

Oligozäne Beckendynamik und Sequenzstratigraphie am Südrand des Nordwesteuropäischen Tertiärbeckens

Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)

der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt von

Elke Nickel

aus

Ludwigsburg

Bonn 2003

Angefertigt mit Genehmigung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

1. Referent: Prof. Dr. Andreas Schäfer

2. Referent: Prof. Dr. Jean Thein

Tag der Promotion:

UNSER KOPF IST RUND, DAMIT DAS DENKEN DIE RICHTUNG
WECHSELN KANN.

FRANCIS PICABIA

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Kurzfassung	3
Abstract	4
1. Einleitung.....	5
1.1 Ziel der Arbeit.....	5
1.2 Arbeitsgebiet.....	6
1.3 Geologischer Überblick	7
1.3.1 Paläogeografie	7
1.3.2 Tektonik.....	7
1.3.3 Schichtenfolge	10
2. Arbeitsmethodik.....	13
2.1 Datenbasis	13
2.2 Aufbereitung und Darstellung der Daten	14
2.2.1 Bohrungen	14
2.2.2 Karten	15
2.3 Auswahl der Bohrungen und Profile	16
2.3.1 Bohrungen	16
2.3.2 Profile	18
2.4 Auswertung der Bohrlochmessungen	18
2.4.1 Radiometrische Verfahren.....	18
2.4.2 Elektrische und elektromagnetische Verfahren.....	21
2.4.3 Akustische Verfahren	23
2.5 Abgrenzung charakteristischer Sedimentationseinheiten	23
3. Entwicklung des Ablagerungsraums im Oligozän.....	25
3.1 Rupel.....	25
3.1.1 Einheit RU-1.....	27
3.1.2 Einheit RU-2.....	32
3.1.3 Einheit RU-3.....	44
3.1.4 Einheit RU-4.....	51
3.1.5 Einheit RU-5.....	55
3.1.6 Einheit RU-6.....	59
3.1.7 Einheit RU-7.....	62

3.2	Chatt.....	66
3.2.1	Einheit CH-1.....	69
3.2.2	Einheit CH-2.....	73
3.2.3	Einheit CH-3.....	76
3.2.4	Einheit CH-4.....	80
3.2.5	Einheit CH-5.....	82
3.2.6	Einheit CH-6.....	85
3.2.7	Einheit CH-7.....	88
4.	Schlussfolgerungen	91
4.1	Faziesentwicklung	91
4.2	Sequenzstratigraphie.....	94
4.3	Tektonik und Beckendynamik.....	100
4.3.1	Reaktivierte variszische Strukturen.....	100
4.3.2	Känozoische Strukturelemente.....	100
4.3.3	Beckenentwicklung	103
5.	Literatur.....	104
	Dank.....	113
	Anhang 1: Verwendete Bohrungen.....	114
	Anhang 2: Profilschnitte	117

Kurzfassung

Durch die Analyse von Bohrdaten aus 230 Explorations- und Forschungsbohrungen wird für die oligozäne Sedimentfüllung am Südrand des Nordwesteuropäischen Tertiärbeckens zwischen Belgien im Westen und Sachsen-Anhalt im Osten ein konsistentes sequenzstratigraphisches Modell aufgestellt. Insgesamt werden sechs oligozäne Sequenzen (R 1 – R 3 und C 1 - C 3) im Arbeitsgebiet nachgewiesen, die sehr gut mit den Sequenzen von HARDENBOL et al. (1998) korrespondieren. Damit gehört die Niederrheinische Bucht zu den europäischen Regionen mit der vollständigsten oligozänen Sedimentfüllung, in der trotz starker Subsidenz beckenweite Meeresspiegelschwankungen nachzuweisen sind. Grundlage für den Nachweis der Oligozänsequenzen war die Festlegung von Überflutungs- und Erosionsflächen.

Zu Beginn des Rupel transgredierte die Nordsee auf das südlich gelegene Vorland und füllte das vorhandene Relief weitgehend auf. In der südwestlichen Niederrheinischen Bucht entwickelte sich in RU-2 ein SW-NE streichendes küstenparalleles Barrieresand-System unter tidalen Bedingungen an einer von Seegang beherrschten Küste. Es wurde durch einen starken Meeresspiegelanstieg zu Beginn von RU-3, der im gesamten Arbeitsgebiet zur Entwicklung einer ‚condensed section‘ führte, konserviert. Mit RU-4 wurde eine regressive Phase eingeleitet, in der es zur Verflachung des Ablagerungsraums und zum vermehrten Eintrag von klastischem Material durch die Heraushebung des Rheinischen Massivs im Hinterland kam.

Zu Beginn des Chatt setzte eine beckenweite Transgression ein, die mit einer Glaukonitanreicherung in den Ablagerungen auf geringe Sedimentlieferraten aus dem Hinterland schließen lässt. Sie erreichte ihr Maximum während CH-2 mit Wassertiefen bis 60 Meter. Bis zum Ende des Chatt kam es mehrfach zu Regressions- und Transgressionsbewegungen der oligozänen Nordsee. Für die Chatt-Sedimente wurde erstmals die Parallelisierung des marinen Veldhoven Clay, der marinen Grafenberg-Sande und der kontinental beeinflussten Köln-Schichten durchgeführt.

Das belgisch-niederländisch-deutsche Grenzgebiet unterlag im Rupel und Chatt dem Zusammenspiel von alpiner Kompressionstektonik und zunehmend extensionstektonischen Einflüssen des känozoischen Zentraleuropäischen Rift-Systems. Zu Beginn des Rupel war die Absenkungsbewegung des Untergrundes am Nordrand des Faltenvariszikums zwischen Belgien und Sachsen-Anhalt sehr konsistent. Senkrecht zur Hauptspannungsrichtung NNW-SSE, die durch die Alpen-Orogenese auf die mitteleuropäische Erdkruste wirkte, wurden variszische Strukturen reaktiviert und prägten maßgeblich die Sedimentation. Bereits ab RU-4 und nicht erst mit Beginn des Oberoligozän (ZAGWIJN 1989) ist die Anlage des heutigen tektonischen Bauplans in der Referenzregion nachweisbar. Ab dem Chatt ist eine unterschiedliche Entwicklung der Niederrheinischen Bucht zu erkennen, da sich die Bruchschollen zunehmend differenzierten.

Abstract

A new consistent sequence stratigraphic model is set up for the Oligocene sedimentary pile at the southern rim of the Northwest European Tertiary Basin. Using well-log analysis of 230 exploration and research wells six Oligocene sequences (R 1 - R 3 and C 1 - C 3) are established for the working area that correspond well with the sequences of HARDENBOL et al. (1998). Hence, the Lower Rhine Embayment is showing one of the most complete sedimentary fillings of European Oligocene basins. Despite strong subsidence basinwide sea-level changes can be traced. The Oligocene sequences are based on the establishment of flooding and erosion surfaces, respectively.

At the beginning of the Rupelian period the North Sea transgressed onto the southern foreland filling up the existing topography. During RU-2 a SW-NE trending system of barrier sands developed parallel to the palaeocoast at the southwestern Lower Rhine Embayment forced by tidal conditions. These sands are preserved due to a strong sea-level rise at the beginning of RU-3 that led up to the development of a condensed section. Starting with RU-4 the basin became shallower caused by the initiation of a regressive phase. It was filled with clastic material due to the uplift of the Rhenish Massif in the hinterland.

The beginning of the Chattian was again initiated by a basinwide transgression. Sediments rich of glauconite indicate low sediment supply rates from the hinterland. The transgression reached its maximum during CH-2 leading to water depths of up to 60 metres. For the rest of the Chattian the Oligocene North Sea was repeatedly regressing and transgressing. In this Ph.D. thesis the marine Veldhoven Clay and Grafenberg Sands are correlated with the continentally influenced Cologne Series ("Köln-Schichten") for the first time ever.

During Rupelian and Chattian times the Lower Rhine Embayment and its adjacent areas were forced by the alpine compressional tectonic regime as well as by an increasing extensional tectonic influence due to the Cenozoic Central European rift system. At the beginning of the Rupelian the subsidence at the northern margin of the variscan fold belt was very consistent from Belgium to Saxony-Anhalt. Variscan structures perpendicular to the main stress orientation NNW-SSE have been reactivated due to the influence of the Alpine orogeny upon the central european earth crust. These structures were affecting the sedimentation patterns to a high degree. Today's architecture of the Lower Rhine Embayment was already initiated from RU-4 onwards. This is in contradiction to ZAGWIJN (1989) who assumed the initiation in the Upper Oligocene. During the Chattian the Lower Rhine Embayment was differentiated into several blocks that were predominantly facing separate sedimentation histories.

1. Einleitung

1.1 Ziel der Arbeit

Die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen entstanden in enger Anlehnung an die Forschungen, die im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 350 „Wechselwirkungen kontinentaler Stoffsysteme und ihre Modellierung“ im Teilprojekt C3 „Entwicklung des Sedimentationsraums Niederrheinische Bucht im Tertiär“ an der Universität Bonn durchgeführt wurden. Die Ergebnisse dieses Teilprojekts zeigten, dass die Sedimentationsentwicklung in der Niederrheinischen Bucht ohne eine Anbindung an das angrenzende Nordwesteuropäische Tertiärbecken nur unzureichend zu verstehen ist. Daher sollten die im Rahmen des SFB 350 in der südlichen Niederrheinischen Bucht durchgeführten Untersuchungen sowohl regional als auch stratigraphisch in das Liegende der im SFB bearbeiteten Sedimentserien des Miozän und Pliozän ausgeweitet werden.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist somit eine sedimentologische und sequenzstratigraphische Analyse der Oligozän-Sedimente des Rupel und Chatt im südlichen Teil des Nordwesteuropäischen Tertiärbeckens. Eine konsistente Analyse des gesamten Sedimentationsraums von Belgien über die Niederrheinische Bucht und die Niederlande bis nach Norddeutschland liegt bislang nicht vor. Die Verzahnung von marinen und kontinentalen Ablagerungen am südlichen Rand des Tertiärbeckens bietet eine gute Gelegenheit, die Oszillationen des Meeresspiegels für jenen Zeitraum zu untersuchen. Für das Norddeutsche Becken und die Niederrheinische Bucht fehlen entsprechende Untersuchungen im Oligozän.

Die übrigen tertiären Schichtglieder – Miozän und Pliozän im Hangenden sowie Eozän und Paläozän im Liegenden – waren bereits in der Vergangenheit mehrfach Gegenstand sequenzstratigraphischer Untersuchungen. Für das Miozän und Pliozän wird auf die Arbeiten von STANDKE et al. 1992, STANDKE et al. 1993, ABRAHAM 1994, MICHELSEN 1994, PETZELBERGER 1994, MICHELSEN et al. 1995, SORENSEN & MICHELSEN 1995, JÜRGENS 1996, KLETT & SCHÄFER 1997, SORENSEN et al. 1997, MICHELSEN et al. 1998, KLETT 2000, KLETT et al. 2002 verwiesen. Für das Eozän und Paläozän liegen unter anderem Arbeiten von KÖTHE 1990, JACOBS et al. 1991, JACOBS & SEVENS 1993, DILL et al. 1996, VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE 1997 und VANDENBERGHE et al. 1998 vor.

1.2 Arbeitsgebiet

Um die Oszillationen des Meeresspiegels im Oligozän möglichst weiträumig zu erfassen, erstreckt sich das Arbeitsgebiet im südlichen Randbereich des Nordwesteuropäischen Tertiärbeckens von Belgien im Westen bis nach Sachsen-Anhalt im Osten. Im Süden schließt es die Niederlande und die Niederrheinische Bucht ein und reicht im Norden bis in den deutschen Nordseesektor (Abb. 1.1).

Durch eine Reihe von Prospektionsbohrungen für die Erdöl-/Erdgasindustrie, die Steinkohlen- und Braunkohlenwirtschaft sowie von Wasser- und Forschungsbohrungen ist das Arbeitsgebiet in einigen Teilen sehr gut erschlossen. Insbesondere die Dichte der tief reichenden Bohrungen in der Niederrheinischen Bucht und den direkt anschließenden Gebieten in Belgien und den Niederlanden hat zur Auswahl als Referenzregion geführt. Die Dichte der Bohrungen sowie die stratigraphische Reichweite der erbohrten Oligozänsedimente erlaubt hoch auflösende Studien der faziellen und sedimentologischen Entwicklung sowohl im Rupel als auch im Chatt, die an anderen Stellen Norddeutschlands nicht möglich sind.

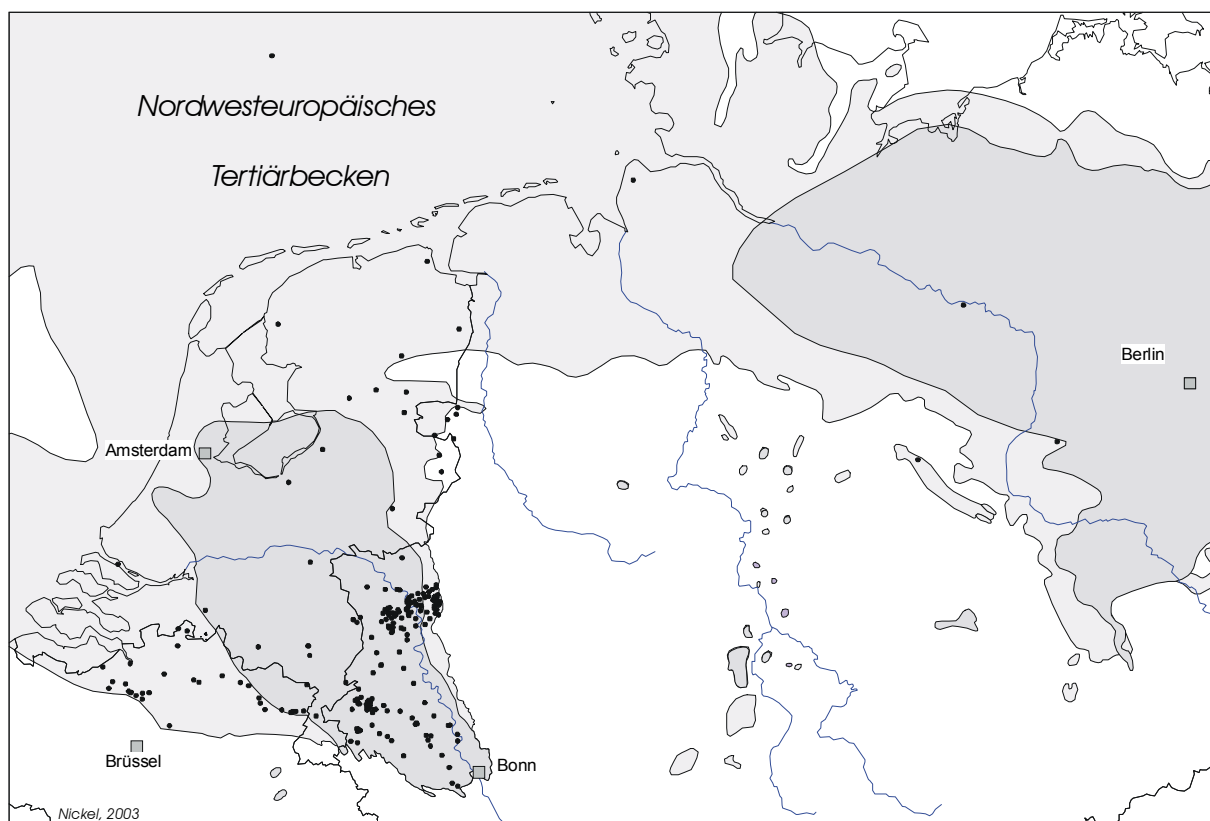


Abb. 1.1: Karte des Arbeitsgebiets mit den heutigen Verbreitungen der Rupel- (hellgrau) und Chatt-Ablagerungen (dunkelgrau) nach VINKEN et al. 1988 sowie die Position der in dieser Arbeit verwendeten Bohrungen (schwarze Punkte)

1.3 Geologischer Überblick

1.3.1 Paläogeografie

Während des gesamten Tertiär lag das Arbeitsgebiet am südlichen Rand des Nordwesteuropäischen Tertiärbeckens, wo sich in mehreren großen Buchten wiederholt Phasen mariner Ablagerung mit terrestrischen und limnischen Sedimentationsperioden abwechselten (Abb. 1.2). Im Oligozän bestand vom Norddeutschen Becken über die Hessische Senke nach Süden eine Verbindung zum Mainzer Becken (u.a. SONNE 1982, ROTHAUSEN 1989, GRIMM et al. 2002, SISSINGH 2001, 2003), zum Oberrheingraben (u.a. DOEBL 1970, PFLUG 1982) und zum Molassebecken des Voralpenraums (BACHMANN et al. 1987, UNGER 1989, PLATT & KELLER 1992). Im Mainzer Becken und im Oberrheingraben entstanden karbonatische Ablagerungen (ROTHAUSEN 1989), die im Norden fehlen (BENDA 1989, KÖTHE 1990).

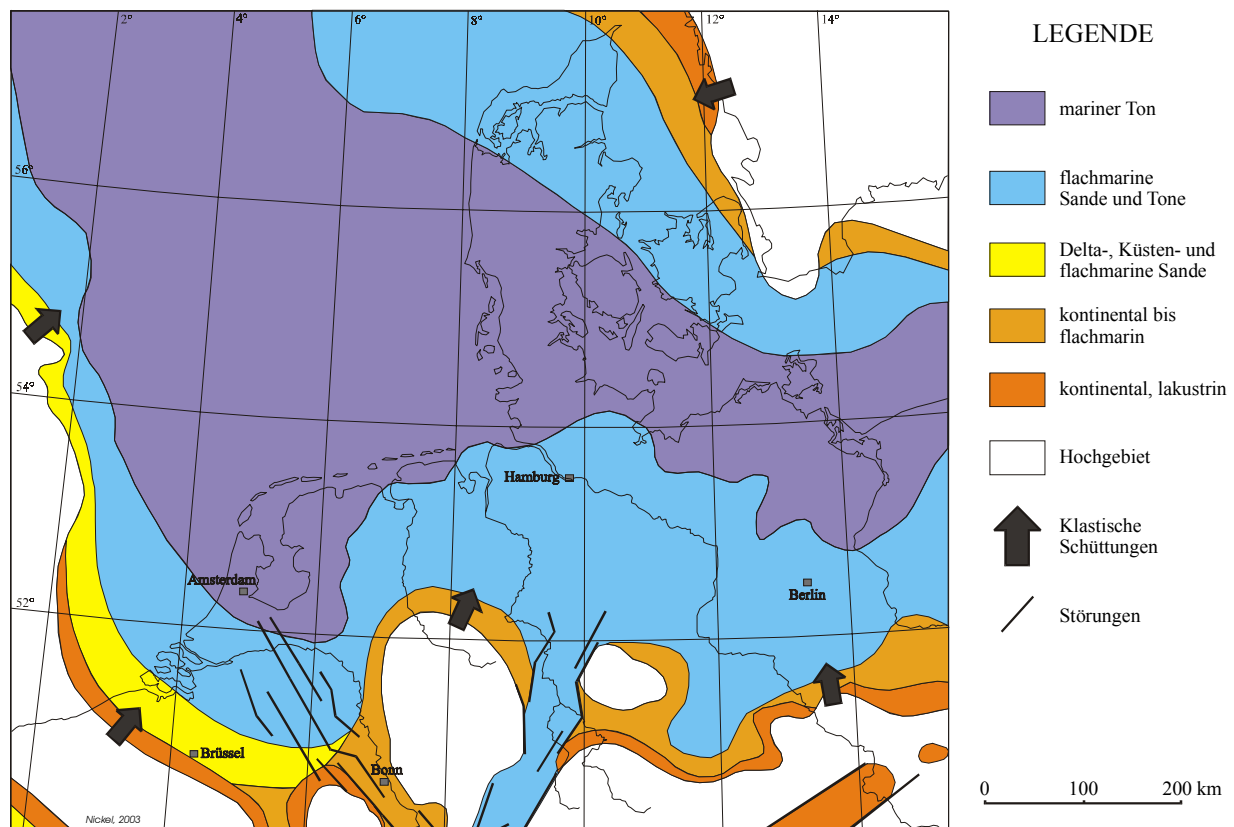


Abb. 1.2: Paläogeografie des Oligozän (nach P.A. ZIEGLER 1990 und VINKEN et al. 1988)

1.3.2 Tektonik

Der Westen des Untersuchungsgebiets liegt im Einflussbereich des känozoischen Zentraleuropäischen Rift-Systems, das vom Viking-Graben zwischen Schottland und Norwegen über

den Zentralgraben der Nordsee und den Niederländischen Zentralgraben bis hinein in die Niederrheinische Bucht reicht (VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE 1997, MICHELSEN et al. 1998, SCHÄFER & SIEHL eds. 2002). Dadurch ist das belgisch-niederländisch-deutsche Grenzgebiet vor allem ab dem Chatt durch nordwest-südost streichende synsedimentäre Störungen geprägt worden, die zur Entstehung mehrerer tektonischer Blöcke und Schollen geführt haben (Abb. 1.3). In der Niederrheinischen Bucht in Deutschland sind dies im Osten die Krefeld-Scholle, die im Südwesten durch den Viersener Sprung gegen die Venlo-Scholle abgegrenzt wird, und die Köln-Scholle. Die Abgrenzung von Krefeld- und Köln-Scholle ist nicht durch eine Störung möglich, auch zwischen Köln- und Venlo-Scholle gibt es keine auskartierbare Störung. Die Sedimente der Schollen gehen dort ineinander über (KLOSTERMANN et al. 1990).

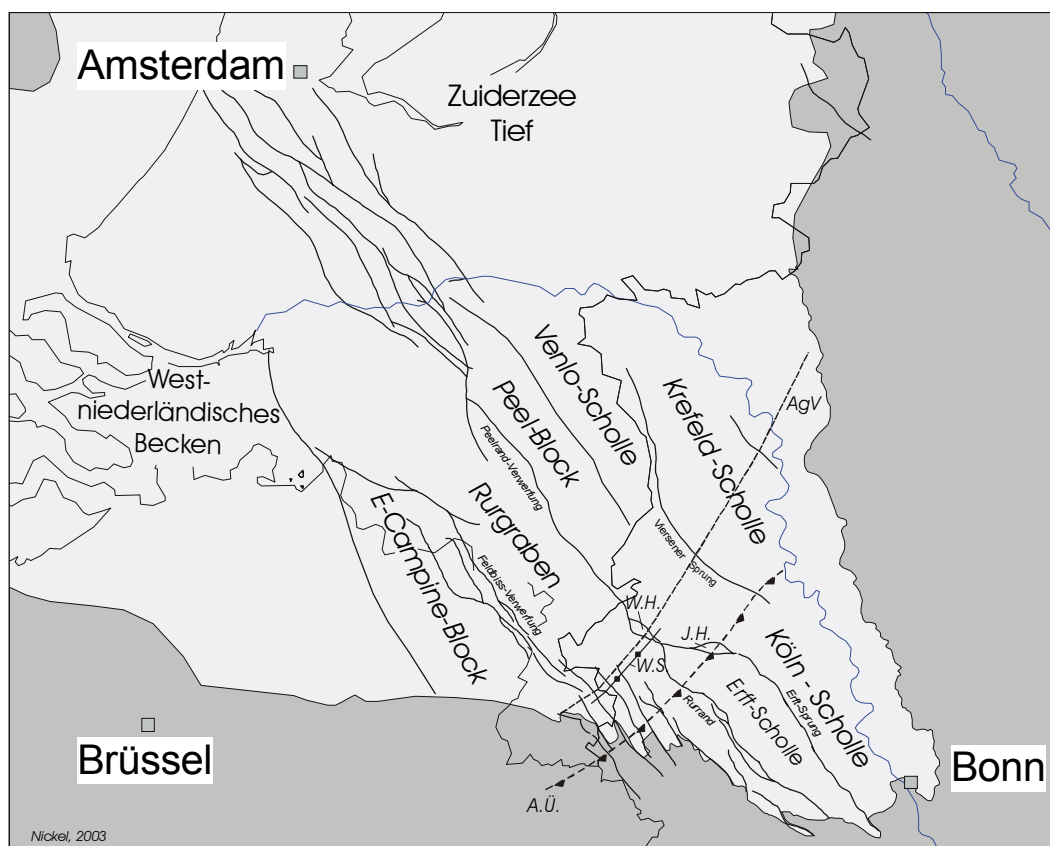


Abb. 1.3: Tektonische Einheiten und Hauptstörungen im belgisch-niederländisch-deutschen Grenzgebiet, W.S. Waubach-Sattel, AgV Außenrand gefaltetes Variszikum, W.H. Wassenberger Horst, J.H. Jackerather Horst, A.Ü. Aachener Überschiebung) (nach HAGER & PRÜFERT 1988, KLOSTERMANN et al. 1990, GELUK et al. 1994, VAN DEN BERG 1996, DROZDZEWSKI et al. 1998); hellgrau: heutige Verbreitung von Rupersedimenten (nach VINKEN et al. 1988)

Deutlicher begrenzt ist hingegen die Erft-Scholle im Süden der Venlo- und westlich der Köln-Scholle. Zwischen Venlo- und Erft-Scholle gibt es als eigenständiges Element den Jackerather Horst, im Osten wird die Erft-Scholle durch den Erft-Sprung und im Westen durch den Rurrand begrenzt. Nördlich der Erft-Scholle, an der Trennlinie zwischen Venlo-Scholle und

Rurgraben, ist der Wassenberger Horst als kleine tektonische Einheit entwickelt. Der Rurrand geht im Nordwesten in den Niederlanden in die Peelrand-Verwerfung über und beide bilden den Ostrand des Rurgrabens (Rur-Scholle), der eine der bedeutendsten Strukturen der Region ist. Auf der Westseite des Rurgrabens liegt die Feldbiss-Verwerfung, an der es bis in jüngster Zeit zu Absenkungen und Erdbeben kommt (DROZDZEWSKI et al. 1998, SCHÄFER & SIEHL 2002). Die Feldbiss-Verwerfung trennt gemeinsam mit einer Reihe kleinerer Störungen, den sogenannten Westlichen Randstaffeln, den Rurgraben im Osten vom Östlichen Campine Block in Belgien und dem südlichen Limburg-Block in den Niederlanden (GELUK et al. 1994, VAN DEN BERG 1996). Obwohl der Einfluss der jungen känozoischen Störungen für die Sedimentationsmuster im belgisch-niederländisch-deutschen Grenzgebiet bestimmend ist, gibt es Hinweise darauf, dass alte variszische SW-NE streichende Strukturen im Untergrund auch während des Tertiär eine Rolle gespielt haben.

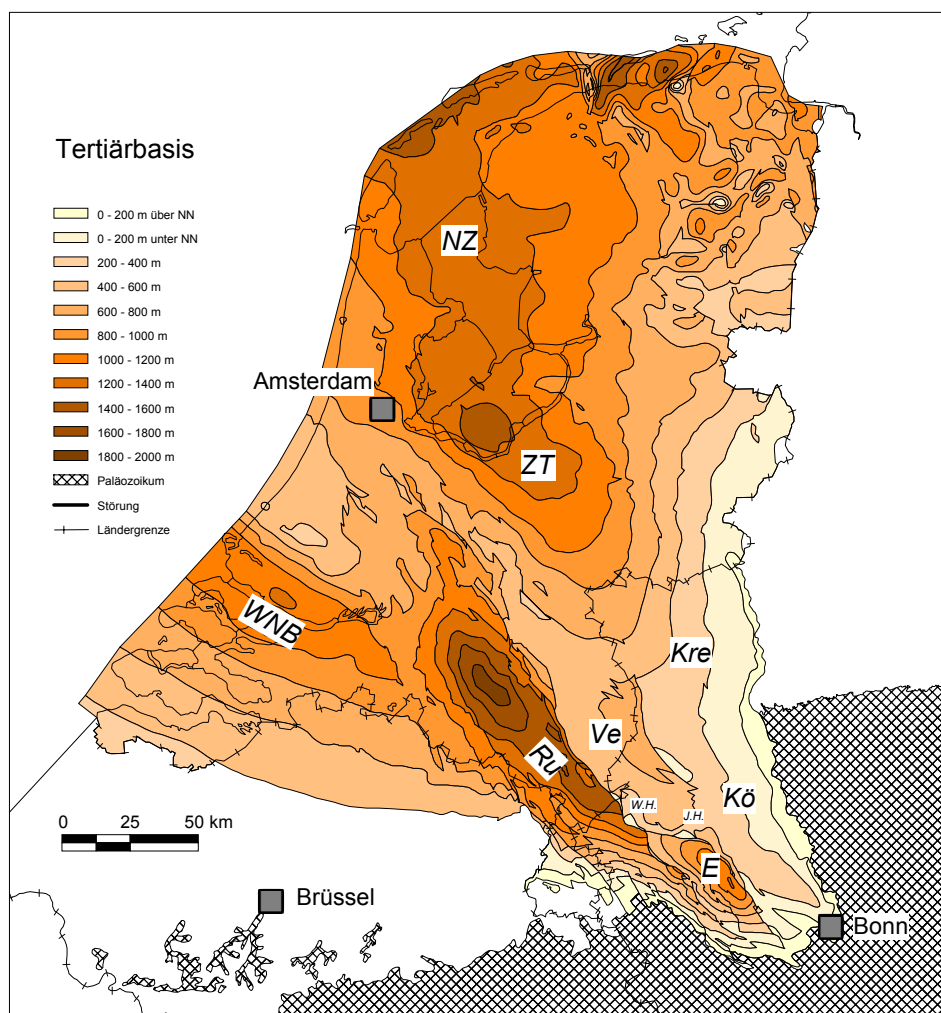


Abb. 1.4: Lage der Tertiärbasis im südlichen Niederländischen Zentralgraben, in Belgien und der Niederrheinischen Bucht (verändert nach unpubl. Vorlagen von SCHÄFER, PETZELBERGER und JENTZSCH (alle Bonn); basierend auf Atlas van Nederland 1985, HAGER & PRÜFERT 1988); Abkürzungen: NZ: Niederländischer Zentralgraben, WNB: Westniederländisches Becken, ZT: Zuiderzee Tief, Ru: Rurgraben, Ve: Venlo-Scholle, Kre: Krefeld-Scholle, E: Erft-Scholle, Kö: Köln-Scholle, W.H.: Wassenberger Horst, J.H.: Jackerather Horst

In diesem Senkungsgebiet ist eine relativ vollständige Abfolge von Oligozän-, Miozän- und Pliozänsedimenten vorhanden, allerdings führten die strukturellen Unterschiede im Untergrund zu erheblichen Schwankungen der Gesamt-Tertiärmächtigkeiten (Abb. 1.4). Die größten Sedimentmächtigkeiten von mehr als 1000 Metern wurden im Südwesten im Rurgraben und im Süden auf der Erft-Scholle akkumuliert, die geringsten im Osten der Niederrheinischen Bucht auf der Krefeld-Scholle und der südlich angrenzenden Köln-Scholle (Atlas van Nederland 1985, HAGER & PRÜFERT 1988, DROZDZEWSKI et al. 1998).

Die Sedimentation in weiten Teilen Nord- und Nordostdeutschlands wurde hingegen weniger durch Bruchtektonik als vielmehr lokal durch den Aufstieg von Zechsteinsalzen im Untergrund beeinflusst.

1.3.3 Schichtenfolge

1.3.3.1 Präoligozän

Die oligozänen Sedimente des Arbeitsgebiets lagern überwiegend auf paläozänen und eozänen Schichtgliedern (Tab 1.1). In den südlichen Randgebieten des Nordwesteuropäischen Tertiärbeckens kommen jedoch auch paläozoische Sedimente des Devon, Karbon und des Zechstein sowie mesozoische Einheiten aus der Trias, dem Jura und der Kreide vor, die von den oligozänen Schichten diskordant überlagert wurden (KOCKEL ed. 1996, BALDSCHUHN et al. 2001).

Innerhalb der Referenzregion sind Paläozänsedimente in Form von kleinen Erosionsinseln an wenigen Stellen in Bohrungen aufgeschlossen. Die Vorkommen der Schichten (Mergel von Gelinden, Sand von Heers, Landen Ton) beschränken sich weitgehend auf den nördlichen Teil der Niederrheinischen Bucht und liegen diskordant unter den Walsum-Schichten des Rupel. Eozänsedimente sind in der Niederrheinischen Bucht in der Regel nicht vorhanden. Eine Ausnahme bildet der Antweiler Graben mit limnischen Tonen am SW-Rand der Niederrheinischen Bucht (OEHMS 1980). In der Bohrung Burghof (006) nahe der niederländischen Grenze wurde von RESCHER (interner Bericht Geologischer Dienst NRW Krefeld) in einer Probe Eozän nachgewiesen. In den Niederlanden, in Belgien (JACOBS et al. 1991, JACOBS & SEVENS 1993) und Norddeutschland (DILL et al. 1996, KÖTHER 1990) wurde Eozän in sehr großen Mächtigkeiten in meist toniger Fazies abgelagert. Vermutlich sind jedoch die sandigen, z.T. fluviatilen Ratheim-Schichten, die auf den südlichen Schollen der Niederrheinischen Bucht anzutreffen sind, in das oberste Eozän (Priabon) zu stellen. Bislang waren sie nach deutscher Nomenklatur Teil des Unteroligozän (Latdorf), das allerdings in der internationalen Tertiärstratigraphie keine Gültigkeit mehr besitzt.

Stratigraphie		Stufe	Belgien	Niederlande	Niederrheinische Bucht	Nordwestdeutschland	Nordostdeutschland	Ostdeutschland
Pliozän	O	Piacentin						
	U	Zanclium						
Miozän	O	Messin						
		Torton	■					
	M	Serraval						
		Langhe						
	U	Burdigal	■				■	
		Aquitain						
Oligozän	O	Chatt	■	■		■	■	■
	U	Rupel						
Eozän	O	Priabon		■	■	?		
	M	Barton						
		Lutet	■	■				
	U	Ypres						
Paläozän	O	Thanet			■	■		
		(Seland)						
	U	Dan	■					

Tab 1.1: Schematische Verteilung der Tertiär-Reichweiten in den unterschiedlichen Regionen des Arbeitsgebiets (O: Ober, M: Mittel, U: Unter; grau: Abschnitte, aus denen Sedimente bekannt sind; bei lückenhafter Schichtenfolge oder vereinzelter regionaler Verbreitung Felder nur teilweise ausgefüllt)

1.3.3.2 Oligozän

Je nach struktureller Entwicklung des Untergrunds entstanden im Sedimentationsraum der oligozänen Nordsee und ihrer südlichen Randgebiete mächtige marine und küstennahe siliziklastische Ablagerungen. In der Niederrheinischen Bucht, in Sachsen-Anhalt und in der Niederlausitz entstanden erste Moore, die später diagenetisch in Braunkohle umgewandelt wurden (HAGER 1991, HAGER 1993). Oligozänsedimente sind in folgenden Gebieten erbohrt und in Sand- und Tongruben sowie Braunkohlentagebauen aufgeschlossen worden:

- Belgien (u.a. VANDENBERGHE & VAN ECHELPOEL 1987, STEURBAUT 1992, VANDENBERGHE & HARDENBOL 1998, VANDENBERGHE et al. 1998),
- Niederlande (VAN STAALDUINEN et al. 1979, LETSCH & SISSINGH 1983, ZAGWIJN & HAGER 1987, ZAGWIJN 1989, VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE 1997),
- Niederrheinische Bucht (u.a. WÖLK 1940, WÖLK 1941, MOSBRUGGER ed. 1987, HAGER & PRÜFERT 1988, MOSBRUGGER 1989, GROSS et al. 1990, HERMANN & VON DER HOCHT 1990, ASHRAF et al. 1992, UTESCHER et al. 1992, SCHÄFER 1994, SCHÄFER et al. 1996, HAGER et al. 1998, KLETT 2000, KLETT et al. 2002),

- Hessische Senke (HOTTENROTT 1987, HOTTENROTT 1988, RITZKOWSKI 1993),
- Norddeutsche Senke (u.a. ELLERMANN 1963, TOBIEN 1986, VINKEN et al. 1988, VON DANIELS et al. 1993, DILL et al. 1996, DILL et al. 1997),
- Helmstedter Raum (u.a. KÖTHE 1994),
- Sachsen-Anhalt (u.a. DOLL 1984, DOLL et al. 1992, KRUTZSCH et al. 1992, KRUTZSCH & BLUMENSTENGEL 1993, BLUMENSTENGEL et al. 1996),
- Niederlausitz (u.a. STANDKE et al. 1993).

Aufgrund der großen Erstreckung des Arbeitsgebiets haben sich in den verschiedenen Regionen eine Vielzahl unterschiedlicher Gliederungsschemata etabliert. Die gebräuchlichsten lithostratigraphischen Einheiten des Oligozän sind in Tab. 1.2 schematisch zusammengestellt.

Stratigraphie		Belgien		Niederlande		Deutschland																			
		NW Belgien (Rupel-Typgebiet)	NE-Belgien (Leuven)	Niederlande	S-Limburg	Niederrheinische Bucht (Ziffern: Kurzzeichen nach Schneider & Thiele 1965)		Norddeutschland																	
Oligozän	Chatt		Veldhoven	Middle North Sea Group	Veldhoven Clay	Veldhoven Clay	Grafenberg-Schichten	Köln-Schichten	3	Chattsand															
									2																
									1																
									09																
									08																
	Rupel	Boom Clay	Putte		Eigenbilzen Sand	Rupel Clay	Steensel Member	Lintfort-Schichten	Lintfort-Schichten	04A	Septarienton/Rupelton														
												Terhagen	Boom Clay	Waterval Member											
			Kerniel																						
			Belsele-Waas		Kleine Spouwen/Nucula		Vessem Member						Ratingen-Schichten		Ratingen-Schichten	03									
					Bergsand							Bergsand Member		Walsum-Schichten			Walsum-Schichten	02	Neungamme-Sand/Basissand						
Rupel	Boom Clay	Voort		Voort Member	Voort Member	Grafenberg-Schichten	Grafenberg-Schichten	04B	Asterigerinen Horizont																
										Belsele-Waas	Kleine Spouwen/Nucula	Vessem Member	Ratingen-Schichten	Ratingen-Schichten	03										
																Bergsand	Bergsand Member	Walsum-Schichten	Walsum-Schichten	02					
																					Kleine Spouwen/Nucula	Vessem Member	Ratingen-Schichten	Ratingen-Schichten	03

Tab 1.2: Zusammenstellung der gebräuchlichsten lithostratigraphischen Einheiten im Arbeitsgebiet (eigener Entwurf auf der Grundlage von SCHNEIDER & THIELE 1965, STEUERBAUT 1986, HAGER & PRÜFERT 1988, VERSTRAELEN 1996, VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE 1997, VANDENBERGHE et al. 1998, DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION 2002)

2. Arbeitsmethodik

2.1 Datenbasis

Die ausgezeichneten Aufschlussverhältnisse, die sich in den Braunkohlentagebauen der Niederrheinischen Bucht für vorhergehende Studien boten (ABRAHAM 1994, PETZELBERGER 1994, SCHÄFER et al. 1996), konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht genutzt werden, da die Schichtenfolge der Tagebaue regional, faziell und stratigraphisch sehr eingeschränkt ist. Für die beckenweite Korrelation der oligozänen Schichtenfolge wurden darum insgesamt 230 Bohrungen aus dem Gebiet der Niederrheinischen Bucht, der Niederlande, Belgiens, Norddeutschlands und der Nordsee ausgewählt. Sie waren überwiegend als Spülbohrungen zur Prospektion von Steinkohle, Braunkohle, Erdöl oder Erdgas bzw. zur hydrogeologischen Erkundung abgeteuft worden (Abb. 2.1, Tabelle in Anhang 1).

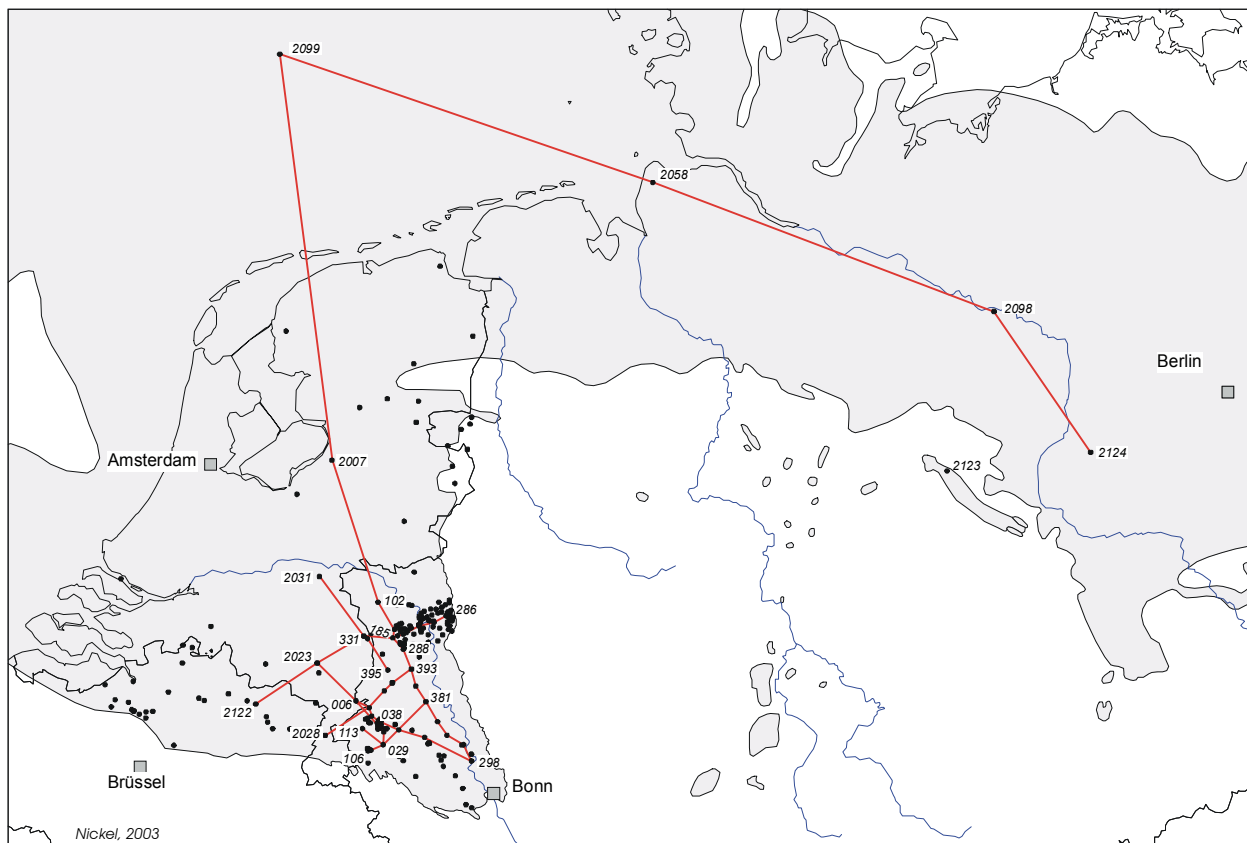


Abb. 2.1: Lage der bearbeiteten und interpretierten Profillinien (Linien) sowie der ergänzenden Bohrungen, Schächte und Aufschlüsse, die zur Interpretation, zur Beurteilung der Paläogeografie und zur Konstruktion von Mächtigkeits- und Verbreitungskarten herangezogen wurden (Punkte, entlang der Profillinien z.T. mit Bohrungsnummern, vollständige Bohrungsliste im Anhang), grau: heutige Verbreitung von Rupel-Sedimenten (nach VINKEN et al. 1988)

Die beste Grundlage für die Untersuchung boten Auswertungen geophysikalischer Bohrlochmessungen, die in sehr unterschiedlichen Maßstäben und erheblich differierender Qualität

vorlagen. Außerhalb des Braunkohlen-Explorationsgebiets in der südlichen Niederrheinischen Bucht unterscheiden sich die zur Verfügung stehenden Messungen erheblich voneinander, da die Messprogramme über einen langen Zeitraum von unterschiedlichen Firmen und Ämtern bei verschiedenen Bohrunternehmen in Auftrag gegeben wurden. Da viele Bohrungen vor mehreren Jahrzehnten niedergebracht worden waren, liegen häufig veraltete Messkombinationen vor. Die in den 60er und 70er Jahren in der Kohlenwasserstoff-Exploration in den Niederlanden und Norddeutschland weit verbreitete Kombinationsmessung von Eigenpotenzial und Widerstand ist in den Frischwasser führenden tertiären Lockersedimenten für fazielle Interpretationen nur bedingt brauchbar, so dass wo immer möglich auf Gamma Ray-Messungen zurückgegriffen wurde. Zusätzlich wurden Literaturdaten aus Forschungsbohrungen (u.a. BENDA ed. 1989), unveröffentlichten Berichten, paläogeografischen und tektonischen Kartenwerken sowie Mächtigkeitkarten für verschiedene Zeitabschnitte ausgewertet.

