

Institut für Geodäsie und Geoinformation der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
Bonn

**Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Bestimmung
gravimetrischer Gezeitenparameter im GeoObservatorium Odendorf**

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

(Dr.-Ing.)

der

Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Bonn

vorgelegt am 18. Januar 2007 von

Dipl.-Ing. Marc Eschmann

aus Siegburg

Referent: Prof. Dr.-Ing. M. Bonatz

1. Korreferent: Prof. Dr.-Ing. B. Witte

2. Korreferent: Prof. Dr.-Ing. H. Kuhlmann

Tag der mündlichen Prüfung: 30. November 2007

Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn
http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online elektronisch publiziert

Erscheinungsjahr: 2007

Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Bestimmung gravimetrischer Gezeitenparameter im GeoObservatorium Odendorf

1 Zusammenfassung

Ziel der Untersuchung ist die Bestimmung der gravimetrischen Gezeitenparameter im GeoObservatorium Odendorf mit einer Maßstabsgenauigkeit von etwa 1‰ und einer Phasensicherheit der Hauptpartialtiden von etwa $0^{\circ},01$. Dies sind Grenzwerte des derzeit metrologisch Erreichbaren. Bei genauer Kenntnis der örtlichen Modellgezeiten können die beobachteten gravimetrischen Zeitreihen durch Subtraktion von dem dominierenden Gezeitensignal befreit werden und es entstehen jene gezeitenreduzierten Zeitreihen, die es ermöglichen, auch in den Daten enthaltene schwächere zeitabhängige Signale unterschiedlicher Ursachen zu erkennen, kausal zu untersuchen und zu quantifizieren.

Im Verlaufe des gesamten Beobachtungszeitraums von November 2000 bis zum Oktober 2006 wurden zwei lineare Gravimeter des Typs Askania GS15 und GS25 sowie vier astasierte Gravimeter des Typs LaCoste-Romberg G mit und ohne Rückkopplungssystem eingesetzt. Der Bestimmung des Registriemaßstabs kommt im Rahmen der Aufgabenstellung eine besondere Bedeutung zu. Diese erfolgt durch die Eingabe definierter und kalibrierter Signalsprünge und deren anschließender Gegenüberstellung mit den zugeordneten Änderungen des Registriersignals. Zur Erreichung der genannten relativen Maßstabsgenauigkeit von 1‰ erfordert die Nutzung des Skalenwertes einer Messspindel gezielte Wiederholungsmessungen in großer Anzahl. Die ausreichende zeitliche Konstanz des Maßstabsfaktors ist nachzuweisen bzw. durch geeignete Maßnahmen herzustellen. Die Güte der Spindelkalibrierung ist zu quantifizieren.

Atmosphärische Effekte, hervorgerufen durch Änderungen des lokalen Luftdrucks, haben einen Einfluss auf die Güte der ermittelten Gezeitenparameter und müssen entsprechend quantifiziert und berücksichtigt werden. Daneben werden die Parameter der instrumentellen Übertragungsfunktion zwischen Ein- und Ausgangssignal determiniert.

Der Nachweis der tatsächlich erreichten Maßstabsgenauigkeit von 1‰ erfolgt durch den Vergleich mit den Parametern zweier Nachbarstationen. Für diesen Vergleich wurden zunächst die Effekte der Meeresgezeiten auf Grundlage unterschiedlicher Modelle eliminiert und die gravimetrischen Gezeiten des festen Erdkörpers berechnet.

Im Rahmen der Untersuchungen zur Bestimmung der Gezeitenparameter für die Station GeoObservatorium Odendorf werden starke Schwankungen des gravimetrischen Rauschpegels in den Aufzeichnungen festgestellt und analysiert. Es zeigt sich ein Zusammenhang mit der Großwetterlage im östlichen Atlantik (Gibraltar bis Nordnorwegen), und der Effekt kann als brandungsinduziertes Phänomen identifiziert werden; es wird so eine Prädiktion des zu erwartenden Rauschpegels auf Grundlage von Wettervorhersagen ermöglicht.

In Zukunft können die mit hoher Genauigkeit ermittelten Gezeitenparameter genutzt werden, um schwächere zeitabhängige Signale in ihrer Deterministik und Kausalität verstehen zu lernen. Im GeoObservatorium Odendorf wurde ein Mess- und Registriersystem errichtet, welches die Aufzeichnung von gravimetrischen Signalen mit einer Auflösung von 10 Nanogal erlaubt. Auf Basis der erreichten metrologischen Signalauflösung kann auch nach lokalen gravimetrischen Effekten gesucht werden, die von Gezeitenbewegungen der lokalen Erdkruste getriggert werden, auch wenn diese bislang noch nicht beobachtet werden konnten.

Experimental and numerical investigations for the determination of gravimetric tidal parameters at the GeoObservatory Odendorf

2 Abstract

The aim of the present investigations is the determination of gravimetric tidal parameters at the GeoObservatory Odendorf with a 1‰ accuracy of scale and a 0°.01 accuracy of phase, representing the limit of the present metrological possibilities. The exact knowledge of the local tidal parameters allows to create tidal reduced time series of the original observations by removing the dominating tidal gravity signals and thereby to identify, analyse and quantify weaker time-dependent signals as these become evident.

During the observation period between November 2000 and October 2006 two linear Askania gravimeters of types GS15 and GS25 and four astatized LaCoste-Romberg G gravimeters with and without feedback system were employed. The determination of the record scale is a matter of special importance and is done by a manual input of selected and calibrated signal steps and their comparison with the corresponding changes of the recorded signal afterwards. To ensure a relative 1‰ accuracy of scale while using the scale value of the spindle, a large number of specific repeated measurements is required. Furthermore, a sufficient time-invariance of the record scale has to be proved or to be established by appropriate means. The quality of the spindle calibration has to be quantified.

Atmospheric effects, caused by changes in local air pressure, have an influence on the precision and accuracy as well of the resulting tidal parameters and have to be quantified and eliminated. Furthermore, the parameters of the instrumental transfer function between input and output signal have to be determined.

The final proof of the achieved accuracy of scale of 1‰ is done by a comparison with the corresponding parameters of two neighbourhood-stations. For this comparison in a first step the effects of the ocean tides have been eliminated on the basis of different models and afterwards the gravimetric tides of the solid earth have been calculated.

During the investigation of the tidal parameters at GeoObservatory Odendorf some major fluctuations of the gravimetric noise level in the data have been detected and analysed. Part of the noise signals could significantly be associated to anthropogenic activities. But it could be shown that there is also an interrelationship between the general weather situation in the east Atlantic area (from Gibraltar to the north of Norway) whereby the effect is identified as a breaker induced phenomenon at the coast lines; this insight allows a prediction of the expected gravimetric noise level based on weather forecasts, with a gravimetric reliability corresponding to the weather forecasts' reliability.

In the future the gravimetric tidal parameters, which are determined with a high level of accuracy, can be used to understand the deterministic and causality of weaker time-dependent signals; parts of such signals could potentially be due to kinematical processes at faults existing in the near vicinity of the observation station.

At GeoObservatory Odendorf a measurement and recording system has been established that allows the observation of gravimetric signals with a resolution of 10 nanogal. On the basis of that achieved resolution future work can also be directed to the search for local gravimetric effects that are triggered by tidal movements of the local earth's crust. Although such effects have not yet been detected one should principally not rule out their existence.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	III
2	Abstract	IV
A	EINLEITUNG	1
1	Gravimetrischer Sachverhalt und Aufgabenstellung.....	1
2	Das GeoObservatorium Odendorf.....	3
B	GRUNDLAGEN.....	9
1	Die Parameter der gravimetrischen Gezeiten als metrologische Zielgrößen.....	9
2	Die derzeitigen Genauigkeitsgrenzen und das Genauigkeitsziel der gravimetrischen Gezeiten- beobachtungen	9
2.1	Der Begriff der Genauigkeit	9
2.2	Das Maßstabsproblem	9
2.3	Die Genauigkeitsgrenzen.....	9
2.4	Das Genauigkeitsziel	10
3	Eingesetzte Gravimeter	10
4	Das Gezeitenpotential als astrophysikalisches Referenzsystem.....	10
5	Das Analyseverfahren [WENZEL 1996b].....	11
6	Das Konzept der Messung und Auswertung gravimetrischer Gezeitensignale	11
7	Das Datenerfassungssystem	12
7.1	Die Entwicklung eines problemorientierten Datenerfassungssystems	12
7.2	Vorbemerkung	12
7.3	Das Konzept der kontinuierlichen digitalen Datenerfassung.....	13
7.4	Der Registrierrechner	13
7.5	Die Steuerung der Systemzeit.....	13
7.6	Die Wandlung des ursprünglichen Analogsignals in ein Digitalsignal	14
7.7	Die DC-Trennverstärker	15
7.8	Das Anforderungsprofil für ein Programm zur Datenerfassung	15
C	DAS PROGRAMMSYSTEM GEODYNA	17
1	Vorbemerkung	17
2	Zielsetzung	17
3	Der Programmteil Messwertregistrierung	18
4	Der Programmteil Daten-Visualisierung.....	19
5	Der Programmteil Tools.....	20
5.1	Die Sprungkorrektur	21
5.2	Das Füllen von Registrierlücken	22
5.3	Die Anfelderung	23
5.4	Die Bildung von Stundenmitteln	23
5.5	Der ETERNA-Export	24
5.6	Die ETERNA-Analyse	25
5.7	Die Regressionsberechnung	25
5.8	Die Gezeitenbereinigung	26

5.9	Der (Teil-)Export.....	26
5.10	Die Korrelationsberechnung.....	26
5.11	Der Import.....	27
5.12	Die Änderung der Stundenmitteltabelle.....	27
5.13	Die mathematischen Berechnungen.....	28
D	VORBEREITENDE UNTERSUCHUNGEN.....	29
1	Vorbemerkung.....	29
2	Das Problem der Maßstabsbestimmung.....	29
3	Die messtechnische Stabilität des Wegaufnehmers bei Gravimeter A206.....	31
4	Die zeitliche Stabilität der A/D-Wandler.....	31
4.1	Die A/D-Wandler der Rechner GeoObs1 und GeoObs3.....	31
4.2	Die parallele Signalregistrierung.....	40
5	Der zeitliche Temperaturverlauf in der Messkammer.....	41
6	Die Bestimmung des Registriermaßstabs.....	43
6.1	Vorbemerkung.....	43
6.2	Gravimeter A206 – gefilterte Daten (Kanal 3).....	44
6.2.1	Kugeleichung.....	44
6.2.2	Die zeitliche Stabilität des Kugeleichwertes.....	45
6.2.2.1	Vergleich des Eichausschlags ΔS_{OD} mit dem Wert des Prüfzeugnisses.....	45
6.2.2.2	Ergebnisse der Kugeleichung in anderen Messstationen.....	46
6.2.3	Der Einfluss der Stellung der Messspindel auf den Eichausschlag ΔS	46
6.2.4	Die Umrechnung des Spindelmaßstabs in den Mikrometermaßstab.....	47
6.2.5	Die Bestimmung des Registriermaßstabs.....	47
6.3	Gravimeter A206 – ungefilterte Daten (Kanal 1).....	49
6.4	Gravimeter LCR-G-xx1F.....	49
7	Gezeitenanalysen der Registrierdaten.....	50
7.1	Gravimeter A206 – gefilterte Daten.....	51
7.2	Gravimeter A206 – ungefilterte Daten.....	52
7.3	Gravimeter LCR-G-xx1F.....	54
8	Maßstabsüberprüfungen durch Gegenüberstellung von Analyseergebnissen.....	56
9	Gravimeter A206 – Vergleich der Ergebnisse der Analysen der gefilterten und der ungefilterten Daten.....	56
10	Ergebnisse einer Kurzzeitregistrierung mit dem Gravimeter LCR-G-xx2F.....	57
11	ANALYZE3.30 und ANALYZE3.40, Ergebnisgegenüberstellung.....	58
E	DIE ERKENNUNG UND BERÜCKSICHTIGUNG VON STÖRSIGNALEN.....	61
1	Die Filterung gravimetrischer Signale.....	61
2	Das Rauschsignal als Informationsträger.....	67
3	Die Residuen als Informationsquelle.....	72
3.1	Allgemeines.....	72
3.2	Die Überprüfung auf Normalverteilung.....	72
3.2.1	Das Gravimeter A206 – gefilterte Daten.....	73
3.2.2	Das Gravimeter A206 – ungefilterte Daten.....	73

3.2.3	Das Gravimeter LCR-G-xx1F.....	74
3.3	Der Effekt fehlerhafter Sprunghöhen	74
3.4	Die Erkennung von Störprozessen.....	75
3.4.1	Vorbemerkung	75
3.4.2	Die Residuenspektren	75
3.4.2.1	Vorbemerkung.....	75
3.4.2.2	Gravimeter A206 – gefilterte Daten	75
3.4.2.3	Gravimeter A206 – ungefilterte Daten	75
3.4.2.4	Gravimeter LCR-G-xx1F	76
3.4.3	Das Spektrum der Luftdruckvariationen	76
3.4.4	Das Spektrum der Temperaturvariationen in der Messkammer	77
3.5	Die Gegenüberstellung von Luftdruckvariationen und Residuenverlauf.....	77
3.6	Die Gegenüberstellung von Variationen der Temperatur in der Messkammer und Residuenverlauf.....	79
4	Untersuchung zur zeitlichen Maßstabsstabilität	80
4.1	Gravimeter A206 – gefilterte Daten	80
4.2	Gravimeter LCR-G-xx1F	87
5	Die Überprüfung und Korrektur der Ergebnisse von Sprunghöhenbestimmungen.....	89
6	Die Gezeitenanalyse synthetischer Zeitreihen.....	92
7	Gravimetrische Wirkungen zeitlicher Änderungen des örtlichen Luftdrucks	95
8	Die Berechnung des Luftdruckregressionskoeffizienten.....	96
8.1	Allgemeine Betrachtungen	96
8.2	Die Regressionsberechnung	97
8.3	Die Signifikanzbewertung von Regressionskoeffizienten	97
8.4	Gravimeter LCR-G-xx1F	97
8.4.1	Bestimmung des Regressionskoeffizienten mit dem Programmsystem Eterna in der Version 3.30.....	97
8.4.2	Regressionsberechnung ohne Driftansatz	99
8.4.3	Regressionsberechnung mit linearem Driftansatz.....	101
8.4.4	Regressionsberechnung mit quadratischem Driftansatz.....	104
8.4.5	Regressionsberechnung mit einem Driftpolynom dritter Ordnung	107
8.4.6	Der wahrscheinlichste mittlere Luftdruck-Regressionskoeffizient	108
8.4.7	Gezeitenanalyse mit a-priori-Berücksichtigung des Luftdruckeffekts	108
8.4.7.1	Analyse der mit Hilfe der minütlichen Luftdruckwerte korrigierten Registrierdaten (verwendeter Luftdruck-Regressionskoeffizient $3,35 \text{ nm/s}^2$, entsprechend $0,335 \mu\text{Gal/mbar}$)	109
8.4.7.2	Analyse der mit Hilfe der stündlichen Luftdruckwerte korrigierten Registrierdaten (verwendeter Luftdruck-Regressionskoeffizient $3,35 \text{ nm/s}^2$, entsprechend $0,335 \mu\text{Gal/mbar}$)	109
8.4.7.3	Gegenüberstellungen	110
8.4.7.4	Die Analyse der luftdruckreduzierten Registrierdaten mit zusätzlichem Luftdruck-Regressionsansatz.....	110
8.4.7.5	Die Analyse der Originaldaten	111
8.4.8	Ergebnisbewertung.....	112

8.5	Gravimeter A206 (gefilterte Daten).....	114
8.5.1	Bestimmung des Regressionskoeffizienten mit dem Programmsystem Eterna in der Version 3.30.....	114
8.5.2	Regressionsberechnung mit linearem Driftansatz.....	115
8.5.3	Regressionsberechnung mit quadratischem Driftansatz.....	117
8.5.4	Regressionsberechnung mit einem Driftpolynom dritter Ordnung.....	118
8.5.5	Regressionsberechnung mit einem Driftpolynom vierter Ordnung.....	119
8.5.6	Regressionsberechnung mit einem Driftpolynom fünfter Ordnung.....	119
8.5.7	Ergebnisbewertung.....	119
8.5.8	Gezeitenanalyse mit a-priori-Berücksichtigung des Luftdruckeffekts.....	120
8.5.8.1	Analyse der mit Hilfe der minütlichen Luftdruckwerte korrigierten Registrierdaten.....	120
8.5.8.2	Analyse der mit Hilfe der stündlichen Luftdruckwerte korrigierten Registrierdaten.....	120
8.5.8.3	Gegenüberstellungen und Interpretationen.....	121
8.5.9	Die Analyse der Originaldaten.....	121
9	Der funktionale Zusammenhang zwischen Kammertemperatur und Gravimeterdrift.....	122
10	Der Einfluss der Temperaturreglung auf das gravimetrische Signal.....	122
11	Die Bestimmung der Übertragungsfunktion.....	125
11.1	Begriffsbestimmung.....	125
11.2	Verfahren der Bestimmung der Übertragungsfunktion.....	125
11.3	Die Eingabe eines Sprungsignals zur Bestimmung der Übertragungsfunktion.....	126
11.4	Voraussetzungen für die Nutzung eines Sprungsignals zur Bestimmung der Übertragungsfunktion.....	126
11.5	Das Signalrauschen.....	126
11.6	Die Leistungsgrenzen des ETSTEP-Verfahrens.....	128
11.6.1	Die Erstellung von Testdatensätzen.....	128
11.6.2	Die Berechnung der Signalverzögerung bei ungestörtem Signalverlauf.....	128
11.6.3	Die Berechnung der Verzögerung des Signals nach Zugabe eines Rauschsignals.....	129
11.6.4	Der Einfluss der Höhe des Rauschpegels.....	130
11.6.5	Die erforderliche Genauigkeit der Berechnung der Signalverzögerung.....	132
11.6.6	Der Einfluss der Sprunghöhe bei unterschiedlichen Rauschpegeln.....	132
11.6.7	Der Einfluss einer Signaldrift auf die berechnete Signalverzögerung.....	134
11.6.8	Die Ergebnisverallgemeinerung.....	136
11.7	Die Erzeugung der Sprungsignale.....	136
11.8	Die Eliminierung des Signalrauschens.....	136
11.8.1	Die partielle polynomiale Signalfilterung.....	136
11.8.2	Die numerische Signalfilterung.....	137
11.9	Der Einfluss eines Zeitfehlers des Sprungeinsatzes.....	141
11.10	Ergebnisse der Untersuchung zur Bestimmung instrumenteller Signalverzögerungen.....	142
F	EXEMPLARISCHE UNTERSUCHUNGEN DER EIGENSCHAFTEN ASTASIIERTER GRAVIMETRISCHER MESSSYSTEME.....	143
1	Das Gravimeter LCR716.....	143
1.1	Allgemeines zu Registrierungen im CPI-Modus.....	143
1.2	Einlaufeffekte nach sprunghaften Änderungen der Position des gravimetrischen Sensors.....	143

1.3	Besondere Eigenschaft des Gravimeters LCR716.....	144
1.4	Die Gravimetereichung.....	146
1.5	Der Einfluss der Thermostatensteuerung auf das Gravimetersignal.....	147
1.6	Technische Maßnahmen zur Gezeitenregistrierung im CPI-Modus.....	148
1.7	Das Konstruktionsprinzip des LaCoste-Romberg-Gravimeters	149
1.8	Die zeitlichen Änderungen der Registrierempfindlichkeit	149
1.9	Analysen der Registrierdaten.....	151
1.9.1	Zielsetzung	151
1.9.2	Der Beobachtungszeitraum	151
1.9.3	Die Analysenergebnisse	151
1.9.3.1	Die Analyse der stündlichen LCR716-Rohdaten (Analyse1).....	151
1.9.3.2	Die Analyse der stündlichen LCR716-Registrierdaten nach Korrektur des instrumentellen Luftdruckeffektes (Analyse 2).....	152
1.9.3.3	Die Analyse der stündlichen LCR716-Registrierdaten nach minütlicher Korrektur des instrumentellen Luftdruckeffektes und linearer Maßstabsinterpolation zwischen den Stützstellen entsprechend Abbildung F.14 (Analyse 3).....	153
1.9.3.4	Die Analyse der korrigierten stündlichen LCR716-Registrierdaten (instrumenteller Luftdruckeffekt $3,0\mu\text{Gal/mbar}$ und lineare Maßstabsinterpolation) mit Berücksichtigung der stündlichen Luftdruckwerte (Analyse 4)	154
1.9.3.5	Die Analyse der korrigierten stündlichen LCR716-Registrierdaten (instrumenteller Luftdruckeffekt $2,3\mu\text{Gal/mbar}$ und lineare Maßstabsinterpolation) mit Berücksichtigung der stündlichen Luftdruckwerte (Analyse 5)	155
1.9.3.6	Die Analyse der stündlichen LCR716-Rohdaten mit linearer Maßstabsinterpolation zwischen den Stützstellen und Berücksichtigung der stündlichen Luftdruckwerte (Analyse 6)	156
1.9.4	Die Bestimmung und Berücksichtigung des zeitvariablen Registriermaßstabs	157
1.9.4.1	Allgemeines.....	157
1.9.4.2	Die Analyse der hinsichtlich des instrumentellen Luftdruckeffektes ($2,3\mu\text{Gal/mbar}$, Abschnitt F1.9.3.5) korrigierten stündlichen LCR716-Registrierdaten mit Berücksichtigung der stündlichen Luftdruckwerte, ausgleichendes Maßstabspolynom 6. Ordnung (Analyse 7)	157
1.9.5	Zusammenstellung der Analysenergebnisse	162
1.9.6	Schlussfolgerungen	162
1.9.7	Der idealtypische Residuenverlauf.....	163
1.10	Die Instabilitäten der Astasierung des Gravimeters und die instrumentelle Drift	165
1.11	Die Instabilitäten der Astasierung des Gravimeters und der Residuenverlauf.....	166
2	Das Gravimeter LCR-G-xx1	169
2.1	Testregistrierungen im Ausschlagmodus.....	169
2.2	Der metrologische Zweck der instrumentellen Untersuchungen des Gravimeters LCR-G-xx1CPI.....	169
2.3	Die Analyse der Rohdaten LCR-G-xx1CPI (Registrierung nach der Ausschlagmethode).....	169
2.4	Vergleich mit Ergebnissen der Registrierung im Rückkopplungsmodus	170
2.5	Die Korrelation zwischen Residuen- und Gezeitenverlauf bei der Registrierung im CPI-Modus	170

2.6	Die Korrelation zwischen Residuen- und Gezeitenverlauf bei der Registrierung im Rückkopplungsmodus-Modus	172
2.7	Die Bestimmung der bei der Registrierung mit dem Gravimeter LCR-G-xx1 im CPI-Modus auftretenden zeitlichen Änderungen des Registriermaßstabs	173
2.7.1	Allgemeines	173
2.7.2	Die Nutzung des Residuensignals für die Bestimmung zeitlicher Maßstabsänderungen.....	174
2.7.3	Das Problem der Residuenstruktur.....	174
2.7.4	Regressionsberechnung mit Hilfe von Zeitfenstern	174
2.7.5	Der zeitliche Verlauf der Regressionskoeffizienten zwischen Residuen und Gezeiten für unterschiedliche Zeitfenster	175
2.7.6	Die Interpolation zwischen den Stützstellen des Registriermaßstabs.....	177
2.8	Die Ergebnisse der Gezeitenanalysen.....	177
2.9	Möglichkeit zur Verbesserung der Maßstabsbestimmung durch Iteration	179
2.10	Gegenüberstellungen	179
2.11	Schlussfolgerungen.....	181
G	DIE GRAVIMETRISCHEN GEZEITENPARAMETER FÜR DIE STATION GEOOBSERVATORIUM ODENDORF	182
1	Zielsetzungen	182
2	Gravimeter A206.....	184
2.1	Vorbemerkung	184
2.2	Gezeitenanalysen der gefilterten Daten des zweiten Untersuchungsabschnitts	184
2.2.1	Die Neubestimmung des Registriermaßstabs.....	184
2.2.2	Analysenergebnisse.....	185
2.2.2.1	Teilanalyse 1	185
2.2.2.2	Teilanalyse 2	186
2.2.2.3	Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 und 2	187
2.2.2.4	Gesamtanalyse der Daten des zweiten Untersuchungsabschnitts	191
2.2.2.5	Ergebniszusammenfassung.....	193
2.2.3	Untersuchung der zeitlichen Stabilität des Registriermaßstabes.....	194
2.3	Gezeitenanalysen der ungefilterten Daten des zweiten Untersuchungsabschnitts.....	195
2.3.1	Vorbemerkung	195
2.3.2	Die Neubestimmung des Registriermaßstabs.....	195
2.3.3	Analysenergebnisse.....	196
2.3.3.1	Teilanalyse 1	196
2.3.3.2	Teilanalyse 2	197
2.3.3.3	Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 und 2	198
2.3.3.4	Gesamtanalyse der Daten des zweiten Untersuchungsabschnitts	202
2.3.3.5	Ergebniszusammenfassung.....	204
2.4	Gesamtanalysen der gefilterten Daten des ersten und zweiten Untersuchungsabschnitts	205
2.4.1	Vorbemerkung	205
2.4.2	Korrektur des Registriermaßstabes der Daten des ersten Untersuchungsabschnitts	205
2.4.3	Ergebnisse der Gesamtanalysen der maßstabskorrigierten Daten des ersten Untersuchungsabschnitts.....	206

2.4.3.1	Gesamtanalyse ohne Luftdruckregression.....	206
2.4.3.2	Gesamtanalyse mit Luftdruckregression	207
2.4.3.3	Gegenüberstellung der Analysenergebnisse ohne und mit Luftdruckregression	208
2.4.3.4	Ergebniszusammenfassung.....	209
2.4.4	Gefilterte Daten – Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen des ersten und zweiten Untersuchungsabschnitts	209
2.4.5	Gefilterte Daten - Analysen der Daten des gesamten Untersuchungszeitraums vom 28.03.2001 bis 10.10.2004	211
2.4.6	Erweiterte Untersuchungen zur zeitlichen Stabilität des Registriermaßstabs	214
2.5	Gesamtanalysen der ungefilterten Daten des ersten und zweiten Untersuchungsabschnitts	214
2.5.1	Vorbemerkung	214
2.5.2	Korrektur des Registriermaßstabs der Daten des ersten Untersuchungsabschnitts	214
2.5.3	Ergebnisse der Gesamtanalysen der maßstabskorrigierten Daten des ersten Untersuchungsabschnitts.....	215
2.5.3.1	Gesamtanalyse ohne Luftdruckregression.....	215
2.5.3.2	Gesamtanalyse mit Luftdruckregression	215
2.5.3.3	Gegenüberstellung der Analysenergebnisse mit und ohne Luftdruckregression.....	216
2.5.3.4	Ergebniszusammenfassung.....	217
2.5.4	Ungefilterte Daten – Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen des ersten und zweiten Untersuchungsabschnitts	217
2.5.5	Ungefilterte Daten - Analysen der Daten des gesamten Untersuchungszeitraums vom 20.07.2001 bis 10.10.2004	219
2.5.6	Erweiterte Untersuchungen zur zeitlichen Stabilität des Registriermaßstabs	222
2.6	Gravimeter A206 - Gegenüberstellungen der Ergebnisse der Gesamtanalysen der gefilterten und ungefilterten Daten	222
2.7	Besonderheiten der Registrierungen mit dem Gravimeter A206.....	226
2.7.1	Sachverhalte	226
2.7.2	Ergebnisse aufeinander folgender Zweimonatsanalysen.....	228
2.7.2.1	Partialtidenband M_2	228
2.7.2.2	Partialtidenband S_2	230
2.7.3	Feststellungen und Schlussfolgerungen	231
3	Gravimeter A233.....	232
3.1	Instrumentelle Angaben.....	232
3.1.1	Das Gravimeter Askania, Typ GS25.....	232
3.1.2	Der Skalenfaktor des Gravimeters	232
3.1.3	Der Einfluss der Intervallschaltung des äußeren Thermostaten	232
3.1.4	Gegenüberstellung des saisonalen Driftverhaltens der Gravimeter A233 und A206.....	233
3.1.5	Vorhergehende Einsätze des Gravimeters A233.....	234
3.2	Gezeitenanalysen der Registrierdaten.....	234
3.2.1	Der Registriermaßstab.....	234
3.2.2	Analysenergebnisse.....	234
3.2.2.1	Teilanalyse 1	235
3.2.2.2	Teilanalyse 2	236

3.2.2.3	Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 und 2	237
3.2.2.4	Gesamtanalyse	241
3.2.2.5	Ergebniszusammenfassung	244
3.3	Untersuchungen der zeitlichen Stabilität des Registriermaßstabs durch sukzessive Teil- analysen	244
3.4	Die elektromagnetische Eichung des Gravimeters A233	245
4	Gravimeter A206 und A233 – Ergebnisvergleiche	247
5	Die Bestimmung und Berücksichtigung der instrumentellen Signalverzögerung	251
5.1	Vorbemerkung	251
5.2	Die Erzeugung gravimetrischer Sprungsignale	251
5.3	Das Gravimeter A233	252
5.3.1	Die instrumentelle Signalverzögerung	252
5.3.2	Gravimeter A233 - korrigierte Phasenverschiebungen der Hauptpartialtiden	252
5.4	Das Gravimeter A206	253
5.4.1	Die instrumentelle Signalverzögerung durch Filterung	253
5.4.2	Gravimeter A206, gefilterte Daten – korrigierte Phasenverschiebungen der Hauptpartial- tiden	253
5.4.3	Gravimeter A206 – Phasenbestimmung aus den ungefilterten Daten	254
5.5	Das Gravimeter LCR-G-xx1F	255
5.5.1	Die instrumentelle Signalverzögerung	255
5.5.2	Gravimeter LCR-G-xx1F – korrigierte Phasenverschiebungen der Hauptpartialtiden	255
5.6	Gegenüberstellung der korrigierten Phasenverschiebungen für die Hauptpartialtiden	256
5.7	Ergebniszusammenfassung und Schlussfolgerungen	256
6	Gezeitenparameter für die Station GeoObservatorium Odendorf	256
6.1	Vorbemerkung	256
6.2	Gravimeter A233	258
6.2.1	Ergebnisse ohne Ansatz einer Luftdruckregression	258
6.2.2	Ergebnisse mit Ansatz einer Luftdruckregression	259
6.2.3	Histogramme der Residuen	260
6.3	Gravimeter A206 – gefilterte Daten	260
6.3.1	Ergebnisse ohne Ansatz einer Luftdruckregression	260
6.3.2	Ergebnisse mit Ansatz einer Luftdruckregression	261
6.3.3	Histogramme der Residuen	262
6.4	Gravimeter A206 – ungefilterte Daten	262
6.4.1	Ergebnisse ohne Ansatz einer Luftdruckregression	262
6.4.2	Ergebnisse mit Ansatz einer Luftdruckregression	263
6.4.3	Histogramme der Residuen	264
6.5	Gravimeter LCR-G-xx1F	264
6.5.1	Ergebnisse ohne Ansatz einer Luftdruckregression	264
6.5.2	Ergebnisse mit Ansatz einer Luftdruckregression	265
6.5.3	Histogramme der Residuen	266
6.6	Gegenüberstellung der berechneten Gezeitenparameter	266
6.7	Der Einfluss der numerischen Filterung auf die Ergebnisse der Gezeitenanalysen	268

6.8	Ergebniszusammenfassung und Schlussfolgerungen	271
6.8.1	Die Modellanpassung.....	271
6.8.2	Die Häufigkeitsverteilung der Residuen	272
6.8.3	Die Gezeitenparameter.....	272
6.8.4	Das Gravimeter A233 als Referenzgravimeter	274
6.8.5	Der Einfluss von Ungenauigkeiten der Gezeitenparameter	274
7	Der gravimetrische Effekt der Meereszeiten	274
8	Die Überprüfung des Erdmodells Dehant-Defraigne-Wahr	278
9	Vergleich der für die Station GeoObservatorium Odendorf ermittelten Gezeitenparameter mit den Beobachtungsergebnissen der benachbarten Observatorien Membach und Walferdange	280
H	STRUKTUREN GRAVIMETRISCHER RAUSCHSIGNALE	286
1	Vorbemerkung	286
2	Zeitliche Variationen des gravimetrischen Rauschpegels	286
3	Strukturen im Verlauf der sekundlichen Signalwerte	287
4	Der Einfluss der Meeresbrandung auf die gravimetrischen Beobachtungen.....	288
5	Die Vorhersage des gravimetrischen Rauschpegels.....	298
6	Detailuntersuchungen des Rauschsignals.....	298
I	TECHNISCHE WEITERENTWICKLUNGEN	299
1	Anlass und Zielsetzungen	299
2	Der A/D-Wandler.....	300
3	Der Registrierrechner	300
4	Das Betriebssystem	300
5	Anpassung und Weiterentwicklung des Programmsystems GeoDyn	300
6	Das Programm Gezeitenbefreiung16K	304
7	Ergebnisse von Testmessungen.....	305
7.1	Zielsetzung	305
7.2	Der Registriermaßstab	305
7.3	Auswertungsergebnisse	306
7.3.1	Numerische Datenfilterung mit dem Algorithmus Pertzev57	306
7.3.2	Numerische Datenfilterung mit dem Algorithmus Pertzev59	307
7.4	Ergebniszusammenfassung	308
J	AKTUALISIERTE GEZEITENPARAMETER FÜR DIE STATION GEOOBSERVATO- RIUM ODENDORF	310
1	Vorbemerkung	310
2	Datensatz A233_8k2	310
2.1	Der Registriermaßstab	310
2.2	Ergebnisse der Gezeitenanalyse (Filter Pertzev59)	311
2.3	Gegenüberstellung mit den vorläufigen Referenzwerten der Tabelle G.61.....	312
3	Datensatz A233_16k1	313
3.1	Der Registriermaßstab	313
3.2	Ergebnisse der Gezeitenanalyse (Filter Pertzev59)	313
3.3	Gegenüberstellung mit den vorläufigen Referenzwerten der Tabelle G.61.....	315

4	Gesamtanalyse der Datensätze A233_8k1, A233_8k2 und A233_16k1 – Referenzparameter 2003/2006	315
5	Das potentielle Problem von Störsignalen mit quasi-täglicher Periode	317
K	ALLGEMEINE ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	319
L	VERZEICHNISSE.....	323
1	Literaturverzeichnis.....	323
2	Abbildungsverzeichnis.....	328
3	Tabellenverzeichnis.....	343
M	DANK.....	351

A Einleitung

1 Gravimetrischer Sachverhalt und Aufgabenstellung

Zeitliche Änderungen der Schwere in einem Beobachtungsort werden durch unterschiedliche physikalische Prozesse hervorgerufen und lassen sich entsprechend ihren Ursachen in solche periodischer und solche nicht-periodischer Natur unterscheiden.

Das dominierende periodische Signal ist im allgemeinen das gravimetrische Gezeitensignal, welches mehrere Anteile enthält [MELCHIOR 1983]:

- Die Gravitationsänderungen von Sonne und Mond, abhängig von der zeitvariablen Lage des Beobachtungsorts relativ zu diesen Himmelskörpern (bei hochaufgelösten Beobachtungen müssen gegebenenfalls auch einige Planeten berücksichtigt werden).
- Die Deformationswirkungen der lunisolaren Gravitationskräfte auf den Erdkörper, die so genannten „Gezeiten der festen Erde“, welche zu entsprechenden Bewegungen der Beobachtungsstation innerhalb der Gravitationsfelder von Sonne und Mond führen.
- Die Wirkungen von Änderungen des örtlichen Schwerepotentials der Erde als Folge der zuvor genannten Formänderungen des Erdkörpers. Die beiden letztgenannten Effekte führen dazu, dass sich die Amplituden der *beobachteten* gravimetrischen Gezeiten gegenüber den *theoretischen* Gezeiten einer starren Erde um etwa 15% vergrößern.
- Die gravimetrischen Wirkungen der Meeresgezeiten. Diese Wirkungen bilden sich aus dem Gravitationseffekt der sich periodisch verlagernden Wassermassen sowie dem Auflasteffekt, welcher sich aus der durch die Auflasten hervorgerufenen Deformation des Untergrunds und den zugeordneten Änderungen des Schwerepotentials zusammensetzt.
- Die gravimetrischen Wirkungen atmosphärischer Gezeiten.

Die gravimetrischen Gezeiten werden außerdem unterschieden nach ihrer Frequenz bzw. Periode. Gezeiten mit Perioden von mehreren Tagen oder größer werden als langperiodisch, Gezeiten mit Bandperioden von einem Tag oder kürzer werden entsprechend als kurzperiodisch bezeichnet. Die vorliegenden Untersuchungen gelten ausschließlich der Bestimmung der Parameter der kurzperiodischen Gezeiten. Entsprechend werden die langperiodischen Gezeiten zunächst als Driftsignale aufgefasst. Zu den langperiodischen Phänomenen zählen auch die so genannten Poltiden, die als Folge der periodischen Anteile in der Polbewegung als zugeordnete langperiodische Änderungen der zentrifugalen Komponente des Schwerefelds der Erde wirken.

Nichtperiodische Schwerevariationen werden hauptsächlich hervorgerufen durch Massenvariationen im Untergrund einer Beobachtungsstation als Folge von Niederschlägen und Grundwasservariationen [BONATZ 1967], gleichermaßen durch Veränderungen der lokalen und regionalen Verteilung atmosphärischer Massen sowie durch Höhenänderungen der Beobachtungsstation als Folge tektonischer Prozesse oder auch als Folge anthropogener Tätigkeiten (z.B. Bergbau). Hydrologisch induzierte Schwerevariationen können neben dem überwiegend aperiodischen Verlauf gelegentlich auch periodische Strukturen aufweisen, zum Beispiel dann, wenn Wasser des lokalen Untergrunds mit einer täglichen Mengenperiode entnommen wird.

Diskrete gravimetrische Feldbeobachtungen hoher Signalauflösung in einem System von Messstationen ermöglichen die Erkennung und Erfassung momentaner örtlicher *Zustände* des lokalen Schwerefelds der Erde, aus denen sich bestimmte Informationen ableiten lassen, so zum Beispiel über räumliche Dichtestrukturen in der Umgebung eines Beobachtungspunkts. Stationäre Beobachtungen hingegen dienen der Erkennung und kontinuierlichen Erfassung lokaler *zeitlicher Abläufe* im Schwerefeld der Erde; im Falle „langsamer“ Vorgänge besteht hinsichtlich der Zuordnung der beobachteten gravimetrischen Signale zu den Ursachen das Problem der Unterscheidung zwischen der instrumentellen Drift und der realen zeitlichen Variation der physikalischen Einflussgröße.

Bei stationären, mikrogravimetrischen Beobachtungen bilden die gravimetrischen Gezeiten das dominierende zeitabhängige Messsignal. Für die Modellierung wird dieses Gezeitensignal in eine Summe von Einzelschwingungen (Partialtiden) zerlegt. Auf der Grundlage hinreichend langer beobachteter Zeitreihen lassen sich die jeweiligen Parameter der einzelnen Partialtiden durch Gezeitenanalyse ermitteln. Die berechneten *Amplitudenquotienten* geben das Verhältnis zwischen der beobachteten Amplitude einer Partialtide und einer zugeordneten theoretischen Amplitude an, die man durch Ableitung des Gezeitenpotentials erhält, und welche man als jene Amplitude verstehen kann, die im Falle einer starren Erde beobachtet würde. Die *Phasenverschiebung* einer

Partialtide beschreibt den lokalen zeitlichen Vorlauf oder Nachlauf der beobachteten gravimetrischen Schwingung gegenüber dem genannten theoretischen Signal.

Bestimmt man die örtlichen Gezeitenparameter mit hinreichender Genauigkeit, so lässt sich das – nunmehr als bekannt anzusetzende – gravimetrische Gezeitensignal als ein metrologisches Referenzsignal nutzen, welches detaillierte Untersuchungen instrumenteller Effekte ebenso ermöglicht, wie die Untersuchung zeitabhängiger, gravitativ oder kinetisch wirksamer Prozesse in der gravimetrisch relevanten Umgebung einer Beobachtungsstation innerhalb oder außerhalb der Gezeitenbänder.

Vor dem Hintergrund dieses Anwendungsspektrums wird als metrologisches Ziel definiert, die für das Geo-Observatorium Odendorf gültigen gravimetrischen Gezeiten hinsichtlich des Schwere-*Maßstabs* mit einer Genauigkeit von relativ etwa 1‰ zu ermitteln, entsprechend einer Signalauflösung von einigen Zehntel Mikrogal (bei einer maximalen Signalvariation von etwa 300µGal). Die *zeitliche* Maßstabssicherheit diskreter Modellwerte sollte im Bereich von 1 bis 2 Zeitsekunden liegen, entsprechend einer Phasensicherheit der Hauptpartialtiden von etwa 0,01°.

Um die genannten metrologischen Ziele *signifikant* zu erreichen, bedarf es nicht nur des Einsatzes geeigneter gravimetrischer Instrumente (Sensoren), sondern auch der Entwicklung eines problembezogen hinreichend leistungsfähigen Registriersystems sowie eines gleichermaßen leistungsfähigen und flexiblen Auswerteprogramms, das insbesondere eingehende instrumentelle und auswertetechnische Untersuchungen ermöglicht.

Während sich die numerische (statistische) Auflösung der zu berechnenden Gezeitenparameter durch entsprechende Ausdehnung des Beobachtungszeitraums relativ leicht verbessern lässt, gilt dies nicht für systematische Fehlereinflüsse. Aus diesem Grunde sollen eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt werden, die nicht nur Hinweise auf kausale Zusammenhänge zwischen dem Beobachtungssignal und verschiedenen systematischen Fehlereinflüssen instrumenteller Natur geben können, sondern auch auf Auswirkungen von realen Variationen der Zielgröße (der Schwere), die im Analysenalgorithmus nicht berücksichtigt sind und daher potentiell systematische Fehler in den Ergebnissen der Gezeitenanalysen hervorrufen. Nach der Gezeitenanalyse verbleibende Anpassungsfehler der gravimetrischen Signale gegenüber den durch Ausgleichung ermittelten Modellfunktionen können mit Hilfe des zeitlichen Verlaufs der Residuen sowie deren Spektren identifiziert werden. Darüber hinaus führen nicht berücksichtigte systematische Fehleranteile zu Unsicherheiten der Ergebnisse der statistischen Fehlerrechnung, da die in den jeweiligen Algorithmus der Gezeitenanalyse eingeführten Bedingungen hinsichtlich der stochastischen Eigenschaften des Beobachtungssignals im allgemeinen nicht oder nur bedingt erfüllt sind, erkennbar durch Abweichungen der Häufigkeitsverteilung der Residuen von einer Normalverteilung.

In diesem Zusammenhang spielt die Struktur des gravimetrischen Rauschsignals, welches das jeweilige Nutzsinal überlagert, eine Rolle. Es ist zu unterscheiden zwischen den Wirkungen von Zufallsstreuungen und den Wirkungen solcher Signale, welche zwar ebenfalls als Rauschsignale bezeichnet werden, die jedoch auf einer Deterministik beruhen. Ist diese Deterministik unbekannt, so werden solche Signale, obwohl sie metrologische oder geophysikalische Informationen enthalten, im allgemeinen nicht berücksichtigt und daher auch nicht physikalisch interpretiert; häufig werden sie einfach mit dem „weißen“ Rauschen zu einem Gesamtrauschsignal zusammengefasst. Insbesondere im Hinblick auf die Lage des GeoObservatoriums Odendorf in einem tektonisch rezent aktiven Gebiet (siehe Abschnitt A2), muss daher den aufgezeichneten gravimetrischen Rauschsignalen eine besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden, da zum Beispiel nicht a-priori ausgeschlossen werden kann, dass zeitliche Veränderungen des Rauschpegels und der Rauschstruktur mit Besonderheiten des lokalen Untergrunds korreliert sind und als Folge zeitabhängiger kinematischer und physikalischer Prozesse auftreten.

Insbesondere Detailuntersuchungen über gravimetrische Rauschstrukturen im Zusammenhang mit der Suche nach möglichen Effekten, die durch die Gezeitendeformationen der lokalen Erdkruste getriggert sein könnten, werden erschwert durch das Vorhandensein eines dominierenden Hauptsignals, den gravimetrischen Gezeiten. Es soll daher ein geeignetes Programmsystem entwickelt werden, das die Untersuchung der *gezeitenbefreiten* gravimetrischen Messdaten mit hoher Auflösung ermöglicht. Sofern es sich als messtechnisch sinnvoll und problembezogen notwendig erweist, wäre die messtechnische Leistungsfähigkeit des zunächst eingesetzten Registriersystems durch Verwendung leistungsfähigerer Einzelkomponenten entsprechend zu steigern; dies würde eine entsprechende Erweiterung und Anpassung der bisherigen Auswerteprogramme erfordern.

Im Hinblick auf Wahrung der Möglichkeiten einer späteren Neuauswertung der gewonnenen gravimetrischen Messdaten unter anderen als den bisherigen Gesichtspunkten, ist eine sorgfältige und detaillierte Dokumentation der durchgeführten Untersuchungen und Auswertergebnisse erforderlich. Dies führt zwangsläufig zu einer Häufung von Einzelnachweisen in Form von Tabellen und graphischen Darstellungen sowie entsprechend zu Schwierigkeiten in der Ergebnisdarstellung. Es wird daher versucht, durch eine detaillierte Gliederung den Überblick zu gewähren.

Anmerkung:

Auf ein spezifisches „Problem“ in der Gravimetrie muss noch hingewiesen werden, nämlich das der parallel

verwendeten Maßeinheiten [m/s^2] und [Gal], welche auf dem aktuellen SI-System bzw. dem ehemaligen cgs-System der Maßeinheiten beruhen. In der gravimetrischen Metrologie und in den meisten Ländern (und entsprechend auch in der Literatur) wird aus praktischen Gründen überwiegend weiterhin die Maßeinheit [Gal] benutzt, da gilt $|g| \approx 1000 \text{ Gal} = 1000 \text{ cm/s}^2$, und sich analog zu anderen Maßeinheiten und einprägsam in Dreierpotenzschritten die Untereinheiten mGal, μGal und nGal bilden lassen ($|g| \approx 10^3 \text{ Gal}$). Die Ergebnisse des verwendeten Programmsystem ETERNA werden jedoch in der Maßeinheit m/s^2 angegeben ($|g| \approx 10 \text{ m/s}^2$); aus gleichermaßen praktischen Gründen werden diese Ergebnisse im einzelnen NICHT in μGal umgerechnet, da die einfache Beziehung gilt:

$$1 \mu\text{Gal} = 10 \text{ Nanometer/s}^2 = 10 \text{ nm/s}^2, \text{ bzw.}$$

$$1 \text{ nm/s}^2 = 0,1 \mu\text{Gal}.$$

2 Das GeoObservatorium Odendorf

Das GeoObservatorium Odendorf wurde als experimentelle Außenstelle des Instituts für Theoretische Geodäsie der Universität Bonn von M. Bonatz im Keller eines Wohnhauses errichtet und am 1. März 1997 in Betrieb genommen. Es befindet sich in einem reinen Wohngebiet am westlichen Rand des Ortes Odendorf zwischen Rheinbach und Euskirchen, gelegen am Rande der Eifel in der Erft-Swist-Bucht als südöstlichem Teil der Niederrheinischen Bucht.

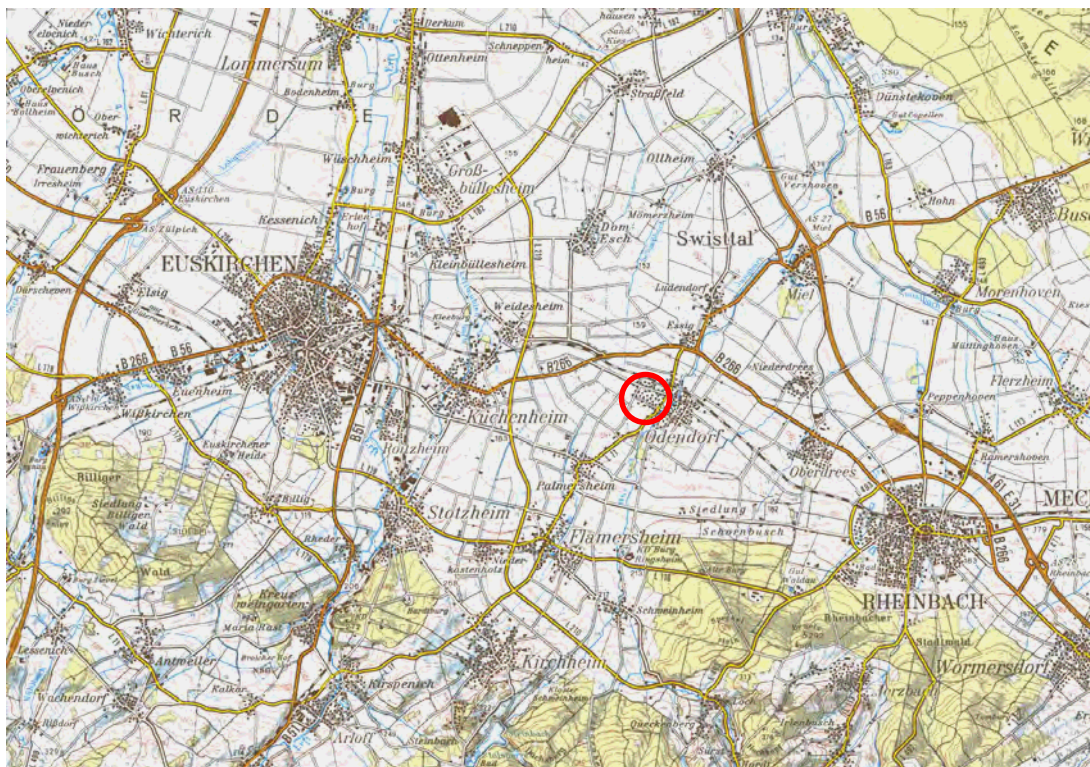


Abbildung A.1: Odendorf und Umgebung, Ausschnitt aus der Topographischen Karte C5506 (Bonn) 1:100000, Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen

Die Region ist Teil des *Rheinischen Schiefergebirges*, das überwiegend aus variszisch gefalteten, von SW nach NO streichenden Schiefen und Grauwacken des Devons und Karbons aufgebaut ist, welche in der Eifel jungvulkanisch durchsetzt sind. Jungtektonische Prozesse führten zu den Einbrüchen der Kölner Bucht und des Neuwieder Beckens.

Die Oberfläche des Grundgesteins des Rheinischen Schiefergebirges taucht nach Norden wenige Kilometer südlich von Odendorf mit etwa gleichmäßiger Neigung unter das weitgehend ebene, lokale Terrain ab (siehe Abbildung A.3), mit danach aufgelagerte tertiären und quartären Schichten, deren Mächtigkeit in nördlicher Richtung zunimmt. Die Grenzfläche zwischen Tertiär und Paläozoikum liegt im Bereich des GeoObservatoriums Odendorf etwa bei 150 m unter der örtlichen Geländehöhe.

Der oberste Grundwasserhorizont befindet sich etwa 10m unter der örtlichen Geländeoberfläche. Ein reichhaltiges Aquifer liegt in einer Tiefe von etwa 50m und steht unter einem Druck von etwa 45m Wassersäule. Grundlage: zwei verrohrte Bohrungen in einer Entfernung von ca. 350m vom GeoObservatorium.

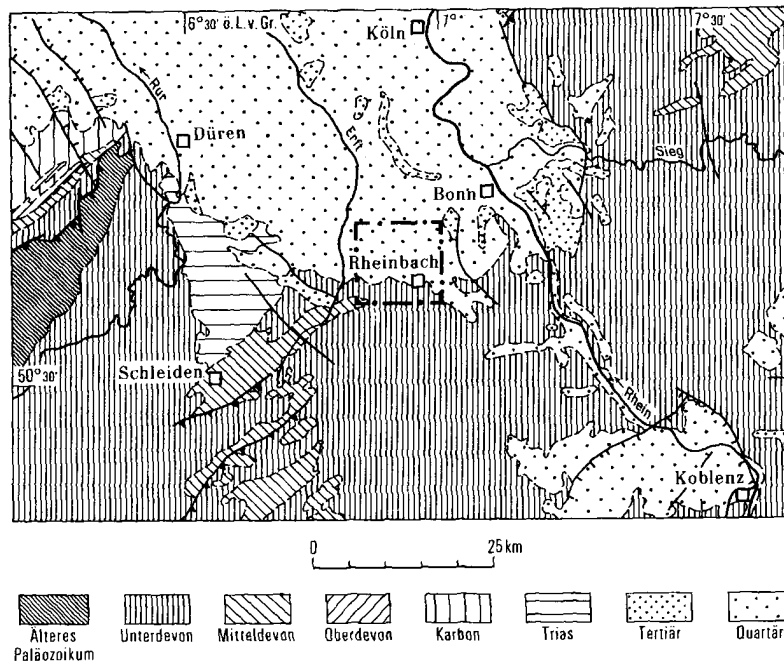


Abbildung A.2: Regionale geologische Übersicht

Quelle: Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:25000, Erläuterungen zu Blatt 5307 Rheinbach. Das Geo-Observatorium liegt etwa 3km westlich der Mitte des eingezeichneten Kartenblattausschnitts



Abbildung A.3: Odendorf und Umgebung, Ausschnitt aus der Geologischen Karte 1:25000, Blatt 5307 Rheinbach, Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen

In der näheren Umgebung des GeoObservatoriums sind eine Vielzahl größerer und kleinerer Verwerfungen vorhanden. Die Abbildung A.4 und Abbildung A.5 zeigen einige Beispiele.

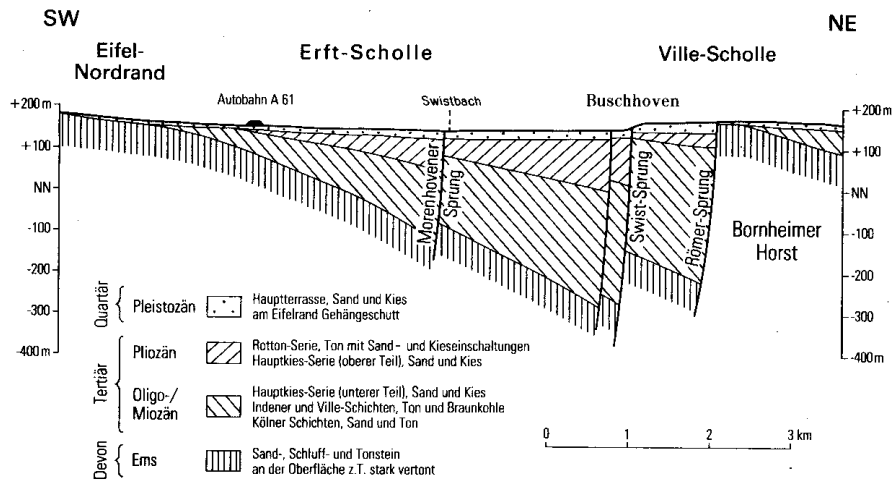


Abbildung A.4: Geologisches Profil Oberdrees-Peppenhoven-Morenhoven-Buschhoven östlich von Odendorf (siehe Topographische Karte Abbildung A.1)
 Quelle: Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:25000, Erläuterungen zu Blatt 5307 Rheinbach.

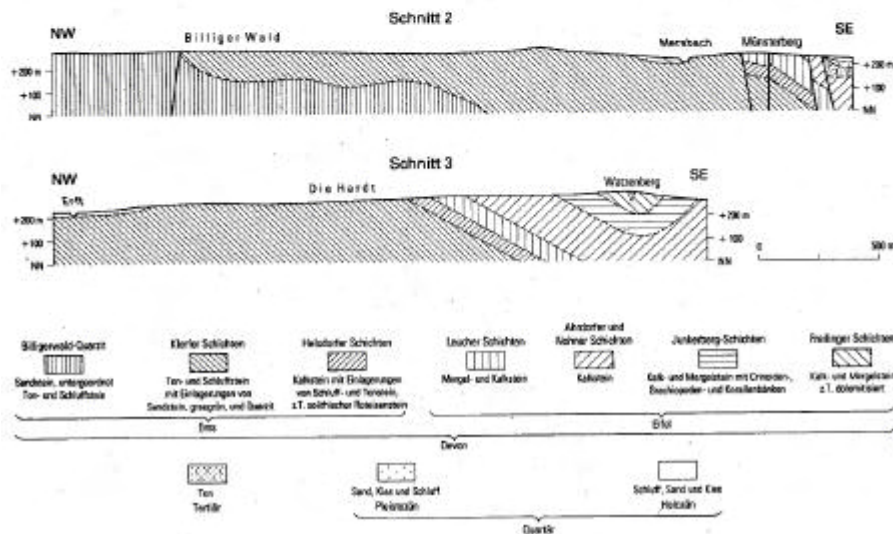
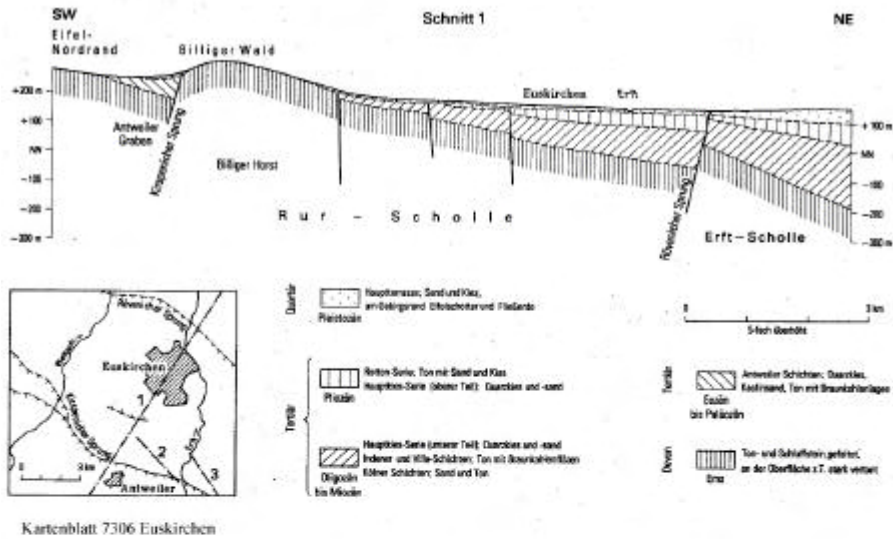


Abbildung A.5: Geologische Profile im Bereich des Kartenblatts 5306 Euskirchen, westlicher Anschluss an das Kartenblatt 5307 Rheinbach
 Quelle: Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:25000, Erläuterungen zu Blatt 5306 Euskirchen

Die nächstgelegenen größeren Verwerfungen sind der nördlich des GeoObservatoriums in einer Entfernung von 2-3km verlaufende und NW-SO-streichende *Ludendorfer Sprung* mit einer Verwurfshöhe von etwa 40 bis 50m, die etwa 1,5km südlich gelegene, WNW-OSO-streichende *Nordrandverwerfung der Eifel* sowie etwa 700m südwestlich der *Rövenicher Sprung*. Odendorf liegt auf dem (devonischen) Lammersumer Horst. Im Bedarfsfalle lässt sich die Lage von oberflächennahen Verwerfungen mit Hilfe mikrogravimetrische Profile recht genau bestimmen [BONATZ 2003].

Hinweise auf die rezente lokale Tektonik liefern unter anderem die beiden Erdbeben von Euskirchen [SCHNEIDER 1975], [MEIDOW 1995]:

Datum Herzzeit	Epizentrum	Herdtiefe	Nahbeben- Magnitude	Epizentral-Intensität
08.03.1950 04:27:06 UT	50° 38' N 06° 43' E	7 km	5,0	VII
14.03.1951 09:46:59 UT	50° 38' N 06°43' E	8-9 km	5,7	VII-VIII

Tabelle A.1: Erdbeben von Euskirchen 1950/1951

Die Epizentren dieser Erdbeben liegen im Bereich des „Billiger Waldes“ (siehe Schnitte 1 und 2 in Abbildung A.5), etwa 5km WSW des Stadtzentrums von Euskirchen und etwa 10km westlich des GeoObservatoriums Odendorf, siehe Abbildung A.1 „Topographische Karte“ und nachfolgende Abbildung A.6 „Geologische Karte“.

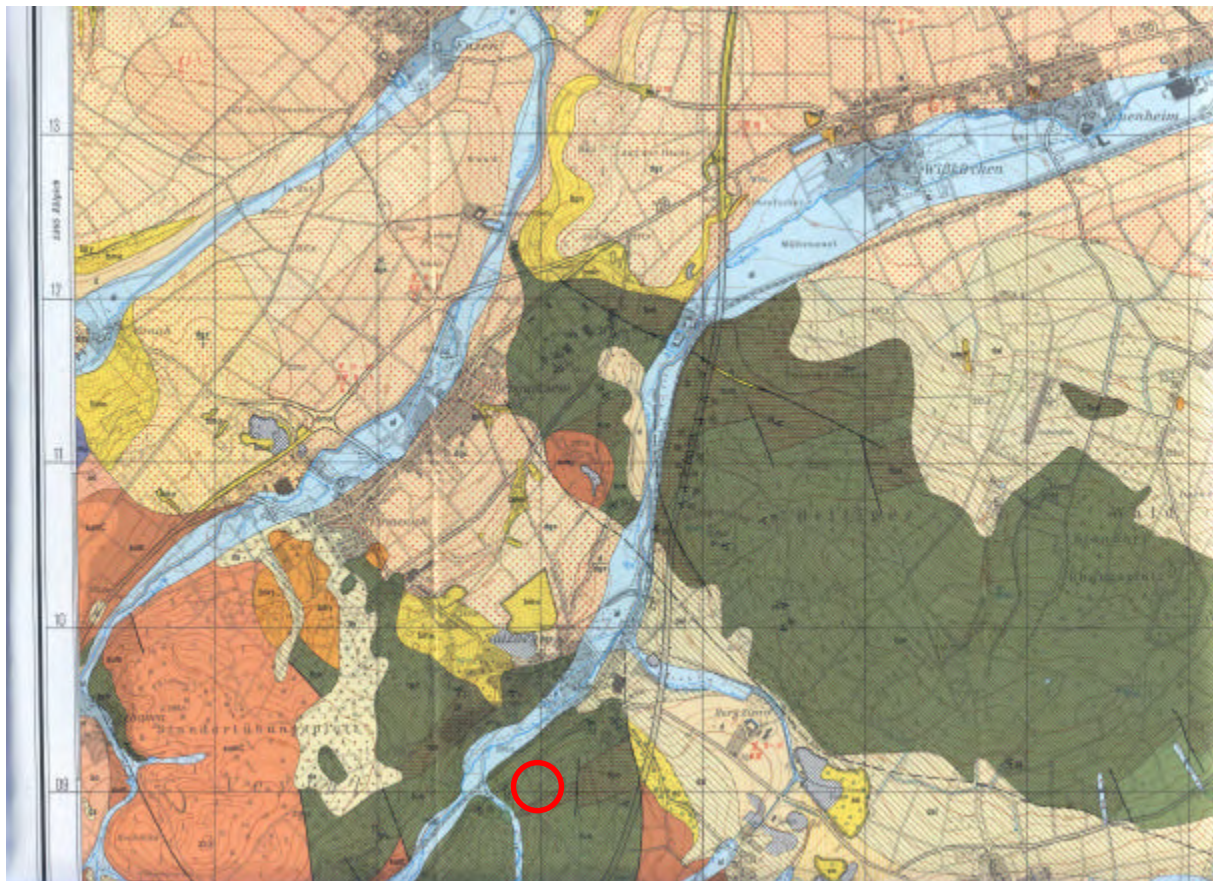


Abbildung A.6: „Billiger Wald“ und Umgebung mit Markierung des Epizentrum, Ausschnitt der Geologischen Karte 1:25000, Blatt 5306 Euskirchen, Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen

Von Interesse ist, ob die kinematischen Prozesse, die zu dem vorgenannten Einbruch der Kölner Bucht führten, weiterhin fortbestehen und gegebenenfalls mit welchen momentanen Bewegungsraten. Mit modernen, hochauflösenden geodätischen Messmethoden lassen sich im Prinzip solche Bewegungen feststellen. Im Bereich des

Donatussprungs, etwa 20km nördlich des GeoObservatoriums Odendorf gelegen, wurden in jüngster Zeit derartige Messungen ausgeführt [GÖRRES, SAGER UND CAMPBELL 2006]. Innerhalb des Messungsgebiets konnten in einer Reihe von Beobachtungspunkten signifikante Bodenbewegungen nach Lage und Höhe festgestellt werden. Das Testgebiet liegt jedoch im Bereich der Grundwasserabsenkungen des Braunkohletagebaus zwischen Köln und Aachen. Dies bedeutet, dass sich zur Zeit leider nicht feststellen lässt, ob die festgestellten Punktbewegungen auch Anteile rein tektonischen Ursprungs enthalten.

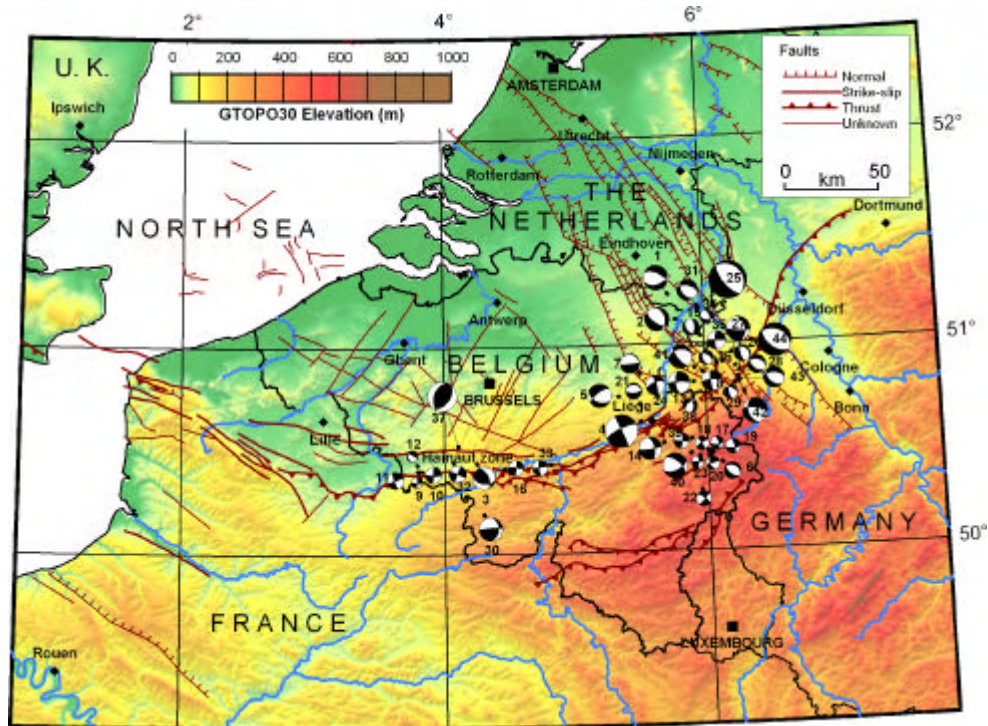


Abbildung A.7: Übersicht über die rezente Seismizität in der Niederrheinischen Bucht und den angrenzenden Gebieten

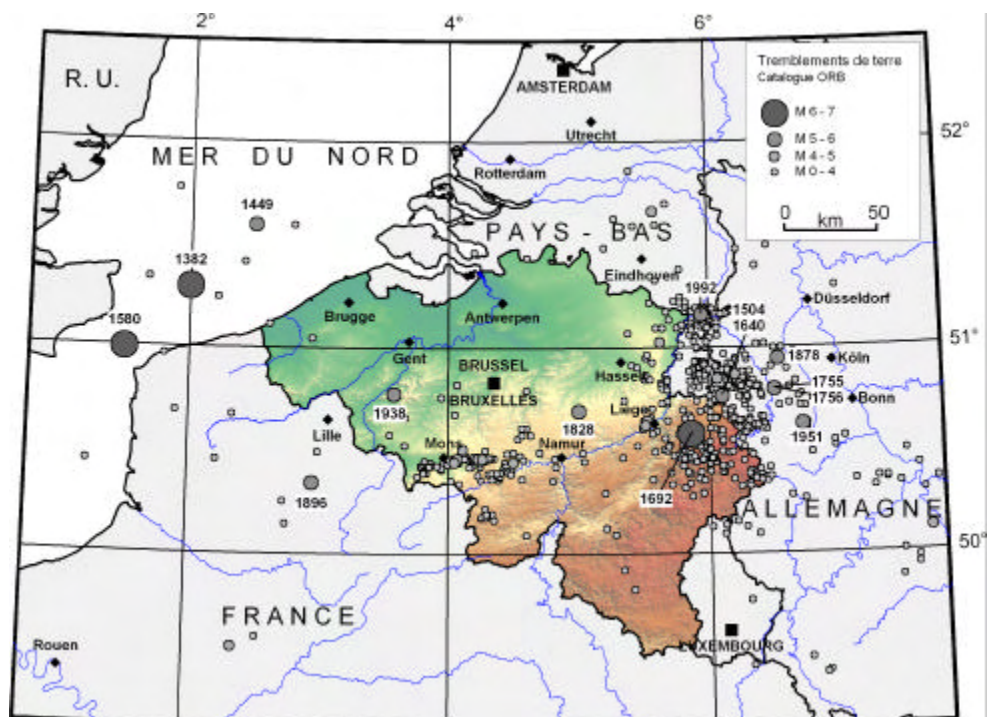


Abbildung A.8: Rezente und Historische Erdbeben in der Niederrheinischen Bucht und den angrenzenden Gebieten

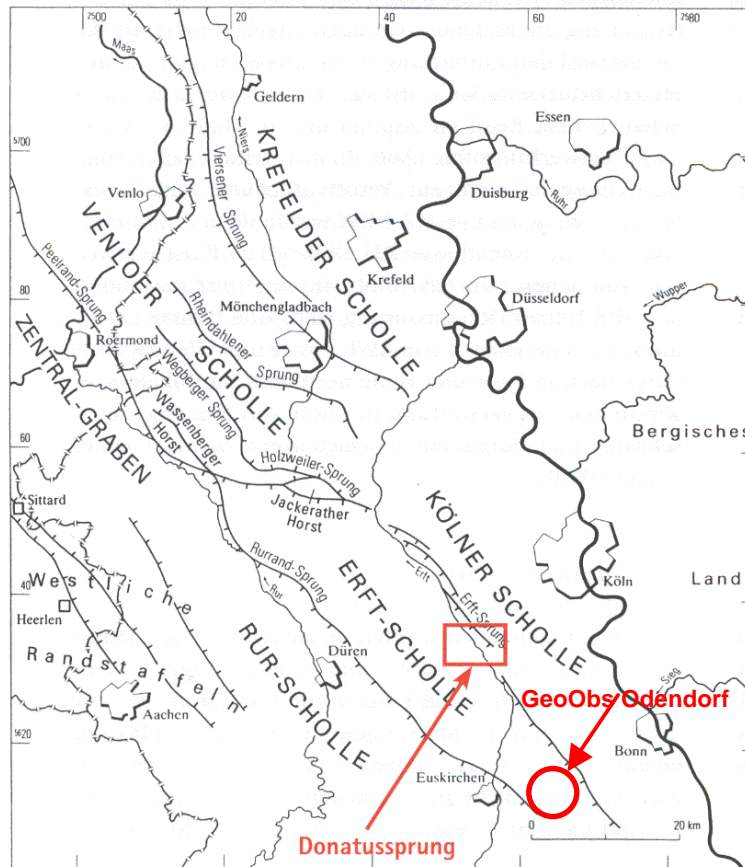


Abbildung A.9: Übersicht über die Hauptverwerfungen in der Niederrheinischen Bucht
Quelle: [Deutscher Planungsatlas, 1976]

Abbildung A.7 und Abbildung A.8 vermitteln einen Überblick über die rezente Seismizität [CAMELBEECK 2006], Abbildung A.9 gibt eine Übersicht über die tektonische Gliederung in der Niederrheinischen Bucht.

Das Observatorium besteht aus drei getrennten Räumen: der Messkammer, in welcher die geodynamischen Sensoren eingerichtet sind, einem Registrierraum und einem Werkraum. Die Messkammer hat eine Grundfläche von etwa 14m² und eine Höhe von etwa 2m; sie wird mit Hilfe eines regelbaren Absaugventilators schwach belüftet. Die natürlichen jährlichen Temperaturschwankungen liegen im Bereich einiger Grad Celsius; es besteht die Möglichkeit einer Temperaturstabilisierung auf einige Zehntelgrad mit Hilfe eines geeigneten Regelsystems.

Ein Beobachtungspfeiler dient der Aufstellung von Gravimetern und anderer Sensoren, ein zwei Meter tiefes verrohrtes Bohrloch der Aufnahme eines hochauflösenden Neigungsmessers. Der Fußboden besteht aus einer freien Lößoberfläche mit lediglich aufgelegten Steinplatten; dies ermöglicht eine einfache Installation weiterer Sensoren in zusätzlichen Bohrlöchern.

Die Koordinaten des GeoObservatoriums lauten

$$j = 50^{\circ} 38' 53'' \text{ N} \quad l = 06^{\circ} 52' 22'' \text{ E} \quad (\text{im System WGS84})$$

Die Höhe des Fußbodenniveaus beträgt

$$H = 172\text{m ü.NN}$$

Schwere im Fußbodenniveau

$$g = 981\,084\,380\mu\text{Gal}$$

Die genannten Daten wurden ermittelt durch GPS-Beobachtungen, durch Anschlussnivellement (LVA Nordrhein-Westfalen) und durch Schwere-Absolutmessungen (Bundesanstalt für Kartographie und Geodäsie 1997, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2002).

B Grundlagen

1 Die Parameter der gravimetrischen Gezeiten als metrologische Zielgrößen

Die kinematischen Abläufe innerhalb des Systems Erde-Sonne-Mond (gegebenenfalls unter Hinzunahme der Planetenbewegungen) sowie deren Gravitationswirkungen auf den Erdkörper erzeugen wie bereits in Abschnitt A1 beschrieben in einem Beobachtungsort zeitliche Schwerevariationen, die als gravimetrische Gezeiten bezeichnet werden. Die Zeitreihe dieser Schwerevariationen lässt sich in himmelsmechanisch determinierte Partialtiden zerlegen. Als Gezeitenparameter werden die Verhältniszahlen der (unter der Annahme einer starren Erde) zu berechnenden Amplituden der *theoretischen* Partialtiden und der für eine reale (visko-elastische) Erde *beobachteten* Partialtidenamplituden bezeichnet; letztere werden durch spektrale Zerlegung der beobachteten Zeitreihe ermittelt. Zudem werden für die einzelnen Partialtiden die Phasendifferenzen zwischen den theoretischen und den beobachteten Schwerevariationen gebildet.

Aus den ermittelten Gezeitenparametern lassen sich Informationen über die physikalischen Eigenschaften des Erdkörpers und seines Aufbaus ableiten sowie über gravimetrisch wirksame Prozesse, die in und auf der Erde ablaufen (z.B. Gezeiten der festen Erde, Resonanzeffekte des flüssigen Erdkerns, Meeresgezeiten, atmosphärische Vorgänge).

Darüber hinaus stellen die gravimetrischen Gezeiten auch ein metrologisches Nutzsignal dar. Denn sind die Gezeitenparameter der relevanten Partialtiden für eine Beobachtungsstation mit der jeweils erforderlichen Genauigkeit bekannt, so können die aus diesen Partialtiden zu berechnenden Zeitreihen der gravimetrischen Gezeiten als bekanntes Referenzsignal für metrologische Untersuchungen unterschiedlichster Art verwendet werden. Immerhin betragen die Schwerevariationen in mittleren Geographischen Breiten und innerhalb von Tageszeiträumen bis zu $300\mu\text{Gal}$. So lassen sich beispielsweise durch Verwendung der gravimetrischen Gezeiten als Referenzsignal detaillierte Untersuchungen der messtechnischen Eigenschaften von Rückkopplungssystemen durchführen, wie z.B. Linearitätsuntersuchungen. Die Verfügbarkeit eines Referenzsignals hinreichender Genauigkeit ermöglicht außerdem die Bestimmung oder Überprüfung des Maßstabs gravimetrischer Signale und die Erkennung möglicher zeitlicher Maßstabsänderungen. Besonders hervorzuheben ist auch die Möglichkeit einer weitgehend hypothesenfreien Bestimmung der instrumentellen Drift und einer sich anschließenden Untersuchung ihrer Ursachen.

In Kenntnis des geodätisch-geophysikalischen Anwendungsbereichs gravimetrischer Gezeiten werden die nachfolgend beschriebenen Messungen und nachfolgenden Untersuchungen schwerpunktmäßig unter metrologischen Gesichtspunkten durchgeführt und begründet.

2 Die derzeitigen Genauigkeitsgrenzen und das Genauigkeitsziel der gravimetrischen Gezeitenbeobachtungen

2.1 Der Begriff der Genauigkeit

Im messtechnischen Sinne bedeutet die Angabe der Genauigkeit einer gemessenen oder berechneten Größe die Information über ihre Abweichung vom *wahren* Wert. In der Praxis kann (problemorientiert) vom „wahren“ Wert einer Größe dann gesprochen werden, wenn ihre metrologischen und statistischen Unsicherheiten in ausreichendem Maße geringer sind, als ein festgelegter zulässiger Grenzwert.

2.2 Das Maßstabsproblem

Bei der Messung der gravimetrischen Gezeiten stellt die Bestimmung des Maßstabs (bzw. der Dimension) der registrierten Signale eine grundlegende Aufgabe dar, sofern nicht lediglich Verhältniszahlen für die Amplituden unterschiedlicher Partialtiden als (dimensionslose) Zielgrößen definiert werden. Während sich die innere Genauigkeit der auf dem Wege der Gezeitenanalyse berechneten Partialtidenamplituden durch entsprechende Ausdehnung der beobachteten Zeitreihen steuern lässt, gilt dieses nicht für den Signalmaßstab, denn ein Maßstabsfehler bleibt unabhängig von der Datenlänge als systematischer Fehler bestehen.

2.3 Die Genauigkeitsgrenzen

Je mehr man sich in der Messtechnik den jeweils aktuellen technologischen Grenzwerten annähert, um so schwieriger - oder auch nur aufwendiger - wird die Bestimmung des „genauen“ Maßstabs einer beobachteten

Messgröße. Die anzustrebende Genauigkeit der Maßstabsbestimmung muss daher sinnvollerweise an die zu lösende wissenschaftliche und metrologische Aufgabe sowie insbesondere an die jeweils messtechnisch erreichbare Signalauflösung angepasst werden.

Bei leistungsfähigen Federgravimetern liegt die *Signalauflösung* im stationären Betrieb und bei hinreichend geringem mikroseismischen Rauschpegel in der Größenordnung von umgerechnet einigen Zehntelmikrogal, entsprechend einigen $10^{-10}|g|$ [WENZEL ET AL. 1995].

2.4 Das Genauigkeitsziel

In mittleren Geographischen Breiten betragen die gezeiteninduzierten gravimetrischen Signalvariationen etwa $300\mu\text{Gal}$. Setzt man diesen Wert in Beziehung zur derzeit mit Federgravimetern erreichbaren Signalauflösung, so ergibt sich als realistische Anforderung an die zu erreichende Maßstabsgenauigkeit ein Wert von relativ 10^{-3} . Dieser Wert wird nun als die relative *Genauigkeit* definiert, mit der die Zeitreihe der gravimetrischen Gezeiten für das GeoObservatorium Odendorf bestimmt werden soll.

Zum Problem der metrologischen Übertragungsfunktion siehe Abschnitt E11.

3 Eingesetzte Gravimeter

Metrologische Zielgrößen gravimetrischer Gezeitenbeobachtungen sind die Parameter der Partialtiden. Wie zuvor dargelegt, hängen aber die Amplituden der *beobachteten* Partialtiden ganz wesentlich vom Registriermaßstab ab. Um den „wahren“ Amplitudenwerten möglichst nahe zu kommen und um Möglichkeiten einer Abschätzung der erreichten Genauigkeit zu erhalten, werden bei hohen Genauigkeitsanforderungen im allgemeinen mehrere Gravimetersysteme eingesetzt. Handelt es sich jedoch um Gravimeter gleichen Typs, so können auf diese Weise potentielle systemtypische (identische) Maßstabsfehler nicht festgestellt werden, d.h. ermittelte übereinstimmende Partialtidenamplituden könnten theoretisch den gleichen Maßstabsfehler aufweisen. Eine effiziente Möglichkeit, die Auswirkungen solcher potentieller systematischer Fehler auf die metrologischen Zielgrößen zu verringern (bzw. die Existenz signifikanter systematischer Fehler überhaupt erst einmal zu erkennen), besteht darin, Messsysteme möglichst unterschiedlicher Konstruktion zu verwenden. Im GeoObservatorium wurden daher die folgenden Gravimeter eingesetzt:

- für permanente Beobachtungen das nichtastasierte Askania-Gravimeter GS15 A206 mit Registrierung der ungefilterten und der schwach gefilterten Ausgangssignale (RC-Filter mit einer Zeitkonstanten von 14sec);
- für temporäre Beobachtungen das LaCoste-Romberg-Gravimeter LCR-G-xx1F mit LaCoste-Rückkopplungssystem (Analog Force Feedback System AFB049), Registrierung der ungefilterten Ausgangssignale;
- für temporäre Beobachtungen das LaCoste-Romberg-Gravimeter LCR-G-xx2F mit SRW-Rückkopplungssystem [SCHNÜLL ET AL. 1984] [RÖDER ET AL. 1988], Registrierung der gefilterten Ausgangssignale;
- für permanente Beobachtungen ab März 2003 das nichtastasierte Askania-Gravimeter GS25 A233 mit elektromagnetischer Eicheinrichtung, Registrierung der gefilterten Ausgangssignale (Bessel-Tiefpassfilter 2.Ordnung, Eckfrequenz 0,015Hz);
- für permanente Beobachtungen das LaCoste-Romberg-Gravimeter LCR716, Registrierung der ungefilterten CPI-Ausgangssignale im wesentlichen zur Erfassung der gravimetrischen Mikroseismik. Das Gravimeter dient außerdem als Referenzgerät im Rahmen der Beseitigung von Funktionsstörungen des Sensors von LCR-Gravimetern [BONATZ 2004].

Zur Theorie der gravimetrischen Sensoren siehe [HEITZ 2000].

4 Das Gezeitenpotential als astrophysikalisches Referenzsystem

Das Gezeitenpotential bildet die astrophysikalische Referenzfunktion für die Berechnung der Amplitudenverhältnisse und Phasenverschiebungen zwischen beobachteten und theoretischen gravimetrischen Gezeiten.

Zur Verfügung stehen derzeit die Potentialkataloge von

- [DOODSON 1922],
- [CARTWRIGHT UND TAYLER 1971],

- [CARTWRIGHT-EDDEN 1973], auf Vorschlag von T. Chojnicki um einige Partialtiden erweiterte Potentiallösung von Cartwright-Tayler, später als
- Cartwright-Tayler-Edden-Doodson-Potential bezeichnet (CTED-Potential),
- [BÜLLESFELD 1985],
- [TAMURA 1987],
- [XI 1989],
- [HARTMANN UND WENZEL 1995],
- [ROOSBEEK 1996].

Im wesentlichen unterscheiden sich die einzelnen Lösungen durch den Grad der Potentialentwicklung für Sonne und Mond, durch ihre spektrale Auflösung (Frequenzabstände) und ihre Genauigkeit [WENZEL 1996a]. Zur Berücksichtigung der Gravitationsfelder der Planeten siehe [HARTMANN UND WENZEL 1994]

Eine der Anlässe für die Weiterentwicklung des CTED-Potentials war seinerzeit die Konstruktion des Supraleitenden Gravimeters [GOODKIND 1991], das in günstigen Fällen eine Signalauflösung von $0,01\mu\text{Gal}$ (relativ $10^{-11}|\text{g}|$) erreicht, entsprechend einer Verbesserung etwa um den Faktor 10 gegenüber der Signalauflösung von Federgravimetern. Im Zusammenhang ist allerdings darauf hinzuweisen, dass bis heute der Maßstab des Ausgangssignals von Supraleitenden Gravimetern weitgehend durch Parallelbeobachtungen mit Federgravimetern oder Absolutgravimetern [RICHTER 1995] bestimmt werden muss, so dass die Maßstabsgenauigkeit keinesfalls besser ist als die von Federgravimetern. Zur Eichung mit Hilfe von Trägheitskräften siehe [RICHTER 1987].

5 Das Analyseverfahren [WENZEL 1996b]

Für die Gezeitenanalyse der gravimetrischen Registrierdaten wurde das Verfahren ANALYZE in den Varianten 3.30 und 3.40 gewählt. Dieses Verfahren basiert auf den deterministischen und stochastischen Modellansätzen von [CHOJNICKI 1973], [SCHÜLLER 1976] und [WENZEL 1976a und b, 1977, 1994a]. Das EDV-Programm ANALYZE ist Teil eines umfangreichen Programmsystems ETERNA, das von H.-G. Wenzel entwickelt wurde und im zugehörigen Handbuch „*EARTH TIDE DATA PROCESSING PACKAGE ETERNA, Version 3.30, Manual, Status 1996.10.06*“, versehen mit zusätzlichen Hinweisen auf weiterführende Literatur, eingehend beschrieben wird. In der internationalen Erdgezeitenforschung wird derzeit aus theoretischen und praktischen Gründen das Verfahren ANALYZE mehr oder weniger als Standardverfahren angewandt und hat das zuvor als Standard genutzte Verfahren [VENEDIKOV 1966] weitgehend verdrängt.

Das Programm ANALYZE ermöglicht unter anderem

- die Verwendung von 12 unterschiedlichen Gezeiten-Tiefpassfiltern mit Diskretisierungsintervallen zwischen 5 Minuten und einer Stunde,
- den optionalen Einsatz der zuvor genannten 7 Potentialmodelle,
- die Eingabe von Amplitudengrenzwerten („threshold“) für zu berücksichtigende Partialtiden,
- die Berechnung von a-priori-Amplitudenverhältnissen auf der Grundlage des Wahr-Dehant-Zschau-Erdmodells [DEHANT 1987],
- die Berücksichtigung zusätzlicher, gravimetrisch wirksamer Prozesse wie zum Beispiel Luftdruckvariationen.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Phasenverschiebungen („phase lead“) als beobachtete Partialtidenphase minus theoretische Partialtidenphase gebildet werden („Ist minus Soll“). In den Programmsystemen ETERNA/ANALYZE wird, wie bereits in Abschnitt A1 erwähnt, als gravimetrische Maßeinheit nm/s^2 verwendet. Aus praktischen Gründen wird auf eine nachgeordnete Umrechnung der Analyseergebnisse in die übliche Einheit Gal verzichtet. Es gilt $1\mu\text{Gal} = 10\text{ nm/s}^2$

6 Das Konzept der Messung und Auswertung gravimetrischer Gezeitensignale

Den gravimetrischen Gezeitenverlauf in einer Beobachtungsstation mit einer Maßstabsgenauigkeit von relativ etwa 1‰ zu bestimmen (Aufgabenstellung), erfordert unter anderem hinreichend *lange* Beobachtungssätze. Bei der Gezeitenanalyse lediglich *kurzer* Datensätze potentiell auftretende Effekte werden in Abschnitt E6 exemplarisch untersucht.

Ein sinnvolles Kriterium für die Definition dessen, was als hinreichend langer Datensatz zu verstehen ist, stellt die Auflösbarkeit der Partialtide S_1 dar, da diese Tide eine Periode von exakt $15^\circ/\text{h}$ aufweist. Somit würde eine an dieser Stelle signifikant auftretende Anomalie insbesondere des Amplitudenverhältnisses auf relevante gravimetrische Störsignale im ganztägigen Gezeitenband hinweisen. Derartige Störsignale können potentiell zu relevanten systematischen Fehlern der durch die Gezeitenanalyse ermittelten Gezeitenparameter des gesamten Bandes führen.

Die Auflösbarkeit der Partialtide S_1 erfordert wegen ihres geringen Frequenzabstands zu größeren Nachbartiden (siehe Gezeitenpotentialentwicklungen, Abschnitt B4) im Prinzip gravimetrische Zeitreihen mit einer Länge von mindestens einem Jahr. In der Praxis sollte eine für die Bestimmung von S_1 verwendete Zeitreihe daher nicht wesentlich kürzer sein als etwa 300 Tage [BONATZ 2004].

Setzt man einen moderaten gravimetrischen Signalrauschpegel und ein leistungsfähiges Verfahren für die Gezeitenanalyse voraus, so zeigt die Erfahrung, dass die relative Auflösung der Amplituden der großen Partialtiden den Wert von 1‰ schon häufig nach wenigen Monaten unterschreitet. Daher ist für das Erreichen des in Abschnitt B2.4 genannten Genauigkeitsziels bei – im obigen Sinne – langen gravimetrischen Zeitreihen eine extreme Signalfilterung nicht erforderlich, da diese nicht zu einer Verbesserung der erreichbaren *Maßstabsgenauigkeit* der gravimetrischen Zeitreihe führt. Im metrologischen Sinne weisen stark gefilterte Signale ohnehin einen wesentlichen Nachteil insofern auf, als die ursprüngliche Signalstruktur nicht mehr erkennbar ist. Zeitvariable Störsignale im mikroseismischen Frequenzbereich können aber zu systematischen Fehlern des gravimetrischen Ausgangssignals führen, besonders dann, wenn sie hinsichtlich ihrer Amplitude mit täglicher oder halbtäglicher Periode variieren. Ursache für derartige Fehler kann zum Beispiel die Verkürzung einer zu Schwingungen angeregten Gravimeterfeder sein [BONATZ 2004].

Diesen Gesichtspunkten wurde dadurch Rechnung getragen, dass die Dauerregistrierung der Gezeiten mit *zwei* Askania-Gravimetern durchgeführt wurde, und zwar mit Aufzeichnung des ungefilterten Signals, des schwach gefilterten Signals (A206, siehe Abschnitt B3) und des stark gefilterten Signals (A233). Die Registrierung von Signalen mit unterschiedlichen Rauschstrukturen und Rauschpegeln ist bei nichtastasierten Gravimetern des Typs Askania besonders deswegen sinnvoll, weil bei diesen Geräten die Eigenperiode des gravimetrischen Sensors im Wirkungsbereich der Hauptperioden des mikroseismisch induzierten Rauschens liegt und dadurch der Sensor trotz mechanischer Dämpfungseinrichtung ständig zu mehr oder weniger starken Bewegungen angeregt wird.

Bei astasierten Gravimetern mit Sensorperioden im üblichen Bereich von 15 bis 20 Sekunden sind diese mikroseismisch induzierten Sensorbewegungen systembedingt wesentlich geringer, so dass bei guten Geräten (und passender Aufgabenstellung) auf eine Signalfilterung verzichtet werden kann. Entsprechend wurde die Registrierung der gravimetrischen Signale des mit einer LCR-Rückkopplungseinrichtung ausgestatteten Gravimeters LCR-G-xx1F nur für den ungefilterten Signalausgang durchgeführt.

LCR-Gravimeter, in die ein SRW-Rückkopplungssystem eingebaut wurde, verfügen im allgemeinen über keine Alternativen, denn diese Geräte besitzen meist nur einen stark gefilterten Signalausgang.

Im Hinblick auf die Aufgabenstellung sowie in Übereinstimmung mit der aktuellen Verfahrensweise des Internationalen Erdgezeitenzentrum in Brüssel wurde für die Gezeitenanalysen auf den Einsatz komplexer und langer numerischer Filteroperatoren verzichtet und statt dessen das bewährte Pertzev-Filter 1957 [PERTZEV 1957] mit einer Länge von 37h und 37 Koeffizienten bzw. das Pertzev59-Filter [PERTZEV 1959] mit einer Länge von 51h und 51 Koeffizienten verwendet. Als astrophysikalisches Referenzsystem dient das Gezeitenpotential von Tamura (siehe Abschnitt B4) mit 1200 Partialtiden, die Amplitudenbegrenzung („threshold“) wurde auf 10^{-7} eingestellt.

7 Das Datenerfassungssystem

7.1 Die Entwicklung eines problemorientierten Datenerfassungssystems

Mit Bezug auf die Zielsetzung der durchzuführenden gravimetrischen Beobachtungen wurde für das GeoObservatorium Odendorf ein der Aufgabenstellung angepasstes Datenerfassungssystem konzipiert, das im folgenden beschrieben und begründet wird.

7.2 Vorbemerkung

Grundlegende Voraussetzung für die technisch-wissenschaftliche Ausschöpfung der Signalinhalte hochauflösender Messsensoren ist die Verfügbarkeit eines problemorientierten und leistungsfähigen Datenerfassungssystems. Messtechnisch sind die Einzelsysteme von Sensor („Messgerät“) und Datenerfassung als Einheit zu bewerten, da beide Komponenten zusammen die Leistung des Gesamtsystems bestimmen.

7.3 Das Konzept der kontinuierlichen digitalen Datenerfassung

Jeder Messung sind im Grundsatz *zwei* Ziele zugeordnet:

- Die Quantifizierung einer physikalischen oder geometrischen Größe in einem gewählten System von Maßeinheiten und
- die Quantifizierung der statistischen Signifikanz der gemessenen Größe.

Anmerkung: Da jede Messung einen physikalischen Prozess darstellt, erfordert die Bestimmung *geometrischer* Größen (Strecken, Winkel) deren physikalische Realisierung durch geeignete *materielle* Positionsmarkierungen. Insofern unterscheidet sich der Begriff der *geometrischen Größe* in Mathematik und Messtechnik.

Die innere Genauigkeit eines Messergebnisses wird durch geeignete Wiederholungsmessungen ermittelt, die äußere Genauigkeit durch Eichung. Unter Eichung ist die Bestimmung des Maßstabs der Signalgrößen (gegebenenfalls unter Berücksichtigung von Nichtlinearitäten) im System der Internationalen Maßeinheiten zu verstehen. Bei gravimetrischen Beobachtungen kommt die Bestimmung der Übertragungsfunktion zwischen dem physikalischen Eingangssignal und dem beobachteten Ausgangssignal hinzu, d.h. die frequenzabhängige Amplitudenverzerrung und der frequenzabhängige Signalnachlauf.

Das Diskretisierungsintervall bei der digitalen Aufzeichnung eines kontinuierlichen physikalischen Prozesses ist problembezogen festzulegen. Ebenso problembezogen ist die Entscheidung zu treffen über die Anzahl der Einzelmessungen zur Bestimmung der statistischen Signifikanz der gegebenenfalls durch einfache oder gewogene Mittelung zu bildenden Stützstellenwerte, die der Datenauswertung zugrunde gelegt werden.

Auf der Grundlage vorliegender Erfahrungen lassen sich die im Rahmen dieser Arbeit zu untersuchenden *kontinuierlichen* geodynamischen Prozesse und Signalvariationen, welche außerhalb des seismischen Spektrums und des Spektrums der Eigenschwingungen der Erde liegen, messtechnisch hinreichend und sinnvoll mit einem Stützstellenabstand von *einer Minute* diskret darstellen. Wählt man ein Diskretisierungsintervall von *einer Sekunde* als Standard, so können optional aus jeweils 60 Einzelwerten *minütliche* Signal-Mittelwerte gebildet und die zugeordnete Standardabweichung der Mittel berechnet werden. Aus Gründen einer Begrenzung des Datenumfangs bei längeren Zeitreihen ist es im Normalfall sinnvoll, lediglich die Signalmittelwerte und ihre Standardabweichungen abzuspeichern. Die sekundlichen Einzelwerte werden dann unmittelbar nach der Berechnung der minutlichen Mittelwerte und deren zugeordneten Standardabweichungen gelöscht. Im Hinblick auf eine sinnvolle Flexibilität der Datenerfassung ist es günstig, die Option einer (innerhalb vernünftiger Grenzen) Veränderung des primären Diskretisierungsintervalls und der aus den diskreten Daten abgeleiteten Stützstellenabstände vorzusehen.

7.4 Der Registrierrechner

Sofern stationäre oder quasistationäre Messungen durchgeführt werden sollen, keine räumlichen Einschränkungen bestehen und eine ausreichende Energieversorgung gewährleistet ist, kann nach praktischen Gesichtspunkten innerhalb der Menge der derzeitigen technischen Alternativen die Verwendung eines geeigneten PC als günstigste Lösung zur Datenerfassung und -speicherung angesehen werden. Hiermit ist ein Höchstmaß an Flexibilität gewährleistet (ein Gesichtspunkt, dem insbesondere bei experimentellen Arbeiten ein großes Gewicht beizumessen ist); so lassen sich unter anderem bestimmte Maßnahmen der Daten-Vorverarbeitung leichter durchführen, und es lässt sich der momentane Datenverlauf in Echtzeit oder der Datenverlauf vorheriger Zeiträume in wählbaren Zeitfenstern visualisieren.

Voraussetzung ist selbstverständlich die Entwicklung, bzw. Verfügbarkeit eines entsprechend leistungsfähigen und problemangepassten Programmsystems zu Datenregistrierung. Aus Gründen der Betriebsicherheit ist es sinnvoll, das zu entwickelnde Registrierprogramm für das Betriebssystem WindowsNT oder ein vergleichbar stabiles Betriebssystem zu erstellen. Als Systemvoraussetzung für zu verwendende Rechner kann festgelegt werden: Ein Pentium-Prozessor mit einer Taktfrequenz von mindestens 100MHz sowie ein Festplattenspeicher von mindestens 1Gigabyte. Diese Vorgaben beziehen sich auf den Stand der verfügbaren technischen Ausstattung zu Beginn der Arbeiten im Jahr 1999. Weiterentwicklungen werden in Abschnitt I beschrieben.

7.5 Die Steuerung der Systemzeit

Bei einer notwendigen Genauigkeit der Systemzeit von etwa ± 1 Sekunde sind besondere Maßnahmen erforderlich, die diese Genauigkeit zuverlässig sicherstellen.

Eine interne *Rechneruhr* erfüllt im allgemeinen die genannte Voraussetzung nicht. Zumindest dann nicht, wenn über längere Zeiträume registriert werden soll. Zwar ist eine Korrektur der Uhrendrift jederzeit leicht möglich, jedoch würde dieses zum Zeitpunkt der Uhrstandskorrektur unvermeidlich zu einer Veränderung der Intervall-

länge führen, d.h. es entstände im genannten Falle ein einzelnes Intervall größer oder kleiner als 60sec. Dieser mögliche Sachverhalt wurde zwar durch eine geeignete Maßnahme im Registrierprogramm berücksichtigt, die zweifellos bessere Lösung ist jedoch, den Effekt erst gar nicht entstehen zu lassen.

Die Systemzeit muss daher durch eine externe Uhr gesteuert werden. Als beste Lösung bietet sich die Verwendung einer DCF-Funkuhr an.

Im Problemzusammenhang lassen sich die auf dem Markt angebotenen Funkuhren in zwei Gruppen unterteilen:

- Quarzgesteuerte Uhren, die im allgemeinen lediglich in Intervallen automatisch ihre Systemzeit an die DCF-Zeit anpassen. In diesem Falle entsteht eventuell wieder das genannte Problem der sporadischen Veränderung der Länge des Diskretisierungsintervalls sowie
- Funkuhren, die *kontinuierlich* das Zeitsystem des Rechners mit der DCF-Zeit synchronisieren und daher vorzuziehen sind.

Bei der Auswahl einer geeigneten DCF-Funkuhr sind zwei weitere Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

Die Uhr soll *extern* an den Rechner über einen seriellen oder parallelen Port anzuschließen sein, d.h. es sollte aus praktischen Gründen auf den nachträglichen Einbau einer Komponente in den Rechner verzichtet werden können. Zu den praktischen Gründen zählt die problemlose Austauschbarkeit der Uhr in einem Störfalle (der z.B. gelegentlich als Folge von Blitzschlag auftreten kann). Ferner sollte die Funkuhr eine hohe Eingangsempfindlichkeit aufweisen, da stationäre geodynamische Messungen häufig in Kellerräumen oder oberflächennahen unterirdischen Laboratorien ausgeführt werden (Problem des Empfangs lediglich schwacher DCF-Signale).

Nach den genannten Kriterien wurde als DCF-Funkuhr die „*Expert mouseCLOCK*“ der Firma Gude Analog- und Digitalssysteme in Köln ausgewählt und mit positivem Ergebnis erprobt.

Bei Verwendung des DCF-Signals zur Steuerung der Systemzeit des Rechners ist der Vorgang der jährlich zweimaligen Umschaltung zwischen Sommer- und Winterzeit zu beachten. Da die gewählte Funkuhr in Verbindung mit der rechnerinternen Uhr arbeitet, lässt sich die automatische Zeitumschaltung durch einen Programmbefehl innerhalb des gewählten Betriebssystems deaktivieren. Für eine Registrierung in der UT-Zeitskala ist danach lediglich noch die Zeitzone „GMT“ einzustellen.

7.6 Die Wandlung des ursprünglichen Analogsignals in ein Digitalsignal

Die derzeit zu erreichende relative Auflösung gravimetrischer Nutzsignale beträgt im Zeitbereich, von Ausnahmen abgesehen (z.B. supraleitende Gravimeter), etwa 10^{-3} bis höchstens 10^{-4} der maximalen gravimetrischen Gezeitenvariationen. Daraus leitet sich das Erfordernis einer mindestens 12-bit-A/D-Signalwandlung ab ($1 : 2^{12} \sim 2 \times 10^4$). Diese Wandlerauflösung ist jedoch nur dann ausreichend, wenn die Spanne des umzuwandelnden analogen Nutzsignals an das maximale Eingangssignal des A/D-Wandler angepasst ist. Ein spezifisches Problem tritt dann auf, wenn an den Wandler mehrere Sensoren mit unterschiedlichen Signalspannen angeschlossen werden sollen. Dies begründet den Einsatz höher auflösender A/D-Wandler mit entsprechend niedrigen Werten für die zulässige Signalschwelle (bis hinein in den μ Volt-Bereich). So basieren beispielsweise bestimmte Anwendungen des Registrierprogramms RECTID [Wenzel 1997] auf dem Einsatz eines 20-bit A/D-Wandlers (mit lediglich 4 Signalkanälen). Nachteilig sind in solchen Fällen die hohen Kosten, die häufig die Anzahl der einsetzbaren Wandler erheblich einschränken. Als ein gewisser praktischer Nachteil ist auch zu bewerten, dass derartige Wandler-Platinen in den Rechner eingebaut werden müssen, was zu einem entsprechenden Aufwand bei einem Austausch im Störfalle führt oder auch dann, wenn der Registrierrechner ausgetauscht werden soll.

Bei den meisten Wandlersystemen werden die analogen Nutzsignale auf ein gemeinsames elektrisches Potential bezogen. Dies führt erfahrungsgemäß häufig zu elektrischen Unverträglichkeiten zwischen den elektronischen Komponenten der angeschlossenen Sensoren (gelegentlich bis hin zum Zerstörungsfall). Daraus ergibt sich – jedenfalls für bestimmte Messgeräte – die Notwendigkeit der galvanischen Trennung von Sensor und A/D-Wandler, etwa durch einen zwischengeschalteten Opto-Koppler. Im Bedarfsfalle kann man ein Trennelement mit zusätzlich eingebautem Messverstärker wählen, dessen Signalverstärkung stufenlos einstellbar ist. Auf diese Weise lassen sich nämlich die Spannungsweiten der zu wandelnden Analogsignale normieren, d.h. an den jeweils verwendeten A/D-Wandler optimal anpassen. Diese Konzeption ermöglicht daher den Einsatz von Wandlersystemen geringerer Auflösung mit den Vorteilen geringerer Kosten, entsprechend einer möglichen größeren Anzahl einsetzbarer Komponenten, sowie höherer Flexibilität dadurch, dass eine Reihe handelsüblicher Wandler *extern* an die Rechner angeschlossen werden können.

Aus den genannten Gründen und nach den genannten Kriterien wurde für die durchzuführenden Untersuchungen der preisgünstige 8-Kanal/12-bit-Analog/Digital-Wandler der Firma Conrad, Hirschau, ausgewählt, der zuvor bereits

im Rahmen anderer Messungen mit Erfolg eingesetzt wurde. Es können allerdings nur unipolare Spannungssignale zwischen 0 und +5,0 Volt digitalisiert werden; die Signalschwelle beträgt ± 1 Millivolt. Zur kontinuierlichen Stabilitäts- und Eigenschaftsüberwachung des A/D-Wandlers wird zweckmäßig einer der acht Kanäle mit einer hinreichend konstanten Messspannung belegt. Hierbei handelt es sich allerdings lediglich um eine Sicherheitsmaßnahme, denn vorgeschaltete Untersuchungen an einer Testplatine zeigten während mehrerer Monate keine signifikanten Änderungen der Wandlereigenschaften.

7.7 Die DC-Trennverstärker

Zur galvanischen Trennung von Sensorausgang und A/D-Wandlereingang werden drei Typen von Trennverstärkern der Firma Knick, Berlin, verwendet:

- der DC-Trennverstärker IsoAmp 5000/6000, wenn das analoge Nutzsignal nicht verstärkt werden soll,
- der DC-Trennverstärker 9000 (Typ 9050A1) mit der Möglichkeit der Signalverstärkung in drei dekadischen Stufen und kontinuierlicher Potentiometereinstellung in den Verhältnissen 1:1 bis 10:1,
- der DC-Trennverstärker VariTrans P 27000 mit der Option der stufenlosen Verstärkereinstellung oder der Einstellung in mehreren festgelegten Schritten.

Jede dieser Komponenten hat einen Eingangswiderstand > 1 M Ω , so dass die Sensorausgänge bei der Signalregistrierung praktisch lastfrei bleiben.

7.8 Das Anforderungsprofil für ein Programm zur Datenerfassung

Die wesentlichen Anforderungen an ein geeignetes gravimetrisches Registrierprogramm lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Hohe Betriebssicherheit,
- Graphische Benutzeroberfläche,
- Benutzerfreundlichkeit,
- Diskretisierungsintervall für analoge Nutzsignale innerhalb gewisser Grenzen frei wählbar,
- Bildung minütlicher Mittelwerte aus 60 sekundlichen Einzelwerten mit Berechnung der zugeordneten Standardabweichungen. Die zeitliche Mitte des Diskretisierungsintervalls einstellbar auf eine volle Minute ± 1 Sekunde,
- Kontinuierliche digitale Anzeige der individuellen sekundlichen Messwerte sowie der Anzahl der im Registrierzeitraum bisher gebildeten Mittelwerte,
- Anzeige des Auftretens fehlerhafter sekundlicher Messwerte, als Hilfsmittel bei der Neuinstallation von Sensoren und des Datenerfassungssystems,
- Möglichkeit der Abschaltung einzelner Registrierkanäle,
- Laufende Ablage der Signalmittelwerte in einer Datenbank. Zugriffsmöglichkeit auf die Daten (Datenkopien) ohne Unterbrechung des Registriervorgangs, Datenauszüge für auszuwählende Kanäle durch Eingabe von Beginn und Ende eines Zeitintervalls,
- Option der graphischen Darstellung des Messwertverlaufs (Mittelwerte) ohne Unterbrechung des Registriervorgangs, mit weitgehend freier Wahl des Zeitfensters bzw. des Darstellungszeitraums,
- Zoomfunktion für die graphische Darstellung des Messwertverlaufs auszuwählender Kanäle durch frei vorgegebene Zeitfenster und Signalspannen,
- Option eines Zweiordinaten-Diagramms zur parallelen Darstellung von Signalmittelwert und zugeordneter Standardabweichung, parallel für alle belegten Kanäle mit der Möglichkeit der Kanalauswahl,
- Möglichkeit der Überprüfung des Uhrstands und der Qualität des empfangenen DCF-Signals.

Ferner Programmergänzung durch nachgeordnete Optionen („Tools“) unter anderem für:

- Sprungkorrektur,

- Eichung der registrierten Spannungssignale,
- Bildung von Signalmittelwerten für Diskretisierungsintervalle von einer Stunde aus den minütlichen Signalmittelwerten mit Hilfe ausgleichender Polynome maximal dritter Ordnung. Für die Berechnung der stündlichen Mittelwerte Verwendung der Daten des Zeitintervalls 25 Minuten vor bis 25 Minuten nach einer vollen Stunde. Die Nutzung von lediglich 50 anstelle von 60 möglichen minütlichen Einzelwerten bietet ohne wesentliche Genauigkeitseinbuße im Bedarfsfalle ein Zeitfenster von 10 Minuten für kürzere Wartungs- und instrumentelle Änderungsmaßnahmen ohne Beeinflussung der gebildeten stündlichen Mittelwerte,
- Überbrückung problembezogen zu definierender „kurzer“ Registrierabschnitte durch Interpolation mit Hilfe geeigneter Polynome bzw. durch Einfügen von „synthetischen“ Messwerten,
- Berechnung der Korrelationskoeffizienten zugeordneter Zeitreihen,
- Umwandlung des Formats ausgewählter Kanäle in das ETERNA- und TSoft-Format.

Durch den Aufruf der Optionen soll der Registriervorgang nicht unterbrochen werden.

C Das Programmsystem GeoDyna

1 Vorbemerkung

Die Untersuchung geophysikalischer Prozesse setzt eine entsprechende Datenbasis voraus. Beobachtet werden die Vorgänge mit Hilfe geeigneter Messinstrumente, welche jedoch nicht zwangsläufig mit einer Registriereinrichtung ausgestattet sein müssen. Im vorliegenden Fall verfügen die Instrumente lediglich über einen analogen Signalausgang zur Übertragung der Messdaten an einen Registrierschreiber (siehe auch Abschnitt B3), welcher zum Zwecke der Datenarchivierung durch einen PC ersetzt wurde. Dieser Datentransfer wird durch den Einsatz von A/D-Wandlern ermöglicht (siehe auch Abschnitt B7.6).

Das Programmsystem GeoDyna wurde unter Beachtung der Anforderungen aus Abschnitt B7.8 erstellt und besteht im Wesentlichen aus den drei Benutzeroberflächen:

- „Messwertregistrierung“,
- „Datenvisualisierung“ und
- „Tools“ zur Datenbearbeitung und Datenauswertung,

sowie einem vierten Programmteil, der für die Übertragung der Daten vom jeweiligen A/D-Wandler notwendig ist. Dieses Unterprogramm verfügt nicht über eine grafische Oberfläche, sondern liest die vom A/D-Wandler zur Verfügung gestellten Daten aus und wandelt sie in ein Format um, auf das insbesondere der Programmteil zur Registrierung lesend zugreift. Durch Kapselung des A/D-Wandler-spezifischen Programmteils in eine DLL (Dynamic Linked Library) ist GeoDyna grundsätzlich in der Lage, mit nahezu jedem beliebigen Wandler zu kommunizieren. Eine DLL ermöglicht es, Programmteile außerhalb des eigentlichen Hauptprogrammcodes zu platzieren. Es ist daher leicht möglich, durch den Ersatz dieser DLL, andere A/D-Wandler mit GeoDyna zu benutzen; es müssen lediglich die definierten Schnittstellen unterstützt werden. Die vorliegende Programmversion ist speziell auf den verwendeten 8-Kanal/12-bit-A/D-Wandler der Firma Conrad, Hirschau, angepasst. Die Notwendigkeit zur Anpassung der Software an den Wandler liegt auch darin begründet, dass im vorliegenden Fall dieser die Informationen nicht wie allgemein üblich als serielle Datensignale in den Computer überführt, sondern die anliegenden Spannungssignale bitweise als Folge von codierten Steuersignalen für die serielle Schnittstelle überträgt.

Die drei Programmteile für die Benutzerinteraktion werden in den folgenden Abschnitten näher vorgestellt.

2 Zielsetzung

Ziel bei der Programmierung des Systems GeoDyna war es, eine Möglichkeit zu schaffen, geodynamische Prozesse zu erfassen, zu visualisieren und zu verarbeiten bzw. auszuwerten (siehe auch Abschnitt B7.8). Zu jeder der drei Anforderungsgebiete wurde ein separates Programm entwickelt, welches jeweils auf der einen Seite getrennt von den anderen Oberflächen einsetzbar ist, auf der anderen Seite jedoch Schnittstellen zur optimierten gemeinsamen Anwendung besitzt.

Die aufgezeichneten Messwerte werden in einer Access-Datenbank abgelegt. Diese besitzt eine problemorientierte vordefinierte Struktur, welche es allen nachgeschalteten Programmteilen erlaubt, auf die registrierten Daten zuzugreifen. Für den Einsatz weiterer Programme, im speziellen ETERNA und TSoft [VAUTERIN 1998], wurden Import- und Exportfunktionen implementiert. Auf Grund der offenliegenden Datenbankstruktur ist aber die Konvertierung in beliebige Formate ebenfalls leicht möglich.

In der Datenbank werden zu jedem Datensatz neben einem eindeutigen Schlüssel (Spalte „ID“), die Uhrzeit der Messung bzw. die Uhrzeit, auf welche sich ein gemittelter Wert bezieht (Spalte „Zeit“), die Messwerte bzw. Minutenmittel zu dem jeweiligen Kanal (Spalten „K1“ bis „K8“) sowie deren Standardabweichung (Spalten „SK1“ bis „SK8“) in der Tabelle „Werte“ persistent gespeichert. Die Speicherung erfolgt direkt in der vom A/D-Wandler vorgegebenen Einheit Volt. Eine eventuell gewünschte Umrechnung in die jeweilige Zielgrößen geschieht in der Nachbearbeitung der Daten.

Die Wahl des zu verwendenden Betriebssystems fiel auf die Windows-Professional-Serie, namentlich Windows NT/2000/XP, da hier auf Grund der höheren Systemstabilität die Störanfälligkeit der sensiblen Registrierungskomponente geringer ist als z. B. bei Windows 9x, zum anderen jedoch im Gegensatz zu Unix-basierten Systemen der Einsatz von PCs möglich ist (siehe auch Abschnitt B7.4) sowie komfortable und effiziente Programmierumgebungen zur Verfügung stehen.

3 Der Programmteil Messwertregistrierung

Dieser Programmteil dient zur Aufzeichnung der vom A/D-Wandler in digitale Signale umgesetzten Spannungssignale und wurde besonders im Hinblick auf Ausfallsicherheit und Wartungsfreiheit entwickelt. Vor dem Start der jeweiligen Registrierung können Einstellungen am Programm vorgenommen werden, z. B. kann die Auswahl über die zu registrierenden Kanäle getroffen werden. Diese Einstellungen werden gespeichert und sind dann beim nächsten Start der Anwendung automatisch vorausgewählt.

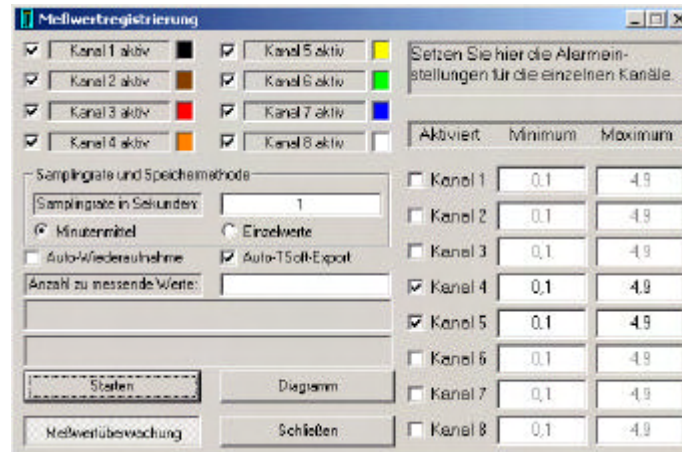


Abbildung C.1: Programmteil „Messwertregistrierung“

Die vorliegende Aufgabenstellung lässt sich im wesentlichen in zwei gegensätzliche Teile untergliedern:

- Langzeitregistrierungen von Minutenmitteln sekundlicher Messwerte zur Gezeitenanalyse,
- Aufzeichnung kurzperiodischer Signale (kurzperiodische Signale bedeuten hier im Gegensatz zu Abschnitt A1 Signale mit einer Periode im Sekundenbereich).

Zur Durchführung der Langzeitbeobachtungen werden folgende Rahmenbedingungen an das System gestellt: sekundliches Abfragen der acht Registrierkanäle, kontinuierliche Berechnung und Speicherung der Minutenmittel und deren Standardabweichungen.

Hierbei wird die einheitliche Speicherung der Minutenmittel dadurch gewährleistet, indem der eigentliche Start der Aufzeichnung genau zur jeweiligen Minutenmitte erfolgt. Das Mittel jedes beobachteten Kanals bezieht sich somit auf die jeweilige volle Minute, die neben den Mittelwerten und deren Standardabweichungen in der Datenbank gespeichert wird. Sollte es z. B. auf Grund einer zu hohen Prozessorlast zu einer fehlerhaften Übertragung der Daten vom A/D-Wandler kommen, wird diese vom Programm automatisch aufgedeckt und der Wert von der weiteren Verarbeitung ausgeschlossen. Das Ergebnis wird hiervon nur minimal beeinflusst, da der Effekt bei der Berechnung beachtet wird; das Minutenmittel wird anstelle aus 60 Einzelwerten nur aus 59 gebildet.

Die Registrierung der kurzperiodischen Signale (die erwartete Hauptperiode der Signale liegt bei ca. 5 - 8 Sekunden) erfordert im Gegensatz dazu die direkte Speicherung der Einzelwerte sowie eine Abtastrate im Zehntelsekundenbereich.

Um diese gegensätzlichen Aufgaben zu erfüllen, wurde sowohl die Samplingrate als auch die Speichermethode konfigurierbar gestaltet. Die Samplingrate ist im Bereich von 0,1 bis 60,0 Sekunden frei wählbar, wobei bei einem eingestellten Intervall von weniger als 30 Sekunden die Möglichkeit zur Speicherung des Minutenmittels und der zugeordneten Standardabweichung besteht. Der genannte Betrag von 0,1sec folgt aus den verwendeten Systemkomponenten als unterer Grenzwert.

Im Zusammenhang mit der Analyse der kurzperiodischen Signale entsteht bei einer fortlaufenden Registrierung der Einzelwerte ein vergleichsweise hoher Speicherbedarf. Bei der gewählten Speichermethode und einem Samplingintervall von 0,2 Sekunden entspricht die Aufzeichnung der Signale einer Stunde ca. vier Megabyte. Da aber das Hauptinteresse auf der Untersuchung der zeitlichen Variationen der Signalstrukturen lag, konnte auf eine fortlaufende Registrierung verzichtet und diese durch repräsentative Messungen in einstellbaren Zeitintervallen ersetzt werden. Diese Messungen wurden im Abstand von sechs Stunden mit einer Dauer von jeweils ca. 30 Minuten vorgenommen. Die Messungen wurden täglich um 0:45 h, 6:45 h, 12:45 h und 18:45 h (UTC) durchgeführt. Zum Zwecke der Automatisierung kann die Registrierung auch mit Hilfe der „geplanten Tasks“

verwendet werden. Die geplanten Tasks bezeichnen einen Betriebssystembestandteil von Windows 2000/XP. Bei Windows NT müssen die „geplanten Tasks“ nachinstalliert (z. B. im Zusammenhang mit dem Internet Explorer 4.0) werden und erlauben dann den automatischen Start von Anwendungen. Neben dem geplanten Zeitpunkt der Ausführung kann auch ein Wiederholungsintervall angegeben werden. Hierzu wird neben dem Schlüsselwort „Auto“ die Anzahl der aufzuzeichnenden Datensätze angegeben. Die Kommandozeile zur automatischen Registrierung von 100 Datensätzen hat z. B. die Struktur: „c:\GeoDyna\MesswerterfassungA.exe Auto 100“. Wird keine Anzahl aufzuzeichnender Datensätze angegeben, wird die Messung bis zum manuellen Abschluss durch den Beobachter fortgeführt.

Das System soll sehr ausfallsicher sein, da auch der Einsatz an nicht ständig besetzten Stationen möglich sein soll. Ein wesentlicher Bestandteil hierfür ist die automatische Wiederaufnahme der Messung, z. B. nach einem Stromausfall. Als Voraussetzung muss die zum Einsatz kommende Hardware auf ihre Eignung hin untersucht werden. Die seit ca. 1998 fast ausschließlich im Einsatz befindlichen PCs der ATX-Bauform sind nur bedingt verwendbar, da diese im Gegensatz zu ihren AT-Vorgänger i. d. R. keinen Schalter, sondern einen Taster zur Regelung der Spannungsversorgung haben und daher z. T. nach einem Stromausfall nicht wieder eigenständig booten. Auf Seite des Betriebssystems müssen ebenfalls einige Einstellungen zur fehlerfreien Funktion der Wiederaufnahmeoption beachtet werden. Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Wiederaufnahmefunktion ist die automatische Anmeldung des Benutzers am Betriebssystem bei dessen Start. Ist diese nicht gesetzt, wird der Bootvorgang des Rechners mit der Anzeige des Anmeldedialogs unterbrochen und nicht vollständig durchgeführt. Da eine entsprechende Einstellung i. d. R. problemlos durchführbar ist, wurde auf die Implementation eines „Dienstes“ verzichtet, welcher ansonsten aber eine durchaus mögliche Alternative darstellen würde. Die automatische Anmeldung unter Windows NT ist mittels eines Registry-Eintrags herzustellen: Dazu ist unter HKEY_Current_User\Software\Microsoft\WindowsNT\CurrentVersion\Winlogon der Schlüssel „AutoLogon“ mit dem Wert „1“ und die entsprechenden Werte zu den Schlüsseln „DefaultUser“ und „DefaultPassword“ zu setzen, respektive die Registry um diese Schlüssel-Wert Kombinationen zu erweitern. Die Betriebssysteme Windows 2000/XP besitzen zur Einstellung dieser Option direkte Schalter in der Systemsteuerung.

Die Ermittlung der im registrierten Signal enthaltenen Einzelfrequenzen wird mittels Fourieranalyse der Software „TSoft“ des Royal Observatory of Belgium durchgeführt [VAUTERIN 1998]. Da „TSoft“ die Messwerte nicht direkt aus der Datenbank lesen kann, müssen die Daten in ein kompatibles Format überführt werden. Diese Formatumwandlung ist einerseits über die GeoDyna-Tools möglich, andererseits wurde die Benutzerfreundlichkeit dadurch erhöht, dass durch Aktivierung der Option „TSoft-Speicherung“ die Messwerte direkt nach Abschluss einer Messreihe in das Austauschformat konvertiert werden. Dieses ist besonders im Zusammenhang mit Wiederholungsmessungen zur Detektion der hochfrequenten Signale interessant.

Ein weiterer Punkt im Hinblick auf die Betriebssicherheit ist die Alarmfunktion der Registrierkomponente. Nach der Auswahl der zu überwachenden Kanäle können individuell je ein unterer und ein oberer Schwellwert eingestellt, bei dessen Über- oder Unterschreitung über den internen PC-Lautsprecher bzw. über eine evtl. angeschlossene Soundkarte ein akustisches und in der Oberfläche ein optisches Warnsignal ausgegeben wird.

4 Der Programmteil Daten-Visualisierung

Diese Oberfläche wurde zur Visualisierung der aufgezeichneten bzw. berechneten Daten entwickelt. Sie dient sowohl zur Betrachtung von im Vorfeld aufgezeichneten oder berechneten Datensätzen, als auch zur Realtime-Überwachung einer aktuellen Registrierung. Beim Start des Visualisierungsdialogs aus einer laufenden Registrierung der Messwerterfassung heraus wird die aktuelle aufgezeichnete Messreihe dargestellt. Erfolgt der Aufruf des Programms direkt, z. B. über das Startmenü oder eine Verknüpfung auf dem Desktop, öffnet sich zunächst ein Dialog zur Auswahl der darzustellenden Registrierung.

Die Abszisse bildet die Zeitachse ab, den Ordinaten sind die Messwerte und/oder ihre zugeordnete Standardabweichung zugeordnet. Alle Achsen sind einzeln frei skalierbar, um die Darstellung optimal an die jeweilige Problemstellung anpassen zu können; die Ordinaten sind einzeln abschaltbar. Die Auswahl der darzustellenden Kanäle wird über die Schaltflächen unterhalb der Graphik getroffen (wobei nicht registrierte Kanäle nicht ausgewählt werden können).

Im automatischen Modus (zur Realtime-Überwachung) wird die grafische Darstellung minütlich aus der Datenbank neu erstellt. Das Darstellungsintervall ist in beliebiger Breite einstellbar, wobei der zuletzt aufgezeichnete Wert jeweils das Ende des Darstellungsintervall bildet.

In der Postprocessing-Betrachtung werden nach der Wahl der Datenbank zunächst die letzten 24 registrierten Stunden einer Zeitreihe dargestellt. Dieser Zustand kann jederzeit über die Schaltfläche „Letzten 24h“ wiederhergestellt werden. Das Darstellungsintervall ist zudem über zwei Datumfelder frei wählbar. Ein Wechsel zu einer anderen Registrierung ist über die Schaltfläche „Datenbankwechsel“ erreichbar. Die jeweils eingestellten Darstellungen werden mittels der Schaltfläche „Zeige Messreihen“ neu gezeichnet.

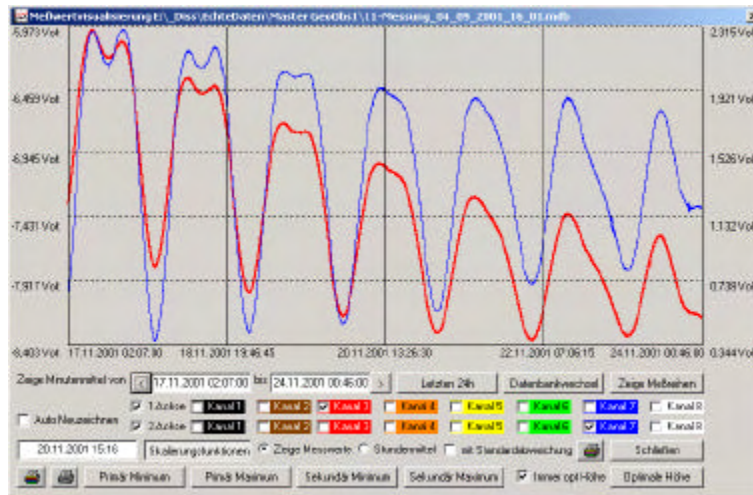


Abbildung C.2: Programmteil „Messwertvisualisierung“

Mit zwei Schaltflächen rechts und links neben den Datumsfeldern ist es möglich, durch den jeweiligen Datensatz zu navigieren, wobei jeweils um ein komplettes Darstellungsintervall „weitergeblättert“ wird.

In der im Dialog links unten vorzufindenden Anzeige wird die Position des Mauszeigers bezogen auf die Zeitachse eingeblendet. Bei Betätigung der linken Maustaste wird die Zeigerposition bezogen auf die primäre (linke) Ordinate, bei Betätigung der rechten Maustaste bezüglich der sekundären (rechten) Ordinate angezeigt, letzteres nur, wenn die sekundäre Achse bzw. die Anzeige der Standardabweichungen aktiviert ist. Mit der mittleren Maustaste wird die angezeigte Information in die Windows-Zwischenablage kopiert (bei 2-Tasten-Mäusen – oder auch wahlweise bei 3-Tasten-Mäusen – durch die gleichzeitige Betätigung der rechten und linken Maustaste). So kann man über die Information in anderen Anwendungen verfügen, beispielsweise in GeoDyna-Tools.

Zum Drucken der aktuellen Darstellung wurden zwei weitere Schaltflächen (für den Bunt- bzw. den Schwarz/Weiß-Druck) in die Oberfläche integriert. Der Ausdruck informiert zusätzlich über den Dateinamen der Datenbank, aus der die abgebildeten Daten stammen, welcher außerdem der Kopfzeile des Formulars zu entnehmen ist.

Weiterhin kann man die darzustellende Skalierung der y-Achse(n) mit den Optionen „Optimale Höhe“ und „Immer optimale Höhe“ beeinflussen. Diese setzen die Ordinatenachsen einmalig, bzw. bis zur Deaktivierung der Option, auf die Extremwerte des jeweilig darzustellenden Intervalls. Somit kann der zur Darstellung der Messreihen vorgesehene Bereich optimal an die gemessenen Werte angepasst werden. Sämtliche Darstellungs- und Druckoptionen werden erst nach Betätigung der Schaltfläche „Skalierungsfunktionen“ sichtbar und können durch erneute Betätigung wieder ausgeblendet werden.

5 Der Programmteil Tools

Neben der Aufzeichnung und der Darstellung der aufgezeichneten Daten umfasst das System GeoDyna eine Sammlung von Werkzeugen, um die registrierten Zeitreihen zu analysieren bzw. zur Analyse durch dritte Programme aufzubereiten.

Das Programm Tools enthält die folgenden Optionen (siehe Abbildung C.3)

1. Sprungkorrektur
2. Füllen von Registrierlücken
3. Anfelderung von Messreihen
4. Berechnung von Stundenmitteln
5. Export in die ETERNA- und TSoft-Formate
6. Gezeitenanalyse mit ETERNA
7. Berechnung der linearen Regression wahlweise mit automatischer Maßstabskorrektur
8. Die Subtraktion des Gezeitensignals von einer Messreihe (Driftermittlung)



Abbildung C.3: Auswahlmaske der Werkzeugsammlung „Tools“

9. Den (Teil-)Export im Access-Format
10. Berechnung der Korrelation zweier Reihen
11. Den Import aus unterschiedlichen Datenformaten
12. Die Änderung und das Anlegen von Stundenmitteltabellen
13. Allgemeine mathematische Grundberechnungen
14. Das Anlegen einer Datenkopie
15. Den Wechsel der zu bearbeitenden Datenbank

Die folgenden Abschnitte erläutern diese Funktionen im einzelnen.

5.1 Die Sprungkorrektur

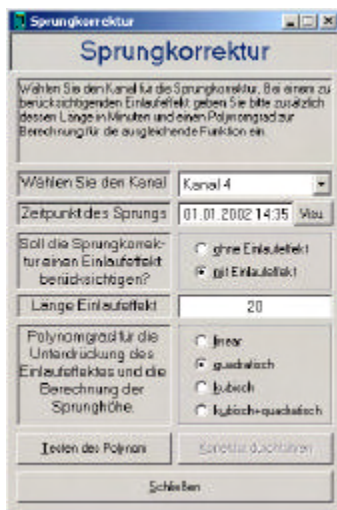


Abbildung C.4: Werkzeug „Sprungkorrektur“

Der Zeitpunkt des Sprungs kann bei aktivierter Schaltfläche „Visu.“ direkt durch Anklicken mit der mittleren Maustaste (bzw. durch kombinierte Betätigung der linken und rechten Maustaste) in der Visualisierungsoberfläche gesetzt werden oder muss manuell in das dafür vorgesehene Feld eingetragen werden.

Für das Korrekturpolynom stehen folgende Ansätze zur Auswahl:

- Linear ($a_1x + a_0$)
- Quadratisch ($a_2x^2 + a_1x + a_0$)
- Kubisch ($a_2x^3 + a_1x + a_0$)
- Kubisch/Quadratisch ($a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0$)

Ein Test des gewählten Polynoms berechnet die Standardabweichungen der Polynomparameter und informiert somit über deren Signifikanz.

Nach den Eingaben wird die Sprungkorrektur automatisch auf alle nachfolgenden Daten und Datensätze angewendet. Es besteht ebenfalls die Möglichkeit die Höhe des auszugleichenden Sprungs manuell festzulegen.

Das Programm berechnet zunächst das bestausgleichende Polynom eingestellten Grades durch Ausgleichung im Gauss-Markov-Modell. Dabei werden die Daten über die vierfache Länge des zu berücksichtigenden Einlaufeffektes (bzw. über 15 Minuten, sofern kein Einlaufeffekt vorliegt) zur Berechnung herangezogen, die zeitlich nach dem Sprung liegen. Daraufhin wird, sofern erforderlich, der Einlaufeffekt durch Extrapolation beseitigt und der wahrscheinlichste Messwert für den Sprungzeitpunkt „von rechts“ (Zeitraum nach dem Sprung) errechnet. Die gleiche Berechnung wird anschließend für die Messwerte vor dem Sprungzeitpunkt ausgeführt und der Messwert „von links“ bestimmt. Die auf diese Weise ermittelte Sprunghöhe wird anschließend in einem Dialog ausgegeben. Hier hat der Beobachter die Möglichkeit, die berechnete Sprunghöhe manuell nachzubessern bzw. die Verarbeitung abzubrechen. Nach der Bestätigung werden der „von links“ errechnete Messwert und alle in

Bei der Registrierung geodynamischer Vorgänge kann es vorkommen, dass der Beobachter manuell in den Registriervorgang eingreifen muss, um z. B. eine Drift des Messinstrumentes auszugleichen, damit die Signalanzeige nicht den Messbereich verlässt. Dieser Eingriff findet sich im Datenmaterial als Sprung wieder, welcher vor einer Auswertung beseitigt werden muss.

Die manuellen Eingriffe verursachen bei einigen Geräten Einlaufeffekte, d.h. diese zeigen nicht sofort wieder den neuen Messwert an, sondern benötigen einige Zeit, um sich auf die geänderte Nulllage einzustellen. Diese Einlaufeffekte müssen bei der Korrektur ebenfalls berücksichtigt werden. Zur Korrektur eines Sprungs werden vom Benutzer die folgenden Eingaben zur Berechnung benötigt:

- Der Zeitpunkt des manuellen Eingriffs,
- die Dauer des Einlaufeffektes (falls vorhanden) und
- die Ordnung des Polynoms mit welcher der Einlaufeffekt korrigiert werden soll.

der Zeitreihe folgenden – vom Einfluss des Sprungs und des Einlaufeffekts bereinigten – Daten in die Datenbank zurückgeschrieben.

Die Berechnung der Sprunghöhe sowie die Korrektur der gestörten Daten erfolgt ausschließlich auf Basis der im originären Aufzeichnungsintervall erfassten Messwerte, d.h. im vorliegenden Fall auf Basis der Minutenmittel. Analoges gilt für die Korrektur von durch Registrierlücken unterbrochenen Datenreihen, auf welche im folgenden Abschnitt C5.2 näher eingegangen wird.

5.2 Das Füllen von Registrierlücken

Im Verlauf einer längeren Registrierung kommt es gelegentlich zu Messunterbrechungen, bzw. zur Aufzeichnung fehlerbehafteter Messwerte (z. B. durch erdbebeninduziertes Überschreiten der für die Messsensorik zulässigen Grenzwerte). Der ETERNA-Algorithmus lässt auftretende Datenlücken durch Bildung von Datenblöcken zu. Jedoch wird die effektive Lückenlänge durch die Länge des über die stündlichen Signalwerte gelegten numerischen Tiefpassfilters (z. B. Pertzef-Filter 57) vergrößert. So kann eine Überbrückung kürzerer Lücken im Einzelfall durchaus sinnvoll sein.

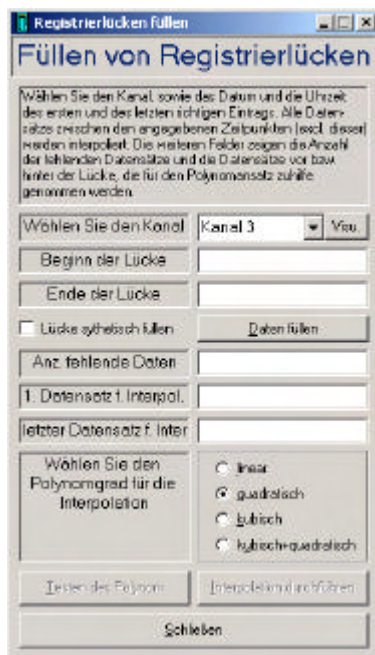


Abbildung C.5: Werkzeug zur Lückenüberbrückung

Polynomkoeffizienten mit Hilfe des Gauss-Markov-Modells bestimmt, wobei den der Lücke näher liegenden Messwerten ein bis zu zehnfach höheres Gewicht gegeben wird, um die Randanpassung zu optimieren.

Nach Bestätigung des Auskunftdialogs, der mittels Polynomkoeffizienten und deren Standardabweichung über die Signifikanz des gewählten Polynomgrads informiert, kann durch [Interpolation durchführen] die Lücke durch die Polynomwerte geschlossen werden.

Für größere zu überbrückende Zeiträume eignet sich die beschriebene Methode, bei der die Lücke unter Verwendung eines geschätzten Polynoms maximal dritten Grades angenähert wird, nicht, da die Messwertverläufe spätestens ab einem Zeitraum von erfahrungsgemäß ca. drei Stunden nicht mehr adäquat durch ein Polynom ausgeglichen werden können. Liegt jedoch bereits ein hinreichend genauer Satz von Gezeitenparametern für die Beobachtungsstation vor, so lassen sich für den Überbrückungszeitraum die synthetischen Gezeiten berechnen. Mit Hilfe dieser Daten können vornehmlich größere Lücken sinnvoll überbrückt werden. Hierfür ist lediglich eine PREDICT-Datei notwendig, die den zu überbrückenden Zeitraum enthält. Selbstverständlich kann diese Methode auch bei kürzeren Lücken Anwendung finden. Die Anpassung an die im interpolierten Zeitraum auftretende Drift der Messinstrumente kann durch drei alternative Methoden (keine Korrektur, Sprungkorrektur, lineare Verteilung des Widerspruchs) erfolgen.

Die erwähnte PREDICT-Datei kann mit Hilfe des gleichnamigen Programms erstellt werden. PREDICT ist im Umfang des Programmpakets ETERNA enthalten.

Da für die Berechnung der Hauptzeitenwellen durch „ETERNA“ ein Datenbestand mit möglichst wenig Lücken von Vorteil ist, sollten fehlende oder fehlerhafte Aufzeichnung entsprechend eingefügt respektive korrigiert werden. Der Einsatz dieses Programmteils erfordert vom Benutzer Sachverständnis über die zum Einsatz kommenden Mittel. Es obliegt ihm die Entscheidung, ob eine Überbrückung fehlender Messungen nicht zu einer signifikanten Verfälschung des Gesamtergebnisses führt. Diese Gefahr wird umso größer, je länger die Unterbrechung ist.

Zur Beseitigung einer Registrierlücke sind vom Beobachter folgende Eingaben notwendig:

- Zeitpunkt der letzten Messung vor der Lücke,
- Zeitpunkt der ersten Messung nach der Lücke,
- Angabe des zur Überbrückung zu verwendenden Polynomgrads.

Nach Eingabe der Lückenränder (bzw. durch Wahl der Zeitpunkte in dem Dialog Visualisierung, entsprechend Abschnitt C5.1) werden über die Schaltfläche [Daten füllen] die weiteren für die Berechnung notwendigen Daten gesetzt. Die Vorgaben für den ersten bzw. letzten zur Interpolation heranzuziehenden Datensatz können vom Beobachter geändert werden. Standardmäßig ist jeweils die vierfache Länge der Lücke voreingestellt. Mittels [Testen des Polynoms] werden die bestausgleichenden

5.3 Die Anfelderung

Insbesondere Langzeitbeobachtungen lassen es sinnvoll erscheinen, die durchgeführten Messungen von Zeit zu Zeit zu unterbrechen und neu zu starten. Hierdurch kann vermieden werden, dass z. B. die Datenbanken auf Grund ihrer Größe nicht mehr leicht handhabbar sind. Zur Auswertung der Langzeitbeobachtung ist jedoch wieder eine fortlaufende Datenreihe ohne jegliche Unterbrechung gewünscht. Der Programmteil Anfelderung dient ebendiesem Zweck. Er ermöglicht es, an die Daten der zum Programmstart geladenen Datenbank, ausgewählte Kanäle einer anderen GeoDyna-Datenbank, wahlweise sprungkorrigiert, anzufügen. Zusätzlich können Daten am Anfang der anzufügenden bzw. am Ende der bestehenden Datenreihe von der Übernahme ausgeschlossen werden. Für den Fall eines nicht nahtlosen zeitlichen Übergangs zwischen den ursprünglichen und den anzufügenden Datensätzen, werden die fehlenden Datensätze automatisch interpoliert, sofern die optionale Sprungkorrektur aktiviert wurde.



Abbildung C.6: Werkzeug zur Anfelderung von Daten

5.4 Die Bildung von Stundenmitteln

Zur Berechnung der Gezeitenparameter mit dem Programmsystem „ETERNA 3.4“, bzw. dessen Vorgängerversion „ETERNA 3.3“ (siehe auch Abschnitt D11), werden anstelle der *minütlichen* in den meisten Fällen die *stündlichen* Mittelwerte benötigt. Diese werden durch den nachfolgend beschriebenen Programmteil errechnet. Eine Besonderheit der Stundenmittelberechnung ist, dass diese zur Berechnung nicht den gesamten Zeitraum von 60 Minuten heranzieht, sondern nur 51 Minuten, und zwar jeweils 25 Minuten vor bis 25 Minuten nach jeder vollen Stunde (siehe auch Abschnitt B7.8). So eröffnet sich dem Beobachter eine Spanne von neun Minuten um kleine Reparaturen bzw. Einstellungen an den Messeinrichtungen auszuführen, von deren Auswirkungen die Stundenmittel unberührt bleiben, sofern diese Maßnahmen keine Drift der Geräte nach sich ziehen. Diese Zeitspanne ist für den Großteil der notwendigen Eingriffe zur Wartung des Messinstrumentariums ausreichend.

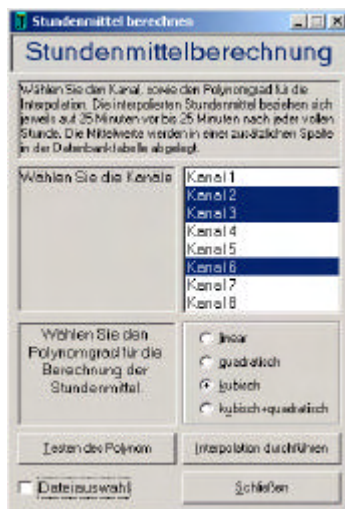


Abbildung C.7: Die Stundenmittelberechnung

Die Berechnung des Stundenmittels erfolgt zudem nicht durch Bildung des arithmetischen Mittels, sondern auf Grund der Struktur der registrierten Zeitreihen über einen Polynomansatz. Für die Berechnung werden die Nummer des zu mittelnden Kanals und der Polynomgrad benötigt, der für die einheitliche Bildung aller Stundenmittel heranzuziehen ist. Diese werden in einer separaten Datenbanktabelle abgelegt, die automatisch unter dem Namen „Stundenmittel“ generiert wird, sofern sie nicht aus einer früheren Berechnung bereits vorhanden ist; in diesem Fall werden die Einträge durch die Neuberechnung überschrieben.

Da der Vorgang der Mittelbildung auch auf leistungsfähigen Computern je nach Länge der Beobachtung einen größeren Zeitraum in Anspruch nehmen kann, wird durch eine Statusanzeige über den Fortschritt der Berechnung Auskunft erteilt.

Die Bestimmung der für jede Stunde separat zu ermittelnden Polynomkoeffizienten geschieht über das Gauss-Markov-Modell [KOCH 1987] mit

$$\hat{\mathbf{b}} = (X'PX)^{-1} X'Py \quad \text{und} \quad \hat{D}(\hat{\mathbf{b}}) = \hat{\mathbf{S}}^2 (X'PX)^{-1} \quad (C-1)$$

wobei die Standardabweichungen der Minutenmittel reziprok in die Gewichtsmatrix P eingehen. Zur Minimierung numerischer Probleme, z. B. bei der Matrizeninvertierung werden die Datumswerte in eine geeignete numerische Form gebracht. Bei der gewählten Form entspricht der Zeitraum eines Tages dem Inkrement 1, wobei zusätzlich alle Datumswerte auf das früheste Datum der Zahlenreihe normiert werden.

Der aus dem Polynom hervorgehende Mittelwert für die jeweilige volle Stunde wird nebst seiner Standardabweichung gespeichert, welche mittels Fehlerfortpflanzungsgesetz

$$D(y) = A'D(x)A \quad (C-2)$$

bestimmt wird [KOCH 1987].

5.5 Der ETERNA-Export

Abbildung C.8: Die Exportoberfläche

die Auswertung benötigten Zielgrößen dar. Der in das erste Feld eingetragene Wert dient dem Programmsystem ETERNA für dessen interne Maßstabsanpassung innerhalb der Analyse, also dem Maßstabsfaktor zur Umrechnung von der registrierten Einheit in die Schwereeinheiten. Im Gegensatz dazu werden alle zu exportierenden Daten bereits während des Tools-Exports mit dem in das zweite Feld eingetragenen Wert multipliziert. Dieser zweite Faktor trägt der Besonderheit Rechnung, dass das ETERNA-Format nur drei Nachkommastellen, aber sieben Vorkommastellen zulässt. Nun werden aber die Minutenmittel mit einer bis zwei Vorkomma- und vier Nachkommastellen aufgezeichnet. Durch Eingabe z.B. des Faktor 10 lässt sich dieser Umstand durch die dem Export vorgeschaltete Berechnung beseitigen und die Messwerte werden ohne Genauigkeitsverlust nach ETERNA übertragen.

Eine weitere Besonderheit stellt der Dateiname dar. Für den ETERNA-Export muss dieser der alten MS-DOS Namenskonvention entsprechen. Das Betriebssystem MS-DOS beschränkt die Dateibezeichnungen auf acht Stellen, welche mit einer Erweiterung von weiteren drei Stellen versehen werden können. Diese Erweiterungen dienen i. d. R. der Klassifizierung der Datei und lassen somit Rückschlüsse auf ein gewisses Format des Dateiinhalts zu. Der Dateiname kann vom Benutzer individuell gewählt werden. Beim Export in das ETERNA-Format wird außer dem Datenfile (*.dat) eine Konfigurationsdatei (*.ini) im selben Verzeichnis erzeugt. Diese Konfigurationsdatei kann durch Modifikation der Dateien im Unterverzeichnis „ETERNAIni“ von GeoDynA auf die Parameter der jeweiligen Beobachtungsstation angepasst werden. Bei entsprechender Auswahl wird eine automatische Gezeitenanalyse der Daten durch ETERNA im Anschluss an den Export durchgeführt. Hierfür ist unterhalb des ETERNA-Stammpfads ein Verzeichnis mit dem Namen „GeoDynDat“ einzurichten, welches die ETERNA-Standardinitialisierungsdatei „default.ini“ enthält. In diesem Verzeichnis werden alle zur Analyse von ETERNA benötigten Dateien abgelegt und die Analysenergebnisse gespeichert.

Die den Export umfassende Zeitspanne wird über zwei Datumsfelder eingestellt, beim Start der Oberfläche ist der gesamte Zeitraum gewählt, der in der Datenbank vorhanden ist. Dieses kann auch über die beiden Schaltflächen [...] neben den Datumsfeldern für Anfangs- und Enddatum getrennt erreicht werden.

Mittels [Export starten] wird der gewählte Zeitraum der Datenbank in die angegebene Datei überführt, wobei eine Statusangabe über den Fortschritt des Vorgangs informiert. Sollte die Datei bereits vorhanden sein, wird diese nach Bestätigung einer Nachfrage überschrieben.

Zur Berechnung der Gezeitenparameter wird, wie schon erwähnt, das Programmsystem „ETERNA“ verwendet. Da ETERNA ein proprietäres Datenformat verwendet, müssen für eine Analyse die Datenbestände aufbereitet werden. Ähnliche Restriktionen gelten für die Datenübernahme nach TSoft.

Obwohl die Formate für ETERNA und TSoft stark unterschiedliche Definitionen besitzen, können sie über eine gemeinsame Oberfläche generiert werden. Je nach eingestelltem Exportformat sind allerdings unterschiedliche Eingaben erforderlich. Da die jeweils notwendigen Eingaben als allgemeinverständlich bewertet werden oder spezielle aus den jeweiligen Programmbeschreibungen hervorgehende Einstellungen sind, wird an dieser Stelle nicht im einzelnen darauf eingegangen. Eine Besonderheit stellen jedoch die DCAL-Felder zur Berücksichtigung von Maßstabsfaktoren der aufgezeichneten Daten gegenüber den für

5.6 Die ETERNA-Analyse

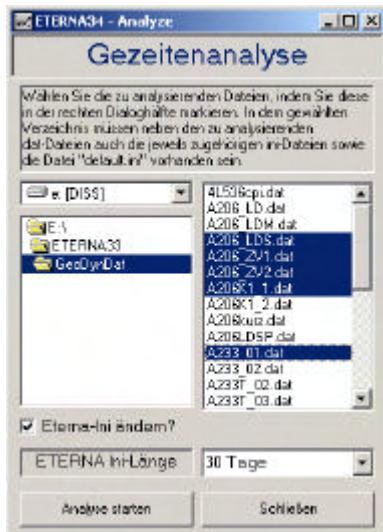


Abbildung C.9: Hilfsoberfläche für ANALYZE

bestehende Gezeiten(,*.dat“-)Datei gewählt, der Initialisierungszeitraum bei Bedarf neu gesetzt und mittels Tastendruck die Analyse gestartet. Durch die optionale Mehrfach-Auswahl können auch mehrere Dateien in einem Schritt analysiert werden.

Dieser Programmteil dient der Steuerung des Analyseprogramms des ETERNA-Pakets, wenn bereits dat-Dateien vorhanden sind. Mit Hilfe dieses Dialogs lassen sich die dat-Dateien direkt aus GeoDyna heraus mittels ANALYZE analysieren und zusätzlich vor der Analyse die jeweilige ini-Steuerdatei für eine andere Datenlänge modifizieren. Die ini-Dateien unterscheiden sich im wesentlichen durch unterschiedlich zusammengefasste Tidengruppen, da für kürzere Datenreihen von z.B. 30 Tagen die Hauptpartialtiden S_1 und K_1 nicht getrennt bestimmbar sind. Bei Datenlängen, die im Grenzbereich einer möglichen Trennung der Partialtiden liegen, ist die mehrfache Analyse mit unterschiedlichen Steuerdateien durchaus sinnvoll. Durch die Integration der Steuerung von ANALYZE in dieser Tools-Option wird eine Steigerung des Bedienungskomforts erreicht, da der Anwender nicht gezwungen ist, die aktive Applikation zu verlassen und die gewünschten Modifikationen an der Steuerdatei von Hand vorzunehmen. Die etwas „unbequeme“ Steuerung der ANALYZE-Optionen liegt in der Verwendung von reinen Textdateien begründet, welche jeweils zur Modifikation geöffnet, die gewünschten Einstellungen von Hand durchgeführt und die anschließend gespeichert werden müssen. Diese Vorgehensweise kann durch die Verwendung der beschriebenen Tools-Option ersetzt werden. Dazu wird lediglich die

5.7 Die Regressionsberechnung

Eine Weiterführung der Korrelationskoeffizientenberechnung im Rahmen der Toolsoption „Korrelationsberechnung“ (siehe auch Abschnitt C5.10) ist die Bestimmung von Regressionsfunktionen. Die Regressionsanalyse erlaubt die Berechnung eines Polynoms zur Quantifizierung funktionaler Zusammenhänge zweier Zeitreihen. Dabei werden die Polynomkoeffizienten mit Hilfe des Gauss-Markov-Modells geschätzt. Die zur Berechnung heranzuziehenden Zeitreihen können dabei entweder aus einer Access-Datenbank, einer ETERNA-Inputdatei oder einer ETERNA-Residuendatei stammen.

Die Regressionsanalyse dient u.a. zur Detektion der zeitlichen Änderung des Maßstabsfaktors der verwendeten Gravimeter bei Berechnung der Regressionskoeffizienten zwischen den Residuen der Gezeitenanalyse und den Gezeiten selbst (siehe Abschnitt F2.5). Ebenso wird die Regressionsanalyse verwendet für die Regression zwischen den Analysenresiduen und weiteren Einflussfaktoren wie z. B. dem Verlauf des Luftdrucks (vergleiche Abschnitt E8.4.2). Hierfür werden die Polynomkoeffizienten jeweils für Zeitfenster einstellbarer Breite berechnet und diese in einer Datenbank gespeichert. Der zeitliche Verlauf der Polynomkoeffizienten kann durch das vereinheitlichte persistente Datenformat im Anschluss an die Berechnung mit dem Programmteil Visualisierung betrachtet (z. B. zur Aufdeckung offensichtlicher Störungen, wie augenscheinlicher Variationen des Maßstabsfaktors – siehe Abschnitt F2.7.5) oder durch andere Tools-Optionen weiterverarbeitet werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, zeitlich nicht stationäre Maßstabsfunktionen als Korrekturen an die registrierten Daten anzubringen und diese in einer separaten Datenbank zu speichern. Diese im Abschnitt F2.7.5 noch näher beschriebene zeitliche Änderung des Maßstabs kann somit effizient bestimmt, eliminiert (indem die ermittelten Regressionskoeffizienten als Zuschläge bzw. Abzüge vom Multiplikator 1 verwendet werden) und die auf diese Art und Weise normierten Datenreihen zur Berechnung des endgültigen Registriermaßstabs herangezogen werden.

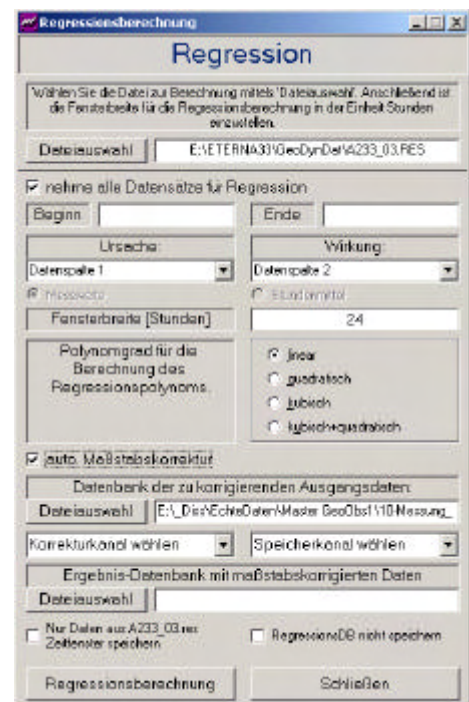


Abbildung C.10: Die Berechnung der Regressionskoeffizienten

5.8 Die Gezeitenbereinigung

Die durch die Analyse gewonnenen Gezeitenparameter bzw. die durch diese repräsentierten idealisierten Gezeitenverläufe lassen sich durch die Funktion „Gezeitenbereinigung“ von den ursprünglichen Messwerten subtrahieren. Dadurch erhält man eine neue Datenbank, deren Messwerte von den Gezeiten signalen befreit sind und mit gewissen Einschränkungen das Driftsignal darstellen. Ein weiterer Kanal wird durch die im vorstehenden Sinne driftbefreiten Messreihen belegt, welche somit nur noch das Gezeiten signal enthalten. Die Addition dieser beiden Kanäle ergäbe jenen Ausgangs datensatz, der in einem weiteren Kanal abgespeichert ist. Die restlichen fünf Kanäle der Datenbank können nach Bedarf durch Kopien von Kanälen der Ausgangsdatenbank gefüllt werden. Somit sind Korrelations- oder Regres sionsuntersuchungen zwischen den gezeitenbefreiten Messwerten und weiteren ebenfalls registrierten Einflussgrößen wie z. B. dem Luftdruck möglich.



Abbildung C.11: Die Gezeitenbereinigung

5.9 Der (Teil-)Export



Abbildung C.12: Der Access-Export

Aufgabe dieser Oberfläche ist die Bestimmung des Korrelationskoeffizienten zweier registrierter Kanäle. Mit Hilfe zweier Pull-down-Menüs werden die zu untersuchenden Kanäle ausgewählt, wobei der erste als „Ursachenkanal“ und der zweite als „Wirkungskanal“ bezeichnet ist. Diese Unterteilung entspringt der Tatsache, dass zur Erreichung der maximalen Korrelation der beiden Kanäle eine zeitliche Relativverschiebung notwendig sein kann, die beiden Kanäle also phasenverschoben sind und somit die Wirkung der Ursache zeitlich nachgelagert ist, und zwar dann, wenn eine Wirkung signifikant zeitverzögert gegenüber der Ursache abläuft. Die gewählten Kanäle beziehen sich je nach gewählter Einstellung auf die Tabelle „Werte“ oder „Stundenmittel“ und unterscheiden hier nochmals zwischen den Datenkanälen respektive deren Standardabweichungskanälen. Eine Korrelation kann durch das Programm nur für zwei Datenreihen vom selben Typ ermittelt werden, z.B. der Korrelationskoeffizient zwischen dem Datenkanal 1 der Werte-Tabelle und dem Datenkanal 5 derselben Tabelle, nicht aber zwischen einem Datenkanal und einem Standardabweichungskanal.

Ob die Korrelationsuntersuchung eine Phasenverschiebung berücksichtigen soll, kann über die Option „mit Phaselag“ bestimmt werden. Ist diese Option gewählt, wird in dem dafür vorgesehenen Textfeld die maximal zu untersuchende Phasenverschiebung in der Einheit Minuten eingegeben. Wahlweise kann auch über die Schaltfläche [10%] eine maximale Phasenverschiebung vorgegeben werden, die 10% des zu untersuchenden Zeitraums umfasst.

Mit [Korrelation berechnen] wird die Verarbeitung gestartet und das Ergebnis (sowie die Phasenverschiebung) angezeigt. Die Berechnung des empirischen Korrelationskoeffizienten [WITTE UND SCHMIDT 1991] erfolgt nach der Formel

Zur separaten Untersuchung von zeitlichen Abschnitten einer Registrierung ist es auch unter dem Gesichtspunkt der Rechenzeitminimierung sinnvoll, Teile der Ausgangs- oder zusammengefassten Datenbank abzuspalten, da einige Tools-Funktionen nicht selektiv, sondern nur für den jeweiligen Gesamtdatenbestand aufgerufen werden können. Der Programmteil „Teil-Export“ dient diesem Zweck. Von der aktuell gewählten Datenbank wird nach Eingabe eines Start- und Enddatums der gewählte Ausschnitt aus den Tabellen „Werte“ und „Stundenmittel“ in eine neue Datenbank überführt und unter dem anzugebenden Namen abgespeichert.

5.10 Die Korrelationsberechnung

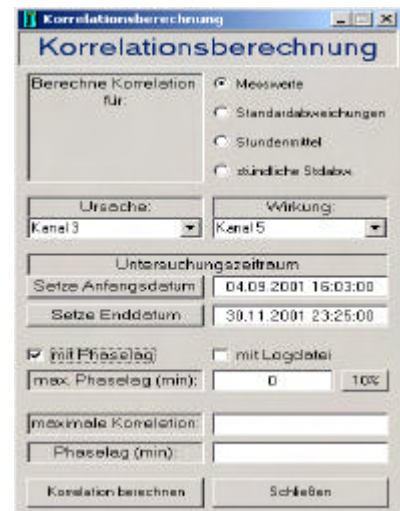


Abbildung C.13: Die Korrelationsberechnung

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y}, \quad \text{mit}$$

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right)},$$

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right)} \quad \text{und}$$

$$s_{xy} = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i \right) \right)$$
(C-3)

Für die Bestimmung der Phasenverschiebung werden die Positionen im Datenvektor des „Wirkungskanals“ iterativ um jeweils eine Position nach vorne verschoben, wobei der jeweils erste Datensatz aus der Berechnung ausgeschlossen wird. Dabei wird durch Verringerung der Daten des „Ursprungskanals“ erreicht, dass alle Iterationsdurchläufe über die identische Anzahl an Datensätzen verfügen.

5.11 Der Import

Zur gemeinsamen Analyse von Daten aus verschiedenen Quellen, wie z. B. der Regressionsanalyse, ist es im Vorfeld notwendig, diese Daten in einer gemeinsamen Datenquelle bzw. Datenbank zusammenzuführen. Dieses wird durch den Programmteil „Import“ gewährleistet. Aus den unterstützten Datenquellen können beliebige Teile in eine neue oder bereits bestehende Tabelle importiert werden, deren Aufbau der Stundenmitteltabelle entspricht und die in beliebiger Anzahl vorhanden sein können. Sofern die Anlage einer neuen Tabelle gewählt wird, ist deren Namen frei wählbar. Durch den identischen Aufbau der Importrespektive Stundenmitteltabelle ist es möglich, die importierten Daten mit denselben Programmteilen zu analysieren, die auch eine Untersuchung der Stundenmitteltabelle ermöglichen (siehe hierfür auch Abschnitt C5.12).

Die derzeit unterstützten Datenformate sind: Access-Datenbanken (*.mdb), die dem GeoDyna-Format entsprechen, ETERNA-Datenfiles (*.dat), ETERNA-Residuenfiles (*.res) und PREDICT-Gezeitenfiles (*.prd).



Abbildung C.14: Die Importoberfläche

5.12 Die Änderung der Stundenmitteltabelle

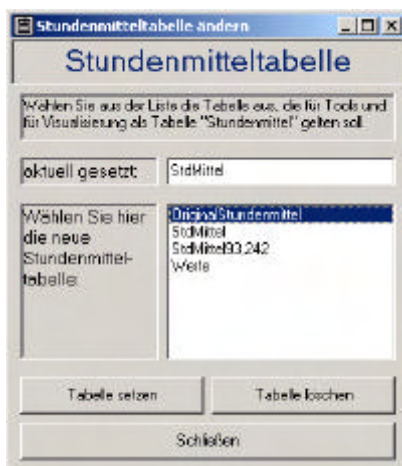


Abbildung C.15: Auswahl der Stundenmitteltabelle

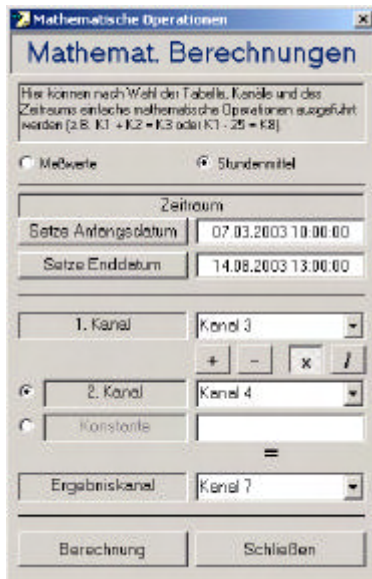
Durch den im Abschnitt C5.11 dargestellten Programmteil „Import“ können Daten aus unterschiedlichen Quellen in eine gemeinsame Datenbank überführt werden. Dieses kann u. a. in eine neue Tabelle erfolgen, die in ihrem Aufbau der Stundenmitteltabelle entspricht und deren Name frei wählbar ist. Zur Berechnung greift „Tools“ jedoch immer entweder auf die Tabelle der direkt registrierten Daten „Werte“ oder auf die Tabelle der Stundenmittel zurück. Damit jedoch auch weiterführende Berechnungen von importierten Daten ermöglicht werden, wie z. B. die Berechnung der linearen Regressionskoeffizienten zwischen den Gezeitenanalyseergebnissen und dem Verlauf der zugeordneten Residuen (siehe auch Abschnitt C5.7 und Abschnitt F2.7.5) kann mit Hilfe der in diesem Abschnitt behandelten Option die Tabelle „Stundenmittel“ durch eine beliebige Tabelle ersetzt werden, wobei jedoch die gewählte Tabelle in ihrer Struktur mit der Stundenmitteltabelle übereinstimmen muss. Die Tabelle der berechneten Stundenmittel wird dabei nicht entfernt, sondern unter dem Namen „OriginalStundenmittel“ weiterhin in der Datenbank geführt und kann unter Zuhilfenahme dieser Option wieder zurückgesetzt werden. Technisch wird diese Option

durch das Anlegen eines Verweises in der Datenbank realisiert, es wird demnach nur ein Zeiger auf die gewählte Tabelle gesetzt und nicht etwa der betreffende Datenbestand kopiert oder die Tabellen umbenannt.

Diese Einstellungen haben nicht nur einen Effekt auf die Berechnungsmöglichkeiten von „Tools“, auch wird die hier erfolgte Einstellung von dem Programm „Visualisierung“ erkannt und für die Darstellung bei Auswahl der dortigen Stundenmittel-Option herangezogen. Somit können beliebige Sachverhalte grafisch umgesetzt werden, die vorab aus Drittsystemen in die GeoDynA-Struktur importiert wurden.

Neben dem Setzen der „virtuellen“ Stundenmitteltabelle unterstützt dieser Programmteil auch das Entfernen einer Import-Tabelle aus der Datenbank. Dazu wird die zu löschende Tabelle markiert und die Schaltfläche [Tabelle löschen] betätigt.

5.13 Die mathematischen Berechnungen



**Abbildung C.16: Die Berechnungs-
oberfläche**

Berechnungskanäle handeln, wobei allerdings die Werte, die vor der Berechnung in dem Ergebniskanal gespeichert waren, durch diese überschrieben werden.

Zur Weiterverarbeitung von Daten bzw. bereits ermittelten Berechnungsergebnissen ist oftmals nur die Anwendung einfacher mathematischer Grundrechenarten auf die registrierten respektive berechneten Daten notwendig. Beispielhaft sei hier auf die Anwendung des Maßstabsfaktors auf die registrierten Daten zur Transformation von der gemessenen Einheit Volt in die Schwereeinheit nm/s^2 vor der nachfolgenden Analyse mit ETERNA verwiesen. Ein weiteres Beispiel stellt die Eliminierung des Einflusses des Luftdrucks dar, wobei ebenfalls im Vorfeld der Gezeitenparameterbestimmung durch ETERNA das Mehrfache der registrierten Luftdruckdaten von den registrierten Schweredaten zu subtrahieren ist (siehe z. B. auch Abschnitt E8.4.7).

Diese und weitere einfache Berechnungen können durch den Programmteil „Mathematische Berechnungen“ vorgenommen werden. Dabei ist zu beachten, dass keine verknüpften, sondern nur einfache Operationen unterstützt werden. Unter Umständen ist somit die Speicherung eines Zwischenergebnisses in einem separaten Kanal notwendig.

Die Berechnungen beschränken sich auf die vier Grundrechenarten und können wahlweise auf die Werte aus zwei Kanälen oder auf die Werte aus einem Kanal und einer Konstanten ausgeführt werden. Das Ergebnis der Operation wird wiederum in einem Kanal derselben Tabelle gespeichert. Bei diesem Ergebniskanal darf es sich auch um einen der

D Vorbereitende Untersuchungen

1 Vorbemerkung

Den Gezeitenanalysen werden einige notwendige Überlegungen, Untersuchungen und Bestimmungen vorangestellt.

2 Das Problem der Maßstabsbestimmung

Durch die *Gravimetreicherung* wird die Funktion bestimmt, welche die Umrechnung der instrumentellen Einstellwerte für die Schwerekompensation in die Maßeinheit der Schwere ermöglicht (Angabe z.B. in $\mu\text{Gal}/\text{Spindelskalenteil}$). Die Gravimetreicherung ist somit von der Bestimmung des *Registriermaßstabs* zu unterscheiden, durch die der Zusammenhang zwischen der Gravimeteranzeige und dem Registriersignal hergestellt wird (relative Maßstabsbestimmung, Angabe z.B. in Volt/Spindelskalenteil).

Die günstigste Lösung besteht darin, das System Gravimeter und Registriereinrichtung als messtechnische Einheit zu betrachten, die mit Hilfe eines bekannten gravimetrischen Eingangssignal kalibriert wird. Es gibt verschiedene Lösungsansätze, die allerdings bei hohen Signalaufösungen auf relativ kleine Messbereiche der Schwere begrenzt sind:

- Eichung durch Verwendung externer Körper bekannter Dichte und Geometrie, siehe z.B. [VARGA 1995], [SPERLING 1994] – Anwendung des Gravitationsgesetzes,
- Eichung mit Hilfe von Beschleunigungskräften z.B. [RICHTER 1987], [VAN RYMBEKE 1989] – Anwendung des Äquivalenzprinzips,
- Eichung durch Nutzung des lokalen vertikalen Schwereverlaufs [BONATZ 1965], [HEITZ 1962]
- Eichung mit Hilfe des lokalen gravimetrischen Gezeitensignals (siehe Abschnitt B1)

Bei Federgravimetern verfährt man in der Praxis im allgemeinen so, dass zunächst auf einer gravimetrischen Gelände-Eichlinie die Messspindel kalibriert wird (d. h. die mechanische Schwere-Kompensationseinrichtung des Gravimeters), welche dann bei stationären Beobachtungen zur Bestimmung des Registriermaßstabs um definierte Beträge verstellt wird, die anschließend in äquivalente Schwereunterschiede umgerechnet werden können.

Fehlerfreie mechanische Getriebe sind jedoch nicht herstellbar, so dass potentiell mit relevanten Wirkungen eines systematischen Spindelfehlers auf das Ergebnis der Bestimmung des Registriermaßstabs dann gerechnet werden muss, wenn der Betrag der Spindeldrehung als Basisgröße verwendet wird. Bei Askania-Gravimetern wird dieser Effekt dadurch ausgeschaltet, dass nicht die Spindelposition abgelesen wird, sondern mit Hilfe eines linearen Glasmaßstabs und eines Mikrometers die jeweilige Position des Einspannpunkts der Messfeder. In diesem Falle tritt allerdings das Problem möglicher systematischer Teilungsfehler auf.

Die Wirkungen der genannten systematischen Fehler auf den ermittelten Registriermaßstab lässt sich bei Gravimetern, die mit einem Rückkopplungssystem ausgestattet sind, durch Vergrößerung der erzeugten Signalspanne reduzieren, jedoch nicht hypothesenfrei, denn es ist dabei vorauszusetzen, dass sich bei der Vergrößerung des Einstellungsbereichs der Feedbackmaßstab nicht relevant ändert.

Eine im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen gewählte Alternative besteht darin, den Einfluss der genannten systematischen Effekte durch Nutzung der Gravimeterdrift zu verringern. Driftet nämlich ein Gravimeter während eines Beobachtungszeitraums in geeignetem Maße, so werden infolge der notwendig werdenden Spindelverstellungen für die Driftkorrektur im Laufe des Zeitraums unterschiedliche Spindelpositionen oder Positionen des Einspannpunkts der Messfeder erreicht – und damit potentiell Bereiche unterschiedlicher systematischer Fehler. Eine Mittelbildung o.ä. führt dann zu einer verbesserten Genauigkeit der ermittelten Maßstabsgröße, dies jedoch wiederum nur dann, wenn der Registriermaßstab zeitlich hinreichend stabil ist.

Allerdings weisen moderne Gravimeter im allgemeinen nur eine geringe Drift auf, was zu Begrenzungen des Verfahrens führt.

Nun besteht bei dem eingesetzten Askania-Gravimeter A203 (siehe Abschnitt B3) eine einfache Möglichkeit, den Einfluss der Umgebungstemperatur auf den Signalverlauf (temperaturinduzierte Drift) durch Ausschaltung des inneren Thermostaten zu vergrößern. Diese Maßnahme, steht selbstverständlich im Widerspruch zu dem metrologischen Bemühen, eine möglichst geringe Gravimeterdrift herbeizuführen. Bei Gezeitenbeobachtungen sind die Auswirkungen der instrumentellen Drift auf das Analyseergebnis jedoch dann gering, wenn dieser Vorgang bezogen auf die Filterlänge langsam abläuft und die Abweichungen vom linearen Verlauf im Filterzeitraum hinreichend klein sind. Treten im Beobachtungsraum langzeitige Änderungen der Lufttemperatur in der

Umgebung des Gravimeters (im Gegensatz zu nur kurzzeitigen Änderungen z.B. durch kurzzeitiges Betreten der Messkammer) mit hinreichend kleinen zeitlichen Gradienten auf, so wird die zugeordnete temperaturinduzierte Drift nur geringe zeitliche Gradienten erfahren. Dies begründet den Versuch, das Verfahren einmal systematisch zu erproben.

Abbildung D.1 zeigt den zeitlichen Verlauf der Kammertemperatur in Gegenüberstellung mit dem Driftsignal des Gravimeters A206. Die Drift wurde ermittelt auf der Grundlage einer zweijährigen Registrierung, aus deren Daten vorläufige Gezeitenparameter berechnet wurden. Die daraus abgeleiteten synthetischen Gezeiten wurden anschließend vom beobachteten Signal abgezogen (siehe auch Abschnitt C5.8).

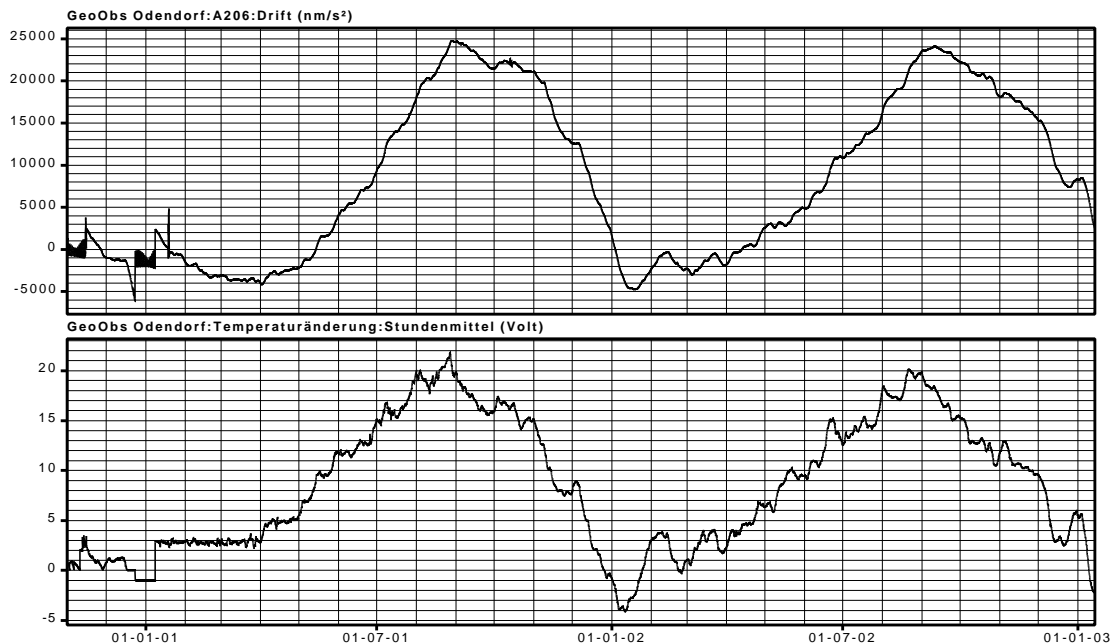


Abbildung D.1: Askania-Gravimeter GS15 Nr.206
Gegenüberstellung von Temperatur in der Messkammer und Gravimeterdrift
innerer Gravimeterthermostat nicht aktiviert
Temperaturmaßstab: 1 Volt entspricht etwa 0,25°C

Die jahreszeitliche, durch Variationen der Kammertemperatur hervorgerufene Signaländerung des Gravimeters A206 beträgt in der Spannungsaufzeichnung etwa 26 Volt (entsprechend 3mGal) bei 6,5°C oder umgerechnet 460 μ Gal/°C (Temperatur: 1Volt entspricht etwa 0,25°C). Bei einem Umrechnungsfaktor von 0,38Volt/MMskt (Mikrometer-Maßstabskalenteil, siehe Abschnitt D6.2.5) ergibt sich somit für eine driftinduzierte Signalvariation von 26Volt eine Verstellung des Mikrometermaßstabs von etwa 70MMskt. Um innerhalb des verfügbaren Registrierbereichs von 5Volt (siehe Abschnitt B7.6) zu verbleiben, können für die relativen Maßstabsbestimmungen der Registriereinrichtung Spindelverstellungen mit einem Betrag von maximal etwa 13MMskt vorgenommen werden, dieses unter Nutzung der jahreszeitlichen Drift aber nun in dem genannten Mikrometerbereich von 70MMskt.

Es bedarf nachfolgender Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses der temperaturinduzierten Drift auf die Ergebnisse der Gezeitenanalysen (siehe Abschnitt E3.6).

Selbstverständlich wurde bei der Errichtung der Messkammer ein Regelsystem zur Stabilisierung der Raumtemperatur vorgesehen, und zwar in Form von spannungsgesteuerten Heizkabeln, die auf dem Fußboden ausgelegt wurden. Dieses System wurde aus den dargelegten Gründen im Registrierzeitraum jedoch nicht eingeschaltet.

Abbildung D.2 zeigt zum Vergleich den Driftverlauf für das Gravimeter LCR-G-xx1F (Feedback-Modus, normale Stabilisierung der Sensortemperatur) in der Gegenüberstellung mit den Temperaturvariationen in der Messkammer. Man erkennt, dass der temperaturinduzierten Drift ein linearer Trend überlagert ist. Der Temperatureffekt im registrierten stündlichen Gravimetersignal lässt sich abschätzen zu 400 μ Gal/6°C, entsprechend 70 μ Gal/°C (Gravimeter A206: 460 μ Gal/°C, innerer Thermostat ausgeschaltet); er ist somit deutlich geringer als beim Gravimeter A206. Insgesamt beträgt im Beobachtungszeitraum (8 Monate) die Signalvariation als Folge der instrumentellen Drift umgerechnet etwa 600 μ Gal. Dies entspricht etwas mehr als einer halben Spindelumdrehung, so dass im Rahmen wiederholter Eichungen durch definierte Spindelverstellungen potentielle periodi-

sche Spindelfehler erkannt und deren Einfluss auf den Eichfaktor durch Mittelbildungen wenigstens teilweise ausgeschaltet werden kann. Unter Nutzung des gravimetrischen Gezeitenverlaufs lassen sich, unter Berücksichtigung eines Sicherheitsabstands von den Registrierrändern, Spindelverstellungen um einen Betrag von umgerechnet $400\mu\text{Gal}$ (entsprechend 4Volt des Registrierbereichs von 5Volt) über einen vollen Umdrehungsbereich der Messspindel verteilen.

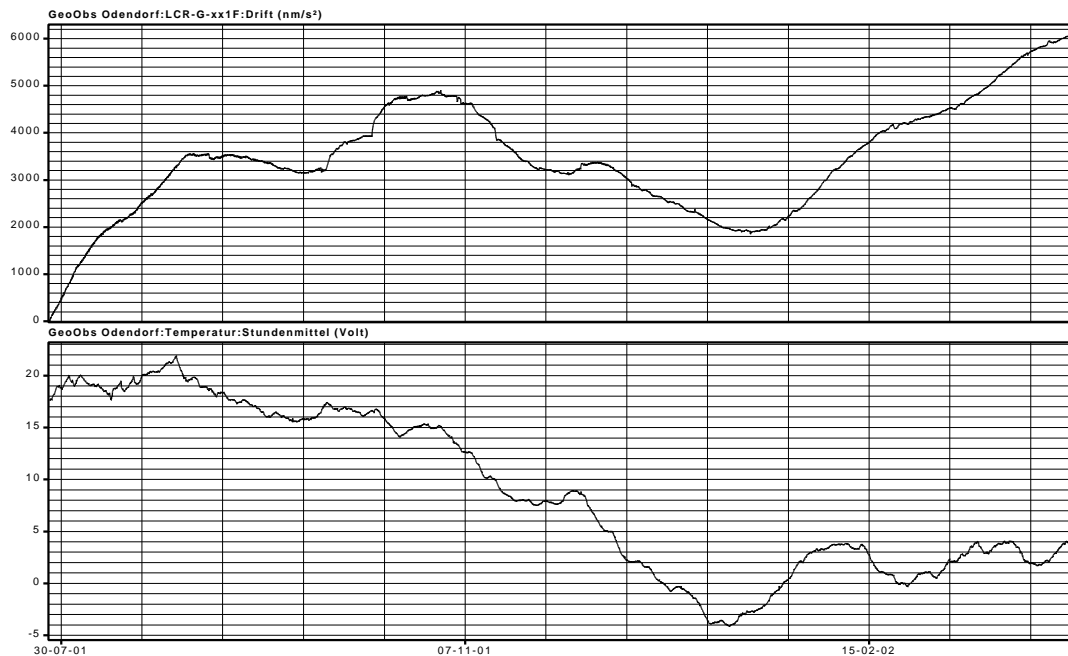


Abbildung D.2: LaCoste-Gravimeter LCR-G-xx1F, Gegenüberstellung von Temperatur in der Messkammer und Gravimeterdrift, Temperaturmaßstab: 1 Volt entspricht etwa $0,25^{\circ}\text{C}$

3 Die messtechnische Stabilität des Wegaufnehmers bei Gravimeter A206

Lageänderungen des gravimetrischen Probekörpers als Folge von Drehmomentänderungen werden mit Hilfe eines kapazitiven Abgriffsystems in ein elektrisches Gleichspannungssignal umgewandelt [ASKANIA 1970], welches registriert wird. Die Versorgungsspannung für den Abgriff beträgt 24,00 Volt (Sollwert). Wie in [BONATZ 1972] nachgewiesen wurde, führen in dem Spannungsbereich von 23,00 bis 25,00 Volt Änderungen der Versorgungsspannung zu Änderungen des Signalmaßstabs mit einem Betrag von 3% pro 1 Volt Spannungsänderung. Will man eine Konstanz des Signalmaßstabs von $<1\%$ erreichen, so erfordert dies somit eine Spannungsstabilisierung auf $\pm 0,03$ Volt. Änderungen der Versorgungsspannung führen aus thermischen Gründen außerdem zu relevanten Drifteffekten, sofern die Spannungsänderungen einen Grenzwert von $\pm 0,03$ Volt überschreitet [BONATZ 1971].

Für die Spannungsversorgung sowohl des Abgriffsystems als auch der Heizung des Gravimeters A206 wurden stabilisierte Netzgeräte verwendet. Eine laufende stichprobenartige Messung der Versorgungsspannung für den kapazitiven Messwertabgriff ergab bei etwa monatlichen Prüfintervallen im Zeitraum von Ende 2000 bis Anfang 2003 Spannungsvariationen von $<0,02$ Volt, bei einer Messgenauigkeit des verwendeten Spannungsmessers im Bereich von $\pm 0,01$ Volt auf 24 Volt Signalweite. Die im Hinblick auf die Aufgabenstellung zu fordernde Spannungsstabilität wurde also eingehalten.

4 Die zeitliche Stabilität der A/D-Wandler

4.1 Die A/D-Wandler der Rechner GeoObs1 und GeoObs3

Die effektive Genauigkeit gravimetrischer Registrierungen hängt nicht nur von der Genauigkeit des instrumentellen gravimetrischen Ausgangssignals ab, sondern auch von der Genauigkeit des Aufzeichnungssystems, welches daher gleichermaßen einer sorgfältigen Untersuchung und laufenden oder stichprobenartigen Überwachung bedarf, vor allem hinsichtlich der zeitlichen Stabilität des Registriermaßstabs. Dies gilt insbesondere dann,

wenn – wie im vorliegenden Fall – relativ einfache A/D-Wandler verwendet werden, über deren Langzeiteigenschaften keine Erfahrungswerte vorliegen.

Selbstverständlich können bei Aufzeichnungen der gravimetrischen Gezeiten *nach* den Datenanalysen Untersuchungen über mögliche Variationen des Registriermaßstabs durchgeführt werden, z.B. durch Überprüfung des zeitlichen Verlaufs der Amplitudenquotienten der Partialtide M_2 bei sequentiellen Analysen; diese Untersuchungen liefern jedoch wegen der für eine Analyse benötigten Datenlänge von mindestens einem Monat keine aktuellen, sondern lediglich a-posteriori Informationen. Aktuelle Maßstabsinformationen können durch Eingabe eines hinreichend genauen Spannungssignals in den zu untersuchenden Registrierkanal gewonnen werden. Dieses Verfahren ist jedoch mit Registrierunterbrechungen verbunden, die nach Möglichkeit vermieden werden sollten. Es wurde daher eine andere, einfachere Lösung gewählt.

Für die Datenaufzeichnung wurden drei Registrierrechner vom Typ HP Vectra 5/133 der Serie 4 eingesetzt:

- Das Registriersystem GeoObs1 diene der laufenden digitalen Aufzeichnung minütlicher Signalmittelwerte der angeschlossenen Kanäle, die jeweils aus 60 sekundlichen Einzelwerten berechnet wurden. Diese minütlichen Signale bildeten die Grundlage für die Gezeitenanalysen der gravimetrischen Daten sowie der zugeordneten Detailuntersuchungen (siehe Abschnitte D und E).
- Das Registriersystem GeoObs2 wurde für einen möglichen Ausfall redundant vorgehalten und zunächst nicht eingesetzt.
- Mit dem Registriersystem GeoObs3 wurden täglich in sechsständigem Abstand vier Stichproben der Gravimetersignale aufgezeichnet mit einer Abtastrate von 0,1 oder 0,2 Sekunden und einer Datenlänge von jeweils 8600 Einzelwerten. Diese Daten dienten der Untersuchung der zeitabhängigen Strukturen des gravimetrischen Signalrauschens (siehe auch Abschnitt C3).

Die Messsignale wurden über zwei im Eingang parallel geschaltete A/D-Wandler des gleichen Typs (siehe Abschnitt B7.6) auf die beiden aktiven Registrierrechner übertragen. Diese Maßnahme ermöglicht die Berechnung von Maßstabsverhältnissen für die angeschlossenen Kanäle, wenn für Zwecke der Maßstabskontrolle der Rechner GeoObs3 zeitweilig auf den gleichen Registriermodus umgestellt wird wie der Rechner GeoObs1 (Bildung minütlicher Mittelwerte auf der Basis eines sekundlichen Abtastintervalls).

Auf Kanal 8 des Rechners GeoObs1 wurde im Normalmodus mit Hilfe eines Quarzsensors (siehe Abschnitt E2) kontinuierlich die kurzperiodische Mikroseismik aufgezeichnet. Für Zwecke der Maßstabskontrolle wurden diese Ergänzungsbeobachtungen kurzzeitig unterbrochen, um ein konstantes Gleichspannungssignal einzugeben, das gleichermaßen auf Kanal 8 des Rechners GeoObs3 übertragen wurde.

Störungen in den messtechnischen Eigenschaften eines der beiden A/D-Wandler müssten sich in Änderungen des Maßstabsverhältnisses sowie in Anomalien der Standardabweichungen dieses Verhältnisses zeigen, wenn man realistischerweise einmal ausschließt, dass bei beiden Wandlern zur gleichen Zeit der gleiche Fehler in gleicher Größe auftritt (es wurde sicherheitshalber ein A/D-Wandler hoher Betriebsstundenzahl mit einem „neuen“ Wandler kombiniert).

Zunächst wurden Maßstabsverhältnisse in kurzen Zeitintervallen bestimmt. Als sich dann eine hohe zeitliche Stabilität dieser Verhältnisse herausstellte, wurden die Prüfintervalle zunehmend vergrößert.

Am 07.07.2001 wurde am Wandler GeoObs3 eine Anomalie in den Standardabweichungen der minütlichen Mittelwerte des eingegebenen Gleichspannungssignals festgestellt sowie zugeordnet auch eine starke Veränderung des Maßstabsverhältnisses. Da es sich bei dem Wandler GeoObs3 um eine Komponente handelte, die vor ihrem Registriereinsatz vielfältigen Erprobungen ausgesetzt worden war, wurde dieser Wandler ohne weitere Untersuchungen gegen einen neuen Wandler ausgetauscht (problemlos innerhalb weniger Minuten, da externer Anschluss über eine serielle Schnittstelle des Rechners). Danach traten innerhalb des nachfolgenden Untersuchungszeitraums keine weiteren erkennbaren Probleme mehr auf.

Die Ergebnisse der Bestimmung der Maßstabsverhältnisse für den gesamten Untersuchungszeitraum sind in Abbildung D.3 nachgewiesen. Es handelt sich um Mittelwerte, die zu den angegebenen Zeitpunkten aus jeweils sechs minütlichen Signalmitteln gebildet wurden, diese wiederum abgeleitet aus sekundlichen Beobachtungen mit einer Auflösung von 1mV (für die Gravimeterkanäle entsprechend etwa 0,1 μ Gal).

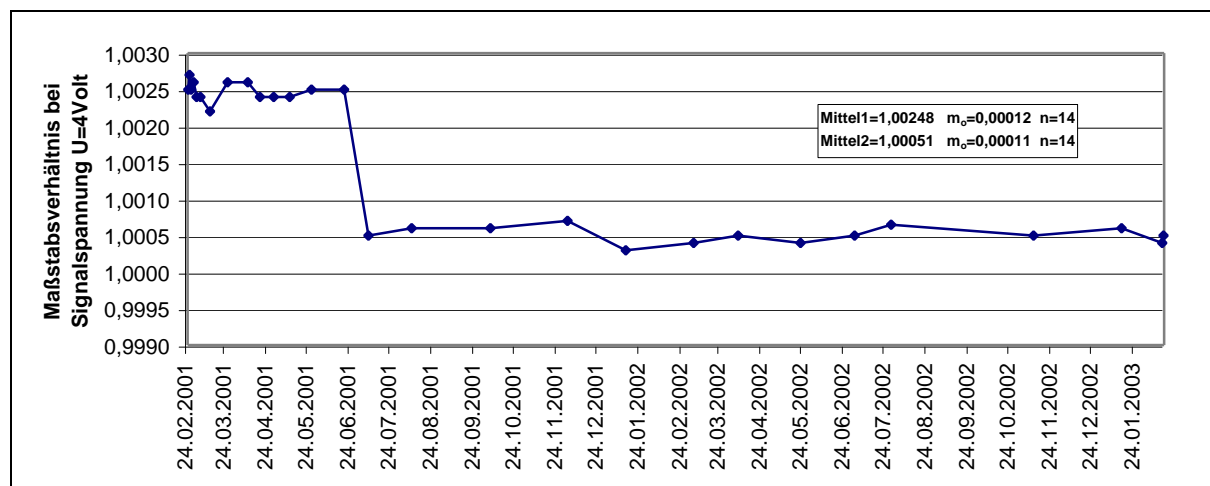


Abbildung D.3: Maßstabsverhältnisse GeoObs3/GeoObs1 durch Eingabe eines konstanten Gleichspannungssignals, Kanal 8, am 07.07.2001 Austausch des A/D-Wandlers an GeoObs3

Es zeigt sich sowohl *vor* als auch *nach* dem Austausch des A/D-Wandlers GeoObs3 (Abbildung D.4 und Abbildung D.5) eine zeitliche Stabilität des Maßstabsfaktors im Bereich von Zehntelpromille, entsprechend der Standardabweichung einer einzelnen Maßstabsbestimmung $s=0,0001$. Die Anzahl der Messungen beträgt in beiden Untersuchungsabschnitten $n=14$, die Eingangsspannung einheitlich etwa 4 Volt. Die im Hinblick auf die Aufgabenstellung (Gezeitenbeobachtungen mit einer absoluten Maßstabsgenauigkeit von 1‰) zu fordernde Maßstabskonstanz der Registriersysteme von deutlich besser als 1‰ wurde somit erreicht. Der Registriermaßstab der verwendeten A/D-Wandler lässt sich in Grenzen verstellen. Da jedoch das Ziel der Untersuchungen in der Ermittlung der zeitlichen Maßstabskonstanz bestand, wurde die Einstellung des Maßstabsverhältnisses auf den Wert 1,000 als überflüssig angesehen (Maßstabsverhältnis 1,0025 im 1. Abschnitt gegenüber 1,0005 im 2. Abschnitt).

Nun liefern die durchgeführten Untersuchungen zunächst lediglich Informationen zur Maßstabskonstanz des Kanals 8. Es wurde ferner das Gleichspannungssignal (Referenzsignal) ohne Zwischenschaltung eines Trennverstärkers den beiden A/D-Wandlern zugeführt. Allerdings sollten die gewählten Trennverstärker aufgrund ihrer Spezifikationen keinen relevanten Beitrag zum Problem der zeitlichen Maßstabskonstanz der Registriersysteme liefern. Es war ebenso zu erwarten, dass die Informationen über das Stabilitätsverhalten des Kanals 8 auch auf die anderen Registrierkanäle zu übertragen waren, da in den Wandlern das Prinzip der sequentiellen Kanalschaltung angewandt wurde. Aus Gründen der Informationssicherheit und der Vollständigkeit wurde jedoch eine experimentelle Überprüfung der genannten Sachverhalte wenigstens bezüglich der Gravimeterkanäle für erforderlich gehalten. Jedoch handelt es sich bei den Gravimeterbeobachtungen um Signale, denen im Vergleich mit dem zuvor verwendeten Gleichspannungssignal ein deutlich stärkeres Rauschen überlagert ist, so dass eine deutliche Einschränkung der Auflösung der zu ermittelnden Maßstabsverhältnisse zu erwarten war.

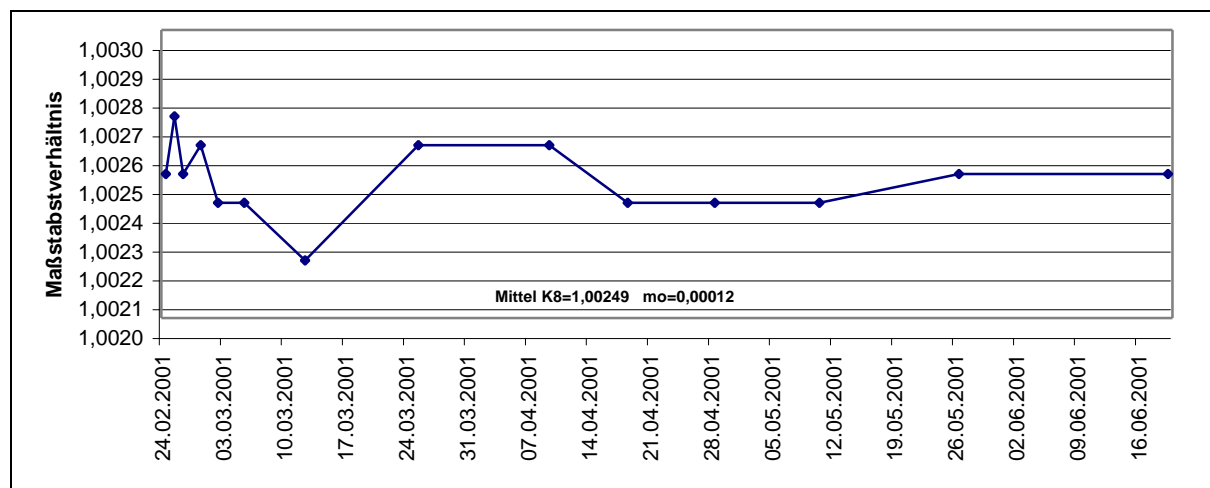


Abbildung D.4: Maßstabsverhältnisse GeoObs3/GeoObs1, Kanal 8 Untersuchungszeitraum vor Austausch des A/D-Wandlers

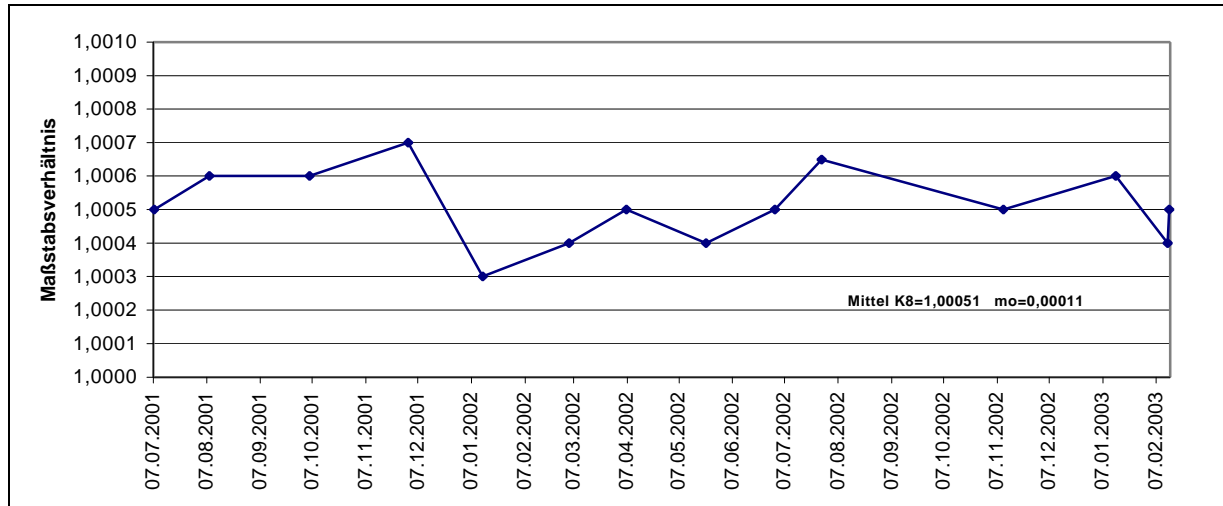


Abbildung D.5: Maßstabsverhältnisse GeoObs3/GeoObs1, Kanal 8
 Untersuchungszeitraum nach Austausch des A/D-Wandlers

Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung D.6, Abbildung D.7 und Abbildung D.8) zeigen die Ergebnisse der Bestimmung der Maßstabsverhältnisse im ersten Untersuchungsabschnitt für die Gravimeterkanäle 3, 4 und 5.

Belegungen:

Kanal 3: Gravimeter A206

Kanal 4: Gravimeter LCR716 im CPI-Modus

Kanal 5: Gravimeter LCR-G-xx1 im CPI-Modus

Unterschiede im mikroseismischen Reaktionsverhalten der Gravimeter führen zu unterschiedlichen Rauschpegeln und entsprechend zu unterschiedlichen Streuungen der ermittelten Maßstabsverhältnisse.

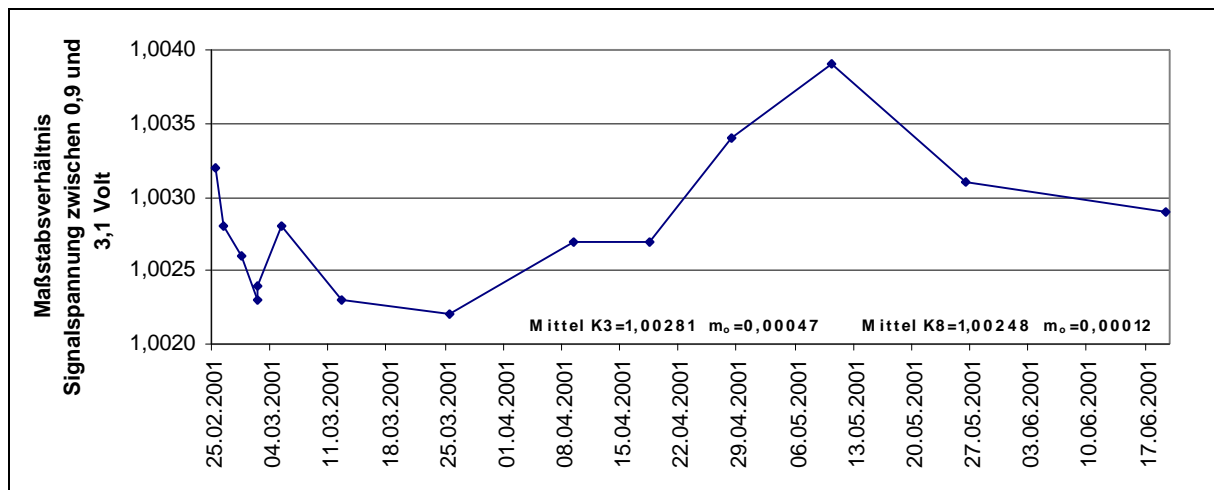


Abbildung D.6: Maßstabsverhältnisse GeoObs3/GeoObs1, Kanal 3
 Untersuchungszeitraum vor Austausch des A/D-Wandlers

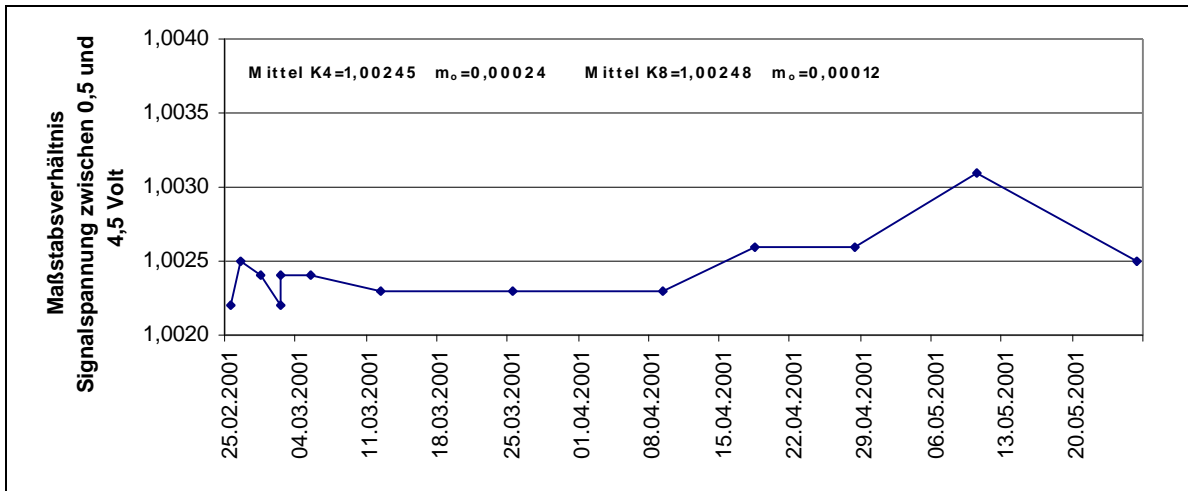


Abbildung D.7: Maßstabsverhältnisse GeoObs3/GeoObs1, Kanal 4
Untersuchungszeitraum vor Austausch des A/D-Wandlers

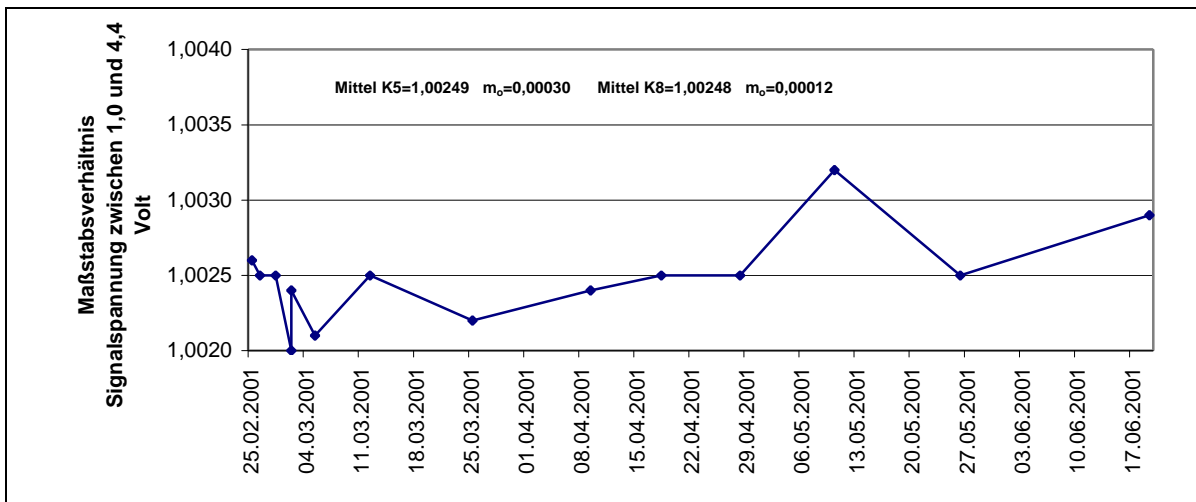


Abbildung D.8: Maßstabsverhältnisse GeoObs3/GeoObs1, Kanal 5
Untersuchungszeitraum vor Austausch des A/D-Wandlers

Es zeigt sich (Tabelle D.1), dass die für die Kanäle 3, 4 und 5 ermittelten Maßstabsverhältnisse nicht signifikant voneinander abweichen.