Biostratigraphische Untersuchungen an den vorhandenen Spülbohrungen gibt es nur punktuell. Zuordnungen zur internationalen Nannoplankton-Gliederung wurden äußerst selten vorgenommen (VAN ROIJEN et al. 1984), noch seltener finden sich Dinoflagellaten-Untersuchungen (BENEDEK 1972, KÖTHE 1986, 1990, 1994 und 1995). Sofern sie vorhanden sind, erlauben sie eine Unterteilung der überwiegend kalkfreien Sedimente.

2.2 Aufbereitung und Darstellung der Daten

2.2.1 Bohrungen

Um eine homogene Datengrundlage zu schaffen, wurden zunächst die Bohrlochmessungen gescannt, mit Hilfe des Programms LogSCAN (Briere Inc., Calgary, Canada) digitalisiert und mit Teufenschritten von 0,2 m als LAS-file ausgegeben. Die LAS-files wurden in einem zweiten Schritt bereinigt, kontrolliert und in LOG-files umgewandelt, die entweder in GRAPHER oder mit Hilfe eines AutoLISP-Programms von M. KLETT in AutoCAD eingelesen werden konnten. Die Schichtenverzeichnisse wurden einheitlich auf der Grundlage des Symbolschlüssel Geologie (NLfB Hannover) im DASCH-Format digitalisiert und anschließend als korngößenabhängiges Ausbissprofil (Litholog) ebenfalls in AutoCAD (Autodesk) eingelesen und dargestellt. Lithosäulen und Bohrlochmessungen konnten so in einheitlichen Maßstäben beliebig kombiniert werden (Abb. 2.2). Des weiteren konnten digitalisierte litho- und biostratigraphische sowie palökologische Daten neben den Lithosäulen dargestellt werden.

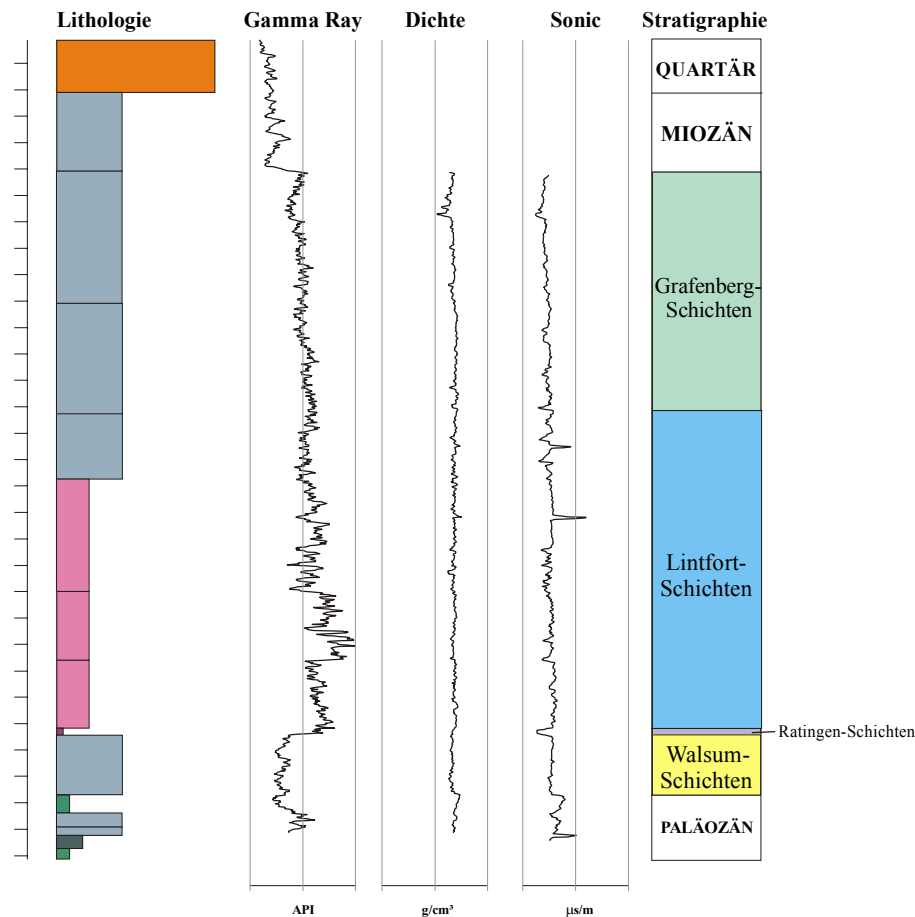


Abb. 2.2: Exemplarische Darstellung einer Bohrung aus der Niederrheinischen Bucht mit einer Kombination von Litholog (in Rupel und Chatt nur Unterscheidung von Sand, Silt, Ton möglich) und Bohrlochmessungen (Gamma Ray-, Dichte- und Sonic-Log; Unterteilung der Oligozänsedimente von unten nach oben in Walsum-Schichten, Ratingen-Schichten, Lintfort-Schichten (alle Rupel) und Grafenberg-Schichten (Chatt), Teufenschritte: 10 m

2.2.2 Karten

Alle Karten in dieser Arbeit wurden georeferenziert und verzerrungsfrei mit Hilfe des Geografischen Informationssystems (GIS) MapInfo erstellt. Im Gegensatz zu AutoCAD und anderen GIS-Programmen verfügt MapInfo über eine Reihe unterschiedlicher aktueller und alter geografischer Projektionen und nationaler Koordinatensysteme, zwischen denen Datentransformationen problemlos vorgenommen werden können.

So konnten alle Grundkarten, thematischen Karten und Störungslinien zunächst in den jeweiligen Koordinatensystemen und der für die Kartengrundlage relevanten Projektion auf eigenen Layern digitalisiert werden. Anschließend wurden die Komponenten in ein einheitliches Koordinatensystem transferiert und die Layer übereinander gelegt. Dies ermöglichte die Integration von Bohrpunkten und Störungen in den nationalen deutschen, belgischen und nie-

derländischen Koordinatensystemen. Dies ist insbesondere in tektonisch stark beanspruchten Gebieten, wie der Niederrheinischen Bucht und ihrer Fortsetzung in den Grabensystemen der Niederlande sowie im Einflussbereich der Salztektone in Norddeutschland, von Bedeutung, um die räumliche Verteilung einzelner Schichten und Störungen auf Hoch- und Tiefschollen in einer einheitlichen Projektion analysieren zu können.

Des Weiteren ermöglicht diese Vorgehensweise die Erstellung und Darstellung von länderübergreifenden thematischen Karten zu paläogeografischen Einheiten, Sedimentmächtigkeiten oder der Faziesverteilung mit variablen Maßstäben über die gesamte West-Ost-Erstreckung des Arbeitsgebiets oder in Teilbereichen. Dies war besonders in der Grenzregion der nördlichen Niederrheinischen Bucht, der südlichen Niederlande und Nordostbelgiens hilfreich, in der eine große Dichte von bis in das Rupel reichenden Bohrungen vorhanden ist. Die aus der flächendeckenden Bohrungsinterpretation resultierenden Mächtigkeitstabellen wurden anschließend in das Programm SURFER (Golden Software, Golden) eingelesen und dort mit Hilfe eines grids (Netz) in 2-D-Mächtigkeitkarten umgewandelt. In Abhängigkeit der Datendichte erhalten die SURFER-Karten entweder konturierte Formen (Abb. 3.5) oder die Mächtigkeiten werden in rechteckigen Feldern berechnet (Abb. 3.1). Die georeferenzierten SURFER-Karten wurden anschließend mit derselben Projektion in MapInfo exportiert und dort mit den bestehenden Kartengrundlagen verschnitten.

Auf diese Weise konnten erstmals länderübergreifende Mächtigkeitkarten für die Rupeleinheiten RU-1 bis RU-7 sowie die Chatteinheiten CH-1 bis CH-7 erstellt werden, um die Sedimentologie und Beckendynamik in der gesamten Region besser zu verstehen.

2.3 Auswahl der Bohrungen und Profile

2.3.1 Bohrungen

In der Niederrheinischen Bucht wurden die Bohrungen nach den Kriterien

- stratigraphische Reichweite,
- Qualität und Kombination der Bohrlochmessungen,
- regionale Verteilung und Zugehörigkeit zu tektonischen Einheiten,
- biostratigraphische Daten aus Spülproben (üblicherweise in Anlehnung an die regionale Benthosforaminiferen-Gliederung nach INDANS (1958, 1965))

ausgewählt.

Diese Auswahl wurde durch Bohrungsdaten von Schächten, die im Zuge des Steinkohlenbergbaus in den 60er und 70er Jahren abgeteuft worden waren, ergänzt. An den Bohrkernen der Schachtbohrungen waren damals zwar Korngrößenbestimmungen und z.T. paläontologische Untersuchungen vorgenommen worden, Bohrlochmessungen fehlten jedoch. Um dennoch eine Verbindung zwischen den niederrheinischen Bohrungen und denen der Nordsee und Norddeutschlands herstellen zu können, wurden die paläontologischen Nannoplankton- und Dinoflagellatenbefunde des Schachtes Tönisberg (Bohrung 602) von BENEDEK (1972), BENEDEK & MÜLLER (1974) und KÖTHER (1990) auf die benachbarte Bohrung Mühlenberg (Bohrung 288) übertragen. Sowohl Schacht Tönisberg als auch die Bohrung 288 liegen auf der tektonisch relativ stabilen Krefeld-Scholle, so dass die Bohrlochmessungen in der Bohrung 288 sehr gut mit dem Korngrößendiagramm des Schachtes Tönisberg korreliert werden konnten. Als einziger der tief reichenden Tertiärbohrungen und Schächte in der Niederrheinischen Bucht liegt beim Schacht Sophia Jacoba bei Erkelenz (Bohrung 038) eine Kombination von Bohrlochmessungen und paläontologischen Untersuchungen an Mollusken und Ostracoden vor (WELLE 1993, F.K. ZIEGLER 1994), die Rückschlüsse über die Paläoökologie des Rupel und Chatt in dieser Region zulassen. Durch die Lage des Schachts in unmittelbarer Nähe des Peel-Blocks, der Erft-Scholle und des Rurgrabens wurde die Sedimentation stärker durch lokale Tektonik beeinflusst.

In Norddeutschland wurden die Bohrungen zunächst in Anlehnung an zwei Nord-Süd ausgerichtete Profile in VINKEN et al. (1988) ausgewählt und durch die Forschungsbohrungen Wursterheide (Bohrung 2058; BENDA ed. 1989), Gartow/GoHy 994 (Bohrung 2098; u.a. KÖTHER 1990), Loburg I/90 (Bohrung 2124; KÖTHER 1995) und BKB 284 (Bohrung 2123; KÖTHER 1994) ergänzt. Die gekernte Bohrung Gartow in Ostniedersachsen ist eine sehr wichtige Forschungsbohrung, da in ihr eine der vollständigsten Paläogen-Abfolgen in Nordwesteuropa gewonnen werden konnte (KÖTHER 1990). Außerdem liegen geochemische und geökologische Untersuchungen (DILL et al. 1996, DILL et al. 1997) vor, die Vergleiche der Fazies und Paläoökologie mit den Ablagerungen in den Niederlanden, Belgien und der Niederrheinischen Bucht ermöglichen. Im Weser-Ems-Gebiet konnten vorhandene Lücken durch Spülbohrungen aus der Kohlenwasserstoff-Exploration geschlossen werden. In der Nordsee wurde die Datenbasis durch eine ebenfalls biostratigraphisch untersuchte Spülbohrung (Bohrung 2099) im deutschen Sektor ergänzt.

Die Auswahl der Bohrungen in den Niederlanden orientierte sich überwiegend an publizierten Referenzbohrungen (VAN ROIJEN et al. 1984, Atlas van Nederland 1985, VAN ADRI-CHEM BOOGAERT & KOUWE eds. 1997), um einen Anschluss an den Niederländischen Zentralgraben zu gewährleisten. Dieser Umfang wurde durch Bohrungen des niederländischen Geologischen Dienstes NITG-TNO aus Limburg im Grenzgebiet zwischen Belgien und

Deutschland sowie durch Bohrungen in der Grenzregion zu Westniedersachsen erweitert. Die belgischen Bohrpunkte stammen meist aus unveröffentlichten Studien und Arbeiten des Geologischen Instituts der Universität Leuven (VAN ECHELPOEL 1991, LEROI 1995, VERSTRAELEN 1996). Die Bohrungen wurden durch Punkte von Tagesaufschlüssen in Tongruben ergänzt, sofern deren Lage aus der Literatur erschlossen werden konnte.

2.3.2 Profile

Die Lage der Profile wurde so gewählt, dass alle wichtigen tektonischen Einheiten des Arbeitsgebiets erschlossen werden, um den Übergangsbereich Land-Meer möglichst genau zu erfassen (Abb. 2.1). Zusätzlich zu den überwiegend Nordwest-Südost bzw. Nord-Süd verlaufenden Profilen wurden als Ergänzung mehrere Südwest-Nordost verlaufende Querprofile untersucht. In der Niederrheinischen Bucht konnten aufgrund der relativ großen Bohrungsdichte nicht nur die tektonisch bedingten Unterschiede auf den verschiedenen Schollen sehr gut erfasst, sondern auch die faziellen küstenparallelen Veränderungen nachvollzogen werden. Dieser Ansatz ermöglichte im regionalen Kontext auch die Identifizierung weit durchgängiger Trennflächen (Erosions- oder Überflutungsflächen) in den Profilen.

2.4 Auswertung der Bohrlochmessungen

Die Interpretation der Bohrlochmessungen und Zuordnung der Faziesseinheiten erfolgte in Anlehnung an RIDER (1996) und DOVETON (1994). Bei der Interpretation wurden Messungen der natürlichen und der spektralen Gammastrahlung, des Widerstands, des Eigenpotenzials und Messungen der Gesteinsdichte sowie der Akustik zur Bestimmung der Schalllaufzeiten in den Gesteinen berücksichtigt. Eine Berechnung von Elektrofazies-Einheiten, wie sie im Braunkohlenexplorationsgebiet der südlichen Niederrheinischen Bucht mit einer einheitlichen Messkombination (GR, DEN, SN, LN) erarbeitet werden konnte (KLETT et al. 1997; KLETT 2000; KLETT & SCHÄFER 1997), war wegen der Heterogenität der Bohrlochmessungen und der sehr unterschiedlichen Ablagerungsbereiche nicht möglich.

2.4.1 Radiometrische Verfahren

2.4.1.1 Natürliche Gammastrahlung (GR [API])

Mit Hilfe der Gamma-Ray-Messungen (in den Profilen und in Abkürzungen mit GR bezeichnet) wird im Bohrloch die natürliche Gammastrahlung des Gesteins bestimmt, die überwie-

gend aus dem radioaktiven Zerfall der Isotope ^{232}Th , ^{238}U und ^{40}K stammt. Die Gammastrahlung wird in API-Einheiten (American Petroleum Index) gemessen und die Mess-Sonde vor jedem Messgang auf API-Standard geeicht. Flache kartierbegleitende Bohrlochmessungen besitzen selten API-Standard, sondern nur cps-Einheiten (counts per second). Während die absoluten Werte dieser Messungen unbrauchbar sind, kann deren Trend zur Interpretation genutzt werden. Im Arbeitsgebiet sind Gammastrahlungsmessungen unter den jüngeren Bohrungen weit verbreitet.

Gamma-Ray-Messungen können gut zur Bestimmung der Lithologie sowie zur Korrelation und Identifizierung von signifikanten Horizonten und Trennlinien mit spezifischen GR-Werten und Mustern eingesetzt werden. In klastischen Sedimentgesteinen wird die Strahlungsintensität maßgeblich durch den Tongehalt der Gesteine bestimmt, da Tonsteine einen höheren Anteil kalium- und thoriumhaltiger Minerale besitzen. Reine Sandsteine mit einem hohen Quarzanteil, Karbonate und die meisten Braunkohlen haben sehr geringe Gammastrahlungswerte. Tone, organische Partikel in Tonen, Glaukonit, Feldspat und Schwerminerale besitzen hingegen hohe Strahlungswerte (RIDER 1996). Hohe Gammastrahlungswerte sind demnach in der Regel ein guter Indikator für feinkörnige, tonige Sedimente. Durch regionale Vergleiche mit benachbarten Bohrungen konnten auch über Verwerfungen hinweg Korrelationshorizonte definiert werden. In den Chattsedimenten ist die alleinige Verwendung von Gammastrahlungsmessungen zur Identifizierung der Lithologie jedoch nicht möglich, da die Messwerte tonige Sedimente an solchen Stellen suggerieren, wo in Wirklichkeit der Glaukonitgehalt für erhöhte Werte verantwortlich ist.

2.4.1.2 Spektrale Gammastrahlung (Th [ppm], U [ppm], K [%])

Mit Hilfe von Spectral Gamma-Ray-Messungen (auch Spectralog genannt) ist die Unterteilung der natürlichen Gesamt-Gammastrahlung eines Gesteins in die Einzelkomponenten ^{232}Th , ^{238}U und ^{40}K möglich. Die Gewichtsanteile der Isotopen ^{232}Th und ^{238}U werden jeweils in ppm angegeben, der Anteil an ^{40}K in Prozent.

Mit Spectralogs, die in den bearbeiteten Profilen mit TH, U und K gekennzeichnet sind, können vor allem charakteristische Horizonte identifiziert und faziell zugeordnet werden. Da sich Tonminerale in ihrer Zusammensetzung und in ihrem Thorium-, Kalium- und Uran-Anteil unterscheiden, lassen sich mit Hilfe der Spectralogs z.B. lagunäre Tone von Schelf-Ablagerungen differenzieren, da der Thorium-Anteil in terrestrischen Tonmineralen (z.B. Kaolinit) höher ist als in Glaukonit. Eine der wichtigsten Möglichkeiten, die die Nutzung von Spectralogs eröffnet, ist die Identifizierung von Abschnitten mit sehr hohem Urangehalt, die in der Regel auf ein anoxisches Ablagerungsmilieu und die Adsorption von Uran an organische Partikel zurückzuführen sind. Diese Horizonte entstanden durch den verminderten Eintrag von

klastischem Detritus und die damit verbundene Akkumulation dieser uranreichen Partikel im Sediment. Dies wird als Hinweis auf extrem verminderte Sedimentationsraten und sequenzstratigraphisch als condensed section gedeutet (LOUTIT et al. 1988, VAN WAGONER et al. 1990, WALKER & JAMES 1992, RIDER 1996).

Im Arbeitsgebiet gibt es drei Bohrungen (Bohrung 006, Bohrung 029, Bohrung 180), bei denen Spectralogs genutzt werden konnten. Sie liegen alle in der Niederrheinischen Bucht im Einzugsbereich der Braunkohlen-Exploration der RHEINBRAUN AG, allerdings ist nur in Bohrung 006 (Abb. 2.3) eine nahezu vollständige Rupel-/ Chatt-Abfolge erbohrt worden.

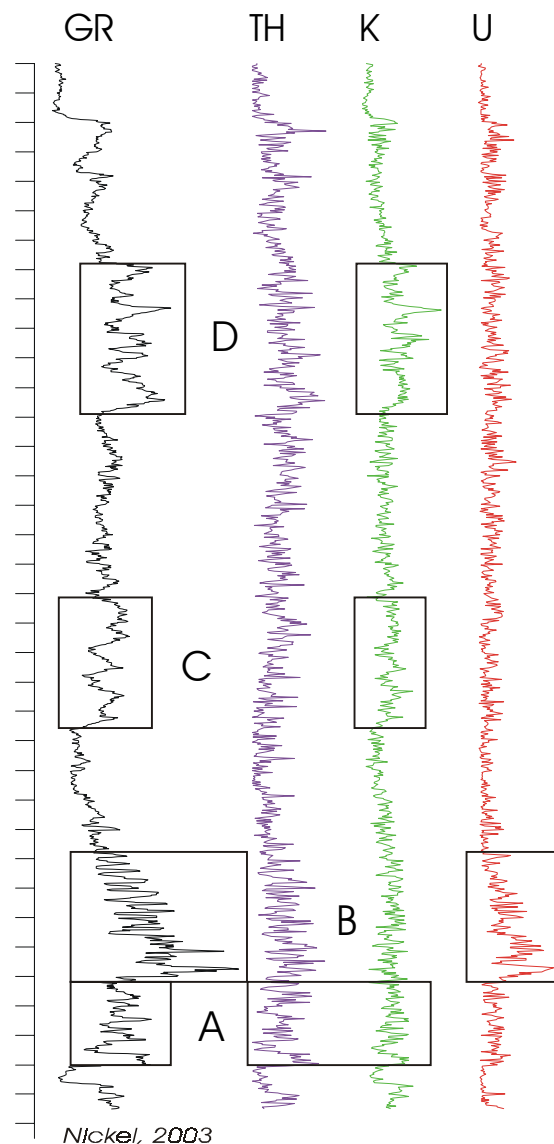


Abb. 2.3: Bohrung Burghof (Bohrung 006) mit Bohrlochmessungen für Gammastrahlung (GR) und Spectralog mit den Komponenten ^{232}Th (TH), ^{238}U (U), ^{40}K (K); umrahmt: charakteristische Abschnitte A bis D auf der Gammastrahlungskurve mit Zuordnung zu den verantwortlichen Komponenten K, TH und U; Teufenschritte: 10 m

2.4.1.3 Dichte (DEN [g/cm^3])

Die Dichtemessungen erfolgten mit Hilfe eines Gamma-Gamma-Logs und werden in der Einheit g/cm^3 angegeben. Dazu wird die sekundäre Gamma-Rückstrahlung aus der näheren Umgebung der Bohrlochwand nach dem Beschuss mit Gamma-Quanten aus einer ^{137}Cs -Quelle erfasst. Die Gesamtdichte eines Gesteins setzt sich aus der Dichte der Gesteinsbestandteile (Matrix) und der Dichte der Porenflüssigkeit zusammen. Je höher beispielsweise bei Sandsteinen die Porosität ist, desto höher ist der Fluidanteil, was wiederum ihre Gesamtdichte verringert. In Tonen und Silten ist die Dichte maßgeblich vom Grad der Kompaktion abhängig.

Im Arbeitsgebiet lagen Dichtemessungen nur von Bohrungen aus der Niederrheinischen Bucht vor. In der nördlichen Niederrheinischen Bucht können die Dichtemessungen sehr gut zur Korrelation weit durchhaltender karbonatischer Septarienlagen (hohe Dichte-Werte) genutzt werden, auch Kalke und Mergel zeigen höhere Messwerte. In der südlichen Bucht lassen sich die niedrigen Messwerte der Braunkohlenhorizonte sehr gut identifizieren, Kalke und Mergel fehlen dort.

2.4.2 Elektrische und elektromagnetische Verfahren

2.4.2.1 Widerstand und Leitfähigkeit (SN [$\Omega \text{ m}$], LN [$\Omega \text{ m}$], LAT [$\Omega \text{ m}$], FEL [$\Omega \text{ m}$])

Der spezifische Widerstand eines Gesteins gehört wie der reziproke Wert der Leitfähigkeit zu den elektrischen Messgrößen. Der Widerstand wird in $\text{Ohm} \cdot \text{Meter}^2$ [$\Omega \text{ m}$] angegeben. Die Messwerte werden vor allem von der elektrischen Leitfähigkeit eines Gesteins sowie der Leitfähigkeit der Formationswässer in den Gesteinsporen und Gesteinsklüften bestimmt: Je größer der Salzgehalt und je höher die Temperatur der Wässer ist, desto größer ist das Leitvermögen und umso kleiner der spezifische Widerstand des Gesteins. Gas und Kohlenwasserstoffe im Porenraum wirken als Isolatoren, ebenso kompakte Salze, Gips und Anhydrit, die kein Wasser enthalten. In der Bohrlochgeophysik werden Widerstandsmessungen häufig verwendet, weil sie sensibel auf kleine lithologische Veränderungen reagieren. Dies ermöglicht vor allem in feinkörnigen Sedimenten die Nutzung für Korrelationen von Trends, bestimmten Mustern oder charakteristischen Peaks (RIDER 1996).

Aufgrund des Alters der meisten Bohrungen und Bohrlochmessungen liegen kaum moderne, sondern überwiegend klassische Widerstandsmessungen wie die Messung der kurzen Normalen (short normal, SN [$\Omega \text{ m}$]) und der langen Normalen (long normal, LN [$\Omega \text{ m}$]) vor. Bei beiden handelt es sich um einfache, nicht gerichtete Potenzialverfahren, die sich durch den Abstand der Elektroden und die Eindringtiefe in das Umgebungsgestein unterscheiden. Bei der SN-Messung beträgt der Abstand zwischen der Strom- und der Messelektrode 16 Zoll

(40,6 cm), bei der LN-Messung 64 Zoll (162,6 cm). Je größer der Abstand der Elektroden ist, desto stärker wird der Widerstand des von der Bohrspülung unbeeinflussten Gebirges gemessen. Bei einigen älteren Bohrungen in Norddeutschland wurde zusätzlich zu Short Normal und Long Normal für die Auflösung geringmächtiger Schichten eine Lateralsonde (LAT [Ω m]) mit einem Elektrodenabstand von 18,8 Zoll eingesetzt, die ebenfalls einfache Potentialdifferenzen misst. Mit Hilfe der gerichteten (fokussierten) Widerstandsmessung durch ein Focussed Electric Log (FEL [Ω m]) wird die Auffächerung des Mess-Stroms im Gebirge unterbunden und eine bessere Vertikalauflösung als im ungerichteten SN-Log erreicht.

2.4.2.2 Induktion (ILD [Ω m])

Bei induktiven Messverfahren wird nicht das direkte Potenzial gemessen, sondern über eine Sendespule im Bohrloch ein elektrisches Feld in das Umgebungsgestein induziert, dessen Veränderungen anschließend von der Empfängerspule registriert werden. Die Mess-Sonden sind so konstruiert, dass der wahre Gebirgswiderstand in Höhe der Sonde berührungsfrei gemessen werden kann (HATZSCH 1994). Bei einigen wenigen Bohrungen in der Niederrheinischen Bucht und in den Niederlanden lagen Induktionsmessungen vor. Aufgrund der größeren Eindringtiefe wurde bevorzugt das Induction Log Deep (ILD [Ω m]) genutzt, mit dessen Hilfe beispielsweise sedimentationsbedingte Korngrößenveränderungen in feinklastischen, wenig verfestigten Abfolgen korreliert werden konnten.

2.4.2.3 Eigenpotenzial (SP [mV])

Mit Eigenpotenzialmessungen, häufig auch als Self Potential oder Spontaneous Potential Logs (SP) bezeichnet, wird das elektrische Potenzial [mV] zwischen einer Referenzelektrode an der Oberfläche und einer Elektrode in der Bohrspülung gemessen. Das Eigenpotenzial wird sowohl vom Salinitätsunterschied zwischen dem Formationswasser und der Bohrspülung als auch von der Druckdifferenz zwischen der hydrostatischen Spülungssäule und der Formation bestimmt. In verfestigten Sedimenten sind SP-Messungen deshalb geeignet, um poröse von dichten Sedimenten zu unterscheiden. In der Niederrheinischen Bucht ist das nur bedingt möglich, da zum einen die Tertiärsedimente weitgehend unverfestigt sind und zum anderen häufig nur Wasser als Bohrspülung verwendet wurde. Dadurch ist der Salinitätsunterschied zwischen Formationswasser und Bohrspülung zu gering. Bei den niederländischen und norddeutschen Bohrungen können Eigenpotenzialmessungen besser verwendet werden, da die Sedimente stärker verfestigt sind. Durch die Analyse der SP-Daten können zwar Aussagen zum Tongehalt der einzelnen Schichten und Faziesinterpretationen getroffen werden, eine feine Differenzierung der Ablagerungen durch Unterschiede im organischen Gehalt und der Mineralzusammensetzung ist mit dieser Methode jedoch nicht zu erreichen.

2.4.3 Akustische Verfahren

2.4.3.1 Sonic- / Acoustic-Messungen [μ s/m, μ s/ft]

Mit dem Sonic- bzw. Acoustic-Verfahren [μ s/m bzw. μ s/ft] wird die Laufzeit von Schallwellen in einem Gestein bestimmt, die von einer Ultraschallquelle im Bohrloch emittiert und von einem Empfänger, der sich in einem fest definierten Abstand zum Sender befindet, registriert werden. Zu langen Laufzeiten (niedrigen Geschwindigkeiten) kommt es in wenig verfestigtem bzw. losem Material und bei Auskesselungen in der Bohrlochwand. Kurze Laufzeiten (hohe Geschwindigkeiten) sind charakteristisch für harte, stärker verfestigte Gesteine. Aufgrund der überwiegend sehr schwachen Verfestigung der siliziklastischen Sedimente im Arbeitsgebiet herrschen lange Laufzeiten vor, Bohrlöcheffekte durch instabile Wände können nicht ausgeschlossen werden. Sonic- bzw. Acoustic-Werte wurden im Arbeitsgebiet wie Dichtemessungen zur Bestimmung von kalkhaltigen Septarienlagen, Kalken und Mergeln mit kurzen Laufzeiten eingesetzt. Da Sonic-Daten auch für norddeutsche Bohrungen vorliegen, konnten sie für Korrelationszwecke genutzt werden.

2.5 Abgrenzung charakteristischer Sedimentationseinheiten

Bohrlochmessungen bilden z.T. sehr genau die Veränderungen der Lithologie und der Geochemie in siliziklastischen Sedimenten ab. Dies gilt auch und gerade für feinkörnige Sedimente, die mit Hilfe von Bohrlochmessungen, in denen charakteristische Muster, Trendlinien, abrupte Wechsel oder Anomalien zu beobachten sind, untergliedert werden können. Auf diese Weise konnten Diskordanzen und Konkordanzen sehr gut bestimmt werden. Bei der Abgrenzung charakteristischer Sedimentationseinheiten wurde eine Kombination von Gamma-Ray- und Widerstandsmessungen berücksichtigt, die in einigen Fällen durch Acoustic- und Dichtemessungen sowie Spectralogs ergänzt werden konnte. Zusätzlich wurden Informationen zur Biostratigraphie und Sedimentologie aus der Literatur integriert.

Mit Hilfe dieser Trennflächen ließen sich in den Rupelablagerungen des Arbeitsgebiets sieben Einheiten, die im Folgenden als RU-1 bis RU-7 (Abb. 2.4) bezeichnet werden, abgrenzen und über maximal 400 Kilometer aushalten. In den Chattablagerungen war die Zuordnung aufgrund des stärkeren tektonischen Einflusses und durch die sandigeren Sedimente zwar schwieriger, aber auch hier ließen sich sieben Einheiten (CH-1 bis CH-7) festlegen. Die Grenzen wurden ähnlich der Sedimenteinheiten von unten nach oben nummeriert (Rupel: I – VIII; Chatt: VIII – XV). Die Fläche VIII entspricht der Rupel/Chatt-Grenze.

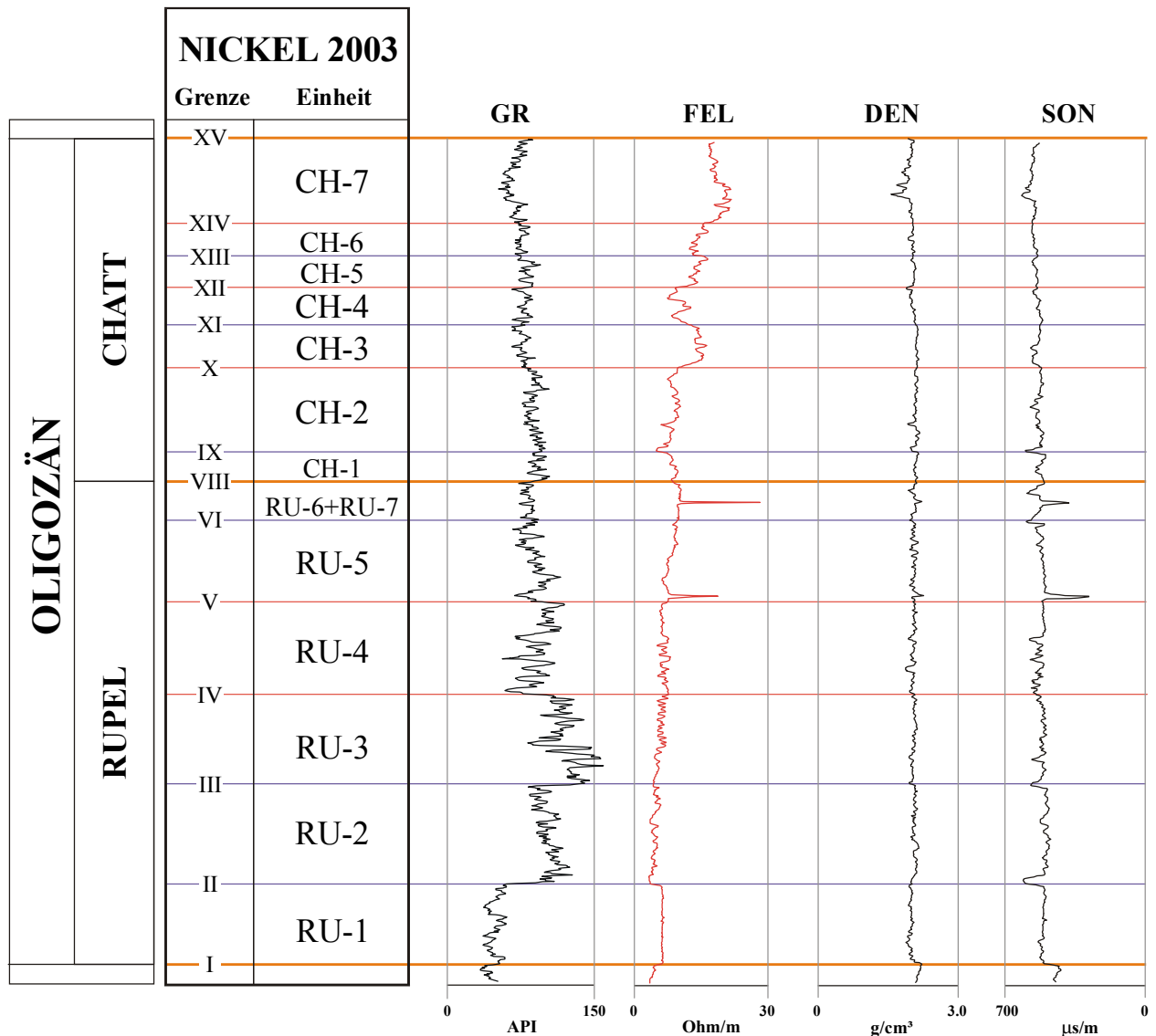


Abb. 2.4: Abgrenzung der in dieser Arbeit neu definierten charakteristischen oligozänen Sedimentationseinheiten RU-1 bis RU-7 (Rupel) und CH-1 bis CH-7 (Chatt) mit den dazugehörigen Grenzen I – XV; die Einheiten wurden exemplarisch den Bohrlochmessungen der Bohrung 185 auf der Krefeld-Scholle zugeordnet; die Grenze VII (Beginn einer sandigeren Einheit im oberen Abschnitt des Rupel) wurde in dieser Bohrung nicht erfasst; GR: Gamma Ray-Messung, FEL: Widerstandsmessung Focussed Electric Log, DEN: Dichtemessung, SON: Sonic-Messung; Grenze I entspricht der Basistransgressionsfläche des Oligozän, VIII repräsentiert die Rupel/Chatt-Grenze, XV zeigt in allen Profilen und Bohrungen die Abgrenzung des Chatt gegenüber hangenden Schichten an; die Grenzen II, III, VI, IX, XI und XIII (violett) besitzen den Charakter von Überflutungsflächen; die Grenzen IV, V, (VII), X, XII, XIV (rot) liegen an der Basis von regressiven bzw. erosiven Einheiten

3. Entwicklung des Ablagerungsraums im Oligozän

Die vollständigste oligozäne Sedimentabfolge am Südrand der tertiären Nordsee befindet sich im belgisch-niederländisch-deutschen Grenzgebiet. Zusätzlich zu den Nord-Süd- und Nord-ost-Südwest-Profilen (Abb. 2.1) stehen in dieser Referenzregion zahlreiche interpretierte Bohrungen zur Verfügung, die die Konstruktion von Mächtigkeitkarten für die zuvor in den Profilen abgegrenzten Rupel- und Chatt-Einheiten erlaubten. Daraus wurden nicht nur die Ablagerungszentren, sondern auch die wechselnden Einflüsse der tektonischen Elemente im Untergrund abgeleitet. Für einige Zeitabschnitte konnte eine detailliertere fazielle Differenzierung vorgenommen werden, die die Küstendynamik jenes Zeitraums sehr gut illustriert. Aufgrund der großen Abstände zwischen den untersuchten Bohrungen und der durch postoligozäne Erosion sehr lückenhaften Schichtenfolge in weiten Teilen Norddeutschlands wurde auf die Konstruktion von Mächtigkeitkarten für Norddeutschland und die Nordsee verzichtet.

3.1 Rupel

Während des Rupel lag das Arbeitsgebiet am Südrand des Nordwesteuropäischen Tertiärbeckens nahezu vollständig unter dem Einfluss der tertiären Nordsee (Abb. 1.2). Die Sedimentation war siliziklastisch geprägt: Marine Schelftone in den distalen Regionen gehen mehrfach in flachmarine Sande und Tone in den küstennahen Gebieten über. Weite Teile des Sedimentationsbeckens lassen sich sehr gut korrelieren, zum einen bedingt durch Septarienlagen, zum anderen durch Lagen mit sehr hohem organischem Gehalt, die vor allem in Gamma-Ray-Messungen gut zu verfolgen sind. Dies deutet auf geringe tektonische Bewegungen hin.

Die lithologischen Wechsel in den fossilarmen und teilweise fossilfreien Rupelsedimenten führten im Arbeitsgebiet in der Vergangenheit zur Etablierung einer Vielzahl lithostratigraphischer Einheiten, die für Belgien, die Niederlande und Deutschland in Tabelle 1.2 zusammengestellt sind. Sie sind zur Rekonstruktion von Meeresspiegelschwankungen im Rupelmeer jedoch nicht geeignet, da aus ihnen allein keine Aussagen über eine zeitgleiche Ablagerung abgeleitet werden können. Aufgrund der Fossilarmut ist die Festlegung eines biostratigraphischen Leithorizonts ebenfalls problematisch.

Deshalb wurde als chronostratigraphischer Korrelationshorizont die Basis einer tonigen Einheit mit sehr hohen Gamma-Ray-Werten genutzt, die auf eine Phase mit vermindertem Sedimenteintrag schließen lässt (condensed section, vgl. Kap. 2.4.1.2). Dieser Horizont ist im gesamten Arbeitsgebiet verbreitet und bildet gleichzeitig die Basis der Einheit RU-3 (vgl. Kap. 3.3). Von diesem Horizont ausgehend konnte eine unabhängige Unterteilung der Sedimentfolge in sieben charakteristische Sedimentationseinheiten vorgenommen werden, die

folge in sieben charakteristische Sedimentationseinheiten vorgenommen werden, die vom Liegenden zum Hangenden als RU-1 bis RU-7 benannt wurden (vgl. Kap. 2.5).