Signifikante zeitliche Trends sind ebenfalls nicht zu erkennen. Auffällig ist allerdings eine gleichgerichtete Vergrößerung der Maßstabsverhältnisse in den Gravimeterkanälen am 10.05.2001, die in Kanal 8 (Gleichspannungssignal) nicht auftritt. Dieser Effekt beträgt allerdings lediglich maximal etwa 1‰ des mittleren Maßstabsverhältnisses. Wahrscheinlichste Ursache sind Wirkungen aufgetretener (anthropogen induzierter) mikroseismischer Anomalien infolge lokaler Tiefbautätigkeit. Der Prozess der Bildung der minütlichen Mittelwerte ist zwar in beiden Registriersystemen identisch, jedoch treten Unterschiede in den Mittelwerten dann auf, wenn die Zeitbasis der Registrierrechner etwas gegeneinander verschoben ist, d.h. die Bedingung zeitidentischer Eingangsdaten für die Mittelbildung nicht hinreichend erfüllt ist. Eine Überprüfung zeigte für die beiden Rechner einen gegenseitigen zeitlichen Offset von etwa 1 Sekunde (GeoObs1 läuft etwa 1 Sekunde nach), ein Sachverhalt, der im Hinblick auf die Zielsetzung der gravimetrischen Messungen (siehe Abschnitt B2) allerdings unerheblich ist und als Folge unterschiedlicher Prozesszeiten bei der Verarbeitung des registrierten DCF-Signals einzustufen ist. Das Ergebnis einer Überprüfung des potentiellen Einflusses von Rauschstrukturen auf die *Differenzen* der mit den Rechnern GeoObs1 und GeoObs3 gebildeten minütlichen Mittelwert zeigt die folgende Tabelle D.2. Es wurde das stark schwankende CPI-Signal eines im Feedback-Modus betriebenen LCR-Gravimeters (die mechanisch rückgekoppelte Null-Lage des Sensors entspricht hier

Kanal	Maßstabsverhältnis	Standardabweichung
8	1,00248	0,00012
3	1,00281	0,00047
4	1,00245	0,00024
5	1,00249	0,00030

Tabelle D.1: Maßstabsverhältnis der gegenübergestellten Registrierkanäle

einem Wandler-Eingangssignal von 2,5 Volt) während des Einsatzes schweren Tiefbaugeräts in der Umgebung des GeoObservatoriums registriert. Die Standardabweichungen der einzelnen minütlichen Mittelwerte betragen etwa $s = 0,02$ Volt und liegen damit deutlich über dem Niveau des maximalen gravimetrischen Rauschpegels, der bisher im GeoObservatorium unter normalen Bedingungen beobachtet wurde. Die Untersuchungen führen zu der (trivialen) Schlussfolgerung, dass für die Maßstabskontrolle der A/D-Wandler Perioden starken Signalrauschens ausgeschlossen werden sollten. Es zeigt sich allerdings, dass mit zunehmender Anzahl der Beobachtungswerte auch in Fällen starken Signalrauschens repräsentative Maßstabsverhältnisse gewonnen werden können (sofern die Mittellage des gravimetrischen Sensors nicht oder lediglich geringfügig systematisch beeinflusst wird).

	GeoObs3 [Volt]	GeoObs1 [Volt]	Faktor
	2,4919	2,4924	0,99979939
	2,5104	2,5017	1,00347764
	2,4886	2,4934	0,99807492
	2,4862	2,5099	0,99055739
	2,5062	2,4973	1,00356385
	2,4956	2,484	1,00466989
Mittel	2,49648	2,49645	1,00002
s	0,0098	0,0088	0,0053

Tabelle D.2: Gravimeter LCR716CPI, aufeinander folgende minütliche Signalwerte und Maßstabsverhältnisse bei hohem Rauschpegel

In den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung D.9, Abbildung D.10 und Abbildung D.11) sind die Ergebnisse der Bestimmung der Maßstabsverhältnisse im zweiten Untersuchungsabschnitt (nach dem Austausch des Wandlers GeoObs3) für die Gravimeterkanäle 3, 4 und 7 dargestellt.

Belegungen:

Kanal 3: Gravimeter A206

Kanal 4: Gravimeter LCR716 im CPI-Modus

Kanal 7: Gravimeter LCR-G-xx1F im Rückkopplungsmodus

Wie zuvor bereits dargelegt führen Unterschiede im mikroseismischen Reaktionsverhalten der Gravimeter zu unterschiedlichen Rauschpegeln und entsprechend zu unterschiedlichen Streuungen der ermittelten Maßstabsverhältnisse.

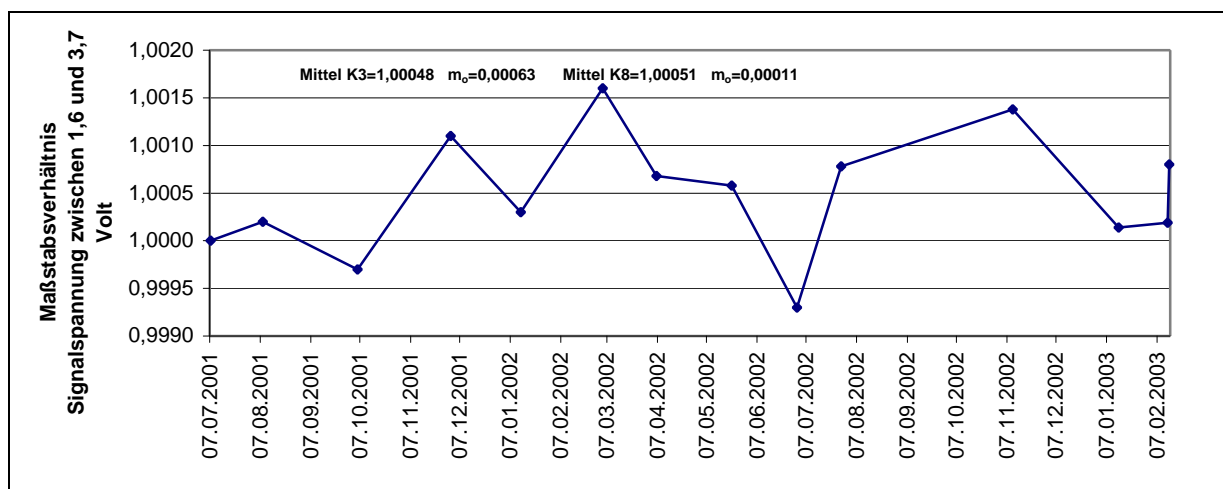


Abbildung D.9: Maßstabsverhältnisse GeoObs3/GeoObs1, Kanal 3 Untersuchungszeitraum nach Austausch des A/D-Wandlers

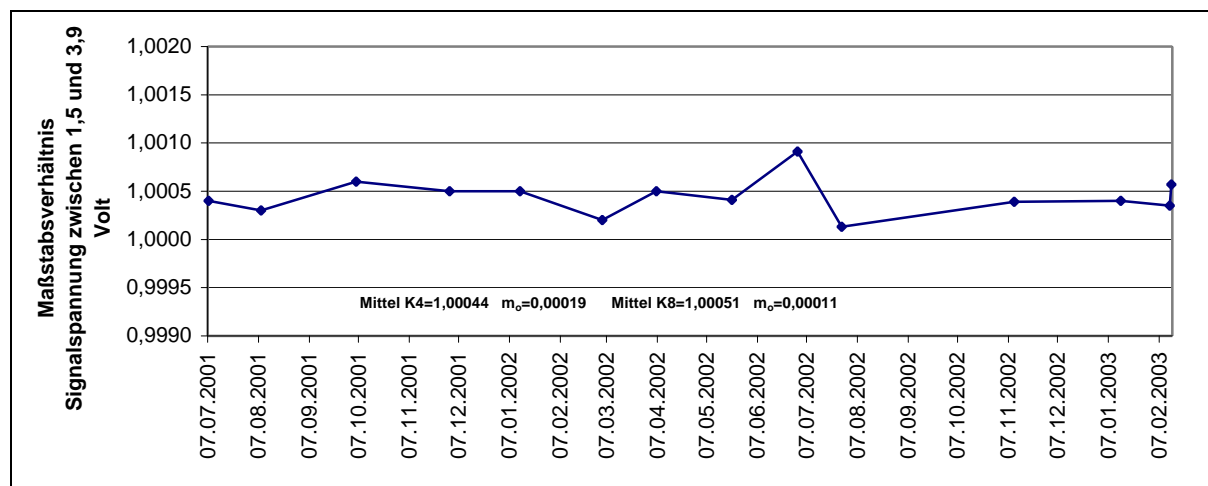


Abbildung D.10: Maßstabsverhältnisse GeoObs3/GeoObs1, Kanal 4
 Untersuchungszeitraum nach Austausch des A/D-Wandlers

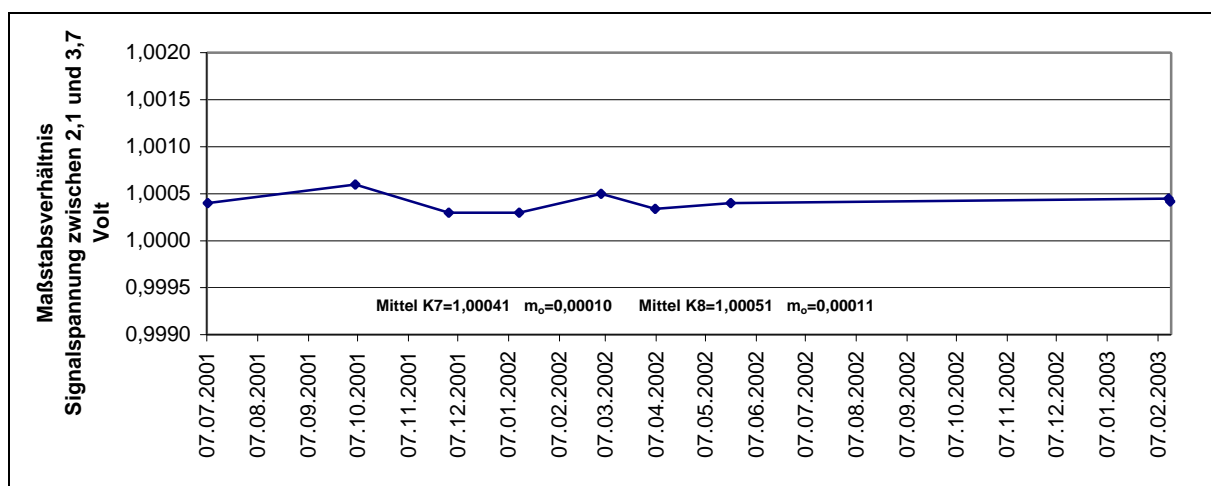


Abbildung D.11: Maßstabsverhältnisse GeoObs3/GeoObs1, Kanal 7
 Untersuchungszeitraum nach Austausch des A/D-Wandlers

Wie im ersten Untersuchungsabschnitt weichen auch im eineinhalbjährigen zweiten Abschnitt die für die Kanäle 3, 4 und 7 ermittelten Maßstabsverhältnisse nicht signifikant von einander ab.

Kanal	Maßstabsverhältnis	Standardabweichung
8	1,00051	0,00011
3	1,00048	0,00063
4	1,00044	0,00019
7	1,00041	0,00010

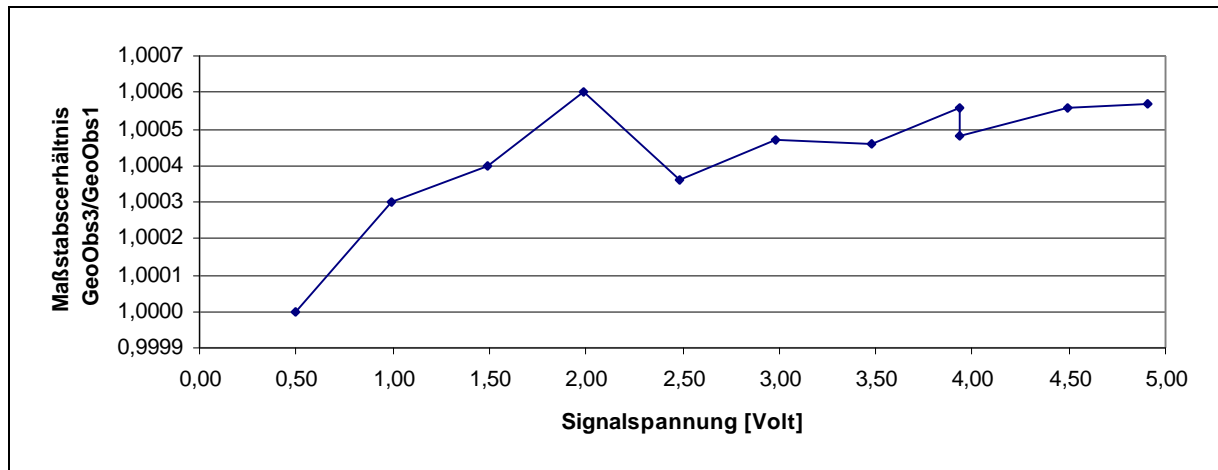
Tabelle D.3: Maßstabsverhältnis der gegenübergestellten Registrierkanäle nach dem Austausch des A/D-Wandlers

Kanal 5 wurde unterschiedlich belegt – Signalstichproben ergaben Maßstabsverhältnisse im Bereich von 1,0003.

Bereits im ersten Untersuchungsabschnitt wurden Anzeichen für eine schwach signifikante Abhängigkeit des Maßstabsverhältnisses vom Betrag der Signalspannung festgestellt. Nach dem Austausch des GeoObs3-Wandlers wurde der Sachverhalt eingehender überprüft.

Zu Beginn des zweiten Abschnitts wurde das Maßstabsverhältnis als Funktion des Betrags der Signalspannung in Schritten von etwa 0,5 Volt untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung D.12 dargestellt.

Es ist eine (nicht-proportionale) Abnahme des Maßstabsverhältnisses mit abnehmender Signalspannung festzustellen. Im Signalspannungsbereich von 0,5 bis 5 Volt beträgt diese Abnahme jedoch lediglich etwa 0,6% und liefert daher bei den gravimetrischen Langzeitregistrierungen keinen relevanten Fehlerbeitrag im Rahmen des in der Aufgabenstellung (siehe Abschnitt B2.4) benannten Maßstabsproblems. Aus diesem Grunde wurde zunächst auf eine weitere Untersuchung des genannten Effekts verzichtet. Es kommt hinzu, dass die Wirkungen von geringfügigen Maßstabsvariationen auf die individuellen Messfehler mit abnehmendem Signalbetrag abnimmt (bei einem Signal von 0,5 Volt bewirkt ein Maßstabsfehler von 1% einen Signalfehler von lediglich 0,5 mV, entsprechend etwa 0,05µGal).

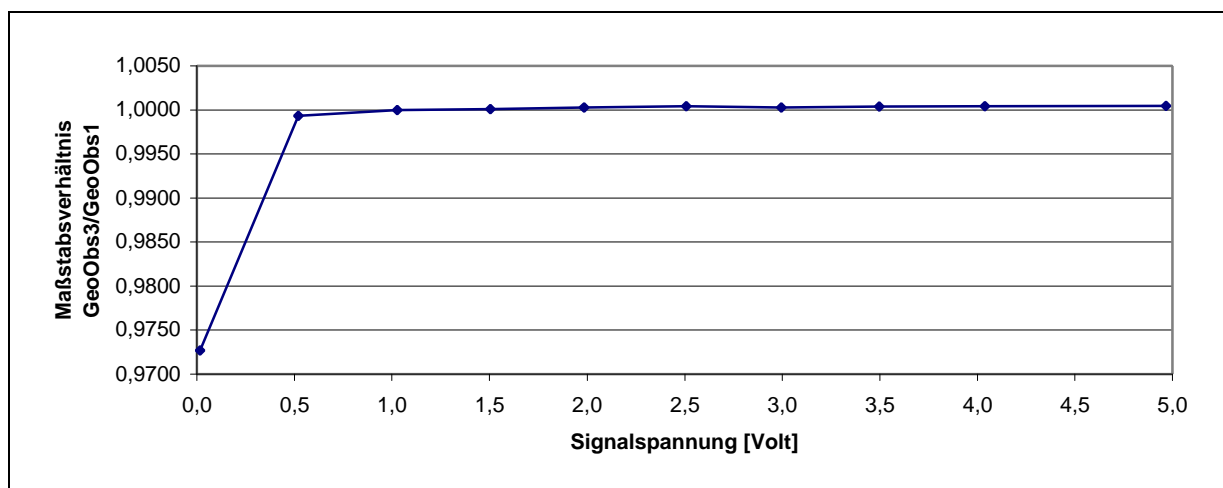


**Abbildung D.12: Maßstabsverhältnis GeoObs3/GeoObs1 in Abhängigkeit von der Signalspannung Kanal 8
Untersuchung nach Austausch des A/D-Wandlers (07.07.2001)**

Im Februar 2003, also nach etwa eineinhalb Jahren, wurden die vorgenannten Untersuchungen erneut durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung D.13 dargestellt.

Erkennbar ändert sich das Maßstabsverhältnis im Signalbereich zwischen 0,02 und 0,5 Volt zunehmend bis hinein in den Bereich von einigen Prozent. Erneut ist jedoch auf die Abnahme der Wirkungen von Maßstabsfehlern mit abnehmendem Signalbetrag hinzuweisen: bei einem Signal von 0,02 Volt bewirkt ein Maßstabsfehler von 5% einen Signalfehler von lediglich 1 mV, entsprechend etwa 0,1 μ Gal.

Aus Gründen der Bewahrung einer Messbereichsreserve im Falle auftretender größerer Driften werden die gravimetrischen Registrierungen überwiegend im Signalbereich zwischen 1 und 4 Volt ausgeführt. Für diesen Bereich ist der Verlauf des Maßstabs in Abbildung D.14 noch einmal gesondert dargestellt. Die ermittelte Abnahme des Maßstabsverhältnisses beträgt im Signalbereich zwischen 0,5 und 5 Volt nunmehr etwa 1‰, gegenüber 0,6‰ zu Beginn des Abschnitts. Dies ändert nichts an der messtechnischen Bewertung des Effekts. Es ist zweifelhaft, ob die zeitliche Änderung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Maßstabsverhältnis und Signalbetrag signifikant ist.



**Abbildung D.13: Maßstabsverhältnis GeoObs3/GeoObs1 in Abhängigkeit von der Signalspannung Kanal 8
Untersuchung nach Austausch des A/D-Wandlers (13.02.2003)**

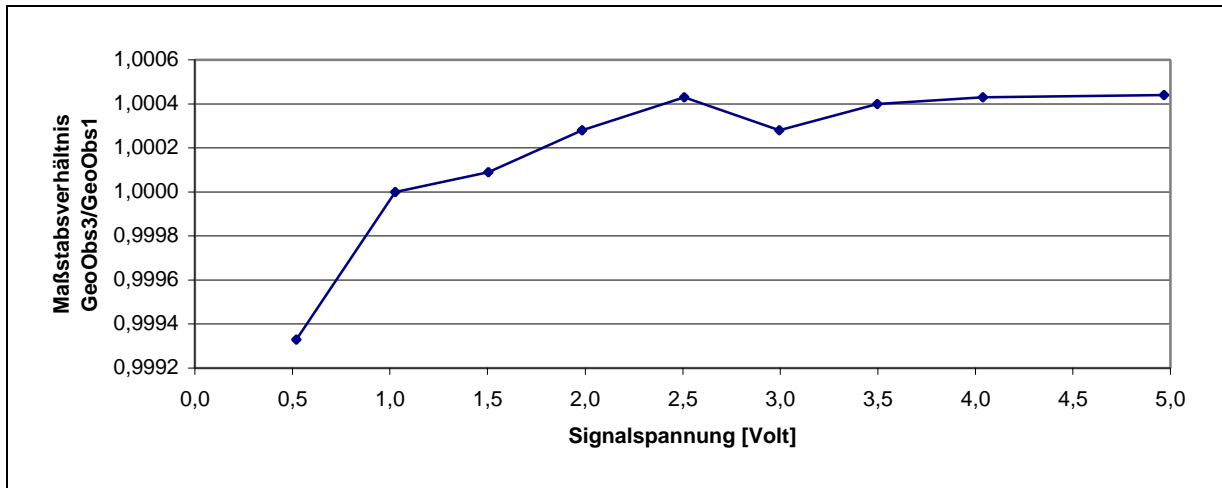


Abbildung D.14: Maßstabsverhältnis GeoObs3/GeoObs1 in Abhängigkeit von der Signalspannung Kanal 8
 Untersuchung nach Austausch des A/D-Wandlers (13.02.2003)

Änderungen des Verhältnisses der Registriermaßstäbe zweier Datenerfassungssysteme in Abhängigkeit von der Signalspannung treten als Folge unterschiedlicher, nicht-linearer Verknüpfung von Eingangssignal und registriertem Signal (Ausgangssignal) auf. Wäre diese Verknüpfung für beide Systeme identisch, könnte die Nicht-Linearität durch Bildung der Maßstabsverhältnisse nicht erkannt werden. Es ist daher erforderlich, die Untersuchungen der Maßstabsverhältnisse durch eine Linearitätsprüfung zu ergänzen.

Zu diesem Zweck wurden die Signaleingangsspannungen der A/D-Wandler mit einem 4 ½-stelligen Voltmeter gemessen und den registrierten minütlichen Signalmittelwerten gegenübergestellt. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung D.15 und Abbildung D.16) nachgewiesen.

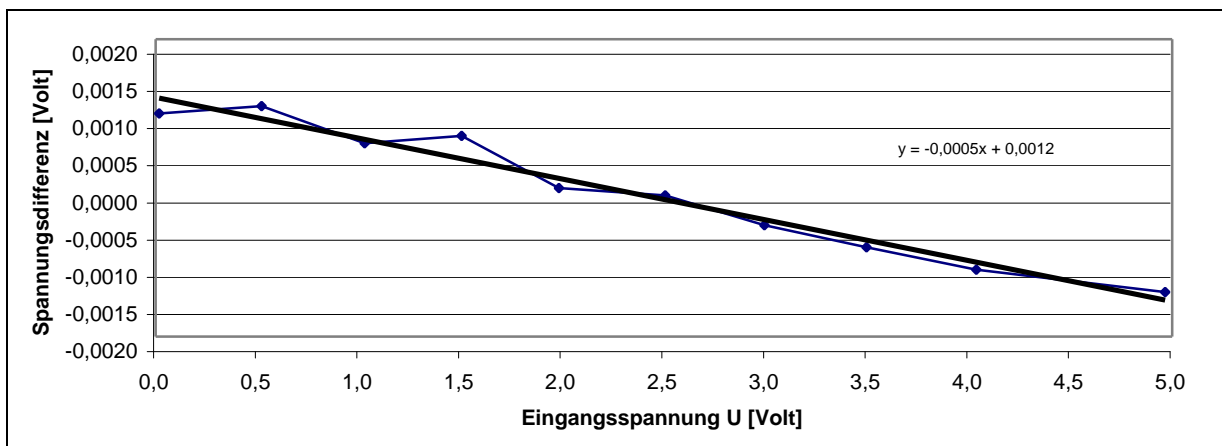
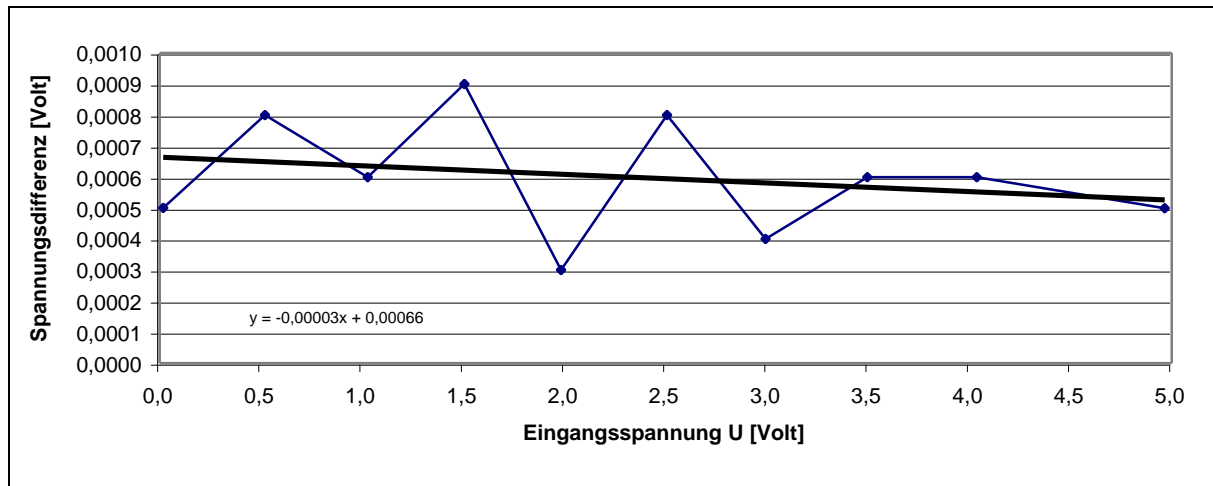


Abbildung D.15: Differenzen zwischen Eingangsspannung U und registrierter Signalspannung GeoObs3 - Kanal 8
 Untersuchung nach Austausch des A/D-Wandlers (13.02.2003)



**Abbildung D.16: Differenzen zwischen Eingangsspannung U und registrierter Signalspannung GeoObs1 - Kanal 8
Untersuchung am 13.02.2003**

Es zeigt sich, dass bei dem System GeoObs3 die Differenz zwischen gemessener Eingangsspannung und Registrierspannung im Registrierbereich (0 bis 5 Volt) von etwa -0,0015 bis +0,0015 Volt variiert. Bei dem System GeoObs1 hingegen tritt lediglich ein etwa konstanter Offset von etwa +0,0006 Volt auf. Fehler individueller Registrierwerte liegen also maximal in der Größenordnung von lediglich etwa 1 mV, entsprechend etwa 0,1 μ Gal für die Gravimeterkanäle und haben somit im Rahmen der Aufgabenstellung keine Relevanz.

Schlussfolgerung: Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen kann die realisierte Datenerfassungsanlage für die vorliegenden gravimetrische Aufgabenstellungen hinsichtlich Betriebsicherheit und messtechnischer Leistungsfähigkeit (einschließlich Maßstabsübertragung und zeitliche Maßstabskonstanz) als uneingeschränkt geeignet bewertet werden.

4.2 Die parallele Signalregistrierung

Schließt man zwei Registriersysteme parallel an einen Signalgeber an, so stellt sich mit zunehmender Annäherung an die Grenze der Signalauflösung die Frage nach der messtechnischen Rückwirkungsfreiheit des einen auf das andere System.

Im System GeoObs1 konnte eine Beeinflussung sowohl der minütlichen Registriersignale als auch der zugeordneten minütlichen Standardabweichungen durch das System GeoObs3 nicht festgestellt werden. Es wurden unter anderem folgende Fälle untersucht:

- Anschluss des Wandlers GeoObs3 ohne Verbindung zum Rechner GeoObs3 parallel zum registrierenden Wandler GeoObs1,
- Anschluss des Wandlers GeoObs3 an den nicht eingeschalteten Registrierrechner GeoObs3
- Einschalten und wieder Abschalten des Rechners GeoObs3
- Einschalten und wieder Abschalten des Registrierprogramms GeoDynA.

Die Aussage der Rückwirkungsfreiheit gilt auch für das System GeoObs3 (keine messbare Beeinflussung durch das System GeoObs1).

Trägt man für das Gravimeter A206 die Standardabweichungen der stündlichen Signalwerte in Abhängigkeit von der Zeit auf, so ist im Zeitraum von Anfang 2001 bis Ende Juli 2001 eine signifikante Änderung des Rauschverhaltens gegenüber den vorhergehenden und nachfolgenden Zeiträumen zu erkennen (Abbildung D.17). Eine Überprüfung der in dem genannten Zeitraum durchgeführten messtechnischen Maßnahmen ergab den folgenden Sachverhalt:

In der Phase der Erprobung des Registriersystems GeoDynA wurde bei Gravimeter A206 ein analoger Kompensationsschreiber (mit potentialfreiem Signaleingang) zunächst an den gefilterten Signalausgang des Gravimeters angeschlossen, parallel zum *Eingang* des Trennverstärkers. Am 6.01.2001, in der Phase einer Registrierunterbrechung, wurde dieser Analogschreiber dann parallel zum *Ausgang* des Trennverstärkers geschaltet und nach Abschluss der Erprobungen am 29.07.2001 entfernt. Einsatz und Ende der Rauschanomalie fallen mit den beiden letztgenannten genannten Maßnahmen zusammen.

Erkennbar ist im vorliegenden Falle das Prinzip der Rückwirkungsfreiheit parallel angeschlossener Registrierungssysteme nicht vollständig erfüllt. Der Effekt ist zwar nur klein und hat letztlich keinen relevanten Einfluss auf die gebildeten minütlichen und stündlichen Signal-Mittelwerte, bei Untersuchungen der Strukturen von Rauschsignalen (siehe Abschnitt F2) könnte es aber je nach Zielgröße durchaus erforderlich werden, die durch den angeschlossenen Analogschreiber verursachte Signaldämpfung zu beachten.

Der festgestellte Sachverhalt kann verschiedene Ursachen haben (z.B. Trägheit des mechanischen Systems der Null-Kompensation innerhalb des analogen Aufzeichnungssystems in Verbindung mit unterschiedlichen Signal-Quellwiderständen und/oder Potentialeinflüsse [BONATZ 2004]). Da jedoch die Rückwirkungseffekte des angeschlossenen Registrierschreibers einerseits klein waren, zum anderen die Störquelle identifiziert und danach beseitigt wurde, konnte auf weitere Untersuchungen verzichtet werden.

Schlussfolgerung: Parallelgeschaltete Registrierungssysteme sollten vorsorglich auf gegenseitige Rückwirkungsfreiheit überprüft werden.

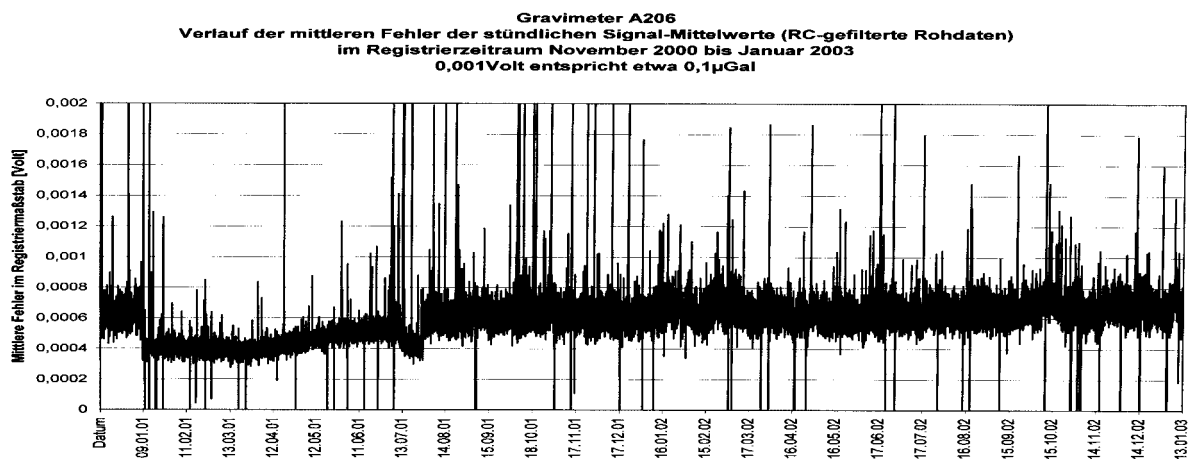


Abbildung D.17

5 Der zeitliche Temperaturverlauf in der Messkammer

Die Drift eines Federgravimeters wird mehr oder weniger stark beeinflusst durch Änderungen der Umgebungstemperatur. Zwar befindet sich der gravimetrische Sensor in einem thermostabilisierten Volumen, jedoch wird - streng genommen - die Temperatur nur an der Stelle des Temperatursensors innerhalb der Regeltoleranz des Thermostaten (beim Askania Gravimeter A206 z.B. $\pm 0,01^\circ\text{C}$) stabilisiert. Ferner führen sich verändernde Unterschiede zwischen Innentemperatur und (niedrigerer) Außentemperatur zu Änderungen des Wärmeflusses von innen nach außen und haben damit Auswirkungen auf Geometrie und das innere Spannungsfeld mechanischer Komponenten. Insgesamt sind die Vorgänge, die zu temperaturinduzierten Driften führen sehr komplex und im einzelnen schwer zu durchschauen. Stationäre gravimetrische Beobachtungen erfordern daher eine hinreichende Konstanz der Umgebungstemperatur zur Vermeidung relevanter Driften, sofern nicht beabsichtigt ist, diese messtechnisch zu nutzen (siehe Abschnitt D2). Was man im Einzelfall unter hinreichender Konstanz zu verstehen hat, hängt von der jeweiligen Aufgabenstellung ab.

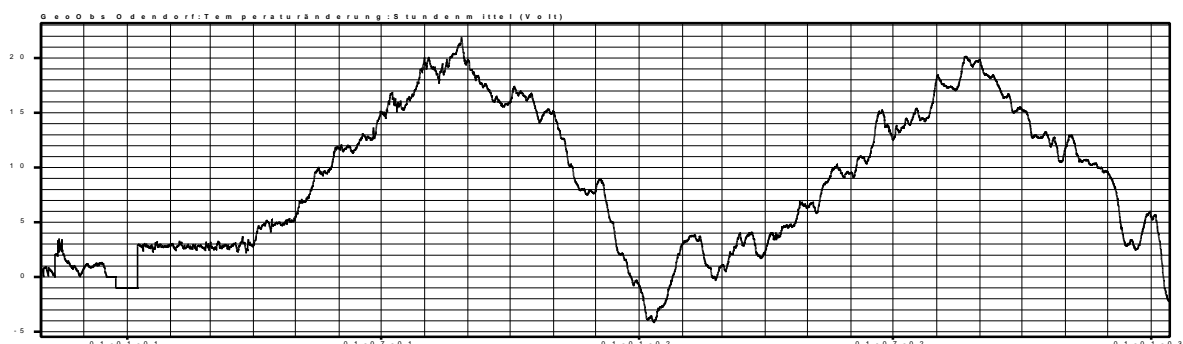


Abbildung D.18: Der Temperaturverlauf in der gravimetrischen Messkammer des GeoObservatoriums Odendorf während eines Registrierzeitraumes von zwei Jahren - Registriermaßstab: 1Volt entspricht etwa 0,25°C

Im vorliegenden Falle wurden vor Beginn der gravimetrischen Beobachtungen zunächst mehrmonatige Registrierungen des Temperaturverlaufs in der Messkammer durchgeführt mit einer Auflösung von etwa $0,002^{\circ}\text{C}$. Aufgrund der gewonnenen Ergebnisse wurde dann im Hinblick auf die Zielsetzung der gravimetrischen Beobachtungen (siehe Abschnitt B2) entschieden, bis auf weiteres auf eine Regelung der Kammertemperatur zu verzichten.

Wie in Abbildung D.18 erkennbar ist, liegen die jahreszeitlichen Schwankungen der Temperatur in der Messkammer im Bereich von 6°C . Überlagert sind kurzperiodische Effekte mit einer Schwankungsbreite von $0,1$ bis 1°C . Diese sind Wirkungen der meteorologischen Temperaturvariationen in der Umgebung des Observatoriums sowie Auswirkungen experimenteller Maßnahmen (z.B. Hinzufügen oder Entfernen von Geräten zur Energieversorgung, die als schwache elektronische Wärmequellen wirken) und Tätigkeiten in der Messkammer. Die aufgetretene Struktur des Temperatursignals ermöglicht Untersuchungen zur messtechnischen Reaktion der eingesetzten Gravimeter auf Schwankungen der Umgebungstemperatur unter Berücksichtigung unterschiedlicher zeitlicher Temperaturgradienten sowie Versuche, die Temperatureffekte in den beobachteten gravimetrischen Daten durch Reduktionsalgorithmen partiell zu eliminieren.

Für die Bestimmung der ganz- und halbtägigen gravimetrischen Gezeitenparameter von besonderer Bedeutung sind *tägliche* Variationen der Temperatur in der Umgebung von Federgravimetern. Solche Variationen wirken sich potentiell als relevante systematische Fehler besonders im täglichen Gezeitenband aus. Für die Temperaturmessdaten wurde daher ein Amplitudenspektrum berechnet (Abbildung D.19). Dieses zeigt an der Stelle 1Cpd eine lediglich schwache Spektrallinie, aus der für den Beobachtungszeitraum eine durchschnittliche tägliche Temperaturschwankung in der Messkammer mit einer Amplitude von kleiner als $0,01^{\circ}\text{C}$ abgeleitet werden kann (1Volt entspricht etwa $0,25^{\circ}\text{C}$). Die Frage, ob eine derartig geringe Temperaturschwankung überhaupt ein signifikantes gravimetrisches Signal hervorruft, kann nur über den Vergleich mit den Parametern der Partialtide S_1 auf der Grundlage von Jahresanalysen beantwortet werden.

Jedes Betreten der Messkammer bewirkt eine von der Dauer abhängige Zufuhr thermischer Energie. Geschieht dieses Betreten zu einer jeweils gleichen Tageszeit, wird eine künstliche tägliche Temperaturschwankung erzeugt. Aus diesem Grund wurden die Zeitpunkte, während derer Arbeiten *in* der Messkammer auszuführen waren, nach Möglichkeit hinsichtlich der Tageszeit stark variiert. Dennoch kann eine anthropogene Komponente in der zuvor beschriebenen (schwachen) täglichen Temperaturvariation nicht völlig ausgeschlossen werden. Aus diesem Grunde wurde zum Vergleich das Amplitudenspektrum eines Temperatur-Datensatzes berechnet, der einem Zeitraum zugeordnet ist, in dem die Messkammer nur ganz selten betreten wurde. Das Ergebnis ist in Abbildung D.20 nachgewiesen. Da der ausgewählte Zeitraum im Vergleich zur Gesamtbeobachtungsdauer eine deutlich geringere Anzahl von Datensätzen enthält, ist die Frequenzauflösung dieses Amplitudenspektrums gegenüber dem in Abbildung D.19 dargestellten Spektrum entsprechend geringer. Für den ausgewählten Zeitraum ist an der Stelle 1Cpd falls überhaupt, dann nur ein Peak bedeutend schwächerer Signifikanz festzustellen; dieser Sachverhalt könnte somit auf einen anthropogenen Ursprung der vorgenannten Störung an der 1Cpd -Frequenzstelle hindeuten.

Die Abbildung D.21 und die Abbildung D.22 verdeutlichen das Verhältnis der Amplituden der langperiodischen Temperaturschwankungen gegenüber der Amplitude der ganztägigen Temperaturschwankung ($5,6$ gegenüber $0,014$)

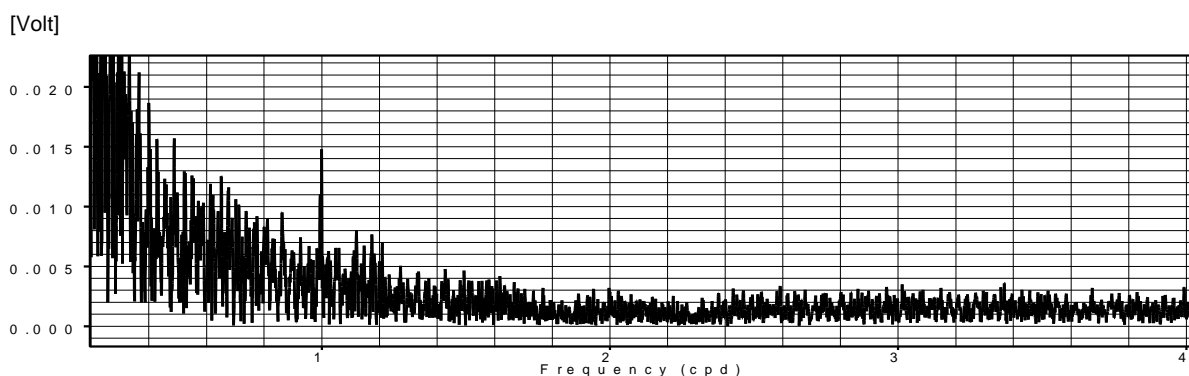


Abbildung D.19: Amplitudenspektrum der in Abbildung D.18 dargestellten Temperaturmessdaten
(Ausschnittsvergrößerung der Abbildung D.21)

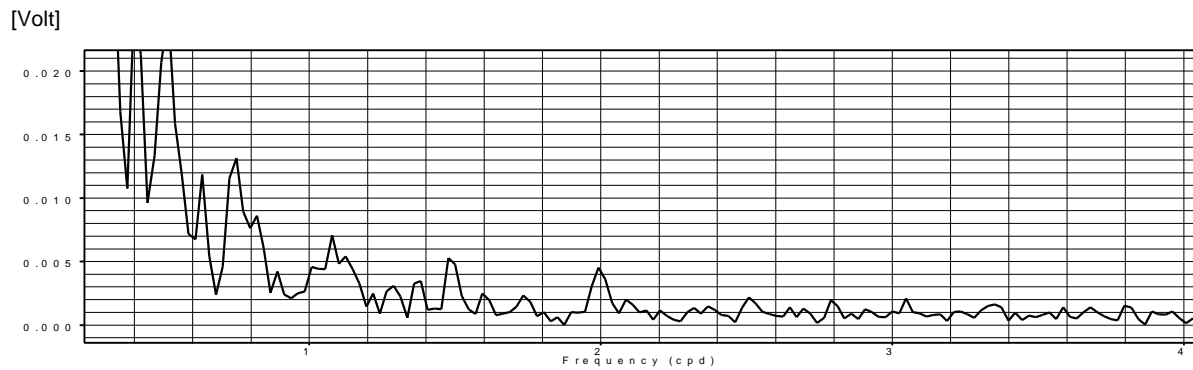


Abbildung D.20: Amplitudenspektrum der Temperaturmessdaten in einem Zeitraum von 36 Tagen (29.10.2001 bis 03.12.2001), in dem die Messkammer nur selten betreten wurde

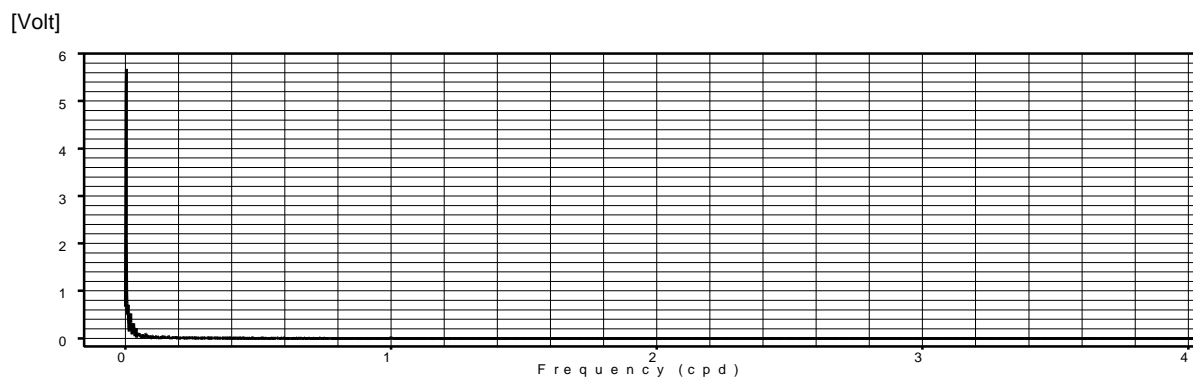


Abbildung D.21: Amplitudenspektrum der in Abbildung D.18 dargestellten Temperaturmessdaten

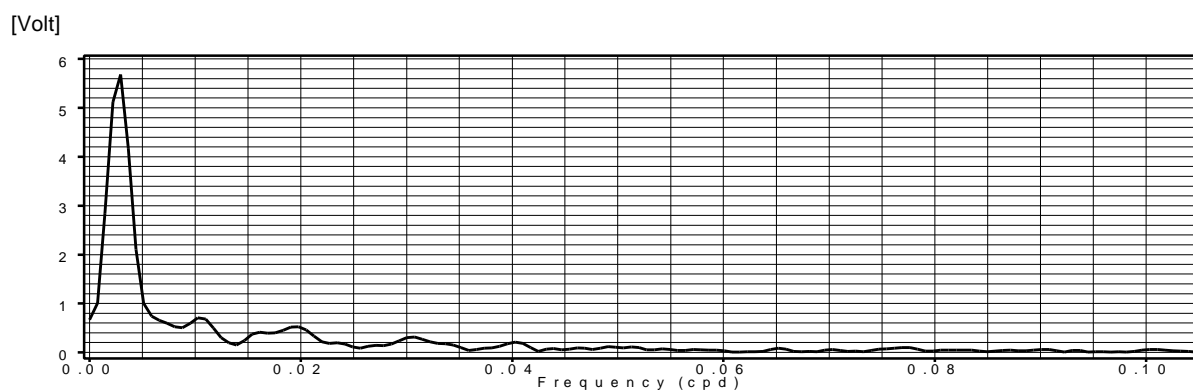


Abbildung D.22: Amplitudenspektrum der Temperaturmessdaten (Ausschnittsvergrößerung der Abbildung D.21). Der niederfrequente Bereich des Amplituden-Gesamtspektrums (eine Periode von 365 Tagen entspricht 0,0027 cpd)

6 Die Bestimmung des Registriermaßstabs

6.1 Vorbemerkung

Die hinreichend genaue Kenntnis des Registriermaßstabs ist eine der grundlegenden Voraussetzungen für die Bestimmung von gravimetrischen Gezeitenparametern, speziell von Amplitudenverhältnissen.

Der Registriermaßstab wird in zwei Schritten ermittelt:

- Zunächst werden am gravimetrischen Sensor geeignete Verstellungen vorgenommen (z. B. Änderungen der Lageeinstellung der Gravimeter-„Masse“ durch Verstellung der Messspindel oder Eingabe von Hilfskräften), danach wird die Verknüpfung der Einstellungsänderungen mit der zugeordneten Änderung des

Registriersignals bestimmt. Man erhält einen relativen Maßstab z. B. in der Dimension Registriersignaländerung in *Volt pro Skalenteil* der Messspindeldrehung.

- Es folgt die Umrechnung der vorgenommenen Einstellungsänderung in Schwereeinheiten mit Hilfe der Eichfunktion des Gravimeters; diese wird im Allgemeinen auf einer gravimetrischen Eichbasis ermittelt. Man erhält den „absoluten“ Registriermaßstab z. B. in der Dimension Volt pro μGal .

Im Hinblick auf die Aufgabenstellung und wegen der grundsätzlichen Bedeutung des Registriermaßstabs wird dessen Bestimmung im Folgenden so weit dokumentiert, dass im Bedarfsfalle Nachprüfungen der Berechnungsergebnisse jederzeit möglich sind oder dass auf der Grundlage später gewonnener Informationen metrologisch begründete Korrekturen vorgenommen werden können.

6.2 Gravimeter A206 – gefilterte Daten (Kanal 3)

6.2.1 Kugelleichung

Bezeichnungskonvention: Im Folgenden werden Spindelmaßstabsskalenteile durch SMskt und Mikrometerskalenteile durch MMskt abgekürzt.

Mit Hilfe einer kleinen Metallkugel, die auf dem Hebelarm des gravimetrischen Drehmomentsensors in zwei definierte Positionen eingestellt werden kann, wird ein Differenzdrehmoment erzeugt (Abbildung D.23). Der zugeordnete Messwertausschlag dient als Eichwert (Eichausschlag) und wird mit Hilfe von Messungen auf einer Eichbasis in einen Schwereunterschied umgerechnet [ASKANIA 1970]. Da das Gewicht der Kugel eine Funktion der örtlichen Schwere ist, ist der Eichwert ortsabhängig und daher auf die jeweilige Ortsschwere umzurechnen.

Entsprechend dem Prüfzeugnis der Askania GmbH vom 12.3.1970 beträgt der Eichwert des Gravimeters A206:

$$E_0 = 41369 \mu\text{Gal},$$

bezogen auf den Schwerewert

$$g_0 = 981,276 \text{Gal}.$$

Die Eichung wurde seinerzeit durchgeführt auf der Eichstrecke Harzburg-Torfhaus, entsprechend kann der relative systematische Fehler des Eichwertes E_0 angesetzt werden zu typisch $<0,1\%$.

Für die Umrechnung des Eichwertes auf einen anderen Schwerewert g_x gilt

$$E_x = E_0 \cdot \frac{g_x}{g_0} \quad (\text{D-1})$$

In der Station GeoObservatorium Odendorf beträgt die gemessene Schwere (Abschnitt A2)

$$g_{\text{OD}} = 981,084 \text{Gal},$$

daraus ergibt sich der örtliche Eichwert zu

$$E_{\text{OD}} = 41361 \mu\text{Gal}.$$

Am 13.11.2000 wurde aus 11 Messungen der mechanische Eichausschlag des Gravimeters A206 ermittelt zu

$$\Delta S_{\text{OD}} = (8,740 \pm 0,001) \text{SMskt}.$$

Da der Basiswert E_0 bereits vor über 30 Jahren ermittelt wurde, stellt sich die Frage nach seiner aktuellen Gültigkeit.

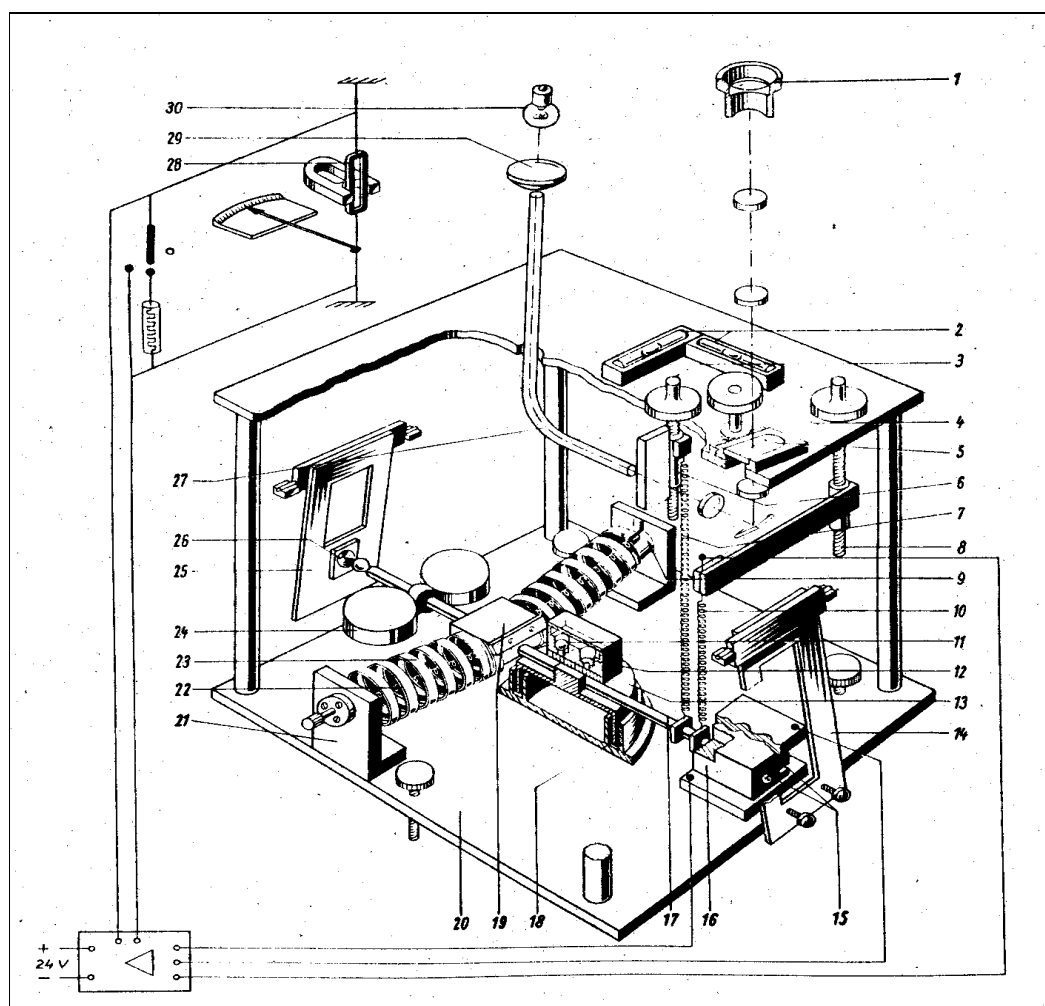


Abbildung D.23: Schematisierte Darstellung des Messprinzips des Askania-Gravimeters GS15.
 11 Kugel der Eicheinrichtung, 12 Bohrung der Eicheinrichtung, 4 Mikrometerantrieb, 6 Spindelmutter mit Präzisionsmaßstab, 7 Messfeder, 16 Gravimetermasse mit Kondensatorplatte

6.2.2 Die zeitliche Stabilität des Kugleichwertes

6.2.2.1 Vergleich des Eichausschlages DS_{OD} mit dem Wert des Prüfzeugnisses

Die Messbereichsfeder des Gravimeters wurde so eingestellt, dass die mittlere Stellung des Spindelmaßstabs 40 SMskt betrug (Mitte des Messbereichs von 0 bis 80 SMskt).

Für diese Spindelstellung weist das Prüfzeugnis vom 12.03.1970 unter Berücksichtigung der Schweredifferenz von 0,2‰ zwischen den Werten g_0 und g_{OD} den folgenden Wert aus:

$$\Delta S'_{OD} = 8,742 \text{ SMskt.}$$

Allerdings beziehen sich die Eichangaben des genannten Prüfzeugnisses auf eine Gravimeter-Innentemperatur von 40°C. Aus messtechnischen Gründen (Verringerungen der Temperaturdifferenz zwischen Innentemperatur und der örtlichen Umgebungstemperatur) wurde die Innentemperatur des Gravimeters jedoch auf 32,5°C eingestellt (Registrierung nur mit äußerem Thermostaten). Daraus ergibt sich eine Temperaturdifferenz von 7,5°C gegenüber der Referenztemperatur. Da der Kugelkäufer aus Messing mit einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $1,8 \cdot 10^{-5}$ besteht, führt eine Temperaturänderung von 7,5°C zu einer Verkürzung der Kugel-Basislänge von 0,14‰, entsprechend einer Verringerung des Eichausschlages auf

$$\Delta S''_{OD} = 8,741 \text{ SMskt.}$$

Dieser Wert, beruhend auf den instrumentellen Angaben für das Jahr 1970, weicht nur um etwa 0,1‰ ab von dem im Jahre 2000 experimentell ermittelten Wert

$$\Delta S_{OD} = (8,740 \pm 0,001) \text{ SMskt.}$$

6.2.2.2 Ergebnisse der Kugleichung in anderen Messstationen

Das Gravimeter A206 wurde erstmalig von Anfang Mai bis Mitte Juni 1970 in Longyearbyen, Spitzbergen in Betrieb genommen [BONATZ UND SCHÜLLER 1973]. Es folgten anschließend bis zum Herbst 1972 Beobachtungen in Bonn, Brüssel, Walferdange und Straßburg [BONATZ UND CHOJNICKI 1972]. Anschließend war das Gravimeter vom 04.01.1973 bis 29.01.1974 auf dem Archipel Kerguelen im Indischen Ozean eingesetzt [BONATZ UND SCHÜLLER 1976]. Danach wurden von März 1974 bis Dezember 1976 Messungen auf La Réunion ausgeführt [BONATZ UND WILMES 1977]. Die Beobachtungen in der südlichen Hemisphäre wurden abgeschlossen mit Messungen in Windhoek vom 24.01.1977 bis 03.11.1977 [BONATZ, SCHÜLLER UND WILMES 1980a]. Bis zur Inbetriebnahme des GeoObservatoriums Odendorf im Jahre 1997 folgen Langzeitregistrierungen mit unterschiedlichen Zielsetzungen in Bonn sowie unterhalb des oberen Staubeckens des Pumpspeicherkraftwerks Vianden, Luxemburg [SPERLING 1994].

Will man die Ergebnisse der in den einzelnen Stationen durchgeführten Kugleichungen, d.h. die Eichausschläge, mit dem in der Station Odendorf ermittelten Wert vergleichbar machen, so sind diese mit Hilfe der Gleichung (D-1) auf den Schwerewert Odendorf zu normieren. Das Ergebnis zeigt die nachfolgende Tabelle:

Station X	Breite j	DS_x [SMskt]	Schwere	DS'_x [SMskt]
Spitzbergen	78° 12' N	8,755 ± 0,004	982,96 (γ)	8,738
Bonn	50° 44' N	8,736 ± 0,002	981,117	8,736
Brüssel	50° 48' N	8,734 ± 0,004	981,120	8,734
Walferdange	49° 40' N	8,739 ± 0,003	980,980	8,740
Straßburg	48° 37' N	8,739 ± 0,002	980,910	8,741
Kerguelen	49° 21' S	8,738 ± 0,001	981,01 (γ)	8,739
La Réunion	20° 52' S	8,723 ± 0,001	978,61 (γ)	8,745
Windhoek	22° 20' S	8,722 ± 0,001	978,42 (γ)	8,746
Odendorf	50° 39' N	8,740 ± 0,001	981,084	8,740

Tabelle D.4: Eichungen des Gravimeter A206 an verschiedenen Stationen

Da an den mit γ bezeichneten Stationen die lokale Schwere unbekannt war, wurde diese unter Zuhilfenahme der Normschwere berechnet.

Die *normierten* Eichausschläge durch Kugelverlagerung $\Delta S'_x$ streuen gegenüber ihrem Mittelwert 8,7399 ± 0,0013 lediglich um *maximal* 0,7%. Der Mittelwert selber stimmt mit dem experimentell gewonnen Wert $\Delta S_{OD}=(8,740 \pm 0,001)$ SMskt signifikant überein. Eine sich andeutende geringfügige Vergrößerung der Eichausschläge in den tropischen Stationen La Réunion und Windhoek wäre zu erklären durch die weitgehende Entspannung der Messbereichsfeder des Gravimeters A206 zur Kompensation der relativ geringen Schwere in diesen Stationen. Schraubenfedern werden häufig mit abnehmender Zugbelastung etwas „weicher“.

6.2.3 Der Einfluss der Stellung der Messspindel auf den Eichausschlag DS

Im Prüfzeugnis zum Askania-Gravimeter GS15 Nr.206 vom 12.03.1970 ist eine Abhängigkeit des Eichausschlages ΔS von der Stellung der Messspindel mit einem Koeffizienten von 0,8% pro 10 SMskt (Spindel-Maßstabskalenteile) angegeben. Dieser Effekt müsste in den experimentell bestimmten (normierten) Werten $\Delta S'_x$ der Tabelle D.4 mit einem Betrag von über 2% erkennbar sein, da die Stellung der Messspindel bei den jeweils durchgeführten Kugleichungen um bis zu 30 SMskt variierte. Diese Variationen begründen sich rein praktisch dadurch, dass es nicht ganz einfach ist, die Messbereichsfeder bei geöffneten Gravimeter so einzustellen, dass später bei geschlossenem und geheiztem Gerät die gewünschte Stellung der Messspindel erreicht wird. Tatsächlich aber ist in Tabelle D.4 die genannte Abhängigkeit nicht zu erkennen. *Wie* überhaupt im einzelnen diese Abhängigkeit seinerzeit vom Hersteller festgestellt wurde, ist heute nicht mehr zu ermitteln, da die Produktion der Askania-Gravimeter bereits vor über zwanzig Jahren eingestellt wurde.

Ursache für den offensichtlich nicht vorhandenen Spindelstellungseffekt könnte sein, dass sich der vom Hersteller angegebene Koeffizient auf eine Sensortemperatur von 40°C bezieht, wohingegen die Messungen durchgängig bei einer Sensortemperatur von 32,5°C durchgeführt wurden [BONATZ 2004]. Die vorstehenden Überlegungen sind jedoch lediglich relevant für die *Interpretation* der während eines Zeitraumes von über dreißig Jahren ermittelten (mechanischen) Eichwerte ΔS_x . Im Rahmen der vorgegebenen Aufgabenstellung jedoch – unter anderem mit dem Ziel einer „absoluten“ Gravimetreichung mit einer Genauigkeit von relativ <1% – würde der

genannte Effekt ohnehin keine wesentliche Rolle spielen, da die der Kugleichung zugeordnete mittlere Stellung des Spindelmaßstabs (etwa 40,5 SMskt) nur etwa 4,5 SMskt von der Maßstabstellung im Registriermodus (etwa 36 SMskt) abweicht, entsprechend einer möglichen Korrektur von ΔS_{OD} um weniger als 0,4‰.

6.2.4 Die Umrechnung des Spindelmaßstabs in den Mikrometermaßstab

Ein mehrfaches Ausmessen des Abstands der Skalenstriche des Spindelmaßstabs im hier relevanten Bereich von 35 bis 46 SMskt ergab die Beziehung

$$1 \text{ Teilstrichintervall des Spindelmaßstabs entspricht } 100,63_3 \pm 0,02 \text{ MMskt.}$$

Der Eichausschlag bei der Kugelverlagerung beträgt

$$\Delta S_{OD} = 8,740 \text{ SMskt,}$$

entsprechend 8 SMskt plus 74 MMskt. Daraus ergibt sich

$$DS_{OD} = 879,06_4 \text{ MMskt.}$$

Mit $E_{OD} = 41361 \mu\text{Gal}$ folgt: 1 Intervall des Mikrometermaßstabs entspricht $47,051 \mu\text{Gal}$, d. h. der Skalenwert des Mikrometermaßstabs beträgt

$$k_1 = 47,051 \mu\text{Gal/MMskt.}$$

Dieser Angabe kann eine relative Genauigkeit von besser als 1‰ zugeordnet werden.

6.2.5 Die Bestimmung des Registriermaßstabs

Zur Korrektur der Instrumentendrift wurden in den Bedarfsfällen Spindelverstellungen durchgeführt. Diese Verstellungen waren einerseits zur Einhaltung des Messbereichs der A/D-Wandler notwendig (siehe auch Abschnitt B7.6), andererseits können sie zur Bestimmung des Registriermaßstabs verwendet werden. Die durchschnittliche Spindelverstellung betrug 5 MMskt. Zur Bestimmung des Registriermaßstabs wurden aus fehlertheoretischen Gründen lediglich Verstellungen = 4 MMskt verwendet. Die Einstellungs- und Ablesungsunsicherheit des Mikrometers beträgt etwa $\pm 0,1$ MMskt. Das entspricht bei einer Spindelverstellung um 5 MMskt einem relativen Betrag von 2%, entsprechend etwa 3% für die aus zwei Einstellungen bzw. Ablesungen gebildeten Intervallwerte.

Für den Zeitraum vom 25.11.00 bis zum 14.01.2003 ergibt sich aus 47 Sprüngen der gemittelter Registrierfaktor

$$k_{21} = (0,3790 \pm 0,0013) \text{ Volt/MMskt,}$$

mit $1/0,3790 = 2,6385 \text{ MMskt/Volt}$ erhält man umgerechnet

$$k_{31} = (124,14_4 \pm 0,43) \mu\text{Gal/Volt.}$$

Die Standardabweichungen dieser beiden Mittelwerte entsprechen einer relativen Abweichung von $\pm 3,5\%$. Die relative Abweichung eines einzelnen Sprungwerts beträgt 2,4%. Damit liegt sie im Bereich des zuvor durch Abschätzung ermittelten Betrags von etwa 3%. Die Streuungen der Einzelwerte gegenüber dem jeweiligen Mittelwert sollten daher einen im wesentlichen zufälligen Charakter haben.

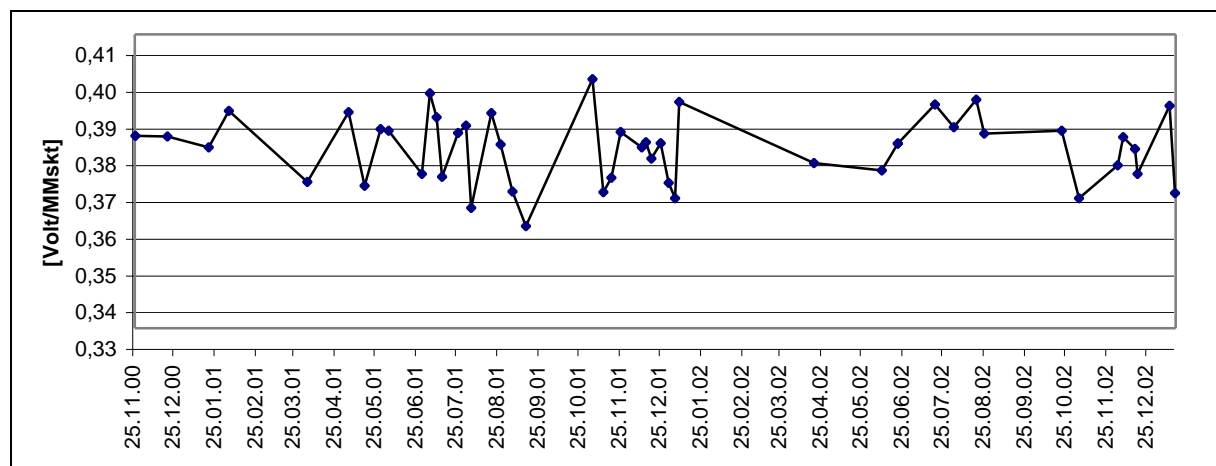


Abbildung D.24: Normierte Sprünghöhen zur Eichung des Gravimeter A206

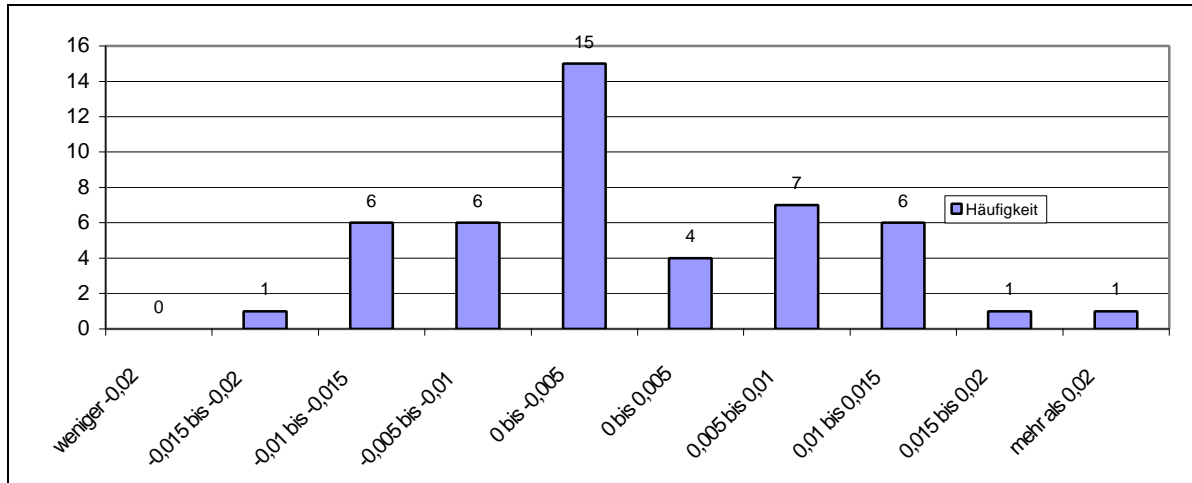


Abbildung D.25: Abweichungen der normierten Sprunghöhen vom Mittelwert

Es wurde versucht, die Einstell- und Ablesegenauigkeit der Spindelpositionen durch Montage eines von außen zu steuernden, hochunteretzten Spindelmotors zu verbessern. Gleichzeitig sollten Berührungen des Gravimeters durch diese Maßnahme während der Einstellprozesse vermieden werden. Außerdem wurden Verbesserungen durch Anbringung eines dünnen (elastischen) Mikrometerhebels von 20cm Länge erwartet (Abbildung D.26).



Abbildung D.26: Askania Gravimeter GS15 Nr. 206 mit Spindelmotor und Mikrometerhebel

Für den Zeitraum vom 25.11.00 bis zur Montage des Spindelmotors und des Mikrometerhebels am 01.02.2002 erhält man aus 31 Spindelverstellungen

$$k_{22} = (0,3787 \pm 0,0012) \mu\text{Gal}/\text{MMskt}, s = \pm 0,0079.$$

Für den Zeitraum danach (nach der Montage des Spindelmotors) aus 16 Spindelverstellungen

$$k_{23} = (0,3796 \pm 0,00067) \mu\text{Gal}/\text{MMskt}, s = \pm 0,0046.$$

Die Differenz $\Delta k = 0,0009$ ist nicht signifikant und beträgt relativ 2,4‰.

Der Vergleich der Standardabweichungen s für einen einzelnen Sprungwert zeigt eine Verbesserung von 2,1% auf 1,2%. Vorbehaltlich der Ergebnisse weiterer Eichungen können die getroffenen instrumentellen Maßnahmen also als durchaus sinnvoll eingestuft werden.

Erkennbar ist allerdings, dass das vorne genannte Ziel einer Eichgenauigkeit von 1‰ noch nicht ganz erreicht werden konnte.

Es wurden daher an drei Tagen unmittelbar im Anschluss an den Untersuchungszeitraum in Hin- und Rückmessung 20 Spindelverstellungen um jeweils 10,0 MMskt durchgeführt und zwar in Zeiträumen geringster zeitlicher Schwerevariationen.

Aus den zugeordneten Messwertausschlägen ergibt sich ein Registrierfaktor

$$k_{24} = (0,37824 \pm 0,0005) \text{ Volt/MMskt},$$

und daraus abgeleitet

$$k_{32} = (124,39 \pm 0,16) \mu\text{Gal/Volt}.$$

Da der Betrag von 124,39 mit 1,3‰ eine deutlich geringere relative Abweichung aufweist als der zuvor aus den Sprungkorrekturen abgeleitete Wert von 124,14 (relative Abweichung 3,5‰), wurde der Faktor $k_{32} = 124,39 \mu\text{Gal/Volt}$ als vorläufig zu verwendender Eichfaktor festgelegt.

6.3 Gravimeter A206 – ungefilterte Daten (Kanal 1)

Die Nutzung der ungefilterten Messwerte des Gravimeters A206 als Informationsquelle über den zeitlichen Verlauf oder den aktuellen Zustand des mikroseismisch induzierten gravimetrischen Störpegels erfordert auch für den Kanal 1 eine Bestimmung des Registriermaßstabs.

Wie in Abschnitt D6.2 nachgewiesen und begründet wurde, beträgt der vorläufige Registriermaßstab für die gefilterten Daten des Kanals 3

$$k_{32\text{-gefilterte Daten}} = (124,39 \pm 0,16) \mu\text{Gal/Volt},$$

entsprechend einer relativen Genauigkeit von $\pm 0,16/124,39 = 1,3\%$.

Die am 09.02.2003 und 11.02.2003 für die Bestimmung des Maßstabs der registrierten *gefilterten* Daten durchgeführten Spindelverstellungen, wurden gleichermaßen zur Bestimmung des Registriermaßstabs der *ungefilterten* Daten verwendet. Als Ergebnis wurde ermittelt

$$k_{32\text{-ungefilterte Daten}} = (270,16 \pm 0,38) \mu\text{Gal/Volt},$$

entsprechend einer Genauigkeit von $\pm 0,38/270,16 = 1,4\%$.

Dieses Ergebnis ist insofern bemerkenswert, als wegen der erheblich größeren Streuungen der ungefilterten minütlichen Mittelwerte im Vergleich zu den gefilterten Daten eine erhebliche Verschlechterung der statistischen relativen Standardabweichung des Faktors $k_{3\text{-ungefilterte Daten}}$ zu erwarten gewesen wäre. In beiden Fällen wurde jedoch eine relative Streuung von praktisch gleicher Größe ermittelt, woraus der Schluss zu ziehen ist, dass es im wesentlichen die Einstell- und Ableseunsicherheiten des Spindelmikrometers sind, die zu den Unsicherheiten der einzelnen Eichausschläge führen.

Das Maßstabsverhältnis zwischen den Registrierkanälen 1 (A206, ungefilterte Daten) und 3 (A206, gefilterte Daten) beträgt

$$270,16 : 124,39 = 2,1719 \pm 0,0041,$$

entsprechend einer relativen Genauigkeit von $\pm 0,0041/2,1719 = 1,9\%$. Aufgrund des Spannungsteilerverhältnisses des zur Signalfilterung verwendeten RC-Glieds in Verbindung mit den verwendeten Trennverstärkern (also auf Basis der verwendeten elektronischen Komponenten) ergibt sich ein Maßstabsverhältnis von 2,1739, d.h. die Differenz gegenüber dem durch Spindeleichung ermittelten Verhältnis beträgt nur 0,9‰, ist also nicht-signifikant.

Schlussfolgerung: Aus dem Vergleich der beiden ermittelten Maßstabsverhältnisse ist eine relative Unsicherheit der ermittelten Registrierfaktoren im Bereich von lediglich 1‰ abzuleiten.

6.4 Gravimeter LCR-G-xx1F

Die Eichungen wurden durch definierte Spindelverstellungen in Zeiträumen minimaler gravimetrischer Signalvariationen ausgeführt, und zwar, wie auch bei dem Gravimeter A206, jeweils innerhalb des Registrierbereichs von 0 bis 5 Volt. Bei einer eingestellten Registrierempfindlichkeit von etwa 10 Volt pro Umdrehung der Messspindel, entsprechend etwa $100 \mu\text{Gal/Volt}$, sind die Eichausschläge somit auf umgerechnet etwa $450 \mu\text{Gal}$ begrenzt (unter Beachtung eines Sicherheitsabstands zu den Grenzwerten des Registrierbereichs). Registriert

wurden die Signale des ungefilterten Signalausgangs des an das Gravimeter angeschlossenen Feedback-Systems AFB (siehe Abschnitt B3).

Einer deutlichen Verbesserung der Einstell- und Ablesegenauigkeit der Spindelpositionen konnte durch einen auf die Spindelscheibe aufgesetzten Hebeladapter erreicht werden (Abbildung D.27), der zusätzlich die Intensität von unvermeidbaren Gravimeterberührungen bei den Spindeleinstellungen auf ein Minimum reduziert und damit deren potentielle Wirkungen auf die Horizontierung des Geräts. Die Länge des dünnen (Durchmesser 2mm) und daher elastischen Hebels beträgt 20cm. Die Kopplung des Hebelaufsatzes mit der Spindelscheibe erfolgt ausschließlich über Reibungskräfte durch Nutzung des Aufsatzgewichts von ca. 100g.



Abbildung D.27: Spindelaufsatz für LCR-Gravimeter

Die Positionen der Messspindel wurden auf Koinzidenz zwischen jeweiligen Teilstrichen der Spindelscheibe und der Ableselinie eingestellt. Bei Verwendung des Spindelaufsatzes liegt die relative Abweichung eines einzelnen Eichausschlags bei Spindelverstellungen zwischen 30 und 40 Skalenteilen im Bereich von 2‰, ohne Spindelaufsatz erfahrungsgemäß mindestens um den Faktor 2 höher.

Im Zeitraum vom 28.07.2001 bis 20.05.2002 wurden insgesamt 33 Spindeleichungen durchgeführt, verteilt über den Bereich etwa einer vollen Spindelumdrehung.

Nach der Eich Tabelle des Herstellers beträgt der Intervallfaktor an der Zählwerksposition $k=1,0200\text{mGal/Spindelumdrehung}$ oder $k=10,200\mu\text{Gal/Skalenteil}$.

Daraus ergibt sich ein Registrierfaktor von

$$k_{3\text{-LCR-G-xxIF}}=105,49 \pm 0,03\mu\text{Gal/Volt.}$$

Die statistische relative Abweichung beträgt somit 0,3‰. Eine signifikante zeitliche Variation des Registrierfaktors ist nicht zu erkennen.

Am 6.02.2003 wurde nach einer längeren Beobachtungsunterbrechung infolge zwischenzeitlich durchgeführter gravimetrische Feldmessungen der Registrierfaktor aus 7 Eichsignalen erneut bestimmt. Das Ergebnis lautet

$$k_{3\text{-LCR-G-xxIF}}=105,49 \pm 0,08\mu\text{Gal/Volt.}$$

Wenn man die Existenz unbekannter relevanter systematischer Fehler einmal ausschließt, kann somit von einer Genauigkeit des Registriermaßstabs für die gravimetrischen Beobachtungen von besser als 1‰ ausgegangen werden. Es wurde zudem die hinreichende zeitliche Konstanz dieses Faktors nachgewiesen.

7 Gezeitenanalysen der Registrierdaten

Nach Bestimmung der jeweiligen Registriermaßstäbe können die registrierten Messdaten der Gezeitenanalyse zugeführt werden.

7.1 Gravimeter A206 – gefilterte Daten

Ergebnis der Gesamtanalyse der im Zeitraum vom 16.11.2000 bis 14.01.2003 beobachteten stündlichen Registrierdaten (8 Beobachtungsblöcke):

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File:  A206_5
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206   Scale: 124.39 µGal/Volt
Summary of observation data :
20001116110000...20001217110000  20010108120000...20010118140000
20010119190000...20010623200000  20010624110000...20010726    0
20010726 90000...20010904150000  20010905 30000...20011012150000
20011014210000...20020520 60000  20020520140000...20030114110000
Number of recorded days in total : 762.00

Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients
Estimation of noise by FOURIER-spectrum of residuals
0.1 cpd band99999.9990 nm/s**2      1.0 cpd band    0.4879 nm/s**2
2.0 cpd band    0.1733 nm/s**2      3.0 cpd band    0.0954 nm/s**2
4.0 cpd band    0.0563 nm/s**2      white noise     0.2860 nm/s**2
adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]           [deg]  [deg]
0.501370 0.911390 Q1    66.9579  1.14772  0.00413 -0.3197  0.2065
0.911391 0.947991 O1    349.8325 1.14810  0.00083  0.0683  0.0416
0.947992 0.981854 M1    28.2281  1.17794  0.00880  1.3206  0.4281
0.981855 0.998631 P1    162.9265 1.14916  0.00183 -0.2314  0.0915
0.998632 1.001369 S1     7.4498  2.22239  0.10989  2.1511  2.8331
1.001370 1.023622 K1   486.6757 1.13567  0.00060  0.1847  0.0301
1.023623 1.035379 TET1  5.0486  1.10175  0.05592  5.3111  2.9086
1.035380 1.057485 J1    27.9354 1.16576  0.01012  0.2914  0.4973
1.057486 1.071833 SO1   4.8280  1.21459  0.06350 -1.9134  2.9960
1.071834 1.470243 OO1  15.3528 1.17096  0.01655  1.7502  0.8100
1.470244 1.880264 2N2  10.5895 1.14624  0.00719  2.8407  0.3596
1.880265 1.914128 N2    67.6477 1.16935  0.00151  2.7348  0.0740
1.914129 1.950419 M2   358.8719 1.18770  0.00031  2.1420  0.0148
1.950420 1.984282 L2     9.8347  1.15153  0.01300  1.4507  0.6469
1.984283 2.002736 S2   167.5543 1.19189  0.00066  0.3395  0.0315
2.002737 2.451943 K2    45.7734 1.19782  0.00234  0.7088  0.1118
2.451944 3.381378 M3     4.0712  1.08067  0.01271 -0.6047  0.6738
3.381379 4.347615 M4     0.0585  1.34428  0.63789 -10.4919 27.1837
Standard deviation of weight unit: 14.478 nm/s**2

```

Tabelle D.5: Gesamtanalyse A206 - gefilterte Daten

Hinweis: Im Programmsystem ANALYZE 3.30 werden in der Spalte 4 die beobachteten Amplituden der Partikaltiden angegeben, bei ANALYZE 3.40 hingegen die theoretischen Amplituden.

Die Standardabweichungen der stündlichen Signalmittelwerte betragen für die gefilterten Daten des Gravimeters A206 im Durchschnitt des zweijährigen Beobachtungszeitraums etwa 0,0007 Volt oder umgerechnet etwa 0,09µGal (vergleiche Abbildung E.2). Dem steht nach der Gezeitenanalyse der Rohdaten eine Standardabweichung der Residuen von 1,4µGal gegenüber (siehe Tabelle D.5) mit maximalen Residuen bis zum Betrag von 8µGal. Der Beitrag der statistischen Unsicherheiten der stündlichen Mittelwerte zu den Residuen ist also ausgesprochen gering. Es kommt hinzu, dass der zeitliche Verlauf der Residuen, wie das Beispiel in Abbildung D.28 zeigt, ausgeprägte systematische, nicht-zufällige Strukturen enthält.

Die beobachteten Messdaten enthalten also offensichtlich signifikante Signalanteile, die durch den gewählten deterministischen Modellansatz (Programm ANALYZE des Programmsystems ETERNA – siehe Abschnitt B5) nicht erfasst und die daher in die Residuen übertragen werden.

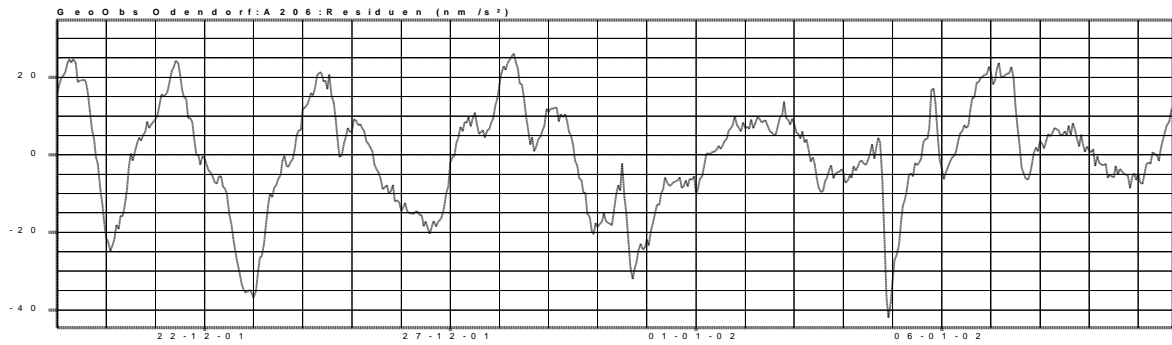


Abbildung D.28: Gravimeter A206 – gefilterte Daten.
Beispiel des zeitlichen Verlaufs der Residuen nach der Gezeitenanalyse

Das Residuenspektrum zeigt eine signifikante Amplitudenzunahme mit abnehmender Frequenz, mit einem Maximum im Bereich von 0,2 cpd (cycles per day) entsprechend einer Periode von 5 Tagen.

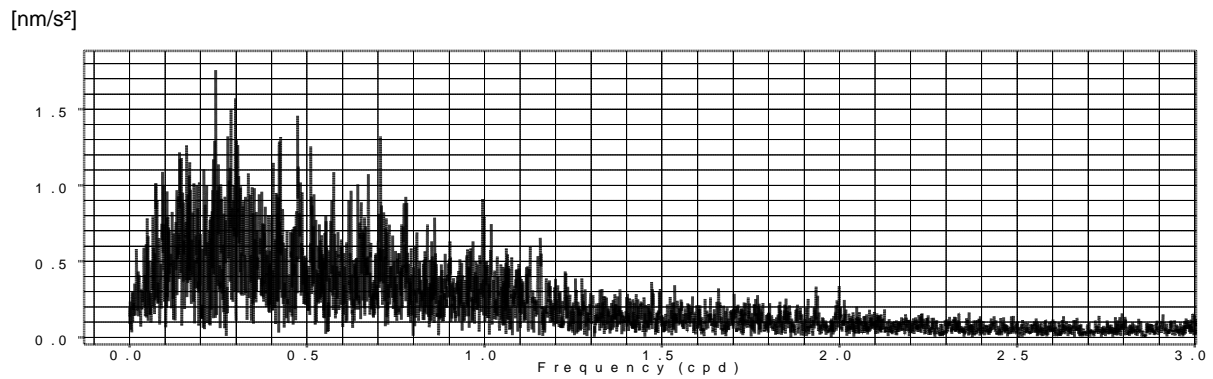


Abbildung D.29: Gravimeter A206 – gefilterte Daten, Amplitudenspektrum der Residuen nach der Gezeitenanalyse der Gesamtdaten

7.2 Gravimeter A206 – ungefilterte Daten

Gesamtanalyse der im Zeitraum vom 20.7.2001 bis 14.1.2003 beobachteten stündlichen Registrierdaten (3 Beobachtungsböcke):

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File:  A206K1_2
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206   Scale: 270.16 µGal/Volt

Summary of observation data :

20010720 90000...20010726      0  20010726 90000...20010904150000
20010904190000...20030114110000
Number of recorded days in total :   542.67

Numerical filter is  PERTZEV57   with 37 coefficients

Estimation of noise by FOURIER-spectrum of residuals
0.1 cpd band99999.9990 nm/s**2           1.0 cpd band   0.6027 nm/s**2
2.0 cpd band   0.3568 nm/s**2           3.0 cpd band   0.2388 nm/s**2
4.0 cpd band   0.2330 nm/s**2           white noise    0.4740 nm/s**2

adjusted tidal parameters :

from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.501370 0.911390 Q1    67.3064  1.15370  0.00477  -0.4808  0.2368
0.911391 0.947991 O1    350.6794 1.15088  0.00096  0.0103  0.0479
0.947992 0.981854 M1    27.8407  1.16178  0.00923  0.7882  0.4551
0.981855 0.998631 P1    163.4769 1.15305  0.00220  -0.3443  0.1095
0.998632 1.001369 S1     7.9161  2.36156  0.13518  11.7458  3.2783
1.001370 1.023622 K1    488.1681 1.13916  0.00071  0.0996  0.0355
1.023623 1.035379 TET1   5.5469  1.21049  0.06438  2.2256  3.0475
1.035380 1.057485 J1    27.4989  1.14755  0.01198  1.2053  0.5981
1.057486 1.071833 SO1    5.1141  1.28658  0.07293  -5.4012  3.2483
1.071834 1.470243 OO1   15.3712  1.17238  0.01780  2.6663  0.8700
1.470244 1.880264 2N2   10.5216  1.13888  0.01414  3.1960  0.7115
1.880265 1.914128 N2    67.7500  1.17111  0.00299  2.6173  0.1463
1.914129 1.950419 M2   359.3029 1.18913  0.00060  2.2466  0.0290
1.950420 1.984282 L2     9.7529  1.14196  0.02381  -0.4546  1.1944
1.984283 2.002736 S2   167.9884 1.19497  0.00128  0.2966  0.0614
2.002737 2.451943 K2    46.0969  1.20629  0.00443  0.7708  0.2105
2.451944 3.381378 M3     4.0927  1.08638  0.03032  1.7020  1.5991
3.381379 4.347615 M4     0.3349  7.69565  2.51568  147.0444 18.7295

Standard deviation of weight unit:   19.304 nm/s**2
    
```

Tabelle D.6: Gesamtanalyse A206 - ungefilterte Daten

Für die *ungefilterten* Daten des Gravimeters A206 liegen die Standardabweichung der stündlichen Signalmittelwerte vom Beginn der Aufzeichnungen bis zum Ende des untersuchten Beobachtungszeitraums im Durchschnitt bei etwa 0,005 Volt oder umgerechnet etwa 1,35 µGal (vergleiche Abbildung E.2), demnach auf dem Niveau der Standardabweichung der Residuen von ca. 1,4 µGal nach der Analyse der gefilterten Daten (siehe vorhergehenden Abschnitt). Dies begründet den Versuch einer Gezeitenanalyse der ungefilterten Daten, deren Ergebnisse in der Tabelle D.6 dokumentiert sind.

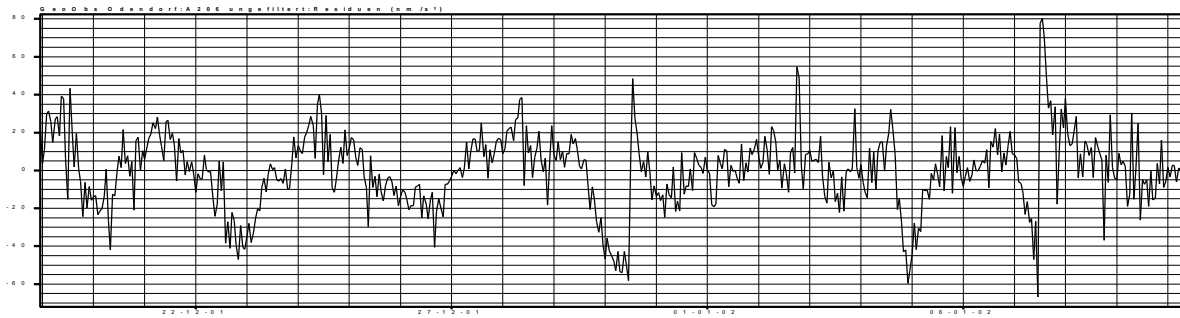


Abbildung D.30: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten. Beispiel des zeitlichen Verlaufs der Residuen nach der Gezeitenanalyse

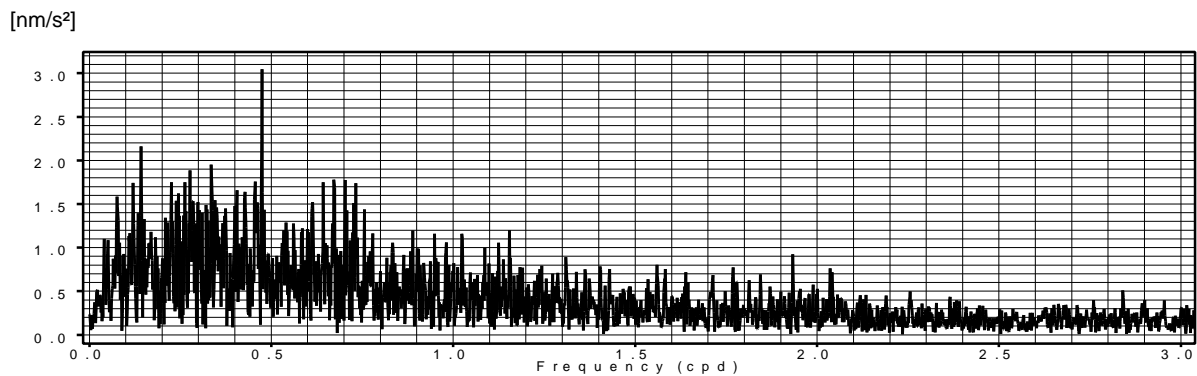


Abbildung D.31: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten, Amplitudenspektrum der Residuen nach der Gezeitenanalyse der Gesamtdaten

Ähnlich wie in Abbildung D.29 tritt eine Amplitudenzunahme mit abnehmender Frequenz auf, zusätzlich sind in Abbildung D.30 schwach ausgeprägte Strukturen zu erkennen, bei einem allerdings erhöhten Grundrauschen, welches sich durch die im Vergleich mit Abbildung D.29 fehlende Filterung erklären lässt.

7.3 Gravimeter LCR-G-xx1F

Tabelle D.7 zeigt die Gesamtanalyse der im Zeitraum vom 26.7.2001 bis 20.5.2002 beobachteten stündlichen Registrierdaten (3 Beobachtungsböcke).

Die durchschnittlichen Standardabweichung der stündlichen Signalmittelwerte vom Beginn der Aufzeichnungen am 26.07.2001 bis zum Ende des untersuchten Beobachtungszeitraums am 20.05.2002 liegen für das Gravimeter LCR-G-xx1F im Durchschnitt bei etwa 0,0004 Volt oder umgerechnet etwa 0,04 μGal , wobei die Standardabweichung der Residuen nach der Gezeitenanalyse hier bei ca. 1,1 μGal liegt. Zwar finden sich bei dem Gravimeter LCR-G-xx1F erwartungsgemäß die niedrigeren Standardabweichungen, es wiederholt sich allerdings der schon beim gefilterten Ausgang des Gravimeter A206 beobachtete Sachverhalt einer Amplitudenzunahme mit abnehmender Frequenz; allerdings liegt das Maximum nun (bei größerer Bandbreite) im Bereich von 0,6 cpd entsprechend einer Periode von 1,7 Tagen. Darüber hinaus sind signifikante Strukturen nicht zu erkennen. Auffällig ist, dass sich die Maximalamplituden der Spektren (Abbildung D.29, Abbildung D.31 und Abbildung D.33) nicht allzu sehr unterscheiden. Die Modellanpassungsfehler resultieren bei beiden Gravimetern (unterschiedlichen Typs) im wesentlichen aus nicht modellierten Effekten im Periodenbereich größer als ein Tag.

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File:   LCR-G-XX1F_2
LaCoste GRAVIMETER LCR-G-xx1F           Scale: 105.49 µGal/Volt

Summary of observation data :
20010726 90000...20011012150000  20011015 20000...20020409 50000
20020412220000...20020520 60000
Number of recorded days in total :   291.83

Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients

Estimation of noise by FOURIER-spectrum of residuals
0.1 cpd band 99999.9990 nm/s**2           1.0 cpd band   0.4529 nm/s**2
2.0 cpd band   0.2681 nm/s**2           3.0 cpd band   0.2152 nm/s**2
4.0 cpd band   0.2229 nm/s**2           white noise    0.3379 nm/s**2

adjusted tidal parameters :

from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.501370 0.911390 Q1   66.6767  1.14291  0.00390  -0.3080  0.1957
0.911391 0.947991 O1   349.5108 1.14705  0.00081  0.0693  0.0405
0.947992 0.981854 NO1  27.7721  1.15892  0.00801  0.1828  0.3957
0.981855 0.998631 P1   162.9213 1.14913  0.00177  0.3173  0.0886
0.998632 1.023622 S1K1 485.4177 1.13274  0.00058  0.2368  0.0293
1.023623 1.054746 J1    27.7562  1.15829  0.00929  0.7069  0.4598
1.054747 1.470243 OO1   14.6922  1.12059  0.01500 -1.5549  0.7668
1.470244 1.880264 2N2   10.7440  1.16296  0.01079  3.9896  0.5313
1.880265 1.914128 N2    67.5956  1.16844  0.00236  2.8666  0.1156
1.914129 1.950419 M2   358.6261 1.18689  0.00049  2.2126  0.0239
1.950420 1.984282 L2    9.9687  1.16722  0.02288  0.5278  1.1229
1.984283 2.002738 S2   167.5041 1.19153  0.00106  0.8128  0.0510
2.002739 2.451943 K2    45.3236  1.18606  0.00383  1.2902  0.1850
2.451944 3.381378 M3    4.0951  1.08702  0.03006  1.8150  1.5834
3.381379 4.347615 M4    0.3337  7.66898  2.65460-177.9888 19.8299

Standard deviation:                11.026 nm/s**2
    
```

Tabelle D.7: Gesamtanalyse Gravimeter LCR-G-xx1F

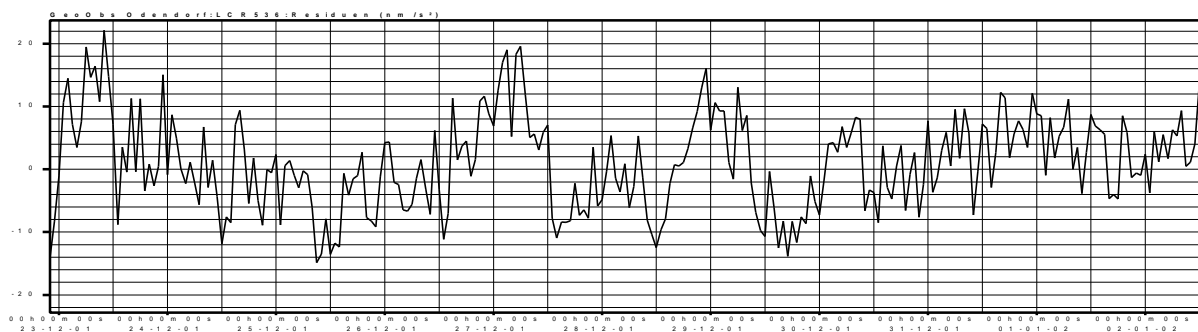


Abbildung D.32: Gravimeter LCR-G-xx1F – Beispiel des zeitlichen Verlaufs der Residuen nach der Gezeitenanalyse

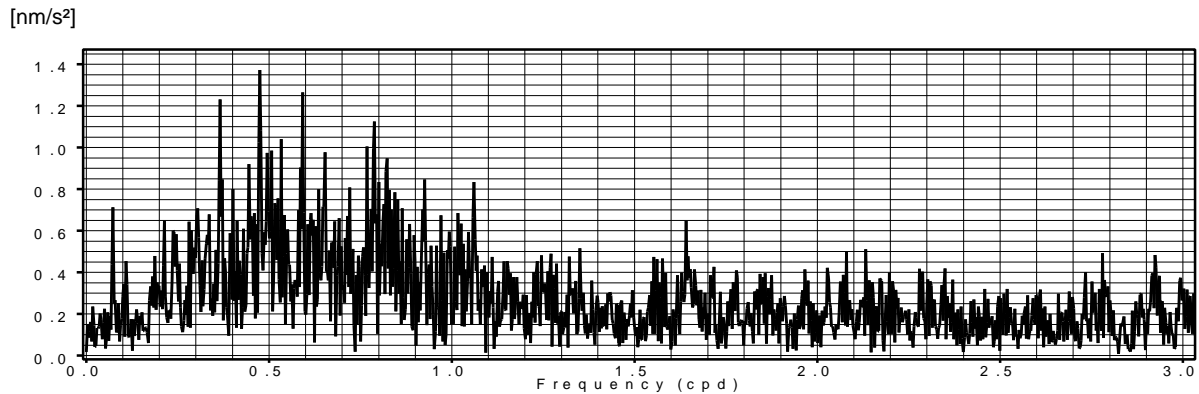


Abbildung D.33: Gravimeter LCR-G-xx1F – Amplitudenspektrum der Residuen nach der Gezeitenanalyse

8 Maßstabsüberprüfungen durch Gegenüberstellung von Analyseergebnissen

Zum Zwecke einer Überprüfung der bisher ermittelten Registriermaßstäbe werden für die Gravimeter LCR-G-xx1F und A206 (gefilterte Daten) die Ergebnisse der Gezeitenanalysen der lediglich sprungkorrigierten Rohdaten aus Abschnitt D7.1 und D7.2 einander gegenübergestellt. Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird auch bei Gravimeter A206 (Datenlänge über zwei Jahre) auf die Berücksichtigung der langperiodischen Tiden verzichtet (diese werden als Driftsignale in der Analyse berücksichtigt).

Tide	LCR-G-xx1F	A206 (gefiltert)	Faktor	Bemerkung
O ₁	1,14705	1,14810	0,99909	
P ₁	1,14913	1,14916	0,99997	
S ₁ ,K ₁ ,K ₁	<u>S₁K₁</u> 1,13274	K ₁ 1,13567	-----	nicht vergleichbar
M ₂	1,18689	1,18770	0,99932	
S ₂	1,19153	1,19189	0,99970	
Mittel			0,99952	

Tabelle D.8: LCR-G-xx1F/A206 Maßstabsverhältnisse für die Hauptpartialtiden

Es ist lediglich eine mittlere (systematische) Maßstabsdifferenz von 0,5‰ festzustellen; dieser Betrag liegt unterhalb des angestrebten Genauigkeitsgrenzwerts von 1‰ für den Registriermaßstab – siehe Aufgabenstellung Abschnitt B2.4.

9 Gravimeter A206 – Vergleich der Ergebnisse der Analysen der gefilterten und der ungefilterten Daten

Trotz der Vergrößerung der durchschnittlichen Standardabweichungen der stündlichen Signalwerte von umgerechnet $\pm 0,09 \mu\text{Gal}$ bei den gefilterten Daten auf $\pm 1,3 \mu\text{Gal}$ bei den ungefilterten Daten vergrößern sich nach der Gezeitenanalyse die Standardabweichungen der Gewichtseinheit (Modellanpassung) lediglich von $\pm 1,45 \mu\text{Gal}$ ($14,5 \text{ nm/s}^2$) auf $\pm 1,93 \mu\text{Gal}$ ($19,3 \text{ nm/s}^2$), das heißt die Güte der Analyseergebnisse hängt weniger von der Signalauflösung als vielmehr von den offensichtlich verbleibenden Modellfehlern ab.

Bildet man für die Hauptpartialtiden die Verhältnisse der Amplitudenquotienten, so zeigt sich ein systematischer mittlerer Maßstabsunterschied von 2,5‰; diese Differenz liegt durchaus im Rahmen dessen, was man auf Grund der gegebenen statistischen Unsicherheiten der Maßstabsfaktoren für die Registrierungen der gefilterten und der ungefilterten Schwerevariationen erwarten kann (siehe Abschnitt D6.2.5 und Abschnitt D6.3).

Partialtide	Amplitude [μGal]	Verhältnis der Amplitudenquotienten
O_1	30,47	1,0024
P_1	14,18	1,0034
K_1	42,85	1,0031
M_2	30,22	1,0012
S_2	14,06	1,0026
		Mittel: 1,0025

Tabelle D.9: Verhältnisse der Amplitudenquotienten der gefilterten und der ungefilterten Daten von A206

Stellt man nun einmal die Standardabweichungen der berechneten Gezeitenparameter einander gegenüber (Tabelle D.10), so ergibt sich der folgende Sachverhalt:

- Die Verhältniszahlen der Standardabweichungen der Amplitudenquotienten d und der Phasenverschiebungen φ_a betragen im gantztägigen Gezeitenbereich $1,15 \pm 0,02$, bzw. $1,13 \pm 0,02$. Diese lediglich geringe Vergrößerung der Standardabweichungen der Gezeitenparameter nach der Gezeitenanalyse der *ungefilterten* Daten ließe sich eventuell als Folge der im Vergleich geringeren Länge des Datensatzes erklären (762 Tage bei den gefilterten Daten, 542 Tage bei den ungefilterten Daten).
- Für die halbtägigen Partialtiden ergeben sich hingegen die Verhältniszahlen $1,92 \pm 0,02$ bzw. $1,93 \pm 0,02$. Das heißt, im halbtägigen Gezeitenband wirkt sich die bei den ungefilterten Daten auftretende vergrößerte statistische Unsicherheit der stündlichen Signalwerte wesentlich und signifikant stärker aus, als im gantztägigen Gezeitenband. Dies lässt sich, vorbehaltlich der Ergebnisse weitergehender Untersuchungen, so interpretieren, dass die durch den Modellansatz der Gezeitenanalyse nicht erfassten Störsignale im gantztägigen Bereich stärker sind als im halbtägigen Bereich. Lediglich der Vollständigkeit halber sei darauf hingewiesen, dass für die dritteltägige Tide M_3 die Verhältniszahlen 2,39 und 2,37 lauten.

Partialtide	theoretische Amplitude [μGal]	A206 gefiltert md	A206 ungefiltert md	A206 gefiltert $m^2 a$	A206 ungefiltert $m^2 a$
Q_1	5,83	0,00413	0,00477	0,2065	0,2368
O_1	30,47	0,00083	0,00096	0,0416	0,0479
M_1	2,40	0,00880	0,00923	0,4281	0,4551
P_1	14,18	0,00183	0,00220	0,0915	0,1095
S_1	0,34	0,10989	0,13518	2,8331	3,2783
K_1	42,85	0,00060	0,00071	0,0301	0,0355
Tet_1	0,46	0,05592	0,06435	2,9086	3,0475
J_1	2,40	0,01012	0,01198	0,4973	0,5981
SO_1	0,40	0,06350	0,07293	2,9960	3,2483
OO_1	1,31	0,01655	0,01780	0,8100	0,8700
$2N_2$	0,92	0,00719	0,01414	0,3596	0,7115
N_2	5,79	0,00151	0,00299	0,0740	0,1463
M_2	30,22	0,00031	0,00060	0,0148	0,0290
L_2	0,85	0,01300	0,02381	0,6469	1,1944
S_2	14,06	0,00066	0,00128	0,0315	0,0614
K_2	3,82	0,00234	0,00443	0,1118	0,2105
M_3	0,38	0,01271	0,03032	0,6738	1,5991
M_4	0,004	0,63789	2,51568	27,1837	18,7295

Tabelle D.10: Die Standardabweichungen der berechneten Gezeitenparameter

10 Ergebnisse einer Kurzzeitregistrierung mit dem Gravimeter LCR-G-xx2F

Im Rahmen einer messtechnischen Überprüfung des mit einem SRW-Rückkopplungssystem ausgerüsteten Gravimeters LCR-G-xx2F wurden mit diesem Instrument sechswöchige Messwertregistrierungen ausgeführt. Die Ergebnisse der Gezeitenanalyse und deren Bewertung sind im Abschnitt F1.9.7 nachgewiesen.

11 ANALYZE3.30 und ANALYZE3.40, Ergebnisgegenüberstellung

Die Homogenität der Maßstabsverhältnisse der aus den Daten LCR-G-xx1F und A206 (gefilterte Daten) berechneten Amplituden der Hauptpartialtiden (siehe Abschnitt D8, Tabelle D.8) wirft die Frage nach einem möglichen Einfluss der Version des gewählten Analyseverfahren ANALYZE auf. Dies insbesondere im Hinblick auf den Sachverhalt, dass auf der Grundlage der berechneten Standardabweichungen für die Amplitudenfaktoren der Hauptpartialtiden die Variationen der Maßstabsverhältnisse als größer, mindestens aber als uneinheitlicher zu erwarten gewesen wären. Es wurden daher jeweils identische Datensätze einmal mit dem Programm ANALYZE in der Version Eterna 3.40 und einmal mit der Version Eterna 3.30 ausgewertet.

Vergleicht man die Ergebnisse, so ist folgender Sachverhalt festzustellen:

- Als Verhältnis der Standardabweichungen Eterna 3.30/Eterna 3.40 ergibt sich mit einer geringen Streuung sowohl für die Standardabweichungen der Amplitudenfaktoren als auch für die der Phasendifferenzen der Faktor 0,67.
- Die berechneten Gezeitenparameter sind identisch für die Amplitudenfaktoren und praktisch identisch für die Phasenverschiebungen. Entsprechend sind die aus den Residuen abgeleiteten Standardabweichungen unabhängig von der gewählten Version des Analyseverfahrens Eterna.

Mit Bezug auf die für die Hauptpartialtiden festgestellte Stabilität der Maßstabsverhältnisse LCR-G-xx1F/A206 (gefilterte Daten) ist somit die Schlussfolgerung möglich, dass die mit der Version ANALYZE 3.30 bestimmten Standardabweichung der Gezeitenparameter die wahrscheinlich realistischeren sind. Wie bereits zuvor wird daher auch im folgenden diese Version als Standard verwendet, für den Übergang nach Eterna 3.40 sind die berechneten Standardabweichungen der Gezeitenparameter lediglich mit dem Faktor 1,5 zu multiplizieren.

Eine theoretische Untersuchung sowie eine Diskussion und Bewertung der den beiden Analyseversionen zugrunde liegenden stochastischen Modelle unterbleibt im Hinblick auf die Aufgabenstellung.

Es wird noch einmal darauf hingewiesen, dass in den Spalten 4 der Ergebnistabellen in der Version ANALYZE 3.40 die theoretischen Partialtidenamplituden, in der Version ANALYZE 3.30 die beobachteten (geschätzten) Amplituden angegeben werden.

```

Program ANALYZE, version 3.40 970921           File:  LCR-G-XX1F_2
20010726...20020520      3 blocks. Recorded days in total:  291.833
Numerical filter is  PERTZEV57   with 37 coefficients
LaCoste GRAVIMETER LCR-G-xx1F      Used scale: 105,49 µGal/Volt
adjusted tidal parameters :
from      to      wave      ampl.  ampl.fac.  stdv.  ph.  lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]
0.501370  0.911390  Q1      58.3395  1.14291  0.00600  -0.3088  0.3010
0.911391  0.947991  O1      304.7045  1.14705  0.00125  0.0684  0.0622
0.947992  0.981854  M1      23.9639  1.15892  0.01232  0.1817  0.6087
0.981855  0.998631  P1      141.7784  1.14913  0.00273  0.3161  0.1362
0.998632  1.023622  S1K1    428.5340  1.13274  0.00089  0.2356  0.0451
1.023623  1.054746  J1      23.9631  1.15829  0.01429  0.7056  0.7072
1.054747  1.470243  O01     13.1111  1.12059  0.02308  -1.5565  1.1795
1.470244  1.880264  2N2     9.2385  1.16296  0.01529  3.9878  0.7532
1.880265  1.914128  N2      57.8509  1.16844  0.00334  2.8646  0.1639
1.914129  1.950419  M2     302.1566  1.18689  0.00070  2.2105  0.0338
1.950420  1.984282  L2      8.5405  1.16722  0.03243  0.5255  1.5918
1.984283  2.002738  S2     140.5792  1.19153  0.00150  0.8103  0.0723
2.002739  2.451943  K2      38.2137  1.18606  0.00543  1.2877  0.2622
2.451944  3.381378  M3       3.7673  1.08702  0.04743  1.8117  2.4989
3.381379  4.347615  M4       0.0435  7.66898  3.87400-177.9930  28.9389
Standard deviation of weight unit:  11.026  nm/s**2

```

Tabelle D.11: Gesamtanalyse Gravimeter LCR-G-xx1F, Eterna-Version 3.40


```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File:   LCR-G-XX1F_2
Summary of observation data :
20010726 90000...20011012150000 20011015 20000...20020409 50000
20020412220000...20020520 60000
Number of recorded days in total : 291.83
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients
LaCoste GRAVIMETER LCR-G-xx1F      Used scale: 105,49 µGal/Volt
adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]
0.501370 0.911390 Q1   66.6767  1.14291  0.00390  -0.3080  0.1957
0.911391 0.947991 O1   349.5108 1.14705  0.00081  0.0693  0.0405
0.947992 0.981854 NO1  27.7721  1.15892  0.00801  0.1828  0.3957
0.981855 0.998631 P1   162.9213 1.14913  0.00177  0.3173  0.0886
0.998632 1.023622 S1K1 485.4177  1.13274  0.00058  0.2368  0.0293
1.023623 1.054746 J1   27.7562  1.15829  0.00929  0.7069  0.4598
1.054747 1.470243 O01  14.6922  1.12059  0.01500  -1.5549 0.7668
1.470244 1.880264 2N2  10.7440  1.16296  0.01079  3.9896  0.5313
1.880265 1.914128 N2   67.5956  1.16844  0.00236  2.8666  0.1156
1.914129 1.950419 M2  358.6261 1.18689  0.00049  2.2126  0.0239
1.950420 1.984282 L2   9.9687  1.16722  0.02288  0.5278  1.1229
1.984283 2.002738 S2  167.5041 1.19153  0.00106  0.8128  0.0510
2.002739 2.451943 K2  45.3236  1.18606  0.00383  1.2902  0.1850
2.451944 3.381378 M3   4.0951  1.08702  0.03006  1.8150  1.5834
3.381379 4.347615 M4   0.3337  7.66898  2.65460-177.9888 19.8299
Standard deviation of weight unit: 11.026 nm/s**2
    
```

Tabelle D.12: Gesamtanalyse Gravimeter LCR-G-xx1F, Eterna-Version 3.30

```

Program ANALYZE, version 3.40 970921           File:   A206_5
20001116...20030114      8 blocks. Recorded days in total: 762.000
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206      Used scale: 124,39 µGal/Volt
adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]
0.501370 0.911390 Q1   58.3397  1.14772  0.00614  -0.3205  0.3070
0.911391 0.947991 O1   304.7055 1.14810  0.00124  0.0673  0.0618
0.947992 0.981854 M1   23.9640  1.17794  0.01308  1.3195  0.6363
0.981855 0.998631 P1  141.7788  1.14916  0.00273  -0.2326  0.1360
0.998632 1.001369 S1   3.3522  2.22239  0.16335  2.1499  4.2114
1.001370 1.023622 K1  428.5352  1.13567  0.00089  0.1835  0.0447
1.023623 1.035379 TET1  4.5824  1.10175  0.08313  5.3097  4.3236
1.035380 1.057485 J1  23.9632  1.16576  0.01504  0.2900  0.7393
1.057486 1.071833 S01  3.9750  1.21459  0.09439  -1.9150 4.4536
1.071834 1.470243 O01  13.1113  1.17096  0.02460  1.7486  1.2041
1.470244 1.880264 2N2   9.2385  1.14624  0.01081  2.8388  0.5405
1.880265 1.914128 N2   57.8509  1.16935  0.00227  2.7328  0.1113
1.914129 1.950419 M2  302.1564 1.18770  0.00046  2.1398  0.0222
1.950420 1.984282 L2   8.5405  1.15153  0.01954  1.4483  0.9722
1.984283 2.002736 S2  140.5791 1.19189  0.00099  0.3371  0.0474
2.002737 2.451943 K2  38.2140  1.19782  0.00351  0.7063  0.1680
2.451944 3.381378 M3   3.7673  1.08067  0.01885  -0.6079 0.9994
3.381379 4.347615 M4   0.0435  1.34428  0.97681 -10.4961 41.6265
Standard deviation of weight unit: 14.478 nm/s**2
    
```

Tabelle D.13: Gesamtanalyse Gravimeter A206 gefilterte Daten, Eterna-Version 3.40

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File:  A206_5
Summary of observation data :
20001116...20030114      8 blocks. Recorded days in total:   762.000
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206      Used scale: 124,39 µGal/Volt
adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]    [cpd]    [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]
0.501370 0.911390 Q1   66.9579  1.14772  0.00413  -0.3197  0.2065
0.911391 0.947991 O1  349.8325  1.14810  0.00083  0.0683  0.0416
0.947992 0.981854 M1   28.2281  1.17794  0.00880  1.3206  0.4281
0.981855 0.998631 P1  162.9265  1.14916  0.00183  -0.2314  0.0915
0.998632 1.001369 S1    7.4498  2.22239  0.10989  2.1511  2.8331
1.001370 1.023622 K1  486.6757  1.13567  0.00060  0.1847  0.0301
1.023623 1.035379 TET1  5.0486  1.10175  0.05592  5.3111  2.9086
1.035380 1.057485 J1   27.9354  1.16576  0.01012  0.2914  0.4973
1.057486 1.071833 SO1   4.8280  1.21459  0.06350  -1.9134  2.9960
1.071834 1.470243 OO1  15.3528  1.17096  0.01655  1.7502  0.8100
1.470244 1.880264 2N2  10.5895  1.14624  0.00719  2.8407  0.3596
1.880265 1.914128 N2   67.6477  1.16935  0.00151  2.7348  0.0740
1.914129 1.950419 M2  358.8719  1.18770  0.00031  2.1420  0.0148
1.950420 1.984282 L2    9.8347  1.15153  0.01300  1.4507  0.6469
1.984283 2.002736 S2  167.5543  1.19189  0.00066  0.3395  0.0315
2.002737 2.451943 K2   45.7734  1.19782  0.00234  0.7088  0.1118
2.451944 3.381378 M3    4.0712  1.08067  0.01271  -0.6047  0.6738
3.381379 4.347615 M4    0.0585  1.34428  0.63789 -10.4919  27.1837
Standard deviation of weight unit:   14.478 nm/s**2

```

Tabelle D.14: Gesamtanalyse Gravimeter A206 gefilterte Daten, Eterna-Version 3.30

E Die Erkennung und Berücksichtigung von Störsignalen

1 Die Filterung gravimetrischer Signale

Durch den Prozess der Datenfilterung werden von einem Gesamtsignal bestimmte Signalanteile abgespalten (Hochpass-, Tiefpass-, Bandpass-Filterung). Dieses kann potentiell zu einem relevanten Informationsverlust führen, wenn nämlich bei hochaufgelösten Beobachtungen komplexer physikalischer Prozesse *ausschließlich* gefilterte Daten erzeugt werden und dementsprechend Eigenschaften und Strukturen des Ursprungssignals unbekannt bleiben.

Dieser Sachverhalt tritt bei Beobachtungen der Schwere dann auf, wenn Gravimeter lediglich mit einem Ausgang für gefilterte Signale ausgestattet sind. Erschwerend kommt in solchen Fällen hinzu, dass der Nutzer häufig keinen Einfluss auf die Filtereigenschaften nehmen kann, welche gegebenenfalls den spezifischen Beobachtungsbedingungen anzupassen wären.

Die Problematik des Sachverhaltes lässt sich im Falle des eingesetzten Gravimeters A206 verdeutlichen:

In diesem Gerät dient ein nicht-astasiertes Hebelsystem als gravimetrischer Sensor (siehe Abbildung D.23). Konstruktionsbedingt liegt die Eigenperiode dieses Sensors im Bereich einiger Zehntelsekunden damit im Wirkungsbereich einiger Hauptperioden des mikroseismischen Störsignals. Dies führt zu verstärkten Schwingungsanregungen des mechanischen Systems, welche am analogen Spannungsausgang des Wegaufnehmers als gravimetrisches Rauschsignal erkennbar sind.

Die Informationen über dieses ungefilterte Rauschsignal sind nun insofern von Bedeutung, als Einflüsse des mikroseismischen Störpegels auf die Mittellage des gravimetrischen Sensors im allgemeinen nicht prinzipiell ausgeschlossen werden können. In solchen Fällen würde bei der zeitlichen Mittelbildung diskreter Einzelsignale ein systematischer Fehler des Mittelwerts auftreten. Es kann sich beispielsweise um mechanische Effekte eines durch Störbeschleunigungen zu Schwingungen angeregten elastischen Systems (Gravimeterfedern) handeln oder bei starken Sensorauschlägen um Wirkungen des Eintritts des Wegaufnehmer-Eingangssignals in den nicht-linearen Bereich.

Im vorliegenden Falle werden aus 60 sekundlichen Einzelwerten minütliche Mittelwerte mit zugehörigen Standardabweichungen berechnet und aufgezeichnet (siehe Abschnitt C3). Diese minütlichen Daten bilden die Grundlage für die zur Gezeitenanalyse benötigten stündlichen Signalwerte sowie für die Berechnung der zugeordneten Standardabweichungen.

Aus auswertetechnischen Gründen ist es notwendig, die stündlichen gravimetrischen Signale bis zu einem gewissen Grade von den im Vergleich zu den Gezeitenperioden kurzperiodischen gravimetrischen Signalanteilen zu befreien. Bei Signalen mit relativ schwachem Rauschpegel (astasierte Gravimeter mit langen Eigenschwingungsperioden) führt bereits die genannte Mittelbildung häufig zur notwendigen Signalglättung. Aber im Falle von Signalen mit signifikant höherem Rauschpegel, wie sie bei gravimetrischen Sensoren mit kurzer Eigenperiode auftreten (z.B. A206), reicht der Filteralgorithmus der Mittelbildung im allgemeinen nicht aus. In solchen Fällen wird hinter den Ausgang des gravimetrischen Wegaufnehmers (oder des Rückkopplungssystems) ein physikalischer Tiefpassfilter geschaltet, dessen Ausgangssignale aufgezeichnet werden. Im Falle des Gravimeters A206 dient als Filter ein doppeltes RC-Glied:

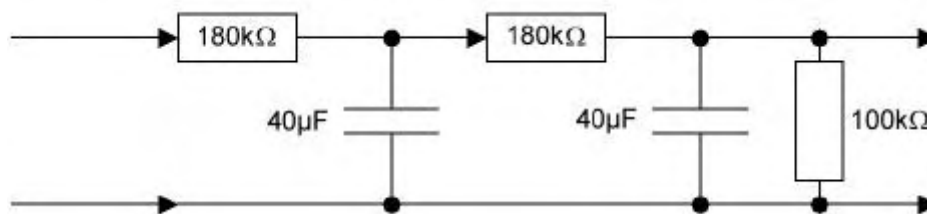


Abbildung E.1: Schema des doppelten RC-Glieds im Gravimeter A206

Die Amplitudendämpfung des Filter-Ausgangssignals ist frequenzabhängig und folgt einer e-Funktion (siehe Abschnitt E11.6.1). Die Filtereigenschaft wird durch die so genannte Filterkonstante τ charakterisiert; diese entspricht dem Zeitraum von der Eingabe eines Rechteck-Spannungssignals bis zum Erreichen des $(1-1/e)$ -fachen des Ausgangssignals. Es gilt

$$\tau[\text{sec}] = R[\text{M}\Omega] \times C[\mu\text{F}], \quad (\text{E-1})$$

mit im vorliegenden Falle

$$0,18\text{M}\Omega \times 40\mu\text{F} = 7,2\text{sec} \quad (\text{E-2})$$

für ein einfaches RC-Glied; bei in Serie geschalteten RC-Gliedern addieren sich die Zeitkonstanten.

Neben der Amplitudendämpfung tritt bei periodischen Eingangssignalen ein frequenzabhängiger zeitlicher Nachlauf des periodischen Ausgangssignals auf. Ein RC-Glied ist ein sehr einfaches, passives Filterelement mit eingeschränkter Flankensteilheit.

Es werden nun Parallelregistrierungen durchgeführt. Einerseits werden die gefilterten (Kanal 3 auf GeoObs1) und die ungefilterten (Kanal 1 auf GeoObs1) minütlichen Signalmittelwerte für die Gezeitenanalyse und für die Untersuchung relativ langsam ablaufender instrumenteller und gravimetrischer Prozesse permanent aufgezeichnet, andererseits in Stichproben die ungefilterten Ursprungssignale (Kanal 1 auf GeoObs1), die auch relativ kurzperiodische Signalanteile enthalten. Maßzahlen für den jeweils aufgetretenen Rauschpegel sind die Standardabweichungen der minütlichen und/oder stündlichen Mittelwerte. Eine Gegenüberstellung der stündlichen Gezeitenresiduen mit dem ungefilterten Rauschsignal ermöglicht potentiell Rückschlüsse auf die Ursache festgestellter Residuenanomalien.

Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung E.2, Abbildung E.3 und Abbildung E.4) zeigen repräsentative Gegenüberstellungen der Standardabweichungen der stündlichen Signalmittelwerte jeweils für die gefilterten und die ungefilterten Daten. Zum Vergleich sind repräsentative Originalregistrierungen mit den minütlichen Signalwerten und zugeordneten Standardabweichungen in Abbildung E.5 und Abbildung E.6 hinzugefügt.

Im Durchschnitt betragen die Standardabweichungen der stündlichen Signalmittelwerte der RC-gefilterten Messdaten etwa 0,0007Volt, oder umgerechnet etwa 0,09 μ Gal. Erwartungsgemäß steigt dieser Betrag erheblich für die ungefilterten Messdaten: Er liegt im Durchschnitt etwa um den Faktor 15 höher, umgerechnet bei etwa 1,4 μ Gal. Es ist zu erkennen, dass aus dem Verlauf der Streuungsinformationen des Kanals 3 **nicht** auf den Rauschpegel und die Rauschstruktur der Ursprungsdaten geschlossen werden kann. Insbesondere fehlen (abgesehen von Fällen des Auftretens von Erdbeben) weitgehend Hinweise auf gravimetrische Störungsspitzen.

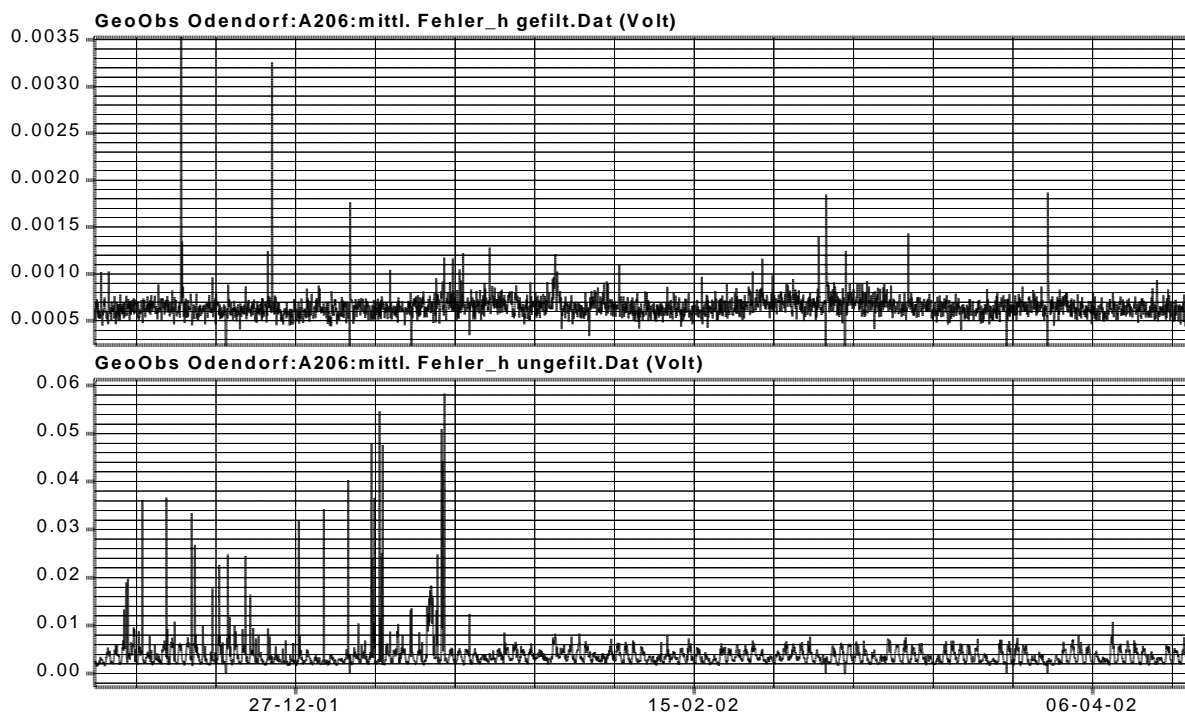


Abbildung E.2: Gravimeter A206 - Beispiel des zeitlichen Verlaufs der Standardabweichungen gefilterter und ungefilterter stündlicher Signalmittelwerte

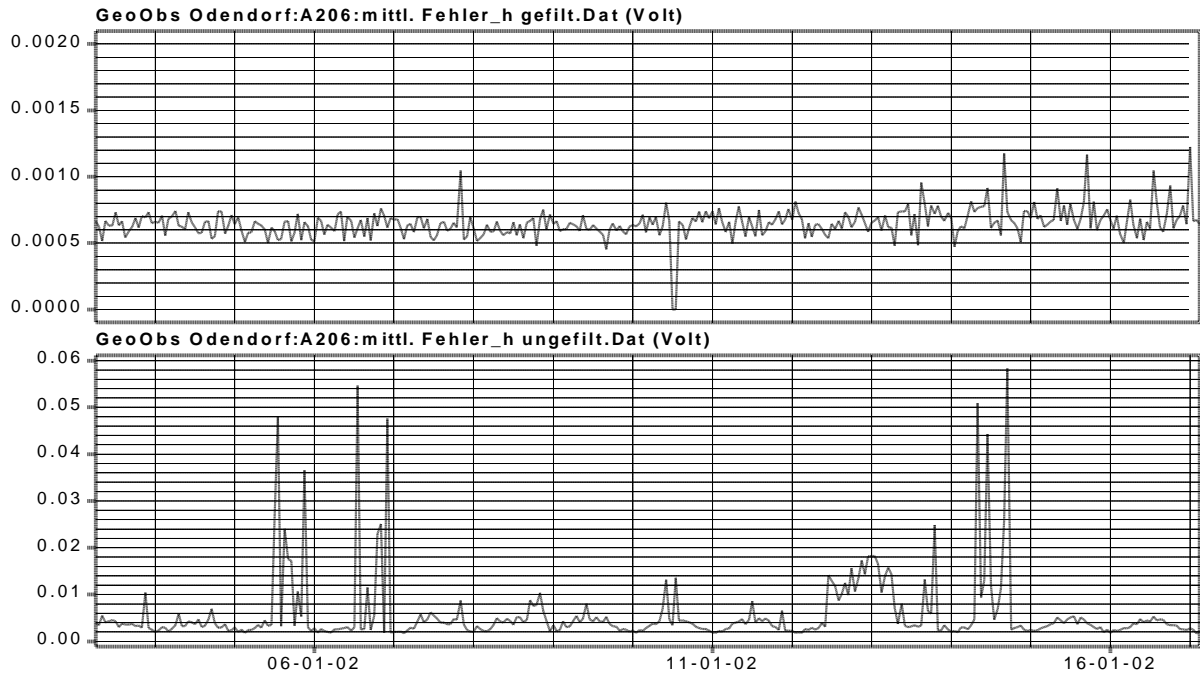


Abbildung E.3: Der zeitliche Verlauf der Standardabweichungen gefilterter und ungefilterter stündlicher Signalmittelwerte bei zeitweilig auftretendem starken mikroseismischen Störungen

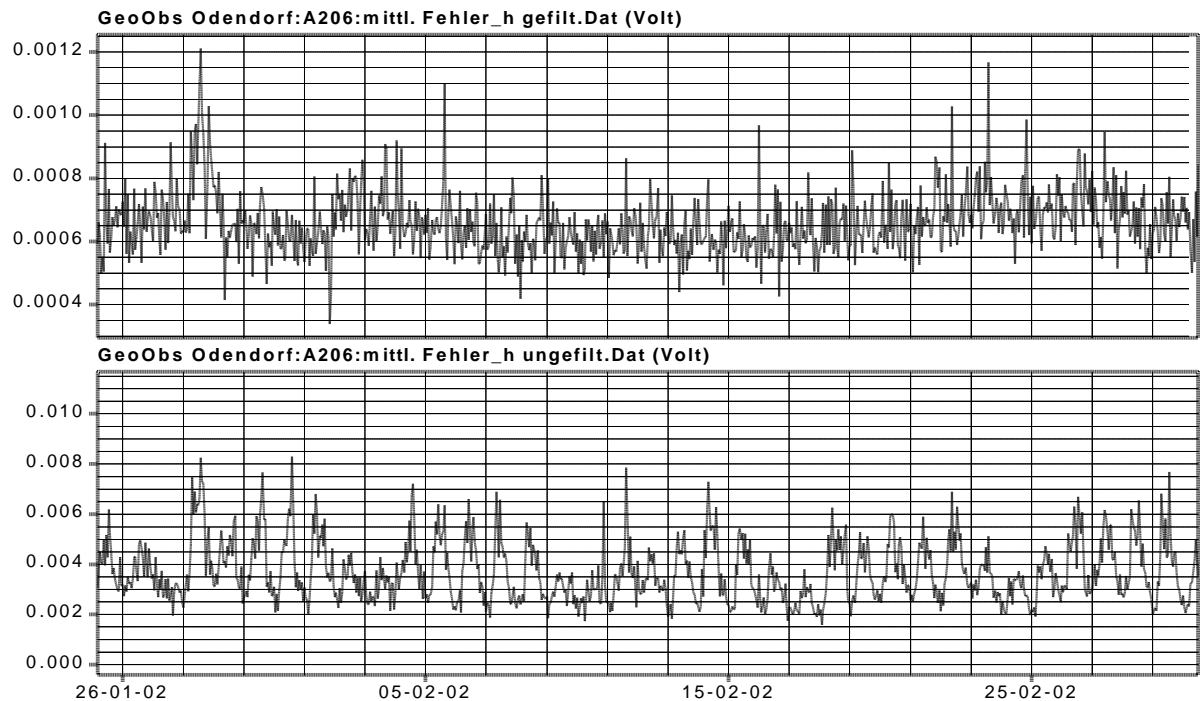


Abbildung E.4: Der zeitliche Verlauf der Standardabweichungen gefilterter und ungefilterter stündlicher Signalmittelwerte bei normalem mikroseismischen Störpegel

Die vorstehenden Abbildungen (Abbildung E.2 bis Abbildung E.4) zeigen in Form des Verlaufs der Standardabweichungen der stündlichen Mittelwerte des registrierten Ursprungssignals (Kanal 1 – ungefilterte Daten) deutliche tägliche Variationen des mikroseismischen Störpegels und dessen wöchentliche Abhängigkeiten, mit klaren Minima an den Wochenenden. Dies weist auf anthropogene Ursachen hin, wogegen in den gefilterten Daten die genannten Strukturen nicht signifikant zu erkennen sind.

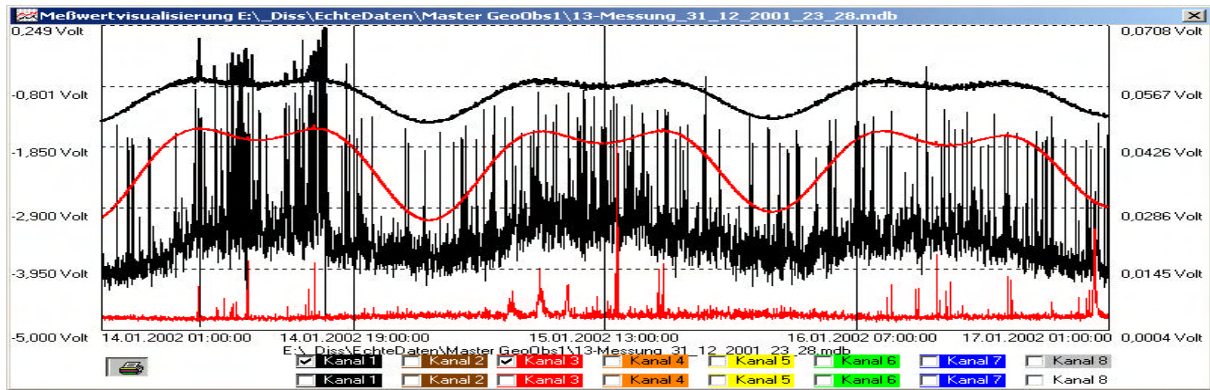


Abbildung E.5: Gravimeter A206 - Originalregistrierung der minutlichen Signalmittelwerte und zugeordneten Standardabweichungen der ungefilterten und der gefilterten sekundlichen Daten bei zeitweilig auftretendem starkem mikroseismischen Störpegel (Montag, 14.01.2002 bis Donnerstag, 17.01.2002) , rechte Ordinate: Standardabweichung
Registriermaßstab: RC-gefilterte Daten: 124 μ Gal/Volt (Kanal 3), ungefilterte Daten: 270 μ Gal/Volt (Kanal 1)

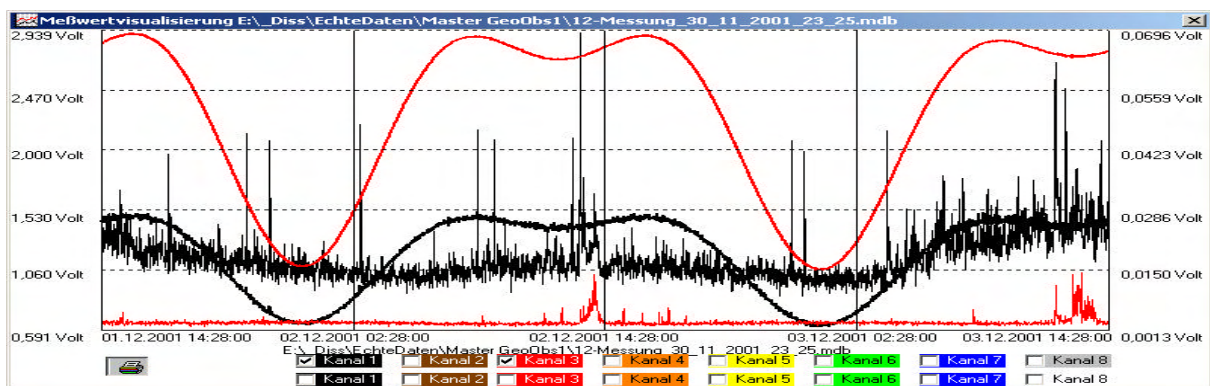


Abbildung E.6: Gravimeter A206 - Originalregistrierung der minutlichen Signalmittelwerte und zugeordneten Standardabweichungen der ungefilterten und der gefilterten sekundlichen Daten bei vergleichsweise niedrigem mikroseismischen Störpegel (Samstag, 01.12.2001 bis Montag 03.12.2001), rechte Ordinate: Standardabweichung
Registriermaßstab: RC-gefilterte Daten: 124 μ Gal/Volt (Kanal 3), ungefilterte Daten: 270 μ Gal/Volt (Kanal 1)

Wie auch das Amplitudenspektrum der Standardabweichungen der stündlichen Signalmittelwerte der RC-gefilterten Daten zeigt (Abbildung E.7), werden die Wirkungen der genannten Variationen des mikroseismischen Rauschpegels durch den Prozess der Filterung vollständig unterdrückt. Signifikante Spektrallinien im Bereich von einer Schwingung pro Tag (cpd = Cycles per day) sind nicht zu erkennen. Das Spektrum der Standardabweichungen der ungefilterten (ursprünglichen) stündlichen Signalmittelwerte hingegen zeigt bei 1cpd eine ausgeprägte Frequenzlinie (Abbildung E.8), sowie auch, jedoch weniger ausgeprägt, den wöchentlichen (entsprechend 0,14cpd) Effekt in Abbildung E.9. Die berechneten Spektren basieren auf Daten, die nach Entfernen des zuvor zu den Registriereingängen der A/D-Wandler parallel geschalteten analogen Registrierschreibers aufgezeichnet wurden (siehe Abschnitt D4.2).

Den Vergleich mit den eingesetzten LCR-Gravimetern zeigt (Abbildung E.10 und Abbildung E.11):

Tägliche Veränderungen des gravimetrischen Signalrauschens als Folge der auftretenden täglichen Variationen des mikroseismischen Rauschpegels sind in den stündlichen Signalen der astasierten Gravimeter LCR716 (ungefilterte Daten im CPI-Modus), LCR-G-xx1F (ungefilterte Daten im Feedback-Modus) sowie LCR-G-xx2F (gefilterte Daten im Feedback-Modus) nicht zu erkennen. Es kann somit festgestellt werden, dass lediglich mit dem Gravimeter A206 das Auftreten täglicher Variationen des mikroseismischen Eingangssignals (Störpegels) erkannt und über die Verhältnisse zugeordneter Standardabweichungen stündlicher Signalwerte gefilterter und ungefilterter Daten partiell quantifiziert werden kann.

Es sind im Besonderen die mit täglichen oder halbtäglichen Perioden auftretenden potentiellen oder realen Störeffekte unterschiedlichen physikalischen Ursprungs (Mikroseismik, Temperatur, Luftdruck, etc.), die der besonderen Aufmerksamkeit und gegebenenfalls Untersuchung bedürfen, da diese mit Frequenzen im Bereich von 15°/h bzw. 30°/h zentral in den beiden Hauptzeitenbändern liegen und daher zu relevanten systematischen Einflüssen auf die berechneten Parameter der Partialtiden führen können.

Weitergehende Untersuchungen zu den Streuungseigenschaften der Rauschsignale können im Bedarfsfalle auf der Grundlage der Standardabweichungen der minutlichen Signalmittelwerte durchgeführt werden.

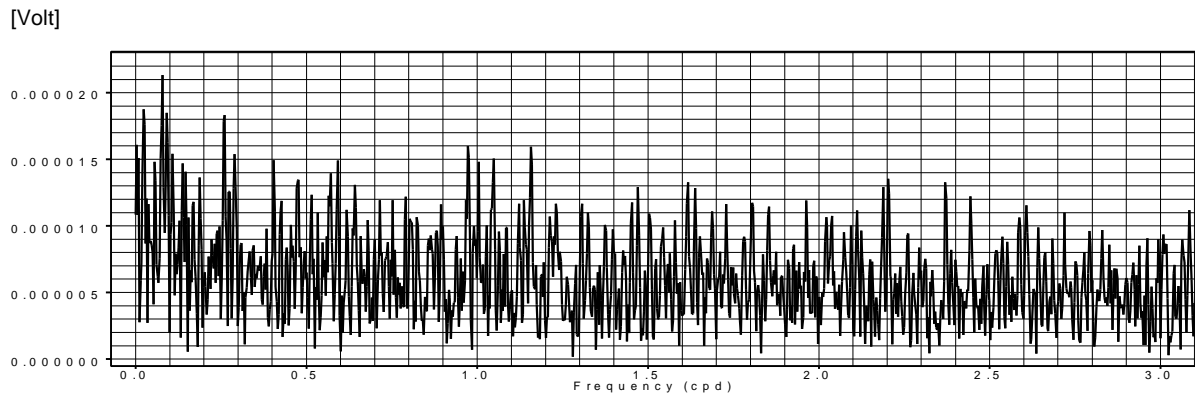


Abbildung E.7: Gravimeter A206 - Amplitudenspektrum der Standardabweichungen der stündlichen Signalmittelwerte der RC-gefilterten Daten

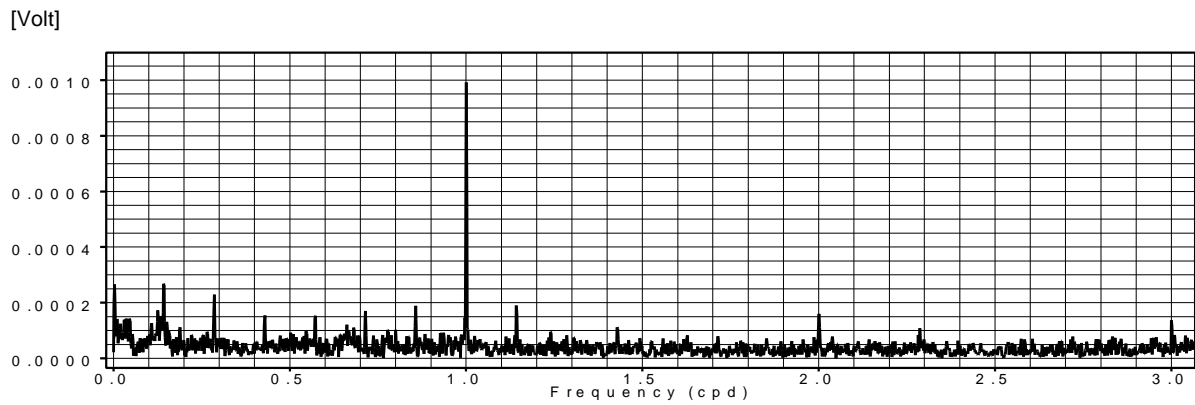


Abbildung E.8: Gravimeter A206 - Amplitudenspektrum der Standardabweichungen der stündlichen Signalmittelwerte der ungefilterten Daten

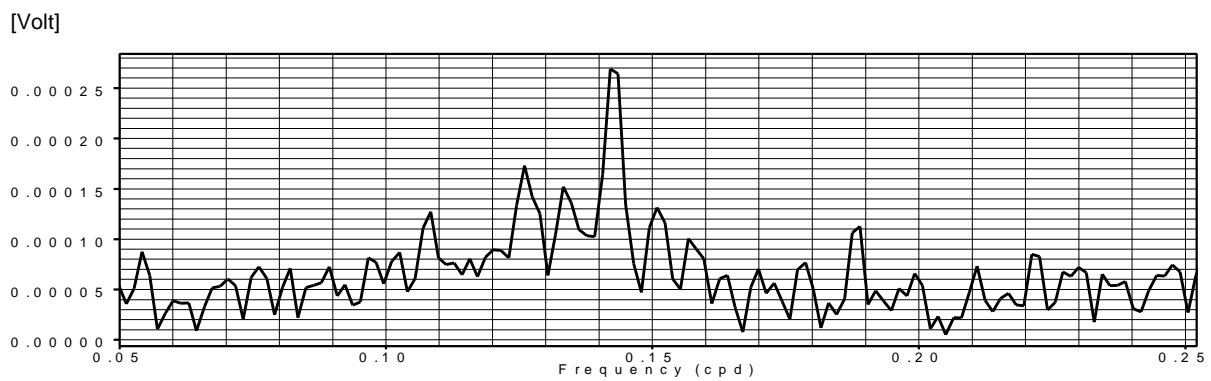


Abbildung E.9: Gravimeter A206 - Amplitudenspektrum der Standardabweichungen der stündlichen Signalmittelwerte der ungefilterten Daten, niederfrequenter Bereich

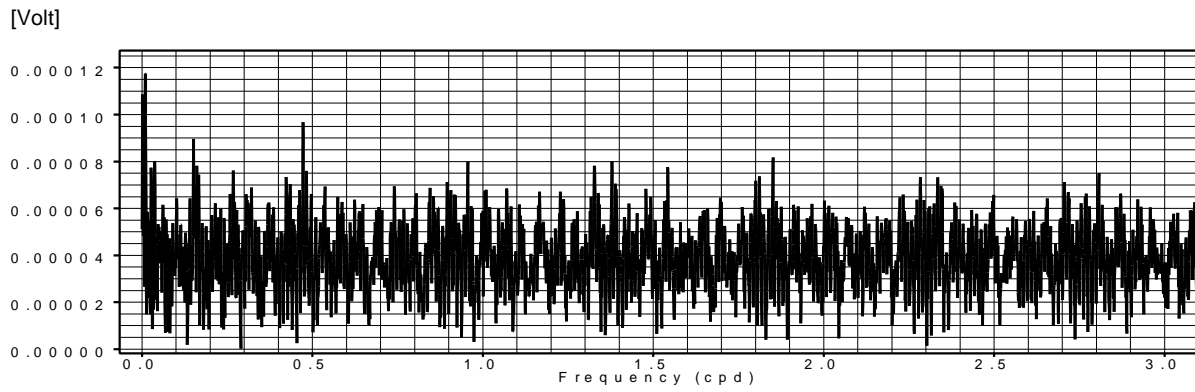


Abbildung E.10: Gravimeter LCR716 - Amplitudenspektrum der Standardabweichungen der stündlichen Signalmittelwerte - ungefilterter CPI-Ausgang

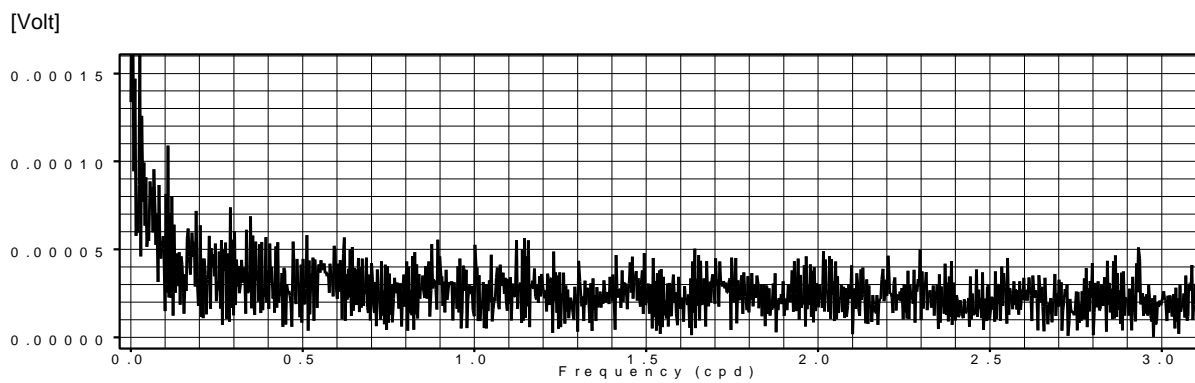


Abbildung E.11: Gravimeter LCR-G-xx1F - Amplitudenspektrum der Standardabweichungen der stündlichen Signalmittelwerte - ungefilterter Feedbackausgang

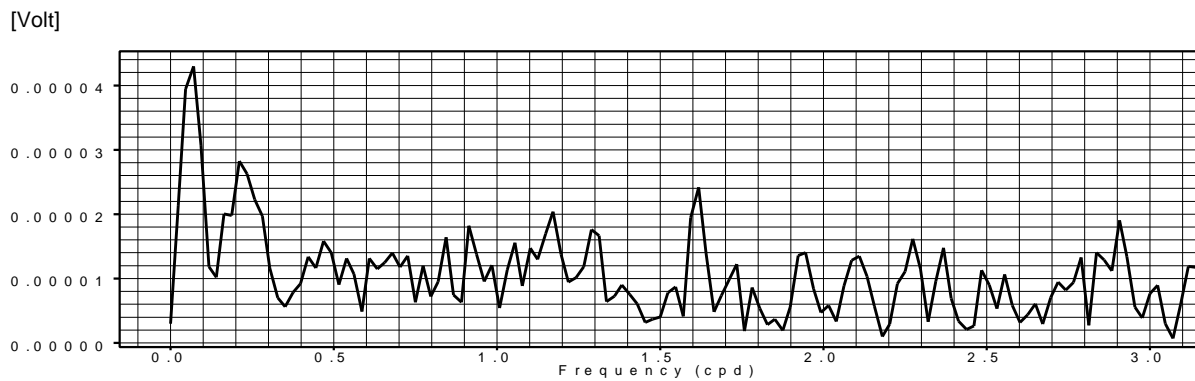


Abbildung E.12: Gravimeter LCR-G-xx2F - Amplitudenspektrum der Standardabweichungen der stündlichen Signalmittelwerte - gefilterter Feedbackausgang

2 Das Rauschsignal als Informationsträger

Wie im letzten Abschnitt bereits erwähnt, werden Rauschsignale in Beobachtungsdaten im allgemeinen lediglich als Signalstörungen eingestuft und unangesehen durch geeignete physikalische oder numerische Filter nach Möglichkeit soweit eliminiert, dass sie die zu bestimmenden Zielgrößen nach Möglichkeit nicht mehr beeinflussen. Rauschsignale sind jedoch auch Informationsträger, zumindest im Hinblick auf ihre Ursachen.

Zur Erfassung der Vertikalkomponente der kurzperiodischen örtlichen Mikrokoseismik wurden ab Anfang August 2001 parallel zu den Gravimeterbeobachtungen die Signale eines Piezo-Sensors registriert. Bei diesem Sensor handelt es sich um einen Quarz des Typs Kistler 925 mit einem Messbereich von ± 50 dN, einer Empfindlichkeit von 472 pC/dN und einer Linearität von 0,3%. Die mikroseismisch induzierten Ladungssignale wurden durch einen geeigneten Ladungsverstärker mit einem Eingangswiderstand von 10^{11} Ohm in ein analoges Gleichspannungssignal umgewandelt und dieses über einen zwischengeschalteten Trennverstärker durch die Registriersysteme GeoObs1 und GeoObs3 (siehe Abschnitt B7) registriert. Als Trägheitskörper wurde ein Messingzylinder mit einer Masse von 17kg verwendet (1/3 der zulässigen Last), wobei die Messeinrichtung über ein zwei Meter tief gegründetes Metallrohr an den Untergrund der Messkammer angekoppelt wurde (Abbildung E.13).



Abbildung E.13: Piezo-Sensor K925

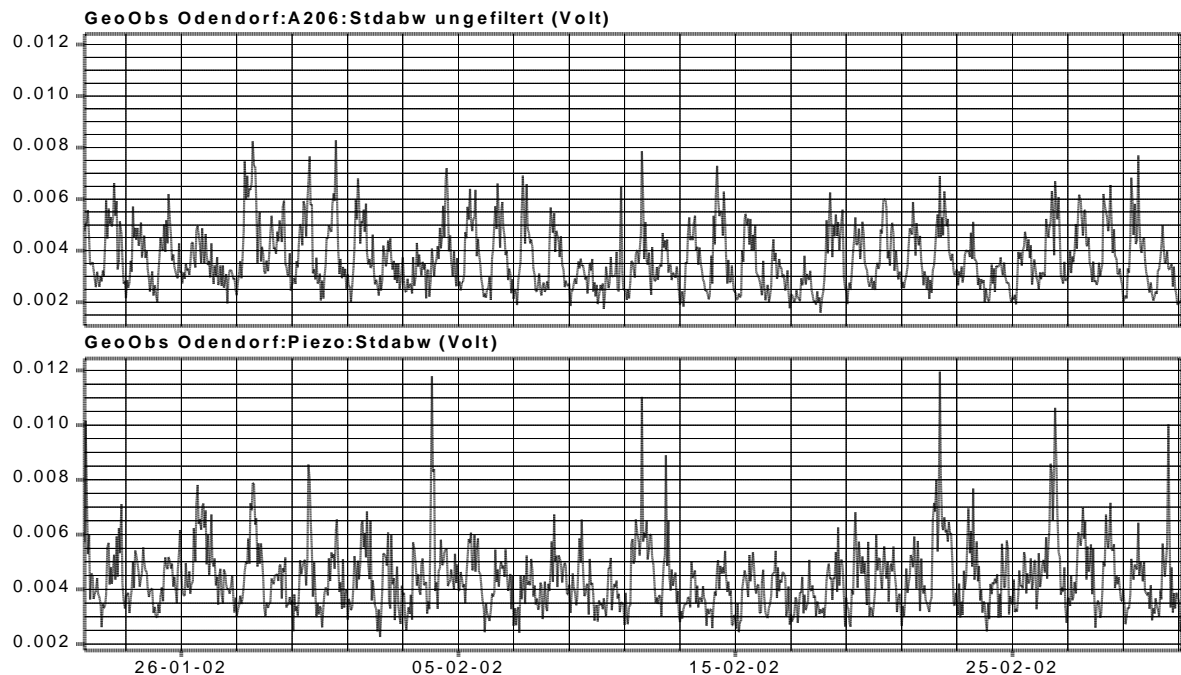


Abbildung E.14: A206 ungefilterter Signalausgang, Piezo-Sensor K925 - Standardabweichungen der stündlichen Signalmittelwerte - Beispiel des Signalverlaufs für einen Zeitraum von etwa einem MONAT

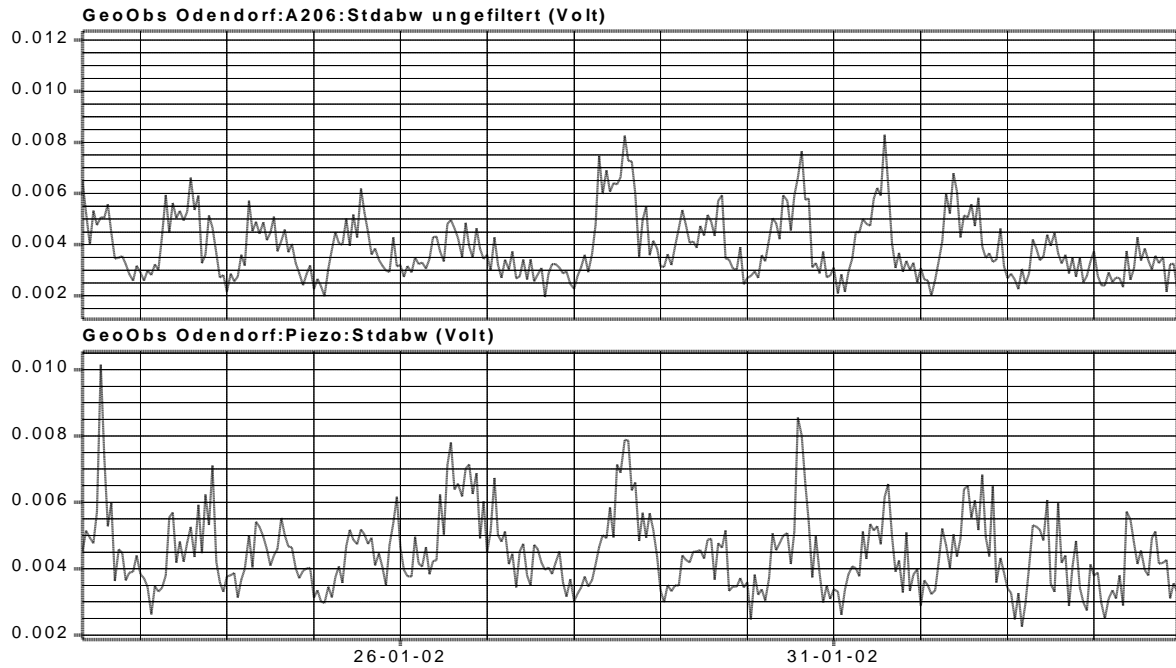


Abbildung E.15: A206 ungefilterter Signalausgang, Piezo-Sensor K925 - Standardabweichungen der stündlichen Signalmittelwerte - Beispiel des Signalverlaufs für einen Zeitraum von etwa einer WOCHE

Abbildung E.14 und Abbildung E.15 zeigen in der Gegenüberstellung der ungefilterten Signale des Gravimeters A206 und der Signale des Piezosensors K925 den zeitlichen Verlauf der Standardabweichungen der stündlichen Signalmittelwerte. Offensichtlich besteht eine deutliche Korrelation der Signalabläufe.

Wie in Abschnitt E1 beschrieben, erkennt man im Amplitudenspektrum der Daten des ungefilterten Signalausganges des Gravimeters A206 der im Zeitraum von Anfang August 2001 bis Januar 2003 gewonnen Aufzeichnungen eine deutliche Spektrallinie bei 1Cpd (Abbildung E.8). Diese findet sich im Spektrum der Daten des Piezo-Sensors K925 wieder (Abbildung E.16). Für den Piezo-Sensor K925 fällt auf, dass beiderseits dieser Spektrallinie nur ein unstrukturiertes Linienband zu verzeichnen ist. Andererseits deutet sich bei A206 an, dass der gravimetrische Rauschpegel auch periodische Variationen außerhalb der täglichen Periodizität enthält; es ist zwischen physikalisch begründeten Peaks und solchen, die durch den verwendeten Berechnungsalgorithmus bewirkt werden (z.B. Aliasing), zu unterscheiden.

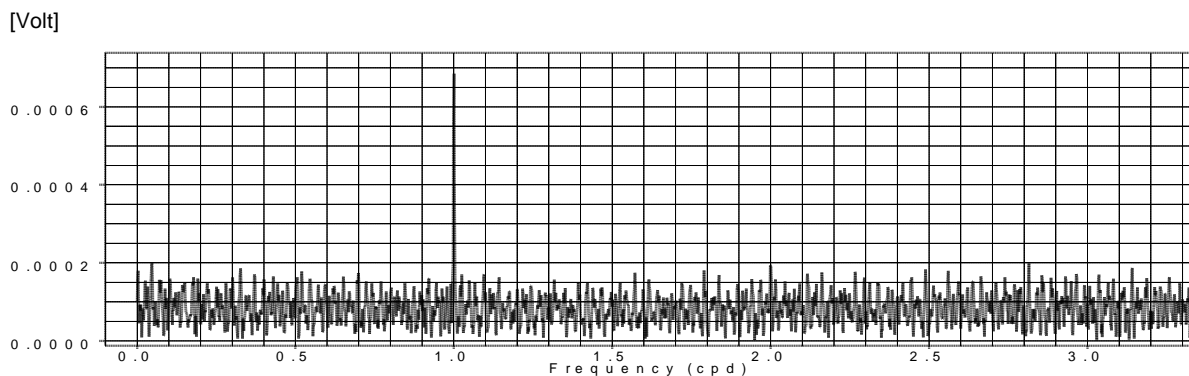


Abbildung E.16: Piezo-Sensor K925 – Amplitudenspektrum der Standardabweichungen der stündlichen Signalmittelwerte

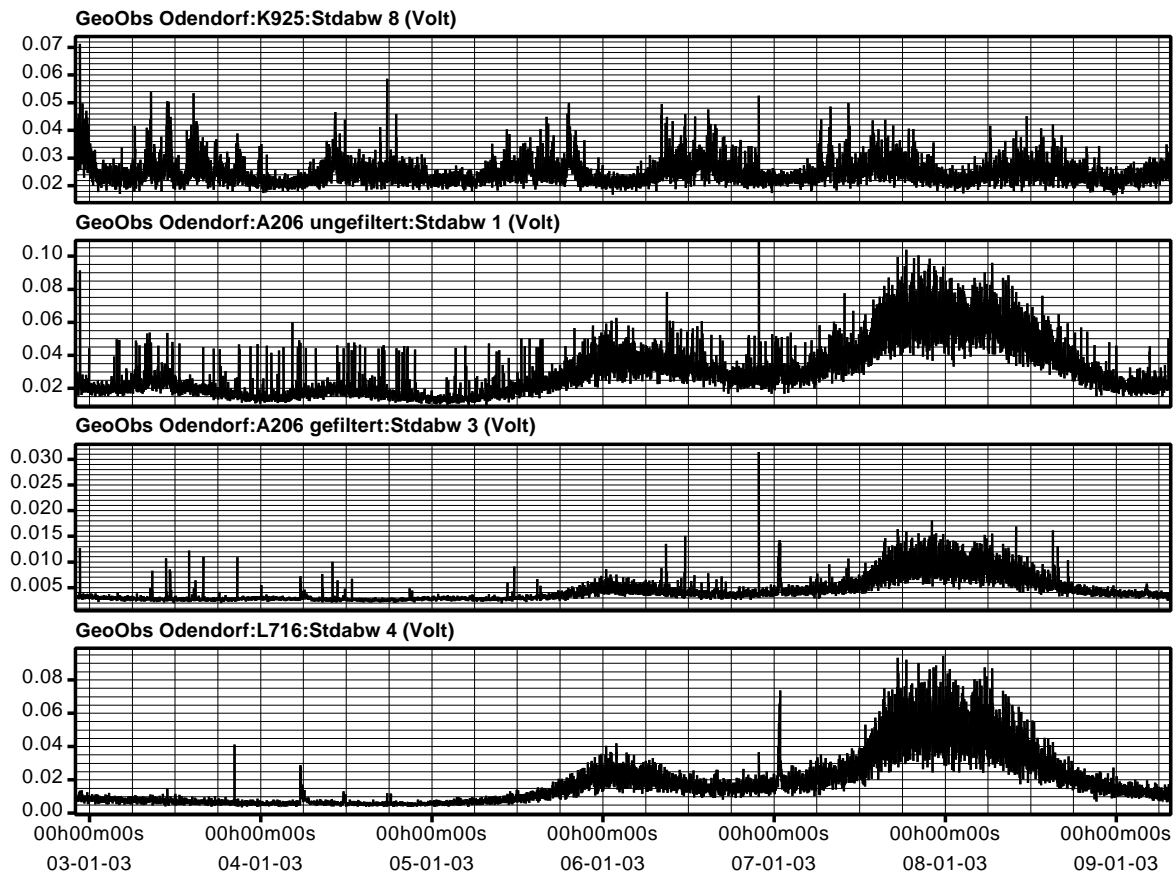


Abbildung E.17: Gegenüberstellung des Verlaufs der Standardabweichungen der minutlichen Mittelwerte der sekundlichen Beobachtungsdaten von K925 (Registrierkanal 8), A206 (Kanal 1: ungefiltert, Kanal 3: gefiltert) sowie LCR716 (Kanal 4)

In der Abbildung E.17 wird in einem exemplarischen Beobachtungszeitraum von etwa einer Woche der Verlauf der *Standardabweichungen* der *minütlichen* Mittelwerte der Signale des Piezo-Sensors K925 (Registrierkanal 8), des Gravimeters A206 – ungefilterte Daten (Registrierkanal 1), des Gravimeters A206 – gefilterte Daten (Registrierkanal 3) und des Gravimeters LCR716 (Registrierkanal 4) gegenübergestellt.

Während in den Signalen des Piezo-Sensor K925 nur tägliche Variationen des Rauschpegels (dargestellt in der Form der Standardabweichungen der minutlichen Mittel) zu erkennen sind, zeigt der Rauschpegel des Gravimeters LCR716, welches mit einer eingestellten Eigenperiode von etwa 15 Sekunden im CPI-Modus (sozusagen als Seismometer) betrieben wird, ausgeprägte langzeitliche Variationen. Ein solcher Effekt kann z. B. auftreten, wenn den Rauschpegeländerungen Variationen in der spektralen Zusammensetzung der Rauschsignale zugeordnet sind, auf welche die mechanischen Sensoren in Abhängigkeit von der mechanischen Übertragungsfunktion unterschiedlich reagieren.

Auch in den beiden Registrierkanälen des Gravimeters A206 treten die langzeitlichen Rauschpegelvariationen deutlich hervor, mit dem wesentlichen Unterschied, dass in den Rauschpegelvariationen der ungefilterten Daten (Kanal 1) zusätzlich auch die täglichen Perioden sichtbar sind - siehe oben und Abschnitt E.1. Auf diesem Kanal sind außerdem mehr oder weniger ständig auftretende, kurzzeitige Vergrößerungen des Rauschpegels im Minutenbereich zu erkennen, deren Ursprung unbekannt ist. Diese Effekte wirken sich allerdings nur geringfügig auf die stündlichen Mittelwerte aus (Abbildung E.18)

Als Detailergänzungen zu den in Abbildung E.17 dargestellten Verläufen der Standardabweichungen sind die folgenden Abbildungen hinzugefügt (Abbildung E.18 bis Abbildung E.22).

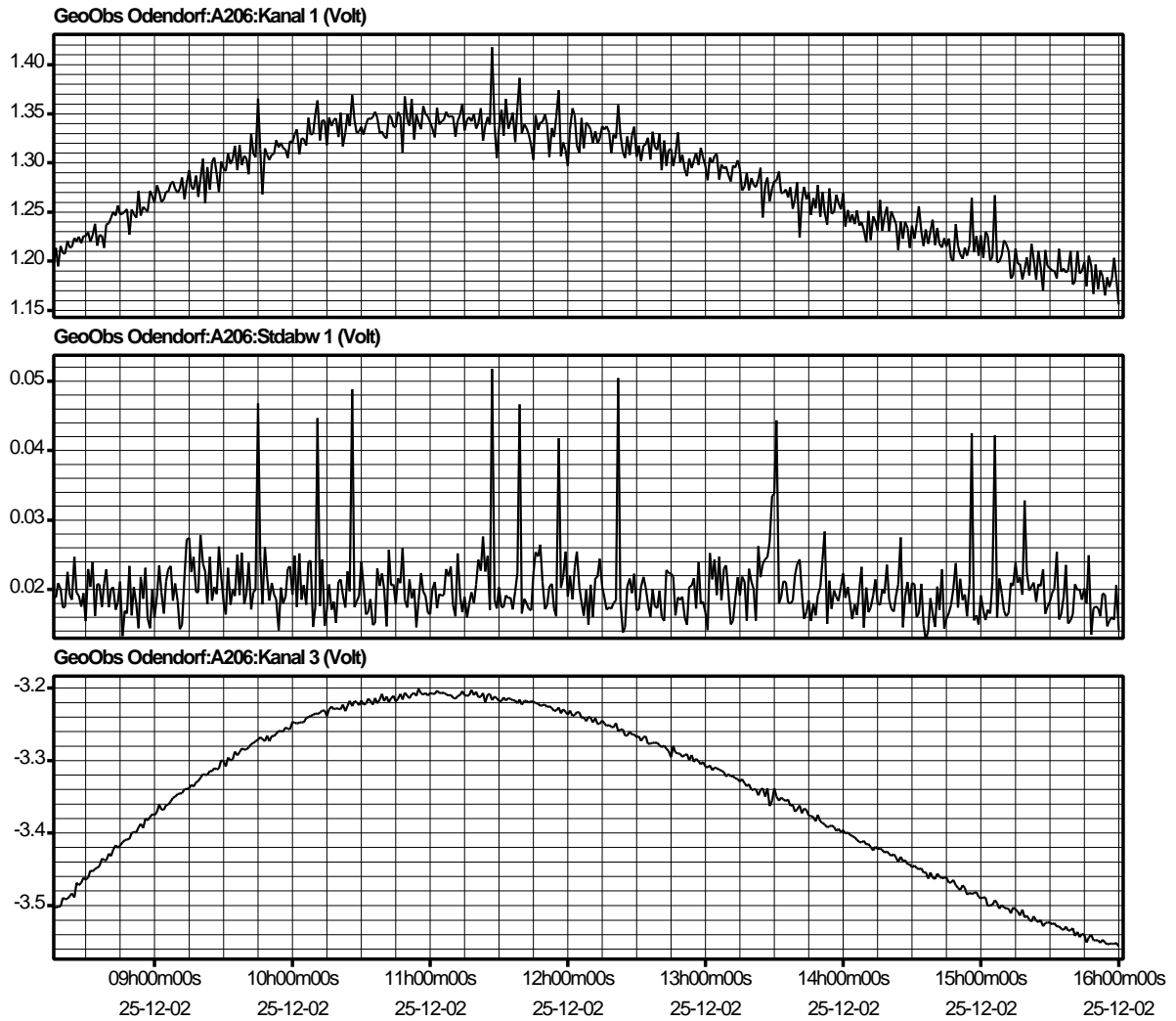


Abbildung E.18: Gravimeter A206 – Gegenüberstellung des Verlaufs der Standardabweichungen der minütlichen Mittelwerte des ungefilterten Signals mit dem Verlauf der minütlichen Mittelwerte der sekundlichen Signale; Registrierkanal 1: ungefilterte Daten - Registrierkanal 3: gefilterte Daten

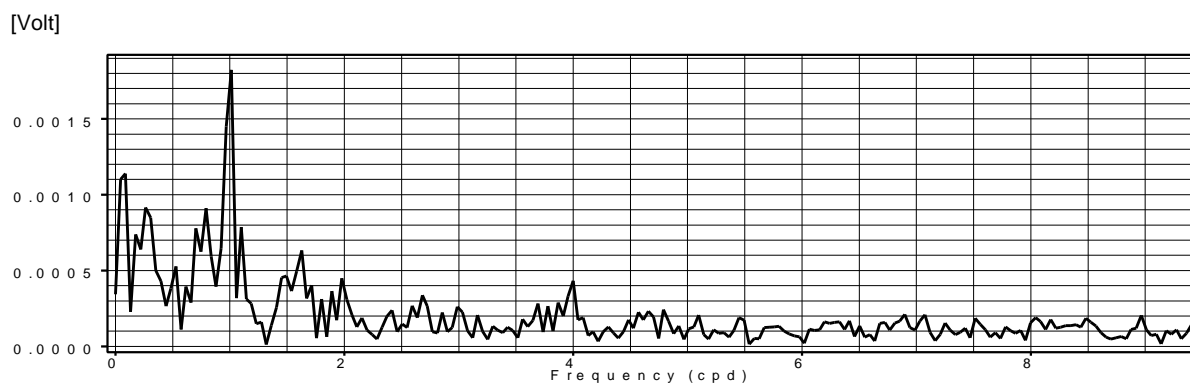


Abbildung E.19: Piezo-Sensor K925 – Registrierkanal 8 - Amplitudenspektrum der Standardabweichungen der minütlichen Mittelwerte

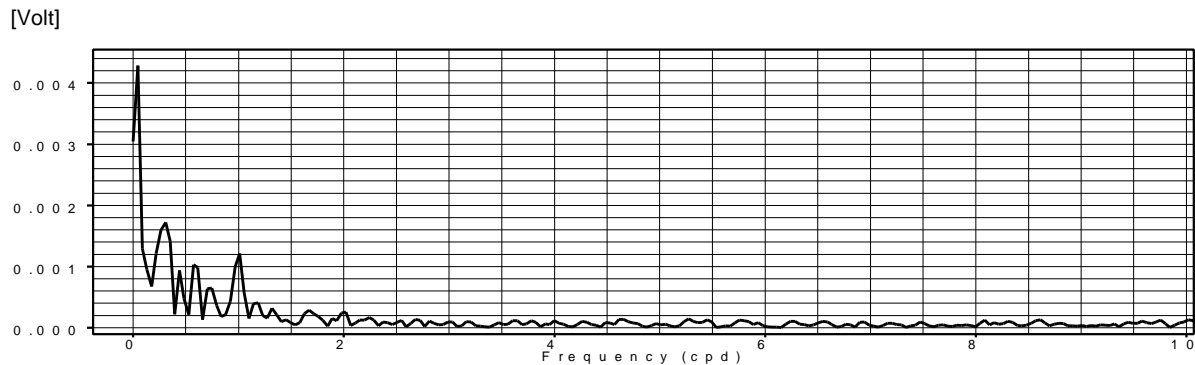


Abbildung E.20: Gravimeter A206 – Registrierkanal 1: ungefilterte Signale - Amplitudenspektrum der Standardabweichungen der minütlichen Mittelwerte

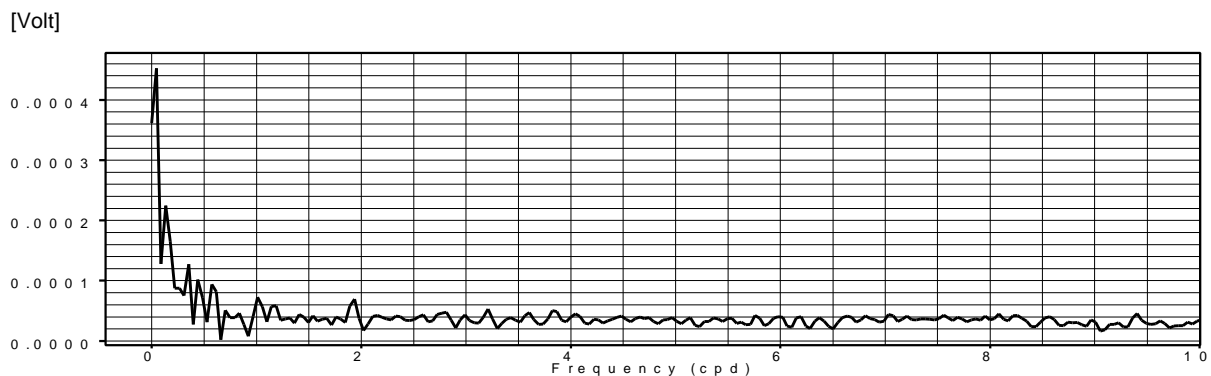


Abbildung E.21: Gravimeter A206 – Registrierkanal 3: gefilterte Signale - Amplitudenspektrum der Standardabweichungen der minütlichen Mittelwerte

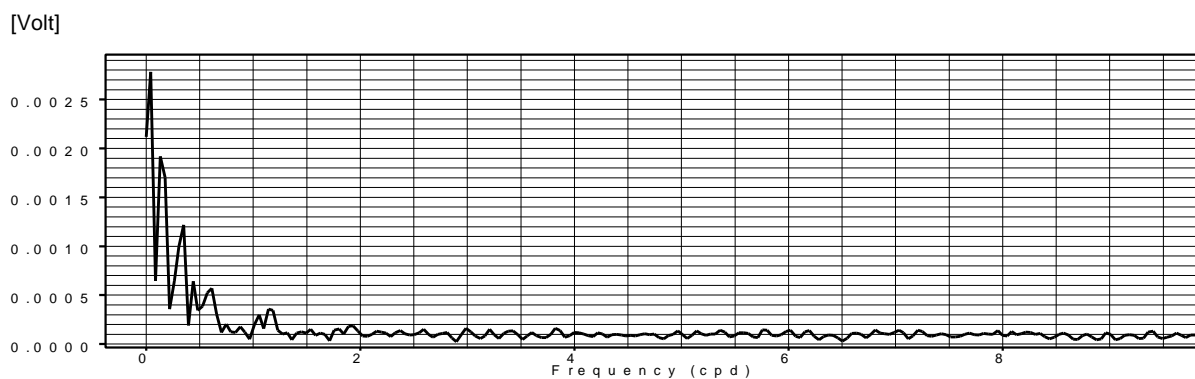


Abbildung E.22: Gravimeter LCR716 – Registrierkanal 4: CPI-Modus - Amplitudenspektrum der Standardabweichungen der minütlichen Mittelwerte

In den Aufzeichnungen der Standardabweichungen der minütlichen Signalmittelwerte des Piezo-Sensors K925 fällt eine Periodizität im Bereich von 3,7 bis 4Cpd auf (Abbildung E.23 und Abbildung E.24), entsprechend einer Periode von 6,5 bis 6 Stunden. Dieser Sachverhalt rührt daher, dass im zeitlichen Verlauf der Standardabweichungen der minütlichen Signalmittelwerte relativ häufig, allerdings meist nur schwach ausgeprägt, Periodizitäten mit einer Dauer von etwa 6 Stunden zu erkennen sind. Diese Perioden korrelieren mit dem gesellschaftlichen Arbeitsrhythmus, der an Werktagen mit dem Einsetzen des Berufsverkehrs beginnt, um die Mittagszeit eine Arbeitspause enthält und dann mit dem Ende des Berufsverkehrs abschließt. Bisweilen wurden zum Beispiel auch mikroseismische Auswirkungen von Frühstückspausen aufgezeichnet, nämlich in Zeiträumen, wenn in einem Entfernungsbereich von 1 bis 2km vom GeoObservatorium schwere Tiefbaugeräte im Einsatz waren. Hier handelt es sich keinesfalls um triviale Sachverhalte, denn Strukturen der genannten Art ermöglichen häufig eine Zuordnung von Störquellen zu den beobachteten, mikroseismisch induzierten Rauschsignalen. Diese Zuordnung wiederum bietet potentiell die Möglichkeit einer partiellen Quantifizierung

der mikroseismischen Vorgänge, mindestens aber in gewissen Grenzen der Prädiktion eines zu erwartenden Rauschpegels.

Ansonsten entsprechen die Spektren der Standardabweichungen der minütlichen Signalmittelwerte im wesentlichen denen der stündlichen Signalmittelwerte (Abbildung E.7, Abbildung E.8, Abbildung E.9 und Abbildung E.16).

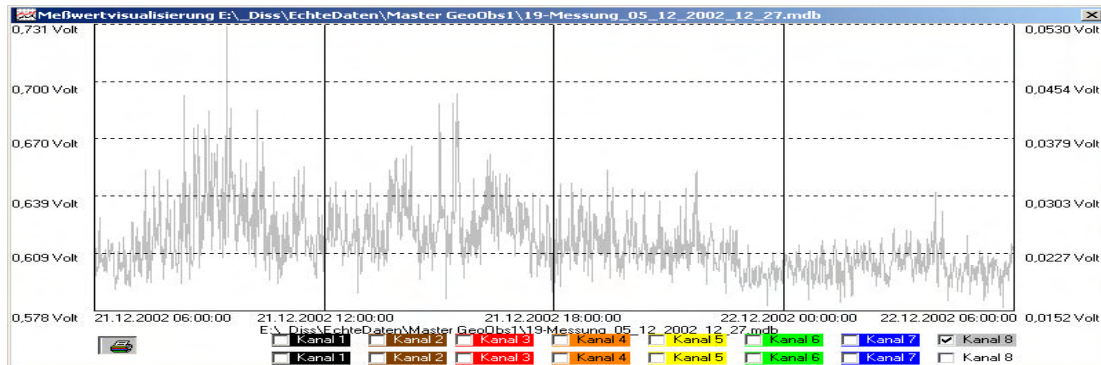


Abbildung E.23: Piezosensor K925 - Verlauf der Standardabweichungen der minütlichen Signalmittelwerte während eines Tages im Winter 2002

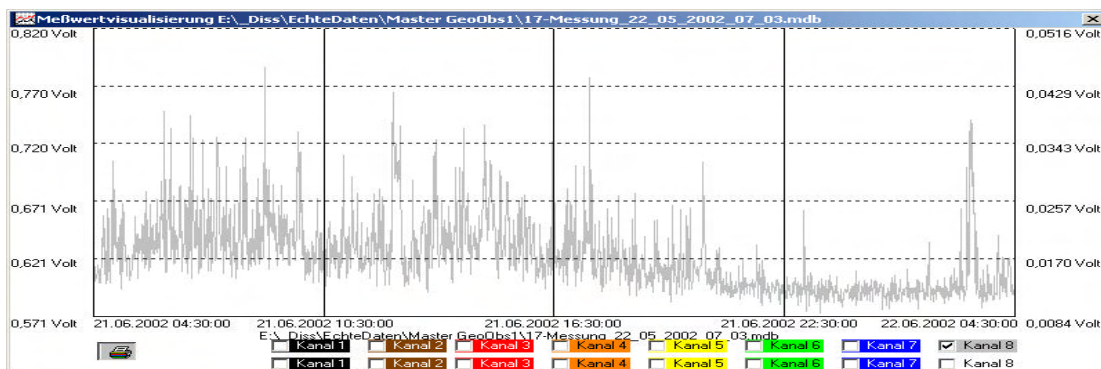


Abbildung E.24: Piezosensor K925 - Verlauf der Standardabweichungen der minütlichen Signalmittelwerte während eines Tages im Sommer 2002

3 Die Residuen als Informationsquelle

3.1 Allgemeines

Neben den im vorangegangenen Abschnitt untersuchten zeitlichen Variationen der Standardabweichungen der minütlichen und stündlichen Mittelwerte enthalten auch die Residuen der Gezeitenanalysen verwertbare Informationen. Die Informationen aus den nach der Gezeitenanalyse der Rohdaten gewonnenen Residuen, somit deren Strukturen und zeitlicher Verlauf, beschränken sich nicht nur auf den als Ganzes oder in gegebenen Zeitfenstern erreichten Grad der Anpassung des auf der Parameterschätzung basierenden Modells an die Beobachtungsdaten; die Residuen beinhalten potentiell auch Informationen über die Ursachen zeitvariabler Modellabweichungen. Dieses gilt unter der Voraussetzung, dass Periodizitäten in den einwirkenden Störprozessen entweder nicht auftreten oder in hinreichendem Abstand von den Gezeitenperioden liegen. Die potentielle Quantifizierung von Störprozessen setzt zunächst einmal deren Erkennung voraus, wobei die Zuverlässigkeit dieser Erkennung mit der Länge der beobachteten Zeitreihen zunimmt, da sich der Grad der Wiederholung der Störprozesse erhöht und Effekte mit eher zufälligem Charakter daher ausgeschlossen werden können.

3.2 Die Überprüfung auf Normalverteilung

Eine wesentliche Maßnahme für die Beurteilung des der Parameterschätzung zugrunde liegenden stochastischen Modells ist die Überprüfung der Residuenverteilung. Wie in den Abschnitten D7.1, D7.2 und D7.3 bereits gezeigt wurde, treten im Residuenverlauf über Zeiträume von Tagen häufig systematische, nicht-zufällige

Strukturen auf. Bei längeren gravimetrischen Zeitreihen könnte jedoch erwartet werden, dass sich insgesamt die Verteilung der Residuen einer Zufallsverteilung annähert (sofern die einwirkenden Störprozesse im Langzeitmaßstab einen überwiegend zufälligen Charakter aufweisen).

3.2.1 Das Gravimeter A206 – gefilterte Daten

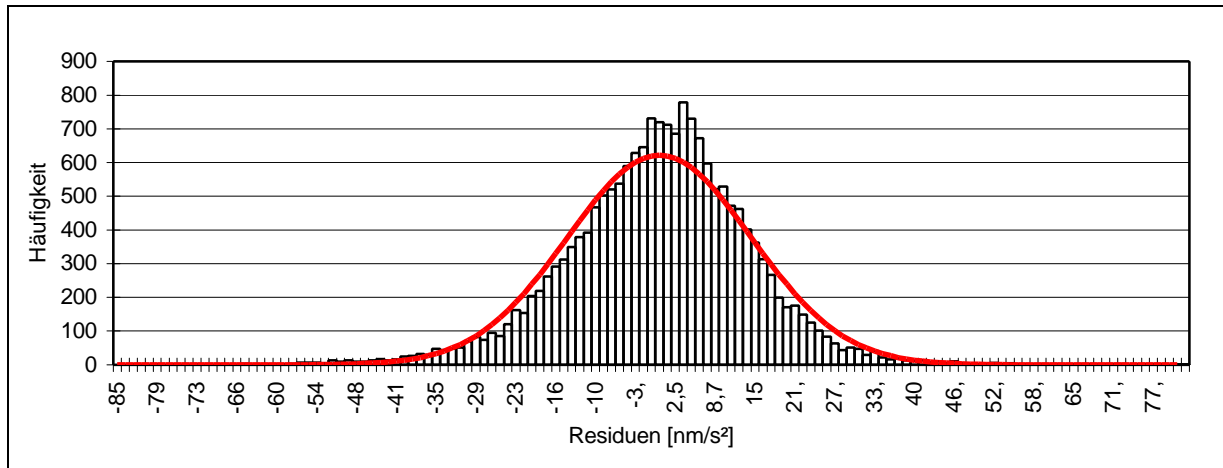


Abbildung E.25: Histogramm der Residuen mit Normalverteilung für Gravimeter A206 gefilterte Daten September 2000 bis Januar 2003

Eine Überprüfung der Annäherung an die Normalverteilung mit Hilfe des χ^2 -Tests ergab eine signifikante Abweichung von der Normalverteilung. Der zentrale Bereich um den Erwartungswert ist deutlich stärker besetzt, als es bei einer normalverteilten Zufallsgröße zu erwarten gewesen wäre. Zur Verdeutlichung ist in Abbildung E.25 die Normalverteilungskurve mit den dem Histogramm entsprechenden Parametern ($E=0$; $s=14,440$; Anzahl=18000) dargestellt.

3.2.2 Das Gravimeter A206 – ungefilterte Daten

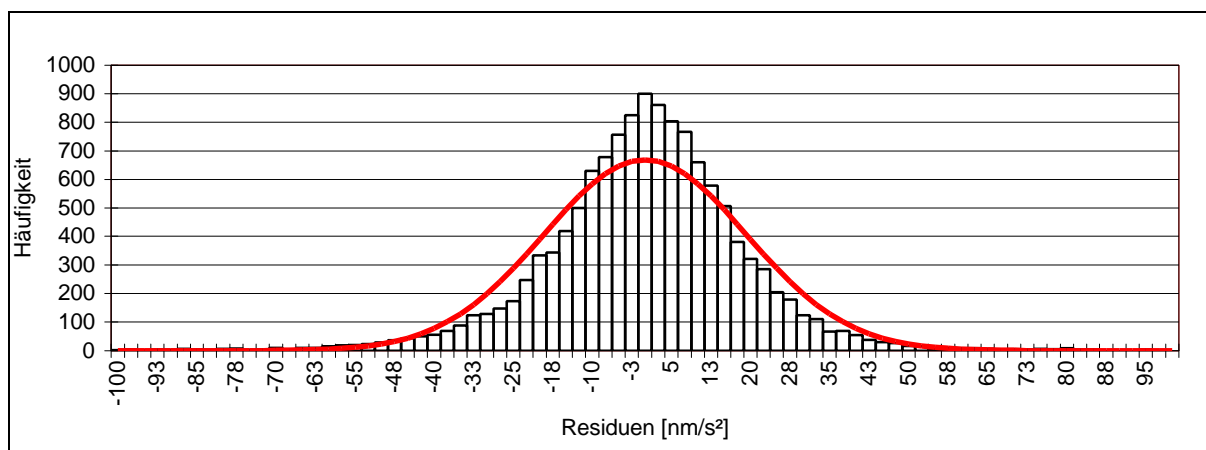


Abbildung E.26: Histogramm der Residuen mit Normalverteilung für Gravimeter A206 ungefilterte Daten Juli 2001 bis Januar 2003

Der χ^2 -Test ergab bei der Untersuchung der Residuenverteilung der ungefilterten Daten des Gravimeters A206, dass diese von der Normalverteilung signifikant abweichen, ebenso wie bei der Untersuchung der gefilterten Daten desselben Gravimeters. Auch hier ist der zentrale Bereich um den Erwartungswert überproportional besetzt, im Gegensatz zu den Flanken der Funktion. Die Parameter der Normalverteilungsfunktion, die in der Abbildung E.26 dargestellt ist, ergeben sich aus den Daten des Histogramms zu $E=0$, $s=19,277$ und Anzahl=12916.

3.2.3 Das Gravimeter LCR-G-xx1F

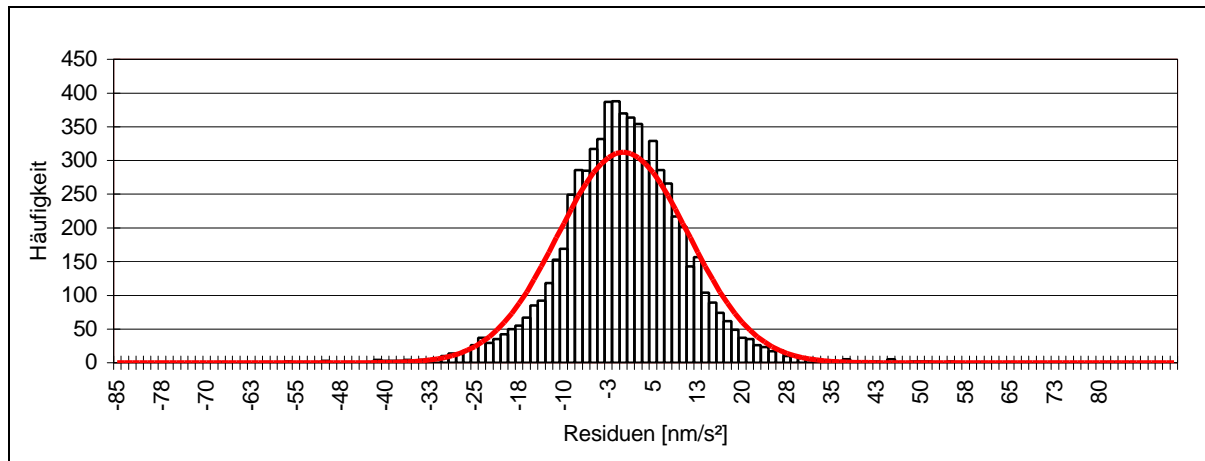


Abbildung E.27: Histogramm der Residuen mit Normalverteilung für Gravimeter LCR-G-xx1F
Juli 2001 bis Mai 2002

Auch hier zeigt der χ^2 -Test, dass die Residuen des Gravimeters LCR-G-xx1F nicht normalverteilt sind. Man kann auch in diesem Histogramm das deutliche „Übergewicht“ der Residuen um den Erwartungswert beobachten. Ebenso wie in den vorstehenden Abbildungen ist auch in der Abbildung E.27 die entsprechende Normalverteilung eingezeichnet ($E=0$; $s=11,003$; Anzahl=6896).

3.3 Der Effekt fehlerhafter Sprunghöhen

Bei der Bestimmung von Sprunghöhen treten infolge des Einlaufverhaltens der Messsysteme bisweilen Probleme dadurch auf, dass erst nach einer gewissen Zeitspanne der Signal-Endwert hinreichend genau erreicht wird. Diese Zeitspanne kann im Falle großer Sprünge bei hochastasierten Gravimetern, die im CPI-Modus (Ausschlagverfahren) betrieben werden, durchaus Beträge von über einer halben Stunde erreichen. Es bestehen also mehr oder weniger große Unsicherheiten über den Zeitpunkt, wann der Einlaufprozess nach einem Sprung als abgeschlossen definiert werden kann. Je länger andererseits ein Einlaufprozess dauert, um so größer wird auch der Extrapolationsfehler vom Ende des Einlaufvorgangs bis zur Sprungauslösung, da die für die Rück-Extrapolation verwendeten Messdaten sowohl Rauschsignale als auch (im günstigen Falle geringe) Gezeitensignale enthalten.

Mit Hilfe einer Überprüfung des Residuenverlaufs an den Stellen, an denen in einem Datensatz eine Sprungkorrektur durchgeführt wurde, lässt sich feststellen, ob die jeweilige Sprungkorrektur hinreichend genau durchgeführt wurde. Abbildung E.28 zeigt den Residuenverlauf in einem Falle, in dem die für die Sprungkorrektur verwendete Sprunghöhe offensichtlich einen relevanten Fehler enthält.

Nun wirkt sich ein solcher Fehler auf die durch die Gezeitenanalyse berechneten Gezeitenparameter um so geringer aus, je länger der Registrierzeitraum ist und wird dadurch zunehmend ergebnisunwirksam. Soll jedoch die „wahre“ Sprunghöhe auch für die Bestimmung des Registriermaßstabs verwendet werden, ist eine Sprunghöhenkorrektur erforderlich.

Infolge des innerhalb des Analyseprozesses verwendeten Filteroperators (hier Pertzev57-Filter mit 37 Koeffizienten, siehe auch Abschnitt B6) stimmen die „Sprunghöhen“ der Residuen nicht mit dem Sprunghöhenfehler überein. Andererseits wäre es zur Vermeidung einer empirischen Ermittlung des Sprunghöhenfehlers aus praktischen Gründen nützlich, wenn der Sprunghöhenfehler aus dem Residuenverlauf abgeleitet werden könnte. Ob dies möglich ist wird in Abschnitt E5 untersucht.

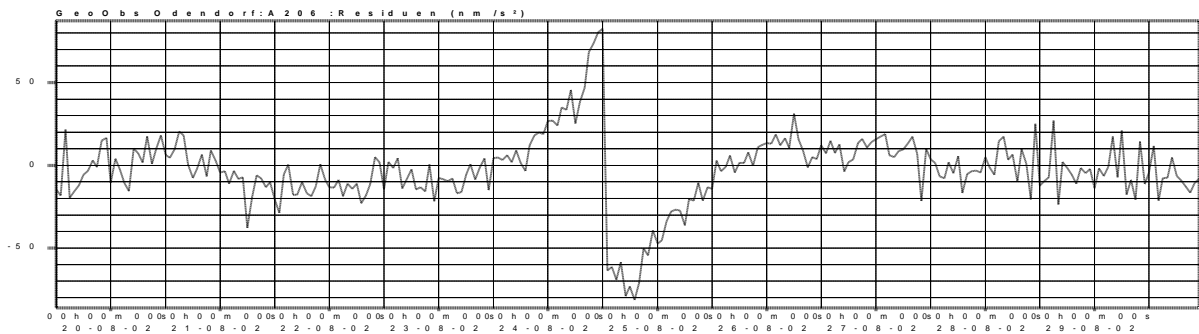


Abbildung E.28: Beispiel des Residuenverlaufs bei ungenauer Sprunghöhenbestimmung / Sprungkorrektur; Spindelverstellung am 24.08.2002 um 12⁰⁸UT; Gravimeter A206, ungefilterte Daten

3.4 Die Erkennung von Störprozessen

3.4.1 Vorbemerkung

Die primäre Voraussetzung für die Berücksichtigung von Störprozessen ist die Erkennung ihres Vorhandenseins. Die graphische Gegenüberstellung synchroner Zeitreihen liefert in diesem Sinne erste Informationen, einschließlich solcher über Stationarität und Größenordnungen der eventuell vorhandenen Korrelationen.

3.4.2 Die Residuenspektren

3.4.2.1 Vorbemerkung

Eine Spektralanalyse der Residuen ermöglicht das Erkennen periodischer Störsignale in den gravimetrischen Messdaten. Von besonderer Bedeutung sind im Rahmen der Aufgabenstellung solche periodischen Störprozesse, die innerhalb der Gezeitenbänder ablaufen und dadurch die durch Schätzung (Gezeitenanalyse) ermittelten Gezeitenparameter beeinflussen.

Betrachtet werden im folgenden nur die Daten längerer Registrierreihen.

3.4.2.2 Gravimeter A206 – gefilterte Daten

Im halbtägigen und ganztägigen Periodenbereich sind lediglich schwach ausgeprägte Spektrallinien zu erkennen. Längerperiodische Signale erreichen ihr Maximum im viertägigen Spektralbereich mit Amplituden von etwa $1,5 \text{ nm/s}^2$.

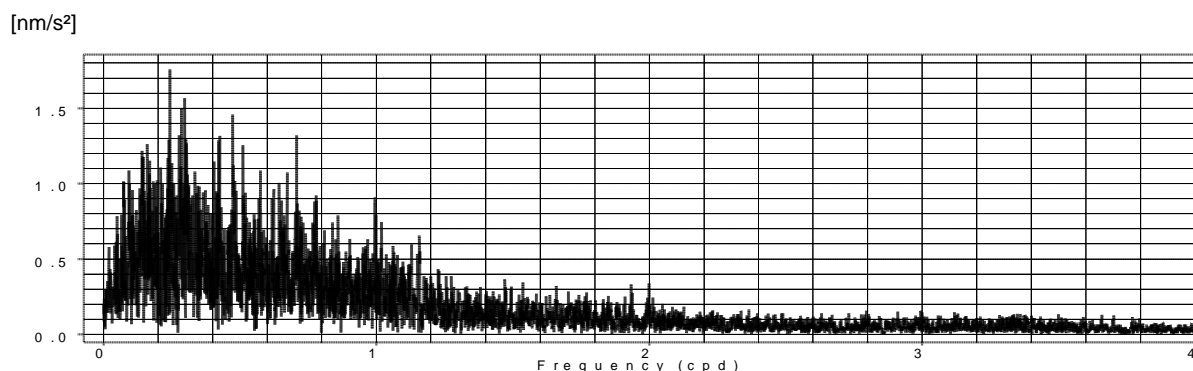


Abbildung E.29: Amplitudenspektrum der Residuen der Gezeitenanalyse des Gravimeter A206 – gefilterte Daten - Registrierzeitraum vom 17. November 2000 bis 13. Januar 2003

3.4.2.3 Gravimeter A206 – ungefilterte Daten

Das Spektrum der Residuen zeigt für die ungefilterten Daten des Gravimeter A206 eine deutliche Spektrallinie im zweitägigen sowie eine klare Linie im wöchentlichen Bereich (siehe auch Abschnitt D7.2 und Abschnitt E1).

Daneben sind schwach ausgeprägte Frequenzen im halb- sowie sehr schwache auch im ganztägigen Gebiet zu erkennen, deren Signifikanz jedoch unsicher ist.

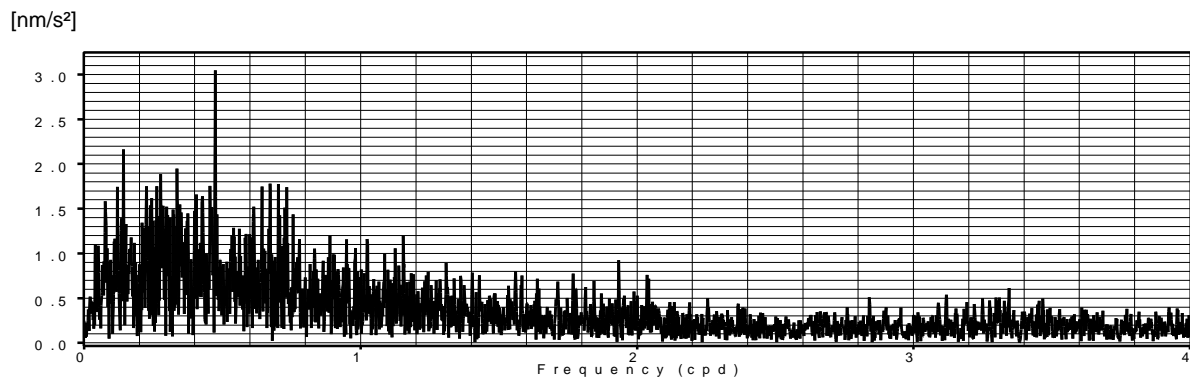


Abbildung E.30: Amplitudenspektrum der Residuen der Gezeitenanalyse des Gravimeter A206 – ungefilterte Daten; Registrierzeitraum vom 21. Juli 2001 bis 13. Januar 2003

3.4.2.4 Gravimeter LCR-G-xx1F

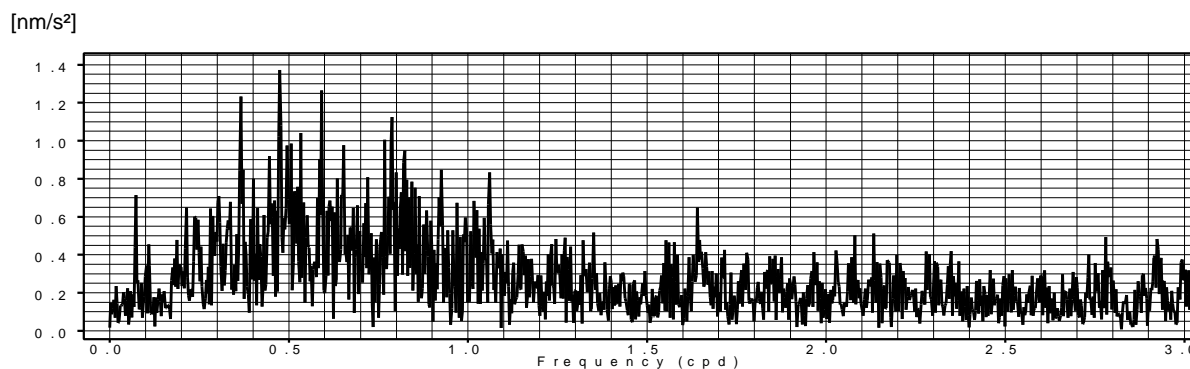


Abbildung E.31: Amplitudenspektrum der Residuen der Gezeitenanalyse des Gravimeter LCR-G-xx1F; Registrierzeitraum vom 27. Juli 2001 bis 19. Mai 2002

Mögliche periodische Störsignale im ganztägigen und halbtägigen Gezeitenband treten nur schwach aus dem spektralen Rauschpegel hervor. Hingegen sind im zweitägigen Periodenbereich wiederum Signale zu erkennen mit einer Amplitude von etwa $1,2 \text{ nm/s}^2$.

3.4.3 Das Spektrum der Luftdruckvariationen

Das Luftdruckspektrum zeigt eine signifikante Periodizität an der Stelle 2Cpd ($30^\circ/\text{h}$) mit einer Amplitude von $0,2 \text{ mbar}$ und Andeutungen von Nebenharmonischen bei 1Cpd und 3Cpd. Die periodischen Luftdruckvariationen im Frequenzbereich $30^\circ/\text{h}$ treten an der Stelle S_2 des halbtägigen Gezeitenbands auf. Sie sind solaren Ursprungs und werden als Wirkungen atmosphärischer Resonanzeffekte interpretiert [CHAPMAN UND LINDZEN 1970]. Der Effekt weist eine globale Verteilung auf, wobei Amplitude und Phase aber abhängig sind vom Ort der Luftdruckbeobachtungen (Breiten- und Längenabhängigkeit).

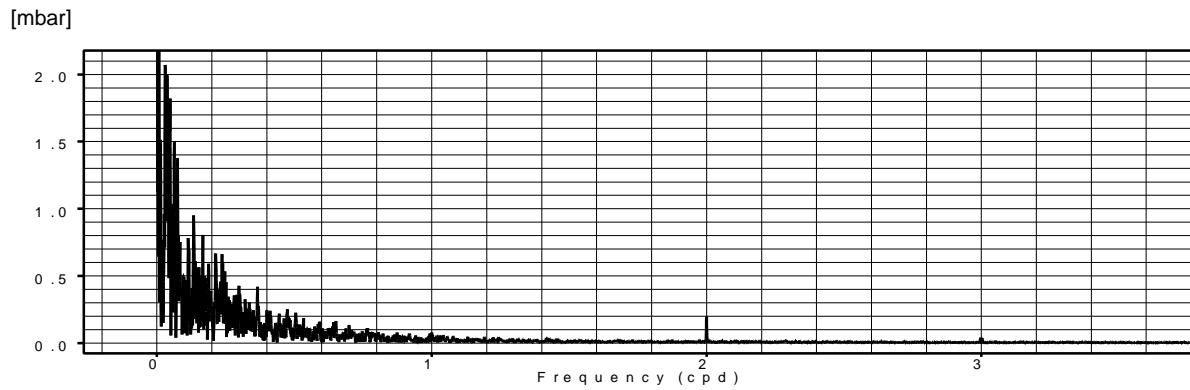


Abbildung E.32: Amplitudenspektrum der Luftdruckvariationen
Stündliche Mittelwerte - Registrierzeitraum 28. März 2001 bis 14. Januar 2003

3.4.4 Das Spektrum der Temperaturvariationen in der Messkammer

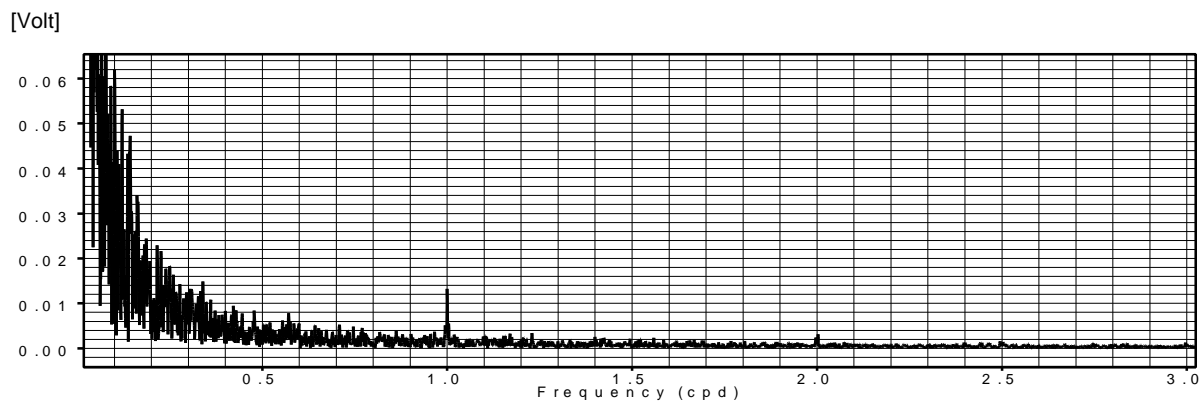


Abbildung E.33: Spektrum der Temperaturvariationen
Stündliche Mittelwerte - Registrierzeitraum 31. Oktober 2000 bis 14. Januar 2003

Man erkennt eine schwache ganztägige Temperaturvariation ($15^\circ/\text{h}$) an der Frequenzstelle S_1 des Gezeitenbands mit einer Amplitude von etwa 0,015 Volt, entsprechend etwa $0,004^\circ\text{C}$, außerdem eine zugeordnete, schwach ausgeprägte halbtägige Subharmonische (siehe auch Abschnitt D5).

3.5 Die Gegenüberstellung von Luftdruckvariationen und Residuenverlauf

Änderungen des Luftdrucks in der Umgebung einer gravimetrischen Beobachtungsstation verursachen primär gravitative Effekte als Folge der Dichteveränderungen im wirksamen Luftvolumen. Hinzu kommen potentiell instrumentelle Reaktionen der Gravimeter auf die Luftdruckvariationen am Beobachtungsort.

Abbildung E.34 zeigt exemplarisch die Gegenüberstellung der im GeoObservatorium gemessenen zeitlichen Luftdruckvariationen mit den Residuen der Gezeitenanalysen von gravimetrischen Beobachtungsdaten, die synchron mit vier Gravimetern beobachtet wurden.

Man erkennt einen mehr oder weniger ausgeprägten Zusammenhang zwischen Luftdruck- und Residuenverlauf lediglich innerhalb eines relativ kurzen Zeitbereichs. Dies erklärt sich aus den Wirkungen des bei der Gezeitenanalyse verwendeten Filters (siehe Abschnitt B6), der die „langsamen“ gravimetrischen Luftdruckeffekte als Drift eliminiert. Der Zusammenhang wird deutlicher, wenn man einen Zeitraum darstellt, in dem relativ kurzzeitliche Luftdruckvariationen auftreten, wie in Abbildung E.35.

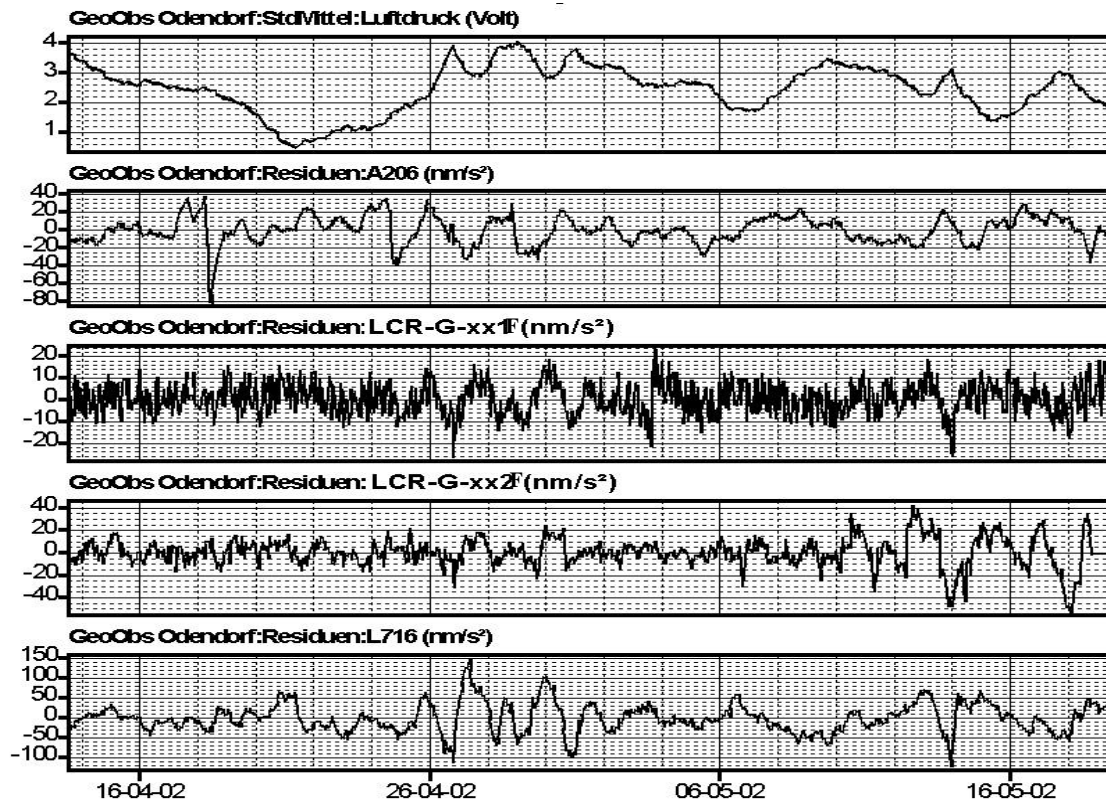


Abbildung E.34: Exemplarische Gegenüberstellung von Luftdruckverlauf und Residuenverlauf für einen Zeitraum von etwa einem MONAT; die Darstellung von A206 bezieht sich auf die gefilterten Daten; Luftdruckmaßstab: 1 Volt entspricht 10mbar

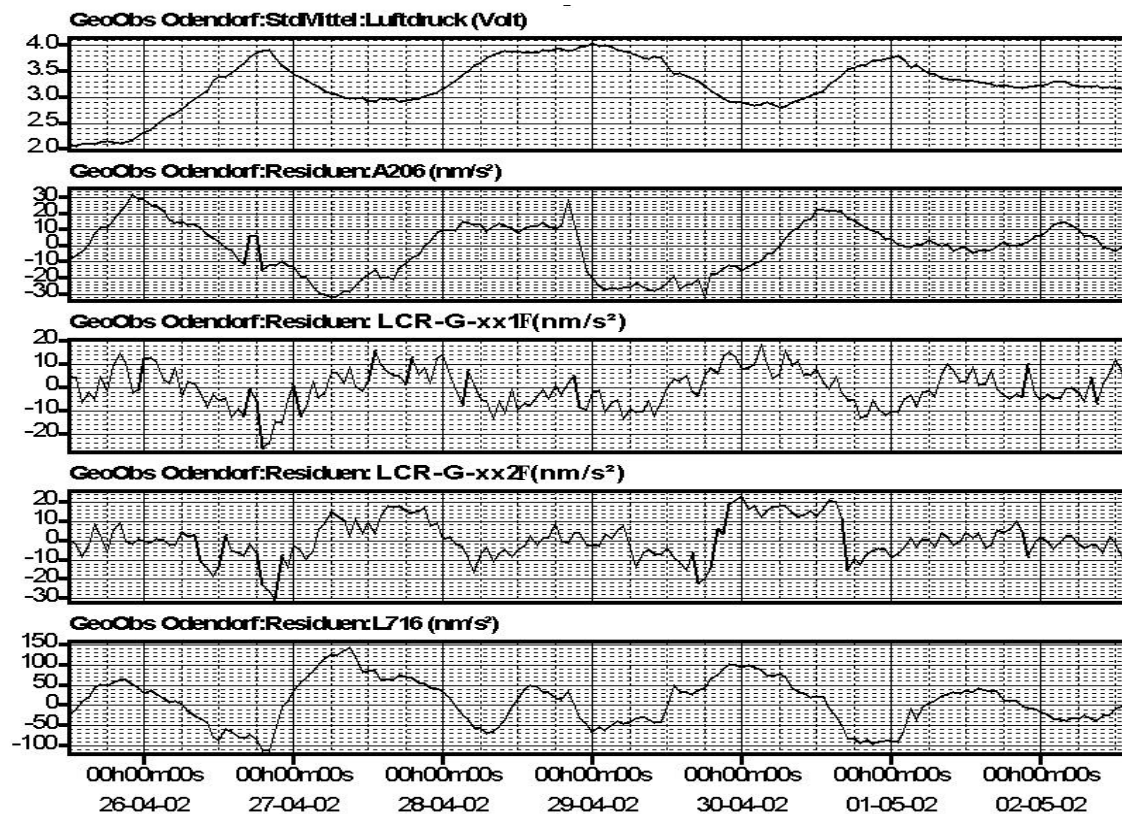


Abbildung E.35: Exemplarische Gegenüberstellung von Luftdruckverlauf und Residuenverlauf für einen Zeitraum von etwa einer WOCHE; die Darstellung von A206 bezieht sich auf die gefilterten Daten; Luftdruckmaßstab: 1 Volt entspricht 10mbar

Erkennbar wird auch, dass es offensichtlich nicht nur Luftdruckeffekte sind, die den zeitlichen Verlauf der Residuen steuern, und dass die Geräte nicht einheitlich auf die Luftdruckvariationen reagieren. Dies weist bereits auf instrumentelle Effekte hin, denn die gravitativen Wirkungen der Luftdruckvariationen sind für alle Geräte identisch (gleicher Beobachtungsort). Bei dem Gravimeter LCR716 ist im Vergleich zu den anderen Gravimetern die Größe der Residuenvariationen zu beachten, sie ist eine Folge mangelnder Druckdichtigkeit des inneren Gravimetergehäuses.

Die Graphiken deuten somit bereits an, dass man bei Berechnungen der Regressionsfunktionen zwischen örtlichem Luftdruck und dem Gravimetersignal mit relativ großen Streuungen der Regressionskoeffizienten zu rechnen hat (siehe Abschnitt E8.1).

3.6 Die Gegenüberstellung von Variationen der Temperatur in der Messkammer und Residuenverlauf

Der Einfluss der Temperaturvariationen auf das registrierte Gravimetersignal besteht im wesentlichen aus der dadurch verursachten Gravimeterdrift (siehe Abschnitt D1, insbesondere auch Abbildung D.1 und Abbildung D.2) und nicht aus einem gravitativen Effekt. Die Gegenüberstellung von Temperaturverlauf und den Residuen in Abbildung E.36 zeigt somit auch keine ausgeprägten Korrelationen. Das ist auch dadurch zu erklären, dass die Einflüsse eher langfristig auf die Gravimeter wirken und diese Effekte durch das verwendete Pertzev-Filter eliminiert werden.

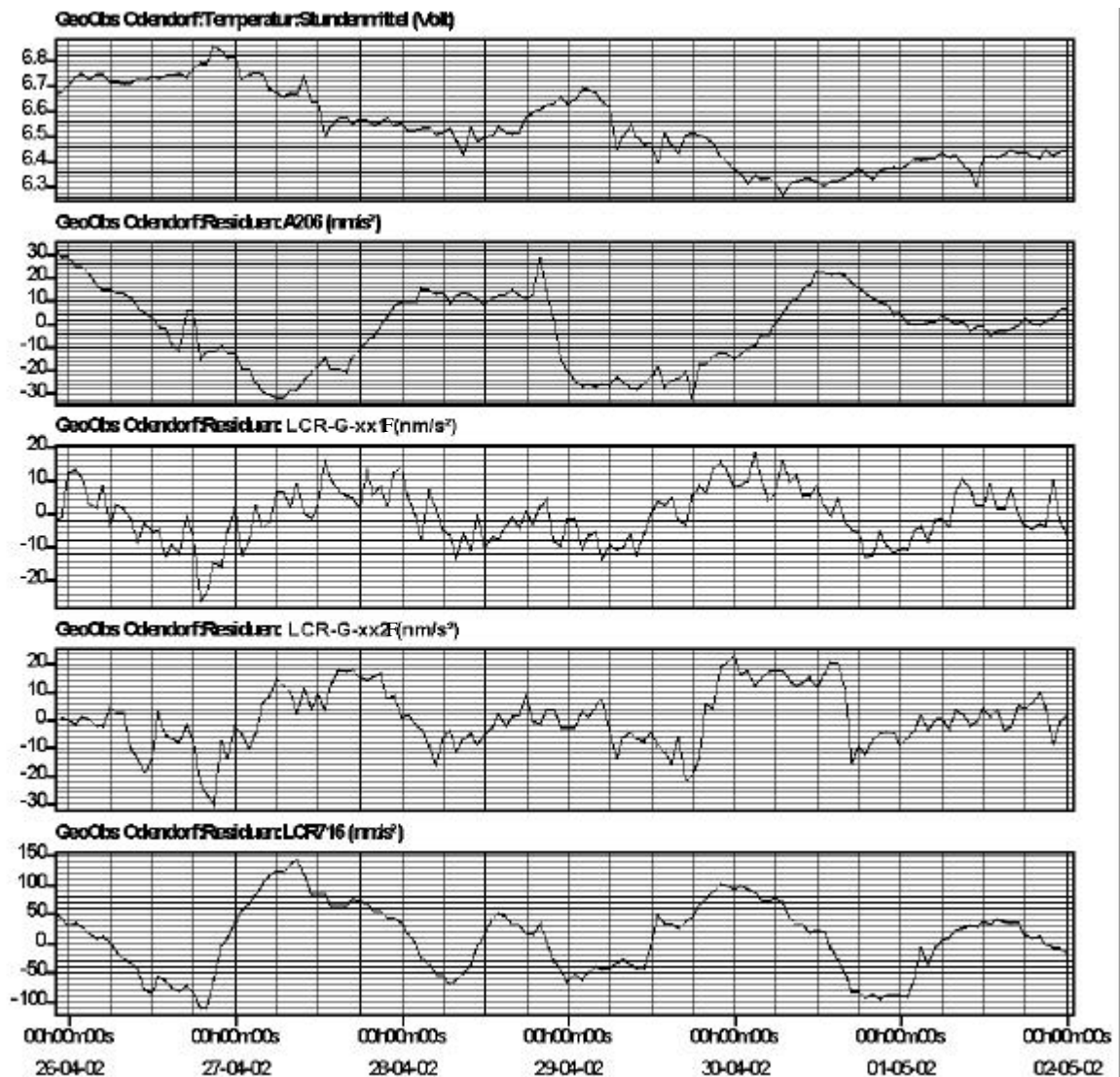


Abbildung E.36: Exemplarische Gegenüberstellung von Temperaturverlauf und Residuenverlauf für einen Zeitraum von etwa einer Woche; die Darstellung von A206 bezieht sich auf die gefilterten Daten; Temperaturmaßstab: 1 Volt entspricht $0,25^{\circ}\text{C}$

4 Untersuchung zur zeitlichen Maßstabsstabilität

4.1 Gravimeter A206 – gefilterte Daten

Die durchgeführten Gezeitenanalysen der Registrierdaten (siehe Abschnitt D6.2) basieren auf der Hypothese, dass sich der Registriermaßstab innerhalb der Analysenzeiträume nicht relevant ändert. Der Prüfung dieser Hypothese kommt daher eine grundlegende Bedeutung bei.

Das Problem der Untersuchung der zeitlichen Maßstabskonstanz ist von dem Problem der Maßstabsbestimmung dann zu unterscheiden, wenn die erreichbare Signalauflösung bei individuellen (einzelnen) Eichungen deutlich geringer ist als die geforderte relative Maßstabsgenauigkeit der Registrierdaten. Dieser Sachverhalt ist im Falle des Gravimeters A206 gegeben (siehe Abschnitt D1). Eine (statistische) relative Abweichung eines Eichwerts von etwa 0,1% lässt sich bei diesem Gerät nur durch eine größere Anzahl von Eichungen erreichen.

Liegen hinreichend lange Datensätze vor, so lässt sich a-posteriori die Stabilität oder eine zeitliche Änderung des Registriermaßstabs durch aufeinander folgende Gezeitenanalysen überprüfen bzw. ermitteln. Aus den in Abschnitt E6 dargelegten Gründen können im allgemeinen lediglich die Beträge der sequentiell berechneten Amplitudenquotienten der Partialtiden M_2 und O_1 zur Überprüfung des Registriermaßstabs verwendet werden.

Für die Untersuchung des zeitlichen Maßstabsverhaltens des Gravimeters A206 (gefilterter Ausgang) wurden die Daten der Registrierungen von Dezember 2000 bis Dezember 2002 in aufeinander folgenden Zeitreihen von zwei, drei und vier Monaten analysiert. Die Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt.

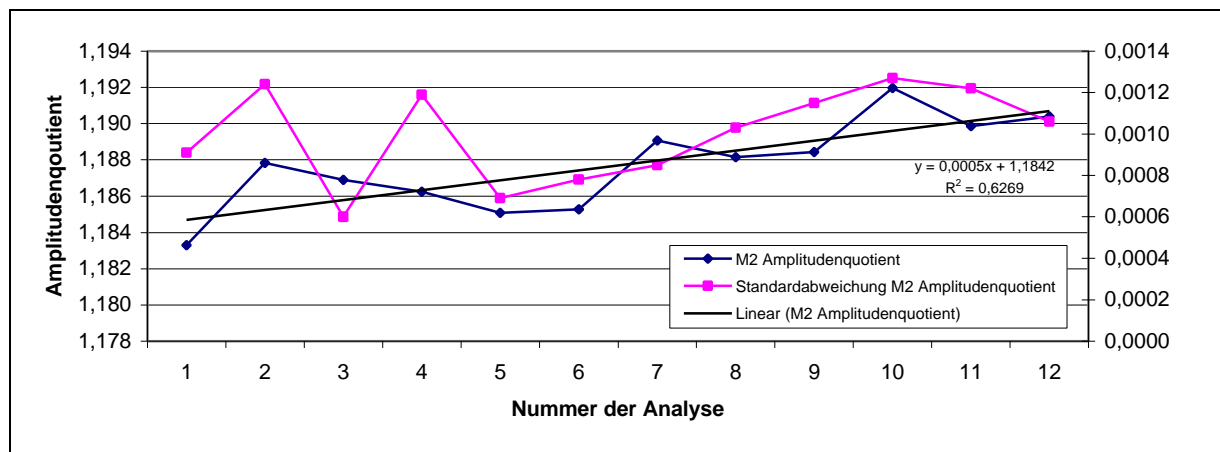


Abbildung E.37: Zeitlicher Verlauf des Amplitudenquotienten M_2 bei aufeinander folgenden 2-Monatsanalysen – Dezember 2000 bis Dezember 2002

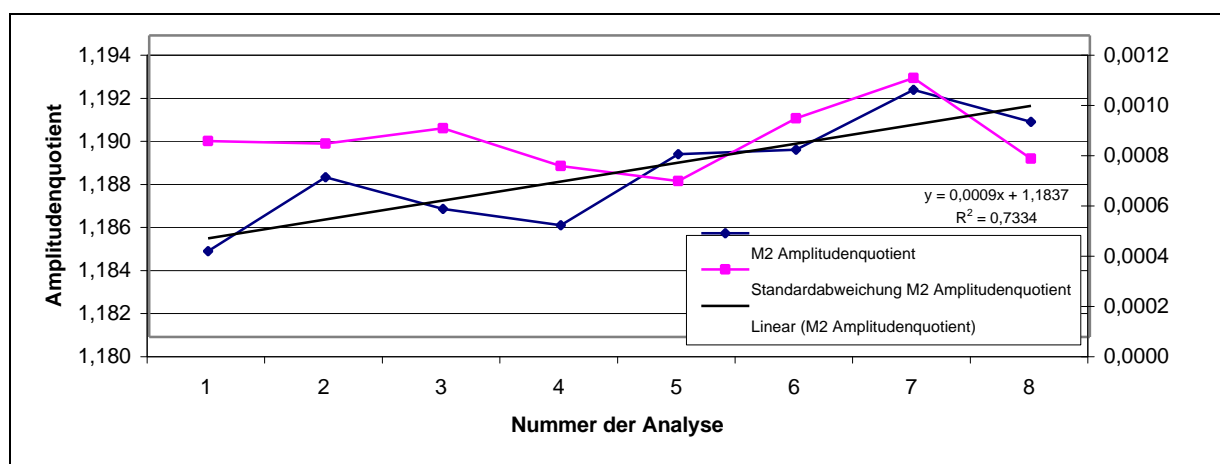


Abbildung E.38: Zeitlicher Verlauf des Amplitudenquotienten M_2 bei aufeinander folgenden 3-Monatsanalysen – Dezember 2000 bis Dezember 2002

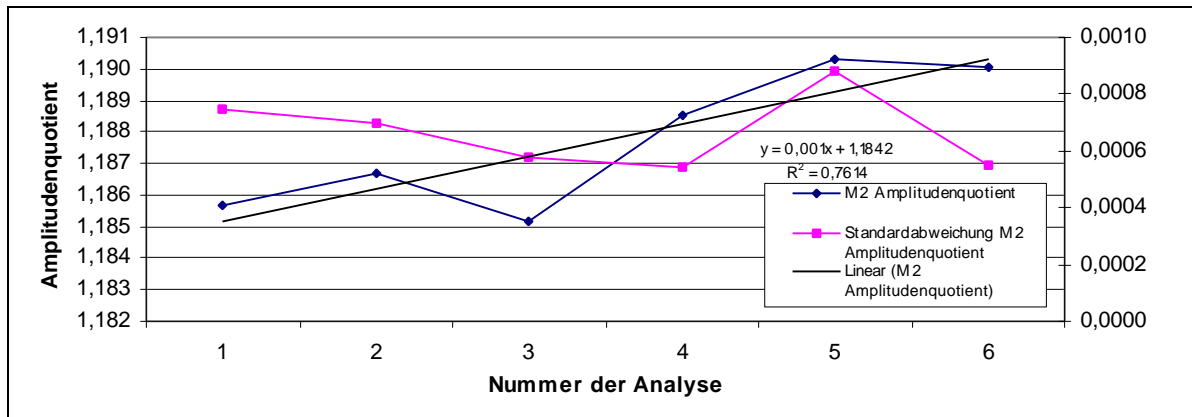


Abbildung E.39: Zeitlicher Verlauf des Amplitudenquotienten M_2 bei aufeinander folgenden 4-Monatsanalysen – Dezember 2000 bis Dezember 2002

Ergebnis der Untersuchungen des Amplitudenquotienten M_2 hinsichtlich zeitlicher Änderungen:

Es ist für die drei unterschiedlich langen Analysenzeiträume ein zeitlicher Trend zur Vergrößerung des Amplitudenquotienten von etwa 0,5% in zwei Jahren zu erkennen. Nach ausschließlich statistischen Kriterien wäre dieser Trend allerdings als nicht signifikant oder schwach signifikant zu bewerten.

Für eine Signifikanz jedoch könnte der annähernd einheitliche Verlauf der Amplitudenquotienten sprechen.

Um einen möglichen Trend weiter zu untersuchen, wird auch der Verlauf des Amplitudenquotient O_1 untersucht:

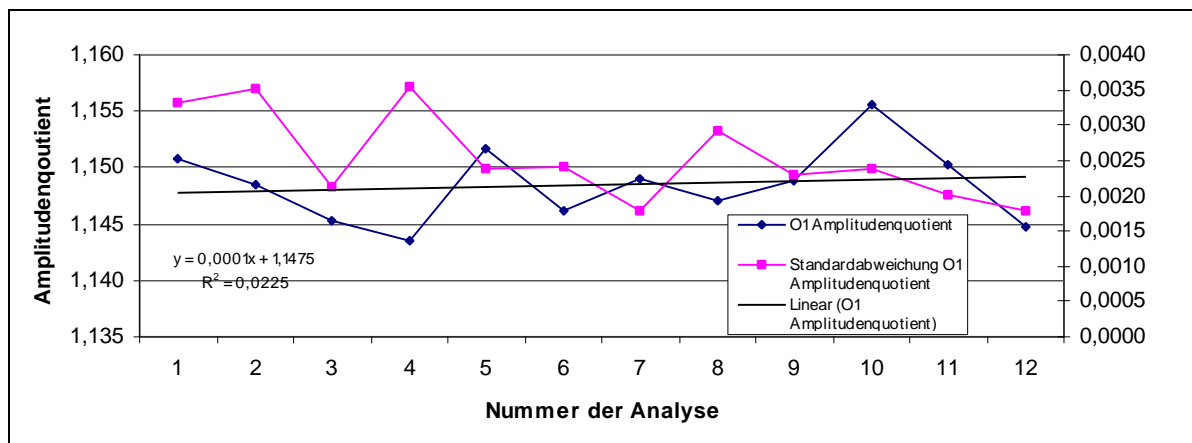


Abbildung E.40: Zeitlicher Verlauf des Amplitudenquotienten O_1 bei aufeinander folgenden 2-Monatsanalysen – Dezember 2000 bis Dezember 2002

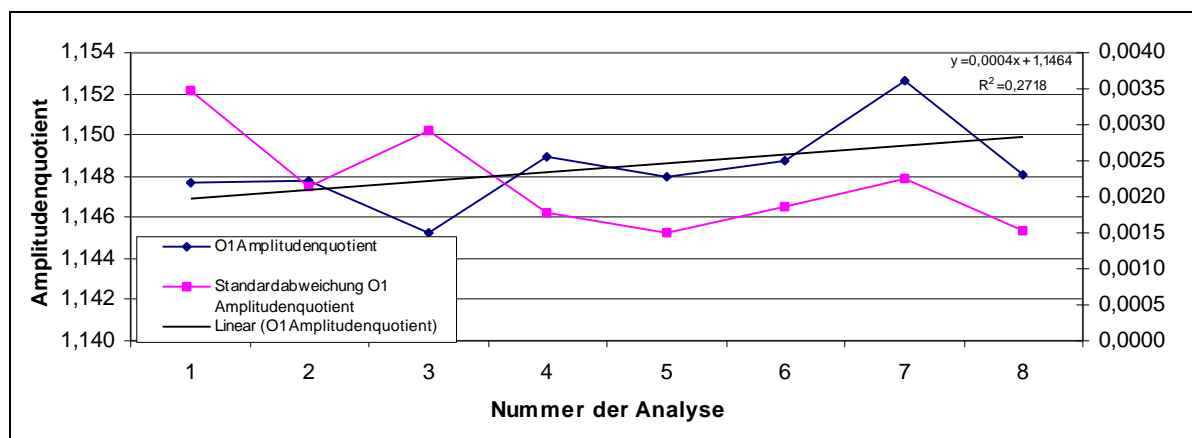


Abbildung E.41: Zeitlicher Verlauf des Amplitudenquotienten O_1 bei aufeinander folgenden 3-Monatsanalysen – Dezember 2000 bis Dezember 2002

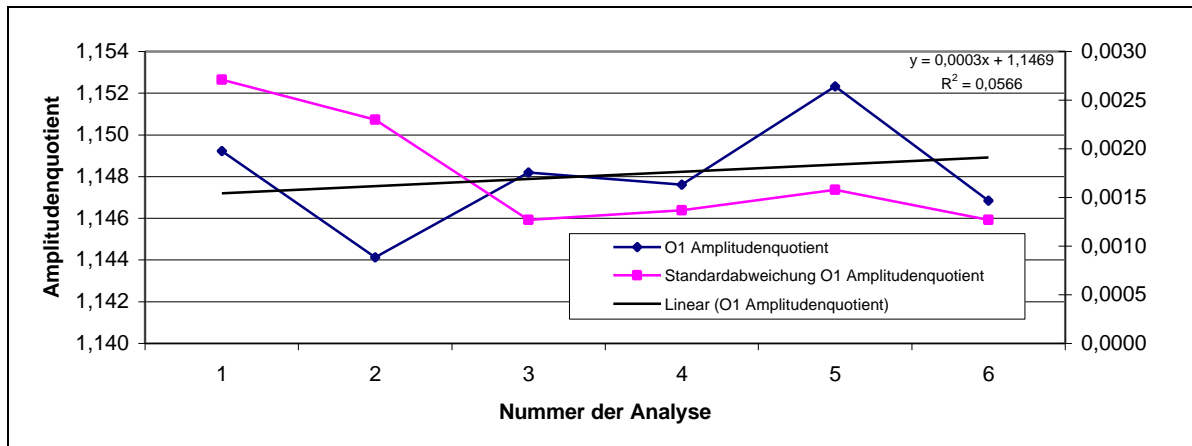


Abbildung E.42: Zeitlicher Verlauf des Amplitudenquotient O_1 bei aufeinander folgenden 4-Monatsanalysen – Dezember 2000 bis Dezember 2002

Ergebnis der Untersuchungen des Amplitudenquotienten O_1 hinsichtlich zeitlicher Änderungen:

Es ist bei den Ergebnissen der Teilanalysen wiederum ein zeitlicher Trend von ca. 3‰ in Richtung einer Vergrößerung der Amplitudenquotienten zu erkennen, nach statistischen Kriterien ist dieser allerdings wiederum als nicht signifikant einzustufen.

Hinweise zur Interpretation der vorstehenden Ergebnisse könnte der zeitliche Verlauf der den einzelnen Analysen zugeordneten Standardabweichungen der Gewichtseinheit liefern:

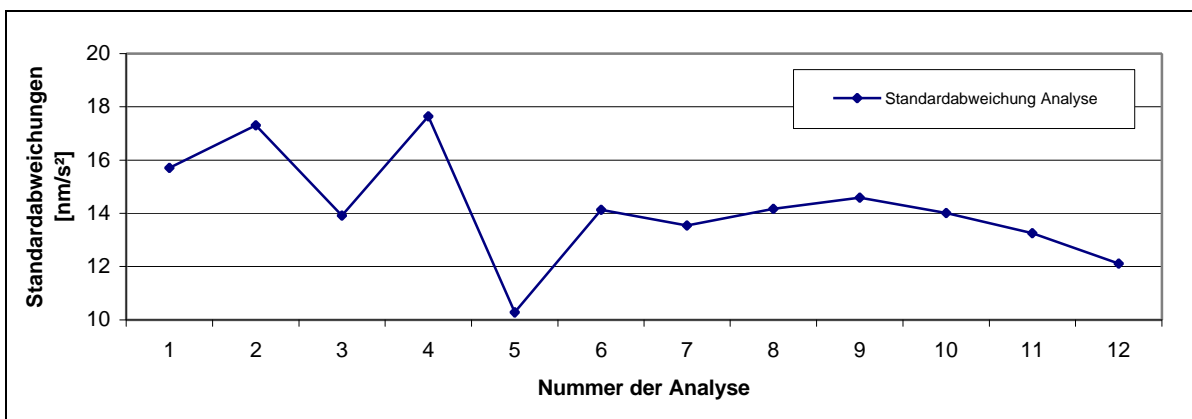


Abbildung E.43: Zeitlicher Verlauf der Standardabweichung der Gewichtseinheit (Modellanpassung) bei aufeinander folgenden 2-Monatsanalysen

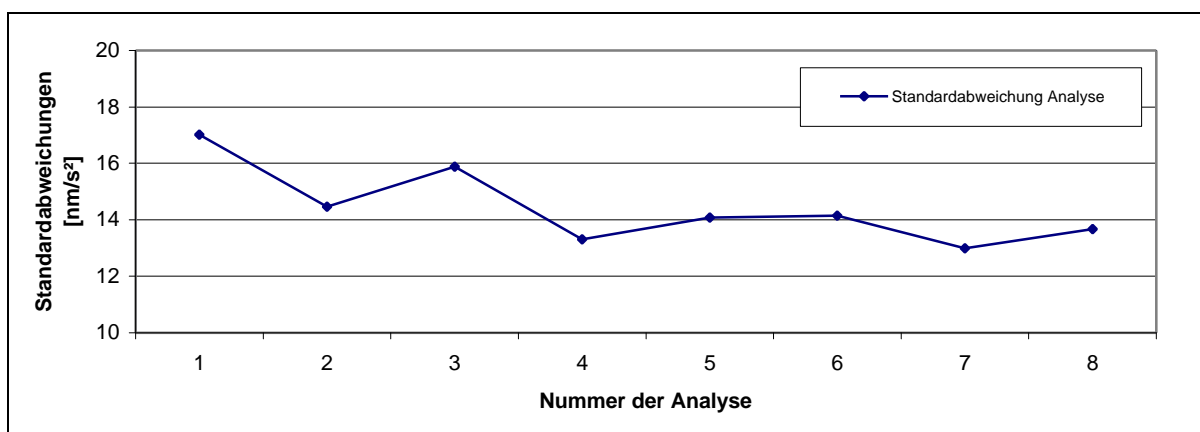


Abbildung E.44: Zeitlicher Verlauf der Standardabweichung der Gewichtseinheit (Modellanpassung) bei aufeinander folgenden 3-Monatsanalysen

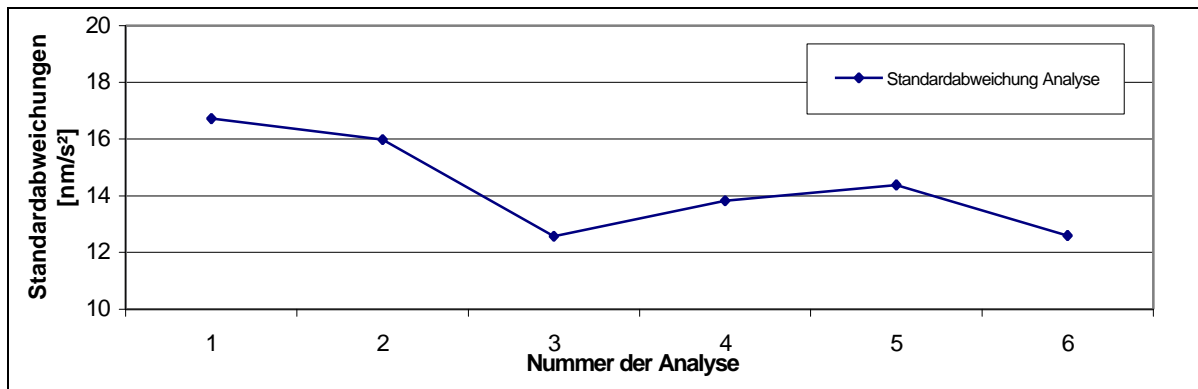


Abbildung E.45: Zeitlicher Verlauf der Standardabweichung der Gewichtseinheit (Modellanpassung) bei aufeinander folgenden 4-Monatsanalysen

Ergebnis der Untersuchungen der Standardabweichung der Gewichtseinheit hinsichtlich zeitlicher Änderungen:

Auffällig sind bei der Zweimonatsanalyse die relativ starken Streuungen der Standardabweichungen im ersten Jahr des Registrierzeitraums. Diese Streuungen können mit großer Wahrscheinlichkeit als Auswirkungen einer Vielzahl experimenteller Arbeiten interpretiert werden, die während dieses Zeitraums in der Messkammer ausgeführt wurden und die das Gravimeter beeinflussen haben könnten. Gegen Ende des Jahres 2001 wurden diese Arbeiten erheblich reduziert, was nachfolgend zu einer deutlichen Steigerung der Homogenität der Standardabweichungen führte. In den Drei- und Viermonatsanalysen werden die genannten Effekte zunehmend verwischt.

Die Güte von Registrierungen zeigt sich (in Grenzen unabhängig von der Maßstabsfrage) im Grad der Homogenität der berechneten Phasenverschiebungen der Partialtiden:

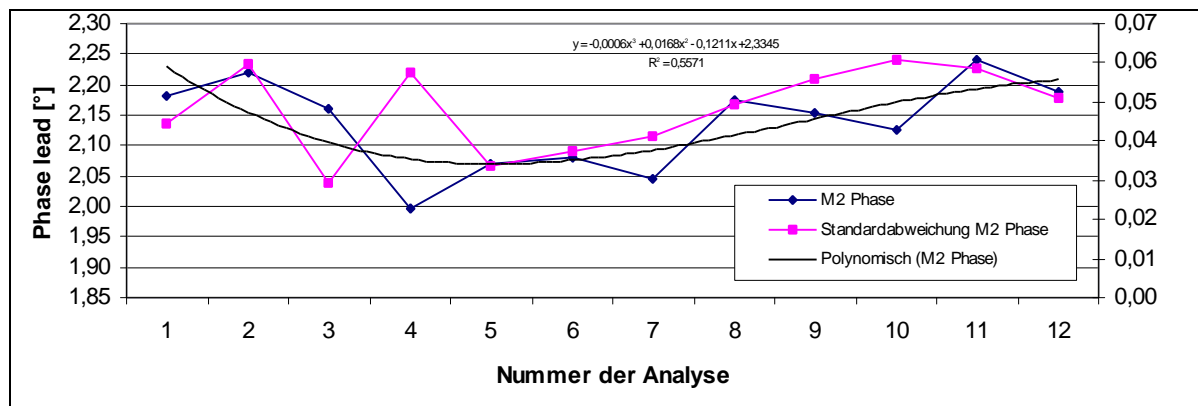


Abbildung E.46: Zeitlicher Verlauf der Phasendifferenz M_2 bei aufeinander folgenden 2-Monatsanalysen Dezember 2000 bis Dezember 2002

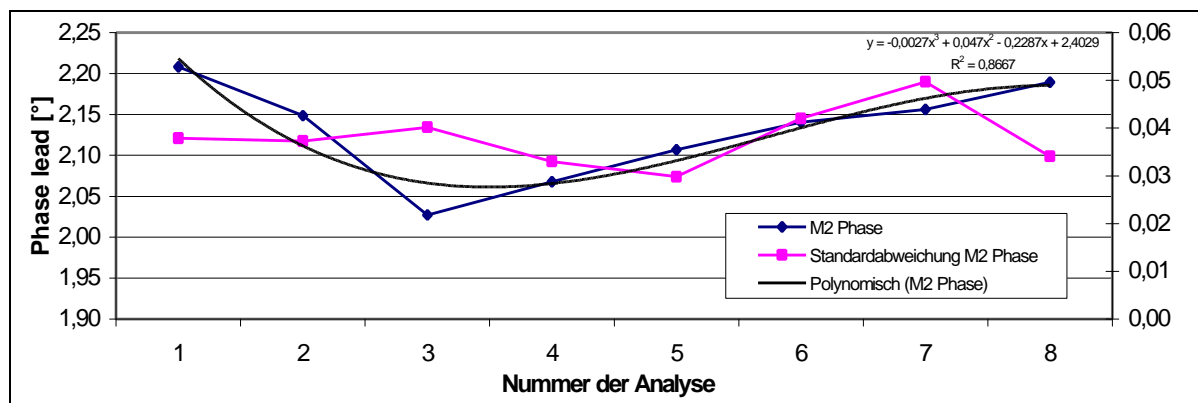


Abbildung E.47: Zeitlicher Verlauf der Phasendifferenz M_2 bei aufeinander folgenden 3-Monatsanalysen Dezember 2000 bis Dezember 2002

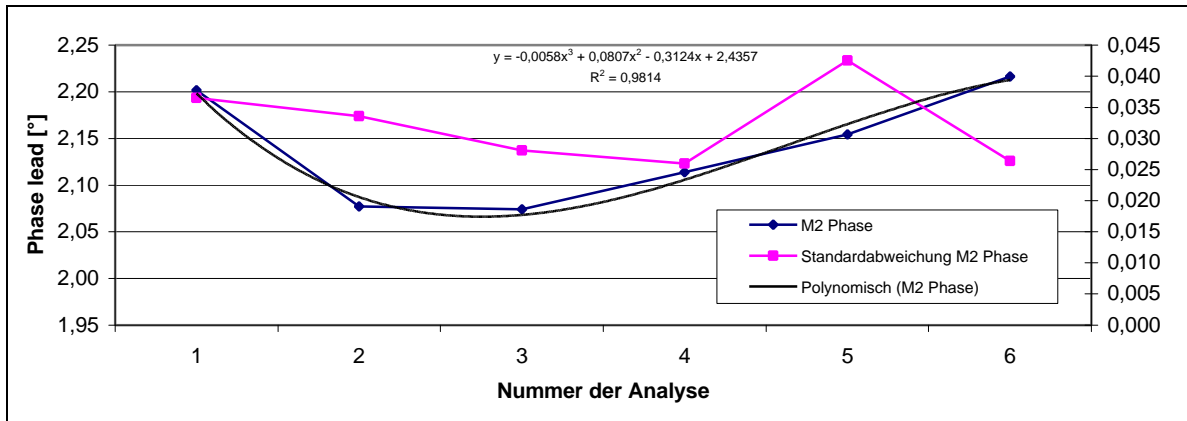


Abbildung E.48: Zeitlicher Verlauf der Phasendifferenz M_2 bei aufeinander folgenden 4-Monatsanalysen Dezember 2000 bis Dezember 2002

Ergebnis der Untersuchungen der Phasenverschiebungen M_2 hinsichtlich zeitlicher Änderungen:

Auffällig ist ein weitgehend einheitlicher Trend im Verlauf der berechneten Phasenverschiebungen. Nach statistischen Kriterien steigt dessen Signifikanz mit zunehmender Länge der Zeiträume der Einzelanalysen.

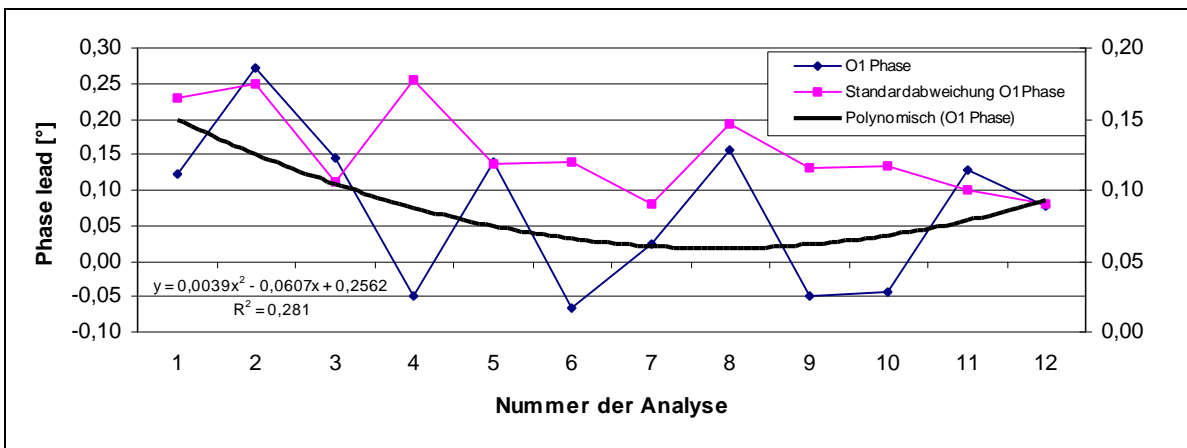


Abbildung E.49: Zeitlicher Verlauf der Phasendifferenz O_1 bei aufeinander folgenden 2-Monatsanalysen Dezember 2000 bis Dezember 2002

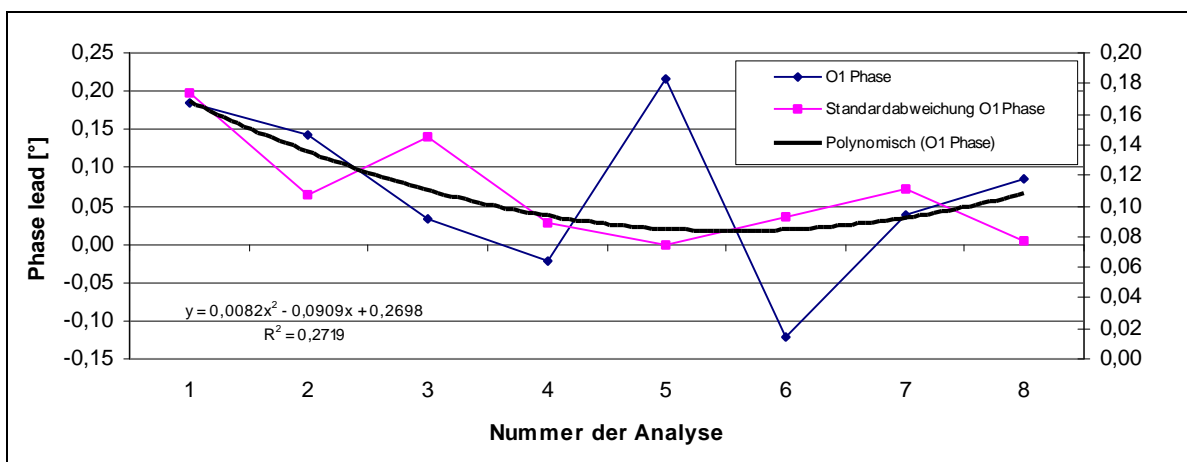


Abbildung E.50: Zeitlicher Verlauf der Phasendifferenz O_1 bei aufeinander folgenden 3-Monatsanalysen Dezember 2000 bis Dezember 2002

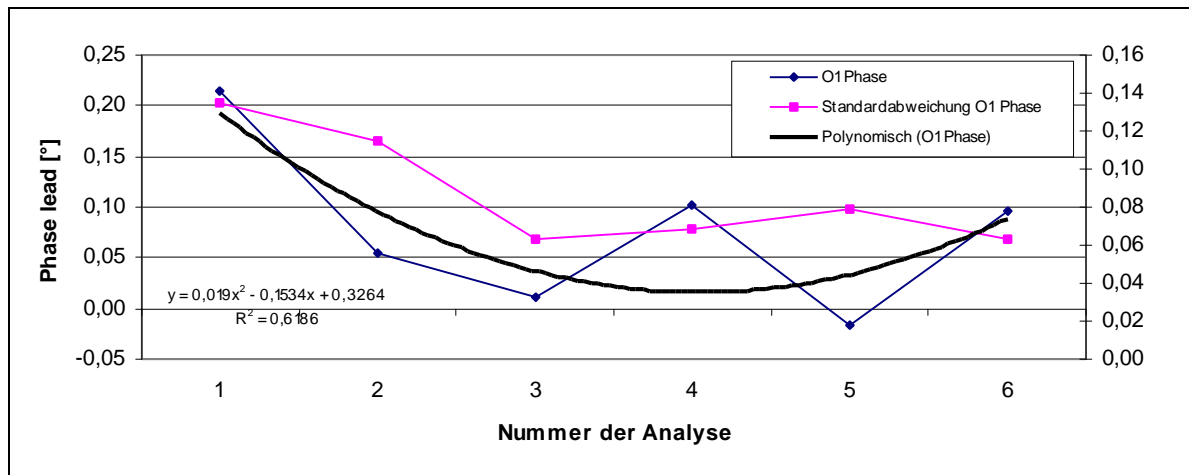


Abbildung E.51: Zeitlicher Verlauf der Phasendifferenz O_1 bei aufeinander folgenden 4-Monatsanalysen Dezember 2000 bis Dezember 2002

Ergebnis der Untersuchungen der Phasenverschiebungen O_1 hinsichtlich zeitlicher Änderungen:

Auffällig ist wiederum ein Trend, der im wesentlichen dem für M_2 zuvor festgestellten etwa entspricht. Nach lediglich statistischen Gesichtspunkten wäre dieser Trend allerdings nicht oder nur schwach signifikant.

Ergänzend wurden abschließend zwei Einjahresanalysen durchgeführt.

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908                               File:  A206J1_1

20010108120000...20010118140000  20010119190000...20010623200000
20010624110000...20010726      0  20010726 90000...20010904150000
20010905 30000...20011012150000 20011014210000...20020101      0
Number of recorded days in total :   352.79

Numerical filter is  PERTZEV57  with 37 coefficients

ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206      Used scale 124.39 µGal/Volt

adjusted tidal parameters :

from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]          [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1   349.5191  1.14707  0.00135  0.0888  0.0673
0.981855 0.998631 P1   163.4862  1.15311  0.00289 -0.1235  0.1435
0.998632 1.001369 S1    7.0034   2.08924  0.17184  8.3562  4.7107
1.001370 1.023622 K1   485.5055  1.13294  0.00095  0.2536  0.0482
1.914129 1.950419 M2   358.2831  1.18575  0.00038  2.1146  0.0184
1.984283 2.002736 S2   167.0406  1.18823  0.00082  0.3555  0.0397
2.002737 2.451943 K2    45.6819  1.19543  0.00308  0.6183  0.1478

Standard deviation of weight unit:   15.204 nm/s**2
    
```

Tabelle E.1: Ergebnisse der ersten Jahresanalyse Gravimeter A206, gefilterte Daten vom 08.01.2001 bis 31.12.2001

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908                               File:  A206J1_2

20020101      0...20020520 50000  20020520140000...20030101      0
Number of recorded days in total :   364.71

Numerical filter is PERTZEV57   with 37 coefficients
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206   Used scale 124.39 µGal/Volt
adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1   350.2297  1.14941  0.00106  0.0615  0.0527
0.981855 0.998631 P1   162.6041  1.14689  0.00240  -0.3891 0.1200
0.998632 1.001369 S1    8.3720   2.49760  0.14373  -4.2869  3.2985
1.001370 1.023622 K1   487.9709  1.13870  0.00076  0.1412  0.0383
1.914129 1.950419 M2   359.4649  1.18966  0.00044  2.1589  0.0213
1.984283 2.002736 S2   168.1937  1.19643  0.00094  0.3550  0.0451
2.002737 2.451943 K2   45.7752   1.19788  0.00320  0.6726  0.1529

Standard deviation of weight unit:   13.686 nm/s**2

```

Tabelle E.2: Ergebnisse der zweiten Jahresanalyse Gravimeter A206, gefilterte Daten vom 01.01.2002 bis 31.12.2002

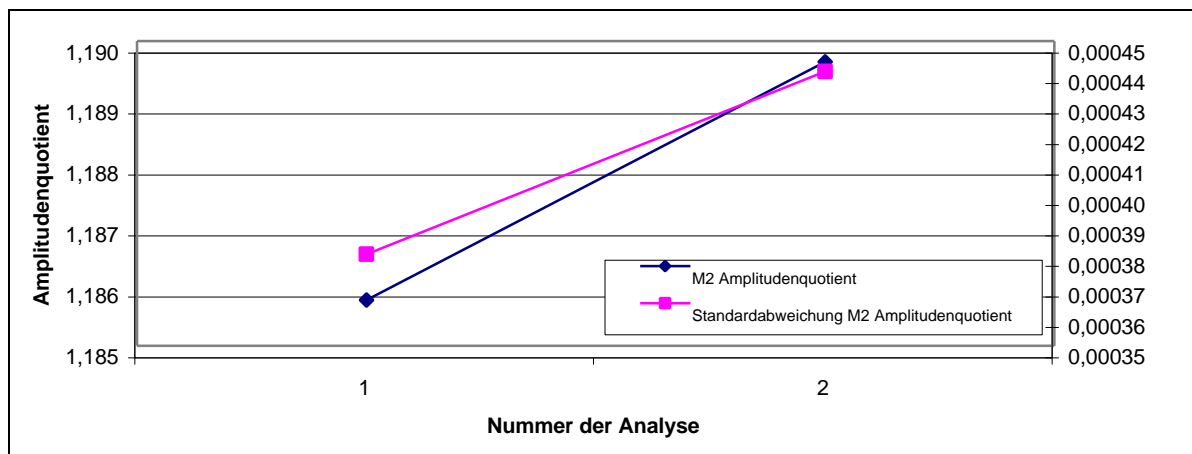


Abbildung E.52: Änderung des Amplitudenquotienten M_2 bei aufeinander folgenden Jahresanalysen

Nach dem 3σ -Kriterium (als erste Näherung) ist die Änderung um etwa 3‰ des Amplitudenquotienten M_2 als signifikant zu bewerten. Der Trend entspricht im wesentlichen dem der Ergebnisse der Einzelanalysen mit kürzeren Datenzeiträumen.

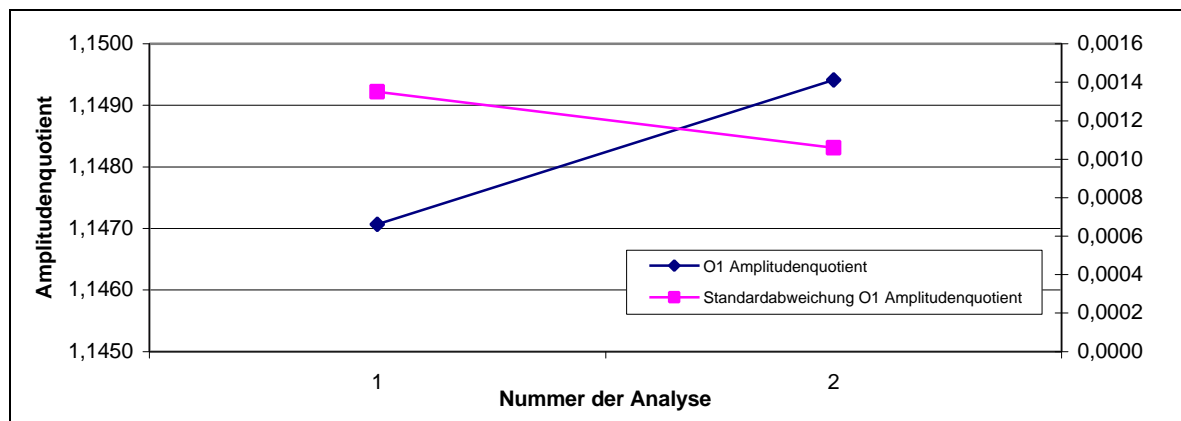


Abbildung E.53: Änderung des Amplitudenquotienten O_1 bei aufeinander folgenden Jahresanalysen

Die Änderung des Amplitudenquotienten O_1 beträgt lediglich etwa 2‰ und muss als nicht-signifikant bewertet werden.

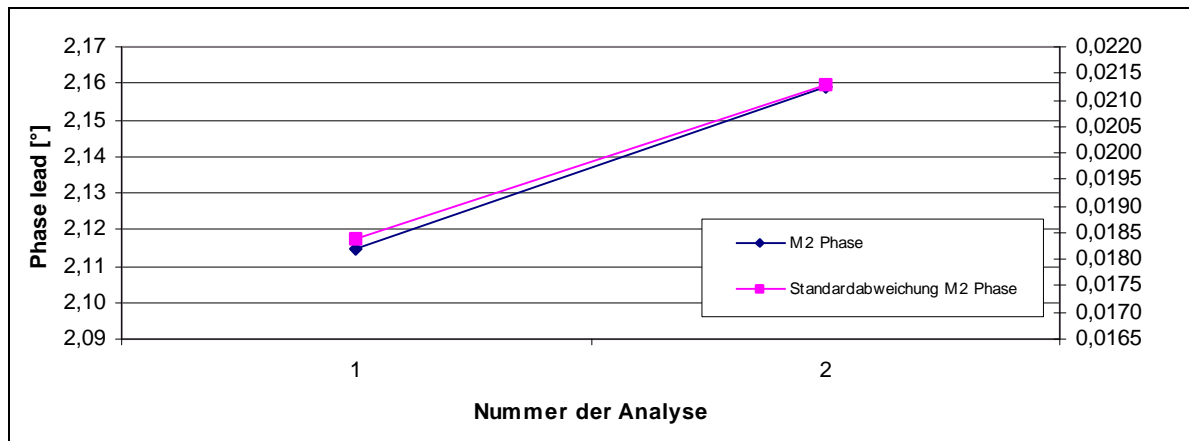


Abbildung E.54: Änderung der Phasendifferenz M_2 bei aufeinander folgenden Jahresanalysen

Die Änderung der Phasendifferenz M_2 von etwa $0,04^\circ$ ist nicht signifikant.

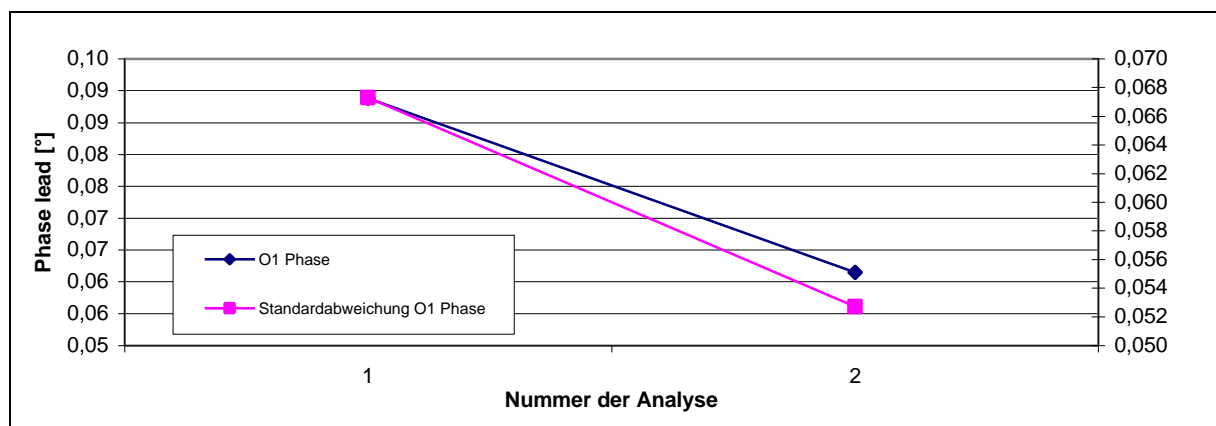


Abbildung E.55: Änderung der Phasendifferenz O_1 bei aufeinander folgenden Jahresanalysen

Die Änderung der Phasendifferenz O_1 von etwa $0,03^\circ$ ist nicht signifikant.

Schlussfolgerung: Hinsichtlich des Maßstabsproblems begründen die dargelegten Ergebnisse eine gezielte Weiterführung der gravimetrischen Beobachtungen und Untersuchungen, wenn eine gesicherte Maßstabsgenauigkeit von besser als 1‰ erreicht werden soll.

4.2 Gravimeter LCR-G-xx1F

Vom 27.07.2001 03hUT bis 20.05.2002 06hUT wurde das Gravimeter LCR-G-xx1F im Rückkopplungsmodus im GeoObservatorium eingesetzt (siehe Abschnitt B3). Die Gesamtzahl der Registriertage beträgt 291.

Entsprechend den Untersuchungen in Abschnitt E4.1 wurden fünf Analysen mit je einer Registrierlänge von 58 Tagen berechnet. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Abbildungen graphisch zusammengestellt.

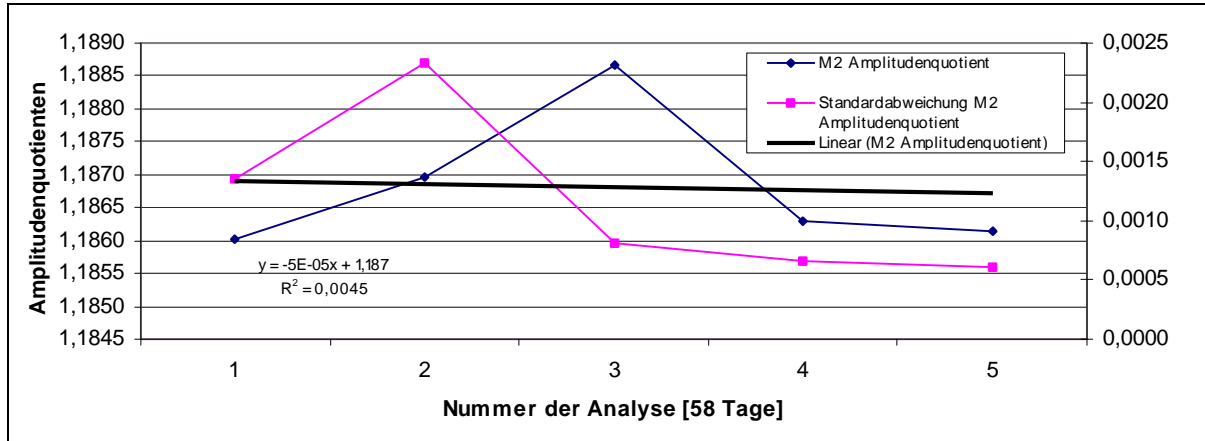


Abbildung E.56: Zeitlicher Verlauf des Amplitudenquotienten M_2 , aufeinander folgende 58Tage-Analysen für den Zeitraum Juli 2001 bis Mai 2002

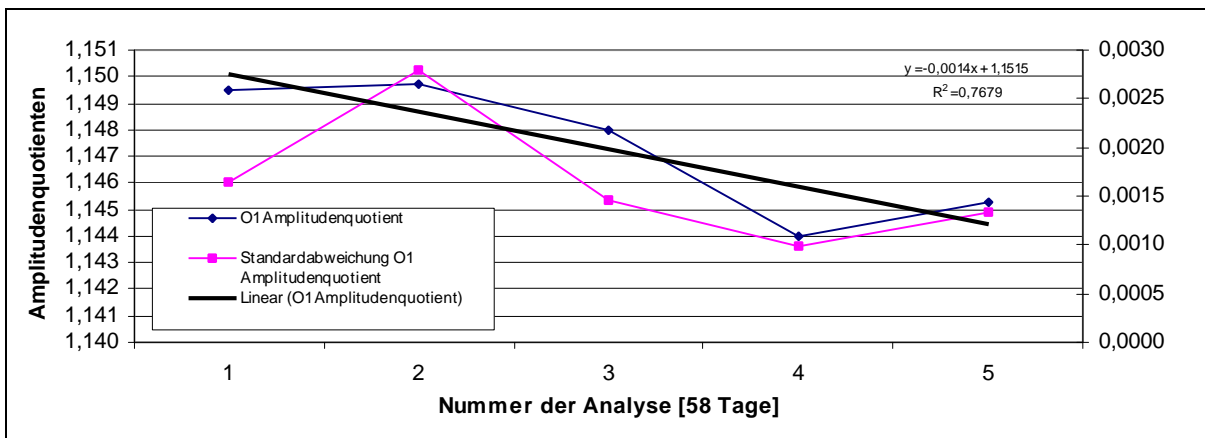


Abbildung E.57: Zeitlicher Verlauf des Amplitudenquotienten O_1 , aufeinander folgende 58Tage-Analysen für den Zeitraum Juli 2001 bis Mai 2002

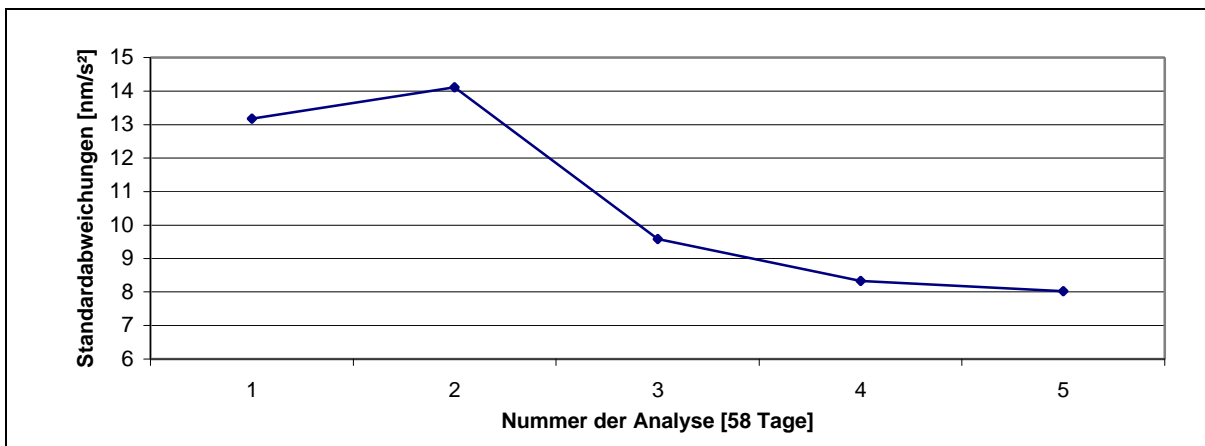


Abbildung E.58: Zeitlicher Verlauf der Standardabweichung der Gewichtseinheit aufeinander folgende 58Tage-Analysen für den Zeitraum Juli 2001 bis Mai 2002

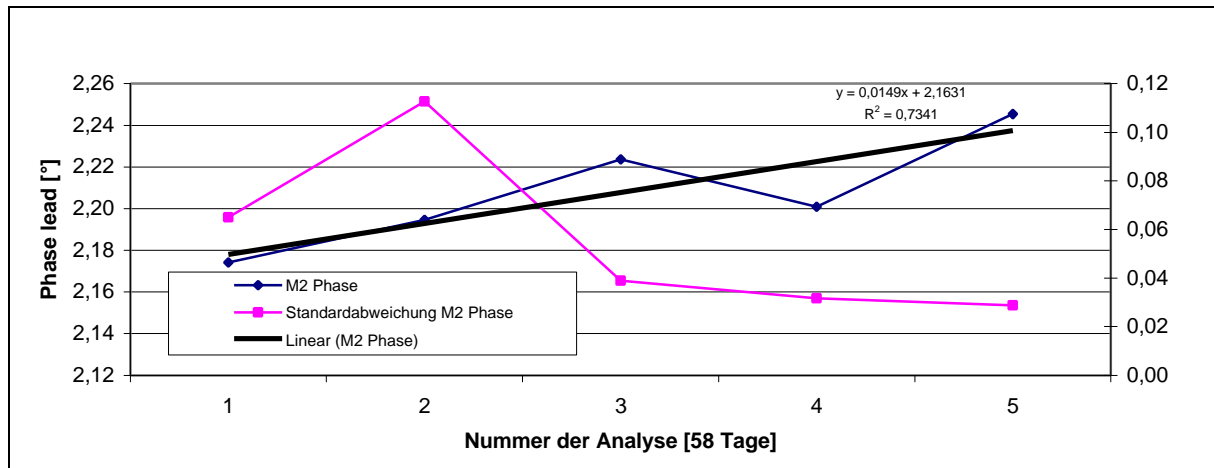


Abbildung E.59: Zeitlicher Verlauf der Phasendifferenz M_2 , aufeinander folgende 58Tage-Analysen für den Zeitraum Juli 2001 bis Mai 2002

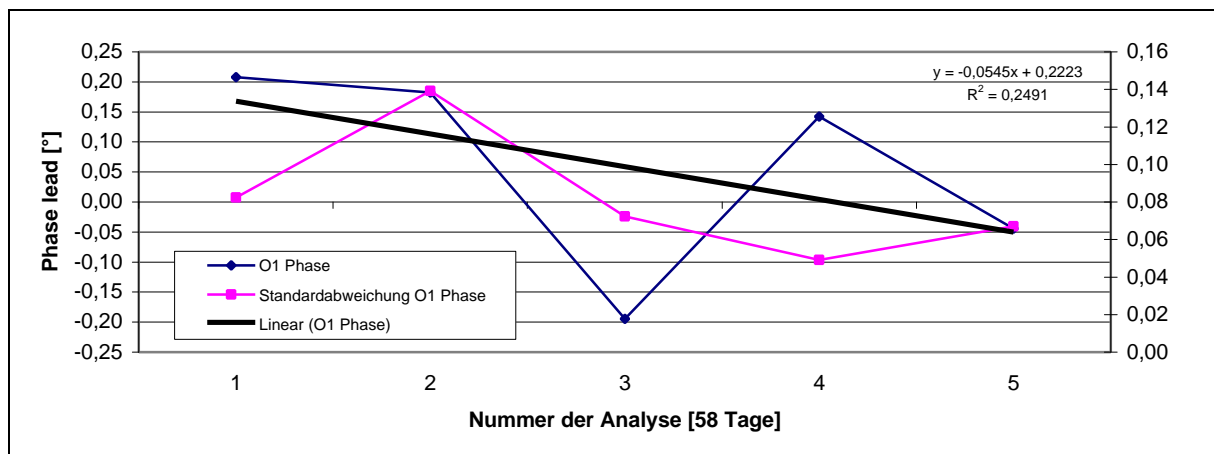


Abbildung E.60: Zeitlicher Verlauf der Phasendifferenz O_1 , aufeinander folgende 58Tage-Analysen für den Zeitraum Juli 2001 bis Mai 2002

Ergebnis: Die zeitlichen Änderungen der berechneten Gezeitenparameter sind nach statistischen Kriterien als nicht signifikant einzustufen. Erkennbar ist der Trend zu einer Abnahme der Standardabweichungen der Gewichtseinheit mit der Dauer der Registrierungen.

Auffallend ist das Maximum aller berechneten Standardabweichungen in der zweiten Gezeitenanalyse mit dem Zentralzeitpunkt zum Ende des Oktobers 2001. Im entsprechenden Zeitraum wurden in den Ergebnissen für A206 keine Besonderheiten beobachtet.

5 Die Überprüfung und Korrektur der Ergebnisse von Sprunghöhenbestimmungen

Je nach Driftverhalten der Gravimeter ist es mehr oder weniger häufig erforderlich, Signalsprünge zu erzeugen, durch die erreicht wird, dass die registrierten zeitlichen Signalvariationen im Registrierbereich verbleiben. Bei Federgravimetern werden diese Sprünge meist durch geeignete Verstellungen der Messspindel erzeugt. Für eine Gezeitenanalyse der aufgezeichneten Messwerte müssen diese Sprünge wieder aus dem Datenbestand herausgerechnet werden, hierzu muss zunächst die Sprunghöhe ermittelt werden (sprungbefreite Messreihen).

Bei längeren Registriererserien sind die Auswirkungen einzelner, fehlerhaft bestimmter Sprungwerte auf die Ergebnisse der Gezeitenanalysen gering und erzeugen im allgemeinen keine signifikanten Variationen der berechneten Gezeitenparameter. Signalsprünge werden jedoch auch zur relativen Eichung der Registrierungen verwendet, durch die Verknüpfung einer gemessenen Spindelverstellung und der zugeordneten Änderung des Registriersignals.

Fehlerhafte Ansätze für das Sprungsignal lassen sich nach der Gezeitenanalyse durch den Verlauf der Residuen an der Sprungstelle erkennen. Abbildung E.61 und Abbildung E.62 zeigen den typischen Residuenverlauf an der Stelle eines nicht berücksichtigten Sprungrests, nach einer Gezeitenanalyse unter Einsatz des Petzev57-Filters.

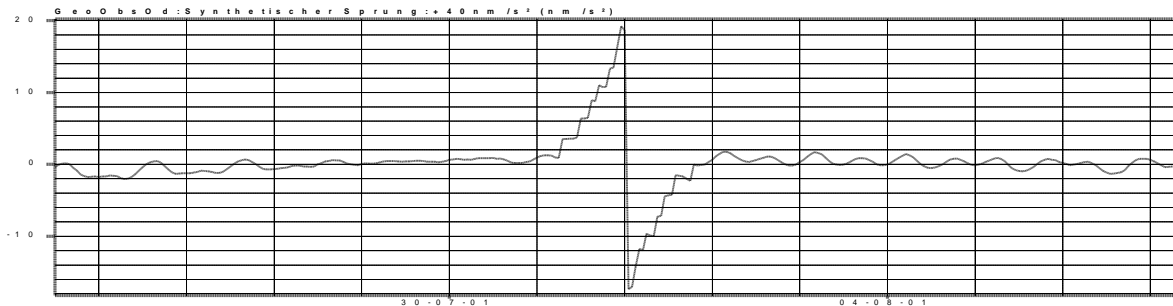


Abbildung E.61: Residuenverlauf im Bereich eines synthetische Sprungs von plus $40\text{nm/s}^2=+4\mu\text{Gal}$ am 01.08.2001 um 00:00h

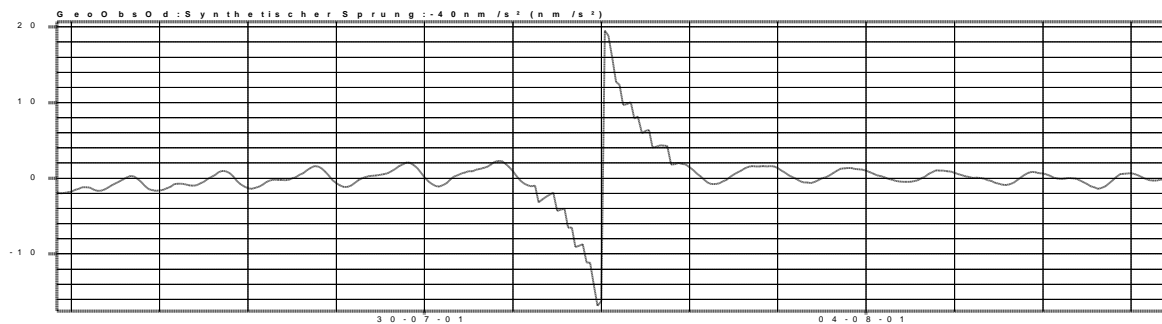


Abbildung E.62: Residuenverlauf im Bereich eines synthetischen Sprungs von minus $40\text{nm/s}^2=-4\mu\text{Gal}$ am 01.08.2001 um 00:00h

Die Residuen entstammen Zweimonatsanalysen von synthetischen stündlichen Gezeitendaten, in die an der Stelle 01.08.2001 0:00h synthetische Sprünge integriert wurden. Die Gezeitendaten wurden für den Zeitraum vom 01.07.2001 bis 31.08.2001 auf der Grundlage der lokalen Gezeitenparameter für die Station GeoObsOd berechnet, deren Parameter auf der Analyse einer mit dem Gravimeter A206 beobachteten Zeitreihe von 762 Tagen basieren (siehe Abschnitt D7.1 und Tabelle E.3).

Die für Sprünge von $+20$ bis $-20\mu\text{Gal}$ ermittelten Ausschlagweiten der Residuen sind in Abhängigkeit von den Sprunghöhen in Abbildung E.63 dargestellt. Die Ausschlagweiten w_{P57} sind mit den Sprunghöhen h durch die Funktion

$$w_{P57} = -0,91 h_{P57} \quad (w \text{ und } h \text{ in gleicher Einheit z.B. } \text{nm/s}^2 \text{ oder } \mu\text{Gal})$$

verknüpft. Daraus folgt, dass unter Berücksichtigung der Vorzeichenkonvention (Ausschlagweite negativ bei positivem Sprungsignal \Rightarrow negativer Verlauf des Sprungsignals von Peak zu Peak) bei einer Residuenstruktur der dargestellten Art aus der ermittelten Ausschlagsweite w die zugeordnete Sprunghöhe h abgeleitet werden kann, bzw. die Sprunghöhenkorrektur nach einer Sprunghöhenbestimmung:

$$h_{P57} = 1,10 w_{P57}.$$

Im realen Fall treten selbstverständlich zusätzlich Residuenstrukturen auf, die andere Ursachen als ein Sprungsignal haben. Durch Überlagerungen kann daher die sprunginduzierte Residuenstruktur verzerrt werden. Dies führt potentiell zu Genauigkeitseinbußen bei der Anwendung des dargestellten Verfahrens zur Ermittlung und Korrektur von Restsprüngen. Im Normalfall lassen sich aber die Daten an den Stellen von Restsprüngen soweit korrigieren, dass im Residuenverlauf eine Struktur der dargestellten Art nicht mehr zu erkennen ist, was aus praktischer Sicht im allgemeinen als ausreichend eingestuft werden kann.

Die angegebene Funktion ist nur gültig für den verwendeten Datenfilter Petzev57 mit 37 Koeffizienten. Bei anderen Filtern ändert sich die Funktion entsprechend der Filtercharakteristik.

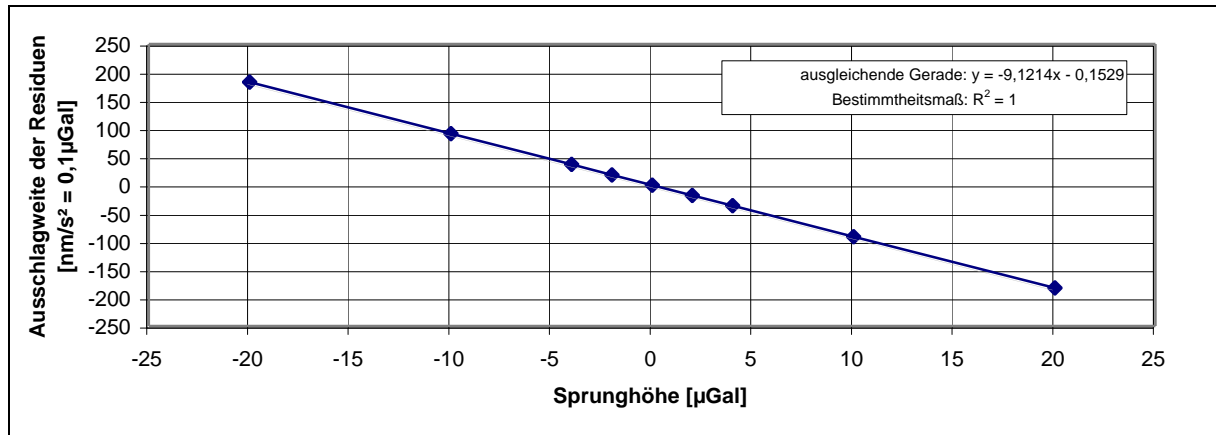


Abbildung E.63: Einfluss eines synthetischen Sprungsignals auf die Ausschlagweite der Residuen an der Sprungstelle bei Filter Pertzev57

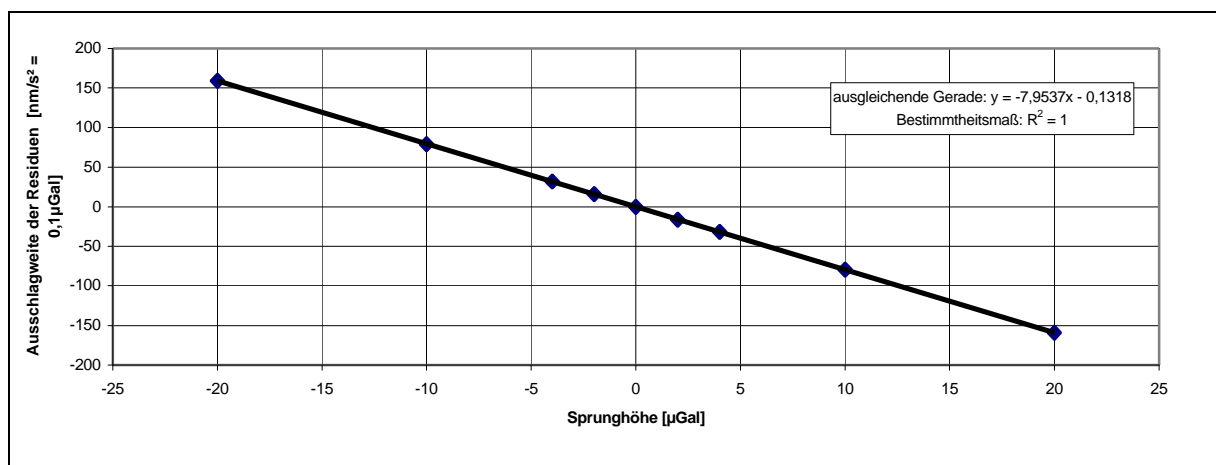


Abbildung E.64: Einfluss eines synthetischen Sprungsignals auf die Ausschlagweite der Residuen an der Sprungstelle bei Filter Pertzev59

Analog wird die Funktion bei Verwendung des Filters Pertzev59 mit 51 Koeffizienten abgeleitet (Abbildung E.64). Es zeigt sich, dass für die Ausschlagweiten w_{P59} und den Sprunghöhen h_{P59} nun der folgende funktionale Zusammenhang besteht:

$$w_{P59} = -0,80 h_{P59} \text{ (w und h in gleicher Einheit z.B. nm/s}^2 \text{ oder } \mu\text{Gal)}$$

bzw.

$$h_{P59} = 1,26 w_{P59}$$

6 Die Gezeitenanalyse synthetischer Zeitreihen

Die Signifikanz der Ergebnisse von Gezeitenanalysen wird begrenzt durch Ungenauigkeiten, die aus dem Systemalgorithmus resultieren, sowie von den instrumentellen Eigenschaften des gesamten Datenerfassungssystems, primär den messtechnischen Eigenschaften des gravimetrischen Sensors. Soll aufgrund gewonnener Analyseergebnisse auf Eigenschaften des Messsystems geschlossen werden (unter der Voraussetzung, dass die Eigenschaften des Registrierungssystems bekannt sind), so ist es erforderlich, eine Vorstellung davon zu haben, welche Grenzen der Parameterauflösung durch das Analysenverfahren selber gesetzt sind. Dies gilt insbesondere dann, wenn relativ kurze Registriererien verwendet werden, welche nur eine eingeschränkte Partialtidenauflösung ermöglichen. Die Frage stellt sich im Rahmen der Untersuchungen längerer Zeitreihen zum Beispiel bei der Überprüfung von Parametervariationen in zeitlich aufeinander folgenden Gezeitenanalysen zur Überprüfung der Maßstabskonstanz der beobachteten gravimetrischen Daten (siehe Abschnitt E1).

Partialtidenband		Delta	PhasDiff	
0.000000	0.501369	1.15000	0.0000	long
0.501370	0.911390	1.14772	-0.3205	Q1
0.911391	0.947991	1.14810	0.0673	O1
0.947992	0.981854	1.17794	1.3195	M1
0.981855	0.998631	1.14916	-0.2326	P1
0.998632	1.001369	2.22239	2.1499	S1
1.001370	1.023622	1.13567	0.1835	K1
1.023623	1.035379	1.10175	5.3097	TET1
1.035380	1.057485	1.16576	0.2900	J1
1.057486	1.071833	1.21459	-1.9150	SO1
1.071834	1.470243	1.17096	1.7486	OO1
1.470244	1.880264	1.14624	2.8388	2N2
1.880265	1.914128	1.16935	2.7328	N2
1.914129	1.950419	1.18770	2.1398	M2
1.950420	1.984282	1.15153	1.4483	L2
1.984283	2.002736	1.19189	0.3371	S2
2.002737	2.451943	1.19782	0.7063	K2
2.451944	3.381378	1.08067	-0.6079	M3
3.381379	4.347615	1.34428	-10.4961	M4
4.347616	7.000000	1.01500	0.0000	M5M6

Tabelle E.3: Parametersatz für die synthetische Gezeitenberechnung

Zur Untersuchung des genannten Sachverhalts wurden wiederum exemplarisch auf der Grundlage der lokalen Gezeitenparameter für die Station GeoObsOd synthetische stündliche Gezeitenwerte für einen Zweimonatszeitraum (01.07.2001 bis 31.08.2001 – siehe auch Abschnitt E5) berechnet und diese Daten dann einer Gezeitenanalyse unterzogen. Tabelle E.3 zeigt den Parametersatz für die Berechnung der synthetischen Gezeiten, Tabelle E.4 die Ergebnisse der Gezeitenanalyse.

from	to	wave	ampl.	ampl.fac.	stdv.	ph.	lead	stdv.
[cpd]	[cpd]	[nm/s**2]				[deg]		[deg]
Program ANALYZE, version 3.30 960908 File: Syn2_0								
20010701 10000...20010831230000								
Number of recorded days in total : 61.96								
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients								
adjusted tidal parameters :								
0.911391	0.947991	O1	349.8663	1.14821	0.00053	0.0690	0.0266	
0.981855	1.023622	PSK1	483.7489	1.12885	0.00034	0.0663	0.0170	
1.914129	1.950419	M2	358.8628	1.18767	0.00032	2.1340	0.0153	
1.984283	2.451943	S2K2	167.7928	1.19358	0.00077	0.2598	0.0371	
Standard deviation of weight unit: 1.217 nm/s**2								

Tabelle E.4: Ergebnisse der zweimonatigen Gezeitenanalyse (Auszug)

Die Standardabweichung der Zweimonatsanalyse der synthetischen (drift- und störungsfreien) Daten beträgt $\pm 0,12\mu\text{Gal}$. Die Ursache zeigt der Verlauf der Residuen in Abbildung E.65: Es handelt sich erkennbar um Wirkungen der nicht-ausreichenden Partialtidentrennung. Eine höhere Partialtidentrennung ist jedoch bei einem Datensatz von lediglich zwei Monaten nicht sinnvoll möglich. Die Auflösung der berechneten Amplitudenquotienten liegt für die Hauptpartialtiden M_2 und O_1 bei 0,3% bzw. 0,5%, für das Partialtidenband $P_1S_1K_1$ bei 0,3% sowie für das Partialtidenband S_2K_2 bei 0,8%. Da man im Realfall zusätzliche Auswirkungen zeitvariabler Störeffekte im täglichen Periodenbereich nicht a-priori ausschließen kann, ergibt sich die Folgerung, dass zur

Untersuchung von Maßstabsvariationen in den beobachteten Zeitreihen vorzugsweise nur die Amplitudenquotienten der Partialtiden M_2 und (mit Einschränkungen) der Partialtide O_1 verwendet werden sollten.

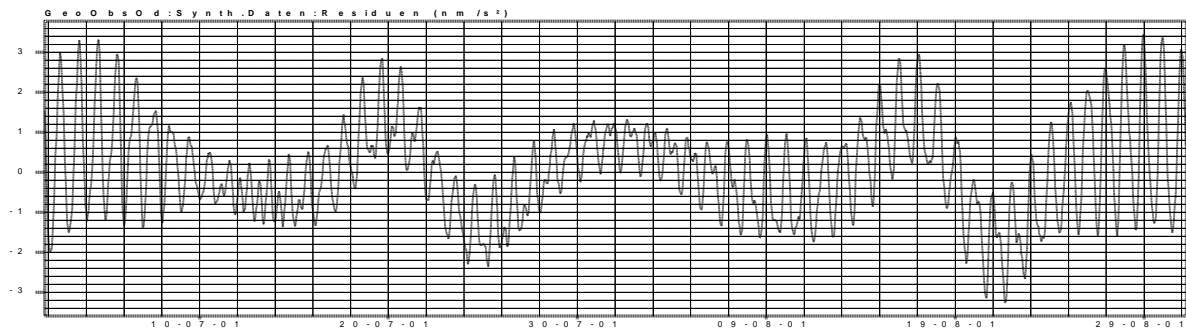


Abbildung E.65: Zeitlicher Verlauf der Residuen nach der Gezeitenanalyse

Es liegt nahe, in der Mitte des zuvor gebildeten Satzes synthetischer Daten unterschiedliche Sprungsignale (als „Restfehler“) einzufügen und zu untersuchen, wie sich diese Sprünge als Funktion der Sprunghöhe auf die Analysenergebnisse auswirken. Die Untersuchungen sind in den nachfolgenden Abbildungen nachgewiesen (Abbildung E.66 bis Abbildung E.70).

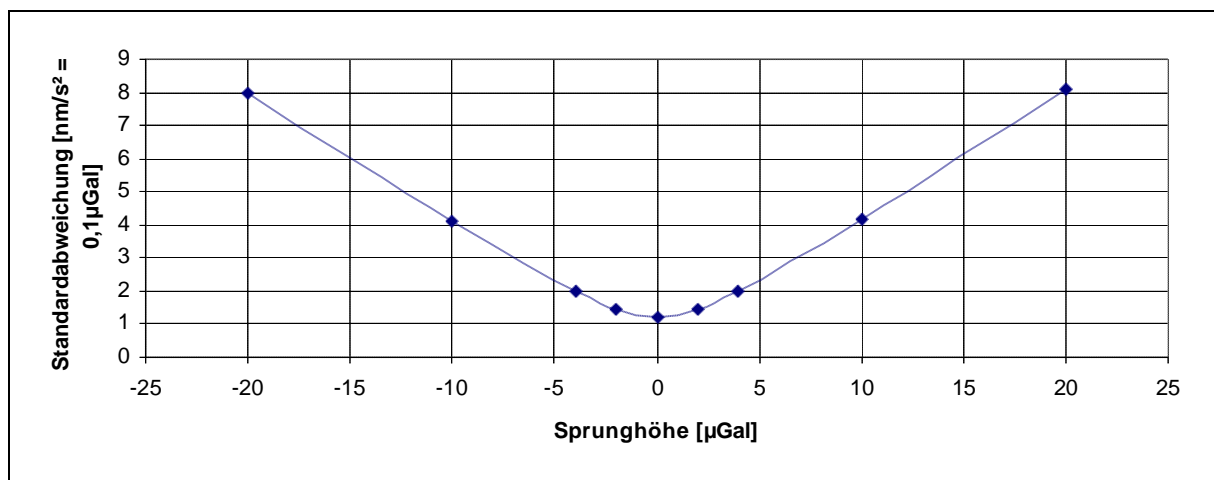


Abbildung E.66: Die Änderung der Standardabweichung der Analyse als Funktion der Sprunghöhe

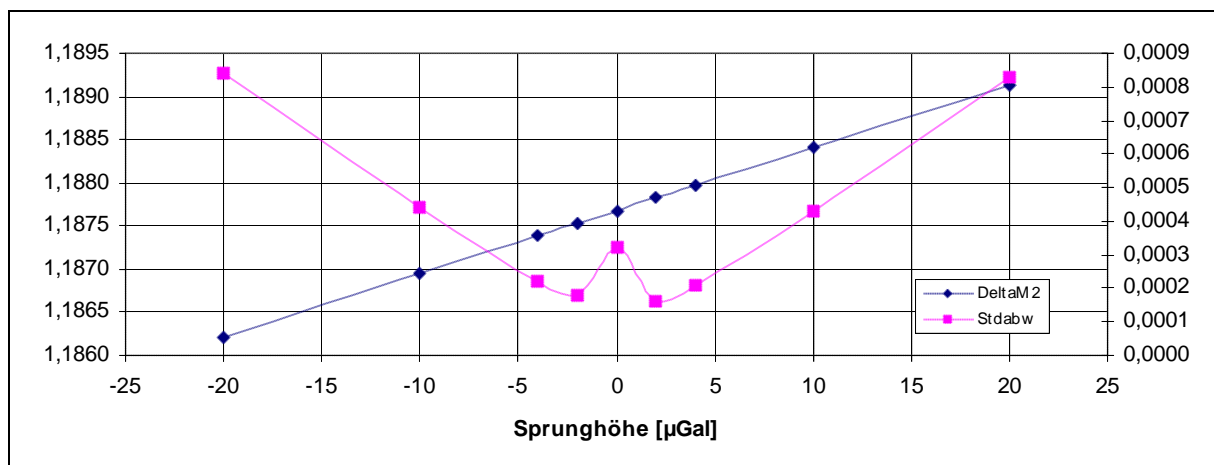


Abbildung E.67: Die Änderung des Amplitudenquotienten ΔM_2 (1,18770 aus Tabelle E.3) als Funktion der Sprunghöhe

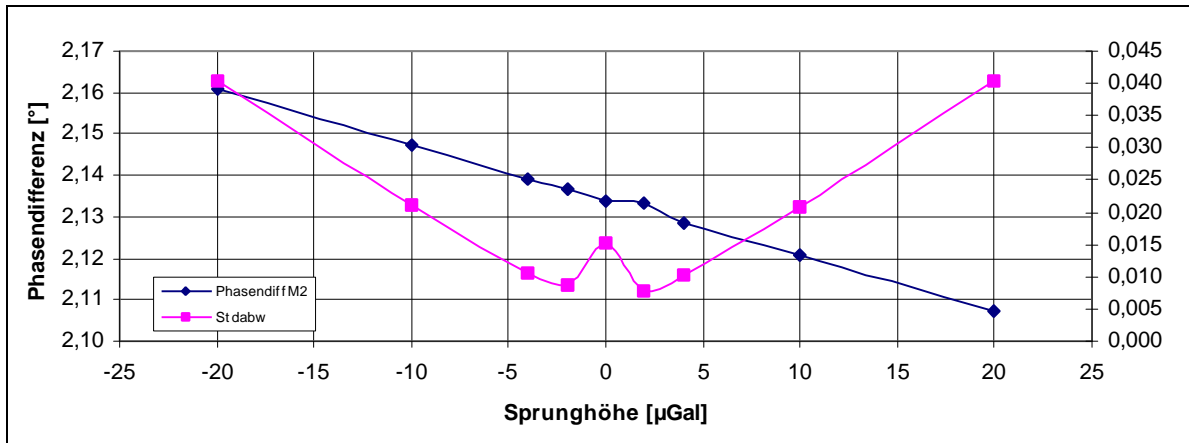


Abbildung E.68: Die Änderung des Phasendifferenzen M_2 ($2^\circ,1398$ aus Tabelle E.3) als Funktion der Sprunghöhe

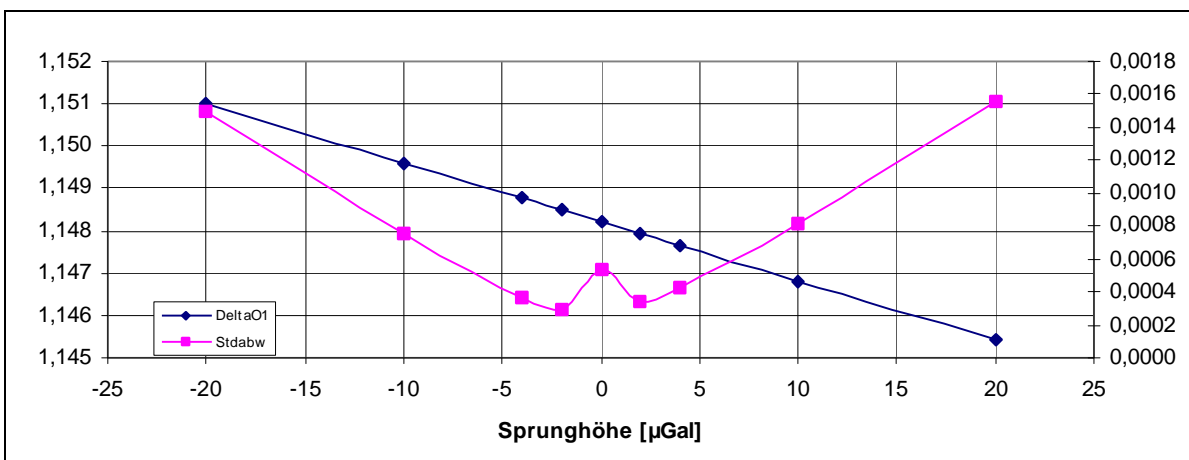


Abbildung E.69: Die Änderung des Amplitudenquotienten ΔO_1 ($1,14810$ aus Tabelle E.3) als Funktion der Sprunghöhe

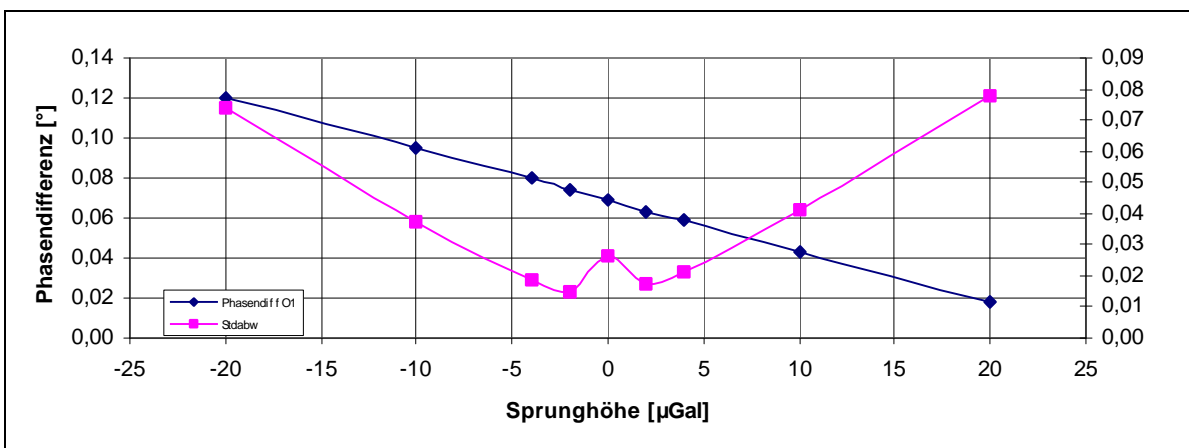


Abbildung E.70: Die Änderung der Phasendifferenz O_1 ($0^\circ,0673$ aus Tabelle E.3) als Funktion der Sprunghöhe

Die dargestellten Ergebnisse führen zu der *Schlussfolgerung*, dass es bei kurzen Registriererien von etwa zwei Monaten im Realfalle kaum möglich sein wird, den Amplitudenquotienten M_2 mit einer *Genauigkeit* von wesentlich besser als relativ einem Promille zu bestimmen.

7 Gravimetrische Wirkungen zeitlicher Änderungen des örtlichen Luftdrucks

Bei hochaufgelösten gravimetrischen Gezeitenregistrierungen erfordern die bereits in Abschnitt E3.4.3 genannten Störsignale besondere Beachtung, die als Folge von lokalen und regionalen Luftdruckvariationen auftreten. Diese sind bei den Gezeitenanalysen besonders dann wirksam, wenn der Luftdruck in relativ kurzen Zeiträumen stark variiert, so dass zugeordnete gravimetrische Effekte bei der Driftbestimmung nicht durchgreifend eliminiert werden.

Die gravimetrischen Auswirkungen atmosphärischer Luftdruck- bzw. Dichteveränderungen sind zu unterscheiden in

- instrumentelle Effekte, z.B. als Folge von Undichtigkeiten des Sensorgehäuses oder als Folge von Deformationsprozessen, die durch Variationen des Unterschieds zwischen Innendruck im Sensorgehäuse und Außendruck auftreten. Die Frage nach der Größe dieser Effekte kann nur für den jeweiligen Einzelfall beantwortet werden (Abschnitt F1.3)
- geophysikalische Effekte. Diese gliedern sich im wesentlichen in Gravitationswirkungen eines relevanten Luftvolumens in der Umgebung des Messgeräts sowie in auflastinduzierte Effekte (vertikale Verschiebungen eines erdfesten Beobachtungspunktes als Folge variabler atmosphärischer Druckbelastungen). Die geophysikalischen Effekte können (abhängig von der geographischen Breite der Beobachtungsstation) Beträge von mehreren $10\mu\text{Gal}$ erreichen

Bei der Gezeitenanalyse gravimetrischer Daten ist der periodische atmosphärische Signalanteil (siehe Abbildung E.72) in besonderem Maße zu beachten. Bei hinreichend langen gravimetrischen Zeitreihen und in mittleren geographischen Breiten können die nicht-periodischen Luftdruckeffekte hingegen in gewissen Grenzen als näherungsweise zufällig verlaufende Störsignale eingestuft werden, welche die berechneten Gezeitenparameter nur noch mehr oder weniger geringfügig beeinflussen (siehe Abschnitt E8.4.8).

Die zeitlichen Luftdruckvariationen im GeoObservatorium Odendorf wurden parallel zu den gravimetrischen Daten mit einer messtechnischen Auflösung von $0,01\text{mbar}$ beobachtet. Abbildung E.71 zeigt den Verlauf der stündlichen Mittelwerte im Zeitraum April 2001 bis Januar 2003, wobei 10mbar einem Volt entsprechen.

Im zugeordneten Amplitudenspektrum (Abbildung E.72 als Vergrößerung der Abbildung E.32) ist ein ausgeprägtes, schmales halbtägiges Spektrallinienband mit einer Amplitudenhöhe von etwa $0,2\text{mbar}$ zu erkennen, weiterhin ein kleiner drittäglicher Effekt (Amplitudenhöhe etwa $0,04\text{mbar}$) und ein schwach signifikantes ganztägiges Spektrallinienband (Amplitudenhöhe etwa $0,08\text{mbar}$). Die zugeordneten Gravitationseffekte gehen voll in die durch Gezeitenanalyse ermittelten Gezeitenparameter, insbesondere der Partialtide S_2 ein.

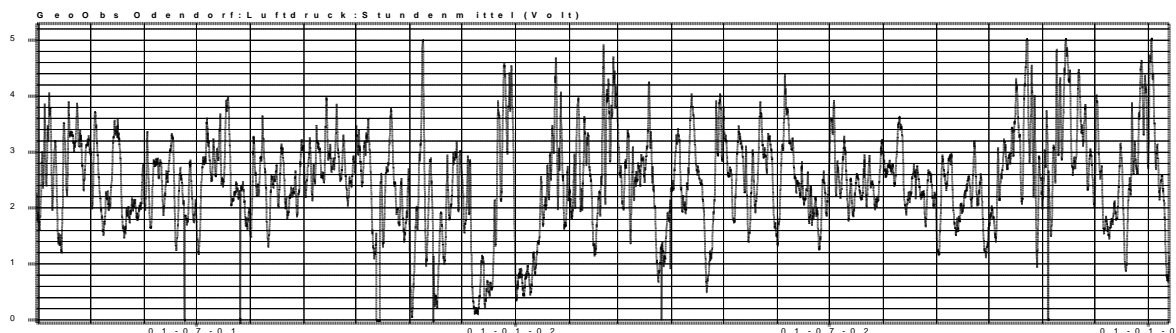


Abbildung E.71: Zeitlicher Verlauf des Luftdrucks im GeoObservatorium Odendorf
stündliche Mittelwerte, Maßstab: 1 Volt entspricht 10 mbar, April 2001 bis Januar 2003

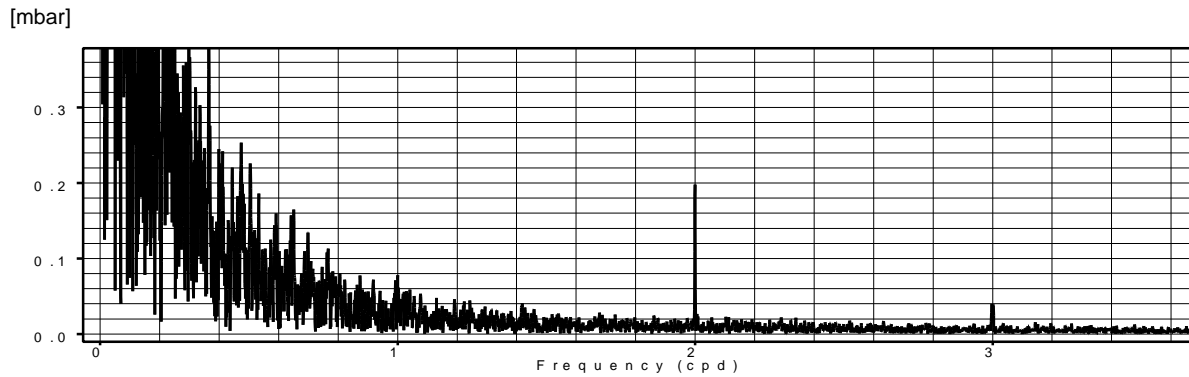


Abbildung E.72: Amplitudenspektrum des Luftdruckverlaufs

8 Die Berechnung des Luftdruckregressionskoeffizienten

8.1 Allgemeine Betrachtungen

Dichteänderungen der Atmosphäre in der Umgebung eines Beobachtungspunkts erzeugen zeitvariable Gravitationseffekte, welche zeitliche Änderungen der Schwere hervorrufen. Gleichzeitig bewirken atmosphärische Auflaständerungen vertikale Deformationen der Erdoberfläche, welche wiederum zu Änderungen des Schwerepotentials führen. Bei Beobachtungen der Vertikalkomponente der Schwere sind die Gravitationseffekte dominierend.

Die Berechnung der atmosphärischen Gravitationseffekte erfordert im Prinzip ein geeignetes, laufend aktualisiertes digitales atmosphärisches Dichtemodell auf der Basis einer dreidimensionalen Punktmatrix innerhalb des relevanten gravitativen Wirkungsvolumens. Derartige Informationen stehen aber im allgemeinen nicht zur Verfügung, da der Wirkungsradius des atmosphärischen Volumens je nach geforderter Auflösung des atmosphärischen Gravitationseffekts horizontal bis zu 100km und die Volumenhöhe über der Erdoberfläche 20km und mehr beträgt [SUN 1995].

Aus dem genannten Grunde, d.h. mangels Alternative, werden die atmosphärisch induzierten lokalen Schwerevariationen phasensynchron aus den zeitlichen Variationen des örtlichen Luftdrucks abgeleitet. Dies ist insofern problematisch, als der Stationsluftdruck nur bedingt repräsentativ für die Dichteverteilung innerhalb des atmosphärischen Wirkungsvolumens ist. Hinzu kommt, dass das örtliche Luftdrucksignal potentiell kinetisch induzierte Anteile als Folge von Luftmassenbewegungen innerhalb des Volumens enthält [SIMON 2003]. Wenn man also beachtet, dass die Isobarenkonfiguration in der dreidimensionalen Umgebung des Beobachtungspunkts aus dem örtlichen Luftdruck allein *nicht* abgeleitet werden kann, so wird deutlich, dass dem Verfahren der Berechnung der atmosphärischen Gravitationseffekte auf der Grundlage örtlicher Luftdruckvariationen erhebliche Genauigkeitsgrenzen gesetzt sind. Entsprechend ist zum Beispiel mit größeren Abweichungen zwischen den für individuelle Zeitfenster berechneten Regressionskoeffizienten von Luftdruck- und Schwerevariationen und einem aus einer längeren Beobachtungsreihe abgeleiteten *mittleren* Regressionskoeffizienten zu rechnen. Es ist im Hinblick auf die dargestellte Problematik bis auf weiteres sicherlich sinnvoll, sich auf einen linearen Luftdruck-Regressionsansatz zu beschränken.

Das Problem des Bezugs auf den örtlichen Luftdruck wird sehr anschaulich, wenn man die gravimetrischen Signalvariationen beim Passieren einer ausgeprägten atmosphärischen Front beobachtet, wenn sich nämlich der Luftdruck während weniger Minuten um mehrere Millibar ändert, innerhalb der Messgenauigkeit aber eine Änderung der gravimetrischen Registriersignale nicht zu erkennen ist (mittlerer gravimetrischer Luftdruck-Regressionskoeffizient ca. 0,3 bis 0,4 $\mu\text{Gal}/\text{mbar}$, siehe nachfolgenden Abschnitt E8.3)

Es muss zudem mit relevanten Auswirkungen des *Modellansatzes* für die nicht-luftdruckinduzierten Signalanteile z. B. der Drift auf das Ergebnis der Regressionsuntersuchungen gerechnet werden, der den Regressionsberechnungen zugrunde gelegt wird.

Der *physikalische* (gravimetrische) Luftdruckeffekt ist, wie zuvor bereits dargelegt wurde, im übrigen klar von dem *instrumentellen* Luftdruckeffekt zu unterscheiden, der gegebenenfalls als systematischer *instrumenteller Fehler* zu berücksichtigen ist.

Luftdruckvariationen beeinflussen auch geringfügig die Strukturen des mikroseismischen Rauschens [ZÜRN 2002]; im Hinblick auf die Aufgabenstellung und die entsprechend gewählte gravimetrische Signalauflösung können solche Effekte jedoch als unwesentlich eingestuft werden.

8.2 Die Regressionsberechnung

Zur linearen Luftdruck-Regressionsberechnung wird der folgende Ansatz herangezogen:

$$\text{Kanal}_{\text{Beobachtung}} = \text{Gezeitensignal} + a_1 * \text{Kanal}_{\text{Luftdruck}} + \text{Drift} + \text{Residuum}$$

Hierin stellt a_1 den linearen Luftdruck-Regressionskoeffizienten dar, wobei die Drift des Gesamtsystems in einem zusätzlichen Term berücksichtigt wird. Zur Quantifizierung der Drift wird ein Polynom verwendet [VAUTERIN UND VAN CAMP 2002]:

$$\text{Drift} = b_0 + b_1t + b_2t^2 + \dots + b_nt^n$$

wobei der Grad n des Polynoms je nach Untersuchung bis zum Grad 5 variiert wird.

Die Berechnungen der linearen Regressionskoeffizienten erfolgen mit Hilfe des entwickelten und vorne beschriebenen Programmsystems Tools sowie des Programmsystems TSoft der Königlich Belgischen Sternwarte in Brüssel (www.orb.be/SEISM0/TSOFT/tsoft.html), wobei die Untersuchungen *ohne* Berücksichtigung der Drift durch Tools, jene *mit* deren Berücksichtigung mit dem Programm TSoft erfolgen. Zum Vergleich werden die Regressionsberechnungen mit dem Programmsystem ANALYZE durchgeführt, dessen Regressionsansatz im Handbuch zu ETERNA allerdings nicht näher beschrieben wird.

8.3 Die Signifikanzbewertung von Regressionskoeffizienten

Die aus den im Abschnitt E8.1 dargelegten Gründen zu erwartenden Streuungen der für unterschiedliche Zeiträume zu berechnenden Regressionskoeffizienten gegenüber einem Mittelwert sowie dessen statistischer Streuungswert erfordern eine ergänzende Bewertung hinsichtlich einer sich durch die Aufgabenstellung ergebenden erforderlichen *physikalischen Signifikanz*.

Geht man von Erfahrungswerten aus, so liegt der Regressionsfaktor zwischen örtlichen Luftdruckvariationen und den zugeordneten Schwerevariationen im Bereich zwischen 0,3 und 0,4 μ Gal/mbar. In der Station GeoObservatorium Odendorf überschreitet die Spanne der zeitlichen Luftdruckänderungen innerhalb der für die Gezeitenanalyse gewählten Filterlänge von 37h (Pertsev-Filter, siehe Abschnitt B6) nur selten den Betrag von 20mbar, d.h. der gravimetrische Luftdruckeffekt liegt maximal lediglich in einem Bereich von 6 bis 8 μ Gal. Demgegenüber betragen die gravimetrischen Gezeiten maximal etwa 300 μ Gal, die entsprechend der Aufgabenstellung mit einer relativen Genauigkeit von mindestens 1%, entsprechend 0,3 μ Gal bestimmt werden sollen. Daraus folgt, dass die Bestimmung des mittleren Regressionsfaktors mit einer relativen Genauigkeit von etwa 3% bereits als hinreichend angesehen werden kann. Eine höhere Genauigkeitsanforderung ist auch deswegen nicht als sinnvoll anzusehen, weil, wie bereits dargelegt, die Hypothese der Repräsentanz der Dichteveränderungen innerhalb des gravimetrisch relevanten atmosphärischen Einwirkungsvolumens durch die örtlichen Luftdruckvariationen nur mehr oder weniger näherungsweise erfüllt ist.

Eine Abschätzung der Genauigkeit eines berechneten mittleren Luftdruck-Regressionsfaktors erfordert die sukzessive Berechnung individueller Regressionsfaktoren innerhalb von Zeitfenstern unterschiedlicher Länge und mit unterschiedlichen Modellansätzen für den Driftanteil in den gravimetrischen Zeitreihen.

8.4 Gravimeter LCR-G-xx1F

8.4.1 Bestimmung des Regressionskoeffizienten mit dem Programmsystem Eterna in der Version 3.30

Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis der Gezeitenanalyse der Messdaten des ursprünglichen Signalverlaufs, d.h. unter Einschluss des gravimetrischen Luftdruckanteils.

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File:   LCR-G-XX1F_2
20010726 90000...20011012150000 20011015 20000...20020409 50000
20020412220000...20020520 60000
Number of recorded days in total :   291.83
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients
LaCoste GRAVIMETER LCR-G-xx1F      Used scale 105.49 µGal/Volt
adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]
0.911391 0.947991 O1   349.5108  1.14705  0.00081  0.0693  0.0405
0.981855 0.998631 P1   162.9213  1.14913  0.00177  0.3173  0.0886
0.998632 1.023622 S1K1 485.4177  1.13274  0.00058  0.2368  0.0293
1.914129 1.950419 M2   358.6261  1.18689  0.00049  2.2126  0.0239
1.984283 2.002738 S2   167.5041  1.19153  0.00106  0.8128  0.0510
2.002739 2.451943 K2    45.3236  1.18606  0.00383  1.2902  0.1850

Standard deviation of weight unit:   11.026 nm/s**2

```

Tabelle E.5: Analyse LCR-G-xx1F ohne Berücksichtigung des Luftdruckeffekts

Das Programmsystem Eterna 3.30 ermöglicht es nun, durch Hinzuschalten der parallel zu den gravimetrischen Signalen aufgezeichneten Luftdruckvariationen (hier: Zusatzkanal 1), einen *mittleren* Luftdruck-Regressionskoeffizienten zu berechnen. Das Ergebnis der erweiterten Datenanalyse zeigt die nachfolgende Tabelle E.6.

Als Ergebnis der Regressionsberechnung erhält man den Faktor $3,027 \pm 0,083 \text{ nm/s}^2$ pro hPa, entsprechend $0,3027 \mu\text{Gal/mbar}$. Bei der Vorzeicheninterpretation ist zu beachten, dass aus praktischen Gründen die Registrierung der Luftdrucksignale so geschaltet wurde, dass dem höheren Luftdruck eine *niedrigere* Signalanzeige zugeordnet ist.

Eine Abschätzung der physikalischen Signifikanz dieses Ergebnisses ist insofern problematisch, als dass das Handbuch zu dem Programmsystem Eterna 3.30, wie bereits erwähnt, keine detaillierte Information über die Wahl des gewählten Modellansatzes enthält (Eterna-Handbuch Abschnitt 17: „einfaches lineares Regressionsmodell“). So kann unter anderem aus dem Ergebnis der Regressionsberechnung nicht auf den Grad der Streuungen der Regressionskoeffizienten bei der Wahl unterschiedlicher Zeitfenster geschlossen werden. Es wurde daher aus den zuvor genannten Gründen für erforderlich gehalten, eine weitergehende Untersuchung des Luftdruckeffekts durchzuführen.

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File:   LCR-G-XX1F_LD
20010726 90000...20011012150000 20011015 20000...20020409 50000
20020412220000...20020520 60000
Number of recorded days in total :   291.83
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients
LaCoste GRAVIMETER LCR-G-xx1F      Used scale 105.49 µGal/Volt
adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]
0.911391 0.947991 O1   349.5264  1.14710  0.00079  0.0920  0.0395
0.981855 0.998631 P1   162.9450  1.14929  0.00173  0.2886  0.0864
0.998632 1.023622 S1K1 485.7175  1.13344  0.00057  0.2275  0.0286
1.914129 1.950419 M2   358.5528  1.18665  0.00054  2.2302  0.0263
1.984283 2.002738 S2   166.9453  1.18755  0.00117  0.5300  0.0568
2.002739 2.451943 K2    45.2790  1.18489  0.00421  1.1914  0.2036

Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff.      stdv. parameter unit
  1      3.02681      0.08342  airpress nm/s**2 /. hPa
Standard deviation of weight unit:   10.101 nm/s**2

```

Tabelle E.6: Analyse LCR-G-xx1F mit Berücksichtigung des Luftdruckeffekts durch Eterna

Der Vergleich der vorstehenden Analysenergebnisse zeigt übrigens eine Verringerung der Standardabweichung der Gewichtseinheit nach Berücksichtigung des Luftdruckeffektes um 10%, bei allerdings nur geringen Auswirkungen auf die Gezeitenparameter. Die Ausnahme hiervon ist die Partialtide S_2 . Hier wurden die gravimetrischen Wirkungen der mit der Frequenz von $30^\circ/h$ ablaufenden periodischen Luftdruckvariationen (siehe Abbildung E.72) offensichtlich reduziert, wie der Vergleich mit dem Amplitudenquotienten der Partialtide M_2 zeigt.

8.4.2 Regressionsberechnung ohne Driftansatz

Der einfachste Modellansatz für die Berechnung des gravimetrischen Luftdruckeffektes basiert auf der Proportionalitätsannahme zwischen gravimetrischem Signal und Luftdrucksignal. Zieht man von den gravimetrischen Messdaten den zuvor auf der Basis einer Gezeitenanalyse berechneten Gezeiteneffekt ab, so erhält man einen gezeitenbefreiten Datensatz, der im Idealfall nur noch die gravimetrischen Wirkungen von Luftdruckvariationen enthalten würde (SISO – SingleInput/SingleOutput). In der Realität kann dieser Sachverhalt aber nur mehr oder weniger genähert erreicht werden, gibt es doch neben dem Luftdruck noch andere geophysikalische Einflussparameter (z.B. Variationen der Bodenfeuchte als Folge von Niederschlägen [BONATZ 1967]), vor allem aber instrumentelle Vorgänge, die zu instrumentellen Driftvorgängen führen (z.B. solche, die durch Variationen der Umgebungstemperatur induziert werden, siehe Abschnitt D5).

Auf der Grundlage des genannten Modellansatzes wurden für die stündlichen Registrierwerte in sukzessiven Zeitfenstern unterschiedlicher Länge lineare Regressionskoeffizienten berechnet. Bei dieser Berechnung wurden Optionen von „Tools“ des Programmsystems GeoDynA verwendet (siehe auch Abschnitt C5.7). Die Berechnungsergebnisse sind in den nachfolgenden Tabellen nachgewiesen. Es wurden gegenüberstellend jeweils das arithmetische und das gewogene Mittel berechnet, wobei der Gewichtsansatz für die gewogenen Mittel $P=1/m^2$ lautet. Die untersuchten Zeitfenster von 29h, 45h, 73h und 103h unterscheiden sich leicht von den Untersuchungen mit TSoft in den folgenden Abschnitten, sind aber auf Grund der nur geringen Differenzen als vergleichbar einzustufen. Die Längen der Zeitfenster wurden so gewählt, dass ein hinreichender und „zufälliger“ Abstand zu natürlichen Perioden, wie z. B. 12 Stunden oder 24 Stunden, bei der Berechnung der Koeffizienten erreicht wird. Die Dimension der Regressionskoeffizienten ist $[nm/s^2 / mbar]$, sofern nicht anders angegeben.

Da in der graphischen Darstellung der Einzelergebnisse zur Regressionsberechnung mit Driftansatz ab Abbildung E.77 vom 21.01.02 bis 20.03.02 ein Zeitraum zu erkennen ist, in dem die Streuungen der Einzelwerte der Koeffizienten relativ gering sind, wurden für diesen Zeitraum ergänzend gesonderte Berechnungen ausgeführt.

Übersicht über die Luftdruckregressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F bei unterschiedlicher Fensterbreite

Zeitraum: 28.7.2001 bis 6.4.2002 ohne Driftmodell

	29h	45h	73h	103h
arithmetisches Mittel:	3,55455846	3,03482087	2,02601889	3,63575182
Standardabweichung arithm. Mittel:	0,95397444	1,19078827	1,64979984	2,02069432
gewogenes Mittel:	3,38143312	2,4955414	3,10650198	3,59429371
Standardabweichung gewogenes Mittel:	0,02516636	0,02885163	0,03280082	0,0432967

Übersicht über die Luftdruckregressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F bei unterschiedlicher Fensterbreite

nur für den Zeitraum vom 21.1.2002 bis 20.3.2002 ohne Driftmodell

	29h	45h	73h	103h
arithmetisches Mittel:	2,96568592	3,67670761	4,80094864	5,83548062
Standardabweichung arithm. Mittel:	1,27133698	1,68813474	2,36818642	2,52742244
gewogenes Mittel:	3,31034807	3,16735824	1,69916865	2,36438254
Standardabweichung gewogenes Mittel:	0,03930432	0,04598373	0,13621946	0,13190198

Tabelle E.7: Lineare Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F ohne Driftmodell

Die Einzelergebnisse und die zugeordneten Standardabweichungen sind nachfolgend graphisch dargestellt (Abbildung E.73 bis Abbildung E.76).

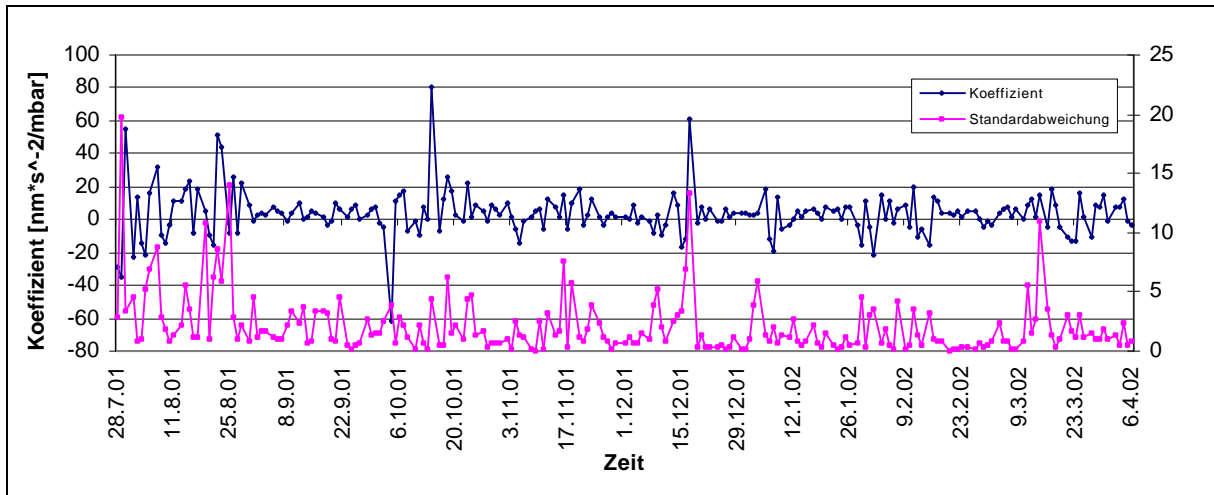


Abbildung E.73: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite: 29h; ohne Driftmodell)

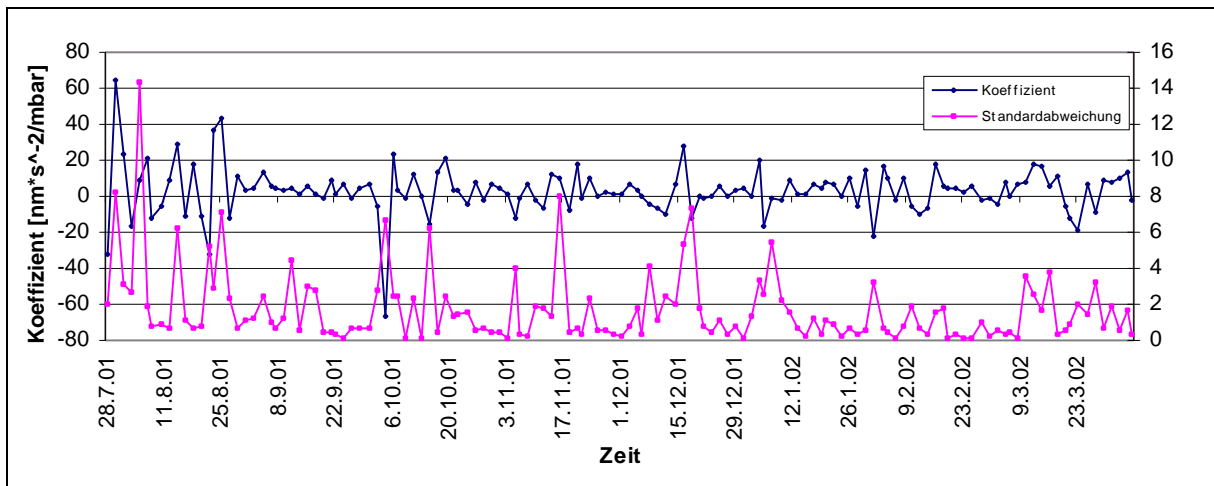


Abbildung E.74: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite: 45h; ohne Driftmodell)

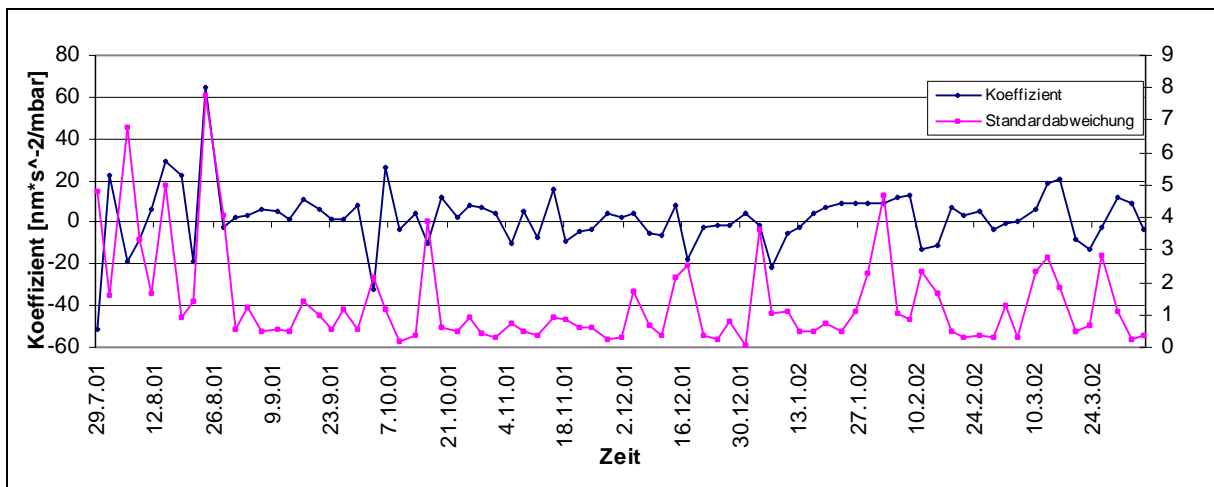


Abbildung E.75: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite: 73h; ohne Driftmodell)

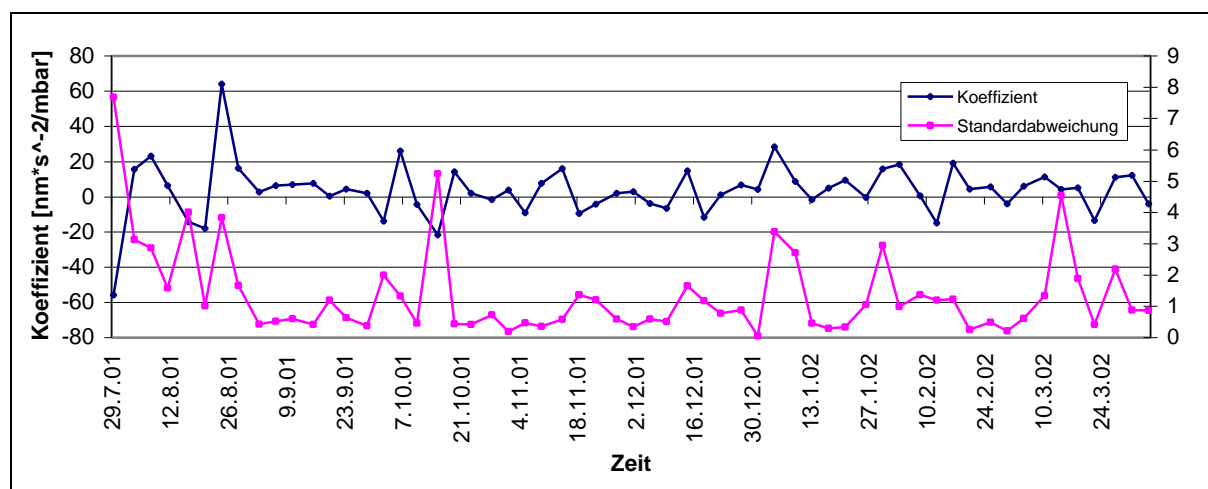


Abbildung E.76: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite: 103h; ohne Driftmodell)

Die gewonnenen Ergebnisse sind gemäß den gesetzten Genauigkeitsgrenzen von 3% als unzureichend zu betrachten. Daraus folgend muss man davon ausgehen, dass im vorliegenden Falle die Drift des Gravimeters bei der Berechnung des Regressionskoeffizienten nicht vernachlässigt werden darf.

8.4.3 Regressionsberechnung mit linearem Driftansatz

Die Berechnungen mit Driftansatz wurden mit dem Programmsystem TSoft ausgeführt. Die Berücksichtigung der Gravimeterdrift erfolgt durch ein Polynom bis zur 5. Ordnung, dessen Koeffizienten neben dem Regressionskoeffizienten durch Schätzung ermittelt werden (siehe auch Abschnitt E8.2). Die Berechnungsergebnisse sind in der Tabelle E.8 nachgewiesen.

In der graphischen Darstellung der Einzelergebnisse ab Abbildung E.77 ist, wie schon erwähnt, vom 21.01.02 bis 20.03.02 ein Zeitraum zu erkennen, in dem die Streuungen der Einzelwerte der Regressionskoeffizienten relativ gering sind. Für diesen Zeitraum wurden daher ergänzend wieder gesonderte Berechnungen ausgeführt.

Die Ergebnisse zeigen eine durchgängige Vergrößerung der gewogenen Mittel der individuellen Regressionskoeffizienten gegenüber den arithmetischen Mittelwerten mit einem Trend zur Abnahme des Betrags des Regressionskoeffizienten ab einer Fensterweite von etwa 125 Stunden. Der Gewichtsansatz bei der Bildung der gewogenen Mittel erfolgt auch hier durch $P=1/m^2$. Der Vergleich der Standardabweichungen der Regressionskoeffizienten zeigt ferner die Notwendigkeit der Regressionsberechnung auf Grundlage von Gewichtungen der Einzelwerte (Verringerung der Standardabweichungen um durchgängig einen Faktor >10 bei den Berechnungen unter Verwendung des Gesamtdatensatzes). Die geringsten Standardabweichungen der mittleren Regressionskoeffizienten treten bei den Fensterweiten 75 bzw. 100 Stunden auf. Die Variationen der Standardabweichungen in Abhängigkeit von der Fensterweite sind allerdings gering, so dass sich partiell die Signifikanzfrage hinsichtlich dieser Variationen stellt.

Übersicht über die Luftdruckregressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F bei unterschiedlicher Fensterbreite

Zeitraum: 28.7.2001 bis 17.5.2002

linearer Driftansatz

	29h	50h	75h	100h	125h	150h
arithmetisches Mittel:	3,074661926	3,0063124	3,1781569	2,64011052	2,95271258	2,99193534
Standardabweichung arithm. Mittel:	0,288056603	0,25129231	0,24718368	0,35077276	0,3993305	0,35597564
gewogenes Mittel:	3,279770123	3,33653999	3,4033309	2,93233492	3,02878367	2,73181222
Standardabweichung gewogenes Mittel:	0,037735345	0,02615806	0,02060292	0,02136861	0,02300872	0,02578643

Übersicht über die Luftdruckregressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F bei unterschiedlicher Fensterbreite nur für den Zeitraum vom 21.1.2002 (bei 150h 27.1.2002) bis 20.3.2002:

linearer Driftansatz

	29h	50h	75h	100h	125h	150h
arithmetisches Mittel:	3,242662121	3,25266444	3,14444787	3,12969806	2,78286869	2,57161417
Standardabweichung arithm. Mittel:	0,168303871	0,15697412	0,31577673	0,18733689	0,19074033	0,24435238
gewogenes Mittel:	3,258497396	3,40926207	3,43352772	3,22791486	3,14358423	2,71019267
Standardabweichung gewogenes Mittel:	0,046983152	0,03108604	0,03191856	0,03024357	0,03312622	0,03143922

Tabelle E.8: Linearer Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F bei linearem Driftansatz

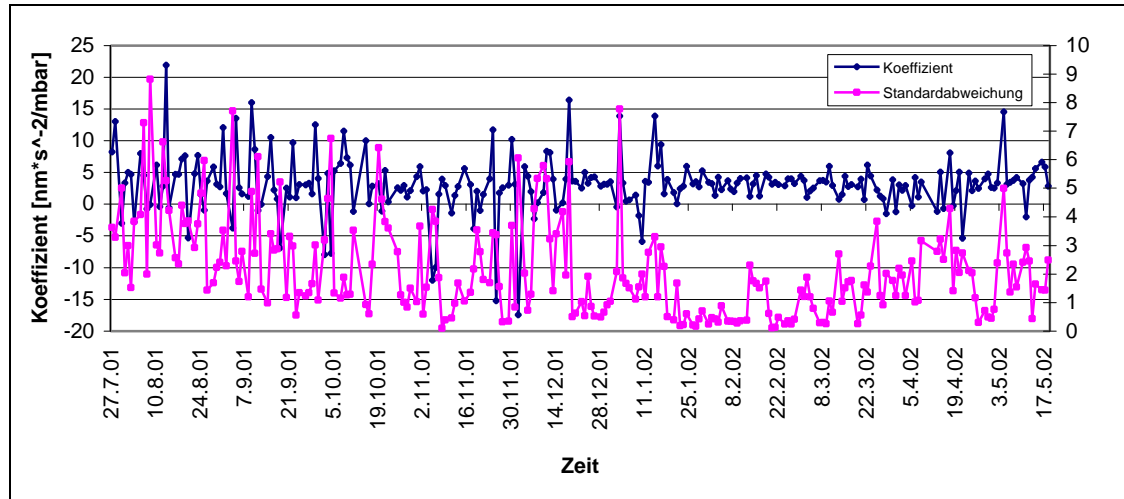


Abbildung E.77: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite: 29h; linearer Driftansatz)

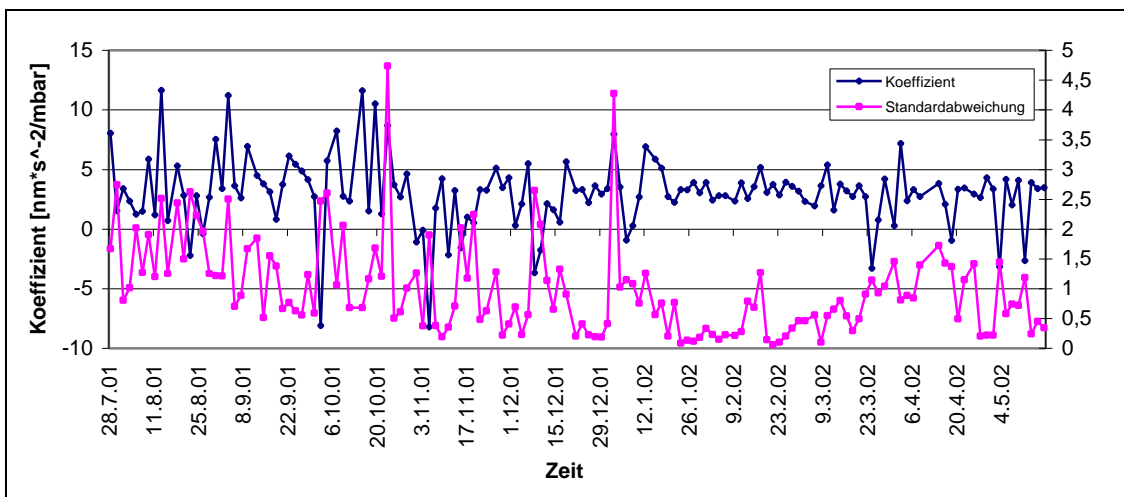


Abbildung E.78: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite: 50h; linearer Driftansatz)

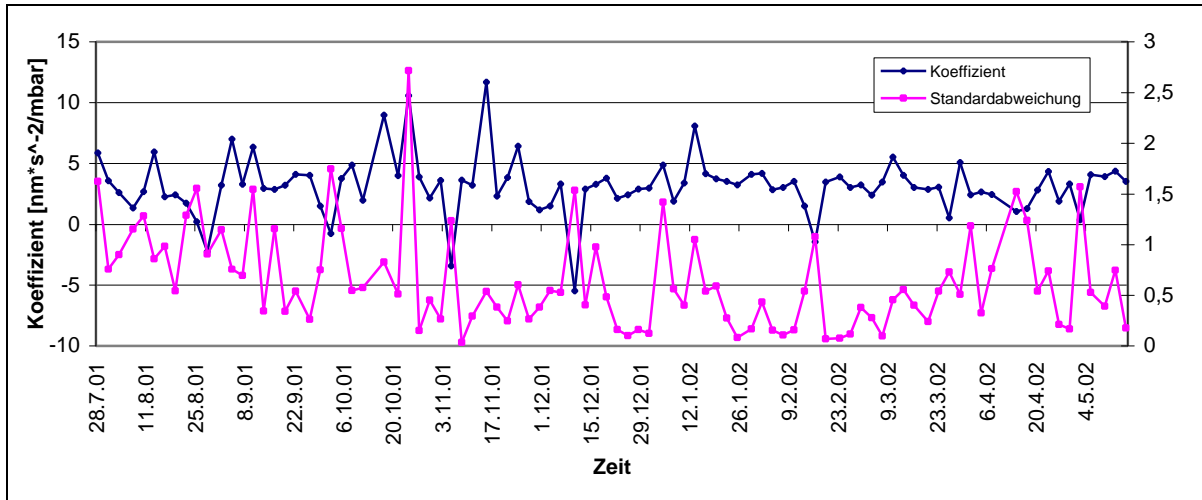


Abbildung E.79: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite: 75h; linearer Driftansatz)

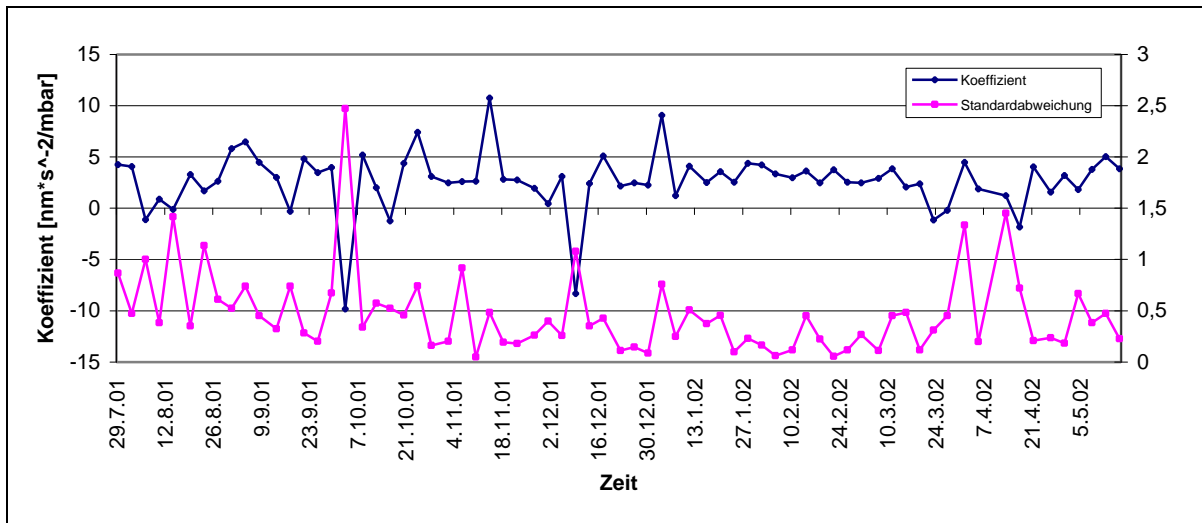


Abbildung E.80: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite:100h; linearer Driftansatz)

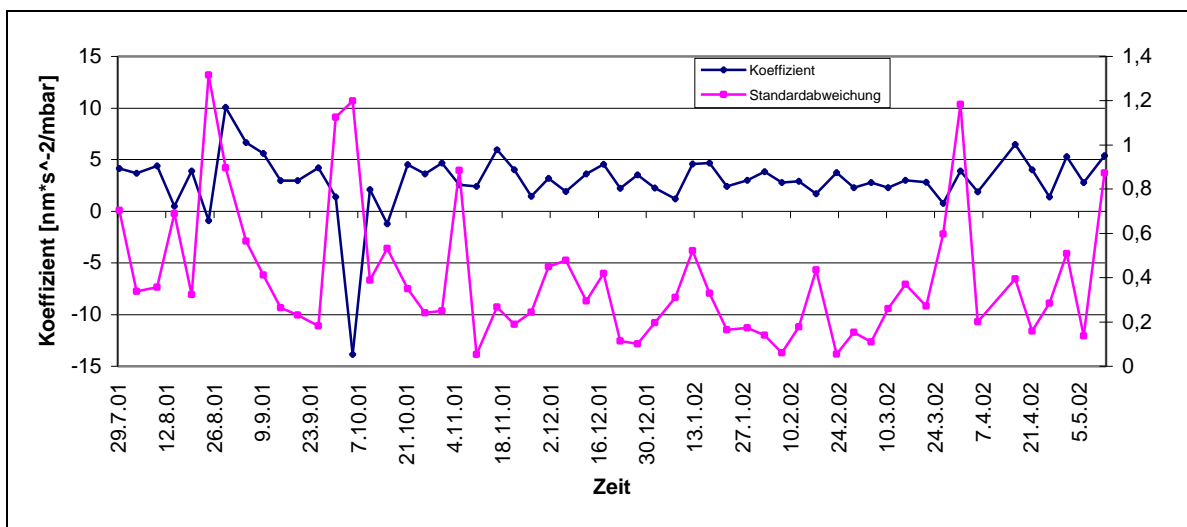


Abbildung E.81: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite:125h; linearer Driftansatz)

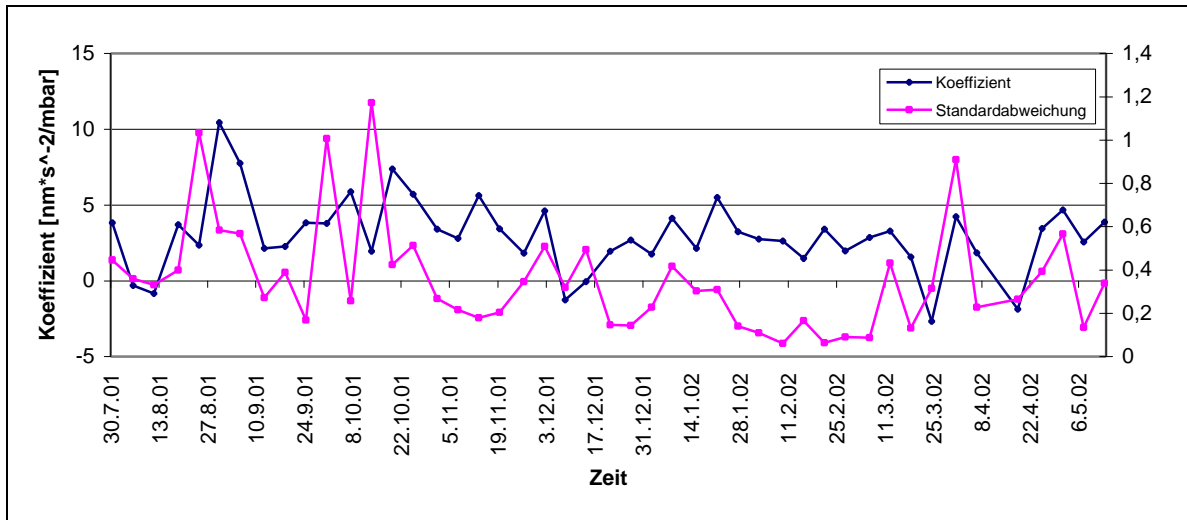


Abbildung E.82: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite:150h; linearer Driftansatz)

8.4.4 Regressionsberechnung mit quadratischem Driftansatz

Die Streuungen der Mittelwerte der Regressionskoeffizienten bei linearem Driftansatz legen es nahe, die Berechnungen mit einem quadratischen Ansatz für das Driftmodell zu wiederholen.

Die Berechnungsergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle nachgewiesen. Die Einzelergebnisse nebst Standardabweichungen sind ab Abbildung E.83 graphisch dargestellt.

Übersicht über die Luftdruckregressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F bei unterschiedlicher Fensterbreite

Zeitraum: 28.7.2001 bis 17.5.2002

Driftansatz: Polynom 2. Ordnung

	29h	50h	75h	100h	125h	150h
arithmetisches Mittel:	2,470016762	2,85712109	3,29945279	2,90174102	3,32953186	3,08693392
Standardabweichung arithm. Mittel:	0,324557973	0,25917636	0,27903272	0,37475003	0,30067535	0,21006882
gewogenes Mittel:	3,096648885	3,34143348	3,37141913	3,35003982	3,31885622	3,17725238
Standardabweichung gewogenes Mittel:	0,060115219	0,0376784	0,03062725	0,02508808	0,0243779	0,0267285

Übersicht über die Luftdruckregressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F bei unterschiedlicher Fensterbreite

nur für den Zeitraum vom 21.1.2002 bis 20.3.2002:

Driftansatz: Polynom 2. Ordnung

	29h	50h	75h	100h	125h	150h
arithmetisches Mittel:	2,626110371	3,06293451	3,12045241	3,21736463	3,17325253	3,07603698
Standardabweichung arithm. Mittel:	0,232573506	0,20056225	0,15476	0,16417761	0,19765501	0,29405193
gewogenes Mittel:	3,128998692	3,36073281	3,28965351	3,39834939	3,42489468	3,17436638
Standardabweichung gewogenes Mittel:	0,07141746	0,04533928	0,0391464	0,02982401	0,03084675	0,03589488

Tabelle E.9: Lineare Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F - Driftansatz: Polynom 2. Ordnung

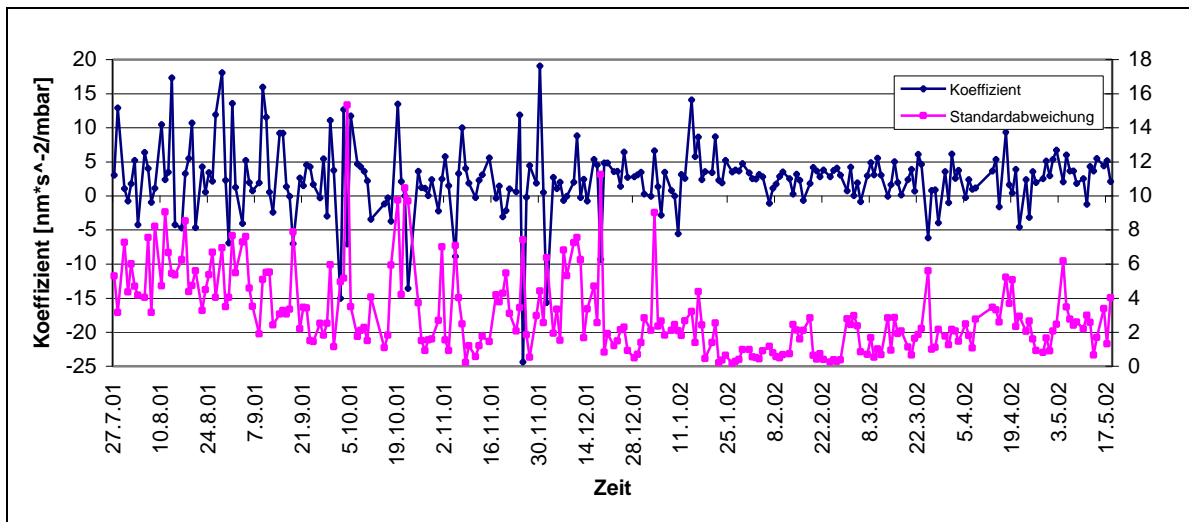


Abbildung E.83: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite:29h; Driftansatz: Polynom 2. Ordnung)

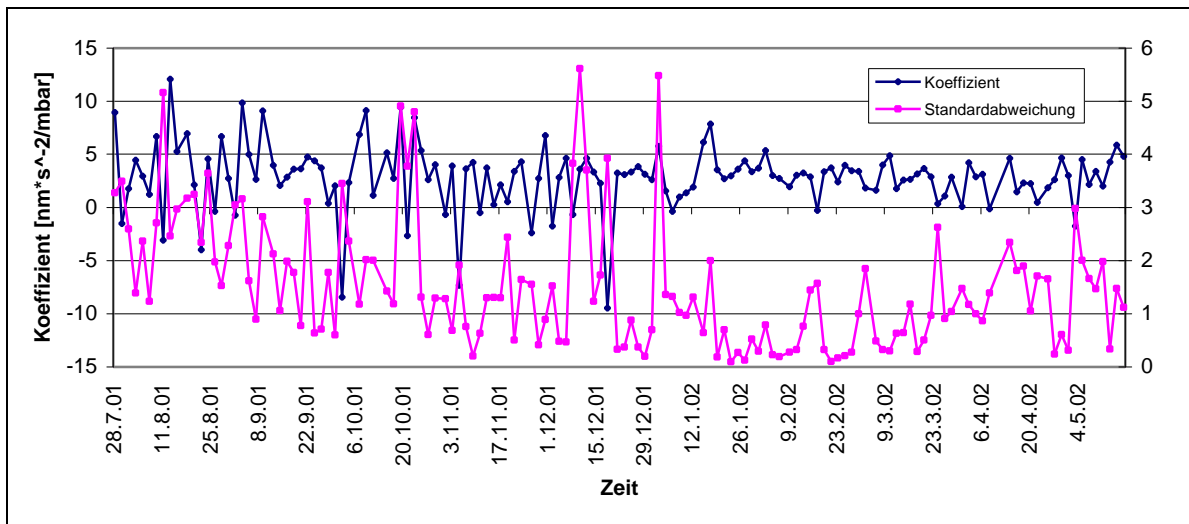


Abbildung E.84: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite:50h; Driftansatz: Polynom 2. Ordnung)

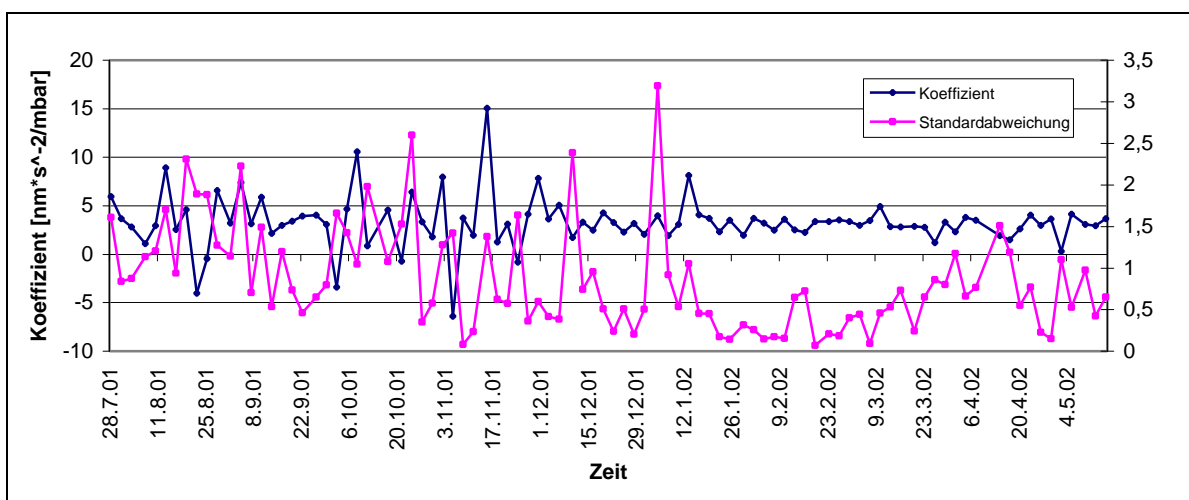


Abbildung E.85: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite:75h; Driftansatz: Polynom 2. Ordnung)

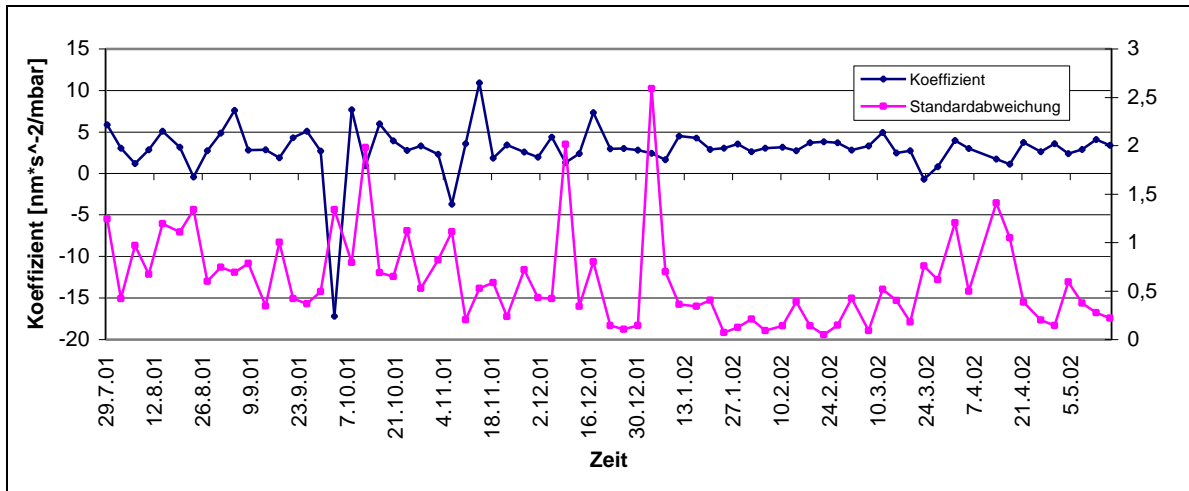


Abbildung E.86: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite:100h; Driftansatz: Polynom 2. Ordnung)

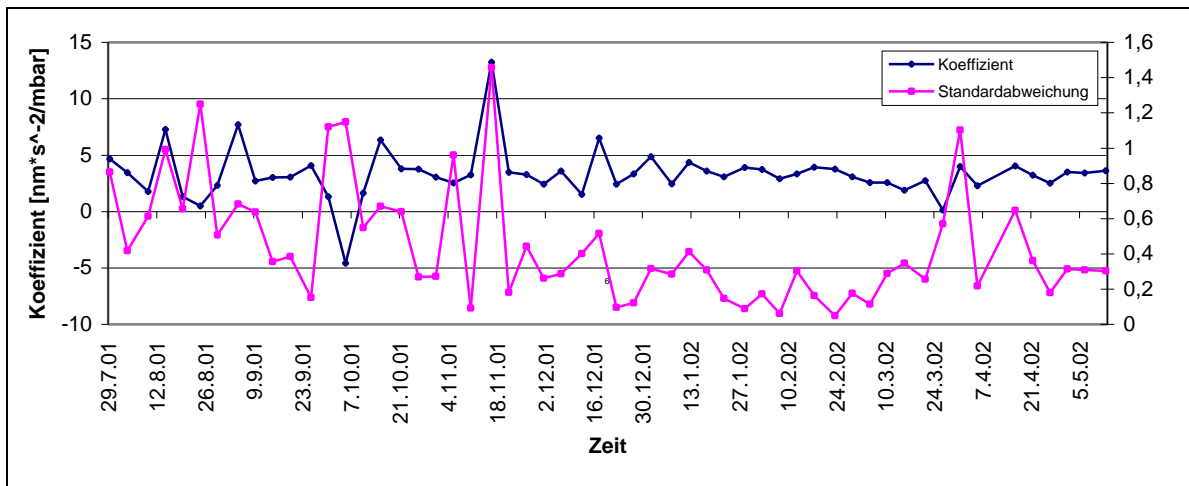


Abbildung E.87: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite:125h; Driftansatz: Polynom 2. Ordnung)

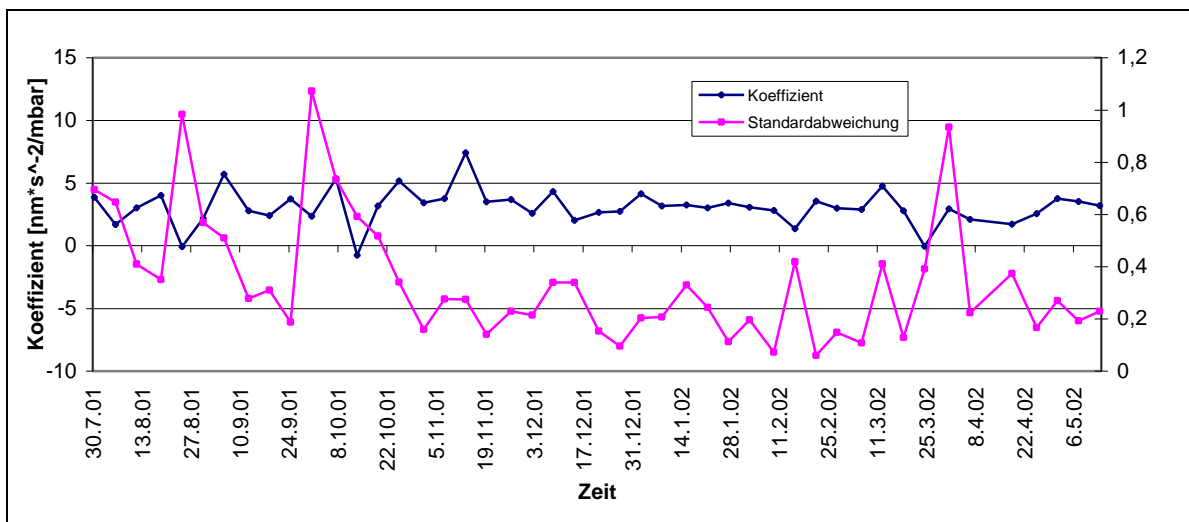


Abbildung E.88: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite:150h; Driftansatz: Polynom 2. Ordnung)

Durch die Erweiterung des Driftansatzes um ein quadratisches Glied wird eine deutliche Vereinheitlichung der den unterschiedlichen Zeitfenstern und den beiden unterschiedlichen Datensätzen zugeordneten gewogenen Mittel der Regressionskoeffizienten erreicht, somit kann von einer höheren physikalischen Signifikanz der mittleren Regressionskoeffizienten ausgegangen werden.

Bei der Überprüfung des Verlaufs der individuellen Regressionskoeffizienten fällt ein Ausreißer am 03.10.2001 besonders auf, der im Zeitfenster von 100h einen Betrag von minus(!) $17,19 \pm 1,34 \text{ nm/s}^2$ pro mbar erreicht. Nun muss bei der Definition und dem möglichen Ausschluss von Ausreißern besonders dann sehr vorsichtig und kritisch verfahren werden, wenn dessen Ursache nicht bekannt ist. Eine Überprüfung ergab, dass an der genannten Stelle weder eine herausragende Residuenanomalie nach der Gezeitenanalysen festzustellen ist, noch eine herausragende Anomalie des registrierten gravimetrischen Signals, noch eine herausragende Anomalie des Luftdruckverlaufs.

Nach der Eliminierung des genannten Ausreißers, erhält man die folgenden Regressionskoeffizienten für den Driftansatz mit einem Polynom 2. Ordnung:

Übersicht über die Luftdruckregressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F bei unterschiedlicher Fensterbreite – ohne Ausreißer

Zeitraum: 28.7.2001 bis 17.5.2002

Driftansatz: Polynom 2. Ordnung

	29h	50h	75h	100h	125h	150h
arithmetisches Mittel:	2,470016762	2,85712109	3,29945279	3,19297533	3,32953186	3,08693392
Standardabweichung arithm. Mittel:	0,324557973	0,25917636	0,27903272	0,23756704	0,30067535	0,21006882
gewogenes Mittel:	3,096648885	3,34143348	3,37141913	3,35724245	3,31885622	3,17725238
Standardabweichung gewogenes Mittel:	0,060115219	0,0376784	0,03062725	0,02509248	0,0243779	0,0267285

Übersicht über die Luftdruckregressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F bei unterschiedlicher Fensterbreite – ohne Ausreißer

nur für den Zeitraum vom 21.1.2002 bis 20.3.2002:

Driftansatz: Polynom 2. Ordnung

	29h	50h	75h	100h	125h	150h
arithmetisches Mittel:	2,626110371	3,06293451	3,12045241	3,21736463	3,17325253	3,07603698
Standardabweichung arithm. Mittel:	0,232573506	0,20056225	0,15476	0,16417761	0,19765501	0,29405193
gewogenes Mittel:	3,128998692	3,36073281	3,28965351	3,39834939	3,42489468	3,17436638
Standardabweichung gewogenes Mittel:	0,07141746	0,04533928	0,0391464	0,02982401	0,03084675	0,03589488

Tabelle E.10: Ergebnis einer Wiederholung der Berechnung zu Tabelle E.9, jedoch unter Ausschluss von Ausreißern

8.4.5 Regressionsberechnung mit einem Driftpolynom dritter Ordnung

Die nachfolgenden Tabellen zeigen, dass sich die Homogenität der gewogenen Mittelwerte der Luftdruck-Regressionskoeffizienten durch den Übergang von einem Driftpolynom zweiter Ordnung zu einem solchen dritter Ordnung bei den Fensterweiten von 50 Stunden und größer nicht mehr wesentlich verbessert. Die Fensterweite von 29 Stunden ist offensichtlich für eine Regressionsberechnung zu kurz.

Übersicht über die Luftdruckregressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F bei unterschiedlicher Fensterbreite

Zeitraum: 28.7.2001 bis 17.5.2002

Driftansatz: Polynom 3. Ordnung

	29h	50h	75h	100h	125h	150h
arithmetisches Mittel:	2,134481161	2,36138907	3,23153351	3,16303914	3,41492097	3,60387512
Standardabweichung arithm. Mittel:	0,406570373	0,29313221	0,29612394	0,31322549	0,24847208	0,31185469
gewogenes Mittel:	2,697362989	3,26687381	3,33668148	3,39319624	3,43020147	3,34620777
Standardabweichung gewogenes Mittel:	0,082717427	0,05373992	0,04311672	0,03131776	0,0315221	0,02855089

Übersicht über die Luftdruckregressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F bei unterschiedlicher Fensterbreite nur für den Zeitraum vom 21.1.2002 (bei 150h 27.1.2002) bis 20.3.2002:

Driftansatz: Polynom 3. Ordnung

	29h	50h	75h	100h	125h	150h
arithmetisches Mittel:	2,290883179	2,99728183	3,16619705	3,40807127	3,55956873	3,44287697
Standardabweichung arithm. Mittel:	0,278556353	0,22516953	0,19139605	0,17471562	0,14817537	0,21009407
gewogenes Mittel:	2,883434856	3,34207156	3,29005158	3,3961796	3,66729493	3,37730346
Standardabweichung gewogenes Mittel:	0,099118423	0,06433886	0,05848347	0,03826922	0,04049449	0,03545507

Tabelle E.11: Lineare Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F - Driftansatz: Polynom 3. Ordnung

Auffällig ist eine leichte Vergrößerung der Standardabweichungen im Vergleich zu den Ergebnissen des vorhergehenden Abschnitts E8.4.4.

8.4.6 Der wahrscheinlichste mittlere Luftdruck-Regressionskoeffizient

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass aus den Standardabweichungen der in den einzelnen Varianten bestimmten mittleren Regressionskoeffizienten nur bedingt auf die physikalische Signifikanz dieser Ergebnisse geschlossen werden darf, d.h. es ist im vorliegenden Falle ein Unterschied zwischen statistischer und physikalischer Signifikanz zu beachten. Zudem lassen sich mit Hilfe des örtlichen Luftdrucks die atmosphärischen Gravitationseffekte nur bedingt modellieren (siehe auch E8.1).

Die statistische Fehlerangabe liefert lediglich Informationen über die Zuverlässigkeit des gewählten Ansatzes für die Modellierung und Berücksichtigung der instrumentellen Drift, die neben den Luftdruckeffekten in den Daten enthalten ist (MultiInput/SingleOutput-Problem). Je „unruhiger“ der Driftverlauf innerhalb eines gewählten Zeitfensters ist, und je weniger der Modellansatz für die Drift dem tatsächlichen Driftverlauf entspricht, um so stärker wird das Ergebnis der Berechnung eines Regressionskoeffizienten systematisch verfälscht.

Als Kriterium für den Grad der physikalischen Signifikanz des zu bestimmenden mittleren Regressionskoeffizienten wird daher die Homogenität der Berechnungsergebnisse für unterschiedliche Zeitfenster und unterschiedliche Datensätze bei unterschiedlichen Driftpolynomansätzen verwendet. Erkennbar verbessert sich diese Homogenität bereits bei Ansatz eines Driftpolynoms 2. Ordnung. Lässt man eine physikalische Unsicherheit des für die Elimination des gravimetrischen Luftdruckeffekts zu verwendenden Luftdruckregressionskoeffizienten von 3% zu (siehe Abschnitt E8.3), so erfüllt der Wert **3,35nm/s² pro Millibar** diese Bedingung im wesentlichen (Schwankungsbreite zwischen 3,25 und 3,45nm/s² pro Millibar bei Auswertung des Gesamtdatensatzes, gewogene Mittel, Fensterweiten von 50 bis 150 Stunden). Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass neben den Problemen der instrumentellen Drift auch gravitative Resteffekte wirksam sind, welche mit Hilfe des lediglich lokalen Luftdruckverlaufs nicht zu modellieren sind.

Die Ergebnisse der Berechnungen für die Fensterweite 29h sind im Hinblick auf die typischen längerzeitigen Luftdruckvariationen physikalisch als nur bedingt zuverlässig einzustufen. Das Zeitfenster von 150h erfordert wegen der sich mit der Zeit ändernden Driftcharakteristiken ein Driftpolynom 3.Ordnung (diese Angabe bezieht sich ausdrücklich nur auf die Drifteigenschaften des Gravimeters LCR-G-xx1F).

8.4.7 Gezeitenanalyse mit a-priori-Berücksichtigung des Luftdruckeffekts

Da das Programmsystem Eterna die a-priori-Eingabe eines vorgegebenen Luftdruck-Regressionskoeffizienten nicht ermöglicht, soll nun versucht werden, den Luftdruckeffekt auf andere Weise zu berücksichtigen. Dies kann dadurch geschehen, dass die Zeitreihe der gravimetrischen Messdaten um den Luftdruckeffekt korrigiert wird. Bei dieser Lösung gibt es zwei Möglichkeiten, nämlich die Korrektur der minutlichen gravimetrischen Mittelwerte mit Hilfe der minutlichen Luftdruckdaten und anschließender Bildung der stündlichen gravimetrischen Mittelwerte oder die Korrektur der stündlichen gravimetrischen Daten mit Hilfe der Zeitreihe der stündlichen Luftdruckwerte.

Im Hinblick auf die Registrierlänge von 291 Tagen wird zur potentiellen Verbesserung der Unterscheidungsmöglichkeiten der Analyseergebnisse und für eine Abschätzung der Amplitude eines täglichen temperaturinduzierten Störsignals bereits eine Trennung von P₁ und S₁ durchgeführt. Die beobachtete Amplitude der Partialtide S₁ beträgt lediglich etwa 0,45µGal; aus dem Amplitudenquotienten von 1,34 gegenüber einem entsprechenden, durch tägliche Temperatureffekte ungestörten Wert von etwa 1,15 folgt ein thermisch induziertes Störsignal mit einer Amplitude von lediglich etwa 0,06µGal. Diese Amplitude beträgt somit nur etwa 0,1% der Amplitude der

benachbarten Partialtide K_1 und 0,3% der Amplitude der Partialtide P_1 . Der geringe thermische Effekt deutet auf günstige Beobachtungsbedingungen in der Messstation hin.

8.4.7.1 Analyse der mit Hilfe der minütlichen Luftdruckwerte korrigierten Registrierdaten (verwendeter Luftdruck-Regressionskoeffizient 3,35 nm/s², entsprechend 0,335µGal/mbar)

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908                               File:   LCR-G-xx1MiLD

20010727 30000...20011012150000  20011015 20000...20020409 50000
20020412220000...20020520 60000
Number of recorded days in total :   291.08
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients
LaCoste GRAVIMETER LCR-G-xx1F      Used scale: 105,49 µGal/Volt

adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]    [cpd]    [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1   349.5047  1.14703  0.00078  0.0987  0.0388
0.981855 0.998631 P1   162.8049  1.14831  0.00176  0.2731  0.0880
0.998632 1.001369 S1    4.5040  1.34365  0.10800  -2.8998  4.6117
1.001370 1.023622 K1   485.6288  1.13323  0.00058  0.2269  0.0292
1.914129 1.950419 M2   358.5910  1.18677  0.00054  2.2325  0.0263
1.984283 2.002736 S2   166.9115  1.18731  0.00116  0.5092  0.0562
2.002737 2.451943 K2    45.2842  1.18502  0.00418  1.1620  0.2019

Standard deviation of weight unit:   10.023 nm/s**2

```

Tabelle E.12: Analyse Gravimeter LCR-G-xx1F der mit Hilfe der minütlichen Luftdruckwerte korrigierten Registrierdaten

8.4.7.2 Analyse der mit Hilfe der stündlichen Luftdruckwerte korrigierten Registrierdaten (verwendeter Luftdruck-Regressionskoeffizient 3,35 nm/s², entsprechend 0,335µGal/mbar)

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908                               File:   LCR-G-XX1D335

20010727 30000...20011012150000  20011015 20000...20020409 50000
20020412220000...20020520 60000
Number of recorded days in total :   291.08
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients
LaCoste GRAVIMETER LCR-G-xx1F      Used scale: 105.49 µGal/Volt

adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]    [cpd]    [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1   349.5156  1.14706  0.00078  0.0952  0.0388
0.981855 0.998631 P1   162.8269  1.14846  0.00176  0.2786  0.0881
0.998632 1.001369 S1    4.5030  1.34335  0.10816  -2.7241  4.6198
1.001370 1.023622 K1   485.6359  1.13325  0.00058  0.2233  0.0292
1.914129 1.950419 M2   358.5560  1.18666  0.00055  2.2314  0.0266
1.984283 2.002736 S2   166.8762  1.18706  0.00118  0.5018  0.0568
2.002737 2.451943 K2    45.2782  1.18487  0.00422  1.1701  0.2042

Standard deviation of weight unit:   10.096 nm/s**2

```

Tabelle E.13: Analyse Gravimeter LCR-G-xx1F der mit Hilfe der stündlichen Luftdruckwerte korrigierten Registrierdaten

8.4.7.3 Gegenüberstellungen

Ein signifikanter Unterschied der berechneten Gezeitenparameter ist nicht zu erkennen. Beide Vorgehensweisen sind daher als gleichwertig einzustufen.

8.4.7.4 Die Analyse der luftdruckreduzierten Registrierdaten mit zusätzlichem Luftdruck-Regressionsansatz

Der durch die Parallelauswertung von gravimetrischen Registrierdaten und Luftdruckdaten gewonnene Regressionskoeffizient beträgt $3,02681 \text{ nm/s}^2$ pro mbar (siehe Abschnitt E8.4.1). Die getrennte Bestimmung der Regressionskoeffizienten in Abschnitt E8.4.2 bis E8.4.5 führt zu einem mittleren Regressionskoeffizienten von $3,35 \text{ nm/s}^2$ pro Millibar, dessen physikalische Signifikanz bei 3% angesetzt werden kann (Abschnitt E8.4.6); die Differenz beträgt somit etwa 10%. Eine erneute Eterna-Analyse mit den luftdruckreduzierten Daten und den Luftdruckdaten müsste folglich einen Regressionskoeffizienten von etwa $-0,32 \text{ nm/s}^2$ pro Millibar ergeben; berechnet wurde in Übereinstimmung mit dem zu erwartenden Wert ein Koeffizient von $-0,31 \text{ nm/s}^2$ pro Millibar (siehe nachfolgende Tabelle E.14).

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908                               File:   LCR-G-XX1F_ZV5

20010727 30000...20011012150000  20011015 20000...20020409 50000
20020412220000...20020520 60000

Number of recorded days in total :   291.08

Numerical filter is PERTZEV57   with 37 coefficients
LaCoste GRAVIMETER LCR-G-xx1F   Used scale: 105.49 µGal/Volt

adjusted tidal parameters :

from      to      wave   ampl. ampl.fac.   stdv. ph. lead   stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]           [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1    349.5145  1.14706  0.00077  0.0929  0.0387
0.981855 0.998631 P1    162.8300  1.14848  0.00176  0.2850  0.0878
0.998632 1.001369 S1     4.4524   1.32824  0.10786 -3.1901  4.6563
1.001370 1.023622 K1    485.6092  1.13319  0.00058  0.2255  0.0291
1.914129 1.950419 M2    358.5638  1.18668  0.00055  2.2296  0.0264
1.984283 2.002736 S2    166.9328  1.18746  0.00117  0.5308  0.0569
2.002737 2.451943 K2     45.2828  1.18499  0.00419  1.1801  0.2026

Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff.      stdv. parameter unit
  1   -0.30892       0.08356  airpress. nm/s**2 / hPa

Standard deviation of weight unit:   10.087 nm/s**2

```

Tabelle E.14: Die Analyse Gravimeter LCR-G-xx1F der luftdruckreduzierten Registrierdaten mit zusätzlichem Luftdruck-Regressionsansatz

Eine alternative Berechnungsart zur Überprüfung der gewonnenen Ergebnisse ist folgende: Man wendet den gewonnenen Regressionskoeffizienten von $3,35 \text{ nm/s}^2$ pro Millibar vorab auf die gemessenen Luftdruckdaten an und wandelt diese somit um in Schwerewerte mit der Einheit nm/s^2 . Mit ETERNA wird nun der Regressionskoeffizient der auf diese Weise in Schwerewerte konvertierten Luftdruckdaten berechnet. Man erhält somit einen Maßstabsfaktor zwischen dem direkt auf die Luftdruckdaten angewendeten und dem von ETERNA berechnetem Koeffizienten.

Die vorab gewonnene Differenz von ca. 10% wird somit durch den in Tabelle E.15 ausgewiesenen als Maßstabsfaktor zu interpretierenden „Regressionskoeffizienten“ bestätigt.

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File:   LCR-G-XX1F_ZV4
20010727 30000...20011012150000 20011015 20000...20020409 50000
20020412220000...20020520 60000
Number of recorded days in total :   291.08
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients
LaCoste GRAVIMETER LCR-G-xx1F      Used scale: 105.49 µGal/Volt
adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]    [cpd]    [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]
0.911391 0.947991 O1   349.5145  1.14706  0.00077  0.0929  0.0387
0.981855 0.998631 P1   162.8300  1.14848  0.00176  0.2850  0.0878
0.998632 1.001369 S1    4.4524  1.32825  0.10786  -3.1902  4.6563
1.001370 1.023622 K1   485.6092  1.13319  0.00058  0.2255  0.0291
1.914129 1.950419 M2   358.5637  1.18668  0.00055  2.2296  0.0264
1.984283 2.002736 S2   166.9328  1.18746  0.00117  0.5308  0.0569
2.002737 2.451943 K2    45.2829  1.18499  0.00419  1.1801  0.2026
Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff.      stdv. parameter unit
  1      0.90778      0.02494 airpress. nm/s**2 / hPa*3.35
Standard deviation of weight unit:   10.087 nm/s**2

```

Tabelle E.15: Alternative Berechnungsmethode zu Tabelle E.14

8.4.7.5 Die Analyse der Originaldaten

Zum Vergleich werden die Analysenergebnisse für die Registrierdaten ohne Luftdruckkorrektion *mit Trennung von S_jK_j* hinzugefügt (vergleiche Tabelle E.5).

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File:   LCR-G-XX1F_ZV3
Summary of observation data :
20010727 30000...20011012150000 20011015 20000...20020409 50000
20020412220000...20020520 60000
Number of recorded days in total :   291.08
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients
LaCoste GRAVIMETER LCR-G-xx1F      Used scale: 105.49 µGal/Volt
adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]    [cpd]    [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]
0.501370 0.911390 Q1    66.6704  1.14280  0.00390  -0.3187  0.1954
0.911391 0.947991 O1   349.5040  1.14703  0.00081  0.0697  0.0404
0.947992 0.981854 M1    27.7865  1.15951  0.00800  0.2002  0.3951
0.981855 0.998631 P1   162.8611  1.14870  0.00184  0.3477  0.0918
0.998632 1.001369 S1    3.9717  1.18484  0.11265  -8.3980  5.4542
1.001370 1.023622 K1   485.3464  1.13257  0.00060  0.2463  0.0305
1.023623 1.035379 TET1  5.0422  1.10035  0.05517  1.4891  2.8738
1.035380 1.057485 J1    27.8363  1.16163  0.00987  0.6426  0.4866
1.057486 1.071833 SO1   4.4983  1.13166  0.06128  -0.6195  3.1017
1.071834 1.470243 OO1  14.6754  1.11931  0.01624  -1.6571  0.8310
1.470244 1.880264 2N2  10.7345  1.16193  0.01081  4.0283  0.5327
1.880265 1.914128 N2    67.6024  1.16856  0.00236  2.8773  0.1158
1.914129 1.950419 M2   358.6399  1.18693  0.00049  2.2121  0.0239
1.950420 1.984282 L2    9.9664  1.16695  0.02290  0.6252  1.1245
1.984283 2.002736 S2   167.4919  1.19144  0.00106  0.8144  0.0509
2.002737 2.451943 K2    45.3288  1.18619  0.00379  1.2788  0.1832
2.451944 3.381378 M3    4.1049  1.08962  0.03012  1.7381  1.5833
3.381379 4.347615 M4    0.3405  7.82526  2.65252  179.1869  19.4222
Standard deviation of weight unit:   11.019nm/s**2

```

Tabelle E.16: Analyse LCR-G-xx1F ohne Berücksichtigung des Luftdruckeffekts mit Trennung von S_jK_j

Zum Vergleich werden ferner hinzugefügt die Analysenergebnisse für die Registrierdaten ohne Luftdruckkorrektur und Berechnung des Luftdruckregressionskoeffizienten nach dem Eterna-Verfahren (Luftdruck als Zusatzkanal 1) mit Trennung von S_1K_1 (vergleiche Tabelle E.6).

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908                File:   LCR-G-XX1F_ZV7

20010727 30000...20011012150000  20011015 20000...20020409 50000
20020412220000...20020520 60000
Number of recorded days in total :   291.08

Numerical filter is PERTZEV57  with 37 coefficients
LaCoste GRAVIMETER LCR-G-xx1F    Used scale: 105.49 µGal/Volt

Estimation of noise by FOURIER-spectrum of residuals
0.1 cpd band99999.9990 nm/s**2      1.0 cpd band    0.3923 nm/s**2
2.0 cpd band    0.2688 nm/s**2      3.0 cpd band    0.2075 nm/s**2
4.0 cpd band    0.2185 nm/s**2      white noise     0.2807 nm/s**2

adjusted tidal parameters :

from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]          [deg]  [deg]

0.501370 0.911390 Q1    66.8393  1.14569  0.00373  -0.4429  0.1865
0.911391 0.947991 O1    349.5140 1.14706  0.00077  0.0928  0.0387
0.947992 0.981854 M1    27.7828  1.15936  0.00765  0.4013  0.3781
0.981855 0.998631 P1    162.8297 1.14848  0.00176  0.2848  0.0878
0.998632 1.001369 S1     4.4528  1.32838  0.10789  -3.1877  4.6573
1.001370 1.023622 K1   485.6086 1.13319  0.00058  0.2254  0.0291
1.023623 1.035379 TET1   4.8419  1.05664  0.05280  0.9843  2.8628
1.035380 1.057485 J1    27.8364  1.16164  0.00944  0.1970  0.4658
1.057486 1.071833 SO1    4.4982  1.13164  0.05862  1.2135  2.9678
1.071834 1.470243 OO1   14.9042  1.13676  0.01555  -1.3266  0.7828
1.470244 1.880264 2N2   10.7671  1.16545  0.01194  4.0424  0.5866
1.880265 1.914128 N2    67.5414  1.16751  0.00261  2.9059  0.1280
1.914129 1.950419 M2   358.5630 1.18668  0.00055  2.2296  0.0264
1.950420 1.984282 L2     9.9914  1.16988  0.02530  0.1913  1.2390
1.984283 2.002736 S2   166.9330 1.18747  0.00117  0.5307  0.0569
2.002737 2.451943 K2    45.2825  1.18498  0.00419  1.1802  0.2026
2.451944 3.381378 M3     4.0612  1.07802  0.03197  1.8266  1.6986
3.381379 4.347615 M4     0.3701  8.50447  2.87105 174.2622 19.3444

Adjusted meteorological or hydrological parameters:

no. regr.coeff.      stdv.  parameter  unit

   1    3.04078    0.08355  airpress.  nm/s**2 / hPa

Standard deviation of weight unit:    10.086 nm/s**2

```

Tabelle E.17: Analyse LCR-G-xx1F mit Berücksichtigung des Luftdruckeffekts durch Eterna und Trennung von S_1K_1

8.4.8 Ergebnisbewertung

Wie die nachfolgende Tabelle E.18 zeigt, führt das Verfahren der Berücksichtigung der Luftdruckeffekte innerhalb des Programmsystems Eterna zu einer Verbesserung der Modellanpassung (Standardabweichung der Gewichtseinheit) im Vergleich zur Analyse der Registrierdaten ohne Luftdruckregression um etwa 10%. Gleiches gilt für die Variante der a-priori Berücksichtigung der Luftdruckeffekte für die stündlichen Signalwerte.

Eine noch etwas bessere Verbesserung der Modellanpassung tritt auf im Falle der a-priori Berücksichtigung der *minütlichen* Luftdruckeffekte. Dieses Verfahren bietet daher einen geringfügigen Vorteil.

Es ist festzustellen, dass die Auswirkungen einer Berücksichtigung des Luftdruckeffekts hinsichtlich der berechneten Gezeitenparameter (mit Ausnahme der Partialtide S_2) nur geringfügig sind, statistisch signifikante Unterschiede treten nicht auf. Infolgedessen können im Rahmen der Aufgabenstellung physikalische Unsicherheiten des Luftdruckregressionskoeffizienten, die größer sind als die zuvor festgelegten 3%, durchaus noch als zulässig angesehen werden, d.h. innerhalb gewisser Grenzen kann daher die Bestimmung dieses Koeffizienten als unkritisch bewertet werden. Besonders hinzuweisen ist jedoch auf die Verringerung des Amplitudenquotienten für die Partialtide S_2 um 4%, die als Folge der Elimination der gravimetrischen Wirkungen der Periodizität der Luftdruckvariationen an der Stelle S_2 des Gezeitenpektrums (siehe Abschnitt E3.4.3) zu interpretieren ist und trotz der bestenfalls nur schwachen statistischen Signifikanz als physikalisch real einzustufen ist.

Die Verringerung der Amplitude der gravimetrischen Partialtide S_2 als Folge der Elimination des gravitativen Effektes der atmosphärischen Luftdrucktide S_2 (Abbildung E.72) beträgt lediglich $0,07\mu\text{Gal}$; dieser Wert ist im Hinblick auf die Aufgabenstellung ohne Relevanz (angestrebte Maßstabssicherheit der gravimetrischen Modellgezeiten relativ 1%, entsprechend einer Betragssicherheit individueller Schwerewerte von $0,3\mu\text{Gal}$). Auffällig, wenn auch nach statistischen Gesichtspunkten nicht signifikant, sind die weitgehend einheitlichen Auswirkungen der Luftdruckreduktion auf den Amplitudenquotienten der Partialtide S_1 , sowie auch auf dessen Phase. Eine einheitliche Phasenveränderung nach der Reduktion tritt auch auf bei der Partialtide S_2 .

Allgemein ist darauf hinzuweisen, dass die Elimination gravitativer atmosphärischer Gezeiteneffekte eine Veränderung der in einer Beobachtungsstation tatsächlich auftretenden, gezeitenbedingten Schwerevariationen bedeutet (ebenso wie die Elimination der Effekte der Meeresgezeiten).

	Eterna 1	Eterna 2	Eterna 3	Eterna 4
s	11,019 nm/s ²	10,086 nm/s ²	10,023 nm/s ²	10,096 nm/s ²
Delta S₁	1,1845±0,1126	1,3284±0,1079	1,3437±0,1080	1,3434±0,1082
Phasendiff.S₁	-8°,398±5,454	-3°,188±4,657	-2°,900±4,612	-2°,724±4,620
Delta S₂	1,1914±0,0011	1,1876±0,0012	1,1873±0,0012	1,1871±0,0012
Phasendiff.S₂	0°,814±0,051	0°,530±0,057	0°,509±0,056	0°,502±0,057
Delta O₁	1,1470±0,0008	1,1471±0,0008	1,1470±0,0008	1,1471±0,0008
Phasendiff.O₁	0°,070±0,040	0°,092±0,040	0°,099±0,039	0°,095±0,039
Delta M₂	1,1869±0,0005	1,1866±0,0005	1,1868±0,0005	1,1867±0,0006
Phasendiff.M₂	2°,212±0,024	2°,230±0,026	2°,232±0,026	2°,231±0,027
Delta S₁K₁	1,1327±0,0006	1,1334±0,0006	(1,1332±0,0006)	(1,1332±0,0006)
Phasendiff.S₁K₁	0°,237±0,029	0°,228±0,029	(0°,227±0,029)	(0°,223±0,029)
Delta K₁	1,1326±0,0006	1,1332±0,0006	1,1332±0,0006	1,1332±0,0006
Phasendiff.K₁	0°,246±0,030	0°,225±0,029	0°,227±0,029	0°,223±0,029

Tabelle E.18: Ergebnisübersicht

Bezeichnungen:

Eterna 1: Analyse mit Eterna ohne Berücksichtigung des gravimetrischen Luftdruckeinflusses

Eterna 2: Analyse mit Berücksichtigung des gravimetrischen Luftdruckeinflusses innerhalb des Programmsystems Eterna (Luftdruckdaten als Zusatzkanal 1).

Eterna 3: Analyse wie 1 ohne Zusatzkanal, a-priori minütliche Luftdruckkorrektur der Registrierdaten, danach Bildung der stündlichen Signalmittel

Eterna 4: Analyse wie 1 ohne Zusatzkanal, a-priori stündliche Luftdruckkorrektur der Registrierdaten

8.5 Gravimeter A206 (gefilterte Daten)

8.5.1 Bestimmung des Regressionskoeffizienten mit dem Programmsystem Eterna in der Version 3.30

Die nachfolgende Tabelle E.19 (Auszug aus Tabelle D.5) zeigt für die Hauptpartialtiden und die Partialtide S₁ noch einmal das Ergebnis der Gezeitenanalyse der Messdaten des ursprünglichen Signalverlaufs, d.h. unter Einschluss des gravimetrischen Luftdruckanteils.

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908                               File:  A206_5a
20001116110000...20001217110000  20010108120000...20010118140000
20010119190000...20010623200000  20010624110000...20010726    0
20010726 90000...20010904150000  20010905 30000...20011012150000
20011014210000...20020520 60000  20020520140000...20030114110000
Number of recorded days in total : 762.00
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206      Used scale: 124.39 µGal/Volt
adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg] [deg]
0.911391 0.947991 O1   349.8325  1.14810  0.00083  0.0683  0.0416
0.981855 0.998631 P1   162.9265  1.14916  0.00183  -0.2314  0.0915
0.998632 1.001369 S1    7.4498   2.22239  0.10989  2.1511  2.8331
1.001370 1.023622 K1   486.6757  1.13567  0.00060  0.1847  0.0301
1.914129 1.950419 M2   358.8719  1.18770  0.00031  2.1420  0.0148
1.984283 2.002736 S2   167.5543  1.19189  0.00066  0.3395  0.0315
2.002737 2.451943 K2    45.7734  1.19782  0.00234  0.7088  0.1118
Standard deviation of weight unit: 14.478 nm/s**2

```

Tabelle E.19: Gezeitenanalyse Gravimeter A206 gefilterte Daten ohne Ansatz einer Luftdruckregression

Berechnet man gleichzeitig den mittleren Luftdruck-Regressionskoeffizienten, so erhält man die in Tabelle E.20 nachgewiesenen Ergebnisse (Daten ab Beginn der Luftdruckregistrierungen mit einem hochauflösenden Barometer).

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908                               File:  A206_LDa
20010328190000...20010726    0  20010726 90000...20010904150000
20010905 30000...20011012150000  20011014210000...20020520 60000
20020520140000...20030114110000
Number of recorded days in total : 653.42
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206      Used scale: 124.39 µGal/Volt
adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg] [deg]
0.911391 0.947991 O1   349.8270  1.14808  0.00078  0.0617  0.0387
0.981855 0.998631 P1   163.1459  1.15071  0.00175  -0.2325  0.0873
0.998632 1.001369 S1    7.6538   2.28328  0.10441  -0.5981  2.6230
1.001370 1.023622 K1   486.9352  1.13628  0.00056  0.1903  0.0284
1.914129 1.950419 M2   359.0213  1.18820  0.00032  2.1188  0.0156
1.984283 2.002736 S2   167.6249  1.19239  0.00070  0.3368  0.0339
2.002737 2.451943 K2    45.8287  1.19927  0.00245  0.8400  0.1173
Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff.  stdv.  Parameter  unit
1      0.11313  0.07959  000  airpr  nm/s**2 /ess. HPa
Standard deviation of weight unit: 14.494 nm/s**2

```

Tabelle E.20: Gezeitenanalyse Gravimeter A206 gefilterte Daten mit Ansatz einer Luftdruckregression

Anders als bei Gravimeter LCR-G-xx1F ergibt die Regressionsberechnung bei Gravimeter A206 **keinen** signifikanten Regressionskoeffizienten: $0,113 \pm 0,080 \text{ nm/s}^2$ pro mbar gegenüber $3,027 \pm 0,083 \text{ nm/s}^2$ pro mbar bei Gravimeter LCR-G-xx1F (siehe Abschnitt E8.4.1). Dies legt die Interpretation nahe, dass der physikalische Luftdruckeffekt bei Gravimeter A206 durch einen instrumentellen Luftdruckeffekt gerade aufgehoben wird, ein Sachverhalt aber, der mit Bezug auf die Untersuchungen des nicht-druckdichten Gravimeters LCR716 (siehe Abschnitt F1.3) als ein bemerkenswerter Zufall einzustufen wäre. Vergleicht man nun die Ergebnisse der Gezeitenanalysen der *nicht*-reduzierten Daten für das Gravimeter LCR-G-xx1F mit den entsprechenden Ergebnissen für das Gravimeter A206, so erkennt man, dass die Partialtide S_2 nach der Analyse *ohne* Luftdruckregression (siehe Abschnitt E8.4.1) praktisch identische Amplitudenquotienten aufweist: $1,19153 \pm 0,00106$ bei Gravimeter LCR-G-xx1F (siehe Tabelle E.5) und $1,19189 \pm 0,00066$ bei Gravimeter A206 (siehe Tabelle E.19). Aus der faktischen Identität der mit beiden Gravimetern beobachteten physikalischen Luftdruckeffekte aber folgt, dass das Gravimeter A206 keinen signifikanten luftdruckinduzierten Fehler aufweisen kann. Würde nämlich der physikalische Luftdruckeffekt bei dem Gravimeter A206 durch einen instrumentellen Fehler kompensiert, müsste in Tabelle E.19 der Amplitudenquotient für S_2 wie in Tabelle E.6 etwa bei 1,188 liegen. Diese Differenz von 0,004 könnte statistisch durchaus als nicht-signifikant bewertet werden, allerdings dann ohne Berücksichtigung der Verhältnisse der Amplitudenquotienten LCR-G-xx1F/A206, die in Tabelle D.8 nachgewiesen wurden.

Somit ist davon auszugehen, dass im Falle des Gravimeters A206 bei der Regressionsberechnung Probleme bei der Modellanpassung aufgetreten sind. Solche Probleme könnten zum Beispiel dann entstehen, wenn die Signaldrift neben dem Trend relativ kurzzeitige Effekte enthält (siehe Residuenverlauf in Abschnitt D7.1, Abbildung D.28).

8.5.2 Regressionsberechnung mit linearem Driftansatz

Aufgrund der bei der Untersuchung des Gravimeters LCR-G-xx1F gewonnenen Erkenntnis, dass die Gravimeterdrift bei der Berechnung des Regressionskoeffizienten im allgemeinen wohl nicht vernachlässigt werden darf, wurde auf eine Regressionsberechnung ohne Berücksichtigung einer Drift verzichtet. Die weiteren Berechnungen unter Einbezug der Drift wurden wiederum mit dem Programmsystem TSoft ausgeführt. Dabei wurden die Regressionsberechnungen für die Fensterweiten entsprechend der Untersuchungen für das Gravimeter LCR-G-xx1F durchgeführt: 29, 50, 75, 100, 125 und 150 Stunden. Die Berechnungsergebnisse sind in den nachfolgenden Tabellen nachgewiesen. Auch hier wurde, wie zuvor für Gravimeter LCR-G-xx1F (Abschnitt E8.4), der Zeitraum vom 21.1.2002 bis 20.3.2002 gesondert untersucht.

Übersicht über die Luftdruckregressionskoeffizienten für A206 bei unterschiedlicher Fensterbreite

Zeitraum: 1.4.2001 bis 12.1.2003

	29h	50h	75h	100h	125h	150h
arithmetisches Mittel:	-0,34775273	-0,72982794	-1,57516479	-1,56311504	0,29689358	2,1767122
Standardabweichung arithm. Mittel:	0,40533715	0,67933005	0,91991859	1,02982241	1,24403616	1,30573483
gewogenes Mittel:	0,16490337	0,07419323	-0,88440454	0,07244125	0,42786801	1,7814669
Standardabweichung gewogenes Mittel:	0,03343943	0,04625089	0,06077053	0,0762156	0,0890587	0,09979541

Übersicht über die Luftdruckregressionskoeffizienten für A206 bei unterschiedlicher Fensterbreite

Zeitraum: 21.1.2002 bis 20.3.2002

	29h	50h	75h	100h	125h	150h
arithmetisches Mittel:	1,4320206	-0,0665971	0,65419327	0,88107457	0,85500578	6,25804258
Standardabweichung arithm. Mittel:	0,9573758	1,37584923	1,09147846	2,11059742	1,89945762	3,36243742
gewogenes Mittel:	1,35611692	1,4783591	0,41707939	2,84168906	1,84672407	3,13489228
Standardabweichung gewogenes Mittel:	0,08504168	0,14028666	0,18293709	0,23608485	0,29660872	0,26781671

Tabelle E.21: Lineare Regressionskoeffizienten für A206 (gefilterte Daten) bei linearem Driftansatz

Nachfolgend sind einige repräsentative Berechnungsergebnisse mit den zugeordneten Standardabweichungen graphisch aufgeführt.

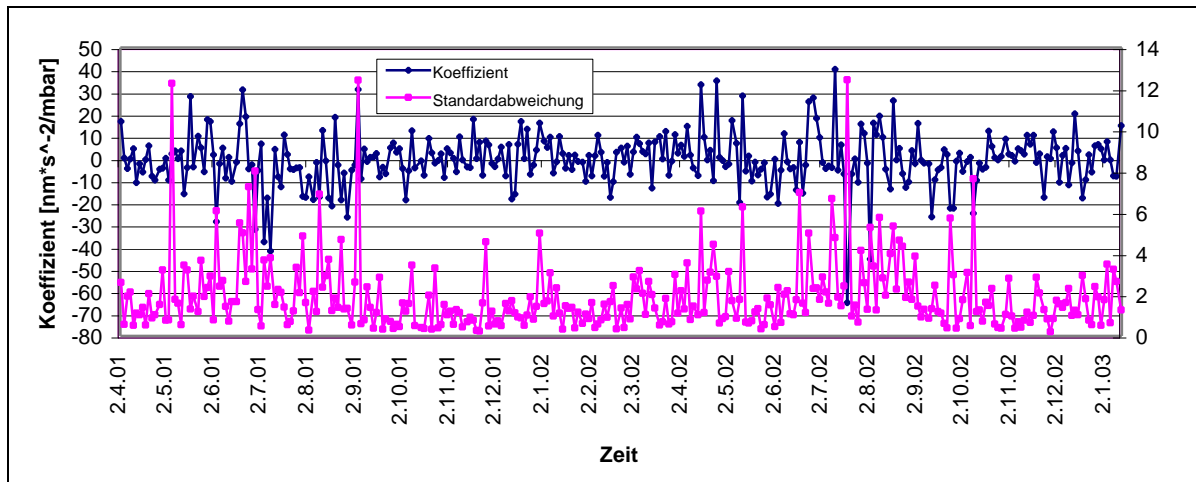


Abbildung E.89: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für A206 (Fensterbreite: 50h; linearer Driftansatz)

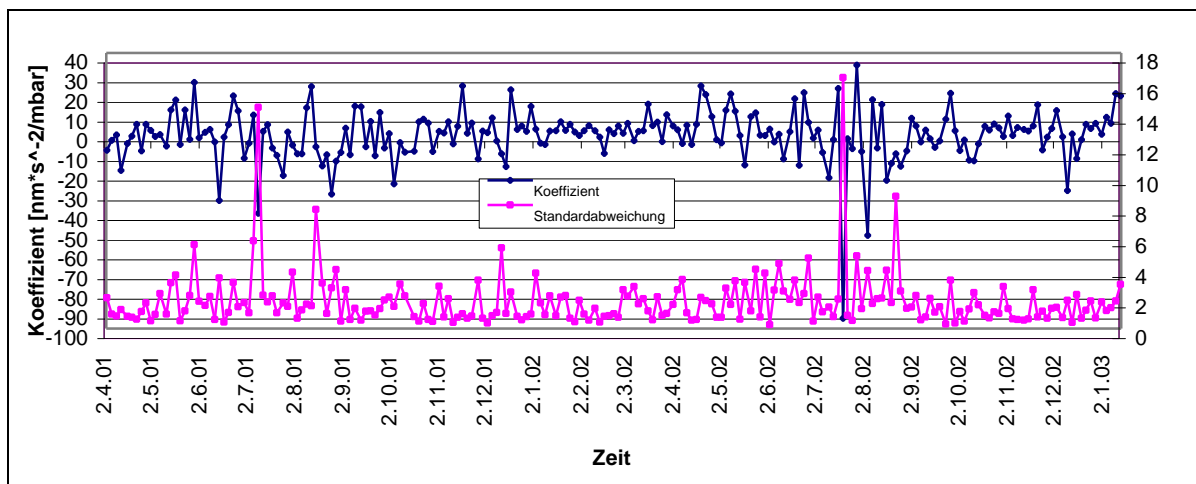


Abbildung E.90: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für A206 (Fensterbreite: 75h; linearer Driftansatz)

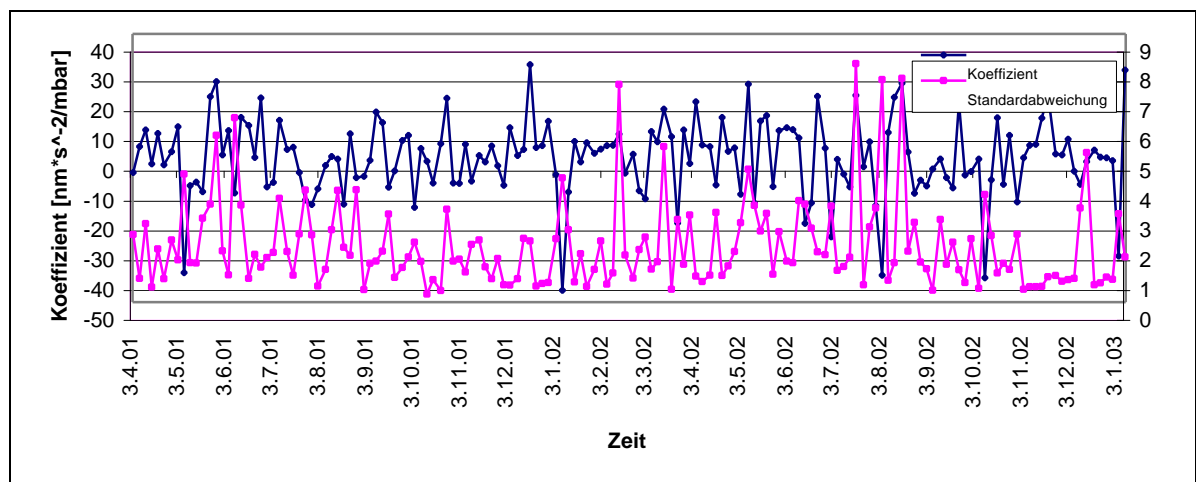


Abbildung E.91: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für A206 (Fensterbreite: 100h; linearer Driftansatz)

Man erkennt, dass der zeitliche Verlauf gegenüber den Ergebnissen für das Gravimeter LCR-G-xx1F viel uneinheitlicher ausfällt, was auf Grund der Ergebnisse aus Abschnitt E8.5.1 auch zu erwarten war.

8.5.3 Regressionsberechnung mit quadratischem Driftansatz

Die vorangegangenen Berechnungen werden unter Verwendung eines quadratischen Ansatzes für die Gravimeterdrift wiederholt.

Übersicht über die Luftdruckregressionskoeffizienten für A206 bei unterschiedlicher Fensterbreite

Zeitraum: 1.4.2001 bis 12.1.2003

Driftansatz: Polynom 2. Ordnung

	29h	50h	75h	100h	125h	150h
arithmetisches Mittel:	0,115676448	-1,10987688	-0,93054447	-0,89116948	-1,30939994	-0,11683259
Standardabweichung arithm. Mittel:	0,278066647	0,43968904	0,63991703	0,69142868	0,78571166	0,76023045
gewogenes Mittel:	0,596909446	0,27891845	0,10411685	-0,05908557	-1,09145266	0,36656116
Standardabweichung gewogenes Mittel:	0,032614093	0,03629153	0,0487797	0,0605668	0,08083145	0,08061525

Übersicht über die Luftdruckregressionskoeffizienten für A206 bei unterschiedlicher Fensterbreite

Zeitraum: 21.1.2002 bis 20.3.2002

	29h	50h	75h	100h	125h	150h
arithmetisches Mittel:	0,429561744	0,93088459	4,49698614	1,81642965	5,74989051	1,60475197
Standardabweichung arithm. Mittel:	0,52645054	0,66692359	1,62181884	0,95799495	2,34878689	1,4610977
gewogenes Mittel:	0,56278402	1,5505445	1,33493737	0,30368583	4,27615095	1,47625362
Standardabweichung gewogenes Mittel:	0,073596998	0,11190606	0,16934511	0,2016943	0,26220612	0,23351408

Tabelle E.22: Lineare Regressionskoeffizienten für A206 (gefilterte Daten) – Driftansatz: Polynom 2. Ordnung

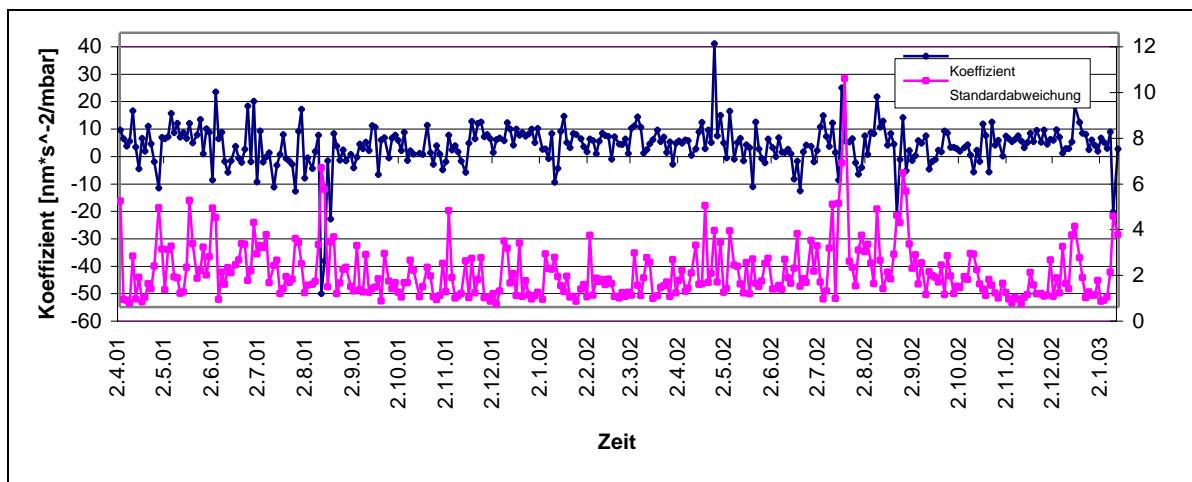


Abbildung E.92: Luftdruckregressionskoeffizienten für A206 (Fensterbreite: 50h; Driftansatz: Polynom 2. Ordnung)

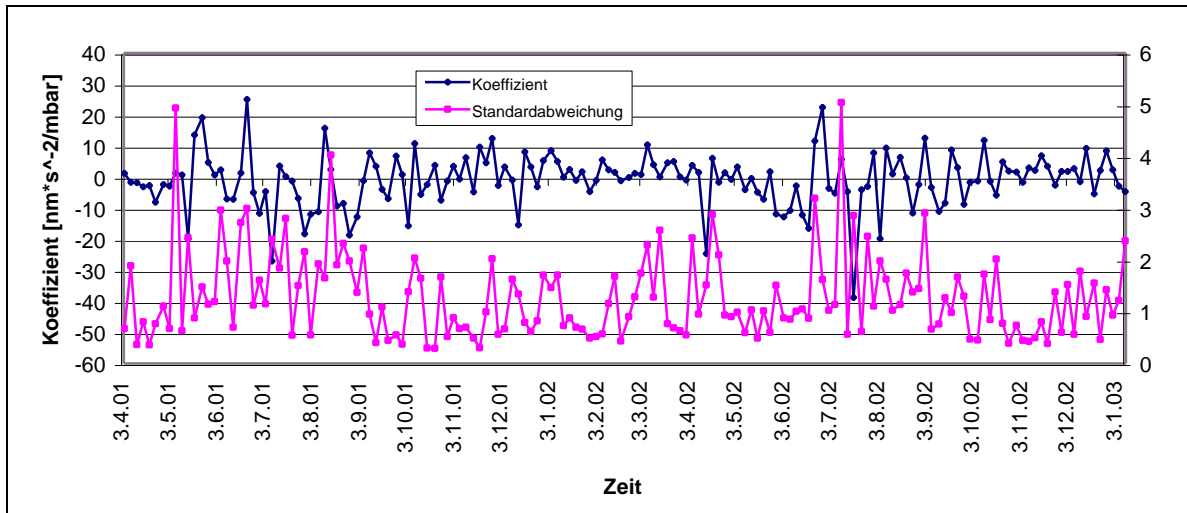


Abbildung E.93: Luftdruckregressionskoeffizienten für A206 (Fensterbreite: 100h; Driftansatz: Polynom 2. Ordnung)

Offensichtlich ändert der Ansatz mit einem Polynom 2. Ordnung für den Driftterm die vorgenannte Problematik nicht. Daher wird versucht, ob weitere Berechnungen mit Driftpolynomen bis zum Grad 5 die erforderliche Homogenität der Ergebnisse gewährleisten können.