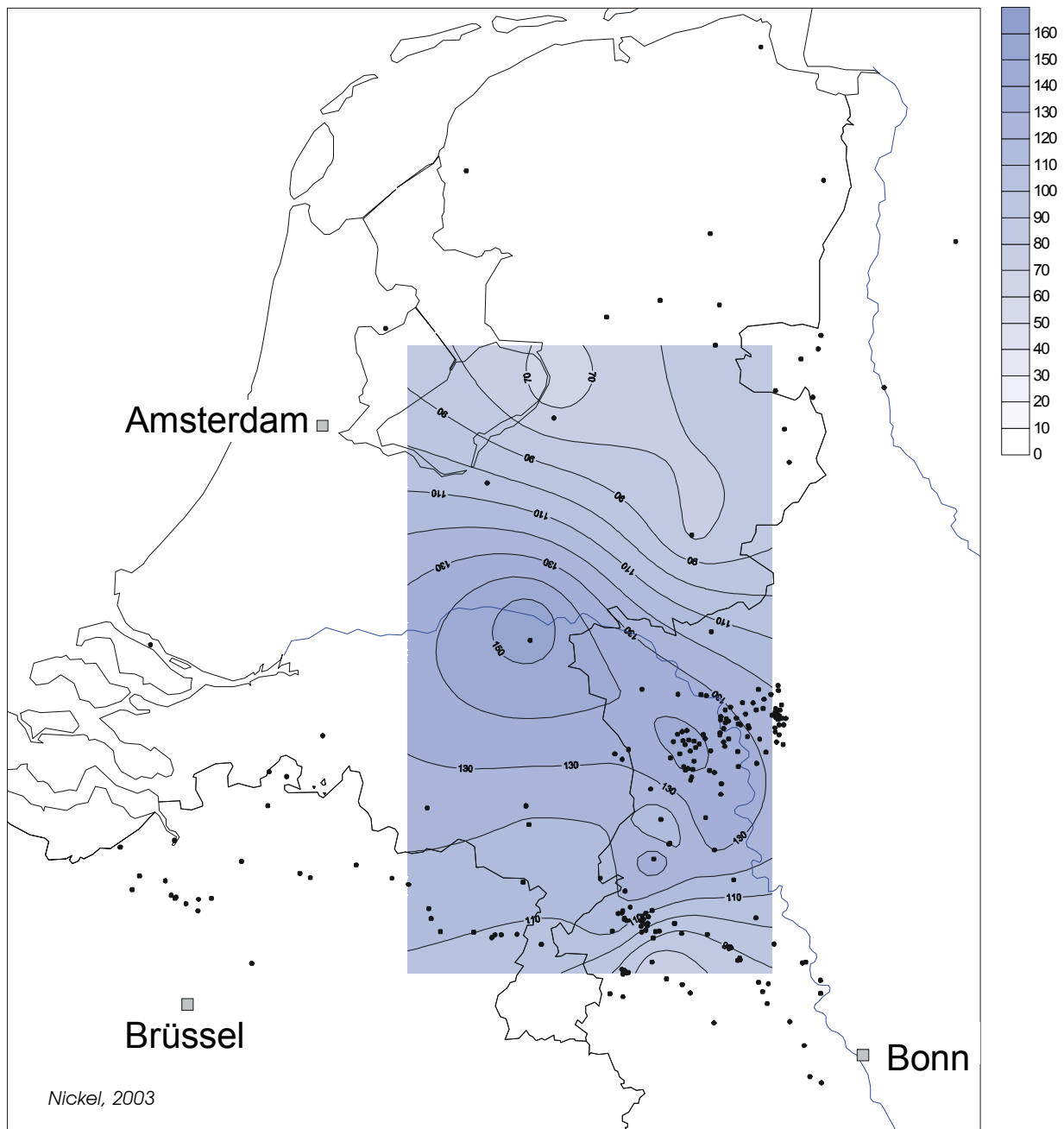


Abb. 3.1: Mächtigkeitsverteilung der gesamten Rupelsedimente
Mächtigkeitkarte der Rupelsedimente in der Region Bonn - Brüssel – Amsterdam;
abgeleitet aus untersuchten Profilen, Mächtigkeiten extrapoliert, Störungen nicht auskartiert;
Isopachenabstand: 10 m, Isopachenintervall: 60 m – 160 m

In der Referenzregion wurde aus den untersuchten Profilen und einigen ergänzenden Bohrungen die Mächtigkeitsverteilung der Rupelsedimente abgeleitet (Abb. 3.1). Das Sedimentationszentrum mit Mächtigkeiten von mehr als 140 Metern befindet sich in einer NW-SE streichenden Zone zwischen Amsterdam und Bonn, während im Nordosten und im Süden die Ru-

pelbedeckung geringmächtiger wird. Während der einzelnen Sedimentationsabschnitte RU-1 bis RU-7 kam es zu einer stärkeren Differenzierung der Ablagerungszentren und mithin zu einer Veränderung des tektonischen und sedimentären Rahmens, die sich aus der gleichförmig scheinenden Verteilung der Gesamtrupelmächtigkeiten allein nicht ablesen lässt.

3.1.1 Einheit RU-1

Definition

Mit den RU-1-Sedimenten beginnt im Arbeitsgebiet die Rupelabfolge. Die Einheit wird von der erosiven Basistransgressionsfläche im Liegenden (Grenze I) und einer marinen Überflutungsfläche (Grenze II) im Hangenden (Abb. 2.4) begrenzt. RU-1 liegt im gesamten Arbeitsgebiet diskordant über älteren Schichten - in den Niederlanden, weiten Teilen Belgiens und Norddeutschlands sind es vorwiegend eozäne Sedimente, in der Niederrheinischen Bucht Paläozän-Ablagerungen und die vermutlich zum obersten Eozän zählenden Ratheim-Schichten. Im Bereich der südlichen Niederrheinischen Bucht reicht die stratigraphische Lücke unter den Rupelsedimenten vereinzelt bis in das Paläozoikum hinab.

Synonyme / regionale Bezeichnungen

Die Einheit RU-1 umfasst eine Reihe lokaler lithostratigraphischer Schichtbezeichnungen. In der Niederrheinischen Bucht entspricht RU-1 den sandigen Walsum-Schichten. Deren obere Grenze zu den tonigen Ratingen-Schichten bzw. den Lintfort-Schichten ist gleichzeitig die Grenze II. Im Norden von Belgien ist RU-1, deren Basistransgressionsfläche als leicht aufgearbeitete Phosphatlage ausgeprägt ist, Teil eines Schelftons, der nach lithostratigraphischen Kriterien zum Boom Clay gehört. Im Süden von Belgien wird RU-1 als Bergsand, einem transgressiven Küstensand, an dessen Basis im Aufschluss eine Geröll- und Kieslage zu beobachten ist, bezeichnet (VANDENBERGHE et al. 1998). So ist RU-1 in den bearbeiteten niederländischen Bohrungen in den meisten Fällen identisch mit dem sandigen Vessem Member an der Basis der Middle North Sea Group (Tab. 1.2), wie die Bohrungen 331 (Broekhuizen-vorst), 2023 (Asten 2), 2024 (Arcen) und 2031 (Nijmegen-Valburg) belegen. Dagegen befindet sich RU-1 in der Bohrung 2007 (Dornspijk 2) als feinkörnige Sedimentabfolge innerhalb des Rupel Clay (VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE 1997). In Norddeutschland entspricht RU-1 vorwiegend den sandigen Lithoeinheiten des Neuengammesands bzw. des Basissands. In distalen norddeutschen Bohrungen mit feinkörnigen siltigen und tonigen Sedimenten wird RU-1 zum Rupelton bzw. Septarienton gerechnet.

Lithologie / Fazies

Innerhalb der Einheit RU-1, die nicht lithologisch definiert ist, variieren die marinen Sedimente zwischen küstennahen flachmarinen, z.T. mittelsandigen Feinsanden im Süden und Schelftonen in der Nordseebohrung 2099. RU-1 zeichnet sich sowohl in den Widerstandsmessungen als auch in den Dichte- und Sonic-Messungen durch sehr homogene Messwerte von der Basis bis zum Top (Abb. 2.4) aus. Die für Feinsande charakteristischen Werte der Gamma Ray-Messungen variieren in dieser Bohrung etwas stärker zwischen 30 und 60 API. In Aufschlüssen am Westrand der Niederrheinischen Bucht beschrieb SCHENK (1998) die Walsum-Schichten als homogene, aufgrund starker Bioturbation strukturlose und gut sortierte Feinsande mit Schluff- und Tonanteilen. Kartierbegleitende Gamma-Ray-Labormessungen an Feinsandproben aus den Walsum-Schichten ergaben Werte zwischen 20 und 40 API. Gefüge sind äußerst selten erhalten, nur z.T. ist noch eine Gezeitenschichtung mit Gezeitenbündeln in schnell abgelagerten Mittelsanden erhalten geblieben. Eine Besonderheit sind die Ichnofossilfunde von *Pygospio elegans* (Sandgrube Spickermann, RW: 25 61 700, HW: 57 20 000, Abb. 3.2.a) und von *Ophiomorpha nodosa* LUNDGREN (1891) (Nordwand Sandgrube WDQ Dr. Müller GmbH, RW: 25 61 800, HW: 57 22 650, Abb. 3.2 b).

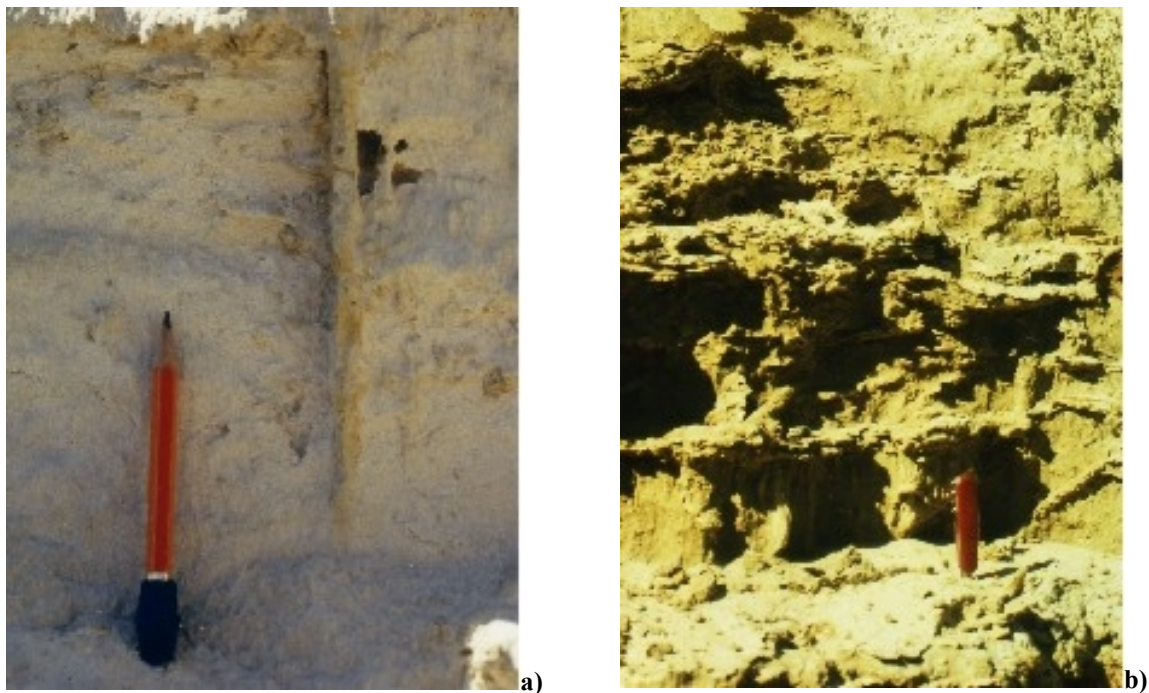


Abb. 3.2: Spurenfossilien in Tagesaufschlüssen der Walsum-Schichten am Ostrand der Niederrheinischen Bucht: a) senkrechter Grabgang eines Wurms (*Pygospio elegans*) rechts neben Bleistift, Grube Spickermann (RW: 25 61 700, HW: 57 20 000); b) Spuren von *Ophiomorpha nodosa*, Nordwand Grube WDQ Dr. Müller GmbH (RW: 25 61 800, HW: 57 22 650); aus SCHENK (1998)

Pygospio elegans ist nach GERDES, KRUMBEIN & REINECK (1985) die Grabspur eines Wurms, der heute im gesamten Wattbereich, vor allem aber im Mischwatt vorkommt. *Ophiomorpha nodosa* konnte bereits im Süden der Niederrheinischen Bucht in Tagebauprofilen der

miozänen marinen Sande beobachtet werden (PETZELBERGER 1994). Die Spuren gelten als Indikator für den subtidalen Unteren Vorstrand unterhalb der Niedrigwasserlinie bzw. der Schönwetter-Wellenbasis (PETZELBERGER 1994, SCHÄFER et al. 1996). Dies wird durch Untersuchungen an der Molluskenfauna der Walsum-Schichten bestätigt, die normale euhaline Bedingungen anzeigen (WELLE 1993).

Der Übergang der Einheit RU-1 von der sandigen Küste am Beckenrand zu den distalen Schelftonen in der Nordsee lässt sich am besten entlang der beiden langen Nord-Süd-Profile von der Nordsee in die Niederrheinische Bucht (Profil 1, Abb. A2.1) und von der Nordsee bis nach Sachsen-Anhalt (Profil 2, Abb. A2.2) beobachten. In den proximalen Sanden liegen die Gamma Ray-Werte zwischen 20 und 40 API, in den distalen Schelftonen meist zwischen 50 und 80 API. Zusätzlich ist häufig ein Anstieg der Gamma Ray-Werte von der Basis der Einheit zum Top zu beobachten, was als Hinweis auf eine transgressive Entwicklung mit graduell feinkörniger werdender Sedimentation (fining-up, FU) zurückzuführen ist.

Mächtigkeiten / Tektonik

Während in der Niederrheinischen Bucht die größten Mächtigkeiten der Einheit RU-1 von maximal 25 Metern in einem NE-SW streichenden Senkungsgebiet bei den Bohrungen 185 (Hartefeld), 188 (Lamerong 1), 197 (Baerlag 1) und 291 (Ankerweide 2) ermittelt wurden (Abb. 3.3), fehlen RU-1-Sedimente nur wenige Kilometer weiter südöstlich der Bohrungen 381 (Lanzerath 1) und 029 (Tetz). Dort transgredierte das Meer erst später auf den paläozoischen Untergrund. Die Mächtigkeitsverteilung legt einen Ausgleich des vorhandenen Paläoreliefs nahe. Während in den Regionen, in denen die Mächtigkeit am größten ist, bis zu drei Transgressionen abgeleitet werden können, lässt sich in Gebieten mit geringen RU-1-Mächtigkeiten nur eine Transgression ausdifferenzieren.

Entlang Profil 2 (Abb. A2.2) nimmt die RU-1-Mächtigkeit von der südlichsten Bohrung des Profils (Bohrung 2124, Loburg I/90) bis zur Nordseebohrung 2099 (G11-1) kontinuierlich von 22,2 m auf 4,5 m ab. Dies entspricht der typischen Mächtigkeitsverteilung für marine Reliefs, in denen die größten Mächtigkeiten in proximalen Sanden und Silten und die geringsten Mächtigkeit in distalen Schelftonen zu beobachten sind. In der südlichsten Bohrung 2124 ist die Mächtigkeit nicht nur ähnlich hoch wie in den mächtigsten Sedimenten der Niederrheinischen Bucht, es sind auch zwei Transgressionszyklen erkennbar.

Der Südrand der kartierbaren Mächtigkeiten korrespondiert sehr gut mit dem Verlauf der variszischen Aachener Überschiebung im Untergrund. Sie trennte in diesem Zeitabschnitt ein südöstlich gelegenes Gebiet mit Erosion von einem nordwestlichen mit Sedimentation. Die Mächtigkeitsunterschiede im Südwesten, wo auf engem Raum RU-1-Mächtigkeiten von > 10

Metern neben solchen von < 2 Metern vorkommen, beruhen vermutlich auf ersten Absenkungen entlang NW-SE verlaufender synsedimentärer Störungen. So könnten die Unterschiede zwischen den Bohrungen 2028 in Limburg und 106 auf Absenkungen im Rurgraben entlang der Feldbiss-Verwerfung zurückzuführen sein. Die zur Feldbiss-Verwerfung antithetisch angeordnete Rurrand-Verwerfung würde die Unterschiede zwischen den Bohrungen 106 im Westen und 029 erklären, in der keine RU-1 Sedimente vorhanden sind. Die nördliche Begrenzung dieses lokalen Sedimentationszentrums bildete offenbar der variszisch angelegte Waubach-Sattel, der als Schwelle im Paläorelief wirkte.

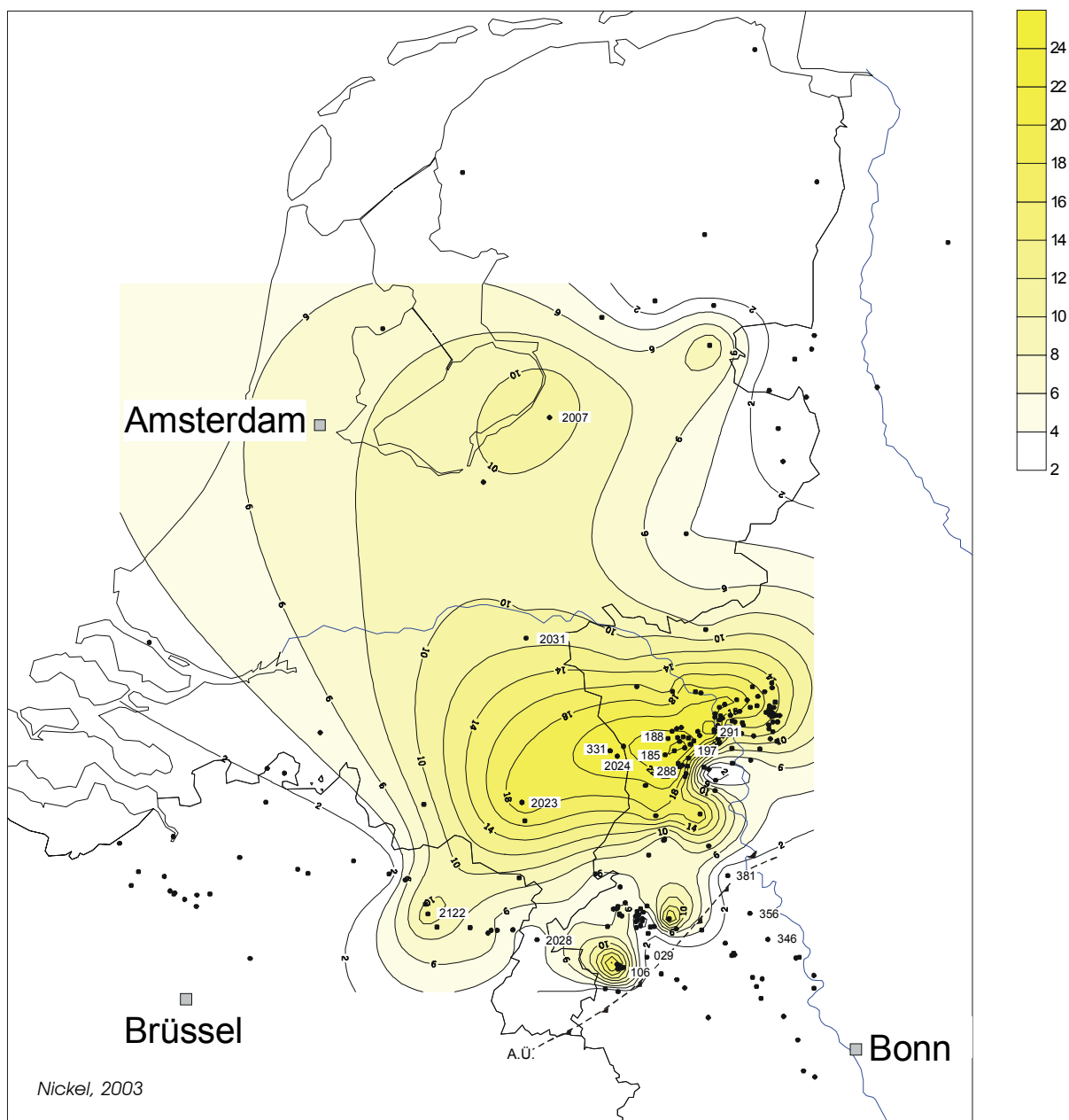


Abb. 3.3: Mächtigkeitsverteilung Einheit RU-1

Mächtigkeitsverteilung in der Referenzregion abgeleitet aus Profilen und Bohrungen (z.T. mit Bohrnummern), Mächtigkeiten extrapoliert; A.Ü.: Verlauf der Aachener Überschiebung, sonstige Störungen nicht ausgehalten; Isopachenabstand: 2 m, Isopachenintervall: 2 m – 24 m

Ein zweites, nur wenige Kilometer entferntes Absenkungsgebiet bildete sich ebenfalls zwischen Waubach-Sattel und Aachener Überschiebung. Es war nach Westen durch den Jackerather Horst begrenzt, der bereits im Zeitabschnitt RU-1 als nach Norden abgetreppter Staffelfbruch angelegt war.

Da mehrere Transgressionszyklen sowohl in der NRB als auch in der fast 400 Kilometer entfernten Bohrung 2124 sichtbar sind, deutet das auf eine vergleichbare tektonische Entwicklung. Einschränkend kommt jedoch hinzu, dass dieses Mächtigmuster in Sachsen-Anhalt nur aus einer Bohrung abgeleitet wurde.

Biostratigraphie / Alter

Für die Sedimente der Einheit RU-1 gibt es wenige verlässliche biostratigraphische Altersangaben, die die Korrelation mit den international gültigen chronostratigraphischen Tabellen gestatten. Das beste Zeitgerüst bieten Dinoflagellaten- und Nannoplankton-Untersuchungen. In der einzigen Bohrung mit Dinoflagellatenzonen in der Niederrheinischen Bucht (Bohrung 288, Mühlenberg) umfasst RU-1 nicht nur D 13, sondern reicht bis in den unteren Abschnitt von D 14na (BENEDEK 1972). In Nord- und Ostdeutschland gehören die RU-1-Sedimente unabhängig von ihrer Lithologie in den Bohrungen 2099 (G11-1), 2098 (Gartow), 2058 (Wursterheide) und 2123 (BKB 284) vollständig zur Dinoflagellatenzone D 13 (KÖTHE 1990, 1994, 1995). In der Bohrung 2124 (Loburg I/90) fällt der untere Teil von RU-1 mit Sicherheit in D 13, der obere RU-1-Abschnitt wurde nicht auf Dinoflagellaten untersucht. Dinoflagellatenuntersuchungen für die bearbeiteten belgischen und niederländischen Bohrungen sind nicht bekannt.

In Belgien enthält der Bergsand, der über kontinentalen Tongeren-Ablagerungen sedimentiert wurde, Nannoplankton aus NP 23 (HOOYBERGHS 1983, STEUERBAUT 1986, VANDENBERGHE et al. 1998), während die basale Schicht des Boom Clay, die zwischen Leuven und Tienen über dem Bergsand liegt, zum Intervall NP 19/20 des Priabon gehört (VANDENBERGHE et al. 1998). In der Niederrheinischen Bucht wurde in der RU-1-Einheit Nannoplankton der Zone NP 23 in der Bohrung Mühlenberg (288) zugeordnet. In der niederländischen Bohrung Broekhuizenvorst (331) in unmittelbarer Nachbarschaft der nördlichen Niederrheinischen Bucht reicht das Nannoplankton von Zone NP 22 an der Basis bis in den untersten Teil von NP 23 (VAN ROIJEN et al. 1984). Im restlichen Gebiet der Niederlande gibt es eine Variation des Alters des Vessem Member in Abhängigkeit von der geographischen Position: In den westlichen Senkungsgebieten der Niederlande, dem Voorne-Trog als Teil des Westniederländischen Beckens und dem Zuiderzee-Tief südlich des heutigen IJsselmeers umspannt es die Zonen NP 19/20 bis unterstes NP 23, Richtung Süden und Osten wird die Einheit stetig jünger, im südlichen Teil von Limburg kommt nur noch NP 23 vor (VAN ADRI-

CHEM BOOGAERT & KOUWE 1997). In den nord- und ostdeutschen Bohrungen ist in der fraglichen Einheit selten Nannoplankton erhalten. In der Bohrung 2098 (Gartow) gehört RU-1 vermutlich zu NP 22, da NP 22 noch im untersten Teil von RU-2 vorkommt. In der Bohrung 2123 (BKB 284) liegt zumindest die Basis in NP 22, der Rest ist nicht untersucht (KÖTHE 1990, 1994, 1995).

3.1.2 Einheit RU-2

Definition

Die zweite Einheit der Rupersedimente ist RU-2. Sie lässt sich weiträumig im Arbeitsgebiet nachweisen. Im Liegenden wird sie von einer marinen Überflutungsfläche (Grenze II, gleichzeitig Obergrenze von RU-1) und im Hangenden durch den Beginn einer condensed section (Grenze III) begrenzt (Abb. 2.4). Die Grenze III wird in den Bohrlochmessungen durch einen plötzlichen Anstieg der Gamma Ray-Werte definiert. In Kernmaterial und Tongruben der belgischen Boom-Region entspricht dies einem Farbumschlag von grau nach schwarz, der knapp oberhalb der dort beschriebenen Septarienlage S4 bzw. S40 (VANDENBERGHE 1978, VANDENBERGHE & VAN ECHELPOEL 1987) liegt. RU-2 lagert konkordant über der Einheit RU-1, allerdings ist RU-2 weiter verbreitet als RU-1, so dass RU-2 teilweise direkt auf Präoligozän-Sedimente transgrediert ist.

Synonyme / regionale Bezeichnungen

Für die in Einheit RU-2 zusammengefassten Sedimente existieren abhängig von der Position und der Lithologie der einzelnen Schichten eine Reihe von lokalen lithostratigraphischen Bezeichnungen. Im nordwestbelgischen Rupel-Typgebiet bei Rupelmonde und Boom südlich von Antwerpen entspricht RU-2 nahezu der Terhagen-Einheit des Boom Clay, während RU-2 in Nordostbelgien bei Leuven vom Liegenden zum Hangenden in die Nucula-/Kleine Spouwen-Schichten, die Kerniel-Schichten und einen Teil des Boom Clay gegliedert werden kann. Diese Differenzierung setzt sich in der Niederrheinischen Bucht fort. Zu RU-2 gehören die Ratingen-Schichten an der Basis und der untere Teil der Lintfort-Schichten. Kerniel-Schichten wurden in der Niederrheinischen Bucht bislang nicht als eigenständige Einheit auskartiert, sondern zu den Lintfort-Schichten gestellt.

In weiten Teilen der Niederlande entspricht RU-2 den Sedimenten des Rupel Clay, nur in Südl limburg gibt es ähnlich wie in Nordwest-Belgien und der Niederrheinischen Bucht den Kleine Spouwen Clay an der Basis, gefolgt von Sanden, die zum Vessem-Member gehören. Darüber liegt ebenfalls feinkörniger Rupel Clay. Von Norddeutschland bis nach Sachsen-Anhalt zu den am weitesten östlich gelegenen Bohrungen des Arbeitsgebiets ist RU-2 ein Teil

der lithostratigraphischen Einheiten Rupelton beziehungsweise Septarienton. In der Nordseebohrung 2099 gibt es keine eigenständige stratigraphische Bezeichnung für diesen Abschnitt.

Lithologie / Fazies

Die Einheit RU-2 ist im gesamten Arbeitsgebiet anhand der Kombination von Gamma Ray-Logs und Widerstandsmessungen sehr gut zu identifizieren. Charakteristischerweise beginnt die Sedimentation mit einer tonigen Lage, die Gamma Ray-Werte von ca. 80 API besitzt. In Widerstandsmessungen variieren zwar die Absolutwerte, allerdings sind die relativen Werte die niedrigsten innerhalb von RU-2. In Sonic-Logs ist diese Basislage ganz eindeutig zu bestimmen, da die Schall-Laufzeiten sehr langsam sind, was bei keiner anderen Schicht in dieser Weise beobachtet werden kann. Über dieser tonigen Basis können beckenweit vier relativ deutliche Untereinheiten ausgehalten werden, die sowohl in Gamma Ray- als auch in Widerstandsmessungen als Grob-Fein-Zyklen zu erkennen sind (Abb. 2.4).

Innerhalb von RU-2 können die weiträumig im Nordwesteuropäischen Tertiärbecken verbreitete distale Fazies mit tonig-siltigen Schelfsedimenten (Kap. 3.1.2.1), die als Boom Clay (Belgien), Rupel Clay (Niederlande), Lintfort-Schichten (Niederrheinische Bucht) und Rupelton bzw. Septarienton (Nord- und Ostdeutschland) bekannt sind, und eine küstennähere, stärker differenzierte Fazies im belgisch-niederländisch-deutschen Grenzgebiet unterschieden werden. Für die küstennähere Fazies sind zusätzlich die Untereinheiten RU-2-RT (Kap. 3.1.2.2) und RU-2-Kerniel (Kap. 3.1.2.3) ausgehalten. Die lithologischen und faziellen Merkmale dieser Untereinheiten sind weiter unten ausführlich dargestellt.

Mächtigkeiten

Aus der Mächtigkeitsverteilung von RU-2-gesamt in der Referenzregion (Abb. 3.4) können ungefähr küstenparallele Südwest-Nordost verlaufende Isopachen abgeleitet werden. Anders als in RU-1 sind keine nennenswerten Lücken in der Verbreitung zu beobachten. Die Zone größter Mächtigkeit (> 30 m) in der Niederrheinischen Bucht verläuft spindelförmig auf der Krefeld-Scholle. Dort wurden die größten Sedimentpakete in den benachbarten Bohrungen 193 (Dinslakener Bruch 1, 36 m) und 291 (Ankerweide 2, 35 m) durchteuft. Die Achse des Sedimentationszentrums verläuft entlang der variszisch angelegten Essener und Emscher Mulde. Bei den Bohrungen 356 und 346 auf der Köln-Scholle finden sich keine RU-2-Sedimente.

In der Nordseebohrung 2099 ist RU-2 13,5 Meter mächtig, in der weiter südlich liegenden norddeutschen Bohrung 2058 erreicht RU-2 hingegen nur 8,8 Meter. In Ostdeutschland entsprechen die Mächtigkeiten der RU-2-Sedimente in den Bohrungen 2124 (Lohburg I/90, 36

m) und 2098 (Gartow, 32 m) den größten Mächtigkeiten im Sedimentationszentrum der Niederrheinischen Bucht.

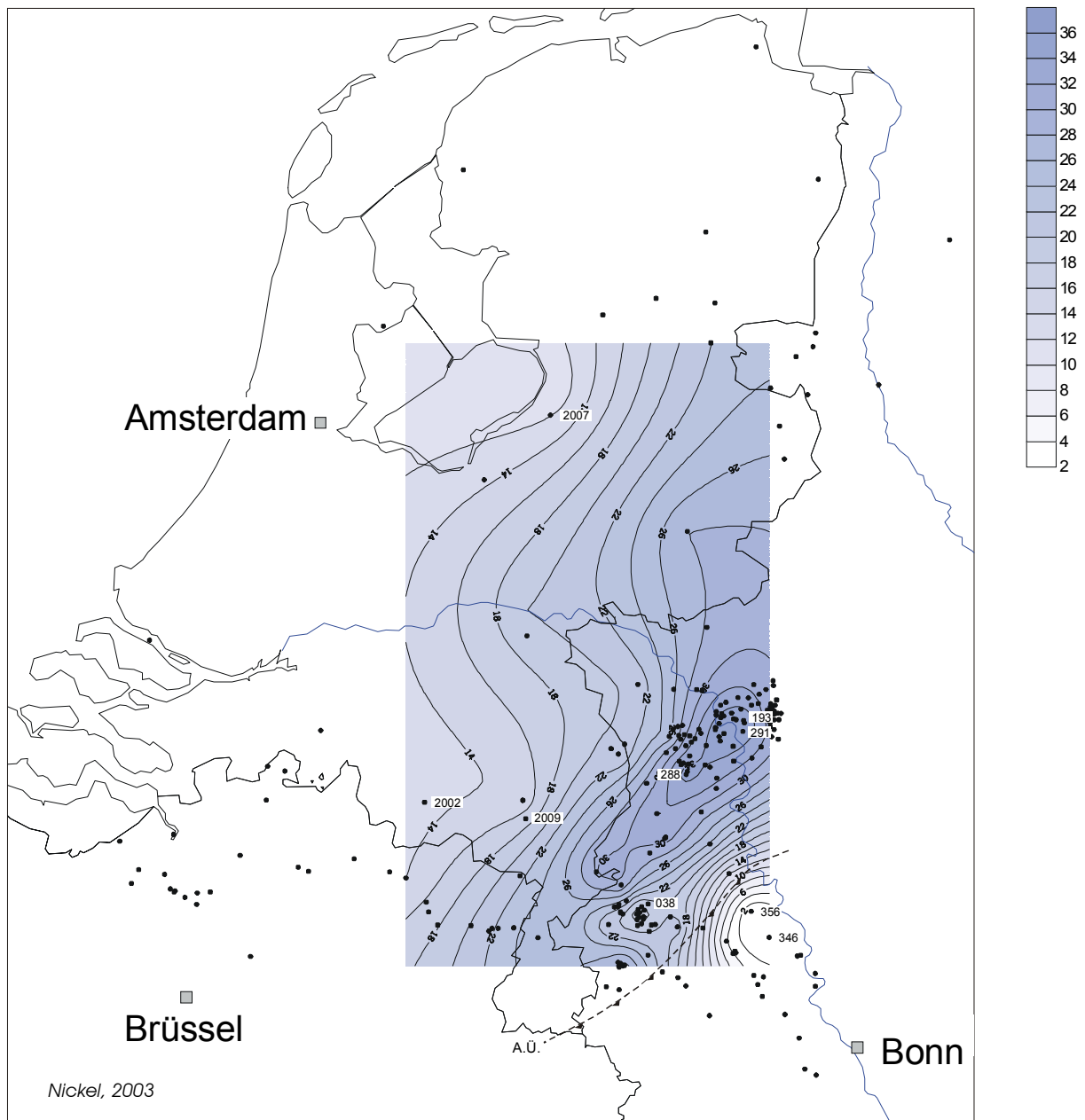


Abb. 3.4: Mächtigkeitsverteilung Einheit RU-2-gesamt
 Mächtigkeitsverteilung in der Referenzregion abgeleitet aus Profilen und Bohrungen (z.T. mit Bohrnummern), Mächtigkeiten extrapoliert; A.Ü.: Verlauf der Aachener Überschiebung, sonstige Störungen nicht ausgehalten; Isopachenabstand: 2 m, Isopachenintervall: 2 m – 34 m

Biostratigraphie / Alter

Mollusken (JANNSEN 1984) legen eine Korrelation des untersten Boom Clay mit dem östlich gelegenen oberen Teil des Nucula Clay nahe, aber biostratigraphische Beweise stehen bislang aus. In den Bohrungen 288/602 (Niederrheinische Bucht), 2099 (Nordsee), 2098, 2124 und 2123 (alle im Osten Deutschlands) liegt RU-2 komplett in der Dinoflagellatenzone

D 14na bzw. beginnt an der Grenze D 13/ D 14na (BENEDEK 1972, KÖTHE 1990, 1994, 1995). Einzig in der norddeutschen Forschungsbohrung Wursterheide (2058) liegt die Untergrenze von RU-2 noch in D 13 (KÖTHE 1990). Von den niederländischen Bohrungen konnten keine Dinoflagellatenuntersuchungen einbezogen werden.

Basierend auf den Nannoplankton-Untersuchungen von STEUERBAUT (1986, 1992) kann RU-2 in Belgien in NP-Zone 23 eingeordnet werden. Die Datierung der RU-2-Sedimente mit Hilfe von Nannoplankton-Zonen ist z.T. lückenhaft, da zahlreiche Bohrungsabschnitte nicht auf Nannoplankton untersucht wurden oder aufgrund der Fossilarmut in den Sedimenten keine NP-Bestimmung möglich war. So kann in der Bohrung 288 nur der untere Abschnitt von RU-2 sicher in NP 23 gestellt werden, da im oberen Abschnitt bis zur Grenze III kein Nannoplankton mehr vorkommt (BENEDEK & MÜLLER 1974). In den Niederlanden fällt RU-2 komplett in NP 23 (VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE 1997), zu den Bohrungen 2058 und 2099 liegen keine NP-Ergebnisse vor. In Ostdeutschland sind ebenfalls Lücken vorhanden, so dass die NP-Zuordnung an der Basis von RU-2 nicht zweifelsfrei möglich ist. An der Basis von Bohrung 2098 folgt auf eine geringmächtige NP 22-Lage zwar NP 23 bis zur Obergrenze von RU-2, allerdings sind in den beiden Bohrungen 2124 und 2123, aus denen nur NP 23 bekannt ist, größere Abschnitte nannoplanktonfrei (KÖTHE 1990, 1994, 1995).

Die Mächtigkeiten der in den Logs zu unterscheidenden vier Untereinheiten variieren meist zwischen 5 – 6 Metern, so dass sie sicher längere Entstehungszeiträume umfassen als die geringmächtigeren Silt-Ton-Wechselfolgen in den belgischen Tongruben. Deren auffallende Rhythmizität wurde auf Milankovitch-Zyklen zurückgeführt (VAN ECHELPOEL & WEEDON 1990), wobei ein Zyklus ca. 120 000 Jahre umfassen soll.

3.1.2.1 Einheit RU-2-distal

Lithologie / Fazies

Die distalen feinkörnigen Schelfsedimente sind in der belgischen Typregion des Rupel südlich von Antwerpen aus zahlreichen Tongruben und Kernbohrungen des Boom Clay bekannt. Die gleichförmige tonig-siltige Wechselfolge zeichnet sich durch eine auffallende Lagerstruktur mit hell- und dunkelgrauen, z.T. schwarzen Lagen aus, die im Aufschluss sehr gut zu unterscheiden sind. Sie gehen auf Unterschiede in der Korngröße und dem organischen Gehalt der Schichten zurück, wobei die Geochemie und Mineralogie des Boom Clays über weite Teile des belgischen Rupelbeckens nahezu konstant bleibt. In den belgischen Tongruben sind die Tonlagen bis zu 2 Meter mächtig, während die Siltlagen meist nicht mehr als 40 cm erreichen (VANDENBERGHE 1978). Die Abfolge ist in weiten Teilen so typisch, dass über Tagesauf-

schlüsse und Kernbohrungen eine sehr feine stratigraphische Gliederung des Boom Clay möglich wurde, bei der sogar einzelne Lagen durchnummeriert sind. Auffällig sind weiterhin die so genannten Septarienlagen, entlang derer Tonmergelsteingeoden angeordnet sind. Die Sedimente sind weitgehend kalkfrei, CaCO_3 ist fast ausschließlich in den Geoden konzentriert. Die Septarienlagen sind so charakteristisch, dass sie vom Liegenden zum Hangenden die Bezeichnung S10 bis S80 erhielten. In RU-2 befinden sich die Septarienlagen S10 bis S40, die in Sonic-Logs aufgrund ihrer Verfestigung zu schnelleren Schall-Laufzeiten führen als die wenig verfestigten Tone und Silte. Auch in Widerstandsmessungen fallen die Septarienlagen durch erhöhte Messwerte auf.

In der Niederrheinischen Bucht sind die zu RU-2 gehörenden distalen Sedimente Teil der Lintfort-Schichten, die vor allem auf der Krefeld-Scholle dominieren. In Spülbohrungen ist die Einheit RU-2 am besten aus Gamma Ray-Messungen in Kombination mit Widerstandsmessungen und Sonic- bzw. Dichte-Logs zu unterscheiden, die in der Niederrheinischen Bucht in ausreichender Menge und Dichte vorliegen. Das Bohrklein der unverfestigten Tone und Silte der Spülbohrungen ist hingegen wenig aussagekräftig. Auch in den Lintfort-Schichten gibt es mehrere Horizonte mit Septarien und z.T. kann eine intensive Wechselfolge siltiger und toniger Sedimente unterschieden werden (KLOSTERMANN et al. 1990). Aus Aufschlüssen in Tongruben im Nordosten der Niederrheinischen Bucht wurden sie als monotone, graue, feinsandige Silte bis Tone oder siltige Feinsande beschrieben (SCHENK 1998), in denen vereinzelt dünne Sandlagen eingebettet sind. Die Schichten sind stark durch Bioturbation verändert, Foraminiferen konnten in den dort bearbeiteten Proben nicht nachgewiesen werden. Am Ostrand der Niederrheinischen Bucht gibt es nach SCHENK (1998) Hinweise auf aufgearbeitete Kreidesedimente. Im Westen der Niederrheinischen Bucht sind die Lintfort-Schichten in der gekernten Schachtbohrung 038 zwar nahezu fossilieer, aber palökologische Untersuchungen an Mollusken (WELLE 1993) und Ostracoden (F.K. ZIEGLER 1994) lassen auf euxinische Ablagerungsbedingungen schließen.

In den Niederlanden kann die Abgrenzung von RU-2 und den hangenden Einheiten im Rupel am besten in der Referenzbohrung Dornspijk-2 (Bohrung 2007, VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE 1997) nachvollzogen werden, da hierzu im Gegensatz zu den beiden anderen Referenzbohrungen Veldhoven-1 (2002) und Asten-1 (2009) Gamma Ray-Messungen für den Rupel Clay vorliegen. In Kernbohrungen ähneln die Rupel Clay-Sedimente nach VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE (1997) dem belgischen Boom Clay. Siltige und tonige Abschnitte alternieren im Dezimeter/Meter-Abstand, der Gehalt an organischem Material variiert auch hier stark und weite Teile sind kalkfrei. Stattdessen ist das in den Sedimenten enthaltene CaCO_3 fast ausschließlich in den Septarienlagen konzentriert.

In Norddeutschland, der Nordsee und den ostdeutschen Bohrungen ist die Situation vergleichbar mit den Niederlanden. Auch hier dominieren distale siltige Schelftone die Sedimentation, wie sie beispielsweise von den gekernten Bohrungen 2058 (Wursterheide) und 2098 (Gartow) beschrieben wurden. Dort sedimentierte ein kalkhaltiger siltiger Ton über einer geringmächtigen tonigen, kalkfreien Basisschicht. In allen Bohrungen kann die Einheit RU-2 mit Hilfe von Gamma Ray-Messungen abgegrenzt werden, da diese die feinen Unterschiede in der Geochemie der Sedimente abbilden.

Die in Norddeutschland aufgrund der Kohlenwasserstoff-Exploration in den 50er bis 70er Jahren weit verbreiteten Eigenpotenzialmessungen sind hierfür nicht geeignet und allein auf der Basis von Widerstandsmessungen ist die Zuordnung zu unsicher, so dass bei einem Großteil der vorliegenden Bohrungen für diesen Abschnitt keine Gliederung möglich war, die die Erstellung von Mächtigkeitkarten erlaubt hätte.

Am besten ist die Entwicklung von RU-2-distal in Profil 1 (Abb. A2.1) zwischen den Bohrungen 2099 und 102, in Profil 2 (Abb. A2.2) sowie im West-Ost-Profil 5 von Nordostbelgien in die nordöstliche Niederrheinische Bucht (Abb. A2.5) zu sehen. Die Bohrlochmessungen lassen darauf schließen, dass es zu Beginn des Zeitintervalls RU-2 im gesamten Arbeitsgebiet zu einer Überflutung kam, die die hydrologische Situation für die nachfolgende Zeit markant veränderte. Die marine Überflutungsfläche an der Basis von RU-2 leitete den Übergang zur Sedimentation von Schelfschlickten auf einem offen-marinen Schelf mit Wassertiefen von über 50 Metern ein (VANDENBERGHE 1981). Die Angaben zu der aus paläoökologischen Untersuchungen an Foraminiferen, Mollusken und Ostracoden abgeleiteten Wassertiefe während der Ablagerung variieren. Die größten Wassertiefen mit ca. 80 Metern wurden von JUNG & LANGER (1990) nach Untersuchungen an Foraminiferen aus dem Schacht Hünxe im Osten der Niederrheinischen Bucht abgeleitet. Die Fossilarmut und der hohe organische Anteil in den Sedimenten deuten auf zeitweise anaerobe Bedingungen am Beckenboden hin.

Die vier in RU-2 über dem Basiston zu unterscheidenden Grob-Fein-Zyklen gehen sehr wahrscheinlich auf verschiedene Sedimentationsimpulse zurück, in denen stärkere Bodenströmungen gröberes Material angeliefert haben bzw. vorhandenes Sediment stärker aufgearbeitet wurde. Dies ist ein Hinweis auf relative kleinzyklische Meeresspiegelschwankungen.

In den Tongruben Belgiens wurden von verschiedenen Bearbeitern sedimentpetrographische Untersuchungen durchgeführt, die klären sollten, woher die großen Mengen feinkörniger Sedimente im Nordwesteuropäischen Tertiärbecken stammen. ZIMMERLE (1993), der Dünnschliffe aus der Tongrube Kruibeke südlich von Antwerpen untersuchte, fand darin Feinsandpartikel, die vollkommen aus sekundären Tonen bestehen. Er interpretierte diese als voll-

kommen verwitterte runde Lithoklasten von Basalt und Tuff, die vermutlich von zeitgleichen Vulkanausbrüchen des Rheinischen Massivs (Hocheifel) stammen, so dass der Boom Clay beträchtliche Mengen von direkt über Ascheregen oder indirekt über Erosion und Transport eingetragene Vulkanoklasten enthält. In der nordostdeutschen Bohrung 2098 (Gartow) wird von DILL et al. 1997 für diesen Bohrungsabschnitt ein sehr hoher Kaolinitanteil beschrieben, der als Hinweis auf eine starke chemische Verwitterung im Liefergebiet unter humiden subtropischen Bedingungen gedeutet wird. Das in großen Mengen vorhandene organische Material stammt von aufgearbeiteten Landpflanzen, die bei vermehrter Erosion an der Küste abgetragen und mit der Strömung auf dem Schelf verteilt wurden (VANDENBERGHE 1978, VANDENBERGHE & VAN ECHELPOEL 1987). Z.T. wurden im belgischen Boom Clay auch aufgearbeitete Kohlepartikel aus dem nordenglischen Karbon gefunden (VANDENBERGHE 1976).

3.1.2.2 Untereinheit RU-2-RT

Neben den weit verbreiteten Schelftonen lassen sich innerhalb von RU-2 im Süden der Referenzregion weitere Fazieseinheiten differenzieren, die in den jeweiligen Ländern zwar teilweise als eigenständige lithostratigraphische Einheiten klassifiziert wurden, deren lateraler Zusammenhang aber bislang wegen fehlender grenzüberschreitender Bearbeitung nicht ausreichend bekannt war.

Lithologie / Fazies

In Nordostbelgien, dem niederländischen Süd-Limburg und der südwestlichen Niederrheinischen Bucht ist die Differenzierung der Sedimente, die sich bereits in der Dreiteilung der lithostratigraphischen Einheiten andeutet (Tab. 1.2), am stärksten ausgeprägt. Die Einheit RU-2 beginnt an der Basis wie in der distalen Fazies mit einer tonigen Lage. Deren Mächtigkeit ist allerdings im Gegensatz zu weiten Teilen des Arbeitsgebiets so groß, dass sie in Belgien und in den Niederlanden als Nucula Clay / Kleine Spouwen Clay (LEROI 1995, VERSTRAELEN 1996, VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE 1997, VANDENBERGHE et al. 1998) und in der Niederrheinischen Bucht als Ratingen-Schichten (HAGER & PRÜFERT 1988) auskartiert wurden. In den distalen Bohrungen der Nordsee, Nord- und Ostdeutschlands ist sie hingegen geringmächtig. Im Folgenden wird diese Untereinheit als RU-2-RT bezeichnet.

RU-2-RT besteht in Aufschlüssen im Osten der Niederrheinischen Bucht aus dunkelgrauen, strukturlosen, fetten bis siltigen Tone mit Septarienlagen, Pyrit und Glaukonit (SCHENK 1998). Diese Sedimente sind im Sonic-Log an langsamen Schallwellen-Laufzeiten gut zu er-

kennen (Abb. 2.2). Die Schall-Laufzeiten im Sonic-Log zeugen von einer intensiven Verwühlung der Sedimente, da ungeschichtete Tone nur geringe Schallgeschwindigkeiten zulassen. Die Entwicklung von RU-2-RT ist am besten im West-Ost-Profil Limburg – Krefeld (Profil 6, Abb. A2.6) und senkrecht dazu in Profil 1 (Abb. A2.1, Bohrungen 288 bis 380) und Profil 3 (Abb. A2.3, Bohrungen 2023 bis 330) nachzuvollziehen.

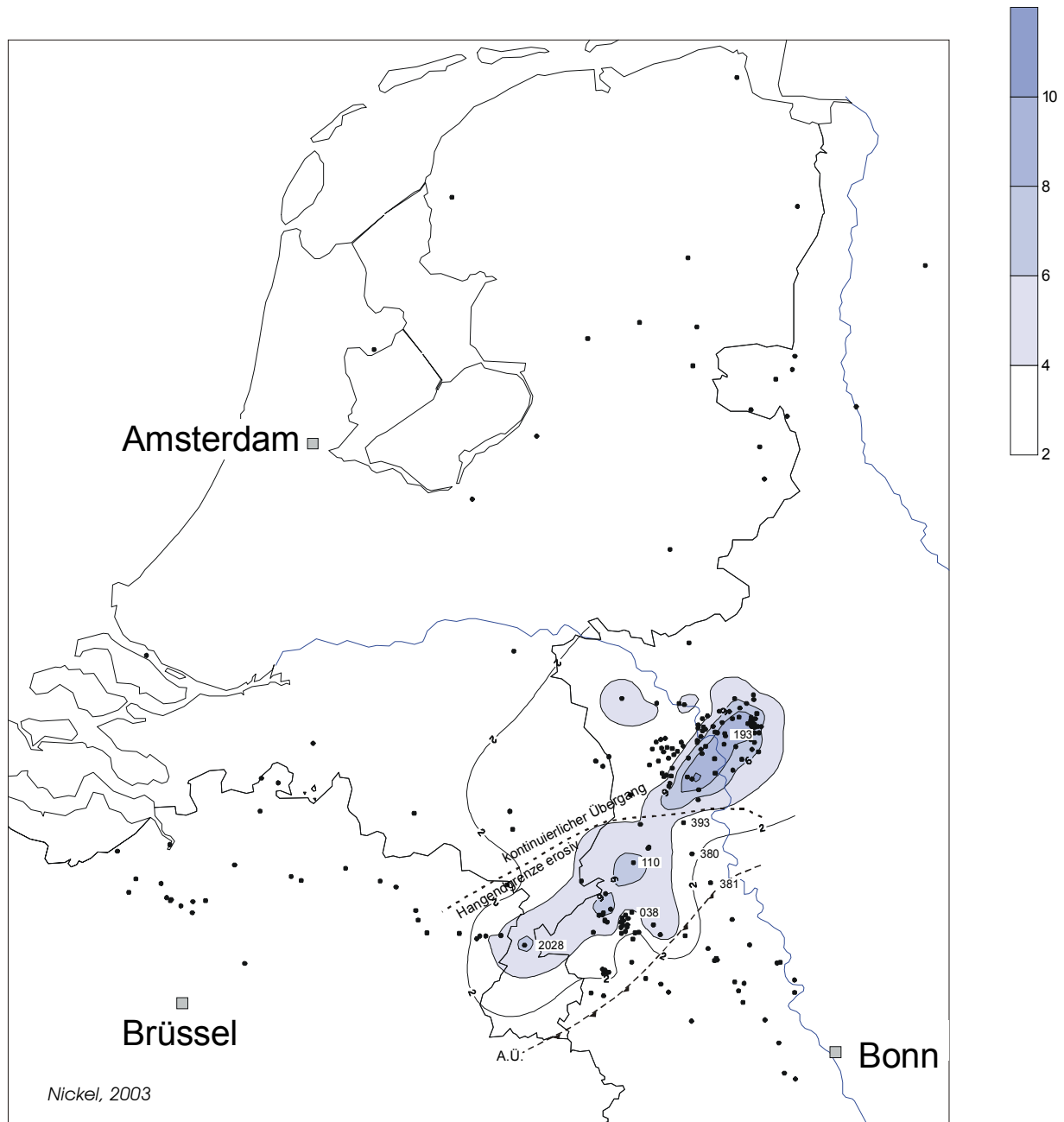


Abb. 3.5: Mächtigkeitsverteilung Einheit RU-2-RT

Mächtigkeitsverteilung in der Referenzregion abgeleitet aus Profilen und Bohrungen (z.T. mit Bohrnummern), Mächtigkeiten extrapoliert; A.Ü.: Verlauf der Aachener Überschiebung, sonstige Störungen nicht ausgehalten; Isopachenabstand: 2 m, Isopachenintervall: 2 m – 10 m; Faziesseinheit wird in der Niederrheinischen Bucht als Ratingen-Schichten, in den Niederlanden und Belgien als Kleine Spouwen Clay bzw. Nucula Clay bezeichnet

Die artenarme Fauna in Schacht Sophia Jacoba (038) enthält vorwiegend Exemplare von *Nucula* und *Nuculana (Saccella) westendorpi* (WELLE 1993), einer Molluskenart, die für schlecht durchlüftetes tieferes Wasser (ca. 50 m Wassertiefe) mit kühler Bodenwasserschicht spricht. Die Molluskenfunde deuten im oberen Teil auf eine bessere Nährstoffversorgung und eine Erhöhung der Wassertemperatur. Die untersuchte Ostracoden-Fauna ist ebenfalls nicht sehr artenreich, die meist transparenten Ostracoden zeigen keine Spuren von Umlagerung und repräsentieren euhaline Bedingungen mit einem Salzgehalt von 30 – 40 ‰ (F.K. ZIEGLER 1994). Fluviatiler oder ufernah-ästuariner Einfluss kann demnach ausgeschlossen werden. Vieles spricht nach Ansicht von WELLE (1993) und F.K. ZIEGLER (1994) für eine geschützte Bucht, die durch submarine Schwellen begrenzt war oder für einen geschützten Schelf außerhalb des direkten Einflusses stärkerer Wellenbewegungen.

Mächtigkeiten

Im Gegensatz zu RU-2-gesamt ist die Zone, in der RU-2-RT mit mehr als 2 Metern Mächtigkeit ausgehalten werden kann, auf einen relativ schmalen Bereich zwischen Limburg im Südwesten und der nördlichen Krefeld-Scholle im Nordosten beschränkt. Die größten Mächtigkeiten werden mit ca. 10 Metern in der Bohrung 193 (Dinslakener Bruch) erreicht. Zur Reduzierung der Mächtigkeiten im südlichen Bereich zwischen Krefeld (Bohrung 393) und Limburg (Bohrung 2028) hat die hangende Kerniel-Einheit beigetragen, die in diesem Abschnitt mit erosivem Kontakt über RU-2-RT liegt (Abb. 3.5).

3.1.2.3 Untereinheit RU-2-Kerniel

Über RU-2-RT liegt mit meist abruptem Wechsel eine fein- bis mittelsandige Einheit, die in Belgien als Kerniel-Sand (VANDENBERGHE et al. 1998) und in den Niederlanden als Waternval Member (Teil des Vesseem Member, VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE 1997) bezeichnet wird. In der Niederrheinischen Bucht wurde diese Schicht nicht separat auskartiert, sondern ist Teil der Lintfort-Schichten. Zur Vereinfachung wird im Folgenden die Bezeichnung RU-2-Kerniel auch für niederländische und deutsche Bohrungen verwendet.

Die Entwicklung von RU-2-Kerniel ist wie RU-2-RT am besten in Profil 6 (Abb. A2.6) und im Querschnitt in Profil 1 (Bohrungen 288 – 380, Abb. A2.1) und Profil 3 (Bohrungen 2023 – 330, Abb. A2.3) nachzuvollziehen.

Lithologie / Fazies

Die Untereinheit RU-2-Kerniel, die im Südwesten z.T. mittelsandig ist und einen erosiven Kontakt zur liegenden Einheit RU-2-RT besitzt, enthält in Schacht Sophia Jacoba (038) Holz, Pflanzenreste und Zapfen. Die Mollusken- und Ostracodenfauna weist auf eine kurzfristige Verflachung des Lebensraums hin (WELLE 1993, F.K. ZIEGLER 1994). Das zunehmend stabile Schwermineralspektrum spricht ebenfalls für stärkere Wellenbeeinflussung und für zunehmende Aufarbeitung.

Alle Hinweise aus der Lithologie, der Sedimentstruktur und der räumlichen Anordnung der Kerniel-Sedimente (Abb. 3.6), der liegenden RT-Einheit sowie der umgebenden RU-2-Fazies sprechen für einen Barrieresand, der sich in der Niederrheinischen Bucht von Maastricht/Limburg im Südwesten nach Krefeld im Nordosten erstreckt. Um diese These zu verifizieren, wurde eine Sondermächtigkeitskarte für die Einheit RU-2-gesamt abzüglich der Untereinheiten -RT und -Kerniel erstellt (Abb. 3.7). Mit dieser Karte kann die Lage der Sandbarriere noch sehr viel deutlicher herausgearbeitet werden. Nach Osten wird der Barrieresand RU-2-Kerniel sukzessive feinkörniger. In der Bohrung 110 enthält die Kerniel-Einheit bereits siltigen Feinsand, die Gamma Ray-Messwerte steigen, die Widerstandswerte nehmen ab und die Bohrungen zeigen einen kontinuierlichen Übergang zur tonigen Normalfazies. Ausgehend von Bohrung 110 ist nach Osten eine zunehmende Verzahnung der Feinsande mit den beckenweit zu beobachtenden vier geringmächtigeren Untereinheiten in RU-2 zu erkennen. Dies spricht für eine küstenparallele SW-NE-Strömung, die im Westen mit größerer Strömungsgeschwindigkeit am Grund für eine stärkere Aufarbeitung der Sedimente gesorgt hat, während weiter im Osten bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten feinere Korngrößen abgelagert wurden.

Im Süden des Barrieresandes herrschen wieder feinkörnige Sedimente vor, was für eine weitgehende Abschirmung vom Einfluss des offenen Meeres spricht, wie dies auf der Rückseite der Friesischen Inseln in der heutigen Nordsee ebenfalls zu beobachten ist. Auch in diesen feinen Silten und Tonen sind die vier geringmächtigen Untereinheiten zu sehen.

Mächtigkeiten / Tektonik

RU-2-Kerniel bleibt ähnlich wie die Untereinheit -RT auf eine SW-NE-verlaufende Zone beschränkt, die von Limburg im Südwesten bis zur südlichen Krefeld-Scholle im Nordosten reicht. Die größten Mächtigkeiten mit mehr als 20 Metern werden nördlich der paläozoischen Aachener Überschiebung erzielt, während südlich davon keine Kerniel-Sande zu finden sind. In Abb. 3.7 ist eine langgestreckte SW-NE-orientierte Zone mit geringen Mächtigkeiten (< 2 m) zu erkennen. Es handelt sich dabei um den Bereich des Barrieresandes, der bis zur Obergrenze von RU-2 nur geringmächtig mit feinkörnigen Sedimenten bedeckt ist. Die Region mit

den größten Mächtigkeiten an feinkörnigen RU-2-Sedimenten (> 24 m) liegt wie in RU-2-gesamt (Abb. 3.4) im Nordosten der Krefeld-Scholle.

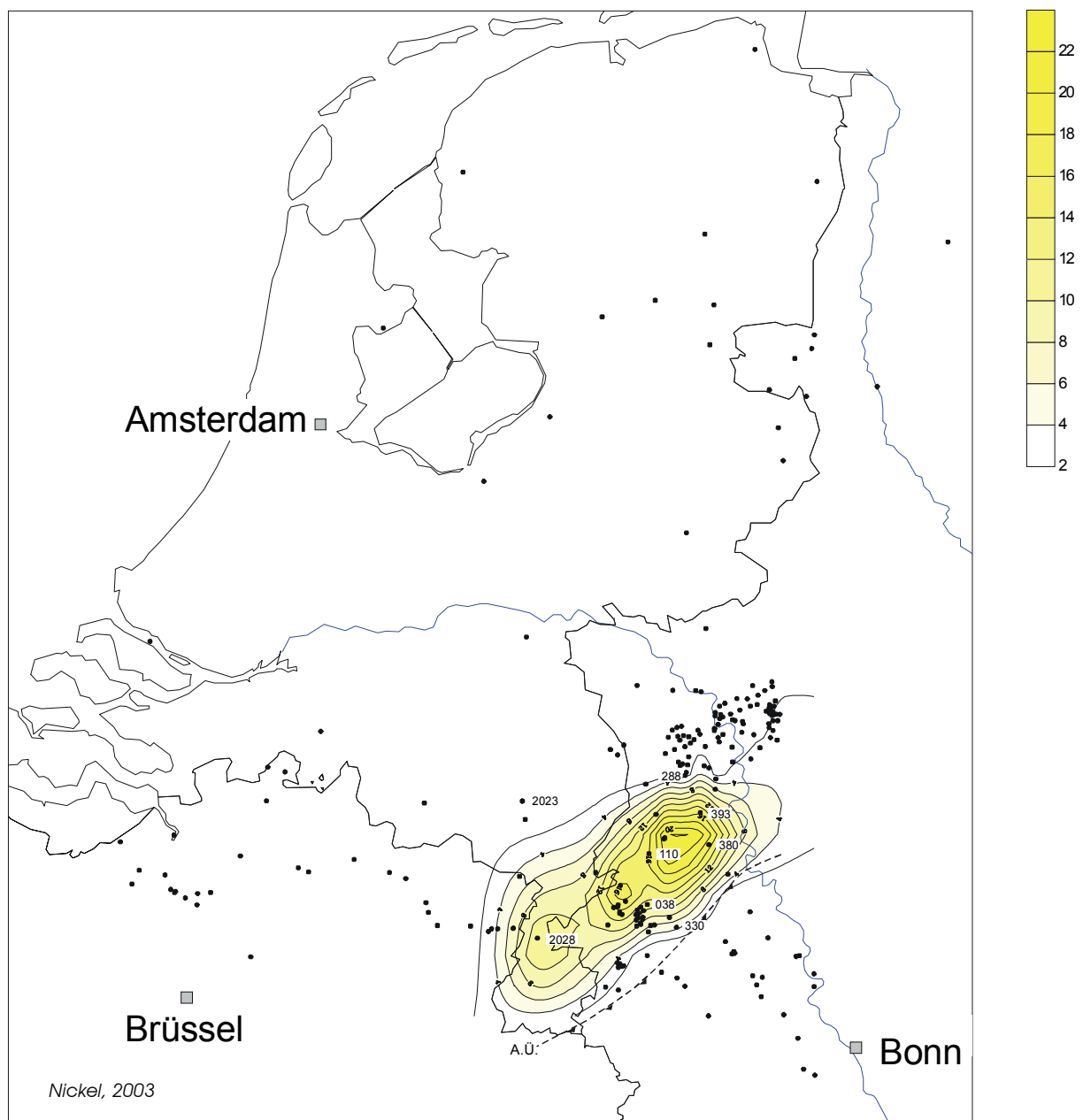


Abb. 3.6: Mächtigkeitsverteilung Einheit RU-2-Kerniel

Mächtigkeitsverteilung der sandigen Fazies über RU-2-RT in der Referenzregion abgeleitet aus Profilen und Bohrungen (z.T. mit Bohrnummern), Mächtigkeiten extrapoliert; A.Ü.: Verlauf der Aachener Überschiebung, sonstige Störungen nicht ausgehalten; Isopachenabstand: 2 m, Isopachenintervall: 2 m – 22 m; Fazieseinheit wird in Belgien als Kerniel-Sand bezeichnet

Das Sedimentationsmuster in der Niederrheinischen Bucht im Zeitabschnitt RU-2 lässt auf ein Zusammenwirken alpiner Kompressions- und neogener Extensionstektonik schließen. Auf eine Reaktivierung variszischer Strukturen in der Referenzregion durch Kompression deuten drei Beobachtungen: Südöstlich der variszisch angelegten Aachener Überschiebung wurde

während des gesamten Zeitintervalls RU-2 paläozoischer Untergrund erodiert, während nordwestlich dieser Verwerfung Sedimente abgelagert wurden. Das deutet darauf hin, dass die Aachener Überschiebung ihren abschiebenden Charakter für das nordwestlich gelegene Vorland seit RU-1 beibehält.

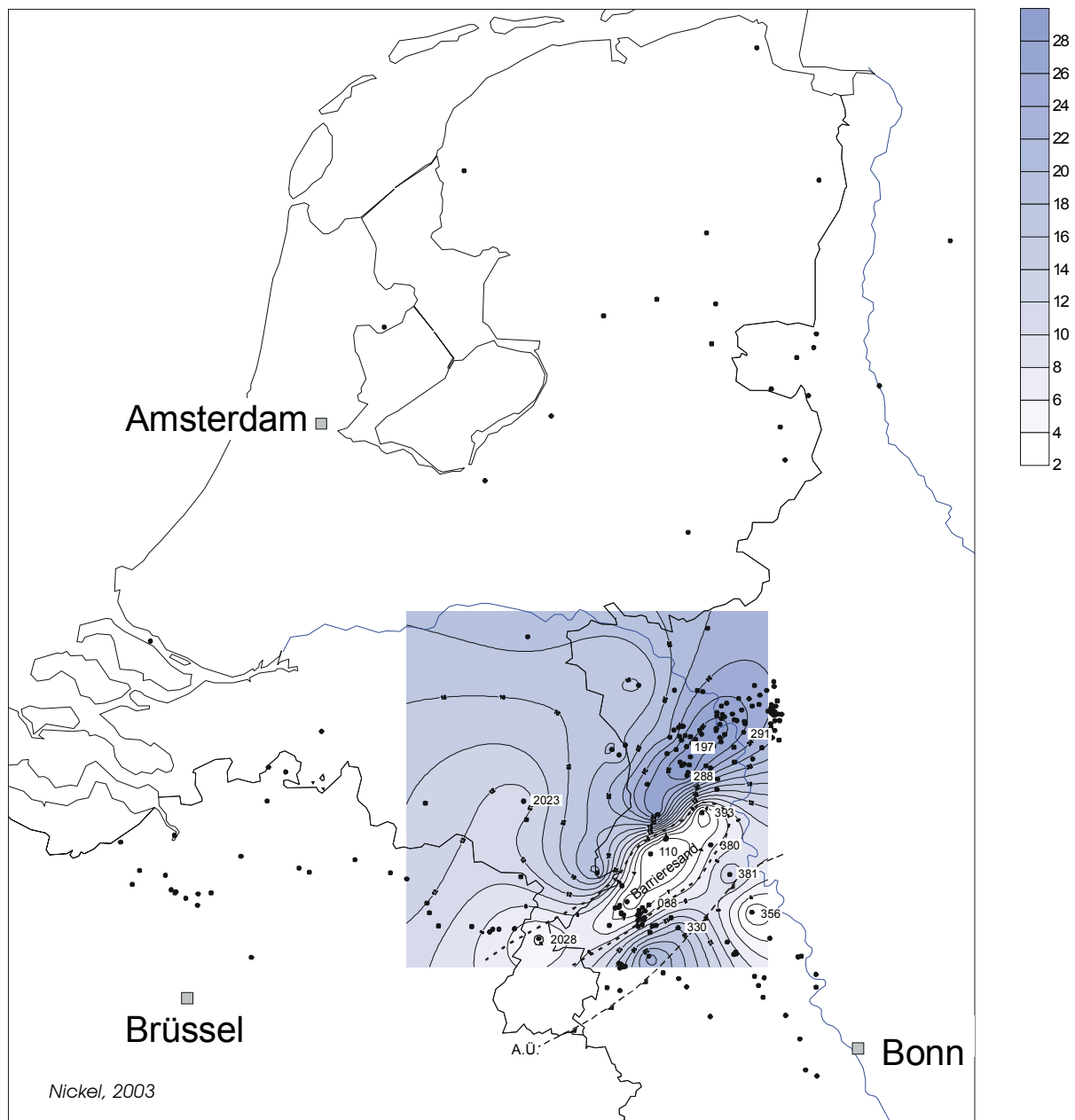


Abb. 3.7: Mächtigkeitsverteilung Einheit RU-2 – ohne Einheiten RT und Kerniel

Mächtigkeitsverteilung der Einheit RU-2 ohne die Einheiten -RT und -Kerniel in der Referenzregion abgeleitet aus Profilen und Bohrungen (z.T. mit Bohrnummern), Datenbasis berechnet aus Gesamtmächtigkeiten von RU-2 ohne die Einheiten RU-2-RT und RU-2-Kerniel; Mächtigkeiten extrapoliert; A.Ü.: Verlauf der Aachener Überschiebung, sonstige Störungen nicht ausgehalten; gestrichelte Linie zeichnet Erstreckung des Kerniel-Barrieresands nach; Isopachenabstand: 2 m, Isopachenintervall: 2 m – 28 m

Die Lage des Kerniel-Sandes entspricht ziemlich genau der Position des variszischen Wau-bach-Sattels (VAN DEN BERG 1996) nördlich der Aachener Überschiebung, der vermutlich durch Kompression aus SE als Schwelle im submarinen Relief entwickelt wurde. Schließlich verläuft die spindelförmige Zone größter Mächtigkeit der RU-2-Sedimente und der Untereinheit RU-2-RT im variszischen Streichen von Essener und Emscher Mulde.

Die Korngrößenverteilung innerhalb des Kerniel-Sandes lässt auf eine grobkörnige Sedimentation im Südwesten schließen, die nach NE kontinuierlich feinkörniger wird. Ursächlich dafür kann nur eine Kippung der Referenzregion sein, die zu einer Absenkung im NE (Ruhrgebiet und angrenzende Gebiete) geführt hat, während der Südwesten stetig oberhalb der Wellenbasis lag. Zwar sind die Störungen, die zur Kippung des Gebietes geführt haben, nicht genau spezifizierbar, doch dürfte der Auslöser für diese Bewegung die neogene Extensionstektonik ausgehend vom Niederländischen Zentralgraben und das damit verbundene Einbrechen der Niederrheinischen Bucht entlang der NW-SE-verlaufenden Randstörungen gewesen sein.

Die beckenweit zu beobachtenden vier Untereinheiten, die selbst in der grobkörnigeren Kerniel-Fazies in abgeschwächter Form zu sehen sind, lassen sich mit tektonischen Bewegungen allein nicht erklären, da eine viermalige Hebung und Senkung des kompletten Arbeitsgebiets von Belgien bis nach Sachsen-Anhalt unwahrscheinlich ist. Vielmehr ist eine kontinuierliche Subsidenz anzunehmen. Um die viermalige Zyklizität in der hier beobachteten Größenordnung zu erreichen, sind kurze Meeresspiegelschwankungen, die neben den Strömungen und Korngrößen auch die Geochemie der Sedimente beeinflussten, die wahrscheinlichste Erklärung.

3.1.3 Einheit RU-3

Definition

Die Einheit RU-3 beginnt im Liegenden an der Grenze III mit erhöhten Gamma Ray-Werten in einer tonigen Abfolge (Abb. 2.4). Sowohl in Kernmaterial als auch in Tongruben entspricht diese Grenze einem Farbumschlag von grau nach schwarz (VANDENBERGHE 1978). Die abrupte Erhöhung der Gamma Ray-Werte ist beckenweit zu beobachten und ein wichtiger Hinweis auf eine bedeutende marine Überflutungsfläche mit chronostratigraphischer Relevanz. Diese Vermutung wird zusätzlich gestützt, da es im Anschluss an die Transgression zu einer Phase mit vermindertem Sedimenteintrag (condensed section, Kap. 2.4.1.2) kam. Deshalb konnte die Grenze III für alle Rupelprofile als chronostratigraphischer Korrelationshorizont genutzt werden. Die obere Grenze von RU-3 (Grenze IV) ist durch eine deutliche Verminderung der Gamma Ray-Werte auf das Niveau von RU-2 gekennzeichnet. RU-3 ist im gesamten Arbeitsgebiet verbreitet und liegt konkordant über RU-2.

Da die Festlegung der unteren und der oberen Grenze von Einheit RU-3 im Wesentlichen auf der Analyse von Gamma Ray-Logs beruht, konnten alle älteren Bohrungen, die nur über eine Kombination von Eigenpotenzial- und Widerstands-, nicht aber über Gammastrahlungsmessungen verfügen, nicht in die Auswertungen einbezogen werden. Dies trifft insbesondere auf alte Bohrungen aus Norddeutschland und den Niederlanden zu.

Synonyme / regionale Bezeichnungen

Wie für die liegenden Einheiten RU-1 und RU-2 gibt es im Arbeitsgebiet unterschiedliche lithostratigraphische Bezeichnungen für die Schichten, die zu RU-3 gerechnet werden. Eine Differenzierung in distale und küstennahe Einheiten, wie sie für RU-2 vorgenommen wurde, existiert für RU-3 nicht. In Belgien ist RU-3 Teil des Boom Clay, in der Niederrheinischen Bucht gehört die Einheit zu den Lintfort-Schichten, in den Niederlanden zum Rupel Clay und in Nord- und Ostdeutschland zum Rupelton bzw. zum Septarienton. Für die Nordseebohrung 2099 sind keine lithostratigraphischen Bezeichnungen bekannt.

Lithologie / Fazies

Wie die Benennung der stratigraphischen Einheiten bereits andeutet, hebt sich die Einheit RU-3 lithologisch zunächst nicht augenfällig von RU-2 ab. In beiden Fällen handelt es sich um eine tonig-siltige Abfolge. Neben RU-2-RT ist RU-3 die Einheit mit der geringsten Korngröße, was sich insbesondere durch niedrige Widerstandsmesswerte nachweisen lässt. Der wesentliche Unterschied gegenüber den liegenden Schichten ist an der Basis von RU-3 ein abrupter Anstieg der Gamma Ray-Werte um bis zu 50 API auf maximal 150 API. Damit kann die tonige Einheit RU-3 scharf gegenüber der liegenden Einheit RU-2 durch die Grenze III abgetrennt werden. Im unteren RU-3-Abschnitt ist ein mehrfacher Wechsel der Gammastrahlungswerte mit extrem hohen Ausschlägen zu beobachten.

In Abbildung 2.4, in der die charakteristischen Sedimentationseinheiten exemplarisch der Bohrung 185 zugeordnet wurden, ist RU-3 in nahezu idealtypischer Weise zweigeteilt abgebildet: Bis zu drei Gamma Ray-Peaks mit Werten > 150 API können im unteren Teil von RU-3 unterschieden werden, die Widerstandsmessungen zeigen für Tone typische geringe Messwerte mit wenig Veränderungen und die Schall-Laufzeiten im Sonic-Log sind an der Basis von RU-3 geringer als in der liegenden Einheit RU-2. Charakteristisch für den oberen Abschnitt von RU-3 ist ein erneuter, nun aber stetiger Anstieg der Gammastrahlungs-Werte, wobei die Maximalwerte des unteren Teils nicht erreicht werden. Auch gibt es in diesem Teil keine markanten Peaks mehr. Die Widerstands- und die Dichtewerte sind höher als im unteren Teil von RU-3, die Schall-Laufzeiten etwas länger.

Die Einheit RU-3 kann weit nach Belgien hinein verfolgt werden. In den bearbeiteten Bohrungen ähnelt die in der nordostbelgischen Bohrung 2114 beobachtete Abfolge am ehesten der in Abb. 2.4 definierten Einheit RU-3. In allen anderen Bohrungen Belgiens hingegen ist der untere Teil von RU-3 als geringmächtiger Horizont mit maximal zwei Gamma Ray-Peaks zu erkennen. Der obere Teil weist geringere Höchstwerte auf und ist nur schwer von den hangenden Sedimenten zu unterscheiden.

Die markanten Gamma Ray-Spitzen können in der Niederrheinischen Bucht am besten in den Bohrungen 102, 185 und 188 auf der nördlichen Krefeld-Scholle beobachtet werden (Profil 1, Abb. A2.1). Im Profil 5 (Abb. A2.5) können die drei Gamma Ray-Spitzen von Nordostbelgien im Westen bis zur Krefeld-Scholle im Osten über fast 70 Kilometer miteinander korreliert werden, ehe die Muster in den Randbereichen schwächer werden und ganz auskeilen. Die Anzahl der Maxima in den weiter südlich bzw. südwestlich gelegenen Bohrungen ist zwar reduziert, die höchsten Werte erreichen aber trotzdem mehr als 140 API. In den Spectralog-Messwerten der Bohrung 006 (Burghof) lassen sich die für RU-3 charakteristischen Messwerte auf eine erhöhte Uran-Komponente zurückführen, da in der gleichen Schicht die Messwerte der Kalium- und Thorium-Anteile kaum verändert sind (Abb. 2.3, Abschnitt B). Durch diese Beobachtung ließ sich RU-3 in der südlichen Niederrheinischen Bucht zweifelsfrei nachweisen, obwohl RU-3 dort nur sehr geringmächtig entwickelt ist (Bohrung 029, Tetz).

Die charakteristischen Höchstwerte sind bis in die östlichen Niederlande hinein in den Bohrungen Broekhuizenvorst (331), Arcen (2024) und 2023 (Asten 2) erkennbar (Abb. 3.8). Aus den Messwerten geht zusätzlich hervor, dass die Sedimente nach Westen hin gröber werden. Die einzige niederländische Stratigraphie-Referenzbohrung, in der die Einheit RU-3 abgegrenzt werden konnte, ist aufgrund der Messkombination die Bohrung Doornspijk 2 (Bohrung 2007). Obwohl darin die aus der Niederrheinischen Bucht beschriebenen Extrem-Messwerte fehlen, ist RU-3 als Abschnitt mit den höchsten Messwerten in der Rupel-Abfolge eindeutig zu identifizieren.

In der Nordseebohrung 2099 ist der Anstieg der Gamma Ray-Werte an Grenze III um nur 10 API zwar relativ niedrig, allerdings ist die abrupte Zunahme auch hier deutlich erkennbar. Dagegen wird in der norddeutschen Forschungsbohrung Wursterheide bei Cuxhaven (Bohrung 2058, Profil 2, Abb. A2.2) die sehr geringmächtige Abfolge RU-3 von den Gammastrahlungsmessungen nicht ausreichend aufgelöst. Die liegende Grenze III konnte dank der sedimentpetrographischen Kernaufnahme von MENGELING (1989) festgelegt werden. Die zu RU-3 zugeordneten Sedimente bestehen aus festem siltigem, kalkigem, fossilführendem und teilweise geschichtetem Ton mit olivgrauer, lagenweise olivschwarzer Färbung. In den östlichsten Bohrungen des Arbeitsgebiets (2098, 2124 und 2123) lässt sich RU-3 sehr gut gegen-

über den liegenden und hangenden Einheiten abgrenzen, da die gemessenen Gammastrahlungswerte jeweils zu den höchsten der durchteuften Rupelabfolge gehören. So variieren die Messwerte zwischen 90 und 120 API, wobei keine markanten Maxima wie in der Niederrheinischen Bucht zu finden sind. Von der Kernbohrung 2098 ist bekannt, dass der zu RU-3 gehörende Abschnitt aus dunkelolivgrünem kalkfreiem Ton besteht und kein Nannoplankton enthält.

Die Einheit RU-3 ist die ungewöhnlichste der gesamten Oligozän-Abfolge. Das liegt an den z.T. stark überhöhten Gammastrahlungswerten mit maximal drei deutlich unterscheidbaren Spitzen, die eindeutig auf die Uran-Komponente zurückzuführen sind, da die Kalium- und Thorium-Werte sich im gleichen Abschnitt nicht nennenswert verändern (Abb. 2.3, B). Hohe Uran-Gehalte sind nicht nur ein Hinweis auf einen hohen Gehalt an organischem Material in stagnierenden anoxischen Gewässern (RIDER 1996) sondern auch auf verminderte Sedimentationsraten. Eine mögliche Erklärung für die weite Verbreitung der charakteristischen Horizonte ist ein wiederholter Kaltwassereintrag, der am Meersboden in einer submarinen Senke über einen längeren Zeitraum für eine sehr stabile Wasserschichtung sorgte. Von niederländischen Bearbeitern wurden für diesen Horizont z.T. euxinische Bedingungen beschrieben, in einigen Fällen konnte Pyrit gefunden werden, was ebenfalls ein anoxisches Ablagerungsmilieu belegt (VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE 1997). Problematisch ist die Rekonstruktion der Wassertiefe, in der die Sedimente abgelagert wurden. Unstrittig ist, dass es sich im gesamten Arbeitsgebiet um Schelftone handelt. Während VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE (1997) für die Niederlande mittlere bis innere Schelfbedingungen rekonstruierten, liegt die Nordseebohrung 2099 im Bereich des Äußeren Schelfs. DILL et al. (1997) schlossen aus den sedimentpetrographischen und geochemischen Daten für die Bohrung 2098 auf einen inneren Schelf und flache subtidale Bedingungen.

Die hohen Messwerte, deren Zuordnung zu uranreichen Partikeln und nicht zuletzt die überregional gleichförmige Verbreitung dieses Horizonts bis in den Oberrheingraben (DERER et al. 2003) legen den Schluss nahe, dass es sich bei RU-3 um eine condensed section handelt (LOUTIT et al. 1988, VAN WAGONER et al. 1990, WALKER & JAMES 1992, RIDER 1996). Sie deutet nach DAVIES & ELLIOTT (1996) auf eine maximum flooding surface hin und dient als chronostratigraphischer Bezugshorizont für die Abfolge im gesamten Arbeitsgebiet.

Mächtigkeiten / Tektonik

Im Abschnitt RU-3 veränderte sich die Lage des Sedimentationszentrums in der Referenzregion gegenüber RU-2 sowohl in der Form als auch in der Ausrichtung: Zum einen ist die Zone größter Mächtigkeit nicht mehr spindel-, sondern breit schüsselförmig (Abb. 3.8). Zum

anderen gleicht die Verteilung der Mächtigkeiten des Sedimentationszentrums stärker der für das gesamte Rupel (Abb. 3.1) und der Einheit RU-1 (Abb. 3.3) als der direkt unterlagernden Einheit RU-2.

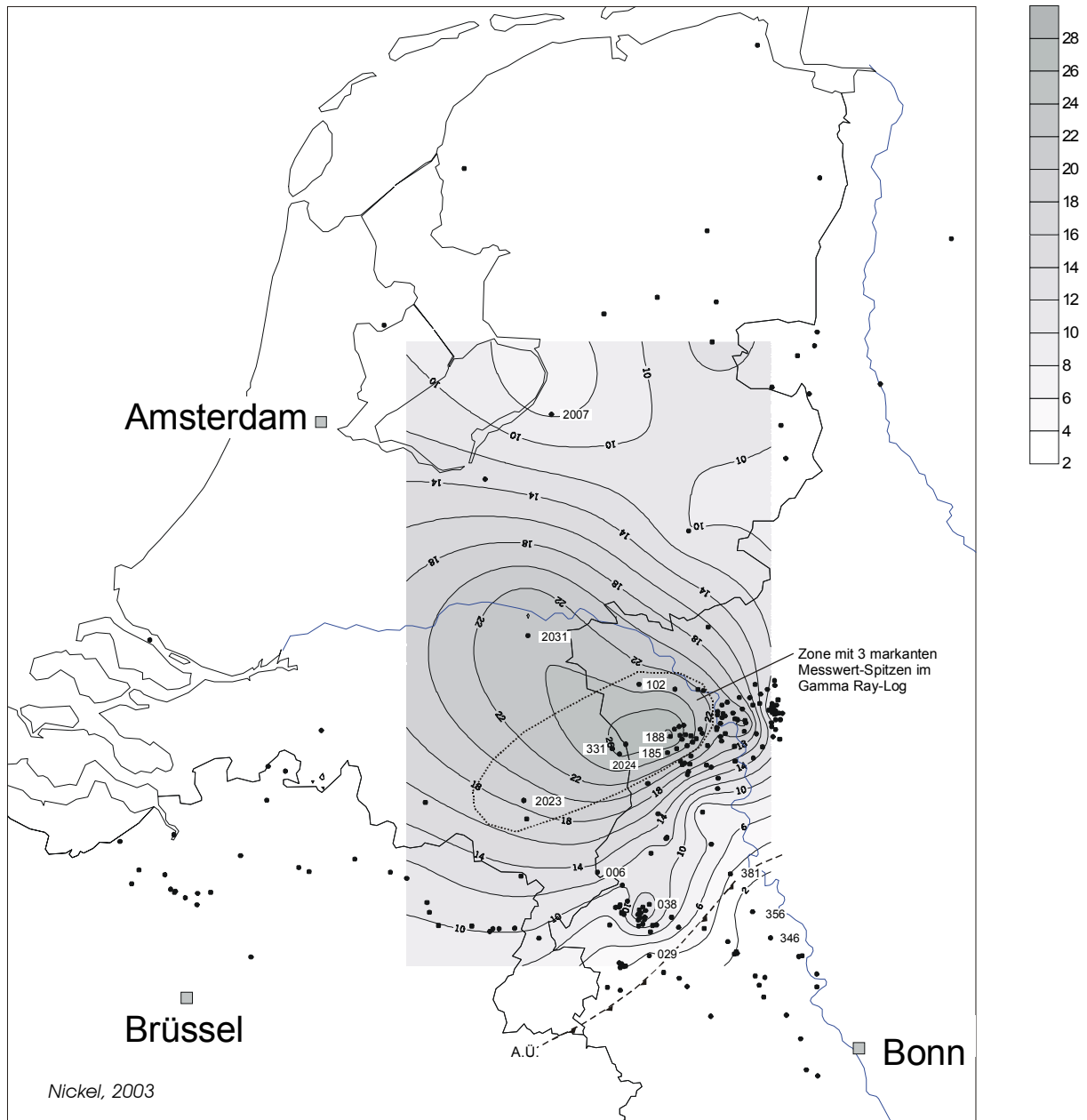


Abb. 3.8: Mächtigkeitsverteilung Einheit RU-3
Mächtigkeitsverteilung in der Referenzregion abgeleitet aus Profilen und Bohrungen (z.T. mit Bohrnummern), Mächtigkeiten extrapoliert; A.Ü.: Verlauf der Aachener Überschiebung, sonstige Störungen nicht ausgehalten; Isopachenabstand: 2 m, Isopachenintervall: 2 m – 28 m

Die größten Mächtigkeiten innerhalb der Niederrheinischen Bucht finden sich mit 28,5 m auf der nördlichen Krefeld-Scholle und auf der westlich benachbarten Venlo-Scholle. Auf der südlichen Krefeld-Scholle konnten in der Bohrung 381 mit 4 Metern und auf der Erft-Scholle in der Bohrung Tetz (Bohrung 029) mit 3,5 Metern nur geringe Mächtigkeiten nachgewiesen

werden. Auf der Köln-Scholle fehlt RU-3 in den Bohrungen 356 (Knechtsteden) und 346 (Pulheim) ganz. In den Niederlanden besitzen die Bohrungen Brokhuizenvorst (331) und Arcen (2024) in unmittelbarer Nachbarschaft des Sedimentationszentrums in der Niederrheinischen Bucht mit 26 Metern bzw. 26,5 Metern die größten RU-3-Mächtigkeiten. In der Bohrung 2007 (Doornspijk 2) südlich des IJsselmeers ist RU-3 hingegen nur 6 Meter mächtig (Abb. 3.10). Auch in der Nordseebohrung 2099 beträgt die Mächtigkeit nur 8 Meter.