8.5.4 Regressionsberechnung mit einem Driftpolynom dritter Ordnung

Übersicht über die Luftdruckregressionskoeffizienten für A206 bei unterschiedlicher Fensterbreite

Zeitraum: 1.4.2001 bis 12.1.2003

Driftansatz: Polynom 3. Ordnung

	29h	50h	75h	100h	125h	150h
arithmetisches Mittel:	0,772587775	-0,34299582	-0,71467588	-0,83065711	-1,07064299	-0,96235845
Standardabweichung arithm. Mittel:	0,249282215	0,32243049	0,39000911	0,52879963	0,66303635	0,68860976
gewogenes Mittel:	0,774492723	0,57347232	-0,04156479	0,33963708	-0,0636226	-0,41319002
Standardabweichung gewogenes Mittel:	0,035645631	0,03841939	0,04335138	0,05249824	0,06094283	0,07049312

Übersicht über die Luftdruckregressionskoeffizienten für A206 bei unterschiedlicher Fensterbreite

Zeitraum: 21.1.2002 bis 20.3.2002

	29h	50h	75h	100h	125h	150h
arithmetisches Mittel:	0,69362	-0,16171856	1,37428858	1,73929008	1,24521568	1,18447173
Standardabweichung arithm. Mittel:	0,47131664	0,68250868	1,11603761	0,96549673	1,15197832	0,94586853
gewogenes Mittel:	0,777574491	0,11563014	1,02869084	1,37073356	1,94049339	1,3950134
Standardabweichung gewogenes Mittel:	0,096027686	0,10514065	0,13781587	0,16006598	0,19633775	0,21241053

Tabelle E.23: Lineare Regressionskoeffizienten für A206 (gefilterte Daten) - Driftansatz: Polynom 3. Ordnung

8.5.5 Regressionsberechnung mit einem Driftpolynom vierter Ordnung

Übersicht über die Luftdruckregressionskoeffizienten für A206 bei unterschiedlicher Fensterbreite

Zeitraum: 1.4.2001 bis 12.1.2003

Driftansatz: Polynom 4. Ordnung

	29h	50h	75h	100h	125h	150h
arithmetisches Mittel:	0,92856191	0,01320982	-0,57832747	-1,29259079	-1,14019982	-1,07689728
Standardabweichung arithm. Mittel:	0,221588761	0,27614749	0,39517765	0,41721479	0,51904046	0,58516752
gewogenes Mittel:	0,755944668	0,47424255	0,27606978	-0,02399616	-0,19655984	-0,12771552
Standardabweichung gewogenes Mittel:	0,033773074	0,03889149	0,04119317	0,05068216	0,05840643	0,06202214

Übersicht über die Luftdruckregressionskoeffizienten für A206 bei unterschiedlicher Fensterbreite

Zeitraum: 21.1.2002 bis 20.3.2002

	29h	50h	75h	100h	125h	150h
arithmetisches Mittel:	1,297345894	0,23025566	0,79233725	1,37354251	1,99119988	1,69416077
Standardabweichung arithm. Mittel:	0,455065057	0,49335089	0,68036923	1,22402005	0,98000478	0,85753644
gewogenes Mittel:	1,329620166	0,6719204	0,88487561	1,42210717	1,97989131	1,93410455
Standardabweichung gewogenes Mittel:	0,093955575	0,1128485	0,12480821	0,15390272	0,20037569	0,16351791

Tabelle E.24: Lineare Regressionskoeffizienten für A206 (gefilterte Daten) – Driftansatz: Polynom 4. Ordnung

8.5.6 Regressionsberechnung mit einem Driftpolynom fünfter Ordnung

Übersicht über die Luftdruckregressionskoeffizienten für A206 bei unterschiedlicher Fensterbreite

Zeitraum: 1.4.2001 bis 12.1.2003

Driftansatz: Polynom 5. Ordnung

	29h	50h	75h	100h	125h	150h
arithmetisches Mittel:	0,930735125	0,38429538	-0,4115465	-0,77683697	-1,28076672	-0,69482557
Standardabweichung arithm. Mittel:	0,205545076	0,25508367	0,36679402	0,37176312	0,50974746	0,50598283
gewogenes Mittel:	0,730335619	0,71920596	0,18265218	-0,13956554	-0,08101357	-0,20458795
Standardabweichung gewogenes Mittel:	0,033420456	0,03981486	0,04078105	0,04683189	0,05231401	0,05441127

Übersicht über die Luftdruckregressionskoeffizienten für A206 bei unterschiedlicher Fensterbreite

Zeitraum: 21.1.2002 bis 20.3.2002

	29h	50h	75h	100h	125h	150h
arithmetisches Mittel:	1,316890527	0,49550216	0,48318421	0,51852699	1,15915775	0,46770751
Standardabweichung arithm. Mittel:	0,398283305	0,49025315	0,48593599	0,96128999	0,67196097	0,70034785
gewogenes Mittel:	1,853199494	0,64304935	0,65909457	-0,06525336	1,31279328	0,65925939
Standardabweichung gewogenes Mittel:	0,099266736	0,10635006	0,13542842	0,14421748	0,14107844	0,1607893

Tabelle E.25: Lineare Regressionskoeffizienten für A206 (gefilterte Daten) - Driftansatz: Polynom 5. Ordnung

8.5.7 Ergebnisbewertung

In allen fünf Varianten der Regressionskoeffizientenberechnung wird das Homogenitätskriterium sowohl bei unterschiedlichen Fensterweiten als auch bei unterschiedlichen Datensätzen signifikant verletzt. Ein plausibler oder wahrscheinlicher mittlerer Regressionskoeffizient lässt sich nicht angeben. Dies führt zu der möglichen Schlussfolgerung, dass in den Registrierdaten des Gravimeters A206, wie bereits zuvor erwähnt, kurzzeitige Driftprozesse wirksam sind, die durch die einfachen Modellansätze nicht erfasst werden können und deren Ursprung unbekannt ist.

8.5.8 Gezeitenanalyse mit a-priori-Berücksichtigung des Luftdruckeffekts

Da aus den Registrierdaten ein Luftdruckregressionskoeffizient nicht ermittelt werden kann, ist die Gezeitenanalyse entsprechend Abschnitt E8.4.7 mit einem vorgegebenem Regressionskoeffizienten durchzuführen. Aufgrund der Feststellungen in Abschnitt E8.1 ist es zulässig, den gleichen geophysikalischen Regressionskoeffizienten wie für Gravimeter LCR-G-xx1F zu verwenden: $k=3,35\text{nm/s}^2$ pro Millibar.

8.5.8.1 Analyse der mit Hilfe der minütlichen Luftdruckwerte korrigierten Registrierdaten

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908                               File:  A206_LDM
20010727 30000...20010904150000  20010905 30000...20011012150000
20011014210000...20020520 60000  20020520140000...20030114110000
Number of recorded days in total :   533.42

Numerical filter is PERTZEV57  with 37 coefficients
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206      Used scale: 124.39 µGal/Volt

adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]
0.911391 0.947991 O1   350.1218  1.14905  0.00090  0.0580  0.0449
0.981855 0.998631 P1   162.9741  1.14950  0.00206  -0.3932  0.1027
0.998632 1.001369 S1    8.8452  2.63873  0.12639  8.1186  2.7457
1.001370 1.023622 K1  487.1665  1.13682  0.00066  0.1010  0.0333
1.914129 1.950419 M2  359.1329  1.18857  0.00037  2.1524  0.0177
1.984283 2.002736 S2  167.2245  1.18954  0.00078  0.0291  0.0376
2.002737 2.451943 K2   45.7524  1.19728  0.00271  0.6296  0.1295

Standard deviation of weight unit:   14.683 nm/s**2

```

Tabelle E.26: Analyse der mittels minütlicher Luftdruckwerte korrigierten Registrierdaten (verkürzter Untersuchungszeitraum) Auszug, A206 (gefilterte Daten)

8.5.8.2 Analyse der mit Hilfe der stündlichen Luftdruckwerte korrigierten Registrierdaten

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908                               File:  A206_LDS
20010727 30000...20010904150000  20010905 30000...20011012150000
20011014210000...20020520 60000  20020520140000...20030114110000
Number of recorded days in total :   533.42

Numerical filter is PERTZEV57  with 37 coefficients
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206      Used scale: 124.39 µGal/Volt

adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]
0.911391 0.947991 O1   350.1112  1.14902  0.00090  0.0573  0.0449
0.981855 0.998631 P1   162.9699  1.14947  0.00206  -0.3964  0.1028
0.998632 1.001369 S1    8.8956  2.65375  0.12649  7.7698  2.7323
1.001370 1.023622 K1  487.1665  1.13682  0.00066  0.1002  0.0333
1.914129 1.950419 M2  359.1229  1.18853  0.00037  2.1536  0.0179
1.984283 2.002736 S2  167.2226  1.18953  0.00079  0.0299  0.0380
2.002737 2.451943 K2   45.7542  1.19732  0.00273  0.6253  0.1308

Standard deviation of weight unit:   14.678 nm/s**2

```

Tabelle E.27: Analyse der mittels stündlicher Luftdruckwerte korrigierten Registrierdaten Auszug, A206 (gefilterte Daten)

8.5.8.3 Gegenüberstellungen und Interpretationen

Die in Tabelle E.26 und Tabelle E.27 nachgewiesenen Ergebnisse der Gezeitenanalysen stimmen praktisch überein. Insofern ist das Verfahren der Luftdruckreduktion der minütlichen Mittelwerte und der Analyse der aus diesen gebildeten stündlichen Mittelwerte wiederum (siehe Gravimeter LCR-G-xx1F, Tabelle E.12 und Tabelle E.13) als gleichwertig anzusehen gegenüber dem Verfahren der direkten Luftdruckreduktion der stündlichen Mittelwerte. Die Analyse der luftdruckreduzierten Daten führt nun zu der aufgrund der Ergebnisse des Abschnitts E8.4 erwarteten Verringerung des Amplitudenquotienten der Partialtide S_2 um etwa 4%, also um jenen Betrag, der bei den Gezeitenanalysen der Daten des Gravimeters LCR-G-xx1F mit den Varianten Eterna2, Eterna3 und Eterna4 (Tabelle E.18) ermittelt wurde. Daraus folgt, dass auch in den Daten des Gravimeters A206 der Gravitationseffekt der atmosphärischen Luftdrucktide S_2 enthalten ist, allerdings weder mit der im Programmsystem enthaltenen Option (Tabelle E.20) noch auf dem Wege der iterativen Regressionsberechnung (Abschnitte E8.5.2 bis E8.5.6) ermittelt und eliminiert werden kann. Das heißt: die Struktur jener, das gravimetrische Nutzsignal überlagernden Störsignale, die nicht im Modellansatz der Gezeitenanalyse berücksichtigt sind, hat einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis der Berechnungen der Luftdruckregression.

Die direkte Elimination des Luftdruckeffektes in den beobachteten gravimetrischen Daten setzt die Kenntnis des geophysikalischen Luftdruckregressionskoeffizienten voraus (Ansatz hier: 3,35nm/s² pro Millibar, entsprechend 0,335 μ Gal/mbar). Es ist denkbar, dass auf iterativem Wege, also durch systematische Wiederholung der Datenreduktion mit unterschiedlichen Regressionskoeffizienten, der wahrscheinlichste Koeffizient ermittelt werden könnte, sofern ein hinreichend sensibler Kriteriumsparameter gefunden werden könnte. Im Hinblick auf die Aufgabenstellung wurde dieser Gesichtspunkt hier jedoch nicht weiter verfolgt.

Die beobachtete Amplitude der Partialtide S_1 beträgt etwa 0,89 μ Gal. Aus dem berechneten Amplitudenquotienten von 2,65 gegenüber einem entsprechenden, durch tägliche Temperatureffekte ungestörten Wert von etwa 1,15 folgt ein wahrscheinlich thermisch induziertes Störsignal mit einer Amplitude von etwa 0,50 μ Gal. Dieser Betrag ist somit etwa achtmal größer als der entsprechende Wert bei Gravimeter LCR-G-xx1F. Die Störampplitude beträgt etwa 1% der Amplitude der benachbarten Partialtide K_1 und etwa 3% der Amplitude der Partialtide P_1 . Das Gravimeter A206 ist daher vorzugsweise bei Langzeitregistrierungen einzusetzen, wenn in der Gezeitenanalyse eine Trennung von P_1 , S_1 und K_1 ermöglicht wird.

Eine Vergrößerung des Temperatureffekts ist einerseits plausibel als eine Folge des Verzichts auf Doppelthermostatisierung des Gravimeters A206, der in Abschnitt D1 begründet wird. Denkbar sind andererseits jedoch auch instrumentelle Auswirkungen der täglichen Variationen des mikroseismischen Rauschpegels (siehe Abbildung E.5, Abschnitt E1), da, anders als bei den eingesetzten astasierten Gravimetern, die Rotationsachse des gravimetrischen Hebelsystems im Gravimeter A206 konstruktiv instabiler festgelegt ist, nämlich lediglich als Achse der Torsionsfeder (siehe Abbildung D.23 in Abschnitt D6.2.1). Infolgedessen reagiert dieser Gravimetertyp potentiell sensibler auf horizontale Störbeschleunigungen, was zu differentiellen Verlagerungen der wirksamen Rotationsachse des gravimetrischen Sensors führen könnte [BONATZ 2004].

8.5.9 Die Analyse der Originaldaten

Zum Vergleich werden für den verkürzten Untersuchungszeitraum (vergleiche Tabelle E.19) ergänzend die Analysenergebnisse für die Registrierdaten ohne Luftdruckkorrektur hinzugefügt.

Nach Berücksichtigung des gravimetrischen Luftdruckeffekts verringert sich der Amplitudenquotient S_2 wie bei Gravimeter LCR-G-xx1F (siehe Abschnitt E8.4) um etwa 0,4%:

Gravimeter A206:	1,19371 =>	1,18954
Gravimeter LCR-G-xx1F:	1,19144 =>	1,18731 (minütliche Luftdruckkorrektur der Registrierdaten)
	1,19144 =>	1,18706 (stündliche Luftdruckkorrektur der Registrierdaten)
	1,19144 =>	1,18747 (Eterna mit zusätzlichem Luftdruckkanal)

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File:  A206_ZV1

20010727 30000...20010904150000 20010905 30000...20011012150000
20011014210000...20020520 60000 20020520140000...20030114110000
Number of recorded days in total : 533.42

Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206 Used scale: 124.39 µGal/Volt

adjusted tidal parameters :

from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]   [nm/s**2 ]          [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1   350.0315  1.14876  0.00084  0.0320  0.0420
0.981855 0.998631 P1   162.9149  1.14908  0.00192 -0.3946  0.0960
0.998632 1.001369 S1    8.4026  2.50668  0.11812  3.7645  2.7014
1.001370 1.023622 K1  486.9813  1.13639  0.00062  0.1109  0.0311
1.914129 1.950419 M2  359.1336  1.18857  0.00035  2.1362  0.0168
1.984283 2.002736 S2  167.8114  1.19371  0.00074  0.3465  0.0355
2.002737 2.451943 K2   45.7735  1.19783  0.00256  0.7808  0.1227

Standard deviation of weight unit: 13.929 nm/s**2

```

**Tabelle E.28: Analyse der Registrierdaten des Gravimeter A206 (gefilterte Daten)
Auszug, ohne Ansatz einer Luftdruckregression**

9 Der funktionale Zusammenhang zwischen Kammertemperatur und Gravimeterdrift

Es liegt nahe, ähnlich den Untersuchungen hinsichtlich der gravimetrischen Wirkungen von Luftdruckvariationen auch nach einem möglichen funktionalen Zusammenhang zwischen Verlauf der Temperatur in der Messkammer und instrumentellen Reaktionen, also primär den Gravimeterdriften, zu suchen. Alle durchgeführten Regressionsberechnungen führten jedoch zu keinen verwertbaren Ergebnissen. Offensichtlich ist das Reaktionsverhalten der Gravimeter gegenüber Änderungen der Umgebungstemperatur sehr komplex, stark abhängig vom jeweiligen zeitlichen Temperaturgradienten und nur in Grenzen stationär.

Dieser Sachverhalt begründet das Erfordernis einer hinreichenden Stabilisierung der Umgebungstemperatur der Gravimeter, *wenn nicht* die Gravimeterdrift, wie im vorliegenden Fall, metrologisch genutzt werden soll.

10 Der Einfluss der Temperaturreglung auf das gravimetrische Signal

Neben den äußeren Einflüssen können auch direkte durch die Konstruktion des Gravimeters bedingte Effekte die Registrierung beeinflussen. Zu diesen möglichen Störquellen gehört z.B. die interne Temperaturreglung. Bei bipolaren Temperaturregelungen (Heizung *ein* oder *aus*) treten bisweilen Rückwirkungseffekte auf das gravimetrische Ausgangssignal auf. Aus diesem Grunde wurde seinerzeit bei Askania-Gravimetern des Typs GS25 der innere Heizkreis von einer durch einen Quecksilbersensor gesteuerten Intervallschaltung auf eine thermistorgesteuerte kontinuierliche Heizungsregelung umgestellt [ASKANIA 1970].

Es ist daher sinnvoll und notwendig, bei hochaufgelösten Beobachtungen das gravimetrische Signal auf mögliche Thermostateffekte zu überprüfen. Derartige Effekte können im vorliegenden Falle leicht erkannt werden, und zwar mit Hilfe der Ergebnisse der parallel zu den fortlaufenden Registrierungen des Systems GeoObs1 viermal am Tag mit dem Registriersystem GeoObs3 durchgeführten Aufzeichnungen (siehe Abschnitt F2), welche auf ein Abtastintervall von 0,1 Sekunden während der Dauer von 14,3 Minuten (8600 Messdaten) fest eingestellt sind.

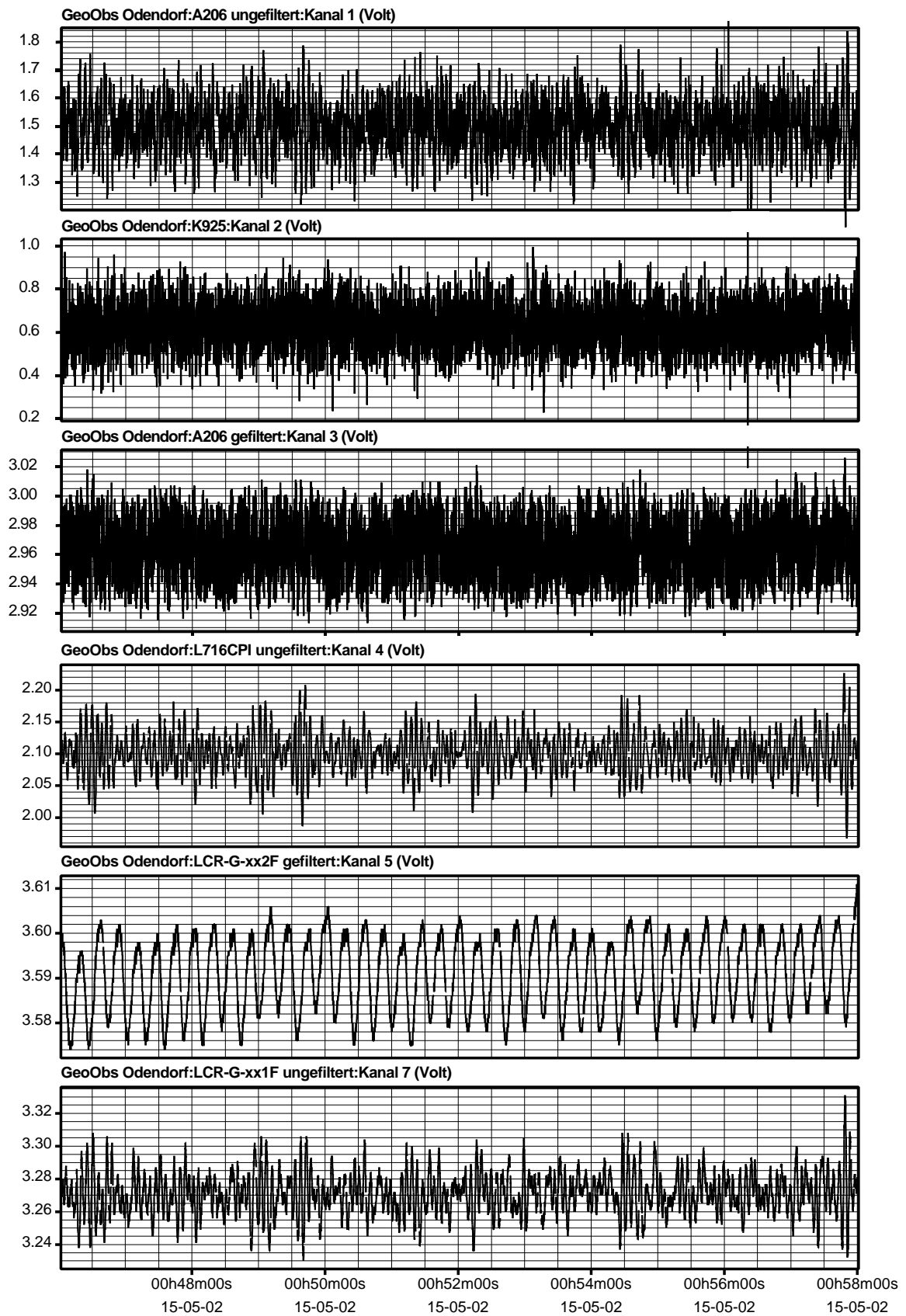


Abbildung E.94: Signalverlauf bei einem Diskretisierungsintervall von 0,1 sec. Registrierzeitraum: 12 Minuten

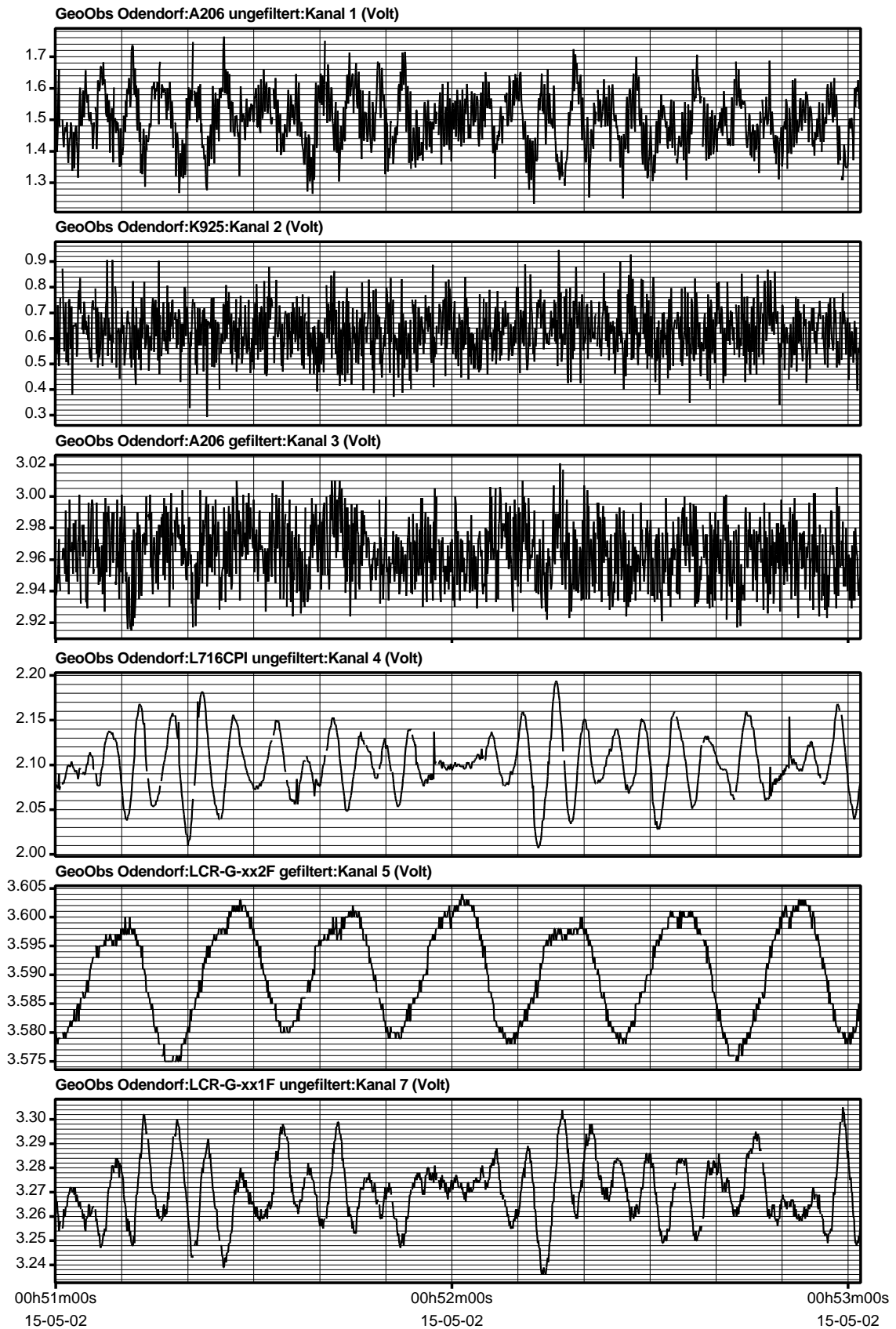


Abbildung E.95: Signalverlauf bei einem Diskretisierungsintervall von 0,1 sec. Registrierzeitraum: 2 Minuten

Die Abbildungen (Abbildung E.94 und Abbildung E.95) zeigen ein repräsentatives Aufzeichnungsbeispiel. Die Kanäle sind wie folgt belegt:

Kanal 1: Gravimeter A206, ungefiltertes Signal

Kanal 2: Piezosensor K925

Kanal 3: Gravimeter A206, gefiltertes Signal

Kanal 4: Gravimeter LCR716 im CPI-Modus

Kanal 5: Gravimeter LCR-G-xx2F, gefilterter Ausgang des SRW-Feedbacksystems

Kanal 7: Gravimeter LCR-G-xx1F, ungefilterter Ausgang des Feedbacksystems LCR-AFB

Bei dem mit einem SRW-Feedbacksystem ausgestatteten Gravimeter ist zu erkennen, dass durch die extreme Filterung praktisch alle Informationen über kurzperiodische mikroseismisch induzierte Störsignale fast vollständig unterdrückt werden sowie weiterhin eine ausgeprägte Signalschwingung mit einer mittleren Periode von 17,3 Sekunden. Das ist exakt die Schaltperiode des bipolaren Thermostaten. Es gibt nach [BONATZ 2004] für den nur bei dem Gravimeter LCR-G-xx2F auftretenden Effekt mehrere Erklärungen:

Zunächst kommen Auswirkungen der Heizung auf den gravimetrischen Sensor in Betracht. Diese sind jedoch im Hinblick auf die relativ kurze Schaltperiode wegen der geringen Schalttemperaturdifferenzen und der thermischen Trägheit von gravimetrischem Sensor und Sensorgehäuse eher unwahrscheinlich. Wahrscheinlicher handelt es sich um einen indirekten Effekt der elektrischen Energieversorgung des Gravimeters:

Mit dem Schalten des Thermostaten ist nämlich in der Heizphase infolge des Innenwiderstands der Pufferbatterie ein geringer Spannungsabfall im Bereich von Zehntelvolt verbunden, der durch das angeschlossene, permanent betriebene Ladegerät (Original-Zubehör) nicht ausgeglichen wird. Spannungsschwankungen wiederum können zu temperaturinduzierten Effekten bei der im Gravimetergehäuse eingebauten Feedbackplatine führen, und zwar infolge von Änderungen der thermischen Verlustleistung am DC-DC-Konverter, der die Eingangsspannung für die Feedback-Elektronik von 12 Volt auf geregelte 30 Volt anhebt. Andererseits sind aber auch unmittelbare Auswirkungen von Änderungen der Eingangsspannung auf den elektronischen Regelkreis denkbar. Der Sachverhalt zeigt, dass es zweifellos besser wäre, wie beim Askania-Gravimeter A206, Signalabgriff (bzw. Feedback) und Heizung mit getrennter Energieversorgung zu versehen, andererseits ist bei der von der Firma LaCoste gewählten Lösung bei Gravimeter LCR-G-xx1F, die wie beim Gravimeter LCR-G-xx2F eine gemeinsame Energieversorgung von Heizung und Feedback aufweist, ein Thermostateffekt nicht zu erkennen.

Für das Gravimeter LCR-G-xx2F kann aber davon ausgegangen werden, dass im Rahmen der Bildung stündlicher Signalmittelwerte Wirkungen der genannte kurzperiodischen Schwingungen weitgehend ausgeschaltet werden.

Aus den vorherigen Abbildungen geht zudem die gute Korrelation der ungefilterten Signale der Gravimeter LCR716 (CPI-Modus, Kanal 4) und LCR-G-xx1F (ungefiltertes Rückkopplungssignal, Kanal 7) bemerkenswert hervor.

11 Die Bestimmung der Übertragungsfunktion

11.1 Begriffsbestimmung

Als Übertragungsfunktion wird die Funktion bezeichnet, welche den Signalverlauf am Eingang eines Signalerfassungs- und Verarbeitungssystems mit dem Signalverlauf an dessen Ausgang miteinander verknüpft. Zu berechnen sind (gegebenenfalls in diskreten Schritten) die frequenzabhängigen Amplitudenverzerrungen und Phasenverschiebungen des Ausgangssignals relativ zum Eingangssignal. Die Kenntnis der Übertragungsfunktion ist eine grundsätzliche Voraussetzung für die Auswertung und Interpretation hochaufgelöster gravimetrischer Beobachtungen.

11.2 Verfahren der Bestimmung der Übertragungsfunktion

Wenn das Eingangssignal („Soll-Signal“) hinreichend genau bekannt ist, führt die Gegenüberstellung von Eingangs- und Ausgangssignal zu den gewünschten Informationen bezüglich der wirksamen Übertragungsfunktion. Ist aber das beobachtete Eingangssignal die metrologische Zielgröße, so kann dieses Signal nur bedingt zur Bestimmung der Übertragungsfunktion verwendet werden. In einem solchen Fall ist es erforderlich, in das System ein hinreichend genau bekanntes künstliches Signal einzugeben.

11.3 Die Eingabe eines Sprungsignals zur Bestimmung der Übertragungsfunktion

Das Programmsystem Eterna enthält einen ETSTEP genannten Programmteil, der es ermöglicht, auf der Grundlage eines erzeugten gravimetrischen Sprungsignals aus dem zugeordneten zeitlichen Verlauf des Ausgangssignals die Übertragungsfunktion zu berechnen. Die Frequenztransfer-Funktion wird mit Hilfe einer Fouriertransformation ermittelt, und zwar für ein linear dynamisches System auf der Grundlage konstanter Parameter. Hinsichtlich der Einzelheiten wird auf [WENZEL 1976b], [RICHTER UND WENZEL 1991] und [WENZEL 1994b] verwiesen. Berechnet werden in diskreten Frequenzschritten die zeitlichen Verzögerungen τ_t („time lag“) des Ausgangssignals gegenüber dem Eingangssignal an der jeweiligen Frequenzstelle sowie die zugeordnete Amplitudenverzerrung eines periodischen Signals („gain“). Aufgrund der Aufgabenstellung werden im folgenden die Signalverzögerungen τ_t ausschließlich für den Frequenzbereich der ganz- und halbtägigen Gezeiten angegeben. Durch Multiplikation mit der Partialtidenfrequenz in $^\circ/\text{sec}$ erhält man den Betrag der Phasenverzögerung.

Zur Berechnung der frequenzabhängigen Zeitverzögerung und Amplitudenveränderung wird auf der Grundlage der diskreten Signalwerte des Sprungantwortverlaufs durch Schätzung ein ausgleichendes Polynom berechnet. Für die Bildung der Polynomkoeffizienten werden Daten innerhalb eines so genannten „collection radius“ um die jeweilige Stützstelle verwendet, wobei im Eterna-Handbuch empfohlen wird, dass dieser collection radius das Zwei- bis Dreifache des Stützstellenintervalls betragen sollte.

11.4 Voraussetzungen für die Nutzung eines Sprungsignals zur Bestimmung der Übertragungsfunktion

Die Theorie der Bestimmung der Übertragungsfunktion mit Hilfe eines Sprungsignals erfordert die Einhaltung der Bedingung, dass in den gebildeten Zeitreihen außer den sprunginduzierten Signalen keine weiteren Signale enthalten sind. Entsprechend dürfen während der Signalaufzeichnungen theoretisch keine Signaländerungen als Folge von Gezeiten und Drift auftreten. Diese Bedingung lässt sich in der Praxis nur genähert einhalten. Allerdings kann der Gezeiteneffekt durch geeignete Wahl des Zeitraums des Sprungexperiments minimiert werden (zeitlicher Schweregradient $\Delta g/\Delta t$ gegen Null), zudem besteht die Möglichkeit der Gezeitenreduktion der Zeitreihen.

11.5 Das Signalrauschen

Im Rahmen praktischer Anwendungen des Programms ETSTEP deutete sich an, dass das Signalrauschen einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der Berechnung der Übertragungsfunktion hat. Dieser Sachverhalt wird mit den beiden folgenden Beispielen verdeutlicht.

Für das im CPI-Modus betriebene Gravimeter LCR716 ergaben sich bei einem Diskretisierungsintervall von 1 sec nach einer Sprungeingabe für die zeitliche Signalverschiebung Δt zwischen Eingangssignal und Ausgangssignale im Bereich der Gezeitenbänder in Abhängigkeit von der Datenlänge die folgenden Werte:

Datenlänge [min]	2	3	4	5	6
Dt [sec]	+5,4	-11,1	+29,9	+5,6	-70,1

Tabelle E.29: Berechnete Signalverzögerungen für LCR716 CPI

Erkennbar liefert das ETSTEP-Verfahren keinerlei brauchbare Ergebnisse, die Anwendung des Verfahrens führt sogar zu berechneten Signalverschiebungen mit negativem Vorzeichen (die Wirkung tritt vor der Ursache auf).

Aus der Gegenüberstellung der Phasen-Ergebnisse von Gezeitenanalysen (siehe Abschnitt F1.9) lässt sich ein Sollwert der Signalverschiebung Δt im Bereich von 90 bis 100 Sekunden ableiten:

$\Delta\alpha_{M_2} = 1,4^\circ$ für LCR716CPI, $\Delta\alpha_{M_2} = 2,2^\circ$ für A206 (gefilterte Daten) und LCR-G-xx1F. Die Differenz beträgt $0,8^\circ$ entsprechend einer zeitlichen Signalverschiebung an der Frequenzstelle M_2 von 96sec.

Die nachfolgende graphische Darstellung des zeitlichen Verlaufs der sekundlichen Werte des Ausgangssignals zeigt einen im Vergleich zur Sprunghöhe relativ hohen Rauschpegel.

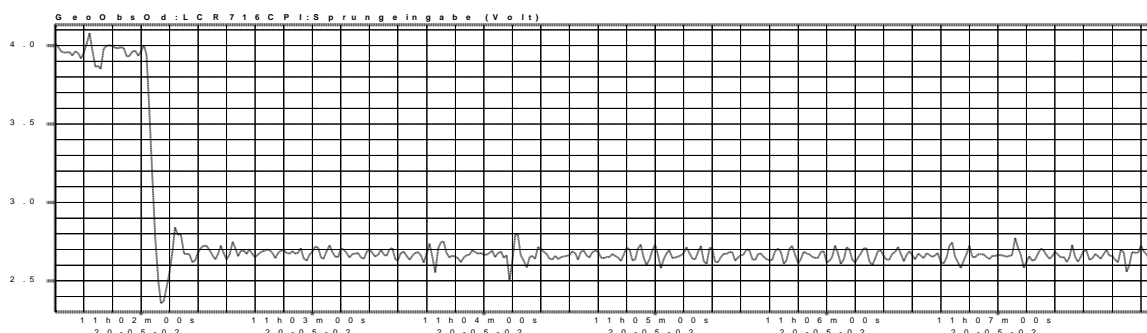


Abbildung E.96: Beispiel für ein Sprungsignal bei Gravimeter LCR716 CPI, Diskretisierungsintervall 1 sec

Alternativ wurde die Sprungantwortfunktion für das Gravimeter LCR-G-xx2F ermittelt, das mit einem SRW-Rückkopplungssystem versehen ist. In diesem Falle ist das Ausgangssignal so stark tiefpassgefiltert, dass am Systemausgang nur noch ein minimales mikroseismisch induziertes Signalausrauschen auftritt.

Die berechneten Signalverzögerungen Δt in Abhängigkeit von der Datenlänge zeigt die nachfolgende Tabelle. Trotz der starken Signalfilterung sind die Ergebnisse weiterhin instabil und unbrauchbar. Zeitverschiebungen mit negativem Vorzeichen treten jedoch nicht mehr auf.

Datenlänge [min]	2	3	4	5	6	7	8
Dt [sec]	15,5	11,9	20,2	10,7	19,8	1,3	23,4

Tabelle E.30: Berechnete Signalverzögerungen (1) für LCR-G-xx2F

Die graphische Darstellung des Signalverlaufs lässt die mögliche Ursache erkennen: dem „glatten“ gravimetrischen Ausgangssignal sind periodische Signalvariationen (Periode etwa 18 Sekunden) überlagert, die durch den Thermostaten des Gravimeters verursacht und gesteuert werden (siehe auch Abschnitt E9).

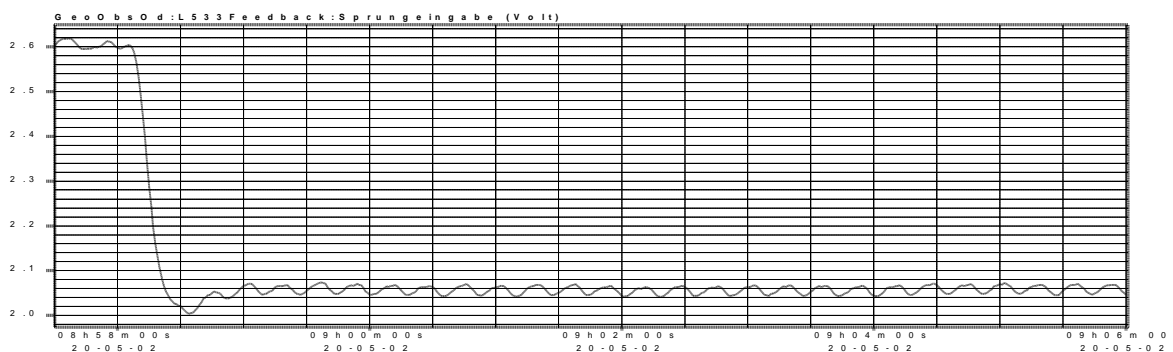


Abbildung E.97: 1. Sprungsignal bei Gravimeter LCR-G-xx2F – Sprunghöhe 0,54 Volt

Vergrößert man nun die Sprunghöhe, um das Verhältnis zwischen dem Nutzsinal und dem periodischen Störsignal zu verbessern (Abbildung E.98), so erhält man zwar eine geringere Streuung der berechneten Signalverschiebungen (Tabelle E.31), jedoch sind die Werte insgesamt zu hoch und zwar mindestens um einen Betrag von 10 sec, wenn man die für das Rückkopplungssystem SRW vorliegenden Erfahrungswerte zugrunde legt [BONATZ 2004]. Offensichtlich können periodische Störsignale nicht nur zu Streuungen der Berechnungsergebnisse Δt_n führen, sondern auch zu systematischen Niveauverschiebungen.

Datenlänge [min]	2	3	4	5	6	7	8
Dt [sec]	27,3	26,1	27,8	24,7	28,0	24,0	28,7

Tabelle E.31: Berechnete Signalverzögerungen (2) für LCR-G-xx2F

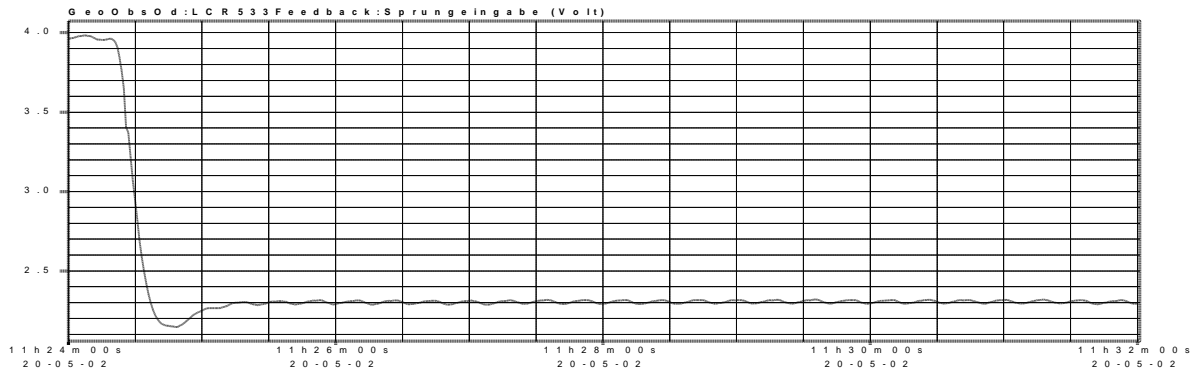


Abbildung E.98: 2. Sprungsignal bei Gravimeter LCR-G-xx2F – Sprunghöhe 1,66 Volt

Die für die Gravimeter LCR716CPI und LCR-G-xx2F ermittelten Ergebnisse machen eine Untersuchung der Leistungsgrenzen des ETSTEP-Verfahrens erforderlich.

11.6 Die Leistungsgrenzen des ETSTEP-Verfahrens

11.6.1 Die Erstellung von Testdatensätzen

Die Untersuchung der Leistungsgrenzen des ETSTEP-Verfahrens wird numerisch-experimentell mit Hilfe eines synthetischen Datensatzes durchgeführt, der für ein RC-Filter mit einer Zeitkonstanten τ von 15,0sec in einem Stützstellenabstand von einer Sekunde berechnet wurde. Für das Spannungssignal U_a am Filterausgang gilt als Funktion des Sprungsignals U_e am Filtereingang (Zeit t in Sekunden ab Sprungeinsatz)

$$U_a = U_e \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (\text{E-3})$$

$$\text{mit } \tau[\text{sec}] = R[\text{M}\Omega] \cdot C[\mu\text{F}], \quad (\text{E-4})$$

wenn R den Längswiderstand und C die Kapazität des Querkondensators des RC-Glieds bezeichnen (siehe auch Abschnitt E1).

Diesem Funktionsverlauf werden abhängig von der Fragestellung synthetische Störsignale überlagert.

11.6.2 Die Berechnung der Signalverzögerung bei ungestörtem Signalverlauf

Zunächst werden für die Untersuchung des Programms ETSTEP unterschiedliche Datensätze erzeugt. Variiert werden hierbei die Sprunghöhe sowie die Länge des Datensatzes (die Zeitkonstante des RC-Glieds beträgt wie gesagt $\tau = 15\text{sec}$). Diese Datensätze wurden anschließend mit ETSTEP zur Berechnung der jeweiligen Signalverzögerung verarbeitet.

Für Frequenzen $< 0,0001\text{Hz}$ (entsprechend einer Signalperiode von $> 2,8\text{h}$) ergeben sich als Signalverzögerung [sec]:

$U_e \setminus$ Datenlänge [sec]	50	100	200	300	400	500	1000
1V	12,832	14,598	14,743	14,743	14,743	14,743	14,743
5V	12,865	14,631	14,755	14,755	14,755	14,755	14,755
10V	12,860	14,625	14,757	14,757	14,757	14,757	14,757

Tabelle E.32: Berechnete Signalverzögerungen Dt [sec] für ungestörte Datenreihen

Ab einer Datenlänge von 200sec ist das Berechnungsergebnis stabil. Der Unterschied zwischen der berechneten Zeitverzögerung Δt und der Zeitkonstanten τ beträgt 1,7%. Der Einfluss der Sprunghöhe liegt im Bereich von lediglich 1%.

Für Signalfrequenzen $< 0,0001\text{Hz}$ beträgt die Amplitudenverzerrung $< 0,05\%$.

11.6.3 Die Berechnung der Verzögerung des Signals nach Zugabe eines Rauschsignals

Dem ungestörten Signalverlauf werden nun Rauschsignale in sechs verschiedenen Varianten überlagert, die durch einen Zufallsgenerator erzeugt wurden. Die Sprunghöhe beträgt 10Volt, der Rauschpegel zunächst $\pm 0,5$ Volt, entsprechend einem Signal-Rauschverhältnis (SR) von 1:5%. Dies ist der ungünstige realistische Fall, der außerhalb von Erdbebenstörungen bei der sekundlichen Registrierung ungefilterter Signale der Askania-Gravimeter A206 und A233 auftreten kann.

Rauschmodell	Datenlänge [sec]		
	100	200	1000
1	16,465	-1,348	76,221
2	17,61	-6,186	-65,701
3	16,028	22,061	26,421
4	9,154	20,566	41,915
5	18,125	26,579	28,295
6	7,831	26,521	57,235
Standardabweichung	4,50625749	14,5822101	49,30285616
Stdabw. des Mittels	1,83967192	5,95316233	20,12780674
Mittelwert	14,202	14,699	27,398

Tabelle E.33: Berechnete Signalverzögerungen Dt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:5%)

Die Streuungen der Berechnungsergebnisse sowie das Auftreten negativer Vorzeichen zeigen, dass die zeitliche Signalverzögerung Δt nach der Überlagerung des synthetischen Signalverlaufs durch die Rauschsignale nicht mehr zuverlässig berechnet werden kann.

Es liegt nahe zu überprüfen, ob sich das Ergebnis durch Vergrößerungen des in vorstehendem Absatz E11.3 genannten „collection radius“ (Ausgangswert hier 2,5sec) verbessern lässt. Wie die nachfolgende Tabelle zeigt, ist dies nicht bzw. nur marginal der Fall. Die Berechnungsergebnisse bleiben weiterhin unbestimmt.

Rauschmodell	Collection Radius			
	2,5	5,0	10,0	20,0
1	76,221	19,173	-1,808	32,431
2	-65,701	-13,736	15,753	-19,148
3	26,421	78,919	65,933	11,843
4	41,915	60,360	37,145	17,147
5	28,295	12,224	15,134	-12,881
6	57,235	81,888	23,761	13,691
Standardabweichung	49,30285616	39,4370931	23,3247651	19,4766428
Stdabw. des Mittels	20,12780674	16,1001259	9,52229549	7,95130615
Mittelwert	27,398	39,805	25,986	7,181

Tabelle E.34: Berechnete Signalverzögerungen Dt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:5%) bei Variation des „collection radius“ – $U_e = 10V$; $t = 15$ sec; Datenlänge: 1000 sec

11.6.4 Der Einfluss der Höhe des Rauschpegels

Die vorstehenden Beispiele zeigen die beiden Grenzfälle der Ergebnisse von Berechnungen mit optimalem Ergebnis und ohne brauchbares Ergebnis. Es wird daher durch sukzessive Veränderungen der Höhe der Rauschpegel versucht, einen Grenzwert für den zulässigen maximalen Rauschpegel zu ermitteln. Die Berechnungsergebnisse sind in den nachfolgenden Tabellen zusammengestellt und zeigen:

- Die Verringerung des Rauschpegels führt erwartungsgemäß zu einer Verringerung der Differenz zwischen dem jeweiligem Berechnungsergebnis und dem Sollwert.
- Kürzere Zeitreihen führen zu besseren Ergebnissen als längere Zeitreihen. Im vorliegenden Falle liegt die günstigste Datenlänge im Bereich von 100 bis 200 Sekunden.

Rauschmodell	Datenlänge [sec]		
	100	200	1000
1	15,003	11,770	27,684
2	15,256	10,789	-0,790
3	14,924	16,306	17,153
4	13,565	15,982	20,463
5	15,390	17,340	17,559
6	13,393	17,178	23,320
Standardabweichung	0,87739404	2,86312629	9,80804155
Stdabw. des Mittels	0,35819462	1,16886641	4,00411619
Mittelwert	14,589	14,894	17,565

Tabelle E.35: Berechnete Signalverzögerungen Dt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:1%)
 $U_e = 10V$; $t = 15$ sec

Rauschmodell	Datenlänge [sec]		
	100	200	1000
1	14,819	13,293	21,187
2	14,942	12,784	7,037
3	14,775	15,552	15,959
4	14,098	15,384	17,531
5	15,007	16,079	16,185
6	14,012	15,975	19,004
Standardabweichung	0,43783075	1,43153411	4,868435467
Stdabw. des Mittels	0,17874366	0,58442135	1,987530457
Mittelwert	14,609	14,845	16,151

Tabelle E.36: Berechnete Signalverzögerungen Dt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:0,5%)
 $U_e = 10V$; $t = 15$ sec

Rauschmodell	Datenlänge [sec]		
	100	200	1000
1	14,664	14,463	16,029
2	14,686	14,359	13,153
3	14,665	14,918	15,040
4	14,517	14,882	15,309
5	14,708	15,025	15,067
6	14,505	14,991	15,636
Standardabweichung	0,08920856	0,28685536	0,9967136
Stdabw. des Mittels	0,03641924	0,11710821	0,40690662
Mittelwert	14,624	14,773	15,039

Tabelle E.37: Berechnete Signalverzögerungen Dt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:0,1%)
 $U_e = 10V$; $t = 15 \text{ sec}$

Rauschmodell	Datenlänge [sec]		
	100	200	1000
1	14,653	14,603	15,373
2	14,655	14,556	14,064
3	14,645	14,822	14,862
4	14,573	14,820	15,037
5	14,666	14,887	14,914
6	14,570	14,891	15,141
Standardabweichung	0,04352011	0,14624557	0,447459831
Stdabw. des Mittels	0,01776701	0,0597045	0,182674711
Mittelwert	14,627	14,763	14,899

Tabelle E.38: Berechnete Signalverzögerungen Dt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:0,05%)
 $U_e = 10V$; $t = 15 \text{ sec}$

Rauschmodell	Datenlänge [sec]		
	100	200	1000
1	14,626	14,730	14,833
2	14,638	14,721	14,592
3	14,629	14,785	14,838
4	14,621	14,779	14,874
5	14,631	14,776	14,756
6	14,618	14,784	14,913
Standardabweichung	0,00719491	0,02898793	0,11486688
Stdabw. des Mittels	0,00293731	0,01183427	0,04689421
Mittelwert	14,627	14,763	14,801

Tabelle E.39: Berechnete Signalverzögerungen Dt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:0,01%)
 $U_e = 10V$; $t = 15 \text{ sec}$

11.6.5 Die erforderliche Genauigkeit der Berechnung der Signalverzögerung

Für die weitere Beurteilung der vorstehenden Berechnungsergebnisse ist es erforderlich abzuschätzen, mit welcher Genauigkeit die Signalverzögerungen für die Bestimmung der Gezeitenparameter überhaupt benötigt werden.

Nun beträgt die Änderung des Phasenwinkels pro Sekunde bei den ganztägigen Partialtiden $15^\circ/3600\text{sec} = 0^\circ,004$, bei den halbtägigen Partialtiden $30^\circ/3600\text{sec} = 0^\circ,008$. Bei einer Modell-Signalverzögerung von 15sec ergeben sich somit systematische Phasenverschiebungen für das gravimetrische Ausgangssignal in den beiden Gezeitenbändern von $0^\circ,063$ bzw. $0^\circ,125$. Im vorliegenden Falle beträgt die Genauigkeit der Zeitbasis der Registrierungen etwa 1sec (siehe Abschnitt B7.5). Daraus ergibt sich eine systembedingte a-priori Phasenunsicherheit der halbtägigen Partialtide von etwa $0^\circ,01$ (ganztägige Partialtiden etwa die Hälfte). Sollen die Auswirkungen eines Fehlers in der Bestimmung der Zeitverzögerung Δt den Betrag von $0^\circ,01$ in den Phasenwerten nicht übersteigen, so darf im vorliegenden Fall die relative Unsicherheit des Δt -Werts den Betrag von etwa 8% nicht übersteigen. Oder anders ausgedrückt: Es reicht aus, diese Signalverzögerungen auf einige Prozent genau zu bestimmen. Im konkreten Fall bedeutet das, dass eine Unsicherheit von $\pm 1,2\text{sec}$ bezogen auf die berechnete Signalverzögerung von etwa 14,7sec keine relevanten Auswirkungen hat. Bei kürzeren Signalverzögerungen werden die zulässigen Toleranzen entsprechend größer, bei längeren entsprechend kleiner.

Auf der Grundlage dieser Überlegungen folgt aus den vorstehenden Berechnungsergebnissen, dass bei einem Sprungsignal von 10Volt und der Beschränkung auf Datenlängen $< 200\text{sec}$ das zulässige Signal-Rauschverhältnis nicht wesentlich größer sein darf als 1:1%, wenn das Verfahren der Bestimmung der Übertragungsfunktion mit Hilfe eines Sprungsignals zu zuverlässigen Ergebnissen führen soll.

11.6.6 Der Einfluss der Sprunghöhe bei unterschiedlichen Rauschpegeln

Es stellt sich nun die Frage, welchen Einfluss die Sprunghöhe bei verrauschten Signalen ausübt. Es wurden daher die Berechnungen des Abschnitts E11.6.4 für eine Sprunghöhe von 1Volt bei unveränderten Rauschpegeln, die somit allerdings ein um den Faktor 10 schlechteres Signal-Rauschverhältnis verursachen, wiederholt.

Rauschmodell	Datenlänge [sec]		
	100	200	1000
1	30,893	-1248,481	420,937
2	32,157	-617,524	-1355,357
3	24,162	59,047	100,158
4	-61,879	52,359	196,602
5	33,613	74,371	104,744
6	646,704	107,201	397,427
Standardabweichung	261,826981	556,93617	667,6412971
Stdabw. des Mittels	106,890417	227,368239	272,5634182
Mittelwert	117,608	-262,171	-22,582

Tabelle E.40: Berechnete Signalverzögerungen Δt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:50%)
 $U_c = 1\text{V}$; $t = 15\text{sec}$

Rauschmodell	Datenlänge [sec]		
	100	200	1000
1	18,234	-20,904	131,416
2	20,164	-30,239	-154,121
3	17,245	28,346	36,999
4	3,282	25,717	66,426
5	21,029	36,024	40,116
6	-0,870	37,681	98,540
Standardabweichung	9,46385861	30,1836226	100,103187
Stdabw. des Mittels	3,8636041	12,3224123	40,8669551
Mittelwert	13,181	12,771	36,563

Tabelle E.41: Berechnete Signalverzögerungen Dt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:10%)
 $U_e = 1V$; $t = 15$ sec

Rauschmodell	Datenlänge [sec]		
	100	200	1000
1	16,420	-1,163	75,699
2	17,632	-6,299	-65,583
3	16,001	22,184	26,338
4	9,102	20,663	41,110
5	18,115	26,682	28,333
6	7,748	26,610	56,813
Standardabweichung	4,536	14,626	49,058
Stdabw. des Mittels	1,852	5,971	20,028
Mittelwert	14,170	14,780	27,118

Tabelle E.42: Berechnete Signalverzögerungen Dt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:5%)
 $U_e = 1V$; $t = 15$ sec

Rauschmodell	Datenlänge [sec]		
	100	200	1000
1	15,041	11,789	27,370
2	15,273	10,785	-1,434
3	14,909	16,314	17,540
4	13,499	16,006	20,231
5	15,348	17,367	17,809
6	13,348	17,090	23,533
Standardabweichung	0,903	2,854	9,999
Stdabw. des Mittels	0,369	1,165	4,082
Mittelwert	14,570	14,892	17,508

Tabelle E.43: Berechnete Signalverzögerungen Dt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:1%)
 $U_e = 1V$; $t = 15$ sec

Rauschmodell	Datenlänge [sec]		
	100	200	1000
1	14,800	13,225	20,903
2	15,020	12,748	7,816
3	14,762	15,400	15,804
4	14,063	15,406	17,567
5	14,941	16,032	16,306
6	13,996	16,077	18,578
Standardabweichung	0,450	1,454	4,474
Stdabw. des Mittels	0,184	0,593	1,827
Mittelwert	14,597	14,815	16,162

Tabelle E.44: Berechnete Signalverzögerungen Dt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:0,5%)
 $U_e = 1V$; $t = 15$ sec

Rauschmodell	Datenlänge [sec]		
	100	200	1000
1	14,712	14,485	15,521
2	14,675	14,376	13,091
3	14,721	15,009	15,547
4	14,544	14,999	15,940
5	14,764	14,934	14,737
6	14,474	15,078	16,290
Standardabweichung	0,122	0,286	1,273
Stdabw. des Mittels	0,050	0,117	0,520
Mittelwert	14,636	14,879	15,121

Tabelle E.45: Berechnete Signalverzögerungen Dt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:0,1%)
 $U_e = 1V$; $t = 15$ sec

Es zeigt sich, dass die Sprunghöhe insoweit relevant ist, als sie das Signal-Rauschverhältnis bestimmt. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen des Abschnitts E11.6.4 ist die notwendige Ergebnissicherheit geknüpft an ein Signal-Rauschverhältnis von 1:1% oder besser. Erforderlich ist wiederum eine Begrenzung der Datenlänge auf höchstens 200sec und die Durchführung von Wiederholungsmessungen. Möglichkeiten der effektiven Ergebnisverbesserung durch Änderungen des „Collection Radius“ von 2,5sec auf andere Werte konnten erneut nicht festgestellt werden.

Somit ergibt sich die *Schlussfolgerung*, dass für die Bestimmung der Übertragungsfunktion nach dem ETSTEP-Verfahren das in das gravimetrische Messsystem einzugebende Sprungsignal mindestens so groß sein sollte, dass ein Signal-Rauschverhältnis von 1:1‰ erreicht wird, bei einer Begrenzung der Datenlänge auf höchstens 200sec.

11.6.7 Der Einfluss einer Signaldrift auf die berechnete Signalverzögerung

Wie in Abschnitt E11.4 bereits erwähnt, erfordert die Theorie des Verfahrens der Bestimmung der Signalverzögerung mit Hilfe eines Sprungsignals die Abwesenheit jeglicher Signalvariationen, die nicht Wirkungen des eingegebenen Rechtecksignals sind. Tatsächlich aber überlagern sich dem Sprungantwort-Signal (neben dem zuvor abgehandelten Signalauschen) die momentane instrumentelle Drift und die natürlichen gravimetrischen Gezeiten, dies – abhängig vom jeweiligen Zeitfenster – in unterschiedlichem Ausmaß.

Zur Untersuchung der Auswirkungen dieses Sachverhalts auf das Ergebnis der Berechnungen der Signalverzögerung werden die synthetischen Datensätze des Abschnitts E11.6.2 um unterschiedliche Beträge „gekippt“, d.h. den synthetischen Daten wird im Zeitbereich eine künstliche lineare Signaldrift überlagert.

Legt man einmal (um zu gravimetrisch realistischen Kippungsbeträgen zu kommen) die im Rahmen der Gezeitenbeobachtungen eingestellten gravimetrischen Registrierempfindlichkeiten von etwa $100\mu\text{Gal}/\text{Volt}$ zugrunde, dann ist einer Schwerevariation von $1\mu\text{Gal}$ eine Signalvariation von etwa 10mV zugeordnet. Entsprechend werden nun den genannten synthetischen Zeitreihen lineare Driften von $\pm 1\mu\text{Gal}/1000\text{s}$, $\pm 2,5\mu\text{Gal}/1000\text{s}$, $\pm 5\mu\text{Gal}/1000\text{s}$, $\pm 10\mu\text{Gal}/1000\text{s}$, $\pm 20\mu\text{Gal}/1000\text{s}$ und $\pm 30\mu\text{Gal}/1000\text{s}$ überlagert.

Berechnete Signalverzögerungen Dt [sec] für t = 15 sec								
U_e	lineare Drift \ Datenlänge [sec]	50	100	200	300	400	500	1000
1V	Ohne	12,832	14,598	14,743	14,743	14,743	14,743	14,743
	+1 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	12,884	14,653	14,939	15,184	15,534	15,987	19,789
	-1 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	12,854	14,563	14,584	14,339	13,987	13,529	9,635
	+2,5 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	12,934	14,707	15,207	15,674	16,683	18,327	27,140
	-2,5 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	12,823	14,508	14,304	13,367	12,800	11,099	1,726
	+5 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	12,914	14,865	15,649	16,857	18,566	20,770	38,904
	-5 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	12,831	14,458	13,852	12,604	10,806	8,452	-12,020
	+10 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	12,900	15,027	16,492	18,861	22,189	26,445	60,700
	-10 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	12,785	14,270	12,940	10,392	6,695	1,811	-41,915
	+20 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	12,964	15,407	18,068	22,582	28,858	36,795	98,360
	-20 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	12,694	13,900	11,156	5,894	-1,893	-12,383	-112,839
	+30 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	13,023	15,745	19,791	26,408	35,450	46,717	130,816
	-30 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	12,640	13,530	9,052	0,698	-11,856	-29,077	-207,663
	5V	Ohne	12,865	14,631	14,755	14,755	14,755	14,755
+1 $\mu\text{Gal}/1000$ sec		12,859	14,638	14,790	14,840	14,910	15,001	15,768
-1 $\mu\text{Gal}/1000$ sec		12,856	14,623	14,723	14,674	14,603	14,512	13,741
+2,5 $\mu\text{Gal}/1000$ sec		12,863	14,642	14,844	14,938	15,142	15,319	17,279
-2,5 $\mu\text{Gal}/1000$ sec		12,852	14,605	14,666	14,480	14,368	14,033	12,203
+5 $\mu\text{Gal}/1000$ sec		12,865	14,673	14,939	15,184	15,533	15,986	19,786
-5 $\mu\text{Gal}/1000$ sec		12,851	14,596	14,580	14,334	13,982	13,524	9,627
+10 $\mu\text{Gal}/1000$ sec		12,880	14,705	15,111	15,599	16,294	17,193	24,701
-10 $\mu\text{Gal}/1000$ sec		12,853	14,565	14,401	13,907	13,200	12,277	4,387
+20 $\mu\text{Gal}/1000$ sec		12,891	14,788	15,440	16,398	17,760	19,522	34,153
-20 $\mu\text{Gal}/1000$ sec		12,836	14,494	14,062	13,074	11,652	9,789	-6,327
+30 $\mu\text{Gal}/1000$ sec		12,902	14,854	15,816	17,261	19,303	21,929	43,456
-30 $\mu\text{Gal}/1000$ sec		12,824	14,422	13,674	12,162	9,984	7,130	-17,788
10V		Ohne	12,860	14,625	14,757	14,757	14,757	14,757
	+1 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	12,863	14,629	14,775	14,800	14,835	14,880	15,264
	-1 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	12,862	14,621	14,741	14,716	14,681	14,636	14,250
	+2,5 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	12,863	14,638	14,801	14,848	14,950	15,117	16,022
	-2,5 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	12,860	14,620	14,713	14,621	14,564	14,397	13,485
	+5 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	12,866	14,643	14,847	14,969	15,144	15,372	17,282
	-5 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	12,860	14,605	14,670	14,547	14,371	14,143	12,206
	+10 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	12,866	14,662	14,935	15,180	15,529	15,981	19,780
	-10 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	12,853	14,587	14,581	14,335	13,983	13,525	9,628
	+20 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	12,873	14,697	15,101	15,584	16,272	17,165	24,654
	-20 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	12,846	14,548	14,412	13,922	13,219	12,300	4,440
	+30 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	12,876	14,732	15,288	16,019	17,056	18,397	29,540
	-30 $\mu\text{Gal}/1000$ sec	12,840	14,512	14,220	13,472	12,402	11,005	-0,988

Tabelle E.46: Berechnete Signalverzögerungen Dt für ungestörte Datenreihen mit variablen linearen Driftüberlagerungen und unterschiedlichen Eingangsspannungen U_e

Die Ergebnisse zeigen erneut das Erfordernis der Begrenzung der Datenlänge auf einen Zeitraum von 100 bis 200 Sekunden (vorzugsweise auf einen Zeitraum im Bereich von etwa $100\text{sec}/2\text{min}$). Es wird ferner erneut deutlich, dass es sinnvoll ist, die Sprunghöhe innerhalb vernünftiger Grenzen möglichst groß zu wählen. Unter

diesen Voraussetzungen können mit Bezug auf Abschnitt E11.6.5 lineare Driften mindestens bis zu $\pm 10 \mu\text{Gal}/1000\text{sec}$ als unkritisch eingestuft werden.

11.6.8 Die Ergebnisverallgemeinerung

Die vorstehenden Ergebnisse und Schlussfolgerungen beziehen sich auf eine RC-Filtercharakteristik mit einer Zeitkonstanten von 15 Sekunden, die für moderne gravimetrische Gezeiten-Messeinrichtungen (Gravimeter plus Filter und Registriersystem) etwa einen oberen Grenzwert darstellt. Bei kürzeren oder geringfügig größeren Zeitkonstanten sind die Schlussfolgerungen hinsichtlich der zulässigen Signal-Rauschverhältnisse und der Datenlängen nur mehr oder weniger geringfügig zu modifizieren. Abschätzungen für Filtercharakteristiken mit steileren Flanken als sie bei RC-Filtern auftreten, führen zu dem Schluss, dass die Grenzwerte in den Abschnitten E11.6.4 und E11.6.6 für die zulässigen Signal-Rauschverhältnisse und Datenlängen beibehalten werden können. Weitere Modelluntersuchungen sind daher erst durch erkannte Bedarfsfälle zu begründen.

11.7 Die Erzeugung der Sprungsignale

Die Eingabe eines Rechtecksignals in den Eingang der Messeinrichtung lässt sich nur dann streng realisieren, wenn ein Gravimeter mit einer Einrichtung zur Eingabe einer elektrostatischen oder elektromagnetischen Hilfskraft versehen ist, welche jedoch meistens nicht vorhanden ist. In diesen Fällen muss ein genähertes Rechtecksignal durch schnelle Verstellung der Messspindel erzeugt werden. Dabei ist aber zu beachten, dass die Berührung des Gravimeters auf ein Minimum reduziert wird (zur Vermeidung zusätzlicher relevanter Signale als Folge der Gravimeterberührung). In diesem Sinne günstige Bedingungen bietet die Verwendung des in den Abschnitten D6.2.5 und D6.4 genannten Spindelaufsatzes.

11.8 Die Eliminierung des Signalrauschens

Bei der Gezeitenbeobachtung werden die gravimetrischen Ausgangssignale häufig so stark gefiltert, dass nur noch ein geringes mikroseismisch induziertes Signalrauschen verbleibt. Dadurch wird jedoch unter anderem das Problem der Ausschaltung eines periodischen thermostatinduzierten Störsignals nicht gelöst (dessen Periode deutlich größer als die mikroseismischen Hauptperioden ist).

Es wird nun untersucht, ob es mit einfachen Mittel möglich ist, in den beiden in Abschnitt E11.5 dargestellten Fällen (Gravimeter LCR-G-xx2F, überlagertes thermostatinduziertes Störsignal) durch geeignete Maßnahmen das Signal-Rauschverhältnis soweit zu verbessern, dass brauchbare Werte für die Signalverschiebung Δt erzielt werden (Abbildung E.97 und Abbildung E.98). Es bieten sich zwei Möglichkeiten an: zum einen die Approximation des Verlaufs des Ausgangssignals durch ein ausgleichendes Polynom für jenen Teil der Zeitreihe, die sich unmittelbar an die Phase der Hauptreaktion auf das eingegebene Sprungsignal anschließt, zum anderen die Tiefpassfilterung oder die Bandpassfilterung im Falle instrumenteller periodischer Störsignale. Die nachfolgenden Untersuchungen werden durchgeführt mit den beiden Datensätzen, welche der Abbildung E.97 und der Abbildung E.98 zugrunde liegen, im folgenden als Datensatz 1 und Datensatz 2 bezeichnet.

11.8.1 Die partielle polynomiale Signalfilterung

Datensatz 1:

Die partielle polynomiale Signalfilterung führt zu dem in der nachfolgenden Abbildung dargestellten Signalverlauf (Sprungeingabe um 08:58:00Uhr)

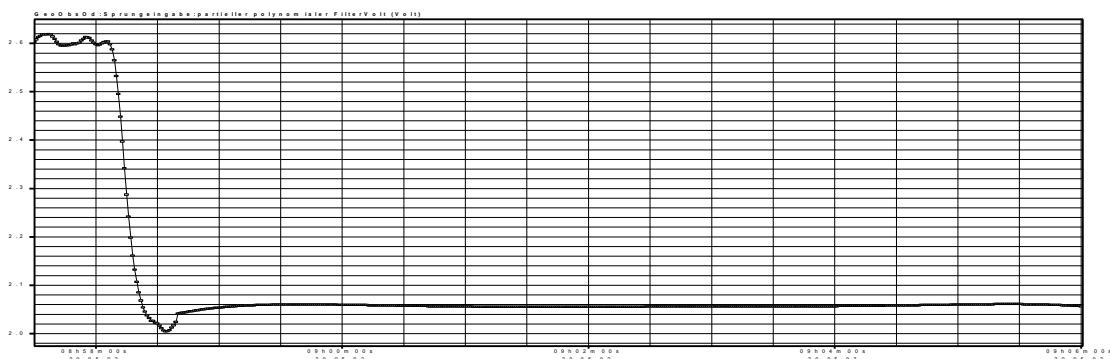


Abbildung E.99: 1. Sprungsignal bei Gravimeter LCR-G-xx2F mit partieller polynomialer Signalfilterung

Die Ergebnisse der Berechnung der Signalverschiebungen Δt entsprechend der in Abschnitt E11.5 gewählten Vorgehensweise sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt. Im Vergleich zu Tabelle E.30, sind die berechneten Werte nun trotz der relativ geringen Sprunghöhe deutlich homogener geworden. Da der Signalsprung aber durch Spindelverstellung erzeugt wurde, könnte die unvermeidbare Abweichung von dem theoretisch geforderten Rechteck-Eingangssignal einen signifikanten Einfluss auf das Niveau der berechneten Signalverschiebungen ausüben. Dieser potentielle Einfluss sollte sich mit größeren Sprunghöhen verringern lassen.

Datenlänge [min]	2	3	4	5	6	7	8
Dt [sec]	12,70	13,56	13,87	13,41	13,41	10,62	14,71

Tabelle E.47: Signalverzögerungen Dt, Datensatz 1 mit partieller Signalfilterung

Datensatz 2:

Die partielle Signalfilterung führt zu dem in der nachfolgenden Abbildung dargestellten Signalverlauf (Sprung-eingabe um 11:24:15Uhr).

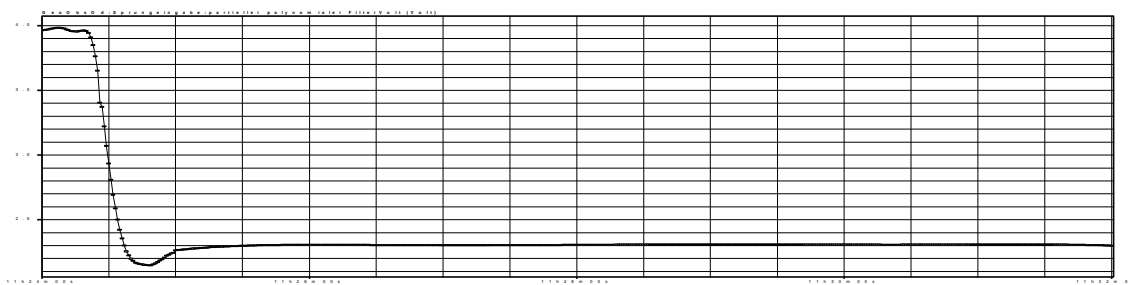


Abbildung E.100: 2. Sprungsignal bei Gravimeter LCR-G-xx2F mit partieller polynomialer Signalfilterung

Die zugeordneten Signalverschiebungen Δt sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt. Bis zu Datenlängen von 7 Minuten sind die berechneten Werte sowohl plausibel als auch nunmehr weitgehend homogen (vgl. Tabelle E.31). Das Ergebnis der Auswertung des längsten Datensatzes fällt etwas aus dem Rahmen, womit sich der zuvor bereits ermittelte Sachverhalt andeutet, dass mit zunehmender Datenlänge die Ergebnisse der Berechnung der Signalverschiebungen unsicherer werden.

Datenlänge [min]	2	3	4	5	6	7	8
Dt [sec]	11,68	11,94	11,65	11,22	11,42	11,17	13,88

Tabelle E.48: Signalverzögerungen Dt, Datensatz 2 mit partieller Signalfilterung

Die dargestellten Ergebnisse erlauben die Aussage, dass das Verfahren der partiellen Signalfilterung mit Hilfe eines ausgleichenden Polynoms eine durchaus sinnvolle Alternative zur numerischen Signalfilterung darstellt.

11.8.2 Die numerische Signalfilterung

Die Schaltperiode des Thermostaten des Gravimeters LCR-G-xx2F und entsprechend die Periode der induzierten Variationen des Ausgangssignals betragen im Zeitraum der Messungen 17,08 Sekunden. Über die verwendeten Datensätze wurde daher ein Glättungsfilter von 17 Sekunden Länge gelegt, sowie für eine Abschätzung des Einflusses eines nicht optimal angepassten Filters ein solcher von 19 Sekunden Länge.

Datensatz 1:

Die Signalglättung mit dem 17-Sekundenfilter führt zu dem in der nachfolgenden Abbildung dargestellten Signalverlauf (Sprungeingabe um 08:58:00Uhr):

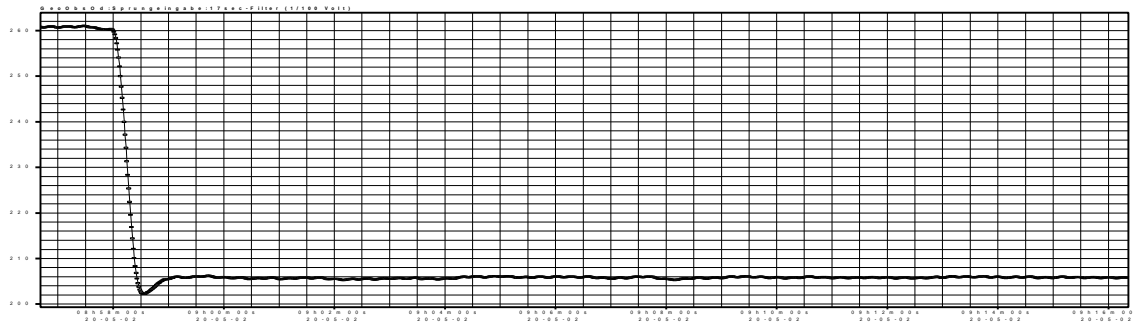


Abbildung E.101: Sprungsignal bei Gravimeter LCR-G-xx2F mit 17sec-Glättungsfilter, Datensatz 1

Zur besseren Veranschaulichung der Filtergüte ist in der folgenden Abbildung E.102 ein Ausschnitt des horizontalen Signalverlaufs nach dem Sprungereignis stark vergrößert dargestellt.

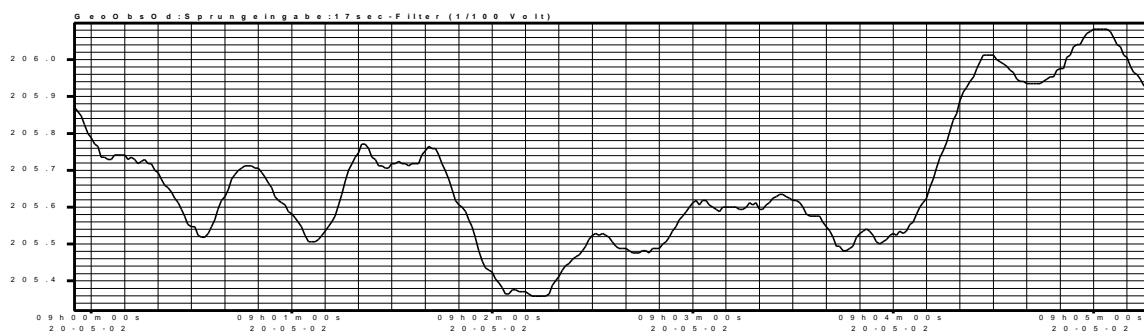


Abbildung E.102: Detailsicht des geglätteten Signals (17sec-Filter), Datensatz 1

Zum Vergleich der Funktionsverlauf nach der Glättung mit dem 19sec-Filter und in der darauf folgenden Grafik ebenfalls eine Detaildarstellung des geglätteten Signalverlaufs:

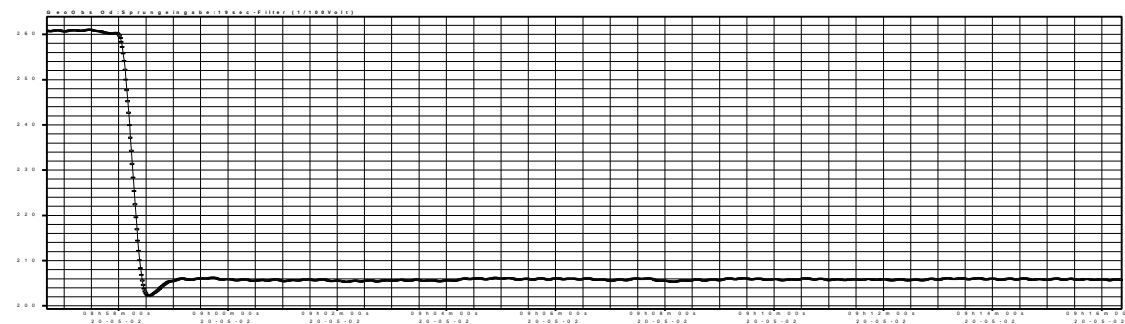


Abbildung E.103: Sprungsignal bei Gravimeter LCR-G-xx2F mit 19sec-Glättungsfilter, Datensatz 1

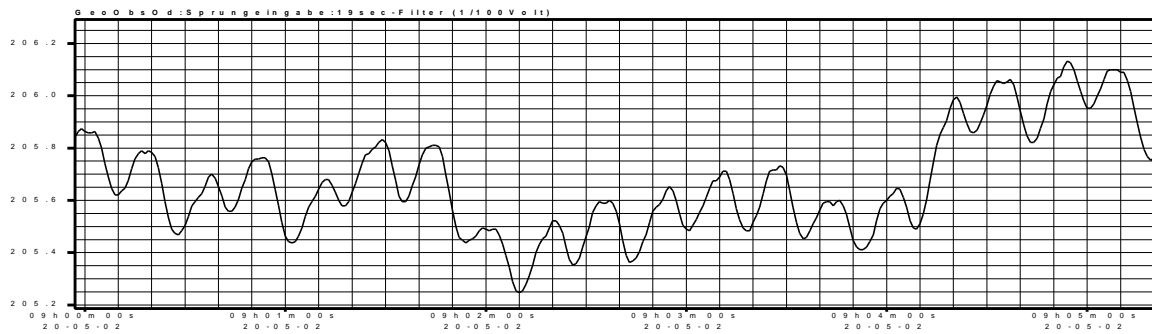


Abbildung E.104: Detailansicht des geglätteten Signals (19sec-Filter), Datensatz 1

Die berechneten Signalverschiebungen Δt sind wiederum für unterschiedliche Datenlängen in den nachfolgenden Tabellen zusammengestellt:

Datenlänge [min]	2	3	4	5	6	7	8	10	18
Dt [sec]	13,04	13,54	14,22	13,26	13,75	10,02	11,15	16,66	13,45

Tabelle E.49: Signalverzögerung bei 17sec-Glättungsfilter, Datensatz 1

Datenlänge [min]	2	3	4	5	6	7	8	10	18
Dt [sec]	12,96	14,01	14,08	13,96	13,46	11,08	10,32	15,78	11,46

Tabelle E.50: Signalverzögerung bei 19sec-Glättungsfilter, Datensatz 1

Bis zu einer Datenlänge von 6 Minuten sind die berechneten Signalverschiebungen innerhalb einer Streubreite von etwa $\pm 4\%$ bezüglich des Mittelwerts homogen. Der Einfluss des nicht optimal angepassten 19sec-Filters beträgt maximal 2%. Damit entsprechen die Ergebnisse hinsichtlich ihrer *statistischen Sicherheit* durchaus den in Abschnitt 6.5 dargelegten Anforderungen.

Die für die Signalglättung gewählte Filterlänge ist in vernünftigen Grenzen unkritisch.

Datensatz 2:

Die Signalglättung mit dem 17-Sekundenfilter führt zu dem in der nachfolgenden Abbildung dargestellten Signalverlauf (Sprungeingabe um 11:24:15Uhr):

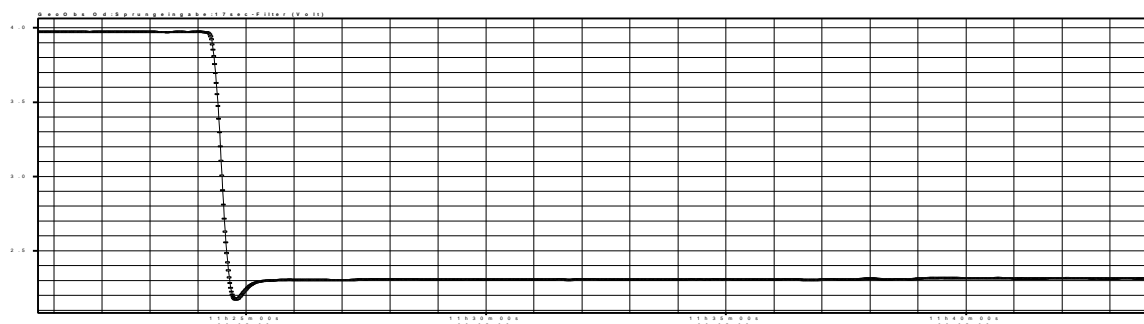


Abbildung E.105: Sprungsignal bei Gravimeter LCR-G-xx2F mit 17sec-Glättungsfilter, Datensatz 2

Die nachfolgende Grafik stellt wieder das gefilterte Signal in einer Ausschnittsvergrößerung der Abbildung E.105 dar.

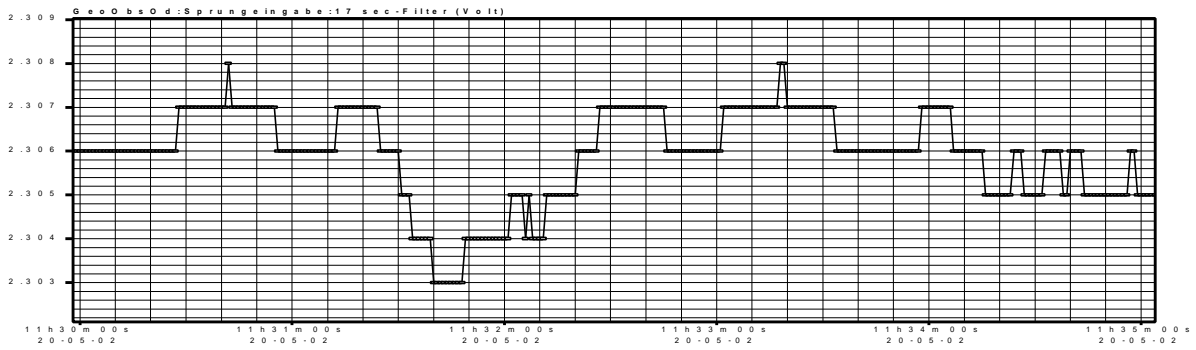


Abbildung E.106: Detailansicht des geglätteten Signals (17sec-Filter), Datensatz 2

Zum Vergleich der Funktionsverlauf nach der Glättung mit dem 19sec-Filter:

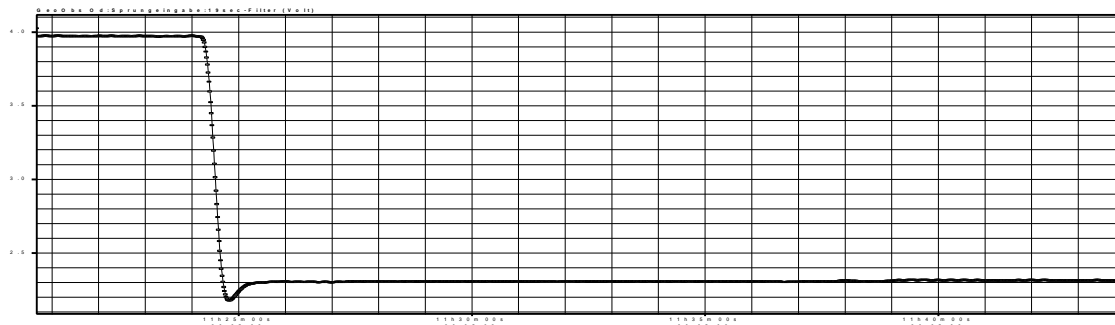


Abbildung E.107: Sprungsignal bei Gravimeter LCR-G-xx2F mit 19sec-Glättungsfilter, Datensatz 2

Auch hier zur genaueren Darstellung eine Ausschnittsvergrößerung des geglätteten Signals.

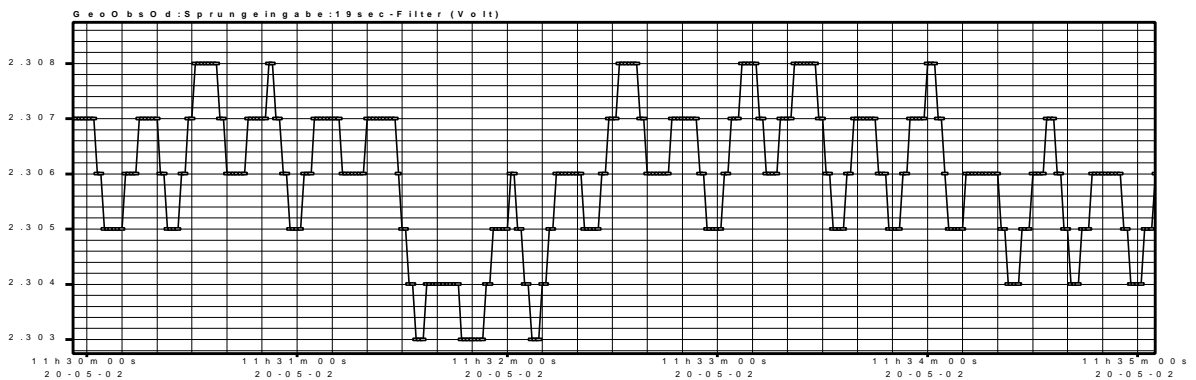


Abbildung E.108: Detailansicht des geglätteten Signals (19sec-Filter), Datensatz 2

Berechnete Signalverzögerungen Δt im Bereich der Gezeitenbänder:

Datenlänge [min]	2	3	4	5	6	7	8	10	18
Dt [sec]	11,89	11,87	11,70	11,23	11,43	11,35	11,69	11,44	7,17

Tabelle E.51: Signalverzögerungen bei 17sec-Glättungsfilter, Datensatz 2

Datenlänge [min]	2	3	4	5	6	7	8	10	18
Dt [sec]	11,87	12,07	11,58	11,52	11,11	11,36	11,38	11,50	6,95

Tabelle E.52: Signalverzögerungen bei 19sec-Glättungsfilter, Datensatz 2

Nach der Signalglättung beträgt der verbleibende Rauschpegel in beiden Fällen $<0,002\text{Volt}$, mit dem Unterschied, dass im Falle des nicht optimal angepassten Filters (19sec-Filter) erwartungsgemäß ein schwaches *periodisches* Rauschsignal auftritt. Bezogen auf die Sprunghöhe von $1,66\text{Volt}$ liegt das Signal-Rauschverhältnis nun im Bereich von $1:1\%$ bis $1:2\%$ und entspricht damit deutlich den in Abschnitt E11.6.5 genannten Anforderungen. Somit wurde gegenüber dem Rauschpegel der Originaldaten (1% der Sprunghöhe) eine Verbesserung etwa um den Faktor 5 bis 10 erzielt. Zum Vergleich: Bei dem Originaldatensatz 1 beträgt der relative Rauschpegel etwa 3%, nach der Signalglättung durch die Filteroperatoren etwa 5%.

Die beiden vorstehenden Tabellen zeigen erneut deutlich, dass der ETSTEP-Algorithmus sehr empfindlich auf Rauschsignale und Rauschstrukturen reagiert. Man wird daher realistischerweise davon auszugehen haben, dass bei auftretenden Signalverzögerungen, die im Bereich von 10 bis 15sec liegen, der messtechnisch „wahre“ Wert bestenfalls auf lediglich einige Zehntelsekunden genau zu bestimmen ist (zur Bewertung siehe Abschnitt E11.6.5).

Stellt man die vorstehenden Berechnungsergebnisse jenen Ergebnissen gegenüber, die zuvor nach dem Verfahren der partiellen Signalfilterung mit Hilfe eines ausgleichenden Polynoms gewonnen wurden, so sind signifikante Unterschiede praktisch nicht zu erkennen. Unterschiede bestehen allerdings hinsichtlich der Datenstrukturen, die nach der Glättung auftreten. Im Falle der optimalen Bandpassfilterung bleiben zeitliche Signalvariationen außerhalb des Sperrbereichs weitgehend erhalten, im Falle des Ansatzes eines Polynoms werden diese durch die Ausgleichung weitgehend unterdrückt.

11.9 Der Einfluss eines Zeitfehlers des Sprungeinsatzes

Es bereitet gewisse praktische Schwierigkeiten, bei Sprüngen, die durch schnelle Spindelverstellungen erzeugt werden, den genauen Zeitpunkt des Sprungeinsatzes zu bestimmen. Es wird daher untersucht, welchen Einfluss ein Zeitfehler auf das Ergebnis der Berechnung der Signalverzögerung Δt ausübt, bzw. mit welcher Genauigkeit dieser Zeitpunkt bekannt sein muss, um einen relevanten zusätzlichen Fehlereinfluss ausschließen zu können; zugrunde gelegt werden die in Abbildung E.101 (Datensatz 1) und Abbildung E.105 (Datensatz 2) dargestellten Datensätze.

Festlegung: Ist der tatsächliche Sprungeinsatz real *zeitverzögert* gegenüber der Zeitangabe, so wird ein solcher Zeitfehler mit einem positiven Vorzeichen bezeichnet.

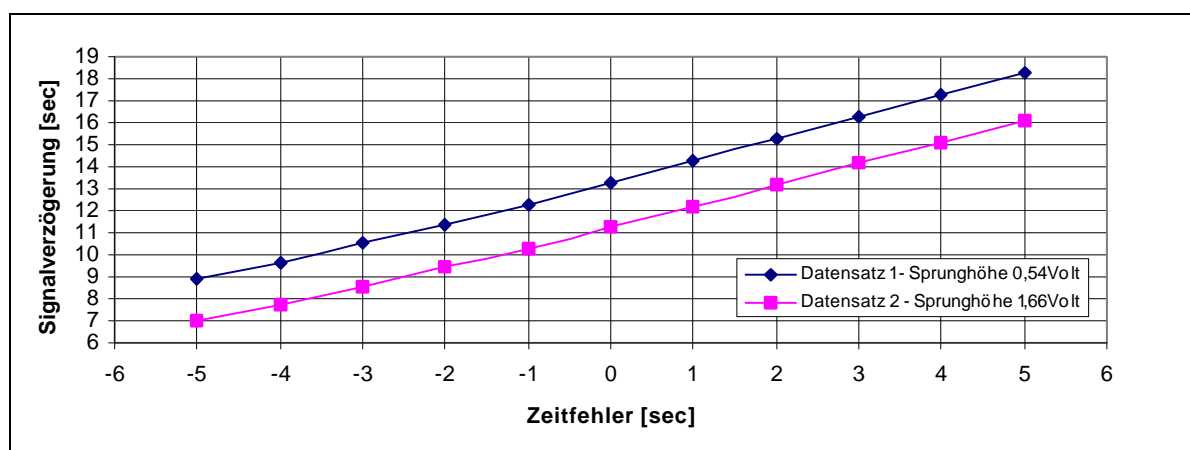


Abbildung E.109: Zeitfehlereinfluss bei unterschiedlichen Sprunghöhen - Datenreihenlänge: 5min

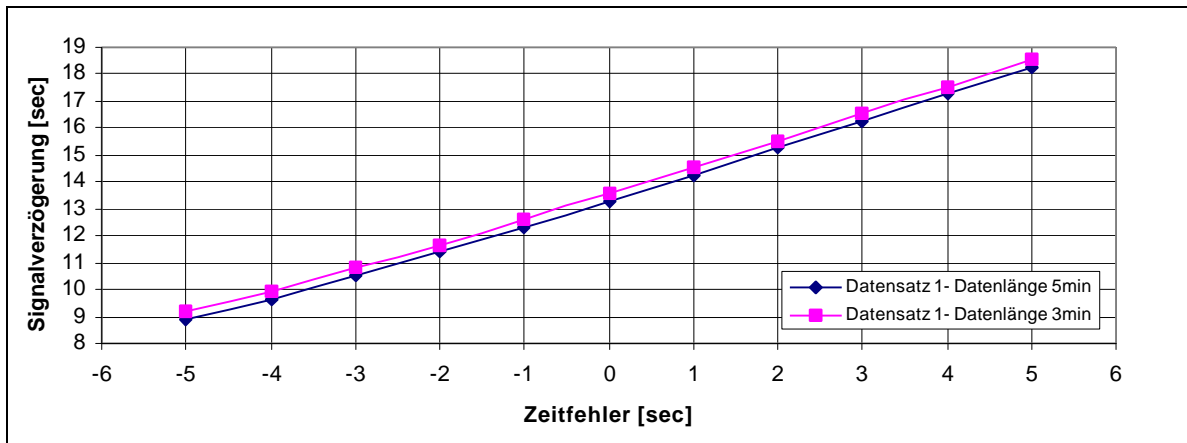


Abbildung E.110: Sprungsignal-Zeitfehlereinfluss bei unterschiedlichen Datenlängen - Sprunghöhe: 0,54Volt

Wie die vorstehenden Abbildungen zeigen, beträgt der Einfluss eines Zeitfehlers auf das Ergebnis der Berechnung der Signalverzögerung Δt im Mittel etwa 0,9 Sekunden pro Sekunde Zeitfehler. Dies bedeutet, dass der Sprungeinsatz auf ein bis zwei Zehntelsekunden genau bekannt sein muss, wenn die durch das Signalrauschen im günstigsten Fall auf wenige Zehntelsekunden prinzipiell begrenzte Bestimmungssicherheit der Signalverzögerung Δt nicht zusätzlich relevant verschlechtert werden soll. Der Einfluss eines Zeitfehlers auf das Ergebnis einer Δt -Berechnung ist weitgehend unabhängig von der Sprunghöhe und von der Datenlänge. Findet die reale Sprungeingabe später als zum angegebenen Zeitpunkt statt, so führt dies zu einer Vergrößerung der berechneten Signalverschiebung.

Der dargelegte Sachverhalt könnte eine Erklärung liefern für die festgestellte Niveaudifferenz zwischen den aus dem Datensatz 1 und dem Datensatz 2 ermittelten Signalverzögerungen Δt .

Es ist insbesondere darauf zu achten, dass die Zeitangabe für den Sprungeinsatz in der Systemzeit der Registrieranlage erfolgt und nicht in DCF-Zeit (im vorliegenden Falle beträgt der Nachlauf der Systemzeit gegenüber der DCF-Zeit etwa eine Sekunde, siehe Abschnitt B7.5 Datenerfassungssystem bzw. Abschnitt D4.1).

11.10 Ergebnisse der Untersuchung zur Bestimmung instrumenteller Signalverzögerungen

Die instrumentellen Signalverzögerungen können wirkungsvoll durch die beschriebenen Verfahren bestimmt und somit zur Berechnung der korrigierten Phasen der Partialtiden herangezogen werden. Dabei sind jedoch unterschiedliche Randbedingungen zu beachten:

Die Berechnungsergebnisse der Verzögerungen durch das Programm ETSTEP werden stark durch das Vorhandensein von Rauschsignalen beeinträchtigt. Somit muss gewährleistet werden, dass das Verhältnis von Rauschpegel und Sprunghöhe den Wert von 1% nicht überschreitet, um das geforderte Genauigkeitsmaß nicht zu verletzen. Die Datenlänge sollte auf etwa 200sec begrenzt sein. Weiterhin ist sicherzustellen, dass während der Durchführung eines Sprungexperiments keine weiteren relevanten Kräfte auf das Gravimeter wirken, eine Forderung, welche sich jedoch nur zum Teil erfüllen lässt. Zur Erzeugung des Sprungsignals ist bei Abwesenheit einer entsprechenden Vorrichtung am Instrument ebenfalls dafür Sorge zu tragen, dass bei der Generierung eines genäherten Rechtecksignals durch eine schnelle Spindelverstellung keine weiteren Kräfte durch den Beobachter auf das Instrument übertragen werden.

Als Ergebnis bei den in Abschnitt E11.8 untersuchten Verfahren zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses bleibt festzuhalten, dass die unterschiedlichen Methoden als gleichgültig zu bewerten sind, wobei eventuell das Verfahren der Filterung vorzuziehen ist, um über weiterhin im gefilterten Signal enthaltene Reststrukturen Hinweise auf Strukturen des Ursprungssignals zu bewahren.

Abschließend sei angeführt, dass auch der Bestimmung des Zeitpunkts der Sprungerzeugung eine große Bedeutung zukommt, da sich Zeitfehler mit dem Faktor 0,9 additiv auf das Ergebnis der Bestimmung der instrumentellen Signalverzögerungen auswirken.

F Exemplarische Untersuchungen der Eigenschaften astasierter gravimetrischer Messsysteme

1 Das Gravimeter LCR716

Bis zum Ende des Jahres 2001 wurde das Instrument im Rahmen geodynamischer Aufgabenstellungen in unregelmäßigen zeitlichen Abständen als Feldgravimeter eingesetzt, so dass die Registrierungen im GeoObservatorium von Zeit zu Zeit unterbrochen werden mussten. In dieser Zeit wurden die im GeoObservatorium Odendorf gewonnenen Registrierdaten primär für Untersuchungen der Strukturen der lokalen Mikroseismik verwendet (siehe Abschnitt F2), d.h. das Gravimeter diente hauptsächlich als Seismometer.

Das Gravimeter LCR716 ist ausgerüstet mit dem SRW-Rückkopplungssystem ([SCHNÜLL, RÖDER UND WENZEL 1984] und [RÖDER, SCHNÜLL UND WENZEL 1988]), das jedoch bei den genannten Feldmessungen unter anderem zur Vermeidung bestimmter systemtypischer Einlaufeffekte nicht genutzt wurde, d.h. das Gravimeter wurde im CPI-Modus betrieben („mechanische Rückkopplung“ durch Spindelverstellung). Gleichermäßen wurden auch die Gezeitenregistrierungen im GeoObservatorium ausschließlich im CPI-Modus (CPI - Capacitive Position Indicator) durchgeführt, und zwar hier hauptsächlich wegen zwischenzeitlich festgestellter Signalstörungen bei eingeschalteter elektrostatischer Rückkopplung.

1.1 Allgemeines zu Registrierungen im CPI-Modus

Wesentlicher Nachteil der Registrierungen nach der Ausschlagmethode (CPI-Modus) sind bekanntermaßen relevante Änderungen der Registrierempfindlichkeit, die besonders im Falle hoher Astasierungen bereits bei kleinen Neigungsänderungen signifikant auftreten. So kann eine hinreichende Stabilität oder mindestens eine gewisse Stetigkeit im zeitlichen Verlauf der Registrierempfindlichkeit nur dann gewährleistet werden, wenn eine hinreichende Positionierungsstabilität des Gravimeters während eines Registrierzeitraums gewährleistet wird, und wenn diese Position nicht durch irgendwelche Eingriffe verändert wird (z.B. Erfordernis der Vermeidung von Nachstellungen der Horizontierung). Nachteilig sind im CPI-Modus ferner Phasenverzögerungen in den Registriersignalen infolge mechanischer Federhysterese, die als Folge der Längenänderungen der Gravimeterfeder auftreten sowie starke Einlaufeffekte des Gravimetersignals nach sprunghaften Messwertänderungen.

1.2 Einlaufeffekte nach sprunghaften Änderungen der Position des gravimetrischen Sensors

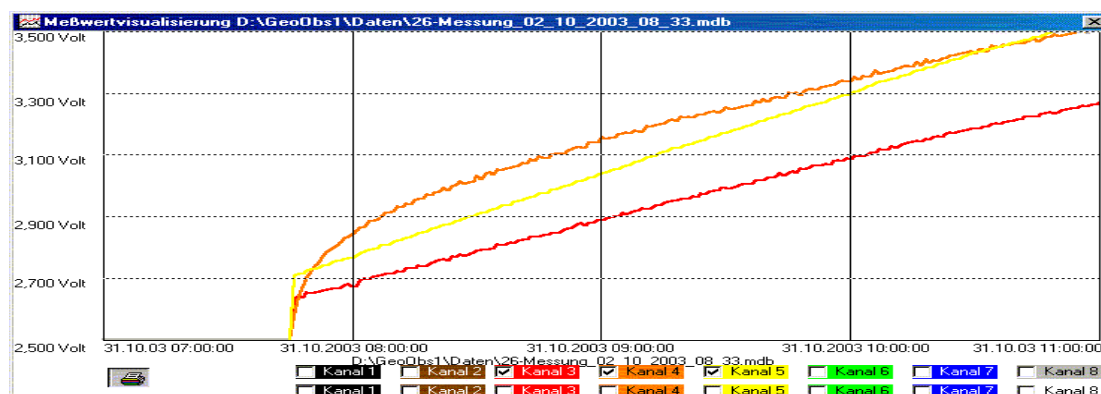


Abbildung F.1:

Kanal 4: Gravimeter LCR716CPI, ca. $160\mu\text{Gal/Volt}$
 Kanal 5: Gravimeter Askania GS25 Nr. 233, ca. $92\mu\text{Gal/Volt}$
 Kanal 3: Gravimeter Askania GS15 Nr. 206, ca. $124\mu\text{Gal/Volt}$

Derartige Einlaufeffekte treten nach jedem Lösen der Arretierung des Messsystems sowie nach sprunghaften Verstellungen der Messspindel auf. Besonders deutlich zu erkennen sind diese elastischen Nachwirkungsvorgänge, wenn der gravimetrische Sensor von einem der beiden mechanischen Anschläge gelöst wird, an dem er bei Auftreten größerer Beschleunigungen durch Erdbebenwellen häufig haften bleibt (ein wesentlicher konstruktiver Nachteil bei LaCoste-Federgravimetern). Die Abbildung F.1 zeigt den Signalverlauf (minütliche

Signalmittelwerte) nach dem Lösen des Sensors im Vergleich mit dem ungestörten Signalverlauf zweier Askania-Gravimeter.

Abbildung F.1 lässt zudem einen messtechnischen Nachteil des verwendeten A/D-Wandlertyps erkennen: Bei starken Übersteuerungen in einem Kanal (hier Kanal 4) treten auch Übersteuerungen in anderen Kanälen auf, obwohl dort die Eingangssignale innerhalb des Messbereichs liegen. Dieser schwerwiegende Nachteil wurde später durch Einsatz eines verbesserten A/D-Wandlers beseitigt (Abschnitt I2).

Elastische Nachwirkungen nach Sensorkleben treten übrigens auch bei eingeschalteter Rückkopplung auf, wie der Vergleich des Signalverlaufs eines rückgekoppelten LCR-Gravimeters im Vergleich mit dem ungestörten Signalverlauf eines Askania-Gravimeters zeigt:

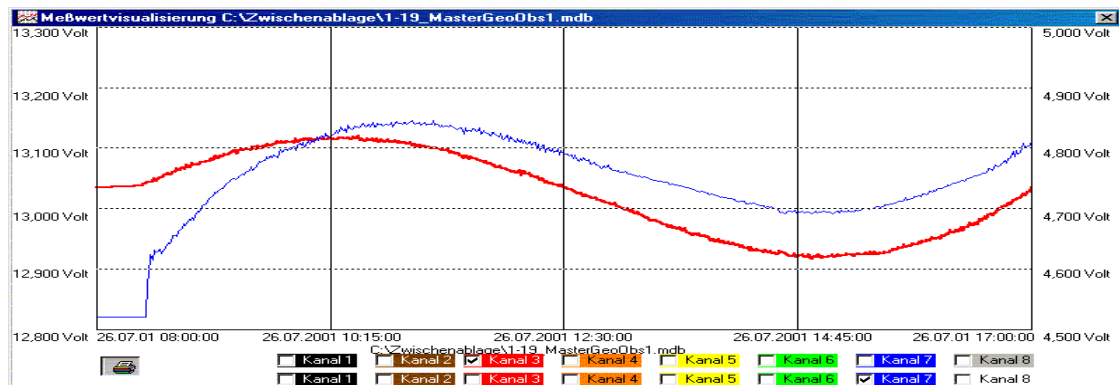


Abbildung F.2: Kanal 7: Gravimeter LCR-G-xx1F, ca. $105\mu\text{Gal/Volt}$
Kanal 3: Gravimeter Askania GS15 Nr. 206, ca. $124\mu\text{Gal/Volt}$

In ungünstigen Fällen kann der Einlaufprozess, wie in Abbildung F.2 erkennbar ist, mehrere Stunden dauern.

1.3 Besondere Eigenschaft des Gravimeters LCR716

Das Gravimeter LCR716 wurde vor etwa 15 Jahren beschafft und ist seit längerem nicht mehr druckdicht.

Der instrumentelle Luftdruckeffekt lässt sich über den Vergleich kurzzeitiger lokaler Luftdruckänderungen erkennen und ermitteln, die bei der Passage einer meteorologischen Front signifikant mit den zugeordneten gravimetrischen Signaländerungen korrelieren.

Die zu beobachtenden Vorgänge werden exemplarisch dargestellt (Abbildung F.3 bis Abbildung F.8). Die linke Ordinate ist dem jeweiligen Gravimetersignal (minütliche Mittelwerte) zugeordnet, die rechte Ordinate dem Luftdrucksignal (Kanal 6, minütliche Mittelwerte, Umrechnungsfaktor einheitlich 10mbar/Volt).

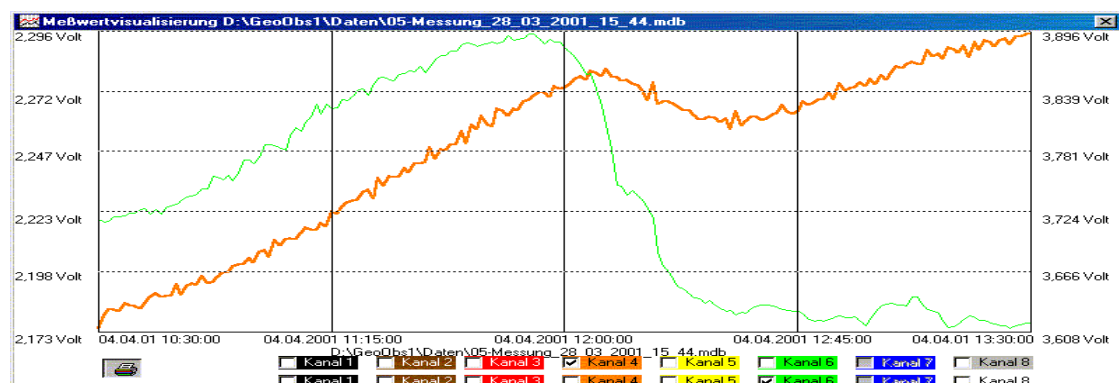


Abbildung F.3: Gegenüberstellung von Luftdruck und Gravimetersignal LCR716CPI (ca. $156\mu\text{Gal/Volt}$)
Instrumenteller Luftdruckeffekt ca. $3,07\mu\text{Gal/mbar}$

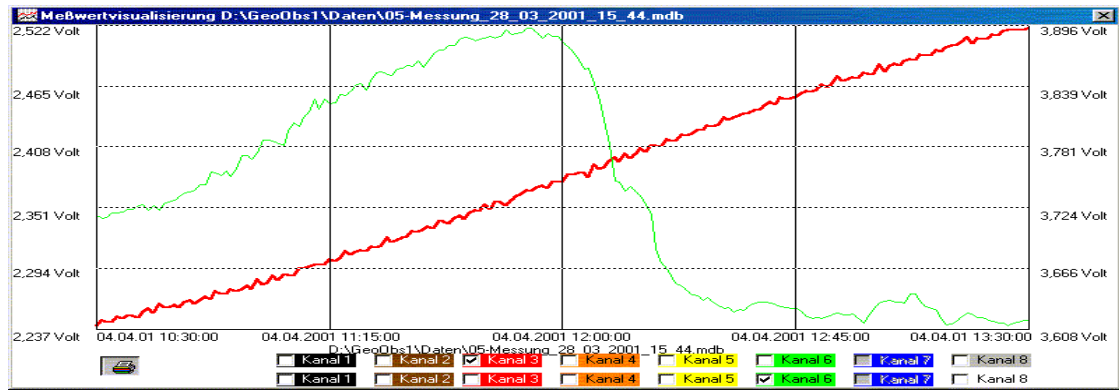


Abbildung F.4: Gegenüberstellung von Luftdruck und Gravimetersignal A206 (ca. 124 μ Gal/Volt)
Kein erkennbarer instrumenteller Luftdruckeffekt: Gravimeter druckdicht

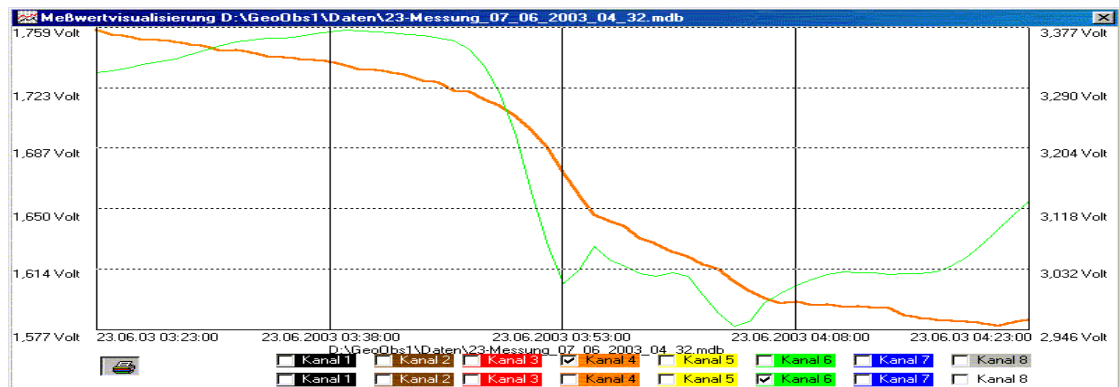


Abbildung F.5: Gegenüberstellung von Luftdruck und Gravimetersignal LCR716CPI (ca. 160 μ Gal/Volt)
Instrumenteller Luftdruckeffekt ca. 3,07 μ Gal/mbar

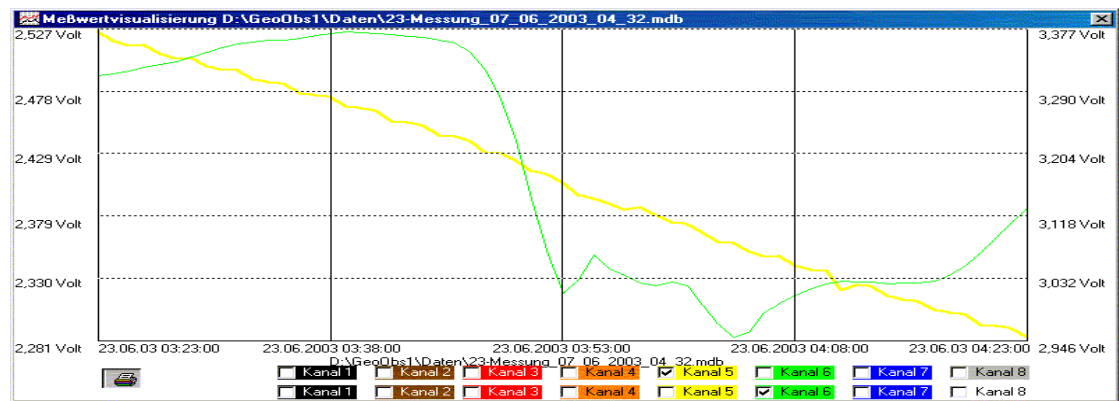


Abbildung F.6: Gegenüberstellung von Luftdruck und Gravimetersignal A233 (ca. 92 μ Gal/Volt)
Kein erkennbarer instrumenteller Luftdruckeffekt: Gravimeter druckdicht

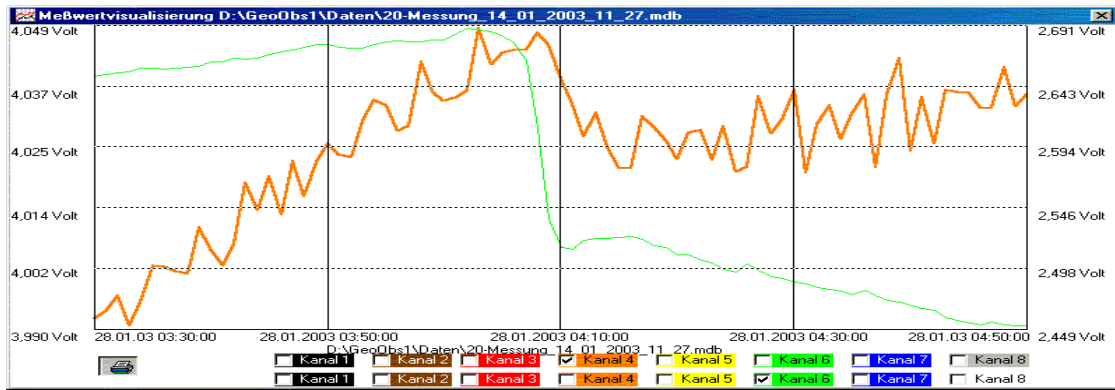


Abbildung F.7: Gegenüberstellung von Luftdruck und Gravimetersignal LCR716CPI (ca. 160 μ Gal/Volt)
Hohe gravimetrische Signallaufösung, sichtbarer Messbereich ca. 9 μ Gal

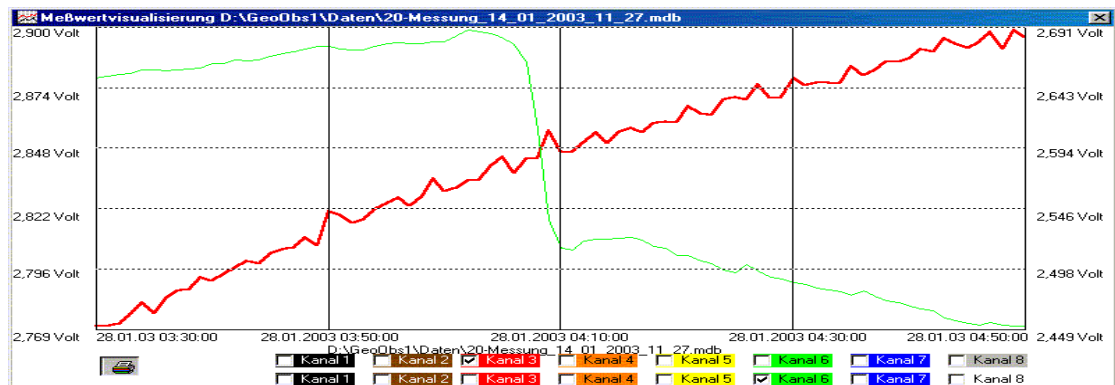


Abbildung F.8: Gegenüberstellung von Luftdruck und Gravimetersignal A206 (ca. 124 μ Gal/Volt)
Hohe gravimetrische Signallaufösung, sichtbarer Messbereich ca. 16 μ Gal
Kein erkennbarer instrumenteller Luftdruckeffekt: Gravimeter druckdicht

Die Auswertung von etwa 40 meteorologischen Frontpassagen mit hinreichend großer lokaler Luftdruckvariation ergab für den instrumentellen Luftdruckeffekt des Gravimeter LCR716 einen mittleren Wert von etwa 3,05 μ Gal/mbar mit einer statistischen Unsicherheit von etwa 2%.

Die erreichbare Signifikanz der individuellen Regressionskoeffizienten hängt nicht unerheblich vom jeweiligen Gezeitenverlauf ab (gravimetrische Signaländerung pro Zeiteinheit), ferner vom momentanen gravimetrischen Rauschpegel, der auch wesentlich gesteuert wird von der jeweiligen regionalen Wetterlage (siehe Abschnitt H2). Der zeitliche Nachlauf der instrumentellen Wirkungen der lokalen Luftdruckvariationen kann bei starken zeitlichen Luftdruckgradienten bis zu etwa 2 Minuten betragen.

1.4 Die Gravimetereichung

Der Skalenfaktor der Messspindel wurde auf der Eichbasis GeoObservatorium Odendorf/Satellitenstation Todenfeld bestimmt.

Die Schweredifferenz zwischen den beiden Absolutpunkten beträgt

$$\Delta g = -48,560 \text{ mGal (im Juni 1997 mit FG5-101 bestimmt durch das IfaG)}$$

$$\Delta g = -48,561 \text{ mGal (im April/Mai 2002 mit FG5-101 bestimmt durch das BKG).}$$

Ergebnisse der Absolutschwerebestimmungen:

$$\text{Odendorf} \quad 1997 \Rightarrow g = 981\,084\,380 \text{ } \mu\text{Gal (Fußbodenoberfläche)}$$

$$2002 \Rightarrow g = 981\,084\,380 \text{ } \mu\text{Gal}$$

$$\text{Todenfeld} \quad 1997 \Rightarrow g = 981\,035\,820 \text{ } \mu\text{Gal (Pfeileroberfläche)}$$

$$2002 \Rightarrow g = 981\,035\,819 \text{ } \mu\text{Gal}$$

Ermittelter Skalenfaktor $k_{mL} = 0,99309 \pm 0,00007 \text{ } [\mu\text{Gal}/10^{-1}\text{Sk}]$.

Dieser Skalenfaktor *enthält* den Einfluss der *instrumentellen* Luftdruckabhängigkeit der Messwertanzeige, d.h. es ist der Skalenfaktor, der für gravimetrische Messwerte gilt, die NICHT um den instrumentellen (der Differenz der Beobachtungshöhen genähert proportionalen) Luftdruckeffekt reduziert sind. Die Höhendifferenz zwischen den beiden Absolutstationen beträgt 230m, die zugeordnete mittlere Luftdruckdifferenz 26,7mbar, entsprechend beträgt der instrumentelle Luftdruckeffekt umgerechnet 80 μ Gal oder 1,6%. Gäbe es zwischen den beiden Beobachtungsstationen keine Luftdruckdifferenz, so hätte man entsprechend den kleineren Wert

$$k_{oL} = 0,99147 [\mu\text{Gal}/10^{-1}\text{Skt}]$$

erhalten, da einer Luftdruckabnahme eine Vergrößerung der Messwertanzeige des Gravimeters LCR716 zugeordnet ist. k_{oL} ist der Wert, der bei der Maßstabsbestimmung von Signalregistrierungen mit Hilfe von Spindelverstellungen im stationären Betrieb zu verwenden ist. Während der Maßstabsbestimmung auftretende instrumentelle Luftdruckeffekte können hier als instrumentelle Driften behandelt werden (Maßstabsbestimmungen während starker lokaler Luftdruckvariationen sind allerdings zu vermeiden).

1.5 Der Einfluss der Thermostatensteuerung auf das Gravimetersignal

Die Schaltperiode des bipolaren Thermostaten liegt bei den Temperaturbedingungen in der Messkammer (Jahresmittel etwa 15°C) im Bereich von 17 bis 18 Sekunden (Heizung an: 2,5sec), dies entspricht einer Frequenz von etwa 0,055Hz. Mit Bezug auf Abschnitt E10 können Thermostateinflüsse auf das Ausgangssignal des Gravimeters nicht a-priori ausgeschlossen werden. Die während eines Zeitraums von jeweils etwa 14,3 Minuten mit einer Abtastrate von 0,1 Sekunden (8600 Messdaten) regelmäßig durchgeführten Registrierungen des Gravimetersignals wurden daher auf Periodizitäten im genannten Bereich der Schaltfrequenz des Thermostaten untersucht.

Anders als bei dem in Abschnitt E10 genannten Gravimeter LCR-G-xx2 (Abbildung E.97 und Abbildung E.98) mit eingeschaltetem SRW-Feedbacksystem sind bei Gravimeter LCR716CPI bei ausgeschaltetem Rückkopplungssystem gleicher Bauart in der zeitlich hochaufgelösten Signalregistrierung Thermostateffekte nicht zu erkennen. Wie das nachfolgende Amplitudenspektrum exemplarisch zeigt, tritt jedoch an der Stelle der Thermostatenfrequenz ein schwacher Peak auf, der durch Induktionseffekte beim Ein- und Ausschalten des Thermostaten hervorgerufen sein könnte [BONATZ 2004].

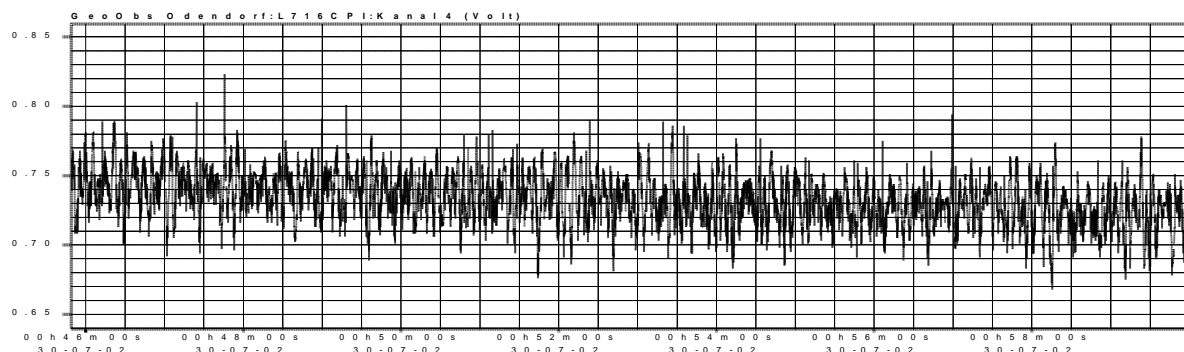


Abbildung F.9: Gravimeter LCR716CPI, Signalverlauf bei Stützstellenabstand 0,1 sec

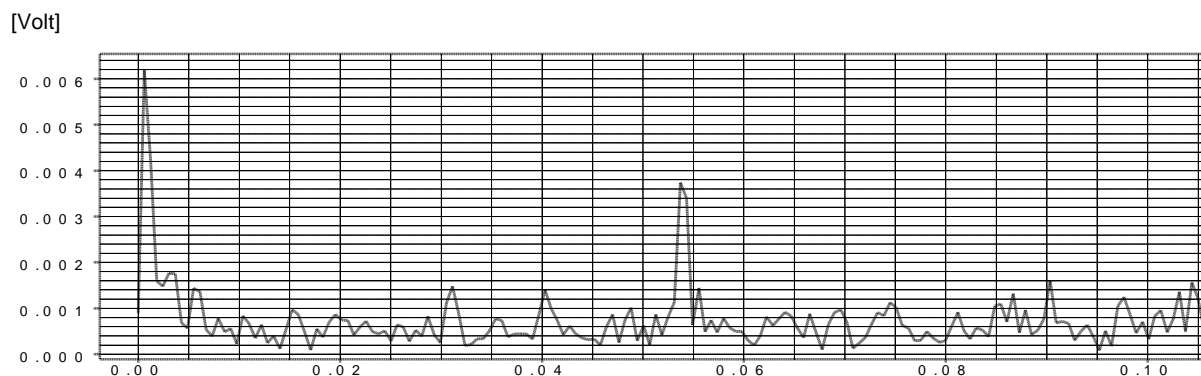


Abbildung F.10: Zugeordnetes Amplitudenspektrum

1.6 Technische Maßnahmen zur Gezeitenregistrierung im CPI-Modus

Ab Januar des Jahres 2002 wurde das Gravimeter LCR716 ausschließlich für Langzeitregistrierungen im CPI-Modus (Ausschlagmethode) eingesetzt. Die Einrichtung des Gravimeters auf einer Messplattform (Abbildung F.11), welche auch bei Feldmessungen verwendet wird, wurde beibehalten. Hinzugefügt wurde eine Feinlibelle (Abbildung F.12) mit einem Skalenwert von 3“, die parallel zum Hebelarm des gravimetrischen Sensors montiert ist. Diese Maßnahme dient der verbesserten Überwachung der Gravimeterhorizontierung in jener Neigungskomponente, die Einfluss auf die Gravimeterastastierung ausübt und damit auf Änderungen des Registriermaßstabs. Neigungsprozesse sind mit einer Auflösung von etwa 0,5“ erkennbar.

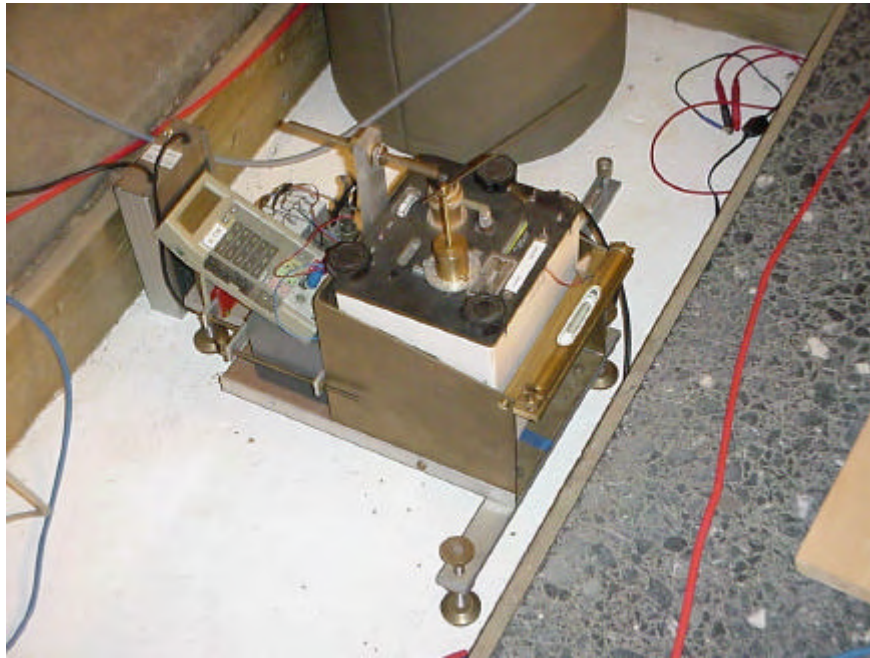


Abbildung F.11: LCR-Gravimeter auf Messplattform

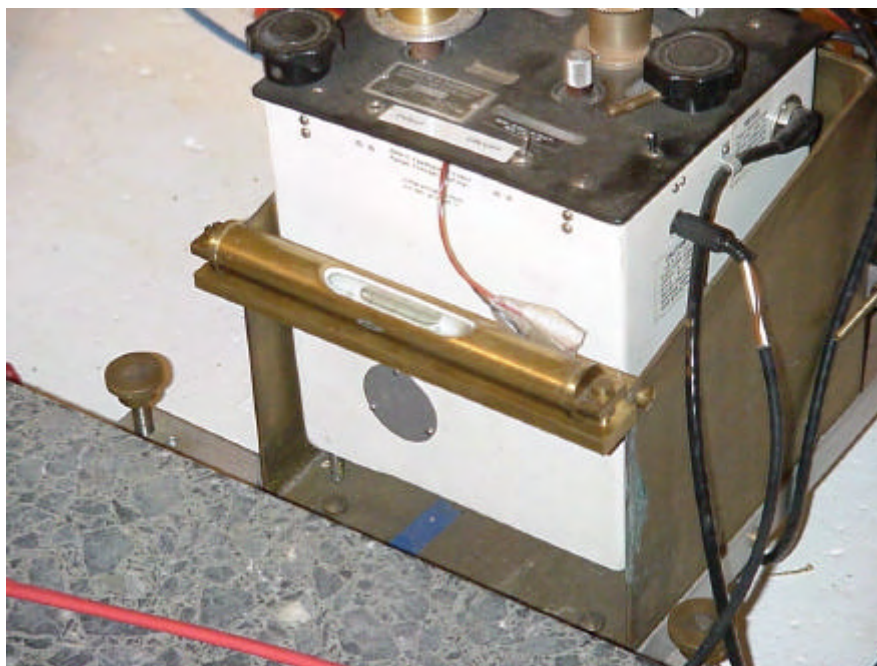


Abbildung F.12: Feinlibelle zur Horizontierungskontrolle in Gravimeter-Längsrichtung

1.7 Das Konstruktionsprinzip des LaCoste-Romberg-Gravimeters

Das LaCoste-Romberg-Gravimeter basiert auf dem Galitzin-Seismometer-Prinzip [GRAF 1967]. Die durch Drehen der Messspindel einzustellende mechanische Null-Stellung des gravimetrischen Sensors wurde ursprünglich mit Hilfe eines eingebauten Mikroskops beobachtet. Später wurde zur Beobachtungsvereinfachung ein elektronischer Positionsanzeiger hinzugefügt, der auf dem Prinzip einer kapazitiven Brücke basiert. Die Mittelplatte des Doppelkondensators ist an der „Gravimetermasse“ montiert, die beiden äußeren Platten sind fest mit dem Gravimetergehäuse verbunden (CPI - Capacitive Position Indicator). Die jeweilige Position der mittleren Kondensatorplatte relativ zu den beiden äußeren Platten wird in ein analoges Gleichspannungssignal umgewandelt, welches durch ein eingebautes Galvanometer angezeigt wird und optional die Registrierung von Lageänderungen der „Gravimetermasse“ im stationären Betrieb ermöglicht (Gezeitenregistrierung im CPI-Modus). Diese Zusatzeinrichtung kann auch dazu verwendet werden, die beiden äußeren Kondensatorplatten mit elektrostatisch wirkenden Hilfsspannungen so anzusteuern, dass die mittlere Kondensatorplatte in Null-Lage gehalten wird: elektrostatisches Rückkopplungssystem (Feedback).

Das Gravimeterprinzip ist in der nachfolgenden Abbildung F.13 graphisch dargestellt.

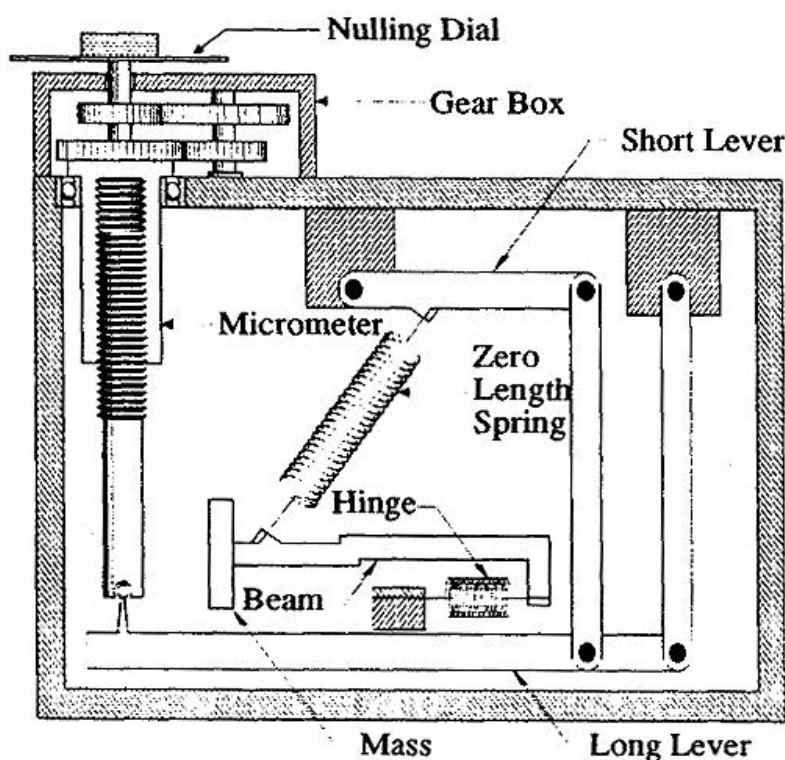


Abbildung F.13: Schema des LaCoste-Romberg-Gravimeters [LaCoste&Romberg, Instruction Manual 1992]

1.8 Die zeitlichen Änderungen der Registrierempfindlichkeit

Wohl hauptsächlich als Folge meist geringfügiger zeitlicher Änderungen der effektiven Instrumentenhorizontierung treten bei gravimetrischen Registrierungen mit astasierten Gravimetern im CPI-Modus üblicherweise signifikante zeitliche Änderungen des Registriermaßstabs auf. Neigungsänderungen bewirken Änderungen des Winkels zwischen der Vertikalen und der Verbindungslinie von Drehachse des Gravimeterhebels und oberem Einspannpunkt der Gravimeterfeder (vgl. vorstehende Abbildung F.13). Neben anderen Sensorparametern beeinflusst dieser Winkel die Astasierung und damit den Wert *Winkeländerung des Gravimeterhebels pro Schwereänderung*.

Die genannten zeitlichen Änderungen der effektiven Gravimeterhorizontierung können hervorgerufen werden durch mechanische Ausgleichs- und Stabilisierungsvorgänge im Gravimeter (z.B. infolge von Alterung), durch Auswirkungen von Änderungen der Umgebungstemperatur (die unter anderem Änderungen der Differenz zwischen Gravimeter-Innentemperatur und der Umgebungstemperatur bewirkt) und/oder durch bodenmechanisch induzierte inklinometrische Instabilitäten des Untergrunds [BONATZ 2004].

Als Folge von Temperaturvariationen in der Messkammer (siehe Abschnitt D5) entstehen auch beim Gravimeter LCR716 temperaturinduzierte Signaldriften, die in Abständen entsprechende Driftkorrekturen durch sprunghafte Spindelverstellungen erfordern. An den Sprungstellen wurde jeweils durch Gegenüberstellung des Betrags der Spindelverstellung mit der zugeordneten Änderung des Registriersignals der momentane Registriermaßstab berechnet. Für den einjährigen Registrierzeitraum ist der zeitliche Verlauf der auf die genannte Weise ermittelten 25 individuellen Maßstabswerte in der nachfolgenden Abbildung F.14 nachgewiesen. Hinsichtlich der Nutzung der temperaturinduzierten Drift für Bestimmungen des Registriermaßstabs siehe auch Abschnitt D2.

Der maximale Unterschied des Betrags der ermittelten Maßstabswerte beträgt etwa $12\mu\text{Gal/Volt}$ oder bezogen auf den Maßstabsmittelwert etwa $\pm 3,6\%$. Die messtechnische Bestimmungssicherheit der individuellen Maßstabswerte, abgeleitet aus der Reproduzierbarkeit von Spindelverstellungen (um den Betrag von umgerechnet $>200\mu\text{Gal}$) und der Reproduzierbarkeit der zugeordneten Differenzen der Registriersignale liegt im Bereich von $0,5\%$. Hinzu kommen jedoch Unsicherheiten dadurch, dass zwar Sprünge nach Möglichkeit nur im Bereich minimaler gravimetrischer Gezeitengradienten ausgeführt wurden, dass aber das Zusammenfallen mit Zeiträumen minimaler Luftdruckvariationen häufig nicht erreicht werden konnte (vgl. vorstehenden Abschnitt F1.3). Des weiteren verbleiben restliche Unsicherheiten hinsichtlich des sprunghöhenabhängigen Abklingens der in Abschnitt F1.2 beschriebenen Einlaufeffekte. Alle Spindelverstellungen wurden durchgeführt mit Hilfe des bereits bei Gravimeter LCR-G-xx1F verwendeten Hebelaufsatzes für die Messspindel, siehe vorstehende Abbildung F.11 sowie Abbildung D.27 im Abschnitt D6.4.

Die Gegenüberstellung des zeitlichen Verlaufs des ermittelten Registriermaßstabs mit dem zeitlichen Verlauf der Kammertemperatur (Abbildung F.15) zeigt eine deutliche Korrelation. Auf diesen Sachverhalt wird in Abschnitt F1.10 näher eingegangen.

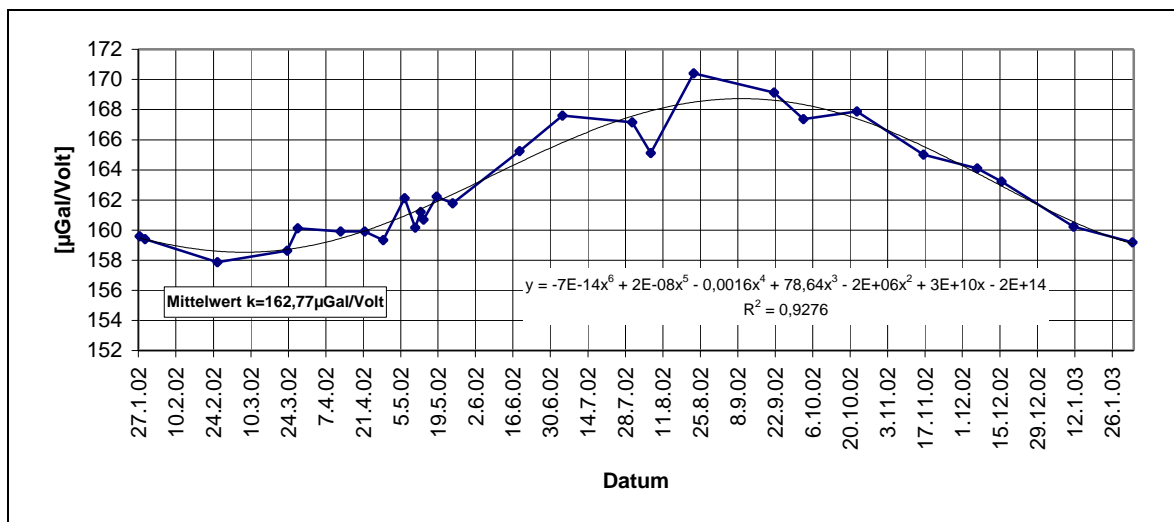


Abbildung F.14: Die zeitlichen Änderungen der Registrierempfindlichkeit während des Zeitraumes Januar 2002 bis Januar 2003 bei Gravimeter LCR716CPI

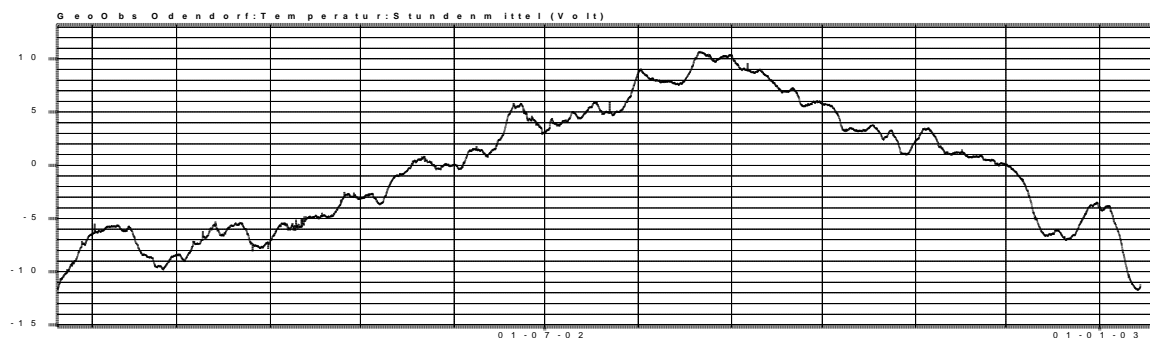


Abbildung F.15: Der Verlauf der Temperatur in der Messkammer während des Zeitraumes Januar 2002 bis Januar 2003

Eine Signaldifferenz von 1 Volt entspricht einer Temperaturdifferenz in der Messkammer von etwa $0,25^\circ\text{C}$.

1.9 Analysen der Registrierdaten

1.9.1 Zielsetzung

Die Schwereregistrierungen mit dem Gravimeter LCR716CPI werden signifikant beeinflusst durch *instrumentelle* Luftdruckeffekte (etwa $3\mu\text{Gal}/\text{mbar}$) sowie durch zeitliche Änderungen des Registriermaßstabs (im Jahreszeitraum etwa $\pm 3,6\%$ bezogen auf den Maßstabsmittelwert). Als Folge der Messungen im Ausschlag-/CPI-Modus werden elastische Hysterese-Eigenschaften der Messfeder wirksam, ferner treten ausgeprägte Einlaufvorgänge nach sprunghaften Verstellungen der Messspindel auf.

Es soll untersucht werden, welchen Einfluss die genannten instrumentellen Eigenschaften auf die Ergebnisse von Gezeitenanalysen ausüben und bis zu welchem Grad diese Effekte eliminiert werden können.

1.9.2 Der Beobachtungszeitraum

Der Beobachtungszeitraum besteht aus den in Tabelle F.1 dargestellten acht Beobachtungsblöcken. Die Gesamtzahl der registrierten Tage beträgt 332,96.

Anfang Beobachtungsblock	Ende Beobachtungsblock
27. Januar 2002 00:00 Uhr	10. Februar 2002 13:00 Uhr
11. Februar 2002 13:00 Uhr	26. März 2002 00:00 Uhr
31. März 2002 20:00 Uhr	15. Juni 2002 09:00 Uhr
18. Juni 2002 11:00 Uhr	03. Juli 2002 13:00 Uhr
04. Juli 2002 12:00 Uhr	24. August 2002 12:00 Uhr
31. August 2002 20:00 Uhr	22. Oktober 2002 13:00 Uhr
23. Oktober 2002 16:00 Uhr	03. November 2002 22:00 Uhr
04. November 2002 10:00 Uhr	14. Januar 2003 11:00 Uhr

Tabelle F.1: Beobachtungsböcke LCR716CPI

1.9.3 Die Analyseergebnisse

1.9.3.1 Die Analyse der stündlichen LCR716-Rohdaten (Analyse1)

Programmsystem Eterna 3.30, L716cp13, adjusted tidal parameters:							
LaCoste GRAVIMETER LCR716CPI				Scale 162,77 $\mu\text{Gal}/\text{Volt}$			
from	to	wave	ampl.	ampl.fac.	stdv.	ph. lead	stdv.
[cpd]	[cpd]	[nm/s**2]				[deg]	[deg]
0.911391	0.947991	O1	353.0297	1.15860	0.00382	-1.0616	0.1888
0.981855	0.998631	P1	164.7888	1.16230	0.00872	-0.4739	0.4300
0.998632	1.001369	S1	8.5819	2.56021	0.52236	-22.0980	11.6749
1.001370	1.023622	K1	487.6697	1.13800	0.00276	-0.4134	0.1389
1.914129	1.950419	M2	358.8800	1.18773	0.00157	1.3156	0.0759
1.984283	2.002736	S2	171.0738	1.21692	0.00334	2.9859	0.1575
2.002737	2.451943	K2	44.8124	1.17268	0.01131	1.0826	0.5524
2.451944	3.381378	M3	4.0281	1.06923	0.06747	-2.2143	3.6167
Standard deviation of weight unit:					42.686nm/s ² (4,27 μGal)		

Tabelle F.2: Analyseergebnis 1(Auszug)

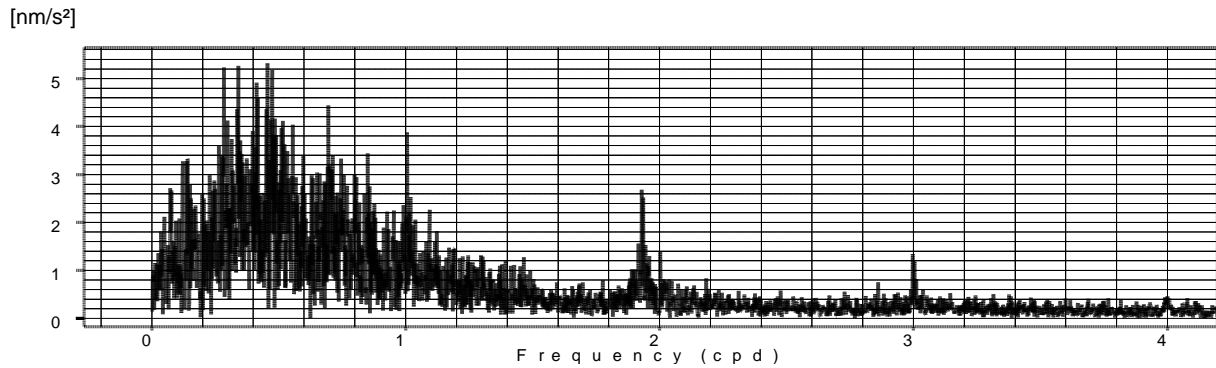


Abbildung F.16: Amplitudenspektrum der Residuen - Analyse 1

Als zu erwartende Folge der nicht berücksichtigten zeitlichen Variationen des Registriermaßstabs treten im Gezeitenbereich von 1, 2 und 3cpd ausgeprägte Peaks auf.

1.9.3.2 Die Analyse der stündlichen LCR716-Registrierdaten nach Korrektur des instrumentellen Luftdruckeffektes (Analyse 2)

Da der örtliche Luftdruck sich häufig sehr kurzzeitig ändert, wurden in Anbetracht der Größe des ermittelten instrumentellen Regressionskoeffizienten von $3,0\mu\text{Gal}/\text{mbar}$ (siehe vorstehenden Abschnitt F1.3) die *minütlichen* LCR716-Registrierdaten luftdruckkorrigiert. Da sich die relativen zeitlichen Variationen des Registriermaßstabs und die relative Unsicherheit des Regressionskoeffizienten (jeweils einige Prozent) nicht wesentlich unterscheiden, erfolgte die Korrektur in der Maßeinheit der Registrierung $[\text{Volt}/\mu\text{Gal}]$. Bei einem mittleren Registriermaßstab von $162,77\mu\text{Gal}/\text{Volt}$ ergibt sich dann der Regressionskoeffizient $3,0\mu\text{Gal}/\text{mbar}$ zu $0,01843\text{Volt}/\text{mbar}$. Bei nachfolgenden begrenzten Änderungen des Registriermaßstabs ist somit der Vorgang der Luftdruckkorrektur nicht wiederholt notwendig.

```

Programmsystem Eterna 3.30, L716cp19, adjusted tidal parameters :
LaCoste GRAVIMETER LCR716CPI          Scale 162,77µGal/Volt
Luftdruckkorrektur der minütlichen LCR716-Registrierdaten 0,01843Volt/mbar
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]    [cpd]    [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]
0.911391 0.947991 O1   352.6446  1.15734  0.00249  -0.9903  0.1234
0.981855 0.998631 P1   165.4491  1.16696  0.00569  -0.7797  0.2796
0.998632 1.001369 S1    11.6730  3.48239  0.34101  12.8288  5.6049
1.001370 1.023622 K1   489.3628  1.14195  0.00180  -0.5508  0.0904
1.914129 1.950419 M2   358.6500  1.18697  0.00112  1.4569  0.0542
1.984283 2.002736 S2   165.8746  1.17994  0.00239  0.0942  0.1160
2.002737 2.451943 K2    44.4233  1.16250  0.00807  -0.5555  0.3980
2.451944 3.381378 M3     4.0967  1.08744  0.03299  -1.1657  1.7385

Standard deviation of weight unit:    23.956 nm/s**2

```

Tabelle F.3: Analysenergebnis 2 (Auszug)

Die Standardabweichung der Modellanpassung hat sich durch die Beseitigung der minütlichen Wirkungen der Luftdruckvariationen, die im Bereich kurzzeitig ablaufender Vorgänge als kurzzeitige, durch den verwendeten Pertzev-Filter nicht zu eliminierende Drifteffekte interpretiert werden können, um den Faktor 0,56 verringert.

Die berechneten Gezeitenparameter haben sich nur geringfügig und nicht signifikant geändert. Ausnahme bildet die Partialtide S_2 , bei der sich der Amplitudenquotient von 1,217 auf 1,180 und die Phasenverschiebung von $2^\circ,99$ auf $0^\circ,09$ signifikant verändert haben. Hier handelt sich offensichtlich um die Beseitigung eines instrumentellen Effekts, der von der halbtäglichen ($30^\circ/\text{h}$) Luftdruckwelle herrührt (siehe Abschnitt E7).

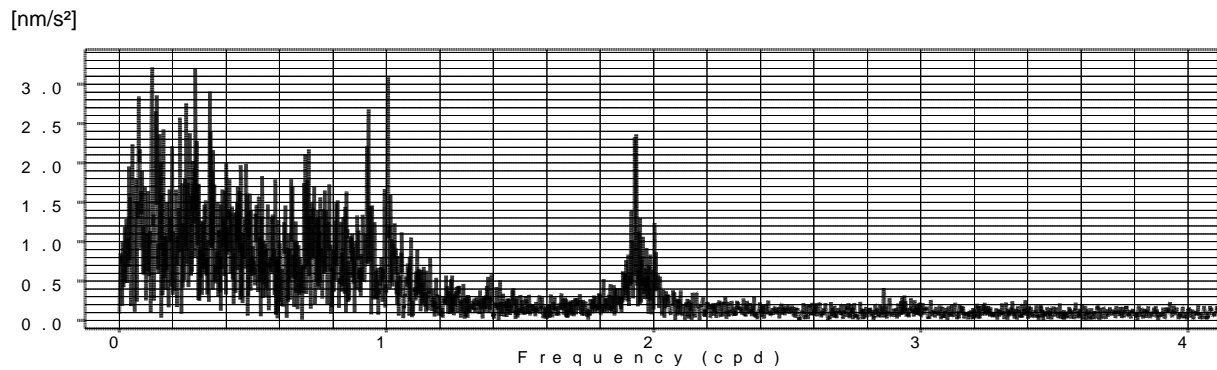


Abbildung F.17: Amplitudenspektrum der Residuen - Analyse 2

Ausgeprägte Peaks treten bei 1 und 2 cpd weiterhin auf, jedoch mit leicht verringerter Signalhöhe.

1.9.3.3 Die Analyse der stündlichen LCR716-Registrierdaten nach minütlicher Korrektur des instrumentellen Luftdruckeffekts und linearer Maßstabsinterpolation zwischen den Stützstellen entsprechend Abbildung F.14 (Analyse 3)

```

Programmsystem Eterna 3.30, L716cp20, adjusted tidal parameters :
Zeitvariabler Maßstabsfaktor, lineare Interpolation zwischen Stützstellen
Luftdruckkorrektur der minütlichen LCR716-Registrierdaten 0,01843Volt/mbar
LaCoste GRAVIMETER LCR716CPI
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg] [deg]
0.911391 0.947991 O1   354.9285  1.16483  0.00182  -0.9937  0.0892
0.981855 0.998631 P1   166.7654  1.17624  0.00414  -0.7043  0.2019
0.998632 1.001369 S1    3.6639   1.09303  0.24823 -18.7079 12.9943
1.001370 1.023622 K1   492.3181  1.14885  0.00131  -0.5914  0.0654
1.914129 1.950419 M2   360.7039  1.19376  0.00093  1.4173  0.0447
1.984283 2.002736 S2   166.9532  1.18761  0.00198  0.2010  0.0957
2.002737 2.451943 K2    44.4672  1.16365  0.00670  -0.2321  0.3300
2.451944 3.381378 M3    4.0926   1.08635  0.03319  -0.8388  1.7511

Standard deviation of weight unit:    22.426 nm/s**2

```

Tabelle F.4: Analysenergebnis 3 (Auszug)

Gegenüber dem Ausgangswert von $42,686 \text{ nm/s}^2$ hat sich die Standardabweichung der Modellanpassung weiter verringert, jedoch im Vergleich zur vorhergehenden Analyse nur geringfügig von Faktor 0,56 auf Faktor 0,53.

Durch die Berücksichtigung der zeitlichen Änderungen des Registriermaßstabs tritt bei den Gezeitenamplituden gegenüber der vorhergehenden Analyse eine Maßstabsvergrößerung von durchgängig 6% auf. Dies erklärt sich dadurch, dass der in den Analysen 1 und 2 verwendete mittlere Maßstabsfaktor von $162,77 \mu\text{Gal/Volt}$ wesentlich von der zeitlichen Verteilung der individuellen Maßstabswerte abhängt und nicht vom Funktionsverlauf.

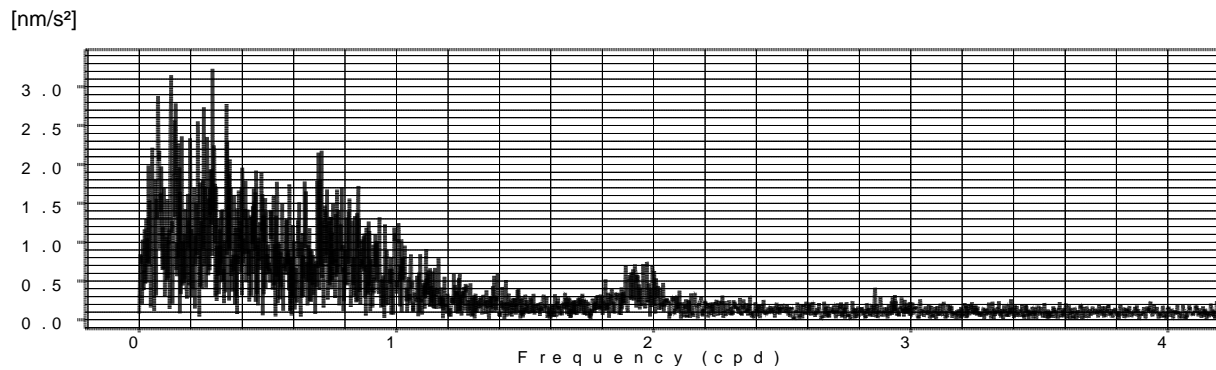


Abbildung F.18: Amplitudenspektrum der Residuen - Analyse 3

Die zuvor ausgeprägten Peaks im Gezeitenbereich von 1, 2 und 3cpd treten nun nicht mehr auf. Reste verbleiben jedoch im halbtägigen Gezeitenband, möglicherweise als *geophysikalische* Wirkungen der halbtägigen Luftdruckwelle.

1.9.3.4 Die Analyse der korrigierten stündlichen LCR716-Registrierdaten (instrumenteller Luftdruckeffekt $3,0\mu\text{Gal}/\text{mbar}$ und lineare Maßstabsinterpolation) mit Berücksichtigung der stündlichen Luftdruckwerte (Analyse 4)

Theoretisch sollten in dem Datensatz der Analyse 3 die Wirkungen des instrumentellen Luftdruckeffekts (als Folge der Undichtigkeit des Gravimeters) sowie die Wirkungen zeitlicher Maßstabsänderungen beseitigt worden sein, jedenfalls bis zu einem gewissen Grad. So liegt es nahe, eine Gezeitenanalyse mit stündlichen Luftdruckwerten als Zusatzkanal anzuschließen, um eine Information über den verbleibenden Luftdruck-Regressionskoeffizienten zu gewinnen.

```

Programmsystem Eterna 3.30, L716cp21, adjusted tidal parameters :
Zeitvariabler Maßstabsfaktor, lineare Interpolation zwischen Stützstellen
Luftdruckkorrektur der minütlichen LCR716-Registrierdaten 0,01843Volt/mbar
LaCoste GRAVIMETER LCR716CPI      Zusatzkanal stündliche Luftdruckwerte
from      to      wave      ampl. ampl.fac.      stdv. ph. lead      stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]           [deg] [deg]
-----
0.911391 0.947991 O1   354.9825  1.16501  0.00180  -1.0034  0.0887
0.981855 0.998631 P1   166.6758  1.17561  0.00412  -0.6629  0.2008
0.998632 1.001369 S1    3.5888   1.07064  0.24670 -33.3086 13.2324
1.001370 1.023622 K1   492.0873  1.14831  0.00130  -0.5728  0.0650
1.914129 1.950419 M2   360.7342  1.19386  0.00094   1.3977  0.0450
1.984283 2.002736 S2   167.6378  1.19248  0.00200   0.6044  0.0969
2.002737 2.451943 K2    44.5183  1.16499  0.00674  -0.0057  0.3318
2.451944 3.381378 M3    4.0827   1.08371  0.03339  -1.0220  1.7659

Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff.      stdv. parameter unit
  1    -4.10200      0.17852  airpress. nm/s**2 / hPa

Standard deviation of weight unit:      21.693 nm/s**2

```

Tabelle F.5: Analysenergebnis 4 (Auszug)

Der berechnete Luftdruck-Regressionskoeffizient beträgt $-4,10\text{nm}/\text{s}^2$ pro mbar, entsprechend $-0,41\mu\text{Gal}/\text{mbar}$, d.h. die vorhergehenden Maßnahmen zur Elimination des instrumentellen Luftdruckeffekts bewirkten eine Überkompensation, denn für ein vergleichbares druckdichtes LCR-Gravimeter (vgl. Tabelle E.17) wurde der geophysikalische Regressionskoeffizient zu $+3,04\text{nm}/\text{s}^2$ pro mbar ermittelt.

Gegenüber dem Ausgangswert von $42,686\text{nm}/\text{s}^2$ (Analyse 1) hat sich die Standardabweichung der Modellanpassung noch einmal etwas verringert um nunmehr den Faktor 0,51. Die Gezeitenparameter

unterscheiden sich nicht signifikant von den Ergebnissen der vorhergehenden Analyse 3. Zu bemerken ist jedoch, dass die Amplitudenquotienten für S_2 und M_2 jetzt praktisch identisch sind.

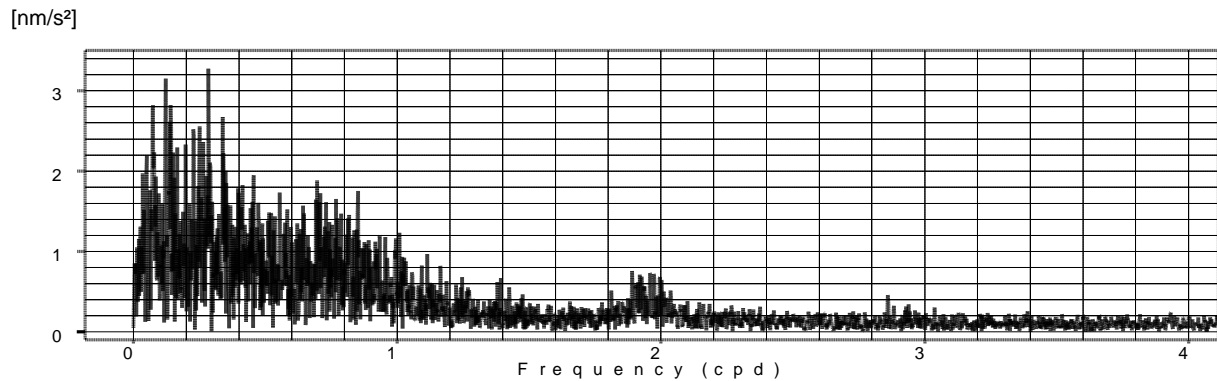


Abbildung F.19: Amplitudenspektrum der Residuen - Analyse 4

Das Spektrum der Residuen ist im Vergleich zu Analyse 3 praktisch identisch geblieben, es zeigt wiederum Periodizitäten im halbtägigen Gezeitenband.

1.9.3.5 Die Analyse der korrigierten stündlichen LCR716-Registrierdaten (instrumenteller Luftdruckeffekt $2,3\mu\text{Gal}/\text{mbar}$ und lineare Maßstabsinterpolation) mit Berücksichtigung der stündlichen Luftdruckwerte (Analyse 5)

Beseitigt man die vorgenannte Überkorrektur des instrumentellen Luftdruckeffekts durch Änderung des Regressionskoeffizienten für die minütliche Luftdruckkorrektur von 3,0 auf $2,3\mu\text{Gal}/\text{mbar}$ (entsprechend $0,01413\text{Volt}/\text{mbar}$, siehe Abschnitt F1.9.3.2), so erhält man das folgende Ergebnis, das praktisch identisch ist mit dem Ergebnis der Analyse 4.

```

Programmsystem Eterna 3.30, L716cp23, adjusted tidal parameters :
Zeitvariabler Maßstabsfaktor, lineare Interpolation zwischen Stützstellen
Luftdruckkorrektur der minütlichen LCR716-Registrierdaten 0,01413Volt/mbar
LaCoste GRAVIMETER LCR716CPI      Zusatzkanal stündliche Luftdruckwerte
from      to      wave  ampl. ampl.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]
0.911391  0.947991  O1   354.9868  1.16502  0.00181  -1.0025  0.0887
0.981855  0.998631  P1   166.6600  1.17550  0.00412  -0.6614  0.2010
0.998632  1.001369  S1    3.5859  1.06978  0.24688  -33.3561 13.2526
1.001370  1.023622  K1   492.0949  1.14832  0.00130  -0.5722  0.0651
1.914129  1.950419  M2   360.7343  1.19386  0.00094  1.3989  0.0450
1.984283  2.002736  S2   167.6476  1.19255  0.00200  0.6073  0.0969
2.002737  2.451943  K2    44.5208  1.16505  0.00674  -0.0033  0.3317
2.451944  3.381378  M3    4.0815  1.08339  0.03347  -0.9880  1.7706

Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff.      stdv. parameter unit
1      2.90080      0.17866  airpress.  nm/s**2 / hPa
Standard deviation of weight unit:      21.709  nm/s**2
    
```

Tabelle F.6: Analysenergebnis 5 (Auszug)

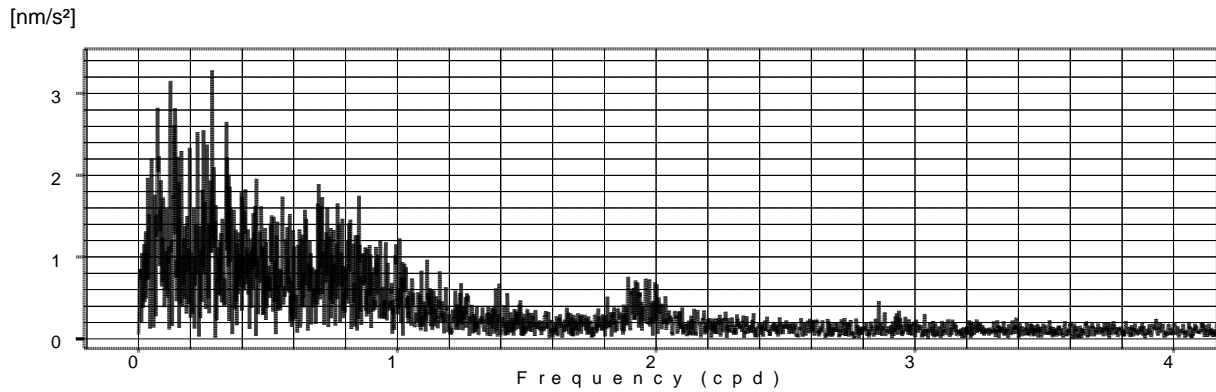


Abbildung F.20: Amplitudenspektrum der Residuen – Analyse 5

Signifikante Unterschiede gegenüber dem Residuenspektrum der vorhergehenden Analyse sind nicht zu erkennen.

1.9.3.6 Die Analyse der stündlichen LCR716-Rohdaten mit linearer Maßstabsinterpolation zwischen den Stützstellen und Berücksichtigung der stündlichen Luftdruckwerte (Analyse 6)

Es liegt nahe, eine Gezeitenanalyse zu berechnen auf Basis der Rohdaten von Analyse 1 aber mit linearer Maßstabsinterpolation zwischen den Stützstellen und Hinzufügung der stündlichen Luftdruckwerte, d.h. den Zwischenschritt der minutlichen Luftdruckkorrektur zu umgehen. Man erkennt weitestgehende Übereinstimmung des Analyseergebnisses mit den Ergebnissen der Analyse 4 (deren zugrundeliegenden Daten *mit* dem genannten Zwischenschritt gebildet wurden). Der berechnete Luftdruck-Regressionskoeffizient von 25,91nm/s²/mbar (entsprechend 2,591µGal/mbar) erfasst sowohl den instrumentellen, als auch den geophysikalischen Luftdruckeffekt.

```

Programmsystem Eterna 3.30, L716cp18, LaCoste GRAVIMETER LCR716CPI
adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1   354.9943  1.16505  0.00181  -0.9990  0.0891
0.981855 0.998631 P1   166.6087  1.17514  0.00414  -0.6595  0.2019
0.998632 1.001369 S1    3.6399   1.08590  0.24786 -33.4907 13.1078
1.001370 1.023622 K1   492.1130  1.14837  0.00131  -0.5696  0.0653
1.914129 1.950419 M2   360.7482  1.19391  0.00094  1.4025  0.0450
1.984283 2.002736 S2   167.6918  1.19286  0.00200  0.6155  0.0967
2.002737 2.451943 K2    44.5285  1.16525  0.00673  -0.0027  0.3312
2.451944 3.381378 M3    4.0773   1.08228  0.03362  -0.7028  1.7801

Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff.      stdv. parameter  unit
  1    25.91365      0.17923  airpress.  nm/s**2 / hPa

Standard deviation of weight unit:    21.779  nm/s**2

```

Tabelle F.7: Analyseergebnis 6 (Auszug)

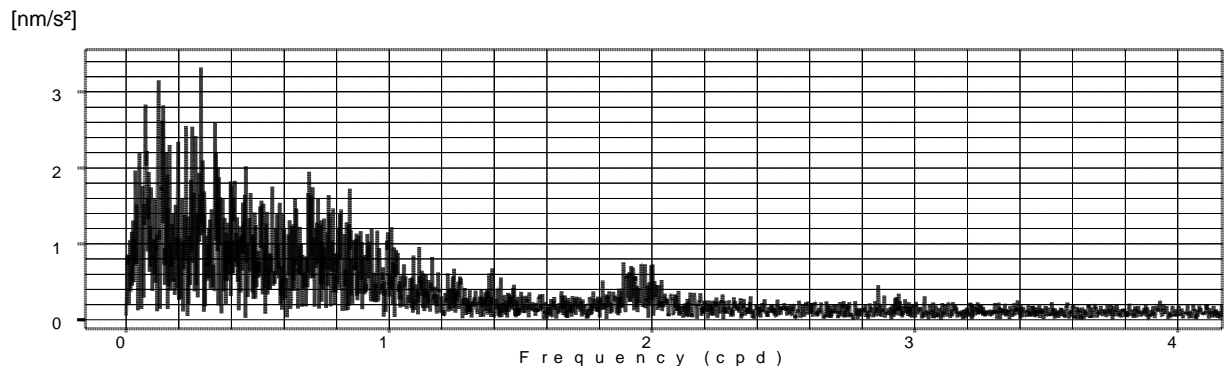


Abbildung F.21: Amplitudenspektrum der Residuen – Analyse 6

Das Spektrum der Residuen entspricht im wesentlichen den Residuenspektren der beiden vorhergehenden Analysen 4 und 5.

1.9.4 Die Bestimmung und Berücksichtigung des zeitvariablen Registriermaßstabs

1.9.4.1 Allgemeines

Die in Abbildung F.14 dargestellten während des Registrierzeitraums ermittelten zeitlichen Änderungen des Registriermaßstabs wurden bisher durch lineare Interpolation zwischen den Stützstellen berücksichtigt. Es stellt sich allerdings die Frage, ob und bis zu welchem Grad die teilweise in kurzen Zeiträumen auftretenden Veränderungen real sind oder aber als eine Folge der statistischen Unsicherheiten der Spindelverstellungen und der zugeordneten Signalsprunghöhen aufzufassen sind, zumal da diese potentiell durch die in Abschnitt F1.2 beschriebenen Einlaufeffekte beeinflusst werden.

Alternativ wurde daher der zeitliche Verlauf der Stützstellenwerte durch ein ausgleichendes Polynom 6. Ordnung dargestellt (Abbildung F.14).

1.9.4.2 Die Analyse der hinsichtlich des instrumentellen Luftdruckeffektes ($2,3\mu\text{Gal}/\text{mbar}$, Abschnitt F1.9.3.5) korrigierten stündlichen LCR716-Registrierdaten mit Berücksichtigung der stündlichen Luftdruckwerte, ausgleichendes Maßstabpolynom 6. Ordnung (Analyse 7)

Anstelle der linearen Maßstabsinterpolation der Analyse 5 tritt nun zur Berücksichtigung der zeitlichen Änderungen des Registriermaßstabs ein ausgleichendes Polynom 6. Ordnung.

Signifikante Änderungen der Gezeitenparameter im Vergleich zu den Ergebnissen der Analyse 5 treten nicht auf. Insofern sind die Verfahren der linearen Maßstabsinterpolation zwischen den Stützstellen und der Berücksichtigung der zeitlichen Maßstabsvariationen durch ein ausgleichendes Polynom 6. Ordnung als gleichwertig einzustufen. Diese Aussage gilt auch, wenn man die Polynomordnung innerhalb sinnvoller Grenzen ändert.

```

Programmsystem Eterna 3.30, L716cp27, adjusted tidal parameters :

Zeitvariabler Maßstabsfaktor, Maßstabspolynom 6. Ordnung
Luftdruckkorrektur der minütlichen LCR716-Registrierdaten 0,01413Volt/mbar
LaCoste GRAVIMETER LCR716CPI      Zusatzkanal stündliche Luftdruckwerte

from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1   354.8813  1.16468  0.00190 -1.0166  0.0932
0.981855 0.998631 P1   166.4641  1.17412  0.00433 -0.6629  0.2114
0.998632 1.001369 S1    4.0801   1.21720  0.25931 -33.6481 12.2340
1.001370 1.023622 K1   491.9655  1.14802  0.00137 -0.5597  0.0684
1.914129 1.950419 M2   360.7557  1.19394  0.00091  1.4090  0.0438
1.984283 2.002736 S2   167.6616  1.19265  0.00195  0.6064  0.0943
2.002737 2.451943 K2    44.6459  1.16833  0.00656 -0.1010  0.3219
2.451944 3.381378 M3    4.0917   1.08611  0.03337 -1.0420  1.7609

Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff.      stdv. parameter unit
  1      2.85985      0.17857 airpress. nm/s**2 / hPa

Standard deviation of weight unit:      21.698 nm/s**2

```

Tabelle F.8: Analysenergebnis 7 (Auszug)

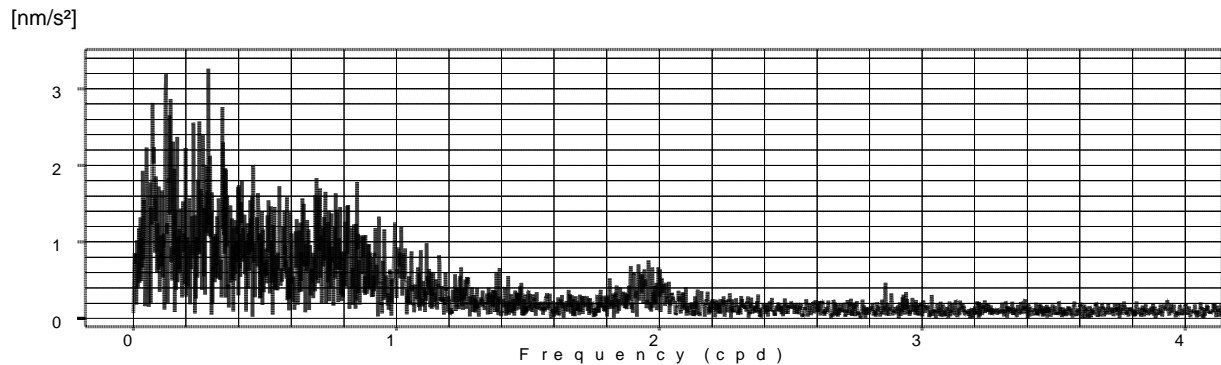


Abbildung F.22: Amplitudenspektrum der Residuen – Analyse 7

Das Spektrum der Residuen ist praktisch identisch mit dem Residuenspektrum der Analyse 5.

Die vorstehenden Aussagen über die Homogenität der Ergebnisse der unterschiedlichen Gezeitenanalysen basieren hinsichtlich der Maßstabsansätze auf einem identischen Datensatz mit einer Länge von etwa einem Jahr. Dies ermöglicht die Bildung von zwei Teilsätzen hinreichender Länge zur Erkennung potentieller systematischer Maßstabseffekte.

Es wurden zwei Datengruppen gebildet, einmal für die Zeiträume vom 27.01.2002 bis 31.05.2002 und 19.12.2002 bis 14.01.2003 (144 Tage), in denen der Registriermaßstab *kleiner* ist als der mittlere Maßstab k_m , zum anderen für einen Zeitraum vom 31.05.2002 bis 19.12.2002 (189 Tage), in dem der Registriermaßstab *größer* ist als der mittlere Maßstab k_m .

Ergebnisse der Teilanalysen:

a) Zeiträume vom 27.01.2002 bis 31.05.2002 und 19.12.2002 bis 14.01.2003 $k_i < k_m$

```

Programmsystem Eterna 3.30, L716cp24, adjusted tidal parameters :

Zeitvariabler Maßstabsfaktor, lineare Interpolation zwischen Stützstellen
Luftdruckkorrektur der minütlichen LCR716-Registrierdaten 0,01413Volt/mbar
144 Tage      LaCoste GRAVIMETER LCR716CPI

from      to      wave      ampl. ampl.fac.      stdv. ph. lead      stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1   352.9758  1.15842  0.00241  -1.0231  0.1191
0.981855 0.998631 P1   166.4824  1.17425  0.01071  -2.1115  0.5220
1.001370 1.023622 K1   488.3422  1.13957  0.00346  -0.2681  0.1735
1.914129 1.950419 M2   358.6921  1.18711  0.00116   1.3906  0.0561
1.984283 2.002736 S2   166.5308  1.18460  0.00246   0.6507  0.1191
2.002737 2.451943 K2    44.9060  1.17513  0.00847  -0.1864  0.4127

Standard deviation of weight unit:    23.452 nm/s**2
    
```

Tabelle F.9: Ergebnis der Teilanalyse 7a (Auszug)

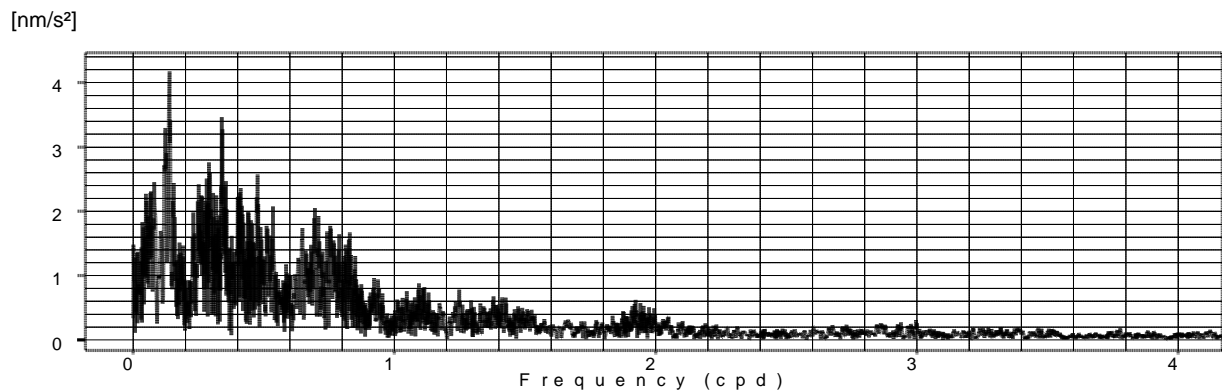


Abbildung F.23: Amplitudenspektrum der Residuen – Teilanalyse 7a ($k_i < k_m$)

b) Zeitraum vom 31.05.2002 bis 19.12.2002 $k_i > k_m$

```

Programmsystem Eterna 3.30, L716cp25, adjusted tidal parameters :

Zeitvariabler Maßstabsfaktor, lineare Interpolation zwischen Stützstellen
Luftdruckkorrektur der minütlichen LCR716-Registrierdaten 0,01413Volt/mbar
189 Tage      LaCoste GRAVIMETER LCR716CPI

from      to      wave      ampl. ampl.fac.      stdv. ph. lead      stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1   356.5985  1.17031  0.00230  -0.9910  0.1124
0.981855 0.998631 P1   166.3460  1.17328  0.00844  -0.3625  0.4120
1.001370 1.023622 K1   493.8467  1.15241  0.00259  -0.5476  0.1289
1.914129 1.950419 M2   362.2219  1.19879  0.00115   1.4008  0.0552
1.984283 2.002736 S2   169.2853  1.20420  0.00250   1.0565  0.1188
2.002737 2.451943 K2    44.4401  1.16294  0.00825   0.6829  0.4067

Standard deviation of weight unit:    20.780 nm/s**2
    
```

Tabelle F.10: Ergebnis der Teilanalyse 7b (Auszug)

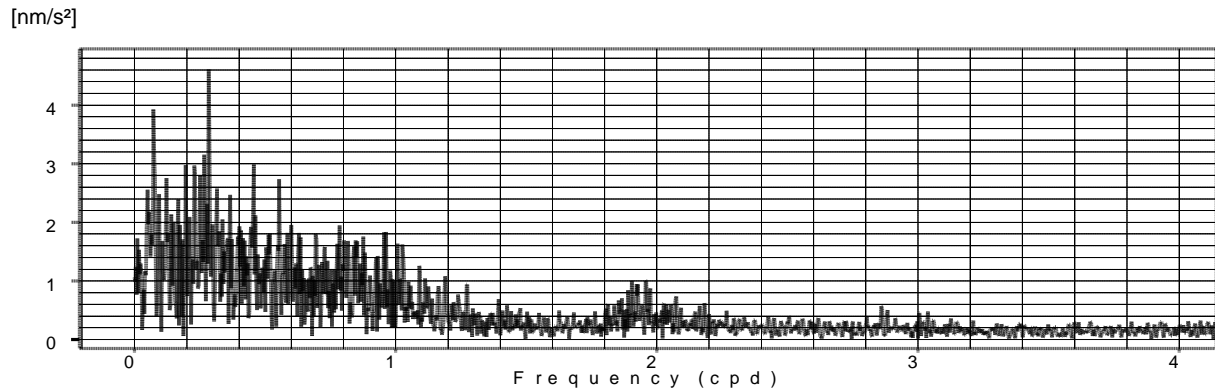


Abbildung F.24: Amplitudenspektrum der Residuen – Teilanalyse 7b ($k_i > k_m$)

Die Verhältnisse der mit beiden Datensätzen berechneten Amplitudenquotienten für die drei großen Partialtiden O_1 , K_1 und M_2 betragen 1,010, 1,011 und 1,010, die Ergebnisse der Analysen beider Datensätze weisen also eine Maßstabsdifferenz von etwa 1% auf.

Diese Maßstabsdifferenz lässt sich schwerlich als Wirkung statistischer Unsicherheiten der einzelnen Stützstellenwerte erklären (vgl. Abschnitt F1.8). Der Betrag dieser Differenz deutet eher auf einen systematischen Effekt hin. Da die Stützstellen ausschließlich aus Spindelverstellungen zur Driftkorrektur abgeleitet wurden, ist möglicherweise die Anzahl dieser Stützstellen und deren zeitliche Verteilung nicht ausreichend.

Wesentliche Unterschiede in der Struktur der Residuenspektren der Analysen $k_i < k_m$ und $k_i > k_m$ sind nicht zu erkennen. Die größere Signalthöhe der Periodizitäten in den Residuen der Analyse $k_i > k_m$ im Bereich des halbtägigen Gezeitenbandes deutet allerdings auf Unterschiede im Grad der Elimination halbtägiger Luftdruckeffekte hin.

Wiederholt man nun die beiden Analysen mit Hinzufügung der stündlichen Luftdruckwerte (Analysen 7aa und 7bb), so ändern sich weder die Gezeitenparameter und die Modellanpassung (Standardabweichung der Gewichtseinheit) noch die Strukturen der Residuenspektren gegenüber den zugeordneten vorhergehenden Analyseergebnissen (Analysen 7a und 7b) in nennenswerter Weise. Ein signifikanter Unterschied besteht allerdings hinsichtlich der berechneten Luftdruck-Regressionskoeffizienten: $2,01\text{nm/s}^2$ bei Analyse aa und $4,08\text{nm/s}^2$ bei Analyse bb.

Mit Bezug insbesondere auf die Ergebnisse der Analysen 2 und 3 ist es denkbar, dass eine Verbesserung der Erfassung der zeitlichen Änderungen des Registriermaßstabs sowohl durch Erhöhung der Zahl der individuellen Maßstabsbestimmungen als auch hinsichtlich ihrer Bestimmungssicherheit zu einer ersten Klärung hinsichtlich der Ursache der in den Residuen verbliebenen halbtägigen Periodizitäten führen könnte.

aa) Zeiträume vom 27.01.2002 bis 31.05.2002 und 19.12.2002 bis 14.01.2003 $k_i < k_m$

Program ANALYZE, version 3.30 960908				File: L716cp28			
Number of recorded days in total : 143.67				LaCoste GRAVIMETER LCR716CPI			
adjusted tidal parameters :							
from	to	wave	ampl.	ampl.fac.	stdv.	ph. lead	stdv.
[cpd]	[cpd]	[nm/s**2]				[deg]	[deg]
0.911391	0.947991	O1	352.9446	1.15832	0.00237	-1.0008	0.1171
0.981855	0.998631	P1	167.0094	1.17796	0.01054	-2.1157	0.5114
1.001370	1.023622	K1	487.8919	1.13852	0.00340	-0.3184	0.1709
1.914129	1.950419	M2	358.6602	1.18700	0.00115	1.4120	0.0555
1.984283	2.002736	S2	166.2350	1.18250	0.00244	0.4530	0.1190
2.002737	2.451943	K2	44.8323	1.17320	0.00837	-0.2743	0.4087
Adjusted meteorological or hydrological parameters:							
no. regr.	coeff.	stdv.	parameter	unit			
1	2.01109	0.26993	airpress.	nm/s**2 / hPa			
Standard deviation of weight unit:				23.259	nm/s**2		

Tabelle F.11: Ergebnis der Teilanalyse 7aa (Auszug)

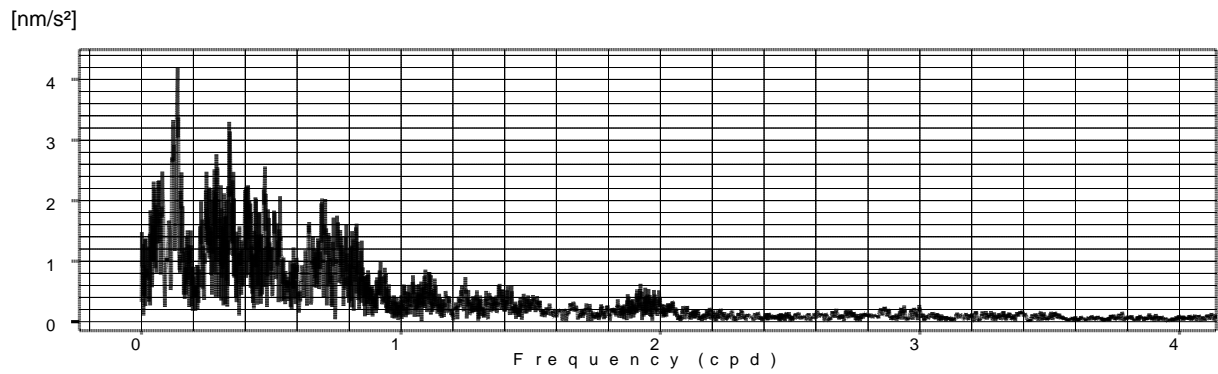


Abbildung F.25: Amplitudenspektrum der Residuen – Teilanalyse 7aa

bb) Zeitraum vom 31.05.2002 bis 19.12.2002 $k_i > k_m$

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908                               File: L716cp29
Number of recorded days in total : 189.29 LaCoste GRAVIMETER LCR716CPI
adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]    [cpd]    [nm/s**2 ]                [deg] [deg]
0.911391 0.947991 O1   356.5237  1.17007  0.00223 -0.9999  0.1091
0.981855 0.998631 P1   166.6482  1.17542  0.00819 -0.3851  0.3989
1.001370 1.023622 K1   494.0725  1.15294  0.00252 -0.5675  0.1250
1.914129 1.950419 M2   362.2375  1.19884  0.00113  1.4034  0.0539
1.984283 2.002736 S2   168.5298  1.19882  0.00245  0.6536  0.1180
2.002737 2.451943 K2    44.4415  1.16298  0.00806  0.4189  0.3971
Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff.      stdv. parameter unit
  1    4.08286    0.24042  airpress. nm/s**2 / hPa
Standard deviation of weight unit: 20.117 nm/s**2

```

Tabelle F.12: Ergebnis der Teilanalyse 7bb (Auszug)

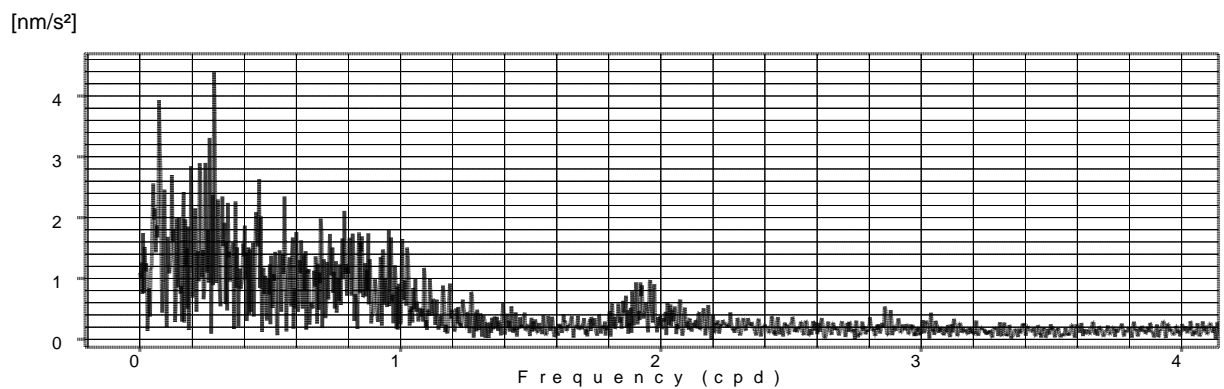


Abbildung F.26: Amplitudenspektrum der Residuen – Teilanalyse 7bb

1.9.5 Zusammenstellung der Analysenergebnisse

Partialtide	Analyse 1	Analyse 2	Analyse 3	Analyse 4	Analyse 5	Analyse 6	Analyse 7
O ₁	1,15860	1,15734	1,16483	1,16501	1,16502	1,16505	1,16468
	0,00382	0,00249	0,00182	0,00180	0,00181	0,00181	0,00190
	-1°,0616	-0°,9903	-0°,9937	-1°,0034	-1°,0025	-0°,9990	-1°,0166
	0°,1888	0°,1234	0°,0892	0°,0887	0°,0887	0°,0891	0°,0932
P ₁	1,16230	1,16696	1,17624	1,17561	1,17550	1,17514	1,17412
	0,00872	0,00569	0,00414	0,00412	0,00412	0,00414	0,00433
	-0°,4793	-0°,7797	-0°,7043	-0°,6629	-0°,6614	-0°,6595	-0°,6629
	0°,4300	0°,0296	0°,2019	0°,2008	0°,2010	0°,2019	0°,2114
K ₁	1,13800	1,14195	1,14885	1,14831	1,14832	1,14837	1,14802
	0,00276	0,00180	0,00131	0,00130	0,00130	0,00131	0,00137
	-0°,4134	-0°,5508	-0°,5914	-0°,5728	-0°,5722	-0°,5696	-0°,5597
	0°,1389	0°,0904	0°,0654	0°,0650	0°,0651	0°,0653	0°,04684
M ₂	1,18773	1,18697	1,19376	1,19386	1,19386	1,19391	1,19394
	0,00157	0,00112	0,00093	0,00094	0,00094	0,00094	0,00091
	1°,3156	1°,4569	1°,4173	1°,3977	1°,3989	1°,4025	1°,4090
	0°,0759	0°,0542	0°,0447	0°,0450	0°,0450	0°,0450	0°,0438
S ₂	1,21692	1,17994	1,18761	1,19248	1,19255	1,19286	1,19265
	0,00334	0,00239	0,00198	0,00200	0,00200	0,00200	0,00195
	2°,9859	0°,0942	0°,2010	0°,6044	0°,6073	0°,6155	0°,6064
	0°,1575	0°,1160	0°,0957	0°,0969	0°,0969	0°,0967	0°,0943
s	42,686	23,956	22,426	21,693	21,709	21,779	21,698
S ₁	2,56021	3,48239	1,09303	1,07064	1,06978	1,08590	1,21720
	0,52236	0,34101	0,24823	0,24670	0,24688	0,24786	0,25931
	-22°,0980	12°,8288	-18°,7079	-33°,3086	-33°,3561	-33°,4907	-33°,6481
	11°,6749	5°,6049	12°,9943	13°,2324	13°,2526	13°,1078	12°,2340

Tabelle F.13: Ergebnisse der Analysen 1 bis 7 für die Hauptpartialtiden sowie die Tide S₁, Standardabweichung s der Gewichtseinheit in nm/s², Beobachtungszeitraum vom 27.1.2002 bis 14.1.2003 (233 Tage)

- Analyse 1: stündliche Rohdaten, konstanter Maßstabsfaktor 162,77µGal/Volt
- Analyse 2: wie vor, jedoch instrumentell Luftdruckkorrektur der minütlichen Registrierwerte mit dem Faktor 0,01843Volt/mbar, danach Bildung der stündlichen Registrierwerte
- Analyse 3: wie vor, jedoch mit linearer Maßstabsinterpolation zwischen den Stützstellen
- Analyse 4: wie vor, jedoch Analyse mit Zusatzkanal der stündlichen Luftdruckwerte => Eterna-Luftdruckregressionskoeffizient: -0,4µGal/mbar
- Analyse 5: wie vor, jedoch instrumentelle Luftdruckkorrektur der minütlichen Registrierwerte mit dem Faktor 0,01413 Volt/mbar (zur Erzielung eines Eterna Luftdruck-Regressionskoeffizienten von ca.+0,3µGal/mbar), danach Bildung der stündlichen Registrierwerte
- Analyse 6: wie Analyse 1, jedoch mit linearer Maßstabsinterpolation zwischen den Stützstellen und Zusatzkanal der stündlichen Luftdruckwerte
- Analyse 7: wie Analyse 5, jedoch mit Maßstabspolynom 6.Ordnung

1.9.6 Schlussfolgerungen

Der Vergleich der Ergebnisse der Jahresanalysen 3 bis 7 zeigt bei den Gezeitenparametern für die Hauptpartialtiden O₁, P₁, K₁, und M₂ weitgehende Übereinstimmung. Insbesondere kann festgestellt werden, dass im vorliegenden Falle der Undichtigkeit des Gravimetergehäuses auf den Zwischenschritt einer minütlichen Elimination der instrumentellen Luftdruckeffekte verzichtet und statt dessen das übliche Eterna-Verfahren der stündlichen

Luftdruckkorrektur angewandt werden kann. Diese Aussage gilt selbstverständlich nur dann, wenn der Regressionskoeffizient des geophysikalischen Luftdruckeffekts *nicht* die Zielgröße ist. Ferner sind im vorliegenden Fall die Verfahren der Berücksichtigung zeitlicher Änderungen des Registriermaßstabs durch lineare Interpolation zwischen Stützstellen oder mit Hilfe eines ausgleichenden Polynoms als gleichwertig einzustufen.

Die Normalamplitude der gravimetrischen Partialtide S_1 beträgt in der Messstation $0,39\mu\text{Gal}$. Die Analysen 3 bis 7 ergaben beobachtete Amplituden zwischen $0,36$ und $0,41\mu\text{Gal}$. Das bedeutet, dass die Amplitude potentieller Störungen mit der Tagesfrequenz $15^\circ/\text{h}$ deutlich kleiner ist als $0,1\mu\text{Gal}$ und daher im Zusammenhang als praktisch wirkungslos eingestuft werden kann.

Von Analyse 3 bis Analyse 7 ändert sich die Standardabweichung der Gewichteinheit nur noch geringfügig.

Die Elimination der gravimetrischen Wirkungen der beobachteten Luftdruckwelle mit der Periode $30^\circ/\text{h}$ (siehe Abschnitt E7), d.h. die Elimination des zugeordneten geophysikalischen Luftdruckeffekts in den Parametern der Partialtide S_2 , erfordert eine Gezeitenanalyse mit zusätzlichem Kanal für die stündlichen (mittleren) Luftdruckwerte.

Die vorläufigen Sollwerte der Amplitudenquotienten der großen Hauptpartialtiden (siehe Abschnitt D8) betragen für O_1 1,1476; K_1 1,1342; M_2 1,1869.

Bildet man die Verhältniszahlen mit den entsprechenden mittleren Parametern aus Tabelle F.13 (Analysen 3 bis 7), so ergeben sich die folgenden Faktoren für die Maßstabsdifferenzen:

$$O_1 1,015; \quad K_1 1,013; \quad M_2 1,006.$$

Man erkennt, dass sich die Maßstabsfehler im gantztägigen und halbtägigen Gezeitenband signifikant unterscheiden. Dieser Sachverhalt könnte als Auswirkung der im halbtägigen Gezeitenband verbliebenen Periodizitäten der Residuen eingestuft werden, die sich um das Frequenzband M_2 ($1,94\text{cpd}$) gruppieren. Auf nahe liegende weitergehende Untersuchungen wird hier im Hinblick auf die Aufgabenstellung verzichtet.

Aus dem Vergleich der Amplitudenquotienten lediglich der beiden großen Partialtiden des gantztägigen Gezeitenbands ergibt sich ein Maßstabsfehler für die Analysenergebnisse LCR716CPI von $1,4\%$, der sich kaum aus den Unsicherheiten der individuellen Maßstabsbestimmungen (siehe Abschnitt F1.8) erklären lässt. Es ist vielmehr denkbar, dass sich die Spindeleichwerte für Messungen nach der Null-Methode (mechanische oder elektrostatische Rückkopplung) und nach der Ausschlagmethode (CPI-Modus) etwas unterscheiden [BONATZ 2004].

Die beste Phasenaufösung wird erwartungsgemäß bei der Partialtide M_2 erzielt. Die beobachtete Phasenverschiebung beträgt $1^\circ,40$ mit einer Standardabweichung von $0^\circ,045$. Aus den Registrierungen des ungefilterten A206-Signals, das weitgehend frei ist von instrumentell verursachten Phaseneffekten, erhält man den Betrag $2^\circ,25$ mit einer Standardabweichung von $0^\circ,03$ (siehe Abschnitt D7.2). Für das Gravimeter LCR716CPI beträgt somit die instrumentelle Phasenverschiebung im halbtägigen Gezeitenband etwa $0^\circ,85$ und entsprechend im gantztägigen Gezeitenband etwa $0^\circ,42$.

1.9.7 Der idealtypische Residuenverlauf

Bei idealer Datenstruktur gehen bei der Gezeitenanalyse alle Signale mit Periodizitäten innerhalb der Gezeitenbänder in das Ergebnis der Parameterschätzung ein. Daher treten dann in den Residuenspektren an den entsprechenden Stellen deutliche Amplitudenminima auf. Ein Beispiel für einen solchen Fall zeigt das nachfolgende Diagramm (Abbildung F.27), das ausgeprägte Minima im Bereich 1cpd und 2cpd aufweist.

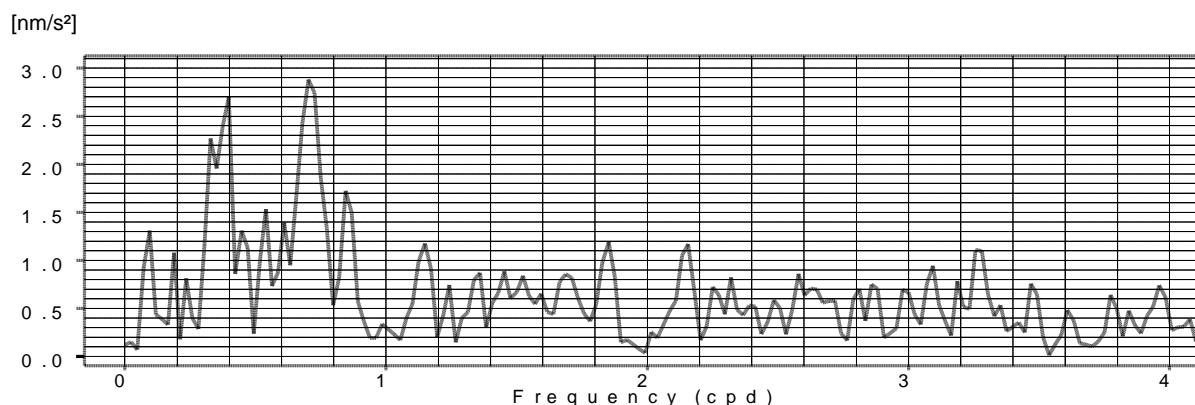


Abbildung F.27: Amplitudenspektrum der Residuen – Analysenergebnis LCR-G-xx2F (Tabelle F.14)

Dem Residuenspektrum liegen Registrierungen zugrunde, die mit einem LaCoste-Romberg-Gravimeter zum Zweck einer Funktionsprüfung in einem Zeitraum von etwa 40 Tagen durchgeführt wurden. Das Gravimeter war mit einem SRW-Feedbacksystem (siehe [SCHNÜLL, RÖDER UND WENZEL 1984] bzw. [RÖDER, SCHNÜLL UND WENZEL 1988]) ausgestattet, welches lediglich die Registrierung der gefilterten Signale ermöglichte.

Am Beginn und am Ende des Einsatzzeitraums vom 11.04.2002 bis 22.05.2002 wurden zur Bestimmung des Registriermaßstabs 11 Spindelverstellungen mit einer Ausschlagweite von umgerechnet ca. 500 μ Gal durchgeführt. Alle Sprungexperimente erfolgten bei etwa gleicher mittlerer Spindelposition (kurzer Beobachtungszeitraum, geringe Drift).

Nach der Eich Tabelle des Herstellers beträgt der Intervallfaktor an der Zählwerksposition

$$k = 1,02375\text{mGal/Spindelumdrehung}$$

oder

$$k = 10,2375\mu\text{Gal/Skalenteil.}$$

Daraus ergab sich ein Registrierfaktor von

$$k_3 = 120,76 \pm 0,06\mu\text{Gal/Volt.}$$

Die relative Standardabweichung des Registrierfaktors beträgt somit 0,5%. Eine signifikante zeitliche Variation des Registrierfaktors konnte (während des kurzen Registrierzeitraums) nicht festgestellt werden.

Das Ergebnis der Gezeitenanalyse ist in der nachfolgenden Tabelle nachgewiesen. Die Amplitudenquotienten der Hauptpartialtiden weichen von den vorläufigen Werten (siehe Tabelle D.5, Tabelle D.6 und Tabelle D.7) nicht signifikant ab. Der berechnete Luftdruck-Regressionskoeffizient beträgt 0,4 μ Gal/mbar und liegt damit im Bereich des zu erwartenden Betrags.

Program ANALYZE, version 3.30 960908				File: LCR-G-xx2_7			
20020412120000...20020519130000							
Number of recorded days in total :				37.08			
LaCoste GRAVIMETER LCR-G-xx2F				Used scale: 120.76 μ Gal/Volt			
adjusted tidal parameters :							
from	to	wave	ampl.	ampl.fac.	stdv.	ph. lead	stdv.
[cpd]	[cpd]	[nm/s**2]				[deg]	[deg]
0.911391	0.947991	O1	348.9413	1.14518	0.00164	0.0523	0.0819
0.947992	0.981854	M1	26.8541	1.12061	0.01430	1.1420	0.7304
0.981855	1.023622	PSK1	485.6720	1.13334	0.00123	-0.0313	0.0630
1.914129	1.950419	M2	358.1209	1.18522	0.00124	2.2662	0.0603
1.984283	2.451943	S2K2	167.3191	1.19021	0.00232	0.3988	0.1124
2.451944	3.381378	M3	3.4707	0.92126	0.08872	6.8065	5.5103
Adjusted meteorological or hydrological parameters:							
no. regr.coeff.	stdv.	parameter	unit				
1	4.06902	0.27897	airpress.	nm/s**2 / hPa			
Standard deviation of weight unit:				9.340 nm/s**2			

Tabelle F.14: Analysenergebnis LCR-G-xx2F (Auszug)

1.10 Die Instabilitäten der Astasierung des Gravimeters und die instrumentelle Drift

Stellt man die Variationen der Kammertemperatur im Beobachtungszeitraum (Abbildung F.28) dem Driftverlauf des Gravimeters LCR716CPI (nachfolgende Abbildung F.29) gegenüber, so ist wie bei den Gravimetern A206 und LCR-G-xx1F (vgl. Abschnitt D2) eine klare Korrelation zu erkennen. Einer jährlichen Temperaturänderung von etwa 5°C (Spitze-Spitze) steht eine driftinduzierte Signalvariation von etwa 4mGal gegenüber, entsprechend etwa 0,8mGal/°C. Zum Vergleich A206: etwa 0,4mGal/°C, LCR-G-xx1F: etwa 0,1mGal/°C.