In den ausgewerteten Bohrungen Norddeutschlands konnte die geringste RU-3-Mächtigkeit mit 3,9 Metern in der Forschungsbohrung Wursterheide nachgewiesen werden. Damit ist die Einheit RU-3 dort - wie schon die liegende Einheit RU-2 - geringmächtiger entwickelt als in den umgebenden Bohrungen. Auch im Südosten des Arbeitsgebiets lassen sich Parallelen bei der Mächtigkeitsverteilung zwischen RU-3 und RU-2 beobachten: So befinden sich die größten Mächtigkeiten in Ostdeutschland mit mehr als 26 Metern wieder in den Bohrungen Gartow (2098) und BKB 284 (2123).

Insgesamt ist RU-3 durch eine sehr gleichmäßige Sedimentation gekennzeichnet. Eine Sonderentwicklung mit ausgeprägter fazieller Differenzierung wie in der südlichen Randfazies in der liegenden Einheit RU-2 gibt es nicht, vielmehr ist in der Referenzregion eine gleichförmige Subsidenz mit einem Zentrum in der nördlichen Niederrheinischen Bucht und den direkt benachbarten Gebieten der Niederlande zu beobachten. Die Zone der größten Mächtigkeiten ist gleichzeitig die Region, in der bis zu drei markante Spitzen im Gamma Ray unterschieden werden können (Abb. 3.8). Das bedeutet, dass in dieser Region aufgrund der kontinuierlichen Subsidenz vermutlich die größtmögliche Auflösung der anoxischen Zeitabschnitte am Meeresboden abgebildet wurde.

Die Verteilung der Sedimente in der Niederrheinischen Bucht ist ein Indiz dafür, dass die Aachener Überschiebung noch einmal die südöstliche Begrenzungslinie für die Sedimentation in der Referenzregion gewesen sein könnte, da sich südlich keine RU-3-Sedimente nachweisen lassen (Abb. 3.8). Ein dem variszischen Streichen folgendes Sedimentationsmuster wie in RU-2-RT ist in dieser Einheit jedoch nicht mehr zu erkennen. Allenfalls im Verlauf der Zone mit den markanten Gamma Ray-Höchstwerten lässt sich ein SW-NE-Streichen erahnen, was auf eine abnehmende Bedeutung des paläozoischen Strukturmusters auf die Sedimentation während des RU-3-Zeitabschnitts deutet.

Während für die übrigen Bohrungen Norddeutschlands und der Nordsee in Profil 2 (Abb. A.2.2) eine ähnliche Mächtigkeitsverteilung wie in Einheit RU-2 zu erkennen ist, weicht die Bohrung 2058 (Wursterheide) mit nur sehr geringen Mächtigkeiten davon ab, was auf synsedimentäre Halokinese zurückzuführen sein könnte. In Ostdeutschland entsprechen die größten

Mächtigkeiten der RU-3-Sedimente erneut denen der Niederrheinischen Bucht. Da nicht nur die Mächtigkeiten in den beiden Sedimentationszentren, sondern auch die Beschaffenheit der Sedimente und die relative Position in Bezug auf das variszische Streichen vergleichbar sind, deutet dies auf großräumig ähnliche tektonische Bewegungen. Während RU-2 wurde hierfür die alpine Kompressionstektonik verantwortlich gemacht, die am Südrand des tertiären Nordseebeckens Senken im variszischen Streichen bildete. Diesem Modell zufolge müsste weiter nördlich ein isostatisch bedingter Aufstieg der Kruste für verminderte Sedimentmächtigkeiten gesorgt haben.

Ein Vergleich mit den Mächtigkeitsverteilungen der hangenden Einheiten legt zudem den Schluss nahe, dass sich während der Einheit RU-3 ein wichtiger Wechsel im tektonischen Bauplan des Arbeitsgebietes vollzieht. Bis zu jenem Zeitabschnitt wurden die Einheiten von der Reaktivierung variszischer Elemente durch alpine Kompressionsbewegungen beeinflusst. Die neogene Extensionstektonik, die die Niederrheinische Bucht und die angrenzenden belgischen und niederländischen Gebiete als Ausläufer des Niederländischen Zentralgrabens bis heute beeinflusst, spielte bis dahin noch keine entscheidende Rolle. Während der neue Strukturplan ab der hangenden Einheit RU-4 erkennbar ist, muss RU-3 als Übergangseinheit angesehen werden.

Biostratigraphie / Alter

Die biostratigraphischen Altersangaben für die Einheit RU-3 ergeben ein sehr einheitliches Bild für das gesamte Arbeitsgebiet. Obwohl Dinoflagellatenuntersuchungen aus den vorliegenden belgischen und niederländischen Bohrungen nicht bekannt sind, ist die Einstufung der kompletten Einheit RU-3 in Dinoflagellatenzone D 14na anhand der niederrheinischen Bohrung 288, der nord- und ostdeutschen Bohrungen 2058, 2098 und 2123 sowie der Nordseebohrung 2099 möglich (BENEDEK 1972, KÖTHER 1990, 1992, 1994). In Bohrung 2124 enthält nur die Basis von RU-3 Dinoflagellaten-Zone D 14na, für den Rest der Einheit liegen keine Untersuchungsergebnisse vor (KÖTHER 1995). Bei der Datierung mit kalkigem Nanoplankton gibt es ebenfalls keine Abweichungen. Im gesamten Arbeitsgebiet von den belgischen Bohrungen im Westen bis zur östlichsten Bohrung 2124 in Sachsen-Anhalt liegt die Einheit RU-3 innerhalb der Nanoplankton-Zone NP 23.

3.1.4 Einheit RU-4

Definition

Die Untergrenze der Einheit RU-4 kann in den geophysikalischen Messprofilen an mehreren Merkmalen festgemacht werden. Aus den Gammastrahlungs-Messwerten geht hervor, dass RU-4 mit gröberem Sediment als die liegende Einheit RU-3 beginnt. Die Messwerte gehen auf das Niveau von RU-2 zurück und heben sich damit deutlich von RU-3 ab. Aus den Widerstands- und Eigenpotenzialmessungen kann ebenfalls eine Vergröberung der Sedimente an der Grenze RU-3/RU-4 abgeleitet werden (Abb. 2.4 bzw. Bohrung 2031 in Abb. A2.4). Im oberen Abschnitt geht RU-4 in einen leichten fining-up-Trend über. Die Obergrenze der Einheit RU-4 wird im Wesentlichen durch die Basis der hangenden Einheit RU-5 definiert, die gegenüber RU-4 niedrigere Gammastrahlungs- und erhöhte Widerstandswerte aufweist. RU-4 ist im gesamten Arbeitsgebiet verbreitet und liegt weitgehend konkordant über RU-3, Erosionshorizonte sind nicht erkennbar.

Synonyme / regionale Bezeichnungen

Die neu definierte Einheit RU-4 umfasst wie die liegende Einheit RU-3 Teile der Lithostratigraphie-Einheiten des Boom Clay in Belgien, der Lintfort-Schichten in der Niederrheinischen Bucht, des Rupel Clay in den Niederlanden, des Rupelton in Norddeutschland und des Septarienton in Ostdeutschland. Für die Sedimente der Nordseebohrung 2099 existieren keine lithostratigraphischen Bezeichnungen.

Lithologie / Fazies

Die Synonyme lassen erkennen, dass sich die Lithologie der Einheit RU-4 in weiten Teilen des Arbeitsgebiets nicht wesentlich gegenüber Einheit RU-3 ändert. Gleichwohl unterscheidet sich die Einheit RU-4 von RU-3 durch eine veränderte Zusammensetzung und Geochemie der Sedimente, da der Anteil an organischem Material wesentlich geringer und der Kalkgehalt der Sedimente höher ist. Auffallend ist zudem ein abrupter Rückgang des Kaolinitanteils an der Grenze RU-3/RU-4, der durch tonmineralogische Untersuchungen an Proben der Bohrung Gartow nachgewiesen wurde (DILL et al. 1997). Während die Gamma Ray-Messwerte an der Basis von RU-4 um ca. 20 bis 30 API niedriger ausfallen, lassen die Widerstandswerte in weiten Teilen des Arbeitsgebiets an dieser Position auf eine leichte Vergröberung der Sedimente schließen. Die Einheit RU-4 wird daher als weit verbreitete tonig-siltige Schelffazies interpretiert. Bis zur hangenden RU-5-Einheit ist in der Regel ein schwacher Fining-Up-Trend zu beobachten (Abb. 2.4). Seit Beginn des Rupel ist RU-4 im Arbeitsgebiet die erste regressiv geprägte Einheit.

Im Südwesten der Referenzregion sind in der Nähe der Paläoküste im unteren Teil von RU-4 siltige und sandige Sedimente eingeschaltet. In Nordost-Belgien führt dies zur Kartierung

eines Küstensandes als eigenständige Einheit, die als Eigenbilzensand bezeichnet wird (LE-ROI 1995, VERSTRAELEN 1996). Die Sedimente im Hangenden des Eigenbilzensandes werden jedoch wieder zum Boom Clay gerechnet, sofern sie nicht durch spätere Erosion in Folge der Hebung der Ardennen und des Brabanter Massivs (VANDENBERGHE et al. 1998) gänzlich fehlen. Auch in der Niederrheinischen Bucht gibt es sandige Partien im Niveau der oberen Lintfort-Schichten, die allerdings nicht als eigenständige Einheit kartiert werden. Die regionale Verteilung zeigt, dass die RU-4-Sedimente in der westlichen Niederrheinischen Bucht gröber sind als im Osten, was sowohl eine west-östliche Transportrichtung als auch eine Verbindung mit den belgischen Sanden nahelegt.

An der Basis von RU-4 werden von KLOSTERMANN et al. (1990) in der Kernbohrung 110 auf der Venlo-Scholle (Profil 6, Abb. A2.6) Feinsande mit stabilem Schwermineralspektrum beschrieben, die im oberen Abschnitt mit Disthen, Andalusit und Sillimanit instabilere metamorphe Schwerminerale enthalten. Dies ist ein weiterer Hinweis auf verstärkte Aufarbeitung der Sedimente an der Basis, da nur die stabilen Schwerminerale angereichert wurden. Im oberen Abschnitt lässt der Grad der Aufarbeitung offenbar nach, da der Anteil an instabilen Mineralen steigt. Desweiteren lässt sich als Liefergebiet für die metamorphen Minerale nur eine skandinavische Quelle ableiten, da die restlichen Anrainergebiete der tertiären Nordsee diese Minerale sehr wahrscheinlich nicht liefern konnte.

In Kernbohrungen aus Nord- und Ostdeutschland werden aus RU-4 Mergel beschrieben, die auf verminderte organische und erhöhte Karbonat-Anteile deuten (DILL et al. 1997). In der Bohrung Wursterheide (Bohrung 2058) besteht der Mergel überwiegend aus Überresten von Planktonforaminiferen (MENGELING 1989).

Die Befunde aus den Bohrlochmessungen und den wenigen gekernten Bohrungen lassen auf eine beckenweite Veränderung in der hydrologischen und geochemischen Situation gegenüber der liegenden Einheit RU-3 schließen. Die anoxischen Bedingungen zur Zeit der Entstehung von RU-3 existierten nicht mehr, allerdings zeigen stark schwankende Gamma Ray- und Widerstandswerte an der Basis von RU-4, dass die Reduzierung des organischen Anteils in den Sedimenten nur schrittweise und gleichzeitig mit vermehrtem klastischen Sedimenteintrag erfolgte. Das stabile Schwermineral-Spektrum an der Basis von RU-4 sowie die Sande in der Niederrheinischen Bucht und in Nordost-Belgien weisen zudem auf eine stärkere Aufarbeitung der Sedimente hin, was in dieser Region auf eine Position oberhalb der Sturmwellenbasis und damit auf eine Verflachung des Ablagerungsraums hindeutet. Die Mergel in Norddeutschland lassen sich nach DILL et al. (1997) mit der Existenz von submarinen Schwellen auf einem kalkigen siliziklastisch geprägten Schelf erklären. In der Nordseebohrung 2099

wird für diesen Abschnitt aufgrund von Foraminiferenuntersuchungen eine Position an der Grenze zwischen Äußerem Schelf und Kontinentalhang angegeben (VON DANIELS 1992).

Mächtigkeiten / Tektonik

Mit RU-4 ändert sich der Bauplan der Referenzregion, da das bisherige gleichmäßige trogförmige Muster nicht mehr zu erkennen ist. Die Isopachenlinien sind im Gegensatz zu den liegenden Einheiten unregelmäßiger angeordnet (Abb. 3.9) und das Sedimentverteilungsmuster folgt ebenfalls anderen Strukturen.

Dies ist neben einem vermehrten klastischen Eintrag in dieser Region auch ein Hinweis auf die Etablierung des bis heute dominierenden Systems des Niederländischen Zentralgrabens mit einer NW-SE streichenden neogenen Extensionstektonik ab RU-4. Diese führte dazu, dass es ab RU-4 von Süden her entlang der Peelrand-Verwerfung zu einer Abschiebung des Rurgrabens gegenüber der östlich angrenzenden Venlo-Scholle kam. Diese Entwicklung war gleichzeitig die Geburtsstunde des Rurgrabens.

Die Venlo-Scholle zwischen dem Rurgraben im Westen und der Krefeld-Scholle im Osten nahm in dieser Zeit eine Hochposition ein. Diese Annahme wird durch die Aufarbeitung der Feinsande an der RU-4-Basis in Bohrung 110 zusätzlich gestützt. Während RU-4 machte sich erstmals der Viersener Sprung bemerkbar, an dem die Krefeld-Scholle im Osten absank und über 30 Meter mehr Sedimente aufnahm als die westlich angrenzende Venlo-Hochscholle. Die Subsidenz des Rurgrabens und der Krefeld-Scholle sind Ausdruck der Dehnung der Erdkruste, da die größten Mächtigkeiten mit mehr als 40 Metern in der Bohrung Asten 2 (2023) im Rurgraben sowie in den Bohrungen 102 (Uedem) und 393 (GLA) auf der Krefeld-Scholle nachgewiesen werden können.

An der Grenze zwischen der Erft- und der Köln-Scholle kam es am Erft-Sprungsystem zur Absenkung der Ville, wie sich aus den RU-4-Mächtigkeitsangaben für die Bohrung 008 ableiten lässt. Dies führte zusammen mit den Sedimenten auf der nördlichen Köln-Scholle erstmals zur Ablagerung nennenswerter Mächtigkeiten südlich der Aachener Überschiebung, die damit ab RU-4 zwar ihre Bedeutung als südliche Begrenzung der Sedimentation in der Niederrheinischen Bucht verloren zu haben scheint, aber als markante Trennlinie bestehen blieb. Auf der südlichen Köln-Scholle bleibt die Position der Bohrung 346 weiterhin frei von Rupelsedimenten.

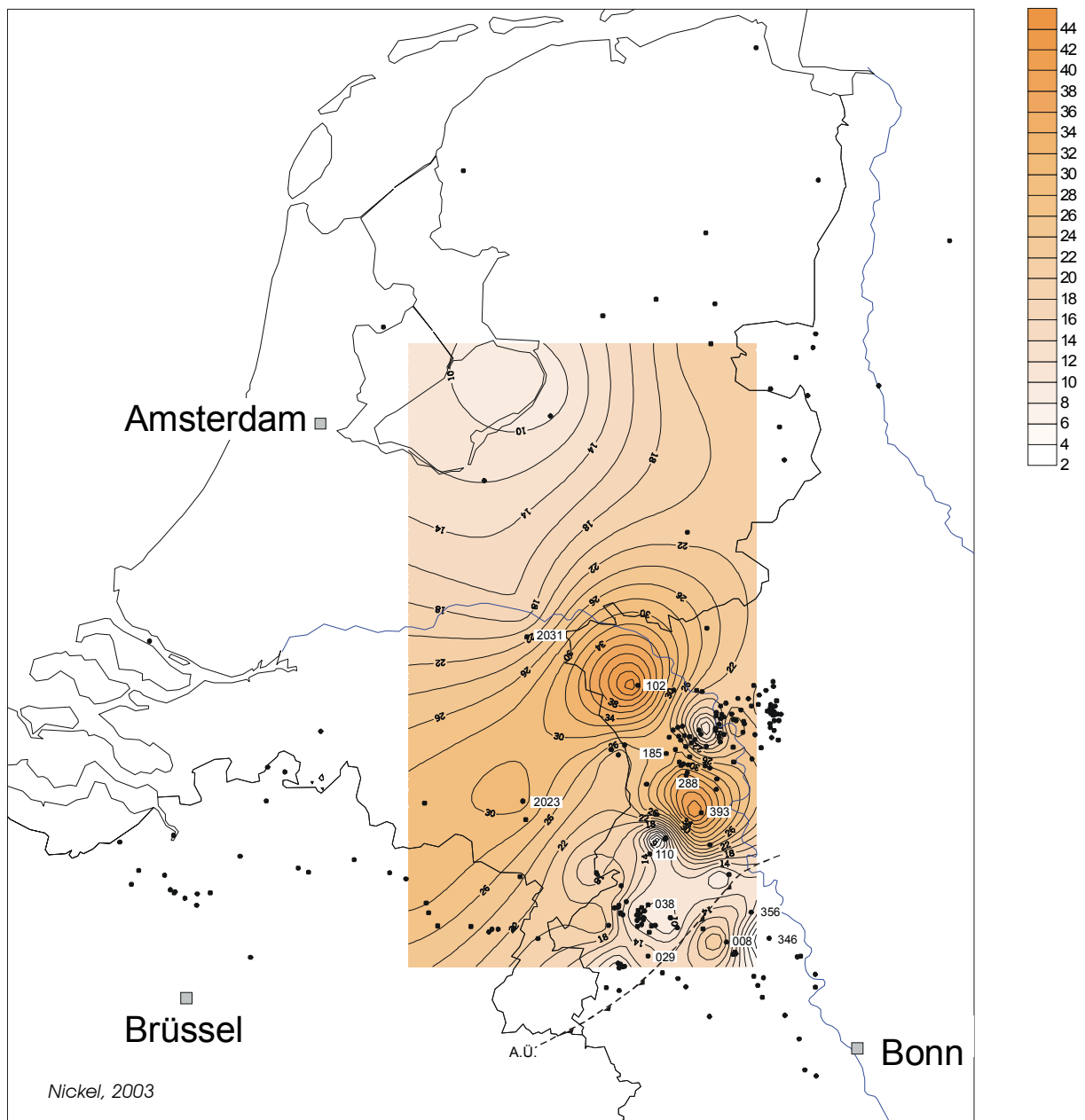


Abb. 3.9: Mächtigkeitsverteilung Einheit RU-4

Mächtigkeitsverteilung in der Referenzregion abgeleitet aus Profilen und Bohrungen (z.T. mit Bohrnummern), Mächtigkeiten extrapoliert; A.Ü.: Verlauf der Aachener Überschiebung, sonstige Störungen nicht ausgehalten; Isopachenabstand: 2 m, Isopachenintervall: 10 m – 44 m

Biostratigraphie / Alter

Innerhalb von RU-4 befindet sich der Übergang von der Dinoflagellatenzone D 14na zur Zone D 14nb. Der kontinuierliche Übergang kann sehr gut in der Nordseebohrung 2099 und in der ostdeutschen Bohrung 2098 (Gartow) nachvollzogen werden (KÖTHER 1992, 1994). Bei beiden Bohrungen liegt die Grenze D 14na/nb in der Mitte der RU-4-Abfolge. Bei den übrigen Bohrungen mit Dinoflagellaten-Untersuchungen ist die Abfolge nicht vollständig erhalten bzw. lückenhaft dokumentiert. In der niederrheinischen Bohrung 288 (BENEDEK 1972) und

der ostdeutschen Bohrung 2124 (KÖTHE 1995) wurde der untere sandige Abschnitt nicht untersucht, die Parallelisierbarkeit der Schichtglieder über viele Kilometer hinweg legt allerdings den Schluss nahe, dass die sandigen Schichten zu D 14na zu zählen sind. Der obere feinkörnige Abschnitt zählt bereits zu D 14nb. In der Bohrung 2058 (Wursterheide, KÖTHE 1990) liegt RU-4 komplett in der Zone D 14nb. Ob der untere Teil aufgrund von Erosion fehlt oder die Auflösung in dem geringmächtigen Abschnitt wegen zu kleiner Probenmengen schlecht war, lässt sich anhand der vorliegenden Daten nicht näher bestimmen.

Aufgrund von Nannoplankton-Datierungen kann RU-4 im gesamten Arbeitsgebiet komplett zur Zone NP 23 gerechnet werden. Die einzige Ausnahme hiervon ist die Abfolge in Bohrung 2098 (Gartow), in der die obersten drei Meter von RU-4 bereits in NP 24 fallen.

3.1.5 Einheit RU-5

Definition

Die Untergrenze der vorwiegend in Form eines coarsening up-Trends entwickelten Sedimente von Einheit RU-5 kann in Gamma Ray-Logs besonders gut festgelegt werden, da in weiten Teilen des Arbeitsgebiets an der Basis niedrigere Gammastrahlungswerte zu beobachten sind als im obersten Abschnitt von RU-4. Auch die Widerstandswerte und die Eigenpotenzialmessungen weisen gegenüber dem oberen Abschnitt von RU-4 auf eine Vergrößerung der Sedimente hin (Abb. 2.4). Die obere RU-5-Begrenzung ist durch einen abrupten Rückgang der Korngröße, die sich in einer Erhöhung der Gammastrahlung und einer Reduzierung der Widerstandsmesswerte äußert, gekennzeichnet. Damit ist RU-5 ähnlich regressiv geprägt wie RU-4, zeigt aber eine stärkere Aufarbeitung und eine größere Variabilität innerhalb der Einheit.

Synonyme / regionale Bezeichnungen

Die Sedimente von RU-5 sind in Belgien Teil des Boom Clay, gehören in der Niederrheinischen Bucht zu den Oberen Lintfort-Schichten, in den Niederlanden zum Rupel Clay und werden in Nord- und Ostdeutschland zum Rupelton bzw. Septarienton gerechnet. Für die Region um die Nordseebohrung 2099 existieren keine eigenständigen lithostratigraphischen Bezeichnungen.

Lithologie / Fazies

Im Gegensatz zu den lithostratigraphischen Begriffen, die eine vorwiegend tonig-siltige Sedimentation erwarten lassen, gibt es im Südwesten des Arbeitsgebiets eine starke Variabilität innerhalb der RU-5-Ablagerungen, in denen teilweise Silte und Feinsande eingeschaltet sind. Die Bandbreite erschließt sich sehr gut entlang des West-Ost-Profiles 6 von Limburg nach Kre-

feld (Abb. A2.6) und senkrecht dazu im Nord-Süd verlaufenden Profil 3 (Abb. A2.3), das von der niederländischen Bohrung Asten 2 in die südliche Niederrheinische Bucht reicht. In Profil 3 zeigen die RU-5-Sedimente im Nordwesten des Profils einen sehr stabilen coarsening-up-Trend in den Widerstandsmessungen, der sich etwa ab der Hälfte des Profils an der Bohrung 038 (Sophia Jacoba) in eine Abfolge weiterentwickelt, bei der charakteristischerweise sowohl in der Gammastrahlungs- als auch in der Widerstandsmessung zwei Maxima ausgeprägt sind.

Dieses Muster ist insbesondere im Südosten der Niederrheinischen Bucht in Bohrungen mit Mächtigkeiten von weniger als 10 Metern zu beobachten. Neben der Bohrung 110 (Profil 6, Abb. A2.6), in der KLOSTERMANN et al. (1990) in Spülproben von der RU-5-Basis gut sortierte quarzreiche Feinsande mit stabilem Schwermineralspektrum fanden, sind dies beispielsweise die Bohrungen 330 (Jackerather Horst in Profil 3) und 029 (Tetz) an der Grenze Venlo-Scholle/Rurgraben in Profil 8 (Abb. A2.8). Dies deutet auf eine küstennahe strömungsbeeinflusste Position hin, an der es zur Aufarbeitung und Sortierung der Sedimente kam. In der östlich benachbarten Bohrung 379 an der Grenze Köln-/ Krefeld-Scholle ist RU-5 sogar nur als einzelne sandige coarsening-up-Einheit entwickelt.

Auf der nordöstlichen Krefeld-Scholle und in der weiteren Verlängerung über die Niederlande bis hinein in die Nordsee kann man in sehr abgeschwächter Form das Muster mit den beiden Maxima am Top und an der Basis von RU-5 ebenfalls beobachten (Profil 1, Abb. A2.1). In einigen Bohrungen, die über ein Sonic-Log verfügen, können einzelne Septarienlagen, wie sie bereits für RU-2 beschrieben wurden, bestimmt werden. In den nord- und ostdeutschen Bohrungen des Arbeitsgebiets ist die Zuordnung nicht immer eindeutig, da die Sedimentmächtigkeiten sehr unterschiedlich ausgeprägt sind (Profil 2, Abb. A2.2). Besser gelingt dies im Vergleich zwischen der Bohrung 288 aus der Niederrheinischen Bucht und der ostdeutschen Bohrung Gartow (2098) (Abb. A2.9), die trotz einer Distanz von 380 Kilometern zwischen den beiden Bohrpunkten ähnliche Muster aufweisen.

Die Fazies wird in weiten Teilen des Arbeitsgebiets als tonig-siltige, z.T. kalkighaltige Sedimentation auf einem mittleren bis inneren Schelf gedeutet. In Hochpositionen kam es zu einer stärkeren Aufarbeitung am Grund, was durch die stabilen Schwermineralanreicherungen in Feinsanden angedeutet ist.

Mächtigkeiten / Tektonik

In der Referenzregion ist die Mächtigkeitsverteilung ähnlich unregelmäßig wie in RU-4, allerdings sind deutlichere regionale Unterschiede erkennbar. Das Sedimentationszentrum befand sich in RU-4 im Osten der Referenzregion auf der Krefeld-Scholle, während es sich in RU-5 nach Westen und damit näher an die belgisch/niederländische Grenze verlagerte. Die

größten Mächtigkeiten mit mehr als 30 Metern weisen die Bohrungen 2023 (Asten 2) und Arcen (2024) auf (Abb. 3.10). Die größte Sedimentdicke des gesamten Arbeitsgebiets wurde in der ostdeutschen Bohrung Gartow (2098) mit bis zu 47 Metern ermittelt. In weiten Teilen Norddeutschlands fehlen dagegen Hinweise auf Ablagerungen von RU-5.

Im Zeitabschnitt RU-5 kam es im Arbeitsgebiet zu verstärkter tektonischer Aktivität. Während in der Referenzregion der heute gültige Strukturplan an Gestalt gewann, kam es in Norddeutschland zu halokinetisch beeinflussten Sedimentationsschwankungen, die sich besonders deutlich in Profil 2 (Abb. A2.2) im Vergleich der Bohrungen Gartow (2098, 47 m) und Wurstterheide (2058, 5 m) zeigen.

In der Niederheinischen Bucht machten sich erstmals die Köln-Scholle und der Wassenberger Horst als neue tektonische Elemente bemerkbar, während sich die Umrisse des Rurgrabens deutlicher abzeichneten. Im Rurgraben kam es zu einer Einsenkung an der Rurrand-Verwerfung nach Süden bis an die Aachener Überschiebung heran, so dass in der Bohrung Straeten (113) große Mächtigkeiten mit mehr als 25 Metern akkumuliert wurden. Der Wassenberger Horst brach gegenüber dem Rurgraben weniger stark ein und ist als kleines Hochgebiet mit geringerer Sedimentbedeckung auf der Isopachenkarte (Abb. 3.10) erkennbar.

Im Westen der Krefeld-Scholle entwickelte sich der Viersener Sprung an der Grenze zur Venlo-Scholle deutlich weiter, nachdem die Struktur bereits in RU-4 angelegt war. Die Mächtigkeitsdifferenz zwischen der Krefeld-Scholle in der Tiefposition und der höher liegenden südlichen Venlo-Scholle mit Mächtigkeiten von weniger als 15 Metern in den Bohrungen 110 und 038 ist deutlich zu erkennen (Abb. 3.10). Auf der Krefeld-Scholle war ein südliches Sedimentationszentrum ähnlich wie in RU-4 von einer Zone größerer Mächtigkeiten im Norden getrennt. Das nördliche Sedimentationszentrum auf der Krefeld-Scholle verlagerte sich gegenüber RU-4 insgesamt weiter nach Südosten, so dass am Ostrand der Scholle die Einheit RU-5 in den Bohrungen 193 und 286 nur noch rund 4 Meter mächtig ist.

Auf der Köln-Scholle wurden in den Bohrungen 356 und 346 nur Mächtigkeiten von weniger als 10 Metern erreicht, weil an der Position der Bohrung 346 RU-5 als erste Rupeleinheit diskordant über Paläozoikum liegt. Für die Ville lassen die größeren Sedimentmächtigkeiten in der Bohrung 008 auf ein Einsinken schließen. Demgegenüber deuten die geringen Mächtigkeiten von weniger als 10 Metern in den Bohrungen 106, 029 (Tetz) und 330 (Jackerather Horst) auf eine fortwährende Aktivität der Aachener Überschiebung.

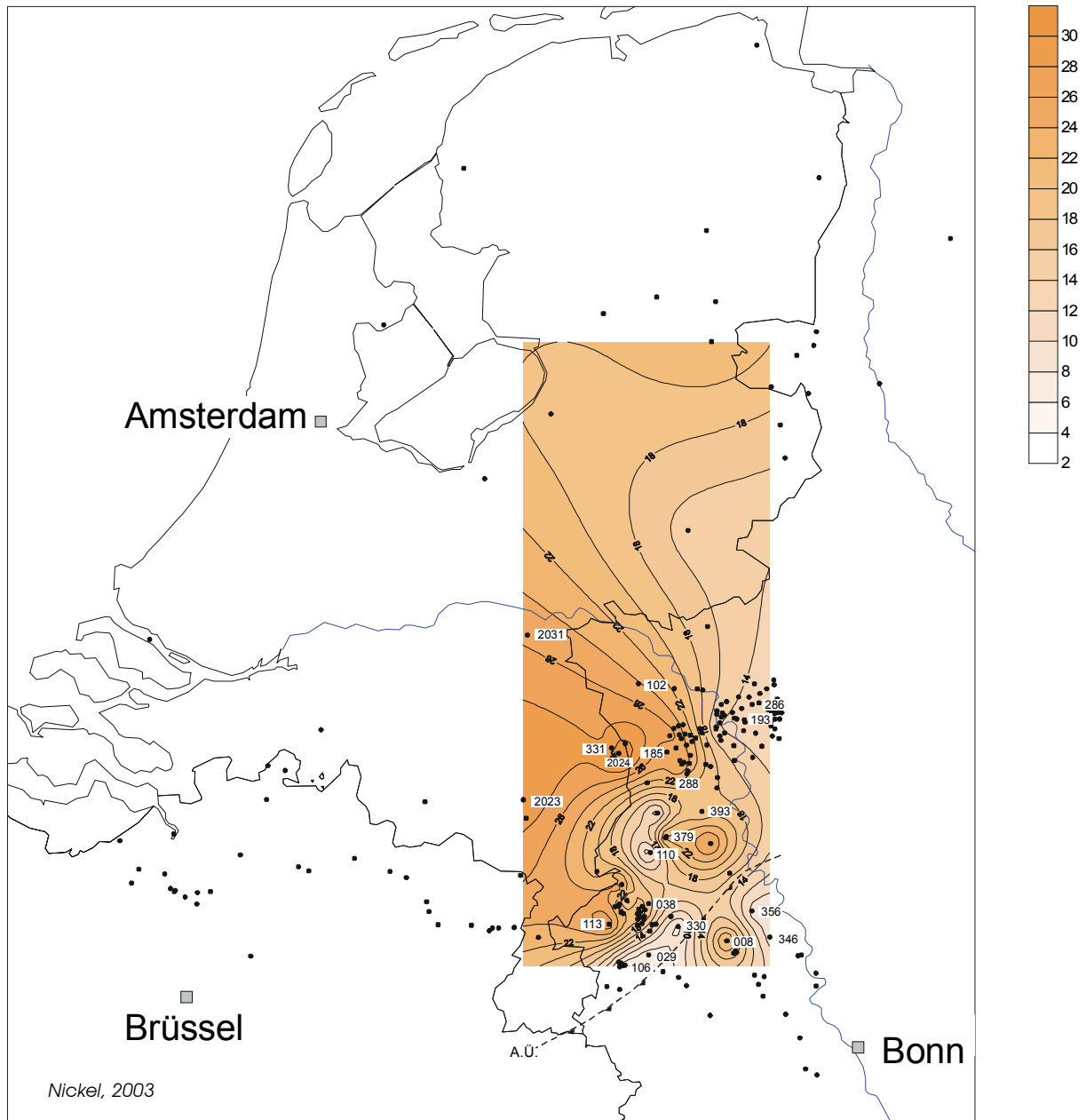


Abb. 3.10: Mächtigkeitsverteilung Einheit RU-5

Mächtigkeitsverteilung in der Referenzregion abgeleitet aus Profilen und Bohrungen (z.T. mit Bohrnummern), Mächtigkeiten extrapoliert; A.Ü.: Verlauf der Aachener Überschiebung, sonstige Störungen nicht ausgehalten; Isopachenabstand: 2 m, Isopachenintervall: 8 m – 30 m

Biostratigraphie / Alter

In sämtlichen Bohrungen, von denen Dinoflagellaten-Untersuchungen vorliegen, konnte RU-5 der Zone D 14 nb zugeordnet werden (BENEDEK 1972, KÖTHE 1990, 1992, 1995). Bei kalkigem Nannoplankton ergibt sich kein eindeutiges Bild. Im Regelfall sind die RU-5-Sedimente der Nannoplankton-Zone NP 24 zuzuordnen, jedoch bilden die niederländische Bohrung Broekhuizenvorst (331) und die Bohrung 2124 in Ostdeutschland Ausnahmen. In der Bohrung Broekhuizenvorst zählt der RU-5-Abschnitt noch vollständig zu NP 23 (VAN ROOIJEN et al. 1984), allerdings wurde die Obergrenze von NP 23 allein aufgrund des Ein-

setzens von *Reticulofenestra abisecta* festgelegt, so dass eventuell die Grenze zwischen NP 23 und NP 24 etwas zu hoch angesetzt wurde. In der ostdeutschen Bohrung 2124 wird RU-5 zum großen Teil ebenfalls auf NP 23 datiert (KÖTHE 1995), was durch die kalkarme Fauna in diesem Kernabschnitt begründet sein könnte. Zudem ist RU-5 erosiv von Miozän überlagert, was die Zuordnung weiter erschwert.

3.1.6 Einheit RU-6

Definition

Die Einheit RU-6 wird durch erhöhte Gammastrahlungs- und deutlich verringerte Widerstandsmesswerte gegen RU-5 abgegrenzt. Der z.T. abrupte Rückgang der Korngröße, der sich aus den Bohrlochmessungen ergibt, geht jedoch in der Regel nicht auf das Niveau der Einheit RU-3 zurück (Abb. 2.4). Die Obergrenze ist in weiten Teilen des Arbeitsgebiets schwieriger festzulegen, da RU-6 durch spätere Erosion nicht mehr in allen Regionen von der hangenden Einheit RU-7, sondern durch Sedimente des Chatt, Miozän oder des Quartär überlagert sein kann. In diesen Fällen reicht RU-6 im Hangenden entweder bis zur Rupel-/Chatt-Grenze VIII oder bis zur Miozän-Untergrenze XV.

Synonyme / regionale Bezeichnungen

Aufgrund der Feinkörnigkeit der Sedimente wird die neu definierte Einheit RU-6 in den bestehenden Lithostratigraphien zum belgischen Boom Clay, zum niederländischen Rupel Clay, in der Niederrheinischen Bucht zu den Lintfort-Schichten und in Nord- und Ostdeutschland zum Rupel- bzw. Septarienton gerechnet.

Lithologie / Fazies

In weiten Teilen des Arbeitsgebiets besteht die transgressive Einheit RU-6 aus geringmächtigen kalkhaltigen tonig-siltigen Schelfsedimenten, die als dünnes Band über den grobkörnigeren RU-5-Abfolgen entwickelt sind. In den tektonisch beeinflussten Regionen am südwestlichen Rand des Arbeitsgebiets kam es zwar zu einer stärkeren Differenzierung der feinkörnigen Sedimente, sandige Partien sind allerdings nicht enthalten. Die Veränderungen lassen sich insbesondere entlang des Nord-Süd-Profiles 1 (Abb. A2.1) und in Profil 3 (Abb. A2.3) beobachten. In Profil 1 vollzieht sich von der Bohrung 404 nach Süden ein gradueller Übergang von einem geringmächtigen tonig-siltigen Horizont zur auffälligsten Einheit in der Bohrung Lanzerath (381). Darin wurden nicht nur ähnliche Gamma Ray-Messwerte wie in den Tonen von RU-2-RT und RU-3 gemessen, auch die Sedimentationsmuster gleichen sich. In Profil 3 ist der Abschnitt zwischen der Bohrung 006 (Burghof) im Norden und der Bohrung 330 (Jackerather Horst) im Süden am stärksten differenziert. In den Spectralogs der Bohrungen 006 und 029, die beide in den Randbereichen der Einheit RU-6 liegen, lässt sich die Gammastrah-

lung im Wesentlichen auf die Komponente ^{40}K zurückführen. Dies kann nach RIDER (1996) als Hinweis auf einen höheren Illitanteil an den Tonmineralen gewertet werden. Damit unterscheidet sich die Geochemie dieser Einheit von RU-2-RT, in der aufgrund des größeren Kaolinitgehalts die Thorium-Komponente betont war, und von RU-3, in der die hohen Urananteile von reduzierenden Ablagerungsbedingungen während der Periode einer condensed section herrühren. Dies bedeutet, dass sich RU-6 und RU-2-RT in den Messwerten zwar ähneln, aber nicht die gleichen Ablagerungsmilieus repräsentieren.

Mächtigkeiten / Tektonik

Die Mächtigkeitsverteilung von RU-6 unterscheidet sich deutlich von den liegenden Einheiten. In weiten Teilen des Untersuchungsgebiets ist RU-6 zu geringmächtig entwickelt, um als eigenständige Einheit wahrgenommen zu werden. Das gilt nicht nur für die distale Nordseebohrung 2099 und die weiter südlich gelegene niederländische Bohrung 2007 (Dornspijk) (Abb. 2.1), sondern auch für die nördliche Niederrheinische Bucht, in der die Einheit weniger als 2 Meter mächtig ist und dadurch nicht eindeutig von RU-7 getrennt werden kann. Dies ändert sich im Einflussbereich des Niederländischen Zentralgrabens erst südlich des SW-NE-Profiles 2122-286 (Abb. A2.5), wo die Zone größter Mächtigkeit der Einheit RU-6 mit SW-NE-Streichen vermutlich parallel zur Küste jenes Zeitabschnitts verläuft (Abb. 3.11). In den Profilen Nord- und Ostdeutschlands sind einzig in der Bohrung 2098 (Gartow) RU-6-Sedimente in differenzierbarer Mächtigkeit vorhanden, die aber mit 8 Metern nur ein Drittel der Maximalwerte in der Niederrheinischen Bucht erreichen.

Das Sedimentationszentrum der Einheit RU-6 liegt im Süden der Krefeld-Scholle, wo in der Bohrung 381 (Lanzerath) mit 24 Metern die mächtigste und am stärksten differenzierte RU-6-Abfolge vorkommt. Gegenüber RU-4 und RU-5 verlagerte sich das Zentrum der RU-6-Subsidenz weiter nach Südosten in die an die Köln-Scholle und die Ville angrenzenden Bereiche. Dies ist insofern bemerkenswert, als in den liegenden Einheiten an dieser Stelle eher geringere Sedimentmächtigkeiten auf eine lange bestehende relative Hochposition hindeuten. Das Verteilungsmuster mit einem schmalen SW-NE-streichenden Sedimentationsstreifen ähnelt in den liegenden Einheiten am ehesten RU-2-RT, doch gibt es deutliche Unterschiede, da das Sedimentationszentrum während RU-2-RT auf der nördlichen Krefeld-Scholle lag.

Zwar zeichnete sich während des Zeitabschnitts RU-6 der moderne Bauplan der Niederrheinischen Bucht immer deutlicher ab, doch machte sich der Einfluss der wesentlich älteren Aachener Überschiebung weiterhin bemerkbar. Sie teilte die Niederrheinische Bucht in eine nordwestlich gelegene distale und eine südöstliche proximale Beckenregion.

Im Südwesten der Referenzregion änderten sich gegenüber RU-5 die Sedimentationsbedingungen erheblich, da die Feldebiss- und die Peelrand-Verwerfung sowie die Rurrand-Störung aktiv waren. Der Rurgraben lag mit einem geringen Sedimentauflager von maximal 10 Metern nun in einer relativen Hochposition, während die benachbarten Bruchschollen des Campine-Blocks im Westen und der Venlo-Scholle im Osten deutlich absanken.

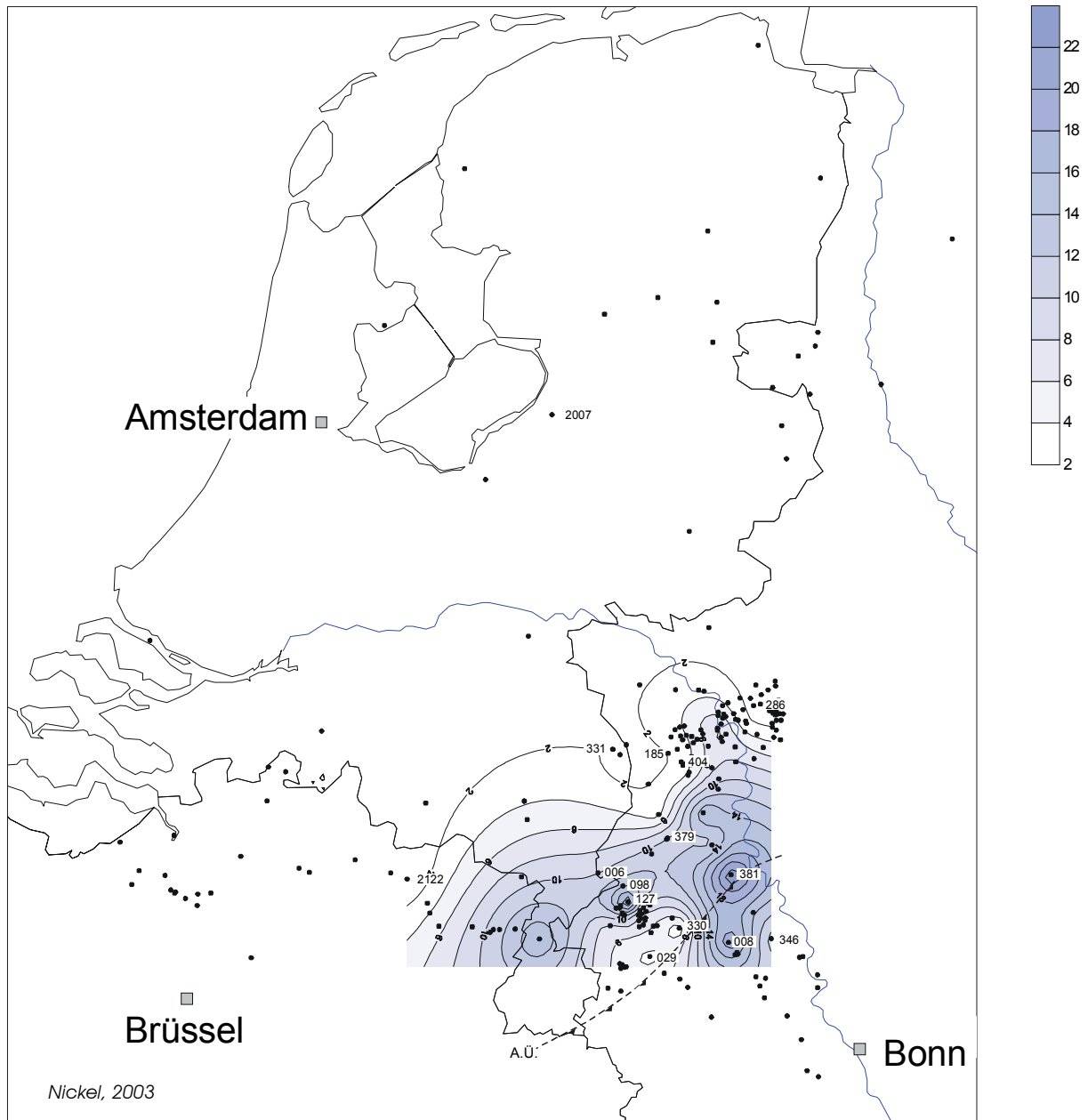


Abb. 3.11: Mächtigkeitsverteilung Einheit RU-6

Mächtigkeitsverteilung in der Referenzregion abgeleitet aus Profilen und Bohrungen (z.T. mit Bohrnummern), Mächtigkeiten extrapoliert; A.Ü.: Verlauf der Aachener Überschiebung, sonstige Störungen nicht ausgehalten; Isopachenabstand: 2 m, Isopachenintervall: 2 m – 22 m

Die Venlo-Scholle brach nach Südwesten ein und nahm im Süden bei den Bohrungen 098 (Rödgen) und 127 (Gerderath) mehr als 20 Meter mächtige RU-6-Sedimente auf. Durch diese

Kippung ist der Viersener Sprung an der Grenze zwischen der Venlo-Scholle im Westen und der tiefer liegenden Krefeld-Scholle deutlich erkennbar. Weiter südlich lagerten sich in unmittelbarer Nachbarschaft zur Aachener Überschiebung auf dem späteren Jackerather Horst (Bohrung 330) und an der Position der Bohrung Tetz (029) nur 3 Meter Sedimente ab. Dies belegt erneut die eigenständige Entwicklung dieses Strukturelements.

Durch die fortdauernde Absenkung entlang des Erft-Sprungsystems akkumulierten am Nordoststrand der Erft-Scholle im Bereich der Bohrung 008 rund 20 Meter Sedimente. Auf der östlich angrenzenden Köln-Scholle entwickelte sich zwar ein Sedimentationszentrum im Norden, doch brach die Köln-Scholle entlang der Aachener Überschiebungslinie gegenüber der Krefeld-Scholle weniger stark ein.

Biostratigraphie / Alter

Die Sedimente von RU-6 können mit Hilfe von Dinoflagellaten der Zone D 14nb (BENEDEK 1972) zugeordnet und durch Kalknannoplankton auf die Zone NP 24 datiert werden (KÖTHE 1990, 1992). Die einzige Ausnahme ist aus der niederländischen Bohrung 331 (Broekhuizen-vorst) von VAN ROOIJEN et al. (1984) beschrieben worden, wo wie in RU-5 die biostratigraphische Datierung der Schichten nicht mit der sedimentologischen Korrelation übereinstimmt.

3.1.7 Einheit RU-7

Definition

Mit RU-7 wird die oberste Einheit der Rupersedimente im Arbeitsgebiet bezeichnet. Die Untergrenze der coarsening-up-Einheit RU-7 ist in der Regel durch eine abrupte Verminderung der Gammastrahlungswerte bzw. des Eigenpotenzials bei gleichzeitiger Erhöhung der Widerstandswerte gekennzeichnet. Im Hangenden wird die Einheit in allen Fällen, in denen RU-7 als eigenständiger Abschnitt definiert werden konnte, von der Rupel/Chatt-Grenze begrenzt. RU-7 liegt konkordant über RU-6, ist jedoch nicht im gesamten Arbeitsgebiet verbreitet. Aus diesem Grund wird für diesen Abschnitt nicht auf die Referenzbohrung 185 (Abb. 2.4) verwiesen, sondern auf Bohrung 381 in den Profilen 1 (Abb. A2.1) und 7 (Abb. A2.7), in der RU-7 in charakteristischer Form ausgeprägt ist. In den Niederlanden liegt die Einheit konkordant über dem Rupel Clay. Die Untergrenze wird von VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE (1997) als graduell und diachron beschrieben und ist am Beckenrand eher als im Beckenzentrum zu sehen. In Nord- und Ostdeutschland kann die Zuordnung von RU-7 aufgrund weit verbreiteter Erosion nur an der Bohrung 2098 (Gartow) vorgenommen werden. Dort sind die Merkmale der Unter- und Obergrenze sehr gut ausgeprägt.

Synonyme / regionale Bezeichnungen

In den Niederlanden wurde mit der Revision der Stratigraphie das Steensel Member als oberstes Teil der Rupel Formation neu eingeführt (VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE 1997) und unter anderem an der Bohrung Broekhuizenvorst (Bohrung 331 in dieser Arbeit) definiert. Der Steensel-Abschnitt entspricht in Bohrung 331 exakt RU-7, so dass auch andere Bohrungen des Arbeitsgebiets interpretiert werden konnten. In der Niederrheinischen Bucht gibt es für RU-7 keine eigenständige Bezeichnung. Entweder wurde RU-7 zu den Lintfort-Schichten gestellt oder eine lithostratigraphische Einordnung ist ganz unterblieben. In Nord- und Ostdeutschland ist RU-7 Teil des Rupel- bzw. Septarientons.

Lithologie / Fazies

Die Sedimente der Einheit RU-7 zeigen in den Bohrlochmessungen der südöstlichen Niederrheinischen Bucht innerhalb einer insgesamt sandigen Abfolge einen ausgeprägten coarsening up-Trend, der für eine deltaische oder flachmarine Progradation spricht (RIDER 1996). Aus den Spectralogs in Profil 15 (Abb. A. 2.15) lässt sich sehr gut ableiten, dass der Tonanteil in RU-7 nach oben hin kontinuierlich abnimmt und die Sande im obersten Teil quarzreicher sein müssen, da der Gehalt der Komponenten Thorium, Kalium und Uran gleichmäßig reduziert ist. In der Forschungsbohrung Schwalmtal (Bohrung 110) wurden aus diesem Abschnitt Feinsande beschrieben, in denen z.T. aufgearbeitete Braunkohlestücke vorkommen und deren oberste Lage viel Holz enthält (KLOSTERMANN et al. 1990). In der weiter südlich gelegenen Bohrung Sophia Jacoba (038) konnte WELLE (1993) mit Hilfe von Mollusken vollmarine Flachwasserbedingungen für diesen Abschnitt rekonstruieren. Diese Ergebnisse sprechen für progradierende marine Schelfsande, deren Hauptschüttung von SE über die Köln-Scholle auf die südliche Venlo-Scholle erfolgte.

In den Niederlanden besteht RU-7 als Steensel Member aus Sanden bzw. aus Wechsellagerungen von Tonen und siltigen Tonen mit dünnen Sandlagen, die im Hangenden in Feinsande mit hohem Glaukonitgehalt übergehen (VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE 1997) und ebenfalls einem flachmarinen Ablagerungsmilieu zugewiesen werden. VANDENBERGHE et al. (1998) leiteten aus der sedimentären Entwicklung in Belgien eine starke Hebung der Brabanter Region und der Ardennen während des obersten Rupel und frühen Chatt ab. Dies korrespondiert mit der Schüttung gröberer Sedimente in die Niederrheinische Bucht und die SE-Niederlande hinein und deutet in Analogie zur Entwicklung in den Ardennen auf eine beginnende Hebung des Rheinischen Schiefergebirges.

In Ostdeutschland entspricht RU-7 vollkommen der Formation I in Bohrung 2098, in der die Fazies als lagunärer Ton bzw. als Buchtenfüllung interpretiert wurde, die im oberen Teil in

ästuarinen Schlick oder Watablagerungen übergeht (DILL et al. 1997). Der fluviatile Einfluss ist nach DILL et al. (1997) in diesem Abschnitt stärker als in den liegenden Rupelsedimenten.

Mächtigkeiten / Tektonik

Im Laufe des Zeitabschnitts RU-7 entwickelten sich im Referenzgebiet zwei voneinander unabhängige Sedimentationszentren auf der Krefeld- und der Venlo-Scholle. Ablagerungen von RU-7 sind außerhalb der Niederrheinischen Bucht und den angrenzenden niederländischen Regionen nur in der Bohrung 2098 (Gartow) nachweisbar. In den Niederlanden werden für das äquivalente Steensel Member im Rurgraben große Mächtigkeiten beschrieben, während die Sedimente auf dem Peel- und dem nördlichen Venlo-Block weniger deutlich ins Auge fallen (VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE 1997).

Ausgehend vom Sedimentationszentrum auf der Venlo-Scholle nehmen die Sedimentmächtigkeiten in westliche Richtung ab. Sowohl Einflüsse der Peelrand-Verwerfung als auch des Wassenberger Horstes sind erkennbar und lassen auf eine Stufung der Bruchschollen von Westen nach Osten schließen. Analog dazu kam es an der südlichen Verwerfung des Jackerather Horstes während RU-7 zu einer deutlichen Abschiebung von Jackerather Horst und Venlo-Scholle. VANDENBERGHE et al. (1998) leiteten aus der weiträumigen Erosion der Sedimente in Belgien eine starke Hebung der Brabanter Region und der Ardennen während des obersten Rupel und frühen Chatt ab.

Die größten Sedimentmächtigkeiten wurden im Bereich der Bohrung 110 mit rund 50 Metern auf der südlichen Venlo-Scholle ermittelt (Abb. 3.12), wo sich das Sedimentationszentrum im Vergleich zu RU-6 nach NE verlagerte. Dies deutet auf eine abschiebende Bewegung entlang des Viersener Sprungs für die Venlo-Scholle hin. Dadurch bedingt erfolgte im Westteil der Krefeld-Scholle im Unterschied zu RU-6 wenig oder gar keine Ablagerung, vermutlich wurde die dünne Sedimentdecke zumindest teilweise später erodiert. Weiter nach Nordosten befand sich ein zweites Sedimentationszentrum, das durch eine reaktivierte Störung, durch die die Krefeld-Scholle in zwei voneinander unabhängig reagierende Bruchschollen geteilt wurde, bis zu 25 Meter Ablagerungen aufnahm.

Spielte die Aachener Überschiebung für die Beckenentwicklung bis einschließlich RU-6 eine bedeutende Rolle, so ist ihr Einfluss in RU-7 kaum nachweisbar. So leitet zum Beispiel das Sedimentationszentrum auf der Venlo-Scholle ohne erkennbare Strukturgrenze zur Köln-Scholle über, auf der sich die größten Mächtigkeiten im nördlichen Teil befinden.

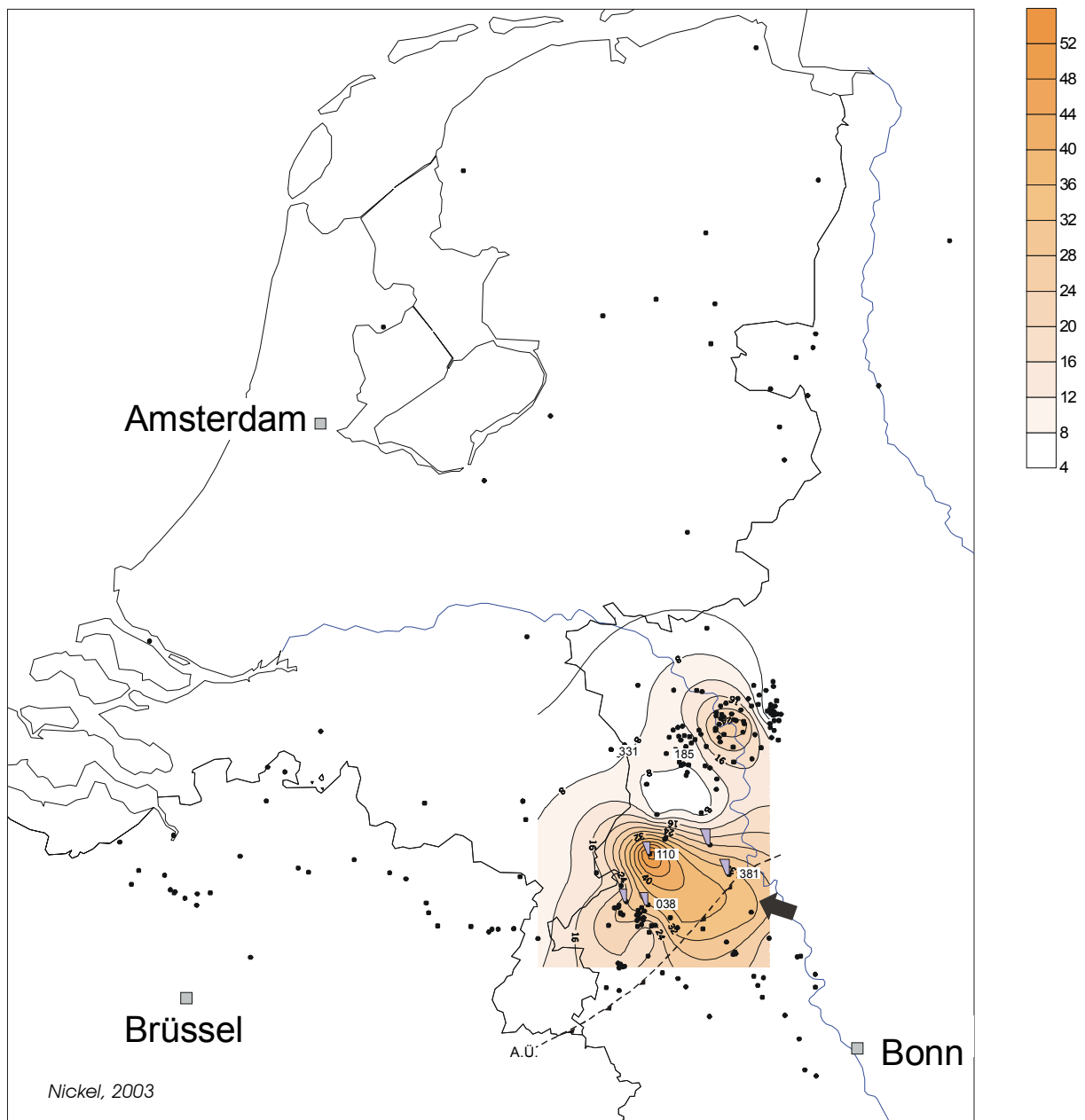


Abb. 3.12: Mächtigkeitsverteilung Einheit RU-7

Mächtigkeitsverteilung in der Referenzregion abgeleitet aus Profilen und Bohrungen (z.T. mit Bohrnummern), Mächtigkeiten extrapoliert; grau: in diesen Bohrungen deutliche coarsening-up-Einheiten erkennbar; Pfeil: Schüttungsrichtung; A.Ü.: Verlauf der Aachener Überschiebung, sonstige Störungen nicht ausgehalten; Isopachenabstand: 4 m, Isopachenintervall: 4 m – 52 m

Biostratigraphie / Alter

In weiten Teilen des Arbeitsgebiets kommt RU-7 nicht mehr vor, da die Einheit erodiert wurde oder nicht als eigenständige Folge abgegrenzt werden konnte. In den wenigen vollständigen Bohrungen, die biostratigraphisch datiert sind, zählt RU-7 zur Dinoflagellatenzone D 14nb und zur Nannoplankton-Zone NP 24. Die einzige Ausnahme ist Bohrung 331 (Broekhuizenvorst), in der auch die neu definierte Einheit RU-7 in NP 23 fällt (VAN ROIJEN et al.

1984). Dies kann wie für die Abschnitte RU-5 und RU-6 mit einer kalkarmen Fauna erklärt werden, die eine genaue Abgrenzung aufgrund von mehreren Arten nicht zulässt.

3.2 Chatt

Im Chatt lag das Arbeitsgebiet am Südrand des Nordwesteuropäischen Tertiärbeckens im Einflussbereich der tertiären Nordsee. Die Sedimentation war wie im Rupel siliziklastisch. Allerdings dominierten weniger Schelftone als vielmehr glaukonithaltige Schelfsande in den distalen Regionen sowie reinere Strandsande im Wechsel mit küstennahen Becken- und Moorablagerungen in proximal gelegenen Gebieten.

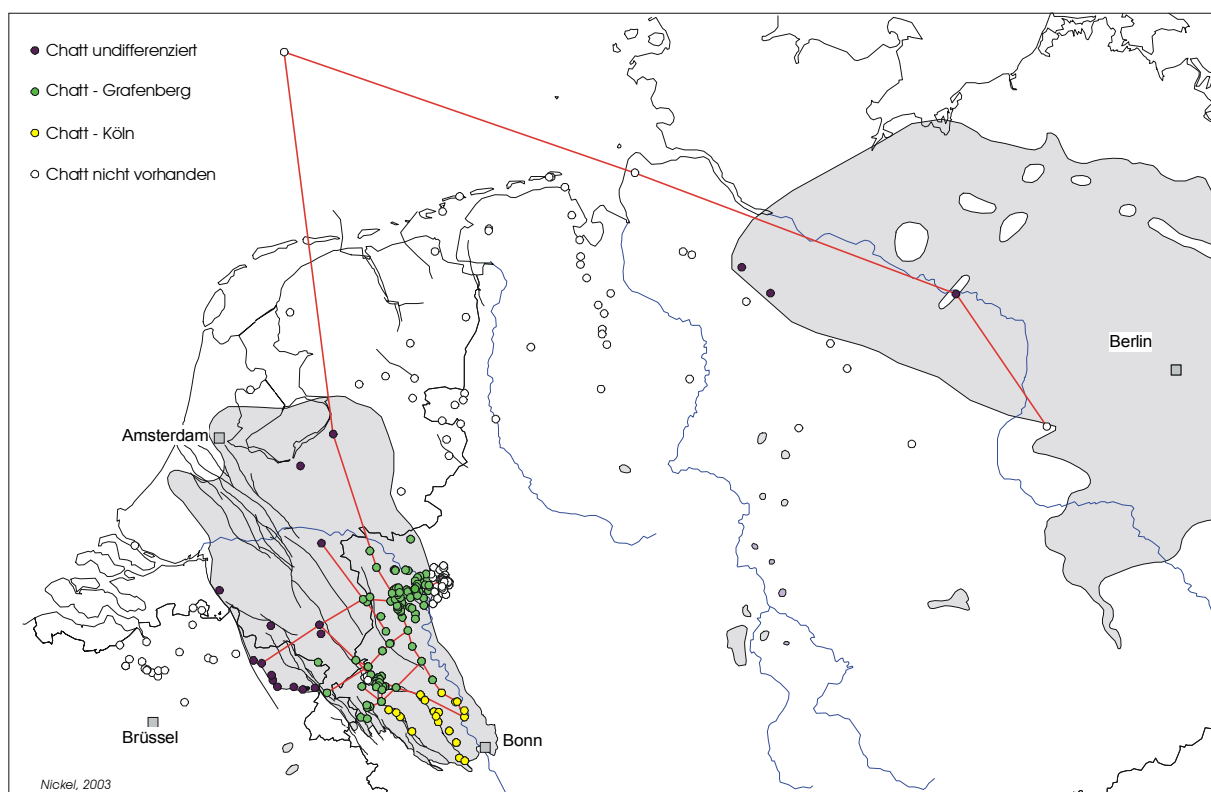


Abb. 3.13: Verbreitung der Chattsedimente im Arbeitsgebiet, im Süden der Niederrheinischen Bucht teilweise Unterscheidung zwischen Grafenberg- und Köln-Schichten; rot: Verlauf aller Profillinien, dunkelgrau: heutige Verbreitung von Chatt-Sedimenten (verändert nach VINKEN et al. 1988)

Während in den Niederlanden und Belgien die Chattsedimente sehr einheitlich entweder als Voort Sand oder Veldhoven Clay bezeichnet werden, ist die lithostratigraphische Vielfalt in der Niederrheinischen Bucht mit Grafenberg-Schichten, Köln-Schichten und den Kurzbezeichnungen 04B bis 3 nach SCHNEIDER & THIELE (1965) für einzelne Ton- und Sandhorizonte größer (Tab. 1.2).

Im Gegensatz zur Niederrheinischen Bucht und den südlichen Niederlanden, wo eine sehr starke Beckensubsidenz wirksam war, die zur Aufnahme großer Sedimentmächtigkeiten führte, fehlen in weiten Bereichen der nördlichen Niederlande und Norddeutschlands äquivalente Sedimente aufgrund der späteren Erosion im Untermiozän (Abb. 3.13).

Die Subsidenz der einzelnen Schollen im Einflussbereich des Niederländischen Zentralgrabens und in der Niederrheinischen Bucht, die sich im Rupel ab RU-4 bereits angekündigt hatte, beschleunigte sich im Chatt. Die Mächtigkeiten zwischen den Bohrungen ändern sich innerhalb weniger Kilometer Abstand sehr stark. So entstand in der Referenzregion zwischen Amsterdam, Brüssel und Bonn ein völlig anderes Mächtigkeitsbild als im Rupel (Abb. 3.14). Einem nordwestlichen Sedimentationszentrum mit Mächtigkeiten von mehr als 380 Metern stand im Rurgraben ein zweites Ablagerungszentrum südlich der Aachener Überschiebung auf der Köln-Scholle gegenüber. Während die Krefeld-Scholle im Nordosten sehr geringmächtig bedeckt ist, erfolgte im Rurgraben die kontinuierlichste Sedimentation mit dem vollständigsten Übergang von Rupel- zu Chatteinheiten, wohingegen die stärkste Differenzierung der Sedimente auf der Köln-Scholle zu beobachten ist.

Innerhalb der Niederrheinischen Bucht zeichneten sich auf den entstehenden Schollen unterschiedliche sedimentäre Entwicklungen ab. Generell lässt sich eine Verzahnung von marinen, überwiegend feinsandigen Schelfsedimenten im Nordwesten und vereinzelt Flözbildungen eines Küstentieflands im Südosten feststellen. Auf der Krefeld-Scholle in der nördlichen Niederrheinischen Bucht besteht das Chatt aus an der Basis glaukonithaltigen, sandigen Grafenberg-Schichten, die relativ gleichkörnig bleiben. In den Köln-Schichten der südlichen Teilschollen sind die Sedimentmächtigkeiten und die küstennahen Einflüsse größer. Die Grenze zwischen beiden Faziesbereichen verläuft ziemlich genau entlang der Linie der Aachener Überschiebung (Abb. 3.13). Anzeichen für große Diskordanzen, die eine tief greifende Regression andeuten, wie sie von HAQ et al. (1988) für die Wende Rupel/Chatt angenommen wurden, finden sich in diesen Sedimenten nicht. Auch die Faunenvergesellschaftungen zeigen keine eindeutig erkennbaren Kappungshorizonte an, die auf Erosionshorizonte hinweisen könnten.

Die Sedimentverteilung ist sehr stark mit der Tektonik der Niederrheinischen Bucht und des Rurgrabens verbunden. In den Niederlanden fehlen Chattsedimente weitgehend aufgrund der Untermiozän-Erosion. Größere Sedimente kommen nur im Rurgraben und auf den direkt benachbarten Schollen vor, sonst fehlen sie jedoch (VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE 1997).

In Belgien sind Ablagerungen aus dem Chatt auf die Voort Sand- und Veldhoven Clay-Fazies im Nordosten des Landes beschränkt. Die Westgrenze der Verbreitung bildet eine der Randverwerfungen des Rurgrabens. Für das übrige Land wird eine starke Hebung des Brabanter Massivs und der Ardennen während des frühen Chatt angenommen, die zu einer weiträumigen Abtragung geführt hat. Eventuell begann die Verkarstung der Ardennen in diesem Zeitraum (VANDENBERGHE et al. 1998).

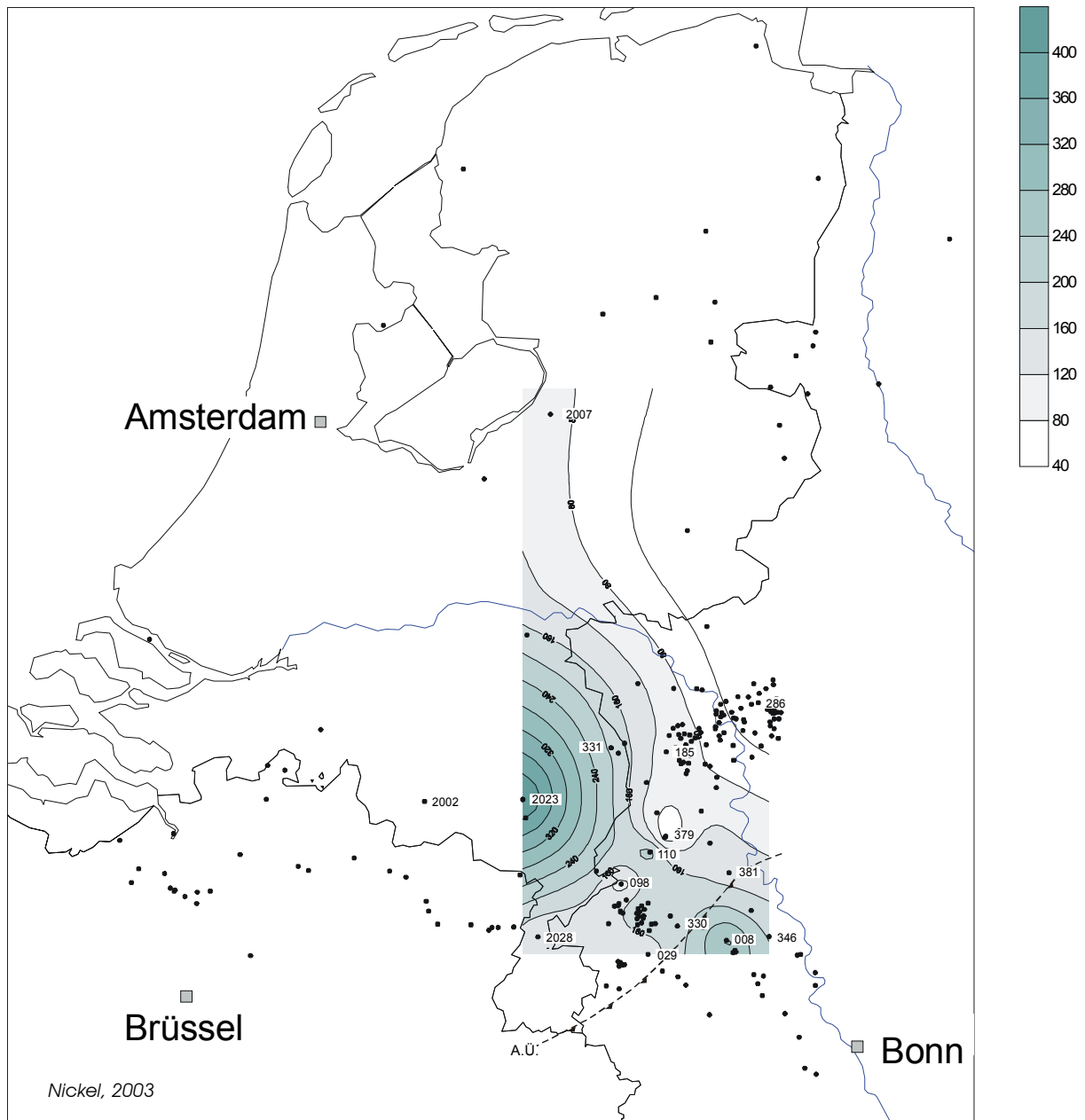


Abb. 3.14: Mächtigkeitsverteilung Chatt gesamt

Mächtigkeitsverteilung in der Referenzregion abgeleitet aus Profilen und Bohrungen (z.T. mit Bohrnummern), Mächtigkeiten extrapoliert; A.Ü.: Verlauf der Aachener Überschiebung, sonstige Störungen nicht ausgehalten; Isopachenabstand: 40 m, Isopachenintervall: 40 m – 400 m

In Norddeutschland fehlen Chatt-Ablagerungen weitgehend. Dort sind die Sedimente nicht nur von der weiträumigen Erosion, sondern auch von aufsteigenden Salzdiapiren in ihren Mächtigkeiten und in ihrer Entwicklung erfasst worden. Erst im östlichen Niedersachsen und in Mecklenburg-Vorpommern sind Chattsedimente wieder vertreten (Abb. 3.13). Da in allen anderen zur Verfügung stehenden Bohrungen Nord- und Ostdeutschlands der Chattabschnitt entweder erodiert ist oder veraltete Bohrlochmessungen eine Neuordnung der Schichtenfolge verhindern, kann nur die Bohrung Gartow (2098) für einen Vergleich mit Bohrungen der Referenzregion herangezogen werden.

Die Korrelation der Chattsedimente ist wegen des stärkeren tektonischen Einflusses problematischer als im Rupel, da bereits auf kurze Distanzen erhebliche Unterschiede in den Sedimentmächtigkeiten und der Fazies zu erkennen sind. Trotz der tektonischen Differenzierung halten jedoch ähnliche Signale durch. Als Korrelationshorizont wurde die Grenze IX an der Basis von Einheit CH-2 gewählt, die als Überflutungsfläche weiträumig auch auf den unterschiedlichen tektonischen Blöcken der Niederrheinischen Bucht, der Niederlande und Nordostbelgiens verbreitet ist. Insgesamt wurden sieben Chatt-Einheiten neu definiert, die vom Liegenden zum Hangenden als CH-1 bis CH-7 bezeichnet werden.

3.2.1 Einheit CH-1

Definition

Die Chatt-Abfolge, die aufgrund der großflächigen Untermiozän-Erosion im Arbeitsgebiet im Wesentlichen auf die Referenzregion beschränkt bleibt, beginnt an der Grenze VIII mit glaukonithaltigen Sanden der Einheit CH-1. Im Hangenden endet CH-1 mit der markanten Grenze IX, die im ganzen Arbeitsgebiet mit einer abrupten Erhöhung der Gamma Ray-Werte und korrespondierend niedrigen Widerstandsmessungen eindeutig festzulegen ist (Abb. 2.4). In Norddeutschland, der Nordseeregion und Ostdeutschland kann CH-1 nur in der Bohrung 2098 (Gartow) zugeordnet werden.

Synonyme / regionale Bezeichnungen

Für die neu definierte Einheit CH-1 gibt es im Arbeitsgebiet eine Reihe lokaler lithostratigraphischer Bezeichnungen. So ist CH-1 im Süden der Referenzregion in Abhängigkeit von der Fazies entweder Teil der insbesondere in der äußeren Niederrheinischen Bucht verbreiteten Grafenberg-Schichten oder der Köln-Schichten in der inneren Niederrheinischen Bucht. Innerhalb der Köln-Schichten umfasst CH-1 vorwiegend den Sand 05 (SCHNEIDER & THIELE 1965, Tab. 1.2). In den Niederlanden werden die sandigen Partien an der Basis als Voort Sand und die tonigeren Einheiten als Veldhoven Clay (Tab. 1.2) bezeichnet. Die Bohrungen 331 (Broekhuizenvorst) und 2002 (Veldhoven) sind Beispiele für die Voort-Sande an

der Basis, die Bohrung 2007 (Dornspijk 2) erschließt in CH-1 feinkörnigen Veldhoven Clay (VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE 1997). Aussagen zu Nord- und Ostdeutschland können nur anhand der Bohrung 2098 (Gartow) getroffen werden, in der CH-1 innerhalb des Asterigerinen-Horizonts (KÖTHER 1990) liegt.

Lithologie / Fazies

CH-1 ist in Abhängigkeit von der geographischen Position und der direkt unterlagernden Rupel-Einheit sehr unterschiedlich ausgeprägt. Diese Bandbreite ist am besten in der Niederrheinischen Bucht zu beobachten, wo nicht nur die vollständigste Chatt-Abfolge sondern auch die größte Bohrdichte vorhanden ist.

Auf der Krefeld-Scholle im Nordosten der Niederrheinischen Bucht und der angrenzenden nördlichen Venlo-Scholle ist CH-1 nur geringmächtig in Form eines stark glaukonithaltigen Feinsandes mit fining-up-Trend entwickelt und überlagert diskordant RU-6 und RU-7-Einheiten, wie in Bohrung 185 zu sehen ist (Abb. 2.4).

In den Regionen mit größerer Subsidenz am Südwestrand der Niederrheinischen Bucht liegen mächtige CH-1-Sande ohne erkennbare Diskordanz über einer ebenfalls sandigen RU-7-Schicht. Dies gilt auch für die südwestlich gelegenen Bohrungen in den Niederlanden und Nordostbelgien. An der Basis von CH-1 ist in diesen Bohrungen häufig eine geringmächtige Lage mit höheren Gammawerten zu beobachten, die die liegende coarsening-up-Folge RU-7 von der hangenden Einheit CH-1 mit fining-up-Trend abgrenzt. Von der Forschungsbohrung Schwalmtal (110) wurden von diesem Horizont mit Sand gefüllte Grabgänge und Glaukonit beschrieben, darüber folgt ein kalk- und glaukonithaltiger, schluffiger Feinsand (KLOSTERMANN et al. 1990).

In den küstennäheren Bohrungen am Westrand der Niederrheinischen Bucht ist der Übergang von den Rupel- zu den Chatt-Einheiten anhand der Gamma Ray-Messungen nicht festzulegen, da die Werte zu ähnlich sind. Erst mit Hilfe der Widerstandsmessungen, die in CH-1 ein meist geringeres Niveau erreichen als in RU-7, ist die Abgrenzung möglich. Untersuchungen an benthischen Ostracoden, die aus glaukonit- und glimmerhaltigen Fein- bis Mittelsanden des Schachtes Sophia Jacoba (Bohrung 038) isoliert werden konnten, deuten nach F.K. ZIEGLER (1994) auf einen vollmarinen, gezeitenexponierten, küstennahen Lebensraum an dieser Position hin, der ständig den Einflüssen des offenen Meeres ausgesetzt war; die Wassertiefe soll ca. 20 Meter betragen haben.

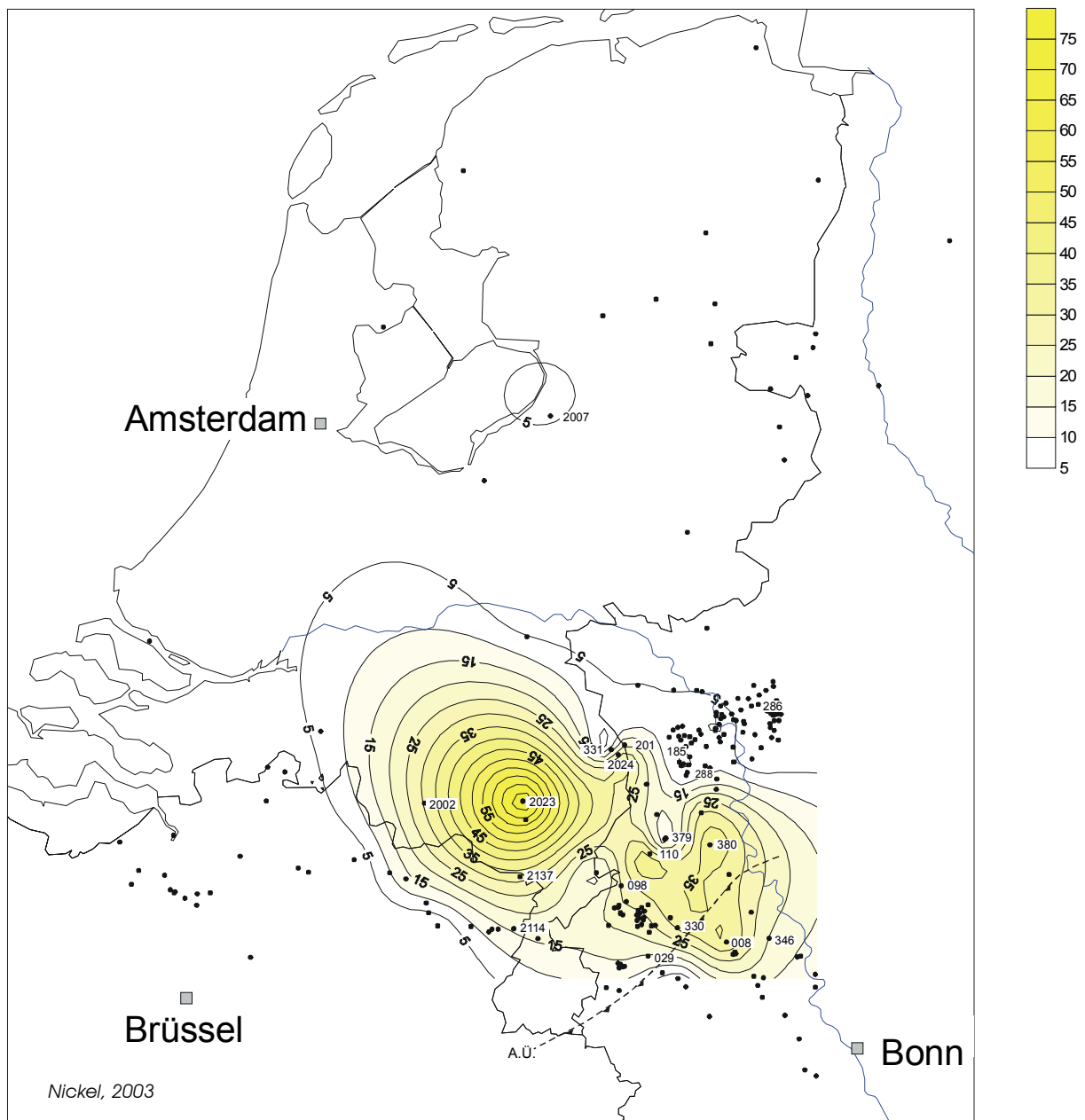


Abb. 3.15: Mächtigkeitsverteilung Einheit CH-1

Mächtigkeitsverteilung in der Referenzregion abgeleitet aus Profilen und Bohrungen (z.T. mit Bohrnummern), Mächtigkeiten extrapoliert; A.Ü.: Verlauf der Aachener Überschiebung, sonstige Störungen nicht ausgehalten; Isopachenabstand: 5 m, Isopachenintervall: 5 m – 70 m

Alle Befunde sprechen dafür, dass die CH-1-Sedimente als transgressive Einheit auf einem weiten offenen Schelf mit ausreichender Sauerstoffversorgung abgelagert wurden. In der Nachbarschaft des Brabanter Massivs, der Ardennen und des Rheinischen Schiefergebirges sorgten offenbar Schüttungen aus dem Hinterland für eine Anlieferung von gröberen Sedimenten, die auf dem inneren Schelf und in Küstennähe kontinuierlich aufgearbeitet wurden. Dagegen wurden in den distalen Regionen auf der Krefeld-Scholle und der Bohrung 2007 (Doornspijk) in der Nähe des heutigen IJsselmeers nur geringmächtige glaukonitische Fein-

sande und Silte abgelagert. In der Bohrung 2098 in Ostniedersachsen konnten in den Sanden an der Basis Dinoflagellaten der Assoziation P (KÖTHE 1990) nachgewiesen werden, die an dieser Stelle für flaches, stagnierendes Wasser mit verringerter Salinität sprechen.

Mächtigkeiten / Tektonik

Im Referenzgebiet sind zwei Sedimentationszentren nachweisbar. Das größere der beiden befand sich im nördlichen Rurgraben, wo die Bohrung 2023 rund 77 Meter Ablagerungen von CH-1 durchteufte. Südöstlich davon lag ein kleineres Sedimentationszentrum auf der südlichen Krefeld-Scholle, das in der Bohrung 380 aufgeschlossen ist und über 40 Meter CH-1-Ablagerungen enthält (Abb. 3.15).

Während Sedimente dieser Einheit in den Bohrungen Westbelgiens erosionsbedingt nicht nachweisbar sind, können sie ausgehend vom Sedimentationszentrum im nördlichen Rurgraben nach Süden bis zu den Bohrungen 2114 und 2137 in Nordost-Belgien und nach Norden bis zur Bohrung 2007 nahe dem heutigen Ijsselmeer bestimmt werden. Die ursprüngliche Verbreitung der Chatt-Sedimente ist allerdings nicht mehr rekonstruierbar, da auf der nordöstlichen Krefeld-Scholle, in weiten Teilen der Nordostniederlande, der Nordsee sowie Nord- und Ostdeutschlands Sedimente ab CH-1 im Zuge der untermiozänen Erosion abgetragen wurden. Lediglich in der Bohrung Gartow (2098) sind 12m dieser Einheit sicher nachweisbar.

Die Peelrand-Verwerfung führte während CH-1 zu einem weiteren Einsinken des nördlichen und mittleren Rurgrabens gegenüber den östlich angrenzenden Bruchschollen. Ein vergleichbarer Bewegungssinn ist für den Viersener Sprung festzustellen. Dort sanken der nördliche und mittlere Bereich der Venlo-Scholle gegenüber der Krefeld-Scholle ab, wie ein Vergleich der Mächtigkeiten zwischen den benachbarten Bohrungen 110 (33 Meter) auf der Venlo- und 379 (15 Meter) auf der Krefeld-Scholle belegt (Abb. A2.13).

Biostratigraphie / Alter

Aufgrund der geringen Verbreitung der Chattsedimente im Arbeitsgebiet gibt es nur noch vereinzelt Bohrungen, die über eine Kombination von geeigneten Bohrlochmessungen und biostratigraphischen Untersuchungen verfügen. Mit Hilfe von Nannoplankton-Untersuchungen kann CH-1 einheitlich der Zone NP 24 zugeordnet werden, wie die Bohrungen 288 auf der Krefeld-Scholle und 201 auf der Venlo-Scholle sowie die ostdeutsche Bohrung 2098 zeigen. Die Angaben zur Dinoflagellaten-Zonierung sind nicht so eindeutig: Während in der niderrheinischen Bohrung 288 CH-1 bereits an der Basis zu D 15 zählt, erfolgt in der Bohrung Gartow (2098) der Übergang von D 14nb zu D 15 erst innerhalb der Einheit.