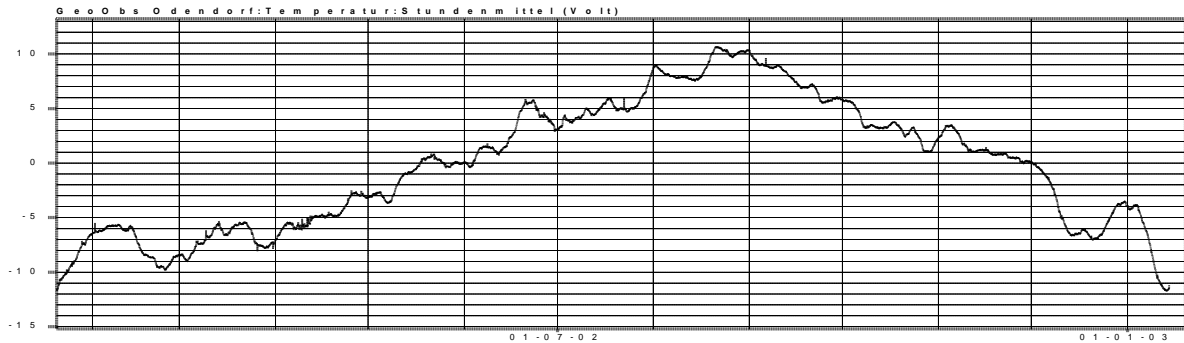


Abbildung F.28: Temperaturverlauf in der Messkammer – entspricht Abbildung F.15

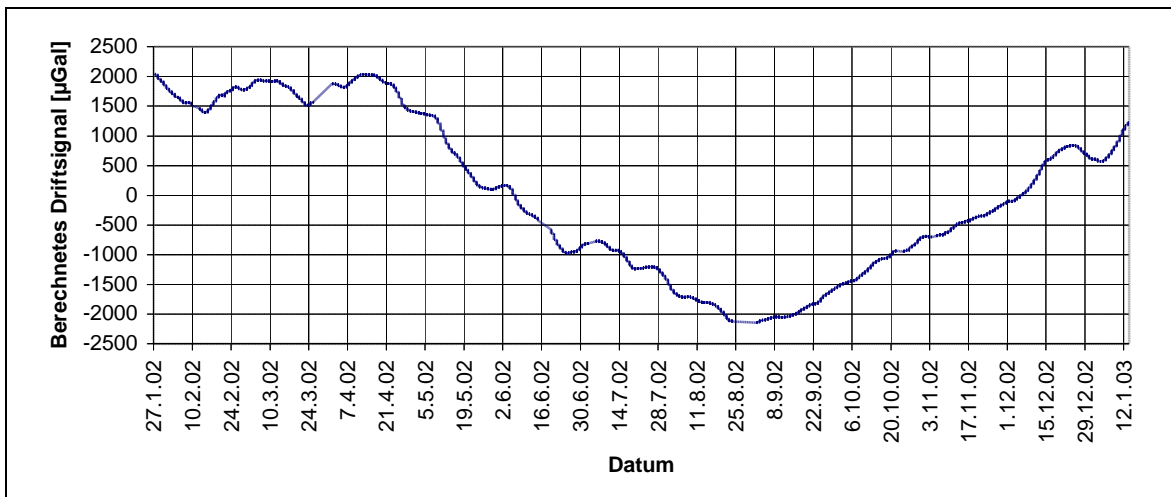


Abbildung F.29: Instrumentelle Drift des Gravimeter LCR716CPI

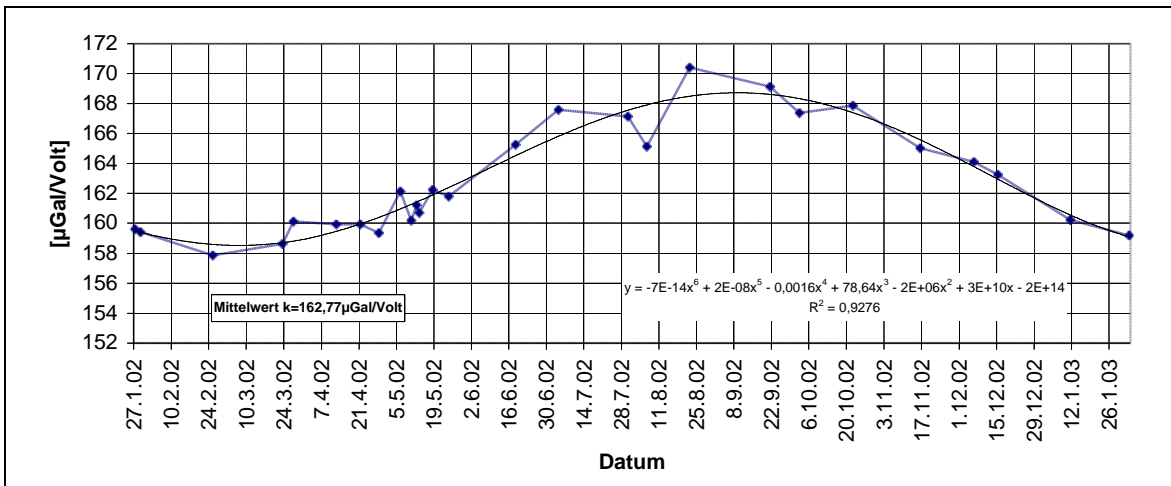


Abbildung F.30: entspricht Abbildung F.14, zeitliche Änderungen der Registrierempfindlichkeit

Somit zeigen die zeitlichen Änderungen des Registriermaßstabs des Gravimeters LCR716CPI nicht nur eine deutliche Korrelation mit der Kammertemperatur (Abschnitt F1.8), sondern auch mit der Instrumentendrift.

Es stellt sich nun die Frage, wie der Zusammenhang zwischen Drift und Änderung des Registriermaßstabs zu erklären ist, bzw. erklärt werden könnte. Die primäre Ursache ist wohl in zeitlichen Änderungen instrumenteller Astasierungsparameter zu suchen.

Ein wesentlicher Astasierungsparameter bei Gravimetern, die auf dem Galitzin-Seismometerprinzip beruhen, ist der Astasierungswinkel δ . Dies ist der Winkel, den die Gerade durch die Rotationsachse des Gravimeterhebels und den oberen Einspann-, „Punkt“ der Gravimeterfeder mit der Vertikalrichtung bildet (siehe Abschnitt F1.7). Als Funktion des Astasierungswinkels δ gilt für die Empfindlichkeit E des Gravimeters [TORGE 1989]

$$E = \frac{d}{g} \cdot \frac{1}{\sin \delta} \quad (\text{F-1})$$

Bei LaCoste-Romberg Gravimetern beträgt die wirksame Hebellänge d von Drehachse bis Systemschwerpunkt etwa 50mm, der Winkel δ liegt im Bereich von $100''$ (entsprechend einem Astasierungsfaktor von etwa 2000). Daraus ergibt sich, dass die Änderung der Empfindlichkeit bei Neigungen des Gravimeters um eine Achse senkrecht zur Hebelachse etwa 1% pro Winkelsekunde beträgt.

Nun wurden aber im Registrierzeitraum Empfindlichkeitsänderungen zwischen 7% und 8% festgestellt. Wäre diese Jahresvariation durch Gravimeterneigungen hervorgerufen worden, so hätte im Beobachtungszeitraum die als Hilfskomponente montierte Feinlibelle Ausschläge zwischen zwei und drei Skalenteilen anzeigen müssen. Dies war aber nicht der Fall, die erkennbaren Positionsänderungen der Mitte der Libellenblase (Ableseungen an beiden Libellenrändern) lagen lediglich im Bereich von einigen Zehntel-Skalenteilen. Somit können Neigungsprozesse als primäre Ursache für die jährlichen Änderungen der Registrierempfindlichkeit weitgehend ausgeschlossen werden.

Eine Besonderheit der LCR-Gravimeter ist, dass zur Kompensation der Wirkungen von Schwereänderungen auf den Mechanismus einer Hilfsfeder verzichtet wird. Durch Schwereänderungen verursachte Änderungen der Gleichgewichtslage des gravimetrischen Sensors werden vielmehr durch quasivertikale Verschiebungen des oberen Einspannpunkts der Gravimeterfeder in die Null-Lage zurückgeführt. Damit ändert sich als Funktion der Stellung der Messspindel der Abstand zwischen Hebelachse und dem oberen Einspannpunkt der Gravimeterfeder (siehe Konstruktionsschema: Abbildung F.13 in Abschnitt F1.7). Derartige Abstandsänderungen aber bewirken Änderungen des Winkels zwischen der Achse der Gravimeterfeder und der Achse des Gravimeterhebels und dadurch als Folge der zugeordneten Änderung der Geometrie des gravimetrischen Sensors eine Änderung der Astasierung. Je niedriger der obere Einspannpunkt der Gravimeterfeder liegt, um so spitzer wird dieser Winkel und um so größer der Astasierungsfaktor bzw. die mechanische Empfindlichkeit des gravimetrischen Sensors.

Infolge der durch Variationen der Temperatur in der Messkammer verursachten instrumentellen Drift war es im Registrierzeitraum erforderlich, abhängig vom Driftverlauf geeignete Verstellungen der Messspindel vorzunehmen, um das Ausgangssignal des Gravimeters im Registrierbereich zu halten. Die Differenz zwischen dem maximalen eingestellten Spindelwert in der Mitte des Monats April 2002 und dem minimalen Wert, der in der zweiten Hälfte des Monats August 2002 erreicht wurde, betrug 4,3 Spindelumdrehungen, entsprechend ca. 4,3mGal, d.h. im August müsste auf der Grundlage der vorhergehenden Überlegungen der Astasierungsfaktor und damit die Registrierempfindlichkeit, größer gewesen sein als im April. Dies steht in Übereinstimmung mit dem durch sprunghafte Spindelverstellungen ermittelten zeitlichen Verlauf der Registrierempfindlichkeit. Auf weitergehende Untersuchungen muss verzichtet werden, da Detailinformationen über wesentliche Konstruktionsparameter des Gravimeters dem Verfasser nicht vorliegen.

1.11 Die Instabilitäten der Astasierung des Gravimeters und der Residuenverlauf

Stellt man nach der Gezeitenanalyse die Residuen dem Gezeitenverlauf gegenüber, so erkennt man an manchen Stellen deutliche Korrelationen zwischen der Struktur der Residuen und der Struktur des Gezeitenverlaufs. Die nachfolgende Abbildung F.31 zeigt ein repräsentatives Beispiel. In dem dargestellten Zeitbereich wird offensichtlich eine Differenz zwischen den tatsächlichen Änderungen des Registriermaßstabs und dem bei der Datenauswertung verwendeten Ansatz wirksam. Es deuten sich kurzzeitige Variationen des Registriermaßstabs an.

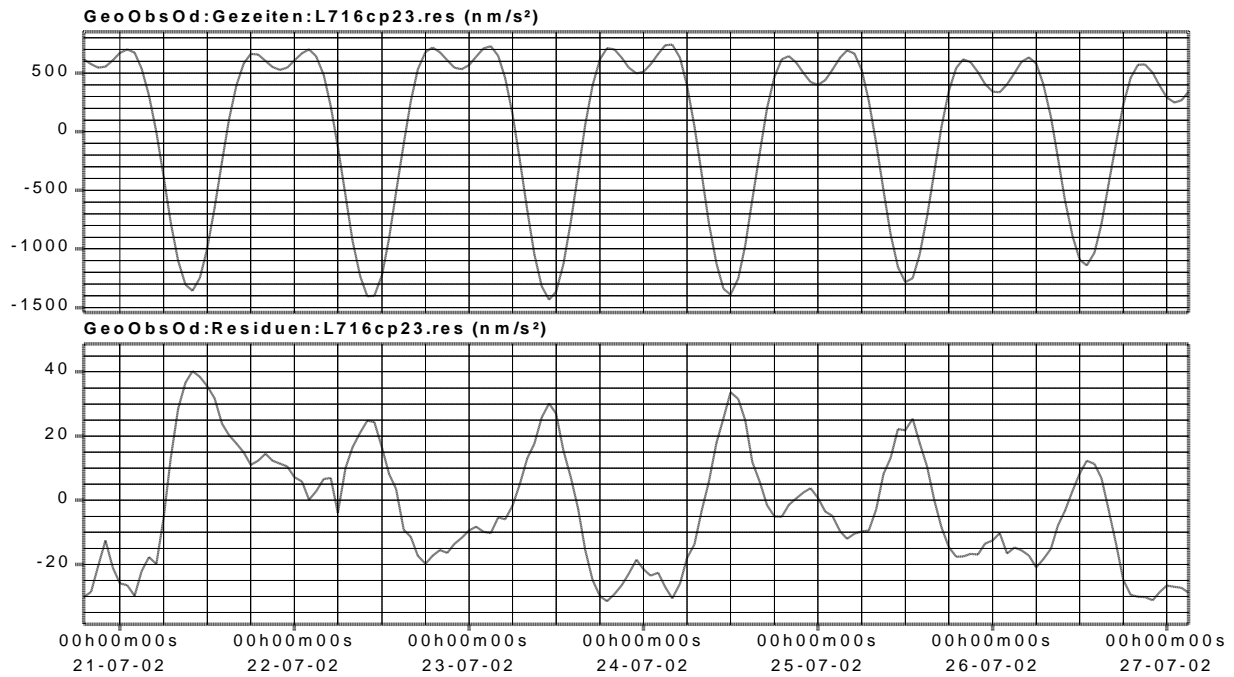


Abbildung F.31: Mit dem Gezeitenverlauf korrelierte Residuen

Unter anderem zu Beginn des Monats Juli tritt, wie Abbildung F.30 erkennen lässt, eine deutliche Differenz auf zwischen den durch ein Polynom 6.Ordnung approximierten und den linear interpolierten Maßstabswerten. Vergleicht man an dieser Stelle den Verlauf der Residuen mit dem Gezeitenverlauf, so erkennt man gezeitenkorrelierte Residuen nicht nur an unterschiedlichen Stellen, sondern auch abrupte Übergänge zwischen systematisch gestörten und ungestörten Bereichen (siehe nachfolgende Abbildung F.32 und Abbildung F.33).

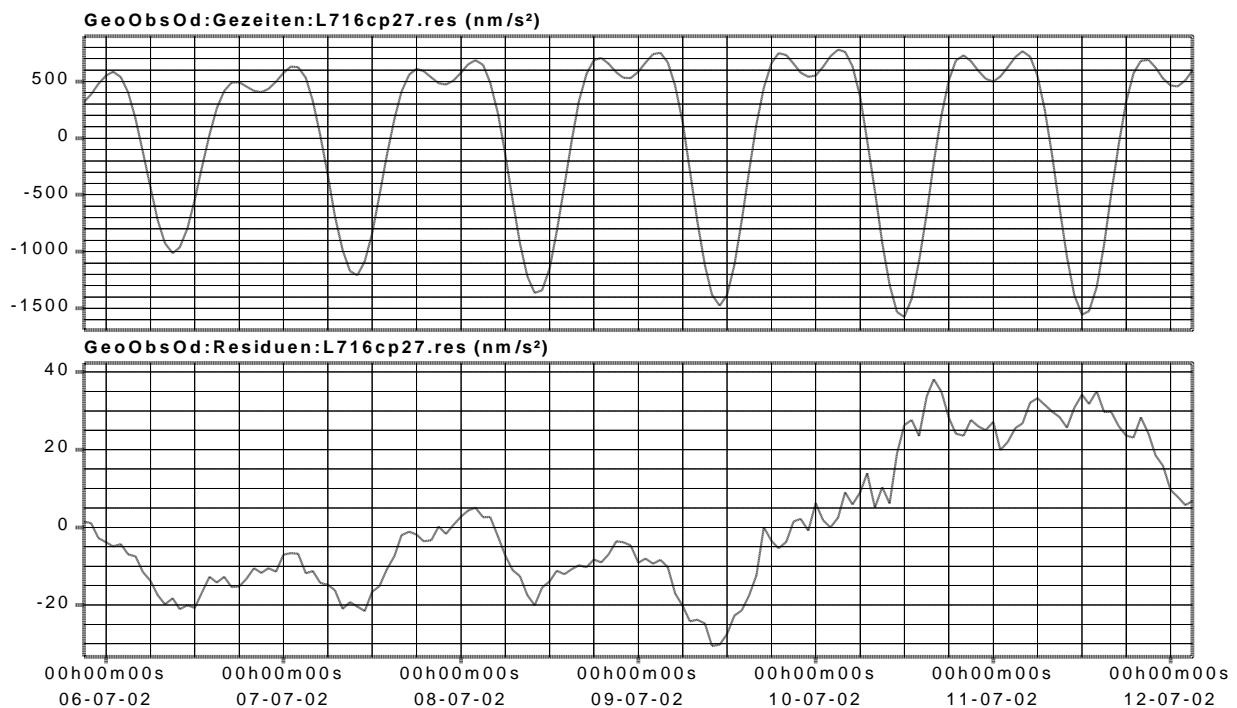


Abbildung F.32: Residuenverlauf bei Verwendung eines Maßstabspolynoms

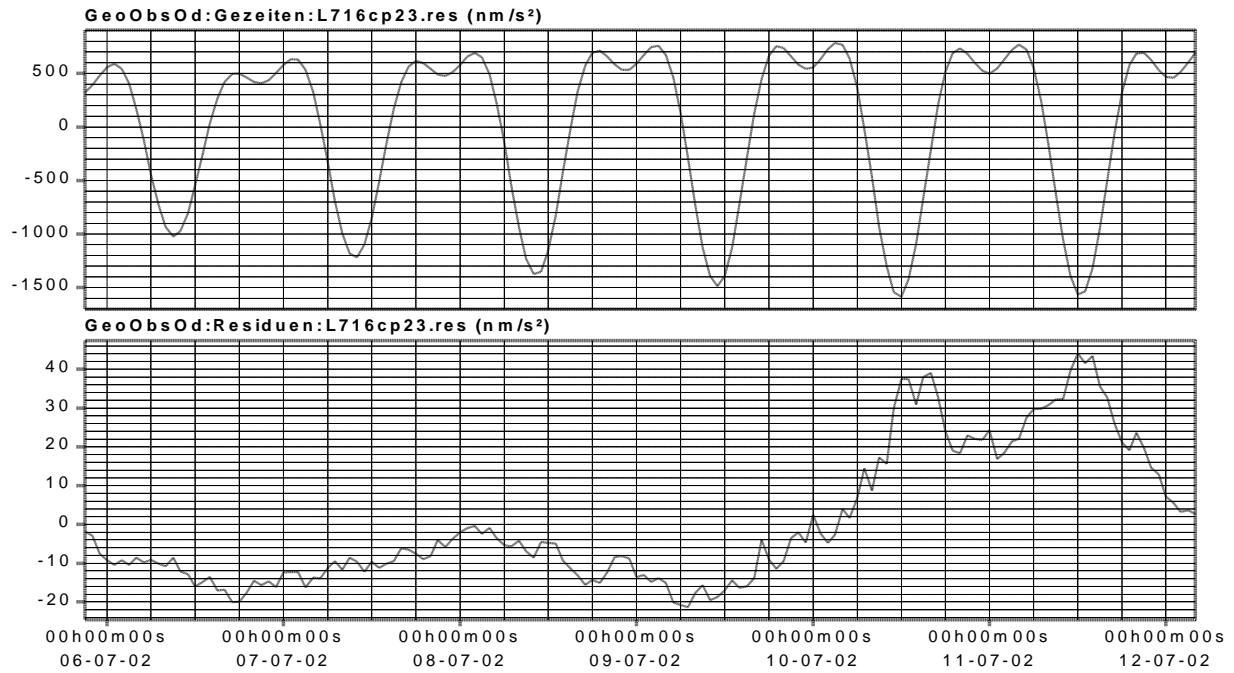


Abbildung F.33: Residuenverlauf bei linearer Maßstabsinterpolation

Ein repräsentatives Beispiel für einen relativ gering systematisch gestörten Residuenverlauf bei gleichzeitig relativ starker zeitlicher Änderung des Registriermaßstabs zeigt die nachfolgende Abbildung F.34.

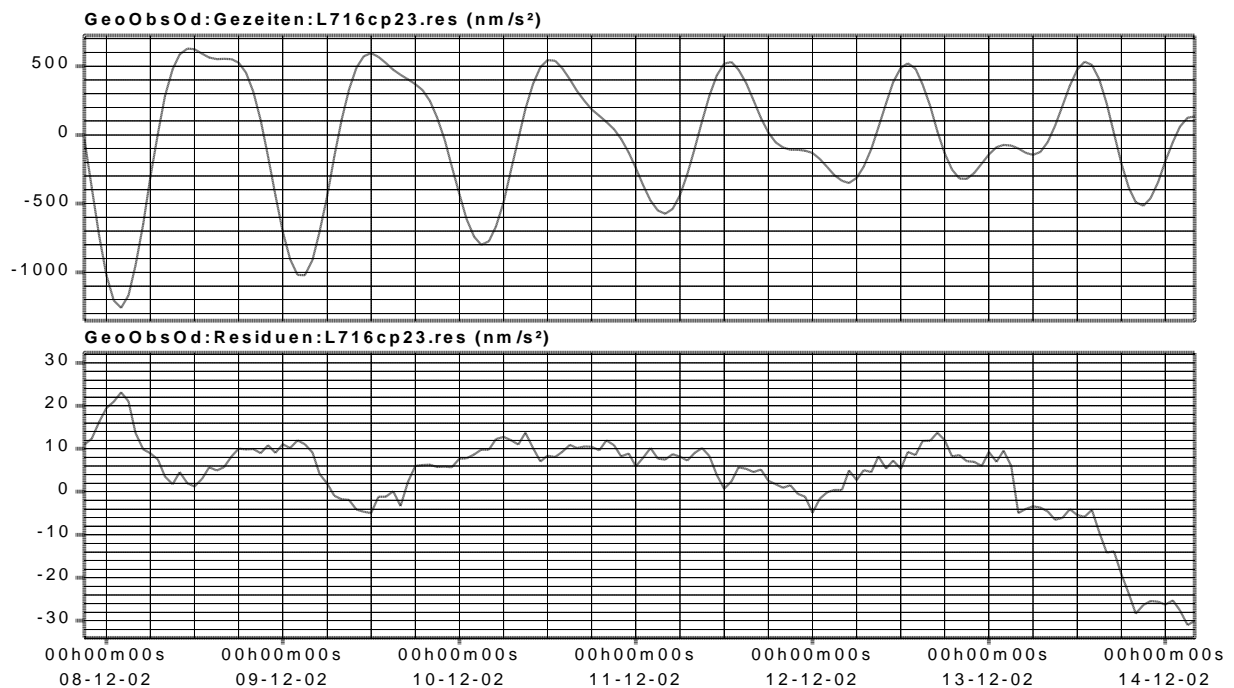


Abbildung F.34: Residuenverlauf bei relativ starker zeitlicher Änderung des Registriermaßstabs

Die dargelegten Ergebnisse deuten (mit Vorbehalt) darauf hin, dass sich die beobachteten zeitlichen Änderungen der Astasierung des Gravimeters LCR716CPI aus zwei Anteilen zusammensetzen: einem mehr oder weniger regelmäßigen Trendanteil als Funktion der Einstellung der Messspindel, dem sich ein kleinerer unregelmäßiger Anteil, der den komplexen Wirkungen unregelmäßiger Änderungen des Astasierungswinkels als Folge von Neigungsänderungen des Gravimeters zugeordnet werden könnte, überlagert.

2 Das Gravimeter LCR-G-xx1

2.1 Testregistrierungen im Ausschlagmodus

Anders als bei der kontinuierliche Signalkückkopplung, durch die mit Hilfe eines Regelkreises elektromagnetische oder elektrostatische Gegenkräfte so gesteuert werden, dass die Geometrie des gravimetrischen Sensorsystems weitestgehend konstant gehalten wird, treten bei der Ausschlagmethode relative Lageänderungen des Waagebalkens gegenüber dem als Analog-Analog-Wandler wirkenden Abgriffsystem auf (Capacitive Position Indicator CPI bei LaCoste-Romberg-Gravimetern). Im Falle mechanischer Instabilitäten an den relevanten Komponenten des gravimetrischen Sensors lässt sich die Existenz solcher Instabilitäten meist am besten bei Registrierungen im Ausschlagmodus erkennen, da in diesem Falle im Prinzip alle Sensoreigenschaften signifikant wirksam werden können. Die Kenntnis der Sensoreigenschaften ist auch für den Rückkopplungsmodus bedeutsam, obwohl die Wirkungen von Änderungen bestimmter Sensorparameter in diesem Modus reduziert oder mehr oder weniger ausgeschaltet werden.

In diesem Abschnitt wird erneut exemplarisch gezeigt, wie große, instrumentell bedingte zeitliche Änderungen der Astasierung eines Gravimeters durch Beobachtungen im CPI-Modus erkannt und teilweise berücksichtigt werden können.

2.2 Der metrologische Zweck der instrumentellen Untersuchungen des Gravimeters LCR-G-xx1CPI

Nach einer Revision des Gravimeters LCR-G-xx1 im Herstellerwerk wurde das Verhalten des gravimetrischen Sensors zunächst durch mehrmonatige Signalregistrierung im Ausschlagmodus überprüft. Der Anlass für die genannte Überholung des Gravimeters waren Signalanomalien, die mit zunehmender Häufigkeit sowohl im CPI-Modus als auch bei eingeschaltetem Rückkopplungssystem auftraten und auf schwerwiegende Instabilitäten des gravimetrischen Sensors hindeuteten.

2.3 Die Analyse der Rohdaten LCR-G-xx1CPI (Registrierung nach der Ausschlagmethode)

Die nachfolgende Tabelle F.15 zeigt die Ergebnisse der Gezeitenanalyse der nach der Geräterevision im CPI-Modus gewonnenen Daten. Im etwa fünfmonatigen Beobachtungszeitraum wurden zu Zwecken der Driftkorrektur sieben definierte Spindelverstellungen durchgeführt, auf deren Grundlage ein genäherter mittlerer Registriermaßstab bestimmt wurde. Für die genannte Überprüfung der Sensoreigenschaften hat das Maßstabsniveau allerdings nur eine untergeordnete Bedeutung.

Program ANALYZE, version 3.30 960908				File: LCR-G-xx1_126			
LaCoste GRAVIMETER LCR-G-xx1F CPI							
EICHUNG durch Spindelverstellung 126,0µGal/Volt							
20010127 0...20010623 20000							
Number of recorded days in total : 147.13							
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.							
adjusted tidal parameters :							
from	to	wave	ampl.	ampl.fac.	stdv.	ph. lead	stdv.
[cpd]	[cpd]	[nm/s**2]				[deg]	[deg]
0.911391	0.947991	O1	355.9758	1.16826	0.00685	-0.8316	0.3358
0.981855	0.998631	P1	152.5179	1.07575	0.01495	1.8506	0.7952
0.998632	1.023622	S1K1	489.6842	1.14269	0.00497	-0.9160	0.2489
1.914129	1.950419	M2	362.4383	1.19951	0.00369	1.2324	0.1762
1.984283	2.002738	S2	169.9994	1.20928	0.00827	-1.1525	0.3919
2.002739	2.451943	K2	49.9644	1.30749	0.03164	5.4845	1.3860
Standard deviation of weight unit: 21.202 nm/s**2							

Tabelle F.15: Gezeitenanalyse LCR-G-xx1 - CPI-Modus (Auszug)

2.4 Vergleich mit Ergebnissen der Registrierung im Rückkopplungsmodus

Zum unmittelbaren Vergleich sind als Tabelle F.16 noch einmal (siehe Abschnitte D6.4 und D7.3) die Ergebnisse der Analyse von Daten hinzugefügt, die mit demselben Gravimeter im Rückkopplungsmodus gewonnen wurden. Diese Messungen schließen sich zeitlich unmittelbar an die nach der Ausschlagmethode durchgeführten Registrierungen an (siehe Abschnitt F2.3).

Program ANALYZE, version 3.30 960908		File: LCR-G-xx1_2	
LaCoste GRAVIMETER LCR-G-xx1 Rückkopplungsmodus			
EICHUNG durch Spindelverstellung		Scale 105,49µGal/Volt	
20010726 90000...	20011012150000	20011015 20000...	20020409 50000
20020412220000...	20020520 60000		
Number of recorded days in total : 291.83			
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.			
adjusted tidal parameters :			
from	to	wave	ampl. ampl. fac. stdv. ph. lead stdv.
[cpd]	[cpd]	[nm/s**2]	[deg] [deg]
0.911391	0.947991	O1	349.5108 1.14705 0.00081 0.0693 0.0405
0.981855	0.998631	P1	162.9213 1.14913 0.00177 0.3173 0.0886
0.998632	1.023622	S1K1	485.4177 1.13274 0.00058 0.2368 0.0293
1.914129	1.950419	M2	358.6261 1.18689 0.00049 2.2126 0.0239
1.984283	2.002738	S2	167.5041 1.19153 0.00106 0.8128 0.0510
2.002739	2.451943	K2	45.3236 1.18606 0.00383 1.2902 0.1850
Standard deviation of weight unit: 11.026 nm/s**2			

Tabelle F.16: Gezeitenanalyse LCR-G-xx1 – Rückkopplungsmodus (Auszug)

Vergleicht man die beiden Ergebnisse miteinander, so ist zunächst festzustellen, dass die Aktivierung der Rückkopplungsautomatik lediglich eine Halbierung der Standardabweichung der Gewichtseinheit bewirkt hat.

Ferner ist bei den einzelnen Hauptpartialtiden im CPI-Modus ein deutlicher Phasennachlauf zu erkennen, der bei Registrierungen nach dem Ausschlagverfahren auftritt und eine bekannte Folge elastischer Hystereseeffekte der Gravimeterfeder ist (siehe auch Abschnitt F1.2). Der Phasennachlauf entspricht hinsichtlich der Größenordnung den zu erwartenden Beträgen. Dass ein solcher Effekt bei Registrierungen im Rückkopplungsmodus als Folge der weitestgehend konstanten Länge der Gravimeterfeder nicht (oder praktisch nicht) auftritt, ist ein wesentlicher Vorteil dieses Messverfahrens.

Der im CPI-Modus festzustellenden Verdopplung der Standardabweichung der Gewichtseinheit gegenüber dem im Rückkopplungsmodus auftretenden Gewichtseinheitsfehler steht für die entsprechenden Amplitudenquotienten der Hauptpartialtiden eine Vergrößerung der zugeordneten Standardabweichungen um etwa den Faktor sieben gegenüber. Ein derartiger Sachverhalt deutet auf eine Konzentration von Modellfehlern in den Gezeitenbändern hin, die in der Analyse der CPI-Daten auftreten. Solche Effekte sind besonders dann zu erwarten, wenn die der Gezeitenanalyse zugrunde liegende Hypothese eines konstanten Maßstabsfaktors der Registrierdaten nicht hinreichend erfüllt ist, bzw. wenn die Registrierdaten im Rahmen einer Analyse vorgeschalteten Pre-Processing nicht hinreichend genau in die Einheit der Schwere umgerechnet wurden.

2.5 Die Korrelation zwischen Residuen- und Gezeitenverlauf bei der Registrierung im CPI-Modus

Vergleicht man nun den zeitlichen Verlauf der Residuen mit dem berechneten Gezeitenverlauf (Abbildung F.35 bis Abbildung F.37), so ist bereits in der graphischen Darstellung eine teilweise ausgeprägte Korrelation zwischen beiden Zeitreihen zu erkennen, was die Vermutung einer zeitlichen Änderung des Registriermaßstabs der CPI-Daten bestätigt. Eine weitere Bestätigung liefert das Residuenspektrum in Abbildung F.38: Die Residuen enthalten wiederum (vgl. Abschnitt F1.9) deutliche Periodizitäten in den ganztägigen und halbtägigen Gezeitenbändern.

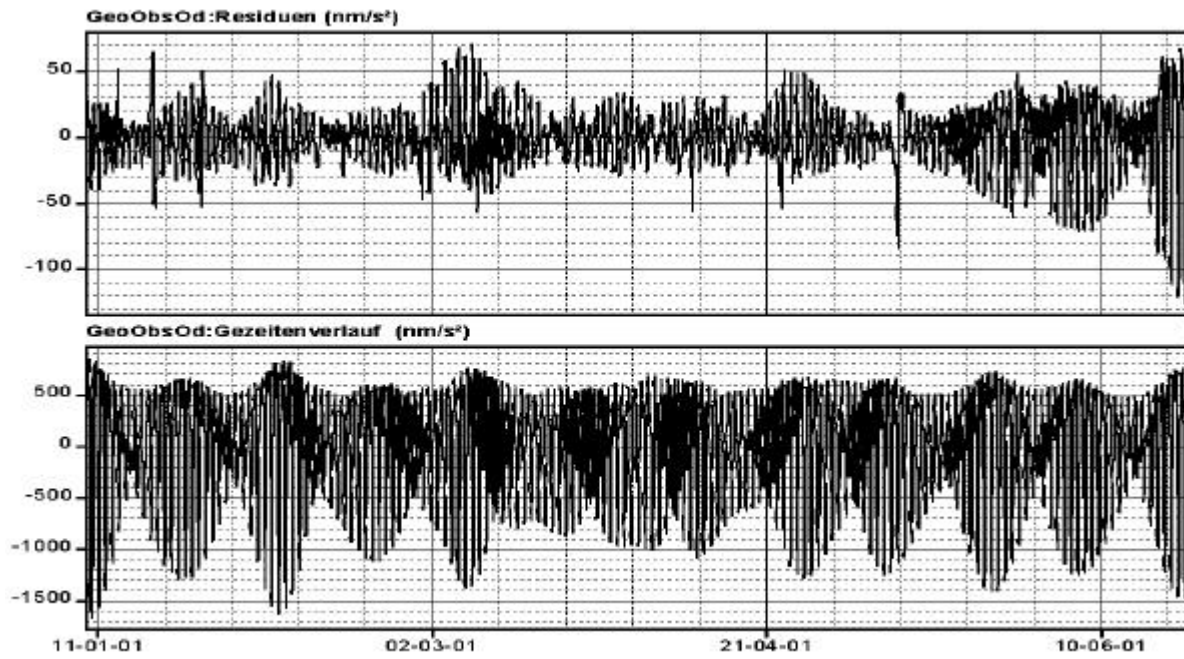


Abbildung F.35: LCR-G-xx1 CPI-Modus, Gegenüberstellung von Residuen und Gezeiten

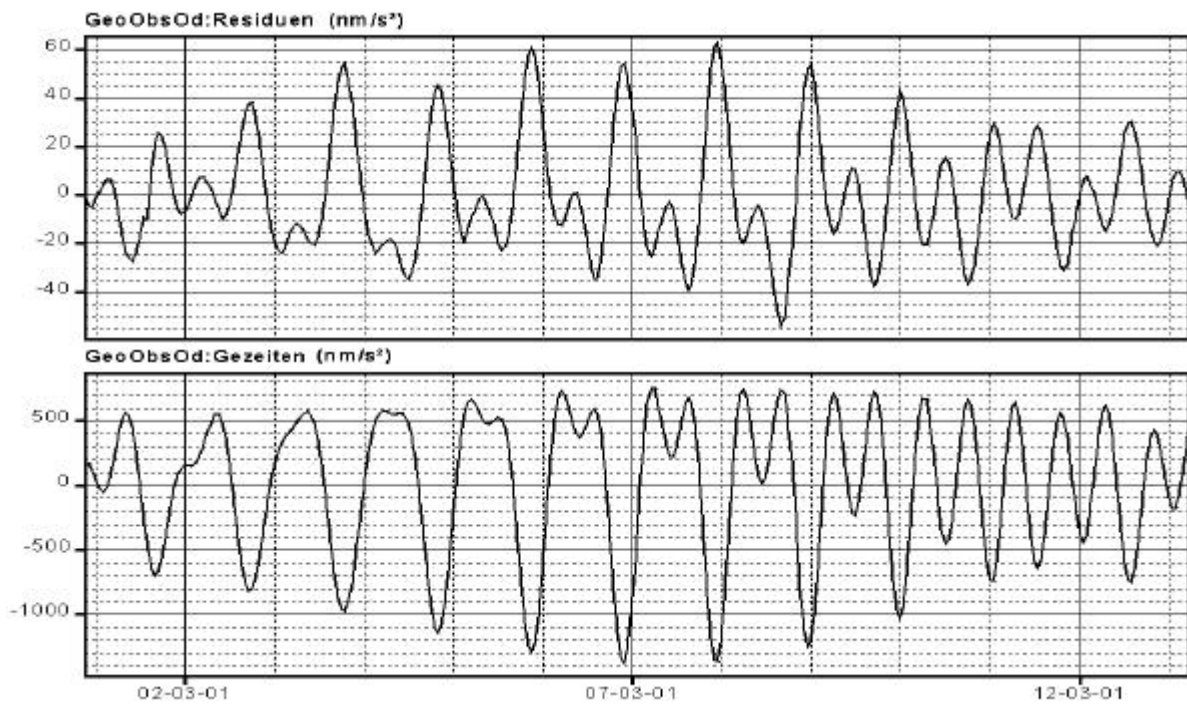


Abbildung F.36: LCR-G-xx1 CPI-Modus, Gegenüberstellung von Residuen und Gezeiten - Beispiel für Gegenläufigkeit

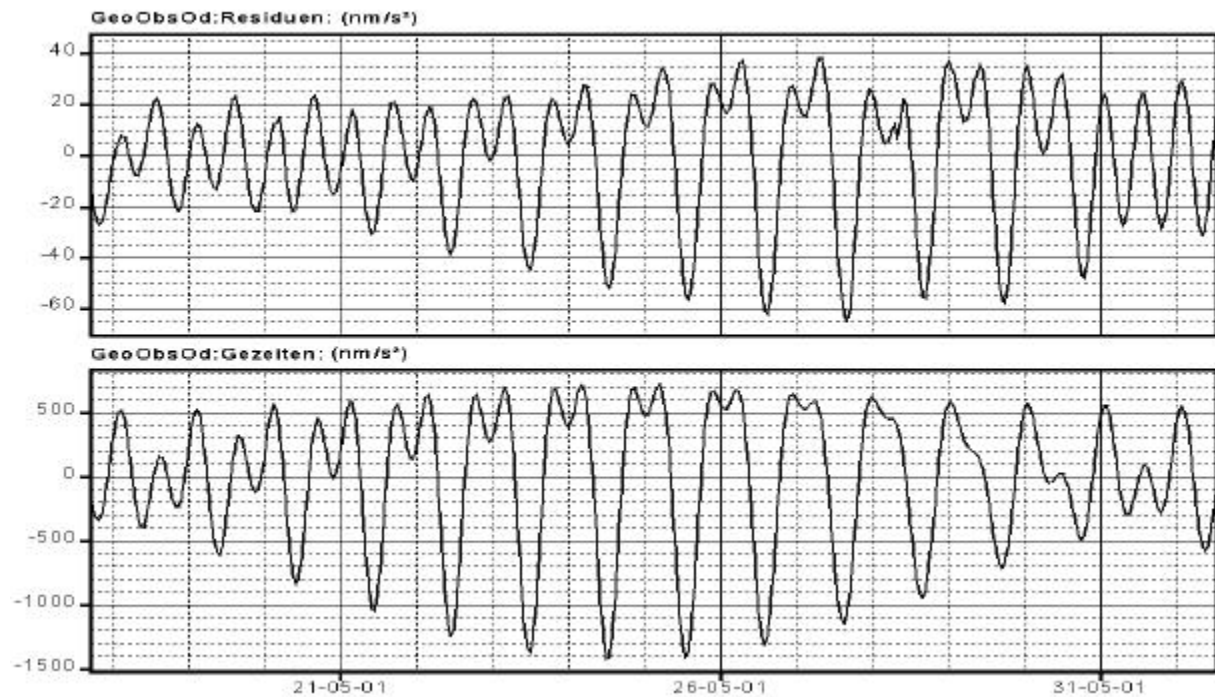


Abbildung F.37: LCR-G-xx1 CPI-Modus, Gegenüberstellung von Residuen und Gezeiten - Beispiel für Parallel-Läufigkeit

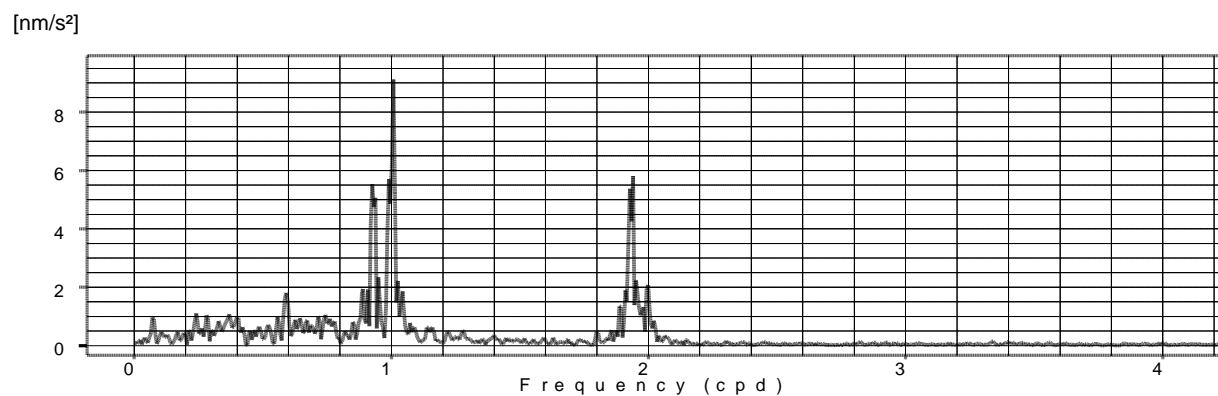


Abbildung F.38: LCR-G-xx1 CPI-Modus, Residuenspektrum

2.6 Die Korrelation zwischen Residuen- und Gezeitenverlauf bei der Registrierung im Rückkopplungsmodus-Modus

Stellt man für einen Vergleich mit den im vorhergehenden Abschnitt gezeigten Ergebnissen den Verlauf der Residuen, der sich nach der Analyse der im *Rückkopplungsmodus* registrierten Daten ergibt (Abschnitt F2.4), dem Gezeitenverlauf gegenüber, so zeigt sich, dass in diesem Falle eine signifikante Korrelation zwischen beiden Zeitreihen nicht auftritt (Abbildung F.39). Ausgeprägte ganz- und halbtägige Periodizitäten in den Residuensignalen sind im Frequenzspektrum in Abbildung F.40 nicht zu erkennen.

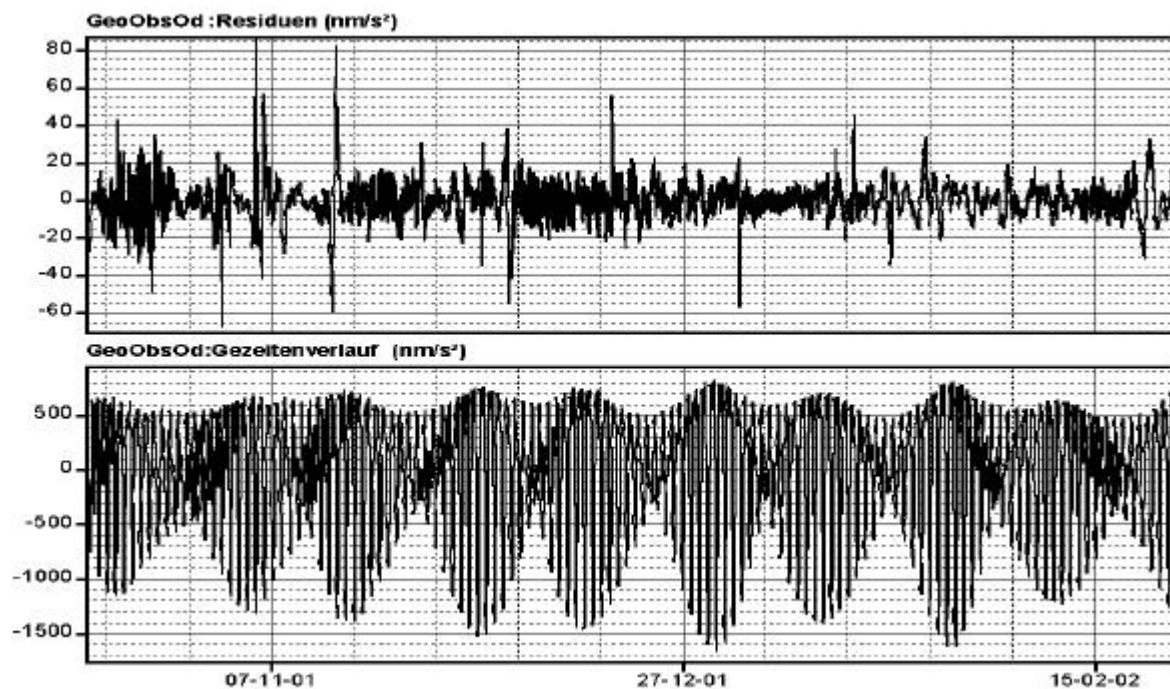


Abbildung F.39: LCR-G-xx1 Rückkopplungsmodus, Gegenüberstellung von Residuen und Gezeiten (Ausschnitt)

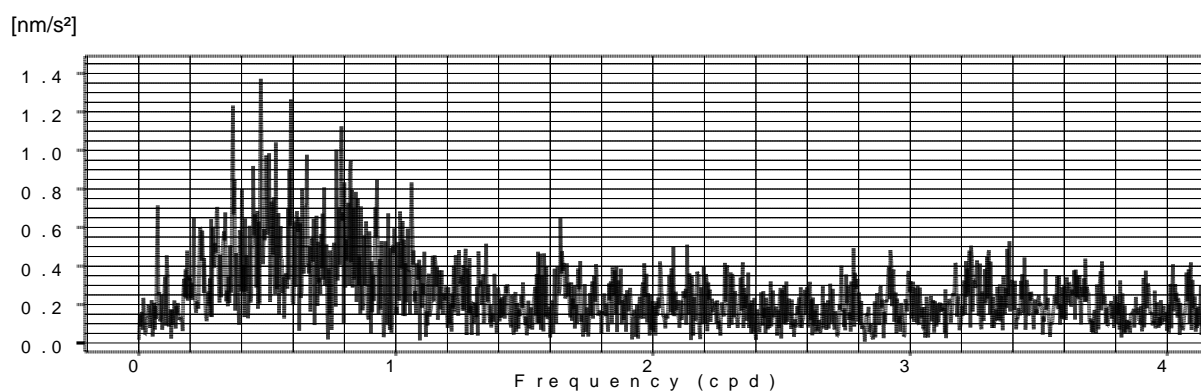


Abbildung F.40: LCR-G-xx1 Rückkopplungsmodus, Residuenspektrum

2.7 Die Bestimmung der bei der Registrierung mit dem Gravimeter LCR-G-xx1 im CPI-Modus auftretenden zeitlichen Änderungen des Registriermaßstabs

2.7.1 Allgemeines

Wie bereits an anderer Stelle gesagt wurde, bestimmt man Änderungen des Registriermaßstabs zweckmäßigerweise durch regelmäßige Relativeichungen, z.B. mit Hilfe von Spindelverstellungen (siehe Abschnitt D6.1). Im vorliegenden Falle bestand der Zweck der Registrierungen jedoch in der detaillierten Untersuchung des zeitlichen Verhaltens des gravimetrischen Sensors nach der Reparatur durch den Hersteller im Jahre 1999. Diese Untersuchungen wurden für erforderlich gehalten, weil bei analogen Proberegistrierungen im Jahre 2000 zunächst weiterhin sporadische Signalstörungen festgestellt worden waren, die als Wirkungen mechanischer Stabilisierungsvorgänge interpretiert wurden. Erst gegen Ende des Jahres 2000 schienen diese möglichen Stabilisierungseffekte hinreichend abgeklungen zu sein. Im Hinblick auf den genannten Zweck wurde im Registrierzeitraum auf regelmäßige Relativeichungen verzichtet, um den Zustand des Gravimeters möglichst wenig zu beeinflussen. Es wurden daher nach Bedarf lediglich kleinere Driftkorrekturen ausgeführt.

Die Registrierungen im CPI-Modus umfassen den Zeitraum vom 27.01.2001 bis zum 23.06.2001 mit 147 Beobachtungstagen (vgl. Abschnitt F2.3).

2.7.2 Die Nutzung des Residuensignals für die Bestimmung zeitlicher Maßstabsänderungen

Die gezeigten deutlichen Korrelationen zwischen dem Verlauf der Residuensignale und dem Verlauf der Gezeiten signale (z. B. Abbildung F.36 und Abbildung F.37) legen es nahe, maßstabsunabhängige *Signalverhältnisse* zu bilden. Deren zeitlicher Verlauf ergäbe dann auf der Grundlage eines linearen Regressionsansatzes den zeitlichen Verlauf der Änderungen des Registriermaßstabs.

2.7.3 Das Problem der Residuenstruktur

In der nachfolgenden Abbildung F.41 sowie auch in der vorhergehenden Abbildung F.36 und Abbildung F.37 ist zu erkennen, dass zwar die Strukturen des Residuenverlaufs und des Gezeitenverlaufs deutlich korreliert sind, aber mit mehr oder weniger starken Abweichungen von der strengen Kongruenz der beiden zugeordneten Zeitreihen. Diese Abweichungen können als Wirkungen bestimmter Eigenschaften des gravimetrischen Sensors interpretiert werden, nahe liegend als mögliche Wirkungen elastischer Hystereseeffekte und Einlaufvorgänge (siehe auch Abschnitt F1.2).

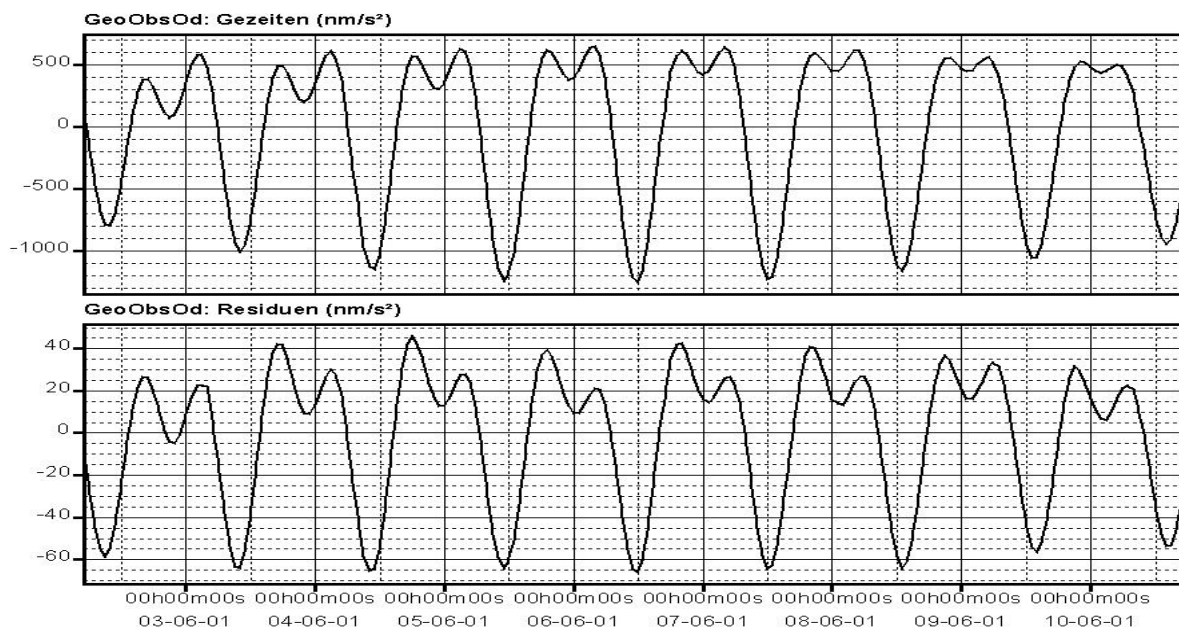


Abbildung F.41: Abweichungen vom kongruenten Verlauf der Residuen und Gezeiten bei Gravimeter LCR-G-xx1CPI

Diese offensichtliche Komplexität der Strukturen des typischen Residuenverlaufs lässt bereits erkennen, dass eine strenge funktionale Verknüpfung der Zeitreihen der Residuen und der Gezeiten, falls überhaupt, nur schwerlich zu erreichen sein wird.

2.7.4 Regressionsberechnung mit Hilfe von Zeitfenstern

Die zeitlichen Änderungen der Registrierempfindlichkeit wurden aus den genannten Gründen über die Bestimmung des linearen Regressionskoeffizienten zwischen Residuen und Gezeiten in aufeinander folgenden Zeitfenstern ermittelt. Da hinsichtlich einer optimalen Fensterweite keinerlei Informationen vorlagen, wurden die Regressionskoeffizienten für Fensterweiten von 29h, 50h, 75h, 100h und 125h berechnet (vgl. zur Wahl der Zeitfenster auch Abschnitt E8.4.3).

Bei der Beurteilung der Auswirkungen unterschiedlicher Fensterweiten auf das Ergebnis der Bestimmungen der zeitlichen Variationen des Registriermaßstabs und damit auf die Analyseergebnisse ist zu beachten, dass die als Ergebnisse der Gezeitenanalyse gewonnenen Residuen (Modellanpassung) nicht nur von zeitlichen Änderungen des Registriermaßstabs gesteuert werden, sondern dass bekanntermaßen auch andere Effekte unterschiedlicher

Art signifikant wirksam sind oder wirksam sein können. Je geringer die Fensterweite gewählt wird, desto größer ist jener zu erwartende Effekt, dass kurzzeitige Störsignale (welcher Ursache auch immer) den berechneten Regressionskoeffizienten dahingehend verfälschen, dass er nicht mehr nur dominant eine Funktion der gesuchten Änderungen der Registrierempfindlichkeit ist. Je länger andererseits die Fensterweite gewählt wird, desto weniger lassen sich potentielle Feinstrukturen im zeitlichen Verlauf des Registriermaßstabs erkennen. Ob die Länge des Zeitfensters für das Ergebnis der Regressionsberechnung ein kritischer Parameter ist, lässt sich letztlich nur auf dem Wege des Vergleichs der Standardabweichungen der Gewichtseinheit von Gezeitenanalysen feststellen, welche auf Datensätzen beruhen, die auf der Grundlage unterschiedlicher Regressionszeitfenster auf einen einheitlichen Registriermaßstab normiert wurden.

2.7.5 Der zeitliche Verlauf der Regressionskoeffizienten zwischen Residuen und Gezeiten für unterschiedliche Zeitfenster

Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung F.42 bis Abbildung F.46) zeigen den Verlauf der berechneten linearen Regressionskoeffizienten zwischen Residuen und Gezeiten für die gewählten Zeitfenster von 29h, 50h, 75h, 100h und 125h.

Erwartungsgemäß tritt mit zunehmender Fensterweite eine zunehmende Glättung der Strukturen im zeitlichen Verlauf der linearen Regressionskoeffizienten auf. Erkennbar ist außerdem, dass den Regressionskoeffizienten, welche stark von einem lokalen Mittelwert abweichen, nicht durchgängig eine besonders große Standardabweichung zugeordnet ist. Die Schwankungsbreite der Standardabweichungen verringert sich mit zunehmender Fensterweite. Nach dem Kriterium der Homogenität der individuellen Standardabweichungen der berechneten linearen Regressionskoeffizienten sowie des mittleren Betrags dieser Standardabweichungen könnten die für die Fensterweite von 100h erzielten Ergebnisse als die günstigsten eingestuft werden (vergleiche auch den nachfolgenden Abschnitt F2.8 sowie die Untersuchungen zur Bestimmung des Luftdruckregressionskoeffizienten in Abschnitt E8).

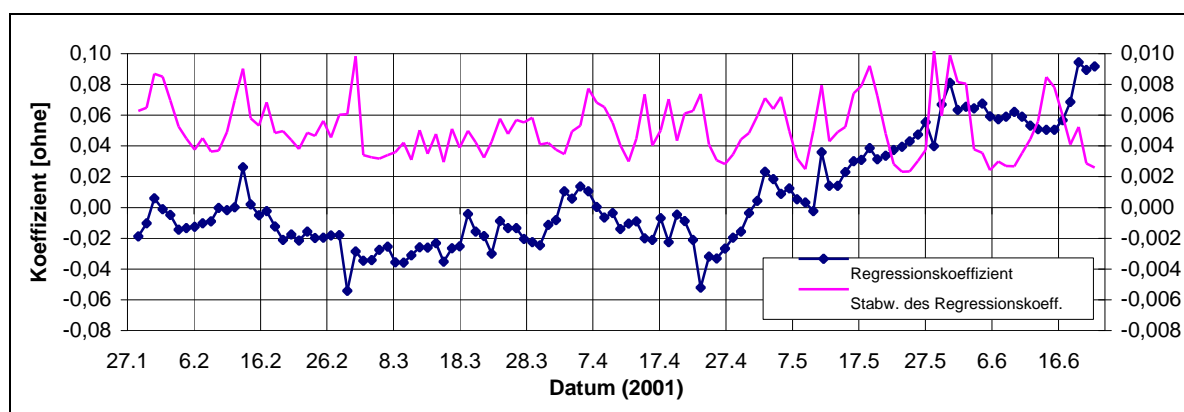


Abbildung F.42: Verlauf des linearen Regressionskoeffizienten zwischen Residuen und Gezeiten LCR-G-xx1CPI (Fensterbreite: 29h)

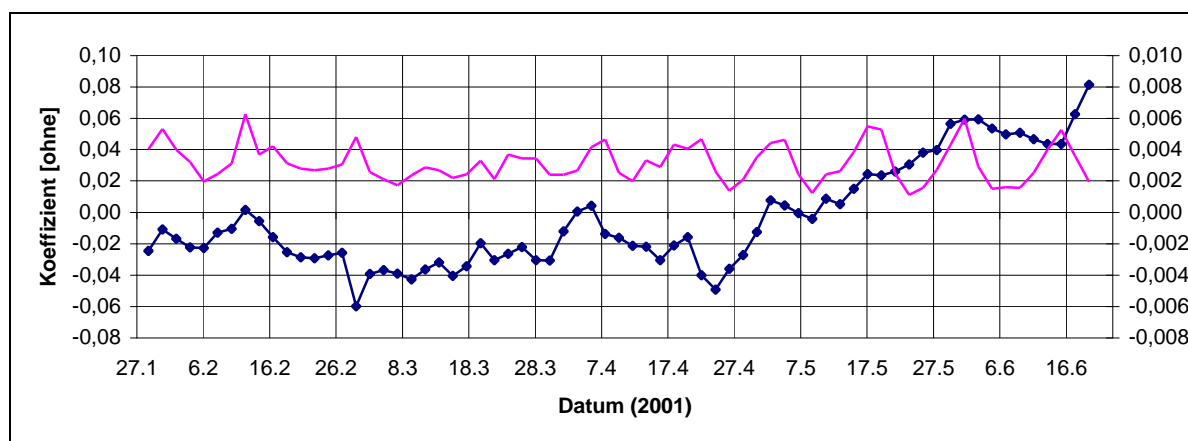


Abbildung F.43: Verlauf des linearen Regressionskoeffizienten zwischen Residuen und Gezeiten LCR-G-xx1CPI (Fensterbreite: 50h)

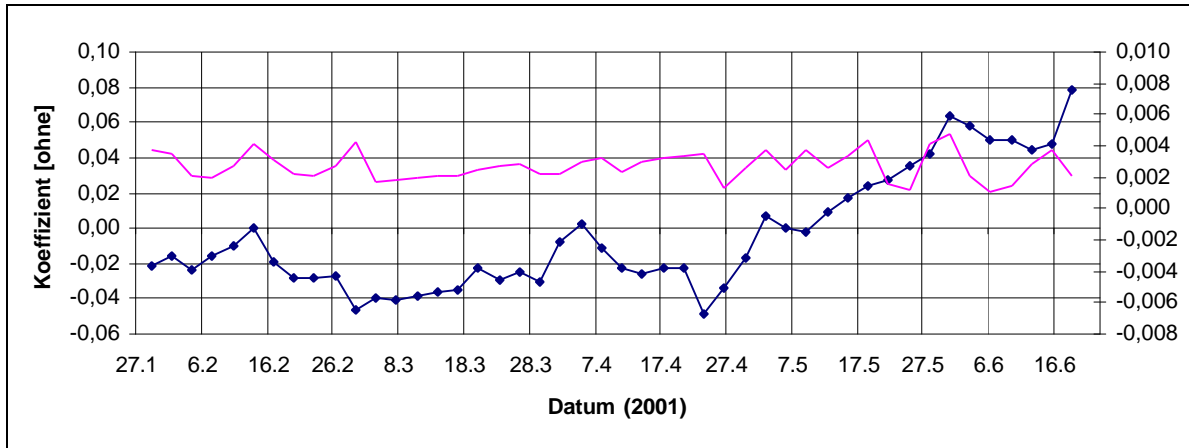


Abbildung F.44: Verlauf des linearen Regressionskoeffizienten zwischen Residuen und Gezeiten LCR-G-xx1CPI (Fensterbreite: 75h)

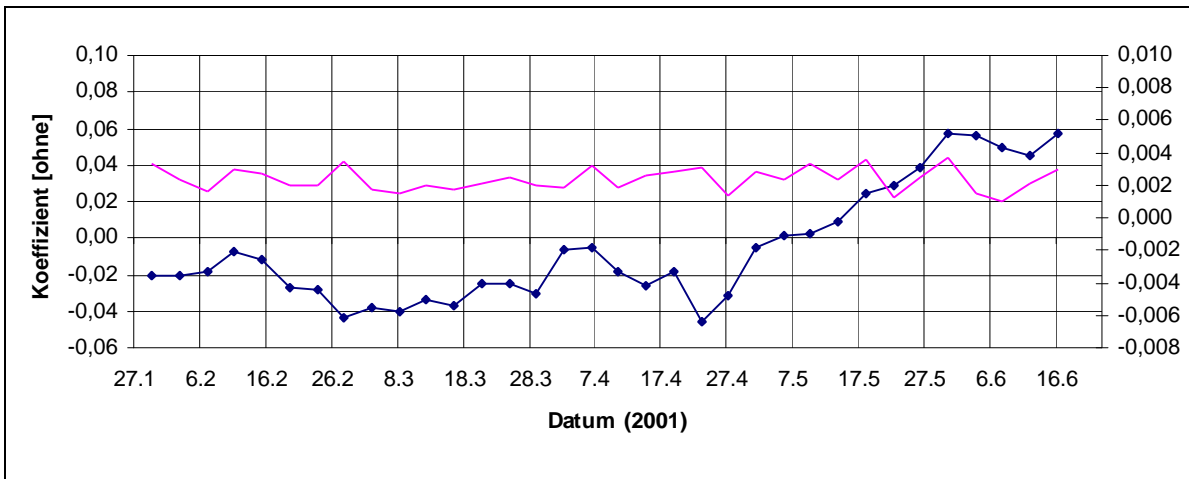


Abbildung F.45: Verlauf des linearen Regressionskoeffizienten zwischen Residuen und Gezeiten LCR-G-xx1CPI (Fensterbreite: 100h)

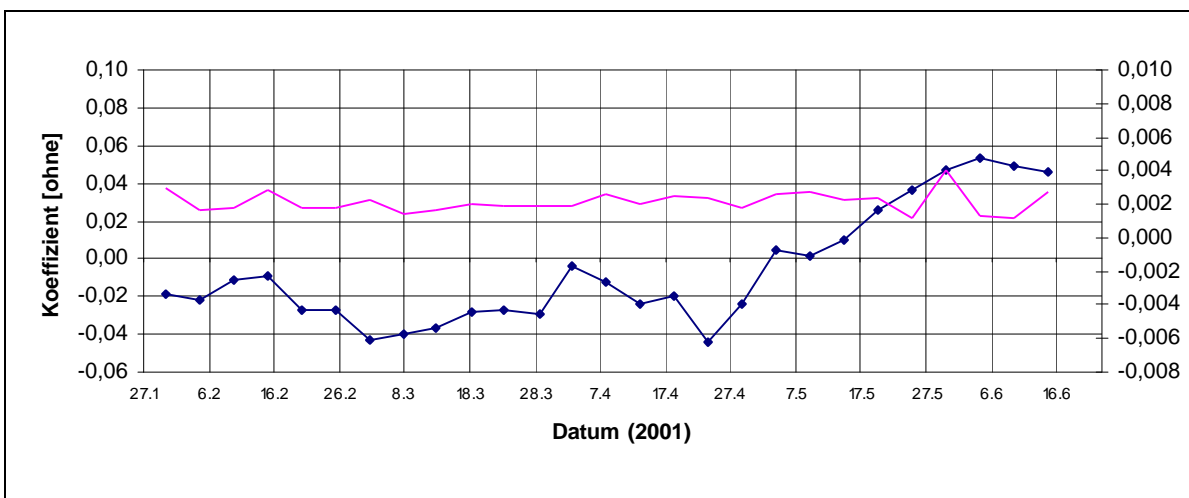


Abbildung F.46: Verlauf des linearen Regressionskoeffizienten zwischen Residuen und Gezeiten LCR-G-xx1CPI (Fensterbreite: 125h)

Die individuellen Maßstabskorrekturfaktoren erhält man (unter Vorzeichenbeachtung) durch Addition der individuellen Regressionskoeffizienten zu dem Wert 1 bzw. durch Subtraktion vom Wert 1. Durch Spindelver-

stellungen erzeugte Signalsprünge, die für die Bestimmung des Registriermaßstabs verwendet werden sollen, sind mit den an den entsprechenden Stellen gültigen Maßstabsfaktoren zu multiplizieren. Die maßstabskorrigierten (normierten) Signalsprünge bilden danach die Grundlage für die Berechnung des endgültigen Registriermaßstabs (des Maßstabsniveaus).

2.7.6 Die Interpolation zwischen den Stützstellen des Registriermaßstabs

Analog zur Maßstabsbestimmung der Registrierdaten des Gravimeters LCR716 (Abschnitt F1.4 und Abbildung F.14) gibt es für die Bestimmung der stündlichen Maßstabswerte wieder die beiden Alternativen:

Es werden durch lineare Interpolation zwischen den Stützstellenwerten der Maßstabskorrekturfaktoren, welche innerhalb der Zeitfenster als konstant angesetzt und der zeitlichen Mitte des jeweiligen Fensters zugeordnet werden, stündliche Zwischenwerte berechnet. Mit diesen Werten werden die ursprünglichen (die Wirkungen von Maßstabsänderungen enthaltenden) Registrierdaten multipliziert. Die neu gebildete Datei ist nun normiert auf einen mehr oder weniger willkürlich gewählten *konstanten* Maßstabsfaktor. Nun werden, wie bereits erwähnt, die Sprunghöhen der durchgeführten relativen Eichungen den Originaldaten entnommen und anschließend mit Hilfe des jeweils zugeordneten Maßstabskorrekturfaktors ebenfalls normiert. Mit Hilfe dieser normierten Sprunghöhen berechnet man die für die Sprungstellen gültigen individuellen Maßstabsfaktoren, deren Mittel für die Umrechnung der maßstabsnormierten Registrierdaten von der Einheit des Registriermaßstabs (hier Volt) in Schwereeinheiten (μGal) verwendet wird. Mit diesen umgeformten Registrierdaten werden anschließend die Gezeitenanalysen gerechnet. Aufgrund der geringen Anzahl der Sprungsignale (siehe vorhergehenden Abschnitt F2.3), welche für die Bestimmung des Maßstabsniveaus zur Verfügung standen, ist im vorliegenden Falle dessen Genauigkeit entsprechend begrenzt, die relative Genauigkeit lässt sich auf etwa 5% abschätzen.

Alternativ lässt sich der zeitliche Verlauf der diskreten Regressionskoeffizienten durch ein ausgleichendes Polynom n . Ordnung approximieren. Dieses Verfahren bereitet jedoch bei einer Begrenzung der Ordnung des Polynoms auf ein sinnvolles Maß insoweit Probleme, als bei dieser Vorgehensweise solche Feinstrukturen in den berechneten Maßstabsvariationen mehr oder weniger verloren gehen können, die aufgrund erkennbarer lokaler Erhaltungstendenzen nicht als zufällig eingestuft werden sollten.

2.8 Die Ergebnisse der Gezeitenanalysen

Auf der Grundlage der gewählten Zeitfenster von 29h, 50h, 75h, 100h und 125h Länge wurden die zeitlichen Änderungen des Registriermaßstabs berechnet und in der zuvor beschriebenen Weise berücksichtigt. Die Ergebnisse der den Zeitfenstern zugeordneten Gezeitenanalysen sind für die Hauptpartialtiden in den nachfolgenden Tabellen (Tabelle F.17 und Tabelle F.18) zusammengestellt. Die stündlichen Werte des Registriermaßstabs wurden einmal durch lineare Interpolation zwischen den Stützstellen bestimmt (in Spalte 1 der Tabellen durch den Zusatz „Linear“ gekennzeichnet), zum andern mit Hilfe eines ausgleichenden Polynoms 6. Ordnung (in Spalte 1 der Tabellen durch den Zusatz „Polynom“ gekennzeichnet).

Die Analysenergebnisse zeigen, dass die wesentliche Verbesserung der Modellanpassung (ähnlich wie bei Gravimeter LCR716) durch den Übergang von einem konstanten zu einem zeitabhängigen Registriermaßstab erfolgt. *Nach* diesem Übergang sind die Gezeitenparameter und ihre zugeordneten Standardabweichungen weitgehend homogen, d.h. sie hängen nur geringfügig von der Wahl des Regressionsfensters und der Wahl des Interpolationsverfahrens ab. Gleiches gilt ab einer Fensterweite von 50h auch für die Standardabweichung der Gewichtseinheit. Eine leichte Systematik ist zu erkennen, wenn man die Gezeitenparameter mit Bezug auf das gewählte Interpolationsverfahren miteinander vergleicht. Ähnlich dem Gravimeter LCR716 scheint auch hier die lineare Interpolation zwischen Stützstellen das etwas günstigere Interpolationsverfahren zu sein. Würde man die Standardabweichung als Kriterium wählen, so könnte man die Variante *100-stündiges Zeitfenster mit linearer Maßstabsinterpolation zwischen Stützstellen* als die geringfügig beste bewerten.

In den Tabellen sind zudem für das ganztägige und das halbtägige Gezeitenband die maximalen Signalhöhen in den Amplitudenspektren der Residuen angegeben. Als Beispiel zeigt die nachfolgende Abbildung F.47 ein repräsentatives Residuenspektrum:

Fenster/Maßstab	S ₁ K ₁	M ₂	O ₁	S ₂	s	Spektrum ₁	Spektrum ₂
ohne zeitliche Maßstabsänderung	1,14335 0,00460	1,19946 0,00333	1,16826 0,00635	1,20895 0,00747	21,691	9,0	6,0
29h/Linear	1,14718 0,00121	1,19468 0,00098	1,16489 0,00166	1,19947 0,00222	10,023	2,4	1,8
29h/Polynom	1,14858 0,00151	1,19494 0,00120	1,16684 0,00208	1,20353 0,00272	8,762	2,6	1,8
50h/Linear	1,14727 0,00114	1,19475 0,00084	1,16414 0,00157	1,19927 0,00190	7,626	2,4	1,8
50h/Polynom	1,14923 0,00142	1,19487 0,00114	1,16748 0,00195	1,20394 0,00260	8,364	2,4	1,8
75h/Linear	1,14768 0,00116	1,19474 0,00080	1,16431 0,00158	1,19974 0,00182	7,412	2,3	1,7
75h/Polynom	1,14953 0,00139	1,19511 0,00112	1,16778 0,00190	1,20433 0,00255	8,201	2,3	1,8
100h/Linear	1,14775 0,00116	1,19476 0,00078	1,16477 0,00157	1,20024 0,00179	7,284	2,2	1,7
100h/Polynom	1,14979 0,00133	1,19522 0,00106	1,16788 0,00181	1,20438 0,00244	7,916	2,2	1,8
125h/Linear	1,14807 0,00124	1,19454 0,00073	1,16509 0,00167	1,20019 0,00167	7,436	2,1	1,6
125h/Polynom	1,14961 0,00136	1,19529 0,00106	1,16767 0,00184	1,20399 0,00242	7,920	2,2	1,7

Tabelle F.17: Zusammenstellung der Analysenergebnisse für die Hauptpartialtiden – Amplitudenverhältnisse

Fenster/Maßstab	S ₁ K ₁	M ₂	O ₁	S ₂	s	Spektrum ₁	Spektrum ₂
ohne zeitliche Maßstabsänderung	-0,9494 0,2306	1,2323 0,1593	-0,8727 0,3113	-1,1404 0,3542	21,691	9,0	6,0
29h/Linear	-0,9399 0,0603	1,1638 0,0471	-0,8585 0,0816	-0,3424 0,1059	10,023	2,4	1,8
29h/Polynom	-0,9109 0,0755	1,2425 0,0577	-0,8970 0,1020	-0,5142 0,1293	8,762	2,6	1,8
50h/Linear	-0,9322 0,0571	1,1778 0,0402	-0,8723 0,0770	-0,3656 0,0910	7,626	2,4	1,8
50h/Polynom	-0,9007 0,0709	1,2523 0,0549	-0,9230 0,0955	-0,4817 0,1236	8,364	2,4	1,8
75h/Linear	-0,9248 0,0579	1,1795 0,0383	-0,8937 0,0779	-0,3276 0,0869	7,412	2,3	1,7
75h/Polynom	-0,8911 0,0692	1,2495 0,0538	-0,9422 0,0929	-0,4618 0,1215	8,201	2,3	1,8
100h/Linear	-0,9027 0,0577	1,1862 0,0375	-0,9265 0,0771	-0,3218 0,0854	7,284	2,2	1,7
100h/Polynom	-0,8724 0,0665	1,1298 0,0510	-0,9791 0,0888	-0,4156 0,1159	7,916	2,2	1,8
125h/Linear	-0,8915 0,0617	1,2005 0,0348	-0,9528 0,0821	-0,3517 0,0795	7,436	2,1	1,6
125h/Polynom	-0,8583 0,0678	1,2489 0,0506	-1,0008 0,0901	-0,4050 0,1152	7,920	2,2	1,7

Tabelle F.18: Zusammenstellung der Analysenergebnisse für die Hauptpartialtiden – Phasenverschiebungen [°]

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Residuen im Bereich der ganztägigen und halbtägigen Gezeiten weiterhin Periodizitäten enthalten. Naheliegender ist es, diesen Sachverhalt einer nicht vollständigen Elimination der Wirkungen zeitlicher Änderungen des Registriermaßstabs zuzuordnen (siehe Abschnitt F2.7.3)

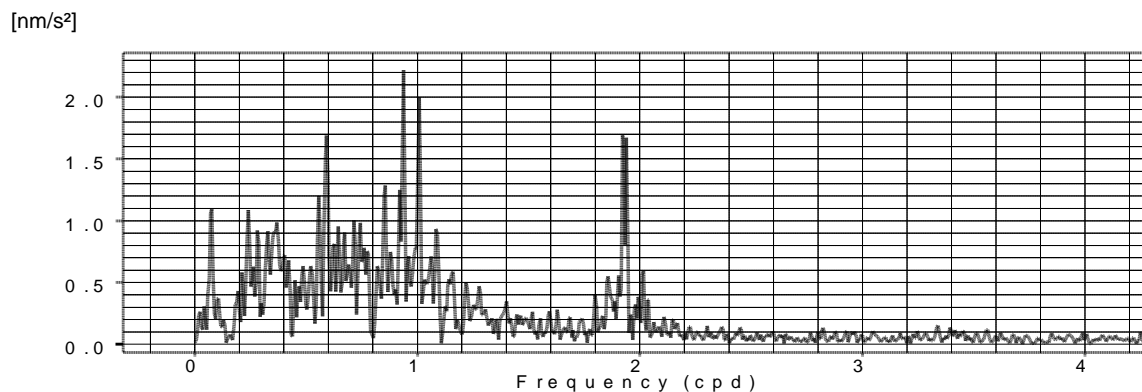


Abbildung F.47: Amplitudenspektrum der Residuen - 100-stündiges Zeitfenster mit linearer Maßstabsinterpolation zwischen Stützstellen

2.9 Möglichkeit zur Verbesserung der Maßstabsbestimmung durch Iteration

Stellt man nun erneut den Verlauf der Residuen dem Gezeitenverlauf gegenüber, so sind (mit Bezug auf Abbildung F.47 erwartungsgemäß) weiterhin Korrelationen zu erkennen, allerdings nunmehr auf einem deutlich niedrigeren Signalniveau der Residuen:

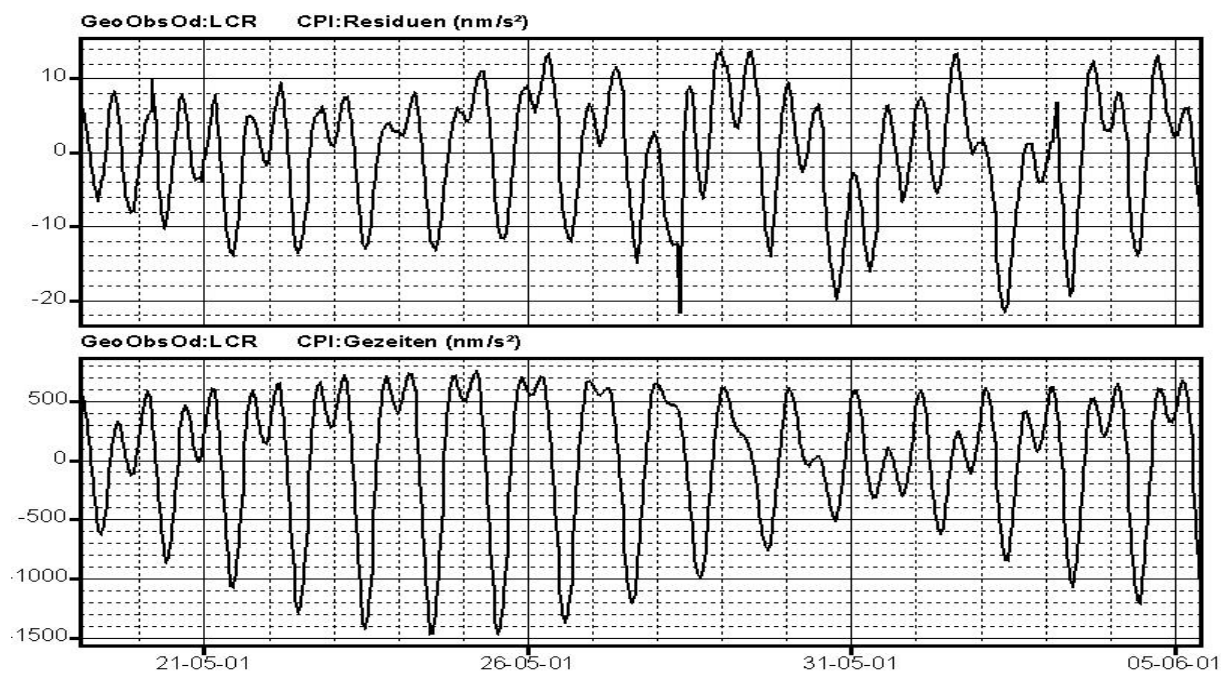


Abbildung F.48: Gegenüberstellung von Residuen und Gezeiten bei Gravimeter LCR-G-xx1CPI

Man könnte nun erneut das zuvor beschriebene Verfahren anwenden und würde dann auf iterative Weise die Wirkungen von Änderungen der Registrierempfindlichkeit weiter verringern. Auf solche weiterführenden Untersuchungen wird aber im Hinblick auf die Aufgabenstellung hier verzichtet.

2.10 Gegenüberstellungen

Die vorläufigen Sollwerte der Amplitudenquotienten der großen Hauptpartialtiden (siehe Abschnitt D8) betragen für

O_1 1,1476 K_1 1,1342 M_2 1,1869.

Aus Tabelle F.17 (Analysen 4 bis 11) erhält man für das Gravimeter LCR-G-xx1CPI die Werte

O_1 1,165 K_1 1,148 M_2 1,195

Bildet man die entsprechenden Verhältniszahlen, so ergeben sich die folgenden Faktoren für die Maßstabsdifferenzen:

O_1 1,015 K_1 1,012 M_2 1,007.

Für das Gravimeter LCR716CPI wurden als Maßstabsverhältnisse ermittelt (siehe Abschnitt F1.9.6)

O_1 1,015 K_1 1,013 M_2 1,006.

Bemerkenswerterweise stimmen die Sätze der Maßstabsverhältnisse für beide im CPI-Modus betriebenen Gravimeter praktisch überein. Diese Tatsache darf jedoch im Hinblick auf die Unsicherheiten der Bestimmung der einzelnen Maßstabsniveaus nicht überbewertet werden. Wesentlich ist vielmehr, dass bei beiden Gravimetern offensichtlich ein Unterschied des Registriermaßstabs für die ganztägigen und halbtägigen Schwerevariationen in der Größenordnung von 1% auftritt.

Durch Hinzufügen des Luftdruckkanals ändern sich die Ergebnisse der Gezeitenanalysen hinsichtlich der berechneten Gezeitenparameter nur geringfügig gegenüber den in der Tabelle F.17 und in der Tabelle F.18 zusammengestellten Werten. Erwartungsgemäß bildet die Partialtide S_2 die Ausnahme, für die durch die Analyse mit Luftdruckkanal die Wirkung der halbtäglichen Luftdruckvariation eliminiert wurde. Festzustellen ist eine deutliche Verringerung der Standardabweichung der Gewichtseinheit (Modellanpassung). Der berechnete Luftdruck-Regressionskoeffizient liegt bei $0,5\mu\text{Gal}/\text{mbar}$. Die Untersuchung der im Rückkopplungsmodus gewonnenen Daten führte zu einem Regressionskoeffizienten zwischen $0,3$ und $0,4\mu\text{Gal}/\text{mbar}$ (siehe Abschnitt E8.4). Berücksichtigt man die Verfahrensunsicherheiten bei der Bestimmung des Regressionskoeffizienten, so kann eine gute Übereinstimmung festgestellt werden.

Program ANALYZE, version 3.30 960908				File: LCR-G-XX1CP30			
LaCoste GRAVIMETER G NR: LCR-G-xx1 CPI-Modus							
20010129190000...20010616 70000							
Number of recorded days in total : 137.54							
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.							
adjusted tidal parameters :							
from	to	wave	ampl.	ampl.fac.	stdv.	ph. lead	stdv.
[cpd]	[cpd]	[nm/s**2]				[deg]	[deg]
0.911391	0.947991	O1	354.9985	1.16506	0.00137	-1.0079	0.0678
0.981855	0.998631	P1	161.7512	1.14087	0.00306	0.2718	0.1538
0.998632	1.023622	S1K1	492.2520	1.14869	0.00102	-0.9360	0.0506
1.914129	1.950419	M2	361.0656	1.19496	0.00099	1.1782	0.0473
1.984283	2.002738	S2	168.2204	1.19662	0.00227	-0.6456	0.1093
2.002739	2.451943	K2	46.7847	1.22428	0.00864	1.9409	0.4043
Adjusted meteorological or hydrological parameters:							
no. regr.coeff.	stdv.	parameter	unit				
1	5.32426	0.12350	airpress.	nm/s**2 / hPa			
Standard deviation of weight unit:				5.805	nm/s**2		

Tabelle F.19: Ergebnisse der Gezeitenanalysen mit zusätzlichem Kanal für den stündlichen Luftdruck, 100-stündiges Zeitfenster mit linearer Maßstabsinterpolation zwischen den Stützstellen

Bemerkenswert ist die mit $s=5,8\text{nm}/\text{s}^2$ gute Modellanpassung, die um den Faktor 2 besser ist, als nach der Analyse der im Rückkopplungsmodus beobachteten Daten gewonnenen Modellanpassung ($11,0\text{nm}/\text{s}^2$, siehe Tabelle F.16).

Das Spektrum der Residuen hat sich im ganztägigen und halbtägigen Gezeitenband durch die Berücksichtigung der Luftdruckvariationen allerdings nicht wesentlich geändert. Eine Verbesserung kann allerdings für den Frequenzbereich $<1\text{Cpd}$ festgestellt werden.

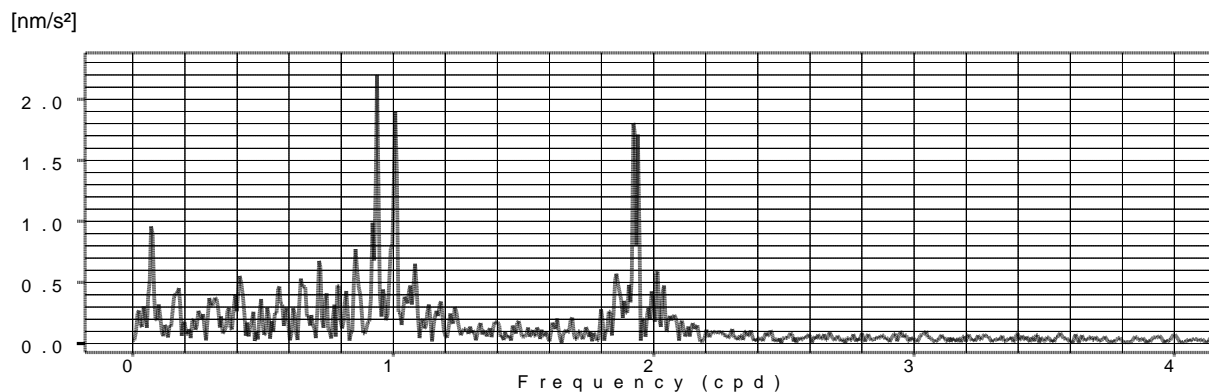


Abbildung F.49: Amplitudenspektrum der Residuen, 100-stündiges Zeitfenster mit linearer Maßstabsinterpolation zwischen den Stützstellen, zusätzlicher Kanal für den stündlichen Luftdruck

Das Frequenzspektrum zeigt, dass der vorgenannte Unterschied des Registriermaßstabs für die ganztägigen und halbtägigen Schwerevariationen schwerlich als Einfluss der instrumentellen Übertragungsfunktion erklärt werden kann, denn diese Funktion bewirkt lediglich Amplitudenverzerrungen, überträgt aber nicht Periodizitäten in den Verlauf der Residuen. Die praktische Identität der Verhältnisse der Registriermaßstäbe für beide untersuchten Gravimeter führt ferner zu dem Schluss, dass im Falle des Gravimeters LCR716CPI die mangelnde Druckdichtigkeit des inneren Gravimetergehäuses (siehe Abschnitt F1.3) den genannten Effekt nicht hervorgerufen haben kann.

Eine über allgemeine Aussagen hinausgehende metrologische Erklärung würde eingehende und zielgerichtete Untersuchungen erfordern, die im Hinblick auf die Aufgabenstellung hier nicht durchgeführt werden.

2.11 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass astasierte Gravimeters des Typs LaCoste-Romberg im allgemeinen wohl nur bedingt im CPI-Modus für Zwecke gravimetrischer Gezeitenbeobachtungen eingesetzt werden können. Das Problem besteht weniger in der statistischen Auflösung der zu berechnenden Partialtidenparameter (durch entsprechende Verlängerung der Registrierzeiträume lässt sich die Auflösung leicht verbessern) als vielmehr in den Wirkungen nicht erfasster zeitlicher Änderungen des Registriermaßstabs. Diese Wirkungen sind – jedenfalls bei den untersuchten Gravimetern LCR716CPI und LCR-G-xx1CPI – in zunächst nicht erklärbarer Weise im ganztägigen und im halbtägigen Gezeitenband signifikant unterschiedlich. Wenn durch geeignete, z.B. iterative, Maßnahmen erreicht werden könnte, dass nach der Gezeitenanalyse die bisher in den Residuen zu erkennenden ganz- und halbtägigen Periodizitäten hinsichtlich ihrer Amplituden das allgemeine Rauschniveau der Nachbarschaft nicht mehr übersteigen, könnte mit einem Verschwinden des genannten Effektes gerechnet werden.

G Die gravimetrischen Gezeitenparameter für die Station GeoObservatorium Odendorf

1 Zielsetzungen

Die Zielsetzungen der weiterführenden Beobachtungen und Untersuchungen basieren unter anderem auf den bisher durchgeführten Arbeiten, die hinsichtlich einiger, für die Weiterführungen wesentlicher Ergebnisse kurz zusammengefasst werden.

Es war zunächst ermittelt worden, ob die lokalen geologischen und die damit verknüpften mikroseismischen Bedingungen im Bereich des GeoObservatoriums Odendorf überhaupt eine sinnvolle hochaufgelöste und signifikante Registrierung gravimetrischer Signale zulassen. Im Vergleich zu den Beobachtungsergebnissen in benachbarten Observatorien, die in festem Gestein errichtet wurden (Walferdange und Membach in der Eifel, Schiltach im Schwarzwald), ist der in Odendorf auftretende gravimetrische Rauschpegel erwartungsgemäß höher, jedoch in einem insoweit begrenztem Maße, dass hochaufgelöste Gezeitenparameter bei entsprechender Verlängerung des Registrierzeitraum durchaus bestimmt werden können.

Aus dem Vergleich der Ergebnisse der in der Station Odendorf mit Federgravimetern unterschiedlichen Typs ausgeführten Registrierungen lässt sich eine im Prinzip *erreichbare* Maßstabsgenauigkeit ableiten, die bei den Amplitudenquotienten der gravimetrischen Hauptpartialtiden zu einer Maßstabssicherheit im Bereich von Promille führt; dies obwohl bei Anwendung der Methode ETERNA die ermittelten statistischen Signifikanzbeträge der gewonnenen Maßstabsfaktoren den angestrebten Wert von relativ $<1\%$ bei den Hauptpartialtiden teilweise mehr oder weniger deutlich überschreitet. Daher diene eine sorgfältige Dokumentation der durchgeführten Berechnungen und deren instrumenteller Grundlagen der Vorbereitung für notwendige Wiederholungen, unter anderem der experimentellen Bestimmungen des Maßstabs der mit dem Gravimeter Askania GS15 Nr.206 registrierten Daten.

Bei längeren Beobachtungszeiträumen ist der Frage der zeitlichen Konstanz eines in einer begrenzten Zeitspanne ermittelten Registriermaßstabs besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Es liegt nahe, mögliche zeitliche Änderungen des Registriermaßstabs durch entsprechende zeitlich wiederholte Maßstabsbestimmungen (z. B. mit Hilfe definierter Verstellungen der Messspindel des Gravimeters) zu ermitteln. Bei einigen Gravimetern stößt dies jedoch dann auf Schwierigkeiten, wenn die relative Genauigkeit einer einzelnen Maßstabsbestimmung zu gering ist, so dass eine größere Anzahl von Wiederholungen erforderlich ist, welche den Registriervorgang als Störungen beeinträchtigen. Das Problem ließe sich andererseits durch entsprechende Vergrößerung der Sprunghöhen lösen. Damit verbunden wäre jedoch, dass das gravimetrische Signal den eingestellten Registrierbereich verlässt: Genau dieses jedoch sollte vermieden werden, da die Gültigkeit der Hypothese voraussetzen wäre, dass sich das Verhältnis von Spindelverstellung und zugeordneter Sprunghöhe des Registriersignals über einen größeren Messbereich nicht relevant ändert. Dies wiederum lässt sich aus Gründen eben jener begrenzten relativen Genauigkeit einer einzelnen Maßstabsbestimmung kaum feststellen. So wurde die zeitliche Maßstabstabilität a-posteriori mit Hilfe sukzessiver Zweimonatsanalysen der Beobachtungsdaten ermittelt. Beim Gravimeter A206 zeigte sich über den Beobachtungszeitraum von 762 Tagen eine als bedingt signifikant einzustufende zeitliche Änderung des Maßstabsfaktors.

Daraus ergab sich die Frage, wie sich zeitliche Änderungen des Maßstabs einer gravimetrischen Registrierung ohne die Unsicherheiten, die sich zwangsläufig bei der Gezeitenanalyse kurzer Zeitreihen ergeben, im einzelnen feststellen lassen und auf welche unterschiedliche Weise sie berücksichtigt werden können. Es wurden daher Zeitreihen untersucht, die mit astasierten Gravimetern im Ausschlagmodus gewonnen wurden. Wie in Abschnitt F1.10 dargelegt ist, treten bei solchen Gravimetern zeitliche Änderungen des Astasierungsfaktors als Funktion des Astasierungswinkels δ auf und damit auch Änderungen des Wertes *Sensorausschlag pro Schwereänderung*, folglich bei angeschlossenen Aufzeichnungssystemen zeitliche Änderungen des Registriermaßstabs. Erfahrungsgemäß sind solche Änderungen in bestimmten Zeiträumen relativ groß, so dass sich mit astasierten Gravimetern im Ausschlagmodus beobachtete Zeitreihen besonders gut für Untersuchungen der genannten Art eignen, da sich die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Elimination von zeitabhängigen Maßstabsänderungen bei großen Effekten leichter feststellen lässt als bei schwachen Effekten. Bei schwachen zeitlichen Maßstabsänderungen tritt im übrigen das Problem auf, diese überhaupt erst einmal zu erkennen; danach bestehen, wie gezeigt werden konnte, durchaus wirkungsvolle Möglichkeiten für die Berücksichtigung dieser Effekte.

Signalvariationen in beobachteten gravimetrischen Zeitreihen, welche durch das mathematische Modell, das einem Auswertalgorithmus zugrunde liegt, nicht erfasst werden, bewirken Fehler in der Modellanpassung. Dies gilt bei Gezeitenanalysen in besonderem Maße für die Wirkungen luftdruckinduzierter Schwerevariationen. Gibt man im Programmsystem ETERNA parallel zu den Schweredaten die zugeordneten Werte des lokalen Luftdruckverlaufs ein, so wird neben den Gezeitenparametern auch ein mittlerer linearer Luftdruckregressionskoeffizient berechnet. Es wurde am Beispiel der Registrierdaten der Gravimeter LCR-G-xx1F und A206 gezeigt, dass

das Berechnungsergebnis offensichtlich nicht unerheblich von auftretenden systematischen Strukturen in den Beobachtungssignalen abhängt, welche das Gezeitensignal überlagern und die durch das verwendete Tiefpassfilter nicht hinreichend eliminiert oder möglicherweise sogar hervorgerufen werden. Durch alternative Ansätze zur Berücksichtigung der Wirkungen des lokalen atmosphärischen Luftdrucks wurde versucht, das Regressionsmodell (auch hinsichtlich seiner physikalischen Signifikanz) zu verbessern. Die Berücksichtigung des Luftdruckeffekts in den gravimetrischen Registrierdaten führt bei der Gezeitenanalyse im allgemeinen zu einer Verbesserung der Modellanpassung. Es ist allerdings zu beachten, dass das Luftdrucksignal eine Periodizität an der Stelle $30^\circ/\text{h}$ (S_2) aufweist, dessen zugeordnete gravitative Wirkung im Rahmen der Zweikanalanalyse durch die generelle Elimination der luftdruckinduzierten Signale mit beseitigt wird. Als Folge dessen verringert sich der Amplitudenquotient der Partialtide S_2 allerdings um lediglich 3,3% (Gravimeter LCR-G-xx1F), entsprechend einer Amplitudenänderung von etwa $0,06\mu\text{Gal}$. Eine relativ deutliche Differenz tritt hingegen bei der Phasenverschiebung auf: Sie verändert sich von $0^\circ,8$ nach $0^\circ,5$ (ebenfalls Gravimeter LCR-G-xx1F), also um etwa $0^\circ,3$ entsprechend einer Zeitverschiebung von etwa 35 Sekunden, d.h. die atmosphärische Partialtide S_2 ist gegenüber dem gravimetrischen Hauptsignal phasenverschoben. Die angegebenen Beträge sind, da sie sich ausschließlich auf die Beobachtungen eines Gravimeter beziehen, selbstverständlich lediglich vorläufige Werte.

Insbesondere zur Phasenbestimmung der Partialtiden ist die hinreichend genaue Kenntnis der instrumentellen Übertragungsfunktion von Bedeutung. Während für die eingesetzten Messsysteme die *Amplitudenverzerrung* bereits bei einer Frequenz des Eingangssignals von $120^\circ/\text{h}$ weniger als 10^{-5} beträgt und damit im Bereich der Gezeitenfrequenzen (halbtägiges Band $30^\circ/\text{h}$) praktisch keine Rolle spielt, gilt dies nicht für die *Verzögerung* des Ausgangssignals gegenüber dem Eingangssignal. Ein leistungsfähiges und bewährtes Verfahren zur Bestimmung der instrumentellen Übertragungsfunktion beruht auf der Eingabe eines Rechtecksignals und der Ableitung der Parameter der Übertragungsfunktion aus dem Verlauf des Ausgangssignals. Durchgeführte Untersuchungen zeigten, dass das Ergebnis hinsichtlich des Signalnachlaufs erheblich von dem Verhältnis des Rauschpegels des Registrierersignals zur Sprunghöhe und von der Datenlänge abhängt.

Entsprechend der Aufgabenstellung ist ein wesentliches Ziel der weiterführenden gravimetrischen Beobachtungen und Auswertungen die Bestimmung der *Gezeitenparameter* für die Station GeoObservatorium mit einer Genauigkeit, welche es ermöglicht, aus diesen Parametern den zeitlichen Verlauf der gravimetrischen Gezeiten hinsichtlich des Maßstabes mit einer relativen Genauigkeit von 1% und hinsichtlich der Zeitskala mit einer Genauigkeit von etwa 1 Sekunde abzuleiten.

Zur Verbesserung der Maßstabssicherheit der mit dem *Gravimeter A206* bisher gewonnenen Ergebnisse ist es erforderlich, im Rahmen des sich an die bisherigen Beobachtungen anschließenden längeren Beobachtungszeitraums, Neubestimmungen des Registriermaßstabes durchzuführen, wobei entsprechend der Vorgabe eine relative Genauigkeit von mindestens 1% erzielt werden muss. Auf der Grundlage weiterer Untersuchungen soll dann versucht werden, erneut mögliche *zeitliche Änderungen* des Registriermaßstabes zu bestimmen und gegebenenfalls zu berücksichtigen. Abschließend sollen auch die bisher ausgeführten Registrierungen hinsichtlich ihres Maßstabes in geeigneter Weise korrigiert und mit den neu gewonnenen Daten zusammengefügt werden. Dieser Datensatz eines nunmehr kohärenten Registriermaßstabes bildet dann die Grundlage für eine zunächst abschließende Gesamtanalyse.

Parallel zu den genannten weiterführenden Beobachtungen mit dem Gravimeter Askania GS15 Nr.206 sollen für einen unbegrenzten Zeitraum Registrierungen mit einem zusätzlichen Gravimeter begonnen werden, das seit März 2003 zur Verfügung steht. Es handelt sich um das Gravimeter *Askania GS25 Nr.233*, das mit einer elektromagnetischen Eicheinrichtung ausgerüstet ist, welche in beliebigen Zeitintervallen den jeweils aktuellen Registriermaßstab bzw. dessen zeitliche Änderungen ebenso zu bestimmen ermöglicht, wie die Stabilität der instrumentellen Übertragungsfunktion.

Das bisher für die Gezeitenanalyse angewandte Konzept der relativen schwachen *numerischen Filterung* (Pertz57) der registrierten Daten soll zunächst beibehalten werden, da es weiterhin als sinnvoll angesehen wird, über den zeitlichen Verlauf der Residuen Kenntnisse hinsichtlich bestehender kurzzeitiger Signalstrukturen zu gewinnen. Erst bei der Bildung der Endergebnisse der Gezeitenanalysen soll auf einen wirksameren (und zeitlich längeren) numerischen Tiefpassfilter übergegangen werden.

Aus der Vielzahl der berechneten Parametersätze ist derjenige auszuwählen, der nach metrologischen Gesichtspunkten die gravimetrische Gezeitenparameter enthält, die für die Station GeoObservatorium Odendorf zur Zeit als Referenzwerte verwendet werden können. Diese *Referenzwerte* für die Amplitudenquotienten und Phasenverschiebungen sollen mit zugeordneten Modellwerten, die auf dem Erdmodell Dehant-Defraigne-Wahr und unterschiedlichen Modellen der Meeresgezeiten beruhen, verglichen werden. Die Abweichungen zwischen den aus den gravimetrischen Beobachtungen abgeleiteten Gezeitenparametern und den Modellwerten enthalten alternativ Informationen über die Güte der in der Station Odendorf bestimmten Parameter und/oder die Güte der Modellwerte.

Reduziert man die genannten Referenzwerte um den Luftdruckeffekt und den gravimetrischen Effekt der Meereszeiten, so gewinnt man Parameter, die nur noch die gravimetrischen Gezeiten der „festen Erde“ enthalten sollten. Diese Amplitudenquotienten und Phasenverschiebungen können nun mit den entsprechenden Werten verglichen werden, die in den benachbarten Stationen Membach und Walferdange mit supraleitenden Gravimetern auf der Grundlage der Eichung mit Absolutgravimetern bestimmt wurden. Dieser Vergleich ist es schließlich, der eine abschließende Bewertung der Güte der in der Station Odendorf durchgeführten Beobachtungen und der aus diesen Messungen abgeleiteten Gezeitenparameter ermöglicht.

Aus Gründen der Überschaubarkeit werden bei Gegenüberstellungen von Analyseergebnissen diese repräsentativ lediglich für die Hauptpartialtiden nachgewiesen.

2 Gravimeter A206

2.1 Vorbemerkung

Um Vergleichbarkeit mit den bisherigen Ergebnissen herzustellen, werden, wie erwähnt, alle Gezeitenanalysen zunächst weiterhin unter Verwendung des numerischen Filters Pertz57 (37 Koeffizienten, Filterlänge 37h) ausgeführt. Der Untersuchung des Verhaltens des Gravimeters A206 gegenüber den zeitlichen Änderungen des lokalen Luftdrucks dienen Parallelanalysen jeweils ohne und mit Ansatz einer linearen Luftdruckregression.

Die weiterführenden gravimetrischen Beobachtungen schließen sich unmittelbar an die bisher ausgeführten und in den Abschnitten D und E ausgewerteten Messungen an. Im folgenden wird der Zeitraum vom **16.11.2001 bis 14.01.2003** als **erster Untersuchungsabschnitt**, der anschließende Zeitraum vom **16.01.2003 bis 10.10.2004** als **zweiter Untersuchungsabschnitt** bezeichnet.

Unter messtechnischen Gesichtspunkten setzt sich der Beobachtungszeitraum vom 16.01.2003 bis 10.10.2004 aus zwei Teilzeiträumen zusammen: Der erste Teilzeitraum beginnt am 16.01.2003 und endet am 01.03.2004; in diesem Zeitabschnitt wurden neben der Bestimmung des aktuellen Registriermaßstabs weitere Arbeiten ausgeführt, die ein häufiges Betreten der Messkammer erforderten. Im zweiten Teilabschnitt hingegen wurden Störungen der Registrierungen durch messtechnische Eingriffe weitgehend vermieden; dieser Zeitraum reicht vom 03.03.2004 bis 10.10.2004. Entsprechend wurden die Registrierdaten zunächst im Rahmen zweier Teilanalysen ausgewertet und erst danach eine Gesamtanalyse der Daten des zweiten Untersuchungsabschnitts ausgeführt.

2.2 Gezeitenanalysen der gefilterten Daten des zweiten Untersuchungsabschnitts

2.2.1 Die Neubestimmung des Registriermaßstabs

Ein wesentlicher Vorteil der Askania-Gravimeterkonstruktion besteht darin, dass Lageänderungen des oberen Einspannpunktes der Messfeder nicht mit Hilfe einer Messspindel über deren Drehwinkel dargestellt werden, sondern direkt durch Ablesung an einer vertikalen Maßstabsskala ermittelt werden können (siehe Prinzipskizze in Abschnitt D6.2.1, Abbildung D.23). Auf Spezialgläsern mit optimaler Formstabilität lassen sich Teilstriche mit hoher Konstanz der Teilstrichintervalle eingravieren. Intervallteile werden durch ein optisches Mikrometer ermittelt, so dass komplizierte Hebelsysteme (wie bei Gravimeter LCR) vermieden werden. Mechanische Spindelfehler spielen bei Askania-Gravimetern keinerlei Rolle.

Von Nachteil ist die begrenzte Ablesegenauigkeit der Messwertanzeige, die auf einen Wert von umgerechnet etwa 4 bis 5 μ Gal ausgelegt ist (neuere astasierte Gravimeter meist 1 bis 2 μ Gal). Dies ist jedoch nicht Folge des gewählten Prinzips der Messwertanzeige, sondern eine Wirkung der auf den Feldeinsatz des Gravimeters abgestimmten Härte der Messfeder. Die geringere Ablesegenauigkeit muss hinsichtlich des zufälligen Fehleranteils durch eine entsprechende Vergrößerung der Anzahl der Wiederholungsmessungen kompensiert werden.

Im Zeitraum vom 31.01.2003 bis 9.11.2003 wurden zur Bestimmung des Registriermaßstabes 110 Spindelverstellungen um jeweils etwa 10 MMskt (Mikrometer-Maßstabsskalenteile) ausgeführt (siehe auch Abschnitt D6.2.5). Der mittlere Signalausschlag pro MMskt wurde zu $k_2 = (0,378746 \pm 0,000278)$ Volt/MMskt ermittelt, entsprechend einer relativen Abweichung von 0,7%; die Standardabweichung einer Einzelmessung betrug $\pm 0,0029$ Volt/MMskt.

Eine erneute Bestimmung des Mikrometermaßstabs in Bezug auf die Skala des Hauptmaßstabes ausschließlich für den Skalenbereich der Gezeitenregistrierungen führte zu dem gegenüber der Erstbestimmung ($100,63 \pm 0,02$ MMskt/SMskt, Abschnitt D6.2.4) leicht veränderten Wert von $100,70 \pm 0,02$ MMskt/SMskt.

Dadurch folgt als Skalenwert des Mikrometers

$$k_1 = 47,022 \mu\text{Gal}/\text{MMskt},$$

(zuvor 47,051 $\mu\text{Gal}/\text{MMskt}$), so dass sich als neuer Wert für den Registriermaßstab ergibt

$$k_3 = (124,152 \pm 0,087) \mu\text{Gal}/\text{Volt}.$$

Zum Vergleich: Die im ersten Untersuchungszeitraum bestimmten Werte für den Registriermaßstab der gefilterten Daten betragen

$$k_{31} = (124,144 \pm 0,43) \mu\text{Gal}/\text{Volt}, \text{ bzw. } k_{32} = (124,39 \pm 0,16) \mu\text{Gal}/\text{Volt};$$

letzterer Wert wurde als vorläufiger Registriermaßstab für die Analyse der gefilterten Daten festgelegt (siehe Abschnitt D6.2.5).

2.2.2 Analysergebnisse

2.2.2.1 Teilanalyse 1

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: 00000058
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206
Scale 124,152  $\mu\text{Gal}/\text{Volt}$ 
20030116 50000...20031117 40000 20031118170000...20040301 80000
Number of recorded days in total : 408.67
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.
adjusted tidal parameters :
from      to      wave      ampl. ampl.fac.      stdv. ph. lead      stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg] [deg]
0.911391 0.947991 O1   350.1707  1.14923  0.00119 -0.0273  0.0592
0.981855 0.998631 P1   162.9292  1.14920  0.00288 -0.4107  0.1436
0.998632 1.001369 S1    9.6724   2.88577  0.17485 -2.9352  3.4718
1.001370 1.023622 K1  486.3924  1.13503  0.00089  0.1005  0.0448
1.914129 1.950419 M2  359.2948  1.18910  0.00057  2.1944  0.0274
1.984283 2.002736 S2  166.9659  1.18770  0.00119  0.4961  0.0576

Standard deviation of weight unit: 16.214 nm/s**2

```

Tabelle G.1: A206 - gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1a, Ergebnisse ohne Luftdruckregression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: UpA206_1
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206
Scale 124,152  $\mu\text{Gal}/\text{Volt}$ 
20030116 50000...20031117 40000 20031118170000...20040301 80000
Number of recorded days in total : 213.63
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.
adjusted tidal parameters :
from      to      wave      ampl. ampl.fac.      stdv. ph. lead      stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg] [deg]
0.911391 0.947991 O1   350.1569  1.14918  0.00119 -0.0293  0.0594
0.981855 0.998631 P1   162.9362  1.14925  0.00289 -0.4247  0.1442
0.998632 1.001369 S1    9.7546   2.91028  0.17577 -2.0702  3.4750
1.001370 1.023622 K1  486.4128  1.13507  0.00089  0.0963  0.0450
1.914129 1.950419 M2  359.2831  1.18906  0.00057  2.1941  0.0274
1.984283 2.002736 S2  166.8831  1.18711  0.00120  0.4456  0.0584

Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff.      stdv. parameter unit
1      0.48726      0.12560 airpress. nm/s**2 / hPa
Standard deviation of weight unit: 16.202 nm/s**2

```

Tabelle G.2: A206 - gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1b, Ergebnisse mit Luftdruckregression

2.2.2.2 Teilanalyse 2

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: 00000059
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206
Scale 124,152 µGal/Volt

20040303170000...20040325110000 20040326130000...20040608170000
20040611200000...20040718110000 20040718160000...20040821150000
20040823220000...20040905 50000 20040906 10000...20041010150000
Number of recorded days in total : 213.63
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.

adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1   350.1992  1.14932  0.00117  0.0194  0.0582
0.981855 0.998631 P1   163.7542  1.15502  0.00435  -0.2404  0.2161
0.998632 1.001369 S1    7.9538   2.37302  0.29350 -24.9438  7.0834
1.001370 1.023622 K1   487.7943  1.13830  0.00125  0.0259  0.0626
1.914129 1.950419 M2   358.7101  1.18716  0.00065  2.0498  0.0315
1.984283 2.002736 S2   166.8458  1.18684  0.00142  0.3790  0.0686

Standard deviation of weight unit: 11.801 nm/s**2

```

Tabelle G.3: A206 - gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2a, Ergebnisse ohne Luftdruckregression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: UpA206_2
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206
Scale 124,152 µGal/Volt

20040303170000...20040325110000 20040326130000...20040608170000
20040611200000...20040718110000 20040718160000...20040821150000
20040823220000...20040905 50000 20040906 10000...20041010150000
Number of recorded days in total : 213.63
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.

adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1   350.1928  1.14930  0.00118  0.0144  0.0587
0.981855 0.998631 P1   163.7572  1.15504  0.00438  -0.2659  0.2178
0.998632 1.001369 S1    7.8378   2.33842  0.29575 -28.1554  7.2916
1.001370 1.023622 K1   487.6734  1.13802  0.00126  0.0194  0.0631
1.914129 1.950419 M2   358.7290  1.18723  0.00066  2.0519  0.0317
1.984283 2.002736 S2   167.1041  1.18868  0.00145  0.5063  0.0706

Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff.      stdv.  parameter  unit
1      -1.24898      0.18946  airpress.  nm/s**2 / hPa

Standard deviation of weight unit: 11.750 nm/s**2

```

Tabelle G.4: A206 - gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2b, Ergebnisse mit Luftdruckregression

2.2.2.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 und 2

Teilanalyse 1a	O1	350.1707	1.14923	0.00119	-0.0273	0.0592
Teilanalyse 1b	O1	350.1569	1.14918	0.00119	-0.0293	0.0594
Teilanalyse 1a	P1	162.9292	1.14920	0.00288	-0.4107	0.1436
Teilanalyse 1b	P1	162.9362	1.14925	0.00289	-0.4247	0.1442
Teilanalyse 1a	S1	9.6724	2.88577	0.17485	-2.9352	3.4718
Teilanalyse 1b	S1	9.7546	2.91028	0.17577	-2.0702	3.4750
Teilanalyse 1a	K1	486.3924	1.13503	0.00089	0.1005	0.0448
Teilanalyse 1b	K1	486.4128	1.13507	0.00089	0.0963	0.0450
Teilanalyse 1a	M2	359.2948	1.18910	0.00057	2.1944	0.0274
Teilanalyse 1b	M2	359.2831	1.18906	0.00057	2.1941	0.0274
Teilanalyse 1a	S2	166.9659	1.18770	0.00119	0.4961	0.0576
Teilanalyse 1b	S2	166.8831	1.18711	0.00120	0.4456	0.0584
Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30):						
Teilanalyse 1a: $s = 16.214 \text{ nm/s}^2$			Teilanalyse 1b: $s = 16.202 \text{ nm/s}^2$			

Tabelle G.5: A206 - gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie für die Partialtide S_1

Teilanalyse 2a	O1	350.1992	1.14932	0.00117	0.0194	0.0582
Teilanalyse 2b	O1	350.1928	1.14930	0.00118	0.0144	0.0587
Teilanalyse 2a	P1	163.7542	1.15502	0.00435	-0.2404	0.2161
Teilanalyse 2b	P1	163.7572	1.15504	0.00438	-0.2659	0.2178
Teilanalyse 2a	S1	7.9538	2.37302	0.29350	-24.9438	7.0834
Teilanalyse 2b	S1	7.8378	2.33842	0.29575	-28.1554	7.2916
Teilanalyse 2a	K1	487.7943	1.13830	0.00125	0.0259	0.0626
Teilanalyse 2b	K1	487.6734	1.13802	0.00126	0.0194	0.0631
Teilanalyse 2a	M2	358.7101	1.18716	0.00065	2.0498	0.0315
Teilanalyse 2b	M2	358.7290	1.18723	0.00066	2.0519	0.0317
Teilanalyse 2a	S2	166.8458	1.18684	0.00142	0.3790	0.0686
Teilanalyse 2b	S2	167.1041	1.18868	0.00145	0.5063	0.0706
Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30):						
Teilanalyse 2a: $s = 11.801 \text{ nm/s}^2$			Teilanalyse 2b: $s = 11.750 \text{ nm/s}^2$			

Tabelle G.6: A206 - gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 2 ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie für die Partialtide S_1

Teilanalyse 1a	O1	350.1707	1.14923	0.00119	-0.0273	0.0592
Teilanalyse 2a	O1	350.1992	1.14932	0.00117	0.0194	0.0582
	Faktor	0,99992	Differenz	-0,0467		
Teilanalyse 1a	P1	162.9292	1.14920	0.00288	-0.4107	0.1436
Teilanalyse 2a	P1	163.7542	1.15502	0.00435	-0.2404	0.2161
	Faktor	0,99496	Differenz	-0,1703		
Teilanalyse 1a	S1	9.6724	2.88577	0.17485	-2.9352	3.4718
Teilanalyse 2a	S1	7.9538	2.37302	0.29350	-24.9438	7.0834
Teilanalyse 1a	K1	486.3924	1.13503	0.00089	0.1005	0.0448
Teilanalyse 2a	K1	487.7943	1.13830	0.00125	0.0259	0.0626
	Faktor	0,99713	Differenz	+0,0746		
Teilanalyse 1a	M2	359.2948	1.18910	0.00057	2.1944	0.0274
Teilanalyse 2a	M2	358.7101	1.18716	0.00065	2.0498	0.0315
	Faktor	1,00163	Differenz	+0,1446		
Teilanalyse 1a	S2	166.9659	1.18770	0.00119	0.4961	0.0576
Teilanalyse 2a	S2	166.8458	1.18684	0.00142	0.3790	0.0686
	Faktor	1,00072	Differenz	+0,1171		
Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30):						
Teilanalyse 1a: $s = 16.214 \text{ nm/s}^2$			Teilanalyse 2a: $s = 11.801 \text{ nm/s}^2$			
$m_02a/m_01a = 0,728$						

Tabelle G.7: A206 - gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 und 2 ohne Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O₁ P₁ K₁ M₂ S₂ sowie für die Partialtide S₁

Teilanalyse 1b	O1	350.1569	1.14918	0.00119	-0.0293	0.0594
Teilanalyse 2b	O1	350.1928	1.14930	0.00118	0.0144	0.0587
	Faktor	0,99990	Differenz	-0,0437		
Teilanalyse 1b	P1	162.9362	1.14925	0.00289	-0.4247	0.1442
Teilanalyse 2b	P1	163.7572	1.15504	0.00438	-0.2659	0.2178
	Faktor	0,99499	Differenz	-0,1588		
Teilanalyse 1b	S1	9.7546	2.91028	0.17577	-2.0702	3.4750
Teilanalyse 2b	S1	7.8378	2.33842	0.29575	-28.1554	7.2916
Teilanalyse 1b	K1	486.4128	1.13507	0.00089	0.0963	0.0450
Teilanalyse 2b	K1	487.6734	1.13802	0.00126	0.0194	0.0631
	Faktor	0,99741	Differenz	+0,0769		
Teilanalyse 1b	M2	359.2831	1.18906	0.00057	2.1941	0.0274
Teilanalyse 2b	M2	358.7290	1.18723	0.00066	2.0519	0.0317
	Faktor	1,00154	Differenz	+0,1422		
Teilanalyse 1b	S2	166.8831	1.18711	0.00120	0.4456	0.0584
Teilanalyse 2b	S2	167.1041	1.18868	0.00145	0.5063	0.0706
	Faktor	0,99868	Differenz	-0,0607		
Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30):						
Teilanalyse 1b: $s = 16.202 \text{ nm/s}^2$			Teilanalyse 2b: $s = 11.750 \text{ nm/s}^2$			
$m_02b/m_01b = 0,725$						

Tabelle G.8: A206 - gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 und 2 mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O₁ P₁ K₁ M₂ S₂ sowie für die Partialtide S₁

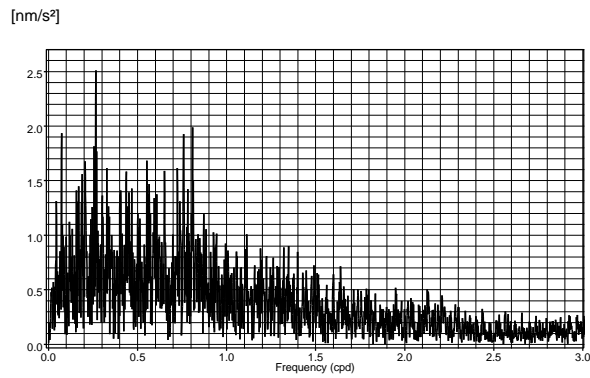


Abbildung G.1: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

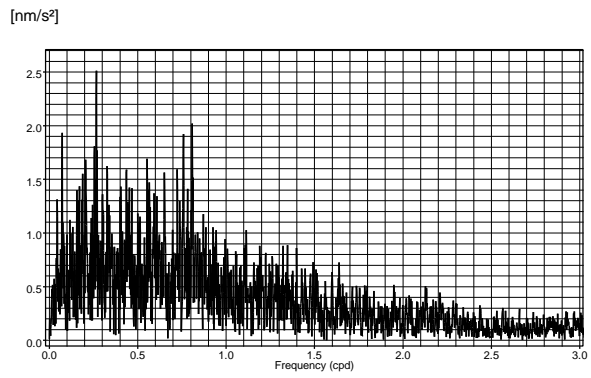


Abbildung G.2: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

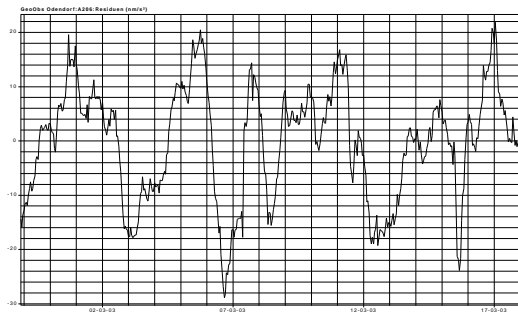


Abbildung G.3: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 27.02.2003 bis 18.03.2003, Maßstäbe: 1 Tag bzw. 2nm/s² je Intervall

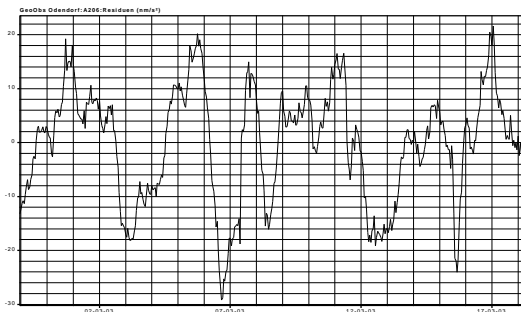


Abbildung G.4: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 27.02.2003 bis 18.03.2003, Maßstäbe: 1 Tag bzw. 2nm/s² je Intervall

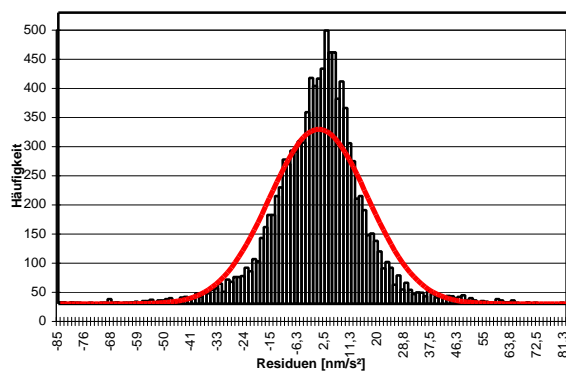


Abbildung G.5: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

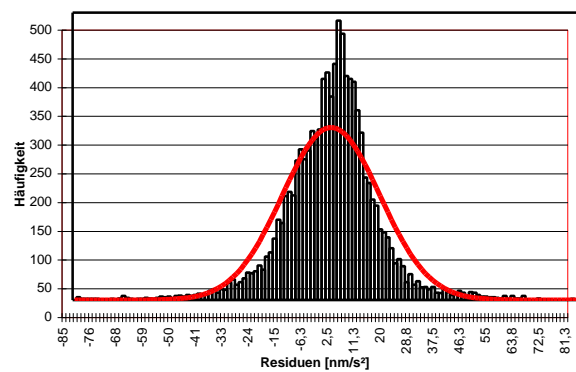


Abbildung G.6: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

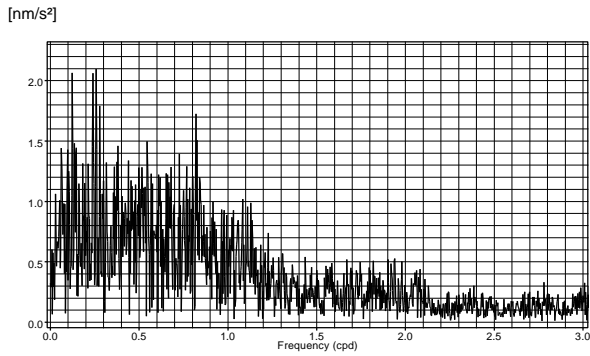


Abbildung G.7: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

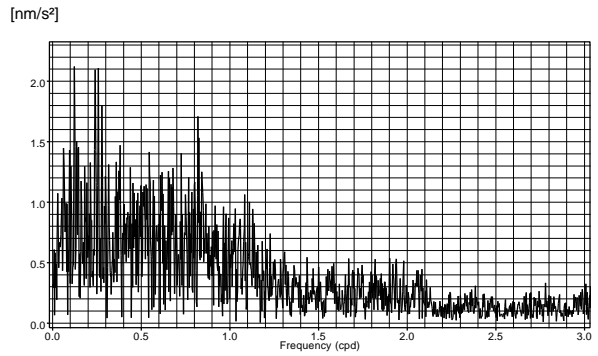


Abbildung G.8: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

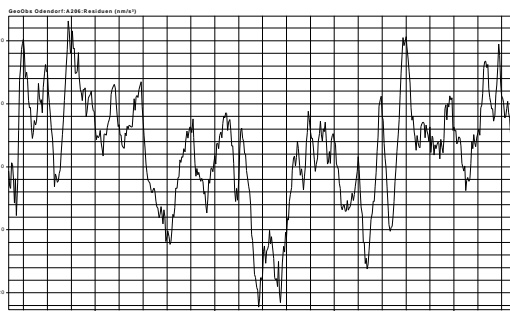


Abbildung G.9: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 26.02.2004 bis 17.03.2004, Maßstäbe: 1 Tag bzw. $2nm/s^2$ je Intervall

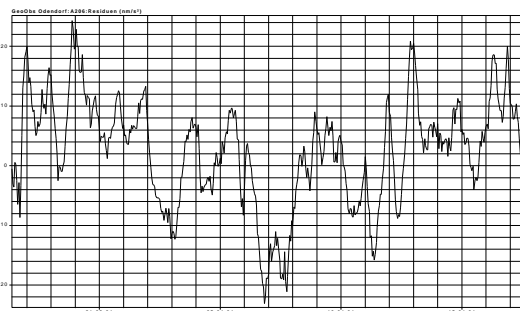


Abbildung G.10: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 26.02.2004 bis 17.03.2004, Maßstäbe: 1 Tag bzw. $2nm/s^2$ je Intervall

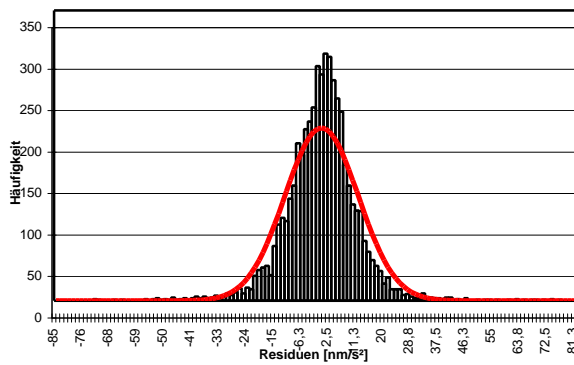


Abbildung G.11: Gravimeter A206 – gefilterte Daten - zweiter Untersuchungsabschnitt Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

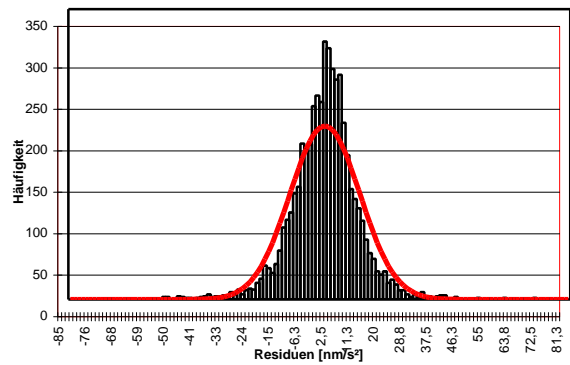


Abbildung G.12: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

2.2.2.4 Gesamtanalyse der Daten des zweiten Untersuchungsabschnitts

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: 00000060
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206
Scale 124,152 µGal/Volt
20030116 50000...20031117 40000 20031118170000...20040301 80000
20040303170000...20040325110000 20040326130000...20040608170000
20040611200000...20040718110000 20040718160000...20040821150000
20040823220000...20040905 50000 20040906 10000...20041010150000
Number of recorded days in total : 622.29
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.
adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]
0.911391 0.947991 O1   350.1854  1.14928  0.00089 -0.0076  0.0445
0.981855 0.998631 P1   163.1713  1.15090  0.00223 -0.2212  0.1110
0.998632 1.001369 S1    8.5857   2.56156  0.13499 -7.0929  3.0196
1.001370 1.023622 K1   486.8486  1.13609  0.00067  0.1129  0.0340
1.914129 1.950419 M2   359.1025  1.18846  0.00045  2.1476  0.0218
1.984283 2.002736 S2   166.9156  1.18734  0.00095  0.4582  0.0460
Standard deviation of weight unit: 14.936 nm/s**2

```

Tabelle G.9: A206 - gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse ohne Luftdruckregression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: UpdA206g
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206
Scale 124,152 µGal/Volt

20030116 50000...20031117 40000 20031118170000...20040301 80000
20040303170000...20040325110000 20040326130000...20040608170000
20040611200000...20040718110000 20040718160000...20040821150000
20040823220000...20040905 50000 20040906 10000...20041010150000
Number of recorded days in total : 622.29
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.

adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1   350.1829  1.14927  0.00089 -0.0078  0.0446
0.981855 0.998631 P1   163.1713  1.15090  0.00223 -0.2239  0.1112
0.998632 1.001369 S1    8.6059   2.56759  0.13532 -6.8325  3.0316
1.001370 1.023622 K1   486.8570  1.13611  0.00068  0.1121  0.0341
1.914129 1.950419 M2   359.0993  1.18845  0.00045  2.1474  0.0217
1.984283 2.002736 S2   166.8879  1.18714  0.00096  0.4425  0.0467

Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff.      stdv.  parameter  unit
  1      0.15253      0.10397  airpress.  nm/s**2 / hPa

Standard deviation of weight unit: 14.935 nm/s**2

```

Tabelle G.10: A206 - gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse mit Luftdruckregression

oL	0.911391	0.947991	O1	350.1854	1.14928	0.00089	-0.0076	0.0445
mL	0.911391	0.947991	O1	350.1829	1.14927	0.00089	-0.0078	0.0446
oL	0.981855	0.998631	P1	163.1713	1.15090	0.00223	-0.2212	0.1110
mL	0.981855	0.998631	P1	163.1713	1.15090	0.00223	-0.2239	0.1112
oL	0.998632	1.001369	S1	8.5857	2.56156	0.13499	-7.0929	3.0196
mL	0.998632	1.001369	S1	8.6059	2.56759	0.13532	-6.8325	3.0316
oL	1.001370	1.023622	K1	486.8486	1.13609	0.00067	0.1129	0.0340
mL	1.001370	1.023622	K1	486.8570	1.13611	0.00068	0.1121	0.0341
oL	1.914129	1.950419	M2	359.1025	1.18846	0.00045	2.1476	0.0218
mL	1.914129	1.950419	M2	359.0993	1.18845	0.00045	2.1474	0.0217
oL	1.984283	2.002736	S2	166.9156	1.18734	0.00095	0.4582	0.0460
mL	1.984283	2.002736	S2	166.8879	1.18714	0.00096	0.4425	0.0467

Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30):
 ohne Luftdruck: $s = 14.936 \text{ nm/s}^2$ mit Luftdruck: $s = 14.935 \text{ nm/s}^2$

Tabelle G.11: A206 - gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie für die Partialtide S_1

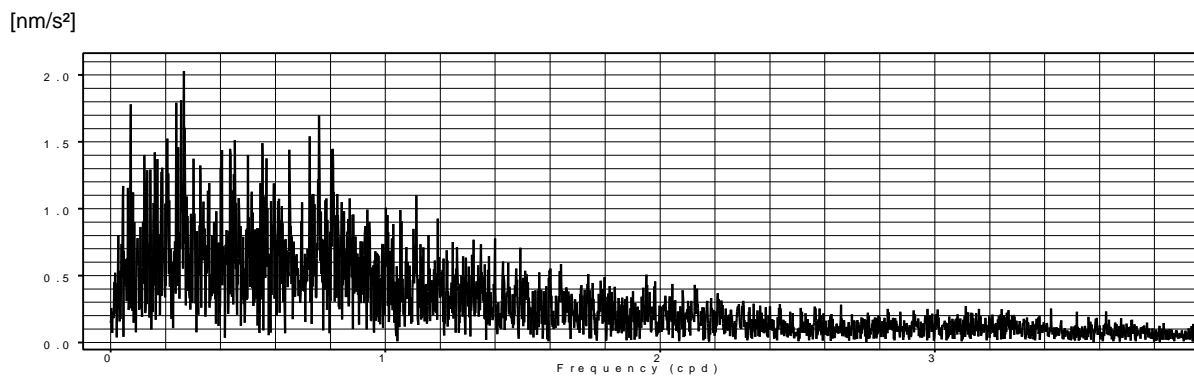


Abbildung G.13: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

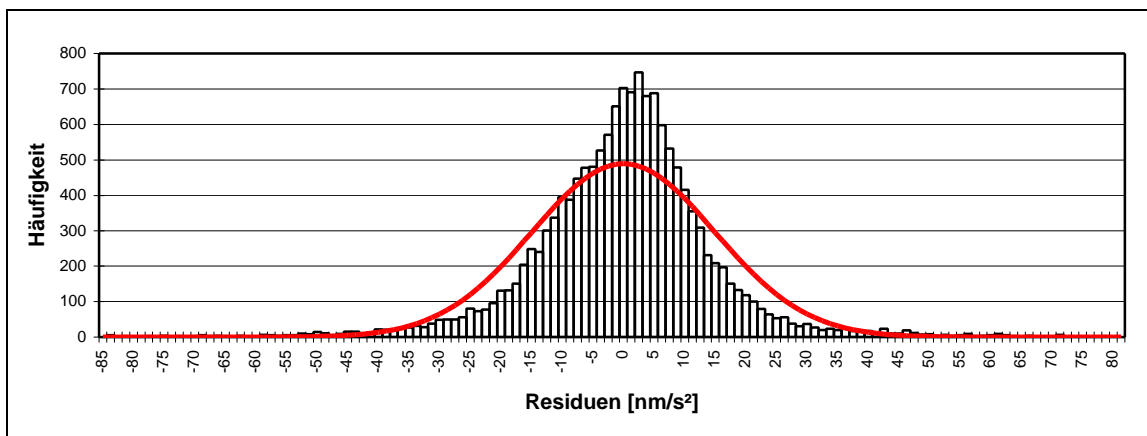


Abbildung G.14: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

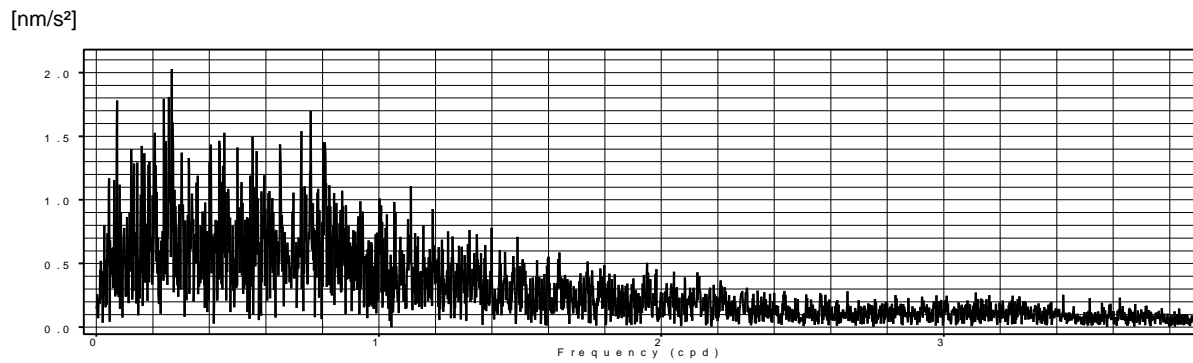


Abbildung G.15: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

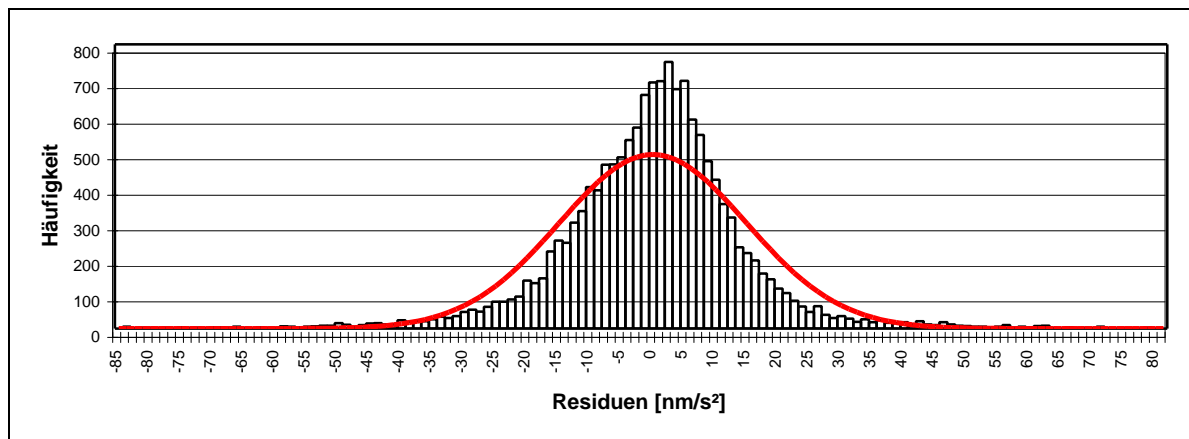


Abbildung G.16: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

2.2.2.5 Ergebniszusammenfassung

Die Ergebnisse der Gegenüberstellungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die *ohne* und *mit* Berücksichtigung einer Luftdruckregression berechneten Gezeitenparameter sowie deren Standardabweichungen sind praktisch identisch. Lediglich geringfügige, statistisch jedoch nicht signifikante Änderungen treten (im Hinblick auf die beobachtete Luftdrucktide S_2 erwartungsgemäß) bei der Partialtide S_2 sowie bei der Partialtide S_1 auf, deren beobachtete Amplitude jedoch lediglich $1\mu\text{Gal}$ beträgt.

Signifikante Unterschiede in den Residuenspektren sind nicht zu erkennen. Gleiches gilt für den zeitlichen Verlauf der Residuen, der mehr oder weniger ausgeprägte Erhaltungstendenzen aufweist.

- Die Unterschiede der in den beiden *Teilanalysen* für die Hauptpartialtiden berechneten *Amplitudenquotienten* sind statistisch (t-Test) nicht signifikant. Sie liegen zwischen 0,1‰ für die Partialtide O_1 und 5‰ für die Partialtide P_1 . Es ist zu berücksichtigen, dass im ersten Beobachtungszeitraum innerhalb der Messkammer häufig tägliche Arbeiten ausgeführt wurden (siehe Abschnitt G2.1), die besonders für den Bereich der Tiden $P_1 S_1 K_1$ (Frequenzband $15^\circ/\text{h}$, bzw. $2\pi/\text{Tag}$) zu Störeinflüssen geführt haben dürften. Wegen des relativ kurzen Registrierzeitraums haben die im zweiten Beobachtungszeitraum für die Partialtide S_1 ermittelten Parameter nur begrenzte physikalische Bedeutung.
- Bei den *Phasendifferenzen* treten in den Ergebnissen der *Teilanalysen* Unterschiede auf, die ebenfalls als nicht signifikant einzustufen sind. Bemerkenswert ist allerdings bei der Partialtide M_2 die relativ große Differenz von $0^\circ,14$, die durchaus als schwach signifikant bewertet werden könnte. Die halbtägige Mondtide M_2 weist mit $36\mu\text{Gal}$ fast die gleiche Amplitude auf, wie die ganztägige Mondtide O_1 ($35\mu\text{Gal}$) bei jedoch etwa doppelter Anzahl von Schwingungen pro Zeiteinheit.

- Für die beiden *Teilanalysen* beträgt der Unterschied der *Modellanpassung* etwa 30% (Verhältnis der Standardabweichungen der Gewichtseinheit gleich 0,7) zugunsten des weniger gestörten zweiten Beobachtungszeitraumes.
- Die *Spektren der Residuen* nach der Datenanalyse ohne und mit Berücksichtigung einer Luftdruckregression sind praktisch identisch. Die Residuenspektren der ersten und der zweiten Teilanalyse unterscheiden sich nur geringfügig. Auffällig sind schwach ausgeprägte, aber einheitlich auftretende Spitzen im Frequenzbereich von etwa 0,8cpd (entsprechend einer Periode von etwa 30 Stunden). Ferner bemerkenswert ist das Auftreten von Spitzen im Bereich von 0,25cpd (entsprechend einer Periode von etwa vier Tagen).
- *Residuenverlauf und -struktur* werden durch eine zusätzliche Berücksichtigung zeitlicher Luftdruckänderungen nicht erkennbar beeinflusst. Ausgeprägte zeitliche Erhaltungstendenzen im Residuenverlauf sind für beide Analysenabschnitte gleichermaßen charakteristisch.
- Die *Histogramme der Residuen* weichen in allen Fällen signifikant von der Normalverteilung ab. Wie die beiden nachfolgenden Abbildungen im Vergleich mit Abbildung G.14 zeigen, ist dies zu einem wesentlichen Teil eine Folge des Auftretens großer Residuen in den Randbereichen der Histogramme. Der Suche nach deterministischen Gründen für diese Residuenanomalien und der Suche nach Möglichkeiten zur Verhinderung oder Beseitigung der zugeordneten temporären Störungen in den beobachteten gravimetrischen Signalen kommt daher für die Gezeitenanalyse auch im Hinblick auf eine Optimierung der Modellanpassung eine große Bedeutung zu.

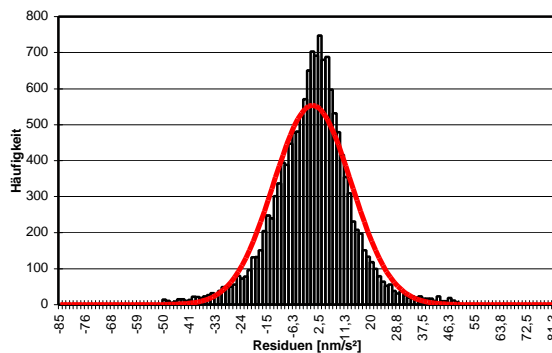


Abbildung G.17: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung, Residuen >50 und <-50 nm/s^2 ausgeschlossen

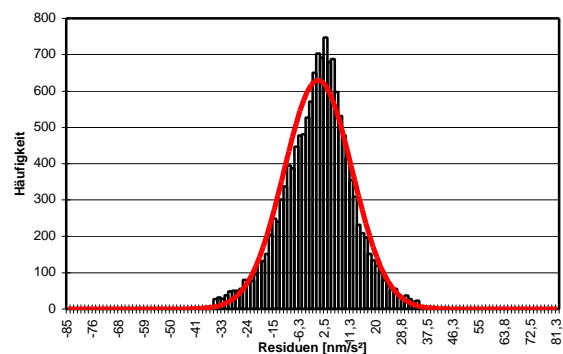


Abbildung G.18: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung, Residuen >35 und <-35 nm/s^2 ausgeschlossen

2.2.3 Untersuchung der zeitlichen Stabilität des Registriermaßstabes

Im ersten Untersuchungsabschnitt wurde mit Hilfe aufeinander folgender Gezeitenanalysen eine zeitliche Änderung des Registriermaßstabes festgestellt (siehe Abschnitt E4.1). In gleicher Weise wurde der Registriermaßstab für den zweiten Untersuchungsabschnitt überprüft. Ein Teilergebnis ist in der nachfolgenden Abbildung G.19 dargestellt. Eine signifikante Änderung des Registriermaßstabes ist für den Zeitraum von März.2003 bis Oktober 2004 nicht zu erkennen. Die Gesamtergebnisse der durchgeführten Untersuchungen sind im Rahmen des Abschnitts G2.4.1 nachgewiesen.

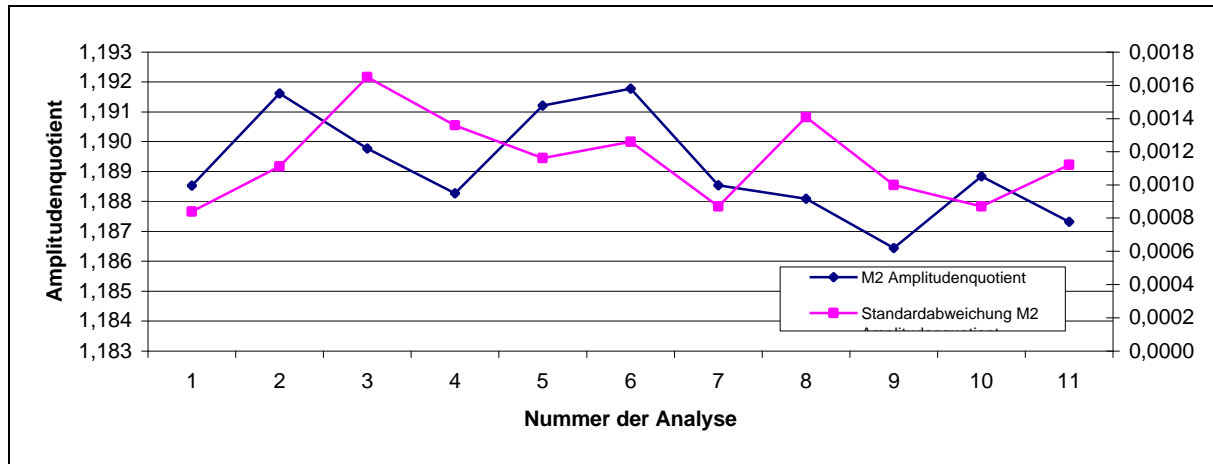


Abbildung G.19: Gravimeter A206, gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Überprüfung der zeitlichen Stabilität des Registriermaßstabs durch zeitlichen Verlauf des Amplitudenquotienten M_2 in aufeinander folgenden Zweimonatsanalysen

2.3 Gezeitenanalysen der ungefilterten Daten des zweiten Untersuchungsabschnitts

2.3.1 Vorbemerkung

Die ungefilterten Registrierdaten des Gravimeters A206 weisen gegenüber den gefilterten Daten einen um etwa den Faktor 15 höheren Rauschpegel auf; dem steht jedoch eine Erhöhung der Standardabweichung der Modellanpassung um lediglich den Faktor 1,3 gegenüber (vgl. Abschnitte D7.2 und D9). Bei hinreichend langen Beobachtungszeiträumen lässt sich somit für die Hauptpartialtiden eine durchaus brauchbare Auflösung der Gezeitenparameter erzielen.

Wenn der Registriermaßstab der ungefilterten Daten messtechnisch aus dem Registriermaßstab der gefilterten Daten direkt abgeleitet werden kann, entstehen in zeitlich identischen Beobachtungsböcken kohärente Datensätze, die es ermöglichen, potentielle Auswirkungen des hochfrequenten Anteils in den realen Bewegungen des gravimetrischen Sensors auf das Ergebnis der Berechnungen der Gezeitenparameter zu erkennen. Voraussetzung ist also, dass das *Verhältnis* der beiden Registriermaßstäbe messtechnisch determiniert ist und nicht aus Registrierdaten abgeleitet wurde (siehe nachfolgenden Abschnitt G2.3.2). Wird diese Voraussetzung nicht erfüllt, so können Abweichungen zwischen den aus gefilterten und ungefilterten Daten abgeleiteten Amplitudenquotienten nicht als Wirkungen hochfrequenter Störsignale interpretiert werden; dies gilt zum Beispiel für die in Abschnitt D9, Tabelle D.9 dargestellten Verhältniszahlen.

Die Gezeitenanalyse der ungefilterten Daten führt maßstabsunabhängig zu Phasen der beobachteten Partialtiden, die weitgehend frei von den Wirkungen instrumenteller Signalverzögerungen sind. Bei gravimetrischen Sensoren des Typs GS15 und GS25 wird nach Eingabe eines Rechtecksignals (siehe Abschnitt E11) das neue Endsignal bereits nach deutlich weniger als 1 Sekunde erreicht; dies ist eine Folge der kurzen Eigenperiode des nicht-astasierten, linearen gravimetrischen Sensors und ein instrumenteller Vorteil gegenüber astasierten Sensoren (Abschnitt F1.2). Die aus den ungefilterten Daten des Gravimeters A206 abgeleiteten Phasenverschiebungen der Hauptpartialtiden können daher im Prinzip als Referenzwerte für die zeitlichen Signalverschiebungen anderer Gravimeter dienen – sofern diese Werte mit hinreichender Auflösung ermittelt wurden. Lange Registrierzeiträume sind somit erforderlich.

2.3.2 Die Neubestimmung des Registriermaßstabs

Das Verhältnis der Registriermaßstäbe zwischen den gefilterten und den ungefilterten Daten war in Abschnitt D6.3 auf Basis der Nennwerte des Spannungsteilers 100k Ω /460k Ω und einer nachgeschalteten Verstärkung des gefilterten Signals um den Faktor 10 ermittelt worden zu 2,1739. Eine Nachmessung der verwendeten Widerstände des eingesetzten RC-Filters (Abschnitt E1) mit einer relativen Genauigkeit von 1% ergab jedoch die realen Werte 179,9k Ω , 181,5k Ω und 99,9k Ω . Daraus ergibt sich ein verändertes Maßstabsverhältnis von **2,1656**, also eine Veränderung von 3,8%; der seinerzeit durch Spindelverstellung, also experimentell ermittelte Wert betrug 2,1719; die neue Differenz von 0,0063 verbleibt im Bereich der statistischen Unsicherheiten.

Der Registriermaßstab für das *gefilterte* Signal des Gravimeters A206 wurde im zweiten Untersuchungsabschnitt durch wiederholte Spindelverstellungen zu 124,152 μ Gal/Volt ermittelt, mit einer relativen Abweichung von 0,7‰ (siehe Abschnitt G2.2.1). Daraus ergibt sich für den Registriermaßstab der **ungefilterten** Daten nunmehr der auf den Registriermaßstab der gefilterten Daten bezogene Wert

$$124,152 \times 2,1656 = 268,86\mu\text{Gal/Volt},$$

mit einer statistischen Unsicherheit im Bereich von etwa 1‰.

2.3.3 Analysenergebnisse

2.3.3.1 Teilanalyse 1

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: 00000062
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206
Scale 268,86  $\mu$ Gal/Volt
20030116 50000...20031117 40000 20031118170000...20040301 80000
Number of recorded days in total : 408.67
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.
adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]          [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1  349.7635  1.14788  0.00119  0.0300  0.0594
0.981855 0.998631 P1  163.3749  1.15233  0.00289  -0.5118  0.1435
0.998632 1.001369 S1   9.1698   2.73556  0.17524  11.8571  3.6700
1.001370 1.023622 K1  486.8125  1.13600  0.00089  0.1502  0.0449
1.914129 1.950419 M2  359.0672  1.18835  0.00078  2.2072  0.0375
1.984283 2.002736 S2  166.9514  1.18760  0.00164  0.6999  0.0790

Standard deviation of weight unit: 19.131 nm/s**2

```

Tabelle G.12: A206 - ungefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 3a, Ergebnisse ohne Luftdruckregression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: 00000061
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206
Scale 268,86  $\mu$ Gal/Volt
20030116 50000...20031117 40000 20031118170000...20040301 80000
Number of recorded days in total : 408.67
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.
adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]          [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1  349.7443  1.14781  0.00119  0.0272  0.0596
0.981855 0.998631 P1  163.3847  1.15240  0.00290  -0.5313  0.1441
0.998632 1.001369 S1   9.3326   2.78412  0.17653  12.8959  3.6329
1.001370 1.023622 K1  486.8408  1.13606  0.00089  0.1444  0.0450
1.914129 1.950419 M2  359.0509  1.18829  0.00078  2.2067  0.0374
1.984283 2.002736 S2  166.8356  1.18677  0.00164  0.6298  0.0797

Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff.      stdv. parameter unit
1      0.67742      0.14815  airpress. nm/s**2 / hPa
Standard deviation of weight unit: 19.111 nm/s**2

```

Tabelle G.13: A206 - ungefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 3b, Ergebnisse mit Luftdruckregression

2.3.3.2 Teilanalyse 2

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: 00000064
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206
Scale 268,86 µGal/Volt

20040303170000...20040325110000 20040326130000...20040608170000
20040611200000...20040718110000 20040718160000...20040821150000
20040823220000...20040905 50000 20040906 10000...20041010150000
Number of recorded days in total : 213.63
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.

adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1   350.8626  1.15148  0.00150  0.1019  0.0745
0.981855 0.998631 P1   162.3087  1.14481  0.00558  -0.4723  0.2796
0.998632 1.001369 S1    4.1579   1.24040  0.37633 -25.7884 17.3760
1.001370 1.023622 K1   488.0480  1.13888  0.00160  0.0191  0.0802
1.914129 1.950419 M2   358.5364  1.18659  0.00097  2.0238  0.0468
1.984283 2.002736 S2   166.7026  1.18583  0.00211  0.5934  0.1019

Standard deviation of weight unit: 15.762 nm/s**2

```

Tabelle G.14: A206 - ungefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 4a, Ergebnisse ohne Luftdruck-regression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: 00000063
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206
Scale 268,86 µGal/Volt

20040303170000...20040325110000 20040326130000...20040608170000
20040611200000...20040718110000 20040718160000...20040821150000
20040823220000...20040905 50000 20040906 10000...20041010150000
Number of recorded days in total : 213.63
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.

adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1   350.8593  1.15147  0.00151  0.0993  0.0749
0.981855 0.998631 P1   162.3103  1.14482  0.00560  -0.4854  0.2809
0.998632 1.001369 S1    4.1022   1.22376  0.37809 -28.9192 17.8144
1.001370 1.023622 K1   487.9865  1.13873  0.00161  0.0159  0.0806
1.914129 1.950419 M2   358.5461  1.18662  0.00097  2.0248  0.0468
1.984283 2.002736 S2   166.8344  1.18676  0.00214  0.6581  0.1044

Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff.      stdv.  parameter  unit
1      -0.63454      0.25400  airpress.  nm/s**2 / hPa

Standard deviation of weight unit: 15.753 nm/s**2

```

Tabelle G.15: A206 - ungefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 4b, Ergebnisse mit Luftdruck-regression

2.3.3.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 und 2

Teilanalyse 3a	O1	349.7635	1.14788	0.00119	0.0300	0.0594
Teilanalyse 3b	O1	349.7443	1.14781	0.00119	0.0272	0.0596
Teilanalyse 3a	P1	163.3749	1.15233	0.00289	-0.5118	0.1435
Teilanalyse 3b	P1	163.3847	1.15240	0.00290	-0.5313	0.1441
Teilanalyse 3a	S1	9.1698	2.73556	0.17524	11.8571	3.6700
Teilanalyse 3b	S1	9.3326	2.78412	0.17653	12.8959	3.6329
Teilanalyse 3a	K1	486.8125	1.13600	0.00089	0.1502	0.0449
Teilanalyse 3b	K1	486.8408	1.13606	0.00089	0.1444	0.0450
Teilanalyse 3a	M2	359.0672	1.18835	0.00078	2.2072	0.0375
Teilanalyse 3b	M2	359.0509	1.18829	0.00078	2.2067	0.0374
Teilanalyse 3a	S2	166.9514	1.18760	0.00164	0.6999	0.0790
Teilanalyse 3b	S2	166.8356	1.18677	0.00164	0.6298	0.0797
Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30):						
Teilanalyse 3a: $s = 19.131 \text{ nm/s}^2$			Teilanalyse 3b: $s = 19.111 \text{ nm/s}^2$			

Tabelle G.16: A206 - ungefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie für die Partialtide S_1

Teilanalyse 4a	O1	350.8626	1.15148	0.00150	0.1019	0.0745
Teilanalyse 4b	O1	350.8593	1.15147	0.00151	0.0993	0.0749
Teilanalyse 4a	P1	162.3087	1.14481	0.00558	-0.4723	0.2796
Teilanalyse 4b	P1	162.3103	1.14482	0.00560	-0.4854	0.2809
Teilanalyse 4a	S1	4.1579	1.24040	0.37633	-25.7884	17.3760
Teilanalyse 4b	S1	4.1022	1.22376	0.37809	-28.9192	17.8144
Teilanalyse 4a	K1	488.0480	1.13888	0.00160	0.0191	0.0802
Teilanalyse 4b	K1	487.9865	1.13873	0.00161	0.0159	0.0806
Teilanalyse 4a	M2	358.5364	1.18659	0.00097	2.0238	0.0468
Teilanalyse 4b	M2	358.5461	1.18662	0.00097	2.0248	0.0468
Teilanalyse 4a	S2	166.7026	1.18583	0.00211	0.5934	0.1019
Teilanalyse 4b	S2	166.8344	1.18676	0.00214	0.6581	0.1044
Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30):						
Teilanalyse 4a: $s = 15.762 \text{ nm/s}^2$			Teilanalyse 4b: $s = 15.753 \text{ nm/s}^2$			

Tabelle G.17: A206 - ungefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 2 ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie für die Partialtide S_1

Teilanalyse 3a	O1	349.7635	1.14788	0.00119	0.0300	0.0594
Teilanalyse 4a	O1	350.8626	1.15148	0.00150	0.1019	0.0745
		Faktor 0,99687	Differenz -0,0719			
Teilanalyse 3a	P1	163.3749	1.15233	0.00289	-0.5118	0.1435
Teilanalyse 4a	P1	162.3087	1.14481	0.00558	-0.4723	0.2796
		Faktor 1,00657	Differenz -0,0395			
Teilanalyse 3a	S1	9.1698	2.73556	0.17524	11.8571	3.6700
Teilanalyse 4a	S1	4.1579	1.24040	0.37633	-25.7884	17.3760
Teilanalyse 3a	K1	486.8125	1.13600	0.00089	0.1502	0.0449
Teilanalyse 4a	K1	488.0480	1.13888	0.00160	0.0191	0.0802
		Faktor 0,99687	Differenz +0,1311			
Teilanalyse 3a	M2	359.0672	1.18835	0.00078	2.2072	0.0375
Teilanalyse 4a	M2	358.5364	1.18659	0.00097	2.0238	0.0468
		Faktor 1,00148	Differenz +0,1834			
Teilanalyse 3a	S2	166.9514	1.18760	0.00164	0.6999	0.0790
Teilanalyse 4a	S2	166.7026	1.18583	0.00211	0.5934	0.1019
		Faktor 1,00149	Differenz +0,1065			
Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30):						
Teilanalyse 3a: $s = 19.131 \text{ nm/s}^2$			Teilanalyse 4a: $s = 15.762 \text{ nm/s}^2$			
$m_{04a}/m_{03a} = 0,824$						

Tabelle G.18: A206 - ungefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 und 2 ohne Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 , P_1 , K_1 , M_2 , S_2 sowie für die Partialtide S_1

Teilanalyse 3b	O1	349.7443	1.14781	0.00119	0.0272	0.0596
Teilanalyse 4b	O1	350.8593	1.15147	0.00151	0.0993	0.0749
		Faktor 0,99682	Differenz -0,0721			
Teilanalyse 3b	P1	163.3847	1.15240	0.00290	-0.5313	0.1441
Teilanalyse 4b	P1	162.3103	1.14482	0.00560	-0.4854	0.2809
		Faktor 1,00662	Differenz -0,0459			
Teilanalyse 3b	S1	9.3326	2.78412	0.17653	12.8959	3.6329
Teilanalyse 4b	S1	4.1022	1.22376	0.37809	-28.9192	17.8144
Teilanalyse 3b	K1	486.8408	1.13606	0.00089	0.1444	0.0450
Teilanalyse 4b	K1	487.9865	1.13873	0.00161	0.0159	0.0806
		Faktor 0,99766	Differenz +0,1285			
Teilanalyse 3b	M2	359.0509	1.18829	0.00078	2.2067	0.0374
Teilanalyse 4b	M2	358.5461	1.18662	0.00097	2.0248	0.0468
		Faktor 1,00141	Differenz +0,1819			
Teilanalyse 3b	S2	166.8356	1.18677	0.00164	0.6298	0.0797
Teilanalyse 4b	S2	166.8344	1.18676	0.00214	0.6581	0.1044
		Faktor 1,00001	Differenz -0,0283			
Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30):						
Teilanalyse 3b: $s = 19.111 \text{ nm/s}^2$			Teilanalyse 4b: $s = 15.753 \text{ nm/s}^2$			
$m_{04b}/m_{03b} = 0,824$						

Tabelle G.19: A206 - ungefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 und 2 mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 , P_1 , K_1 , M_2 , S_2 sowie für die Partialtide S_1

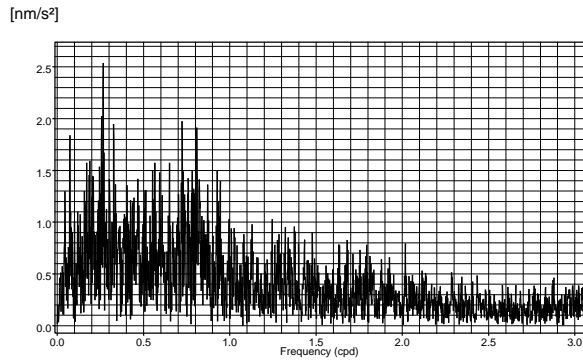


Abbildung G.20: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

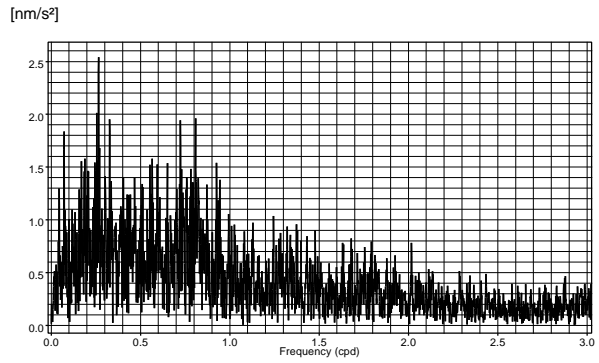


Abbildung G.21: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

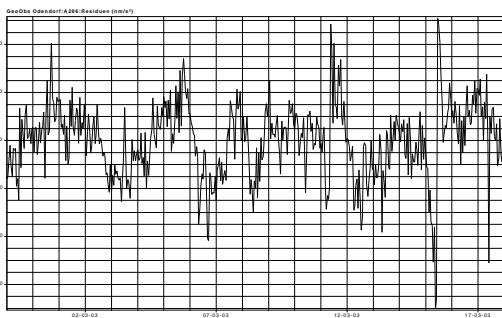


Abbildung G.22: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 27.02.2003 bis 18.03.2003, Maßstäbe: 1 Tag bzw. 5nm/s² je Intervall

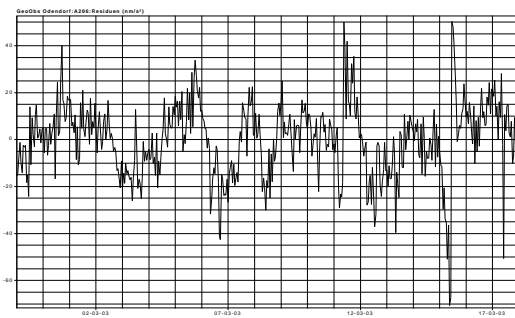


Abbildung G.23: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 27.02.2003 bis 18.03.2003, Maßstäbe: 1 Tag bzw. 5nm/s² je Intervall

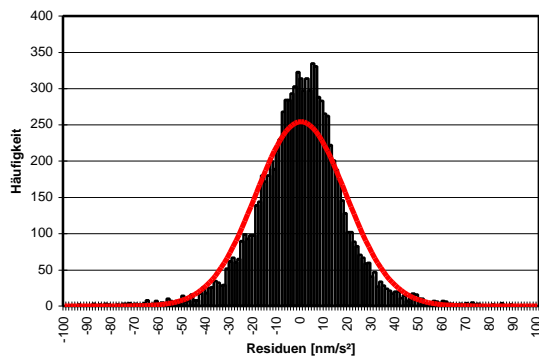


Abbildung G.24: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

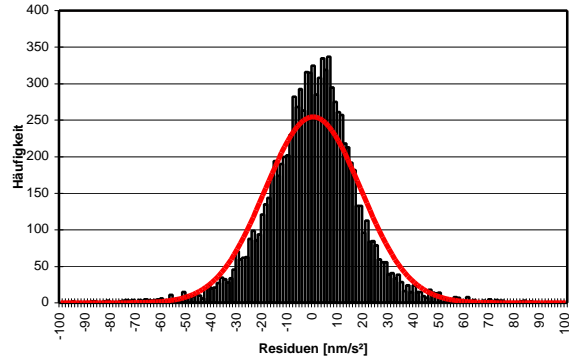


Abbildung G.25: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

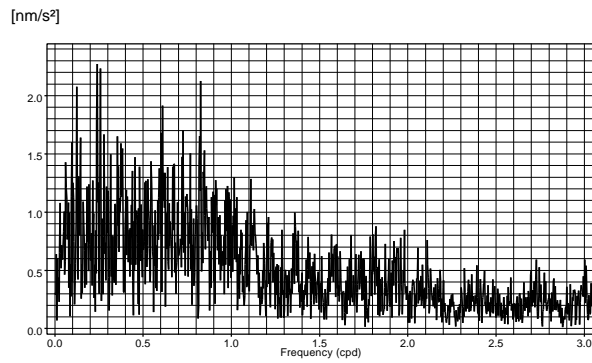


Abbildung G.26: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

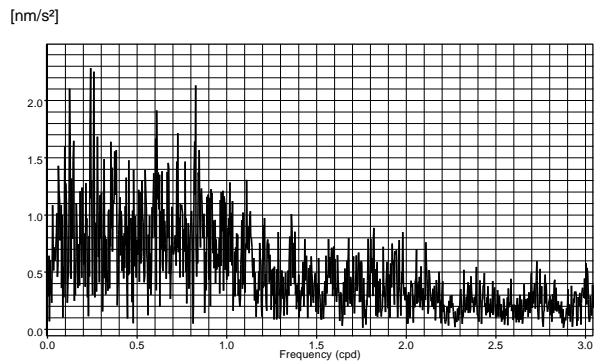


Abbildung G.27: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

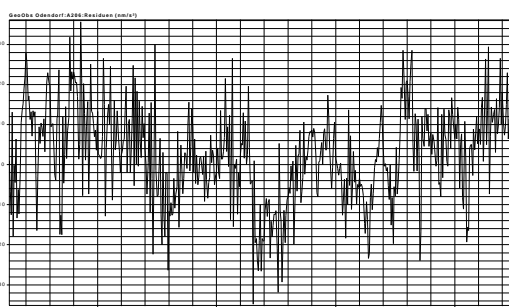


Abbildung G.28: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 26.02.2004 bis 17.03.2004, Maßstäbe: 1 Tag bzw. 2nm/s^2 je Intervall

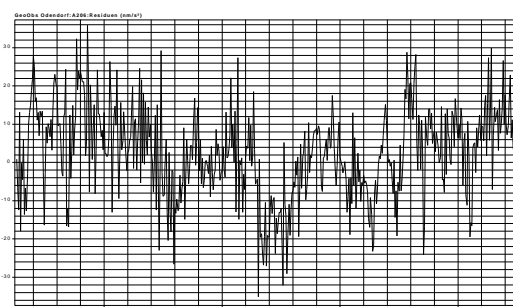


Abbildung G.29: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 26.02.2004 bis 17.03.2004, Maßstäbe: 1 Tag bzw. 2nm/s^2 je Intervall

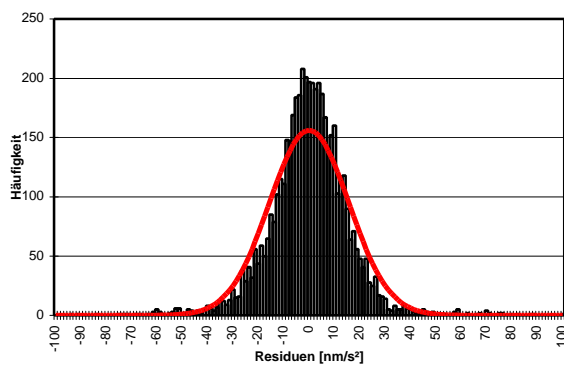


Abbildung G.30: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

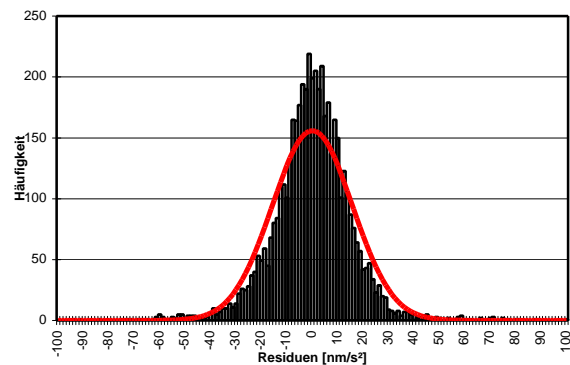


Abbildung G.31: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

2.3.3.4 Gesamtanalyse der Daten des zweiten Untersuchungsabschnitts

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: 00000020
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206
Scale 268,86 µGal/Volt

20030116 50000...20031117 40000 20031118170000...20040301 80000
20040303170000...20040325110000 20040326130000...20040608170000
20040611200000...20040718110000 20040718160000...20040821150000
20040823220000...20040905 50000 20040906 10000...20041010150000
Number of recorded days in total : 622.29
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.

adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1   350.1595  1.14918  0.00095  0.0580  0.0475
0.981855 0.998631 P1   163.2387  1.15137  0.00237  -0.2787  0.1182
0.998632 1.001369 S1    7.4981  2.23687  0.14381  7.5264  3.6838
1.001370 1.023622 K1   487.4855  1.13757  0.00072  0.1631  0.0362
1.914129 1.950419 M2   358.8852  1.18775  0.00062  2.1462  0.0301
1.984283 2.002736 S2   166.8987  1.18722  0.00132  0.6655  0.0636

Standard deviation of weight unit: 18.146 nm/s**2

```

Tabelle G.20: A206 - ungefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse ohne Luftdruckregression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: 00000018
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206
Scale 268,86 µGal/Volt

20030116 50000...20031117 40000 20031118170000...20040301 80000
20040303170000...20040325110000 20040326130000...20040608170000
20040611200000...20040718110000 20040718160000...20040821150000
20040823220000...20040905 50000 20040906 10000...20041010150000
Number of recorded days in total : 622.29
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.

adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1   350.1527  1.14915  0.00095  0.0576  0.0475
0.981855 0.998631 P1   163.2387  1.15137  0.00238  -0.2858  0.1183
0.998632 1.001369 S1    7.5768  2.26032  0.14428  8.1863  3.6597
1.001370 1.023622 K1   487.5077  1.13762  0.00072  0.1610  0.0362
1.914129 1.950419 M2   358.8767  1.18772  0.00062  2.1458  0.0301
1.984283 2.002736 S2   166.8246  1.18669  0.00133  0.6238  0.0646

Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff.      stdv. parameter unit
1      0.40615      0.12628  airpress. nm/s**2 / hPa

Standard deviation of weight unit: 18.141 nm/s**2

```

Tabelle G.21: A206 - ungefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse mit Luftdruckregression

oL	0.911391	0.947991	O1	350.1595	1.14918	0.00095	0.0580	0.0475
mL	0.911391	0.947991	O1	350.1527	1.14915	0.00095	0.0576	0.0475
oL	0.981855	0.998631	P1	163.2387	1.15137	0.00237	-0.2787	0.1182
mL	0.981855	0.998631	P1	163.2387	1.15137	0.00238	-0.2858	0.1183
oL	0.998632	1.001369	S1	7.4981	2.23687	0.14381	7.5264	3.6838
mL	0.998632	1.001369	S1	7.5768	2.26032	0.14428	8.1863	3.6597
oL	1.001370	1.023622	K1	487.4855	1.13757	0.00072	0.1631	0.0362
mL	1.001370	1.023622	K1	487.5077	1.13762	0.00072	0.1610	0.0362
oL	1.914129	1.950419	M2	358.8852	1.18775	0.00062	2.1462	0.0301
mL	1.914129	1.950419	M2	358.8767	1.18772	0.00062	2.1458	0.0301
oL	1.984283	2.002736	S2	166.8987	1.18722	0.00132	0.6655	0.0636
mL	1.984283	2.002736	S2	166.8246	1.18669	0.00133	0.6238	0.0646

Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30):
 ohne Luftdruck: $s = 18.146 \text{ nm/s}^2$ mit Luftdruck: $s = 18.141 \text{ nm/s}^2$

Tabelle G.22: A206 - ungefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie für die Partialtide S_1

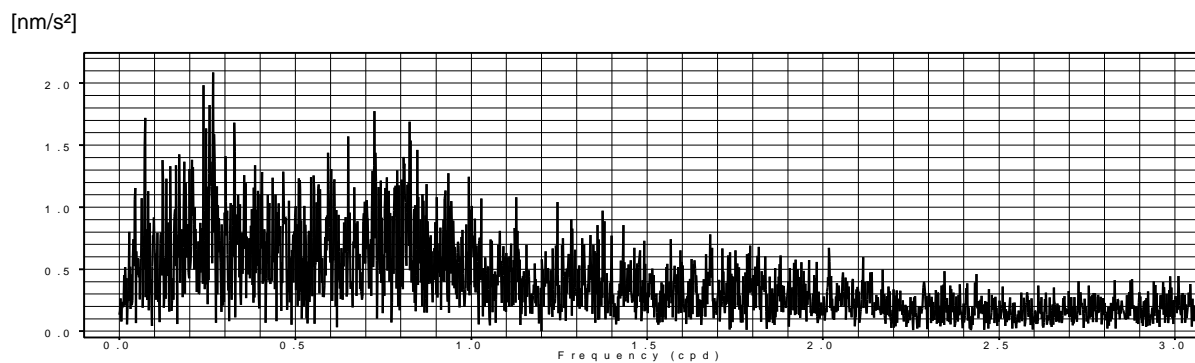


Abbildung G.32: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

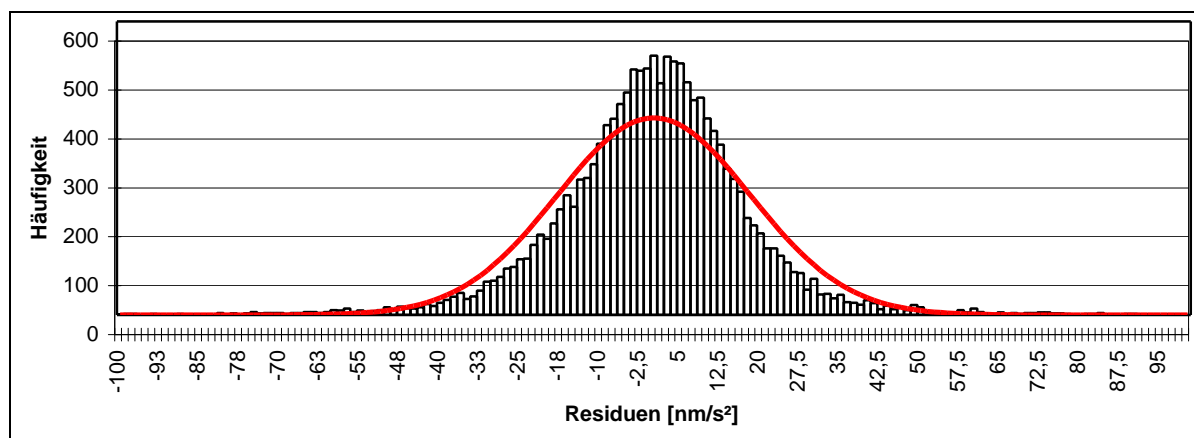


Abbildung G.33: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

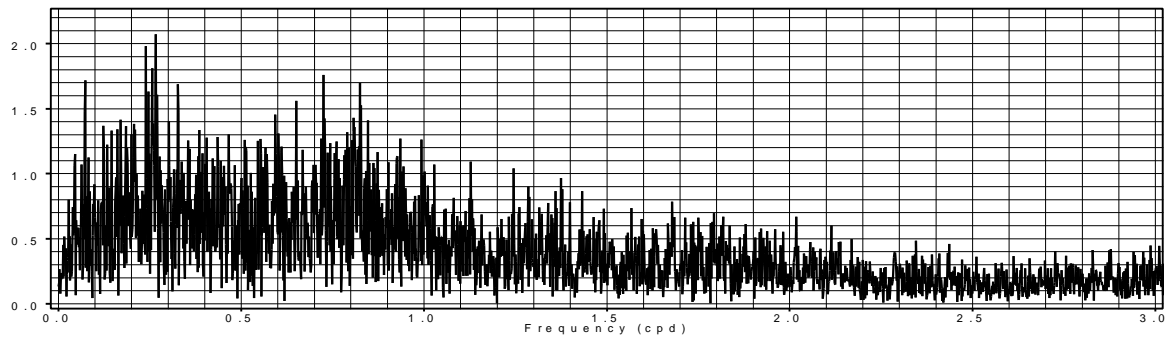
[nm/s²]

Abbildung G.34: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

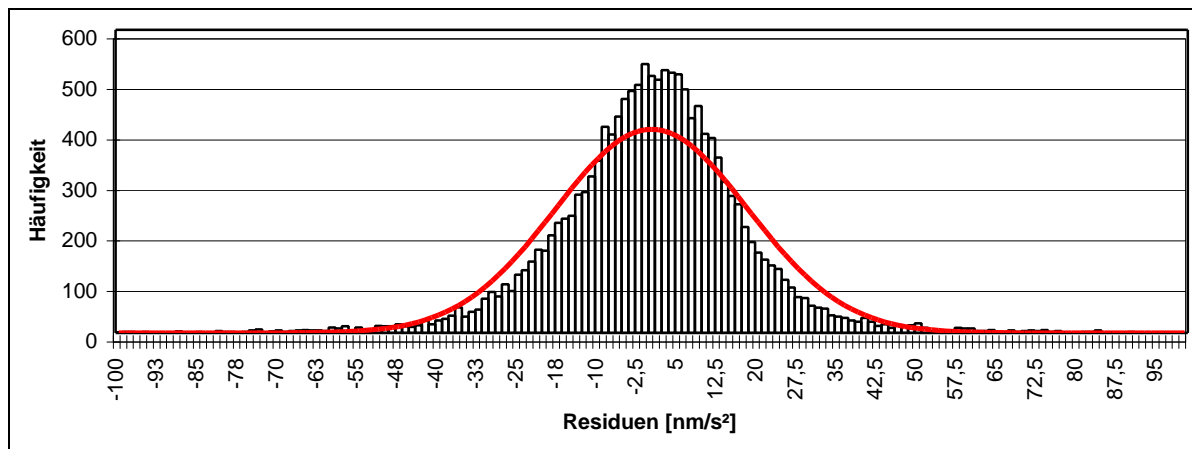


Abbildung G.35: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

2.3.3.5 Ergebniszusammenfassung

Die Ergebnisse der Gegenüberstellungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die *ohne* und *mit* Berücksichtigung einer Luftdruckregression berechneten Gezeitenparameter sowie deren Standardabweichungen sind praktisch identisch; lediglich geringfügige, statistisch jedoch nicht signifikante Änderungen treten (im Hinblick auf die beobachtete Luftdrucktide S_2 erwartungsgemäß) auf bei der Partialtide S_2 sowie bei der Partialtide S_1 , deren beobachtete Amplitude jedoch weniger als $1\mu\text{Gal}$ beträgt.

Signifikante Unterschiede in den Residuenspektren sind nicht zu erkennen; gleiches gilt für den zeitlichen Verlauf der Residuen, der mehr oder weniger ausgeprägte Erhaltungstendenzen aufweist.

Dieser Sachverhalt entspricht dem Untersuchungsergebnis für die gefilterten Daten.

- Die Unterschiede der in den beiden *Teilanalysen* für die Hauptpartialtiden berechneten *Amplitudenquotienten* sind statistisch (t-Test) nicht signifikant; sie liegen zwischen 0,0‰ für die Partialtide S_2 (nur Analyse mit Luftdruckregression) und 6,6‰ für die Partialtide P_1 . Die Differenzen und ihre Streuungen sind im Durchschnitt etwas größer als bei den gefilterten Daten. Es ist wiederum zu berücksichtigen, dass im ersten Beobachtungszeitraum innerhalb der Messkammer häufig tägliche Arbeiten ausgeführt wurden (siehe Abschnitt G2.1), die besonders für den Bereich der Tiden $P_1 S_1 K_1$ (Frequenzband $15^\circ/\text{h}$, bzw. $2\pi/\text{Tag}$) zu Störeinflüssen geführt haben dürften. Wegen des relativ kurzen Registrierzeitraums haben die im zweiten Beobachtungszeitraum für die Partialtide S_1 ermittelten Parameter nur begrenzte physikalische Bedeutung.
- Bei den *Phasendifferenzen* treten in den Ergebnissen der *Teilanalysen* Unterschiede auf, die ebenfalls als nicht signifikant einzustufen sind; die Beträge der Phasendifferenzen und ihre Streuungen entsprechen im wesentlichen den Werten, die für die gefilterten Daten ermittelt wurden. Bemerkenswert ist wiederum, dass bei der Partialtide M_2 mit $0^\circ,18$ (gefilterte Daten $0^\circ,14$) eine relativ große Differenz

auftritt, die vielleicht als schwach signifikant bewertet werden könnte; die halbtägige Mondtide M_2 weist mit $36\mu\text{Gal}$ fast die gleiche Amplitude auf wie die ganztägige Mondtide O_1 ($35\mu\text{Gal}$) bei jedoch etwa doppelter Anzahl von Schwingungen pro Zeiteinheit.

- Für die beiden *Teilanalysen* beträgt der Unterschied der *Modellanpassung* etwa 20% (Verhältnis der Standardabweichungen der Gewichtseinheit gleich 0,8) zugunsten des weniger gestörten zweiten Beobachtungszeitraums. Dieser Unterschied ist, wahrscheinlich als Folge des wesentlich höheren Rauschpegels der ungefilterten Beobachtungen, geringer als bei den gefilterten Daten (30%).
- Die *Spektren der Residuen* nach der Datenanalyse ohne und mit Berücksichtigung einer Luftdruckregression sind wiederum praktisch identisch. Die Residuenspektren der ersten und der zweiten Teilanalyse unterscheiden sich nur geringfügig. Auffällig sind, wie bei den Spektren der Residuen nach der Analyse der gefilterten Daten, schwach ausgeprägte, aber einheitlich auftretende Spitzen im Frequenzbereich von etwa 0,8cpd (entsprechend einer Periode von etwa 30 Stunden); im niederfrequenten Bereich sind erneut Spitzen im Bereich von 0,25cpd (Periode 4 Tage) zu erkennen.
- *Residuenverlauf und -struktur* werden durch eine zusätzliche Berücksichtigung zeitlicher Luftdruckänderungen nicht erkennbar beeinflusst. Ausgeprägte zeitliche Erhaltungstendenzen im Residuenverlauf sind für beide Analysenabschnitte gleichermaßen charakteristisch, im Vergleich mit den Residuen der gefilterten Daten sind sie jedoch deutlich überlagert durch kurzzeitige Variationen, die als Folge der erhöhten statistischen Unsicherheiten der stündlichen Mittelwerte der ungefilterten Beobachtungsdaten einzustufen sind (vgl. auch Abbildung D.28 und Abbildung D.30 in den Abschnitten D7.1 und D7.2). Größere individuelle Abweichungen im Residuenverlauf treten bisweilen dort auf, wo Sprungkorrekturen – sei es in der Zeitreihe der gefilterten, sei es in der Zeitreihe der ungefilterten Daten – einen signifikanten Restfehler aufweisen.
- Die *Histogramme der Residuen* weichen in allen Fällen signifikant von der Normalverteilung ab. Der Suche nach deterministischen Gründen für diesen Sachverhalt und nach Möglichkeiten zur Verhinderung oder Beseitigung der zugeordneten temporären Störungen kommt daher wiederum für die Gezeitenanalyse im Hinblick auf eine Optimierung der Modellanpassung eine große Bedeutung zu.

2.4 Gesamtanalysen der gefilterten Daten des ersten und zweiten Untersuchungsabschnitts

2.4.1 Vorbemerkung

Wie in Abschnitt D6.2.5 dargelegt und begründet wurde, war der für den ersten Auswerteabschnitt ermittelte und bei den Analysen verwendete Maßstabsfaktor $124,39\mu\text{Gal/Volt}$ im Hinblick auf die erreichte statistische Signifikanz als vorläufig einzustufen. Die Untersuchung der Maßstabstabilität mit Hilfe aufeinander folgender Zweimonatsanalysen in Abschnitt E4.1 zeigte ferner im Registrierzeitraum von 762 Tagen den als signifikant einzustufenden Trend einer Maßstabsänderung von etwa 5‰ (Abbildung E.37). Die innerhalb des ersten Untersuchungsabschnitts durchgeführten Gesamtanalysen basierten jedoch auf der Annahme einer zeitlichen Maßstabskonstanz. Infolgedessen ist es für eine Gegenüberstellung der Analyseergebnisse des ersten Untersuchungsabschnitts mit jenen des zweiten Auswerteabschnitts zunächst erforderlich, den „endgültigen“ Registriermaßstab zu bestimmen.

2.4.2 Korrektur des Registriermaßstabes der Daten des ersten Untersuchungsabschnitts

Da zwischen dem Registrierzeitraum vom 16.11.2001 bis 14.01.2003 (erster Untersuchungsabschnitt) und dem anschließenden Registrierzeitraum vom 16.01.2003 bis 10.10.2004 (zweiter Untersuchungsabschnitt) keinerlei messtechnische Änderungen vorgenommen wurden (die Unterteilung des Gesamtzeitraums hatte überwiegend praktische und methodische Gründe), ist davon auszugehen, dass der Registriermaßstab am Ende des *ersten* Zeitraums identisch ist mit dem nach statistischen Kriterien als konstant anzusetzenden Registriermaßstab des *zweiten* Zeitraums (siehe vorhergehenden Abschnitt G2.2.3). Dieser Maßstab wurde mit einer relativen *statistischen* Unsicherheit von etwa 0,7‰ zu $124,152\mu\text{Gal/Volt}$ ermittelt (Abschnitt G2.2.1); der *systematische* Fehleranteil lässt sich zu einigen Zehntel-Promille abschätzen und resultiert im wesentlichen aus den messtechnischen Grenzen der Bestimmung des Mikrometermaßstabes im Bezug zum Spindelmaßstab (Abschnitt D6.2.4). Somit kann der Registriermaßstab am Ende des ersten Beobachtungszeitraumes gleichermaßen zu $124,152\mu\text{Gal/Volt}$ festgelegt werden.

Fügt man die Ergebnisse aufeinander folgender Zweimonatsanalysen beider Untersuchungsabschnitte zusammen, so ergibt sich für die Amplitudenquotienten der Hauptpartialide M_2 der in Abbildung G.36 dargestellte zeitliche Verlauf

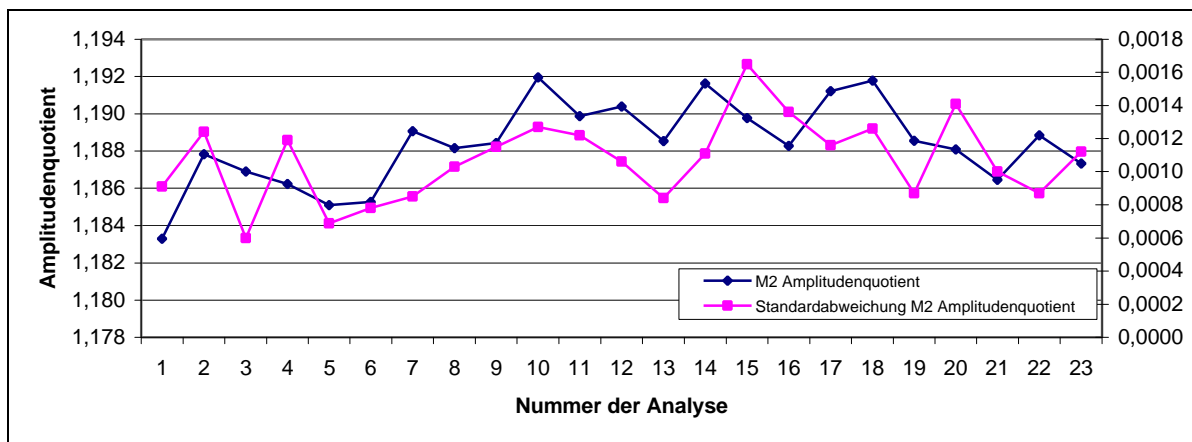


Abbildung G.36: Gravimeter A206, gefilterte Daten, erster und zweiter Untersuchungsabschnitt zeitlicher Verlauf der Amplitudenquotienten M_2 bei aufeinanderfolgenden 2-Monatsanalysen, bis Analyse 12 erster Untersuchungsabschnitt

Die Berücksichtigung der zeitlichen Änderungen des Registriermaßstabs während des ersten Untersuchungsabschnitts erfolgt nun durch Ansatz eines zeitproportionalen Maßstabskorrekturfaktors, mit dem die beobachteten Messdaten multipliziert werden: Am Ende des Untersuchungsabschnitts (14.01.2003) beträgt dieser Faktor in Folge der vorstehenden Festlegung exakt 1, zu Beginn des Jahres 2001 liegt er bei 1,0056 (Abbildung E.37 in Abschnitt E4.1). Dieses Verfahren führt zu einer relativen Maßstabsnormierung der Beobachtungsdaten bezogen auf das Ende des Registrierabschnitts.

2.4.3 Ergebnisse der Gesamtanalysen der maßstabskorrigierten Daten des ersten Untersuchungsabschnitts

2.4.3.1 Gesamtanalyse ohne Luftdruckregression

Der erste Untersuchungsabschnitt begann am 16.11.2000 zunächst mit Testregistrierungen ohne Parallelaufzeichnungen des Luftdrucks; diese konnten erst ab 28.03.2001 durchgeführt werden. Um Vergleichbarkeit der Analysenergebnisse *ohne* Luftdruckregression herzustellen mit den Analysenergebnissen, die auf dem zusätzlichen Ansatz einer Luftdruckregression beruhen, wird im folgenden für *beide* Zeitreihen der Auswertungsbeginn auf den 28.03.2001 festgelegt.

Zum Zwecke der relativen Maßstabsnormierung wurden die Registrierdaten mit dem zuvor definierten, linearzeitabhängigen Maßstabskorrekturfaktor multipliziert; am 28.03.2001 (Beginn der Parallelregistrierungen des Luftdrucks) beträgt dieser 1,0050, am 14.01.2003 (Ende des ersten Untersuchungsabschnitts) 1,0000.

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: 00000065
ASKANIA GRAVIMETER GS25 Nr.206
Scale 124,152 µGal/Volt

20010328190000...20010623200000 20010624110000...20010726 0
20010726 90000...20010904150000 20010905 30000...20011012150000
20011014210000...20020520 60000 20020520140000...20030114110000
Number of recorded days in total : 652.83
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.

adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1  350.1012  1.14898  0.00084  0.0536  0.0419
0.981855 0.998631 P1  163.1708  1.15088  0.00189  -0.2796  0.0944
0.998632 1.001369 S1   7.5208  2.24358  0.11288  2.3359  2.8822
1.001370 1.023622 K1  487.1692  1.13683  0.00061  0.1823  0.0307
1.914129 1.950419 M2  359.2569  1.18898  0.00031  2.1321  0.0151
1.984283 2.002736 S2  167.8149  1.19374  0.00068  0.3481  0.0324

Standard deviation of weight unit: 14.206 nm/s**2

```

Tabelle G.23: A206 - gefilterte Daten, erster Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse ohne Luftdruckregression

2.4.3.2 Gesamtanalyse mit Luftdruckregression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: A206GeT4
ASKANIA GRAVIMETER GS25 Nr.206
Scale 124,152 µGal/Volt

20010328190000...20010623200000 20010624110000...20010726 0
20010726 90000...20010904150000 20010905 30000...20011012150000
20011014210000...20020520 60000 20020520140000...20030114110000
Number of recorded days in total : 652.83
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.

adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1  350.1036  1.14899  0.00084  0.0541  0.0419
0.981855 0.998631 P1  163.1744  1.15091  0.00189  -0.2798  0.0944
0.998632 1.001369 S1   7.5341  2.24758  0.11298  2.4919  2.8830
1.001370 1.023622 K1  487.1748  1.13684  0.00061  0.1820  0.0307
1.914129 1.950419 M2  359.2563  1.18897  0.00031  2.1325  0.0151
1.984283 2.002736 S2  167.7956  1.19360  0.00068  0.3376  0.0328

Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff.      stdv.  parameter  unit
1      0.10887      0.07801  airpress.  nm/s**2 / hPa

Standard deviation of weight unit: 14.206 nm/s**2

```

Tabelle G.24: A206 - gefilterte Daten, erster Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse mit Luftdruckregression

2.4.3.3 Gegenüberstellung der Analysenergebnisse ohne und mit Luftdruckregression

oL	0.911391	0.947991	O1	350.1012	1.14898	0.00084	0.0536	0.0419
mL	0.911391	0.947991	O1	350.1036	1.14899	0.00084	0.0541	0.0419
oL	0.981855	0.998631	P1	163.1708	1.15088	0.00189	-0.2796	0.0944
mL	0.981855	0.998631	P1	163.1744	1.15091	0.00189	-0.2798	0.0944
oL	0.998632	1.001369	S1	7.5208	2.24358	0.11288	2.3359	2.8822
mL	0.998632	1.001369	S1	7.5341	2.24758	0.11298	2.4919	2.8830
oL	1.001370	1.023622	K1	487.1692	1.13683	0.00061	0.1823	0.0307
mL	1.001370	1.023622	K1	487.1748	1.13684	0.00061	0.1820	0.0307
oL	1.914129	1.950419	M2	359.2569	1.18898	0.00031	2.1321	0.0151
mL	1.914129	1.950419	M2	359.2563	1.18897	0.00031	2.1325	0.0151
oL	1.984283	2.002736	S2	167.8149	1.19374	0.00068	0.3481	0.0324
mL	1.984283	2.002736	S2	167.7956	1.19360	0.00068	0.3376	0.0328

Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30):
 ohne Luftdruck: $s = 14.206 \text{ nm/s}^2$ mit Luftdruck: $s = 14.206 \text{ nm/s}^2$

Tabelle G.25: A206 - gefilterte Daten – erster Untersuchungsabschnitt - Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie für die Partialtide S_1

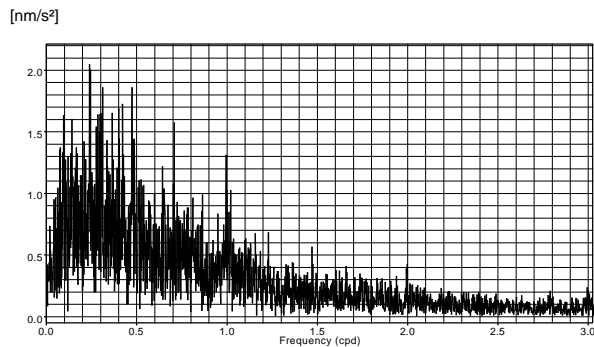


Abbildung G.37: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – erster Untersuchungsabschnitt, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

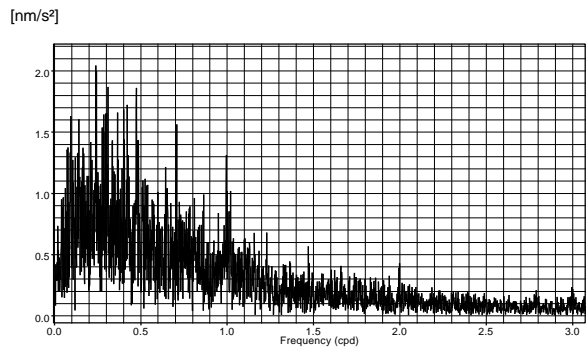


Abbildung G.38: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – erster Untersuchungsabschnitt, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

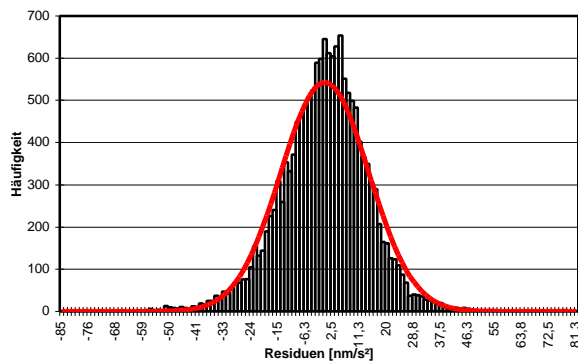


Abbildung G.39: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – erster Untersuchungsabschnitt, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

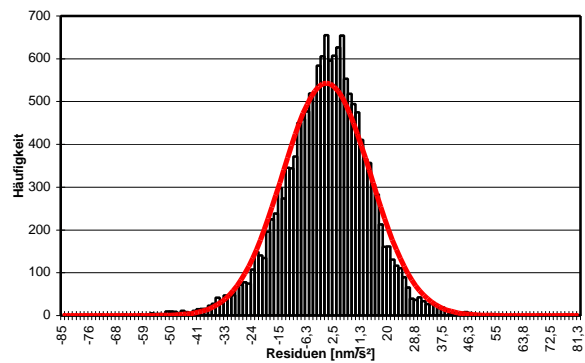


Abbildung G.40: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – erster Untersuchungsabschnitt, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

2.4.3.4 Ergebniszusammenfassung

Die Ergebnisse der Gegenüberstellungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die *ohne* und *mit* Berücksichtigung einer Luftdruckregression berechneten Gezeitenparameter sowie deren Standardabweichungen sind praktisch identisch; lediglich geringfügige, statistisch jedoch nicht signifikante Änderungen treten (vgl. Abschnitt G2.2.2.4) nur bei der Partialtide S_1 auf, deren beobachtete Amplitude jedoch lediglich $0,7\mu\text{Gal}$ beträgt (vgl. Ergebnisse des zweiten Untersuchungsabschnitts, Abschnitte G2.2.2.4 und G2.2.2.5).

Signifikante Unterschiede in den Residuenspektren sind nicht zu erkennen; gleiches gilt wiederum für den zeitlichen Verlauf der Residuen.

- Die *Spektren der Residuen* nach der Datenanalyse ohne und mit Berücksichtigung einer Luftdruckregression sind praktisch identisch. Im Unterschied zu den Residuenspektren des *zweiten* Untersuchungsabschnitts (siehe Abbildung G.13 und Abbildung G.15 in Abschnitt G2.2.2.4) tritt an der Stelle 1cpd eine signifikante, an der Stelle 2cpd eine schwach ausgeprägte Spitze auf. Die zuvor festgestellten schwach ausgeprägten Spitzen im Bereich von $0,8\text{cpd}$ finden sich in den Residuenspektren des *ersten* Untersuchungsabschnitts in ausgeprägter Form wieder, nun allerdings an der Stelle $0,7\text{cpd}$. Im langperiodischen Bereich wiederholt sich das Auftreten eines Maximums im Bereich von $0,25\text{cpd}$.
- Die *Histogramme der Residuen* weichen wiederum signifikant von der Normalverteilung ab (vgl. Abschnitt G2.2.2.4).

2.4.4 Gefilterte Daten – Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen des ersten und zweiten Untersuchungsabschnitts

Zusammenfassung der in Tabelle G.26 nachgewiesenen Analyseergebnisse:

- Für die beiden Untersuchungsabschnitte differieren die berechneten Standardabweichungen der Gewichtseinheit (als Maß für die erreichte Modellanpassung) um lediglich 5%; in dieser Hinsicht sind also die Auswirkungen der in der Messkammer durchgeführten unterschiedlichen experimentellen Arbeiten auf die Güte der Registrierungen in beiden Untersuchungsabschnitten weitgehend gleich.
- Bei den Amplitudenquotienten der Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 , die für eine Maßstabsüberprüfung verwendet werden können, beträgt ohne Ansatz einer Luftdruckregression die maximale Abweichung zwischen den Ergebnissen des ersten und zweiten Untersuchungsabschnitts $0,65\%$ (K_1); für die vier Partialtiden im Mittel $0,20\%$. Mit Ansatz einer Luftdruckregression ergeben sich praktisch identische Abweichungen von $0,64\%$, bzw. $0,21\%$. Die im vorstehenden Abschnitt G2.4.2 beschriebene relative Maßstabskorrektur der Beobachtungsdaten des ersten Untersuchungsabschnitts kann somit als richtig und sinnvoll bewertet werden. Größere Unterschiede treten erwartungsgemäß auf bei der Partialtide S_2 sowie der (kleinen) Partialtide S_1 .
- Die berechneten Phasendifferenzen liegen bei den Partialtiden O_1 P_1 K_1 im Bereich von $0^\circ,06$; nach statistischen Gesichtspunkten wären die Unterschiede mit Bezug auf die Standardabweichungen der Phasendifferenzen jedoch als nichtsignifikant zu bewerten. Im Hinblick auf die im vorstehenden Abschnitt G2.2.2.3 nachgewiesenen Ergebnisse (Tabelle G.7 und Tabelle G.8) ist bemerkenswert; dass die für M_2 berechneten Phasendifferenzen in beiden Untersuchungsabschnitten praktisch übereinstimmen (sie unterscheiden sich lediglich um maximal $0^\circ,013$).

1oL	O1	350.1012	nm/s ²	1.14898	0.00084	0.0536	0.0419
2oL	O1	350.1854		1.14928	0.00089	-0.0076	0.0445
		Faktor 0,99974		Differenz +0,0612			
1mL	O1	350.1036		1.14899	0.00084	0.0541	0.0419
2mL	O1	350.1829		1.14927	0.00089	-0.0078	0.0446
		Faktor 0,99976		Differenz +0,0619			
1oL	P1	163.1708	nm/s ²	1.15088	0.00189	-0.2796	0.0944
2oL	P1	163.1713		1.15090	0.00223	-0.2212	0.1110
		Faktor 0,99998		Differenz -0,0584			
1mL	P1	163.1744		1.15091	0.00189	-0.2798	0.0944
2mL	P1	163.1713		1.15090	0.00223	-0.2239	0.1112
		Faktor 1,00001		Differenz -0,0559			
1oL	S1	7.5208	nm/s ²	2.24358	0.11288	2.3359	2.8822
2oL	S1	8.5857		2.56156	0.13499	-7.0929	3.0196
1mL	S1	7.5341		2.24758	0.11298	2.4919	2.8830
2mL	S1	8.6059		2.56759	0.13532	-6.8325	3.0316
1oL	K1	487.1692	nm/s ²	1.13683	0.00061	0.1823	0.0307
2oL	K1	486.8486		1.13609	0.00067	0.1129	0.0340
		Faktor 1,00065		Differenz +0,0694			
1mL	K1	487.1748		1.13684	0.00061	0.1820	0.0307
2mL	K1	486.8570		1.13611	0.00068	0.1121	0.0341
		Faktor 1,00064		Differenz +0,0699			
1oL	M2	359.2569	nm/s ²	1.18898	0.00031	2.1321	0.0151
2oL	M2	359.1025		1.18846	0.00045	2.1476	0.0218
		Faktor 1,00044		Differenz -0,0155			
1mL	M2	359.2563		1.18897	0.00031	2.1325	0.0151
2mL	M2	359.0993		1.18845	0.00045	2.1474	0.0217
		Faktor 1,00044		Differenz -0,0149			
1oL	S2	167.8149	nm/s ²	1.19374	0.00068	0.3481	0.0324
2oL	S2	166.9156		1.18734	0.00095	0.4582	0.0460
		Faktor 1,00539		Differenz -0,1101			
1mL	S2	167.7956		1.19360	0.00068	0.3376	0.0328
2mL	S2	166.8879		1.18714	0.00096	0.4425	0.0467
		Faktor 1,00544		Differenz -0,1049			
Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30):							
1	ohne Luftdruck: s = 14.206 nm/s ²		mit Luftdruck: s = 14.206 nm/s ²				
2	ohne Luftdruck: s = 14.936 nm/s ²		mit Luftdruck: s = 14.935 nm/s ²				

Tabelle G.26: A206 - gefilterte Daten – Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen des ersten und des zweiten Untersuchungsabschnitts ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O₁ P₁ K₁ M₂ S₂ sowie für die Partialtide S₁

2.4.5 Gefilterte Daten - Analysen der Daten des gesamten Untersuchungszeitraums vom 28.03.2001 bis 10.10.2004

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: 00000066

ASKANIA GRAVIMETER GS25 Nr.206
Scale 124,152 µGal/Volt

Summary of observation data :

20010328190000...20010623200000  20010624110000...20010726    0
20010726 90000...20010904150000  20010905 30000...20011012150000
20011014210000...20020520 60000  20020520140000...20030114110000
20030116 50000...20031117 40000  20031118170000...20040301 80000
20040303170000...20040325110000  20040326130000...20040608170000
20040611200000...20040718110000  20040718160000...20040821150000
20040823220000...20040905 50000  20040906 10000...20041010150000
Number of recorded days in total : 1275.13
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.

Estimation of noise by FOURIER-spectrum of residuals
0.1 cpd band99999.9990 nm/s**2      1.0 cpd band    0.3774 nm/s**2
2.0 cpd band    0.1574 nm/s**2      3.0 cpd band    0.0817 nm/s**2
4.0 cpd band    0.0543 nm/s**2      white noise     0.2326 nm/s**2

adjusted tidal parameters :

from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.501370 0.911390 Q1   66.3139  1.13669  0.00301  -0.6426  0.1518
0.911391 0.947991 O1   350.1447  1.14913  0.00059  0.0211  0.0292
0.947992 0.981854 M1   28.2907  1.18056  0.00632  0.8476  0.3066
0.981855 0.998631 P1   163.2117  1.15117  0.00138  -0.2330  0.0685
0.998632 1.001369 S1    8.0474  2.40070  0.08273  -2.7137  1.9744
1.001370 1.023622 K1   486.9747  1.13637  0.00043  0.1430  0.0217
1.023623 1.035379 TET1  5.0122  1.09380  0.03910  0.8266  2.0488
1.035380 1.057485 J1   27.8198  1.16094  0.00768  -0.1215  0.3791
1.057486 1.071833 SO1   4.8304  1.21520  0.04509  -2.1643  2.1254
1.071834 1.470243 OO1  15.2558  1.16357  0.01059  -0.2058  0.5214
1.470244 1.880264 2N2  10.6174  1.14926  0.00694  3.9164  0.3459
1.880265 1.914128 N2   67.8197  1.17232  0.00142  2.8775  0.0694
1.914129 1.950419 M2   359.1779  1.18871  0.00027  2.1405  0.0130
1.950420 1.984282 L2   10.0805  1.18032  0.00710  0.9118  0.3449
1.984283 2.002736 S2   167.3674  1.19056  0.00057  0.4026  0.0276
2.002737 2.451943 K2   45.6501  1.19459  0.00187  0.6869  0.0895
2.451944 3.381378 M3    4.0434  1.07328  0.01062  -0.3292  0.5670
3.381379 4.347615 M4    0.0485  1.11384  0.59868  18.4261  30.7923

Standard deviation of weight unit: 14.592 nm/s**2

```

Tabelle G.27: A206 - gefilterte Daten des ersten und zweiten Untersuchungsabschnitts, Ergebnisse der Gesamtanalyse ohne Luftdruckregression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File:  A206Ges4

ASKANIA GRAVIMETER GS25 Nr.206
Scale 124,152 µGal/Volt

Summary of observation data :

20010328190000...20010623200000  20010624110000...20010726    0
20010726 90000...20010904150000  20010905 30000...20011012150000
20011014210000...20020520 60000  20020520140000...20030114110000
20030116 50000...20031117 40000  20031118170000...20040301 80000
20040303170000...20040325110000  20040326130000...20040608170000
20040611200000...20040718110000  20040718160000...20040821150000
20040823220000...20040905 50000  20040906 10000...20041010150000
Number of recorded days in total : 1275.13
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.

Estimation of noise by FOURIER-spectrum of residuals
0.1 cpd band99999.9990 nm/s**2          1.0 cpd band    0.3778 nm/s**2
2.0 cpd band    0.1574 nm/s**2          3.0 cpd band    0.0816 nm/s**2
4.0 cpd band    0.0543 nm/s**2          white noise     0.2326 nm/s**2

adjusted tidal parameters :

from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.501370 0.911390 Q1   66.3147  1.13670  0.00302 -0.6404  0.1520
0.911391 0.947991 O1   350.1448  1.14913  0.00059  0.0213  0.0292
0.947992 0.981854 M1   28.2907  1.18055  0.00632  0.8514  0.3070
0.981855 0.998631 P1  163.2135  1.15119  0.00138 -0.2341  0.0686
0.998632 1.001369 S1    8.0620  2.40506  0.08292 -2.5335  1.9797
1.001370 1.023622 K1  486.9807  1.13639  0.00043  0.1425  0.0217
1.023623 1.035379 TET1  5.0094  1.09319  0.03915  0.8031  2.0523
1.035380 1.057485 J1   27.8169  1.16082  0.00769 -0.1272  0.3796
1.057486 1.071833 SO1   4.8308  1.21530  0.04514 -2.1218  2.1279
1.071834 1.470243 OO1  15.2546  1.16348  0.01060 -0.2061  0.5220
1.470244 1.880264 2N2  10.6181  1.14933  0.00693  3.9233  0.3458
1.880265 1.914128 N2   67.8184  1.17230  0.00142  2.8784  0.0694
1.914129 1.950419 M2  359.1765  1.18871  0.00027  2.1407  0.0130
1.950420 1.984282 L2   10.0803  1.18029  0.00710  0.9115  0.3448
1.984283 2.002736 S2  167.3470  1.19041  0.00058  0.3914  0.0279
2.002737 2.451943 K2   45.6483  1.19455  0.00187  0.6822  0.0895
2.451944 3.381378 M3    4.0436  1.07334  0.01061 -0.3308  0.5662
3.381379 4.347615 M4    0.0486  1.11635  0.59906 18.8138 30.7428

Adjusted meteorological or hydrological parameters:

no. regr.coeff.      stdv.  parameter  unit
1      0.11302      0.06282  airpress.  nm/s**2 / hPa

Standard deviation of weight unit:      14.592 nm/s**2

```

Tabelle G.28: A206 - gefilterte Daten des ersten und zweiten Untersuchungsabschnitts, Ergebnisse der Gesamtanalyse mit Luftdruckregression

oL	0.911391	0.947991	O1	350.1447	1.14913	0.00059	0.0211	0.0292
mL	0.911391	0.947991	O1	350.1448	1.14913	0.00059	0.0213	0.0292
oL	0.981855	0.998631	P1	163.2117	1.15117	0.00138	-0.2330	0.0685
mL	0.981855	0.998631	P1	163.2135	1.15119	0.00138	-0.2341	0.0686
oL	0.998632	1.001369	S1	8.0474	2.40070	0.08273	-2.7137	1.9744
mL	0.998632	1.001369	S1	8.0620	2.40506	0.08292	-2.5335	1.9797
oL	1.001370	1.023622	K1	486.9747	1.13637	0.00043	0.1430	0.0217
mL	1.001370	1.023622	K1	486.9807	1.13639	0.00043	0.1425	0.0217
oL	1.914129	1.950419	M2	359.1779	1.18871	0.00027	2.1405	0.0130
mL	1.914129	1.950419	M2	359.1765	1.18871	0.00027	2.1407	0.0130
oL	1.984283	2.002736	S2	167.3674	1.19056	0.00057	0.4026	0.0276
mL	1.984283	2.002736	S2	167.3470	1.19041	0.00058	0.3914	0.0279

Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30):
 ohne Luftdruck: $s = 14.592 \text{ nm/s}^2$ mit Luftdruck: $s = 14.592 \text{ nm/s}^2$

Tabelle G.29: A206 - gefilterte Daten des ersten und zweiten Untersuchungsabschnitts - Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O₁ P₁ K₁ M₂ S₂ sowie für die Partialtide S₁

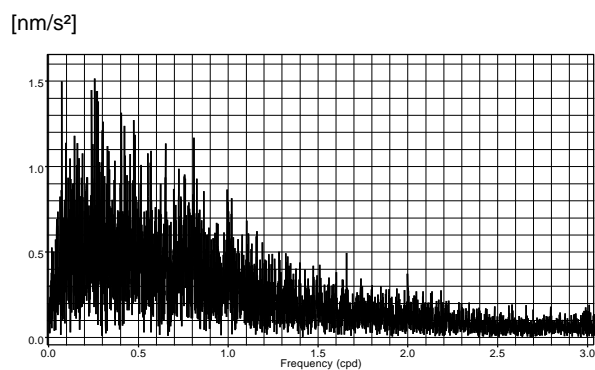


Abbildung G.41: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – Gesamter Untersuchungszeitraum, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

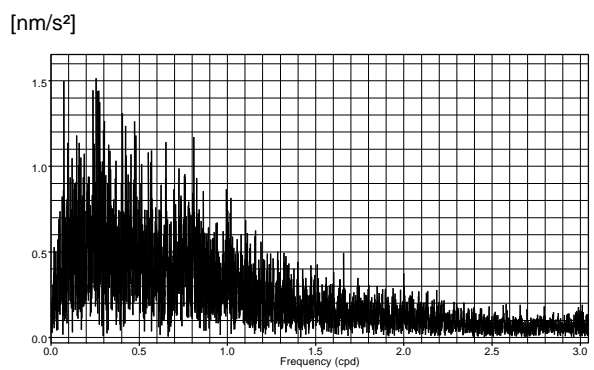


Abbildung G.42: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – Gesamter Untersuchungszeitraum, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

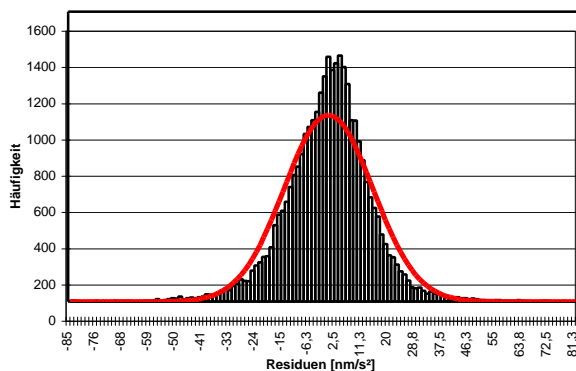


Abbildung G.43: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – Gesamter Untersuchungszeitraum, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

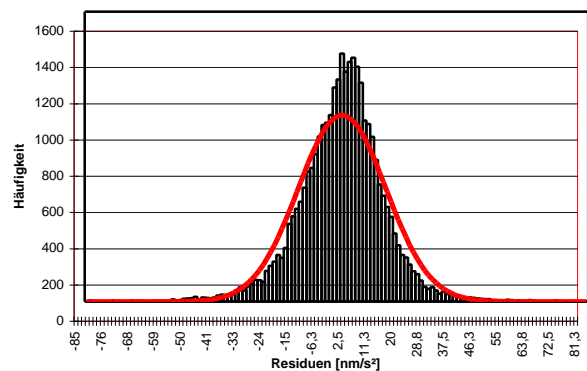


Abbildung G.44: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – Gesamter Untersuchungszeitraum, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

Ergebniszusammenfassung:

- Die ohne und mit Ansatz einer Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden berechneten Gezeitenparameter stimmen (einschließlich der Parameter für die Partialtide S_2) weitestgehend überein. Geringe Unterschiede bestehen weiterhin bei der (kleinen) Partialtide S_1 ; diese sind jedoch nach statistischen Kriterien weiterhin als nichtsignifikant einzustufen.
- Mit Bezug auf die Aufgabenstellung kann festgestellt werden, dass die statistische Auflösung der für die Hauptpartialtiden berechneten Amplitudenquotienten im Bereich von $\leq 1\%$ liegt. Wiederum bemerkenswert ist, dass die beste Auflösung der Phasendifferenzen mit etwa $0^\circ,01$ für die Partialtide M_2 erzielt wird; die statistische Auflösung der übrigen Hauptpartialtiden beträgt $\leq 0^\circ,03$.
- Der zusätzliche Ansatz einer Luftdruckregression führt bei den Residuenspektren zu keinen erkennbaren Änderungen gegenüber den Ergebnissen ohne Luftdruckregression. Schwach ausgeprägte Spitzen treten erneut auf an den Stellen 1cpd und 0,8cpd (mit schwächer ausgeprägten Spitzen bei 2cpd und 1,65cpd). Ferner sind wiederum Periodizitäten zu erkennen bei 0,25cpd (entsprechend einer Periode von 4 Tagen).
- Die *Histogramme der Residuen* weichen wie bei den Teilzeiträumen (vgl. Abschnitte G2.2.2.4 und G2.4.3.3) signifikant von der Normalverteilung ab.

2.4.6 Erweiterte Untersuchungen zur zeitlichen Stabilität des Registriermaßstabs

Die für die Daten des ersten Untersuchungsabschnitts durchgeführten Maßstabskorrekturen erfordern auf der Grundlage aufeinander folgender Zweimonatsanalysen eine erneute Überprüfung potentieller zeitlicher Variationen des Registriermaßstabs. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Rahmen des nachfolgenden Abschnitts G2.7 nachgewiesen.

2.5 Gesamtanalysen der ungefilterten Daten des ersten und zweiten Untersuchungsabschnitts

2.5.1 Vorbemerkung

Innerhalb des ersten Untersuchungsabschnitts wurden die Aufzeichnungen der ungefilterten Daten des Gravimeters A206 am 20.07.2001 begonnen; der Beobachtungszeitraum ist somit im Vergleich mit den Registrierungen der gefilterten Daten um 110 Tage kürzer (siehe Abschnitt G2.4.3.1).

2.5.2 Korrektur des Registriermaßstabs der Daten des ersten Untersuchungsabschnitts

Da die Registriermaßstäbe der gefilterten und ungefilterten Daten ausschließlich über die Widerstandswerte des verwendeten Spannungsteilers verknüpft sind (siehe Abschnitte E1 und G2.3.2), müssen die während des ersten Untersuchungsabschnitts festgestellten zeitlichen Änderungen des Registriermaßstabs der gefilterten Daten identisch sein mit entsprechenden zeitlichen Maßstabsänderungen der ungefilterten Daten. Für diese Daten wurde daher nach dem gleichen Verfahren, das bei den gefilterten Daten angewandt wurde (siehe Abschnitt G2.4.2), eine relative Maßstabskorrektur durchgeführt; am 20.07.2001 betrug der Maßstabskorrekturfaktor 1,0041, am 14.01.2003 (Ende des ersten Untersuchungsabschnitts) 1,0000. Der Registriermaßstab des zweiten Untersuchungsabschnitts bildet für die relative Maßstabskorrektur wieder das Referenzniveau (268,86 μ Gal/Volt, siehe Abschnitt G2.3.2).

2.5.3 Ergebnisse der Gesamtanalysen der maßstabskorrigierten Daten des ersten Untersuchungsabschnitts

2.5.3.1 Gesamtanalyse ohne Luftdruckregression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: 00000068
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206
Scale 268,86 µGal/Volt
20010720 90000...20010726      0 20010726 90000...20010904150000
20010904190000...20030114110000
Number of recorded days in total : 542.67
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.

adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1  349.6895  1.14763  0.00095  0.0108  0.0476
0.981855 0.998631 P1  162.9496  1.14933  0.00218 -0.3188  0.1088
0.998632 1.001369 S1    7.8822  2.35143  0.13398 11.8343  3.2633
1.001370 1.023622 K1  486.7736  1.13590  0.00070  0.0971  0.0353
1.914129 1.950419 M2  358.3077  1.18583  0.00060  2.2464  0.0288
1.984283 2.002736 S2  167.5310  1.19172  0.00127  0.2935  0.0611

Standard deviation of weight unit: 19.230 nm/s**2

```

Tabelle G.30: A206 - ungefilterte Daten, erster Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse ohne Luftdruckregression

2.5.3.2 Gesamtanalyse mit Luftdruckregression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: 00000069
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206
Scale 268,86 µGal/Volt
20010720 90000...20010726      0 20010726 90000...20010904150000
20010904190000...20030114110000
Number of recorded days in total : 542.67
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.

adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1  349.8061  1.14802  0.00095  0.0087  0.0475
0.981855 0.998631 P1  162.9644  1.14943  0.00218 -0.3328  0.1086
0.998632 1.001369 S1    8.3393  2.48781  0.13394 10.0541  3.0790
1.001370 1.023622 K1  486.7440  1.13584  0.00070  0.0803  0.0353
1.914129 1.950419 M2  358.3525  1.18598  0.00059  2.2361  0.0285
1.984283 2.002736 S2  167.5644  1.19196  0.00126  0.5469  0.0610

Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff.      stdv. parameter unit
  1      2.30069      0.10992  airpress. nm/s**2 / hPa

Standard deviation of weight unit: 18.912 nm/s**2

```

Tabelle G.31: A206 - ungefilterte Daten, erster Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse mit Luftdruckregression

2.5.3.3 Gegenüberstellung der Analysenergebnisse mit und ohne Luftdruckregression

oL	0.911391	0.947991	O1	349.6895	1.14763	0.00095	0.0108	0.0476
mL	0.911391	0.947991	O1	349.8061	1.14802	0.00095	0.0087	0.0475
oL	0.981855	0.998631	P1	162.9496	1.14933	0.00218	-0.3188	0.1088
mL	0.981855	0.998631	P1	162.9644	1.14943	0.00218	-0.3328	0.1086
oL	0.998632	1.001369	S1	7.8822	2.35143	0.13398	11.8343	3.2633
mL	0.998632	1.001369	S1	8.3393	2.48781	0.13394	10.0541	3.0790
oL	1.001370	1.023622	K1	486.7736	1.13590	0.00070	0.0971	0.0353
mL	1.001370	1.023622	K1	486.7440	1.13584	0.00070	0.0803	0.0353
oL	1.914129	1.950419	M2	358.3077	1.18583	0.00060	2.2464	0.0288
mL	1.914129	1.950419	M2	358.3525	1.18598	0.00059	2.2361	0.0285
oL	1.984283	2.002736	S2	167.5310	1.19172	0.00127	0.2935	0.0611
mL	1.984283	2.002736	S2	167.5644	1.19196	0.00126	0.5469	0.0610

Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30):
 ohne Luftdruck: $s = 19.230 \text{ nm/s}^2$ mit Luftdruck: $s = 18.912 \text{ nm/s}^2$

Tabelle G.32: A206 - ungefilterte Daten – erster Untersuchungsabschnitt - Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie für die Partialtide S_1

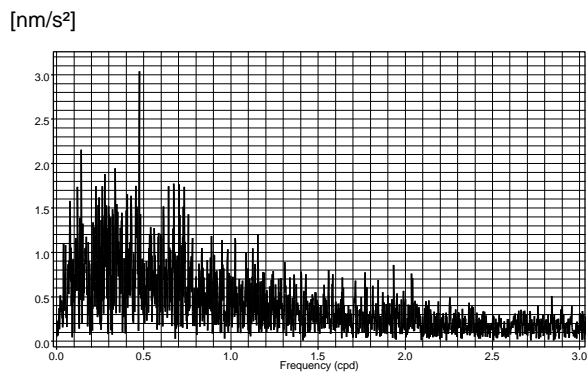


Abbildung G.45: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – erster Untersuchungsabschnitt, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

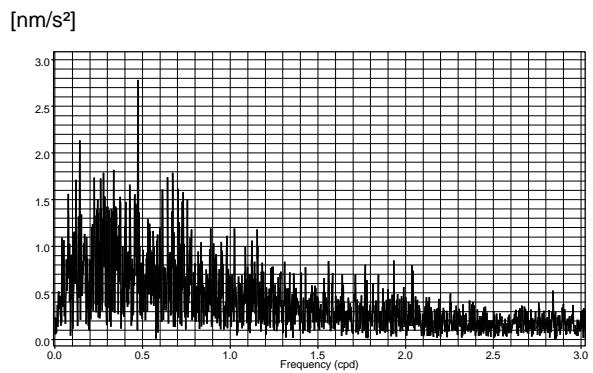


Abbildung G.46: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – erster Untersuchungsabschnitt, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

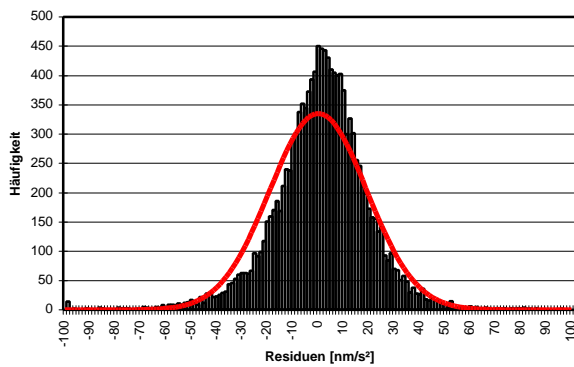


Abbildung G.47: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – erster Untersuchungsabschnitt, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

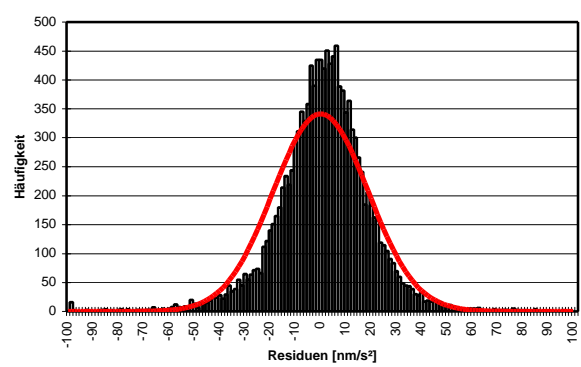


Abbildung G.48: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – erster Untersuchungsabschnitt, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

2.5.3.4 Ergebniszusammenfassung

Die Ergebnisse der Gegenüberstellungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die *ohne* und *mit* Berücksichtigung einer Luftdruckregression berechneten Gezeitenparameter sowie deren Standardabweichungen sind praktisch identisch; lediglich geringfügige, statistisch jedoch nicht signifikante Änderungen treten nur bei der Partialtide S_1 auf, deren beobachtete Amplitude jedoch lediglich $0,8\mu\text{Gal}$ beträgt (vgl. Ergebnisse des zweiten Untersuchungsabschnitts, Abschnitte G2.3.3.4 und G2.3.3.5).

Signifikante Unterschiede in den Residuenspektren sind nicht zu erkennen; gleiches gilt wiederum für den zeitlichen Verlauf der Residuen.

- Die *Spektren der Residuen* nach der Datenanalyse ohne und mit Berücksichtigung einer Luftdruckregression sind praktisch identisch. Im Unterschied zu den Residuenspektren des *zweiten* Untersuchungsabschnitts (siehe Abbildung G.32 und Abbildung G.34 in Abschnitt G2.3.3.4) tritt an der Stelle $0,48\text{cpd}$ eine signifikante Spitze auf; hingegen sind die zuvor festgestellten, schwach ausgeprägten aber einheitlich auftretenden Spitzen im Frequenzbereich von etwa $0,7$ bis $0,8\text{cpd}$ und $0,25\text{cpd}$ (siehe Abbildung G.13 und Abbildung G.15 sowie Abbildung G.37 und Abbildung G.38) nicht zu erkennen.
- Die *Histogramme der Residuen* weichen wiederum signifikant von der Normalverteilung ab (vgl. Abschnitt G2.3.3.4).

2.5.4 Ungefilterte Daten – Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen des ersten und zweiten Untersuchungsabschnitts

Zusammenfassung der in Tabelle G.33 nachgewiesenen Analyseergebnisse:

- Für die beiden Untersuchungsabschnitte differieren die berechneten Standardabweichungen der Gewichtseinheit (als Maß für die erreichte Modellanpassung) um lediglich 6% bei den Analysen ohne Ansatz einer Luftdruckregression und um 4% bei den Analysen mit Ansatz einer Luftdruckregression. In dieser Hinsicht sind also die Auswirkungen der in der Messkammer durchgeführten unterschiedlichen experimentellen Arbeiten auf die Güte der Registrierungen in beiden Untersuchungsabschnitten weitgehend gleich.
- Bei den *Amplitudenquotienten* der Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 , die für eine Maßstabsüberprüfung verwendet werden können, tritt zwischen den Ergebnissen des ersten und zweiten Untersuchungsabschnitts sowohl bei Ansatz einer Luftdruckregression als auch ohne einen solchen Ansatz mit geringer Streuung der Einzelwerte eine systematische Änderung der Beträge von im Mittel $1,6$ bzw. $1,4\%$ auf, bei einem Maximalwert von etwa $1,7\%$ für P_1 . Da der Registriermaßstab der Daten in beiden Untersuchungsabschnitten auf demselben Referenzwert beruht (siehe Abschnitte G2.3.2 und G2.5.2), sind Maßstabsunterschiede beider Datenreihen auszuschließen und entfallen daher als potentielle Erklärung für den Sachverhalt. Nach rein statistischen Gesichtspunkten wäre jeder einzelne Unterschied zugeordneter Amplitudenquotienten zwar nicht signifikant, die genannte Einheitlichkeit der Ablagen weist jedoch auf einen realen systematischen Effekt hin. Bemerkenswert ist, dass bei den gefilterten Daten, die messtechnisch auf denselben gravimetrischen Ursprungssignalen beruhen (Abschnitte E1 und G2.3.2), die Beträge zugeordneter Amplitudenquotienten praktisch gleich sind (Tabelle G.26 in Abschnitt G2.4.4). Bemerkenswert ist weiterhin, dass die Unterschiede der für beide Untersuchungsabschnitte berechneten Amplitudenquotienten der Partialtide S_1 bei den gefilterten Daten deutlich größer sind als bei den ungefilterten Daten, während diese Unterschiede für S_2 etwa gleich sind.
- Die berechneten Phasendifferenzen liegen bei den Partialtiden O_1 P_1 K_1 im Bereich von $0^\circ,04$ bis $0^\circ,08$ und entsprechen daher hinsichtlich ihres Betrags den Werten, die für die gefilterten Daten ermittelt wurden; bei O_1 und K_1 hat jedoch eine Vorzeichenumkehr stattgefunden (vgl. Tabelle G.26 in Abschnitt G2.4.4). Nach statistischen Gesichtspunkten wären die Unterschiede mit Bezug auf die berechneten Standardabweichungen der Phasendifferenzen wiederum als nicht signifikant zu bewerten. Anders als bei den gefilterten Daten (wieder Tabelle G.26 in Abschnitt G2.4.4) weichen die für die Partialtide M_2 berechneten Phasendifferenzen deutlich von einander ab.
- Es ist ferner bemerkenswert, dass die Analyse der ungefilterten Daten im ersten Untersuchungsabschnitt bei Ansatz einer Luftdruckregression zu einem Koeffizienten von $0,23\mu\text{Gal}/\text{mbar}$ führt (der somit im Bereich des geophysikalischen Erwartungswertes liegt), während bei den gefilterten Daten eine Luftdruckregression nicht festgestellt wurde. Es ist darauf hinzuweisen, dass sich die Zeitreihen der ungefilterten und der gefilterten Daten hinsichtlich ihres Beginns unterscheiden (siehe Abschnitt G2.5.1).

1oL	O1	349.6895	nm/s ²	1.14763	0.00095	0.0108	0.0476
2oL	O1	350.1595		1.14918	0.00095	0.0580	0.0475
		Faktor 0,99865		Differenz -0,0472			
1mL	O1	349.8061		1.14802	0.00095	0.0087	0.0475
2mL	O1	350.1527		1.14915	0.00095	0.0576	0.0475
		Faktor 0,99902		Differenz -0,0489			
1oL	P1	162.9496	nm/s ²	1.14933	0.00218	-0.3188	0.1088
2oL	P1	163.2387		1.15137	0.00237	-0.2787	0.1182
		Faktor 0,99823		Differenz -0,0401			
1mL	P1	162.9644		1.14943	0.00218	-0.3328	0.1086
2mL	P1	163.2387		1.15137	0.00238	-0.2858	0.1183
		Faktor 0,99832		Differenz -0,0470			
1oL	S1	7.8822	nm/s ²	2.35143	0.13398	11.8343	3.2633
2oL	S1	7.4981		2.23687	0.14381	7.5264	3.6838
1mL	S1	8.3393		2.48781	0.13394	10.0541	3.0790
2mL	S1	7.5768		2.26032	0.14428	8.1863	3.6597
1oL	K1	486.7736	nm/s ²	1.13590	0.00070	0.0971	0.0353
2oL	K1	487.4855		1.13757	0.00072	0.1631	0.0362
		Faktor 0,99853		Differenz -0,0660			
1mL	K1	486.7440		1.13584	0.00070	0.0803	0.0353
2mL	K1	487.5077		1.13762	0.00072	0.1610	0.0362
		Faktor 0,99848		Differenz -0,0807			
1oL	M2	358.3077	nm/s ²	1.18583	0.00060	2.2464	0.0288
2oL	M2	358.8852		1.18775	0.00062	2.1462	0.0301
		Faktor 0,99838		Differenz +0,1002			
1mL	M2	358.3525		1.18598	0.00059	2.2361	0.0285
2mL	M2	358.8767		1.18772	0.00062	2.1458	0.0301
		Faktor 0,99854		Differenz +0,0903			
1oL	S2	167.5310	nm/s ²	1.19172	0.00127	0.2935	0.0611
2oL	S2	166.8987		1.18722	0.00132	0.6655	0.0636
		Faktor 1,00379		Differenz -0,3720			
1mL	S2	167.5644		1.19196	0.00126	0.5469	0.0610
2mL	S2	166.8246		1.18669	0.00133	0.6238	0.0646
		Faktor 1,00444		Differenz -0,9,0769			
Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30):							
1	ohne Luftdruck: s = 19.230 nm/s ²			mit Luftdruck: s = 18.912 nm/s ²			
2	ohne Luftdruck: s = 18.146 nm/s ²			mit Luftdruck: s = 18.141 nm/s ²			

Tabelle G.33: A206 - ungefilterte Daten – Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen des ersten und des zweiten Untersuchungsabschnitts ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O₁ P₁ K₁ M₂ S₂ sowie für die Partialtide S₁

2.5.5 Ungefilterte Daten - Analysen der Daten des gesamten Untersuchungszeitraums vom 20.07.2001 bis 10.10.2004

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: 00000070

ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206
Scale 268,86 µGal/Volt

Summary of observation data :

20010720 90000...20010726      0  20010726 90000...20010904150000
20010904190000...20030114110000  20030116 50000...20031117 40000
20031118170000...20040301 80000  20040303170000...20040325110000
20040326130000...20040608170000  20040611200000...20040718110000
20040718160000...20040821150000  20040823220000...20040905 50000
20040906 10000...20041010150000
Number of recorded days in total : 1164.96
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.

Estimation of noise by FOURIER-spectrum of residuals
0.1 cpd band99999.9990 nm/s**2           1.0 cpd band    0.4757 nm/s**2
2.0 cpd band    0.2427 nm/s**2           3.0 cpd band    0.1620 nm/s**2
4.0 cpd band    0.1517 nm/s**2           white noise     0.3185 nm/s**2

adjusted tidal parameters :

from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.501370 0.911390 Q1   66.3471  1.13726  0.00367 -0.7165  0.1847
0.911391 0.947991 O1   349.9508  1.14849  0.00072  0.0381  0.0357
0.947992 0.981854 M1   28.0309  1.16971  0.00755  0.2572  0.3698
0.981855 0.998631 P1   163.1212  1.15054  0.00169 -0.2838  0.0842
0.998632 1.001369 S1    7.5949  2.26572  0.10175 10.0324  2.5724
1.001370 1.023622 K1   487.1307  1.13674  0.00053  0.1355  0.0265
1.023623 1.035379 TET1  5.1598  1.12602  0.04765 -0.9362  2.4256
1.035380 1.057485 J1   27.4373  1.14498  0.00950  0.2641  0.4756
1.057486 1.071833 SO1   4.9025  1.23335  0.05499 -5.3073  2.5541
1.071834 1.470243 OO1  15.2420  1.16253  0.01273 -0.1962  0.6275
1.470244 1.880264 2N2  10.5754  1.14471  0.01026  3.9727  0.5134
1.880265 1.914128 N2   67.7375  1.17090  0.00214  2.7885  0.1049
1.914129 1.950419 M2   358.6055  1.18682  0.00041  2.1959  0.0197
1.950420 1.984282 L2    9.9992  1.17079  0.01031  0.6165  0.5047
1.984283 2.002736 S2   167.1985  1.18935  0.00086  0.4862  0.0416
2.002737 2.451943 K2   45.9612  1.20274  0.00278  0.6902  0.1322
2.451944 3.381378 M3    3.9894  1.05894  0.02061  2.6743  1.1153
3.381379 4.347615 M4    0.1359  3.12309  1.63379 137.9942 29.9756

Standard deviation of weight unit: 18.694 nm/s**2

```

Tabelle G.34: A206 - ungefilterte Daten, erster und zweiter Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse ohne Luftdruckregression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: 00000071

ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206
Scale 268,86 µGal/Volt

Summary of observation data :

20010720 90000...20010726      0  20010726 90000...20010904150000
20010904190000...20030114110000  20030116 50000...20031117 40000
20031118170000...20040301 80000  20040303170000...20040325110000
20040326130000...20040608170000  20040611200000...20040718110000
20040718160000...20040821150000  20040823220000...20040905 50000
20040906 10000...20041010150000
Number of recorded days in total : 1164.96
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.

Estimation of noise by FOURIER-spectrum of residuals
0.1 cpd band 99999.9990 nm/s**2          1.0 cpd band    0.4789 nm/s**2
2.0 cpd band   0.2425 nm/s**2          3.0 cpd band    0.1615 nm/s**2
4.0 cpd band   0.1516 nm/s**2          white noise     0.3193 nm/s**2

adjusted tidal parameters :

from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]    [cpd]    [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.501370 0.911390 Q1   66.3744  1.13773  0.00366  -0.7172  0.1844
0.911391 0.947991 O1  349.9691  1.14855  0.00072  0.0365  0.0357
0.947992 0.981854 M1   28.0770  1.17164  0.00754  0.3286  0.3686
0.981855 0.998631 P1  163.1191  1.15052  0.00169  -0.3114  0.0841
0.998632 1.001369 S1   7.8960  2.35556  0.10184  10.8064  2.4709
1.001370 1.023622 K1  487.1923  1.13688  0.00053  0.1265  0.0265
1.023623 1.035379 TET1  5.1185  1.11699  0.04758  -0.7085  2.4412
1.035380 1.057485 J1   27.3785  1.14253  0.00949  0.2676  0.4758
1.057486 1.071833 SO1   4.9384  1.24237  0.05490  -4.8730  2.5315
1.071834 1.470243 OO1  15.2194  1.16080  0.01271  -0.2672  0.6274
1.470244 1.880264 2N2  10.5734  1.14449  0.01016  3.9858  0.5087
1.880265 1.914128 N2   67.7527  1.17116  0.00212  2.7873  0.1039
1.914129 1.950419 M2  358.6025  1.18681  0.00040  2.1912  0.0195
1.950420 1.984282 L2    9.9914  1.16989  0.01021  0.6521  0.5003
1.984283 2.002736 S2  167.0619  1.18838  0.00086  0.4836  0.0412
2.002737 2.451943 K2   45.9533  1.20253  0.00275  0.6597  0.1310
2.451944 3.381378 M3    3.9920  1.05964  0.02037  2.7144  1.1014
3.381379 4.347615 M4    0.1441  3.31169  1.61908  140.4504 28.0139

Adjusted meteorological or hydrological parameters:

no. regr.coeff.      stdv.  parameter  unit

   1    1.49875    0.08148  airpress.  nm/s**2 / hPa

Standard deviation of weight unit:    18.581 nm/s**2

```

Tabelle G.35: A206 - ungefilterte Daten, erster und zweiter Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse mit Luftdruckregression

oL	0.911391	0.947991	O1	349.9508	1.14849	0.00072	0.0381	0.0357
mL	0.911391	0.947991	O1	349.9691	1.14855	0.00072	0.0365	0.0357
oL	0.981855	0.998631	P1	163.1212	1.15054	0.00169	-0.2838	0.0842
mL	0.981855	0.998631	P1	163.1191	1.15052	0.00169	-0.3114	0.0841
oL	0.998632	1.001369	S1	7.5949	2.26572	0.10175	10.0324	2.5724
mL	0.998632	1.001369	S1	7.8960	2.35556	0.10184	10.8064	2.4709
oL	1.001370	1.023622	K1	487.1307	1.13674	0.00053	0.1355	0.0265
mL	1.001370	1.023622	K1	487.1923	1.13688	0.00053	0.1265	0.0265
oL	1.914129	1.950419	M2	358.6055	1.18682	0.00041	2.1959	0.0197
mL	1.914129	1.950419	M2	358.6025	1.18681	0.00040	2.1912	0.0195
oL	1.984283	2.002736	S2	167.1985	1.18935	0.00086	0.4862	0.0416
mL	1.984283	2.002736	S2	167.0619	1.18838	0.00086	0.4836	0.0412

Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30):
 ohne Luftdruck: $s = 18.694 \text{ nm/s}^2$ mit Luftdruck: $s = 18.581 \text{ nm/s}^2$

Tabelle G.36: A206 - ungefilterte Daten des ersten und zweiten Untersuchungsabschnitts - Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O₁ P₁ K₁ M₂ S₂ sowie für die Partialtide S₁

[nm/s²]

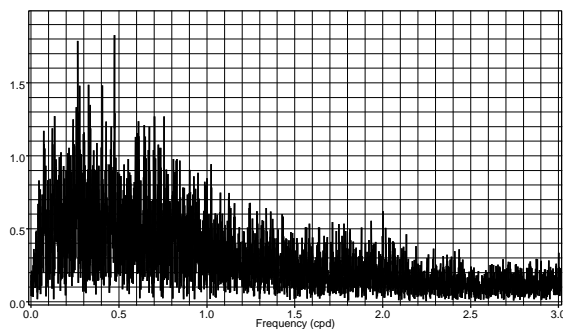


Abbildung G.49: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – Gesamter Untersuchungszeitraum, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

[nm/s²]

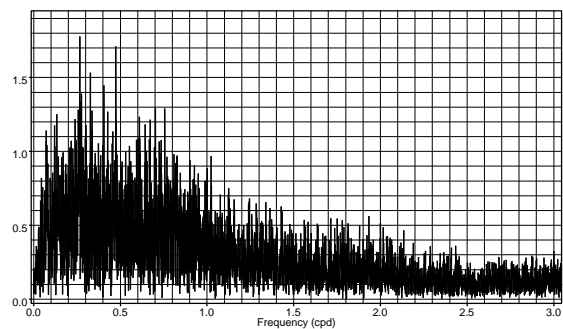


Abbildung G.50: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – Gesamter Untersuchungszeitraum, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

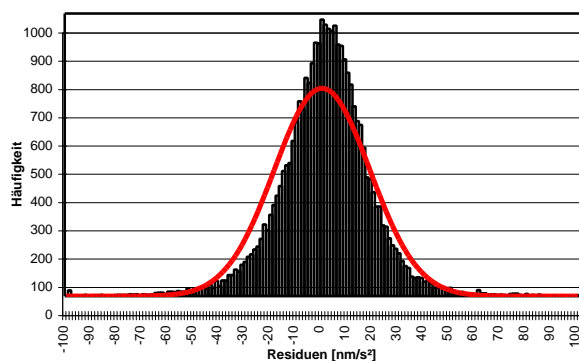


Abbildung G.51: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – Gesamter Untersuchungszeitraum, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

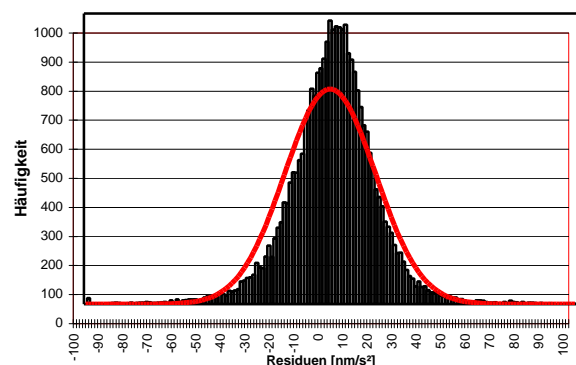


Abbildung G.52: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – Gesamter Untersuchungszeitraum, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

Ergebniszusammenfassung:

- Die ohne und mit Ansatz einer Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 berechneten Gezeitenparameter stimmen weitgehend überein; bei den Amplitudenquotienten beträgt der größte Unterschied 0,8‰ (Partialtide S_2), bei den Phasenverschiebungen $0^{\circ},009$ (Partialtide K_1). Geringe Unterschiede bestehen weiterhin bei der (kleinen) Partialtide S_1 ; diese sind jedoch nach statistischen Kriterien weiterhin als nicht signifikant einzustufen.
- Der zusätzliche Ansatz einer Luftdruckregression führt bei den Residuenspektren zu keinen nennenswerten Änderungen gegenüber den Ergebnissen ohne Luftdruckregression (ohne Luftdruckregression lediglich Andeutung einer Spitze bei 2cpd). In den Bereichen 0,48cpd und 0,26cpd treten erneut deutliche Spitzen auf (vgl. Abschnitt G2.5.3.4).
- Die *Histogramme der Residuen* weichen wie bei den Teilzeiträumen (vgl. Abschnitte G2.3.3.4 und G2.5.3.3) signifikant von der Normalverteilung ab.
- Es ist erneut bemerkenswert, dass die Analyse der ungefilterten Daten des gesamten Untersuchungszeitraums bei Ansatz einer Luftdruckregression zu einem Koeffizienten von $0,15\mu\text{Gal/mbar}$ führt (der somit in etwa im Bereich des geophysikalischen Erwartungswertes verbleibt), während bei den gefilterten Daten eine Luftdruckregression nicht festgestellt wurde. Es wird darauf hingewiesen, dass sich die Zeitreihen der ungefilterten und der gefilterten Daten hinsichtlich ihres Beginns unterscheiden (siehe Abschnitt G2.5.1).

2.5.6 Erweiterte Untersuchungen zur zeitlichen Stabilität des Registriermaßstabs

Die für die Daten des ersten Untersuchungsabschnitts durchgeführten Maßstabskorrekturen erfordern auf der Grundlage aufeinander folgender Zweimonatsanalysen eine erneute Überprüfung potentieller zeitlicher Variationen des Registriermaßstabs. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Rahmen des Abschnitts G2.7 nachgewiesen.

2.6 Gravimeter A206 - Gegenüberstellungen der Ergebnisse der Gesamtanalysen der gefilterten und ungefilterten Daten

Die Gegenüberstellungen der für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie die Partialtide S_1 berechneten Gezeitenparameter basieren auf den folgenden Ergebnistabellen:

gefilterte Daten:	Tabelle G.27 und Tabelle G.28 in Abschnitt G2.4.5
	Tabelle G.23 in Abschnitt G2.4.3.1 und Tabelle G.24 in Abschnitt G2.4.3.2
	Tabelle G.9 und Tabelle G.10 in Abschnitt G2.2.2.4
ungefilterte Daten:	Tabelle G.34 und Tabelle G.35 in Abschnitt G2.5.5
	Tabelle G.30 in Abschnitt G2.5.3.1 und Tabelle G.31 in Abschnitt G2.5.3.2
	Tabelle G.20 und Tabelle G.21 in Abschnitt G2.3.3.4

In den nachfolgenden Tabellen sind die Gezeitenparameter jeweils mit Amplitude, Amplitudenquotient, dessen Standardabweichung, Phasenverschiebung sowie deren Standardabweichung für die jeweiligen Partialtiden getrennt als gefilterte und ungefilterte Datenreihen sowie mit und ohne Luftdruckregression aufgeführt.

Gesamter Untersuchungszeitraum							
oL	gefilterte Daten	O1	350.1447	1.14913	0.00059	0.0211	0.0292
mL		O1	350.1448	1.14913	0.00059	0.0213	0.0292
oL	ungefilterte Daten	O1	349.9508	1.14849	0.00072	0.0381	0.0357
mL		O1	349.9691	1.14855	0.00072	0.0365	0.0357
Erster Untersuchungsabschnitt							
oL	gefilterte Daten	O1	350.1012	1.14898	0.00084	0.0536	0.0419
mL		O1	350.1036	1.14899	0.00084	0.0541	0.0419
oL	ungefilterte Daten	O1	349.6895	1.14763	0.00095	0.0108	0.0476
mL		O1	349.8061	1.14802	0.00095	0.0087	0.0475
Zweiter Untersuchungsabschnitt							
oL	gefilterte Daten	O1	350.1854	1.14928	0.00089	-0.0076	0.0445
mL		O1	350.1829	1.14927	0.00089	-0.0078	0.0446
oL	ungefilterte Daten	O1	350.1595	1.14918	0.00095	0.0580	0.0475
mL		O1	350.1527	1.14915	0.00095	0.0576	0.0475

Tabelle G.37: Berechnete Gezeitenparameter für die Partialtide O₁

Gesamter Untersuchungszeitraum							
oL	gefilterte Daten	P1	163.2117	1.15117	0.00138	-0.2330	0.0685
mL		P1	163.2135	1.15119	0.00138	-0.2341	0.0686
oL	ungefilterte Daten	P1	163.1212	1.15054	0.00169	-0.2838	0.0842
mL		P1	163.1191	1.15052	0.00169	-0.3114	0.0841
Erster Untersuchungsabschnitt							
oL	gefilterte Daten	P1	163.1708	1.15088	0.00189	-0.2796	0.0944
mL		P1	163.1744	1.15091	0.00189	-0.2798	0.0944
oL	ungefilterte Daten	P1	162.9496	1.14933	0.00218	-0.3188	0.1088
mL		P1	162.9644	1.14943	0.00218	-0.3328	0.1086
Zweiter Untersuchungsabschnitt							
oL	gefilterte Daten	P1	163.1713	1.15090	0.00223	-0.2212	0.1110
mL		P1	163.1713	1.15090	0.00223	-0.2239	0.1112
oL	ungefilterte Daten	P1	163.2387	1.15137	0.00237	-0.2787	0.1182
mL		P1	163.2387	1.15137	0.00238	-0.2858	0.1183

Tabelle G.38: Berechnete Gezeitenparameter für die Partialtide P₁

Gesamter Untersuchungszeitraum							
oL	gefilterte Daten	S1	8.0474	2.40070	0.08273	-2.7137	1.9744
mL		S1	8.0620	2.40506	0.08292	-2.5335	1.9797
oL	ungefilterte Daten	S1	7.5949	2.26572	0.10175	10.0324	2.5724
mL		S1	7.8960	2.35556	0.10184	10.8064	2.4709
Erster Untersuchungsabschnitt							
oL	gefilterte Daten	S1	7.5208	2.24358	0.11288	2.3359	2.8822
mL		S1	7.5341	2.24758	0.11298	2.4919	2.8830
oL	ungefilterte Daten	S1	7.8822	2.35143	0.13398	11.8343	3.2633
mL		S1	8.3393	2.48781	0.13394	10.0541	3.0790
Zweiter Untersuchungsabschnitt							
oL	gefilterte Daten	S1	8.5857	2.56156	0.13499	-7.0929	3.0196
mL		S1	8.6059	2.56759	0.13532	-6.8325	3.0316
oL	ungefilterte Daten	S1	7.4981	2.23687	0.14381	7.5264	3.6838
mL		S1	7.5768	2.26032	0.14428	8.1863	3.6597

Tabelle G.39: Berechnete Gezeitenparameter für die Partialtide S₁

Gesamter Untersuchungszeitraum							
oL	gefilterte Daten	K1	486.9747	1.13637	0.00043	0.1430	0.0217
mL		K1	486.9807	1.13639	0.00043	0.1425	0.0217
oL	ungefilterte Daten	K1	487.1307	1.13674	0.00053	0.1355	0.0265
mL		K1	487.1923	1.13688	0.00053	0.1265	0.0265
Erster Untersuchungsabschnitt							
oL	gefilterte Daten	K1	487.1692	1.13683	0.00061	0.1823	0.0307
mL		K1	487.1748	1.13684	0.00061	0.1820	0.0307
oL	ungefilterte Daten	K1	486.7736	1.13590	0.00070	0.0971	0.0353
mL		K1	486.7440	1.13584	0.00070	0.0803	0.0353
Zweiter Untersuchungsabschnitt							
oL	gefilterte Daten	K1	486.8486	1.13609	0.00067	0.1129	0.0340
mL		K1	486.8570	1.13611	0.00068	0.1121	0.0341
oL	ungefilterte Daten	K1	487.4855	1.13757	0.00072	0.1631	0.0362
mL		K1	487.5077	1.13762	0.00072	0.1610	0.0362

Tabelle G.40: Berechnete Gezeitenparameter für die Partialtide K_1

Gesamter Untersuchungszeitraum							
oL	gefilterte Daten	M2	359.1779	1.18871	0.00027	2.1405	0.0130
mL		M2	359.1765	1.18871	0.00027	2.1407	0.0130
oL	ungefilterte Daten	M2	358.6055	1.18682	0.00041	2.1959	0.0197
mL		M2	358.6025	1.18681	0.00040	2.1912	0.0195
Erster Untersuchungsabschnitt							
oL	gefilterte Daten	M2	359.2569	1.18898	0.00031	2.1321	0.0151
mL		M2	359.2563	1.18897	0.00031	2.1325	0.0151
oL	ungefilterte Daten	M2	358.3077	1.18583	0.00060	2.2464	0.0288
mL		M2	358.3525	1.18598	0.00059	2.2361	0.0285
Zweiter Untersuchungsabschnitt							
oL	gefilterte Daten	M2	359.1025	1.18846	0.00045	2.1476	0.0218
mL		M2	359.0993	1.18845	0.00045	2.1474	0.0217
oL	ungefilterte Daten	M2	358.8852	1.18775	0.00062	2.1462	0.0301
mL		M2	358.8767	1.18772	0.00062	2.1458	0.0301

Tabelle G.41: Berechnete Gezeitenparameter für die Partialtide M_2

Gesamter Untersuchungszeitraum							
oL	gefilterte Daten	S2	167.3674	1.19056	0.00057	0.4026	0.0276
mL		S2	167.3470	1.19041	0.00058	0.3914	0.0279
oL	ungefilterte Daten	S2	167.1985	1.18935	0.00086	0.4862	0.0416
mL		S2	167.0619	1.18838	0.00086	0.4836	0.0412
Erster Untersuchungsabschnitt							
oL	gefilterte Daten	S2	167.8149	1.19374	0.00068	0.3481	0.0324
mL		S2	167.7956	1.19360	0.00068	0.3376	0.0328
oL	ungefilterte Daten	S2	167.5310	1.19172	0.00127	0.2935	0.0611
mL		S2	167.5644	1.19196	0.00126	0.5469	0.0610
Zweiter Untersuchungsabschnitt							
oL	gefilterte Daten	S2	166.9156	1.18734	0.00095	0.4582	0.0460
mL		S2	166.8879	1.18714	0.00096	0.4425	0.0467
oL	ungefilterte Daten	S2	166.8987	1.18722	0.00132	0.6655	0.0636
mL		S2	166.8246	1.18669	0.00133	0.6238	0.0646

Tabelle G.42: Berechnete Gezeitenparameter für die Partialtide S_2

Die *Amplitudenquotienten* der Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 variieren insgesamt im Bereich von lediglich einem Promille. Eine begrenzte Ausnahme bilden allerdings die Ergebnisse für die *ungefilterten* Daten des *ersten* Untersuchungsabschnitts (siehe auch Ergebniszusammenfassung in Abschnitt G2.5.4); die Ursache *könnte* im folgenden Sachverhalt zu suchen sein:

Die Streuungen der sekundlichen Einzelwerte der ungefilterten Signale innerhalb eines Minutenintervalls sind, wenn man die Standardabweichungen der gebildeten mütlichen Mittelwerte in Betracht zieht, im Vergleich zu

den gefilterten Signal etwa um den Faktor 15 größer (siehe Abschnitt G2.3.1). Nun werden in der Nähe der beiden Registriergrenzwerte (0 Volt und 5 Volt) *sekündliche* Signale dann nicht mehr korrekt erfasst, wenn die Werte kleiner als 0 Volt oder größer als 5 Volt sind (die Signale werden „abgeschnitten“); im Bereich des unteren Registriergrenzwerts *vergrößern* sich somit in solchen Zeiträumen die *Minutenmittel*, sie *verkleinern* sich entsprechend im Bereich des oberen Grenzwerts. Die Auswirkungen sind in beiden Fällen mehr oder weniger geringfügige Verringerungen des effektiven, momentanen Registriermaßstabs in jenen Zeiträumen, in denen einzelne sekundliche Signale in unterschiedlicher Häufigkeit den Registrierbereich unter- oder überschreiten. Dieser Effekt hat zwangsläufig mehr oder weniger relevante Auswirkungen auf die Analyseergebnisse, sowohl hinsichtlich der berechneten Amplitudenquotienten als auch der Phasenverschiebungen.

Dem genannten Sachverhalt wurde einerseits dadurch Rechnung getragen, dass die Registrierempfindlichkeit der ungefilterten Signale gegenüber den gefilterten Signalen entsprechend verringert wurde (siehe Abschnitt G2.3.2), andererseits dadurch, dass das Registriersignal durch geeignete Einstellungen am Gravimeter in einem mittleren Registrierbereich gehalten wurde. Im *ersten* Untersuchungsabschnitt wurden die zugelassenen Abstände zu den Grenzwerten des Registrierbereichs aus verschiedenen experimentellen Gründen zunächst relativ klein gewählt; dies – mangels Aufzeichnung des zeitlichen Verlaufs der sekundlichen Einzelwerte (siehe Abschnitt C3) – nach dem Kriterium der auftretenden Beträge der Standardabweichungen der Minutenmittel. Erst im *zweiten* Untersuchungsabschnitt wurde für die Untersuchung zeitabhängiger Strukturen der sekundlichen Signale (siehe Abschnitt H) parallel zum ersten Rechner ein zweiter Registrierrechner permanent angeschlossen, der selbstständig viermal pro Tag für die Dauer von jeweils einer halben Stunde die sekundlichen Signale (oder Signale mit kürzerem Diskretisierungsintervall) aufzeichnete. Die auf diese Weise gewonnenen Kenntnisse über die tatsächlich auftretenden Signalausschläge der sekundlichen Messwerte führten im zweiten Untersuchungsabschnitt zu einer Vergrößerung der Sicherheitsabstände zu den Registriergrenzwerten 0 und 5 Volt.

Die bemerkenswert gute Homogenität der berechneten Amplitudenquotienten (letztlich einschließlich der Ergebnisse des ersten Untersuchungsabschnitts für die ungefilterten Daten) sagt jedoch zunächst nur etwas über die erreichte (innere) Systemgenauigkeit aus, nicht aber über die tatsächliche Maßstabgenauigkeit in den Einheiten des Internationalen Maßsystems.

Die Streuungen der Phasenverschiebungen müssen für die gefilterten und ungefilterten Daten getrennt betrachtet werden, da die durch das RC-Glied gefilterten Daten einen zeitlichen *Nachlauf* aufweisen (siehe Abschnitte E1 und E11). Dieser führt dazu, dass die berechneten zeitlichen Verschiebungen zwischen dem beobachteten und dem theoretischen Signalverlauf der Partialtiden bei den gefilterten Daten kleiner sein müssen als bei den ungefilterten Daten (bei den gefilterten Daten kommt das gravimetrische Signal auf dem Registrierrechner „später an“, entsprechend sind die Phasenwinkel der beobachteten Partialtiden permanent kleiner).

Innerhalb der beiden Gruppen liegen die für die einzelnen Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 auftretenden Differenzen der berechneten Phasenverschiebungen im Bereich lediglich einiger Hundertstel Grad und sind statistisch nicht signifikant. Auffälligkeiten sind bei den aus den ungefilterten Daten für die Partialtide M_2 abgeleiteten Werten zu erkennen.

Größere Streuungen der Gezeitenparameter treten erwartungsgemäß bei der Partialtide S_2 auf. Für die Amplitudenquotienten beträgt die maximale Differenz etwa 4%; bei der Bewertung dieses Betrags ist jedoch zu berücksichtigen, dass die beobachtete Amplitude der Tide S_2 lediglich $16,7\mu\text{Gal}$ beträgt, d.h. eine Abweichung von 4% entspricht einer Änderung der berechneten Amplitude von lediglich $0,07\mu\text{Gal}$. Teilweise relativ große Unterschiede weisen zugeordnete Phasenverschiebungen auf. Auffällig ist (wiederum) im ersten Untersuchungsabschnitt bei den auf den ungefilterten Daten basierenden Analyseergebnissen die Differenz von $0^\circ,25$ zwischen den ohne und mit Ansatz einer Luftdruckregression berechneten Phasenverschiebungen.

Das Partialtidenband S_1 reicht von 0,999 bis 1,001cpd und ist somit sehr schmal. Mit täglicher Periodizität auftretende gravimetrische Störeffekte (z.B. anthropogenen Ursprungs) wirken sich in besonderem Maße auf diese Partialtide aus, deren Gezeitenparameter infolgedessen sensible Indikatoren für das Vorhandensein solcher Störungen sind. Im Hinblick auf die Vielzahl der häufig täglich in der Beobachtungsstation durchgeführten experimentellen Arbeiten sind die Amplitudenquotienten der Partialtide S_1 als bemerkenswert stabil zu bewerten: Die berechnete Amplitude schwankt lediglich zwischen 0,75 und $0,86\mu\text{Gal}$. Aus dem durchschnittlichen Amplitudenquotienten von etwa 2,4 (Wert bei ungestörten Beobachtungen etwa 1,15) folgt ein mittleres tägliches Störsignal von lediglich etwa $0,4\mu\text{Gal}$. Bei den Phasenverschiebungen fällt vor allem die relativ einheitliche und durchgängig große Differenz zwischen den Ergebnissen mit und ohne Regressionsansatz für den Luftdruck auf.

Vorbehaltlich des Ergebnisses eines Vergleichs der nachgewiesenen Amplitudenquotienten mit den aus den Messwerten anderer Gravimeter abgeleiteten Werten folgt aus den Gegenüberstellungen, dass die Analyse der beiden *Gesamtdatensätze* (gefilterte und ungefilterte Daten) aufgrund der Länge der Beobachtungszeiträume und mit Bezug auf die Aufgabenstellung hinsichtlich des Maßstabs zu messtechnisch repräsentativen Amplitudenquo-

tienten führt. Aussagen zur Phasensicherheit erfordern bei den gefilterten Daten noch eine Reduktion der berechneten Phasenverschiebungen durch Berücksichtigung des Signalnachlaufs.

2.7 Besonderheiten der Registrierungen mit dem Gravimeter A206

2.7.1 Sachverhalte

Die Auswertungen der gefilterten und ungefilterte Registrierdaten des Gravimeters A206 zeigten folgende Sachverhalte:

- im Unterschied zu allen anderen bisher in der Station Odendorf eingesetzten Gravimetern lassen sich aus den mit dem Gravimeter A206 gewonnenen gravimetrischen Signalen, von einer Ausnahme abgesehen, durch das Programmsystem Eterna keine geophysikalisch plausiblen Regressionen der gravimetrischen Ausgangssignale mit dem örtlichen Luftdruck berechnen; die Ausnahme bilden die Analysen der ungefilterten Daten des ersten Untersuchungsabschnitts (siehe Abschnitt G2.5.3.2). Bemerkenswert ist aber, dass die Auswertungen der *gefilterten* Daten dieses Abschnitts, die im Zeitraum der Parallelregistrierung auf identischen *ungefilterten* Eingangssignalen basieren (Abschnitt G2.5.1), zu keinen physikalisch plausiblen Luftdruck-Regressionskoeffizienten führen; berechnet wurde der Wert $0,30 \pm 0,08 \text{ nm/s}^2$, gegenüber $2,30 \pm 0,10 \text{ nm/s}^2$ für die ungefilterten Daten (Abschnitt G2.5.3.2). Dies könnte auf einen numerischen Effekt bei der Schätzung des Luftdruckparameters im Rahmen der Gezeitenanalyse hindeuten.

Denkbar ist aber auch, dass die gravitativen Wirkungen der atmosphärischen örtlichen Luftdruck- bzw. Luftdichteveriationen durch einen anderen Prozess kompensiert werden. Letzterer Sachverhalt wäre als ein messtechnischer Effekt zu bewerten, denn die luftdruckinduzierten gravimetrischen Wirkungen sind objektiv vorhanden, würden aber von der Messanlage unterdrückt, auf Grund welcher Ursachen auch immer.

Gezielt durchgeführte Untersuchungen ergaben keinen Hinweis auf eine mögliche Undichtigkeit des Gravimetergehäuses (siehe auch Abschnitt E8.5).

Eine weitere Ursache *könnte* in der Art der Gravimeteraufstellung zu suchen sein, denn aus Platzgründen wurde dieses Gravimeter nicht auf dem Beobachtungspfeiler aufgestellt, sondern in etwa einem Meter Abstand von diesem Pfeiler auf einer Betonplatte, die mit einer dünnen Zwischenschicht aus Sand und darunter einer weiteren Zwischenschicht aus aufgeschüttetem und verfestigtem örtlichem Bodenmaterial auf den natürlichen Untergrund aufgebracht wurde. So kann nicht völlig ausgeschlossen werden, dass luftdruckinduzierte Neigungsprozesse der Aufstellungsplatte auftreten, die das gravimetrische Beobachtungssignal schwach beeinflussen. Es werden daher zur Zeit spezielle Neigungssensoren entwickelt, die eine kontinuierliche Überwachung bzw. Registrierung der Horizontierung des Gravimeters ermöglichen. Dies soll als ein erster Schritt auf dem Wege zur Ursachenfindung für die nicht vorhandene Luftdruckregression gelten, wobei es zweifellos ein bemerkenswerter Zufall wäre, wenn ein derartiger Störprozess den physikalischen Luftdruckeffekt gerade kompensiert.

Ein instrumenteller Kompensationseffekt könnte auch als Folge von spezifischen Deformationen des Gehäuses des Gravimeters entstehen, gesteuert durch die *Differenz* zwischen dem zeitvariablen atmosphärischen Aussendruck und dem Innendruck des druckdichten Gravimeters. Auch in diesem Fall wäre die Kompensation des gravitativen Luftdruckeffekts als Zufallssachverhalt wiederum bemerkenswert.

- Es treten im zeitlichen Verlauf der Residuen nach der Gezeitenanalyse ausgeprägte Erhaltungstendenzen auf, die nach Struktur und Betrag sowohl bei den gefilterten, als auch bei den ungefilterten Daten nicht durch die statistischen Streuungen der berechneten minütlichen und stündlichen Mittelwerte erklärt werden können. Bei den gefilterten Daten liegen die Standardabweichungen der stündlichen Mittelwerte, von relativ kurzen Zeiträumen mit starkem mikroseismischen Störpegel (siehe Kapitel H) einmal abgesehen, durchgängig im Bereich von lediglich $\pm 0,1 \mu\text{Gal}$, bei den ungefilterten Daten zwischen $\pm 0,5 \mu\text{Gal}$ in den Nachtstunden und $\pm 2,0 \mu\text{Gal}$ während der Tageszeiten mit maximalem anthropogenem Störpegel (nachfolgende Abbildung G.55).

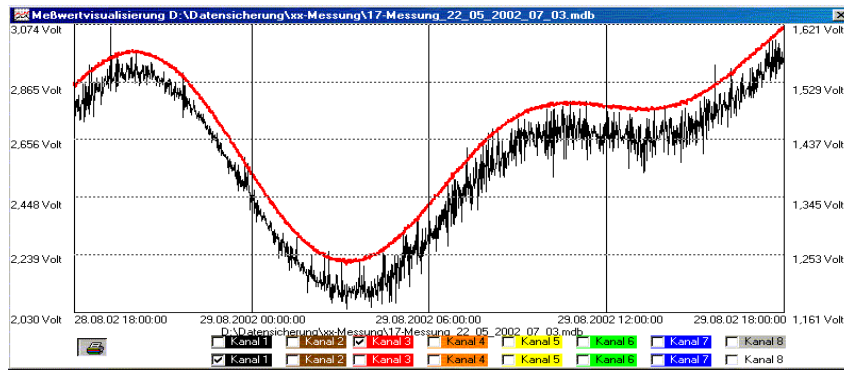


Abbildung G.53: Gravimeter A206 - Beispiel für den zeitlichen Verlauf der minütlichen Mittelwerte der Registriersignale, linke Ordinate: gefiltert, 124µGal/Volt, rechte Ordinate: ungefiltert, 269µGal/Volt

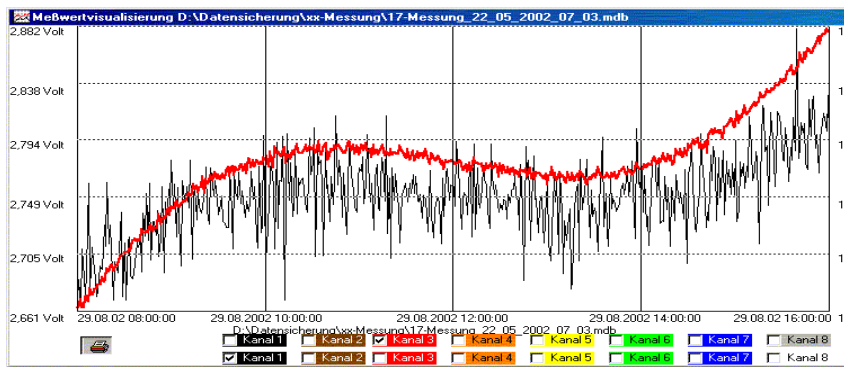


Abbildung G.54: Gravimeter A206 - Beispiel für den zeitlichen Verlauf der minütlichen Mittelwerte der Registriersignale (vergrößerter Ausschnitt), linke Ordinate: gefiltert, 124 µGal/Volt, rechte Ordinate: ungefiltert, 269µGal/Volt

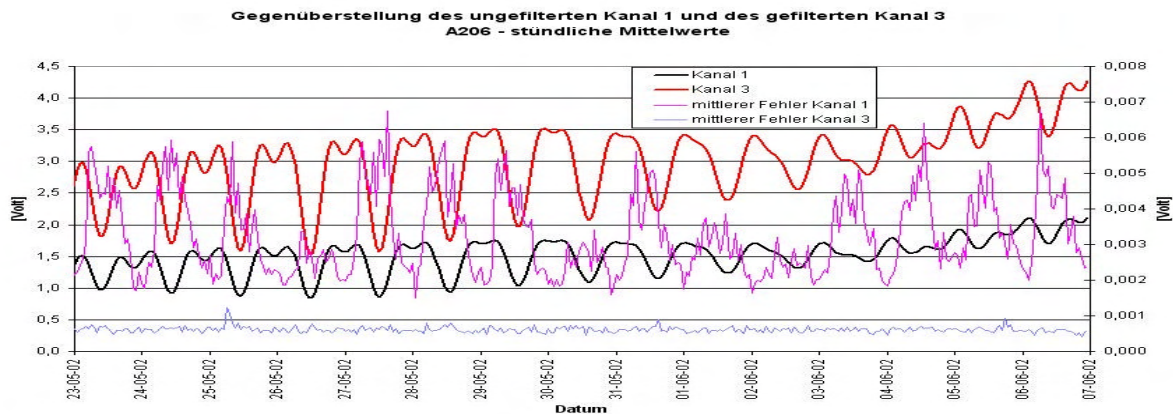


Abbildung G.55: Gravimeter A206 – Beispiel für den zeitlichen Verlauf der stündlichen Mittelwerte der gefilterten und ungefilterten Registriersignale mit zugeordneten Standardabweichungen, Registriermaßstäbe siehe vorstehende Abbildung G.53 und Abbildung G.54

Wie die zeitliche Struktur der Residuen nach der Gezeitenanalyse, so können auch zeitliche Variationen der berechneten Gezeitenparameter potentiell Informationen liefern über wirksame Störprozesse, die bei der Modellbildung nicht berücksichtigt und deren Signalanteile durch die im Rahmen der Gezeitenanalysen erfolgende numerische Signalfilterung nicht hinreichend eliminiert wurden oder prinzipiell nicht eliminiert werden konnten. Es wurden daher mit den beobachteten, maßstabskorrigierten Datensätzen (siehe Abschnitte G2.4.2 und G2.5.2) der gefilterten und ungefilterten Signale aufeinander folgende Zweimonatsanalysen gerechnet, deren primäre Ziele die Erkennung sowie mögliche Zuordnungen zeitlicher Erhaltungstendenzen der geschätzten Gezeitenparameter sind.

2.7.2 Ergebnisse aufeinander folgender Zweimonatsanalysen

Der zeitlichen Zuordnung der ausgeführten Zweimonatsanalysen dient die nachfolgende Tabelle. Die Zeiträume der Analysen 3 bis 21 der gefilterten Daten und 1 bis 19 der ungefilterten Daten sind identisch und die einander zugeordneten zweimonatlichen Datensätze somit in dem in Abschnitt G2.3.1 dargelegten Sinne weitgehend kohärent.

A206 gefiltert			A206 ungefiltert		
Analyse	Von	Bis	Analyse	Von	Bis
1	29.03.2001	31.05.2001			
2	01.06.2001	31.07.2001			
3	01.08.2001	30.09.2001	1	01.08.2001	30.09.2001
4	01.10.2001	30.11.2001	2	01.10.2001	30.11.2001
5	01.12.2001	31.01.2002	3	01.12.2001	31.01.2002
6	01.02.2002	31.03.2002	4	01.02.2002	31.03.2002
7	01.04.2002	31.05.2002	5	01.04.2002	31.05.2002
8	01.06.2002	31.07.2002	6	01.06.2002	31.07.2002
9	01.08.2002	30.09.2002	7	01.08.2002	30.09.2002
10	01.10.2002	30.11.2002	8	01.10.2002	30.11.2002
11	01.12.2002	31.01.2003	9	01.12.2002	31.01.2003
12	01.02.2003	31.03.2003	10	01.02.2003	31.03.2003
13	01.04.2003	31.05.2003	11	01.04.2003	31.05.2003
14	01.06.2003	31.07.2003	12	01.06.2003	31.07.2003
15	01.08.2003	30.09.2003	13	01.08.2003	30.09.2003
16	01.10.2003	30.11.2003	14	01.10.2003	30.11.2003
17	01.12.2003	31.01.2004	15	01.12.2003	31.01.2004
18	01.02.2004	31.03.2004	16	01.02.2004	31.03.2004
19	01.04.2004	31.05.2004	17	01.04.2004	31.05.2004
20	01.06.2004	31.07.2004	18	01.06.2004	31.07.2004
21	01.08.2004	30.09.2004	19	01.08.2004	30.09.2004

Tabelle G.12: zeitliche Zuordnung der 2-Monatsanalysen

Die Ergebnisse der Zweimonatsanalysen sind in den nachfolgenden Diagrammen nachgewiesen. Mit Bezug auf die in den Abschnitten G2.2.2.5, G2.3.3.5, G2.4.3.4 und G2.5.3.4 zusammengefassten Sachverhalte wird lediglich der Verlauf der Gezeitenparameter für die Partialtiden M_2 und S_2 dargestellt.

2.7.2.1 Partialtidenband M_2

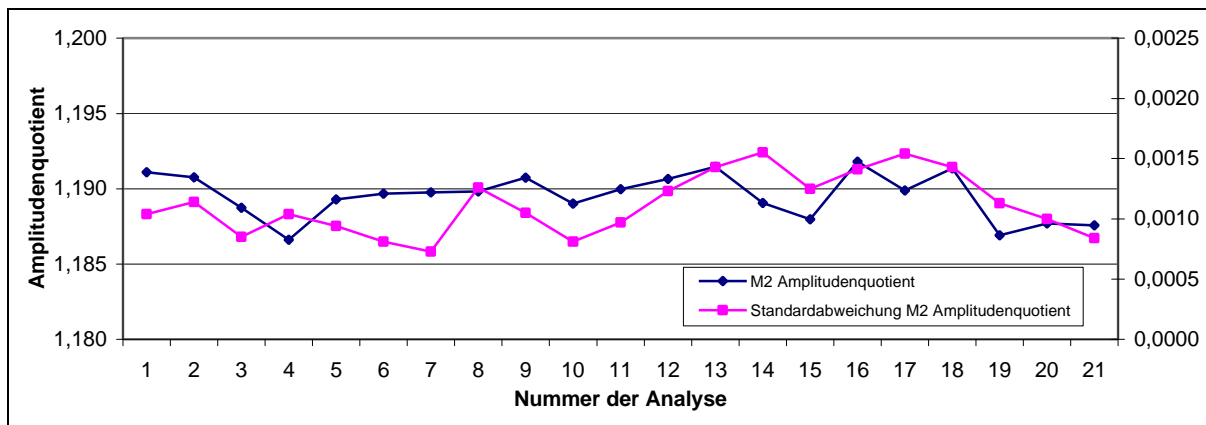


Abbildung G.56: A206 gefilterte Daten, zeitlicher Verlauf der berechneten Amplitudenquotienten M_2 im Zeitraum April 2001 bis Oktober 2004

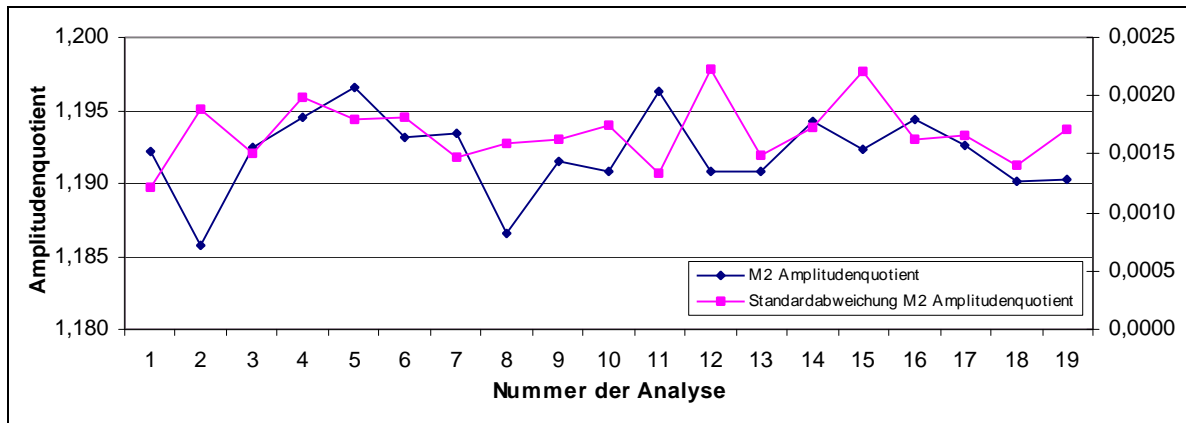


Abbildung G.57: A206 ungefilterte Daten, zeitlicher Verlauf der berechneten Amplitudenquotienten M_2 im Zeitraum August 2001 bis Oktober 2004

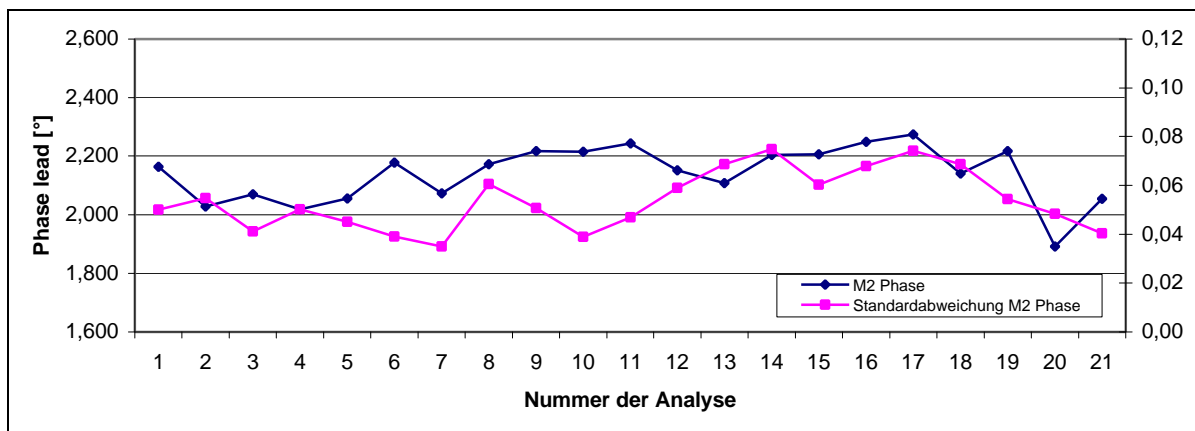


Abbildung G.58: A206 gefilterte Daten, zeitlicher Verlauf der berechneten Phasenverschiebungen M_2 im Zeitraum April 2001 bis Oktober 2004

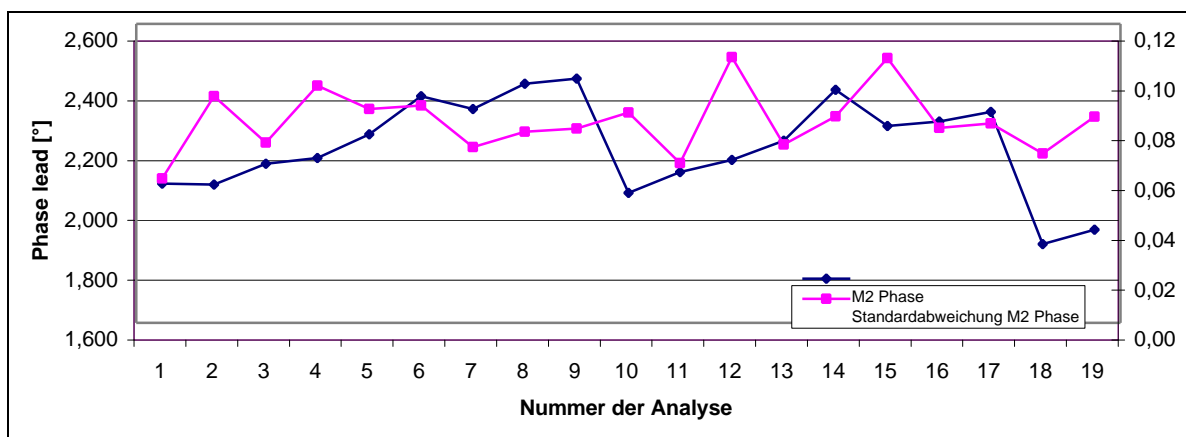


Abbildung G.59: A206 ungefilterte Daten, zeitlicher Verlauf der berechneten Phasenverschiebungen M_2 im Zeitraum August 2001 bis Oktober 2004

2.7.2.2 Partialtidenband S_2

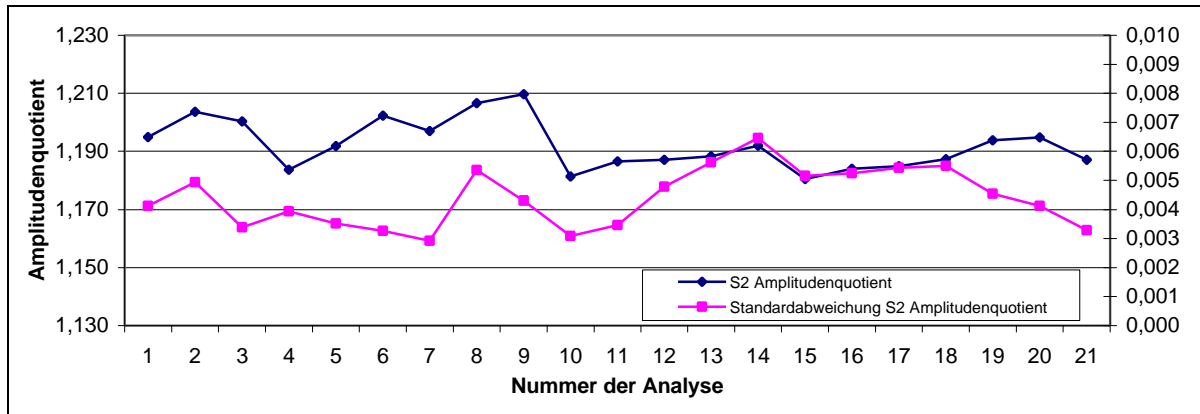


Abbildung G.60: A206 gefilterte Daten, zeitlicher Verlauf der berechneten Amplitudenquotienten S_2 im Zeitraum April 2001 bis Oktober 2004

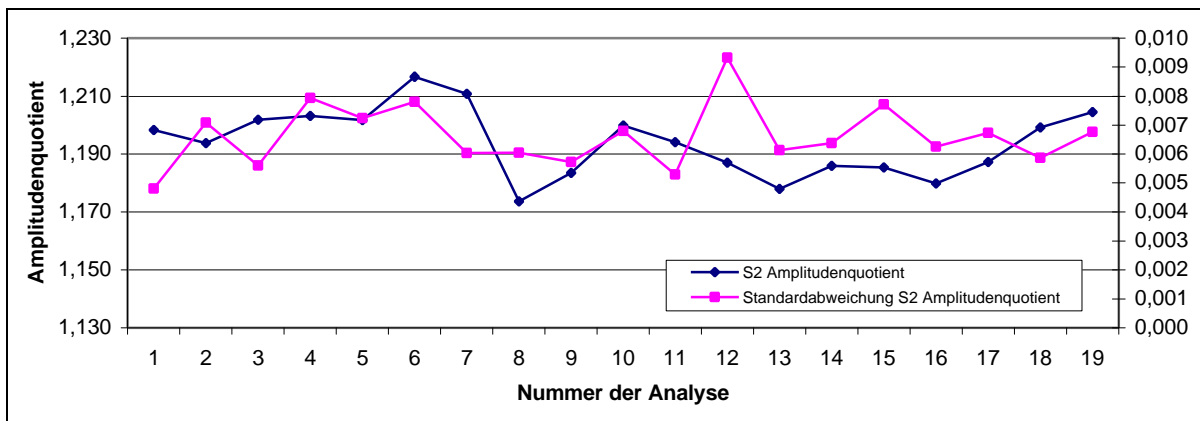


Abbildung G.61: A206 ungefilterte Daten, zeitlicher Verlauf der berechneten Amplitudenquotienten S_2 im Zeitraum August 2001 bis Oktober 2004

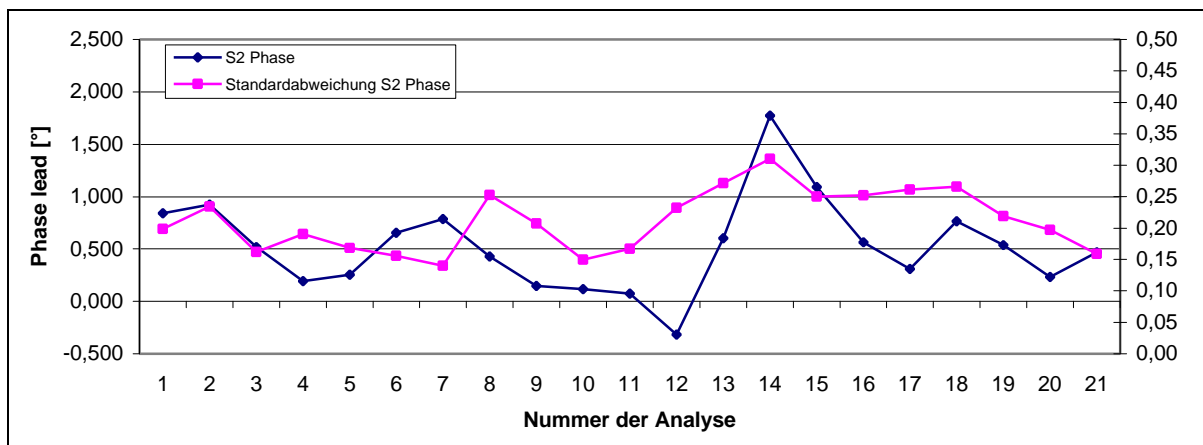


Abbildung G.62: A206 gefilterte Daten, zeitlicher Verlauf der berechneten Phasenverschiebungen S_2 im Zeitraum April 2001 bis Oktober 2004

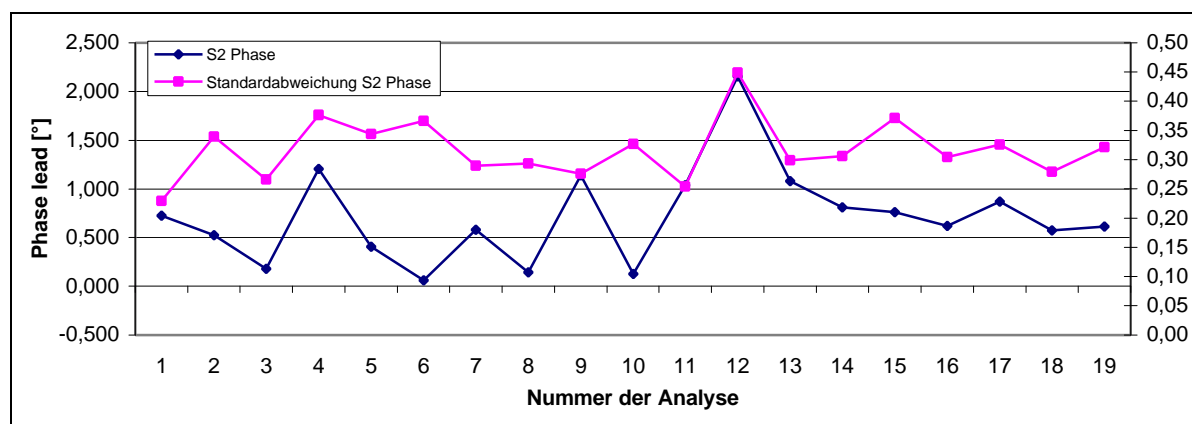


Abbildung G.63: A206 ungefilterte Daten, zeitlicher Verlauf der berechneten Phasenverschiebungen S_2 im Zeitraum August 2001 bis Oktober 2004

2.7.3 Feststellungen und Schlussfolgerungen

Der zeitliche Verlauf der Gezeitenparameter zeigt in einer Reihe von Fällen ausgeprägte Trends mit bisweilen sprunghaften Niveaushiftungen. Die Änderungsbeträge aufeinander folgender Parameterwerte sind zwar nach statistischen Kriterien für jeden Einzelfall nicht signifikant (t-Test), jedoch widersprechen die systematischen Strukturen in den Parameterverläufen jenen Mustern, die bei einer statistischen Zufallsstreuung zu erwarten wären. Dies gilt insbesondere für die aus den *ungefilterten* Daten für das Partialtidenband M_2 berechneten Phasenverschiebungen. Bemerkenswert ist, dass in den zugeordneten Ergebnissen der Phasenberechnungen für die *gefilterten* Daten vergleichbare Strukturen nicht zu erkennen sind (Ausnahme Ergebnisse der Analysen 19 und 20 (gefiltert) bzw. 17 und 18 (ungefiltert)), also eine signifikante Korrelation zwischen beiden Zeitreihen nicht auftritt. Dies könnte darauf hindeuten, dass die dargelegten Sachverhalte ihre Ursache ausschließlich oder überwiegend in numerischen Effekten bei der Gezeitenanalyse haben, dass also der Rauschpegel das Ergebnis der Parameterschätzung systematisch und relevant beeinflusst. Gezielte Untersuchungen bestätigten, dass insbesondere die Beträge der geschätzten Phasenverschiebungen sensibel auf herbeigeführte Änderungen des Verlaufs der stündlichen Mittelwerte der Registriersignale reagieren (z.B. als Folge instrumenteller Signalverstellungen). Allerdings kann dies keinesfalls die genannte Systematik bei den zeitlichen Änderungen der Phasenverschiebungen M_2 im ersten Untersuchungsabschnitt erklären.

Zwischen den Analysen 9 und 10 der ungefilterten Daten tritt bei den berechneten Phasenverschiebungen für die Partialtide M_2 eine ausgeprägte Niveauveränderung von über $0,3^\circ$ auf. Bei den Amplitudenquotienten der Partialtide S_2 wiederum ist zwischen den Analysen 9 und 10 bzw. 7 und 8 sowohl für die gefilterten, als auch für die ungefilterten Daten eine deutliche Betragsänderung von 3% bis 4% zu erkennen, die bei der Partialtide M_2 nicht auftritt. Es wurde daher untersucht, welche messtechnischen Arbeiten während der genannten Zeiträume in der Messkammer durchgeführt wurden; bietet doch das GeoObservatorium Odendorf als Experimentalstation keinesfalls durchgängig optimale Bedingungen hinsichtlich der Messung langer und *anthropogen* ungestörter gravimetrischer Zeitreihen. Signifikante Besonderheiten experimenteller Tätigkeiten traten in dem genannten Zeitraum aber nicht auf.

Generell kann festgestellt werden, dass zwar zeitweise zwischen zugeordneten Zeitreihen der berechneten Gezeitenparameter Korrelationen zu erkennen sind, überwiegend jedoch nicht. Die Ursachen der zeitlichen Variationen der berechneten Amplitudenquotienten und Phasenverschiebungen sind somit offensichtlich komplexer Natur. Aus dem Verlauf der Amplitudenquotienten M_2 kann geschlossen werden, dass die verwendeten Registrierdaten im gesamten Untersuchungszeitraum keine signifikanten zeitlichen Änderungen des Registriermaßstabs mehr aufweisen.

Die dargelegten Ergebnisse rechtfertigen die gewählte Vorgehensweise der Registrierung ungefilterter oder schwach gefilterter Daten (im Gegensatz zum üblichen Standardverfahren der Gezeitenanalyse mit stark gefilterten Daten); denn ein Ziel der durchgeführten Untersuchungen bestand gerade darin, Informationen über reale oder potentielle systematische Störeffekte zu gewinnen, die bei stark gefilterten Daten kaum signifikant zu erkennen sind. Die Kenntnis potentieller Störeffekte ist aber die Voraussetzung für geeignete Maßnahmen zu ihrer Vermeidung oder Berücksichtigung. Auf die möglichen Auswirkung der bei der Gezeitenanalyse kurzer Registrierzeiträume einzuführenden relativ großen Partialtidenbandbreiten wurde bereits im Rahmen der in Abschnitt E6 durchgeführten Untersuchungen hingewiesen.

3 Gravimeter A233

3.1 Instrumentelle Angaben

3.1.1 Das Gravimeter Askania, Typ GS25

Das Gravimeter GS25 stellt die letzte technische Entwicklungsstufe der Askania-Gravimeter dar. Die zuletzt von der Bodenseewerk Geosystem GmbH übernommene Produktion wurde 1978 eingestellt. Nach Kenntnisstand wurden lediglich zwei Gravimeter des Typs GS25 gebaut.

Der gravimetrische Sensor entspricht hinsichtlich seiner mechanischen Konstruktion dem des ursprünglichen Gravimeters GS11. Das Gravimeter GS25 verfügt jedoch - wie das Gravimeter GS15 - über einen kapazitiven Wegaufnehmer für die Analogwandlung der Positionen und Bewegungen des gravimetrischen Probekörpers („Gravimetermasse“) in ein Gleichspannungssignal. Anders als beim Typ GS15 wird der innere Heizkreis durch einen Thermistor kontinuierlich geregelt, so dass die als Folge der ursprünglichen Intervallsteuerung des *inneren* Heizkreises auftretenden, starken periodischen Signalvariationen (10 bis 20 μ Gal) vermieden werden, jedenfalls soweit sie durch den inneren Heizkreis gesteuert werden. Einen weiteren Fortschritt stellen einige mechanische Verbesserungen des druckdichten Gravimetergehäuses dar; hinsichtlich Einzelheiten wird verwiesen auf [ASKANIA 1977]. Das Gravimeter ist mit einer elektromagnetischen Eicheinrichtung ausgestattet.

3.1.2 Der Skalenfaktor des Gravimeters

Entsprechend Prüfzeugnis des Herstellers vom 31.03.1977 beträgt der Kugeleiwert $E_0=37,002\text{mGal}$, bezogen auf einen Schwerewert $g_0=980710\text{mGal}$. Daraus ergibt sich für die Station GeoObservatorium Odendorf der Kugeleiwert $E=37,016\text{mGal}$ (vgl. Abschnitt D6.2).

Der örtliche Messwertausschlag bei Kugeleichtung wurde am 19.03.2003 bestimmt zu $\Delta S=773,3\pm 0,1$ Mikrometerskalenteile (MMSkt); 100,0 Mikrometerskalenteile entsprechen einem Skalenteil des Spindelmaßstabs (vergleiche Abschnitt D6.2.4).

Der in dem o. a. Prüfzeugnis angegebene Messwertausschlag beträgt nach der *Umrechnung* auf den Schwerewert Odendorf 773,2 MMSkt und ist somit praktisch identisch mit dem vorgenannten Wert.

Der durch Kugeleichtung für die Station Odendorf ermittelte Skalenfaktor des Mikrometers ergibt sich somit zu $k_1 = 47,868\mu\text{Gal/MMSkt}$.

3.1.3 Der Einfluss der Intervallschaltung des äußeren Thermostaten

Anders als beim Gravimeter A206 bewirkt das temperaturgesteuerte Schalten des *äußeren* Thermostaten geringe periodische Signalvariationen (siehe Abbildung G.64).

Die Doppelamplitude der temperaturinduzierten Signalvariationen beträgt jedoch lediglich etwa 0,0025 Volt entsprechend etwa 0,25 μ Gal, so dass eine relevante Auswirkung dieser Störung auf die stündlichen Signalmittelwerte ausgeschlossen werden kann; vgl. auch Gravimeter LCR-G-xx2 in Abschnitt E10. Die Periode der Signalvariationen beträgt etwa 180 Sekunden; dies ist die Schaltperiode des äußeren Thermostaten.

Beobachtungen der Periode und Amplitude dieser Signalstörung ermöglichen eine Überwachung der Temperaturregelung des Gravimeters.

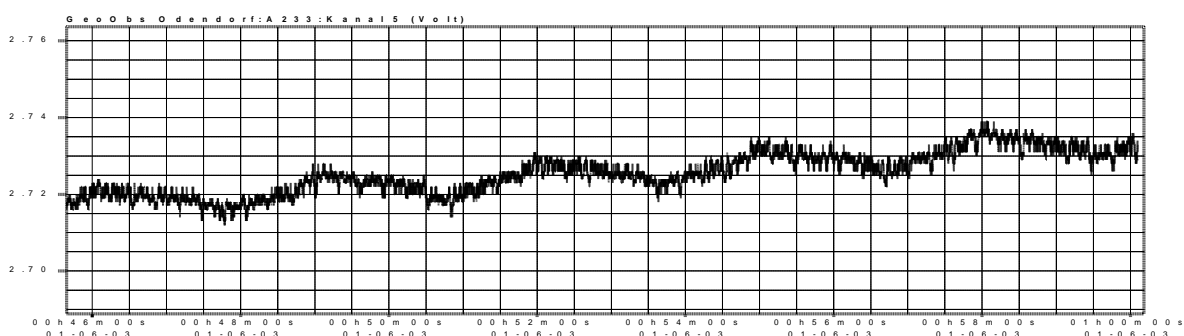


Abbildung G.64: Periodische Variationen des Registriersignals bei Gravimeter A233
0,01 Volt entspricht etwa 1 μ Gal

3.1.4 Gegenüberstellung des saisonalen Driftverhaltens der Gravimeter A233 und A206

Wie in Abschnitt D5 dargelegt, wurde die Temperaturstabilisierung in der Messkammer nicht aktiviert, um Einsichten in das langfristige Temperaturverhalten der untersuchten Gravimeter zu gewinnen und um daraus in Abhängigkeit jeweiliger Aufgabenstellungen Grenzwerte für die zulässigen Temperaturvariationen in der Messkammer abzuleiten.

Für das Gravimeter A206 wurde im ersten Untersuchungsabschnitt (Dezember 2000 bis Januar 2003, Abschnitt G2.1) eine langfristige, saisonale Verlagerung des Signalniveaus festgestellt, aus der sich ein langfristiger Temperatureffekt von etwa $460\mu\text{Gal}/^\circ\text{C}$ ableiten ließ (siehe Abschnitt D2).

Wie bereits dargelegt, unterscheidet sich das Gravimeter A233 von dem Gravimeter A206 hinsichtlich der Temperaturstabilisierung durch eine Doppelthermostatisierung mit einem thermistor-gesteuerten inneren Heizkreis. Es kann daher eine Verbesserung des Temperaturverhaltens des Gravimeters A233 im Vergleich mit der des Gravimeters A206 erwartet werden.

Die nachfolgende Abbildung G.65 zeigt für den zweiten Untersuchungsabschnitt (Januar 2003 bis Oktober 2004) eine Gegenüberstellung des saisonalen Driftverlaufs des Gravimeters A233 mit dem des Gravimeters A206.

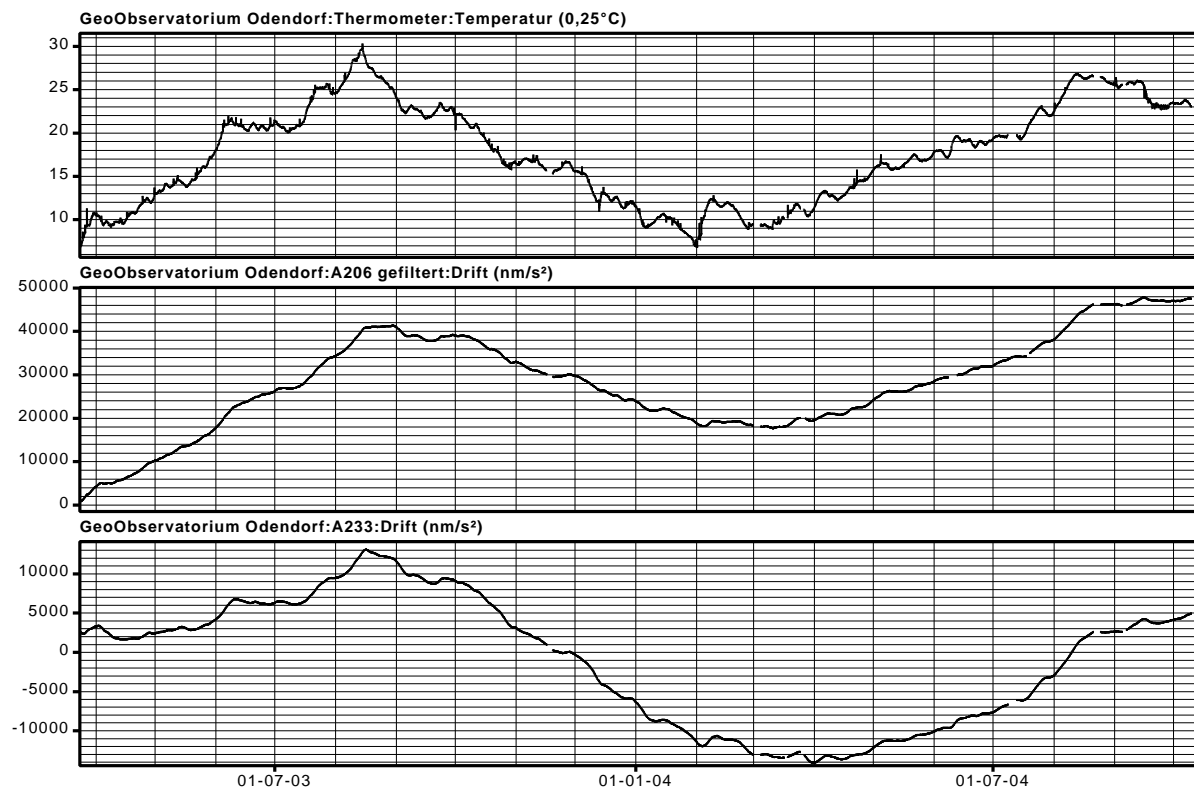


Abbildung G.65: Gegenüberstellung der Kammertemperatur mit den Gravimeterdriften A206 und A233

Es ist wiederum eine deutliche Korrelation der instrumentellen Driften mit den saisonalen Variationen der Kammertemperatur festzustellen, und zwar für beide Gravimeter. Die Ablage des gravimetrischen Signalminimums im Zeitraum Februar/März 2003 gegenüber dem Mittel der Signalwerte im August 2003 und September 2004 beträgt etwa $2600\mu\text{Gal}$ für Gravimeter A206 und ebenfalls $2600\mu\text{Gal}$ für Gravimeter A233; die zugeordneten Änderung der Temperatur in der Messkammer liegt bei 5°C . Daraus leitet sich für beide Gravimeter ein saisonaler Temperatureffekt von etwa $520\mu\text{Gal}/^\circ\text{C}$ (zum Vergleich: für Gravimeter A206 wurde in guter Übereinstimmung im ersten Untersuchungszeitraum ein Wert von etwa $460\mu\text{Gal}/^\circ\text{C}$ ermittelt; siehe Abschnitt D2, Abbildung D.1). Eine Verbesserung des Temperaturverhaltens des Gravimeters A233 als Folge der Doppelthermostatisierung tritt somit entgegen den Erwartungen *nicht* auf. Ursache könnte sein, dass die zusätzliche Temperaturstabilisierung durch den inneren Heizkreis, deren volle Wirkung ja nur an der Stelle des installierten Temperatursensors auftritt, sich letztlich nicht wesentlich auf die durch Änderungen der Außentemperatur induzierten Variationen der Innentemperatur innerhalb des *gesamten* Gehäuses auswirkt, in dem der gravimetrische Sensor installiert ist. Ein solcher Effekt verstärkt sich mit zunehmender Größe des Volumens,

innerhalb dessen ein (weitgehend) zeitkonstantes Temperaturfeld erzeugt werden soll; dieses Volumen wiederum ist abhängig von den geometrischen Dimensionen des gravimetrischen Sensors. Metrologische Vorteile groß dimensionierter gravimetrischer Sensoren (wie bei den Askania-Gravimetern) sind somit verbunden mit prinzipiellen Nachteilen bei der Temperaturstabilisierung [BONATZ 2004].

3.1.5 Vorhergehende Einsätze des Gravimeters A233

Nach der Beschaffung des Gravimeters wurden in den Jahren 1977 bis 1980 auf dem Fundament des Radioteleskops Effelsberg Gezeitenregistrierungen ausgeführt. Die Aufzeichnung der gravimetrischen Signale erfolgte (wie in dieser Zeit noch üblich) lediglich analog, so dass die damals gewonnenen Ergebnisse wegen ihrer (im Vergleich zum heutigem Stand der Technik) begrenzten Auflösung für einen Vergleich mit den im benachbarten GeoObservatorium Odendorf aktuell erzielten Ergebnissen nicht geeignet sind [BONATZ, SCHÜLLER UND WILMES 1980b].

Danach wurde das Gravimeter im Rahmen unterschiedlicher Aufgabenstellungen bis zum Jahre 2000 permanent im Geodynamischen Laboratorium Walferdange des Europäischen Zentrums für Geodynamik und Seismologie in Luxemburg eingesetzt. Die Messungen mit dem Gravimeter A233 mussten infolge des Ausfalls des kapazitiven Signalwandlers beendet werden.

Nach einer Reparatur des Gravimeters durch Professor M. Bonatz und anschließenden experimentellen Tests zum Nachweis der uneingeschränkten Funktionsfähigkeit des Messgeräts konnten permanente Gezeitenregistrierungen im GeoObservatorium Odendorf am 24.03.2003 00h UT begonnen werden.

3.2 Gezeitenanalysen der Registrierdaten

3.2.1 Der Registriermaßstab

Zur Bestimmung des Registriermaßstabs wurden vom 15.10.2003 bis 03.03.2004 101 Spindelverstellungen durchgeführt (Spindeleichung). Als mittlerer Signalausschlag ergab sich

$$0,5166 \pm 0,000348 \text{ Volt/MMskt.}$$

Die erreichte relative statistische Standardabweichungen beträgt somit 0,67% und liegt damit signifikant unter dem anzunehmenden systematischen Fehler des Skalenfaktors von etwa 1%. Dieser Sachverhalt begründet wie bei Gravimeter A206, dass weitere Spindeleichungen zunächst einmal zurückgestellt wurden.

Der ermittelte Ausschlagwert entspricht einem Registriermaßstab von

$$k = 47,868/0,5166 = 92,660 \mu\text{Gal/Volt.}$$

3.2.2 Analyseergebnisse

Die im Rahmen der Aufgabenstellungen (Abschnitt A1) ausgewerteten Registrierungen mit dem Gravimeter A233 beziehen sich innerhalb des zweiten Untersuchungsabschnitts (siehe Abschnitt G2.1) auf den Zeitraum vom 20.03.2003 bis zum 10.10.2004. Messtechnisch lässt sich dieser Zeitraum (wie bei Gravimeter A206) unterscheiden in die Periode bis Anfang März 2004, in der unter anderem die Spindeleichungen durchgeführt und damit relevante Störungen des Messungsablaufs verursacht wurden, sowie die anschließende Periode mit wesentlich geringeren Eingriffen in den Verlauf der Registrierungen (lediglich gelegentliche Maßnahmen zur Identifikation potentieller elektrostatischer Störquellen). Aus diesem Grunde werden analog zur Auswertung der mit dem Gravimeter A206 gewonnenen Messungsergebnisse (Abschnitte G2.2 und G2.3) Gezeitenanalysen sowohl für die beiden Einzelzeiträume, als auch für den Gesamtzeitraum ausgeführt. Das gravimetrische Signal wird gefiltert durch einen Bessel-Tiefpass 2. Ordnung; die Eckfrequenz beträgt 0,015 Hz (Herstellangaben).

3.2.2.1 Teilanalyse 1

Teilanalyse1 ohne Ansatz einer Luftdruckregression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: 00000056
ASKANIA GRAVIMETER GS25 Nr.233
Scale 92,660 µGal/Volt

20030320180000...20031117 40000 20031118170000...20040301 80000
Number of recorded days in total : 345.13
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.

adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]          [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1   350.0924  1.14897  0.00057  -0.0169  0.0285
0.981855 0.998631 P1   162.6963  1.14755  0.00139  -0.0168  0.0693
0.998632 1.001369 S1     4.0198  1.19927  0.08381 -12.8460  4.0047
1.001370 1.023622 K1   486.8778  1.13616  0.00042  0.1713  0.0214
1.914129 1.950419 M2   359.0945  1.18844  0.00039  2.1242  0.0190
1.984283 2.002736 S2   168.1272  1.19596  0.00083  0.8412  0.0397

Standard deviation of weight unit: 10.397 nm/s2

```

Tabelle G.43:A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1a, Ergebnisse ohne Luftdruckregression

Teilanalyse1 mit Ansatz einer Luftdruckregression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: A233-1
ASKANIA GRAVIMETER GS25 Nr.233
Scale 92,660 µGal/Volt

20030320180000...20031117 40000 20031118170000...20040301 80000
Number of recorded days in total : 345.13
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.

adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]          [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1   350.0177  1.14872  0.00052  -0.0343  0.0260
0.981855 0.998631 P1   162.7491  1.14792  0.00127  -0.1015  0.0633
0.998632 1.001369 S1     4.4339  1.32280  0.07670  -1.0168  3.3342
1.001370 1.023622 K1   486.9939  1.13643  0.00039  0.1456  0.0196
1.914129 1.950419 M2   359.0324  1.18823  0.00040  2.1218  0.0193
1.984283 2.002736 S2   167.6159  1.19232  0.00084  0.5481  0.0408

Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff.      stdv. parameter unit
1      2.84531      0.08182  airpress. nm/s**2 / hPa

Standard deviation of weight unit: 9.705 nm/s**2

```

Tabelle G.44: A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1b, Ergebnisse mit Luftdruckregression

3.2.2.2 Teilanalyse 2

Teilanalyse 2 ohne Luftdruckregression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: 00000057
ASKANIA GRAVIMETER GS25 Nr.233
Scale 92,660 µGal/Volt
20040303170000...20040317 40000 20040317 90000...20040325110000
20040325200000...20040709 50000 20040712 10000...20040821150000
20040823210000...20040905 80000 20040906 0...20041010150000
Number of recorded days in total : 214.83
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.

adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1   349.9168  1.14839  0.00053  0.0075  0.0263
0.981855 0.998631 P1   163.1348  1.15065  0.00197 -0.1970  0.0981
0.998632 1.001369 S1    4.1417  1.23569  0.13397 -23.1165  6.1840
1.001370 1.023622 K1   487.0327  1.13652  0.00056  0.1320  0.0284
1.914129 1.950419 M2   359.0537  1.18830  0.00050  2.0709  0.0242
1.984283 2.002736 S2   168.0439  1.19537  0.00109  0.7933  0.0522

Standard deviation of weight unit: 7.933 nm/s**2

```

Tabelle G.45: A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2a, Ergebnisse ohne Luftdruckregression

Teilanalyse 2 mit Luftdruckregression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: A233-2
ASKANIA GRAVIMETER GS25 Nr.233
Scale 92,660 µGal/Volt
20040303170000...20040317 40000 20040317 90000...20040325110000
20040325200000...20040709 50000 20040712 10000...20040821150000
20040823210000...20040905 80000 20040906 0...20041010150000
Number of recorded days in total : 214.83
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.

adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

0.911391 0.947991 O1   349.9633  1.14855  0.00046  0.0199  0.0230
0.981855 0.998631 P1   163.1438  1.15071  0.00172 -0.1707  0.0857
0.998632 1.001369 S1    4.4785  1.33615  0.11725 -13.7353  5.0243
1.001370 1.023622 K1   487.2282  1.13698  0.00049  0.1360  0.0248
1.914129 1.950419 M2   359.0294  1.18822  0.00048  2.0688  0.0231
1.984283 2.002736 S2   167.6060  1.19225  0.00105  0.5804  0.0513

Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff.      stdv.  parameter  unit
  1      2.08810      0.12595  airpress.  nm/s**2 / hPa

Standard deviation of weight unit: 7.721 nm/s**2

```

Tabelle G.46: A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2b, Ergebnisse mit Luftdruckregression

3.2.2.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 und 2

Teilanalyse 1a	O1	350.0924	1.14897	0.00057	-0.0169	0.0285
Teilanalyse 1b	O1	350.0177	1.14872	0.00052	-0.0343	0.0260
Teilanalyse 1a	P1	162.6963	1.14755	0.00139	-0.0168	0.0693
Teilanalyse 1b	P1	162.7491	1.14792	0.00127	-0.1015	0.0633
Teilanalyse 1a	S1	4.0198	1.19927	0.08381	-12.8460	4.0047
Teilanalyse 1b	S1	4.4339	1.32280	0.07670	-1.0168	3.3342
Teilanalyse 1a	K1	486.8778	1.13616	0.00042	0.1713	0.0214
Teilanalyse 1b	K1	486.9939	1.13643	0.00039	0.1456	0.0196
Teilanalyse 1a	M2	359.0945	1.18844	0.00039	2.1242	0.0190
Teilanalyse 1b	M2	359.0324	1.18823	0.00040	2.1218	0.0193
Teilanalyse 1a	S2	168.1272	1.19596	0.00083	0.8412	0.0397
Teilanalyse 1b	S2	167.6159	1.19232	0.00084	0.5481	0.0408
Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30):						
Teilanalyse 1oL: $s = 10.397 \text{ nm/s}^2$ Teilanalyse 1mL: $s = 9.705 \text{ nm/s}^2$						

Tabelle G.47: A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O₁ P₁ K₁ M₂ S₂ sowie die Partialtide S₁

Teilanalyse 2a	O1	349.9168	1.14839	0.00053	0.0075	0.0263
Teilanalyse 2b	O1	349.9633	1.14855	0.00046	0.0199	0.0230
Teilanalyse 2a	P1	163.1348	1.15065	0.00197	-0.1970	0.0981
Teilanalyse 2b	P1	163.1438	1.15071	0.00172	-0.1707	0.0857
Teilanalyse 2a	S1	4.1417	1.23569	0.13397	-23.1165	6.1840
Teilanalyse 2b	S1	4.4785	1.33615	0.11725	-13.7353	5.0243
Teilanalyse 2a	K1	487.0327	1.13652	0.00056	0.1320	0.0284
Teilanalyse 2b	K1	487.2282	1.13698	0.00049	0.1360	0.0248
Teilanalyse 2a	M2	359.0537	1.18830	0.00050	2.0709	0.0242
Teilanalyse 2b	M2	359.0294	1.18822	0.00048	2.0688	0.0231
Teilanalyse 2a	S2	168.0439	1.19537	0.00109	0.7933	0.0522
Teilanalyse 2b	S2	167.6060	1.19225	0.00105	0.5804	0.0513
Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30):						
Teilanalyse 2oL: $s = 7.933 \text{ nm/s}^2$ Teilanalyse 2mL: $s = 7.721 \text{ nm/s}^2$						

Tabelle G.48: A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 2 ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O₁ P₁ K₁ M₂ S₂ sowie die Partialtide S₁

Teilanalyse 1a	O1	350.0924	1.14897	0.00057	-0.0169	0.0285
Teilanalyse 2a	O1	349.9168	1.14839	0.00053	0.0075	0.0263
Faktor 1,00051	Differenz	-0.0244				
Teilanalyse 1a	P1	162.6963	1.14755	0.00139	-0.0168	0.0693
Teilanalyse 2a	P1	163.1348	1.15065	0.00197	-0.1970	0.0981
Faktor 0,99731	Differenz	+0.1802				
Teilanalyse 1a	S1	4.0198	1.19927	0.08381	-12.8460	4.0047
Teilanalyse 2a	S1	4.1417	1.23569	0.13397	-23.1165	6.1840
Teilanalyse 1a	K1	486.8778	1.13616	0.00042	0.1713	0.0214
Teilanalyse 2a	K1	487.0327	1.13652	0.00056	0.1320	0.0284
Faktor 0,99968	Differenz	+0.0393				
Teilanalyse 1a	M2	359.0945	1.18844	0.00039	2.1242	0.0190
Teilanalyse 2a	M2	359.0537	1.18830	0.00050	2.0709	0.0242
Faktor 1,00012	Differenz	+0.0533				
Teilanalyse 1a	S2	168.1272	1.19596	0.00083	0.8412	0.0397
Teilanalyse 2a	S2	168.0439	1.19537	0.00109	0.7933	0.0522
Faktor 1,00049	Differenz	+0.0479				

Tabelle G.49: A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 und 2 ohne Luftdruckregression

Teilanalyse 1b	O1	350.0177	1.14872	0.00052	-0.0343	0.0260
Teilanalyse 2b	O1	349.9633	1.14855	0.00046	0.0199	0.0230
Faktor 1,00015	Differenz	-0.0542				
Teilanalyse 1b	P1	162.7491	1.14792	0.00127	-0.1015	0.0633
Teilanalyse 2b	P1	163.1438	1.15071	0.00172	-0.1707	0.0857
Faktor 0,99757	Differenz	+0.0692				
Teilanalyse 1b	S1	4.4339	1.32280	0.07670	-1.0168	3.3342
Teilanalyse 2b	S1	4.4785	1.33615	0.11725	-13.7353	5.0243
Teilanalyse 1b	K1	486.9939	1.13643	0.00039	0.1456	0.0196
Teilanalyse 2b	K1	487.2282	1.13698	0.00049	0.1360	0.0248
Faktor 0,99952	Differenz	+0.0096				
Teilanalyse 1b	M2	359.0324	1.18823	0.00040	2.1218	0.0193
Teilanalyse 2b	M2	359.0294	1.18822	0.00048	2.0688	0.0231
Faktor 1,00001	Differenz	+0.0530				
Teilanalyse 1b	S2	167.6159	1.19232	0.00084	0.5481	0.0408
Teilanalyse 2b	S2	167.6060	1.19225	0.00105	0.5804	0.0513
Faktor 1,00006	Differenz	-0.0323				

Tabelle G.50: A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 und 2 mit Luftdruckregression

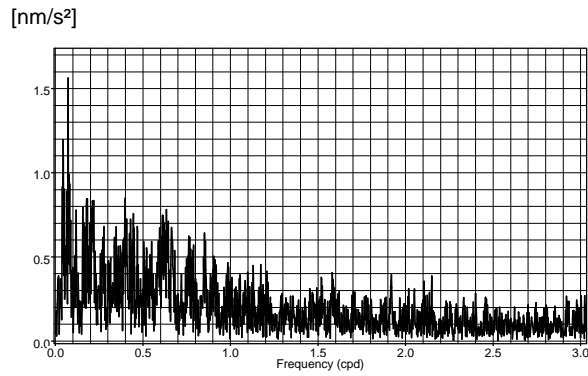


Abbildung G.66: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

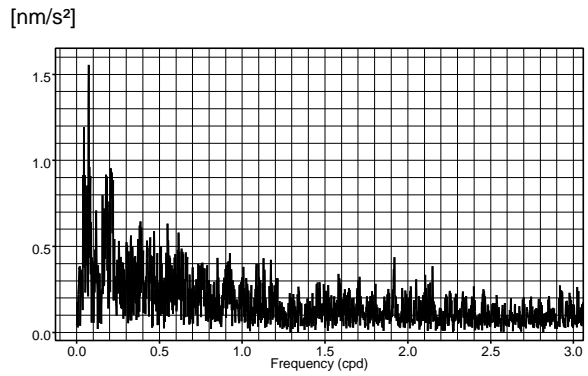


Abbildung G.67: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

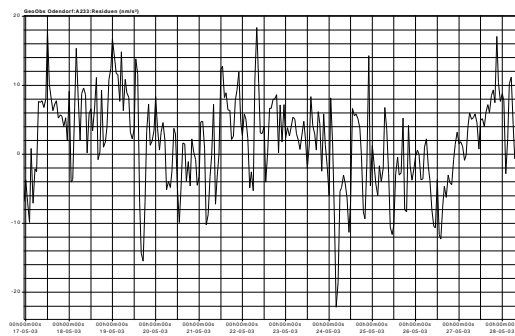


Abbildung G.68: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 17.05.2003 bis 28.05.2003, Maßstäbe: 12h bzw. 2nm/s^2 je Intervall

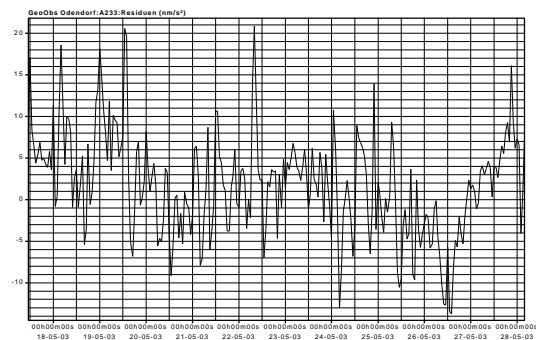


Abbildung G.69: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 17.05.2003 bis 28.05.2003, Maßstäbe: 12h bzw. 1nm/s^2 je Intervall

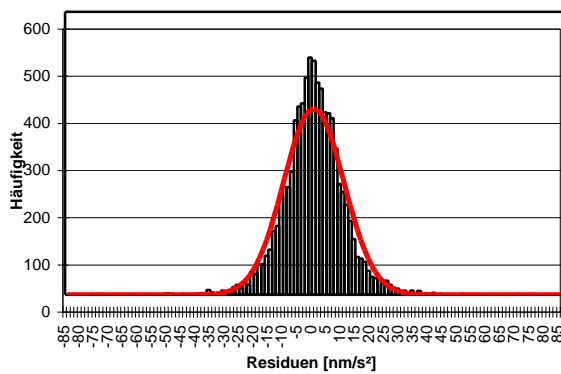


Abbildung G.70: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

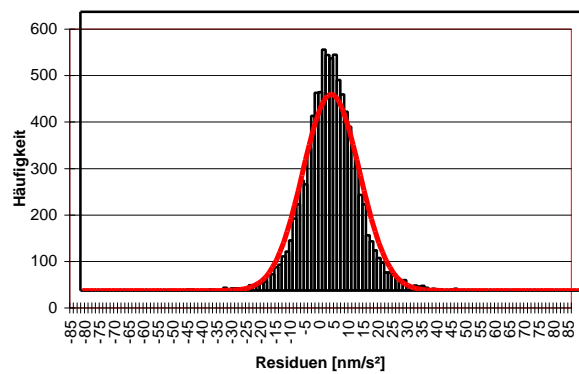


Abbildung G.71: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

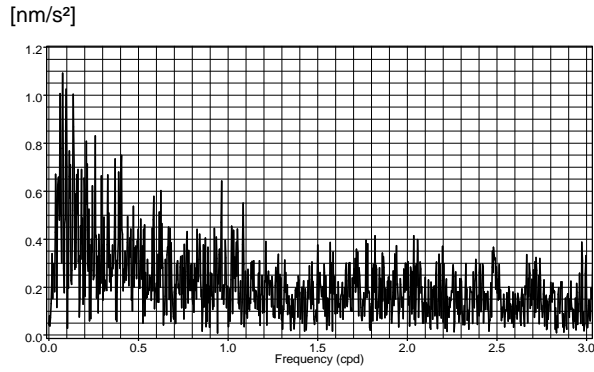


Abbildung G.72: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

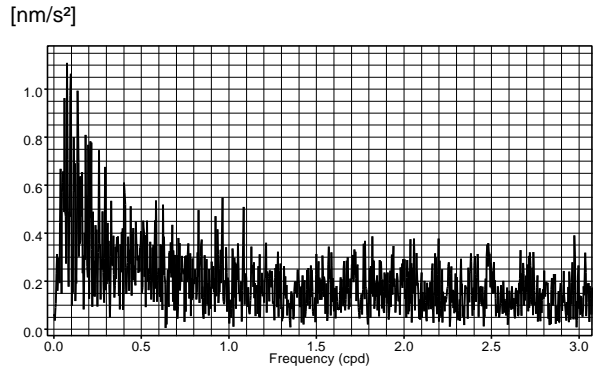


Abbildung G.73: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

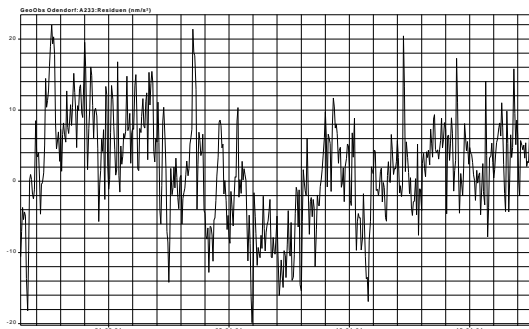


Abbildung G.74: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 26.02.2004 bis 18.03.2004, Maßstäbe: 1 Tag bzw. 2nm/s^2 je Intervall

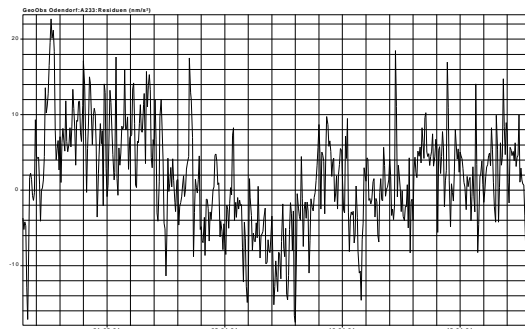


Abbildung G.75: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 26.02.2004 bis 18.03.2004, Maßstäbe: 1 Tag bzw. 2nm/s^2 je Intervall

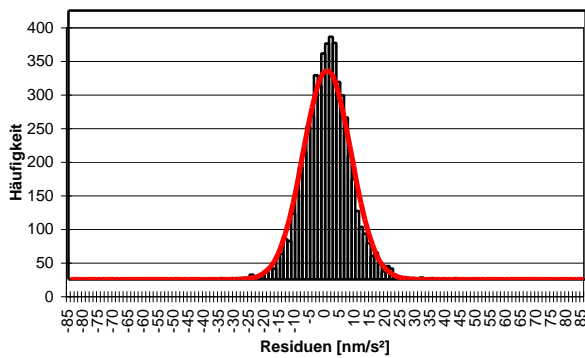


Abbildung G.76: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

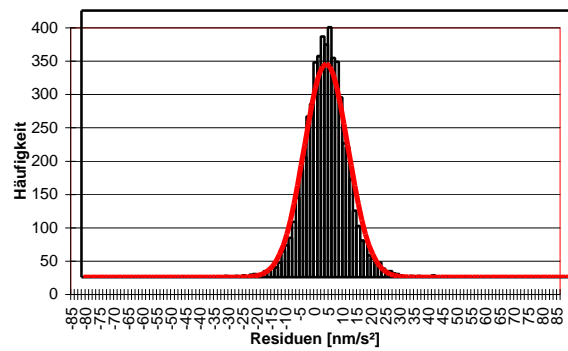


Abbildung G.77: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

3.2.2.4 Gesamtanalyse

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: 00000055
ASKANIA GRAVIMETER GS25 Nr.233
Scale 92,660 µGal/Volt

20030320180000...20031117 40000 20031118170000...20040301 80000
20040303170000...20040317 40000 20040317 90000...20040325110000
20040325200000...20040709 50000 20040712 10000...20040821150000
20040823210000...20040905 80000 20040906 0...20041010150000
Number of recorded days in total : 559.96
Numerical filter is PERTZEV57 with 37 coefficients.

Estimation of noise by FOURIER-spectrum of residuals
0.1 cpd band 99999.9990 nm/s**2          1.0 cpd band 0.2583 nm/s**2
2.0 cpd band 0.1871 nm/s**2            3.0 cpd band 0.1547 nm/s**2
4.0 cpd band 0.1445 nm/s**2            white noise 0.2279 nm/s**2

adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]    [cpd]    [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]
0.501370 0.911390 Q1   66.6522  1.14250  0.00201 -0.5579  0.1010
0.911391 0.947991 O1   350.0254  1.14875  0.00039 -0.0072  0.0193
0.947992 0.981854 M1   27.4794  1.14671  0.00451  0.4800  0.2255
0.981855 0.998631 P1  162.8078  1.14834  0.00098 -0.0357  0.0490
0.998632 1.001369 S1    4.0001  1.19340  0.06013 -13.0727  2.8860
1.001370 1.023622 K1  486.8917  1.13619  0.00030  0.1693  0.0149
1.023623 1.035379 TET1  5.6754  1.23855  0.02590 -1.4709  1.1986
1.035380 1.057485 J1   27.8732  1.16318  0.00548 -0.1382  0.2700
1.057486 1.071833 SO1  4.3250  1.08808  0.03010 -4.0242  1.5842
1.071834 1.470243 OO1  15.2324  1.16182  0.00671 -0.8357  0.3310
1.470244 1.880264 2N2  10.6198  1.14951  0.00873  3.7447  0.4353
1.880265 1.914128 N2   68.0335  1.17601  0.00182  3.0377  0.0888
1.914129 1.950419 M2  359.0880  1.18841  0.00033  2.1042  0.0159
1.950420 1.984282 L2   10.0162  1.17279  0.00644  1.1940  0.3146
1.984283 2.002736 S2  168.1117  1.19585  0.00070  0.8246  0.0333
2.002737 2.451943 K2   45.6637  1.19498  0.00209  0.8163  0.1003
2.451944 3.381378 M3    3.9842  1.05756  0.02073  1.3907  1.1229
3.381379 4.347615 M4    0.1380  3.17105  1.62984 -0.1360  29.4491

Standard deviation of weight unit: 9.555 nm/s**2

```

Tabelle G.51: A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse ohne Luftdruckregression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File:  A233
ASKANIA GRAVIMETER GS25 Nr.233
Scale 92,660 µGal/Volt

20030320180000...20031117 40000  20031118170000...20040301 80000
20040303170000...20040317 40000  20040317 90000...20040325110000
20040325200000...20040709 50000  20040712 10000...20040821150000
20040823210000...20040905 80000  20040906   0...20041010150000
Number of recorded days in total :  559.96

Estimation of noise by FOURIER-spectrum of residuals
0.1 cpd band99999.9990 nm/s**2          1.0 cpd band    0.2321 nm/s**2
2.0 cpd band   0.1821 nm/s**2          3.0 cpd band    0.1523 nm/s**2
4.0 cpd band   0.1447 nm/s**2          white noise     0.2122 nm/s**2

adjusted tidal parameters :

from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]           [deg]  [deg]

0.501370 0.911390 Q1   66.6125  1.14182  0.00184 -0.5466  0.0921
0.911391 0.947991 O1  350.0034  1.14867  0.00035 -0.0111  0.0176
0.947992 0.981854 M1   27.5688  1.15044  0.00411  0.4084  0.2049
0.981855 0.998631 P1  162.8187  1.14841  0.00089 -0.0890  0.0447
0.998632 1.001369 S1   4.3670  1.30284  0.05492 -3.3526  2.4219
1.001370 1.023622 K1  487.0334  1.13652  0.00027  0.1519  0.0136
1.023623 1.035379 TET1  5.6013  1.22237  0.02362 -1.4863  1.1071
1.035380 1.057485 J1   27.7585  1.15839  0.00500 -0.2069  0.2471
1.057486 1.071833 SO1   4.3820  1.10241  0.02744 -2.9939  1.4255
1.071834 1.470243 OO1  15.1411  1.15486  0.00612 -0.8494  0.3035
1.470244 1.880264 2N2  10.6090  1.14834  0.00862  4.0266  0.4301
1.880265 1.914128 N2   68.0164  1.17572  0.00180  3.0376  0.0877
1.914129 1.950419 M2  359.0385  1.18825  0.00032  2.1015  0.0156
1.950420 1.984282 L2   10.0057  1.17156  0.00636  1.2323  0.3108
1.984283 2.002736 S2  167.6020  1.19222  0.00069  0.5499  0.0335
2.002737 2.451943 K2   45.6139  1.19367  0.00207  0.7035  0.0992
2.451944 3.381378 M3    3.9826  1.05715  0.02069  1.4321  1.1211
3.381379 4.347615 M4    0.1350  3.10230  1.65406 -2.7372 30.5493

Adjusted meteorological or hydrological parameters:

no. regr.coeff.      stdv.  parameter  unit

   1      2.68769      0.06728  airpress.  nm/s**2 / hPa

Standard deviation of weight unit:      9.022 nm/s**2

```

Tabelle G.52:A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse mit Luftdruckregression

oL	0.911391	0.947991	O1	350.0254	1.14875	0.00039	-0.0072	0.0193
mL	0.911391	0.947991	O1	350.0034	1.14867	0.00035	-0.0111	0.0176
oL	0.981855	0.998631	P1	162.8078	1.14834	0.00098	-0.0357	0.0490
mL	0.981855	0.998631	P1	162.8187	1.14841	0.00089	-0.0890	0.0447
oL	0.998632	1.001369	S1	4.0001	1.19340	0.06013	-13.0727	2.8860
mL	0.998632	1.001369	S1	4.3670	1.30284	0.05492	-3.3526	2.4219
oL	1.001370	1.023622	K1	486.8917	1.13619	0.00030	0.1693	0.0149
mL	1.001370	1.023622	K1	487.0334	1.13652	0.00027	0.1519	0.0136
oL	1.914129	1.950419	M2	359.0880	1.18841	0.00033	2.1042	0.0159
mL	1.914129	1.950419	M2	359.0385	1.18825	0.00032	2.1015	0.0156
oL	1.984283	2.002736	S2	168.1117	1.19585	0.00070	0.8246	0.0333
mL	1.984283	2.002736	S2	167.6020	1.19222	0.00069	0.5499	0.0335

Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30):
 ohne Luftdruck: $s = 9.555 \text{ nm/s}^2$ mit Luftdruck: $s = 9.022 \text{ nm/s}^2$

Tabelle G.53: A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O₁ P₁ K₁ M₂ S₂ sowie die Partialtide S₁

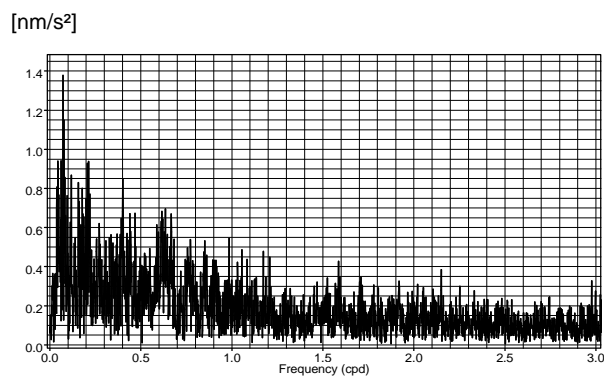


Abbildung G.78: Gravimeter A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

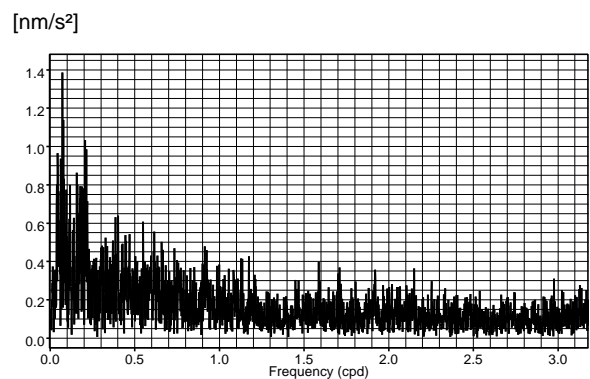


Abbildung G.79: Gravimeter A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen

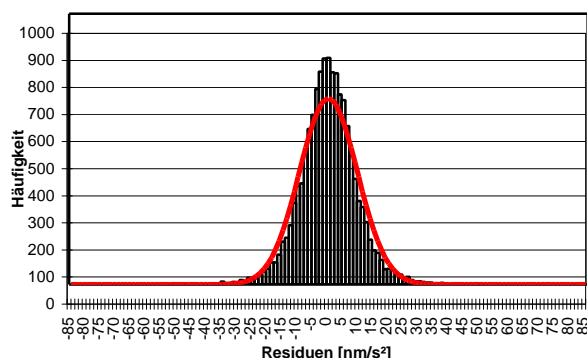


Abbildung G.80: Gravimeter A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

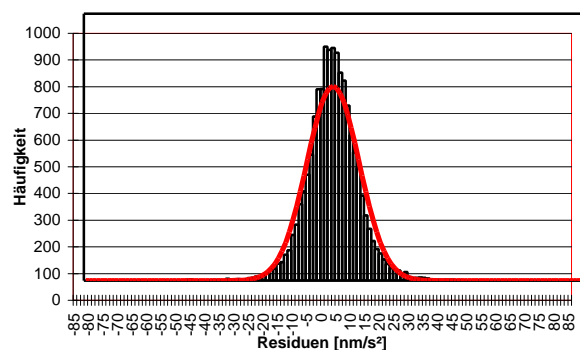


Abbildung G.81: Gravimeter A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

3.2.2.5 Ergebniszusammenfassung

Die Ergebnisse der Gezeitenanalysen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Ansatz einer lineare Luftdruckregression führt zu signifikanten Koeffizienten; diese betragen im ersten Teilabschnitt $2,845 \pm 0,081$, im zweiten Teilabschnitt $2,088 \pm 0,126$ und bei der Gesamtanalyse der Daten $2,688 \pm 0,067$ nm/s² pro mbar; die ermittelten Werte liegen damit in dem zu erwartenden Bereich oder in dessen Nähe (siehe Abschnitt E8.3).
- Die *ohne* und *mit* Berücksichtigung einer Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O₁ P₁ K₁ und M₂ berechneten Gezeitenparameter sowie deren Standardabweichungen sind praktisch identisch. Geringfügige, statistisch jedoch nicht signifikante Änderungen treten bei der Partialtide S₁ auf, deren beobachtete Amplitude jedoch lediglich 0,4μGal beträgt; die zugeordneten Amplitudenquotienten liegen bei 1,2 und damit im Bereich des Normalwertes. Systematische Wirkungen des Ansatzes einer Luftdruckregression auf die berechneten Parameter der Partialtide S₂ sind deutlich zu erkennen (Elimination des Signalanteils, der durch die beobachtete Luftdrucktide S₂ hervorgerufen wird, siehe Abschnitt E7).
- Die Unterschiede der in den beiden *Teilanalysen* für die Hauptpartialtiden berechneten *Amplitudenquotienten* liegen zwischen 0,0 und 0,5‰; lediglich bei der Partialtide P₁ tritt mit 2,5‰ eine größere Abweichung auf, die jedoch statistisch als nichtsignifikant zu bewerten ist. Es ist zu berücksichtigen, dass im ersten Beobachtungszeitraum innerhalb der Messkammer häufig tägliche Arbeiten ausgeführt wurden (siehe Abschnitt G2.1), die besonders für den Bereich der Tiden P₁ S₁ K₁ (Frequenzband 15°/h, bzw. 2π/Tag) teilweise zu Störeinflüssen geführt haben dürften.
- Bei den *Phasendifferenzen* treten in den Ergebnissen der *Teilanalysen* lediglich Unterschiede auf, die als nicht signifikant einzustufen sind.
- Für die beiden *Teilanalysen* beträgt der Unterschied der *Modellanpassung* maximal 26% (Verhältnis der berechneten Standardabweichungen der Gewichtseinheit gleich 0,74) zugunsten des weniger gestörten zweiten Beobachtungszeitraumes. Der Ansatz einer Luftdruckregression führt zu einer geringen Verbesserung der Modellanpassung.
- Die *Spektren der Residuen* nach der Datenanalyse ohne und mit Berücksichtigung einer Luftdruckregression sind praktisch identisch. Die Residuenspektren der ersten und der zweiten Teilanalyse unterscheiden sich nur geringfügig und weisen keine als signifikant einzustufenden Spitzen auf. Allenfalls als schwach ausgeprägt könnten in den Ergebnissen der Teilanalyse 1 und der Gesamtanalyse Spitzen im Bereich von 0,2cpd (entsprechend einer Periode von etwa fünf Tagen) bewertet werden.
- *Residuenverlauf und -struktur* werden durch eine zusätzliche Berücksichtigung zeitlicher Luftdruckänderungen nicht erkennbar beeinflusst. In einigen Zeiträumen sind ausgeprägte zeitliche Erhaltungstendenzen im Residuenverlauf beider Analysenabschnitte und des gesamten Beobachtungszeitraums zu erkennen; zu Einzelheiten siehe Abschnitt G4.
- Die *Histogramme der Residuen* weichen in allen Fällen signifikant von der Normalverteilung ab; die geringsten Abweichungen treten in den Ergebnissen der zweiten Teilanalyse auf, also in dem Zeitraum relativ ungestörter gravimetrischer Registrierungen. Der Suche nach deterministischen Gründen für offensichtlich auftretende Residuenanomalien und der Suche nach Möglichkeiten zur Verhinderung oder Beseitigung der zugeordneten temporären Störungen in den beobachteten gravimetrischen Signalen kommt für die Gezeitenanalyse auch im Hinblick auf eine Optimierung der Modellanpassung eine große Bedeutung zu, insoweit unterscheiden sich die Analysen des Gravimeters A206 nicht von denen des Gravimeters A233.

3.3 Untersuchungen der zeitlichen Stabilität des Registriermaßstabs durch sukzessive Teilanalysen

Zur Überprüfung der zeitlichen Konstanz des Maßstabsfaktors wurden, wie zuvor, die mit dem Gravimeter A233 beobachteten Daten in laufenden 2-Monatsanalysen ausgewertet (siehe auch Abschnitt E4.1). Die Ergebnisse für den Amplitudenquotienten M₂ sind in der nachfolgenden Abbildung G.82 nachgewiesen; als Ergänzung ist in Abbildung G.83 der Verlauf der zugeordnete Phasendifferenz dargestellt.

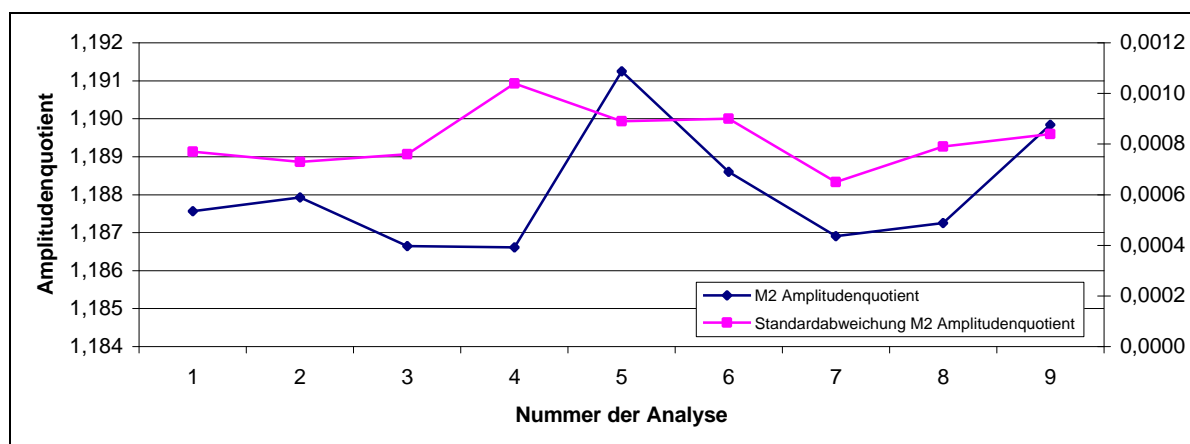


Abbildung G.82: Stabilität des Amplitudenquotienten M_2 bei aufeinander folgenden 2-Monatsanalysen für Gravimeter A233 im Zeitraum April 2003 bis September 2004

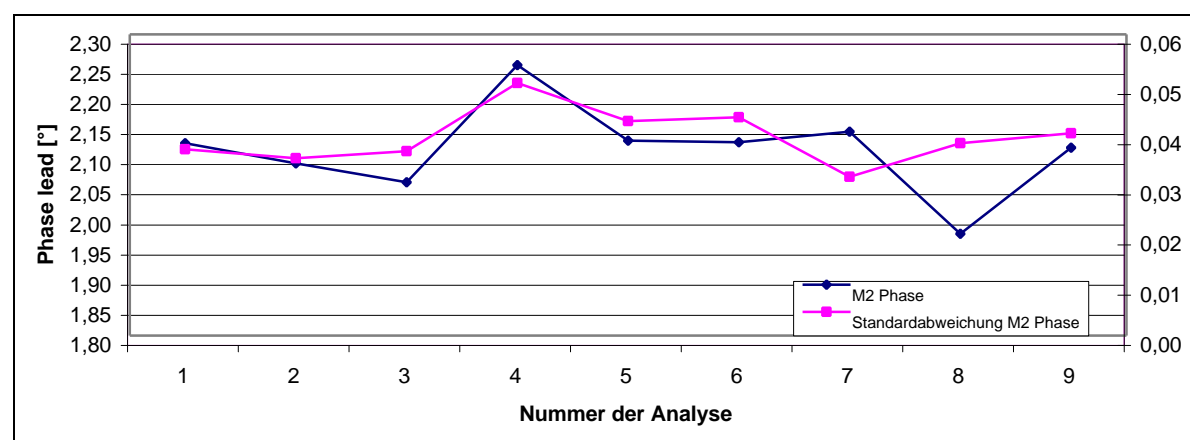


Abbildung G.83: Stabilität der Phasendifferenz M_2 bei aufeinander folgenden 2-Monatsanalysen für Gravimeter A233 im Zeitraum April 2003 bis September 2004

Signifikante zeitliche Trends sind weder für den Amplitudenquotienten M_2 noch für die zugeordnete Phasendifferenzen zu erkennen.

Es muss auf die prinzipiellen Nachteile des Verfahrens der sukzessiven Kurzzeitanalysen hingewiesen werden: zum einen ist die statistische Auflösung der berechneten Gezeitenparameter infolge der Kürze des Analysenzeitraums deutlich eingeschränkt, zum anderen können Informationen über eine potentielle zeitliche Änderung des Registriermaßstabs immer nur a-posteriori, d.h. mit einem mehr oder weniger großen zeitlichen Nachlauf gewonnen werden. Diese Nachteile treten bei Verwendung der elektromagnetischen Eicheinrichtung des Gravimeters A233 nicht auf.

3.4 Die elektromagnetische Eichung des Gravimeters A233

Mit Hilfe eines geeigneten Spulensystems können als Funktion eines fließenden Stroms vertikale elektromagnetische Kräfte auf den gravimetrischen Sensor ausgeübt werden.

Der gemessenen elektrische Widerstand R der Spulen dieser elektromagnetischen Eicheinrichtung beträgt $178,0 \pm 0,1 \Omega$. Die Kenntnis des Widerstands ermöglicht mit Hilfe kalibrierter Vorwiderstände die Messung des Stroms I auf einfache Weise durch Messung der angelegten Spannung U über die Beziehung

$$U [\text{Volt}] = R [\text{Ohm}] \times I [\text{Ampere}]. \quad (\text{G-1})$$

Ersichtlich stellt die elektromagnetische Eichung eine *relative* Eichung dar, mit der primären Anwendung einer Überwachung der zeitlichen Stabilität oder der Erfassung zeitlicher Veränderungen des Registriermaßstabs. Auf die Bedeutung einer solchen Möglichkeit wurde bereits mehrfach im Zusammenhang mit den Auswertungen der gravimetrischen Registrierdaten hingewiesen. Während ohne eine hinreichend hoch auflösende relative Eicheinrichtung zeitliche Änderungen des Registriermaßstabs, wie bereits dargelegt, nur mit begrenzter Genauigkeit und erst a-posteriori mit Hilfe sukzessiver Gezeitenanalysen erkannt und erfasst werden können, bietet die elektro-

magnetische Eicheinrichtung die Option einer jederzeitigen Überprüfung des Registriermaßstabs, dies vorzugsweise nach besonderen geophysikalischen Ereignissen oder durchgeführten messtechnischen Maßnahmen.

Nach einer längeren Erprobungsphase wurde die elektromagnetische Eicheinrichtung ab 12.08.2004 zur gezielten Überwachung des Registriermaßstabs eingesetzt. Die auf 1mA normierten Ergebnisse der elektromagnetischen Eichungen sind in der nachfolgenden Abbildung nachgewiesen.

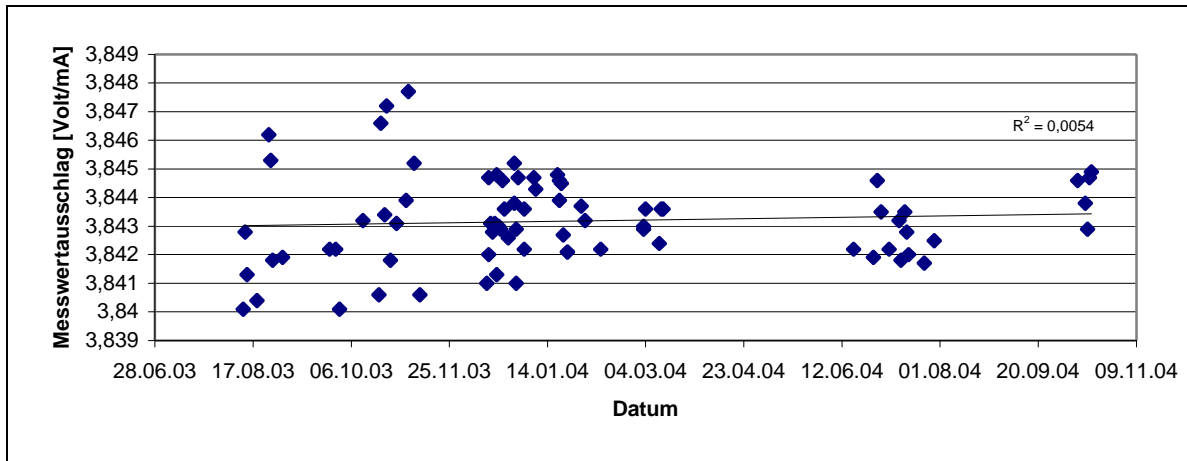


Abbildung G.84: Ergebnisse der elektromagnetischen Eichung bei Gravimeter A233

Erkennbar haben sich nach dem 10.11.2003 die Streuungen der Einzelwerte deutlich verringert. Dies rührt daher, dass ab 14.12.2003 mittlere Signalausschläge durch Sprunghöhenbestimmung für jeweils Hin- und Rückmessung ermittelt wurden, nachdem geringfügige, kurzzeitige Driften erkannt worden waren, die während des eingeschalteten Spulenstroms in der Größenordnung einiger Zehntel-Mikrogal auftreten. Ursache dieses Effekts könnte die thermische Verlustleistung in den Eichspulen sein, die bei den verwendeten Strömen von etwa 0,7mA (und dem vorgenannten Spulenwiderstand von 178 Ω) etwa 0,1 Milliwatt beträgt.

Für den Zeitraum bis zum 10.11.2003 beträgt der aus 22 Einzelbestimmungen gebildete Mittelwert der normierten Eichausschläge

$$k_{\text{elmag}} = 3,84307 \pm 0,00050 \text{ Volt/mA,}$$

entsprechend einer relativen Abweichung des Mittels von lediglich 0,13‰ und einer relativen Abweichung einer Einzelbestimmung von 0,6‰.

Für den nachfolgenden Zeitraum vom 10.11.2003 bis zum 17.10.2004 ergibt sich aus 55 Bestimmungen mit Hin- und Rückmessung der Wert

$$k_{\text{elmag}} = 3,84323 \pm 0,00015 \text{ Volt/mA,}$$

mit einer relativen Standardabweichung des Mittels von 0,04‰, und der relativen Abweichung einer Bestimmung aus Hin- und Rückmessung von 0,28‰ (gegenüber dem vorhergehenden Untersuchungszeitraum somit eine Verbesserung um den Faktor 2).

Fasst man die Ergebnisse beider Zeiträume zusammen erhält man

$$k_{\text{elmag}} = 3,84318 \pm 0,00018 \text{ Volt/mA,}$$

mit der relativen Standardabweichung des Gesamtmittels von 0,06‰.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich bereits mit vergleichsweise wenigen Wiederholungsmessungen die statistische Auflösung des relativen Eichsignals in den Bereich von 10^{-4} bringen lässt. Damit verfügt das Askania-Gravimeter GS25 Nr. 233 im Vergleich zu allen bisher bekannten Federgravimetern über die leistungsfähigste instrumentelle Einrichtung zur Überwachung bzw. zur Bestimmung von Strukturen im zeitlichen Verlauf des Registriermaßstabs. Ein signifikanter Einfluss der Richtung der elektromagnetischen Kraft (Polung der an die Spulen angelegten Spannung) auf das Registriersignal konnte im übrigen nicht festgestellt werden.

Wegen des vorgenannten schwachen Drifteffekts, der während des Einsatzes der elektromagnetischen Eicheinrichtung auftritt, sollte bei der Überwachung des Registriermaßstabs die Einschaltdauer des Spulenstroms einheitlich gewählt werden (hier: einheitlich 7 Minuten). Legt man die elektromagnetische Eichung in dem Zeitraum „volle Stunde plus 25½ Minuten bis 32½ Minuten“, so wird die Bildung der *stündlichen* Registriersignale

durch den Eichvorgang nicht beeinflusst (siehe Abschnitt C5.4). Eine Variation des im Hinblick auf die eingestellte Registrierempfindlichkeit gewählten Spulenstroms von 0,7 mA um 5% führte zu keinen erkennbaren Signaleffekten.

Die hohe Auflösung des elektromagnetischen Eichsignals kann selbstverständlich auch für Linearitätsbestimmungen o.ä. verwendet werden. Derartige Untersuchungen wurden jedoch im Hinblick auf die Aufgabenstellung zunächst zurückgestellt.

Kennt man die Verknüpfung von Registriermaßstab und Skalenwert der Messspindel, so lässt sich das elektromagnetische Eichsignal in die Einheit [$\mu\text{Gal}/\text{mA}$] umrechnen.

Im vorliegenden Falle gilt (mit einer Toleranz von etwa 1%) für den Registriermaßstab $92,660\mu\text{Gal}/\text{Volt}$; k_{elmag} beträgt $3,8432\text{Volt}/\text{mA}$, daraus ergibt sich

$$k'_{\text{elmag}} = 356,11\mu\text{Gal}/\text{mA}.$$

Die Ergebnisse der durchgeführten elektromagnetischen Eichungen lassen im Registrierzeitraum mit einer Toleranz von etwa 0,1bis 0,2% keine signifikanten zeitlichen Änderungen des Registriermaßstabs erkennen; die zeitliche Stabilität des Registriermaßstabs war bereits, allerdings mit wesentlich geringerer messtechnischer Sicherheit, durch die Ergebnisse der laufenden 2-Monatsanalysen in Abschnitt G3.3 festgestellt worden.

4 Gravimeter A206 und A233 – Ergebnisvergleiche

Die Ergebnisse der jeweils für den Gesamtzeitraum der Beobachtungen ausgeführten Gezeitenanalysen (verwendetes numerisches Filter: Pertz57 mit 37 Koeffizienten) mit und ohne Ansatz einer Luftdruckregression wurden in den folgenden Tabellen nachgewiesen:

Gravimeter A206, gefilterte Daten:

Tabelle G.27 und Tabelle G.28 in Abschnitt G2.4.5

ungefilterte Daten:

Tabelle G.34 und Tabelle G.35 in Abschnitt G2.5.5

Gravimeter A233, gefilterte Daten:

Tabelle G.51 und Tabelle G.52 in Abschnitt G3.2.2.4

Zur gegenseitigen Überprüfung der Registriermaßstäbe für die Gravimeter A206 und A233 sind in der nachfolgenden Gegenüberstellung lediglich Analyseergebnisse für die gefilterten Daten aufgeführt, da der Registriermaßstab der ungefilterten Daten des Gravimeters A206 aus dem Registriermaßstab der gefilterten Daten abgeleitet wurde (siehe Abschnitt G2.3.2).

A206oL	0.911391	0.947991	O1	350.1447	1.14913	0.00059	0.0211	0.0292
A233oL	0.911391	0.947991	O1	350.0254	1.14875	0.00039	-0.0072	0.0193
Faktor 1,00033								
A206mL	0.911391	0.947991	O1	350.1448	1.14913	0.00059	0.0213	0.0292
A233mL	0.911391	0.947991	O1	350.0034	1.14867	0.00035	-0.0111	0.0176
Faktor 1,00040								
A206oL	0.981855	0.998631	P1	163.2117	1.15117	0.00138	-0.2330	0.0685
A233oL	0.981855	0.998631	P1	162.8078	1.14834	0.00098	-0.0357	0.0490
Faktor 1,00246								
A206mL	0.981855	0.998631	P1	163.2135	1.15119	0.00138	-0.2341	0.0686
A233mL	0.981855	0.998631	P1	162.8187	1.14841	0.00089	-0.0890	0.0447
Faktor 1,00242								
A206oL	0.998632	1.001369	S1	8.0474	2.40070	0.08273	-2.7137	1.9744
A233oL	0.998632	1.001369	S1	4.0001	1.19340	0.06013	-13.0727	2.8860
A206mL	0.998632	1.001369	S1	8.0620	2.40506	0.08292	-2.5335	1.9797
A233mL	0.998632	1.001369	S1	4.3670	1.30284	0.05492	-3.3526	2.4219
A206oL	1.001370	1.023622	K1	486.9747	1.13637	0.00043	0.1430	0.0217
A233oL	1.001370	1.023622	K1	486.8917	1.13619	0.00030	0.1693	0.0149
Faktor 1,00016								
A206mL	1.001370	1.023622	K1	486.9807	1.13639	0.00043	0.1425	0.0217
A233mL	1.001370	1.023622	K1	487.0334	1.13652	0.00027	0.1519	0.0136
Faktor 0,99989								
A206oL	1.914129	1.950419	M2	359.1779	1.18871	0.00027	2.1405	0.0130
A233oL	1.914129	1.950419	M2	359.0880	1.18841	0.00033	2.1042	0.0159
Faktor 1,00025								
A206mL	1.914129	1.950419	M2	359.1765	1.18871	0.00027	2.1407	0.0130
A233mL	1.914129	1.950419	M2	359.0385	1.18825	0.00032	2.1015	0.0156
Faktor 1,00039								
A206oL	1.984283	2.002736	S2	167.3674	1.19056	0.00057	0.4026	0.0276
A233oL	1.984283	2.002736	S2	168.1117	1.19585	0.00070	0.8246	0.0333
Faktor 0,99558								
A206mL	1.984283	2.002736	S2	167.3470	1.19041	0.00058	0.3914	0.0279
A233mL	1.984283	2.002736	S2	167.6020	1.19222	0.00069	0.5499	0.0335
Faktor 0,99848								
Gravimeter A206 - Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30):								
ohne Luftdruck: $s = 14.592 \text{ nm/s}^2$ mit Luftdruck: $s = 14.592 \text{ nm/s}^2$								
Gravimeter A233 - Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30):								
ohne Luftdruck: $s = 9.555 \text{ nm/s}^2$ mit Luftdruck: $s = 9.022 \text{ nm/s}^2$								

Tabelle G.54: Gravimeter A206 - gefilterte Daten des gesamten Beobachtungszeitraumes (erster und zweiter Untersuchungsabschnitt, 1275 Tage) - Gravimeter A233 - gefilterte Daten des gesamten Beobachtungszeitraumes (zweiter Untersuchungsabschnitt, 560 Tage) - Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 M_2 S_2 sowie die Partialtide S_1

Sinnvollerweise sollte man für die Maßstabsüberprüfung lediglich die Berechnungsergebnisse jener Hauptpartialtiden verwenden, welche die größten Amplituden aufweisen, also der Partialtiden O_1 ($35\mu\text{Gal}$), K_1 ($49\mu\text{Gal}$) und M_2 ($36\mu\text{Gal}$). Wegen ihres Abstands von der Frequenz $15^\circ/\text{h}$ (und den zugeordneten höheren Harmonischen) können die beiden Hauptmontiden O_1 und M_2 als von Störprozessen mit täglicher Periode besonders gering beeinflusst eingestuft werden; insbesondere der zeitliche Verlauf anthropogener Störprozesse weist dominant eine Tagesperiode auf (z. B. die durch Straßenverkehr induzierte zeitvariable Mikroseeismik).

Für die Partialtiden O_1 K_1 M_2 betragen die Abweichungen der Verhältnisse der berechneten Amplitudenquotienten vom Idealwert 1 maximal lediglich 0,4 %. Dies kann (im Hinblick auf die für beide Gravimeter völlig unabhängig durchgeführten Bestimmungen der jeweiligen Registriermaßstäbe) als ein Hinweis darauf interpretiert werden, dass die im Rahmen der Aufgabenstellung angestrebte Maßstabssicherheit von 1% der beobachteten und modellierten gravimetrischen Gezeiten weitgehend erreicht wurde.

Für die Partialtide P_1 (beobachtete Amplitude $16\mu\text{Gal}$) betragen die Unterschiede zugeordneter Amplitudenquotienten etwa 2,4%; dies allerdings entspricht einer Amplitudendifferenz von lediglich $0,04\mu\text{Gal}$. Zudem ist der Unterschied der berechneten Amplitudenquotienten als nicht-signifikant zu bewerten. Dennoch soll darauf hingewiesen werden, dass die mit Gravimeter A206 ermittelten Amplitudenquotienten im Vergleich zu O_1 (und mit Bezug auf die Gezeitentheorien) geringfügig größer sind als der Erwartungswert, anders als bei Gravimeter A233.

Im Gegensatz zu den Auswertungen der gefilterten Registrierdaten des Gravimeters A206 führt der Ansatz einer linearen Luftdruckregression bei den Gezeitenanalysen der mit dem Gravimeter A233 gewonnenen (ebenfalls gefilterten) Daten durchgängig zu signifikanten und physikalisch plausiblen Koeffizienten (siehe Abschnitte G3.2.2.5).

Ohne Ansatz einer Luftdruckregression differieren die für beide Gravimeter berechneten Amplitudenquotienten der Partialtide S_2 (berechnete Amplitude $17\mu\text{Gal}$) um etwa 4,4 %, entsprechend einem Amplitudenunterschied von $0,07\mu\text{Gal}$; vergleicht man die luftdruckreduzierten Werte, so ergibt sich ein Unterschied von nur noch 1,5% oder $0,03\mu\text{Gal}$ in der Amplitude. Dieser Sachverhalt könnte so interpretiert werden, dass der objektiv vorhandene gravimetrische Luftdruckeffekt durch die Gezeitenanalyse der gefilterten Daten des Gravimeters A206 mit dem Programmsystem ETERNA bereits ohne Ansatz einer Luftdruckregression (aus welchen Gründen auch immer) weitgehend eliminiert wird, oder aber dass dieser Luftdruckeffekt durch einen gegenläufigen messtechnisch wirksamen Prozess (welcher Art auch immer) weitgehend kompensiert wird; beide Varianten werfen Verständnisprobleme auf (siehe auch Abschnitt E8.5).

Die in einer Messstation *beobachtete* Amplitude der Partialtide S_1 (Frequenz der Bandmitte $1,0000005\text{cpd}$) ist wegen ihrer geringen *theoretischen* Amplitude, die in der geographischen Breite des GeoObservatoriums Odendorf lediglich $0,34\mu\text{Gal}$ beträgt, ein sensibler Indikator für das Auftreten gravimetrisch relevanter Störprozesse mit einer wirksamen Periode von einem Tag. Beobachtet wurde mit dem Gravimeter A233 eine mittlere S_1 -Amplitude von $0,42\mu\text{Gal}$ gegenüber einem Erwartungswert von $0,38$, den man bei einem ungestörten Amplitudenquotienten von $1,15$ erhalten würde; die Differenz beträgt somit lediglich $0,04\mu\text{Gal}$. Zur Veranschaulichung: Bei den gravimetrischen Beobachtungen mit dem Gravimeter A233 in der benachbarten Station Radioteleskop Effelsberg [BONATZ, SCHÜLLER UND WILMES 1980b] betrug der Amplitudenquotient für die Partialtide S_1 etwa $7,9$, entsprechend einer beobachteten Amplitude von $2,7\mu\text{Gal}$ oder einem mittleren täglichen Störsignal von $2,3\mu\text{Gal}$. Für Gravimeter A206 beträgt die beobachtete Amplitude $0,8\mu\text{Gal}$, d.h. die Amplitude des mittleren täglichen Störsignals liegt somit bei etwa $0,4\mu\text{Gal}$ und ist deutlich größer als bei Gravimeter A233.

Die Standardabweichungen der Gewichtseinheit (ETERNA 3.30) nach der Gezeitenanalyse der gefilterten Daten beider Gravimeter unterscheiden sich (bezogen auf den niedrigeren Wert) um etwa 50% zugunsten des Gravimeters A233. Berücksichtigt man nur das mit Gravimeter A206 im zweiten Untersuchungsabschnitt, also im Zeitraum der Parallelbeobachtungen gewonnene Ergebnis (Abschnitt G2.2.2.4), so ändert sich das Verhältnis der Standardabweichungen der Gewichtseinheit nur unwesentlich.

Der zeitliche Verlauf der Residuen nach der Analyse der Beobachtungsdaten des Gravimeters A233 weist im Vergleich mit den Residuen für das Gravimeter A206 nicht nur einen reduzierten Grundrauschpegel auf, sondern ist im allgemeinen auch weniger strukturiert, d.h. die Erhaltungstendenzen im Residuenverlauf sind geringer.

Wie bereits mehrfach dargelegt (u. a. in Abschnitt E3), lassen sich mit Hilfe der Residuen neben den statistisch begründeten Zufallsstreuungen systematische Abweichungen der Beobachtungswerte vom deterministischen Modellansatz der Ausgleichung in Form auftretender Strukturen und statistisch nicht zu begründender zeitlicher Erhaltungstendenzen erkennen. Diese Abweichungen von den Modellwerten haben ihre Ursache unter anderem in Unvollständigkeits des deterministischen Modells, welches das Auftreten bestimmter Vorgänge nicht berücksichtigt. Diese Vorgänge können rein instrumenteller Natur sein oder ihren Ursprung in den Eigenschaften der physikalischen Beobachtungsgröße selber haben. Ob ein Prozess als *Störprozess* einzustufen ist, hängt allerdings unter anderem von der Aufgabenstellung ab.

Erste Hinweise auf den Ursprung von Residuenanomalien lassen sich potentiell dadurch gewinnen, dass man zeitparallele Residuensätze miteinander vergleicht, die unterschiedlichen Messgeräten zugeordnet sind. Identische oder ähnliche Residuenstrukturen weisen auf eine gemeinsame Ursache hin. Besteht keine Korrelation zwischen den Datenreihen, kann man von mehr oder weniger individuellen Eigenschaften der Instrumente ausgehen.

Parallele Beobachtungen wurden mit den Gravimetern A206 und A233 im Zeitraum vom 20.03.2003 bis 10.10.2004 ausgeführt. Die Gegenüberstellung der beiden Residuenzeitreihen, die den in den Abschnitten G2.2.2.4 und G3.2.2.4 nachgewiesenen Analyseergebnissen zugeordnet sind, ergab einen Korrelationskoeffizienten von lediglich 0,38, d.h. eine signifikante Korrelation besteht in dem genannten Gesamtzeitraum zwischen den Residuen nicht. Wie die nachfolgenden graphischen Beispiele zeigen, lassen sich in einigen kurzen Teilabschnitten allerdings schwach ausgeprägte Strukturähnlichkeiten erkennen; der Pegel des „Grundrauschens“ ist bei Gravimeter A233 etwas höher als bei Gravimeter A206, bei verringerter Signalweite der auftretenden Strukturen.

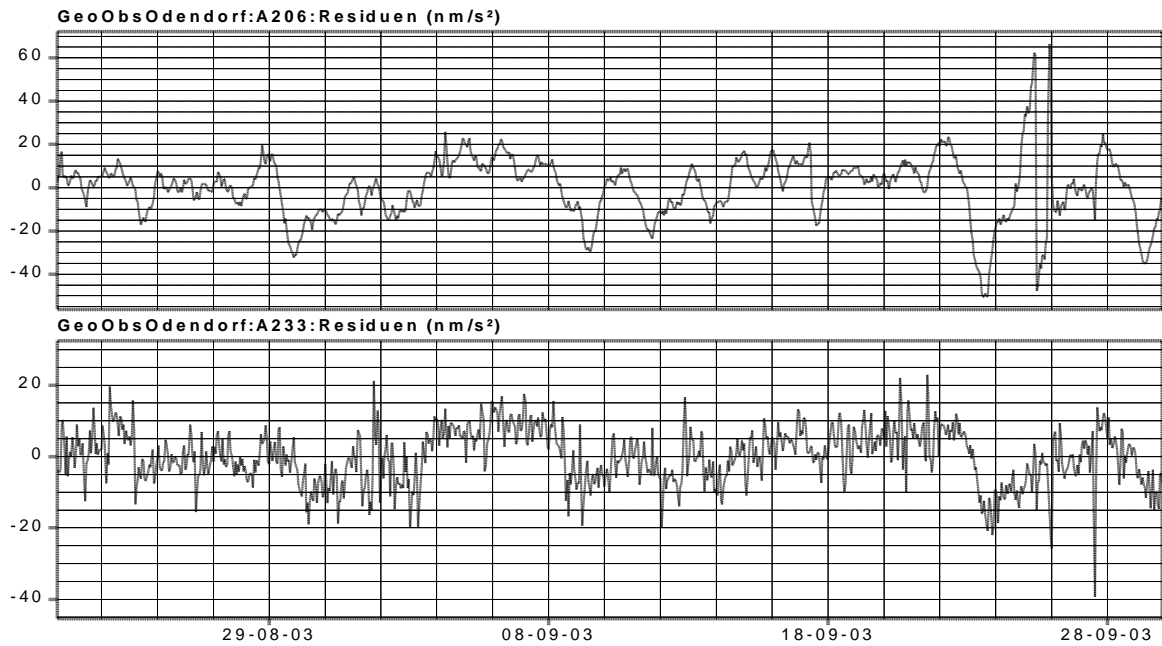


Abbildung G.85: Gravimeter A206 und A233, gefilterte Daten – Gegenüberstellung des Verlaufs der Residuen – Beispiel 1

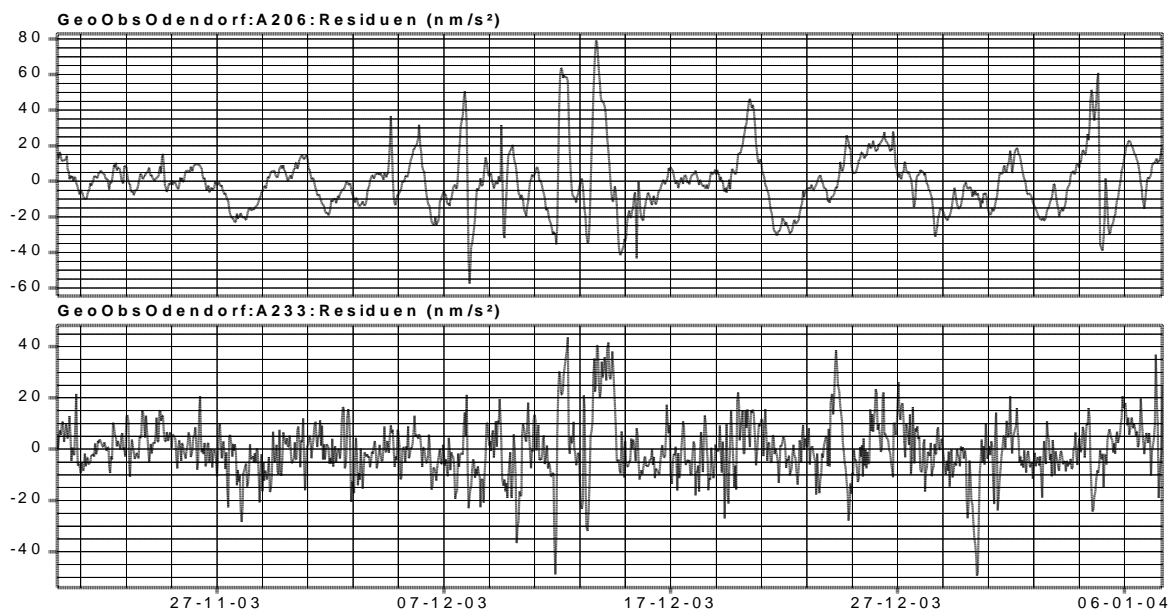


Abbildung G.86: Gravimeter A206 und A233, gefilterte Daten – Gegenüberstellung des Verlaufs der Residuen – Beispiel 2

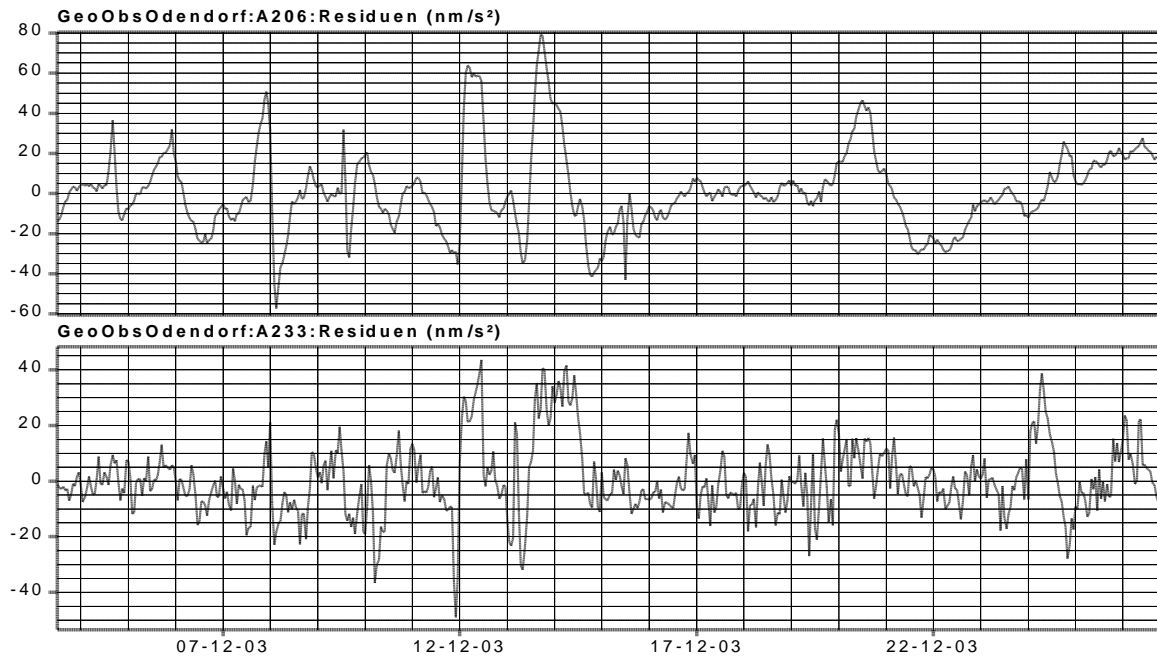


Abbildung G.87: Gravimeter A206 und A233, gefilterte Daten – Gegenüberstellung des Verlaufs der Residuen – Ausschnittvergrößerung von Beispiel 2

5 Die Bestimmung und Berücksichtigung der instrumentellen Signalverzögerung

5.1 Vorbemerkung

Ein Schwerpunkt der bisher durchgeführten Untersuchungen lag auf der Bestimmung des Maßstabs der beobachteten gravimetrischen Zeitreihen mit einer angestrebten relativen *Genauigkeit* im Bereich von 1‰, d.h. es galt die Zielvorgabe, dass der systematische Fehler des jeweiligen Registriermaßstabs den Betrag von relativ 1‰ nicht (jedenfalls nicht wesentlich) überschreiten sollte.

Wie bereits dargelegt, tritt bei der Beobachtung gravimetrischer Zeitreihen neben möglicher relevanter Fehler des Registriermaßstabs noch ein zweiter systematischer Fehler auf, nämlich die frequenzabhängige zeitliche Verzögerung des beobachteten gravimetrischen Ausgangssignals gegenüber dem physikalischen Eingangssignal, also der instrumentell (einschließlich Registrieranlage) bedingte Phasennachlauf periodischer gravimetrischer Signale. Diese instrumentelle zeitliche Signalverzögerung des Ausgangssignals bildet neben der Amplitudenverzerrung den zweiten Parameter der instrumentellen Übertragungsfunktion (siehe Abschnitt E11). Der instrumentelle Phasennachlauf ist unabhängig vom Amplitudenmaßstab.

Die äquivalenten Begriffe *Phasennachlauf* oder *instrumentelle Signalverzögerung* sind zu unterscheiden von dem in Abschnitt B5 definierten Begriff *Phasenverschiebung*, welcher ausschließlich die zeitliche Verschiebung der durch Gezeitenanalyse der Beobachtungsdaten ermittelten „beobachteten“ Phasen der Partialtiden gegenüber den aus dem Gezeitenpotential abgeleiteten theoretischen Phasen bezeichnet. Entsprechend ist der Begriff *Phasenkorrektur* ausschließlich zuzuordnen dem instrumentell determinierten Begriff *Phasennachlauf*.

5.2 Die Erzeugung gravimetrischer Sprungsignale

Wie in Abschnitt E11 dargelegt wurde, kann man die frequenzabhängige instrumentelle Signalverzögerung aus dem Reaktionsverlauf des gravimetrischen Ausgangssignals auf ein eingegebenes Rechtecksignal (streng sprunghafte Signaleingabe) ermitteln. Dabei spielt, wie gezeigt wurde, das Verhältnis zwischen Größe des Signalausgangs und dem Rauschpegel eine wesentliche Rolle. Es ist ferner wichtig, dass während des Sprungexperiments keinerlei relevante Signalvariationen auftreten, die nicht aus dem Sprungexperiment stammen (Drift, Gezeiten). Von besonderer Bedeutung ist außerdem, dass der Verlauf des gravimetrischen Eingangssignals die theoretischen Anforderungen einer Flankensteilheit von 90° hinreichend genau erfüllt.

Durch das üblicherweise gewählte Verfahren einer „schnellen“ Verstellung der Messspindel eines Federgravimeters kann ein strenges Rechtecksignal jedoch nicht erreicht werden, da dieser mechanische Vorgang eine gewisse Zeit benötigt. Es ist daher sinnvoll, elektrostatische oder elektromagnetische Kräfte weitestgehend sprunghaft (z.B. durch Umlegung eines externen Schalters) auf den gravimetrischen Sensor einwirken zu lassen. Üblicherweise sind allerdings Federgravimeter mit einer solchen Einrichtung nicht ausgerüstet. Eine Ausnahme bei den Askania-Gravimetern bildet das Gravimeter A233, dessen Ausstattung mit einer elektromagnetischen (relativen) Eicheinrichtung im Zusammenhang mit der Überprüfung der zeitlichen Stabilität des Registriermaßstabs bereits genutzt wurde (siehe Abschnitt G3.4). Es sei darauf hingewiesen, dass elektrostatische Kräfte insbesondere wegen ihrer reziprok-quadratischen Abhängigkeit vom Abstand der kapazitiven Komponenten (meist Platten), welcher zur Vermeidung des Einsatzes hoher Spannungen meist sehr klein gewählt werden muss, für eine Überwachung des Registriermaßstabs im allgemeinen nur bedingt geeignet ist; hier bietet die elektromagnetische Lösung deutliche Vorteile.

5.3 Das Gravimeter A233

5.3.1 Die instrumentelle Signalverzögerung

Mit der elektromagnetischen Einrichtung wurden durch Hin- und Rückmessung zwanzig Sprungexperimente ausgeführt, wobei die Stromstärke so bemessen wurde, dass die Ausschlagweite im Bereich der maximalen Gezeitenvariation von etwa $300\mu\text{Gal}$ lag. Die Sprungexperimente wurden in Zeiträumen minimaler gravimetrischer Signalvariationen ausgeführt. Da ferner durch Verwendung eines Bessel-Tiefpassfilters 2. Ordnung mit einer Eckfrequenz von $0,015\text{Hz}$ (Abschnitt B3) die höherfrequenten Anteile im registrierten Ausgangssignal weitgehend unterdrückt wurden, konnten hinsichtlich des verbleibenden Rauschpegels die in Abschnitt E11 abgeleiteten Bedingungen für die Ermittlung zuverlässiger Werte der instrumentellen Signalverzögerungen als hinreichend erfüllt angesehen werden. Die Reihe der Wiederholungsmessungen wurde nach 12 Messungen beendet, als die Standardabweichung des Mittels der berechneten Signalverzögerungen eine Zehntelsekunde erreicht hatte.

Als zeitliche Signalverzögerung ΔT im Gezeitenbereich wurde der Betrag $16,7\pm 0,1$ Sekunden ermittelt; Grundlage sind Messreihen mit einem Diskretisierungsintervall von 1 Sekunde.

In den beiden Hauptzeitenbändern betragen die Kreisfrequenzen

$$15^\circ/\text{h} = 0,00417^\circ/\text{s} \text{ und}$$

$$30^\circ/\text{h} = 0,00833^\circ/\text{s}.$$

Daraus ergibt sich bei einer Signalverzögerung von 16,7 Sekunden eine instrumentelle Phasenkorrektur von

$$\Delta\alpha = +0^\circ,070 \text{ im ganztägigen und}$$

$$\Delta\alpha = +0^\circ,139 \text{ im halbtägigen Gezeitenband.}$$

5.3.2 Gravimeter A233 - korrigierte Phasenverschiebungen der Hauptpartialtiden

In Übereinstimmung mit der Vorgehensweise zur Überprüfung des Registriermaßstabs im vorhergehenden Abschnitt G4 werden auch die Phasenverschiebungen zunächst nur für jene Hauptpartialtiden angegeben, welche die größten Amplituden aufweisen; nämlich die Partialtiden O_1 ($35\mu\text{Gal}$), K_1 ($49\mu\text{Gal}$) und M_2 ($36\mu\text{Gal}$). Die vollständigen, hinsichtlich der instrumentellen Signalverzögerungen unkorrigierten Analyseergebnisse sind nachgewiesen in Tabelle G.51 und Tabelle G.52 in Abschnitt G3.2.2.5.

Zum Vorzeichen der Phasenkorrektur: die instrumentelle Signalverzögerung führt dazu, dass der „beobachtete“ rechtsdrehende Phasenwinkel einer Partialtide kleiner ist als er wäre, wenn die Verzögerung nicht aufträte (Vorlauf der „wahren“ Phase gegenüber der beobachteten Phase). Infolgedessen führt die Korrektur einer beobachteten Phase zu einer Vergrößerung des Phasenwerts.

Die Tabelle zeigt, dass sich die mit und ohne Luftdruckregression berechneten Phasenverschiebungen nicht signifikant unterscheiden.

Partialtide	berechnete Phasenverschiebung mit Luftdruck- regression	korrigierte Phasenverschiebung	berechnete Phasen- verschiebung ohne Luftdruck- regression	korrigierte Phasenverschiebung
O ₁	-0°,011 ±0°,018	+0°,059	-0°,007 ±0°,019	+0°,063
K ₁	+0°,152 ±0°,014	+0°,222	+0°,169 ±0°,015	+0°,239
M ₂	+2°,102 ±0°,016	+2°,241	+2°,104 ±0°,016	+2°,243

Tabelle G.55: Gravimeter A233 – berechnete und korrigierte Phasenverschiebungen für die Hauptpartialtiden O₁K₁M₂

5.4 Das Gravimeter A206

5.4.1 Die instrumentelle Signalverzögerung durch Filterung

Die *nominelle* Zeitkonstante des für die Filterung des gravimetrischen Ausgangssignals verwendeten RC-Glieds (passives Filter) beträgt 14,4sec (siehe Abschnitt E1, Gleichung E-2). Eine Nachmessung der Filterelemente ergab für die beiden verwendeten Kondensatoren innerhalb der Messgenauigkeit von etwa 3% eine Übereinstimmung mit den Nominalwerten (jeweils 40µF); die Widerstandswerte wurden mit einer relativen Messgenauigkeit von etwa 1‰ zu 179,9, 181,5 und 99,9kΩ bestimmt (Abschnitt G2.3.2). Somit kann die Zeitkonstante rechnerisch zu $\Delta T = 14,4 \pm 0,4$ sec angesetzt werden. Daraus ergeben sich für die beiden Hauptgezeitenbändern die folgenden Korrekturen der berechneten Phasenverschiebungen:

$$15^\circ/\text{h} = 0,00417^\circ/\text{s} > \Delta\alpha = +0^\circ,060,$$

$$30^\circ/\text{h} = 0,00833^\circ/\text{s} > \Delta\alpha = +0^\circ,120.$$

Eine Überprüfung der aus den Filterdaten abgeleiteten Zeitkonstanten durch die Ergebnisse einer größeren Anzahl von Sprungexperimenten führte zu nicht-signifikanten Abweichungen: Der gewonnene Mittelwert beträgt $12,0 \pm 1,5$ Sekunden. Die relativ große Standardabweichungen reflektiert im übrigen die in Abschnitt E11 dargelegten Probleme bei der Anwendung des ETSTEP-Algorithmus auf Signale mit nicht ausreichend kleinem relativem Rauschpegel.

Die Sprungexperimente erfassen alle Komponenten, die eine Signalverzögerung bewirken, also neben dem Filter und den Laufzeiteffekten in der Registrieranlage auch die mechanischen Reaktionen des gravimetrischen Sensors. Bei dem eingesetzten Askania-Gravimeter GS15 besteht der Sensor aus einer nicht-astasierten Torsionshebelwaage mit einer Eigenperiode von einigen Zehntelsekunden (siehe Abbildung D.23 in Abschnitt D6.2.1). Entsprechend ist die Einlaufzeit nach Änderung der Gleichgewichtslage durch zusätzliche Drehmomente (z.B. nach einer Spindelverstellung) in eine neue Gleichgewichtslage sehr kurz. Zeitlich hochaufgelöste Messungen zeigten, dass der Einlauffeffekt (anders als bei den gefilterten Signalen) bereits nach wenigen Sekunden abgeschlossen ist. Daraus wiederum lässt sich abschätzen, dass die sensorgesteuerte instrumentelle Zeitverzögerung der gravimetrischen Ausgangssignale im Gezeitenbereich signifikant kleiner ist als etwa 1 Sekunde, entsprechend einem Phaseneinfluss von $< 0^\circ,01$. Dieser Effekt kann daher (mit Bezug auf die Aufgabenstellung) bis auf weiteres ebenso vernachlässigt werden wie geringe Laufzeiteffekte im Registrierrechner, die außerdem bei der Registrierung der Gezeitensignale und der Sprungsignale identisch sind. Zur Korrektur der berechneten Phasenverschiebungen wird daher ausschließlich die Zeitkonstante des genannten passiven Filters verwendet.

5.4.2 Gravimeter A206, gefilterte Daten – korrigierte Phasenverschiebungen der Hauptpartialtiden

Die korrigierte Phasenverschiebungen der drei Hauptpartialtiden sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt. Die vollständigen, hinsichtlich der instrumentellen Signalverzögerungen unkorrigierten Analyseergebnisse sind nachgewiesen in Tabelle G.27 und Tabelle G.28 in Abschnitt G2.4.5.

Partialtide	berechnete Phasenverschiebung mit Luftdruckregression	korrigierte Phasenverschiebung	berechnete Phasenverschiebung ohne Luftdruckregression	korrigierte Phasenverschiebung
O ₁	+0°,021 ±0°,029	+0°,081	+0°,021 ±0°,029	+0°,081
K ₁	+0°,142 ±0°,022	+0°,202	+0°,143 ±0°,022	+0°,203
M ₂	+2°,141 ±0°,016	+2°,261	+2°,140 ±0°,013	+2°,260

Tabelle G.56: Gravimeter A206, gefilterte Daten – berechnete und korrigierte Phasenverschiebungen für die Hauptpartialtiden O₁K₁M₂

Die Tabelle zeigt wiederum, dass die mit und ohne Luftdruckregression berechneten Phasen sich nicht signifikant unterscheiden.

Bei der Ergebnisbewertung gilt es zu beachten, dass eine Phasendifferenz von 0°,01 im ganztägigen Gezeitenband einem Zeitversatz der beobachteten gravimetrischen Gezeitensignale von nur etwa 2 Sekunden, im halbtägigen Gezeitenband von lediglich etwa 1 Sekunde entspricht; dieser Betrag liegt im Bereich der zeitlichen Auflösung, mit der die Registrieranlage die gravimetrischen Signale erfasst.

Will man die Phasenauflösung verbessern, so erfordert dies zunächst einmal eine entsprechend verbesserte Registriereinrichtung. Fraglich ist allerdings, ob bei den verwendeten *Federgravimetern* und in Anbetracht der bodenmechanischen Gegebenheiten im Gebiet der Station Odendorf hier eine solche Maßnahme Sinn macht oder ob man nicht vielmehr im Hinblick insbesondere auf die bei Federgravimetern (anders als bei supraleitenden Gravimetern) häufig auftretenden kurzzeitigen (Stunden, Tage) nichtlinearen Drifteffekte mit einer Auflösung der Phasen der Hauptpartialtiden im Bereich von 0°,01 bereits an die metrologischen Grenzen gelangt ist; gemeint ist hier nicht die statistische, systeminterne Auflösung der Phasenverschiebungen, die sich durch längere Registrierzeiträume leicht verbessern lässt, sondern der systematische Fehleranteil.

5.4.3 Gravimeter A206 – Phasenbestimmung aus den ungefilterten Daten

Durch Analyse der ungefilterten Daten kann man im Prinzip Phasenbestimmungen durchführen, die mit Bezug auf den zuvor dargelegten Sachverhalt weitgehend frei sein sollten von instrumentellen Signalverzögerungen. Der im Vergleich zu den gefilterten Daten wesentlich erhöhte Rauschpegel führt jedoch zu einer mehr oder weniger starken Verringerung der statistischen Auflösung der berechneten Phasenwerte.

Die durch Gezeitenanalyse der ungefilterten Daten ermittelten Phasenverschiebungen der drei Hauptpartialtiden sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt. Die vollständigen Analyseergebnisse sind nachgewiesen in Tabelle G.34 und Tabelle G.35 in Abschnitt G2.5.5.

Partialtide	berechnete Phasenverschiebung mit Luftdruckregression	berechnete Phasenverschiebung ohne Luftdruckregression	<i>gefilterte Daten - korrigierte Phasenverschiebungen mit/ohne Luftdruckreg.</i>
O ₁	+0°,036 ±0°,036	+0°,038 ±0°,036	+0°,081/+0°,081 ±0°,029/±0°,029
K ₁	+0°,126 ±0°,026	+0°,136 ±0°,026	+0°,202/+0°,203 ±0°,022/±0°,022
M ₂	+2°,191 ±0°,020	+2°,196 ±0°,020	+2°,261/+2°,260 ±0°,016/±0°,013

Tabelle G.57: Gravimeter A206, ungefilterte Daten – berechnete Phasenverschiebungen für die Hauptpartialtiden O₁K₁M₂

Wiederum sind signifikante Unterschiede zwischen den mit und ohne Luftdruckregression berechneten Phasenverschiebungen nicht zu erkennen. Im Vergleich zu den aus den gefilterten Daten abgeleiteten *korrigierten* Phasenverschiebungen müssten die aus den ungefilterten Daten abgeleiteten Phasenverschiebungen (Arbeitshypothese $\Delta\alpha=0$) mit diesen korrigierten Werten innerhalb der statistischen Toleranzen übereinstimmen. In der Tat sind allenfalls statistisch schwach signifikante Differenzen festzustellen (t-Test). Dieser Vergleich zeigt aber, dass die erreichte statistische Auflösung der Phasenverschiebungen nicht ausreicht, um mit einer angestrebten Sicherheit von $\pm 0,01$ aus den Differenzen auf systematische Unterschiede schließen zu können. Es ist auffällig, dass die aus den ungefilterten Daten berechneten Phasenverschiebungen einheitlich kleiner sind als die zugeordneten Werte für die gefilterten Daten.

5.5 Das Gravimeter LCR-G-xx1F

5.5.1 Die instrumentelle Signalverzögerung

Mangels des Vorliegens anderer Informationen konnte die instrumentelle Phasenverzögerung ausschließlich durch wiederholte Sprungexperimente ermittelt werden. Da aus dargelegten Gründen das ungefilterte Feedback-Signal registriert wurde, traten jedoch bei der Anwendung des ETSTEP-Algorithmus, wie zuvor, die durch das relativ ungünstige Signal-Rauschverhältnis verursachten Probleme hinsichtlich der erreichbaren Signifikanz der ermittelten Signalverzögerungen auf.

Die zeitliche Signalverzögerung im Bereich der beiden Hauptzeitenbänder wurde bestimmt zu

$$\Delta T = 4,4 \pm 1,8 \text{ Sekunden.}$$

Daraus ergibt sich im ganz- und im halbtägigen Gezeitenband für die instrumentelle Phasenkorrektur Δt

$$15^\circ/\text{h} = 0,00417^\circ/\text{s} > \Delta\alpha = +0^\circ,018 (\pm 0^\circ,008)$$

$$30^\circ/\text{h} = 0,00833^\circ/\text{s} > \Delta\alpha = +0^\circ,037 (\pm 0^\circ,015)$$

5.5.2 Gravimeter LCR-G-xx1F – korrigierte Phasenverschiebungen der Hauptpartialtiden

Die korrigierte Phasenverschiebungen der drei Hauptpartialtiden sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt. Die vollständigen, hinsichtlich der instrumentellen Signalverzögerungen unkorrigierten Analyseergebnisse sind nachgewiesen in Tabelle E.16 und Tabelle E.17 in Abschnitt E8.4.7.5.

Partialtide	berechnete Phasenverschiebung mit Luftdruckregression	korrigierte Phasenverschiebung	berechnete Phasenverschiebung ohne Luftdruckregression	korrigierte Phasenverschiebung
O ₁	+0°,093 ±0°,039	+0°,111	+0°,070 ±0°,040	+0°,088
K ₁	+0°,225 ±0°,029	+0°,243	+0°,246 ±0°,030	+0°,264
M ₂	+2°,230 ±0°,026	+2°,267	+2°,212 ±0°,024	+2°,249

Tabelle G.58: Gravimeter LCR-G-xx1F, ungefilterte Daten – berechnete und korrigierte Phasenverschiebungen für die Hauptpartialtiden O₁K₁M₂

Die relativ große statistische Unsicherheit in der Bestimmung von ΔT führt bei den Phasenkorrekturen zu statistischen Streuungsbeträgen von lediglich $0^\circ,01$ bis $0^\circ,02$.

5.6 Gegenüberstellung der korrigierten Phasenverschiebungen für die Hauptpartialtiden

Partialtide	A233	A206 gefiltert	A206 ungefiltert	LCR-G-xx1F
O ₁ mL	+0°,059 (±0°,018)	+0°,081 (±0°,029)	+0°,036 (±0°,036)	+0°,111 (±0°,039)
oL	+0°,063 (±0°,019)	+0°,081 (±0°,029)	+0°,038 (±0°,036)	+0°,088 (±0°,040)
K ₁ mL	+0°,222 (±0°,014)	+0°,202 (±0°,022)	+0°,126 (±0°,026)	+0°,243 (±0°,029)
oL	+0°,239 (±0°,015)	+0°,203 (±0°,022)	+0°,136 (±0°,026)	+0°,264 (±0°,030)
M ₂ mL	+2°,241 (±0°,016)	+2°,261 (±0°,016)	+2°,191 (±0°,020)	+2°,267 (±0°,026)
oL	+2°,243 (±0°,016)	+2°,260 (±0°,013)	+2°,196 (±0°,020)	+2°,249 (±0°,024)

Tabelle G.59: Phasenverschiebungen der Hauptpartialtiden O₁K₁M₂ nach der instrumentellen Phasenkorrektur; in Klammern Standardabweichungen der berechneten Phasenverschiebungen nach der Gezeitenanalyse; ungefilterte Daten des Gravimeters A206: Arbeitshypothese Da=0.

Numerisch fällt auf, dass für das Gravimeter A233 die korrigierten Phasenverschiebungen durchgängig zwischen den beiden mit dem Gravimeter A206 gewonnenen Werten liegen. Bei der Bewertung der Ergebnisse des Gravimeters LCR-G-xx1F ist der mit 291 Tagen relativ kurze Registrierzeitraum zu berücksichtigen.

5.7 Ergebniszusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Schwankungsbreite der korrigierten Phasenverschiebungen beträgt einige Hundertstelgrad. Unter Berücksichtigung der statistischen Unsicherheiten der ermittelten Einzelwerte treten *signifikante* Differenzen zwischen den mit den drei Gravimetern gewonnenen Phasenergebnissen nicht auf.

Somit kann die Phasenkorrektur der Analysenergebnisse basieren auf den folgenden Signalverzögerungen ΔT :

Gravimeter A233:	$\Delta T = 16,7$ Sekunden,
Gravimeter A206 _{gefilterte Daten} :	$\Delta T = 14,4$ Sekunden,
Gravimeter A206 _{ungefilterte Daten} :	$\Delta T = 0,0$ Sekunden (Hypothese)
Gravimeter LCR-G-xx1F:	$\Delta T = 4,4$ Sekunden.

Die Tabelle G.59 lässt, vorbehaltlich der Ergebnisse weiterer Untersuchungen, den Schluss zu, dass die beste Phasensicherheit dem Gravimeter A233 zuzuordnen ist, möglicherweise in Verbindung mit einer günstigen Ankopplung an den Untergrund. Der ausgewertete Registrierzeitraum beträgt nur 560 Tage, gegenüber 1275 Tagen (gefilterte Daten) bzw. 1165 Tagen (ungefilterte Daten) bei Gravimeter A206.

Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass ein Sprungexperiment, welches anstelle der (praktisch verzögerungsfreien) Zuführung einer elektrostatischen oder elektromagnetischen Kraft auf den mechanischen Sensor durch eine schnelle Spindelverstellung erzeugt wird, prinzipiell zu einer Vergrößerung der berechneten Signalverzögerung ΔT führt, da die Dauer des Vorgangs der Spindelverstellung unvermeidbar einige Zehntelsekunden beträgt und die Flankensteilheit des Eingangssignals daher mehr oder weniger von 90° abweicht.

6 Gezeitenparameter für die Station GeoObservatorium Odendorf

6.1 Vorbemerkung

Die im Rahmen der Gezeitenanalyse durchgeführte numerische Filterung der aus den beobachteten sekundlichen Signalwerten (über die minütlichen Mittelwerte) gebildeten stündlichen Signalmittelwerte dient der Reduzierung oder Elimination modellfremder, mehr oder weniger kurzzeitiger Signalanteile. Diese können instrumenteller Natur sein und werden dann als instrumentelle Drift bezeichnet, oder sie sind physikalisch reale Variationen der Beobachtungsgröße, die den zu modellierenden Prozess überlagern und als „Störprozesse“ eingestuft werden. Durch Änderung der Aufgabenstellung können physikalische Störprozesse zu Zielprozessen werden.

Für Gezeitenanalysen wurden in den zurückliegenden Jahrzehnten eine größere Anzahl numerischer Filter entwickelt mit einer Länge von 37 Stunden bis zu 10 Tagen [WENZEL 1997]. Dem Vorteil einer starken Filterung hinsichtlich einer verbesserten Modellanpassung an die gefilterten stündlichen Beobachtungsdaten steht jedoch der Nachteil gegenüber, dass Informationen über den ursprünglichen Signalverlauf verloren gehen; denn durch zunehmende numerische Filterung wird der Residuenverlauf zunehmend geglättet.

Da das Erkennen des Vorhandenseins solcher instrumenteller oder physikalischer Prozesse, welche für die *Gezeitenanalyse* als mehr oder weniger kurzzeitige Störprozesse einzustufen sind, in der Aufgabenstellung als eines der Ziele der durchzuführenden Untersuchungen definiert worden war, wurden die stündlichen Beobachtungswerte in allen bisherigen Auswertungen einheitlich mit Hilfe des Pertzev57-Algorithmus gefiltert [PERTZEV 1957]; das numerische Pertzev57-Filter hat eine Länge von lediglich 37 Stunden (16 Stunden beiderseits des Zentralpunkts) und enthält 37 Koeffizienten. Zur Berechnung der für das GeoObservatorium Odendorf aktuell gültigen Parameter der gravimetrischen Gezeiten wurde nun die Modellanpassung durch Anwendung des Pertzev59-Filters mit 51 Koeffizienten und einer Länge von 51 Stunden etwas verbessert. Ergänzend wurden die gewonnenen Ergebnisse mit den zugeordneten Werten verglichen, die unter Verwendung des Pertzev57-Filters erzielt worden waren. Für den Vergleich der Phasenwerte mussten die in den Abschnitten G2.4.5 (Gravimeter A206, gefilterte Daten), G3.2.2.4 (Gravimeter A233) und E8.4.7.5 (Gravimeter LCR-G-xx1F) nachgewiesenen Ergebnisse um die Beträge der instrumentellen Signalverzögerung (Abschnitt G5.7) korrigiert werden; für die ungefilterten Daten des Gravimeters A206 (Ergebnisse in Abschnitt G2.5.5) gilt weiterhin die Hypothese $\Delta T = 0$.

6.2 Gravimeter A233

6.2.1 Ergebnisse ohne Ansatz einer Luftdruckregression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: 00000026
ASKANIA GRAVIMETER GS25 Nr.233
Eichfaktor 92,660 µGal/Volt
INSTRUMENTELLE SIGNALVERZÖGERUNG 16,7 SEC.

Latitude: 50.6480 deg, longitude: 6.8730 deg, azimuth: 0.000 deg.

20030324100000...20031117 40000 20031118170000...20040301 80000
20040303170000...20040317 40000 20040317 90000...20040325110000
20040325200000...20040709 50000 20040712 10000...20040821150000
20040823210000...20040905 80000 20040906 0...20041010150000
Number of recorded days in total : 556.29
Numerical filter is PERTZEV59 with 51 coefficients.