3.2.2 Einheit CH-2

Definition

Die Einheit CH-2 beginnt mit der markanten Untergrenze IX, die als einzige als weit durchhaltende Überflutungsfläche im gesamten Arbeitsgebiet verbreitet ist und aus diesem Grund als Korrelationshorizont für die Chattaufolge dient. CH-2 ist eindeutig nur in solchen Bohrungen festzulegen, bei denen eine Kombination aus Gamma Ray- und Widerstandsmessungen zur Verfügung steht. In diesen Bohrungen kann der Beginn unabhängig von der Lithologie auch in sandigen Partien mit einer abrupten Erhöhung der Gamma Ray-Werte und korrespondierend niedrigen Widerstandsmessungen sehr gut bestimmt werden. In Bohrungen, die nur über Gammamessungen verfügen, ist die Untergrenze durch den erhöhten Glaukonitgehalt der liegenden CH-1-Schicht nicht zweifelsfrei zuzuordnen. Innerhalb von CH-2 kann in den korngößensensiblen Widerstandsmessungen bis zu drei Mal eine Verringerung der Messwerte und damit einhergehend eine Verringerung der Korngröße nachgewiesen werden, die nicht automatisch eine Entsprechung in den Gammawerten hat (Abb. 2.4).

Die Obergrenze X liegt in lithologisch stärker differenzierten Bohrungen an der Basis des hangenden CH-3-Sandes, in den Regionen mit gleichförmig glaukonithaltigen Sanden an der Basis einer Lage mit reineren, aufgearbeiteten Sanden. In beiden Fällen zeigen die Bohrlochmessungen an der Obergrenze einen signifikanten Rückgang der Gamma Ray- und eine Erhöhung der Widerstandswerte. In Bohrungen mit zugehörigen Spectralogs korreliert der Rückgang der Gammawerte mit einem spürbar verminderten Kaliumanteil, d.h. die hangenden Sedimente sind reiner und stärker aufgearbeitet als die CH-2-Sedimente (Abb. A2.15).

Synonyme / regionale Bezeichnungen

In der Niederrheinischen Bucht ist CH-2 entweder Teil der Grafenberg- oder der Köln-Schichten, wobei die Einheit in Teilen dem Ton 06 (SCHNEIDER & THIELE 1965, Tab. 1.2) innerhalb der Köln-Schichten entspricht. In den Niederlanden überwiegen in der Einheit CH-2 tonige Schichten, so dass bis auf die Bohrung 331 (Broekhuizenvorst), die noch Teile des Voort Sand erschließt, alle übrigen niederländischen Bohrungen des Arbeitsgebiets tonigen Veldhoven Clay (VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE 1997) enthalten. Sehr gut lässt sich dies in den Bohrungen 2002, 2007, 2028 und 2031 nachvollziehen. In der ostdeutschen Bohrung 2098 (Gartow) sind die Chatteinheiten mit dem Beginn der Einheit CH-2 Teil des Chattsands (KÖTHE 1990).

Lithologie / Fazies

Auf der Krefeld- und der Venlo-Scholle dominieren in CH-2 glaukonitische, tonig-siltige, kalkhaltige Feinsande der Grafenberg-Schichten. Aus den restlichen Gebieten der Niederlande wurden Schelftone und -silte in der Fazies des Veldhoven Clay beschrieben (VAN ADRI-

CHEM BOOGAERT & KOUWE 1997). Nach bathymetrischen und paläoökologischen Untersuchungen an Ostracoden-Proben des Schachtes Sophia Jacoba (Bohrung 038) im Süden der Venlo-Scholle lag diese Position zu Beginn von CH-2 in ca. 30 Meter Wassertiefe. Darauf folgte eine Vertiefung auf ca. 60 Meter im oberen Teil von CH-2. In dieser Phase wurden die größten Wassertiefen der Chatabfolge erreicht (F.K. ZIEGLER 1994).

Die stärkste lithologische Differenzierung der Sedimente kann in der südlichen Niederrheinischen Bucht beobachtet werden. Auf der nördlichen Köln-Scholle befand sich im Bereich der Bohrungen 346 und 356 der Übergang von den nördlichen glaukonitischen Schelfsanden der Grafenberg-Schichten zu den küstennäheren Köln-Schichten. In beiden Bohrungen wurden sehr reine Sande mit geringen Gammawerten erbohrt, die auf eine über der Wellenbasis gelegene Position zurückgeführt werden können, in der der eingetragene Detritus permanent aufgearbeitet wurde. Sie leiten zu den südlichen Bohrungen 300 und 298, in denen die Köln-Schichten mit terrestrisch geprägten Faziesassoziationen erschlossen wurden (Abb. A2.10, A2.11), über. So konnte KLETT (2000) in der Bohrung 300 mit Hilfe der Elektrofaziesanalyse aus den Bohrlochmessungen vom Liegenden zum Hangenden im Ton 06 die Abfolge „Moor – Becken – tidale Rinne – Kleindelta – Moor – Becken – Marsch“ ableiten.

In allen Bohrungen kann in den Widerstandsmessungen bis zu drei Mal ein Rückgang der Werte beobachtet werden, die in tonigeren Sedimenten jeweils mit erhöhten Gamma Ray-Peaks korrespondieren. Diese Beobachtung legt den Schluss nahe, dass die hydrologischen Veränderungen, die auf der Köln-Scholle in CH-2 das dreimalige Aufwachsen von Moorsedimenten gestatteten, auch in der übrigen Referenzregion die Sedimentationsbedingungen so verändert haben, dass es zu dieser zyklischen Veränderung der Korngröße kam.

In Bohrung 006 (Abschnitt C in Abb. 2.3) gibt es in den Spectralogs Hinweise, dass die erhöhten Gammawerte mit dem Kaliumanteil korrelieren, was nach RIDER (1996) auf die Minerale Illit, Glaukonit und Glimmer hindeutet. Glaukonit entsteht typischerweise bei geringem Eintrag von Detritus im Schelfbereich und ist ähnlich wie die Anreicherung von Uran ein Hinweis für condensed sections (LOUTIT et al. 1988, AMOROSI 1995). Da Glimmer insbesondere in den Schiefen der Ardennen und des Rheinischen Schiefergebirges enthalten ist, kann der sedimentologische Befund mit der Erschließung des variszischen Sockels in den Liefergebieten erklärt werden, nachdem dort die mesozoisch-tertiäre Verwitterungsdecke weiträumig abgetragen worden war. Für diese Annahme spricht auch der in den Sedimenten von CH-2 bisher nicht eindeutig nachgewiesene Illit, der in den paläozoischen Schichten von Ardennen und Schiefergebirge stark vertreten ist.

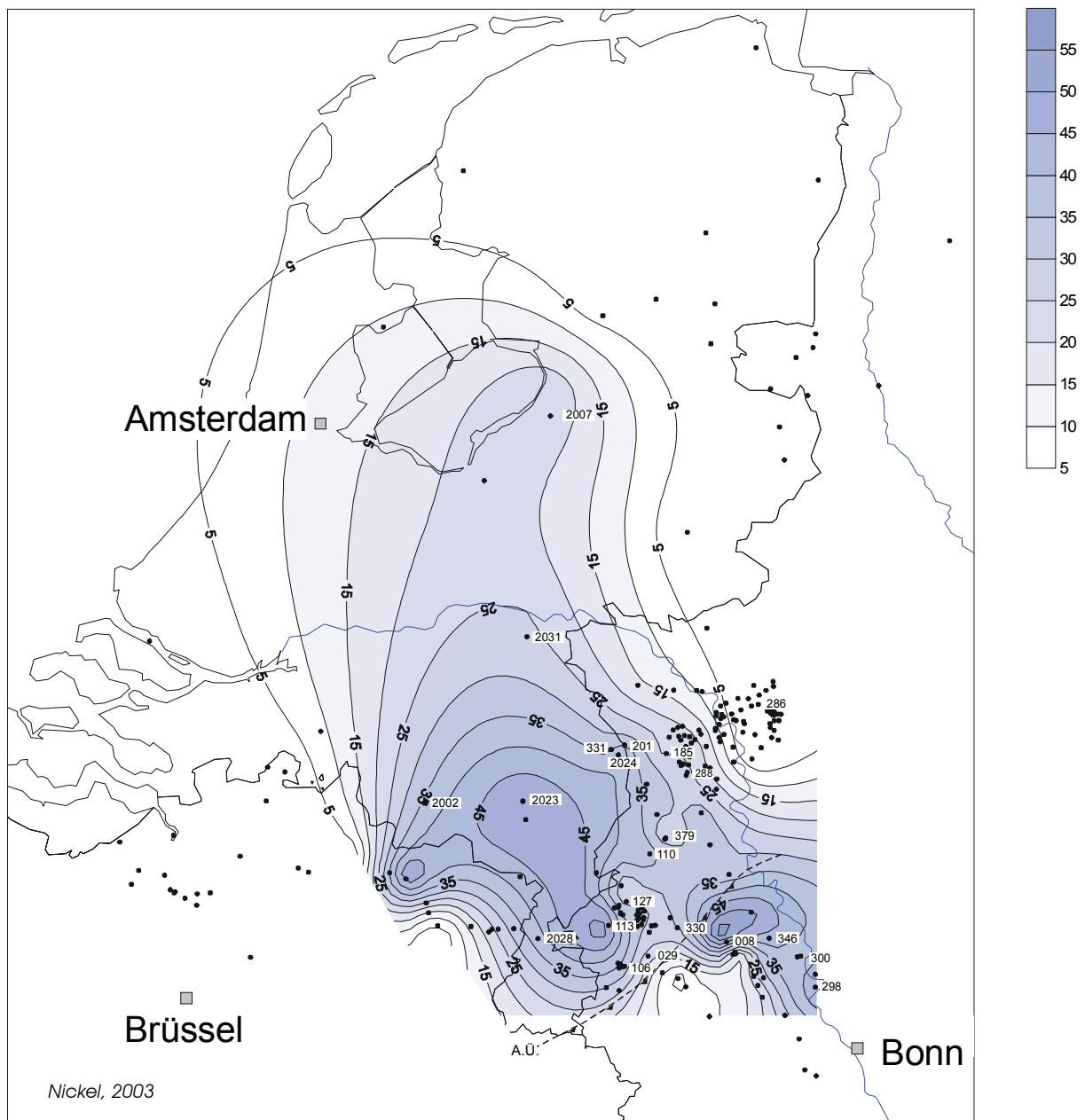


Abb. 3.16: Mächtigkeitsverteilung Einheit CH-2

Mächtigkeitsverteilung in der Referenzregion abgeleitet aus Profilen und Bohrungen (z.T. mit Bohrnummern), Mächtigkeiten extrapoliert; A.Ü.: Verlauf der Aachener Überschiebung, sonstige Störungen nicht ausgehalten; Isopachenabstand: 5 m, Isopachenintervall: 5 m – 50 m

Mächtigkeiten / Tektonik

Im Referenzgebiet sind ähnlich wie für CH-1 zwei Sedimentationszentren erkennbar (Abb. 3.16). Im Rurgraben dehnte sich die bereits angelegte Senkungszone nach Südwesten und Südosten aus und nahm bis 55 Meter Sedimente (Bohrung 113) auf. Ähnlich große Sedimentstapel entstanden auf der nördlichen Köln-Scholle. In einem weiten Bogen von der nördlichen Krefeld-Scholle über die östlichen Niederlande bis weit nach Norddeutschland hinein fehlen Ablagerungen von CH-2. Vergleichbare Sedimentmächtigkeiten wie im Referenzgebiet wur-

den jedoch in der Bohrung Gartow mit 46 Metern ermittelt, allerdings ist dort die Abgrenzung zum Hangenden problematisch.

Die Ausdehnung des Sedimentationszentrums im Rurgraben nach Südosten lässt auf einen weiteren Einbruch dieser Scholle schließen. Darüber hinaus erweiterte sich der Rurgraben bis zu den westlichen Randstaffeln im Süden. Am Ostrand leiteten Randstörungen abgetrept von der Venlo-Scholle zum Rurgraben über, der im Bereich der Bohrung 113 rund 20 Meter mehr Sedimente aufnahm als die Venlo-Scholle in der nur wenige Kilometer entfernt liegenden Bohrung 127. Südlich davon sank der Rurgraben entlang der Rurrand-Verwerfung gegenüber der Erft-Scholle weiter ab, wie der Mächtigkeitsunterschied zwischen den benachbarten Bohrungen 029 auf der Erft-Scholle (22 Meter) und 106 im Rurgraben (34 Meter) belegt.

Die seit RU-7 erkennbare Abschiebung des mittleren und nördlichen Bereichs der Venlo-Scholle gegenüber der Krefeld-Scholle setzte sich im Zeitintervall CH-2 nicht fort. Dies belegen die benachbarten Bohrungen 110 (41 Meter) auf der Venlo- und 379 (37 Meter) auf der Krefeld-Scholle. Dagegen spielte die Aachener Überschiebung im Zeitabschnitt CH-2 wieder eine wichtige Rolle, da an ihr die Köln-Scholle absank und im Bereich der Bohrung 008 ein Sedimentationszentrum mit mehr als 60 Meter Mächtigkeit entstand, während die beiden nördlich angrenzenden Schollen als Hochschollen wirkten.

Biostratigraphie / Alter

Dinoflagellaten-Untersuchungen sind nur von der Bohrung 288 in der Niederrheinischen Bucht und von Bohrung 2098 in Ostdeutschland bekannt. In beiden liegt die Einheit CH-2 innerhalb von Dinoflagellatenzone D 15. Variabler ist das Bild bei der Nannoplanktonzonierung. In Bohrung 288 auf der Krefeld-Scholle liegt CH-2 komplett in der Zone NP 24, in den Bohrungen 201, 331 und 2024 auf der Venlo-Scholle vollzieht sich der Übergang von NP 24 zu NP 25 und im Osten des Arbeitsgebiets in der Bohrung 2098 gehört CH-2 vollständig zu NP 25.

3.2.3 Einheit CH-3

Definition

Die in den meisten Fällen sandige Einheit CH-3 lässt sich im Arbeitsgebiet am sichersten mit Hilfe der Widerstandsmessungen abgrenzen, da hier die Differenzierung der Chatt-Schichten am stärksten abgebildet wird. Die Untergrenze X ist durch eine signifikante Erhöhung der Widerstandswerte an der Basis von CH-3 gekennzeichnet, die Gamma Ray-Messwerte gehen an dieser Grenze leicht zurück. Im Hangenden wird CH-3 an der Grenze XI durch einen deut-

lichen Rückgang der Widerstandsmesswerte gegen CH-4 abgegrenzt (Abb. 2.4). CH-3 ist nicht in der gesamten Referenzregion als eigenständige Einheit kartierbar, da der feinkörnigere Abschnitt CH-4 im Hangenden nicht in allen Bohrungen erkennbar ist.

Synonyme / regionale Bezeichnungen

Die Einheit CH-3 ist in der Äußeren Niederrheinischen Bucht ein Bestandteil der Grafenberg-Schichten, während sie auf den Schollen der südlichen Niederrheinischen Bucht zum Sand 07 (SCHNEIDER & THIELE 1965) zählt. In den Niederlanden gehören alle CH-3-Abschnitte zum lithostratigraphisch definierten Veldhoven Clay (VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE 1997), allein in der Bohrung 331 ist CH-3 Teil des Voort Sand. In der Bohrung 2098 (Gartow) entspricht CH-3 einem Teil des Chattsands (KÖTHER 1990).

Lithologie / Fazies

Die Einheit CH-3 ist in der Niederrheinischen Bucht überall in sandiger Fazies entwickelt. In den weit verbreiteten glaukonithaltigen Feinsanden der Grafenberg-Schichten unterscheidet sich Einheit CH-3 deutlich im Grad der Aufarbeitung von der liegenden Einheit CH-2. Die intensivste Aufarbeitung in den Grafenberg-Sanden der Niederrheinischen Bucht kann durch hohe Widerstandswerte am Ostrand der Krefeld-Scholle in den Bohrungen 288, 197 und 291 abgeleitet werden. In den Profilen 10 (Abb. A2.10) und 12 (Abb. A2.12) lässt sich dieser Anstieg der Widerstandswerte zum östlichen Beckenrand hin sehr gut nachvollziehen. Für die südliche Köln-Scholle leitete KLETT (2000) aus der Bohrung 300 für dieses Niveau einen reinen Strandsand ab, während er aus dem Elektrofaziesprofil der Bohrung 113 im Rurgraben für CH-3 auf Sedimentationsbedingungen eines inneren Schelfs schloss.

In der östlich benachbarten Bohrung 110 auf der südlichen Venlo-Scholle deutet Feinsand mit stabilem Schwermineralspektrum, wie er in KLOSTERMANN et al. (1990) für diesen Abschnitt beschrieben wird, ebenfalls auf Aufarbeitung durch Welleneinfluss hin. Allerdings zeigen in der weiter im Südwesten gelegenen Bohrung 038 die Gammastrahlungsmessungen höhere Durchschnittswerte als für Einheit CH-1, d.h. die Aufarbeitung war an dieser Position nicht so stark wie an der Chattbasis. Dies wiederum korrespondiert mit den Angaben von F.K. ZIEGLER (1994) zur Bathymetrie, der von 30 Meter Wassertiefe und somit von ca. 10 Meter tieferem Wasser als in CH-1 ausging. In den belgischen und niederländischen Bohrungen ist die stärkere Aufarbeitung ebenfalls anhand der Bohrlochmessungen zu erkennen, so dass allgemein in der Referenzregion von einem niedrigeren Meeresspiegel als in CH-2 ausgegangen werden kann.

Mächtigkeiten / Tektonik

Im Zeitabschnitt CH-3 bestanden die zwei bereits angelegten Sedimentationszentren im Rurgraben und auf der Köln-Scholle fort. Allerdings verlagerte sich das Zentrum im Rurgraben durch eine Kippung der Bruchscholle in den Südosten, wo sich mehr als 70 Meter Sedimente (Bohrung 113: 72,5 Meter) absetzten, während die größten Mächtigkeiten der Köln-Scholle rund 30 Meter betragen (Abb. 3.17). Eine Sedimentation in Belgien ist durch die Hebung des Brabanter Massivs dagegen kaum noch feststellbar. In Norddeutschland kann CH-3 nur in der Bohrung Gartow mit einer Mächtigkeit von 12 Metern nachgewiesen werden, jedoch ist diese Einstufung insofern problematisch, als die Sedimente von Quartär überlagert werden und nur unsicher zum Hangenden abgegrenzt werden können.

Ähnlich wie im Zeitabschnitt CH-2 bildeten die Randstörungen des Wassenberger Horstes einen von der Venlo-Scholle zum Rurgraben überleitenden Staffelbruch. Dadurch akkumulierten auf der östlich gelegenen Hochscholle rund 25 Meter Sedimente (Bohrung 127), während nur wenige Kilometer entfernt im Rurgraben auf der Tiefscholle mehr als 70 Meter Detritus abgelagert wurden. Weiter südlich brach der Rurgraben entlang der Rurrand-Verwerfung gegenüber der Erft-Scholle weiter ein, wie der Mächtigkeitsunterschied zwischen den benachbarten Bohrungen 029 auf der Erft-Scholle (15 Meter) und 106 im Rurgraben (25 Meter) belegt.

Die Aachener Überschiebung spielte auch im Zeitabschnitt CH-3 eine wichtige Rolle, da an ihr die Köln-Scholle absank und im Bereich der Bohrung 008 ein Sedimentationszentrum mit mehr als 30 Meter Mächtigkeit entstand, während die beiden nördlich angrenzenden Schollen als Hochschollen wirkten.

Biostratigraphie / Alter

Wie sich aus den Dinoflagellaten-Untersuchungen von BENEDEK (1972) in der Niederrheinischen Bucht und von KÖTHER (1990) an Proben der ostdeutschen Bohrung Gartow ableiten lässt, fällt die Einheit CH-3 im Arbeitsgebiet einheitlich in die Zone D 15. Durch Nanoplankton-Untersuchungen können die Sedimente in den niederrheinischen und niederländischen Bohrungen 201, 331, 2024 sowie der ostdeutschen Bohrung 2098 zu NP 25 zugeordnet werden. Allein in der Bohrung 288 auf der Krefeld-Scholle fällt CH-3 noch in NP 24.

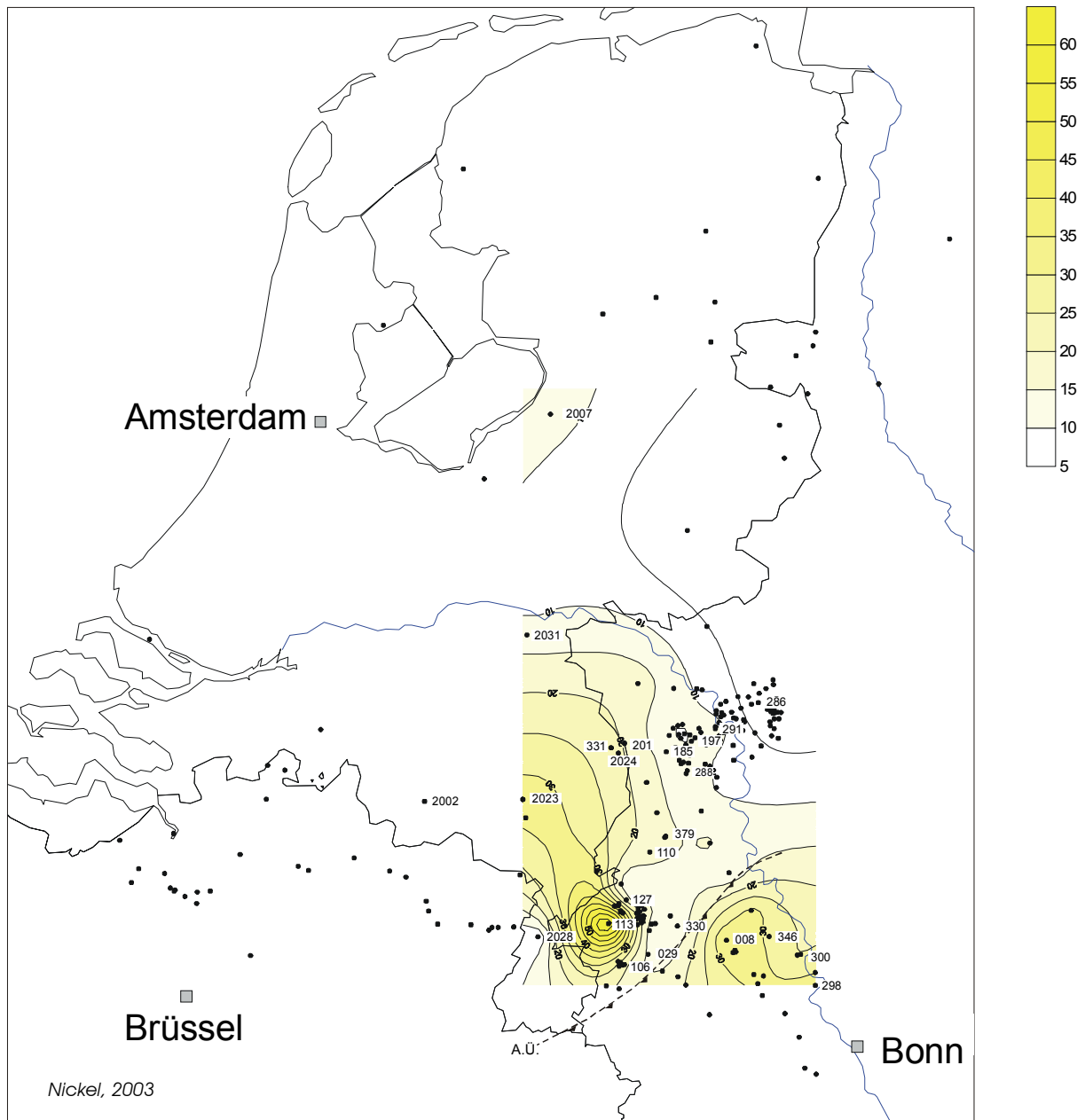


Abb. 3.17: Mächtigkeitsverteilung Einheit CH-3

Mächtigkeitsverteilung in der Referenzregion abgeleitet aus Profilen und Bohrungen (z.T. mit Bohrnummern), Mächtigkeiten extrapoliert; A.Ü.: Verlauf der Aachener Überschiebung, sonstige Störungen nicht ausgehalten; Isopachenabstand: 5 m, Isopachenintervall: 5 m – 60 m

3.2.4 Einheit CH-4

Definition

Nicht in allen Chatt führenden Bohrungen kann die Einheit CH-4 eindeutig festgelegt werden. In den Bohrungen, in denen dies möglich ist, beginnt CH-4 mit einer Verminderung der Widerstandswerte. In der Regel kann innerhalb von CH-4 ein zweimaliger Rückgang der Widerstandswerte beobachtet werden, ehe mit einem erneuten Anstieg an der Grenze XII die Einheit CH-5 beginnt (Abb. 2.4).

Synonyme / regionale Bezeichnungen

Im Norden der Niederrheinischen Bucht ist die Einheit CH-4 weiterhin ein Teil der Grafenberg-Schichten, während sie im Süden als Teil der Köln-Schichten dem Ton 08 (SCHNEIDER & THIELE 1965) entspricht. In den Niederlanden hat sich die Zuordnung gegenüber Einheit CH-3 nicht verändert. Nach wie vor zählen allein die Sedimente in Bohrung 331 zum Voort Sand, während in den übrigen Bohrungen alle CH-4-Abschnitte zum Veldhoven Clay (VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE 1997) gehören. In der Bohrung Gartow (2098) kann CH-4 nicht eindeutig zugewiesen werden.

Lithologie / Fazies

Zwar entsprachen die Lithologie der Einheit CH-4 und die Verteilung der Sedimente im Wesentlichen der Einheit CH-2, doch ist CH-4 aufgrund seiner geringen Mächtigkeit nicht in allen Bohrungen der Referenzregion eindeutig auszumachen. Teilweise haben die überlagernden Sedimente der Einheit CH-5 für eine Aufarbeitung der geringmächtigen CH-4-Lage gesorgt, wodurch CH-3 bis CH-5 als einheitliche sandige Lage entwickelt sind.

In den meisten Bohrungen der Referenzregion kann jedoch in Einheit CH-4 ein ähnliches Phänomen wie in CH-2 beobachtet werden. Auch in dieser Einheit ist unabhängig von der Lithologie und den lithostratigraphischen Bezeichnungen der Schichten in den deutschen, den niederländischen und den nordostbelgischen Bohrungen ein zweifacher Rückgang der Widerstandswerte feststellbar. In Analogie zu Einheit CH-2 können die charakteristischen Muster der Widerstandsmessungen mit bis zu zwei Moorwachstumsphasen im Süden der Niederrheinischen Bucht in Verbindung gebracht werden. So ist anzunehmen, dass die veränderten hydrologischen Bedingungen, die das Aufwachsen der Moore gestattet haben, gleichzeitig zu feinkörnigeren Sedimenten und damit einhergehenden Veränderungen in der Niederrheinischen Bucht geführt haben. Dies wird durch Befunde aus den Ostracoden-Untersuchungen von F.K. ZIEGLER (1994) gestützt, der in der Bohrung 038 für einen Horizont, der zwar nach den Bohrlochmessungen, nicht aber nach den lithologischen Bohrbefunden zu CH-4 zu zählen ist, eine Wassertiefe von 60 Metern rekonstruierte. In der westlich benachbarten Bohrung 113 im Rurgraben gibt das Elektrofaziesprofil von KLETT (2000) für die CH-4-Einheit mit einer

sehr feinkörnigen Lage an der Basis Hinweise auf Ablagerungen auf einem äußeren Schelf, im Hangenden auf Bedingungen eines inneren Schelfs.

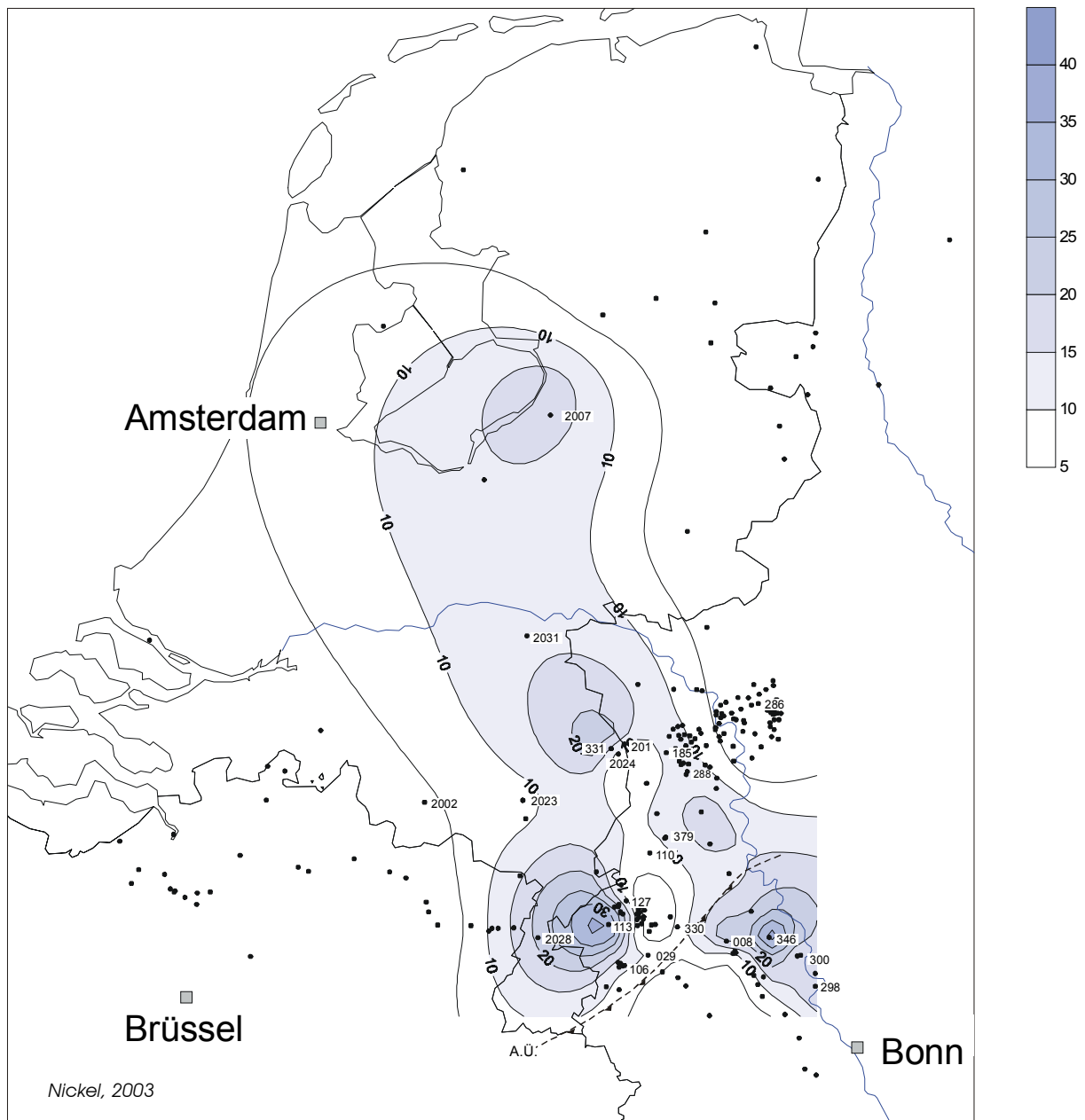


Abb. 3.18: Mächtigkeitsverteilung Einheit CH-4

Mächtigkeitsverteilung in der Referenzregion abgeleitet aus Profilen und Bohrungen (z.T. mit Bohrnummern), Mächtigkeiten extrapoliert; A.Ü.: Verlauf der Aachener Überschiebung, sonstige Störungen nicht ausgehalten; Isopachenabstand: 5 m, Isopachenintervall: 5 m – 35 m

Mächtigkeiten / Tektonik

Die beiden punktförmigen Sedimentationszentren im südlichen Rurgraben und auf der nördlichen Köln-Scholle blieben nahezu ortsfest im Vergleich zum Zeitabschnitt CH-3 und nahmen jeweils etwa 35 Meter Ablagerungen auf (Abb. 3.18). Möglicherweise entwickelte sich im Bereich der mittleren Venlo-Scholle ein drittes Sedimentationszentrum, in dem rund 26 Meter

Detritus (Bohrung 331) sedimentierten. Da jedoch die Datendichte für dieses Gebiet sehr gering ist, bedarf diese Aussage zukünftiger Bestätigung.

Die Randstörungen des Wassenberger Horstes bildeten seit CH-2 einen von der Venlo-Scholle zum Rurgraben überleitenden Staffelbruch. Dabei nahm der Rurgraben im Bereich der Bohrung 113 rund 20 Meter mehr Sedimente auf als die Venlo-Scholle in der nur wenige Kilometer entfernt liegenden Bohrung 127. Auch gegenüber der Erft-Scholle brach der Rurgraben weiter ein, wie der Mächtigkeitsunterschied zwischen den benachbarten Bohrungen 029 auf der Erft-Scholle (9 Meter) und 106 im Rurgraben (14 Meter) belegt.

Die Aachener Überschiebung spielte auch im Zeitabschnitt CH-4 eine wichtige Rolle, da an ihr die Köln-Scholle absank und im Bereich der Bohrung 346 ein Sedimentationszentrum mit fast 40 Meter Mächtigkeit entstand, während die beiden nördlich angrenzenden Schollen als Hochschollen wirkten.

Biostratigraphie / Alter

Die Einheit CH-4 enthält in den zur Verfügung stehenden Bohrungen der Niederrheinischen Bucht und der Niederlande einheitlich Nannoplankton der Zone NP 25. Die Dinoflagellatenzone D 15 kann nur von der niederrheinischen Bohrung 288 abgeleitet werden (BENEDEK 1972), da in der ostdeutschen Bohrung Gartow die Abgrenzung von CH-4 nicht mehr möglich ist.

3.2.5 Einheit CH-5

Definition

Die Abgrenzung der in der Regel sandigen Einheit CH-5 lässt sich ähnlich wie für CH-3 am besten mit Hilfe von Widerstandsmessungen vornehmen, in denen ein Anstieg der Messwerte auf das Niveau von CH-3 oder darüber hinaus zu beobachten ist. Die Obergrenze XIII ist in Bohrlochmessungen durch einen erneuten Anstieg der Gamma Ray-Messwerte bei gleichzeitigem Rückgang der Widerstandsmesswerte erkennbar (Abb. 2.4).

Synonyme / regionale Bezeichnungen

Die Einheit CH-5 ist in der Niederrheinischen Bucht entweder ein Teil der sandigen Grafenberg-Schichten oder umfasst die Sedimente des Sand 09 nach SCHNEIDER & THIELE (1965). In der niederländischen Bohrung 331 zählt CH-5 nach wie vor zum Voort Sand, während alle übrigen niederländischen Bohrungen in diesem Abschnitt den feinkörnigen Veldhoven Clay enthalten. In der Bohrung Gartow (2098) kann CH-5 nicht eindeutig nachgewiesen werden.

Lithologie / Fazies

Lithologisch unterscheidet sich die Einheit CH-5 nur unwesentlich von CH-3. Wie in CH-3 dominieren in der nördlichen Niederrheinischen Bucht glaukonit- und glimmerhaltige Feinsande in Grafenberg-Fazies. Die Feinsande der Bohrung 110 enthalten im Abschnitt CH-5 wieder ein stabiles Schwermineralspektrum (KLOSTERMANN et al. 1990), so dass von verstärkter Aufarbeitung in diesem Horizont ausgegangen werden kann. Dafür sprechen auch die Ergebnisse von WELLE (1993) und F.K. ZIEGLER (1994), die anhand von Mollusken und Ostracoden in Proben des Schachtes Sophia Jacoba (038) die Sedimentationsbedingungen als teilweise turbulent und reich an Suspensionsfracht beschrieben haben. Die Wassertiefe soll an dieser Stelle maximal 20 Meter betragen haben, d.h. sie war geringer als in der Einheit CH-3.

Im Rurgraben wurden die Sedimente der Bohrung 113 erneut einem inneren Schelfmilieu zugeordnet (KLETT 2000). Auch auf der Köln-Scholle gab es wenig Veränderungen gegenüber CH-3, da der in dieser Einheit erbohrte relativ reine Sand nach KLETT (2000) als Strandsand angesprochen werden kann. Nach VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE (1997) ist bei den in den Niederlanden lithostratigraphisch zum Veldhoven Clay gehörenden Sedimenten von Schelfablagerungen auszugehen, die unter vollmarinen Bedingungen entstanden sind.

Mächtigkeiten / Tektonik

Die Einheit CH-5 ist aufgrund der problematischen Obergrenze von CH-4 nicht überall zweifelsfrei nachzuweisen. Die Mächtigkeitskarte (Abb. 3.19) bezieht demnach nur die Regionen mit ein, in denen CH-5 eindeutig differenzierbar ist. Analog zu den vorangegangenen Zeitabschnitten des Chatt existierten im Süden des Referenzgebiets zwei punktförmige Sedimentationszentren im Rurgraben und auf der nördlichen Köln-Scholle, die ihre Position jeweils um wenige Kilometer in Richtung auf die Aachener Überschiebung veränderten und beide mehr als 40 Meter Detritus aufnahmen. Das im Zeitabschnitt CH-4 nur ansatzweise erkennbare Sedimentationszentrum auf der mittleren Venlo-Scholle weitete sich während CH-5 erheblich aus. Sein Zentrum befand sich im Bereich der Bohrung 2031 auf der nördlichen Venlo-Scholle, wo rund 35 Meter CH-5-Sedimente nachweisbar sind.

Während des Zeitabschnitts CH-5 wurde der Rurgraben weiter geformt. Die Störungen des Wassenberger Horstes bildeten seit CH-2 einen von der Venlo-Scholle zum Rurgraben überleitenden Randabbruch. Dabei nahm der Rurgraben im Bereich der Bohrung 113 rund 20 Meter mehr Sedimente auf als die Venlo-Scholle in der nur wenige Kilometer entfernt liegenden Bohrung 127. Weiter südlich brach der Rurgraben entlang der Rurand-Verwerfung gegenüber der Erft-Scholle weiter ein, wie der Mächtigkeitsunterschied von ca. 25 Metern zwischen den benachbarten Bohrungen 029 auf der Erft-Scholle und 106 im Rurgraben belegt.

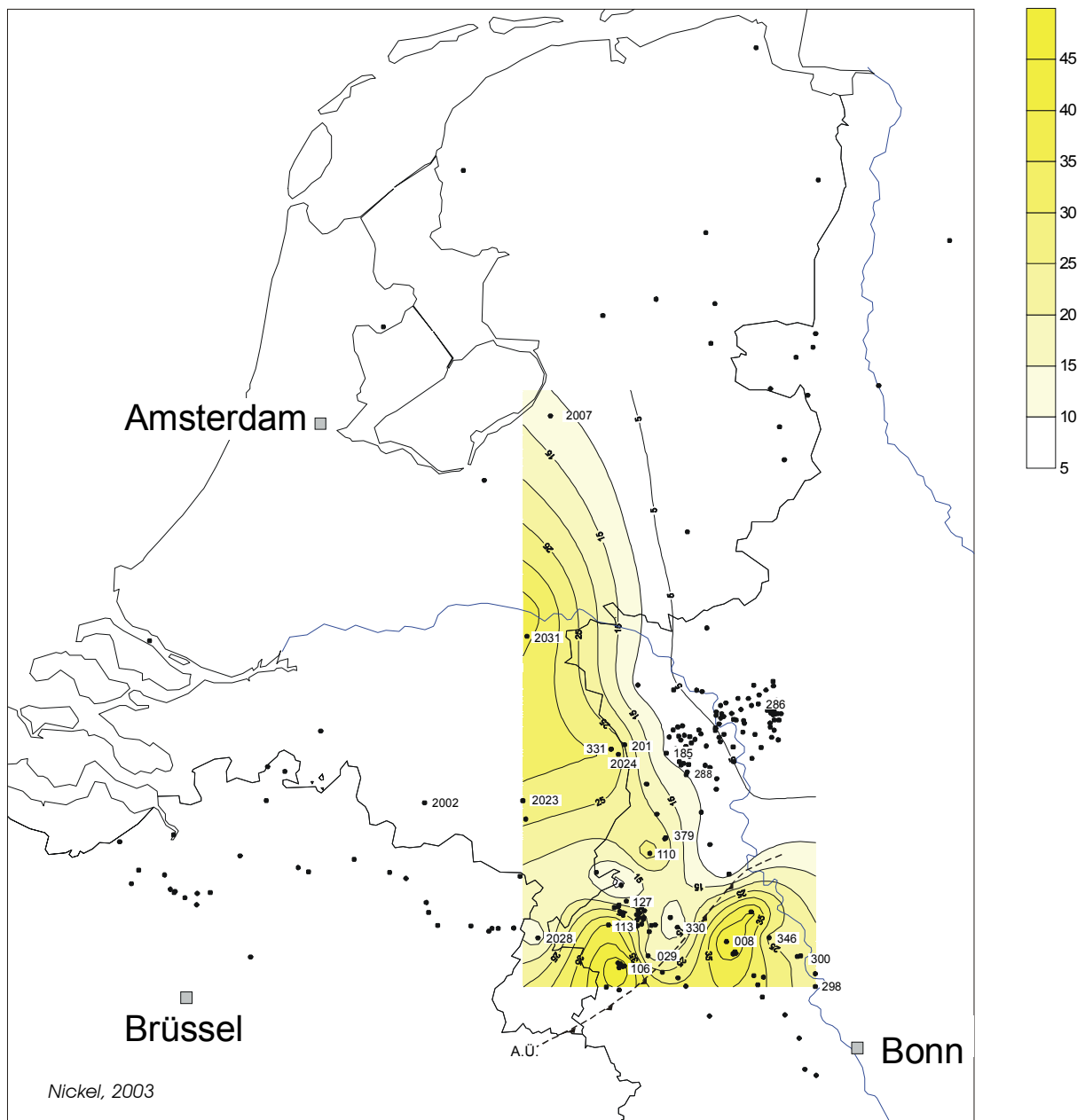


Abb. 3.19: Mächtigkeitsverteilung Einheit CH-5

Mächtigkeitsverteilung in der Referenzregion abgeleitet aus Profilen und Bohrungen (z.T. mit Bohrnummern), Mächtigkeiten extrapoliert; A.Ü.: Verlauf der Aachener Überschiebung, sonstige Störungen nicht ausgehalten; Isopachenabstand: 5 m, Isopachenintervall: 5 m – 40 m

Nachdem es am Viersener Sprung zwischen CH-3 und CH-4 zu keinen signifikanten Versatzbeträgen gekommen war, wurden der nördliche und mittlere Bereich der Venlo-Scholle gegenüber der Krefeld-Scholle während CH-5 abgeschoben. Darauf lassen die Mächtigkeiten in den benachbarten Bohrungen 2024 (25 Meter) auf der Venlo- und 185 (10 Meter) auf der Krefeld-Scholle schließen.