Estimation of noise by FOURIER-spectrum of residuals
0.1 cpd band 99999.9990 nm/s**2      1.0 cpd band 0.2317 nm/s**2
2.0 cpd band 0.1685 nm/s**2        3.0 cpd band 0.1425 nm/s**2
4.0 cpd band 0.1349 nm/s**2        white noise 0.1478 nm/s**2

adjusted tidal parameters :

from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]           [deg]  [deg]

0.501370 0.911390 Q1    66.5720  1.14112  0.00183  -0.4379  0.0918
0.911391 0.947991 O1    350.0614  1.14886  0.00034  0.0627  0.0172
0.947992 0.981854 M1    27.4084  1.14375  0.00400  0.4940  0.2005
0.981855 0.998631 P1    162.9506  1.14934  0.00087  0.1029  0.0434
0.998632 1.001369 S1     4.3643  1.30206  0.05331 -10.9328  2.3472
1.001370 1.023622 K1    486.9080  1.13623  0.00026  0.2383  0.0132
1.023623 1.035379 TET1   5.6420  1.23126  0.02316  -0.9751  1.0771
1.035380 1.057485 J1    27.7862  1.15955  0.00491  -0.1492  0.2424
1.057486 1.071833 SO1   4.3818  1.10236  0.02731  -2.0310  1.4203
1.071834 1.470243 OO1   15.1943  1.15891  0.00612  -0.7329  0.3025
1.470244 1.880264 2N2   10.7188  1.16023  0.00798  3.8787  0.3940
1.880265 1.914128 N2    68.0206  1.17579  0.00163  3.1371  0.0796
1.914129 1.950419 M2    359.1051  1.18847  0.00029  2.2279  0.0141
1.950420 1.984282 L2     9.9824  1.16883  0.00569  1.2803  0.2790
1.984283 2.002736 S2    168.1188  1.19590  0.00062  1.0091  0.0296
2.002737 2.451943 K2    45.6996  1.19592  0.00186  1.0656  0.0893
2.451944 3.381378 M3     3.9692  1.05359  0.01876  1.0772  1.0203
3.381379 4.347615 M4     0.1207  2.77273  1.49056  2.8965  30.7983

Standard deviation of weight unit: 6.072 nm/s**2

```

Tabelle G.60: Gravimeter A233 – gesamter Beobachtungszeitraum - Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression mit Phasenkorrektur, numerisches Filter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten

6.2.2 Ergebnisse mit Ansatz einer Luftdruckregression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File:  A233End
ASKANIA GRAVIMETER GS25 Nr.233
Eichfaktor 92,660 µGal/Volt
INSTRUMENTELLE SIGNALVERZÖGERUNG 16,7 SEC.

Latitude: 50.6480 deg, longitude:  6.8730 deg, azimuth:  0.000 deg.

Summary of observation data :

20030324100000...20031117 40000  20031118170000...20040301 80000
20040303170000...20040317 40000  20040317 90000...20040325110000
20040325200000...20040709 50000  20040712 10000...20040821150000
20040823210000...20040905 80000  20040906   0...20041010150000
Number of recorded days in total :  556.29
Numerical filter is PERTZEV59 with 51 coefficients.

Estimation of noise by FOURIER-spectrum of residuals
0.1 cpd band99999.9990 nm/s**2          1.0 cpd band    0.1943 nm/s**2
2.0 cpd band   0.1651 nm/s**2          3.0 cpd band    0.1405 nm/s**2
4.0 cpd band   0.1348 nm/s**2          white noise    0.1351 nm/s**2

adjusted tidal parameters :

from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]           [deg] [deg]

0.501370 0.911390 Q1    66.5279  1.14037  0.00157 -0.4258  0.0788
0.911391 0.947991 O1    350.0298  1.14876  0.00030  0.0577  0.0148
0.947992 0.981854 M1    27.5020  1.14765  0.00344  0.4073  0.1715
0.981855 0.998631 P1    162.9763  1.14952  0.00075  0.0476  0.0373
0.998632 1.001369 S1     4.7803  1.42615  0.04601 -1.7755  1.8606
1.001370 1.023622 K1    487.0554  1.13657  0.00023  0.2188  0.0113
1.023623 1.035379 TET1   5.5627  1.21395  0.01989 -0.9534  0.9379
1.035380 1.057485 J1    27.6491  1.15383  0.00422 -0.2221  0.2091
1.057486 1.071833 SO1    4.4487  1.11919  0.02345 -0.9505  1.2015
1.071834 1.470243 OO1   15.0980  1.15158  0.00526 -0.7253  0.2614
1.470244 1.880264 2N2   10.7090  1.15916  0.00800  4.1631  0.3955
1.880265 1.914128 N2    68.0042  1.17551  0.00164  3.1302  0.0799
1.914129 1.950419 M2    359.0507  1.18829  0.00029  2.2253  0.0141
1.950420 1.984282 L2     9.9724  1.16765  0.00571  1.3224  0.2801
1.984283 2.002736 S2    167.5678  1.19198  0.00063  0.7139  0.0310
2.002737 2.451943 K2    45.6422  1.19441  0.00187  0.9440  0.0897
2.451944 3.381378 M3     3.9688  1.05348  0.01894  1.0922  1.0299
3.381379 4.347615 M4     0.1165  2.67788  1.52537 -1.3768  32.6338

Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff.      stdv.  parameter  unit
  1      2.89559      0.06746  airpress.  nm/s**2 / hPa

Standard deviation of weight unit:      5.681  nm/s**2

```

Tabelle G.61: Gravimeter A233 – gesamter Beobachtungszeitraum - Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression und mit Phasenkorrektur, numerisches Filter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten

6.2.3 Histogramme der Residuen

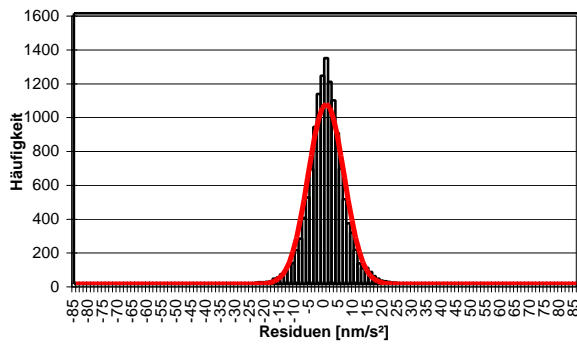


Abbildung G.88: Gravimeter A233 – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

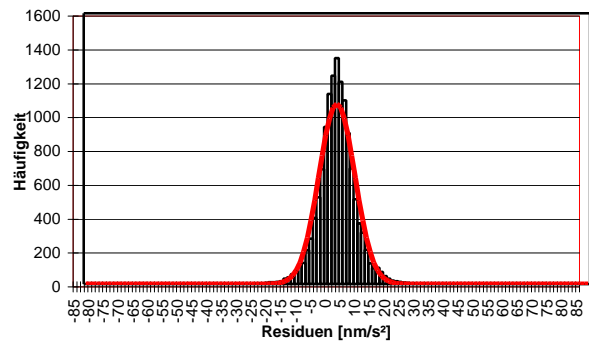


Abbildung G.89: Gravimeter A233 – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

6.3 Gravimeter A206 – gefilterte Daten

6.3.1 Ergebnisse ohne Ansatz einer Luftdruckregression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908                               File: 00000051
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206
Scale 124,152 µGal/Volt      INSTRUMENTELLE SIGNALVERZÖGERUNG 14,4 SEC.
Latitude: 50.6480 deg, longitude: 6.8730 deg, azimuth: 0.000 deg.
20010328190000...20010623200000 20010624110000...20010726 0
20010726 90000...20010904150000 20010905 30000...20011012150000
20011014210000...20020520 60000 20020520140000...20030114110000
20030116 50000...20031117 40000 20031118170000...20040301 80000
20040303170000...20040325110000 20040326130000...20040608170000
20040611200000...20040718110000 20040718160000...20040821150000
20040823220000...20040905 50000 20040906 10000...20041010150000
Number of recorded days in total : 1275.13
Numerical filter is PERTZEV59 with 51 coefficients.
adjusted tidal parameters :
from to wave ampl. ampl.fac. stdv. ph. lead stdv.
[cpd] [cpd] [nm/s**2 ] [deg] [deg]
0.501370 0.911390 Q1 66.3358 1.13706 0.00285 -0.5970 0.1437
0.911391 0.947991 O1 350.1202 1.14905 0.00054 0.0790 0.0272
0.947992 0.981854 M1 28.3113 1.18141 0.00583 0.8690 0.2829
0.981855 0.998631 P1 163.1547 1.15077 0.00127 -0.1834 0.0634
0.998632 1.001369 S1 8.0839 2.41157 0.07650 -2.5896 1.8179
1.001370 1.023622 K1 486.9549 1.13633 0.00040 0.2075 0.0200
1.023623 1.035379 TET1 5.0312 1.09795 0.03646 1.0075 1.9023
1.035380 1.057485 J1 27.8015 1.16018 0.00717 -0.1146 0.3543
1.057486 1.071833 SO1 4.8352 1.21642 0.04272 -1.7519 2.0126
1.071834 1.470243 OO1 15.2623 1.16407 0.01007 -0.2356 0.4957
1.470244 1.880264 2N2 10.6093 1.14838 0.00660 4.1325 0.3295
1.880265 1.914128 N2 67.8464 1.17278 0.00133 2.9856 0.0650
1.914129 1.950419 M2 359.1857 1.18874 0.00025 2.2601 0.0121
1.950420 1.984282 L2 10.0637 1.17835 0.00657 1.1559 0.3197
1.984283 2.002736 S2 167.3554 1.19047 0.00053 0.5235 0.0257
2.002737 2.451943 K2 45.6514 1.19463 0.00174 0.7960 0.0833
2.451944 3.381378 M3 4.0486 1.07468 0.00991 -0.1352 0.5285
3.381379 4.347615 M4 0.0467 1.07259 0.56115 20.6710 29.9766
Standard deviation of weight unit: 8.600 nm/s**2
    
```

Tabelle G.62: Gravimeter A206, gefilterte Registrierdaten – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression mit Phasenkorrektur, numerisches Filter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten

6.3.2 Ergebnisse mit Ansatz einer Luftdruckregression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908                               File: 00000050

ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206
Scale 124,152 µGal/Volt
INSTRUMENTELLE SIGNALVERZÖGERUNG 14,4 SEC.
Latitude: 50.6480 deg, longitude: 6.8730 deg, azimuth: 0.000 deg.

20010328190000...20010623200000 20010624110000...20010726 0
20010726 90000...20010904150000 20010905 30000...20011012150000
20011014210000...20020520 60000 20020520140000...20030114110000
20030116 50000...20031117 40000 20031118170000...20040301 80000
20040303170000...20040325110000 20040326130000...20040608170000
20040611200000...20040718110000 20040718160000...20040821150000
20040823220000...20040905 50000 20040906 10000...20041010150000
Number of recorded days in total : 1275.13
Numerical filter is PERTZEV59 with 51 coefficients.

Estimation of noise by FOURIER-spectrum of residuals
0.1 cpd band 99999.9990 nm/s**2 1.0 cpd band 0.3621 nm/s**2
2.0 cpd band 0.1516 nm/s**2 3.0 cpd band 0.0794 nm/s**2
4.0 cpd band 0.0532 nm/s**2 white noise 0.1426 nm/s**2

adjusted tidal parameters :

from to wave ampl. ampl.fac. stdv. ph. lead stdv.
[cpd] [cpd] [nm/s**2 ] [deg] [deg]

0.501370 0.911390 Q1 66.3360 1.13707 0.00285 -0.5962 0.1438
0.911391 0.947991 O1 350.1202 1.14905 0.00055 0.0791 0.0272
0.947992 0.981854 M1 28.3112 1.18141 0.00584 0.8704 0.2831
0.981855 0.998631 P1 163.1554 1.15078 0.00127 -0.1838 0.0634
0.998632 1.001369 S1 8.0892 2.41317 0.07674 -2.5252 1.8316
1.001370 1.023622 K1 486.9572 1.13633 0.00040 0.2073 0.0201
1.023623 1.035379 TET1 5.0302 1.09773 0.03649 0.9980 1.9038
1.035380 1.057485 J1 27.8005 1.16014 0.00718 -0.1168 0.3546
1.057486 1.071833 SO1 4.8355 1.21648 0.04274 -1.7365 2.0142
1.071834 1.470243 OO1 15.2619 1.16403 0.01008 -0.2357 0.4959
1.470244 1.880264 2N2 10.6095 1.14840 0.00660 4.1351 0.3295
1.880265 1.914128 N2 67.8460 1.17277 0.00133 2.9859 0.0650
1.914129 1.950419 M2 359.1853 1.18874 0.00025 2.2602 0.0121
1.950420 1.984282 L2 10.0636 1.17834 0.00657 1.1558 0.3196
1.984283 2.002736 S2 167.3480 1.19042 0.00054 0.5194 0.0264
2.002737 2.451943 K2 45.6507 1.19461 0.00174 0.7943 0.0833
2.451944 3.381378 M3 4.0487 1.07470 0.00991 -0.1363 0.5282
3.381379 4.347615 M4 0.0467 1.07302 0.56130 20.7812 29.9721

Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff. stdv. parameter unit
1 0.04136 0.05725 airpress. nm/s**2 / hPa

Standard deviation of weight unit: 8.600 nm/s**2

```

Tabelle G.63: Gravimeter A206, gefilterte Registrierdaten – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression und mit Phasenkorrektur, numerisches Filter Pertzев59 mit 51 Koeffizienten

6.3.3 Histogramme der Residuen

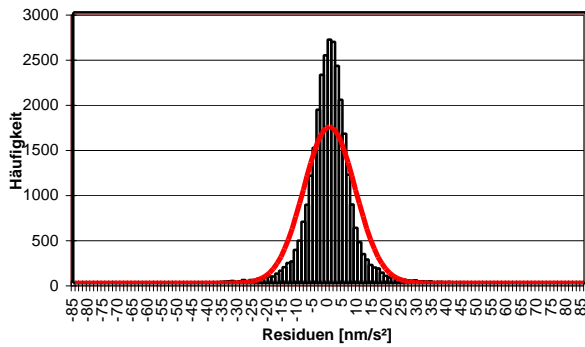


Abbildung G.90: Gravimeter A206, gefilterte Daten – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

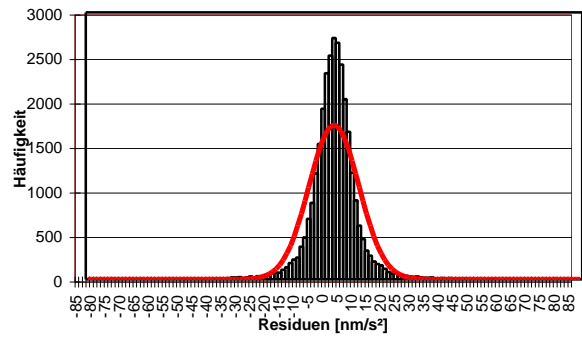


Abbildung G.91: Gravimeter A206, gefilterte Daten – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

6.4 Gravimeter A206 – ungefilterte Daten

6.4.1 Ergebnisse ohne Ansatz einer Luftdruckregression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908                               File: 00000092
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206                                  Scale 268,86 µGal/Volt
Latitude: 50.6480 deg, longitude: 6.8730 deg, azimuth: 0.000 deg.
20010720 90000...20010726 0 20010726 90000...20010904150000
20010904190000...20030114110000 20030116 50000...20031117 40000
20031118170000...20040301 80000 20040303170000...20040325110000
20040326130000...20040608170000 20040611200000...20040718110000
20040718160000...20040821150000 20040823220000...20040905 50000
20040906 10000...20041010150000
Number of recorded days in total : 1164.96
Numerical filter is PERTZEV59 with 51 coefficients.

adjusted tidal parameters :
from to wave ampl. ampl.fac. stdv. ph. lead stdv.
[cpd] [cpd] [nm/s**2 ] [deg] [deg]
0.501370 0.911390 Q1 66.4027 1.13821 0.00389 -0.7564 0.1961
0.911391 0.947991 O1 349.9653 1.14854 0.00075 0.0402 0.0373
0.947992 0.981854 M1 28.0448 1.17029 0.00782 0.3305 0.3829
0.981855 0.998631 P1 163.0886 1.15031 0.00175 -0.2943 0.0873
0.998632 1.001369 S1 7.6570 2.28426 0.10554 10.0230 2.6481
1.001370 1.023622 K1 487.0559 1.13656 0.00055 0.1407 0.0275
1.023623 1.035379 TET1 5.2315 1.14167 0.04986 -0.3458 2.5015
1.035380 1.057485 J1 27.4455 1.14532 0.00996 0.3286 0.4982
1.057486 1.071833 SO1 4.9355 1.24166 0.05845 -4.7631 2.6979
1.071834 1.470243 OO1 15.2111 1.16017 0.01359 -0.1809 0.6709
1.470244 1.880264 2N2 10.5733 1.14448 0.01084 4.0192 0.5427
1.880265 1.914128 N2 67.7250 1.17068 0.00223 2.7886 0.1090
1.914129 1.950419 M2 358.6146 1.18685 0.00042 2.1950 0.0203
1.950420 1.984282 L2 9.9884 1.16953 0.01059 0.6623 0.5191
1.984283 2.002736 S2 167.1831 1.18925 0.00089 0.4825 0.0429
2.002737 2.451943 K2 45.9730 1.20305 0.00287 0.6632 0.1365
2.451944 3.381378 M3 3.9609 1.05140 0.02139 3.4811 1.1655
3.381379 4.347615 M4 0.0838 1.92667 1.69574 132.8252 50.4291
Standard deviation of weight unit: 13.517 nm/s**2
    
```

Tabelle G.64: Gravimeter A206, ungefilterte Registrierdaten – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression mit Phasenkorrektur, numerisches Filter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten

6.4.2 Ergebnisse mit Ansatz einer Luftdruckregression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: 00000093
ASKANIA GRAVIMETER GS15 Nr.206
Eichfaktor 268,86 µGal/Volt

Latitude: 50.6480 deg, longitude: 6.8730 deg, azimuth: 0.000 deg.

20010720 90000...20010726      0 20010726 90000...20010904150000
20010904190000...20030114110000 20030116 50000...20031117 40000
20031118170000...20040301 80000 20040303170000...20040325110000
20040326130000...20040608170000 20040611200000...20040718110000
20040718160000...20040821150000 20040823220000...20040905 50000
20040906 10000...20041010150000
Number of recorded days in total : 1164.96
Numerical filter is PERTZEV59 with 51 coefficients.

Estimation of noise by FOURIER-spectrum of residuals
0.1 cpd band99999.9990 nm/s**2      1.0 cpd band    0.4611 nm/s**2
2.0 cpd band    0.2323 nm/s**2      3.0 cpd band    0.1567 nm/s**2
4.0 cpd band    0.1474 nm/s**2      white noise     0.2153 nm/s**2

adjusted tidal parameters :

from      to      wave      ampl. ampl.fac.      stdv. ph. lead      stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]           [deg] [deg]
0.501370 0.911390 Q1      66.4258  1.13861  0.00389 -0.7560  0.1957
0.911391 0.947991 O1      349.9808  1.14859  0.00075  0.0385  0.0373
0.947992 0.981854 M1      28.0836  1.17191  0.00781  0.3929  0.3818
0.981855 0.998631 P1      163.0899  1.15032  0.00175 -0.3179  0.0872
0.998632 1.001369 S1       7.9164  2.36164  0.10597 10.6489  2.5581
1.001370 1.023622 K1      487.1099  1.13669  0.00055  0.1329  0.0275
1.023623 1.035379 TET1    5.1970  1.13414  0.04978 -0.1759  2.5136
1.035380 1.057485 J1      27.3958  1.14325  0.00994  0.3352  0.4982
1.057486 1.071833 SO1     4.9683  1.24989  0.05836 -4.3877  2.6758
1.071834 1.470243 OO1    15.1911  1.15864  0.01357 -0.2430  0.6706
1.470244 1.880264 2N2    10.5707  1.14419  0.01075  4.0318  0.5384
1.880265 1.914128 N2     67.7370  1.17089  0.00221  2.7857  0.1081
1.914129 1.950419 M2     358.6140  1.18685  0.00042  2.1909  0.0201
1.950420 1.984282 L2      9.9830  1.16890  0.01051  0.6921  0.5151
1.984283 2.002736 S2     167.0662  1.18841  0.00089  0.4807  0.0426
2.002737 2.451943 K2     45.9649  1.20284  0.00284  0.6374  0.1354
2.451944 3.381378 M3      3.9636  1.05212  0.02120  3.5075  1.1544
3.381379 4.347615 M4      0.0901  2.07085  1.68376 136.7394 46.5856

Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff.      stdv. parameter unit
  1      1.29136      0.08907  airpress. nm/s**2 / hPa

Standard deviation of weight unit: 13.466 nm/s**2

```

Tabelle G.65: Gravimeter A206, ungefilterte Registrierdaten – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression und mit Phasenkorrektur, numerisches Filter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten

6.4.3 Histogramme der Residuen

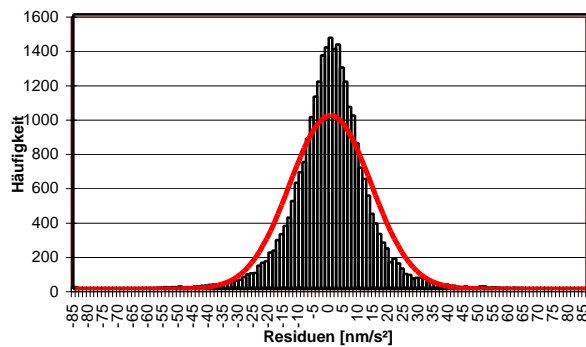


Abbildung G.92: Gravimeter A206, ungefilterte Daten – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

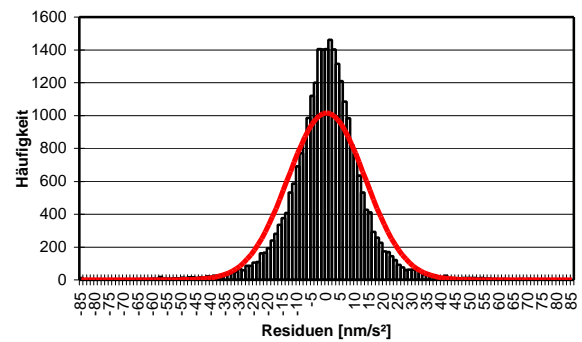


Abbildung G.93: Gravimeter A206, ungefilterte Daten – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung

6.5 Gravimeter LCR-G-xx1F

6.5.1 Ergebnisse ohne Ansatz einer Luftdruckregression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: 00000039
LaCoste GRAVIMETER LCR-G-xx1F
Scale 105,49 µGal/Volt INSTRUMENTELLE SIGNALVERZÖGERUNG 4,4 SEC.
Latitude: 50.6480 deg, longitude: 6.8730 deg, azimuth: 0.000 deg.
20010727 30000...20011012150000 20011015 20000...20020409 50000
20020412220000...20020520 60000
Number of recorded days in total : 291.08
Numerical filter is PERTZEV59 with 51 coefficients.
Estimation of noise by FOURIER-spectrum of residuals
0.1 cpd band 99999.9990 nm/s**2           1.0 cpd band 0.4354 nm/s**2
2.0 cpd band 0.2591 nm/s**2             3.0 cpd band 0.2109 nm/s**2
4.0 cpd band 0.2172 nm/s**2           white noise 0.2514 nm/s**2
adjusted tidal parameters :
from      to      wave      ampl.  ampl.fac.  stdv.  ph.  lead  stdv.
[cpd]    [cpd]    [nm/s**2 ]          [deg]    [deg]
0.501370 0.911390 Q1    66.6855  1.14306  0.00430  -0.3223  0.2154
0.911391 0.947991 O1    349.4870  1.14697  0.00088  0.0841  0.0438
0.947992 0.981854 M1    27.7964  1.15993  0.00861  0.2357  0.4255
0.981855 0.998631 P1    162.8631  1.14872  0.00198  0.3509  0.0987
0.998632 1.001369 S1    3.9913  1.19071  0.12167  -8.4879  5.8509
1.001370 1.023622 K1    485.3762  1.13264  0.00065  0.2681  0.0329
1.023623 1.035379 TET1   5.0140  1.09421  0.05988  1.7299  3.1349
1.035380 1.057485 J1    27.8758  1.16328  0.01073  0.6732  0.5284
1.057486 1.071833 SO1   4.4649  1.12326  0.06755  -0.2490  3.4488
1.071834 1.470243 OO1  14.6898  1.12041  0.01799  -1.5011  0.9200
1.470244 1.880264 2N2  10.7409  1.16262  0.01196  4.0504  0.5891
1.880265 1.914128 N2   67.6056  1.16862  0.00257  2.9330  0.1260
1.914129 1.950419 M2    358.6569  1.18699  0.00053  2.2470  0.0257
1.950420 1.984282 L2   9.9647  1.16675  0.02463  0.5895  1.2096
1.984283 2.002736 S2    167.5205  1.19165  0.00114  0.8550  0.0549
2.002737 2.451943 K2   45.3570  1.18693  0.00410  1.3171  0.1979
2.451944 3.381378 M3    4.1026  1.08901  0.03282  1.4075  1.7269
3.381379 4.347615 M4    0.3414  7.84524  2.87568  177.2037  20.9941
Standard deviation of weight unit: 9.136 nm/s**2

```

Tabelle G.66: Gravimeter LCR-G-xx1F – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression mit Phasenkorrektur, numerisches Filter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten

6.5.2 Ergebnisse mit Ansatz einer Luftdruckregression

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File: 00000007

LaCoste GRAVIMETER LCR-G-xx1F
Scale 105,49 µGal/Volt
INSTRUMENTELLE SIGNALVERZÖGERUNG 4,4 SEC.

Latitude: 50.6480 deg, longitude: 6.8730 deg, azimuth: 0.000 deg.

20010727 30000...20011012150000 20011015 20000...20020409 50000
20020412220000...20020520 60000
Number of recorded days in total : 291.08

Numerical filter is PERTZEV59 with 51 coefficients.

Estimation of noise by FOURIER-spectrum of residuals
0.1 cpd band99999.9990 nm/s**2          1.0 cpd band    0.3811 nm/s**2
2.0 cpd band    0.2581 nm/s**2          3.0 cpd band    0.2031 nm/s**2
4.0 cpd band    0.2133 nm/s**2          white noise     0.2212 nm/s**2

adjusted tidal parameters :

from      to      wave      ampl. ampl.fac.      stdv. ph. lead      stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]           [deg] [deg]
0.501370 0.911390 Q1      66.8410  1.14573  0.00409 -0.4368  0.2046
0.911391 0.947991 O1      349.4949  1.14700  0.00083  0.1061  0.0417
0.947992 0.981854 M1      27.7935  1.15981  0.00819  0.4173  0.4050
0.981855 0.998631 P1      162.8372  1.14853  0.00189  0.2941  0.0940
0.998632 1.001369 S1       4.4272  1.32072  0.11612 -3.5789  5.0269
1.001370 1.023622 K1      485.6238  1.13322  0.00062  0.2483  0.0313
1.023623 1.035379 TET1    4.8307  1.05419  0.05703  1.2403  3.0957
1.035380 1.057485 J1      27.8736  1.16319  0.01020  0.2451  0.5036
1.057486 1.071833 SO1     4.4696  1.12445  0.06426  1.4666  3.2796
1.071834 1.470243 OO1    14.9032  1.13669  0.01715 -1.2057  0.8630
1.470244 1.880264 2N2    10.7697  1.16573  0.01295  4.0610  0.6361
1.880265 1.914128 N2     67.5480  1.16762  0.00278  2.9570  0.1365
1.914129 1.950419 M2     358.5845  1.18675  0.00058  2.2627  0.0279
1.950420 1.984282 L2      9.9880  1.16948  0.02667  0.2131  1.3067
1.984283 2.002736 S2     166.9956  1.18791  0.00125  0.5886  0.0609
2.002737 2.451943 K2     45.3136  1.18579  0.00444  1.2193  0.2146
2.451944 3.381378 M3      4.0652  1.07906  0.03436  1.5388  1.8244
3.381379 4.347615 M4      0.3694  8.48967  3.06983 173.2830 20.7104

Adjusted meteorological or hydrological parameters:

no. regr.coeff.      stdv.  parameter  unit

1      2.85181      0.11314  airpress.  nm/s**2 / hPa

Standard deviation of weight unit:      8.738 nm/s**2

```

Tabelle G.67: Gravimeter LCR-G-xx1F – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression und mit Phasenkorrektur, numerisches Filter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten

6.5.3 Histogramme der Residuen

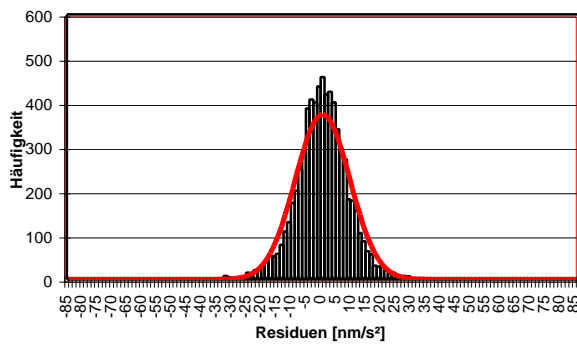


Abbildung G.94: Gravimeter LCR-G-xx1F, ungefilterte Daten – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen

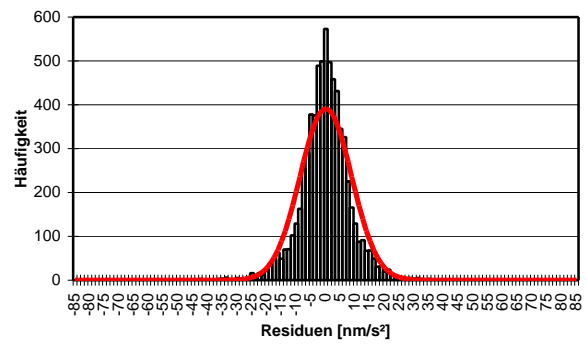


Abbildung G.95: Gravimeter LCR-G-xx1F, ungefilterte Daten – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen

6.6 Gegenüberstellung der berechneten Gezeitenparameter

A206	oL	0.911391	0.947991	O1	350.1202	1.14905	0.00054	0.0790	0.0272
A233	oL	0.911391	0.947991	O1	350.0614	1.14886	0.00034	0.0627	0.0172
Gegenüberstellung A233 > A206:					Faktor	0,99983	Differenz	-0.0163	
A206	oL	0.911391	0.947991	O1	349.9653	1.14854	0.00075	0.0402	0.0373
Lxx1F	oL	0.911391	0.947991	O1	349.4870	1.14697	0.00088	0.0841	0.0438
Gegenüberstellung A233 > LCR-G-xx1F:					Faktor	1,00165	Differenz	-0,0214	
A206	mL	0.911391	0.947991	O1	350.1202	1.14905	0.00055	0.0791	0.0272
A233	mL	0.911391	0.947991	O1	350.0298	1.14876	0.00030	0.0577	0.0148
Gegenüberstellung A233 > A206:					Faktor	0,99975	Differenz	-0.0214	
A206	mL	0.911391	0.947991	O1	349.9808	1.14859	0.00075	0.0385	0.0373
Lxx1F	mL	0.911391	0.947991	O1	349.4949	1.14700	0.00083	0.1061	0.0417
Gegenüberstellung A233 > LCR-G-xx1F:					Faktor	1,00153	Differenz	-0,0484	
A206	oL	0.981855	0.998631	P1	163.1547	1.15077	0.00127	-0.1834	0.0634
A233	oL	0.981855	0.998631	P1	162.9506	1.14934	0.00087	0.1029	0.0434
Gegenüberstellung A233 > A206:					Faktor	0,99876	Differenz	+0.2863	
A206	oL	0.981855	0.998631	P1	163.0886	1.15031	0.00175	-0.2943	0.0873
Lxx1F	oL	0.981855	0.998631	P1	162.8631	1.14872	0.00198	0.3509	0.0987
Gegenüberstellung A233 > LCR-G-xx1F:					Faktor	1,00053	Differenz	-0,2480	
A206	mL	0.981855	0.998631	P1	163.1554	1.15078	0.00127	-0.1838	0.0634
A233	mL	0.981855	0.998631	P1	162.9763	1.14952	0.00075	0.0476	0.0373
Gegenüberstellung A233 > A206:					Faktor	0,99890	Differenz	+0.2314	
A206	mL	0.981855	0.998631	P1	163.0899	1.15032	0.00175	-0.3179	0.0872
Lxx1F	mL	0.981855	0.998631	P1	162.8372	1.14853	0.00189	0.2941	0.0940
Gegenüberstellung A233 > LCR-G-xx1F:					Faktor	1,00086	Differenz	-0,2465	
A206	oL	0.998632	1.001369	S1	8.0839	2.41157	0.07650	-2.5896	1.8179
A233	oL	0.998632	1.001369	S1	4.3643	1.30206	0.05331	-10.9328	2.3472
A206	oL	0.998632	1.001369	S1	7.6570	2.28426	0.10554	10.0230	2.6481
Lxx1F	oL	0.998632	1.001369	S1	3.9913	1.19071	0.12167	-8.4879	5.8509
A206	mL	0.998632	1.001369	S1	8.0892	2.41317	0.07674	-2.5252	1.8316
A233	mL	0.998632	1.001369	S1	4.7803	1.42615	0.04601	-1.7755	1.8606
A206	mL	0.998632	1.001369	S1	7.9164	2.36164	0.10597	10.6489	2.5581
Lxx1F	mL	0.998632	1.001369	S1	4.4272	1.32072	0.11612	-3.5789	5.0269

A206	oL	1.001370	1.023622	K1	486.9549	1.13633	0.00040	0.2075	0.0200
A233	oL	1.001370	1.023622	K1	486.9080	1.13623	0.00026	0.2383	0.0132
Gegenüberstellung A233 > A206: Faktor 0,99991 Differenz +0.0308									
A206	oL	1.001370	1.023622	K1	487.0559	1.13656	0.00055	0.1407	0.0275
Lxx1F	oL	1.001370	1.023622	K1	485.3762	1.13264	0.00065	0.2681	0.0329
Gegenüberstellung A233 > LCR-G-xx1F: Faktor 1,00317 Differenz -0,0298									
A206	mL	1.001370	1.023622	K1	486.9572	1.13633	0.00040	0.2073	0.0201
A233	mL	1.001370	1.023622	K1	487.0554	1.13657	0.00023	0.2188	0.0113
Gegenüberstellung A233 > A206: Faktor 1,00021 Differenz +0.0115									
A206	mL	1.001370	1.023622	K1	487.1099	1.13669	0.00055	0.1329	0.0275
Lxx1F	mL	1.001370	1.023622	K1	485.6238	1.13322	0.00062	0.2483	0.0313
Gegenüberstellung A233 > LCR-G-xx1F: Faktor 1,00296 Differenz -0,0295									
A206	oL	1.914129	1.950419	M2	359.1857	1.18874	0.00025	2.2601	0.0121
A233	oL	1.914129	1.950419	M2	359.1051	1.18847	0.00029	2.2279	0.0141
Gegenüberstellung A233 > A206: Faktor 0,99977 Differenz -0.0322									
A206	oL	1.914129	1.950419	M2	358.6146	1.18685	0.00042	2.1950	0.0203
Lxx1F	oL	1.914129	1.950419	M2	358.6569	1.18699	0.00053	2.2470	0.0257
Gegenüberstellung A233 > LCR-G-xx1F: Faktor 1,00125 Differenz -0,0191									
A206	mL	1.914129	1.950419	M2	359.1853	1.18874	0.00025	2.2602	0.0121
A233	mL	1.914129	1.950419	M2	359.0507	1.18829	0.00029	2.2253	0.0141
Gegenüberstellung A233 > A206: Faktor 0,99962 Differenz -0.0349									
A206	mL	1.914129	1.950419	M2	358.6140	1.18685	0.00042	2.1909	0.0201
Lxx1F	mL	1.914129	1.950419	M2	358.6569	1.18699	0.00053	2.2470	0.0257
Gegenüberstellung A233 > LCR-G-xx1F: Faktor 1,00110 Differenz -0,0217									
A206	oL	1.984283	2.002736	S2	167.3554	1.19047	0.00053	0.5235	0.0257
A233	oL	1.984283	2.002736	S2	168.1188	1.19590	0.00062	1.0091	0.0296
Gegenüberstellung A233 > A206: Faktor 1,00456 Differenz +0.4856									
A206	oL	1.984283	2.002736	S2	167.1831	1.18925	0.00089	0.4825	0.0429
Lxx1F	oL	1.984283	2.002736	S2	167.5205	1.19165	0.00114	0.8550	0.0549
Gegenüberstellung A233 > LCR-G-xx1F: Faktor 1,00357 Differenz +0,1541									
A206	mL	1.984283	2.002736	S2	167.3480	1.19042	0.00054	0.5194	0.0264
A233	mL	1.984283	2.002736	S2	167.5678	1.19198	0.00063	0.7139	0.0310
Gegenüberstellung A233 > A206: Faktor 1,00131 Differenz +0.1945									
A206	mL	1.984283	2.002736	S2	167.0662	1.18841	0.00089	0.4807	0.0426
Lxx1F	mL	1.984283	2.002736	S2	167.5205	1.19165	0.00114	0.8550	0.0549
Gegenüberstellung A233 > LCR-G-xx1F: Faktor 1,00028 Differenz -0,1411									
Gravimeter A206, gefilterte Daten - Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30): ohne Luftdruck: $s = 8.600 \text{ nm/s}^2$ mit Luftdruck: $s = 8.600 \text{ nm/s}^2$									
Gravimeter A233 - Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30): ohne Luftdruck: $s = 6.072 \text{ nm/s}^2$ mit Luftdruck: $s = 5.681 \text{ nm/s}^2$									
Gravimeter A206, ungefilterte Daten - Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30): ohne Luftdruck: $s = 13.517 \text{ nm/s}^2$ mit Luftdruck: $s = 13.466 \text{ nm/s}^2$									
Gravimeter LCR-G-xx1F - Standardabweichung der Gewichtseinheit (Eterna 3.30): ohne Luftdruck: $s = 9.136 \text{ nm/s}^2$ mit Luftdruck: $s = 8.738 \text{ nm/s}^2$									

Tabelle G.68: Gravimeter A206, gefilterte Daten, Gravimeter A233, Gravimeter A206, ungefilterte Daten, Gravimeter LCR-G-xx1F, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 M_2 S_2 sowie die Partialtide S_1 , Tiefpassfilter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten

6.7 Der Einfluss der numerischen Filterung auf die Ergebnisse der Gezeitenanalysen

A206	oL	Pertzev59	O1	350.1202	1.14905	0.00054	0.0790	0.0272
A206	oL	Pertzev57	O1	350.1447	1.14913	0.00059	0.0769	0.0292
Differenzen:				-0,00008	+0,0021			
A233	oL	Pertzev59	O1	350.0614	1.14886	0.00034	0.0627	0.0172
A233	oL	Pertzev57	O1	350.0254	1.14875	0.00039	0.0575	0.0193
Differenzen:				+0,00011	+0,0052			
A206	oL	Pertzev59	O1	349.9653	1.14854	0.00075	0.0402	0.0373
A206	oL	Pertzev57	O1	349.9508	1.14849	0.00072	0.0381	0.0357
Differenzen:				+0,00005	+0,0021			
LCR-G-xx1F	oL	Pertzev59	O1	349.4870	1.14697	0.00088	0.0841	0.0438
LCR-G-xx1F	oL	Pertzev57	O1	349.5040	1.14703	0.00081	0.0868	0.0404
Differenzen:				-0,00006	-0,0027			
A206	mL	Pertzev59	O1	350.1202	1.14905	0.00055	0.0791	0.0272
A206	mL	Pertzev57	O1	350.1448	1.14913	0.00059	0.0771	0.0292
Differenzen:				-0.00008	+0,0020			
A233	mL	Pertzev59	O1	350.0298	1.14876	0.00030	0.0577	0.0148
A233	mL	Pertzev57	O1	350.0034	1.14867	0.00035	0.0536	0.0176
Differenzen:				+0,00009	+0,0041			
A206	mL	Pertzev59	O1	349.9808	1.14859	0.00075	0.0385	0.0373
A206	mL	Pertzev57	O1	349.9691	1.14855	0.00072	0.0365	0.0357
Differenzen:				+0,00004	+0,0020			
LCR-G-xx1F	mL	Pertzev59	O1	349.4949	1.14700	0.00083	0.1061	0.0417
LCR-G-xx1F	mL	Pertzev57	O1	349.5140	1.14706	0.00077	0.1098	0.0387
Differenzen:				-0,00006	-0,0037			

Tabelle G.69: Partialtide O₁ - Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression, Tiefpassfilter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten und Tiefpassfilter Pertzev57 mit 37 Koeffizienten

A206	oL	Pertzev59	P1	163.1547	1.15077	0.00127	-0.1834	0.0634
A206	oL	Pertzev57	P1	163.2117	1.15117	0.00138	-0.1732	0.0685
Differenzen:				-0,00040	-0,0102			
A233	oL	Pertzev59	P1	162.9506	1.14934	0.00087	0.1029	0.0434
A233	oL	Pertzev57	P1	162.8078	1.14834	0.00098	0.0337	0.0490
Differenzen:				+0,00100	+0,0692			
A206	oL	Pertzev59	P1	163.0886	1.15031	0.00175	-0.2943	0.0873
A206	oL	Pertzev57	P1	163.1212	1.15054	0.00169	-0.2838	0.0842
Differenzen:				-0,00023	-0,0105			
LCR-G-xx1F	oL	Pertzev59	P1	162.8631	1.14872	0.00198	0.3509	0.0987
LCR-G-xx1F	oL	Pertzev57	P1	162.8611	1.14870	0.00184	0.3659	0.0918
Differenzen:				+0,00002	-0,0150			
A206	mL	Pertzev59	P1	163.1554	1.15078	0.00127	-0.1838	0.0634
A206	mL	Pertzev57	P1	163.2135	1.15119	0.00138	-0.1743	0.0686
Differenzen:				-0,00041	-0,0095			
A233	mL	Pertzev59	P1	162.9763	1.14952	0.00075	0.0476	0.0373
A233	mL	Pertzev57	P1	162.8188	1.14841	0.00089	-0.0196	0.0447
Differenzen:				+0,00111	+0,0672			
A206	mL	Pertzev59	P1	163.0899	1.15032	0.00175	-0.3179	0.0872
A206	mL	Pertzev57	P1	163.1191	1.15052	0.00169	-0.3114	0.0841
Differenzen:				-0,00020	-0,0065			
LCR-G-xx1F	mL	Pertzev59	P1	162.8372	1.14853	0.00189	0.2941	0.0940
LCR-G-xx1F	mL	Pertzev57	P1	162.8297	1.14848	0.00176	0.3031	0.0878
Differenzen:				+0,00005	-0,0090			

Tabelle G.70: Partialtide P₁ - Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression, Tiefpassfilter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten und Tiefpassfilter Pertzev57 mit 37 Koeffizienten

A206	oL	Pertzev59	S1	8.0839	2.41157	0.07650	-2.5896	1.8179
A233	oL	Pertzev59	S1	4.3643	1.30206	0.05331	-10.9328	2.3472
A206	oL	Pertzev59	S1	7.6570	2.28426	0.10554	10.0230	2.6481
LCR-G-xx1F	oL	Pertzev59	S1	3.9913	1.19071	0.12167	-8.4879	5.8509
A206	oL	Pertzev57	S1	8.0474	2.40070	0.08273	-2.6538	1.9744
A233	oL	Pertzev57	S1	4.0001	1.19340	0.06013	-13.0030	2.8860
A206	oL	Pertzev57	S1	7.5949	2.26572	0.10175	10.0324	2.5724
LCR-G-xx1F	oL	Pertzev57	S1	3.9717	1.18484	0.11265	-8.3797	5.4542
A206	mL	Pertzev59	S1	8.0892	2.41317	0.07674	-2.5252	1.8316
A233	mL	Pertzev59	S1	4.7803	1.42615	0.04601	-1.7755	1.8606
A206	mL	Pertzev59	S1	7.9164	2.36164	0.10597	10.6489	2.5581
LCR-G-xx1F	mL	Pertzev59	S1	4.4272	1.32072	0.11612	-3.5789	5.0269
A206	mL	Pertzev57	S1	8.0620	2.40506	0.08292	-2.4735	1.9797
A233	mL	Pertzev57	S1	4.3670	1.30284	0.05492	-3.2830	2.4219
A206	mL	Pertzev57	S1	7.8960	2.35556	0.10184	10.8064	2.4709
LCR-G-xx1F	mL	Pertzev57	S1	4.4528	1.32838	0.10790	-3.1694	4.6573

Tabelle G.71: Partialtide S_1 - Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression, Tiefpassfilter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten und Tiefpassfilter Pertzev57 mit 37 Koeffizienten

A206	oL	Pertzev59	K1	486.9549	1.13633	0.00040	0.2075	0.0200
A206	oL	Pertzev57	K1	486.9747	1.13637	0.00043	0.2031	0.0217
Differenzen:				-0,00004	+0,0044			
A233	oL	Pertzev59	K1	486.9080	1.13623	0.00026	0.2383	0.0132
A233	oL	Pertzev57	K1	486.8917	1.13619	0.00030	0.1693	0.0149
Differenzen:				+0,00004	+0,0690			
A206	oL	Pertzev59	K1	487.0559	1.13656	0.00055	0.1407	0.0275
A206	oL	Pertzev57	K1	487.1307	1.13674	0.00053	0.1355	0.0265
Differenzen:				-0,00018	+0,0052			
LCR-G-xx1F	oL	Pertzev59	K1	485.3762	1.13264	0.00065	0.2681	0.0329
LCR-G-xx1F	oL	Pertzev57	K1	485.3464	1.13257	0.00060	0.2647	0.0305
Differenzen:				+0,00007	+0,0034			
A206	mL	Pertzev59	K1	486.9572	1.13633	0.00040	0.2073	0.0201
A206	mL	Pertzev57	K1	486.9807	1.13639	0.00043	0.2027	0.0217
Differenzen:				-0,00006	+0,0046			
A233	mL	Pertzev59	K1	487.0554	1.13657	0.00023	0.2188	0.0113
A233	mL	Pertzev57	K1	487.0334	1.13652	0.00027	0.2217	0.0136
Differenzen:				+0,00005	-0,0029			
A206	mL	Pertzev59	K1	487.1099	1.13669	0.00055	0.1329	0.0275
A206	mL	Pertzev57	K1	487.1923	1.13688	0.00053	0.1265	0.0265
Differenzen:				-0,00019	+0,0064			
LCR-G-xx1F	mL	Pertzev59	K1	485.6238	1.13322	0.00062	0.2483	0.0313
LCR-G-xx1F	mL	Pertzev57	K1	485.6086	1.13319	0.00058	0.2438	0.0291
Differenzen:				+0,00003	+0,0045			

Tabelle G.72: Partialtide K_1 - Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression, Tiefpassfilter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten und Tiefpassfilter Pertzev57 mit 37 Koeffizienten

A206	oL	Pertzev59	M2	359.1857	1.18874	0.00025	2.2601	0.0121
A206	oL	Pertzev57	M2	359.1779	1.18871	0.00027	2.2565	0.0130
Differenzen:				+0,00003	+0,0036			
A233	oL	Pertzev59	M2	359.1051	1.18847	0.00029	2.2279	0.0141
A233	oL	Pertzev57	M2	359.0880	1.18841	0.00033	2.2386	0.0159
Differenzen:				+0,00006	-0,0107			
A206	oL	Pertzev59	M2	358.6146	1.18685	0.00042	2.1950	0.0203
A206	oL	Pertzev57	M2	358.6055	1.18682	0.00041	2.1959	0.0197
Differenzen:				+0,00003	-0,0009			
LCR-G-xx1F	oL	Pertzev59	M2	358.6569	1.18699	0.00053	2.2470	0.0257
LCR-G-xx1F	oL	Pertzev57	M2	358.6399	1.18693	0.00049	2.2475	0.0239
Differenzen:				+0,00006	-0,0005			
A206	mL	Pertzev59	M2	359.1853	1.18874	0.00025	2.2602	0.0121
A206	mL	Pertzev57	M2	359.1765	1.18871	0.00027	2.2566	0.0130
Differenzen:				+0,00003	+0,0036			
A233	mL	Pertzev59	M2	359.0507	1.18829	0.00029	2.2253	0.0141
A233	mL	Pertzev57	M2	359.0385	1.18825	0.00032	2.2359	0.0156
Differenzen:				+0,00004	-0,0106			
A206	mL	Pertzev59	M2	358.6140	1.18685	0.00042	2.1909	0.0201
A206	mL	Pertzev57	M2	358.6025	1.18681	0.00040	2.1912	0.0195
Differenzen:				+0,00004	-0,0003			
LCR-G-xx1F	mL	Pertzev59	M2	358.6569	1.18699	0.00053	2.2470	0.0257
LCR-G-xx1F	mL	Pertzev57	M2	358.5630	1.18668	0.00055	2.2650	0.0264
Differenzen:				+0,00031	-0,0180			

Tabelle G.73: Partialtide M_2 - Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression, Tiefpassfilter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten und Tiefpassfilter Pertzev57 mit 37 Koeffizienten

A206	oL	Pertzev59	S2	167.3554	1.19047	0.00053	0.5235	0.0257
A206	oL	Pertzev57	S2	167.3674	1.19056	0.00057	0.5226	0.0276
Differenzen:				-0,00009	+0,0009			
A233	oL	Pertzev59	S2	168.1188	1.19590	0.00062	1.0091	0.0296
A233	oL	Pertzev57	S2	168.1117	1.19585	0.00070	0.9637	0.0333
Differenzen:				+0,00005	+0,0454			
A206	oL	Pertzev59	S2	167.1831	1.18925	0.00089	0.4825	0.0429
A206	oL	Pertzev57	S2	167.1985	1.18935	0.00086	0.4862	0.0416
Differenzen:				-0,00010	-0,0037			
LCR-G-xx1F	oL	Pertzev59	S2	167.5205	1.19165	0.00114	0.8550	0.0549
LCR-G-xx1F	oL	Pertzev57	S2	167.4919	1.19144	0.00106	0.8511	0.0509
Differenzen:				+0,00021	+0,0039			
A206	mL	Pertzev59	S2	167.3480	1.19042	0.00054	0.5194	0.0264
A206	mL	Pertzev57	S2	167.3470	1.19041	0.00058	0.5114	0.0279
Differenzen:				+0,00001	+0,0080			
A233	mL	Pertzev59	S2	167.5678	1.19198	0.00063	0.7139	0.0310
A233	mL	Pertzev57	S2	167.6020	1.19222	0.00069	0.6891	0.0335
Differenzen:				-0,00024	+0,0248			
A206	mL	Pertzev59	S2	167.0662	1.18841	0.00089	0.4807	0.0426
A206	mL	Pertzev57	S2	167.0619	1.18838	0.00086	0.4836	0.0412
Differenzen:				+0,00003	-0,0029			
LCR-G-xx1F	mL	Pertzev59	S2	167.5205	1.19165	0.00114	0.8550	0.0549
LCR-G-xx1F	mL	Pertzev57	S2	166.9330	1.18747	0.00117	0.5673	0.0569
Differenzen:				+0,00418	+0,2877			

Tabelle G.74: Partialtide S_2 - Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression, Tiefpassfilter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten und Tiefpassfilter Pertzev57 mit 37 Koeffizienten

	Pertzev59 ohne Luftdruckregression	Pertzev59 mit Luftdruckregression	Pertzev57 ohne Luftdruckregression	Pertzev57 mit Luftdruckregression
A206 gefilterte Daten	$s =$ 8.600 nm/s²	$s =$ 8.600 nm/s²	$s =$ 14.592 nm/s²	$s =$ 14.592 nm/s²
A233	$s =$ 6.072 nm/s²	$s =$ 5.681 nm/s²	$s =$ 9.555 nm/s²	$s =$ 9.022 nm/s²
A206 ungefilterte Daten	$s =$ 13.517 nm/s²	$s =$ 13.466 nm/s²	$s =$ 18.694 nm/s²	$s =$ 18.581 nm/s²
LCR-G-xx1F	$s =$ 9.136 nm/s²	$s =$ 8.738 nm/s²	$s =$ 11.019 nm/s²	$s =$ 10.086 nm/s²

Tabelle G.75: Gegenüberstellung der Standardabweichungen der Gewichtseinheit (ETERNA 3.30) ohne und mit Luftdruckregression, Tiefpassfilter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten und Tiefpassfilter Pertzev57 mit 37 Koeffizienten

6.8 Ergebniszusammenfassung und Schlussfolgerungen

6.8.1 Die Modellanpassung

Die im Rahmen der Gezeitenanalysen berechneten Standardabweichungen s der Gewichtseinheit stellen ein Maß für den Grad der Anpassung des deterministischen Modells der gravimetrischen Gezeiten an die beobachteten, numerisch gefilterten stündlichen Daten dar; die Fehlerangaben beziehen sich auf den im Programmsystem Eterna 3.30 verwendeten Algorithmus. Die Frage, ob und in welchem Maße diese Angaben als ein *statistisches Fehlermaß* bewertet werden können, wird zurzeit diskutiert [DUCARME, VANDERCOILDEN UND VENEDIKOV 2006]. Durch eine numerische Vorfilterung sollen zunächst im wesentlichen solche Anteile in den beobachteten stündlichen Signalwerten eliminiert oder reduziert werden, die nicht direkt oder indirekt aus den gravimetrischen Gezeitenprozessen herrühren. Wird nun die Wirksamkeit des Filteralgorithmus verbessert, so führt dies nur dann zu einer verbesserten Modellanpassung, wenn Störsignale vorhanden sind. Infolgedessen lassen sich über den Vergleich der mit Filtern unterschiedlicher Effizienz gewonnenen Standardabweichungen der Gewichtseinheit Informationen ableiten über die Existenz relevanter Störsignale und deren relative Größe. Die numerischen Filter sind zu unterscheiden von den als (Hardware-)Komponenten der Signalerfassung teilweise verwendeten elektronischen/elektrischen Filtern (Gravimeter A233 und Gravimeter A206), die ausschließlich der Verringerung des mikroseismisch induzierten, hochfrequenten Rauschpegels in den aufgezeichneten Messwerten dienen.

In Tabelle G.75 sind die berechneten Standardabweichungen s der Gewichtseinheit zusammengestellt. Die geringsten Beträge ergeben sich sowohl bei Anwendung des Filters Pertzev59, als auch des Filters Pertzev57 für die Daten des Gravimeters A233. Bei Gravimeter A206, gefilterte Messwerte, wird mit dem numerischen Filter Pertzev59 eine *geringerer* Wert erreicht als bei Gravimeter LCR-G-xx1F, im Gegensatz zu den zugeordneten Ergebnissen nach Einsatz des Filters Pertzev57. Wendet man das numerische Filter Pertzev59 auf die *ungefilterten* Registrierwerte des Gravimeters A206 an, so stellt sich eine Wert ein, der 8% kleiner ist der als der zugeordnete Wert für die *gefilterten* Daten bei Anwendung des numerischen Filters Pertzev57.

Bildet man die *Verhältnisse* zugeordneter Standardabweichungen der Gewichtseinheit, so lassen sich unterschiedliche Grade der Verbesserung der Modellanpassung erkennen, die durch Verwendung des Filter Pertzev59 bewirkt werden:

	Verhältnisse der Standardabweichungen (ETERNA3.30) ohne Ansatz einer Luftdruckregression	Verhältnisse der Standardabweichungen (ETERNA3.30) mit Ansatz einer Luftdruckregression
A206 gefilterte Daten	1,700	1,700
A233	1,574	1,588
A206 ungefilterte Daten	1,383	1,380
LCR-G-xx1F	1,206	1,154

Tabelle G.76: Numerische Filterung Pertzev59 und Pertzev57, Gegenüberstellung der Verhältnisse zugeordneter Standardabweichungen der Gewichtseinheit

Die Verhältniszahlen für die beiden Fälle der Gezeitenanalyse ohne und mit Ansatz einer Luftdruckregression stimmen weitgehend überein. Die geringste Verbesserung der Modellanpassung durch die Verwendung des numerischen Filters Pertz59 tritt bei der Gezeitenanalyse der stündlichen Daten des Gravimeters LCR-G-xx1F auf, d.h. der Anteil der Störsignale ist hier im Vergleich zu den anderen Datensätzen relativ gering. Es ist allerdings zu beachten, dass die Registrierungen, anders als bei den Gravimetern A206 und A233, insofern weitgehend ungestört sind, als lediglich nur in kurzen Zeiträumen zu Beginn und am Ende eines Registrierabschnitts Bestimmungen des Registriermaßstabs ausgeführt wurden, wobei die Daten dieser kurzen Zeiträume von der Analyse ausgeschlossen wurden. Daher kann von dem genannten Sachverhalt nur bedingt auf bessere instrumentelle Eigenschaften des Gravimeters LCR-G-xx1F geschlossen werden. Andererseits beträgt bei Gravimeter A233 der Zeitraum, in dem mehr oder weniger durchgängig eine größer Anzahl von instrumentellen Arbeiten unter anderem zur Bestimmung des Registriermaßstabes ausgeführt wurden, über 300 Tage gegenüber einem Gesamt-Beobachtungszeitraum von 560 Tagen (siehe Abschnitt G3.2.2); bei Gravimeter A206 umfasst der gesamte Beobachtungszeitraum 1275 bzw. 1165 Tage (siehe Abschnitte G2.4.5 und G2.5.5).

Bemerkenswert ist der deutliche Unterschied der Verhältniszahlen der Standardabweichungen der Gewichtseinheit bei Gravimeter A206, und zwar zwischen den Werten, die sich aus den Analysen der *gefilterten* und der *ungefilterten* Registrierdaten ergeben; die Verbesserung durch die Anwendung des Filters Pertz59 ist bei den *gefilterten* Daten wesentlich *größer*. Dies bedeutet, dass der relative Anteil von Störsignalen in den gefilterten Daten *höher* ist als in den ungefilterten Daten. Nun unterscheiden sich aber die beiden Sätze der gefilterten und ungefilterten Registrierdaten sowie die aus diesen abgeleiteten stündlichen Werte (abgesehen vom hier nicht in Betracht zu ziehenden Registriermaßstab) lediglich durch die Wirkungen des bei den gefilterten Daten zwischengeschalteten RC-Glieds als passives Filter (siehe Abschnitt E1). Daraus folgt nun zwangsläufig die Einstufung des RC-Glieds als potentielle Störquelle, eine Schlussfolgerung die eine plausible und mögliche Erklärung erfordert.

Bei Gravimeter A206 liegt die den gravimetrischen Gezeiten zugeordnete Spanne des Ausgangssignals lediglich im Bereich von 10mVolt. Durch den Spannungsteiler des RC-Glieds verringert sich diese Spanne nochmals um den Faktor 3,6, d.h. eine angestrebte relative Auflösung des Nutzsignals von etwa 1% führt zu Spannungswerten im Bereich von μ Volt. Es ist nicht völlig auszuschließen, dass in diesem Spannungsbereich an den Anschlüssen der verwendeten Kondensatoren mit einer Kapazität von jeweils immerhin 40 μ F zeitweilig geringe Störspannungen aufgetreten sind, und zwar als Folge elektrochemischer Reaktionen auf Zustandsänderungen äußerer Parameter wie z.B. Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck [BONATZ 2004]. Da andererseits, wie gezeigt, die Gezeitenanalyse auch der *ungefilterten* Ausgangssignale des Gravimeters A206 im Prinzip zu durchaus brauchbaren Ergebnissen führen kann, wird das verwendete RC-Glied vorerst nicht mehr eingesetzt.

6.8.2 Die Häufigkeitsverteilung der Residuen

Wie bei der Verwendung des Pertz57-Filters (siehe Abschnitte G2 und G3 sowie E3.2.3) zeigen auch die sich auf das numerische Filter Pertz59 beziehenden vorstehenden Diagramme, dass die Residuen nach der Gezeitenanalyse eine von der Normalverteilung signifikant abweichende Häufigkeitsverteilung aufweisen, die allerdings unterschiedlich ausgeprägt ist. Auffällig ist besonders der Unterschied in der Verteilung der Residuenhäufigkeiten nach der Gezeitenanalyse der Daten des Gravimeters LCR-G-xx1F mit und ohne Ansatz einer Luftdruckregression, wobei im Zentralbereich hier die Abweichungen von der Normalverteilung bei Berücksichtigung des Luftdrucks deutlich größer sind als ohne Ansatz einer Luftdruckregression; der gleiche Sachverhalt tritt auf bei Einsatz des Pertz57-Filters.

Offensichtlich treten auch nach Verwendung des Pertz59-Algorithmus im zeitlichen Verlauf der gefilterten stündlichen Signalwerte weiterhin Abweichungen gegenüber dem gravimetrischen Analysemodell auf, die hinsichtlich ihres Betrags den statistisch determinierten Grenzwert überschreiten. In solchen Zeitabschnitten kann der Vergleich des zeitlichen Verlaufs möglicher Einflussgrößen mit dem zeitlichen Verlauf der Residuen zu Informationen über die Ursache führen und damit potentiell die Beseitigung einzelner Störsignale in den beobachteten Messwerten ermöglichen. Bei unregelmäßigem Auftreten sowie begrenzter Häufigkeit und Größe der Störsignale kann man im allgemeinen davon ausgehen, dass ein relevanter Einfluss auf die Schätzergebnisse der Gezeitenanalyse durch Ausdehnung des Registrierzeitraums weitgehend vermieden werden kann. Unter anderem liegt hier der Vorteil langer Beobachtungsreihen.

6.8.3 Die Gezeitenparameter

In Tabelle G.68 wurden die unter Verwendung des numerischen Filters Pertz59 für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 und die Partialtide S_1 berechneten Gezeitenparameter einander gegenübergestellt.

Der Vergleich der in Tabelle G.68 zusammengestellten Ergebnisse für Gravimeter A233 und A206 zeigt bei den *Amplitudenquotienten* für die Tiden O_1 K_1 M_2 eine Übereinstimmung zwischen 0,1 und 0,4‰, sowohl ohne, als auch mit Ansatz einer Luftdruckregression. Bei P_1 beträgt der Unterschied in beiden Fällen etwas über 1 ‰ und ist somit deutlich kleiner als der Wert von 2,4‰ nach der Gezeitenanalyse mit Verwendung des Filters Pertzev57 (siehe Abschnitt G4, Tabelle G.54). Die Berücksichtigung der zeitlichen Luftdruckvariationen führt bei Tide S_2 zu einer Verringerung des Verhältnisses von 4,5‰ auf 1,3‰.

Die Gegenüberstellung der Amplitudenquotienten für Gravimeter A233 mit den Beträgen für Gravimeter LCR-G-xx1F lässt einen systematischen Maßstabsunterschied erkennen; dieser beträgt 1,9‰ mit Luftdruckregression (2,0‰ ohne Luftdruckregression), wenn man nur die Werte für die Tiden O_1 K_1 M_2 zugrunde legt; berücksichtigt man auch die für die Tiden P_1 und S_2 berechneten Werte, so ergibt sich ein Unterschied von 1,4‰ (bzw. 2,0‰).

Die genannten systematischen Sachverhalte sind bemerkenswert, denn alle genannten Unterschiede sind nach statistischen Kriterien, also mit Bezug auf die den Unterschieden zugeordneten Standardabweichungen weit von einer Signifikanz entfernt.

Bei den *Phasenverschiebungen*, die maßstabsunabhängig bestimmt werden, sollten die aus den *ungefilterten* Messwerten des Gravimeter A206 berechneten Phaseninformationen nur begrenzt in Betracht gezogen werden, denn es tritt bei der Partialtide K_1 (beobachtete Amplitude 49 μ Gal) eine statistisch signifikante Differenz gegenüber den Ergebnissen der anderen drei Zeitreihen auf, die außerhalb des physikalischen Plausibilitätsbereichs liegt. Gleiches gilt allerdings auch für Gravimeter LCR-G-xx1F bei der Partialtide P_1 ; diese Tide ist jedoch, im Gegensatz zu K_1 (beobachtete Amplitude 16 μ Gal), a-priori und mit Bezug auf die bisherigen Auswertergebnisse als relativ stärker durch tägliche Störeffekte beeinflusst einzustufen. Sieht man ferner von den großen Unterschieden der für die Partialtide S_2 berechneten Phasenverschiebungen ab, so liegen die Abweichungen zwischen den Berechnungsergebnissen überwiegend im Bereich von lediglich einigen Hundertstelgrad, wobei in einer größeren Anzahl von Fällen die mit *Gravimeter A233* gewonnenen Ergebnisse im Bereich des Streuungsmittels liegen.

Die großen Streuungen der für die Partialtide S_1 (beobachtete Amplituden 0,4 bis 0,8 μ Gal) berechneten Gezeitenparameter lassen unterschiedliche Auswirkungen von unregelmäßig auftretenden Störprozessen erkennen, die mit lediglich quasi-ganztägiger Periodizität ablaufen.

Ergebnisunterschiede, die bei Verwendung der Filter Pertzev57 und Pertzev59 aufgetreten sind (Tabelle G.69 bis Tabelle G.74):

- Partialtide O_1 : die Differenz der *Amplitudenquotienten* beträgt maximal 0,00011 (A233 ohne Luftdruckregression), die Differenzen der *Phasenverschiebungen* liegen einheitlich unter dem Betrag von 0°,01.
- Partialtide P_1 : Die maximalen Differenzen der *Amplitudenquotienten* betragen 0,00100 (A233 ohne Luftdruckregression) und 0,00111 (A233 mit Luftdruckregression); die Beträge aller anderen Unterschiede sind kleiner als 0,00042. Maximale Differenzbeträge der *Phasenverschiebungen* 0°,069 (A233 ohne Luftdruckregression) und 0°,067 (A233 mit Luftdruckregression); alle anderen Unterschiede sind kleiner als 0°,016.
- Partialtide S_1 : relativ geringe Auswirkungen der stärkeren Signalfilterung auf die berechneten Gezeitenparameter.
- Partialtide K_1 : Maximale Differenz der *Amplitudenquotienten* 0,00019 (A206 mit Luftdruckregression, ungefilterte Messwerte) und 0,00018 (A206 ohne Luftdruckregression, ungefilterte Messwerte). Maximaler Differenzbetrag der *Phasenverschiebungen* 0°,069 (A233 ohne Luftdruckregression), alle anderen Beträge sind kleiner als 0°,007.
- Partialtide M_2 : Maximale Differenz der *Amplitudenquotienten* 0,00031 (LCR-G-xx1F mit Luftdruckregression), die Beträge aller anderen Unterschiede sind kleiner als 0,00007. Maximaler Differenzbetrag der *Phasenverschiebungen* 0°,018 (LCR-G-xx1F mit Luftdruckregression), alle anderen Beträge sind kleiner als 0°,012.
- Partialtide S_2 : Maximale Differenz der *Amplitudenquotienten* 0,00418 (LCR-G-xx1F mit Luftdruckregression), die Beträge aller anderen Unterschiede sind kleiner als 0,00025. Maximale Differenzbeträge der *Phasenverschiebungen* 0°,288 (LCR-G-xx1F mit Luftdruckregression), 0°,045 (A233 ohne Luftdruckregression), 0°,025 (A233 ohne Luftdruckregression); alle anderen Beträge sind kleiner als 0°,01.

Einige der aufgetretenen größeren Differenzen könnten nach statistischen Kriterien als signifikant eingestuft werden.

Die Anwendung des Pertz59-Filters führt zu Veränderungen gegenüber den mit Hilfe des Pertz57-Filters gewonnenen Analyseergebnissen, die hinsichtlich der berechneten Gezeitenparameter überwiegend als gering einzustufen sind, wenn man das Ziel einer Bestimmungssicherheit von 1‰ für die Amplitudenquotienten und von 0°,01 für die Phasendifferenzen zugrunde legt (Aufgabenstellung). Nicht zuletzt als einfache Maßnahme zu Erkennung des Vorhandenseins von relevanten Störsignalen in den Ausgangsdaten, die das Gezeitensignal überlagern, erweist es sich als sinnvoll, Gezeitenanalysen komplementär mit beiden Filtern durchzuführen.

6.8.4 Das Gravimeter A233 als Referenzgravimeter

Vergleicht man die mit dem *Gravimeter A233* unter Verwendung des numerischen Filters Pertz59 gewonnenen Ergebnisse mit jenen des Gravimeters A206, gefilterte Registrierwerte, so liegt die Differenz der Maßstäbe der Amplitudenquotienten bei den großen Hauptpartialtiden O_1 K_1 M_2 unter 0,5‰, bei den relativ etwas stärker gestörten kleineren Partialtiden P_1 S_2 im Bereich von lediglich 1‰. Der Vergleich mit den Ergebnissen des Gravimeters LCR-G-xx1F deutet auf einen systematischen Maßstabsunterschied hin im Bereich von lediglich 1,5 bis 2‰. Die für die Partialtide S_1 berechneten Amplitudenquotienten lassen eine lediglich geringe Amplitude ganztägiger Störprozesse erkennen.

Sieht man von den Ergebnissen für die Partialtide S_2 ab, so stimmen die berechneten Phasenverschiebungen bei den Hauptpartialtiden innerhalb weniger Hundertstelgrad überein.

Mit den Registrierwerten des Gravimeters A233 wurden die besten Modellanpassungen erzielt, d.h. in diesen Signalen sind vergleichsweise geringe Störungen enthalten. Die elektromagnetische Eicheinrichtung ermöglicht mit hoher Auflösung eine stetige Überwachung bzw. Bestimmung des jeweils aktuellen Registriermaßstabs und des Reaktionsverhaltens des Gravimeters gegenüber mechanischen (gravimetrischen) Eingangssignalen. Das Gravimeter A233 wird daher bis auf weiteres als Referenzgravimeter definiert; die mit diesem Gravimeter bestimmten Gezeitenparameter dienen als Bezugswerte, deren statistische Signifikanz durch Weiterführung der Beobachtungen laufend verbessert wird.

6.8.5 Der Einfluss von Ungenauigkeiten der Gezeitenparameter

Prinzipiell darf bei der Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Modellwerte der beobachteten gravimetrischen Gezeiten, die auf der Grundlage bekannter Gezeitenparameter ausgeführt wird, der Effekt der atmosphärischen Partialtide S_2 nicht eliminiert werden, da es sich um eine reale Variation der Beobachtungsgröße handelt. Infolgedessen muss bei dieser Aufgabenstellung jener Parametersatz verwendet werden, der *ohne* Ansatz einer Luftdruckregression ermittelt wurde. Jedoch beträgt die Amplitude des atmosphärischen Effekts, wie gezeigt, lediglich 0,06 μ Gal, also nur 0,2‰ der maximalen, gezeitenbedingten Schwereänderungen von etwa 300 μ Gal und spielt daher mit Bezug auf die (mit großer Wahrscheinlichkeit) erreichte Maßstabsgenauigkeit der beobachteten gravimetrischen Gezeiten von relativ etwa 1‰ keine wesentliche Rolle. Von daher könnten im genannten Zusammenhang die Gezeitenparameter, die aus den Beobachtungen mit dem Gravimeter A206 gewonnen wurden, und die – aus welchen Gründen auch immer – keinen atmosphärischen Luftdruckeffekt enthalten, unter praktischen Gesichtspunkten den zuvor genannten Bezugswerten als weitgehend gleichwertig eingestuft werden.

Der Einfluss von Phasenfehlern bzw. eines zeitlichen Versatzes auf das Ergebnis der Berechnung der gravimetrischen Gezeiten ist bei Verwendung der genannten Bezugswerte gleichermaßen unkritisch: Im ganztägigen Band beträgt die Änderung des Phasenwinkels 0°,004 pro Sekunde, im halbtägigen Band 0°,008 pro Sekunde. Einem Fortschritt von 1 Zeitsekunde entspricht andererseits bei einem zeitlichen Schweregradienten von 50 μ Gal/h, der im Verlauf der gravimetrischen Gezeiten maximal auftreten kann, ein Betrag von lediglich 0,014 μ Gal. Für die einzelnen Partialtiden reduziert sich dieser Wert in Abhängigkeit von der Amplitude. Im Bereich des maximalen Signalgradienten einer Sinusschwingung gilt bei einer Änderung des Phasenwinkels um 0°,01 für die zugeordnete Signaländerung $dS = A \sin(0°,01) = 0,00017A$, wenn A die Amplitude bezeichnet. Die größte Partialtide K_1 weist eine beobachtete Amplitude von 49 μ Gal auf; daraus ergibt sich eine maximale Signaländerung von lediglich 0,009 μ Gal pro 0°,01 Phasenänderung. Die beobachtete Amplitude der Partialtide S_2 beträgt 17 μ Gal; dem entspricht ein Wert von 0,003 μ Gal/0°,01 oder bei einer Phasengenauigkeit von 0°,1 eine Änderung des berechneten Schwerewertes von lediglich 0,03 μ Gal (entsprechend 0,1‰ der maximalen Signalweite der gravimetrischen Gezeiten von 300 μ Gal).

7 Der gravimetrische Effekt der Meeresgezeiten

Auf einen Bezugskörper, der sich im kosmischen Nahbereich eines oder mehrerer Himmelskörper befindet, wirken als Funktion der Entfernungen sowie der geometrischen Ausdehnung des Bezugskörpers gravitative Differenzkräfte, die im allgemeinen als Gezeitenkräfte bezeichnet werden. Rotiert der Bezugskörper im Gravitationsfeld eines anderen Körpers, so verändern sich diese Kräfte in den Körperpunkten periodisch und führen als Folge der visko-elastischen Körpereigenschaften zu periodischen Deformationen, im Falle der Erde zu den

Gezeiten des festen Erdkörpers, welche durch die Gravitationsfelder von Sonne und Mond dominant gesteuert werden.

Nun wirken die Gezeitenkräfte nicht nur auf die Massenelemente des festen Erdkörpers, sondern gleichermaßen auf die Wassermassen der Meere und erzeugen die Meeresgezeiten. Die gravimetrischen Wirkungen dieser Meeresgezeiten setzen sich aus drei Anteilen zusammen, dem Gravitationseffekt, dem Effekt der (dominant) vertikalen Deformation des Meeresbodens als Folge der variablen Auflasten und dem diesen Deformationen zugeordneten Effekt der Änderung des Schwerepotentials der festen Erde.

Während für ein globales Modell der Gezeiten der festen Erde inzwischen relativ sichere Lösungen vorliegen (z. B. auf der Grundlage des Erdmodells von Wahr-Dehant-Zschau), trifft dies bei den Meeresgezeiten nicht generell zu. Schwierigkeiten bei der Modellierung der Meeresgezeiten treten vor allem regional im Bereich komplexer Küstenverläufe auf, da diese häufig zu komplexen hydrodynamischen Vorgängen führen; eine wesentliche Rolle spielt auch die Meeresbodentopographie.

Zu den Gebieten mit sehr unterschiedlichen Amplituden- und Phasenverteilungen der Meeresgezeiten gehört das System von Englischem Kanal und Nordsee. Die in den Englischen Kanal periodisch einlaufenden und aus diesem ablaufenden Gezeiteströmungen führen im Golf von St.-Malo zu den bekannten extremen Tidenhuben mit Werten im Bereich von 10m (und zugeordneten gravimetrisch relevanten Deformationen der Oberfläche der festen Erde) [VERGNOLLE, BOUIN, MELACHROINOS, MOREL, DURAND, NICOLAS UND MASSON 2006]. Nördlich der Straße von Dover weiten sich die Küstenlinien von Britischen Inseln und Europäischem Kontinent auf; dies führt aus hydrodynamischen Gründen in nordöstlicher Richtung zu einer mehr oder weniger kontinuierlichen Abnahme der Gezeitenhübe mit schließlich nur noch geringen Beträgen an der Jütländischen Küste und für die Meeresgezeitentide M_2 zu lokalen Amphidromischen Punkten (Punkte ohne Gezeitenhub) westlich von Jütland und im Bereich der Norwegischen Südküste [ROCHOLL 1974].

Lediglich einer Veranschaulichung des komplexen Zusammenhangs zwischen den beobachteten Amplituden der Partialtiden der Meeresgezeiten und den zugeordneten lokalen Werten der gravimetrischen Gezeiten dient die nachfolgende Tabelle für die Nordsee-Pegelstation Oostende [MELCHIOR 1966]. Diese Station liegt etwa 80 km nordöstlich von Calais und etwa 170 km westlich des GeoObservatoriums Odendorf. Anders als bei den theoretischen gravimetrischen Gezeiten ist bei den Wasserstandsvariationen eine deutliche (hydrodynamisch begründete) Dominanz der Amplituden der beiden halbtägigen Haupttiden festzustellen.

Partialtide	Frequenz [°/h]	Theoretische Amplitude Vertikal [μGal]	Theoretische Amplitude EW [μGal]	Theoretische Amplitude NS [μGal]	Pegelamplitude [cm]
O_1	13,943	27	24	10	9
P_1	14,959	13	14	5	2
K_1	15,041	40	38	14	6
M_2	28,984	35	52	38	180
S_2	30,000	16	14	10	58

Tabelle G.77: Nordseepiegel Oostende, Hauptpartialtiden, Vergleich der theoretischen gravimetrischen Gezeitenamplituden mit den beobachteten Amplituden der Pegelbeobachtungen. Die Amplituden der beiden Horizontalkomponenten wurden von Winkleinheiten in Schwereeinheiten umgerechnet

Das erste, nach modernen Gesichtspunkten leistungsfähige globale Meeresgezeitenmodell wurde von Schwiderski entwickelt [SCHWIDERSKI 1979]. Prinzipiell lassen sich gravimetrische Effekte, die einem Meeresgezeitenmodell rechnerisch zugeordnet sind, mit Hilfe terrestrischer gravimetrischer Gezeitenbeobachtungen, die an geeigneten Standorten ausgeführt werden, innerhalb gewisser Toleranzen durch die Residualvektoren überprüfen [FRANCIS 1995], [MELCHIOR, DUCARME, VAN RUYBEKE, POITEVIN UND DE BECKER 1984]: Die aus Beobachtungen abgeleiteten gravimetrischen Gezeitenparameter werden mit den Elementen Amplitudenquotient und Phasenverschiebung vektoriell dargestellt; man bildet nun für die Partialtiden durch Addition der Vektoren der Modellwerte für die Gezeiten der festen Erde und der Meeresgezeiten den Vektor der theoretischen Parameter, dessen Differenz gegenüber dem Vektor der beobachteten Parameter als Residualvektor bezeichnet wird. Für Westeuropa führt das Modell Schwiderski bei den halbtägigen Partialtiden zu signifikanten Abweichungen der gravimetrischen Modellwerte von den Beobachtungswerten, offensichtlich als Folge von Modellfehlern für den Bereich Englischer Kanal und Nordsee (vgl. die großen Amplituden der halbtägigen Meeresgezeiten in Tabelle G.77).

Inzwischen stehen weitere, auch in der räumlichen Auflösung verbesserte Meereszeitenmodelle zur Verfügung.

Das von [LEPROVOST ET AL. 1994] entwickelte Modell **FES94.1** stellt eine hydrodynamische Lösung mit Hilfe Finiter Elemente dar. Die Maschenweite variiert zwischen 200 km für die Tiefsee und 10 km in den Küstenregionen. Inzwischen liegen verbesserte Modellwerte vor.

Die Nutzung der präzisen altimetrischen Daten der TOPEX/POSEIDON-Beobachtungen führten zu dem Modell **CSR3.0** [EANES UND BETTADPUR 1996], welches auf Basis einer 2,4jährigen Datenreihe langwellige Korrekturen für das FES94 Modell beinhaltet. Das nachfolgende Modell CSR4.0 ist eine Aktualisierung des CSR3.0 Modells, das noch längere Beobachtungsreihen verwendet. Außerhalb der durch TOPEX/POSEIDON abgedeckten Breitengrade von $\pm 66^\circ$ benutzen diese Modelle weiterhin das FES94 Modell. Auch das **FES** Modell wurde dadurch weiterentwickelt [LEFÉVRE ET AL. 2002], dass die fünf halbtägigen und drei ganztägigen Harmonischen mit den Daten von näherungsweise 700 küstennahen Stationen und 687 TOPEX/POSEIDON Beobachtungspunkten im Bereich der Tiefsee kombiniert wurden.

Das **GOT** Modell der ozeanischen Gezeiten basiert auf dem von [RAY 1999] entwickelten Modell GOT99.2b, das Korrekturen für ein $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ -Modell auf der Grundlage harmonischer Analysen einer sechsjährigen TOPEX/POSEIDON-Beobachtungsreihe aufweist und vornehmlich auf dem hydrologischen FES94.1 Modell aufbaut und von diesem nur durch lokale Modelle für den Golf von Maine und den Golf von St. Lawrence, sowie dem persischen Golf, dem Mittelmeer und dem roten Meer abweicht.

Das ozeanische Gezeitenmodell **NAO99** [MATSUMOTO ET AL. 2000] überführt eine fünfjährige TOPEX/POSEIDON-Beobachtungsreihe in ein globales $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ hydrologisches Modell. Dabei lag ein Hauptaugenmerk auf der Verbesserung der Modelle in den Küstenregionen, welche durch die zusätzliche Verwendung von speziellen TOPEX/POSEIDON-Beobachtungen gegenüber den Modellen CSR und GOT auch erreicht wurde (für weitere Details siehe auch [BAKER UND BOS 2003]).

In der nachfolgenden Tabelle werden die für die Station GeoObservatorium Odendorf durch gravimetrische Beobachtung ermittelten Gezeitenparameter den aus oben genannten ozeanischen Gezeitenmodellen abgeleiteten Modellparametern gegenübergestellt; als Ergänzung sind die aus dem neueren Modell **TPX06** abgeleiteten Werte hinzugefügt (Berechnungen: B. Ducarme, ICET, März 2006).

Partialtide	beobachtete, luftdruckreduzierte Gezeitenparameter	Modellwerte CSR4	Modellwerte FES02	Modellwerte GOT00	Modellwerte NAO99	Modellwerte TPX06
Q ₁	1,14037 $\pm 0,00157$ -0°,4258 $\pm 0,0788$	1,14985 -0°,349	1,14432 +0°,024	1,14726 -0°,197	1,14983 -0°,326	1,14862 -0°,266
O ₁	1,14876 $\pm 0,00030$ +0°,0577 $\pm 0,0148$	1,15024 +0°,055	1,14999 +0°,072	1,15064 +0°,072	1,15014 +0°,133	1,15067 +0°,135
P ₁	1,14952 $\pm 0,00075$ +0°,0475 $\pm 0,0373$	1,14886 +0°,263	1,15210 +0°,092	1,15058 +0°,230	1,14955 +0°,259	1,15055 +0°,296
K ₁	1,13657 $\pm 0,00023$ +0°,2188 $\pm 0,0113$	1,13466 +0°,248	1,13804 +0°,106	1,13637 +0°,246	1,13519 +0°,242	1,13559 +0°,264
N ₂	1,17551 $\pm 0,00164$ +3°,1302 $\pm 0,0799$	1,17060 +3°,087	1,16772 +2°,863	1,17644 +3°,029	1,18348 +3°,059	1,19763 +2°,200
M ₂	1,18829 $\pm 0,00029$ +2°,2253 $\pm 0,0141$	1,18735 +2°,252	1,18890 +2°,142	1,18997 +2°,170	1,18997 +2°,087	1,18979 +2°,131
S ₂	1,19198 $\pm 0,00063$ +0°,7139 $\pm 0,0310$	1,19135 +1°,185	1,19569 +0°,872	1,19343 +0°,984	1,19104 +0°,672	1,19069 +0°,754
K ₂	1,19441 $\pm 0,00187$ +0°,9440 $\pm 0,0897$	1,18999 1°,145	1,19387 +0°,777	1,18918 +0°,911	1,18936 +0°,741	1,19031 +0°,366

Tabelle G.78: GeoObservatorium Odendorf - Gegenüberstellung von beobachteten, luftdruckreduzierten Gezeitenparametern (Tabelle G.61) und Modellwerten

Wie die Tabelle zeigt, lässt der Vergleich der für die Station GeoObservatorium Odendorf ermittelten Gezeitenparameter mit den zugeordneten theoretischen Werten, welche aus den fünf Meereszeitenmodellen (in Verbindung mit dem Erdmodell Dehant-Defraigne-Wahr) abgeleitet wurden, aufgrund der auftretenden Streuungen eine sichere Aussage bezüglich eines als ganzes bestpassenden Modells nicht zu, insbesondere dann nicht, wenn die statistischen Signifikanzangaben zu den aus den gravimetrischen Beobachtungen abgeleiteten Gezeitenpara-

metern mitberücksichtigt werden. Zwar lässt sich für jeden “beobachten” Parameter sowohl bei den Amplitudenquotienten, als auch bei den Phasenverschiebungen mindestens ein theoretischer Wert finden, der mit den Beobachtungsergebnissen weitgehend übereinstimmt (in der Tabelle hervorgehoben), jedoch sind diese Übereinstimmungen unterschiedlichen Modellen zugeordnet. Nach dem Kriterium der *Häufigkeit* der maximalen Übereinstimmungen wären die beiden Modelle CSR4 und FES02 zu bevorzugen, jedoch tritt bei den berechneten Phasendifferenzen für K_1 in FES02 eine relativ große Differenz gegenüber dem beobachteten Wert auf; dieser Sachverhalt kann die Schwierigkeiten bei der Wahl sinnvoller Bewertungskriterien verdeutlichen. Weitere Kriterien könnten die Übereinstimmung im ganztägigen oder halbtägigen Gezeitenband sein, die Übereinstimmung bei den Amplitudenquotienten oder bei den Phasenverschiebungen, das Kriterium der partialtidenabhängigen räumlichen Unterschiede in den auftretenden Amplituden und Phasen der Meereszeiten im Bereich des Englischen Kanals und der Nordsee. Somit wäre die Entscheidung über ein Bewertungskriterium aufgabenbezogen zu treffen.

Im vorliegenden Falle liegt es nahe, in Hinblick auf die relativ guten Übereinstimmungen der für die einzelnen Partialtiden berechneten Modellwerte der *Amplitudenquotienten* über den Vergleich mit den “beobachteten” Werten eine Überprüfung des Registriermaßstabs vorzunehmen. Hierzu wird zunächst die Arbeitshypothese aufgestellt, dass durch die Bildung der jeweiligen Mittel aus fünf zugeordneten Modellwerten die Auswirkung eines Teils der die Einzelwerte beeinflussenden systematischen Fehler eliminiert wird.

Partialtide	Modellmittel der Amplitudenquotienten	beobachteter, luftdruckreduzierter Amplitudenquotient	Differenzen	Relative Differenzen
O_1	1,15034	1,14876	-0,00158	-1,38‰
P_1	1,15033	1,14952	-0,00081	-0,70‰
K_1	1,13597	1,13657	+0,00060	+0,53‰
M_2	1,18920	1,18829	-0,00091	-0,77‰
S_2	1,19244	1,19198	-0,00046	-0,39‰
Mittel				-0,54‰

Tabelle G.79: GeoObservatorium Odendorf - Gegenüberstellung von beobachteten, luftdruckreduzierten Gezeitenparametern (Tabelle G.61) und gemittelten Modellwerten für die Hauptpartialtiden

Bei Annahme der Gültigkeit der oben genannten Arbeitshypothese ergibt sich aus der Tabelle die Schlussfolgerung, dass der Registriermaßstab, welcher für die gravimetrischen Gezeitenbeobachtungen in der Station GeoObservatorium Odendorf ermittelt wurde, einen systematischen Fehler größer als relativ 1‰ *nicht* aufweist (vgl. auch Tabelle G.81). Auffällig bei der Partialtide O_1 sind die im Vorzeichen einheitlichen Abweichungen zwischen allen Modellwerten und dem aus Beobachtungen abgeleiteten Betrag der Amplitudenquotienten.

Für Untersuchungen im Zusammenhang mit auftretenden globalen und regionalen Strukturen in Betrag und Ausrichtung von Residualvektoren [MELCHIOR UND DUCARME 1991] wurden seinerzeit vom Internationalen Erdgezeitenzentrum für eine größere Anzahl von Beobachtungsstationen Modellwerte auf der Grundlage der (älteren) Meereszeitenmodelle Schwiderski80, CSR3.0 und FES95.2 berechnet. Auf gleicher Grundlage wurden daher auch für die Beobachtungsstation GeoObservatorium Odendorf entsprechende Modellwerte gebildet (Berechnungen: O. Francis, ECGS, Januar 2005). Die in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellten Modellparameter sind daher vergleichbar mit den entsprechenden Berechnungsergebnissen in den vorgenannten anderen Stationen. In Klammern hinzugefügt wurden die Modellwerte der verbesserten Meereszeitenmodelle CSR4 und FES02 aus Tabelle G.78.

Partialtide / beobachtete, luftdruckreduzierte Amplitude	beobachtete, luftdruckreduzierte Gezeitenparameter <i>Standardabweichung (ETERNA 3.30)</i>	Parameter bezogen auf Meereszeitenmodell Schwiderski80 Differenzen	Parameter bezogen auf Meereszeitenmodell CSR3.0 Differenzen (CSR4)	Parameter bezogen auf Meereszeitenmodell FES95.2 Differenzen (FES02)
Q ₁ 6,6μGal	1,1404 -0°,43 ±0,0016 ±0°,08	1,1502 -0°,25	1,1512 -0°,33 (1,1498 -0°,35)	1,1464 -0°,22 (1,1443 +0°,02)
O ₁ 35,0μGal	1,1488 +0°,06 ±0,0003 ±0°,015	1,1499 +0°,07 +0,0011 +0°,01	1,1503 +0°,12 +0,0015 +0°,06 (1,1502 +0°,06)	1,1493 +0°,09 +0,0005 +0°,03 (1,1500 +0°,07)
P ₁ 16,3μGal	1,1495 +0°,05 ±0,0008 ±0°,04	1,1504 +0°,21 +0,0009 +0°,17	1,1496 +0°,33 +0,0001 +0°,28 (1,1489 +0°,26)	1,1513 +0°,24 +0,0018 +0°,19 (1,1521 +0°,09)
K ₁ 48,7μGal	1,1366 +0°,22 ±0,0002 ±0°,01	1,1368 +0°,20 +0,0002 -0°,02	1,1357 +0°,31 -0,0009 +0°,09 (1,1347 +0°,25)	1,1373 +0°,24 +0,0007 +0°,02 (1,1380 +0°,11)
N ₂ 6,8μGal	1,1755 +3°,13 ±0,0016 ±0°,08	1,1817 +2°,75	1,1698 +2°,92 (1,1706 +3°,09)	1,1719 +2°,82 (1,1677 +2°,86)
M ₂ 35,9μGal	1,1883 +2°,23 ±0,0003 ±0°,014	1,1945 +2°,21 +0,0062 -0°,02	1,1867 +2°,34 -0,0016 +0°,11 (1,1874 +2°,25)	1,1903 +2°,19 +0,0020 -0°,04 (1,1889 +2°,14)
S ₂ 16,8μGal	1,1920 +0°,71 ±0,0006 ±0°,03	1,1966 +0°,86 +0,0046 +0°,15	1,1939 +1°,02 +0,0019 +0°,31 (1,1914 +1°,18)	1,1949 +0°,88 +0,0029 +0°,17 (1,1957 +0,87)
K ₂ 4,6μGal	1,1944 +0°,94 ±0,0019 ±0°,09	1,1947 +0°,74	1,1928 +0°,92 (1,1900 +1°,14)	1,1942 +1°,07 (1,1939 +0°,78)

Tabelle G.80: GeoObservatorium Odendorf - Gegenüberstellung von beobachteten, luftdruckreduzierten Gezeitenparametern (Tabelle G.61) und den zugeordneten Werten der Meereszeitenmodelle Schwiderski80, CSR3.0 und FES95.2

Der Vergleich der Modellwerte CSR3.0 und CSR4 sowie FES95.2 und FES02 mit den zugeordneten, in der Station GeoObservatorium Odendorf beobachteten Werten zeigt zwar bei den neueren Modellen in vielen Fällen eine Verbesserung der Annäherung, sowohl bei den Amplitudenquotienten, als auch bei den Phasenverschiebungen, jedoch in anderen Fällen eher eine leichte Verschlechterung. Daraus könnte geschlossen werden, dass ein höherer Modellierungsaufwand nicht zwangsläufig zu einer Verbesserung der physikalischen Signifikanz der berechneten Meereszeitenparameter führen muss. Im halbtägigen Gezeitenband treten lediglich im Modell Schwiderski80 bei den Amplitudenquotienten der Hauptpartialtiden M₂ und S₂ deutliche Unterschiede gegenüber den beobachteten Werten auf, aber bei gleichzeitig sehr guter Übereinstimmung der Phasenverschiebungen. Auffällig sind bei der Partialtide P₁ die großen Differenzen der aus den gravimetrischen Beobachtungen abgeleiteten Phasenverschiebung gegenüber den in der Tabelle G.78 und in Tabelle G.80 nachgewiesenen zugeordneten Modellwerten; eine bemerkenswerte Ausnahme stellt das Ergebnis des weiterentwickelten Modells FES02 dar.

8 Die Überprüfung des Erdmodells Dehant-Defraigne-Wahr

Das Erdmodell Dehant–Defraigne–Wahr basiert auf der Annahme eines nicht-elastischen, viskosen Körpers, der sich nicht vollständig im hydrostatischen Gleichgewicht befindet [DEFRAIGNE, DEHANT UND WAHR 1996], [DEHANT UND WAHR 1991], [DEHANT 1991]. Die Berechnung der zeitabhängigen Verformungen dieses Körpers im Feld der Gezeitenkräfte (abgeleitet aus dem Gezeitenpotential) führt zu den geometrischen Modellgezeiten der festen Erde, aus denen sich wiederum die zugeordneten Schwerevariationen in Form von Modellwerten berechnen lassen, die im allgemeinen durch Modellwerte der Parameter der Partialtiden dargestellt werden. Diese Modellparameter kann man nun den beobachteten, also durch Gezeitenanalyse von Schwerebeobachtungen gewonnenen Gezeitenparametern gegenüberstellen [DEHANT UND DUCARME 1987] und aus dem Grad der Übereinstimmungen Rückschlüsse ziehen, inwieweit ein Erdmodell die physikalische Wirklichkeit beschreibt. Zuvor müssen diese Gezeitenparameter - hier die in Tabelle G.61 nachgewiesenen Werte - jedoch um die Effekte der atmosphärischen Gezeiten und der Meereszeiten reduziert werden; bei den atmosphärischen Gezeiten ist dies geschehen durch Ansatz einer Luftdruckregression im Rahmen der Gezeitenanalyse, bei den Meereszeiten durch vektorielle Subtraktion der Modellwerte für die Meereszeiten von den luftdruckreduzierten beobachteten Partialtiden (Amplituden und Phasen).

Der aus dem Erdmodell Dehant-Defraigne-Wahr abgeleitete Verlauf der gravimetrischen Modellgezeiten weist keine zeitlichen Verzögerungen auf gegenüber dem aus dem Gezeitenpotential abgeleiteten Verlauf der Gezeitenkräfte (Gezeitenbeschleunigungen), die Phasenverschiebungen der Partialtiden sind somit Null.

Partialtide/ theoretischer Amplitudenquotient für Erdmodell DDW Dehant-Defraigne-Wahr	Amplitudenquotient CSR4 relative Differenz zu DDW	Amplitudenquotient FES02 relative Differenz zu DDW	Amplitudenquotient GOT00 relative Differenz zu DDW	Amplitudenquotient NAO99 relative Differenz zu DDW	Amplitudenquotient TPX06 relative Differenz zu DDW
O₁ 1,1543 mittl. Diff. -1,37‰	1,1528 -1,30‰	1,1531 -1,04‰	1,1524 -1,65‰	1,1529 -1,21‰	1,1524 -1,65‰
P₁ 1,1491 mittl. Diff. -0,70‰	1,1498 +0,61‰	1,1465 -2,26‰	1,1480 -0,96‰	1,1491 0,00‰	1,1481 -0,87‰
K₁ 1,1345 mittl. Diff. +0,53‰	1,1364 +1,67‰	1,1330 -1,32‰	1,1347 +0,18‰	1,1359 +1,23‰	1,1355 +0,88‰
M₂ 1,1620 mittl. Diff. -0,83‰	1,1630 +0,86‰	1,1613 -0,60‰	1,1603 -1,46‰	1,1602 -1,55‰	1,1604 -1,38‰
S₂ 1,1620 mittl. Diff. -0,35‰	1,1628 +0,69‰	1,1583 -3,18‰	1,1606 -1,20‰	1,1629 +0,77‰	1,1633 +1,12‰

Tabelle G.81: GeoObservatorium Odendorf - Vergleich der luftdruck- und meeresgezeitenreduzierten Amplitudenquotienten mit den entsprechenden Werten des Erdmodells Dehant – Defraigne – Wahr, Hauptpartialtiden O₁ P₁ K₁ M₂ S₂ - Meeresgezeitenmodelle CSR4, FES02, GOT00, NAO99 und TPX06

Die Übereinstimmung der reduzierten Parameter mit den theoretischen Werten des Erdmodells Dehant-Defraigne-Wahr liegt bei den Einzelwerten überwiegend im Bereich von relativ 1 bis 2‰; die maximale Abweichung beträgt 3,2‰ bei der Partialtide S₂ für das Modell FES02. Bildet man die Mittel der Einzelabweichungen, so ergeben sich Unterschiede von unter 1,4‰; die höchste Abweichung tritt bei der Partialtide O₁ auf. Somit bestätigen die im GeoObservatorium Odendorf ausgeführten gravimetrischen Beobachtungen das Erdmodell Dehant-Defraigne-Wahr innerhalb einer Toleranz von 1 bis 2‰. Selbstverständlich wird der erreichte Grad der physikalischen Signifikanz der aktuellen Meeresgezeitenmodelle hinsichtlich der Ergebnisse der Amplitudenberechnungen gleichermaßen nachgewiesen.

Dass es durchaus zulässig und sinnvoll ist, weiterhin auch die älteren Meeresgezeitenmodelle CSR3 und FES95 für eine Reduktion der im Gebiet des GeoObservatoriums beobachteten gravimetrischen Amplituden zu benutzen, zeigt die nachfolgende Tabelle.

Partialtide/ theoretischer Amplitudenquotient für Erdmodell DDW Dehant-Defraigne-Wahr	beobachteter, luftdruckreduzierter Amplitudenquotient	Amplitudenquotient reduziert mit Meeresgezeitenmodell Schwiderski und relative Abweichung zu DDW	Amplitudenquotient reduziert mit Meeresgezeitenmodell CSR3.0 und relative Abweichung zu DDW	Amplitudenquotient reduziert mit Meeresgezeitenmodell FES95.2 und relative Abweichung zu DDW
O₁ 1,1543	1,1488 ±0,0003	1,1532 -0,95‰	1,1528 -1,30‰	1,1537 -0,52‰
P ₁ 1,1491	1,1495 ±0,0008	1,1482 -0,78‰	1,1490 -0,09‰	1,1473 -1,56‰
K₁ 1,1345	1,1366 ±0,0002	1,1343 -0,18‰	1,1354 +0,79‰	1,1337 -0,71‰
M₂ 1,1620	1,1883 ±0,0003	1,1558 -5,34‰	1,1637 +1,46‰	1,1600 -1,72‰
S ₂ 1,1620	1,1920 ±0,0006	1,1574 -3,96‰	1,1602 -1,55‰	1,1592 -2,41‰
	Filter Pertzév59 S ₁ : 1,42615±0,04601 -1°,7755±1°,8606 Luftdruck: 2,89559±0,06746 Standardabweichung der Gewichtseinheit (ETERNA 3.30) s = 5,681 nm/s ²	Summe Abweichungen -11,21‰ mittlere Abweichung -2,24‰ mittlere Abw. O ₁ ,P ₁ ,K ₁ -0,64‰	Summe Abweichungen -0,69‰ mittlere Abweichung -0,14‰ mittlere Abw. O ₁ ,P ₁ ,K ₁ -0,20‰	Summe Abweichungen -6,92‰ mittlere Abweichung -1,38‰ mittlere Abw. O ₁ ,P ₁ ,K ₁ -0,93‰

Tabelle G.82: GeoObservatorium Odendorf - Vergleich der luftdruck- und meeresgezeitenreduzierten Amplitudenquotienten mit den entsprechenden Werten des Erdmodells Dehant-Defraigne-Wahr, Hauptpartialtiden O₁ P₁ K₁ M₂ S₂ - Meeresgezeitenmodelle Schwiderski80, CSR3.0 und FES95.2

Bei den Partialtiden M_2 und S_2 werden die vorgenannten Unterschiede zwischen den mit dem Meereszeitenmodell Schwiderski reduzierten Amplitudenquotienten und den zugeordneten Werten des Erdmodells deutlich sichtbar. Die geringsten Abweichungen treten auf bei Anwendung des Meereszeiten Modells CSR3.0; sie erreichen Beträge von maximal lediglich 1,6%.

9 Vergleich der für die Station GeoObservatorium Odendorf ermittelten Gezeitenparameter mit den Beobachtungsergebnissen der benachbarten Observatorien Membach und Walferdange

Eine Möglichkeit zur metrologischen Überprüfung der für die Station GeoObservatorium Odendorf ermittelten Gezeitenparameter hinsichtlich möglicher Einflüsse ungenauer Bestimmungen des Registriermaßstabs oder instrumenteller Signalverzögerungen bietet der Vergleich mit den in benachbarten Stationen gewonnenen Ergebnissen. Diese Stationen sind das Observatorium Membach (etwa 15 km süd-südwestlich von Aachen) und das Observatorium Walferdange (etwa 4 km nördlich von Luxemburg-Stadt). Beide Stationen sind in unterirdischen Kammern innerhalb lokaler Formationen des Rheinischen Schiefergebirges eingerichtet; somit sind dort die örtlichen Beobachtungsbedingungen wesentlich günstiger als in Odendorf.

Die Stationen Odendorf und Membach liegen praktisch auf demselben Parallelkreis (siehe Tabelle G.83). Die Entfernungen betragen: Odendorf - Membach 60 km, Odendorf - Walferdange 120 km, Membach - Walferdange 110 km.

Station	Odendorf	Membach	Walferdange
Geographische Breite	50° 38' 52",8 N	50° 36' 33",3 N	49° 39' 52",9 N
Geographische Länge	06° 52' 22",8 E	06° 00' 23",8 E	06° 09' 10",1 E
Höhe	172 m	250 m	295 m

Tabelle G.83: Lage der Stationen Odendorf, Membach und Walferdange

In Membach und Walferdange wurden die gravimetrischen Beobachtungen mit hochauflösenden Supraleitenden Gravimetern des Typs GWR ausgeführt. Da diese Instrumente über keine Eicheinrichtung verfügen, wurde der jeweilige Registriermaßstab durch Parallelbeobachtungen mit ballistischen Absolutgravimetern bestimmt [FRANCIS UND VAN CAMP 1998], [VAN CAMP 1998].

Nun sind die gravimetrischen Meereszeiteneffekte in den genannten drei Stationen aufgrund ihrer unterschiedlichen geographischen Lage mehr oder weniger verschieden, d.h. bei oben genannter Zielsetzung können die jeweils berechneten (lediglich luftdruckreduzierten) Gezeitenparameter wegen dieses systematischen Einflusses nicht direkt miteinander verglichen werden. Um die Vergleichbarkeit herzustellen ist es daher erforderlich, den gravimetrischen Effekt der Meereszeiten, wie zuvor in Abschnitt G8, durch entsprechende Reduktion möglichst weitgehend zu eliminieren. Zweifellos enthalten die Modellwerte der Meereszeiteneffekte systematische Fehler. Beim metrologischen Vergleich von Parametern, die in unterschiedlichen Stationen unter Verwendung desselben Meereszeitenmodells reduziert wurden, spielt jedoch weniger der jeweilige systematische Fehler eine Rolle als vielmehr dessen räumliche Änderung von Station zu Station; diese Änderung wird aber um so geringer sein, je geringer der räumliche Abstand der zu vergleichenden Stationen ist, d.h. bei benachbarten Stationen kann man davon ausgehen, dass ein wesentlicher Teil der Wirkung von Modellfehlern sich bei der Bildung von Parameterdifferenzen aufhebt. Somit ist es sinnvoll, die meereszeitenreduzierten Gezeitenparameter benachbarter Stationen für einen metrologischen Vergleich einander gegenüberzustellen. Dies geschieht in der nachfolgenden Tabelle, aufgliedert nach den Hauptpartialtiden, für die benachbarten Stationen Odendorf, Walferdange und Membach.

Partialtide/ Station	beobachtete, luftdruckreduzierte Gezeitenparameter Standardabweichung (ETERNA 3.30)	Gezeitenparameter nach Reduktion Schwiderski	Gezeitenparameter nach Reduktion CSR3.0	Gezeitenparameter nach Reduktion FES95.2
O₁ Odendorf	1,1488 +0°,06 ±0,0003 ±0°,015	1,1532 -0°,01	1,1528 -0°,06	1,1537 -0°,04
Walferdange	1,1488 +0°,050 ±0,00006 ±0°,003	1,1536 +0°,01	1,1534 -0°,05	1,1541 -0°,03
Membach Serie 1	1,1503 +0°,068 ±0,00008 ±0°,004	1,1548 0°,00	1,1543 -0°,05	1,1553 -0°,02
Membach Serie 2	1,1522 +0°,123 ±0,00009 ±0°,005	1,1567 +0°06	1,1562 0°,01	1,1572 +0°,03
Memb.1 > Memb.2	0,9984 -0°,055	0,9984 -0°,06	0,9984 -0°,06	0,9984 -0°,05
P₁ Odendorf	1,1495 +0°,05 ±0,0008 ±0°,04	1,1482 -0°,16	1,1490 -0°,28	1,1473 -0°,19
Walferdange	1,1498 +0°,171 ±0,0002 ±0°,009	1,1487 -0°,06	1,1491 -0°,18	1,1476 -0°,09
Membach Serie 1	1,1510 +0°,186 ±0,00014 ±0°,008	1,1497 -0°,04	1,1505 -0°,16	1,1486 -0°,07
Membach Serie 2	1,1542 +0°,327 ±0,0002 ±0°,011	1,1529 +0°,10	1,1537 -0°,02	1,1518 +0°,08
Memb.1 > Memb.2	0,9972 -0°,141	0,9972 -0°,14	0,9972 -0°,14	0,9972 -0°,15
K₁ Odendorf	1,1366 +0°,22 ±0,0002 ±0°,01	1,1343 +0°,02	1,1354 -0°,09	1,1337 -0°,03
Walferdange	1,1373 +0°,239 ±0,00005 ±0°,003	1,1351 +0°,02	1,1358 -0°,09	1,1343 -0°,02
Membach Serie 1	1,1381 +0°,237 ±0,00005 ±0°,003	1,1357 +0°03	1,1369 -0°,09	1,1351 -0°,02
Membach Serie 2	1,1392 +0°,336 ±0,00006 ±0°,004	1,1369 +0°,12	1,1380 +0°,01	1,1363 +0°,08
Memb.1 > Memb.2	0,9990 -0°,099	0,9989 -0°,09	0,9990 -0°,10	0,9989 -0°,10
M₂ Odendorf	1,1883 +2°,23 ±0,0003 ±0°,014	1,1558 0°,00	1,1637 -0°,11	1,1600 +0°,03
Walferdange	1,1871 +2°,344 ±0,00004 ±0°,002	1,1575 -0°,12	1,1637 -0°,12	1,1598 0°,00
Membach Serie 1	1,1890 +2°,372 ±0,00003 ±0°,002	1,1565 -0°,02	1,1653 -0°,14	1,1607 +0°,01
Membach Serie 2	1,1910 +2°,504 ±0°,00005 ±0°,003	1,1583 +0°,12	1,1672 -0°,01	1,1625 +0°,15
Memb.1 > Memb.2	0,9983 -0°,132	0,9984 -0°,14	0,9984 -0°,13	0,9985 -0°,14
S₂ Odendorf	1,1920 +0°,71 ±0,0006 ±0°,03	1,1574 -0°,15	1,1602 -0°,31	1,1592 -0°,18
Walferdange	1,1916 +0°,696 ±0,00008 ±0°,005	1,1568 -0°,35	1,1599 -0°,46	1,1582 -0°,33
Membach Serie 1	1,1941 +0°,672 ±0,00008 ±0°,004	1,1583 -0°,29	1,1613 -0°,47	1,1599 -0°,32
Membach Serie 2	1,1971 +0°,756 ±0,0001 ±0°,006	1,1613 -0°,21	1,1643 -0°,38	1,1630 -0°,23
Memb.1 > Memb.2	0,9975 -0°,084	0,9974 -0°,08	0,9974 -0°,09	0,9973 -0°,09

Tabelle G.84: Stationen Odendorf, Walferdange und Membach - Gegenüberstellung der reduzierten Gezeitenparameter der Hauptpartialtiden O₁ P₁ K₁ M₂ S₂

Das primäre Ziel der Gegenüberstellung ist die Überprüfung des gravimetrischen Maßstabs der in der Station Odendorf durchgeführten Beobachtungen sowie des ermittelten Signalnachlaufs des Referenzgravimeters (Abschnitt G6.8.4). Aus diesem Grunde ist es wegen der nachgewiesenen besonderen Empfindlichkeit der beobachteten Gezeitenphasen gegenüber Störprozessen sinnvoll, für den Phasentest lediglich die drei großen Partialtiden O_1 , K_1 und M_2 zum metrologischen Vergleich heranzuziehen.

Für die Stationen Odendorf, Walferdange und Membach (*Serie 1*) lässt sich das Ergebnis der Gegenüberstellungen wie folgt zusammenfassen:

- Die maximale relative Abweichung der *Amplitudenquotienten* von den in der Station Odendorf ermittelten Werten beträgt lediglich 1,5%. Besonders gute Übereinstimmungen bestehen mit der Station Walferdange. Bemerkenswert ist auch die gute Übereinstimmung mit den auf dem Modell Schwiderski basierenden Modellwerten für die halbtägigen Partialtiden; da diese Modellwerte einen bekannten systematischen Fehler aufweisen. Es wird damit bestätigt, dass für die genannte metrologische Überprüfung der für die Station Odendorf ermittelten Gezeitenparameter bei den Amplitudenquotienten primär die räumliche Änderung von Fehlern des Meeresgezeitenmodells bedeutsam ist und weniger der Fehler selber.
- Die Abweichungen der *Phasenverschiebungen* liegen für die Hauptpartialtiden O_1 , K_1 und M_2 überwiegend im Bereich von lediglich $0^{\circ},01$, bei einem Maximalwert von $0^{\circ},03$. Anders als bei den berechneten Amplitudenquotienten sind die auf dem Modell Schwiderski beruhenden Phasenergebnisse wegen der verstärkten Wirkungen von Modellfehlern auf die Phasen nicht zu verwenden.

Beachtung erfordern die Ergebnisdifferenzen zwischen Serie 1 und Serie 2 in der Station Membach, besteht doch eine gute Übereinstimmung mit den in den Stationen Walferdange und Odendorf bestimmten Parametern lediglich bei den Ergebnissen der Serie 1, nicht aber der Serie 2. Dies wirft selbstverständlich die Frage auf, welche der beiden Beobachtungsserien für den metrologischen Vergleich zu verwenden ist. Als Ursache für die genannten Ergebnisunterschiede könnten Ungenauigkeiten in der Bestimmung des Registriermaßstabs und des instrumentellen Signalnachlaufs in Betracht gezogen werden. Die eingesetzten messtechnischen Komponenten und deren Eigenschaften sowie die Ermittlung des Maßstabs und der instrumentellen Übertragungsfunktion sind für das eingesetzte Supraleitende Gravimeter und die Beobachtungsserie 1 eingehend dokumentiert in [FRANCIS UND VAN CAMP 1998], [VAN CAMP 1998], [FRANCIS, VAN CAMP, SCHOTT UND WENZEL 1998]. Bezüglich des *Registriermaßstabs* der Beobachtungsserie 1 ist aufgrund der genannten Dokumentation die Angabe einer erreichten Maßstabsgenauigkeit von relativ 1‰ nach messtechnischen Kriterien als realistisch zu bewerten, woraus zu folgern wäre, dass es der Registriermaßstab der Serie 2 ist, welcher eine relevante Ungenauigkeit aufweisen könnte. Aus den *Verhältnissen* der aus den gravimetrischen Beobachtungen abgeleiteten Amplitudenquotienten der Hauptpartialtiden ergibt sich zwischen Serie 1 und Serie 2 eine mittlere Maßstabdifferenz von relativ 1,9‰; der maximale *Unterschied* der Verhältniszahlen beträgt 1,8‰. Es stellt sich die Frage, ob dieser Betrag mit Bezug auf die erreichte statistische Auflösung der einzelnen Amplitudenquotienten als signifikant einzustufen ist.

Ändert man den Wert des Registriermaßstabs eines Datensatzes um einen bestimmten Faktor, so ändern sich nach der Gezeitenanalyse *alle* maßstabsrelevanten Parameter um exakt denselben Faktor. Bei unterschiedlichen Datensätzen wird diese Identität begrenzt durch den Grad der statistischen Parameterrauigkeit. Wie die Tabelle G.84 zeigt, liegen die berechneten Standardabweichungen der Amplitudenquotienten der drei großen Partialtiden bei relativ 10^{-4} oder darunter; der mittlere Maßstabsunterschied beträgt aber 14×10^{-4} bei einer maximalen Differenz von 7×10^{-4} (K_1/M_2); nach statistischen Gesichtspunkten (Standardabweichungen der Differenzen, 3σ -Kriterium) könnte diese Differenz somit durchaus als knapp signifikant eingestuft werden. Gleiches gilt für die bei den Partialtiden P_1 und S_2 auftretenden Maßstabdifferenzen. An dieser Stelle entsteht selbstverständlich wieder die Frage nach der Bewertung der berechneten Fehlermaße als statistische Informationsgrößen, hängen die Beträge der Fehlerangaben doch von der jeweiligen Wahl des stochastischen Modells ab; in Abschnitt D11 wurden (exemplarisch) die Unterschiede aufgezeigt, die hinsichtlich der berechneten Fehlermaße auftreten, wenn alternativ der Algorithmus Eterna 3.30 oder Eterna 3.40 gewählt wird. Vor wenigen Jahren wurde mit dem Analyseverfahren VAV [VENEDIKOV, ARONSO UND VIERA 2001], [VENEDIKOV, ARONSO UND VIERA 2003] eine Weiterentwicklung der „klassischen“ Analyseverfahren Venedikov [VENEDIKOV 1966a] vorgestellt, das für identische Beobachtungsdaten bei weitgehend identischen Schätzwerten im Vergleich zu den Eterna-Ergebnissen zu wesentlich geringeren und (wahrscheinlich realistischeren) Fehlerbeträgen führt. Mit den zu erwartenden VAV-Fehlermaßen wären mit großer Wahrscheinlichkeit die oben genannten Maßstabdifferenzen als eindeutig signifikant einzustufen (siehe auch [DUCARME, VANDERCOILDEN UND VENEDIKOV 2006]).

Alternativ zu den Gegenüberstellungen innerhalb der vorstehenden Tabelle G.84 besteht eine anschaulichere Möglichkeit, die genannte Maßstabdifferenz als Folge einer Maßstabsungenauigkeit in einer der beiden Registriererien zu identifizieren, indem man die aus den Beobachtungen abgeleiteten luftdruck- und meeresgezei-

tenreduzierten Amplitudenquotienten mit den zugeordneten Werten des Erdmodells Dehant-Defraigne-Wahr direkt vergleicht.

Zunächst wurde in Tabelle G.85 für die Station Walferdange eine der Tabelle G.82 entsprechende Gegenüberstellung vorgenommen. Der Grad der Übereinstimmung zugeordneter Werte entspricht dem der Tabelle G.82, insbesondere im gantztägigen Gezeitenband (auf die Ungenauigkeiten des Meeresgezeitenmodells Schwiderski im halbtägigen Gezeitenband wurde bereits hingewiesen). Zu einem ähnlich guten Ergebnis führt, wie Tabelle G.86 zeigt, der Vergleich der luftdruck- und meeresgezeitenreduzierten Amplitudenquotienten mit den entsprechenden Werten des Erdmodells Dehant-Defraigne-Wahr in Station Membach für die *Beobachtungsreihe 1*. Systematische Unterschiede treten hingegen auf bei den Ergebnissen der *Beobachtungsreihe 2*, Tabelle G.87. Bildet man für diese beiden Serien die Differenzen der mittleren Abweichungen von den DDW-Modellwerten, so ergibt sich einheitlich wieder der zuvor genannte Betrag von 1,9‰; berücksichtigt man lediglich die drei gantztägigen Hauptpartialtiden, so erhält man einheitlich den Wert 1,8‰. Es kann somit geschlossen werden, dass die Registrierdaten der Beobachtungsreihe 2 einen systematischen Maßstabsfehler von etwas unter 2‰ aufweisen. Für den metrologischen Vergleich mit den in der Station Odendorf gewonnenen Ergebnissen sollten diese Daten daher nicht berücksichtigt werden. Es wird ergänzend darauf hingewiesen, dass die gewählten Partialtidenaufgliederungen bei den durchgeführten Gezeitenanalysen jeweils identisch sind.

Wie Tabelle G.84 zeigt, treten bei den Ergebnissen der Beobachtungsreihen 1 und 2 auch Unterschiede hinsichtlich der für die Hauptpartialtiden berechneten *Phasenverschiebungen* auf; im Mittel betragen diese $0^{\circ},102$ und sind als signifikant einzustufen. Würde es sich bei den Unterschieden um Wirkungen eines ungenau bestimmten Signalnachlaufs handeln, so müssten die Beträge bei den halbtägigen Partialtiden doppelt so groß sein, wie bei den gantztägigen Tiden (vgl. Abschnitt G5); im Mittel erhält man jedoch $0^{\circ},098$ und $0^{\circ},108$. Das aber bedeutet, dass die auftretenden Phasendifferenzen mit einem ungenau bestimmten Signalnachlauf eben *nicht* erklärt werden können. Es treten ferner erhebliche Streuungen der Differenzbeträge Memb. 1 > Memb. 2 auf, mit einem maximalen Wert von $0^{\circ},086$ ($O_1 > P_1$). Da aber bei Serie 1 die luftdruck- und meeresgezeitenreduzierten Phasenverschiebungen praktisch übereinstimmen mit den in den Stationen Walferdange und Odendorf erzielten Ergebnissen (aus bekannten Gründen Ausschluss der Werte im halbtägigen Gezeitenband für das Modell Schwiderski), müssen die genannten Unterschiede eine Folge des Auftretens anderer systematischer Effekte in den Daten der Beobachtungsreihe 2 sein und zwar von Effekten, die in den Daten der Serie 1 nicht vorkommen.

Die durchgeführten Gegenüberstellungen und Untersuchungen berechtigen zu der Schlussfolgerung, dass der *Maßstab* der in der Station GeoObservatorium Odendorf mit dem Referenzgravimeter Askania A233 (Abschnitt G6.8.4) gewonnenen gravimetrischen Daten mit einer Toleranz von etwa 1‰ als gesichert angesehen werden kann. Der für die Berechnung der *Phasenverschiebungen* wesentliche instrumentelle Signalnachlauf des Gravimeters A233 (Abschnitt G5.3.1) wurde offensichtlich so genau ermittelt, dass Restfehler bis zu einer Auflösung im Bereich von $0^{\circ},01$ bis $0^{\circ},02$ in den halb- und gantztägigen Gezeitenbändern keinen signifikanten Einfluss auf die Phasenbestimmung der beobachteten Partialtiden ausüben.

Partialtide/ theoretischer Amplitudenquotient für Erdmodell DDW Dehant-Defraigne-Wahr	beobachteter, luftdruckreduzierter Amplitudenquotient	Amplitudenquotient reduziert mit Meeresgezeitenmodell Schwiderski und relative Abweichung zu DDW	Amplitudenquotient reduziert mit Meeresgezeitenmodell CSR3.0 und relative Abweichung zu DDW	Amplitudenquotient reduziert mit Meeresgezeitenmodell FES952 und relative Abweichung zu DDW
O₁ 1,1543	1,1488 ±0,00006	1,1536 -0,61‰	1,1534 -0,78‰	1,1541 -0,17‰
P ₁ 1,1491	1,1498 ±0,00016	1,1487 -0,35‰	1,1491 0,00‰	1,1476 -1,31‰
K₁ 1,1345	1,1373 ±0,00005	1,1351 +0,53‰	1,1358 +1,15‰	1,1343 -0,18‰
M₂ 1,1620	1,1871 ±0,00004	1,1575 -3,87‰	1,1637 +1,46‰	1,1598 -1,89‰
S ₂ 1,1620	1,1916 ±0,00008	1,1568 -4,48‰	1,1599 -1,81‰	1,1582 -3,27‰
	Filter Pertzev59 S ₁ : 1,21159±0,00969 +7°,3937±0°,5577 Luftdruck: -3,24897±0,00819 Standardabweichung der Gewichtseinheit s = 0,0082 nm/s ²	Summe Abweichungen -8,78‰ mittlere Abweichung -1,76‰ mittlere Abw. O ₁ ,P ₁ ,K ₁ -0,14‰	Summe Abweichungen +0,02‰ mittlere Abweichung 0,00‰ mittlere Abw. O ₁ ,P ₁ ,K ₁ -0,12‰	Summe Abweichungen -6,82‰ mittlere Abweichung -1,36‰ mittlere Abw. O ₁ ,P ₁ ,K ₁ -0,55‰

Tabelle G.85: Station Walferdange – Supraleitendes Gravimeter GWR C040 - 18.12.2003 bis 01.11.2004 – 319Tage, Vergleich der luftdruck- und meeresgezeitenreduzierten Amplitudenquotienten mit den entsprechenden Werten des Erdmodells Dehant-Defraigne-Wahr (DDW), Hauptpartialtiden O₁ P₁ K₁ M₂ S₂, Meeresgezeitenmodelle Schwiderski80, CSR3.0 und FES95.2 (vergl. Tabelle G.82)

Partialtide/ theoretischer Amplitudenquotient für Erdmodell DDW Dehant-Defraigne-Wahr	beobachteter, luftdruckreduzierter Amplitudenquotient	Amplitudenquotient reduziert mit Meereszeitenmodell Schwidorski und relative Abweichung zu DDW	Amplitudenquotient reduziert mit Meereszeitenmodell CSR3.0 und relative Abweichung zu DDW	Amplitudenquotient reduziert mit Meereszeitenmodell FES952 und relative Abweichung zu DDW
O₁	1,1543	1,1503 ±0,00008	1,1548 +0,43‰	1,1553 +0,87‰
P ₁	1,1491	1,1510 ±0,00014	1,1497 +0,52‰	1,1486 -0,44‰
K₁	1,1345	1,1381 ±0,00005	1,1358 +1,16‰	1,1352 +0,62‰
M₂	1,1620	1,1890 ±0,00003	1,1563 -4,91‰	1,1605 -1,29‰
S ₂	1,1620	1,1941 ±0,00008	1,1583 -3,18‰	1,1600 -1,72‰
	Filter Pertzev59 S _i : 1,21073±0,00852 +6°,0354±0°,4904 Luftdruck: -0,319714±0,00786 Standardabweichung der Gewichtseinheit s = 0,0076 nm/s ²	Summe Abweichungen -5,98‰ mittlere Abweichung -1,20‰ mittlere Abw. O ₁ ,P ₁ ,K ₁ +0,70‰	Summe Abweichungen +5,49‰ mittlere Abweichung +1,10‰ mittlere Abw. O ₁ ,P ₁ ,K ₁ +1,11‰	Summe Abweichungen -1,96‰ mittlere Abweichung -0,39‰ mittlere Abw. O ₁ ,P ₁ ,K ₁ +0,35‰

Tabelle G.86: Station Membach – Supraleitendes Gravimeter GWR C021 - 04.08.1995 bis 31.05.1997 – 626 Tage (Serie 1), Vergleich der luftdruck- und meereszeitenreduzierten Amplitudenquotienten mit den entsprechenden Werten des Erdmodells Dehant – Defraigne – Wahr, Hauptpartialtiden O₁ P₁ K₁ M₂ S₂, Meereszeitenmodelle Schwidorski80, CSR3.0 und FES95.2 (vergl. Tabelle G.82)

Partialtide/ theoretischer Amplitudenquotient für Erdmodell DDW Dehant-Defraigne-Wahr	beobachteter, luftdruckreduzierter Amplitudenquotient	Amplitudenquotient reduziert mit Meereszeitenmodell Schwidorski und relative Abweichung zu DDW	Amplitudenquotient reduziert mit Meereszeitenmodell CSR3.0 und relative Abweichung zu DDW	Amplitudenquotient reduziert mit Meereszeitenmodell FES952 und relative Abweichung zu DDW
O₁	1,1543	1,1522 ±0,00009	1,1567 +2,08‰	1,1572 +2,51‰
P ₁	1,1491	1,1542 ±0,00019	1,1529 +3,31‰	1,1518 +2,35‰
K₁	1,1345	1,1392 ±0,00006	1,1369 +2,12‰	1,1363 +1,59‰
M₂	1,1620	1,1910 ±0,00005	1,1583 -3,18‰	1,1625 +0,43‰
S ₂	1,1620	1,1971 ±0,00011	1,1613 -0,60‰	1,1630 +0,86‰
	Filter Pertzev59 S _i : 1,06261±0,01157 -12°,3608±0°,6633 Luftdruck: 3,34752±0,00893 Standardabweichung der Gewichtseinheit s = 0,0089 nm/s ²	Summe Abweichungen +3,73‰ mittlere Abweichung +0,75‰ mittlere Abw. O ₁ ,P ₁ ,K ₁ +2,50‰	Summe Abweichungen +15,20‰ mittlere Abweichung +3,04‰ mittlere Abw. O ₁ ,P ₁ ,K ₁ +2,91‰	Summe Abweichungen 7,74‰ mittlere Abweichung +1,55‰ mittlere Abw. O ₁ ,P ₁ ,K ₁ +2,15‰

Tabelle G.87: Station Membach – Supraleitendes Gravimeter GWR C021 - 01.07.1998 bis 03.06.2004 – 2159 Tage (Serie 2), Vergleich der luftdruck- und meereszeitenreduzierten Amplitudenquotienten mit den entsprechenden Werten des Erdmodells Dehant – Defraigne – Wahr, Hauptpartialtiden O₁ P₁ K₁ M₂ S₂ Meereszeitenmodelle Schwidorski80, CSR3.0 und FES95.2 (vergl. Tabelle G.82)

Die Gezeitenanalysen der mit den Supraleitenden Gravimetern gewonnenen gravimetrischen Beobachtungsdaten weisen durchgängig Standardabweichungen der Gewichtseinheit (als Maß für die erreichte Modellanpassung) von unter 0,001µGal aus, gegenüber 0,57µGal für das Federgravimeter A233. Selbst wenn man die mikroseismisch wesentlich ungünstigeren Bedingungen am Standort Odendorf in Betracht zieht und berücksichtigt, dass die ausgewerteten Beobachtungen spezifische anthropogene Störsignale enthalten, die bei Verzicht auf experimentelle Arbeiten in der Messkammer entfallen und dann zu Verbesserungen bis in den Bereich von etwa 0,2µGal führen sollten, verbleibt ein instrumentell begründeter Unterschied von zwei Zehnerpotenzen zugunsten der Supraleitenden Gravimeter. Diese Verbesserung spiegelt sich jedoch nicht in gleichem Umfang im erreichten Grad der statistischen Auflösung der berechneten Gezeitenparameter wider.

Sieht man einmal von den genannten Schwierigkeiten bei der Eichung der Supraleitenden Gravimeter ab, so liegt der Vorteil einer höheren Auflösung der registrierten Signale und einer verbesserten Modellanpassung im Prinzip in der potentiellen Verbesserung der Auflösung *maßstabsunabhängiger* Größen, wie zum Beispiel den Verhältnissen der Amplitudenquotienten unterschiedlicher Partialtiden. Bildet man nun aber zum Beispiel die

Verhältniszahlen für P_1/O_1 (Tabelle G.84), so erhält man für die Serie 1 der in der Station Membach ausgeführten Beobachtungen den Quotienten 1,00061, für Serie 2 aber den Quotienten 1,00174, entsprechend einem Unterschied von 1,1‰; für die Verhältnisse S_2/K_1 lauten die entsprechenden Werte 1,00429 für Serie 1 und 1,00512 für Serie 2, entsprechend einem Unterschied von 0,8‰. Auf das Phasenproblem wurde bereits hingewiesen. Somit wird auch in diesem Zusammenhang deutlich, dass die erreichte Modellanpassung nicht uneingeschränkt als Kriterium für die Güte der berechneten Gezeitenparameter dienen kann.

Der größte Vorteil der Supraleitenden Gravimeter besteht zweifellos in dem außerordentlich günstigen Driftverhalten dieser Instrumente, welches es insbesondere ermöglicht, die Parameter der langperiodischen Gezeiten mit hoher Genauigkeit zu bestimmen [DUCARME, VENEDIKOV, ARNOSO UND VIEIRA 2004]

Wird eine Genauigkeit der Gezeitenparameter der Hauptpartialtiden von 1‰ bei den Amplitudenquotienten und von 0°,01 bei den Phasenverschiebungen angestrebt, so bestätigen die oben dargelegten Sachverhalte die Sinnhaftigkeit und Notwendigkeit detaillierter Untersuchungen der Art, wie sie mit Bezug auf die Aufgabenstellung im Zusammenhang mit den gravimetrischen Beobachtungen im GeoObservatorium ausgeführt und in den Kapiteln D und E sowie in den Abschnitten G2 bis G4 nachgewiesen wurden.

H Strukturen gravimetrischer Rauschsignale

1 Vorbemerkung

Die berechneten Standardabweichungen der aus den sekundlichen Registrierwerten gebildeten minütlichen Mittel stellen ein Maß für die im jeweiligen minütlichen Zeitintervall vorhandenen Signalvariationen dar, also ein Maß für den aktuellen gravimetrischen *Rauschpegel*. Bei auftretenden *zeitlichen Änderungen* dieser Standardabweichungen lassen sich potentiell auf dem Wege zeitlicher Zuordnungen Ursachen identifizieren, z.B. Korrelationen des Rauschpegels mit dem Straßenverkehr.

Eine weitere Möglichkeit der Ursachenfindung liegt in der direkten Untersuchung der Zeitreihen der Einzelwerte, sofern die Variationen der Einzelwerte nicht die Struktur eines „weißen Rauschens“ aufweisen, d.h. nicht Wirkungen von reinen Zufallsprozessen sind. Treten die Signalvariationen ganz oder teilweise als Folge deterministischer „Störprozesse“ periodischer Natur auf, so lassen sich mit Hilfe der Methode der Spektralanalyse Amplituden und Frequenzen ermitteln, die in einigen Fällen aufgrund vorliegender Erfahrungswerte zumindest qualitativ einer bestimmten Ursache zugeordnet werden können.

2 Zeitliche Variationen des gravimetrischen Rauschpegels

Im Rahmen des Vergleichs gefilterter und ungefilterter Daten wurde in Abschnitt E1 bereits auf tägliche Variationen des gravimetrischen Rauschpegels hingewiesen (siehe Abbildung E.5 und Abbildung E.6). In Abschnitt E2 konnte exemplarisch die Zuordnung eines Rauschpegelverlaufs zu Erdarbeiten gezeigt werden, die zeitweilig in etwa 1 bis 2 km Entfernung vom GeoObservatorium ausgeführt wurden (Abbildung E.23 und Abbildung E.24).

Zeitliche Änderungen des gravimetrischen Rauschpegels treten jedoch nicht nur in der täglichen Zeitskala auf, sondern - wie bereits in Abschnitt E2 dargelegt wurde (Abbildung E.17) - permanent auch in längeren Zeitskalen, wobei sich in einem bestimmten Zeitraum die maximalen und minimalen Pegelniveaus bisweilen um eine Zehnerpotenz und mehr unterscheiden können. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen drei Beispiele von Originalaufzeichnungen mit jeweils ausgeprägten Rauschpegelmaxima, deren Ursprung zunächst unbekannt war. Die dargestellten Standardabweichungen beziehen sich auf minütliche Mittel sekundlicher Signalwerte des Gravimeters LCR716CPI; sie sind ungefiltert und stellen daher die realen Bewegungen des astasierten mechanischen Sensors in der Maßeinheit und im Maßstab der Registrierung dar (1 Volt entspricht etwa jeweils 150 μ Gal). Kurzzeitige Signalspitzen sind durch schwache Erdbeben hervorgerufen.

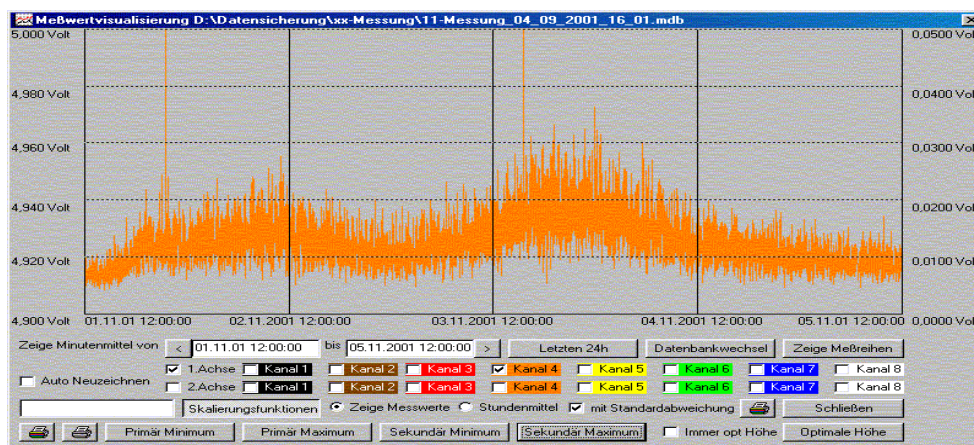


Abbildung H.1: Gravimeter LCR716CPI, ungefiltert, Beispiel 1 für den zeitlichen Verlauf der Standardabweichungen minütlicher Mittelwerte, Maßstab: siehe rechten Ordinatenachse

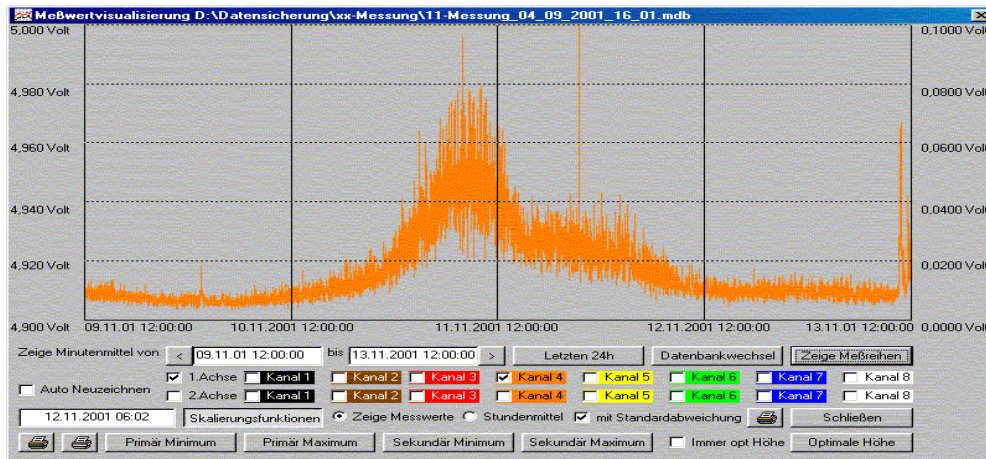


Abbildung H.2: Gravimeter LCR716CPI, ungefiltert, Beispiel 2 für den zeitlichen Verlauf der Standardabweichungen minütlicher Mittelwerte, Maßstab: siehe rechten Ordinatenachse

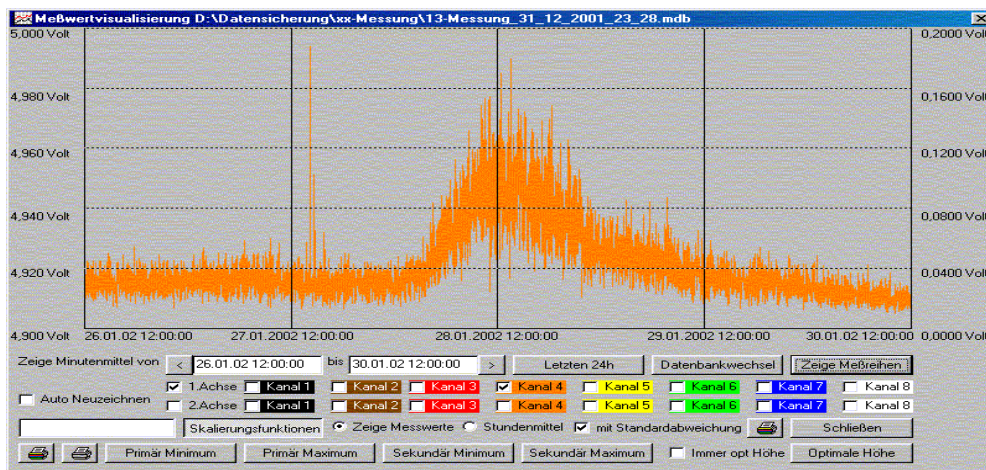


Abbildung H.3: Gravimeter LCR716CPI, ungefiltert, Beispiel 3 für den zeitlichen Verlauf der Standardabweichungen minütlicher Mittelwerte, Maßstab: siehe rechten Ordinatenachse

3 Strukturen im Verlauf der sekundlichen Signalwerte

Im Falle auftretender Periodizitäten in den Rauschsignalen, die das definierte Nutzsignal (hier die gravimetrischen Gezeiten) überlagern, bietet die Bestimmung der jeweiligen Rauschamplituden und -frequenzen, wie bereits erwähnt, die Möglichkeit, Hinweise auf den jeweiligen Ursprung solcher Signale zu gewinnen. Durch den Anschluss eines zweiten Registrierrechners parallel zu dem Rechner für die Gezeitenregistrierung (siehe auch Abschnitt D4.1) konnten nun zusätzlich Daten der sekundlichen Basissignale in begrenztem Umfang aufgezeichnet werden. Auf diese Weise wurden mehrere hundert Stichprobensätze gebildet mit unterschiedlicher Zeitdauer zwischen 3600 und 7200 Sekunden, entsprechend ein bis zwei Stunden. Zu Testzwecken wurden weitere Stichproben mit Diskretisierungsintervallen kürzer als 1 Sekunde aufgezeichnet, wobei festgestellt wurde, dass die Leistungsfähigkeit des Registrierrechners und des verwendeten A/D-Wandlers eine Abtastfrequenz von größer als 5 Hz nicht zulässt. Die Zeiträume für die Stichprobenaufzeichnungen wurden entweder regelmäßig auf ein Tagesintervall verteilt (vier Stichproben pro Tag) oder nach unterschiedlichen Kriterien ausgewählt, dann überwiegend nach dem Kriterium des jeweiligen maximalen oder minimalen zeitlichen Gradienten der gravimetrischen Gezeiten.

Durchgängig und typisch weisen die sekundlichen Signale systematische Strukturen auf, die sich jedoch schon in Zeiträumen von einigen Stunden signifikant ändern können. In der nachfolgenden Abbildung ist eine solche Struktur exemplarisch dargestellt.

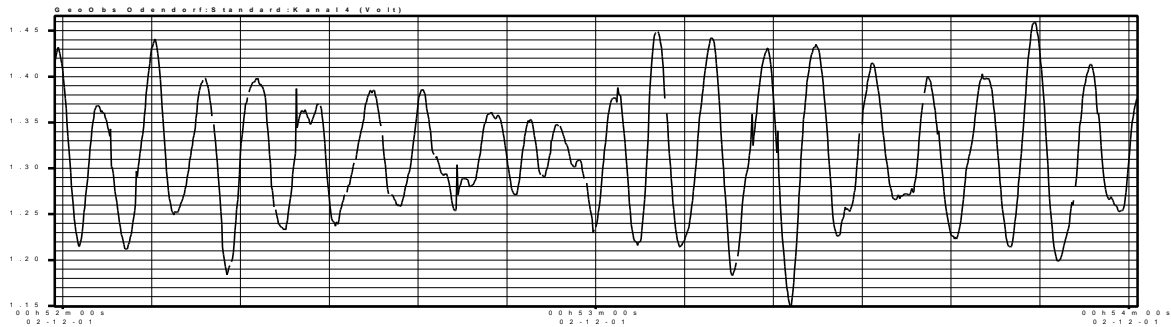


Abbildung H.4: Ausschnitt aus einer Kurzzeitregistrierung für das Gravimeter LCR716
Datenlänge: 2 Minuten – beobachtete Frequenz ca. 0,2 Hz

Die Spektralanalysen der Stichprobendaten zeigten eine Dominanz von Schwingungen im Periodenbereich zwischen 3 und 9 Sekunden, deren Amplituden starken zeitlichen Schwankungen unterworfen sind. Damit deutet sich an, dass die in Abbildung H.1, Abbildung H.2 und Abbildung H.3 exemplarisch dargestellten Variationen des gravimetrischen Rauschpegels Wirkungen ozeanischer Meereswellen sein könnten [SCHNEIDER 1975]. Diese Vermutung erforderte eine empirische Überprüfung.

4 Der Einfluss der Meeresbrandung auf die gravimetrischen Beobachtungen

Ein Vergleich der Isobarenstrukturen und Windfelder im Gebiet des östlichen Nordatlantik, der Irischen See und der Nordsee mit dem zeitlichen Verlauf des gravimetrischen Rauschpegels (Standardabweichungen der minütlichen Mittelwerte der gravimetrischen Signale) ließ in der Tat einen Zusammenhang erkennen, der deutlicher wurde, wenn man den Rauschpegel mit der örtlichen Verteilung der Wellenhöhen und ihren Richtungen verglich. Es zeigte sich, dass die höchsten Rauschpegel dann auftraten, wenn Bereiche besonders großer Wellenhöhen auf die Küsten auftrafen. Damit waren die genannten gravimetrischen Sachverhalte als Brandungseffekte identifiziert.

Die Zusammenhänge werden in den nachfolgenden Abbildungen verdeutlicht. In Sechsstundenintervallen sind die Amplitudenspektren der sekundlichen Registrierdaten und die zugeordneten räumlichen Strukturen der Wellenhöhenverteilung dargestellt, und zwar für die zugeordneten Zeiträume der obigen Abbildung H.1, Abbildung H.2 und Abbildung H.3, so dass ein unmittelbarer Vergleich mit dem dargestellten Verlauf der Standardabweichungen der minütlichen Mittelwerte ermöglicht wird. Die Zeiträume der gravimetrischen Stichproben sind einheitlich 00:45h–01:13h, 06:45h–07:13h, 12:35h–13:13h und 18:45h–19:13h UT (aus technischen Gründen musste ein Wechsel des Tagesdatums während der Registrierung der sekundlichen Signale vermieden werden). Die Wellenhöhenkarten wurden aus <http://www.wetteronline.de/segel.htm> entnommen und beziehen sich jeweils auf 00:00h, 06:00h, 12:00h und 18:00h UT: Dadurch entsteht eine zeitliche Verschiebung von einer Stunde gegenüber der zeitlichen Mitte des Registrierzeitraums, der jedoch im Hinblick auf die qualitative Zielsetzung der Gegenüberstellungen und im Hinblick auf die relativ langsamen Veränderungen der räumlichen Wellenhöhenstrukturen als nicht wesentlich anzusehen ist.

Die Einheiten der nachfolgenden Amplitudenspektren sind Hertz für die Abszisse und Volt für die Ordinate. Die Abszisse umfasst einheitlich die Werte von 0 bis ca. 0,35Hz, der Ordinatenumfang ist gesetzt worden auf 0,05 Volt für Beispiel 1, 0,10 Volt für Beispiel 2 und 0,15 Volt für Beispiel 3.

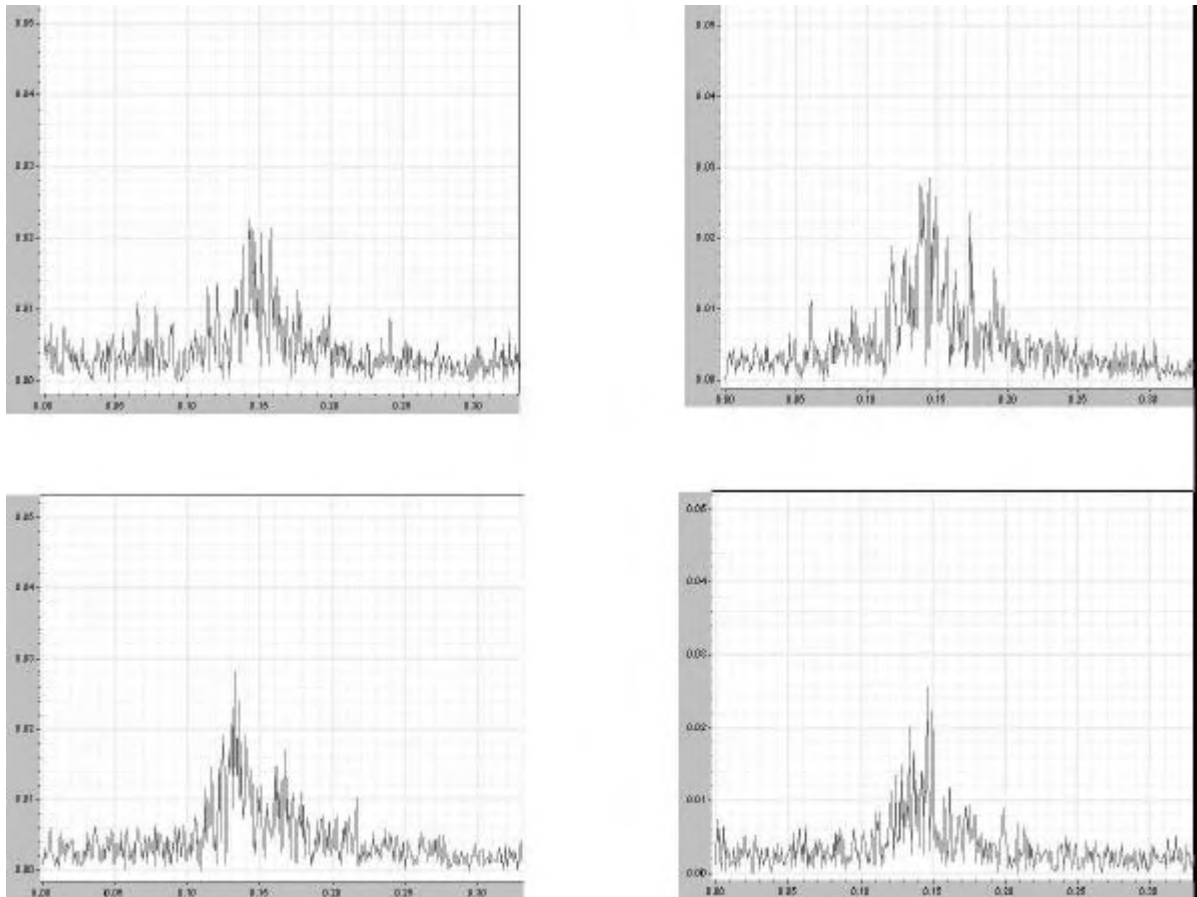


Abbildung H.5: Beispiel 1 - Spektren vom 02.11.2001

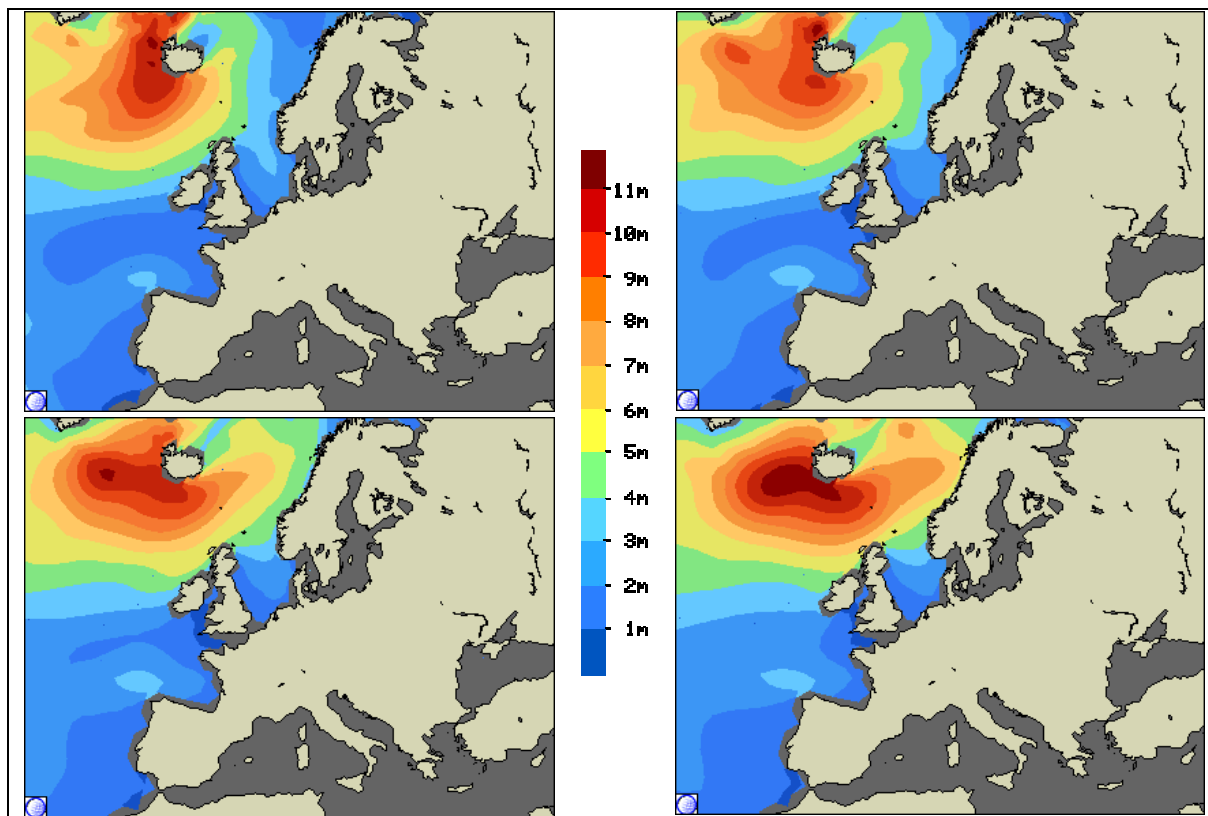


Abbildung H.6: Beispiel 1 - zugeordnete Wellenfronten 02.11.2001

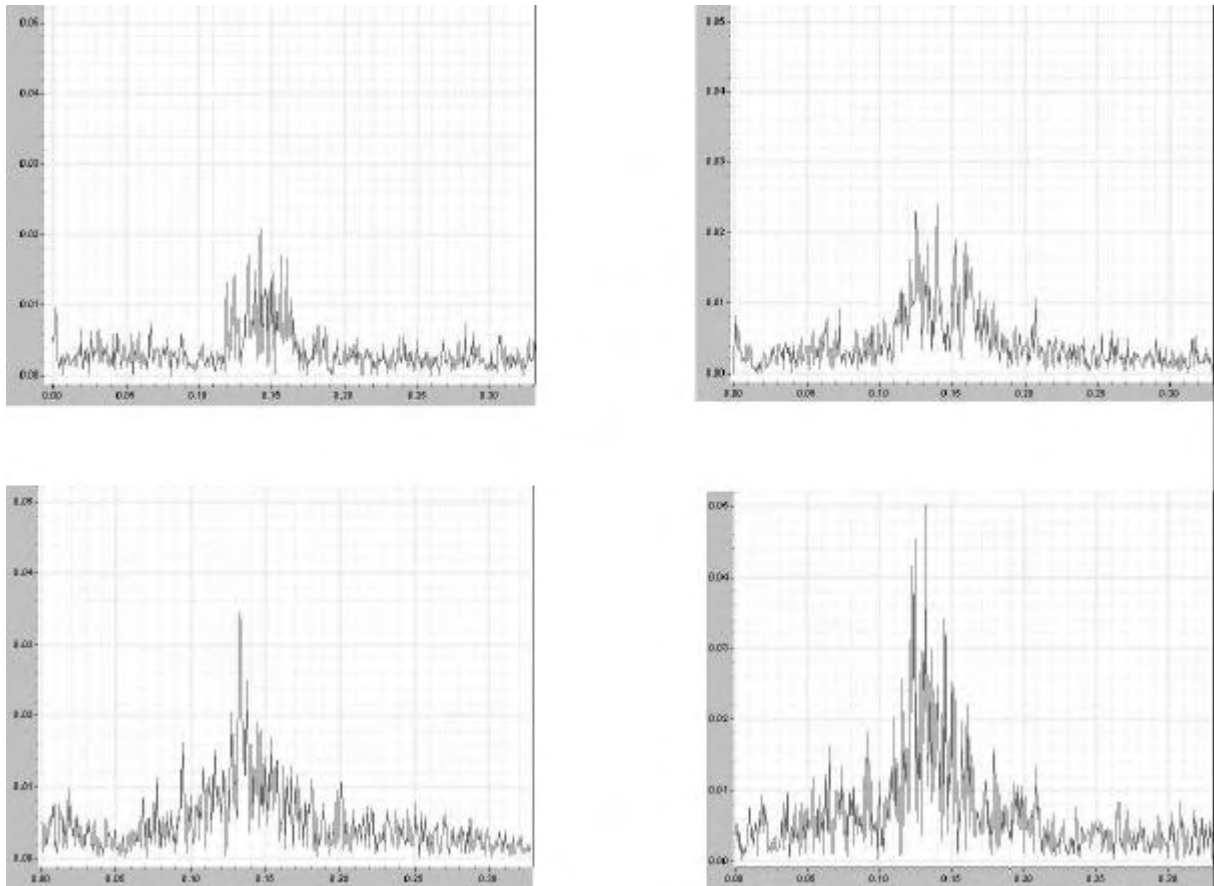


Abbildung H.7: : Beispiel 1 - Spektren vom 03.11.2001

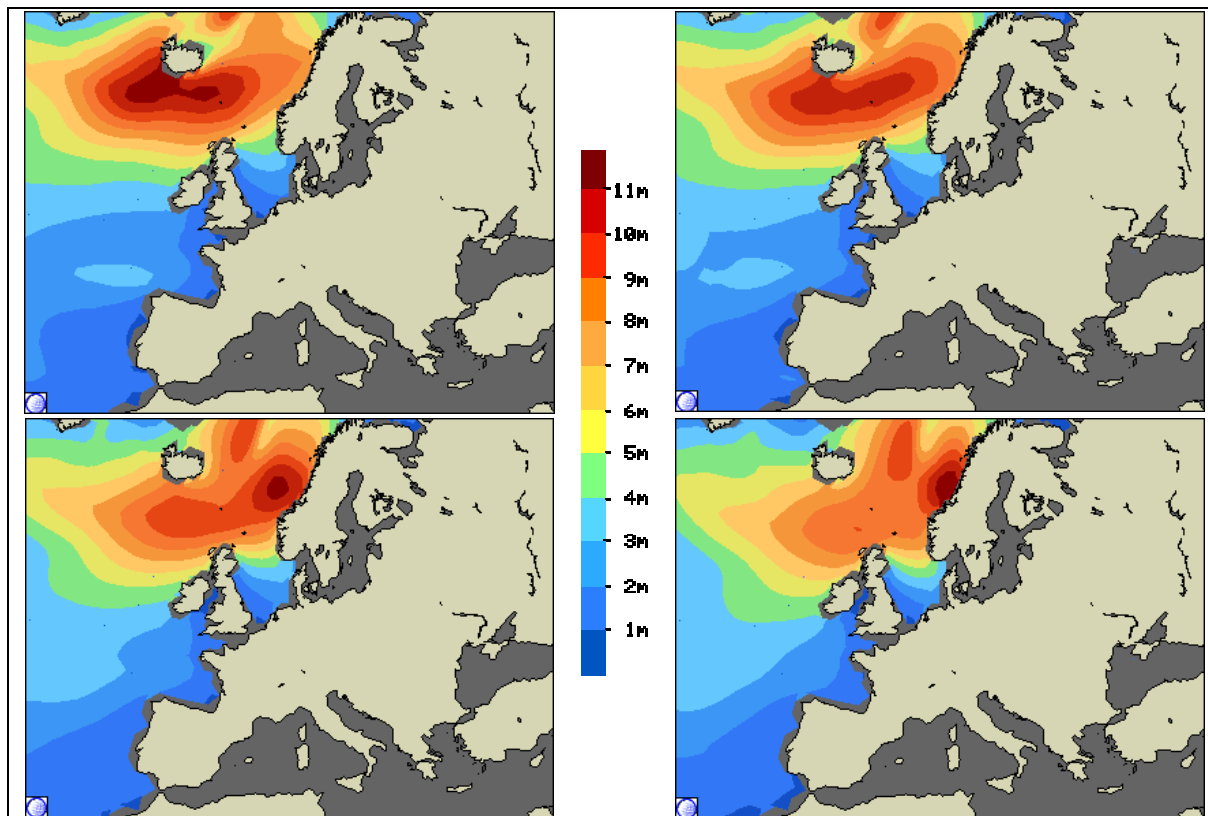


Abbildung H.8: Beispiel 1 - zugeordnete Wellenfronten 03.11.2001

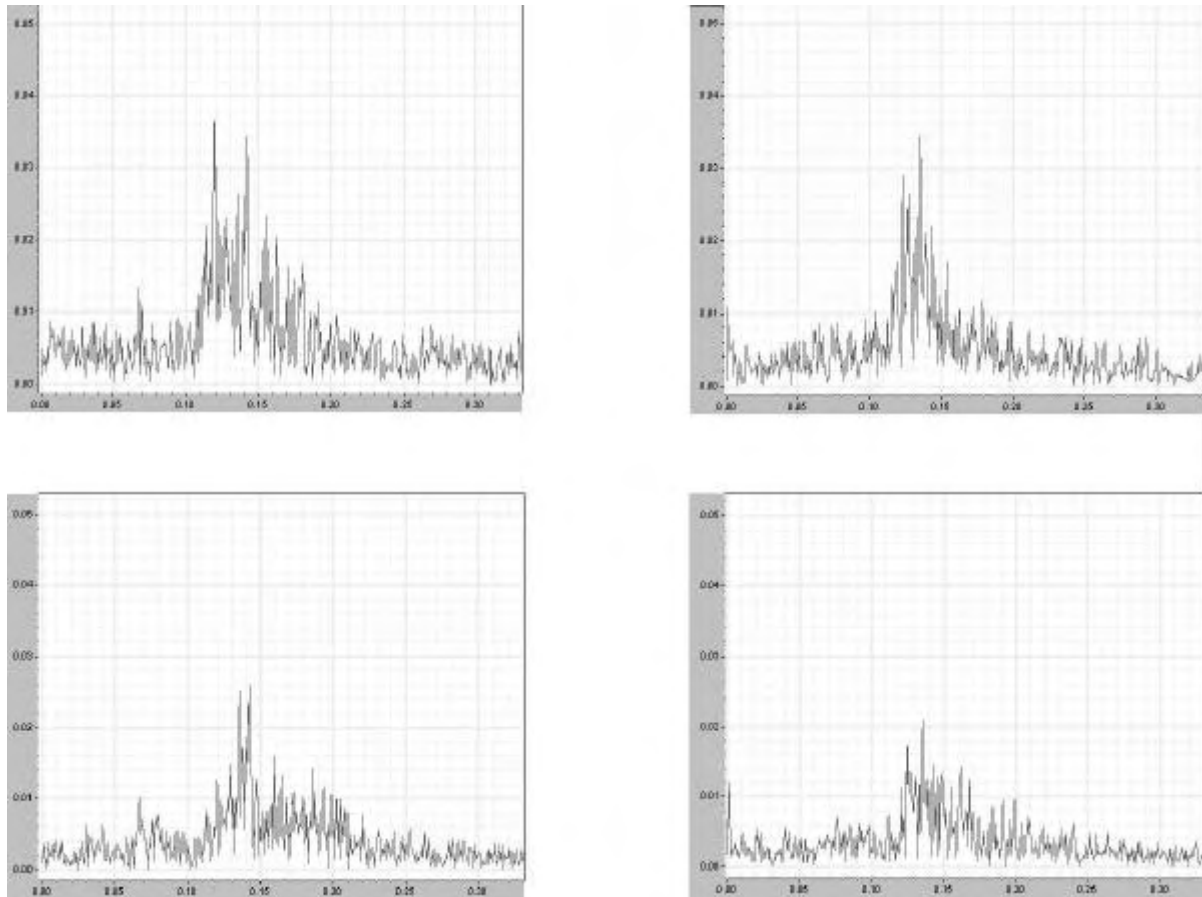


Abbildung H.9: Beispiel 1 - Spektren vom 04.11.2001

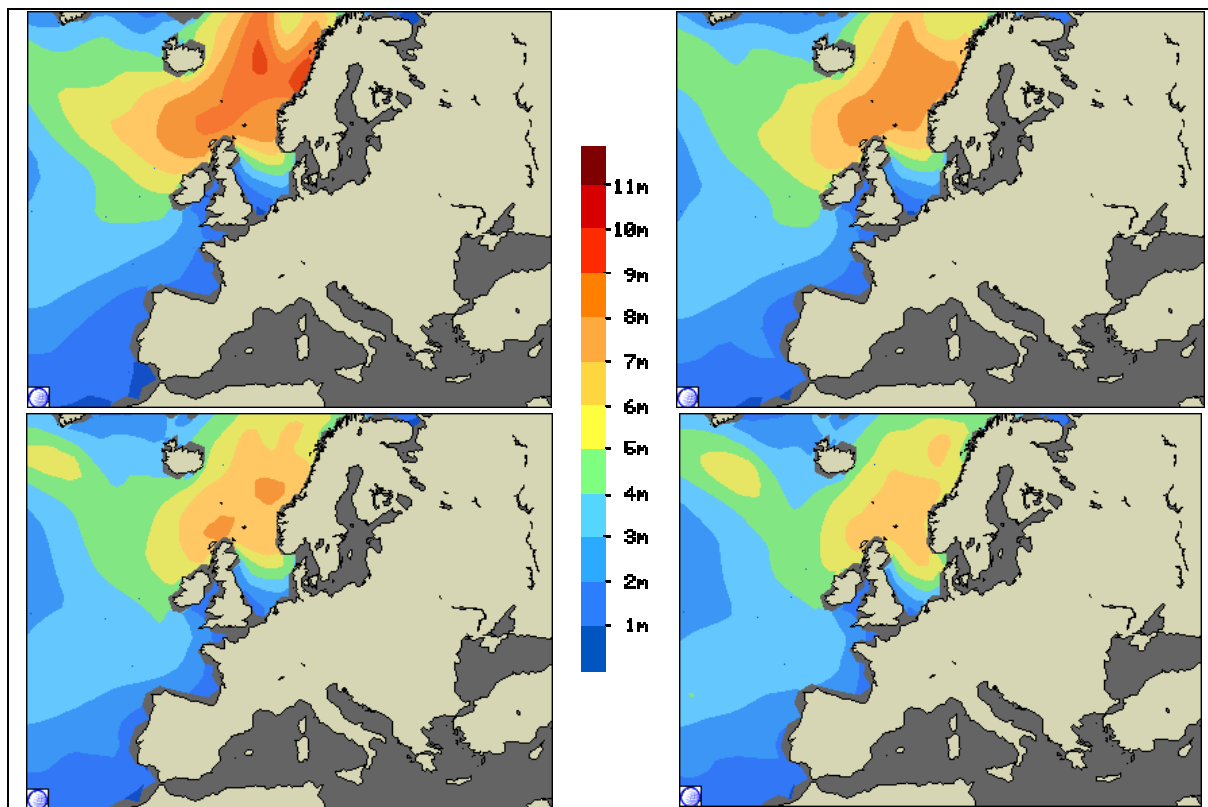


Abbildung H.10: Beispiel 1 - zugeordnete Wellenfronten 04.11.2001

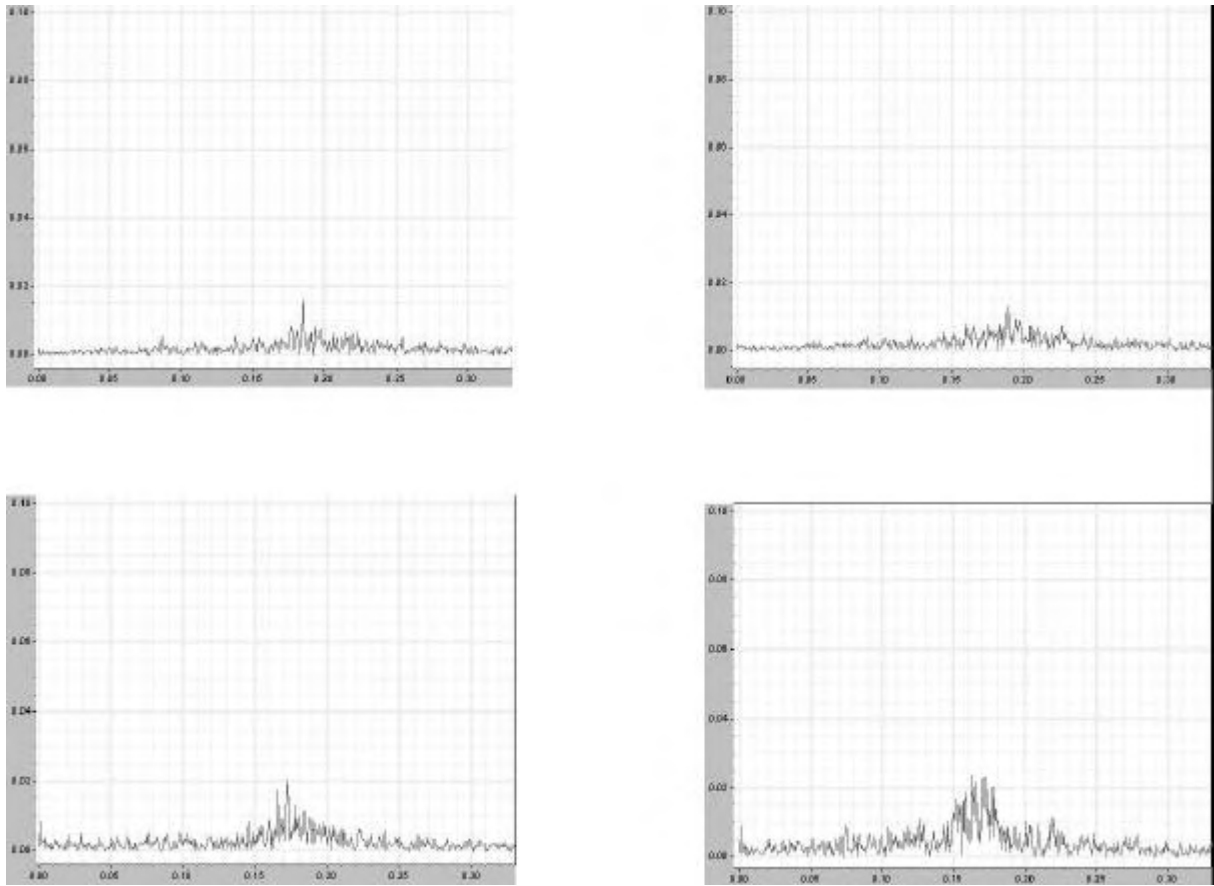


Abbildung H.11: Beispiel 2 - Spektren vom 10.11.2001

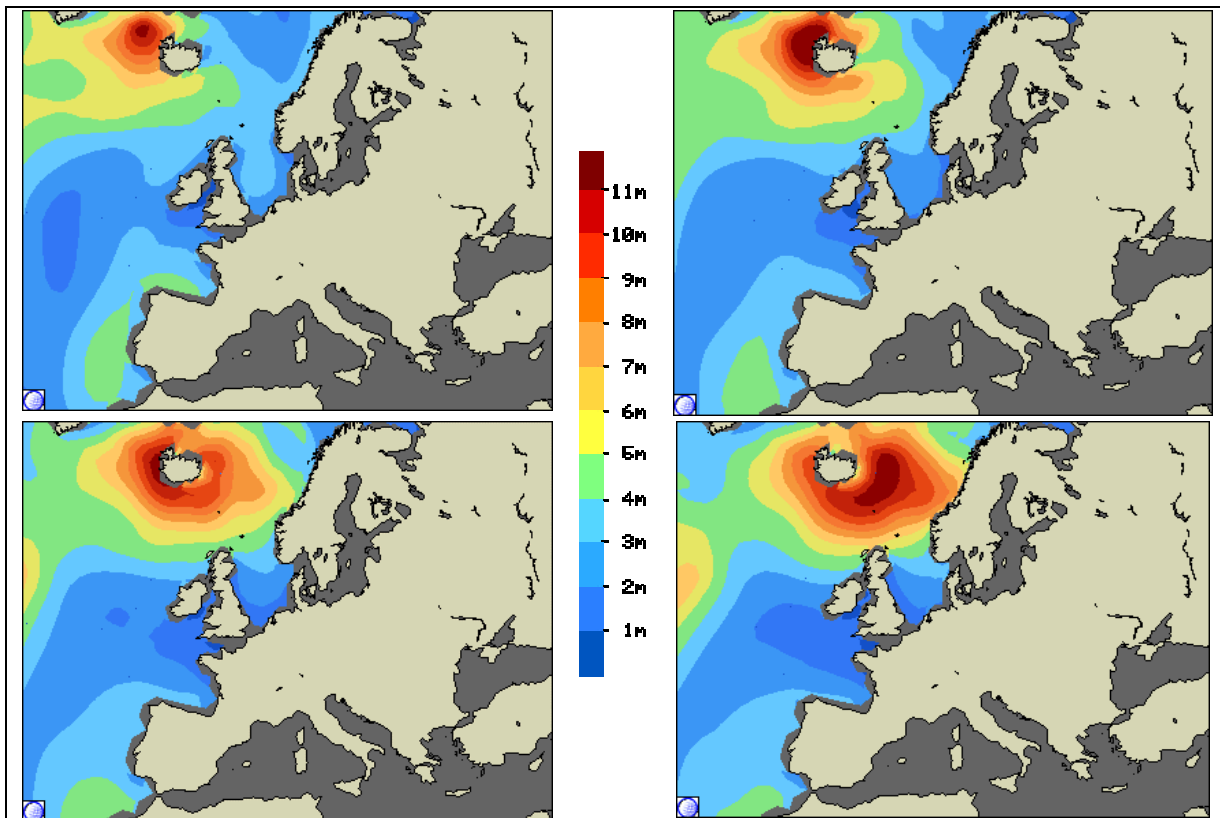


Abbildung H.12: Beispiel 2 - zugeordnete Wellenfronten 10.11.2001

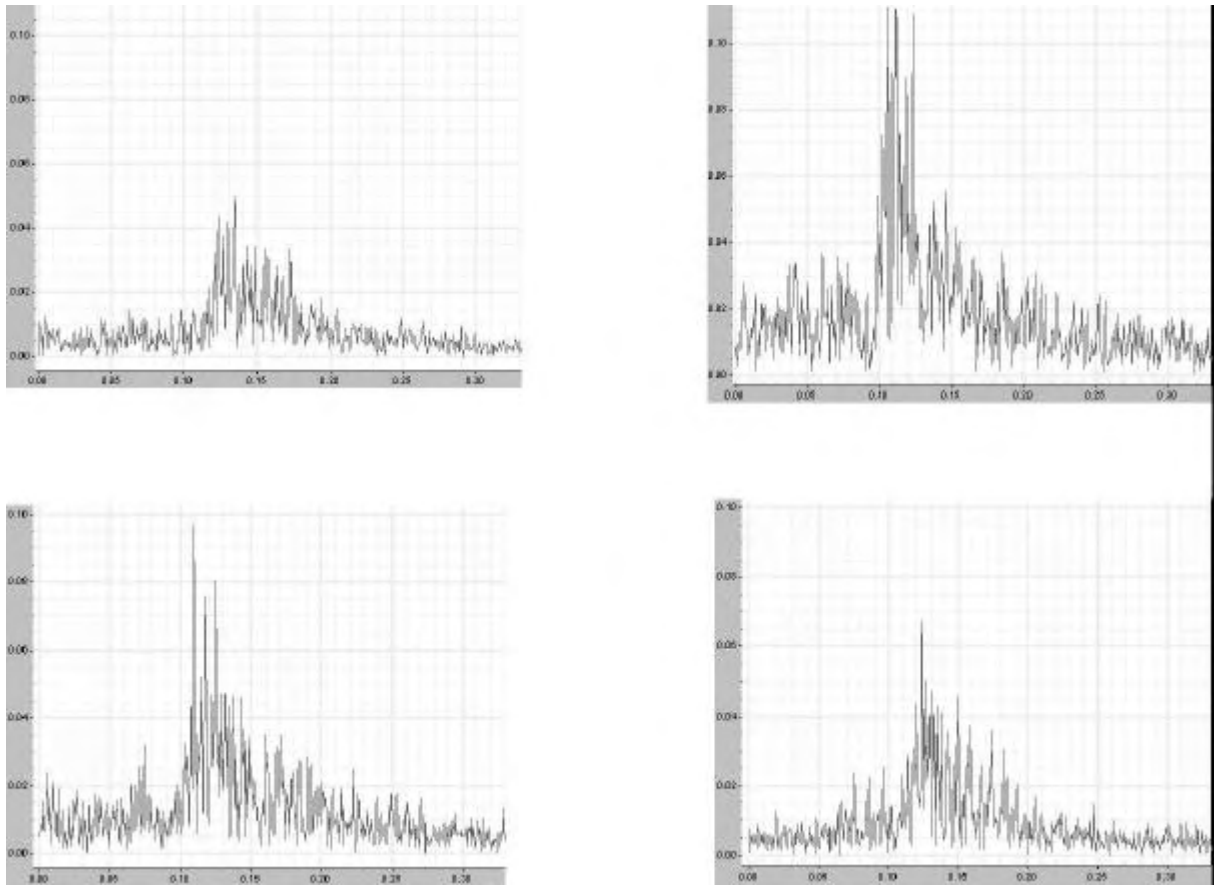


Abbildung H.13: Beispiel 2 - Spektren vom 11.11.2001

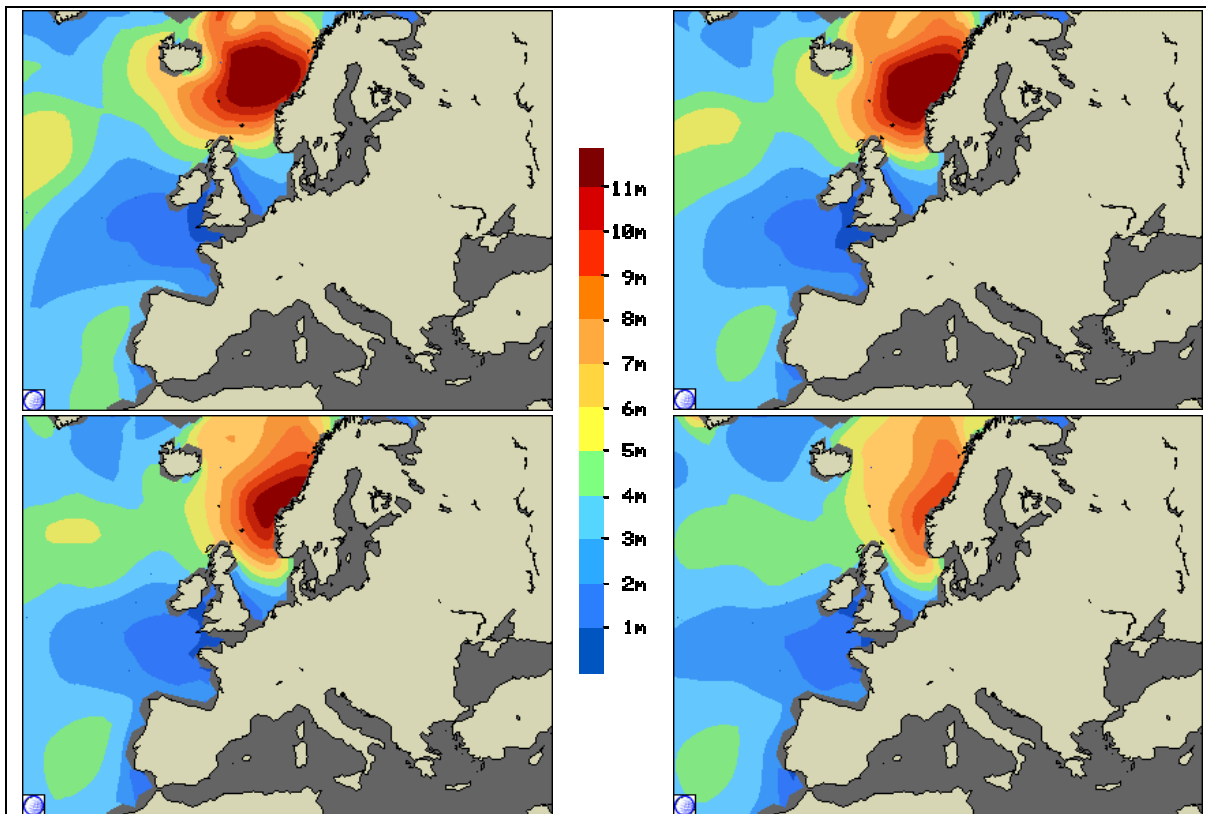


Abbildung H.14: Beispiel 2 - zugeordnete Wellenfronten 11.11.2001

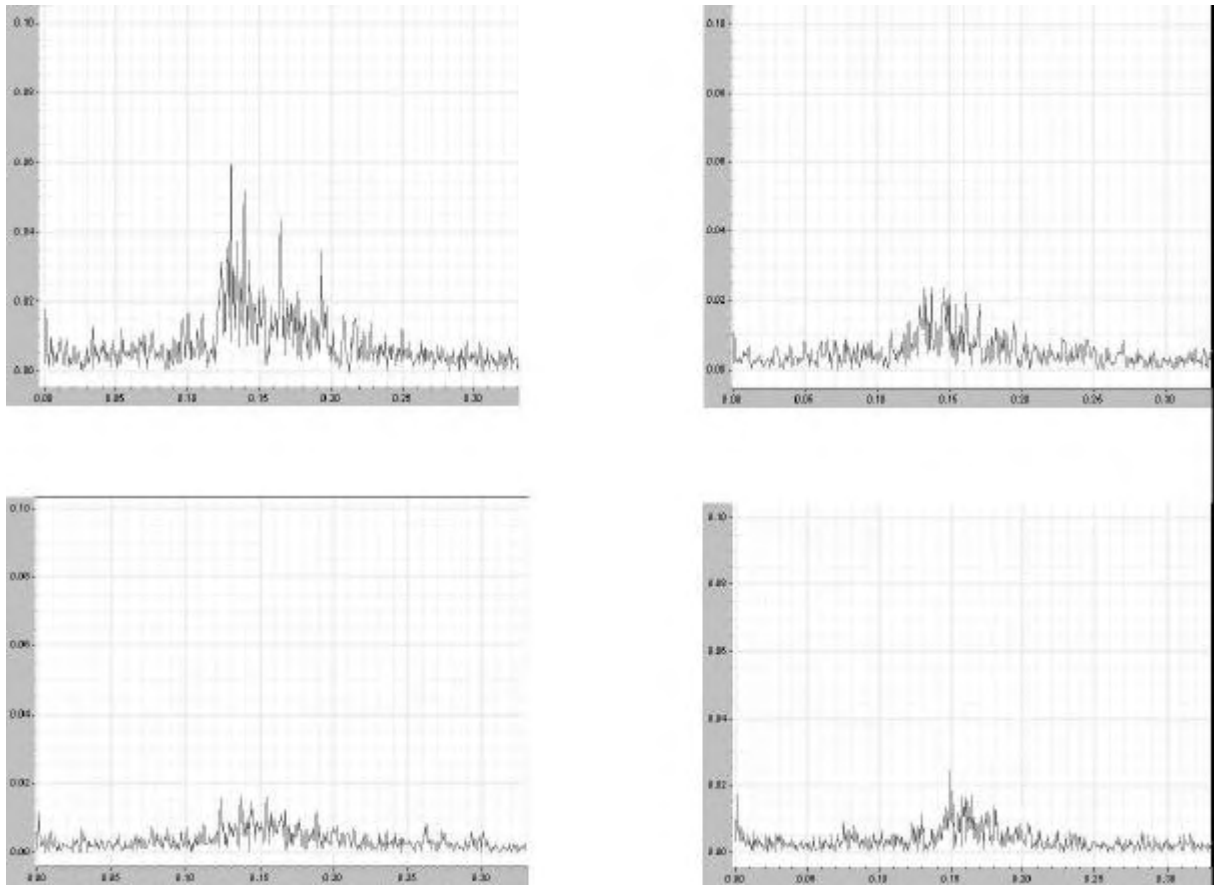


Abbildung H.15: Beispiel 2 - Spektren vom 12.11.2001

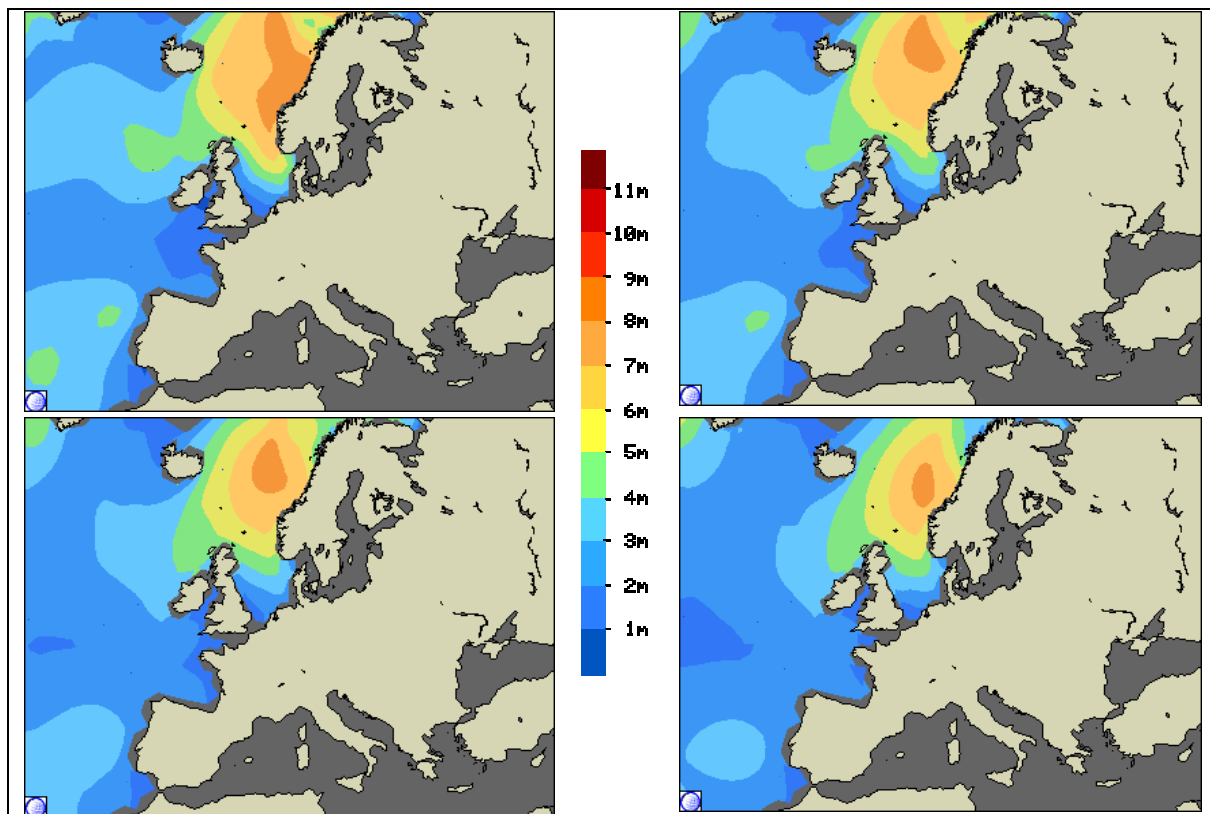


Abbildung H.16: Beispiel 2 - zugeordnete Wellenfronten 12.11.2001

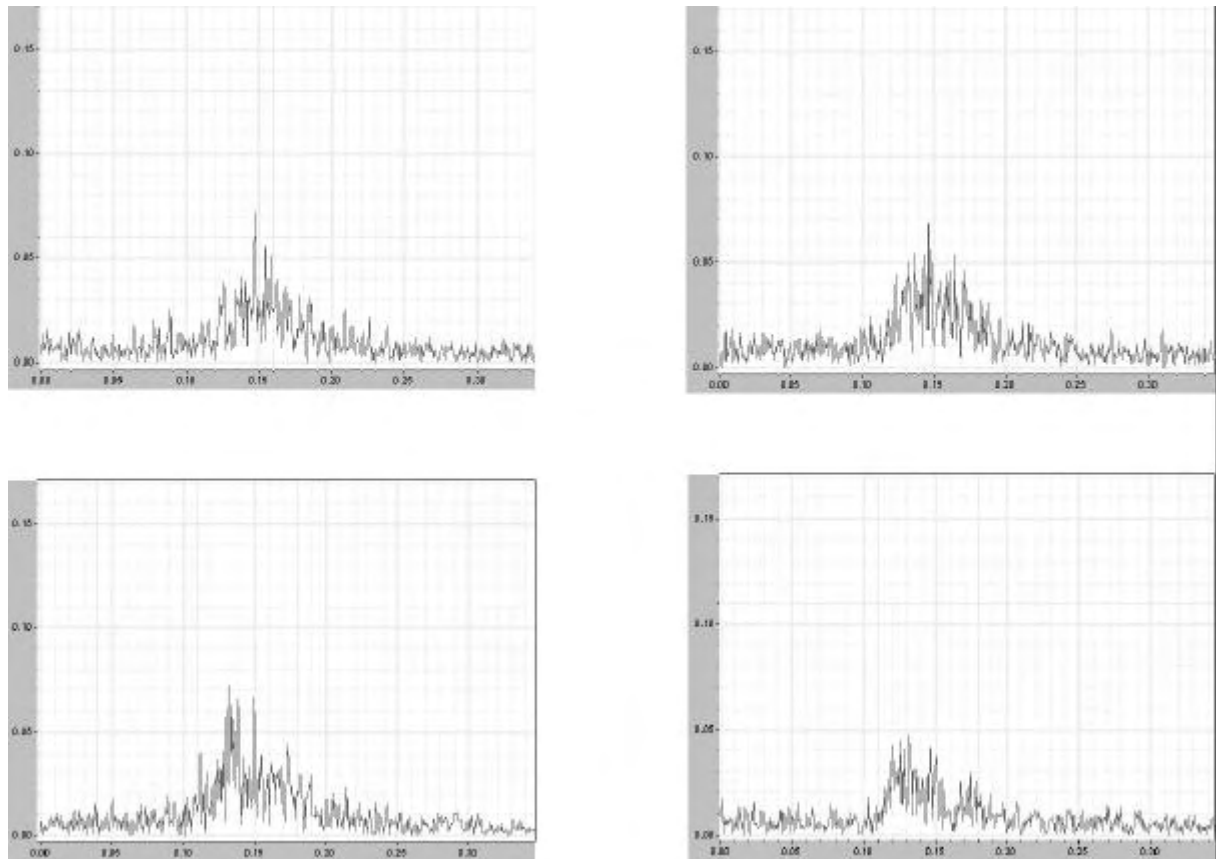


Abbildung H.17: Beispiel 3 - Spektren vom 27.01.2002

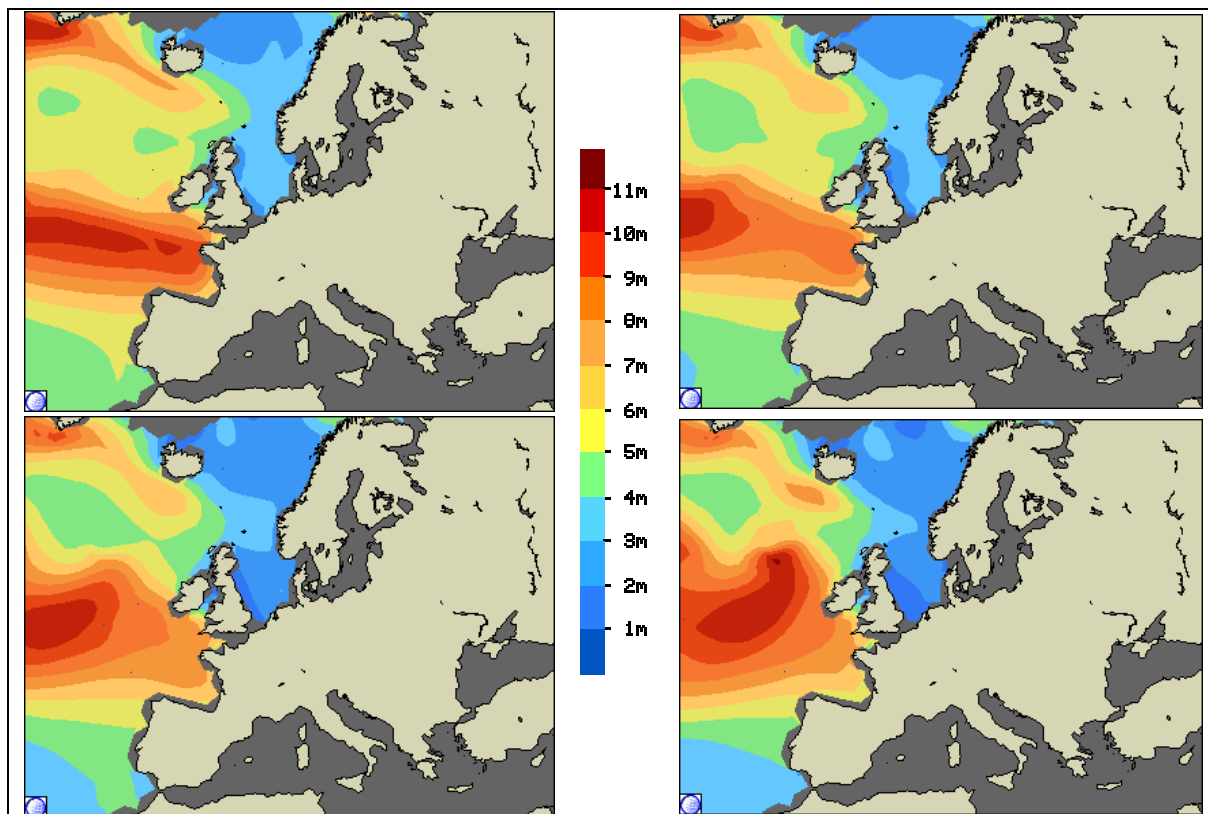


Abbildung H.18: Beispiel 3 - zugeordnete Wellenfronten 27.01.2002

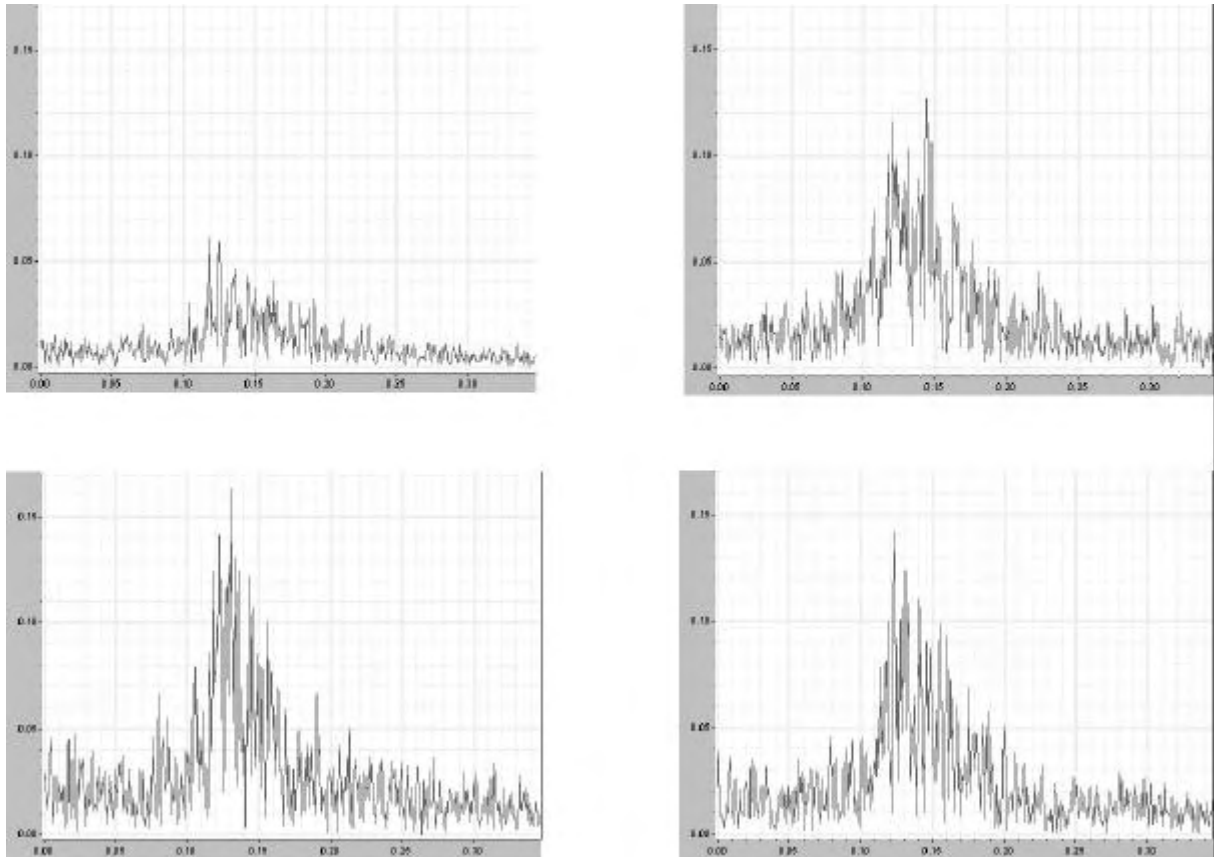


Abbildung H.19: Beispiel 3 - Spektren vom 28.01.2002

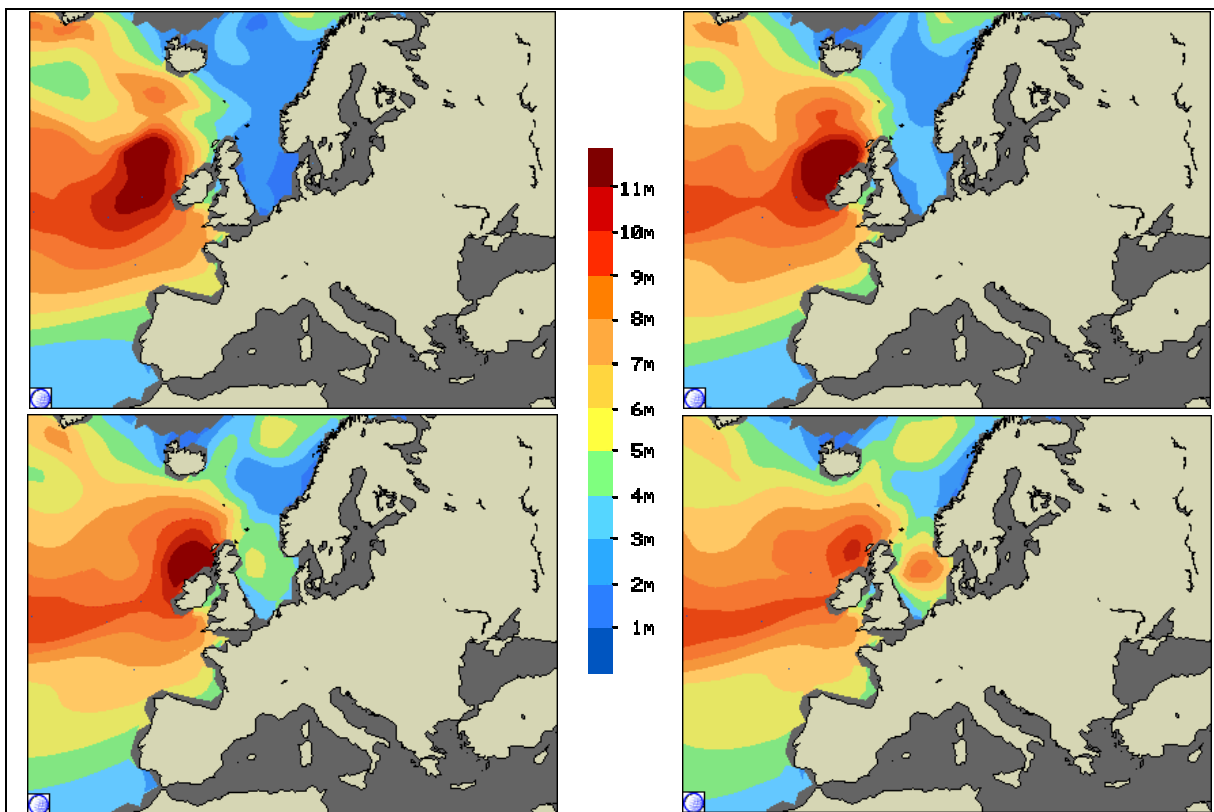


Abbildung H.20: Beispiel 3 - zugeordnete Wellenfronten 28.01.2002

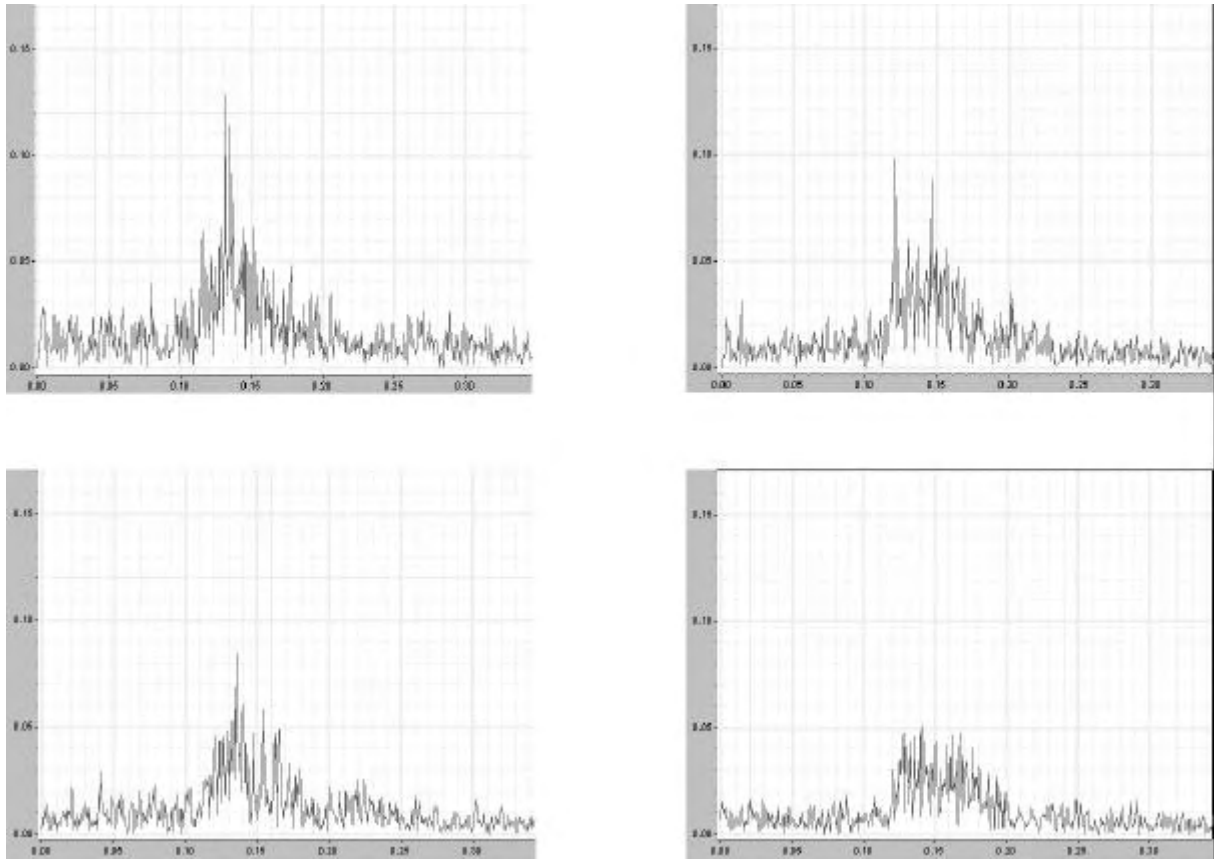


Abbildung H.21: Beispiel 3 - Spektren vom 29.01.2002

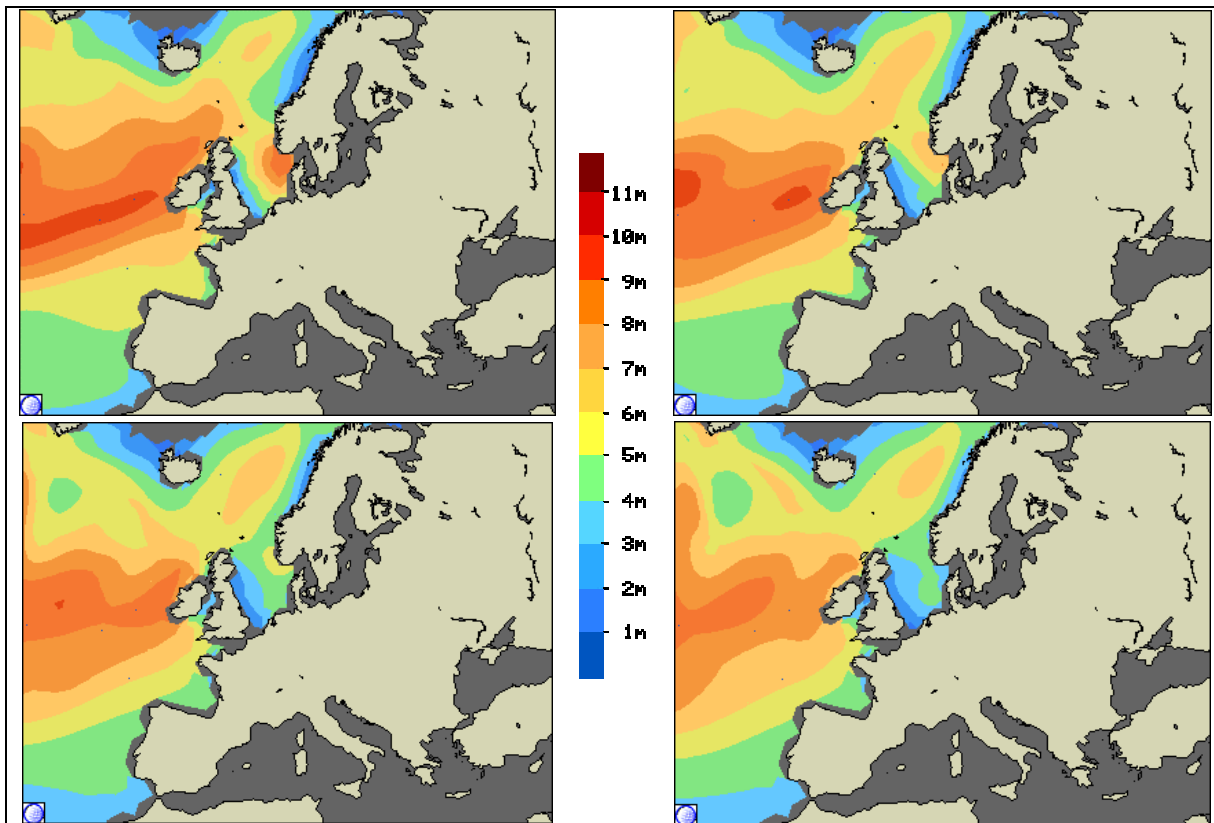


Abbildung H.22: Beispiel 3 - zugeordnete Wellenfronten 29.01.2002

5 Die Vorhersage des gravimetrischen Rauschpegels

Der festgestellte Zusammenhang zwischen dem gravimetrischen Rauschpegel und den Höhen der Meereswellen im Bereich der europäischen Atlantikküsten, der Irischen See und der Nordsee ermöglicht für einen Zeitraum von einigen Tagen eine Vorhersage des in der Station GeoObservatorium Odendorf zu erwartenden gravimetrischen Rauschens und zwar mit Hilfe der Wettervorhersage für die genannten Gebiete. Dies ist von Bedeutung unter anderem für die Planung und Vorbereitung solcher gravimetrischer Beobachtungen und Experimente, deren Ergebnisse in besonderem Maße einen niedrigen Rauschpegel erfordern.

6 Detailuntersuchungen des Rauschsignals

Aufgrund der vorliegenden Beobachtungsergebnisse liegt die Frage nahe, ob und in wieweit die im GeoObservatorium Odendorf beobachteten gravimetrischen Brandungseffekte hinsichtlich ihrer auftretenden Amplituden und Frequenzen abhängig sind unter anderem

- von der Region, in der sie entstehen, insbesondere
- von der lokalen Geologie,
- von den geometrischen Küstenstrukturen,
- von der vorgelagerten Meeresbodentopographie und den Wassertiefen,
- vom Einfallswinkel der Meereswellen,
- von der jeweiligen Wellenperiode, die bekanntermaßen verknüpft ist mit der jeweiligen Höhe der Meereswellen,
- sowie von der lateralen Ausdehnung des Brandungsbereichs.

Die gezielte und umfangreiche Auswertung der vorliegenden Datensätze lieferte lediglich Hinweise darauf, dass solche Zusammenhänge bestehen könnten. Schwierigkeiten für die Dateninterpretation bereitete insbesondere der Sachverhalt, dass die Zeitfenster für die Registrierung sekundlicher gravimetrischer Signale (oder von Signalen mit kürzerem Diskretisierungsintervall) bei dem jetzigen Registriersystem a-priori bestimmt werden müssen und aus technischen Gründen nur mit relativ großen zeitlichen Abständen festgelegt werden können. Diese Einschränkungen führten zu Datensätzen nicht optimaler zeitlicher Positionierung. Es ist daher die Schlussfolgerung zu ziehen, dass sich mit den bisher durchgeführten Beobachtungen die genannten Fragen nicht signifikant beantworten lassen. Somit wäre es (auch) für die Untersuchung und Interpretation der beobachteten gravimetrischen Rauschsignale generell erforderlich, die Datenerfassung technisch zu verbessern, insbesondere durch die Option einer kontinuierlichen Aufzeichnung und Speicherung der sekundlichen Messwerte, welche die Bildung beliebiger Stichproben a-posteriori ermöglicht (z.B. für Frequenzanalysen). Zur besseren Erfassung kurzperiodischer Prozesse (kurzperiodisch im Vergleich zu den Gezeitenperioden) sollte ferner die digitale Signalauflösung der einzelnen Messwerte um eine Zehnerpotenz verbessert werden.

I Technische Weiterentwicklungen

1 Anlass und Zielsetzungen

Nach mehrjährigem Einsatz der Registriereinrichtung und mehrjähriger Anwendung der entwickelten Auswertprogramme wurden Verbesserungsmöglichkeiten erkannt, die einerseits der Ausschaltung potentieller Störeinflüsse bei der Signalaufzeichnung und andererseits der Verbesserung der Signalauflösung dienen können. Die gravimetrischen Registrierungen nach dem Sumatra-Erdbeben im Dezember 2004 zeigten ferner, dass die Löschung der sekundlichen Signalwerte nach der Bildung der minütlichen Mittel in bestimmten Fällen zu einem Informationsverlust führt, der durch Einsatz eines Registrierrechners mit vergrößertem Speicher leicht vermieden werden kann (so ließen zum Beispiel die nach dem Sumatra-Erdbeben aufgezeichneten minütlichen Mittelwerte der gravimetrischen Signale während mehrerer Tage zwar periodische Schwingungen erkennen, die jedoch nicht ausgewertet werden konnten, da die sekundlichen Basiswerte nicht mehr zur Verfügung standen). Da es offensichtlich gelungen ist, für die gravimetrischen Gezeiten Modellparameter mit einer Maßstabsgenauigkeit von 1% und einer Phasensicherheit im Bereich von $0^{\circ},01$ (für die Hauptpartialtiden) zu ermitteln, besteht nun die Möglichkeit, die gravimetrischen Gezeiten als Referenzsignal zu verwenden; zieht man dieses von den beobachteten Signalwerten ab, so erhält man ein hochaufgelöstes Restsignal, welches Feinstrukturen in den beobachteten Zeitreihen zu erkennen ermöglicht und damit Untersuchungen gestattet hinsichtlich potentieller Ursachenzuordnungen. Daher wird (als Erweiterung der bereits vorhandenen Tools-Option) nun ein geeignetes, zusätzliches Auswertprogramm zur Bildung von Dateien *gezeitenbefreiter* sekundlicher Registrierwerte sowie minütlicher und stündlicher Mittelwerte erforderlich.

Das Ziel der Erfassung von Feinstrukturen im zeitlichen Verlauf der Schwere wiederum setzt generell den Einsatz eines leistungsfähigen und hochauflösenden A/D-Wandlers voraus. Im besonderen muss dieser Wandler die Eigenschaft aufweisen, dass Einflüsse von Messbereichüberschreitungen in einem Kanal auf die Messwerte der anderen Registrierkanäle definitiv nicht auftreten; auf dieses Problem wurde bereits im Zusammenhang mit den kurzzeitig möglichen Überschreitungen des Messbereichs bei den ungefilterten Signalen des Gravimeters A206 in Abschnitt G2.6 hingewiesen.

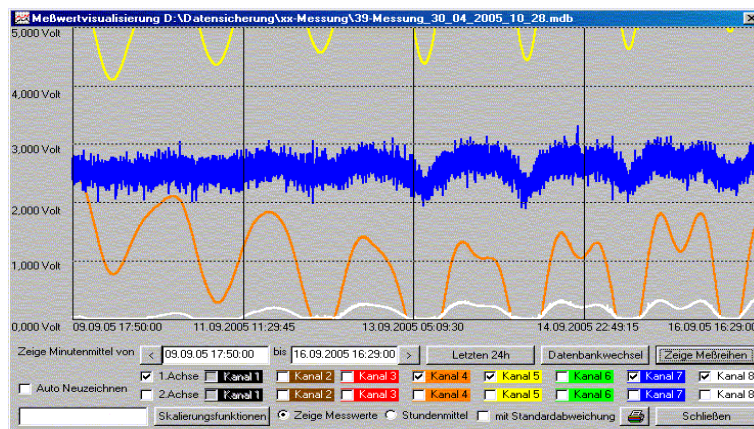


Abbildung I.1: Wirkungen von Über- oder Unterschreitungen des Messbereichs

Die Abbildung I.1 zeigt den Sachverhalt am Beispiel eines zur Verdeutlichung herbeigeführten Signalverlaufs der Gravimeter A233 (Kanal 5, gelbe Spur) und A206, gefilterte Daten (Kanal 4, orange Spur). Das Eingangssignal des Kanals 8 (weiße Spur) beträgt const. = 0,001 Volt, der Eingang des Kanals 5 (blaue Spur) ist offen. Beide Zeitreihen lassen deutlich die Auswirkungen der Signalüberschreitungen in den Kanälen 4 und 5 erkennen; der nutzbare Messbereich des angeschlossenen A/D-Wandlers beträgt 0 bis 5 Volt (siehe Abschnitt B7.6). Nun werden zwar die Nutzsignale (hier dargestellt als minütliche Mittel sekundlicher Einzelwerte) während der Registrierungen durch rechtzeitige Eingabe von geeigneten Sprungsignalen innerhalb der Grenzwerte des Messbereichs gehalten, in Zeiträumen ungünstiger mikroseismischer Verhältnisse jedoch können in einem Kanal mehr oder weniger sporadisch Einzelwerte auftreten, die außerhalb des Messbereichs liegen und die zugeordneten Einzelwerte anderer Kanäle ebenfalls beeinflussen. Bei der Bildung der Minutenmittel entstehen daher potentiell Fehler, die es grundsätzlich zu vermeiden gilt. Die Ursache des genannten Sachverhalts ist konstruktionsbedingt und keinesfalls nur typisch für einfache A/D-Wandler-Schaltungen.

2 Der A/D-Wandler

In der weiterentwickelten Registrieranlage wird der A/D-Wandler PCI-AD16N – TS der Firma Kolter Electronic, Erfstadt (www.kolter.de) eingesetzt. Die hier wesentlichen technischen Daten lauten:

Kanäle	16, single ended, unipolar/bipolar
A/D-Auflösung	16 bit
Messspannungen	0...2,5 0...5 0...10 ± 5 ± 10 Volt, feste Einstellungen mit Jumper
Überspannungsschutz	im single-ended mode max. 44 V _{ss} , bei TAZ-Dioden (Option TS) wird auf 12 Volt vorbegrenzt
Eingangswiderstand	> 1 M Ω (ohne 100k Ω -Shunt) je A/D-Kanal bei single ended
A/D-Abtastrate	typ. 24 μ s
S&H	sample-and-hold Funktion als C-Netzwerk im Wandler enthalten
Multiplexerzeit	typ. 4 μ s, 4...10 μ s für single ended
Toleranz, lin. 16 bit	± 3 LSB (entsprechend $4,6 \times 10^{-5}$ oder 0,046‰)
Offset/Drift	worst-case: typ. $\sim 1,15$ mV pro 10° Celsius
Betriebsbereich	max. Dauerbetrieb...70°C

Tabelle I.1: Technische Daten des A/D-Wandlers Kolter PCI-AD16N – TS

Um Vergleichbarkeit mit den bisherigen Messdaten herzustellen, wurde die Messspannung auf 0 bis 5 Volt eingestellt. Durch eine Schaltungsergänzung wurde auf Wunsch die in den Registrierrechner eingebaute Platine ferner dahingehend verbessert, dass Über- oder Unterschreitungen des Messbereichs in einem Kanal keinen messbaren Einfluss auf die digitalisierten Signale der anderen Kanäle ausüben. Durch eingehende Versuche konnte dieser Sachverhalt experimentell bestätigt werden. Es sind zwei Gruppen zu je 8 Kanälen verfügbar; für jede der beiden Gruppen kann unabhängig ein eigener Messspannungsbereich eingestellt werden.

3 Der Registrierrechner

Basierend auf der Forderung nach kontinuierlicher Speicherung der sekundlichen Messwerte aus Abschnitt H6 musste ein modernisierter Computer zum Einsatz gebracht werden. Die wesentlichen Daten des gewählten Registrierrechners sind:

- CPU Intel Celeron 2,8GHz
- RAM 256 MB
- Festplatte 80 GB

Durch den Einsatz eines im Vergleich zu den bisher eingesetzten Registrierrechnern (Abschnitt B7.4) mehrfach schneller arbeitenden Prozessors und verkürztem Festplattenzugriff ist es in Verbindung mit dem verbesserten Programmsystem GeoDyn16K (siehe Abschnitt I5) nunmehr möglich, das Diskretisierungsintervall auf 0,01 Sekunde zu verringern und somit die erreichbare maximale Aufzeichnungsfrequenz von bisher 5Hz auf bis zu 100Hz zu steigern.

4 Das Betriebssystem

Als Betriebssystem wurde in Übereinstimmung mit Abschnitt C2 gewählt *Windows XP Professional, V.2002*; damit soll primär sichergestellt werden, dass innerhalb eines längeren Zukunftszeitraums keine Probleme hinsichtlich der Nutzung solcher neu entwickelter kommerzieller Programme auftreten, die bei der Auswertung der beobachteten Messdaten hilfreich sein könnten.

5 Anpassung und Weiterentwicklung des Programmsystems Geo-Dyn

Die Architektur des ursprünglichen Programmsystems GeoDyn sollte weitestgehend erhalten bleiben. Es galt jedoch eine Anpassung an den 16bit-A/D-Wandler mit 16 Kanälen vorzunehmen. Die ursprüngliche Konzeption zur Anpassung des Programms an einen neuen A/D-Wandler lediglich durch Austausch einer DLL (siehe Ab-

schnitt C1) konnte hier nicht vorgenommen werden, da damit weiterhin eine Beschränkung auf acht Registrierkanäle gegeben wäre und somit der gesamte Funktionsumfang des verbesserten A/D-Wandlers nicht hätte vollständig ausgeschöpft werden können. Daraufhin erfolgte eine Weiterentwicklung des Programms MesswertregistrierungA einerseits zur 16-Kanal-Variante *Messwertregistrierung16K* und einer Variante MesswertregistrierungB als Ergänzung, die eine zeitgleiche Parallelregistrierung zu dem 16K-System mit den bisher eingesetzten A/D-Wandlern ermöglicht. Die Variante Messwertregistrierung16K zeichnet zudem die einzelnen Messwerte und die daraus resultierenden minütlichen Mittelwerte um eine Dezimalstelle erweitert auf, um der verbesserten Auflösung von 12bit auf 16bit Rechnung zu tragen. Umgestellt wurde in diesem Zusammenhang auch der akustische Signalgeber. Dieser bedient sich nun nicht mehr des eingebauten Lautsprechers, sondern einer Soundkarte, wodurch eine Installation der Lautsprecher ermöglicht wird, welche bei Bedarf Signale im gesamten Gebäudebereich des GeoObservatoriums wahrnehmen läßt.

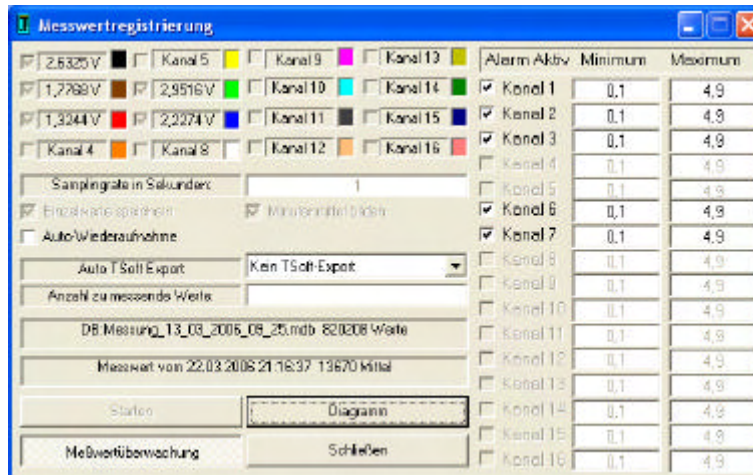


Abbildung I.2: Programmteil „Messwertregistrierung16K“ (vgl. Abbildung C.1)

Daneben wurde eine Anpassung und damit Weiterentwicklung des Systems ToolsA zur Version *Tools16K* vorgenommen, die neben der Erweiterung sämtlicher im Abschnitt C5 beschriebenen Programmteile von 8 auf 16 Kanäle einige weitere Neuerungen enthält. So wurde neben der bereits in Abschnitt II genannten erweiterten Gezeitenbefreiung auf die im einzelnen im Abschnitt I6 eingegangen wird auch eine Option zur nachträglichen Berechnung der Minutenmittel geschaffen. Die Berechnung erfolgt analog zu der auch in der Messwertaufzeichnung verwendeten Methode, jedoch mit dem Unterschied, dass diese nicht direkt während der Messwertaufzeichnung stattfindet, sondern wahlweise auch a-posteriori erfolgen kann. Eine weitere Innovation stellt die Option „Sprungkorrektur *.dat“ dar, die es entsprechend der bisherigen Sprungkorrektur (Abschnitt C5.1) auch erlaubt, Sprünge direkt in den ETERNA Eingangsdateien zu korrigieren und somit eine komfortable Möglichkeit bietet, z.B. ungenau durchgeführte oder erst im Nachhinein erkannte Sprünge zu verbessern (siehe hierzu auch Abschnitt E3.3 und E5).

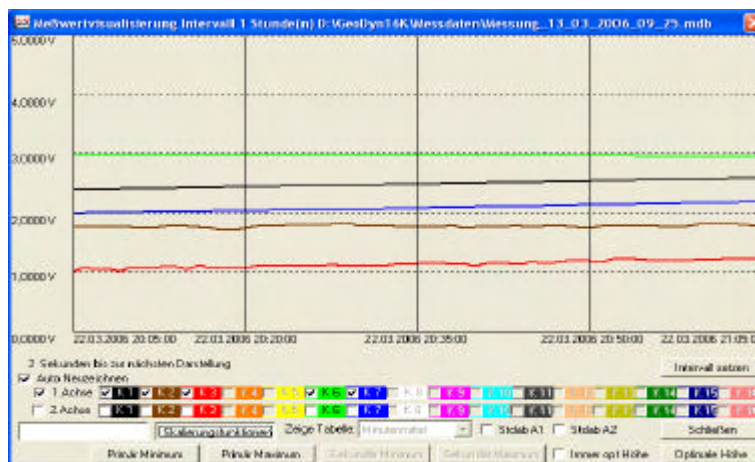


Abbildung I.3: Programmteil „16K_Meßwertvisualisierung“ (vgl. Abbildung C.2)

Auch zum Programmteil Visualisierung wurde ein Upgrade zu *Visualisierung16K* erstellt. Hier ist die wesentlichste Änderung die Erweiterung der im Abschnitt C4 beschriebenen Version auf 16 Kanäle und die Steigerung der Genauigkeit um eine Dezimalstelle und die wahlweise direkte Darstellung der gemessenen Einzelwerte. Die Anzahl der anzuzeigenden Werte je Kanal wurde von 10.000 auf 43.201 erhöht und bietet damit die Möglichkeit über Zeiträume von 2 Sekunden bis zu 12 Stunden bei sekundlich erfassten Messwerten zu informieren. Die Zweordinatendarstellung wurde erweitert; diente sie in der ursprünglichen Version lediglich zur zusätzlichen Anzeige der Standardabweichungen der ausgewählten Kanäle, so kann jetzt für jede Achse separat entschieden werden, ob die Messwerte oder die zugeordneten Standardabweichungen dargestellt werden bei frei wählbarem Maßstab. Somit ist auch die alleinige Aufführung der Standardabweichungen möglich, ohne gleichzeitig über die Messwerte zu informieren.

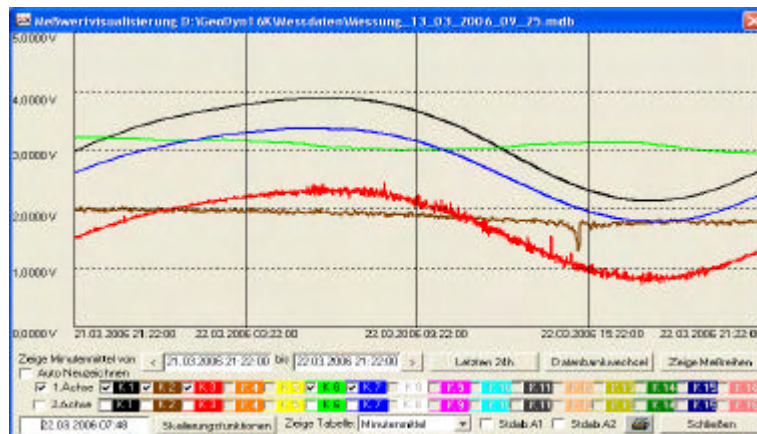


Abbildung I.4: Programmteil „16K_Meßwertvisualisierung“, verändertes Zeitintervall, Zeitintervalleinstellung möglich von 2 Sekunden bis 12 Stunden bei Anzeige sekundlich erfasster Messwerte

Die Programmteile Visualisierung und Tools sind sowohl in der Programmversion Geodn16K, als auch in der Version GeoDynB kompatibel mit den Betriebssystemen Win95, Win98, WinME, Win2000, WinNT4 und WinXP. Der Programmteil Messwertregistrierung ist in beiden Versionen kompatibel mit den Systemen WinNT4, Win2000 und WinXP, in der Version 16K besteht darüber hinaus auch Kompatibilität zu Win95, Win98 und WinME.

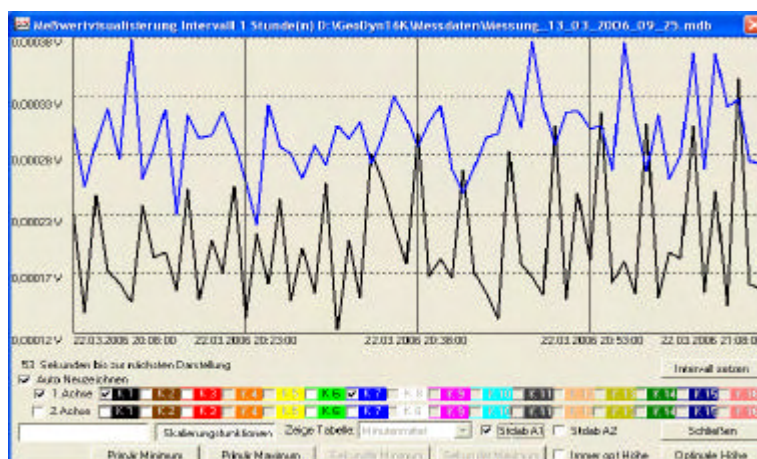


Abbildung I.5: Paralleldarstellung der Standardabweichungen minütlicher Mittel mit gemeinsamer Ordinate wählbaren Maßstabs

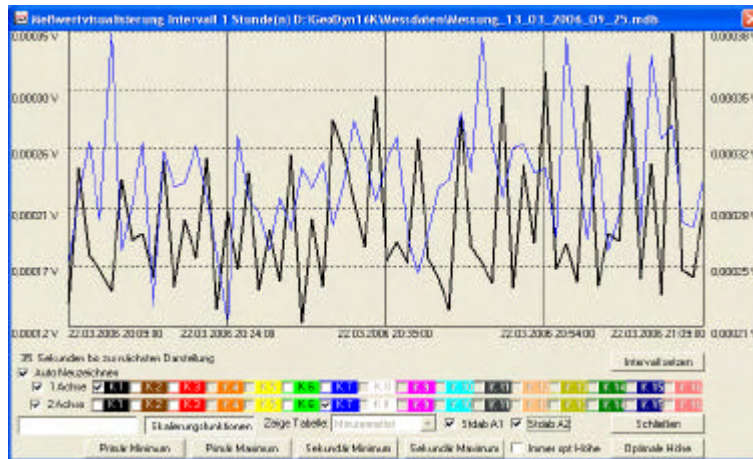


Abbildung I.6: Paralleldarstellung der Standardabweichungen minütlicher Mittel mit zwei getrennten Ordinaten wählbaren Maßstabs

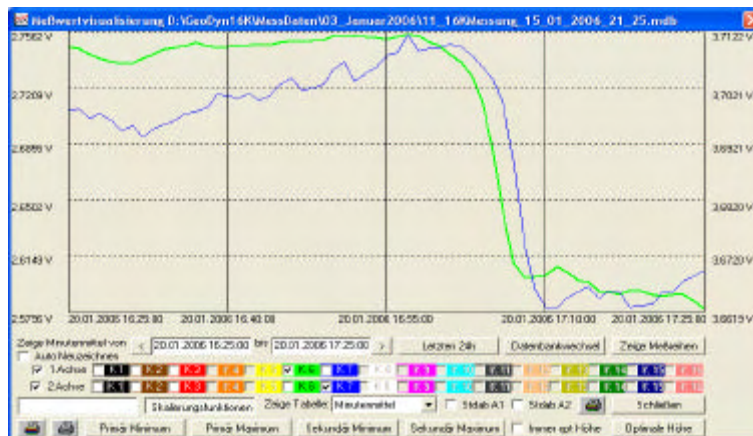


Abbildung I.7: Paralleldarstellung des Verlaufs der minütlicher Mittel eines gravimetrischen Signals und des Luftdrucks mit zwei getrennten Ordinaten wählbaren Maßstabs zur graphischen Bestimmung der Luftdruckregression, rechte Ordinate: 0,05Volt entspricht etwa 5 μ Gal, linke Ordinate: 0,18Volt entspricht etwa 1,8mbar, Nicht-druckdichtes Gravimeter LCR716F

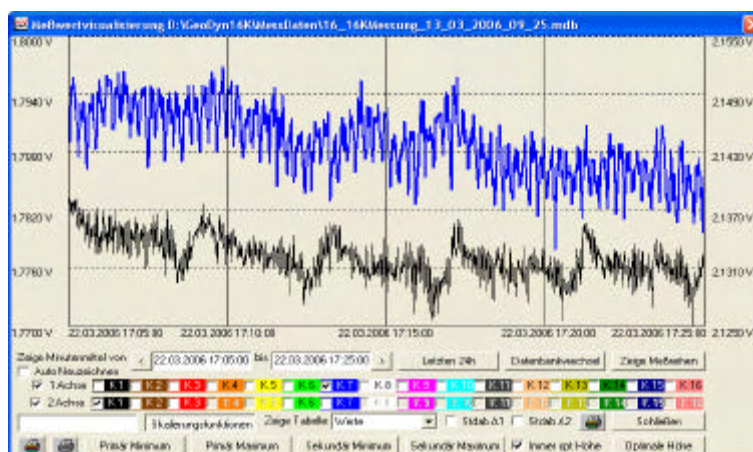


Abbildung I.8: Paralleldarstellung des Verlaufs zweier sekundlicher Beobachtungsreihen mit individueller Ordinatenanpassung, 0,03 Volt entspricht etwa 3 μ Gal, (Kanal 1 Gravimeter A233, Kanal 7 Gravimeter LCR716F, Schalteffekte der Thermostaten erkennbar)

6 Das Programm Gezeitenbefreiung16K

Das Programm dient, als Ergänzung zu der in dem Programmteil Tools bereits vorhandenen Option (Abschnitt C5.8), der Berechnung gezeitenreduzierter gravimetrischer Registrierdaten und zwar sowohl der ursprünglichen, *sekündlichen* Registrierwerte als auch der minütlichen und stündlichen Mittelwerte. Wurde für die digitale Erfassung des kontinuierlichen Verlaufs der Messsignale ein anderer Stützstellenabstand als der als Standard vorgesehene sekundliche Zeitabstand gewählt, so kann dieser (innerhalb gewisser Grenzen) alternativ eingegeben werden bzw. ergibt sich direkt aus den aufgezeichneten Daten.

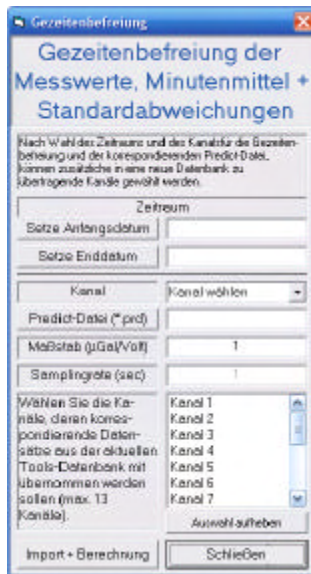


Abbildung I.9: Programmteil „Gezeitenbefreiung16K“

Um den Rechenaufwand zu reduzieren, werden mit Hilfe des Programm-Moduls PREDICT im Programmsystem ETERNA 3.30 nach Eingabe der Stationsparameter und der für die Beobachtungsstation gültigen Gezeitenparameter zunächst lediglich die minütlichen Werte der gravimetrischen Gezeiten berechnet; durch lineare Interpolation zwischen den Stützstellen erhält man die sekundlichen Werte (oder die Werte mit einem anderen Stützstellenabstand). Nach Eingabe des jeweils gültigen Registriermaßstabs werden die sekundlichen, minütlichen oder stündlichen Signalwerte in Schwereeinheiten umgerechnet und weisen nun dieselbe Maßeinheit auf wie die Zeitreihe der gravimetrischen Modellgezeiten. Es werden dann die Differenzen zwischen den Messwerten und den zugeordneten Werten der Modellgezeiten gebildet. Die Ergebnisse der Gezeitenreduktion werden in einer Datei abgelegt, die formal der Ursprungsdatei entspricht, so dass die vorhandenen Visualisierungs- und Toolsoptionen unmittelbar aufgerufen und verwendet werden können.

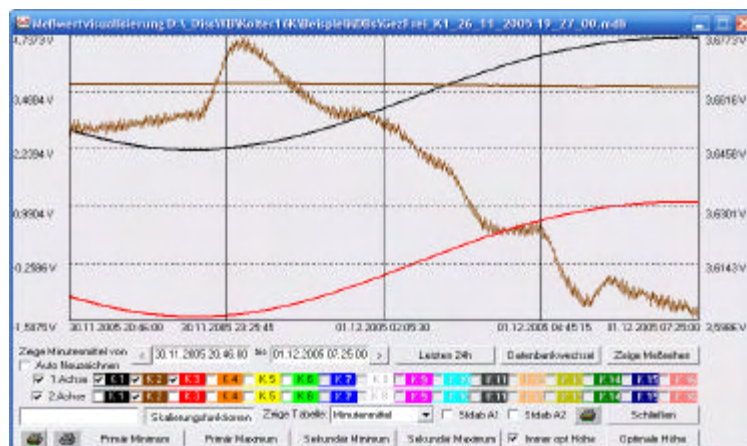


Abbildung I.10: Ergebnis einer Gezeitenbefreiung, Kanal 1 (schwarz): Eingangssignal sekundlicher Messwerte, Kanal 2 (braun): gezeitenbefreites Eingangssignal (zweimal mit unterschiedlichen Skalierungen dargestellt), Kanal 3 (rot): Modellgezeitenverlauf laut PREDICT - Maßstab: 1Volt entspricht ca. 100µGal

Das Programm wird gestartet nach Eingabe der Ursprungsdatei, des Kanals, für dessen Daten die Gezeitenreduktion ausgeführt werden soll, sowie des Zeitintervalls (Zeitpunkt von Beginn und Ende). Aus numerischen Gründen ist es sinnvoll bei sekundlicher Abtastrate die Länge der Zeitreihe zu begrenzen; bei umfangreichen Datensätzen sollten daher zunächst Teildateien gebildet werden, die dann bei Bedarf anzufordern sind (Tools-Option Abschnitt C5.3). Zusätzlich können aus der Datei des Ursprungssignals bis zu 13 weitere Kanäle in die Ergebnisdatei übernommen werden, z.B. zur Gegenüberstellung des gezeitenbefreiten Signals mit dem Temperaturverlauf.

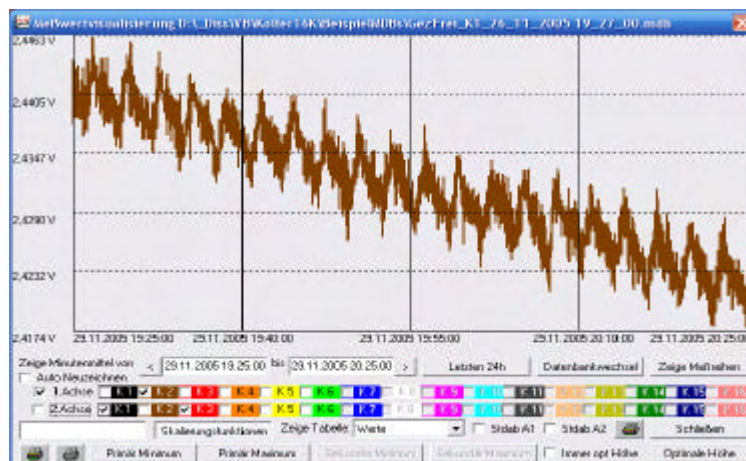


Abbildung I.11: Ausschnittsvergrößerung des zeitenbefreiten Signals – Kanal 2, erkennbar sind die Schaltungen der thermistor-gesteuerten Heizung bei Gravimeter A233 – Maßstab siehe Abbildung I.10

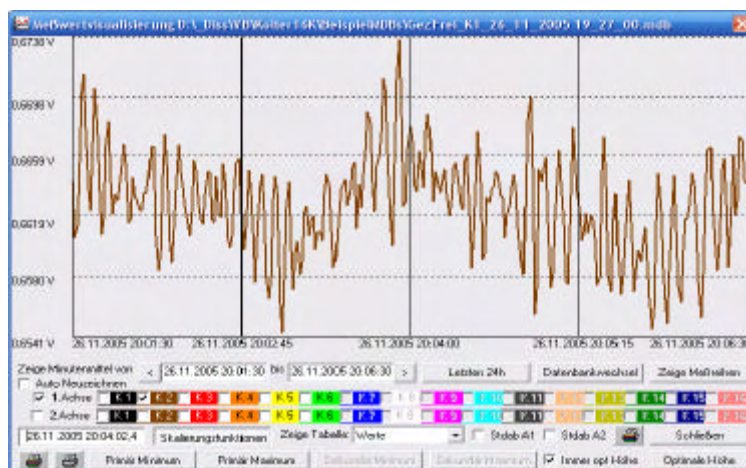


Abbildung I.12: Weiter verstärkte Vergrößerung des zeitenbefreiten Signals aus Abbildung I.10. Hier wird eine zusätzliche Schwingung mit einer Frequenz von ca. 0,2 Hz sichtbar, siehe auch Abbildung H.4 – Maßstab siehe Abbildung I.10

Nach dem vorstehenden Konzept wird für weiterführende Untersuchungen der bisher gewonnenen Messdaten auch die Zeitenreduktion der minutlichen und stündlichen Mittel dieser Daten ermöglicht.

7 Ergebnisse von Testmessungen

7.1 Zielsetzung

Die verbesserte Registriereinrichtung wurde am 16. November 2005 in Betrieb genommen. Die bis zum 28. Juni 2006 während eines 222-tägigen Probezeitraumes ausgeführten gravimetrischen Beobachtungen dienten in erster Linie und zunächst der eingehenden Untersuchung der Leistungsfähigkeit und Betriebssicherheit der Einrichtung sowie der Überprüfung der uneingeschränkten Funktionsfähigkeit des neuen Programmsystems.

7.2 Der Registriermaßstab

Für den Beobachtungszeitraum vom 24.03.2003 bis 10.10.2004 (Registriersystem GeoDynA) wurde der Registriermaßstab zu $92,660 \mu\text{Gal}/\text{Volt}$ bestimmt, siehe Abschnitte G3.1.2 und G3.2.1. Der zugeordnete, normierte elektromagnetische Eichausschlag, ermittelt aus 77 Einzelwerten, betrug $k_{\text{elmag}} = 3,84318 \text{ Volt}/\text{mA}$, mit einer Standardabweichung von $\pm 0,00018$, entsprechend relativ 0,06%, siehe Abschnitt G3.4. Für den Beobachtungszeitraum vom 16.11.2005 bis 28.06.2006 (Registriersystem Geodyn16K) wurde der mittlere elektromagnetische Eichausschlag aus 29 Beobachtungen bestimmt zu $k_{\text{elmag}} = 3,908065 \text{ Volt}/\text{mA} \pm 0,000250$ (relativ $\pm 0,064\%$). Das Maßstabsverhältnis beträgt somit 0,983397, der aktuelle Registriermaßstab **91,122 $\mu\text{Gal}/\text{Volt}$** .

7.3 Auswertungsergebnisse

7.3.1 Numerische Datenfilterung mit dem Algorithmus Pertzev57

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908           File:  A233G01d

Summary of observation data :

20051116150000...20060330160000  20060401110000...20060518 20000
20060518170000...20060628210000
Number of recorded days in total :  221.96
Numerical filter is PERTZEV57  with 37 coefficients.
Registriermaßstab 91,122 µGal/Volt           Signalverzögerung 16.7 sec

adjusted tidal parameters :

from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]          [deg]  [deg]

0.501370 0.911390 Q1    66.9173  1.14706  0.00295  -0.0408  0.1472
0.911391 0.947991 O1    350.3630  1.14987  0.00056  0.0983  0.0279
0.947992 0.981854 M1    27.8365  1.16162  0.00559  0.1404  0.2759
0.981855 0.998631 P1    163.6918  1.15459  0.00143  0.6145  0.0712
0.998632 1.023622 S1K1  487.6219  1.13790  0.00043  0.1529  0.0215
1.023623 1.054746 J1    27.8065  1.16041  0.00769  -0.1845  0.3798
1.054747 1.470243 O01   15.0391  1.14713  0.00812  -0.0032  0.4051
1.470244 1.880264 2N2   10.6606  1.15393  0.01112  3.4767  0.5521
1.880265 1.914128 N2    68.3856  1.18210  0.00225  2.8809  0.1091
1.914129 1.950419 M2   359.1655  1.18867  0.00041  2.2316  0.0198
1.950420 1.984282 L2    10.0483  1.17654  0.01023  0.1830  0.4982
1.984283 2.002738 S2    167.0966  1.18862  0.00086  0.7384  0.0417
2.002739 2.451943 K2    45.5883  1.19304  0.00242  0.6592  0.1162
2.451944 3.381378 M3     4.1636  1.10519  0.03081  2.6841  1.5966

Adjusted meteorological or hydrological parameters:

no. regr.coeff.      stdv.  parameter  unit

  1    26.05232      0.87044   airpress  nm/s**2 /10 hPa

Standard deviation of weight unit:      7.212nm/s2

```

Tabelle I.2: Ergebnisse der Gezeitenanalyse der Testdaten – Pertzev57

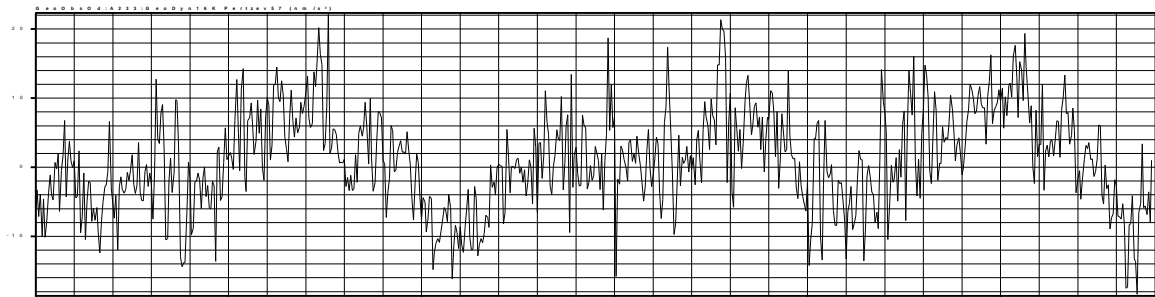


Abbildung I.13: Beispiel für den Verlauf der Residuen - Zeitraum 01. 03. bis 31. 03. 2006 - 1 Intervall entspricht 1 Tag

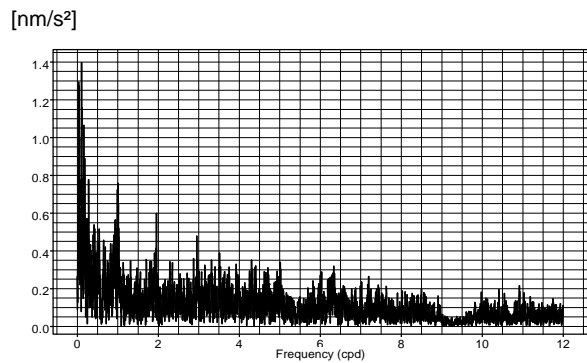


Abbildung I.14: Gravimeter A233, Amplitudenspektrum der Residuen

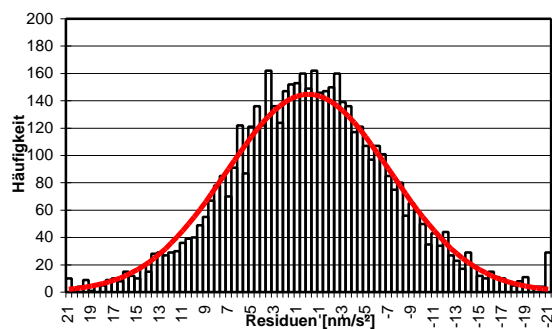


Abbildung I.15: Residuenhistogramm mit Normalverteilung Gravimeter A233 - Histogramm der Residuen - mit Luftdruckregression - Zeitraum: November 2005 bis Juni 2006 – Filter Pertzev57

7.3.2 Numerische Datenfilterung mit dem Algorithmus Pertzev59

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908                               File:  A233G01e

Summary of observation data :
20051116150000...20060330160000  20060401110000...20060518 20000
20060518170000...20060628210000

Number of recorded days in total :  221.96
Numerical filter is PERTZEV59 with 51 coefficients.
Registriermaßstab 91,122  $\mu Gal/Volt$       Signalverzögerung 16.7 sec

adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]    [cpd]    [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]

.501370  0.911390  Q1    66.9278  1.14724  0.00307  -0.0544  0.1529
0.911391  0.947991  O1    350.3606  1.14986  0.00057  0.1010  0.0285
0.947992  0.981854  M1    27.8484  1.16212  0.00568  0.1241  0.2798
0.981855  0.998631  P1    163.6888  1.15456  0.00146  0.6120  0.0725
0.998632  1.023622  S1K1  487.6380  1.13794  0.00043  0.1534  0.0218
1.023623  1.054746  J1    27.8239  1.16113  0.00789  -0.1488  0.3893
1.054747  1.470243  O01   15.0354  1.14685  0.00849  0.0518  0.4242
1.470244  1.880264  2N2   10.6600  1.15386  0.01152  3.5154  0.5721
1.880265  1.914128  N2    68.3828  1.18205  0.00229  2.9191  0.1111
1.914129  1.950419  M2   359.1681  1.18868  0.00042  2.2347  0.0200
1.950420  1.984282  L2    10.0590  1.17779  0.01029  0.1755  0.5003
1.984283  2.002738  S2   167.1253  1.18883  0.00088  0.7382  0.0432
2.002739  2.451943  K2    45.5885  1.19304  0.00245  0.6432  0.1177
2.451944  3.381378  M3     4.1642  1.10533  0.03093  2.7624  1.6026

Adjusted meteorological or hydrological parameters:

no. regr.coeff.      stdv.  parameter  unit
1      25.77677      0.99451  airpress  nm/s**2 / 10 hPa

Standard deviation of weight unit:      5.129 nm/s2
    
```

Tabelle I.3: Ergebnisse der Gezeitenanalyse der Testdaten – Pertzev59

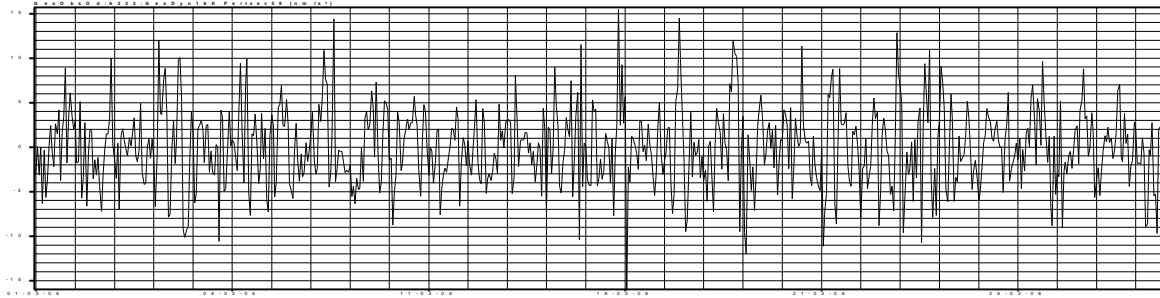


Abbildung I.16: Beispiel für den Verlauf der Residuen - Zeitraum 01. 03. bis 31. 03. 2006 - 1 Intervall entspricht 1 Tag

[nm/s²]

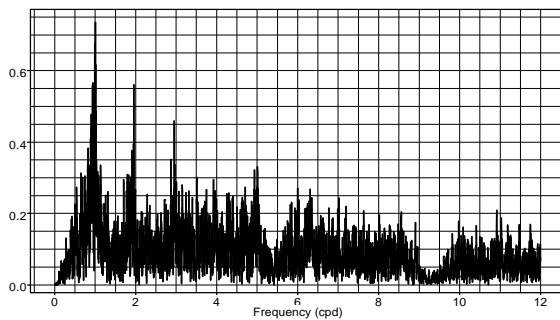


Abbildung I.17: Gravimeter A233, Amplitudenspektrum der Residuen

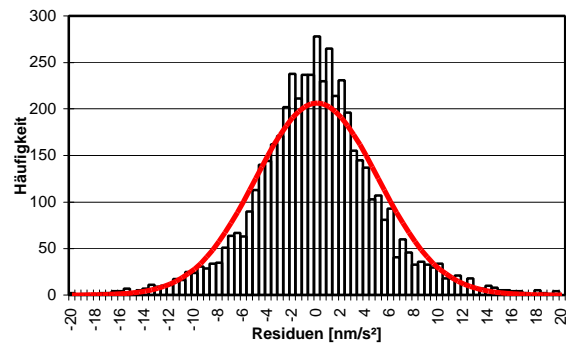


Abbildung I.18: Residuenhistogramm mit Normalverteilung Gravimeter A233 - Histogramm der Residuen - mit Luftdruckregression - Zeitraum: November 2005 bis Juni 2006 – Filter Pertzev59

7.4 Ergebniszusammenfassung

- Eingehende Untersuchungen des A/D-Wandlers PCI-ADN16N-TS (Abschnitt I2) zeigten keinerlei Einflüsse von Signalüberschreitungen in einem Kanal auf die Messdaten der anderen Registrierkanäle, somit besteht nun die gewünschte Komponentenunabhängigkeit.
- Alle Module des Programmsystems GeoDyn16K arbeiten fehlerfrei.
- Der zeitliche Verlauf der Residuen nach der Datenanalyse unter Verwendung des numerischen Filters Pertzev57 zeigt weiterhin ausgeprägte Erhaltungstendenzen. Durch Filterung mit dem Algorithmus Pertzev59 werden diese Effekte deutlich reduziert. Andererseits weist hier das Residuenhistogramm im Vergleich mit dem Pertzev57-Histogramm eine deutlich vergrößerte Abweichung von der Normalverteilung auf.
- Die zugeordneten Residuenspektren lassen erkennen, dass durch den längeren Filteroperator im wesentlichen die (im Vergleich zu den Gezeitenperioden) kurzperiodischen Signalanteile in den Beobachtungsdaten eliminiert werden. Dieser für die Gezeitenanalyse gewünschte Effekt führt aber dazu, dass Informationen über die Qualität der Ursprungsdaten verloren gehen – worauf zuvor mehrfach hingewiesen wurde. An den Stellen 1cpd sowie 2 und 3cpd treten Signalspitzen auf mit Beträgen von maximal 0,7nm/s² (0,07μGal), die wahrscheinlich dominant dem Verlauf der antropogen gesteuerten täglichen Variationen des mikroseismischen Störpegels zuzuordnen sind, und zwar unter anderem als Folge der wegen des zu kurzen Registrierzeitraums nicht durchführbaren Trennung von S_1/K_1 .
- Die Wirkung der verstärkten Filterung zeigt sich in der deutlichen Abnahme des Betrags der berechneten Standardabweichungen (als ein Maß für die jeweils erzielte Modellanpassung) von $\pm 7,2$ auf $\pm 5,1$ nm/s².
- Bemerkenswert ist, dass die berechneten Gezeitenparameter und die zugeordneten berechneten Standardabweichungen durch die unterschiedliche numerische Filterung nur minimal beeinflusst werden; dies gilt nicht nur für die Hauptpartialtiden, sondern auch für Partialtiden mit geringer Amplitude.

Damit zeigt sich erneut (siehe Bemerkungen zu Tabelle G.86 und zu Tabelle G.87), dass die berechneten Standardabweichungen der Gewichtseinheit, also die Modellanpassungen, nur mit Einschränkungen als Maß für die Güte der Parameterschätzung dienen können.

- Der vorgenannte Sachverhalt lässt sich übrigens dadurch erklären, dass bei der Gezeitenanalyse die (relativ) langwelligen Störprozesse die geschätzten Parameter des ganz- und halbtägigen Gezeitenbandes und ihre berechneten Standardabweichungen kaum beeinflussen. Wenn aber die Bestimmung dieser Parameter das alleinige Ziel der Datenauswertung ist, kann die Filterung mit dem Operator Pertz57 als durchaus hinreichend bewertet werden, mit ebenjenem Vorteil, dass bei dessen Anwendung in den Residuen Informationen über Strukturen in den Ursprungsdaten erhalten bleiben.
- Die berechneten Gezeitenparameter weisen keine signifikanten Abweichungen zu den Werten des vorläufigen Referenzdatensatzes in Tabelle G.61 auf. Eine eingehende Gegenüberstellung sollte erst erfolgen, wenn ein *Jahreszeitraum* mit dem Registriersystem Geodyn16K beobachtet wurde (siehe nachfolgendes Kapitel J3).
- Im Hinblick auf die nunmehr um den Faktor $2^4 = 16$ erhöhte Auflösung der Registrierdaten erfordert jener Sachverhalt besondere Beachtung, dass sich nämlich die berechneten Standardabweichungen der Gewichtseinheit, die sich auf die unterschiedlichen Registriersysteme Geodyn16K und GeoDynA beziehen, nur geringfügig unterscheiden: $\pm 5,1 \text{ nm/s}^2$ in Tabelle I.3 gegenüber $\pm 5,7 \text{ nm/s}^2$ in Tabelle G.61, also lediglich um den Faktor 1,1, wobei sich dieser geringe Unterschied bereits durch die bei dem System Geodyn16K erzielte Verbesserung hinsichtlich der Komponentenunabhängigkeit mindestens teilweise erklären ließe. Messtechnisch bedeutet die bemerkenswert gute Übereinstimmung, dass die zuvor verwendeten A/D-Wandler höchst einfacher Ausführung dem A/D-Wandler modernster Technologie für die Bestimmung von Gezeitenparametern als weitgehend gleichwertig eingestuft werden können (sofern das genannte Problem der Messwertüberschreitungen vermieden wird). Will man die Bestimmungsgenauigkeit der Gezeitenparameter als Zielgrößen verbessern, bedarf es also nicht einer Erhöhung der Auflösung der Registriersignale, sondern der Vermeidung jener Effekte, welche die genannten Strukturen im zeitlichen Verlauf der Residuen hervorrufen oder deren Modellierung und individueller Elimination. Hierzu aber ist es zunächst erforderlich, überhaupt einmal qualitativ festzustellen, welches die steuernden physikalischen Prozesse sind.

J Aktualisierte Gezeitenparameter für die Station GeoObservatorium Odendorf

1 Vorbemerkung

Die am 24.03.2003 mit dem Referenzgravimeter A233 (Abschnitt G6.8.4) begonnenen gravimetrischen Registrierungen wurden über den bis zum 10.10.2004 reichenden und untersuchten Zeitraum (Abschnitte G3 bis G6) hinaus fortgesetzt. Es wurden jedoch unmittelbar nach dem 10.10.2004 zunächst einige instrumentelle Verbesserungen hinsichtlich der elektrischen Abschirmung von Störsignalen sowie der Erdung vorgenommen. Diese Maßnahmen führten aus unbekanntem Gründen zu einer geringen Veränderung des Registriermaßstabes. Mit Hilfe der elektromagnetischen Eicheinrichtung (Abschnitt G3.4) konnten das Maßstabsverhältnis gegenüber den vorläufigen Referenzwerten (Tabelle G.60 und Tabelle G.61) jedoch mit einer relativen Genauigkeit von etwa $\pm 0,1\%$ ermittelt und die aufgetretenen Maßstabsunterschiede entsprechend berücksichtigt werden. Am 09.11.2005 wurden die Signalaufzeichnungen mit dem System GeoDynA beendet und dieses durch das System Geodyn16K ersetzt; die Messungen mit dem verbesserten System wurden am 16.11.2005 begonnen (Abschnitt I7). Auch hier konnte mit Hilfe der elektromagnetischen Eicheinrichtung das Maßstabsverhältnis gegenüber den ursprünglichen Referenzwerten mit hinreichender Genauigkeit (etwa $\pm 0,1\%$) bestimmt werden.

Es werden die folgenden Bezeichnungen eingeführt:

Registrierzeitraum 24.03.2003 bis 10.10.2004, GeoDynA, identisch mit dem Datensatz, der Tabelle G.60 und Tabelle G.61 zugrunde liegt:	Datensatz A233_8k1,
Registrierzeitraum 21.10.2004 bis 09.11.2005, GeoDynA:	Datensatz A233_8k2,
Registrierzeitraum 16.11.2005 bis 08.11.2006, GeoDyn16K:	Datensatz A233_16k1.

Bei den weiterführenden Messungen mit dem Referenzgravimeter A233 wurde und wird darauf geachtet, dass aufeinander folgende Blöcke mit einer zeitlichen Ausdehnung von etwa 1 Jahr entstehen. Diese Maßnahme soll für jeden Block einerseits eine möglichst zuverlässige Bestimmung der Parameter der Partialtide S_1 ($15,00^\circ/\text{h}$) ermöglichen, als ein Indikator für auftretende tägliche Störprozesse, sowie generell die Möglichkeit bieten, gleichwertige Jahresdatensätze hinsichtlich möglicher Auffälligkeiten gegenüber vorhergehenden oder nachfolgenden Sätzen zu untersuchen.

2 Datensatz A233_8k2

2.1 Der Registriermaßstab

Normierter elektromagnetischer Eichausschlag aus 23 Einzelwerten

$$k_{\text{elmag}} = 3,906721 \pm 0,000417 (\pm 0,1\%),$$

Maßstabsverhältnis gegenüber A233_8k1: $3,843232 / 3,906721 = 0,983749$

Registriermaßstab bezogen auf A233_8k1: $92,660 \times 0,983749 = \mathbf{91,154 \mu\text{Gal/Volt}}$.

2.2 Ergebnisse der Gezeitenanalyse (Filter Pertzev59)

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908                               File: 233End2c
Summary of observation data :
20041021 0...20041223140000 20050101110000...20050328150000
20050329 0...20050620 90000 20050622220000...20050908100000
20050924180000...20051109170000 Number of recorded days: 356.79
Numerical filter is PERTZEV59 with 51 coefficients.
Registriermaßstab 91,154 µGal/Volt Signalverzögerung 16,7 sec
from to wave ampl. ampl.fac. stdv. ph. lead stdv.
[cpd] [cpd] [nm/s**2 ] [deg] [deg]
0.501370 0.911390 Q1 66.7876 1.14483 0.00245 -0.3038 0.1225
1.14037 0.00157 -0.4258 0.0788
0.911391 0.947991 O1 350.3834 1.14993 0.00046 0.0758 0.0230
1.14876 0.00030 0.0577 0.0148
Differenzen +0.00117 +0.0181
0.947992 0.981854 NO1 27.6154 1.15239 0.00578 0.2214 0.2881
1.14765 0.00344 0.4073 0.1715
0.981855 0.998631 P1 163.7565 1.15504 0.00117 0.3143 0.0580
1.14952 0.00075 0.0476 0.0373
Differenzen +0,00552 +0.2667
0.998632 1.001369 S1 4.1367 1.23420 0.07173 -3.3429 3.3461
1.42615 0.04601 -1.7755 1.8606
Differenzen -0,19195 -1.5674
1.001370 1.023622 K1 487.4365 1.13747 0.00035 0.1928 0.0175
1.13657 0.00023 0.2188 0.0113
Differenzen +0.00090 -0.0260
1.023623 1.035379 TET1 4.9787 1.08651 0.03135 -1.4892 1.6533
1.21395 0.01989 -0.9534 0.9379
1.035380 1.057485 J1 27.7634 1.15860 0.00662 0.3203 0.3274
1.15383 0.00422 -0.2221 0.2091
1.057486 1.071833 SO1 4.3034 1.08264 0.03592 -0.7080 1.9002
1.11919 0.02345 -0.9505 1.2015
1.071834 1.470243 OO1 15.2560 1.16365 0.00771 -0.7374 0.3793
1.15158 0.00526 -0.7253 0.2614
1.470244 1.880264 2N2 10.6642 1.15432 0.00914 4.2449 0.4535
1.15916 0.00800 4.1631 0.3955
1.880265 1.914128 N2 68.4845 1.18381 0.00188 3.1206 0.0912
1.17551 0.00164 3.1302 0.0799
1.914129 1.950419 M2 359.1548 1.18863 0.00033 2.2330 0.0161
1.18829 0.00029 2.2253 0.0141
Differenzen +0.00034 +0.0077
1.950420 1.984282 L2 10.1181 1.18472 0.00613 0.7326 0.2966
1.16765 0.00571 1.3224 0.2801
1.984283 2.002736 S2 167.3953 1.19075 0.00070 0.6192 0.0346
1.19198 0.00063 0.7139 0.0310
Differenzen -0.00123 -0.0947
2.002737 2.451943 K2 45.6368 1.19429 0.00197 0.8662 0.0946
1.19441 0.00187 0.9440 0.0897
2.451944 3.381378 M3 3.9242 1.04164 0.02052 0.3591 1.1284
1.05348 0.01894 1.0922 1.0299

Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff. stdv. parameter unit
1 30.8695 0.8298 airpress nm/s**2 /10 hPa
1 28.9559 0.6746 airpress nm/s**2 /10 hPa
Standard deviation of weight unit: 5.650 nm/s²
Standard deviation of weight unit: 5.681 nm/s²

```

Tabelle J.1: Ergebnisse der Gezeitenanalyse des Datensatzes A233_8k2 mit Ansatz einer Luftdruckregression (zugeordnete Werte des Datensatzes A233_8k1 kursiv)

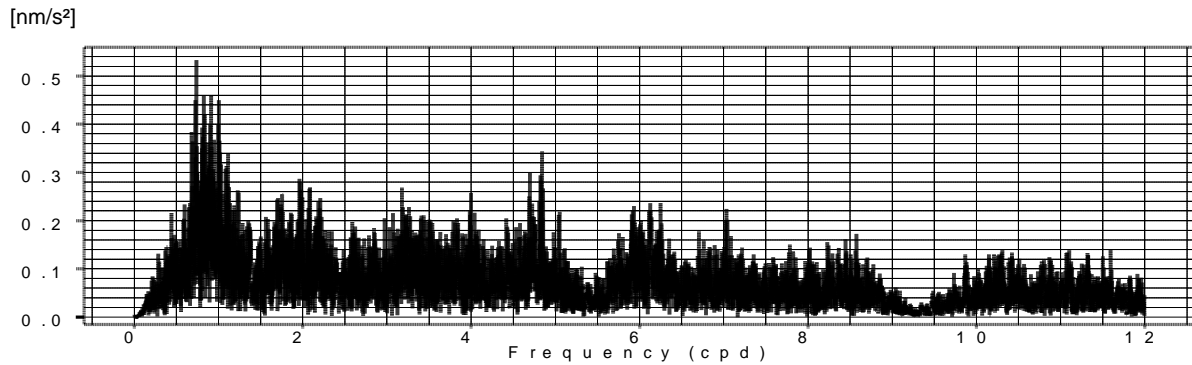


Abbildung J.1: Gravimeter A233, Amplitudenspektrum der Residuen zu A233_8k2

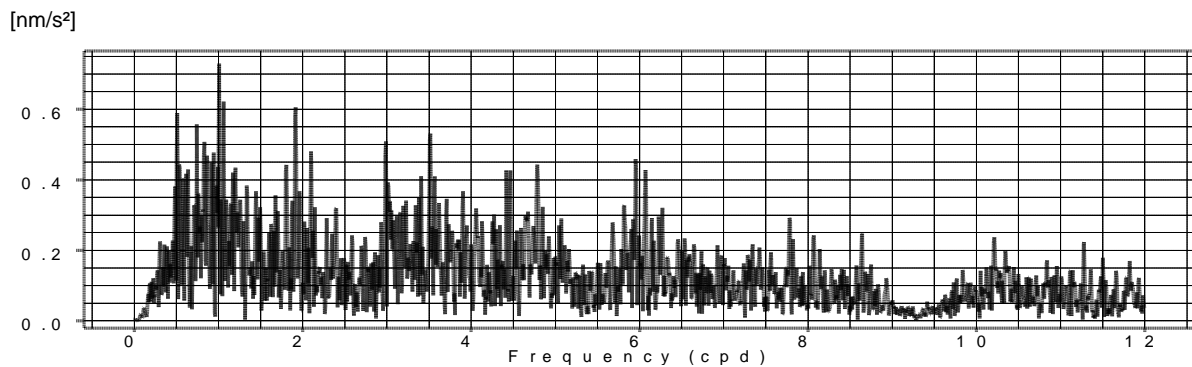


Abbildung J.2: Gravimeter A233, Amplitudenspektrum der Residuen zu A233_8k1

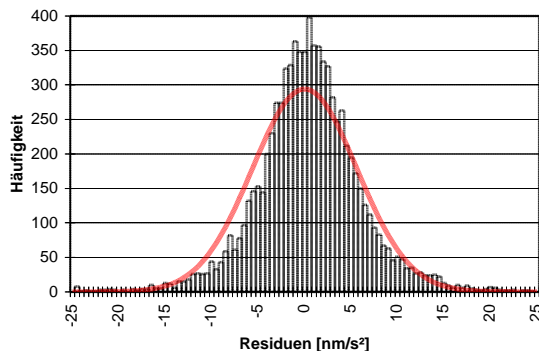


Abbildung J.3: Gravimeter A233, Histogramm der Residuen und Normalverteilung zu A233_8k2

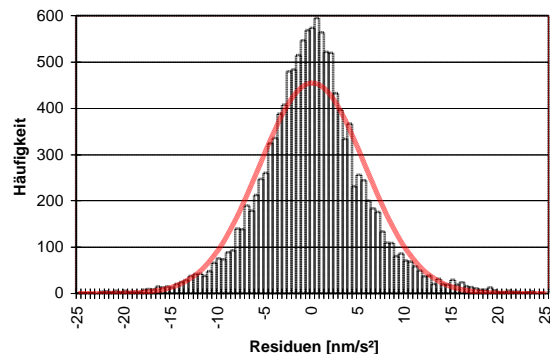


Abbildung J.4: Gravimeter A233, Histogramm der Residuen und Normalverteilung zu A233_8k1

2.3 Gegenüberstellung mit den vorläufigen Referenzwerten der Tabelle G.61

Bei den Hauptpartialtiden O_1 , K_1 , S_2 liegen die relativen Abweichungen der berechneten Amplitudenquotienten im Bereich von 1%, bei der Partialtide M_2 beträgt die Abweichung lediglich 0,3%. Auffällig ist die mit 4,8% vergleichsweise große Differenz für die Partialtide P_1 , die – je nach Bewertung der statistischen Aussagekraft der berechneten Standardabweichungen [DUCARME, VANDERCOILDEN, VENEDIKOV 2006] – durchaus als signifikant eingestuft werden könnte. Hinsichtlich der Phasenverschiebungen besteht wiederum mit $\Delta = 0^\circ,008$ eine besonders gute Übereinstimmung bei M_2 , während die Differenzen bei O_1 und K_1 etwas größere Beträge aufweisen. Bei P_1 erfüllt wohl auch die Phasendifferenz von $0^\circ,27$ das Kriterium der Signifikanz; zu Überlegungen hinsichtlich der Ursachen siehe Abschnitt J5.

Die berechneten Parameter für die Partialtide S_1 stimmen, wenn man auch Schwankungen in der täglichen Periodizität des keineswegs stationären anthropogenen Störpegels mit in Betracht zieht, recht gut überein.

Die Amplitudenspektren der Residuen unterscheiden sich im wesentlichen lediglich hinsichtlich ihrer Detailstrukturen. Im zweiten Beobachtungszeitraum (Datensatz A233_8k2) dominieren Signalspitzen mit etwa ganztägiger Periode bei maximalen Amplituden im Bereich von etwa 0,05 μGal , d.h. *unter* 0,2‰ der maximalen gravimetrischen Gezeiten.

Die Histogramme der Residuen weisen für beide Datensätze signifikante Unterschiede gegenüber der Normalverteilung auf.

3 Datensatz A233_16k1

3.1 Der Registriermaßstab

Für den Beobachtungszeitraum vom 16.11.2005 bis 28.06.2006 wurde, wie in Kapitel I7 nachgewiesen, der mittlere elektromagnetische Eichausschlag aus 29 Beobachtungen bestimmt zu

$$k_{\text{elmag}} = 3,908065 \text{ Volt/mA} \pm 0,000250 \text{ (relativ } \pm 0,064\% \text{)},$$

entsprechend einem auf den Parametersatz A233_8k1 bezogenen Registriermaßstab von **91,122 $\mu\text{Gal/Volt}$** .

Im nachfolgenden, zunächst bis zum 08.11.2006 reichenden Beobachtungszeitraum, trat (innerhalb einer relativ kurzen Zeitspanne) aus nicht bekannter Ursache eine geringfügige Änderung auf: Aus 19 Einzelwerten ergab sich für diesen Zeitraum der mittlere elektromagnetische Eichausschlag zu

$$k_{\text{elmag}} = 3,909489 \text{ Volt/mA} \pm 0,000168 \text{ (relativ } \pm 0,038\% \text{)};$$

daraus leitet sich der Registriermaßstab ab zu **91,089 $\mu\text{Gal/Volt}$** ; die Differenz zu dem vorhergehenden Wert beträgt zwar nur 0,36‰, könnte jedoch statistisch als signifikant eingestuft werden. Der Sachverhalt zeigt die Bedeutung und Notwendigkeit einer leistungsfähigen messtechnischen Einrichtung zur Überprüfung und Erfassung möglicher zeitlicher Änderungen des Registriermaßstabs bei hochaufgelösten gravimetrischen Registrierungen.

3.2 Ergebnisse der Gezeitenanalyse (Filter Pertzev59)

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908                               File:  B233G02
20051116150000...20060330160000  20060401110000...20060518 20000
20060518170000...20060628210000  20060629120000...20060717230000
20060718 60000...20061108100000
Number of recorded days in total :   353.67
Numerical filter is PERTZEV59 with 51 coefficients.
Registriermaßstab 91,122, 91,089  $\mu\text{Gal/Volt}$ 
Signalverzögerung 16.7 sec
adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]
0.501370 0.911390 Q1   66.8613  1.14610 0.00215 -0.1053 0.1071
                                1.14037 0.00157 -0.4258 0.0788
0.911391 0.947991 O1   350.1871  1.14929 0.00042  0.0875 0.0209
A233_8k1                                1.14876 0.00030  0.0577 0.0148
Differenzen A233_16k1 / 8k1                +0.00053                +0.0298
Differenzen A233_8k2 / 8k1                +0.00117                +0.0181
0.947992 0.981854 M1   27.6877  1.15541 0.00390  0.1719 0.1933
                                1.14765 0.00344  0.4073 0.1715
0.981855 0.998631 P1  163.6339  1.15418 0.00106  0.3079 0.0530
A233_8k1                                1.14952 0.00075  0.0476 0.0373
Differenzen A233_16k1 / 8k1                +0,00464                +0.2603
Differenzen A233_8k2 / 8k1                +0.00552                +0.2667
0.998632 1.001369 S1    6.0194  1.79599 0.06542 -3.8554 2.1316
A233_8k1                                1.42615 0.04601 -1.7755 1.8606
Differenzen A233_16k1 / 8k1                +0,36984                -2.0799
Differenzen A233_8k2 / 8k1                -0,19195                -1.5674

```

1.001370	1.023622	K1	487.1156	1.13672	0.00031	0.2251	0.0158
A233_8k1				1.13657	0.00023	0.2188	0.0113
Differenzen A233_16k1 / 8k1				+0.00015		-0.0063	
Differenzen A233_8k2 / 8k1				+0.00090		-0.0260	
1.023623	1.035379	TET1	5.2616	1.14825	0.02820	0.3338	1.4074
				1.21395	0.01989	-0.9534	0.9379
1.035380	1.057485	J1	27.8624	1.16274	0.00579	-0.0455	0.2856
				1.15383	0.00422	-0.2221	0.2091
1.057486	1.071833	SO1	4.4958	1.13105	0.03179	0.5411	1.6090
				1.11919	0.02345	-0.9505	1.2015
1.071834	1.470243	OO1	15.1173	1.15309	0.00604	0.2402	0.3005
				1.15158	0.00526	-0.7253	0.2614
1.470244	1.880264	2N2	10.7134	1.15964	0.00834	3.1045	0.4119
				1.15916	0.00800	4.1631	0.3955
1.880265	1.914128	N2	68.4092	1.18250	0.00175	2.8797	0.0850
				1.17551	0.00164	3.1302	0.0799
1.914129	1.950419	M2	358.9875	1.18808	0.00033	2.2433	0.0161
A233_8k1				1.18829	0.00029	2.2253	0.0141
Differenzen A233_16k1 / 8k1				-0.00021		+0.0180	
Differenzen A233_8k2 / 8k1				+0.00034		+0.0077	
1.950420	1.984282	L2	10.0619	1.17814	0.00890	0.4857	0.4327
				1.16765	0.00571	1.3224	0.2801
1.984283	2.002736	S2	167.2917	1.19001	0.00071	0.7238	0.0347
A233_8k1				1.19198	0.00063	0.7139	0.0310
Differenzen A233_16k1 / A8k1				-0.00197		+0.0091	
Differenzen A233_8k2 / 8k1				-0.00123		-0.0947	
2.002737	2.451943	K2	45.6137	1.19370	0.00194	0.8271	0.0931
				1.19441	0.00187	0.9440	0.0897
2.451944	3.381378	M3	4.0283	1.06927	0.02193	3.4475	1.1750
				1.05348	0.01894	1.0922	1.0299
Adjusted meteorological or hydrological parameters:							
		no. regr.	coeff.	stdv.	parameter	unit	
A233_16k1	1	24.05015	0.82442	airpress	nm/s ² / 10hPa		
A233_8k1	1	28.9559	0.6746	airpress	nm/s ² / 10hPa		
A233_8k2	1	30.8695	0.8298	airpress	nm/s ² / 10hPa		
A233_16k1	Standard deviation of weight unit:				4.965	nm/s ²	
A233_8k1	Standard deviation of weight unit:				5.681	nm/s ²	
A233_8k2	Standard deviation of weight unit:				5.650	nm/s ²	

Tabelle J.2: Ergebnisse der Gezeitenanalyse des Datensatzes A233_16k1 bei Ansatz einer Luftdruckregression (zugeordnete Werte des Datensatzes A233_8k1 kursiv) mit Parameterdifferenzen für die Hauptpartialtiden

[nm/s²]

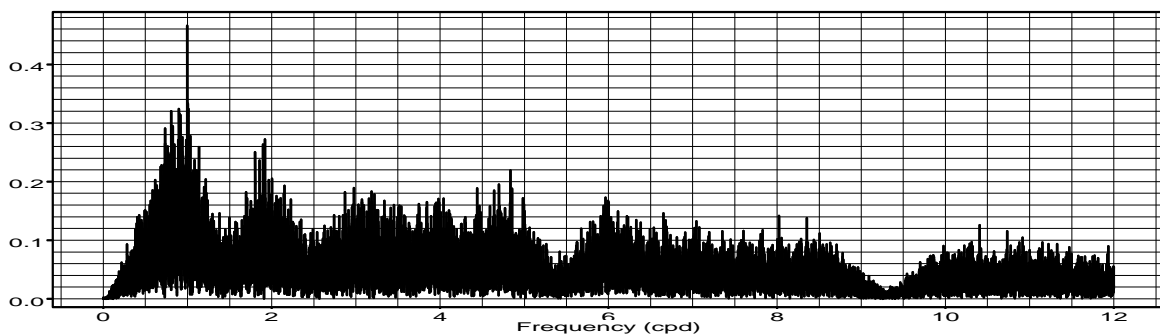


Abbildung J.5: Residuenspektrum zu A233_16k1 (Pertzev59)

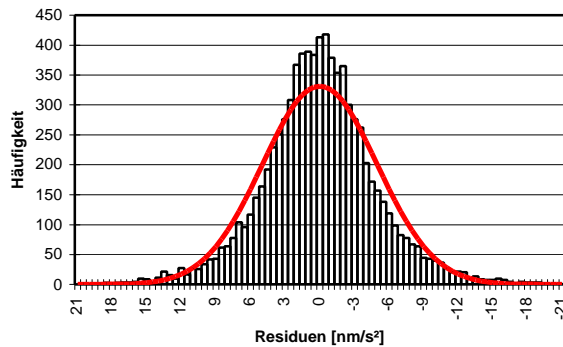


Abbildung J.6: Gravimeter A233, Histogramm der Residuen und Normalverteilung zu A233_16k1

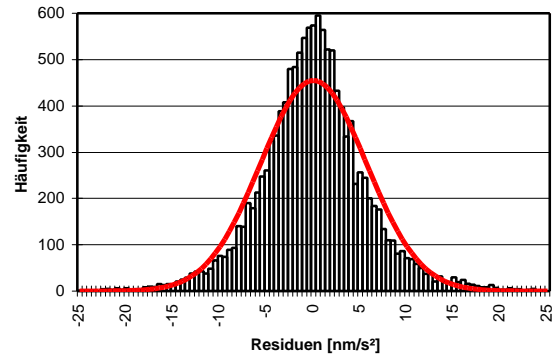


Abbildung J.7: Gravimeter A233, Histogramm der Residuen und Normalverteilung zu A233_8k1 (identisch mit Abb. J.4)

3.3 Gegenüberstellung mit den vorläufigen Referenzwerten der Tabelle G.61

Die Gegenüberstellung der berechneten Gezeitenparameter zeigt weitgehend die gleichen Sachverhalte, die in Abschnitt J.2.3 aufgeführt wurden. Für die Amplitudenquotienten der Hauptpartialtiden O_1 , K_1 und M_2 treten bei dem Parameterdatensatz A233_16k1 geringere Abweichungen gegenüber den zugeordneten Werten des Referenzdatensatzes A233_8k1 auf (wenige Zehntelpromille) als bei Datensatz A233_8k2; bei den Phasenverschiebungen ist der Sachverhalt uneinheitlich. Die Gezeitenparameter der Partialtide P_1 stimmen bei den Datensätzen A233_8k2 und A233_16k1 bemerkenswert gut überein und weisen gemeinsam eine mehr oder weniger signifikante Abweichung gegenüber den Parametern des Referenzdatensatzes A233_8k1 auf. Andererseits fällt bei der Partialtide S_2 die gute Phasenübereinstimmung nach Analyse der Datensätze A233_16k1 und A233_8k1 auf. Die Partialtide S_1 weist für den Datensatz A233_16k1 die größte Abweichung des Amplitudenquotienten vom theoretischen Idealwert 1,15 auf; allerdings beträgt die Amplitude des lokalen Störsignals lediglich $0,2\mu\text{Gal}$.

Die Streuungen der berechneten Luftdruck-Regressionskoeffizienten spiegeln die prinzipiellen Unsicherheiten wieder, die sich ergeben, wenn man die lokalen Luftdruckvariationen als Referenzsignal für das atmosphärische Dichtefeld in der Umgebung der gravimetrischen Beobachtungsstation verwendet.

Die Unterschiede in den berechneten(!) Standardabweichungen der Gewichtseinheit (welche statistische Bedeutung sie auch tatsächlich haben mögen [DUCARME, VANDERCOILDEN, VENEDIKOV 2006]) betragen maximal lediglich etwa 10%. Somit können die drei genannten Datensätze als gleichgewichtig für eine Gesamtanalyse verwendet werden.

4 Gesamtanalyse der Datensätze A233_8k1, A233_8k2 und A233_16k1 – Referenzparameter 2003/2006

Die durch eine Gesamtanalyse der Datensätze A233_8k1, A233_8k2 und A233_16k1 gewonnen Gezeitenparameter bilden den aktualisierten Satz der Referenzparameter A233GG03 für die Beobachtungsstation GeoObservatorium Odendorf (als Referenzparameter 2003/2006 bezeichnet) und ersetzen den Parametersatz des Abschnitts G6.2.2. Unterschiede beeinflussen die Zeitreihe der gravimetrischen Modellgezeiten nur geringfügig und sind mit Bezug zur Aufgabenstellung bis auf weiteres als unwesentlich einzustufen.

```

Program ANALYZE, version 3.30 960908                               File:  A233GG03
#####
# STATION 0745 GeoObservatorium ODENDORF          VERTIKALKOMPONENTE  #
# 50 38 53 N   06 52 22 E   H 172 M P   4M   D 90KM   #
# SUEDLICHER RAND DER NIEDERRHEINISCHEN BUCHT. LOESS.      #
# UNIVERSITAET BONN   INSTITUT FUER THEORETISCHE GEODAESIE  #
# ASKANIA GRAVIMETER GS25 Nr.233                    #
# DIGITALE REGISTRIERUNG SYSTEME GeodynA und Geodyn16K:    #
#                                                       #
#                               Minütliche Mittelwerte #
# REGISTRIERMSSSTÄBE  92.660, 91.154, 91.122, 91.089 µGal/Volt #
# INSTRUMENTELLE SIGNALVERZÖGERUNG 16.7 SEC.              #
# Aktuelle Gesamtanalyse der Registrierdaten 8k und 16k,    #
#                                                       #
#                               24.03.2003 bis 08.11.2006 #
#####
Latitude: 50.6480 deg, longitude:  6.8730 deg.
Summary of observation data :
20030324100000...20031117 40000  20031118170000...20040301 80000
20040303170000...20040317 40000  20040317 90000...20040325110000
20040325200000...20040709 50000  20040712 10000...20040821150000
20040823210000...20040905 80000  20040906 0...20041010150000
20041021 0...20041223140000  20050101110000...20050328150000
20050329 0...20050620 90000  20050622220000...20050908100000
20050924180000...20051109170000  20051116150000...20060330160000
20060401110000...20060518 20000  20060518170000...20060628210000
20060629120000...20060717230000  20060718 60000...20061108100000
Number of recorded days in total : 1266.75
Tamura (1987)          tidal potential used with threshold  0.10E-06
Inertial correction not applied
UNITY window used for least squares adjustment.
Numerical filter is PERTZEV59 with 51 coefficients.
Spectral condition number of normal equations:                2.195

adjusted tidal parameters :
from      to      wave  ampl. ampl.fac.  stdv. ph. lead  stdv.
[cpd]     [cpd]     [nm/s**2 ]                [deg]  [deg]
0.501370 0.911390 Q1   66.7056  1.14341  0.00108 -0.2963  0.0541
0.911391 0.947991 O1  350.1726  1.14923  0.00021  0.0713  0.0103
0.947992 0.981854 M1  27.6042  1.15192  0.00226  0.2914  0.1123
0.981855 0.998631 P1  163.3843  1.15240  0.00052  0.1954  0.0257
0.998632 1.001369 S1   5.0305  1.50079  0.03157 -2.7471  1.2172
1.001370 1.023622 K1  487.1895  1.13688  0.00015  0.2121  0.0078
1.023623 1.035379 TET1  5.3051  1.15772  0.01382 -0.7631  0.6839
1.035380 1.057485 J1  27.7354  1.15743  0.00290 -0.0334  0.1435
1.057486 1.071833 SO1  4.4249  1.11321  0.01601 -0.4582  0.8238
1.071834 1.470243 OO1 15.1572  1.15609  0.00335 -0.3697  0.1662
1.470244 1.880264 2N2 10.6946  1.15761  0.00481  3.8504  0.2379
1.880265 1.914128 N2   68.2573  1.17988  0.00099  3.0542  0.0483
1.914129 1.950419 M2  359.0639  1.18834  0.00018  2.2331  0.0087
1.950420 1.984282 L2  10.0378  1.17531  0.00370  0.9945  0.1803
1.984283 2.002736 S2  167.4313  1.19101  0.00038  0.6888  0.0189
2.002737 2.451943 K2   45.6334  1.19418  0.00110  0.8840  0.0526
2.451944 3.381378 M3   3.9710  1.05406  0.01182  1.5385  0.6424

Adjusted meteorological or hydrological parameters:
no. regr.coeff.  stdv.  parameter  unit
1  28.42226  0.44251  airpress.  nm/s2 / 10hPa
Standard deviation of weight unit:  5.522 nm/s2

```

Tabelle J.3: Referenzparameter 2003/2006

Hinweis: Wie bereits mehrfach erwähnt, wurde aus experimentellen Gründen (vgl. z.B. Abbildung I.7) die Polarität des registrierten Luftdrucksignals so gewählt, daß einem höheren Signalwert ein niedrigerer Luftdruckwert zugeordnet ist. Entsprechend unterscheiden sich die berechneten Luftdruck-Regressionskoeffizienten von den gravimetrischen Regressionskoeffizienten durchgängig im Vorzeichen, d.h. dem vorstehenden, *berechneten* Koeffizienten von **plus** 28.42226 nm/s² / 10hPa entspricht ein *gravimetrischer* Luftdruck-Regressionskoeffizient von **minus** 28.42226 nm/s² / 10hPa.

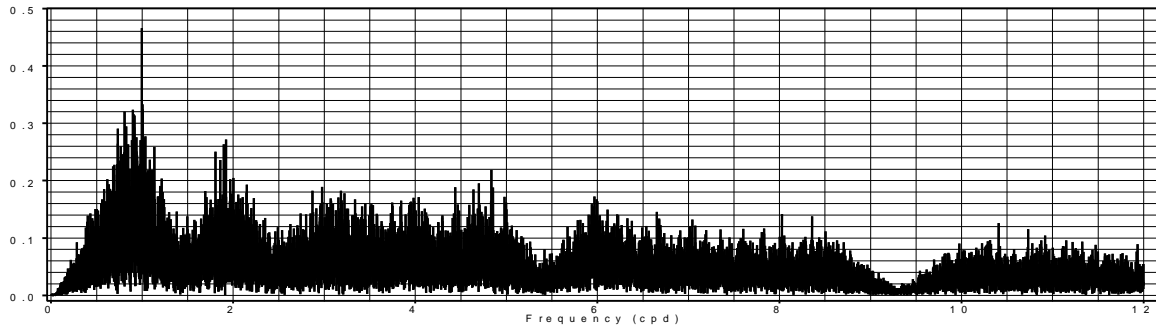
[nm/s²]

Abbildung J.8: Residuenpektrum zu A233GG03 (Pertzev59)

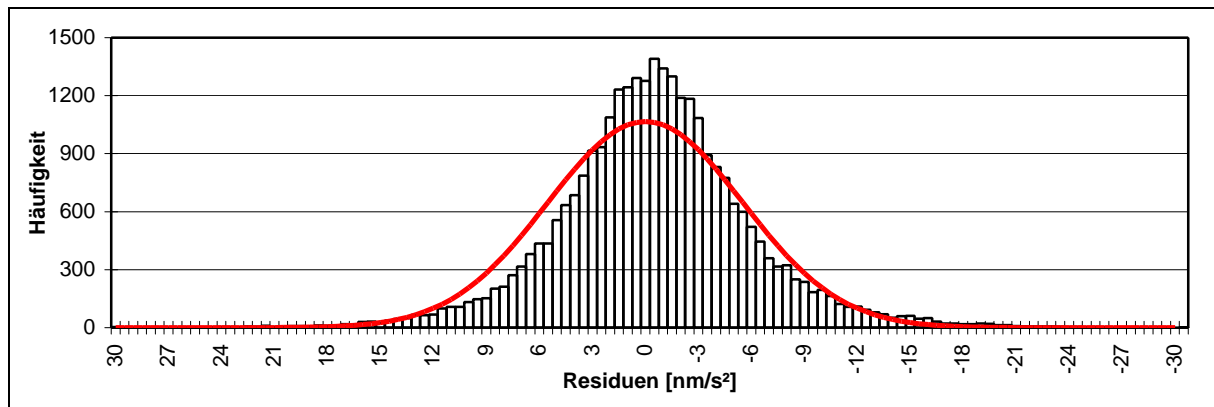


Abbildung J.9: Residuen-Histogramm und Normalverteilung zu A233GG03

5 Das potentielle Problem von Störsignalen mit quasi-täglicher Periode

Betrachtet man bei den Gravimetern des Typs Askania GS15/25 den zeitlichen Verlauf der Standardabweichungen der minütlichen Mittel der ungefilterten Signale, so sind, wie bereits zuvor einmal dargelegt, ausgeprägte tägliche Variationen des Rauschpegels festzustellen, zusätzlich abhängig davon, ob es sich jeweils um einen normalen Arbeitstag oder einen Feiertag/Samstag handelt. Die nachfolgende Abbildung zeigt ein repräsentatives Beispiel. Deutlich zu erkennen ist die mikroseismische Auswirkung des *Tages der Deutschen Einheit* am Dienstag, dem 3. Oktober 2006.

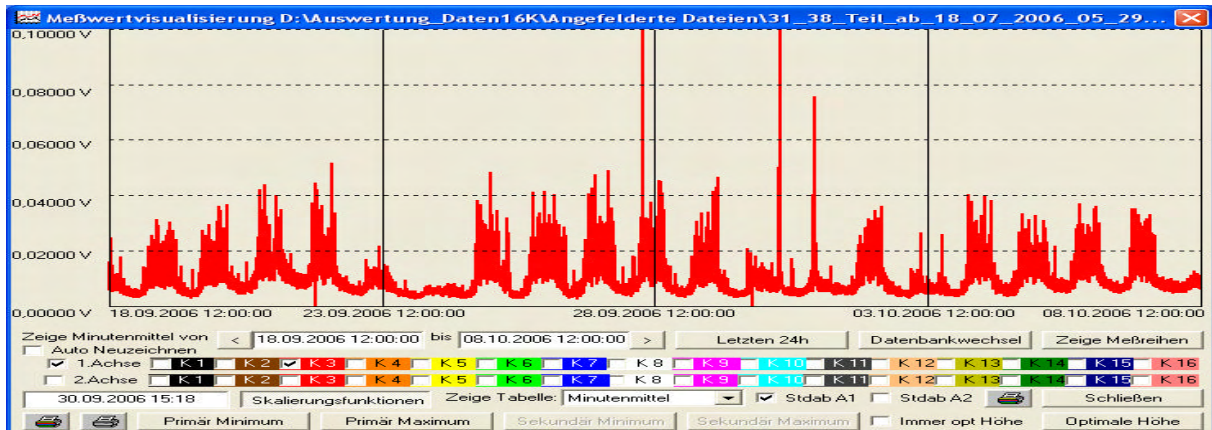


Abbildung J.10: Beispiel für die täglichen Variationen des Rauschpegels (Standardabweichungen der minütlichen Signalmittel); ungefiltertes Signal des Gravimeters Askania GS15 Nr.206. Ordinate nmaßstab: 0,01Volt entspricht etwa $5\mu\text{Gal}$

Sobald man jedoch die ursprünglichen Signale zur Bestimmung der gravimetrischen Gezeitensignale in geeigneter Weise filtert, verschwinden diese Informationen über kurzzeitige Rauschpegelvariationen, wie die Abbildung J.11 deutlich macht. Wahrzunehmen sind nun nur noch die langzeitigen Variationen des Rauschpegels, die durch Brandungseffekte an den östlichen Küsten des Nordatlantiks hervorgerufen werden (Kapitel H). Man beachte den Unterschied des Ordinate nmaßstabs im Vergleich zu Abbildung J.10.

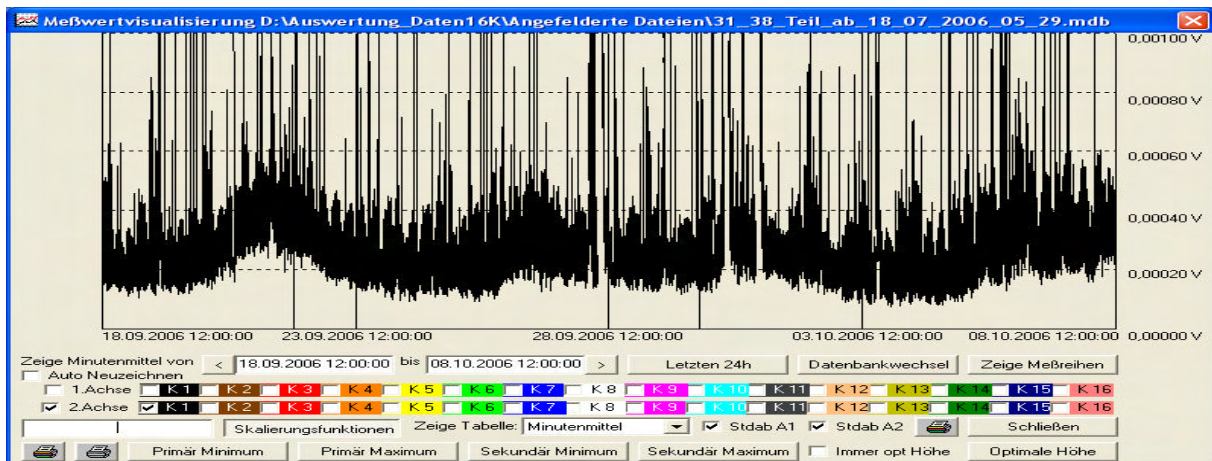


Abbildung J.11: Beispiel für nur noch langzeitige Variationen des Rauschpegels (Standardabweichungen der minütlichen Signalmittel); gefiltertes Signal des Gravimeters Askania GS25 Nr.233. Ordinate nmaßstab: 0,0001Volt entspricht etwa $0,01\mu\text{Gal}$

Wird nun ein elastisch gefesselter gravimetrischer Sensor durch mikroseismische Störbeschleunigungen in Schwingungen versetzt, so ist dieser Effekt nur dann unkritisch, wenn lediglich die Schwingungsamplituden durch den Rauschpegel beeinflusst werden und somit der Signalmittelwert lediglich hinsichtlich seiner metrologischen Auflösung mit zufälliger Charakteristik beeinflusst wird. Sind die kinematischen Auswirkungen des Rauschpegels jedoch nicht-linearer Natur, so kann der Signal-Mittelwert durch den Rauschpegel systematisch beeinflusst werden, was im vorliegenden Falle zu einem systematischen Fehler mit quasi-täglicher Periode führen kann. Aus diesem Grunde ist die Kenntnis über die tatsächlichen Sensorbewegungen von großer Bedeutung.

Bei den auftretenden täglichen Rauschpegelvariationen ist außerdem zu beachten, dass zweimal im Jahr, jeweils bei den Umstellungen von Sommerzeit auf Winterzeit und von Winterzeit auf Sommerzeit, Zeitverschiebungen von einer Stunde auftreten, entsprechend einer Phasenverschiebung der Störsignale von 15° .

K Allgemeine Zusammenfassung und Ausblick

Das GeoObservatorium Odendorf wurde in den Jahren 1995 bis 1997 als experimentelle Außenstelle des Instituts für Theoretische Geodäsie der Universität Bonn errichtet. Es ist in einem tektonisch rezent aktiven Gebiet etwa 20 km westlich von Bonn gelegen.

Ein Schwerpunkt der wissenschaftlichen Zielsetzungen ist unter anderem die permanente Beobachtung, Interpretation und Modellierung der gravimetrischen Gezeiten mit einer Maßstabsgenauigkeit von relativ etwa 1‰ und einer Phasensicherheit der Hauptpartialtiden in der Größenordnung von etwa $0^{\circ},01$, entsprechend 2,4 bzw. 1,2 sec im Zeitbereich des ganztägigen und halbtägigen Gezeitenbandes. Die genaue Kenntnis der örtlichen Modellgezeiten lässt sich nicht nur geowissenschaftlich, sondern auch metrologisch nutzen, etwa für detaillierte Untersuchungen der beobachteten Signale im Hinblick auf instrumentelle Effekte, die in den Algorithmen für die Auswertung der Beobachtungsdaten nicht oder nicht vollständig erfasst wurden oder auch zur in-situ-Kalibrierung bestimmter Systemkomponenten von Gravimetern. Stimmen die gravimetrischen Modellgezeiten mit den realen astronomisch-geophysikalischen Gezeiten hinreichend genau überein, so können die beobachteten gravimetrischen Zeitreihen durch Subtraktion von dem dominierenden zeitabhängigen Signal befreit werden und es entstehen jene gezeitenreduzierten Zeitreihen, die es nun ermöglichen, in den Daten auch enthaltene schwächere zeitabhängige Signale unterschiedlicher Ursachen zu erkennen, kausal zu untersuchen und zu quantifizieren. Danach lässt sich im Prinzip wiederum eine neue Zeitreihe generieren, die von „Störsignalen“ mehr oder weniger befreit ist und nur noch das Gezeitensignal enthält; auf dieser Grundlage kann eine erneute, iterative Gezeitenanalyse durchgeführt werden. Für die Gezeitenanalyse stündlicher Beobachtungsmittelwerte wurde das Programmsystem Eterna3.30 verwendet.

Die Dissertation gliedert sich in zwei Hauptteile. Im ersten Teil werden notwendige Vorarbeiten geleistet und Voruntersuchungen durchgeführt. Der zweite Teil beinhaltet die Bestimmung der Parameter der gravimetrischen Modellgezeiten für die Station GeoObservatorium Odendorf sowie die Darstellung und Untersuchung von Phänomenen, die mit dieser Zielsetzung im Zusammenhang stehen.

Als prinzipielle Voraussetzungen für das Erreichen des zuvor genannten Genauigkeitsziels war zunächst die Schaffung entsprechender mess- und auswertetechnischer Einrichtungen und Hilfsmittel erforderlich, handelt es sich doch bei den genannten Genauigkeitsangaben um solche, die durchaus Grenzwerte des derzeit metrologisch Erreichbaren darstellen; dies gilt in besonderer Weise für die Maßstabsgenauigkeit.

Es war zu Beginn keineswegs klar, ob der Standort des Observatoriums im Hinblick auf die lokale Geologie und die potentiellen anthropogenen Störquellen für die Durchführung hochaufgelöster gravimetrischer Langzeitbeobachtungen letztlich überhaupt die erforderliche Eignung aufwies. Durchgeführte Testmessungen ließen dann aber erkennen, dass die ursprünglichen Bedenken nicht begründet waren. Im Verlaufe des gesamten Beobachtungszeitraums von November 2000 bis zum Oktober 2006 wurden mit unterschiedlichen Zielsetzungen zwei lineare Gravimeter des Typs Askania GS15 und GS25 sowie vier astasierte Gravimeter des Typs LaCoste-Romberg G mit und ohne Rückkopplungssystem eingesetzt.

Definiert man Zielgrößen durchzuführender Messungen, so werden solche auftretenden Signale, die nicht Wirkungen dieser Zielgrößen sind, als *Störsignale* benannt und eingestuft, deren Ursachen sowohl instrumenteller, als auch geophysikalischer Art sein können. Diese Störsignale werden, sofern sie nach ihrer Erkennung nicht durch geeignete, hauptsächlich instrumentelle Maßnahmen zu vermeiden sind, durch geeignete Auswertelgorithmen berücksichtigt, z.B. durch numerische Vorfilterung der Eingangsdaten. Da eine erwünschte Elimination jedoch bei komplexen Sachverhalten im allgemeinen nicht vollständig möglich ist und somit Restauswirkungen auf die Schätzwerte häufig nicht prinzipiell ausgeschlossen werden können, wird es erforderlich, eingehende und sorgfältige Datenuntersuchungen hinsichtlich des Auftretens möglicher oder bekannter systematischer Fehler und Effekte vorzunehmen. Zu den Störsignalen gehören auch jene kurzperiodischen Signale in den ursprünglichen Beobachtungsdaten, die man im allgemeinen als Rauschsignale bezeichnet. Für das GeoObservatorium spezifische Eigenschaften gravimetrischer Rauschsignale sowie ihrer zeitlichen Änderungen wurden zunächst an mehreren Beispielen untersucht. Auch die Bedeutung der nach einer Gezeitenanalyse berechneten Residuen und ihrer Frequenzstrukturen als Informationsquellen für auftretende Störprozesse wurde zunächst exemplarisch dargelegt.

Die eingesetzten Askania-Gravimeter bieten für die Bestimmung des Registriermaßstabes gegenüber den anderen eingesetzten Gravimetern einen wesentlichen Vorteil dadurch, dass der aktuelle Betrag des Skalenwertes der Messspindel (in $\mu\text{Gal}/\text{Spindelskalenteil}$) jederzeit mit Hilfe der mechanischen Kugeleichenrichtung **in-situ** ermittelt werden kann; der instrumententypische Kugeleichenwert bildet reproduzierbar einen definierten virtuellen Schwereunterschied mit einer relativen Genauigkeit von 10^{-4} oder besser. Allerdings erfordert die Nutzung des Skalenwertes für die Bestimmung des aktuellen Registriermaßstabes wegen der begrenzten Auflösung der Positionsablesung der Messspindel eine recht große Anzahl von Spindelverstellungen, will man eine statistische Si-

cherheit des Registriermaßstabs (in $\mu\text{Gal}/\text{Registriereinheit}$) von 1‰ erreichen. Erste und vorläufige Vergleiche von Analyseergebnissen der mit unterschiedlichen Gravimetern gewonnenen, geeichten Messdaten zeigten Streuungen lediglich innerhalb eines realistisch anzunehmenden Erwartungswerts und begründeten weiterführende Maßnahmen zur metrologischen Absicherung und Verbesserung der gravimetrischen Eichwerte.

Verwendet man für die Bestimmung des Registriermaßstabs Signalsprünge als Folge herbeigeführter sprunghafter Positionsänderungen des gravimetrischen Sensors, so ist das Ergebnis auch von der Genauigkeit des Sprungsignals in der Registrierung abhängig. Es wurde aufgezeigt, wie man an einer betreffenden Stelle aus dem Verlauf der Residuen nach einer vorläufigen Gezeitenanalyse Fehler einer verwendeten Sprunghöhe zunächst erkennen und dann mit Hilfe einer empirisch ermittelten Funktion eliminieren kann.

Bei gravimetrischen Langzeitbeobachtungen sind Überprüfungen des Registriermaßstabs in diskreten Zeitabständen unverzichtbar. Soll die wiederholte Maßstabsbestimmung bei Federgravimetern durch definierte Verstellungen der Messspindel erfolgen, so bedeutet dies selbstverständlich jeweils eine Störung des Registriervorgangs, und dies um so mehr, je größer die Anzahl der Sprungsignale ist, die zur Erzielung einer hinreichenden statistischen Auflösung der Zielgröße erforderlich ist. Aus diesem Grund werden meist *a-posteriori* Gezeitenanalysen aufeinander folgender Zeitreihen ausgeführt, die aber im Hinblick auf die erforderliche Auflösung der Amplitudenquotienten der Hauptpartialtiden eine zeitliche Länge von mindestens zwei Monaten aufweisen müssen. Mit den im Rahmen von Voruntersuchungen für zwei repräsentative Gravimeter durchgeführten sukzessiven Gezeitenanalysen ließen sich signifikante zeitliche Änderungen des Registriermaßstabs zunächst nicht nachweisen.

Eine Alternative zur Erkennung und Bestimmung zeitlicher Änderungen des Registriermaßstabs bietet nach einer Gezeitenanalyse die Auswertung zeitlicher Interferenzstrukturen im Verlauf der Residuen, die mit dem Verlauf der gravimetrischen Gezeiten korrelieren. Im Zusammenhang mit durchgeführten Untersuchungen einiger mechanischer Eigenschaften astasierter gravimetrischer Sensoren wurde diese Idee an einem Datensatz erprobt, der während eines längeren Beobachtungszeitraums mit einem LaCoste-Gravimeter ohne elektrostatische Rückkopplung gewonnen wurde. Es konnte gezeigt werden, dass es im Prinzip möglich ist, durch Verwendung derartiger Residuen die zeitlichen Maßstabsänderungen mit durchaus brauchbarer Genauigkeit zu bestimmen und dann durch Normierung auf einen zuverlässigen Referenzwert einen maßstabskonstanten Datensatz zu erzeugen. Damit lässt sich zwar das Problem zeitlicher Änderungen des Registriermaßstabs mindestens teilweise lösen, nicht jedoch die Auswirkungen jener instrumentellen Eigenschaft astasierter gravimetrischer Federsensoren, die als elastische Hysterese bezeichnet wird und sich in einem ausschlagabhängigen Signalnachlauf zeigt (der Betrag der Phasenverschiebung der instrumentell beobachteten Ausgangsschwingung gegenüber der ursprünglichen Eingangsschwingung ist hier eine Funktion des Schwingungsausschlags).

Bei hochaufgelösten gravimetrischen Messung spielen atmosphärische Effekte eine nicht unwesentliche Rolle. Sieht man einmal von möglichen instrumentellen Wirkungen örtlicher Luftdruckvariationen auf die Messwertanzeige ab, die als instrumentelle Fehler überwiegend bei nicht-druckdichten Geräten auftreten, so handelt es sich im wesentlichen um gravitative Effekte der lokalen und regionalen atmosphärischen Massen in der Umgebung der Beobachtungsstation. Zur Verfügung stehen meist nur Beobachtungsdaten des örtlichen Luftdrucks, nicht aber die eigentlich benötigten Informationen über die räumliche Dichteverteilung in der Atmosphäre innerhalb des gravimetrisch relevanten Luftvolumens. Somit stellt sich die Frage, inwieweit die örtlichen Luftdruckwerte repräsentativ sind für die tatsächlichen auftretenden atmosphärischen Gravitationseffekte; lässt sich doch aus einem örtlichen Luftdruckwert allenfalls bei „ruhigen“ Wetterlagen auf eine bestimmte regionale Dichteverteilung in der Atmosphäre schließen. Daraus folgt wiederum, dass Regressionsbeziehungen zwischen örtlichen Luftdruck und dem atmosphärisch induzierten gravimetrischen Signal keinesfalls die Bedingung der Stationarität erfüllen können. Es wurden daher eingehende und umfangreiche Untersuchungen hinsichtlich auftretender zeitlicher Variationen des linearen Regressionskoeffizienten zwischen örtlichem Luftdruck und gravimetrischer Signaländerung ausgeführt. Als Ergebnis lässt sich feststellen, dass mit einem solchen Regressionskoeffizienten die tatsächlichen gravitativen Wirkungen atmosphärischer Dichteveränderungen wohl kaum besser als auf 5 bis 10% modelliert werden können. Somit sind es die gravitativen atmosphärischen Wirkungen, die – neben anderen Effekten – der Modellbildung für hochaufgelöste gravimetrische Zeitreihen gewisse Grenzen setzen. Mit zunehmendem Abstand einer Beobachtungsstation von den Ozeanen mögen sich die Sachverhalte verbessern (stabilere Großwetterlagen).

Auf einen merkwürdigen Sachverhalt ist hinzuweisen: Die gravimetrischen Registrierdaten des druckdichten Gravimeters A206 lassen keinerlei signifikante Regressionen mit dem zeitlichen Verlauf des Luftdrucks erkennen. Die Ursache dieses Sachverhalt kann bisher nicht schlüssig erklärt werden. Die aus den Registrierdaten durch Gezeitenanalyse abgeleiteten Gezeitenparameter weisen keinerlei spezifische Anomalien auf.

Eine genaue Berechnung der Parameter der Partialtiden durch Gezeitenanalyse von Messdaten erfordert eine entsprechend genaue Kenntnis der instrumentellen Übertragungsfunktion zwischen Eingangssignal und Ausgangssignal, d.h. die Kenntnis der frequenzabhängigen Amplitudenverzerrung periodischer Signale sowie des,

ebenfalls frequenzabhängigen, Phasennachlaufs. Diese Parameter können durch Eingabe eines Rechtecksignals in den Systemeingang aus dem Verlauf des zugeordneten Ausgangssignals streng nur dann abgeleitet werden, wenn dieses keine anderen zeitabhängigen Signale enthält. Während die Amplitudenverzerrung im Frequenzbereich der Gezeiten praktisch den Wert 1 aufweist (und daher unproblematisch ist), treten bei den Phasen relevante Verschiebungen auf, die hinreichend genau ermittelt werden müssen. Im Rahmen eingehender Untersuchungen wurde gezeigt, dass insbesondere der Rauschpegel den berechneten Signalnachlauf dann erheblich verfälscht, wenn ein bestimmter Grenzwert des Signal/Rauschverhältnisses nicht eingehalten wird. Es wurden zusätzlich unterschiedliche Lösungsansätze entwickelt und erprobt, die einen Einfluss des Rauschpegels auf das Berechnungsergebnis weitgehend ausschließen.

Nach den beschriebenen Voruntersuchungen wurden nun im zweiten Hauptteil der Dissertation die Ergebnisse der zur Bestimmung der Modellparameter der gravimetrischen Modellgezeiten durchgeführten Berechnungen und Untersuchungen eingehend dargelegt und interpretiert. Eine bei dem Gravimeter A206 in einem Teilabschnitt der gravimetrischen Registrierungen nunmehr festgestellte zeitliche Änderung des Registriermaßstabs konnte mit einem speziellen Normierungsverfahren eliminiert werden. Die berechneten Standardabweichungen zu den durch Gezeitenanalyse der Beobachtungsdaten ermittelten Gezeitenparameter liefern prinzipiell nur begrenzte Informationen hinsichtlich möglicher, als Folge potentieller, nicht modellierter Störprozesse auftretender systematischer Fehleranteile in den berechneten gravimetrischen Parameterwerten. Es wurde daher für erforderlich gehalten, einen jeweiligen gesamten Beobachtungszeitraum hinreichender Länge nach bestimmten Kriterien in Teilzeiträume zu zerlegen, für diese Zeiträume individuelle Teilanalysen durchzuführen und die einzelnen Ergebnisse miteinander zu vergleichen; mit Bezug auf die zuvor dargelegten Luftdruckeffekte wurden die einzelnen Berechnungen jeweils ohne und mit Ansatz einer Luftdruckregression durchgeführt.

Die Teilergebnisse ebenso wie die Ergebnisse der Gesamtanalysen der mit unterschiedlichen Gravimetern gewonnenen Beobachtungsdaten stimmen nicht nur in Anbetracht des lokalen, anthropogenen mikroseismischen Rauschpegels bemerkenswert gut überein. Das Ziel einer Maßstabssicherheit der Amplitudenquotienten im Bereich von 1‰, so wie einer Phasensicherheit der Hauptpartialtiden im Bereich von 0°,01 konnte daher, vorbehaltlich der Ergebnisse weiterer Überprüfungen, als erreicht angesehen werden; eine Ausnahme bildet die Tide P_1 , deren Parametervariationen ergänzende Untersuchungen hinsichtlich möglicher Einflüsse täglicher Variationen des mikroseismischen Rauschpegels erfordern.

Im März 2003 wurde das Askania-Gravimeter GS25 Nr.233 in Betrieb genommen. Dieses Instrument weist eine elektromagnetische Eicheinrichtung auf, die es ermöglicht, die Stabilität des Registriermaßstabs oder dessen zeitliche Änderungen mit einer Genauigkeit von etwa **0,1‰** zu jedem beliebigen Zeitpunkt und *während* der laufenden gravimetrischen Beobachtungen ohne Verstellungen einer mechanischen Komponente zu kontrollieren bzw. zu bestimmen; besonders nach Veränderungen der instrumentellen Konfiguration kam dieser Option eine besondere Bedeutung zu, konnten doch so zugeordnete Maßstabsänderungen zuverlässig ermittelt werden. Mit der genannten Toleranz konnten während des gesamten Beobachtungszeitraums, abgesehen von den künstlich erzeugten Änderungen, keine Maßstabsvariationen festgestellt werden. Dieser wesentliche Sachverhalt führte dazu, dass das Gravimeter A233 als Referenzgravimeter definiert wurde. Die mit diesem Instrument gewonnenen, aus dem gesamten Beobachtungszeitraum abgeleiteten Gezeitenparameter wurden entsprechend als *vorläufige Referenzwerte* für die Beobachtungsstation GeoObservatorium Odendorf festgelegt.

Die beobachteten gravimetrischen Gezeiten enthalten neben den (dominierenden) „Gezeiten der festen Erde“ auch periodische Signalanteile, welche hauptsächlich gravitative Wirkungen der ozeanischen Gezeiten sind. Für diese „Meeresgezeiten“ bestehen inzwischen mehrere, zunehmend verbesserte Modelle. Die jeweiligen, für die Station GeoObservatorium Odendorf berechneten Modellwerte der gravimetrischen Hauptpartialtiden, die aus Modellwerten für die Gezeiten der festen Erde und der Meeresgezeiten abgeleitet werden, wurden den aus den Beobachtungen ermittelten Gezeitenparametern gegenübergestellt. Es konnte eine im allgemeinen gute Übereinstimmung festgestellt werden, ohne dass eine eindeutige Aussage hinsichtlich eines allgemein bestpassenden Modells getroffen werden konnte.

Die Frage nach der tatsächlichen Genauigkeit der für die Station GeoObservatorium Odendorf aus gravimetrischen Langzeitbeobachtungen ermittelten Gezeitenparameter wurde noch einmal aufgegriffen. Denn es lassen sich durch Vergleich der meeresgezeitenkorrigierten Gezeitenparameter der Hauptpartialtiden mit den entsprechenden Parametern geeigneter Nachbarstationen aus dem Grad der Übereinstimmung insbesondere Rückschlüsse auf die erzielte *Maßstabsgenauigkeit* der Registrierdaten ziehen. Die verwendeten Vergleichswerte basieren auf Beobachtungen, die mit Supraleitenden Gravimetern in den benachbarten Observatorien Walferdange (Luxemburg) und Membach (Belgien) gewonnen wurden und deren Eichung durch Parallelbeobachtungen mit modernen Absolutgravimetern erfolgte. Bei den Hauptpartialtiden betragen die Differenzen der meeresgezeitenkorrigierten Amplitudenquotienten für das GeoObservatorium gegenüber den zugeordneten Werten der Nachbarobservatorien im Durchschnitt lediglich etwa 1‰ (bei der Station Membach wurde der zweite Registrierzeitraum nicht berücksichtigt, da hier offensichtlich ein systematischer Restfehler sowohl hinsichtlich des Registriermaßstabs als auch des Betrags des instrumentellen Signalnachlaufs vorliegt).

Im Rahmen der durchgeführten Langzeitbeobachtungen wurde festgestellt, dass das Niveau des gravimetrischen Rauschpegels innerhalb mehrtägiger oder mehrwöchiger Zeiträume immer wieder starken Schwankungen unterworfen ist. Die Spektralanalysen sekundlicher Registrierdaten zeigten nun bei wiederholten Stichproben, dass in Zeiträumen hohen Rauschpegels ausgeprägte Signalschwingungen im Periodenbereich zwischen etwa 5 und 10 Sekunden auftreten. Nachdem ein Zusammenhang zwischen Rauschpegel und der Großwetterlage im östlichen Nordatlantik festgestellt worden war, konnte der genannte gravimetrische Sachverhalt den Wellenhöhen in den Küstenbereichen des Europäischen Kontinents zugeordnet und damit als ein brandungsinduziertes Phänomen identifiziert werden. Die Kenntnis des kausalen Zusammenhangs zwischen gravimetrischen Rauschsignalen und nordatlantischer Großwetterlage aber ermöglicht nunmehr eine Prädiktion eines zu erwartenden Rauschpegels auf der Grundlage von Wettervorhersagen mit der diesen innewohnenden Prädiktionssicherheit.

Das bisher verwendete 12-bit-Datenerfassungssystem einfacher Bauart weist einen gewissen Mangel auf, da Messwertüberschreitungen in einem Kanal die Signale anderer Kanäle, abhängig vom Ausmaß der Überschreitungen, relevant beeinflussen können. Auch im Hinblick auf andere Zielsetzungen zukünftiger gravimetrischer Beobachtungen wurde daher nun ein verbesserter A/D-Wandler moderner Technologie eingesetzt, der den genannten Mangel nicht aufweist sowie die analogen Eingangssignale mit einer 16-bit-Auflösung digitalisiert und Parallelmessungen mit 16 Kanälen ermöglicht. Diese Umstellung erforderte neben der Erstellung eines neuen Datenerfassungsprogramms auch wesentlich veränderte und ergänzte Auswerteprogramme („Tools“). Nach Herstellung der vollen Funktionsfähigkeit des neuen Datenerfassungs- und Auswertesystems, als *GeoDyn16K* bezeichnet, wurden intensive Testmessungen ausgeführt. Die Gezeitenanalyse eines ersten 222-tägigen Datensatzes des Referenzgravimeters A233 zeigte trotz Verbesserung der Signalauflösung um den Faktor $2^4 = 16$ nur eine unwesentliche Verringerung der berechneten Standardabweichung der Gewichtseinheit gegenüber den Ergebnissen der mit dem System *GeoDynA* ausgeführten, vorhergehenden Beobachtungen. Daraus muss gefolgert werden, dass es im vorliegenden Falle nicht primär die Auflösung der ursprünglichen gravimetrischen Signale ist, welche die Genauigkeit der durch Gezeitenanalyse berechneten Gezeitenparameter begrenzt, sondern jene im deterministischen Auswertemodell nicht berücksichtigten Störeffekte, die in täglichen und mehrtägigen Zeitintervallen auftreten und sich nach der Gezeitenanalyse als mehr oder weniger ausgeprägte Strukturen im zeitlichen Verlauf der Residuen zeigen.

Die Fortführung der gravimetrischen Beobachtungen im GeoObservatorium Odendorf ermöglicht im Prinzip eine laufende Aktualisierung der örtlichen Modellgezeiten. Diese Aktualisierung wird jedoch lediglich in Jahresintervallen durchgeführt, d.h. vor der Anfelderung der Beobachtungsdaten eines Jahreszeitraums an die Daten des vorherigen Gesamtzeitraums wird durch Jahresanalyse überprüft, ob Auffälligkeiten gegenüber Parametern des jeweils bestehenden Referenzmodells der gravimetrischen Gezeiten auftreten. Erst danach werden die *aktualisierten* Referenzwerte der gravimetrischen Modellgezeiten berechnet. Bisher konnten drei unabhängige Teildatensätze gebildet werden, welche eine hinreichende Länge und zusätzlich bestimmte metrologische Unterschiede aufwiesen; signifikante Unterschiede der aktualisierten Parameter der gravimetrischen Modellgezeiten gegenüber den zuvor bestimmten *vorläufigen* Referenzwerten konnten nicht festgestellt werden; bei der Partialtide P_1 sollten jedoch insbesondere die auftretenden Variationen der berechneten Phasenverschiebungen hinsichtlich einer möglichen Ursache eingehender untersucht werden.

In der Zukunft wird sich der Schwerpunkt der gravimetrischen Arbeiten im GeoObservatorium Odendorf verlagern: Zur Verbesserung der Auflösung der Gezeitenparameter wird, wie zuvor dargelegt, der Beobachtungszeitraum laufend verlängert, jedoch ist das primäre Ziel nun, jene Störprozesse, von denen zuvor mehrfach die Rede war und die nun als Sekundärprozesse bezeichnet werden sollen, in ihrer Deterministik und Kausalität verstehen zu lernen. Dies gilt gleichermaßen für die kurzzeitigen mikroseismischen Signale, die den gravimetrischen Rauschpegel zeitlich steuern. Das GeoObservatorium liegt, wie eingangs dargelegt, in einer seismisch aktiven Region; ein System von ausgeprägten Verwerfungen durchzieht in relativ geringer Entfernung die Umgebung des Observatoriums. Es wurde ein Mess- und Registriersystem aufgebaut, das es ermöglicht, gravimetrische Signale mit einer Auflösung von 10 Nanogal (10^{-11} des Betrags der Schwerebeschleunigung) aufzuzeichnen. Die örtlichen gravimetrischen Modellgezeiten wurden mit hoher Genauigkeit bestimmt und können nun der Eichung gravimetrischer Registrierdaten dienen oder auch als bekanntes deterministisches Signal von den Beobachtungswerten abgezogen werden, um zu einer höheren Auflösung von Sekundärsignalen zu gelangen. Es ist durchaus nicht als wissenschaftlich a-priori sinnlos zu bewerten, auf der Grundlage der erreichten metrologischen Signalauflösung nun nach lokalen gravimetrischen Effekten zu suchen, die von Gezeitenbewegungen der lokalen Erdkruste getriggert werden. Die Tatsache, dass bisher in der Gezeitenforschung derartige Phänomene nicht nachgewiesen werden konnten, darf nicht so interpretiert werden, dass eine Existenz prinzipiell auszuschließen ist.

L Verzeichnisse

1 Literaturverzeichnis

- ASKANIA, FA. (1970), Gerätebeschreibung und Betriebsanleitung Gravimeter GS15 Nr.206, Berlin 1970
- ASKANIA, FA. (1977), Gerätebeschreibung und Betriebsanleitung Gravimeter GS25 Nr.233, 1977
- BAKER, T. F. UND BOS, M. S. (2003), Validating Earth and ocean tide models using tidal gravity measurements, *Geophys. J. Int.*, 152, 468-485
- BONATZ, M. (1965), Über die Eichung von Registriergravimetern mittels einer vertikalen Labor-Eichstrecke, Dissertation, Veröffentlichung Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 84, Frankfurt 1965
- BONATZ, M. (1967), Der Gravitationseinfluss der Bodenfeuchtigkeit, *Zeitschrift für Vermessungswesen*, Heft 4, 1967
- BONATZ, M. (1971), Der Einfluss von Änderungen der Verstärkereingangsspannung auf die Messwertanzeige des neuen Askania-Gravimeters GS 15, *Bulletin d'Informations Marrées Terrestres* Nr. 61, S. 3070, ICET Brüssel 1971
- BONATZ, M. (1972), Der Einfluss der Versorgungsspannung für das Abgriffsystem des Askania-Gravimeters GS 15 auf den Eichfaktor, *Bulletin d'Informations Marrées Terrestres* Nr. 63, S. 3306, ICET Brüssel 1972
- BONATZ, M. (2003), *Proceedings of the Joint BGI/ICET Summer School on Terrestrial Data Acquisition Techniques*, Louvain-la-Neuve 2002, Bureau Gravimetrique International
- BONATZ, M. (2004), Persönliche Mitteilung
- BONATZ, M. UND CHOJNICKI, T. (1972), Europäisches Erdzeitenprofil – Ergebnisse der Gezeitenregistrierungen mit dem Askania-Gravimeter GS15 Nr. 206 in den Stationen Bonn, Bruxelles, Walferdange, Strasbourg, *Mitteilungen des Instituts für Theoretische Geodäsie*, Nr. 8, Bonn 1972
- BONATZ, M. UND SCHÜLLER, K. (1973), International Astro-Geo-Project Spitzbergen 1968-70, Gravimeterstation, Strenge Zweigruppen-Erdzeitenanalyse nach der Methode der kleinsten Quadrate – Erste Gruppenausgleichung, Veröffentlichung Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Nr. 202, München 1973
- BONATZ, M. UND SCHÜLLER, K. (1976), Gravimetrische Erdzeiten-Station Kerguelen – Parameter der Partialtiden für den Beobachtungszeitraum 1973/74, Veröffentlichung Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Nr. 218, München 1976
- BONATZ, M., SCHÜLLER, K. UND WILMES, H. (1980a), Ergebnisse gravimetrischer Gezeitenregistrierungen in Windhoek, Südwafrika, *Mitteilungen des Instituts für Theoretische Geodäsie*, Nr. 57, Bonn 1980
- BONATZ, M. SCHÜLLER, K. UND WILMES, H. (1980b), Auswertung gravimetrischer Langzeitregistrierungen in der Station Effelsberg mit einem Gravimeter GS 25, *Mitteilungen aus dem Institut für Theoretische Geodäsie*, Bonn 1980
- BONATZ, M. UND WILMES, H. (1977), Gesamtergebnis gravimetrischer Gezeitenregistrierungen in der Station Réunion im Indischen Ozean, *Mitteilungen des Instituts für Theoretische Geodäsie*, Nr. 51, Bonn 1977

- BÜLLEFELD, F.-J. (1985), Ein Beitrag zur harmonischen Darstellung des gezeitenerzeugenden Potentials, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 314, München 1985
- CAMELBECK, T. (2006), Seismic Hazards and Risks in Belgium, 93. Journées Luxembourgeoises de Géodynamiques 13. – 15. 3.2006, ECGS, Walferdange
- CARWRIGHT, D. E. UND EDDEN, A. C. (1973), Corrected tables of tidal harmonics, The Geophysical Journal, vol. 33, no. 3, Oxford 1973
- CARWRIGHT, D. E. UND TAYLOR, R. J. (1971), New computations of tide generating potential, The Geophysical Journal, vol. 23, no. 1, Oxford 1971
- CHAPMAN, T. UND LINDZEN R. S. (1970), Atmospheric Tides – Thermal and Gravitational, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht – Holland 1970
- CHOJNICKI, T. (1973), Ein Verfahren zur Erdzeitenanalyse in Anlehnung an das Prinzip der kleinsten Quadrate, Mitteilungen des Instituts für Theoretische Geodäsie, Nr. 15, Bonn 1973
- DEFRAIGNE, P., DEHANT, V. UND WAHR, J. M. (1996), Internal loading of an inhomogeneous compressible earth with phase boundaries. Comm. Obs. Roy. Belgique A117/S. Geoph. 185; Geophys. J. Int., Vol. 125, PP. 173-192
- DEHANT, V. (1987), Tidal parameters for an inelastic Earth, Physics of the Earth and Planetary Interiors, Nr. 49, 1987
- DEHANT, V. (1991), Review of the earth tidal models and contribution of earth tides in geodynamics. Geodynamics. Journal of Geophys. Res., Vol. 96, N°B12, PP 20,235-20,240
- DEHANT, V., DEFRAIGNE, P. UND WAHR, J. M. (1999), Tides for a convective Earth, J. geophys. Res., B1, 104, 1035-1058
- DEHANT, V., DUCARME, B. (1987), Comparison between the theoretical and observed tidal gravimetric factors. Physics of the earth&plan Int., Vol. 49, PP 192-212
- DEHANT, V., WAHR, J. M. (1991), The response of a compressible, non-homogenous earth to internal loading: Theory Journ. Geomag. Geoelectr., Vol. 43, PP 157-178
- DEUTSCHER PLANUNGSATLAS (1976), Band 1 Nordrhein-Westfalen, Lieferung 8: Geologie, Veröffentlichung der Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Hermann Schrödel Verlag, Hannover
- DOODSON, A. T. (1921), The harmonic development of the tide generating potential, Proceedings of the Royal Society, Series A 100, London 1921
- DUCARME, B., VANDERCOILDEN, L., VENEDIKOV, A.P. (2006) Estimation of the Precision by the Tidal Analysis Programs ETERNA and VAV, BIM 141, S.11189, Bruxelles
- DUCARME, B., VENEDIKOV, A. P., ARNOSO, J. UND VIEIRA, R. (2004), Determination of the long period tidal waves in the GGP superconducting gravity data, Journal of Geodynamics 38, 307-324
- EANES, R. J. UND BETTADPUR, S. (1996), The CSR3.0 Global Ocean Tide Model: Diurnal and semi-Diurnal Ocean Tides from TOPEX/POSEIDON Altimetry. CSR-TM-96-05, The University of Texas Center for Space Research

- FRANCIS, O. (1995), Validation of ocean tide models by comparison to gravity loading measurements, Bulletin d'Informations Marees Terrestres, N°122, PP 9265-9271
- FRANCIS, O. UND VAN CAMP, M. (1998), Calibration of C021 superconducting gravimeter in Membach (Belgium) using absolute gravity measurements, Proc. 13th Int. Symp. Earth Tides, Observatoire Royal de Belgique, Bruxelles
- FRANCIS, O., VAN CAMP, M., SCHOTT, P. UND WENZEL, H.-G. (1998), Instrumental transfer function determination for cryogenic gravimeter GWR-C021 at station Membach, Proc. 13th Int. Symp. Earth Tides, Observatoire Royal de Belgique, Bruxelles
- GÖRRES, B., SAGER, B. UND CAMPBELL, J. (2006), Geodätische Bestimmung von Bodenbewegungen im Bereich des Erftsprungs, Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 1, 131. Jahrgang, Wißner Verlag
- GOODKIND, J. M. (1991), The Superconducting Gravimeters: Principles of Operation, Current Performance and Future Prospects, Cahiers du Centre Européen de géodynamique et de sismologie, vol. 3, Luxemburg
- GRAF, A. (1967), Gravimetrische Instrumente und Meßmethoden, Jordan/Eggert/Kneissl, Handbuch der Vermessungskunde, Band Va, Stuttgart
- HARTMANN, T. UND WENZEL, H.-G. (1994), The harmonic development of the Earth tide generating potential due to the direct effects of the planets, Geophysical Research Letters, vol. 21, Nr. 18
- HARTMANN, T. UND WENZEL, H.-G. (1995a), The HW95 tidal potential catalogue, Geophysical Research Letters, vol. 22, no. 24, 1995
- HARTMANN, T. UND WENZEL, H.-G. (1995b), Catalogue HW95 of the tide generating potential, Bulletin d'Informations Marees Terrestres, vol.123, Brüssel 1995
- HEITZ, S. (1962), Zur Eichung von Registrier-Gravimetern, Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 5
- HEITZ, S. (2000), Gravimeter und Gradiometer, Mitteilungen aus den Geodätischen Instituten, Nr. 88, Bonn
- KOCH, K. R. (1987), Parameterschätzung und Hypothesentests, 2. Auflage, Dümmler Verlag, Bonn
- LEFÈVRE, F., LYARD, F. H., LE PROVOST, C. UND SCHRAMA E. J. O. (2002), FES: a global tide finite element solution assimilating tide gauge and altimetric information, J. Atmos. Oceanic Technol., 19, 1345-1356
- LE PROVOST, C., GENCO, M. L., LYARD, F. VINCENT, P. UND CANCEL, P. (1994), Tidal spectroscopy of the world ocean tides from a finite element hydrodynamic model, J. geophys. Res., 99, 24777-24798
- MATSUMOTO, K., TAKANEZAWA, T. UND OOE, M. (2000), Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan, J. Oceanography, 56, 567-581
- MEIDOW, H. (1995), Rekonstruktion und Reinterpretation von historischen Erdbeben in den nördlichen Rheinlanden unter Berücksichtigung der Erfahrungen bei dem Erdbeben von Roermond am 13. April 1992, Dissertation, Universität Köln, 1995
- MELCHIOR, P. (1966), The Earth Tides, Pergamon Press, London 1966
- MELCHIOR, P. (1983), The tides of the planet Earth, 3. Auflage, Pergamon Press, Oxford 1983

- MELCHIOR, P. UND DUCARME, B. (1991), A Study of the observed Tidal Residue Vectors B versus Oceanic Tidal Load Vectors B, Proceedings 11th Symp. Earth Tides, Helsinki 1989, Schweizerbarthsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1991
- MELCHIOR, P., DUCARME, B., VAN RUYBEKE, M., POITEVIN, C. UND DE BECKER, M. (1984), Interactions between oceanic and gravity tides, as analysed from world-wide earth tide observations and ocean models, Marine Geophysical Researches, 1984, N°7
- PERTZEV, B. (1957), On the calculation of drift curve in observation of bodily tides, Observatoire Royal de Belgique, BIM Nr. 5, Brüssel 1957
- PERTZEV, B. (1959), Ob outchetie spolzaniya nulia pir nabloudenij ouprougikh prilivov, Izv. Akad. Naouk SSR, no. 4, 1959
- RAY, R. D. (1999), A global ocean tide model from TOPEX/POSEIDON altimetry: GOT99.2, NASA Tech. Mem. 209478, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD. USA
- RICHTER, B. (1987), Das supraleitende Gravimeter – Anwendung, Eichung und Überlegungen zur Weiterentwicklung, Dissertation, Veröffentlichung Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 329, Frankfurt 1987
- RICHTER, B. (1995), Cryogenic Gravimeters: Status Report on Calibration, Data Acquisition and Environmental Effects, Cahiers du Centre Européen de géodynamique et de sismologie, vol. 11, Luxemburg 1995
- RICHTER, B. UND WENZEL, H.-G. (1991), Precise instrumental phase lag determination by the step response method, Observatoire Royal de Belgique, Bulletin d'Informations Mares Terrestres, vol. 111, Brüssel 1991
- ROCHOLL, W. (1974), Untersuchungen zur Attraktionswirkung der Meereszeiten auf die Erdzeitenregistrierungen in Europa, Veröffentlichung Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 203, München 1974
- RÖDER, R. H., SCHNÜLL, M. UND WENZEL, H.-G. (1988), SRW Feedback for LaCoste-Romberg Gravimeters with Extended Range, Bureau Gravimétrique International, Bulletin d'Informations Mares Terrestres Nr. 62, 1988
- ROOSBEEK, F. (1996), RATGP95: A harmonic development of the tide-generating potential using an analytical method, Geophysical Journal International, vol. 126, 1996
- SCHNEIDER, G. (1975), Erdbeben, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- SCHNÜLL, M., RÖDER, R. H. UND WENZEL, H.-G. (1984), An Improved Electronic Feedback for LaCoste-Romberg Gravimeters, Bureau Gravimétrique International, Bulletin d'Informations Mares Terrestres Nr. 85, 1984
- SCHÜLLER, K. (1976), Ein Beitrag zur Auswertung von Erdzeitenregistrierungen, Veröffentlichung Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C Nr. 227, München 1976
- SCHWIDERSKI, E. W. (1979), Detailed Ocean Tide Models of N2, M2, S2, K2 and K1, P1, O1, Q1 including Tidal Charts and Maps, IUGG General Assembly, Canberra 1979, Symp. Nr. 20
- SCHWIDERSKI, E. W. (1980a), On charting global ocean tides, Reviews of Geophysics and Space Physics Nr. 18, 1980

- SCHWIDERSKI, E. W. (1980b), Ocean tides: a hydrodynamic interpolation model, Marine Geodesy Nr. 3, 1980
- SIMON, D. (2003), Modelling of the gravimetric effects induced by vertical air mass shifts, Mitteilungen des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Band 21, Frankfurt 2003
- SPERLING, D. (1994), Zeitabhängige Gravitationseffekte am Beispiel des Pumpspeicherkraftwerks Vianden, Dissertation Bonn 1994
- SUN, H. P. (1995), Static deformation and gravity changes at the Earth's surface due to the atmospheric pressure, Observatoire Royal de Belgique, Dissertation, Brüssel 1995
- TAMURA, Y. (1987), A harmonic development of the tide-generating potential, Bulletin d' Informations Marees Terrestres no. 99, Brüssel 1987
- TIMMEN, L. UND WENZEL, H-G. (1994), Worldwide synthetic gravity tide parameters available on Internet, Bureau Gravimetrique International, Bulletin d'Informations vol. 75, Toulouse 1994
- TORGE, W. (1989), Gravimetry, de Gruyter Verlag, Berlin 1989
- VAN CAMP, M. (1998), Qualification d'un gravimètre cryogénique pour les périodes supérieurs à cent secondes, Dissertation Louvain-la-Neuve, 1998
- VAN RYMBEKE, M. (1989), A calibration system for gravimeters using a sinusoidal acceleration resulting from a vertical periodic movement, Bulletin Geodesique Nr. 63, 1989
- VARGA, P. (1995), Laboratory calibration of LaCoste-Romberg type gravimeters by using a heavy cylindrical ring, Geophysical Journal Int., Nr. 120, 1995
- VAUTERIN, P. (1998), Graphical and interactive software for the analysis of Earth tide data, Proceedings 13th Int. Symposium On Earth tides, Royal Observatory of Belgium, Brüssel 1998
- VAUTERIN, P. UND VAN CAMP, M. (2002), TSoft Manual, Version 2.0.5, Royal Observatory of Belgium, Brüssel 2002
- VENEDIKOV, A. P. (1966a), Une méthode pour l'analyse des marées terrestres à partir d'enregistrements de longueur arbitraire, C.O.R.B. Nr. 76, Brüssel 1966
- VENEDIKOV, A. P. (1966b), Sur la constitution de filtres numériques pour le traitement des enregistrements des marées terrestres C.O.R.B. Nr. 76, Brüssel 1966
- VENEDIKOV, A. P. (1984), Analyse des enregistrements des marées terrestres, Observatoire Royal de Belgique, Bulletin d'Informations Marees Terrestres, vol. 92, Brüssel 1984
- VENEDIKOV, A. P., ARONSO, J. UND VIERA, R. (2001), Program VAV/2000 for tidal analysis of unequally spaced data with irregular drift and coloured noise, J.Geodetic Soc. Jpn. 47 (1)
- VENEDIKOV, A. P., ARONSO, J. UND VIERA, R. (2003), VAV: a program for tidal data processing, Comput. Geosci. 29
- VERGNOLLE, M., BOUIN, M.-N., MELACHROINOS, S., MOREL, L., DURAND, S., NICOLAS, J. UND MASSON, F. (2006), GPS multi-software analysis applied to 3D ocean loading effects in NW France, 93^e Journées Luxembourgeoises de Geodynamique, ECGS, Luxembourg

- WARBURTON, R. J. UND BRINTON, E. W. (1995), Recent Developments in GWR Instrument's Superconducting Gravimeters, Cahiers du Centre Européen de géodynamique et de sismologie, vol. 11, Luxemburg 1995
- WENZEL, H.-G. (1976a), Zur Genauigkeit von gravimetrischen Erdzeitenbeobachtungen, Wissenschaftliche Arbeiten des Lehrstuhls für Geodäsie, Photogrammetrie und Kartographie an der TU Hannover Nr. 67, Hannover 1976
- WENZEL, H.-G. (1976b), Some remarks to the analysis method of Chojnicki, Observatoire Royal de Belgique, Bulletin d'Informations Marees Terrestres, vol. 73, Brüssel 1976
- WENZEL, H.-G. (1977), Estimation of accuracy for the earth tide analysis results, Observatoire Royal de Belgique, Bulletin d'Informations Marees Terrestres, vol. 76, Brüssel 1977
- WENZEL, H.-G. (1994a), Accurate instrumental phase lag determination for feedback gravimeters, Observatoire Royal de Belgique, Bulletin d'Informations Marees Terrestres, vol. 118, Brüssel 1994
- WENZEL, H.-G. (1994b), Earth tide data processing package ETERNA 3.20, Observatoire Royal de Belgique, Bulletin d'Informations Marees Terrestres, vol. 120, Brüssel 1994
- WENZEL, H.-G. (1996a), Accuracy Assessment of Tidal Potential Catalogues, Observatoire Royal de Belgique, Bulletin d'Informations Marees Terrestres, vol. 124, Brüssel 1996
- WENZEL, H.-G. (1996b), The nanogal software: Earth tide data processing package ETERNA 3.30, Bull. Inf. Marées Terrestres 124, 9425-9439
- WENZEL, H.-G. (1997), Earth tide data processing package ETERNA 3.40, Karlsruhe 1997
- WENZEL, H.-G., OTTO, H., ZÜRN, W. UND RICHTER, B. (1995), Comparison of a cryogenic and a spring gravimeter between 0.2 and 96 cpd at BFO Schiltach, Observatoire Royal de Belgique, Bulletin d'Informations Marees Terrestres, vol. 122, Brüssel 1995
- WITTE, B. UND SCHMIDT, H. (1991), Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen, 2. Auflage, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1991
- XI, Q. (1989), A new complete development of the tide-generating potential for the epoch J2000.0, Bulletin d'Informations Marees Terrestres, vol. 99, Brüssel 1989
- ZÜRN, W. (2002), Simplistic models of vertical seismic noise above 0,1mHz derived from local barometric pressure, Observatoire Royal de Belgique, Bulletin d'Informations Marees Terrestres, vol. 37, Brüssel 2002

2 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung A.1: Odendorf und Umgebung, Ausschnitt aus der Topographischen Karte C5506 (Bonn) 1:100000, Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen3
- Abbildung A.2: Regionale geologische Übersicht Quelle: Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:25000, Erläuterungen zu Blatt 5307 Rheinbach. Das GeoObservatorium liegt etwa 3km westlich der Mitte des eingezeichneten Kartenblattausschnitts.....4
- Abbildung A.3: Odendorf und Umgebung, Ausschnitt aus der Geologischen Karte 1:25000, Blatt 5307 Rheinbach, Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen4
- Abbildung A.4: Geologisches Profil Oberdrees-Peppenhoven-Morenhoven-Buschhoven östlich von Odendorf (siehe Topographische Karte Abbildung A.1) Quelle: Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:25000, Erläuterungen zu Blatt 5307 Rheinbach.....5

Abbildung A.5: Geologische Profile im Bereich des Kartenblatts 5306 Euskirchen, westlicher Anschluß an das Kartenblatt 5307 Rheinbach Quelle: Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:25000, Erläuterungen zu Blatt 5306 Euskirchen.....	5
Abbildung A.6: „Billiger Wald“ und Umgebung mit Markierung des Epizentrum, Ausschnitt der Geologischen Karte 1:25000, Blatt 5306 Euskirchen, Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen	6
Abbildung A.7: Übersicht über die rezente Seismizität in der Niederrheinischen Bucht und den angrenzenden Gebieten	7
Abbildung A.8: Rezente und Historische Erdbeben in der Niederrheinischen Bucht und den angrenzenden Gebieten	7
Abbildung A.9: Übersicht über die Hauptverwerfungen in der Niederrheinischen Bucht Quelle: [Deutscher Planungsatlas, 1976]	8
Abbildung C.1: Programmteil „Messwertregistrierung“	18
Abbildung C.2: Programmteil „Messwertvisualisierung“	20
Abbildung C.3: Auswahlmaske der Werkzeugsammlung „Tools“	20
Abbildung C.4: Werkzeug „Sprungkorrektur“	21
Abbildung C.5: Werkzeug zur Lückenüberbrückung.....	22
Abbildung C.6: Werkzeug zur Anfelderung von Daten.....	23
Abbildung C.7: Die Stundenmittelberechnung	23
Abbildung C.8: Die Exportoberfläche.....	24
Abbildung C.9: Hilfsoberfläche für ANALYZE.....	25
Abbildung C.10: Die Berechnung der Regressionskoeffizienten.....	25
Abbildung C.11: Die Gezeitenbefreiung.....	26
Abbildung C.12: Der Access-Export.....	26
Abbildung C.13: Die Korrelationsberechnung.....	26
Abbildung C.14: Die Importoberfläche.....	27
Abbildung C.15: Auswahl der Stundenmitteltabelle.....	27
Abbildung C.16: Die Berechnungsoberfläche.....	28
Abbildung D.1: Askania-Gravimeter GS15 Nr.206 Gegenüberstellung von Temperatur in der Messkammer und Gravimeterdrift innerer Gravimeterthermostat nicht aktiviert Temperaturmaßstab: 1 Volt entspricht etwa 0,25°C	30
Abbildung D.2: LaCoste-Gravimeter LCR-G-xx1F, Gegenüberstellung von Temperatur in der Messkammer und Gravimeterdrift, Temperaturmaßstab: 1 Volt entspricht etwa 0,25°C	31
Abbildung D.3: Maßstabsverhältnisse GeoObs3/GeoObs1 durch Eingabe eines konstanten Gleichspannungssignals, Kanal 8, am 07.07.2001 Austausch des A/D-Wandlers an GeoObs3	33
Abbildung D.4: Maßstabsverhältnisse GeoObs3/GeoObs1, Kanal 8 Untersuchungszeitraum vor Austausch des A/D-Wandlers.....	33
Abbildung D.5: Maßstabsverhältnisse GeoObs3/GeoObs1, Kanal 8 Untersuchungszeitraum nach Austausch des A/D-Wandlers	34
Abbildung D.6: Maßstabsverhältnisse GeoObs3/GeoObs1, Kanal 3 Untersuchungszeitraum vor Austausch des A/D-Wandlers.....	34
Abbildung D.7: Maßstabsverhältnisse GeoObs3/GeoObs1, Kanal 4 Untersuchungszeitraum vor Austausch des A/D-Wandlers.....	35
Abbildung D.8: Maßstabsverhältnisse GeoObs3/GeoObs1, Kanal 5 Untersuchungszeitraum vor Austausch des A/D-Wandlers.....	35

Abbildung D.9: Maßstabsverhältnisse GeoObs3/GeoObs1, Kanal 3 Untersuchungszeitraum nach Austausch des A/D-Wandlers	36
Abbildung D.10: Maßstabsverhältnisse GeoObs3/GeoObs1, Kanal 4 Untersuchungszeitraum nach Austausch des A/D-Wandlers	37
Abbildung D.11: Maßstabsverhältnisse GeoObs3/GeoObs1, Kanal 7 Untersuchungszeitraum nach Austausch des A/D-Wandlers	37
Abbildung D.12: Maßstabsverhältnis GeoObs3/GeoObs1 in Abhängigkeit von der Signalspannung Kanal 8 Untersuchung nach Austausch des A/D-Wandlers (07.07.2001)	38
Abbildung D.13: Maßstabsverhältnis GeoObs3/GeoObs1 in Abhängigkeit von der Signalspannung Kanal 8 Untersuchung nach Austausch des A/D-Wandlers (13.02.2003)	38
Abbildung D.14: Maßstabsverhältnis GeoObs3/GeoObs1 in Abhängigkeit von der Signalspannung Kanal 8 Untersuchung nach Austausch des A/D-Wandlers (13.02.2003)	39
Abbildung D.15: Differenzen zwischen Eingangsspannung U und registrierter Signalspannung GeoObs3 - Kanal 8 Untersuchung nach Austausch des A/D-Wandlers (13.02.2003).....	39
Abbildung D.16: Differenzen zwischen Eingangsspannung U und registrierter Signalspannung GeoObs1 - Kanal 8 Untersuchung am 13.02.2003	40
Abbildung D.17.....	41
Abbildung D.18: Der Temperaturverlauf in der gravimetrischen Messkammer des GeoObservatoriums Odendorf während eines Registrierzeitraumes von zwei Jahren - Registriermaßstab: 1 Volt entspricht etwa 0,25°C	41
Abbildung D.19: Amplitudenspektrum der in Abbildung D.18 dargestellten Temperaturmessdaten (Ausschnittsvergrößerung der Abbildung D.21)	42
Abbildung D.20: Amplitudenspektrum der Temperaturmessdaten in einem Zeitraum von 36 Tagen (29.10.2001 bis 03.12.2001), in dem die Messkammer nur selten betreten wurde	43
Abbildung D.21: Amplitudenspektrum der in Abbildung D.18 dargestellten Temperaturmessdaten.....	43
Abbildung D.22: Amplitudenspektrum der Temperaturmessdaten (Ausschnittsvergrößerung der Abbildung D.21). Der niederfrequente Bereich des Amplituden-Gesamtspektrums (eine Periode von 365 Tagen entspricht 0,0027 cpd)	43
Abbildung D.23: Schematisierte Darstellung des Messprinzips des Askania-Gravimeters GS15. 11 Kugel der Eicheinrichtung, 12 Bohrung der Eicheinrichtung, 4 Mikrometerantrieb, 6 Spindelmutter mit Präzisionsmaßstab, 7 Messfeder, 16 Gravimetermasse mit Kondensatorplatte	45
Abbildung D.24: Normierte Sprunghöhen zur Eichung des Gravimeter A206.....	47
Abbildung D.25: Abweichungen der normierten Sprunghöhen vom Mittelwert	48
Abbildung D.26: Askania Gravimeter GS15 Nr. 206 mit Spindelmotor und Mikrometerhebel	48
Abbildung D.27: Spindelaufsatz für LCR-Gravimeter.....	50
Abbildung D.28: Gravimeter A206 – gefilterte Daten. Beispiel des zeitlichen Verlaufs der Residuen nach der Gezeitenanalyse.....	52
Abbildung D.29: Gravimeter A206 – gefilterte Daten, Amplitudenspektrum der Residuen nach der Gezeitenanalyse der Gesamtdaten.....	52
Abbildung D.30: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten. Beispiel des zeitlichen Verlaufs der Residuen nach der Gezeitenanalyse	54
Abbildung D.31: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten, Amplitudenspektrum der Residuen nach der Gezeitenanalyse der Gesamtdaten.....	54
Abbildung D.32: Gravimeter LCR-G-xx1F – Beispiel des zeitlichen Verlaufs der Residuen nach der Gezeitenanalyse.....	55
Abbildung D.33: Gravimeter LCR-G-xx1F – Amplitudenspektrum der Residuen nach der Gezeitenanalyse	56
Abbildung E.1: Schema des doppelten RC-Glieds im Gravimeter A206.....	61

Abbildung E.2: Gravimeter A206 - Beispiel des zeitlichen Verlaufs der Standardabweichungen gefilterter und ungefilterter stündlicher Signalmittelwerte	62
Abbildung E.3: Der zeitliche Verlauf der Standardabweichungen gefilterter und ungefilterter stündlicher Signalmittelwerte bei zeitweilig auftretendem starken mikroseismischen Störungen.....	63
Abbildung E.4: Der zeitliche Verlauf der Standardabweichungen gefilterter und ungefilterter stündlicher Signalmittelwerte bei normalem mikroseismischen Störpegel.....	63
Abbildung E.5: Gravimeter A206 - Originalregistrierung der minütlichen Signalmittelwerte und zugeordneten Standardabweichungen der ungefilterten und der gefilterten sekundlichen Daten bei zeitweilig auftretendem starken mikroseismischen Störpegel (Montag, 14.01.2002 bis Donnerstag, 17.01.2002) , rechte Ordinate: Standardabweichung Registriermaßstab: RC-gefilterte Daten: 124 μ Gal/Volt (Kanal 3), ungefilterte Daten: 270 μ Gal/Volt (Kanal 1)	64
Abbildung E.6: Gravimeter A206 - Originalregistrierung der minütlichen Signalmittelwerte und zugeordneten Standardabweichungen der ungefilterten und der gefilterten sekundlichen Daten bei vergleichsweise niedrigem mikroseismischen Störpegel (Samstag, 01.12.2001 bis Montag 03.12.2001), rechte Ordinate: Standardabweichung Registriermaßstab: RC-gefilterte Daten: 124 μ Gal/Volt (Kanal 3), ungefilterte Daten: 270 μ Gal/Volt (Kanal 1)	64
Abbildung E.7: Gravimeter A206 - Amplitudenspektrum der Standardabweichungen der stündlichen Signalmittelwerte der RC-gefilterten Daten.....	65
Abbildung E.8: Gravimeter A206 - Amplitudenspektrum der Standardabweichungen der stündlichen Signalmittelwerte der ungefilterten Daten.....	65
Abbildung E.9: Gravimeter A206 - Amplitudenspektrum der Standardabweichungen der stündlichen Signalmittelwerte der ungefilterten Daten, niederfrequenter Bereich	65
Abbildung E.10: Gravimeter LCR716 - Amplitudenspektrum der Standardabweichungen der stündlichen Signalmittelwerte - ungefilterter CPI-Ausgang.....	66
Abbildung E.11: Gravimeter LCR-G-xx1F - Amplitudenspektrum der Standardabweichungen der stündlichen Signalmittelwerte - ungefilterter Feedbackausgang.....	66
Abbildung E.12: Gravimeter LCR-G-xx2F - Amplitudenspektrum der Standardabweichungen der stündlichen Signalmittelwerte - gefilterter Feedbackausgang.....	66
Abbildung E.13: Piezo-Sensor K925	67
Abbildung E.14: A206 ungefilterter Signalausgang, Piezo-Sensor K925 - Standardabweichungen der stündlichen Signalmittelwerte - Beispiel des Signalverlaufs für einen Zeitraum von etwa einem MONAT	67
Abbildung E.15: A206 ungefilterter Signalausgang, Piezo-Sensor K925 - Standardabweichungen der stündlichen Signalmittelwerte - Beispiel des Signalverlaufs für einen Zeitraum von etwa einer WOCHE.....	68
Abbildung E.16: Piezo-Sensor K925 – Amplitudenspektrum der Standardabweichungen der stündlichen Signalmittelwerte	68
Abbildung E.17: Gegenüberstellung des Verlaufs der Standardabweichungen der minütlichen Mittelwerte der sekundlichen Beobachtungsdaten von K925 (Registrierkanal 8), A206 (Kanal 1: ungefiltert, Kanal 3: gefiltert) sowie LCR716 (Kanal 4).....	69
Abbildung E.18: Gravimeter A206 – Gegenüberstellung des Verlaufs der <i>Standardabweichungen</i> der minütlichen Mittelwerte des ungefilterten Signals mit dem Verlauf der minütlichen <i>Mittelwerte</i> der sekundlichen Signale; Registrierkanal 1: ungefilterte Daten - Registrierkanal 3: gefilterte Daten	70
Abbildung E.19: Piezo-Sensor K925 – Registrierkanal 8 - Amplitudenspektrum der Standardabweichungen der minütlichen Mittelwerte	70
Abbildung E.20: Gravimeter A206 – Registrierkanal 1: ungefilterte Signale - Amplitudenspektrum der Standardabweichungen der minütlichen Mittelwerte	71
Abbildung E.21: Gravimeter A206 – Registrierkanal 3: gefilterte Signale - Amplitudenspektrum der Standardabweichungen der minütlichen Mittelwerte	71
Abbildung E.22: Gravimeter LCR716 – Registrierkanal 4: CPI-Modus - Amplitudenspektrum der Standardabweichungen der minütlichen Mittelwerte	71

Abbildung E.23: Piezosensor K925 - Verlauf der Standardabweichungen der minütlichen Signalmittelwerte während eines Tages im Winter 2002.....	72
Abbildung E.24: Piezosensor K925 - Verlauf der Standardabweichungen der minütlichen Signalmittelwerte während eines Tages im Sommer 2002.....	72
Abbildung E.25: Histogramm der Residuen mit Normalverteilung für Gravimeter A206 gefilterte Daten September 2000 bis Januar 2003.....	73
Abbildung E.26: Histogramm der Residuen mit Normalverteilung für Gravimeter A206 ungefilterte Daten Juli 2001 bis Januar 2003.....	73
Abbildung E.27: Histogramm der Residuen mit Normalverteilung für Gravimeter LCR-G-xx1F Juli 2001 bis Mai 2002.....	74
Abbildung E.28: Beispiel des Residuenverlaufs bei ungenauer Sprunghöhenbestimmung / Sprungkorrektur; Spindelverstellung am 24.08.2002 um 12 ⁰⁸ UT; Gravimeter A206, ungefilterte Daten.....	75
Abbildung E.29: Amplitudenspektrum der Residuen der Gezeitenanalyse des Gravimeter A206 – gefilterte Daten - Registrierzeitraum vom 17. November 2000 bis 13. Januar 2003.....	75
Abbildung E.30: Amplitudenspektrum der Residuen der Gezeitenanalyse des Gravimeter A206 – ungefilterte Daten; Registrierzeitraum vom 21. Juli 2001 bis 13. Januar 2003.....	76
Abbildung E.31: Amplitudenspektrum der Residuen der Gezeitenanalyse des Gravimeter LCR-G-xx1F Registrierzeitraum vom 27. Juli 2001 bis 19. Mai 2002.....	76
Abbildung E.32: Amplitudenspektrum der Luftdruckvariationen Stündliche Mittelwerte - Registrierzeitraum 28. März 2001 bis 14. Januar 2003.....	77
Abbildung E.33: Spektrum der Temperaturvariationen Stündliche Mittelwerte - Registrierzeitraum 31. Oktober 2000 bis 14. Januar 2003.....	77
Abbildung E.34: Exemplarische Gegenüberstellung von Luftdruckverlauf und Residuenverlauf für einen Zeitraum von etwa einem MONAT; die Darstellung von A206 bezieht sich auf die gefilterten Daten; Luftdruckmaßstab: 1 Volt entspricht 10mbar.....	78
Abbildung E.35: Exemplarische Gegenüberstellung von Luftdruckverlauf und Residuenverlauf für einen Zeitraum von etwa einer WOCHEN; die Darstellung von A206 bezieht sich auf die gefilterten Daten; Luftdruckmaßstab: 1 Volt entspricht 10mbar.....	78
Abbildung E.36: Exemplarische Gegenüberstellung von Temperaturverlauf und Residuenverlauf für einen Zeitraum von etwa einer Woche; die Darstellung von A206 bezieht sich auf die gefilterten Daten; Temperaturmaßstab: 1 Volt entspricht 0,25°C.....	79
Abbildung E.37: Zeitlicher Verlauf des Amplitudenquotienten M_2 bei aufeinander folgenden 2-Monatsanalysen – Dezember 2000 bis Dezember 2002.....	80
Abbildung E.38: Zeitlicher Verlauf des Amplitudenquotienten M_2 bei aufeinander folgenden 3-Monatsanalysen – Dezember 2000 bis Dezember 2002.....	80
Abbildung E.39: Zeitlicher Verlauf des Amplitudenquotienten M_2 bei aufeinander folgenden 4-Monatsanalysen – Dezember 2000 bis Dezember 2002.....	81
Abbildung E.40: Zeitlicher Verlauf des Amplitudenquotienten O_1 bei aufeinander folgenden 2-Monatsanalysen – Dezember 2000 bis Dezember 2002.....	81
Abbildung E.41: Zeitlicher Verlauf des Amplitudenquotienten O_1 bei aufeinander folgenden 3-Monatsanalysen – Dezember 2000 bis Dezember 2002.....	81
Abbildung E.42: Zeitlicher Verlauf des Amplitudenquotienten O_1 bei aufeinander folgenden 4-Monatsanalysen – Dezember 2000 bis Dezember 2002.....	82
Abbildung E.43: Zeitlicher Verlauf der Standardabweichung der Gewichtseinheit (Modellanpassung) bei aufeinander folgenden 2-Monatsanalysen.....	82
Abbildung E.44: Zeitlicher Verlauf der Standardabweichung der Gewichtseinheit (Modellanpassung) bei aufeinander folgenden 3-Monatsanalysen.....	82
Abbildung E.45: Zeitlicher Verlauf der Standardabweichung der Gewichtseinheit (Modellanpassung) bei aufeinander folgenden 4-Monatsanalysen.....	83

Abbildung E.46: Zeitlicher Verlauf der Phasendifferenz M_2 bei aufeinander folgenden 2-Monatsanalysen Dezember 2000 bis Dezember 2002	83
Abbildung E.47: Zeitlicher Verlauf der Phasendifferenz M_2 bei aufeinander folgenden 3-Monatsanalysen Dezember 2000 bis Dezember 2002	83
Abbildung E.48: Zeitlicher Verlauf der Phasendifferenz M_2 bei aufeinander folgenden 4-Monatsanalysen Dezember 2000 bis Dezember 2002	84
Abbildung E.49: Zeitlicher Verlauf der Phasendifferenz O_1 bei aufeinander folgenden 2-Monatsanalysen Dezember 2000 bis Dezember 2002	84
Abbildung E.50: Zeitlicher Verlauf der Phasendifferenz O_1 bei aufeinander folgenden 3-Monatsanalysen Dezember 2000 bis Dezember 2002	84
Abbildung E.51: Zeitlicher Verlauf der Phasendifferenz O_1 bei aufeinander folgenden 4-Monatsanalysen Dezember 2000 bis Dezember 2002	85
Abbildung E.52: Änderung des Amplitudenquotienten M_2 bei aufeinander folgenden Jahresanalysen	86
Abbildung E.53: Änderung des Amplitudenquotienten O_1 bei aufeinander folgenden Jahresanalysen	86
Abbildung E.54: Änderung der Phasendifferenz M_2 bei aufeinander folgenden Jahresanalysen	87
Abbildung E.55: Änderung der Phasendifferenz O_1 bei aufeinander folgenden Jahresanalysen	87
Abbildung E.56: Zeitlicher Verlauf des Amplitudenquotienten M_2 , aufeinander folgende 58Tage- Analysen für den Zeitraum Juli 2001 bis Mai 2002	88
Abbildung E.57: Zeitlicher Verlauf des Amplitudenquotienten O_1 , aufeinander folgende 58Tage- Analysen für den Zeitraum Juli 2001 bis Mai 2002	88
Abbildung E.58: Zeitlicher Verlauf der Standardabweichung der Gewichtseinheit aufeinander folgende 58Tage-Analysen für den Zeitraum Juli 2001 bis Mai 2002	88
Abbildung E.59: Zeitlicher Verlauf der Phasendifferenz M_2 , aufeinander folgende 58Tage- Analysen für den Zeitraum Juli 2001 bis Mai 2002	89
Abbildung E.60: Zeitlicher Verlauf der Phasendifferenz O_1 , aufeinander folgende 58Tage- Analysen für den Zeitraum Juli 2001 bis Mai 2002	89
Abbildung E.61: Residuenverlauf im Bereich eines synthetische Sprungs von plus $40\text{nm/s}^2=+4\mu\text{Gal}$ am 01.08.2001 um 00:00h	90
Abbildung E.62: Residuenverlauf im Bereich eines synthetischen Sprungs von minus $40\text{nm/s}^2=-4\mu\text{Gal}$ am 01.08.2001 um 00:00h	90
Abbildung E.63: Einfluss eines synthetischen Sprungsignals auf die Ausschlagweite der Residuen an der Sprungstelle bei Filter Pertzev57	91
Abbildung E.64: Einfluss eines synthetischen Sprungsignals auf die Ausschlagweite der Residuen an der Sprungstelle bei Filter Pertzev59	91
Abbildung E.65: Zeitlicher Verlauf der Residuen nach der Gezeitenanalyse	93
Abbildung E.66: Die Änderung der Standardabweichung der Analyse als Funktion der Sprunghöhe	93
Abbildung E.67: Die Änderung des Amplitudenquotienten ΔM_2 (1,18770 aus Tabelle E.3) als Funktion der Sprunghöhe	93
Abbildung E.68: Die Änderung des Phasendifferenzen M_2 ($2^\circ,1398$ aus Tabelle E.3) als Funktion der Sprunghöhe	94
Abbildung E.69: Die Änderung des Amplitudenquotienten ΔO_1 (1,14810 aus Tabelle E.3) als Funktion der Sprunghöhe	94
Abbildung E.70: Die Änderung der Phasendifferenz O_1 ($0^\circ,0673$ aus Tabelle E.3) als Funktion der Sprunghöhe	94
Abbildung E.71: Zeitlicher Verlauf des Luftdrucks im GeoObservatorium Odendorf stündliche Mittelwerte, Maßstab: 1Volt entspricht 10mbar, April 2001 bis Januar 2003	95
Abbildung E.72: Amplitudenspektrum des Luftdruckverlaufs	96

Abbildung E.73: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite: 29h; ohne Driftmodell).....	100
Abbildung E.74: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite: 45h; ohne Driftmodell).....	100
Abbildung E.75: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite: 73h; ohne Driftmodell).....	100
Abbildung E.76: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite: 103h; ohne Driftmodell).....	101
Abbildung E.77: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite: 29h; linearer Driftansatz).....	102
Abbildung E.78: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite: 50h; linearer Driftansatz).....	102
Abbildung E.79: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite: 75h; linearer Driftansatz).....	103
Abbildung E.80: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite:100h; linearer Driftansatz).....	103
Abbildung E.81: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite:125h; linearer Driftansatz).....	103
Abbildung E.82: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite:150h; linearer Driftansatz).....	104
Abbildung E.83: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite:29h; Driftansatz: Polynom 2. Ordnung).....	105
Abbildung E.84: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite:50h; Driftansatz: Polynom 2. Ordnung).....	105
Abbildung E.85: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite:75h; Driftansatz: Polynom 2. Ordnung).....	105
Abbildung E.86: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite:100h; Driftansatz: Polynom 2. Ordnung).....	106
Abbildung E.87: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite:125h; Driftansatz: Polynom 2. Ordnung).....	106
Abbildung E.88: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F (Fensterbreite:150h; Driftansatz: Polynom 2. Ordnung).....	106
Abbildung E.89: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für A206 (Fensterbreite: 50h; linearer Driftansatz)	116
Abbildung E.90: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für A206 (Fensterbreite: 75h; linearer Driftansatz)	116
Abbildung E.91: Luftdruck-Regressionskoeffizienten für A206 (Fensterbreite: 100h; linearer Driftansatz)	116
Abbildung E.92: Luftdruckregressionskoeffizienten für A206 (Fensterbreite: 50h; Driftansatz: Polynom 2. Ordnung)	117
Abbildung E.93: Luftdruckregressionskoeffizienten für A206 (Fensterbreite: 100h; Driftansatz: Polynom 2. Ordnung)	118
Abbildung E.94: Signalverlauf bei einem Diskretisierungsintervall von 0,1 sec. Registrierzeitraum: 12 Minuten	123
Abbildung E.95: Signalverlauf bei einem Diskretisierungsintervall von 0,1 sec. Registrierzeitraum: 2 Minuten	124
Abbildung E.96: Beispiel für ein Sprungsignal bei Gravimeter LCR716 CPI, Diskretisierungsintervall 1 sec.....	127
Abbildung E.97: 1. Sprungsignal bei Gravimeter LCR-G-xx2F – Sprunghöhe 0,54 Volt.....	127

Abbildung E.98: 2. Sprungsignal bei Gravimeter LCR-G-xx2F – Sprunghöhe 1,66 Volt.....	128
Abbildung E.99: 1. Sprungsignal bei Gravimeter LCR-G-xx2F mit partieller polynomialer Signalfilterung	136
Abbildung E.100: 2. Sprungsignal bei Gravimeter LCR-G-xx2F mit partieller polynomialer Signalfilterung.....	137
Abbildung E.101: Sprungsignal bei Gravimeter LCR-G-xx2F mit 17sec-Glättungsfilter, Datensatz 1 ..	138
Abbildung E.102: Detailansicht des geglätteten Signals (17sec-Filter), Datensatz 1.....	138
Abbildung E.103: Sprungsignal bei Gravimeter LCR-G-xx2F mit 19sec-Glättungsfilter, Datensatz 1 ..	138
Abbildung E.104: Detailansicht des geglätteten Signals (19sec-Filter), Datensatz 1.....	139
Abbildung E.105: Sprungsignal bei Gravimeter LCR-G-xx2F mit 17sec-Glättungsfilter, Datensatz 2 ..	139
Abbildung E.106: Detailansicht des geglätteten Signals (17sec-Filter), Datensatz 2.....	140
Abbildung E.107: Sprungsignal bei Gravimeter LCR-G-xx2F mit 19sec-Glättungsfilter, Datensatz 2 ..	140
Abbildung E.108: Detailansicht des geglätteten Signals (19sec-Filter), Datensatz 2.....	140
Abbildung E.109: Zeitfehlereinfluss bei unterschiedlichen Sprunghöhen - Datenreihenlänge: 5min.....	141
Abbildung E.110: Sprungsignal-Zeitfehlereinfluss bei unterschiedlichen Datenlängen - Sprunghöhe: 0,54Volt.....	142
Abbildung F.1: Kanal 4: Gravimeter LCR716CPI, ca. 160 μ Gal/Volt Kanal 5: Gravimeter Askania GS25 Nr. 233, ca. 92 μ Gal/Volt Kanal 3: Gravimeter Askania GS15 Nr. 206, ca. 124 μ Gal/Volt	143
Abbildung F.2: Kanal 7: Gravimeter LCR-G-xx1F, ca. 105 μ Gal/Volt Kanal 3: Gravimeter Askania GS15 Nr. 206, ca. 124 μ Gal/Volt.....	144
Abbildung F.3: Gegenüberstellung von Luftdruck und Gravimetersignal LCR716CPI (ca. 156 μ Gal/Volt) Instrumenteller Luftdruckeffekt ca. 3,07 μ Gal/mbar	144
Abbildung F.4: Gegenüberstellung von Luftdruck und Gravimetersignal A206 (ca. 124 μ Gal/Volt) Kein erkennbarer instrumenteller Luftdruckeffekt: Gravimeter druckdicht	145
Abbildung F.5: Gegenüberstellung von Luftdruck und Gravimetersignal LCR716CPI (ca. 160 μ Gal/Volt) Instrumenteller Luftdruckeffekt ca. 3,07 μ Gal/mbar	145
Abbildung F.6: Gegenüberstellung von Luftdruck und Gravimetersignal A233 (ca. 92 μ Gal/Volt) Kein erkennbarer instrumenteller Luftdruckeffekt: Gravimeter druckdicht	145
Abbildung F.7: Gegenüberstellung von Luftdruck und Gravimetersignal LCR716CPI (ca. 160 μ Gal/Volt) Hohe gravimetrische Signalauflösung, sichtbarer Messbereich ca. 9 μ Gal	146
Abbildung F.8: Gegenüberstellung von Luftdruck und Gravimetersignal A206 (ca. 124 μ Gal/Volt) Hohe gravimetrische Signalauflösung, sichtbarer Messbereich ca. 16 μ Gal Kein erkennbarer instrumenteller Luftdruckeffekt: Gravimeter druckdicht	146
Abbildung F.9: Gravimeter LCR716CPI, Signalverlauf bei Stützstellenabstand 0,1 sec.....	147
Abbildung F.10: Zugeordnetes Amplitudenspektrum	147
Abbildung F.11: LCR-Gravimeter auf Messplattform.....	148
Abbildung F.12: Feinlibelle zur Horizontierungskontrolle in Gravimeter-Längsrichtung	148
Abbildung F.13: Schema des LaCoste-Romberg-Gravimeters [LaCoste&Romberg, Instruction Manual 1992]	149
Abbildung F.14: Die zeitlichen Änderungen der Registrierempfindlichkeit während des Zeitraumes Januar 2002 bis Januar 2003 bei Gravimeter LCR716CPI.....	150
Abbildung F.15: Der Verlauf der Temperatur in der Messkammer während des Zeitraumes Januar 2002 bis Januar 2003.....	150
Abbildung F.16: Amplitudenspektrum der Residuen - Analyse 1	152
Abbildung F.17: Amplitudenspektrum der Residuen - Analyse 2	153
Abbildung F.18: Amplitudenspektrum der Residuen - Analyse 3	154

Abbildung F.19: Amplitudenspektrum der Residuen - Analyse 4	155
Abbildung F.20: Amplitudenspektrum der Residuen – Analyse 5	156
Abbildung F.21: Amplitudenspektrum der Residuen – Analyse 6	157
Abbildung F.22: Amplitudenspektrum der Residuen – Analyse 7	158
Abbildung F.23: Amplitudenspektrum der Residuen – Teilanalyse 7a ($k_i < k_m$)	159
Abbildung F.24: Amplitudenspektrum der Residuen – Teilanalyse 7b ($k_i > k_m$)	160
Abbildung F.25: Amplitudenspektrum der Residuen – Teilanalyse 7aa	161
Abbildung F.26: Amplitudenspektrum der Residuen – Teilanalyse 7bb	161
Abbildung F.27: Amplitudenspektrum der Residuen – Analyseergebnis LCR-G-xx2F (Tabelle F.14)	163
Abbildung F.28: Temperaturverlauf in der Messkammer – entspricht Abbildung F.15	165
Abbildung F.29: Instrumentelle Drift des Gravimeter LCR716CPI	165
Abbildung F.30: entspricht Abbildung F.14, zeitliche Änderungen der Registrierempfindlichkeit	165
Abbildung F.31: Mit dem Gezeitenverlauf korrelierte Residuen	167
Abbildung F.32: Residuenverlauf bei Verwendung eines Maßstabpolynoms	167
Abbildung F.33: Residuenverlauf bei linearer Maßstabsinterpolation	168
Abbildung F.34: Residuenverlauf bei relativ starker zeitlicher Änderung des Registriermaßstabs	168
Abbildung F.35: LCR-G-xx1 CPI-Modus, Gegenüberstellung von Residuen und Gezeiten	171
Abbildung F.36: LCR-G-xx1 CPI-Modus, Gegenüberstellung von Residuen und Gezeiten - Beispiel für Gegenläufigkeit	171
Abbildung F.37: LCR-G-xx1 CPI-Modus, Gegenüberstellung von Residuen und Gezeiten - Beispiel für Parallel-Läufigkeit	172
Abbildung F.38: LCR-G-xx1 CPI-Modus, Residuenspektrum	172
Abbildung F.39: LCR-G-xx1 Rückkopplungsmodus, Gegenüberstellung von Residuen und Gezeiten (Ausschnitt)	173
Abbildung F.40: LCR-G-xx1 Rückkopplungsmodus, Residuenspektrum	173
Abbildung F.41: Abweichungen vom kongruenten Verlauf der Residuen und Gezeiten bei Gravimeter LCR-G-xx1CPI	174
Abbildung F.42: Verlauf des linearen Regressionskoeffizienten zwischen Residuen und Gezeiten LCR-G- xx1CPI (Fensterbreite: 29h)	175
Abbildung F.43: Verlauf des linearen Regressionskoeffizienten zwischen Residuen und Gezeiten LCR-G- xx1CPI (Fensterbreite: 50h)	175
Abbildung F.44: Verlauf des linearen Regressionskoeffizienten zwischen Residuen und Gezeiten LCR-G- xx1CPI (Fensterbreite: 75h)	176
Abbildung F.45: Verlauf des linearen Regressionskoeffizienten zwischen Residuen und Gezeiten LCR-G- xx1CPI (Fensterbreite: 100h)	176
Abbildung F.46: Verlauf des linearen Regressionskoeffizienten zwischen Residuen und Gezeiten LCR-G- xx1CPI (Fensterbreite: 125h)	176
Abbildung F.47: Amplitudenspektrum der Residuen - 100-stündiges Zeitfenster mit linearer Maßstabsinterpolation zwischen Stützstellen	179
Abbildung F.48: Gegenüberstellung von Residuen und Gezeiten bei Gravimeter LCR-G-xx1CPI	179
Abbildung F.49: Amplitudenspektrum der Residuen, 100-stündiges Zeitfenster mit linearer Maßstabsinterpolation zwischen den Stützstellen, zusätzlicher Kanal für den stündlichen Luftdruck	181
Abbildung G.1: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen	189

Abbildung G.2: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen.....	189
Abbildung G.3: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 27.02.2003 bis 18.03.2003, Maßstäbe: 1 Tag bzw. 2nm/s ² je Intervall.....	189
Abbildung G.4: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 27.02.2003 bis 18.03.2003, Maßstäbe: 1 Tag bzw. 2nm/s ² je Intervall.....	189
Abbildung G.5: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	189
Abbildung G.6: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	189
Abbildung G.7: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen	190
Abbildung G.8: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen.....	190
Abbildung G.9: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 26.02.2004 bis 17.03.2004, Maßstäbe: 1 Tag bzw. 2nm/s ² je Intervall.....	190
Abbildung G.10: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 26.02.2004 bis 17.03.2004, Maßstäbe: 1 Tag bzw. 2nm/s ² je Intervall.....	190
Abbildung G.11: Gravimeter A206 – gefilterte Daten - zweiter Untersuchungsabschnitt Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	190
Abbildung G.12: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	190
Abbildung G.13: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen	192
Abbildung G.14: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	192
Abbildung G.15: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen.....	193
Abbildung G.16: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	193
Abbildung G.17: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung, Residuen >50 und <-50 nm/s ² ausgeschlossen	194
Abbildung G.18: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung, Residuen >35 und <-35 nm/s ² ausgeschlossen	194
Abbildung G.19: Gravimeter A206, gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Überprüfung der zeitlichen Stabilität des Registriermaßstabs durch zeitlichen Verlauf des Amplitudenquotienten M_2 in aufeinander folgenden Zweimonatsanalysen.....	195
Abbildung G.20: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen	200
Abbildung G.21: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen.....	200
Abbildung G.22: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 27.02.2003 bis 18.03.2003, Maßstäbe: 1 Tag bzw. 5nm/s ² je Intervall.....	200

Abbildung G.23: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 27.02.2003 bis 18.03.2003, Maßstäbe: 1 Tag bzw. 5nm/s ² je Intervall.....	200
Abbildung G.24: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	200
Abbildung G.25: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	200
Abbildung G.26: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen	201
Abbildung G.27: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen.....	201
Abbildung G.28: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 26.02.2004 bis 17.03.2004, Maßstäbe: 1 Tag bzw. 2nm/s ² je Intervall.....	201
Abbildung G.29: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 26.02.2004 bis 17.03.2004, Maßstäbe: 1 Tag bzw. 2nm/s ² je Intervall.....	201
Abbildung G.30: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten- zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	201
Abbildung G.31: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	201
Abbildung G.32: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen ...	203
Abbildung G.33: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	203
Abbildung G.34: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen.....	204
Abbildung G.35: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	204
Abbildung G.36: Gravimeter A206, gefilterte Daten, erster und zweiter Untersuchungsabschnitt zeitlicher Verlauf der Amplitudenquotienten M_2 bei aufeinanderfolgenden 2-Monatsanalysen, bis Analyse 12 erster Untersuchungsabschnitt.....	206
Abbildung G.37: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – erster Untersuchungsabschnitt, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen	208
Abbildung G.38: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – erster Untersuchungsabschnitt, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen.....	208
Abbildung G.39: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – erster Untersuchungsabschnitt, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	208
Abbildung G.40: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – erster Untersuchungsabschnitt, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	208
Abbildung G.41: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – Gesamter Untersuchungszeitraum, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen	213
Abbildung G.42: Gravimeter A206 – gefilterte Daten –Gesamter Untersuchungszeitraum, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen.....	213
Abbildung G.43: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – Gesamter Untersuchungszeitraum, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	213
Abbildung G.44: Gravimeter A206 – gefilterte Daten – Gesamter Untersuchungszeitraum, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	213

Abbildung G.45: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – erster Untersuchungsabschnitt, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen	216
Abbildung G.46: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – erster Untersuchungsabschnitt, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen.....	216
Abbildung G.47: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – erster Untersuchungsabschnitt, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	216
Abbildung G.48: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – erster Untersuchungsabschnitt, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	216
Abbildung G.49: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – Gesamter Untersuchungszeitraum, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen	221
Abbildung G.50: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten –Gesamter Untersuchungszeitraum, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen.....	221
Abbildung G.51: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – Gesamter Untersuchungszeitraum, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	221
Abbildung G.52: Gravimeter A206 – ungefilterte Daten – Gesamter Untersuchungszeitraum, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	221
Abbildung G.53: Gravimeter A206 - Beispiel für den zeitlichen Verlauf der minütlichen Mittelwerte der Registriersignale, linke Ordinate: gefiltert, 124 μ Gal/Volt, rechte Ordinate: ungefiltert, 269 μ Gal/Volt	227
Abbildung G.54: Gravimeter A206 - Beispiel für den zeitlichen Verlauf der minütlichen Mittelwerte der Registriersignale (vergrößerter Ausschnitt), linke Ordinate: gefiltert, 124 μ Gal/Volt, rechte Ordinate: ungefiltert, 269 μ Gal/Volt.....	227
Abbildung G.55: Gravimeter A206 – Beispiel für den zeitlichen Verlauf der stündlichen Mittelwerte der gefilterten und ungefilterten Registriersignale mit zugeordneten Standardabweichungen, Registriermaßstäbe siehe vorstehende Abbildung G.53 und Abbildung G.54	227
Abbildung G.56: A206 gefilterte Daten, zeitlicher Verlauf der berechneten Amplitudenquotienten M_2 im Zeitraum April 2001 bis Oktober 2004	228
Abbildung G.57: A206 ungefilterte Daten, zeitlicher Verlauf der berechneten Amplitudenquotienten M_2 im Zeitraum August 2001 bis Oktober 2004	229
Abbildung G.58: A206 gefilterte Daten, zeitlicher Verlauf der berechneten Phasenverschiebungen M_2 im Zeitraum April 2001 bis Oktober 2004	229
Abbildung G.59: A206 ungefilterte Daten, zeitlicher Verlauf der berechneten Phasenverschiebungen M_2 im Zeitraum August 2001 bis Oktober 2004	229
Abbildung G.60: A206 gefilterte Daten, zeitlicher Verlauf der berechneten Amplitudenquotienten S_2 im Zeitraum April 2001 bis Oktober 2004	230
Abbildung G.61: A206 ungefilterte Daten, zeitlicher Verlauf der berechneten Amplitudenquotienten S_2 im Zeitraum August 2001 bis Oktober 2004	230
Abbildung G.62: A206 gefilterte Daten, zeitlicher Verlauf der berechneten Phasenverschiebungen S_2 im Zeitraum April 2001 bis Oktober 2004	230
Abbildung G.63: A206 ungefilterte Daten, zeitlicher Verlauf der berechneten Phasenverschiebungen S_2 im Zeitraum August 2001 bis Oktober 2004	231
Abbildung G.64: Periodische Variationen des Registriersignals bei Gravimeter A233 0,01 Volt entspricht etwa 1 μ Gal	232
Abbildung G.65: Gegenüberstellung der Kammertemperatur mit den Gravimeterdriften A206 und A233	233
Abbildung G.66: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen	239
Abbildung G.67: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen.....	239

Abbildung G.68: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 17.05.2003 bis 28.05.2003, Maßstäbe: 12h bzw. 2nm/s ² je Intervall	239
Abbildung G.69: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 17.05.2003 bis 28.05.2003, Maßstäbe: 12h bzw. 1nm/s ² je Intervall	239
Abbildung G.70: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	239
Abbildung G.71: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung.....	239
Abbildung G.72: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen	240
Abbildung G.73: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen	240
Abbildung G.74: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 26.02.2004 bis 18.03.2004, Maßstäbe: 1 Tag bzw. 2nm/s ² je Intervall	240
Abbildung G.75: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Beispiel für den Residuenverlauf: Zeitraum vom 26.02.2004 bis 18.03.2004, Maßstäbe: 1 Tag bzw. 2nm/s ² je Intervall	240
Abbildung G.76: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	240
Abbildung G.77: Gravimeter A233 – zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung.....	240
Abbildung G.78: Gravimeter A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen	243
Abbildung G.79: Gravimeter A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Amplitudenspektrum der Residuen.....	243
Abbildung G.80: Gravimeter A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung.....	243
Abbildung G.81: Gravimeter A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gesamtanalyse, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung.....	243
Abbildung G.82: Stabilität des Amplitudenquotienten M_2 bei aufeinander folgenden 2-Monatsanalysen für Gravimeter A233 im Zeitraum April 2003 bis September 2004	245
Abbildung G.83: Stabilität der Phasendifferenz M_2 bei aufeinander folgenden 2-Monatsanalysen für Gravimeter A233 im Zeitraum April 2003 bis September 2004	245
Abbildung G.84: Ergebnisse der elektromagnetischen Eichung bei Gravimeter A233	246
Abbildung G.85: Gravimeter A206 und A233, gefilterte Daten – Gegenüberstellung des Verlaufs der Residuen – Beispiel 1	250
Abbildung G.86: Gravimeter A206 und A233, gefilterte Daten – Gegenüberstellung des Verlaufs der Residuen – Beispiel 2.....	250
Abbildung G.87: Gravimeter A206 und A233, gefilterte Daten – Gegenüberstellung des Verlaufs der Residuen – Ausschnittvergrößerung von Beispiel 2.....	251
Abbildung G.88: Gravimeter A233 – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung.....	260
Abbildung G.89: Gravimeter A233 – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung.....	260
Abbildung G.90: Gravimeter A206, gefilterte Daten – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung.....	262

Abbildung G.91: Gravimeter A206, gefilterte Daten – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	262
Abbildung G.92: Gravimeter A206, ungefilterte Daten – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	264
Abbildung G.93: Gravimeter A206, ungefilterte Daten – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen und Normalverteilung	264
Abbildung G.94: Gravimeter LCR-G-xx1F, ungefilterte Daten – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression, Histogramm der Residuen	266
Abbildung G.95: Gravimeter LCR-G-xx1F, ungefilterte Daten – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression, Histogramm der Residuen	266
Abbildung H.1: Gravimeter LCR716CPI, ungefiltert, Beispiel 1 für den zeitlichen Verlauf der Standardabweichungen minütlicher Mittelwerte, Maßstab: siehe rechten Ordinatenachse.....	286
Abbildung H.2: Gravimeter LCR716CPI, ungefiltert, Beispiel 2 für den zeitlichen Verlauf der Standardabweichungen minütlicher Mittelwerte, Maßstab: siehe rechten Ordinatenachse.....	287
Abbildung H.3: Gravimeter LCR716CPI, ungefiltert, Beispiel 3 für den zeitlichen Verlauf der Standardabweichungen minütlicher Mittelwerte, Maßstab: siehe rechten Ordinatenachse.....	287
Abbildung H.4: Ausschnitt aus einer Kurzzeitregistrierung für das Gravimeter LCR716 Datenlänge: 2 Minuten – beobachtete Frequenz ca. 0,2 Hz	288
Abbildung H.5: Beispiel 1 - Spektren vom 02.11.2001	289
Abbildung H.6: Beispiel 1 - zugeordnete Wellenfronten 02.11.2001	289
Abbildung H.7: : Beispiel 1 - Spektren vom 03.11.2001	290
Abbildung H.8: Beispiel 1 - zugeordnete Wellenfronten 03.11.2001	290
Abbildung H.9: Beispiel 1 - Spektren vom 04.11.2001	291
Abbildung H.10: Beispiel 1 - zugeordnete Wellenfronten 04.11.2001	291
Abbildung H.11: Beispiel 2 - Spektren vom 10.11.2001	292
Abbildung H.12: Beispiel 2 - zugeordnete Wellenfronten 10.11.2001	292
Abbildung H.13: Beispiel 2 - Spektren vom 11.11.2001	293
Abbildung H.14: Beispiel 2 - zugeordnete Wellenfronten 11.11.2001	293
Abbildung H.15: Beispiel 2 - Spektren vom 12.11.2001	294
Abbildung H.16: Beispiel 2 - zugeordnete Wellenfronten 12.11.2001	294
Abbildung H.17: Beispiel 3 - Spektren vom 27.01.2002	295
Abbildung H.18: Beispiel 3 - zugeordnete Wellenfronten 27.01.2002	295
Abbildung H.19: Beispiel 3 - Spektren vom 28.01.2002	296
Abbildung H.20: Beispiel 3 - zugeordnete Wellenfronten 28.01.2002	296
Abbildung H.21: Beispiel 3 - Spektren vom 29.01.2002	297
Abbildung H.22: Beispiel 3 - zugeordnete Wellenfronten 29.01.2002	297
Abbildung I.1: Wirkungen von Über- oder Unterschreitungen des Messbereichs.....	299
Abbildung I.2: Programmteil „Messwertregistrierung 16K“ (vgl. Abbildung C.1).....	301
Abbildung I.3: Programmteil „16K_Meßwertvisualisierung“ (vgl. Abbildung C.2).....	301
Abbildung I.4: Programmteil „16K_Meßwertvisualisierung“, verändertes Zeitintervall, Zeitintervalleinstellung möglich von 2 Sekunden bis 12 Stunden bei Anzeige sekundlich erfasster Messwerte	302
Abbildung I.5: Paralleldarstellung der Standardabweichungen minütlicher Mittel mit gemeinsamer Ordinate wählbaren Maßstabs	302

Abbildung I.6: Paralleldarstellung der Standardabweichungen minütlicher Mittel mit zwei getrennten Ordinaten wählbaren Maßstabs	303
Abbildung I.7: Paralleldarstellung des Verlaufs der minütlicher Mittel eines gravimetrischen Signals und des Luftdrucks mit zwei getrennten Ordinaten wählbaren Maßstabs zur graphischen Bestimmung der Luftdruckregression, rechte Ordinate: 0,05Volt entspricht etwa 5 μ Gal, linke Ordinate: 0,18Volt entspricht etwa 1,8mbar, Nicht-druckdichtes Gravimeter LCR716F	303
Abbildung I.8: Paralleldarstellung des Verlaufs zweier sekundlicher Beobachtungsreihen mit individueller Ordinatenanpassung, 0,03 Volt entspricht etwa 3 μ Gal, (Kanal 1 Gravimeter A233, Kanal 7 Gravimeter LCR716F, Schalteffekte der Thermostaten erkennbar).....	303
Abbildung I.9: Programmteil „Gezeitenbefreiung16K“.....	304
Abbildung I.10: Ergebnis einer Gezeitenbefreiung, Kanal 1 (schwarz): Eingangssignal sekundlicher Messwerte, Kanal 2 (braun): gezeitenbefreites Eingangssignal (zweimal mit unterschiedlichen Skalierungen dargestellt), Kanal 3 (rot): Modellgezeitenverlauf laut PREDICT - Maßstab: 1Volt entspricht ca. 100 μ Gal	304
Abbildung I.11: Ausschnittsvergrößerung des gezeitenbefreiten Signals – Kanal 2, erkennbar sind die Schaltungen der thermistor-gesteuerten Heizung bei Gravimeter A233 – Maßstab siehe Abbildung I.10	305
Abbildung I.12: Weiter verstärkte Vergrößerung des gezeitenbefreiten Signals aus Abbildung I.10. Hier wird eine zusätzliche Schwingung mit einer Frequenz von ca. 0,2 Hz sichtbar, siehe auch Abbildung H.4 – Maßstab siehe Abbildung I.10.....	305
Abbildung I.13: Beispiel für den Verlauf der Residuen - Zeitraum 01. 03. bis 31. 03. 2006 - 1 Intervall entspricht 1 Tag.....	306
Abbildung I.14: Gravimeter A233, Amplitudenspektrum der Residuen.....	307
Abbildung I.15: Residuenhistogramm mit Normalverteilung Gravimeter A233 - Histogramm der Residuen - mit Luftdruckregression - Zeitraum: November 2005 bis Juni 2006 – Filter Pertz57.....	307
Abbildung I.16: Beispiel für den Verlauf der Residuen - Zeitraum 01. 03. bis 31. 03. 2006 - 1 Intervall entspricht 1 Tag.....	308
Abbildung I.17: Gravimeter A233, Amplitudenspektrum der Residuen.....	308
Abbildung I.18: Residuenhistogramm mit Normalverteilung Gravimeter A233 - Histogramm der Residuen - mit Luftdruckregression - Zeitraum: November 2005 bis Juni 2006 – Filter Pertz59.....	308
Abbildung J.1: Gravimeter A233, Amplitudenspektrum der Residuen zu A233_8k2	312
Abbildung J.2: Gravimeter A233, Amplitudenspektrum der Residuen zu A233_8k1	312
Abbildung J.3: Gravimeter A233, Histogramm der Residuen und Normalverteilung zu A233_8k2.....	312
Abbildung J.4: Gravimeter A233, Histogramm der Residuen und Normalverteilung zu A233_8k1	312
Abbildung J.5: Residuenspektrum zu A233_16k1 (Pertz59)	314
Abbildung J.6: Gravimeter A233, Histogramm der Residuen und Normalverteilung zu A233_16k1	315
Abbildung J.7: Gravimeter A233, Histogramm der Residuen und Normalverteilung zu A233_8k1 (identisch mit Abb. J.4).....	315
Abbildung J.8: Residuenspektrum zu A233GG03 (Pertz59).....	317
Abbildung J.9: Residuen-Histogramm und Normalverteilung zu A233GG03.....	317
Abbildung J.10: Beispiel für die täglichen Variationen des Rauschpegels (Standardabweichungen der minütlichen Signalmittel); ungefiltertes Signal des Gravimeters Askania GS15 Nr.206. Ordinatenmaßstab: 0,01Volt entspricht etwa 5 μ Gal	318
Abbildung J.11: Beispiel für nur noch langzeitige Variationen des Rauschpegels (Standardabweichungen der minütlichen Signalmittel); gefiltertes Signal des Gravimeters Askania GS25 Nr.233. Ordinatenmaßstab: 0,0001Volt entspricht etwa 0,01 μ Gal	318

3 Tabellenverzeichnis

Tabelle A.1: Erdbeben von Euskirchen 1950/1951.....	6
Tabelle D.1: Maßstabsverhältnis der gegenübergestellten Registrierkanäle	35
Tabelle D.2: Gravimeter LCR716CPI, aufeinander folgende minütliche Signalwerte und Maßstabsverhältnisse bei hohem Rauschpegel.....	36
Tabelle D.3: Maßstabsverhältnis der gegenübergestellten Registrierkanäle nach dem Austausch des A/D-Wandlers	37
Tabelle D.4: Eichungen des Gravimeter A206 an verschiedenen Stationen	46
Tabelle D.5: Gesamtanalyse A206 - gefilterte Daten.....	51
Tabelle D.6: Gesamtanalyse A206 - ungefilterte Daten.....	53
Tabelle D.7: Gesamtanalyse Gravimeter LCR-G-xx1F	55
Tabelle D.8: LCR-G-xx1F/A206 Maßstabsverhältnisse für die Hauptpartialtiden	56
Tabelle D.9: Verhältnisse der Amplitudenquotienten der gefilterten und der ungefilterten Daten von A206	57
Tabelle D.10: Die Standardabweichungen der berechneten Gezeitenparameter	57
Tabelle D.11: Gesamtanalyse Gravimeter LCR-G-xx1F, Eterna-Version 3.40	58
Tabelle D.12: Gesamtanalyse Gravimeter LCR-G-xx1F, Eterna-Version 3.30	59
Tabelle D.13: Gesamtanalyse Gravimeter A206 gefilterte Daten, Eterna-Version 3.40.....	59
Tabelle D.14: Gesamtanalyse Gravimeter A206 gefilterte Daten, Eterna-Version 3.30.....	60
Tabelle E.1: Ergebnisse der ersten Jahresanalyse Gravimeter A206, gefilterte Daten vom 08.01.2001 bis 31.12.2001.....	85
Tabelle E.2: Ergebnisse der zweiten Jahresanalyse Gravimeter A206, gefilterte Daten vom 01.01.2002 bis 31.12.2002.....	86
Tabelle E.3: Parametersatz für die synthetische Gezeitenberechnung	92
Tabelle E.4: Ergebnisse der zweimonatigen Gezeitenanalyse (Auszug).....	92
Tabelle E.5: Analyse LCR-G-xx1F ohne Berücksichtigung des Luftdruckeffekts	98
Tabelle E.6: Analyse LCR-G-xx1F mit Berücksichtigung des Luftdruckeffekts durch Eterna	98
Tabelle E.7: Lineare Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F ohne Driftmodell	99
Tabelle E.8: Linearer Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F bei linearem Driftansatz	102
Tabelle E.9: Lineare Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F - Driftansatz: Polynom 2. Ordnung	104
Tabelle E.10: Ergebnis einer Wiederholung der Berechnung zu Tabelle E.9, jedoch unter Ausschluss von Ausreißern	107
Tabelle E.11: Lineare Regressionskoeffizienten für LCR-G-xx1F - Driftansatz: Polynom 3. Ordnung ..	108
Tabelle E.12: Analyse Gravimeter LCR-G-xx1F der mit Hilfe der minütlichen Luftdruckwerte korrigierten Registrierdaten.....	109
Tabelle E.13: Analyse Gravimeter LCR-G-xx1F der mit Hilfe der stündlichen Luftdruckwerte korrigierten Registrierdaten	109
Tabelle E.14: Die Analyse Gravimeter LCR-G-xx1F der luftdruckreduzierten Registrierdaten mit zusätzlichem Luftdruck-Regressionsansatz.....	110
Tabelle E.15: Alternative Berechnungsmethode zu Tabelle E.14.....	111
Tabelle E.16: Analyse LCR-G-xx1F ohne Berücksichtigung des Luftdruckeffekts mit Trennung von S_1K_1	111
Tabelle E.17: Analyse LCR-G-xx1F mit Berücksichtigung des Luftdruckeffekts durch Eterna und Trennung von S_1K_1	112

Tabelle E.18: Ergebnisübersicht	113
Tabelle E.19: Gezeitenanalyse Gravimeter A206 gefilterte Daten ohne Ansatz einer Luftdruckregression	114
Tabelle E.20: Gezeitenanalyse Gravimeter A206 gefilterte Daten mit Ansatz einer Luftdruckregression	114
Tabelle E.21: Lineare Regressionskoeffizienten für A206 (gefilterte Daten) bei linearem Driftansatz....	115
Tabelle E.22: Lineare Regressionskoeffizienten für A206 (gefilterte Daten) – Driftansatz: Polynom 2. Ordnung	117
Tabelle E.23: Lineare Regressionskoeffizienten für A206 (gefilterte Daten) - Driftansatz: Polynom 3. Ordnung	118
Tabelle E.24: Lineare Regressionskoeffizienten für A206 (gefilterte Daten) – Driftansatz: Polynom 4. Ordnung	119
Tabelle E.25: Lineare Regressionskoeffizienten für A206 (gefilterte Daten) - Driftansatz: Polynom 5. Ordnung	119
Tabelle E.26: Analyse der mittels minütlicher Luftdruckwerte korrigierten Registrierdaten (verkürzter Untersuchungszeitraum) Auszug, A206 (gefilterte Daten)	120
Tabelle E.27: Analyse der mittels stündlicher Luftdruckwerte korrigierten Registrierdaten Auszug, A206 (gefilterte Daten)	120
Tabelle E.28: Analyse der Registrierdaten des Gravimeter A206 (gefilterte Daten) Auszug, ohne Ansatz einer Luftdruckregression	122
Tabelle E.29: Berechnete Signalverzögerungen für LCR716 CPI	126
Tabelle E.30: Berechnete Signalverzögerungen (1) für LCR-G-xx2F	127
Tabelle E.31: Berechnete Signalverzögerungen (2) für LCR-G-xx2F	127
Tabelle E.32: Berechnete Signalverzögerungen Δt [sec] für ungestörte Datenreihen.....	128
Tabelle E.33: Berechnete Signalverzögerungen Δt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:5%).....	129
Tabelle E.34: Berechnete Signalverzögerungen Δt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:5%) bei Variation des „collection radius“ – $U_e = 10V$; $t = 15$ sec; Datenlänge: 1000 sec	129
Tabelle E.35: Berechnete Signalverzögerungen Δt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:1%) $U_e = 10V$; $t = 15$ sec	130
Tabelle E.36: Berechnete Signalverzögerungen Δt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:0,5%) $U_e = 10V$; $t = 15$ sec.....	130
Tabelle E.37: Berechnete Signalverzögerungen Δt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:0,1%) $U_e = 10V$; $t = 15$ sec.....	131
Tabelle E.38: Berechnete Signalverzögerungen Δt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:0,05%) $U_e = 10V$; $t = 15$ sec.....	131
Tabelle E.39: Berechnete Signalverzögerungen Δt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:0,01%) $U_e = 10V$; $t = 15$ sec.....	131
Tabelle E.40: Berechnete Signalverzögerungen Δt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:50%) $U_e = 1V$; $t = 15$ sec	132
Tabelle E.41: Berechnete Signalverzögerungen Δt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:10%) $U_e = 1V$; $t = 15$ sec	133
Tabelle E.42: Berechnete Signalverzögerungen Δt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:5%) $U_e = 1V$; $t = 15$ sec.....	133
Tabelle E.43: Berechnete Signalverzögerungen Δt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:1%) $U_e = 1V$; $t = 15$ sec.....	133
Tabelle E.44: Berechnete Signalverzögerungen Δt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:0,5%) $U_e = 1V$; $t = 15$ sec	134

Tabelle E.45: Berechnete Signalverzögerungen Δt [sec] für gestörte Datenreihen (SR=1:0,1%) $U_e = 1V$; $t = 15$ sec	134
Tabelle E.46: Berechnete Signalverzögerungen Δt für ungestörte Datenreihen mit variablen linearen Driftüberlagerungen und unterschiedlichen Eingangsspannungen U_e	135
Tabelle E.47: Signalverzögerungen Δt , Datensatz 1 mit partieller Signalfilterung.....	137
Tabelle E.48: Signalverzögerungen Δt , Datensatz 2 mit partieller Signalfilterung.....	137
Tabelle E.49: Signalverzögerung bei 17sec-Glättungsfilter, Datensatz 1	139
Tabelle E.50: Signalverzögerung bei 19sec-Glättungsfilter, Datensatz 1	139
Tabelle E.51: Signalverzögerungen bei 17sec-Glättungsfilter, Datensatz 2	140
Tabelle E.52: Signalverzögerungen bei 19sec-Glättungsfilter, Datensatz 2	141
Tabelle F.1: Beobachtungsböcke LCR716CPI	151
Tabelle F.2: Analysenergebnis 1 (Auszug)	151
Tabelle F.3: Analysenergebnis 2 (Auszug)	152
Tabelle F.4: Analysenergebnis 3 (Auszug)	153
Tabelle F.5: Analysenergebnis 4 (Auszug)	154
Tabelle F.6: Analysenergebnis 5 (Auszug)	155
Tabelle F.7: Analysenergebnis 6 (Auszug)	156
Tabelle F.8: Analysenergebnis 7 (Auszug)	158
Tabelle F.9: Ergebnis der Teilanalyse 7a (Auszug)	159
Tabelle F.10: Ergebnis der Teilanalyse 7b (Auszug)	159
Tabelle F.11: Ergebnis der Teilanalyse 7aa (Auszug).....	160
Tabelle F.12: Ergebnis der Teilanalyse 7bb (Auszug)	161
Tabelle F.13: Ergebnisse der Analysen 1 bis 7 für die Hauptpartialtiden sowie die Tide S_1 , Standardabweichung s der Gewichtseinheit in nm/s^2 , Beobachtungszeitraum vom 27.1.2002 bis 14.1.2003 (233 Tage).....	162
Tabelle F.14: Analysenergebnis LCR-G-xx2F (Auszug).....	164
Tabelle F.15: Gezeitenanalyse LCR-G-xx1 - CPI-Modus (Auszug).....	169
Tabelle F.16: Gezeitenanalyse LCR-G-xx1 – Rückkopplungsmodus (Auszug).....	170
Tabelle F.17: Zusammenstellung der Analysenergebnisse für die Hauptpartialtiden – Amplitudenverhältnisse.....	178
Tabelle F.18: Zusammenstellung der Analysenergebnisse für die Hauptpartialtiden – Phasenverschiebungen [°]	178
Tabelle F.19: Ergebnisse der Gezeitenanalysen mit zusätzlichem Kanal für den stündlichen Luftdruck, 100-stündiges Zeitfenster mit linearer Maßstabsinterpolation zwischen den Stützstellen	180
Tabelle G.1: A206 - gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1a, Ergebnisse ohne Luftdruckregression	185
Tabelle G.2: A206 - gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1b, Ergebnisse mit Luftdruckregression	185
Tabelle G.3: A206 - gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2a, Ergebnisse ohne Luftdruckregression	186
Tabelle G.4: A206 - gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2b, Ergebnisse mit Luftdruckregression	186
Tabelle G.5: A206 - gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie für die Partialtide S_1	187

Tabelle G.6: A206 - gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 2 ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie für die Partialtide S_1	187
Tabelle G.7: A206 - gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 und 2 ohne Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie für die Partialtide S_1	188
Tabelle G.8: A206 - gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 und 2 mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie für die Partialtide S_1	188
Tabelle G.9: A206 - gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse ohne Luftdruckregression.....	191
Tabelle G.10: A206 - gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse mit Luftdruckregression	191
Tabelle G.11: A206 - gefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie für die Partialtide S_1	192
Tabelle G.12: A206 - ungefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 3a, Ergebnisse ohne Luftdruckregression.....	196
Tabelle G.13: A206 - ungefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 3b, Ergebnisse mit Luftdruckregression	196
Tabelle G.14: A206 - ungefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 4a, Ergebnisse ohne Luftdruckregression.....	197
Tabelle G.15: A206 - ungefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 4b, Ergebnisse mit Luftdruckregression	197
Tabelle G.16: A206 - ungefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie für die Partialtide S_1	198
Tabelle G.17: A206 - ungefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 2 ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie für die Partialtide S_1	198
Tabelle G.18: A206 - ungefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 und 2 ohne Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 , P_1 , K_1 , M_2 , S_2 sowie für die Partialtide S_1	199
Tabelle G.19: A206 - ungefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 und 2 mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie für die Partialtide S_1	199
Tabelle G.20: A206 - ungefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse ohne Luftdruckregression.....	202
Tabelle G.21: A206 - ungefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse mit Luftdruckregression	202
Tabelle G.22: A206 - ungefilterte Daten, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie für die Partialtide S_1	203
Tabelle G.23: A206 - gefilterte Daten, erster Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse ohne Luftdruckregression	207
Tabelle G.24: A206 - gefilterte Daten, erster Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse mit Luftdruckregression	207
Tabelle G.25: A206 - gefilterte Daten – erster Untersuchungsabschnitt - Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie für die Partialtide S_1	208

Tabelle G.26: A206 - gefilterte Daten – Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen des ersten und des zweiten Untersuchungsabschnitts ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie für die Partialtide S_1	210
Tabelle G.27: A206 - gefilterte Daten des ersten und zweiten Untersuchungsabschnitts, Ergebnisse der Gesamtanalyse ohne Luftdruckregression.....	211
Tabelle G.28: A206 - gefilterte Daten des ersten und zweiten Untersuchungsabschnitts, Ergebnisse der Gesamtanalyse mit Luftdruckregression	212
Tabelle G.29: A206 - gefilterte Daten des ersten und zweiten Untersuchungsabschnitts - Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie für die Partialtide S_1	213
Tabelle G.30: A206 - ungefilterte Daten, erster Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse ohne Luftdruckregression.....	215
Tabelle G.31: A206 - ungefilterte Daten, erster Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse mit Luftdruckregression	215
Tabelle G.32: A206 - ungefilterte Daten – erster Untersuchungsabschnitt - Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie für die Partialtide S_1	216
Tabelle G.33: A206 - ungefilterte Daten – Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen des ersten und des zweiten Untersuchungsabschnitts ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie für die Partialtide S_1	218
Tabelle G.34: A206 - ungefilterte Daten, erster und zweiter Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse ohne Luftdruckregression.....	219
Tabelle G.35: A206 - ungefilterte Daten, erster und zweiter Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse mit Luftdruckregression	220
Tabelle G.36: A206 - ungefilterte Daten des ersten und zweiten Untersuchungsabschnitts - Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie für die Partialtide S_1	221
Tabelle G.37: Berechnete Gezeitenparameter für die Partialtide O_1	223
Tabelle G.38: Berechnete Gezeitenparameter für die Partialtide P_1	223
Tabelle G.39: Berechnete Gezeitenparameter für die Partialtide S_1	223
Tabelle G.40: Berechnete Gezeitenparameter für die Partialtide K_1	224
Tabelle G.41: Berechnete Gezeitenparameter für die Partialtide M_2	224
Tabelle G.42: Berechnete Gezeitenparameter für die Partialtide S_2	224
Tabelle G.43: A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1a, Ergebnisse ohne Luftdruckregression	235
Tabelle G.44: A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 1b, Ergebnisse mit Luftdruckregression	235
Tabelle G.45: A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2a, Ergebnisse ohne Luftdruckregression	236
Tabelle G.46: A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Teilanalyse 2b, Ergebnisse mit Luftdruckregression	236
Tabelle G.47: A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie die Partialtide S_1	237
Tabelle G.48: A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 2 ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie die Partialtide S_1	237
Tabelle G.49: A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 und 2 ohne Luftdruckregression.....	238

Tabelle G.50: A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilanalysen 1 und 2 mit Luftdruckregression	238
Tabelle G.51: A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse ohne Luftdruckregression	241
Tabelle G.52:A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Ergebnisse der Gesamtanalyse mit Luftdruckregression	242
Tabelle G.53: A233, zweiter Untersuchungsabschnitt, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 sowie die Partialtide S_1	243
Tabelle G.54: Gravimeter A206 - gefilterte Daten des gesamten Beobachtungszeitraumes (erster und zweiter Untersuchungsabschnitt, 1275 Tage) - Gravimeter A233 - gefilterte Daten des gesamten Beobachtungszeitraumes (zweiter Untersuchungsabschnitt, 560 Tage) - Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 M_2 S_2 sowie die Partialtide S_1	248
Tabelle G.55: Gravimeter A233 – berechnete und korrigierte Phasenverschiebungen für die Hauptpartialtiden $O_1K_1M_2$	253
Tabelle G.56: Gravimeter A206, gefilterte Daten – berechnete und korrigierte Phasenverschiebungen für die Hauptpartialtiden $O_1K_1M_2$	254
Tabelle G.57: Gravimeter A206, ungefilterte Daten – berechnete Phasenverschiebungen für die Hauptpartialtiden $O_1K_1M_2$	254
Tabelle G.58: Gravimeter LCR-G-xx1F, ungefilterte Daten – berechnete und korrigierte Phasenverschiebungen für die Hauptpartialtiden $O_1K_1M_2$	255
Tabelle G.59: Phasenverschiebungen der Hauptpartialtiden $O_1K_1M_2$ nach der instrumentellen Phasenkorrektur; in Klammern Standardabweichungen der berechneten Phasenverschiebungen nach der Gezeitenanalyse; ungefilterte Daten des Gravimeters A206: Arbeitshypothese $\Delta\alpha=0$	256
Tabelle G.60: Gravimeter A233 – gesamter Beobachtungszeitraum - Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression mit Phasenkorrektur, numerisches Filter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten.....	258
Tabelle G.61: Gravimeter A233 – gesamter Beobachtungszeitraum - Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression und mit Phasenkorrektur, numerisches Filter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten	259
Tabelle G.62: Gravimeter A206, gefilterte Registrierdaten – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression mit Phasenkorrektur, numerisches Filter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten.....	260
Tabelle G.63: Gravimeter A206, gefilterte Registrierdaten – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression und mit Phasenkorrektur, numerisches Filter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten.....	261
Tabelle G.64: Gravimeter A206, ungefilterte Registrierdaten – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression mit Phasenkorrektur, numerisches Filter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten.....	262
Tabelle G.65: Gravimeter A206, ungefilterte Registrierdaten – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression und mit Phasenkorrektur, numerisches Filter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten.....	263
Tabelle G.66: Gravimeter LCR-G-xx1F – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse ohne Luftdruckregression mit Phasenkorrektur, numerisches Filter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten.....	264
Tabelle G.67: Gravimeter LCR-G-xx1F – gesamter Beobachtungszeitraum, Gezeitenanalyse mit Luftdruckregression und mit Phasenkorrektur, numerisches Filter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten	265
Tabelle G.68: Gravimeter A206, gefilterte Daten, Gravimeter A233, <i>Gravimeter A206, ungefilterte Daten</i> , Gravimeter LCR-G-xx1F, Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression für die Hauptpartialtiden O_1 P_1 M_2 S_2 sowie die Partialtide S_1 , Tiefpassfilter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten.....	267
Tabelle G.69: Partialtide O_1 - Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression, Tiefpassfilter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten und Tiefpassfilter Pertzev57 mit 37 Koeffizienten.....	268

Tabelle G.70: Partialtide P_1 - Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression, Tiefpassfilter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten und Tiefpassfilter Pertzev57 mit 37 Koeffizienten.....	268
Tabelle G.71: Partialtide S_1 - Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression, Tiefpassfilter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten und Tiefpassfilter Pertzev57 mit 37 Koeffizienten.....	269
Tabelle G.72: Partialtide K_1 - Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression, Tiefpassfilter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten und Tiefpassfilter Pertzev57 mit 37 Koeffizienten.....	269
Tabelle G.73: Partialtide M_2 - Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression, Tiefpassfilter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten und Tiefpassfilter Pertzev57 mit 37 Koeffizienten.....	270
Tabelle G.74: Partialtide S_2 - Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtanalysen ohne und mit Luftdruckregression, Tiefpassfilter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten und Tiefpassfilter Pertzev57 mit 37 Koeffizienten.....	270
Tabelle G.75: Gegenüberstellung der Standardabweichungen der Gewichtseinheit (ETERNA 3.30) ohne und mit Luftdruckregression, Tiefpassfilter Pertzev59 mit 51 Koeffizienten und Tiefpassfilter Pertzev57 mit 37 Koeffizienten.....	271
Tabelle G.76: Numerische Filterung Pertzev59 und Pertzv57, Gegenüberstellung der Verhältnisse zugeordneter Standardabweichungen der Gewichtseinheit.....	271
Tabelle G.77: Nordseepegel Oostende, Hauptpartialtiden, Vergleich der theoretischen gravimetrischen Gezeitenamplituden mit den beobachteten Amplituden der Pegelbeobachtungen. Die Amplituden der beiden Horizontalkomponenten wurden von Winkeleinheiten in Schwereeinheiten umgerechnet...275	275
Tabelle G.78: GeoObservatorium Odendorf - Gegenüberstellung von beobachteten, luftdruckreduzierten Gezeitenparametern (Tabelle G.61) und Modellwerten.....	276
Tabelle G.79: GeoObservatorium Odendorf - Gegenüberstellung von beobachteten, luftdruckreduzierten Gezeitenparametern (Tabelle G.61) und gemittelten Modellwerten für die Hauptpartialtiden.....	277
Tabelle G.80: GeoObservatorium Odendorf - Gegenüberstellung von beobachteten, luftdruckreduzierten Gezeitenparametern (Tabelle G.61) und den zugeordneten Werten der Meeresgezeitenmodelle Schwiderski80, CSR3.0 und FES95.2.....	278
Tabelle G.81: GeoObservatorium Odendorf - Vergleich der luftdruck- und meeresgezeitenreduzierten Amplitudenquotienten mit den entsprechenden Werten des Erdmodells Dehant – Defraigne – Wahr, Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 - Meeresgezeitenmodelle CSR4, FES02, GOT00, NAO99 und TPX06.....	279
Tabelle G.82: GeoObservatorium Odendorf - Vergleich der luftdruck- und meeresgezeitenreduzierten Amplitudenquotienten mit den entsprechenden Werten des Erdmodells Dehant-Defraigne-Wahr, Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 - Meeresgezeitenmodelle Schwiderski80, CSR3.0 und FES95.2.....	279
Tabelle G.83: Lage der Stationen Odendorf, Membach und Walferdange.....	280
Tabelle G.84: Stationen Odendorf, Walferdange und Membach - Gegenüberstellung der reduzierten Gezeitenparameter der Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2	281
Tabelle G.85: Station Walferdange – Supraleitendes Gravimeter GWR C040 - 18.12.2003 bis 01.11.2004 – 319Tage, Vergleich der luftdruck- und meeresgezeitenreduzierten Amplitudenquotienten mit den entsprechenden Werten des Erdmodells Dehant-Defraigne-Wahr (DDW), Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 , Meeresgezeitenmodelle Schwiderski80, CSR3.0 und FES95.2 (vergl. Tabelle G.82).....	283
Tabelle G.86: Station Membach – Supraleitendes Gravimeter GWR C021 - 04.08.1995 bis 31.05.1997 – 626 Tage (Serie 1), Vergleich der luftdruck- und meeresgezeitenreduzierten Amplitudenquotienten mit den entsprechenden Werten des Erdmodells Dehant – Defraigne – Wahr, Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 , Meeresgezeitenmodelle Schwiderski80, CSR3.0 und FES95.2 (vergl. Tabelle G.82).....	284
Tabelle G.87: Station Membach – Supraleitendes Gravimeter GWR C021 - 01.07.1998 bis 03.06.2004 – 2159 Tage (Serie 2), Vergleich der luftdruck- und meeresgezeitenreduzierten Amplitudenquotienten mit den entsprechenden Werten des Erdmodells Dehant – Defraigne – Wahr, Hauptpartialtiden O_1 P_1 K_1 M_2 S_2 Meeresgezeitenmodelle Schwiderski80, CSR3.0 und FES95.2 (vergl. Tabelle G.82).....	284

Tabelle I.1: Technische Daten des A/D-Wandlers Kolter PCI-AD16N – TS	300
Tabelle I.2: Ergebnisse der Gezeitenanalyse der Testdaten – Pertzev57	306
Tabelle I.3: Ergebnisse der Gezeitenanalyse der Testdaten – Pertzev59	307
Tabelle J.1: Ergebnisse der Gezeitenanalyse des Datensatzes A233_8k2 mit Ansatz einer Luftdruckregression (zugeordnete Werte des Datensatzes <i>A233_8k1 kursiv</i>).....	311
Tabelle J.2: Ergebnisse der Gezeitenanalyse des Datensatzes A233_16k1 bei Ansatz einer Luftdruckregression (zugeordnete Werte des Datensatzes <i>A233_8k1 kursiv</i>) mit Parameterdifferenzen für die Hauptpartialtiden	314
Tabelle J.3: Referenzparameter 2003/2006.....	316

M Dank

Mein herzlichster Dank gilt meinem akademischen Lehrer und Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Bonatz, der es mir ermöglichte, auch während der Ausübung meines Berufes zu promovieren. Insbesondere für die intensive Betreuung und Unterstützung sowie seine jederzeitige Bereitschaft zur Hilfe sei ihm von ganzem Herzen gedankt. Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Witte danke ich für seine vielen wertvollen Hinweise und für die Übernahme des Korreferats.

Prof. Dr. B. Ducarme vom International Centre for Earth Tides (ICET) danke ich für die Berechnung der gravimetrischen Effekte der Meeresgezeiten. Ebenfalls zu Dank verpflichtet bin ich Prof. Dr. O. Francis vom European Centre for Geodynamics and Seismology (ECGS) für seine Bereitschaft, gravimetrische Beobachtungs- und Auswertungsergebnisse des Observatoriums Walferdange für den Vergleich mit zugeordneten Ergebnissen des GeoObservatorium Odendorf zur Verfügung zu stellen sowie Dr. M. Van Camp vom Observatoire Royal de Belgique, der gleichermaßen gravimetrische Beobachtungs- und Auswertungsergebnisse des Observatoriums Membach zur Verfügung gestellt hat.

Bedanken möchte ich mich weiterhin bei allen Menschen, die mich begleitet und unterstützt haben. Neben meinen Eltern gilt dies besonders auch für meine Freundin Gabi.