Die Aachener Überschiebung spielte auch im Zeitabschnitt CH-5 eine wichtige Rolle, da an ihr die Köln-Scholle absank und im Bereich der Bohrung 008 ein Sedimentationszentrum mit mehr als 45 Meter Mächtigkeit entstand, während die beiden nördlich angrenzenden Schollen als Hochschollen wirkten.

Biostratigraphie / Alter

Wie in der liegenden Einheit kann CH-5 in den niederrheinischen und niederländischen Bohrungen 201, 288, 331 und 2024 einheitlich der Nannoplanktonzone NP 25 zugerechnet werden. Eine Ableitung der Dinoflagellatenzone D 15 ist aus der Bohrung 288 möglich (BENEDEK 1972).

3.2.6 Einheit CH-6

Definition

Die untere Begrenzung von CH-6 ist in Bohrlochmessungen in der Regel deutlich durch einen abrupten Anstieg der Gamma Ray-Messwerte bei gleichzeitigem starkem Rückgang der Widerstandsmesswerte festzulegen. CH-6 ist damit ähnlich gut zu unterscheiden wie die weit verbreitete Einheit CH-2, auch die interne Struktur ist ähnlich. Bis zu drei charakteristische Rückgänge in den Widerstandsmessungen lassen sich innerhalb der Einheit CH-6 beobachten, in der Referenzbohrung 185 ist es allerdings nur eine relativ kompakte Einheit (Abb. 2.4). An der Obergrenze XIV lassen sowohl die Gammawerte als auch die Widerstandsmessungen mit einer Vergröberung der Sedimente auf den Beginn der obersten Chatteinheit CH-7 schließen.

Synonyme / regionale Bezeichnungen

Die Einheit CH-6 wird im Norden der Niederrheinischen Bucht zu den Grafenberg-Schichten gerechnet, während sie im Süden dem Ton 1 der Köln-Schichten entspricht (SCHNEIDER & THIELE 1965). In den untersuchten niederländischen Bohrungen gibt es bei den Bohrungen, die seit CH-2 ausschließlich zur lithostratigraphischen Einheit des Veldhoven Clay gerechnet werden, keine Veränderung. In der Bohrung 331 hingegen, die bislang ausschließlich Voort Sand enthielt, ist der oberste CH-6-Abschnitt erstmals Teil eines geringmächtig entwickelten Veldhoven Clays (VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE 1997). In der Bohrung Gartow (2098) kann CH-6 nicht nachgewiesen werden.

Lithologie / Fazies

Die Einheit CH-6 ist lithologisch und faziell am besten mit Einheit CH-2 vergleichbar. In den distalen niederländischen Bohrungen dominieren die tonig-siltigen Schelfsedimente der Veldhoven Clay-Fazies, die in weiter südlich gelegenen Bohrungen des Arbeitsgebiets zunehmend durch glaukonitische, siltig-tonige Feinsande der Grafenberg-Schichten und des Voort Sand abgelöst werden. In Bohrung 331 enthalten die obersten Meter von CH-6 erstmals Veldhoven Clay-Fazies, während der liegende Teil in Voort Sand-Fazies vorliegt, der an der Basis aus stark glaukonitischen Sanden besteht. Der Übergang von den glaukonitischen Schelfsand zu den küstennahen Köln-Schichten mit einer differenzierten, terrestrisch geprägten Faziesassoziation ist im Profil 10 (Abb. A2.10) gut zu sehen.

Wie in Einheit CH-2 lässt sich in allen Bohrungen, die CH-6 aufschließen, sowohl im Voort Sand als auch in den Grafenberg-Schichten, im Veldhoven Clay sowie im Ton 1 der Köln-Schichten ein bis zu dreimaliger Rückgang der Widerstandsmesswerte beobachten. Der Rückgang der Messwerte erreicht aber in den sandigen Partien in der Regel nicht mehr das Niveau von CH-2, so dass von einer Vergröberung der Sedimente und einer insgesamt geringeren Wassertiefe gegenüber CH-2 ausgegangen werden kann. Diese Annahme wird unter anderem durch die Ostracoden-Untersuchungen von F.K. ZIEGLER (1994) an Proben der Bohrung 038 gestützt, nach denen eine Wassertiefe von 30 Metern für diese Position abgeleitet wurde. Damit repräsentiert der tonig-siltige, glimmerführende Feinsand mit hohem Glaukonitgehalt zwar eine ähnliche Wassertiefe wie CH-3, liegt aber tiefer als CH-5. Mit Hilfe der Elektrofaziesanalyse konnte KLETT (2000) im Ton 1 der Bohrung 300 im Süden der Köln-Scholle eine zyklische Abfolge vom Liegenden zum Hangenden von „*Becken – Moor – Becken – Moor – Becken*“ nachweisen.

Der charakteristische dreimalige Rückgang der Widerstandsmessungen ist auch in den Beckenabfolgen zu beobachten. Auf der südlichen Venlo-Scholle befinden sich in der Bohrung 110 in diesen Niveaus jeweils Glaukonithorizonte. In den Spectralogs der Bohrung 006 entsprechen die erhöhten Gammastrahlungsmessungen wie bereits in Einheit CH-2 fast ausschließlich dem Kaliumanteil, im Unterschied zu dieser Einheit ist in CH-6 jedoch insbesondere an der Basis der Thoriumanteil erhöht (Fall D in Abb. 2.3).

Die Zyklizität in den Bohrlochmessungen bestätigt die Beobachtungen für die Einheiten CH-2 und CH-4, nach denen sich die hydrologischen Veränderungen unabhängig von der Lithologie zeitgleich ausgewirkt haben müssen. Denn trotz unterschiedlicher Subsidenz und damit unterschiedlicher Sedimentmächtigkeiten sind die offensichtlich veränderten Bedingungen, die im Süden der Niederrheinischen Bucht zu terrestrisch beeinflusster Sedimentation mit Moor-

wachstum und im Norden zu Glaukonitlagen und feinkörnigeren Ablagerungen auf dem inneren Schelf geführt haben, in der gesamten Referenzregion zu beobachten.

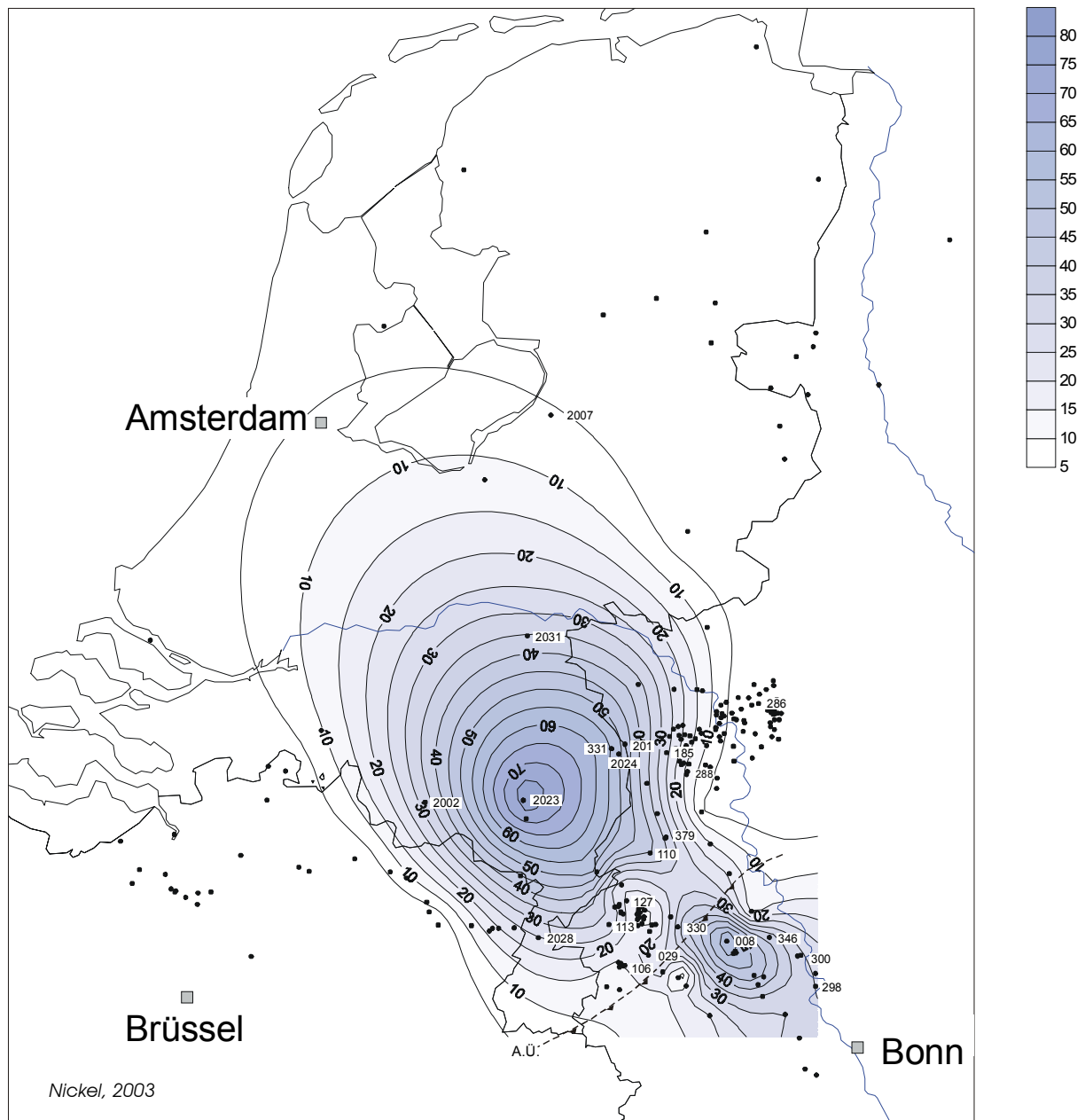


Abb. 3.20: Mächtigkeitsverteilung Einheit CH-6

Mächtigkeitsverteilung in der Referenzregion abgeleitet aus Profilen und Bohrungen (z.T. mit Bohrnummern), Mächtigkeiten extrapoliert; A.Ü.: Verlauf der Aachener Überschiebung, sonstige Störungen nicht ausgehalten; Isopachenabstand: 5 m, Isopachenintervall: 5 m – 75 m

Mächtigkeiten / Tektonik

Im Zeitabschnitt CH-6 akkumulierte der Detritus in zwei Sedimentationszentren. Das bedeutendere befand sich im Bereich der Bohrung 2023 im mittleren Rurgraben, wo sich rund 80 Meter Sediment abgelagerten. Gegenüber CH-5 verlagerte sich seine Position um rund 40 Kilometer nach Süden. Ein zweites Sedimentationszentrum lag in seiner Position fast unverän-

dert im Norden der Köln-Scholle und nahm mehr als 60 Meter Ablagerungen auf (Bohrung 008). Eine Verbindung beider Zentren erfolgte in NW-SE-Richtung über die südliche Venlo-Scholle und die Aachener Überschiebung hinweg. Dagegen ist das von CH-2 bis CH-5 bestehende Sedimentationszentrum im südlichen Rurgraben unweit der Aachener Überschiebung nicht mehr nachweisbar (Abb. 3.20).

In CH-6 machte sich die Feldbiss-Verwerfung mit einer deutlichen Vertikalbewegung bemerkbar, durch die der zentrale Teil des Rurgrabens abgeschoben wurde. In der zentralen Niederrheinischen Bucht brach der Jackerather Horst gegenüber Erft- und Venlo-Scholle ein und nahm eine Grabenposition ein, in der sich Sedimente in einer Mächtigkeit von mehr als 30 Metern sammelten. Die in CH-5 einsetzende Absenkung der mittleren und nördlichen Venlo-Scholle dauerte in CH-6 an. Darauf lassen die Mächtigkeiten in den benachbarten Bohrungen 2024 (50 Meter) auf der Venlo- und 185 (25 Meter) auf der Krefeld-Scholle schließen.

Biostratigraphie / Alter

Die biostratigraphischen Angaben für die Einheit CH-6 sind im Arbeitsgebiet sehr einheitlich. In der Niederrheinischen Bucht liegt CH-6 innerhalb von Dinoflagellatenzone D 15, wie in Bohrung 288 abgeleitet werden konnte. Die Nannoplankton-Untersuchungen ergaben wie in den Einheiten CH-4 und CH-5 eine konsistente Zuordnung zu NP 25.

3.2.7 Einheit CH-7

Definition

Die Einheit CH-7 reicht vom Top der Einheit CH-6 bis zur Obergrenze XV, die gleichzeitig die obere Begrenzung des Oligozän im Arbeitsgebiet und in der Regel diskordant entwickelt ist. Sedimente des Miozän oder Quartär überlagern die Chatteinheit mit erosivem Kontakt (Abb. 2.4). Ein konkordanter Übergang ist nur in der südlichen Niederrheinischen Bucht innerhalb der Köln-Schichten zu beobachten. Die Mächtigkeiten und die Eigenschaften der Einheit schwanken in Abhängigkeit von der geographischen und insbesondere der tektonischen Position der jeweiligen Bohrung stark.

Synonyme / regionale Bezeichnungen

Da sich die Einheit CH-7 von CH-6 bis zur Oligozän-Obergrenze erstreckt, gibt es eine Reihe von lithostratigraphischen Einheiten, die unter CH-7 zusammengefasst sind. So fallen in der südlichen Niederrheinischen Bucht die Köln-Schichten mit dem Sand 2 und dem Ton 3 nach SCHNEIDER & THIELE (1965) darunter, während CH-7 im Norden der Niederrheinischen Bucht noch immer ein Teil der sandigen Grafenberg-Schichten ist. Für sandige Chatt-Schichten über dem Veldhoven Clay wurde in den Niederlanden bei der Revision der Stra-

tigraphie durch VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE (1997) das Someren Member als oberstes Schichtglied im Chatt eingeführt, das beispielsweise in den Bohrungen 2002 und 331 zu CH-7 zählt. In Bohrungen, die in diesem Horizont über feinkörnige Sedimente verfügen, gilt CH-7 als Teil des Veldhoven Clay.

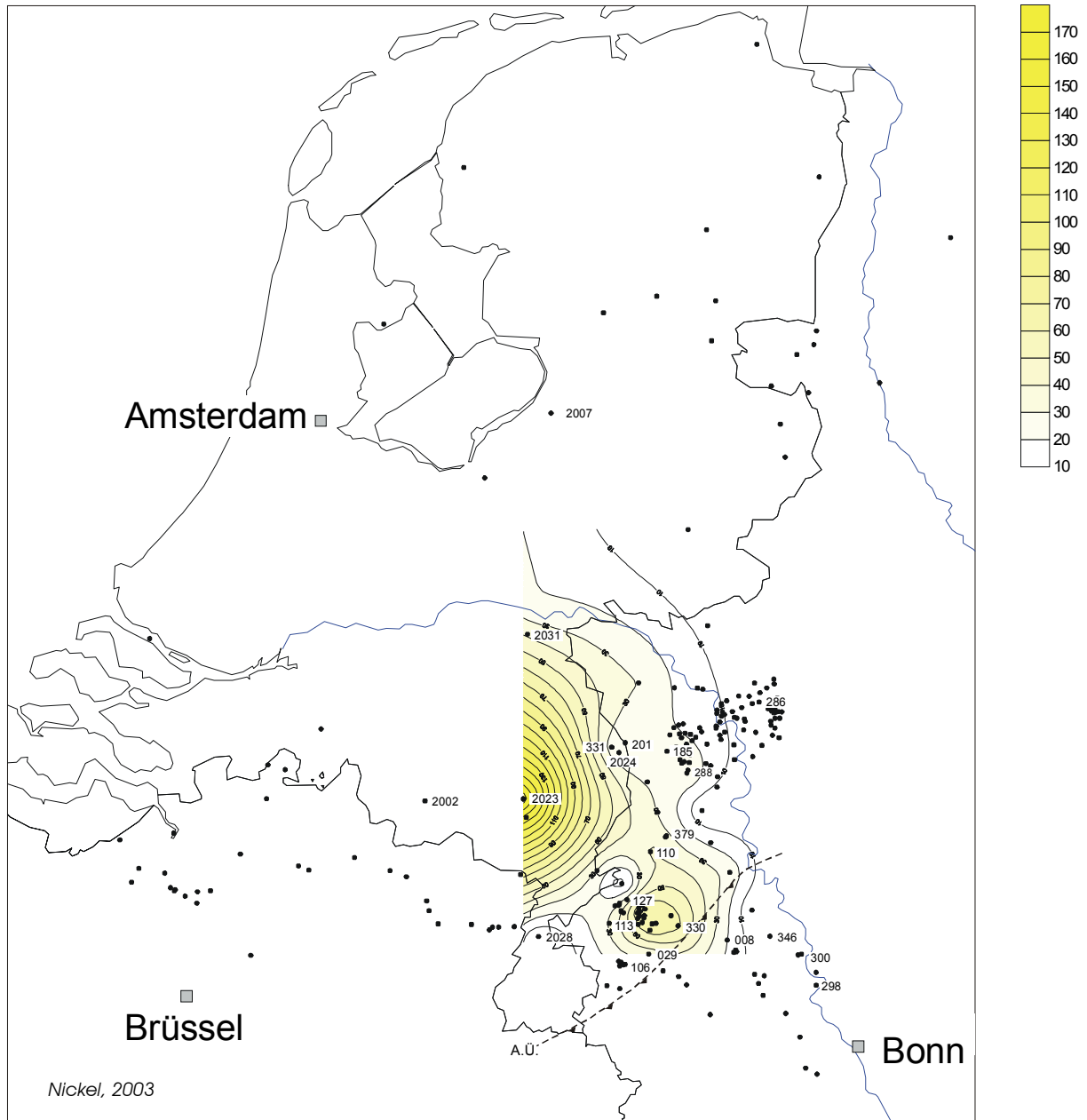


Abb. 3.21: Mächtigkeitsverteilung Einheit CH-7

Mächtigkeitsverteilung in der Referenzregion abgeleitet aus Profilen und Bohrungen (z.T. mit Bohrnummern), Mächtigkeiten extrapoliert; A.Ü.: Verlauf der Aachener Überschiebung, sonstige Störungen nicht ausgehalten; Isopachenabstand: 10 m, Isopachenintervall: 10 m – 170 m

Lithologie / Fazies

Lithologisch und faziell gleicht CH-7 den sandigen Einheiten CH-3 und CH-5, besitzt aber einen deutlicheren coarsening-up-Trend und einen höheren Reifegrad der Sedimente als die beiden liegenden Sande. Das durchschnittliche Niveau der Gammastrahlungswerte ist ähnlich niedrig wie in CH-1. Die Wassertiefe von weniger als 20 Meter, die F.K. ZIEGLER (1994) aus Ostracoden-Proben der Bohrung 038 für diesen Abschnitt ableitete, unterstreicht die Befunde der Bohrlochmessungen.

Mächtigkeiten / Tektonik

Während CH-7 akkumulierte der Detritus im Referenzgebiet in zwei Bereichen (Abb. 3.21). Das bereits seit CH-5 bestehende Sedimentationszentrum im mittleren Rurgraben war die bedeutendste Sedimentfalle während CH-7. Dort brach der nördliche Rurgraben entlang der Peelrand-Verwerfung stark gegenüber den östlich angrenzenden Bruchschollen ein. In der Bohrung 2023 können mehr als 170 Meter Sediment diesem Zeitabschnitt zugerechnet werden.

Ein kleineres Sedimentationszentrum entstand im Süden der Venlo-Scholle und dehnte sich über die nördliche Erft-Scholle bis zur Köln-Scholle aus. In diesem Bereich wurden in der Bohrung 312 am Tagebau Hambach 70 Meter CH-7-Sedimente festgestellt (KLETT 2000). Dafür war die Aachener Überschiebung verantwortlich, da an ihr die Venlo-Scholle absank, während die südlich angrenzende Köln-Scholle als Hochscholle wirkte. Der im Chatt vorherrschende Bewegungssinn entlang der Aachener Überschiebung stellte sich damit während CH-7 um.

Biostratigraphie / Alter

Eine Aussage zur biostratigraphischen Einordnung von CH-7 ist aufgrund von Dinoflagellaten nicht möglich, da die Einheit CH-7 in der Bohrung 288 nicht nachgewiesen werden kann. Entweder wurde sie nicht abgelagert oder aber später durch die Erosion im Untermiozän abgetragen, da Miozänsedimente direkt über CH-6 folgen. Nach den Ergebnissen der Nanoplanktonuntersuchungen der Bohrungen 201, 331 und 2024 liegt CH-7 innerhalb der Zone NP 25.

4. Schlussfolgerungen

4.1 Faziesentwicklung

Zu Beginn des Rupel transgredierte die Nordsee auf das südlich gelegene Vorland und füllte das vorhandene Relief weitgehend auf. Der marine Vorstoß erfolgte jedoch nicht gleichmäßig, vielmehr können bis zu drei Kleinzyklen im Westen und zwei im Osten des Arbeitsgebiets nachgewiesen werden. Die Küstenlinie verlief in Höhe der Aachener Überschiebung oder noch weiter südlich, in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt südlich der erfassten Bohrungen. Das gesamte Arbeitsgebiet unterlag einer vergleichbaren tektonisch-sedimentären Entwicklung und dokumentiert den Faziesübergang von distalen Schelftonen im Norden zu einer sandigen Küste mit subtidalem Unterem Vorstrand im Süden.

Am Beginn von RU-2 transgredierte im gesamten Arbeitsgebiet das Meer mit einer marinen Überflutungsfläche; es müssen Wassertiefen von $> 50\text{m}$ angenommen werden. Tonig-siltige Schelfsedimente mit Septarienlagen dominieren die Abfolge von RU-2 auf dem offen marinen Schelf. Beckenweit können bis zu vier fining-up-Zyklen bestimmt werden, die auf kürzere Meeresspiegelschwankungen in einer stabilen tektonischen Situation deuten. Einen Sonderfall im SE der Referenzregion bilden die fetten bis siltigen Tone der Einheit RU-2-RT mit Muscheln der Gattung *Nucula*, die indikativ für euxinische Bedingungen mit einer kühlen Bodenwasserschicht sind. Diese Region des oligozänen Nordseebeckens muss mithin durch eine submarine Schwelle vom übrigen Becken weitgehend abgetrennt gewesen sein.

Während RU-2 befand sich im SW der Referenzregion ein Barrieresand-System, das sich küstenparallel in SW-NE-Richtung von Nordostbelgien über Limburg bis nach Krefeld erstreckte. Im Westen des Barrieresandes (Einheit RU-2-Kerniel) herrschten größere Strömungsgeschwindigkeiten, der Sedimenttransport erfolgte in NE-Richtung. Zwar ist der Kontakt zum Festland heute nicht mehr aufgeschlossen, doch die Geometrie deutet auf eine submarine Verbindung zum Festland im SW, so dass eine oligozäne Barriereinsel-Landschaft, vergleichbar den Friesischen Inseln der heutigen Nordsee, angenommen werden kann. Weiter im SE befinden sich die Tone und Feinsilte des Rückseitenwatts. Aus diesen Beobachtungen kann geschlossen werden, dass die Küste in RU-2 wellendominiert, teilweise geschlossen und durch küstenparallelen Sedimenttransport unter tidalen Bedingungen (REINSON 1992) gekennzeichnet war.

Zu Beginn von RU-3 kam es durch einen starken Meeresspiegelanstieg zu einer beckenweiten Überflutung, die weit in das Hinterland gereicht haben muss, da im Arbeitsgebiet tonreiche Sedimente mit großen Mengen organischem Material nachweisbar sind, die auf eine condensed section deuten. Im westlichen Teilgebiet sind drei Kleinzyklen nachweisbar, die auf einen

stagnierenden Wasseraustausch zurückzuführen sind. Die dadurch hervorgerufene stabile Wasserschichtung wurde durch den Eintrag von Kaltwasser in das südliche Teilbecken verursacht und lässt darauf schließen, dass dieses Gebiet durch eine submarine Schwelle vom zentralen südlichen Nordseebecken getrennt war. Diese submarine Schwelle verlief vom heutigen nördlichen Niederrhein in südwestliche Richtung. Der Verlauf der Gamma Ray-Messkurve ähnelt sehr stark den TOC (,total organic carbon')-Messkurven des Fairport Member und Blue Hill Shales im Western Interior Basin der USA (FORSTER in Vorb.), wobei diese Zyklen nach den Ergebnissen der geochemischen Analysen Transgressions-Regressionen-Zyklen 4. und 5. Ordnung sensu VAIL, zugeordnet werden können, die auch die Produktion und Erhaltung von organischem Material steuern (CREANEY & PASSEY 1993).

Erstmalig im Rupel kam es zu Beginn von RU-4 im ganzen Arbeitsgebiet zu einer Regression, die eine Phase größerer Sedimentation einleitete. Bedingt durch den abnehmenden Meeresspiegel verflachte der Ablagerungsraum und die Sedimente wurden stärker aufgearbeitet. In Norddeutschland wurden von DILL et al. (1997) mehrere submarine Schwellen nachgewiesen. Im Südwesten des Arbeitsgebiets kam es durch die Heraushebung des Rheinischen Massivs, die im Westen begann, zu einem vermehrten klastischen Eintrag. Sande auf dem Campine-Block deuten auf die nahe gelegene Küstenlinie, deren weiterer Verlauf nach Osten jedoch unklar ist. Die Befunde von der nördlichen Köln-Scholle schließen die Küstenlinie wieder auf. Der progradierende marine Schelf im Bereich der Bohrung 102 bei Kleve weist auf die nahe gelegene Küstenlinie im Osten. Dagegen kann die Küstenlinie in Nord- und Ostdeutschland nicht auskartiert werden, da die Bohrpunkte zu distal gelegen sind.

Die zweite Phase der Regression, die in RU-4 ihren Anfang nahm, setzte sich während RU-5 fort und spiegelt sich in den Sedimenten als stabiles coarsening up wider. Weite Teile des Arbeitsgebiets befanden sich im Bereich des mittleren bis inneren Schelfs. Nur im südwestlichen Abschnitt kann darüber hinaus die Küstenlinie, die im Bereich der Aachener Überschiebung lag, festgemacht werden.

Zu Beginn von RU-6 kam es zu einer weiteren Transgression der oligozänen Nordsee auf das südliche Festland, während der kalkhaltige tonig-siltige Schelfsedimente in geringer Mächtigkeit abgelagert wurden. Die Küstenlinie im Südwesten des Arbeitsgebiets verlagerte sich wieder deutlich nach Süden. Im Südosten der Niederrheinischen Bucht lagerten sich Illitreiche Tonminerale ab, die auf einen vermehrten Eintrag von paläozoischem Detritus aus dem variszisch geprägten Hinterland deuten.

Zu Beginn von RU-7 kam es überregional zu einer erneuten Regression der Nordsee, die auf eine Meeresspiegelabsenkung zurückzuführen ist. Während Sedimente von RU-7 dadurch im

östlichen Arbeitsgebiet allenfalls lückenhaft überliefert sind, blieben durch das Einbrechen der Niederrheinischen Bucht bis zu 40 Meter Sediment erhalten. Hier erfolgten die Sedimentschüttungen überwiegend von Südosten, allerdings ist der Verlauf der Küstenlinie nicht zu bestimmen. Im östlichen Arbeitsgebiet entwickelte sich im Bereich der Bohrung Gartow eine Lagune mit fluvialem Einfluss, so dass auch dort von einer Progradation von Flüssen in Richtung des Nordseebeckens und einer nicht sehr weit entfernten Küstenlinie auszugehen ist.

Das Chatt wurde durch eine langsam voranschreitende beckenweite Transgression in CH-1 eingeleitet. In den distalen Bereichen reicherte sich Glaukonit an und dokumentiert den verringerten Eintrag von Detritus aus dem Hinterland. Das submarine Relief wurde zu dieser Zeit hauptsächlich von den Bewegungen der Bruchschollen beeinflusst. Die Küstenlinie ist zwar nicht direkt nachweisbar, doch küstennahe Sande wurden in der gesamten südlichen Niederrheinischen Bucht erbohrt.

Mit einem weiteren Transgressionsimpuls begann CH-2. Die Niederrheinische Bucht war in dieser Zeit ein differenzierter Ablagerungsraum, in dem von NW nach SE glaukonitische Schelfsedimente im distalen Bereich über gut aufgearbeitete Küstensande bis zu terrestrisch geprägten Faziesabfolgen mit Mooren im Süden (KLETT 2000) übergehen. Die größte Wassertiefe in der gesamten Chatt-Abfolge mit rund 60 Meter wurde in der zentralen Niederrheinischen Bucht ermittelt. Die Küstenlinie verlief im Süden erneut im Bereich der Aachener Überschiebung und ist am Ostrand der Niederrheinischen Bucht auf der östlichen Krefeld-Scholle nachweisbar. Im Abschnitt CH-2 gab es drei Kleinzyklen mit ruhiger Sedimentation, Glaukonitanreicherung und Moorbildung, die bis in die Veldhoven Clay-Fazies von Bohrung 2007 in den Zentralniederlanden korrelierbar sind.

Mit dem Beginn von CH-3 fand die Transgression, die seit Beginn des Chatt die Sedimentation dominierte, ein vorläufiges Ende. Die Nordsee ging in eine regressive Phase mit einer weiträumigen Ablagerung von Sanden über. Während die Küstenlinie im Süden nicht genau rekonstruiert werden kann, kam es im Osten nahe der Küste zu einer besonders intensiven Aufarbeitung.

Bereits mit CH-4 transgredierte die Nordsee erneut nach Süden und überflutete die zentrale Niederrheinische Bucht bis zu 60 Meter. Die Küstenlinie verlief ähnlich wie im Abschnitt CH-2 entlang der Aachener Überschiebung und der östlichen Krefeld-Scholle. Für CH-4 sind zwei Kleinzyklen mit wenig Sedimenteintrag in das Teilbecken und Moorbildung im Süden nachzuweisen. Im folgenden Zeitabschnitt CH-5 kam es erneut zu einer Regression, die in vielen Charakteristika CH-3 gleicht. Allerdings deuten Befunde von Ostracoden auf eine noch geringere Wassertiefe als im früheren Chatt-Abschnitt.

CH-6 begann mit einer Transgression und ähnelt stark CH-2, da sich die Anzahl der Kleinzyklen, die Verteilung der Faziesräume und der Verlauf der Küstenlinie entsprechen. Mit einer erneuten Regression der oligozänen Nordsee schloss sich CH-7 an. Die Küstenlinie im Süden der Niederrheinischen Bucht lag südlich der untersuchten Bohrungen, während entlang der Krefeld-Scholle durch nachfolgende Erosionsphasen sämtliche Spuren des Küstenverlaufs verwischt wurden.

4.2 Sequenzstratigraphie

Zu einer stratigraphischen Sequenz gehören sich wiederholende Schichtstapel („systems tracts“), die zeitgleich abgelagert wurden und deren horizontale Grenzflächen als Erosions- oder Überflutungsflächen entwickelt sein können (VAN WAGONER et al. 1987, 1988, 1990, MITCHUM & VAN WAGONER 1991, GRADSTEIN et al. 1998, NYSTUEN 1998). Für die im Arbeitsgebiet weit verbreitete tonig-siltige Sedimentation auf einem flachen offenen Schelf mit vollmarinen Bedingungen wurde die Korrelation mit Hilfe von Überflutungsflächen („flooding surfaces“, FS) durchgeführt.

Im Arbeitsgebiet können für das Oligozän sechs Sequenzen R 1 bis R 3 während des Rupel und C 1 bis C 3 in der Chatt-Abfolge nachgewiesen werden (Abb. 4.1). Die 14 charakteristischen Sedimentations-Einheiten RU-1 bis CH-7 sind in unterschiedlichem Umfang Teile der Sequenzen. Die Grenzen I, III, VI, VIII, XI, XIII und XV sind gleichzeitig Sequenzgrenzen. In der untersuchten Abfolge gibt es nur Ablagerungen von „transgressive systems tracts“ (TST) und „highstand systems tracts“ (HST). Die Abschnitte der „transgressive systems tracts“ (TST) sind in der untersuchten Sedimentfolge in der Regel dünn entwickelt, während die Hochstandablagerungen mächtiger sind und einen größeren Teil der Abfolge ausmachen. Zusätzlich zu den einzelnen Sequenzen lässt sich ein übergeordneter Trend von Transgressions- und Regressions-Zyklen (T-R-Zyklen) nachweisen.

Sequenz R 1: Die unterste Rupel-Sequenz R 1 umfasst die Einheiten RU-1 und RU-2. Sie beginnt mit der transgressiven Einheit RU-1, deren Basis sich durch eine Basis-Transgressionsfläche auszeichnet, an der weiträumig Erosion und Aufarbeitung während der Transgression stattfand („ravinement surface“). Diese Fläche bildet die untere Sequenzgrenze von R 1. Die Einheit RU-1 zählt vollständig zum „transgressive systems tract“ (TST). RU-2 beginnt mit einer weiteren Überflutungsfläche. Am Top von RU-2-RT ist die maximale Überflutungsfläche erreicht („maximum flooding surface“). Darüber beginnt mit der Sedimentation des „highstand systems tract“ (HST) eine beckenwärts gerichtete Sedimentation in einem tekto-

nisch ruhigen Umfeld, die bis zum Ende von RU-2 reicht. Damit ist die erste Sequenz abgeschlossen.

Sequenz R 2: Die zweite Rupel-Sequenz (R 2) ist die bedeutendste der Rupel-Abfolge und reicht von RU-3 bis RU-5. An der Basis von R 2 befindet sich eine weiträumig zu beobachtende Überflutungsfläche („major flooding surface“). RU-3 ist als so genannte ‚condensed section‘ mit stark vermindertem Detrituseintrag entwickelt. Die maximale Überflutungsfläche befindet sich in der Mitte von RU-3, womit der untere Teil von RU-3 eine transgressive Einheit (TST) darstellt. Über der maximalen Überflutungsfläche beginnt bereits in RU-3 die anschließende Hochstand-Sedimentation. Die darüber liegende Einheit RU-4 ist eindeutig regressiv geprägt, wie die weiträumig verbreitete beckenwärtige Sedimentationsrichtung zeigt. Ähnlich verhält es sich mit der Einheit RU-5, in der sich die Tendenz, die in RU-4 angelegt ist, noch verstärkt. Beide Einheiten werden deshalb als Parasequenzen des abschließenden ‚highstand systems tracts‘ (HST) von Sequenz R 2 interpretiert.

Sequenz R 3: Die oberste Rupel-Sequenz R 3 ist nur am Südrand des Arbeitsgebiets vollständig entwickelt. Auch R 3 gliedert sich in den transgressiven Basisabschnitt (TST), der in Einheit RU-6 liegt, und die abschließende Hochstand-Sedimentation („highstand systems tract“), in RU-7.

Sequenz C 1: Die unterste Chatt-Sequenz C 1, die durch eine große Transgressionsfläche an der Basis von CH-1 eingeleitet wird, umfasst die drei Einheiten CH-1 bis CH-3 und besitzt die größte Bedeutung während des Chatt. CH-1 ist transgressiv geprägt (TST) und reicht bis zu einer größeren Überflutungsfläche an der Basis von Einheit CH-2, die beckenweit als Korrelationsfläche dient. Die maximale Überflutungsfläche an der Grenze zwischen ‚transgressive systems tract‘ (TST) und anschließendem ‚highstand systems tract‘ (HST) liegt in Abhängigkeit von der tektonischen Position der Bohrung entweder in der Mitte oder an der Basis von CH-2. Der oberste Teil von C 1 besteht vollständig aus Einheit CH-3, die grobkörniger und mit einer erosiven Fläche an der Basis stärker regressiv geprägt ist.

Sequenz C 2: Mit einer Überflutungsfläche an der Basis von CH-4 wird die mittlere Chatt-Sequenz C 2 eingeleitet. Die gesamte Einheit CH-4 ist transgressiv geprägt und weist in der Mitte die maximale Überflutungsfläche der Sequenz C 2 auf. Darüber beginnt der ‚highstand systems tract‘ (HST), der in CH-5 seine Fortsetzung findet. CH-5 ist jedoch grobkörniger und regressiv geprägt.

Sequenz C 3: Mit einer Überflutungsfläche an der Basis leitet CH-6 die Sequenz C 3 ein. Bis zur maximalen Überflutungsfläche in der Mitte der Einheit ist CH-6 Teil des TST, darüber beginnt der untere Teil des HST, der sich in CH-7 fortsetzt.

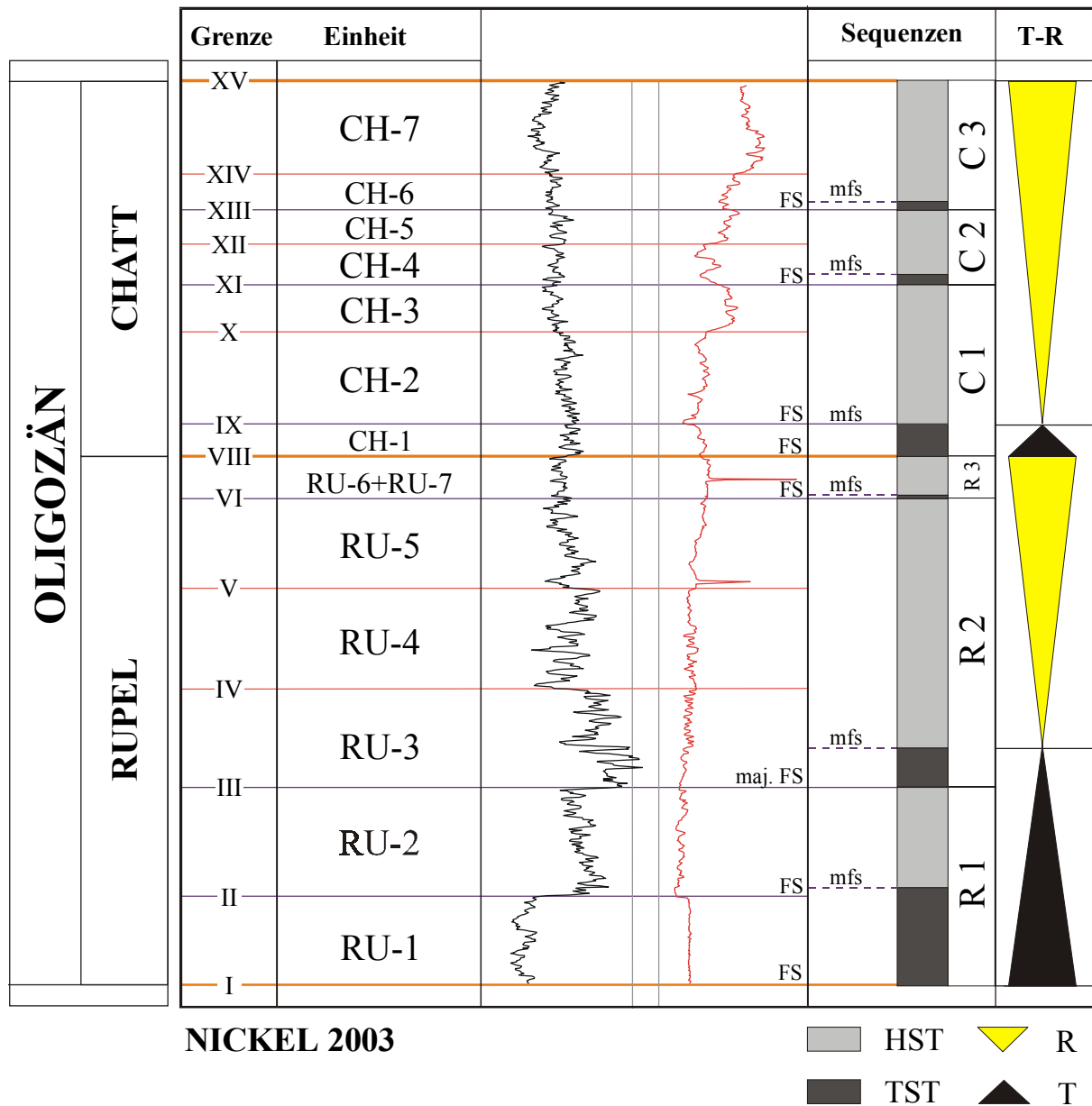


Abb. 4.1: Abgrenzung der Sequenzen, charakteristischen Einheiten und Transgressiv-Regressiv-Zyklen im Arbeitsgebiet; TST: ‚Transgressiv Systems Tract‘, HST: ‚Highstand Systems Tract‘, mfs: ‚maximum flooding surface‘, FS: ‚flooding surface‘, R: Regressiver Zyklus, T: Transgressiver Zyklus

Anzeichen für große Diskordanzen, die eine tief greifende Regression andeuten, wie sie von HAQ et al. (1987, 1988) für die Wende Rupel/Chatt angenommen wurde, finden sich am Südrand des Nordwesteuropäischen Tertiärbeckens nicht. Auch die Faunenvergesellschaftungen zeigen keine eindeutig erkennbaren Kappungshorizonte an, die auf Erosionshorizonte hinweisen könnten. Vielmehr stimmen die Anzahl der nachgewiesenen Sequenzen im Oligozän sowie das Ausmaß der maximalen Überflutung in R 2 und C 1 mit der für andere europäische Tertiärbecken abgeleiteten Größenordnung überein (HARDENBOL et al. 1998). Des Weiteren erlauben die an wenigen Stellen des Untersuchungsgebietes vorhandenen Angaben zu Dinoflagellaten- und Nannoplanktonzonen die Einordnung in diesen größeren Rahmen (Abb. 4.2).

An der Typuslokalität in Belgien konnten mit Hilfe von Tagesaufschlüssen und Bohrungen nur die beiden untersten Rupel-Sequenzen eindeutig abgegrenzt werden (VANDENBERGHE & VAN ECHELPOEL 1987, VANDENBERGHE et al. 1997 a und b, VANDENBERGHE et al. 1998, VANDENBERGHE & HARDENBOL 1998), die dritte Rupel-Sequenz ist in Belgien nur rudimentär entwickelt (Abb. 4.2). Ein Großteil der Chatt-Sedimente fehlt, ehe in der obersten Chatt-Sequenz Voort Sand und Veldhoven Clay eingeordnet sind (VANDENBERGHE et al. 1998). Allerdings sind nach den Erkenntnissen aus den eigenen Korrelationen zumindest in den Randbereichen des Rurgrabens eindeutige Hinweise auf die unterste Chatt-Sequenz C 1 zu finden (Bohrung 2122, Profil 12, Abb. A2.12).

Für die Niederlande konnten in der Bohrung 2007 (Dornspijk), die eine der Standardbohrungen für die Chatt-Stratigraphie der Niederlande ist (VAN ADRICHEM BOOGAERT & KOUWE 1997), durch die Korrelation mit der Niederrheinischen Bucht alle sechs Sequenzen nachgewiesen werden. Die seismostratigraphischen Sequenzen von VERBEEK et al. (2002) erlauben diese Auflösung nicht.

Über die Bohrung 2099 im deutschen Sektor der Nordsee lassen sich die Ergebnisse sehr gut mit Untersuchungen im dänischen Sektor (MICHELSEN 1994, DANIELSEN et al. 1995, MICHELSEN et al. 1995, SORENSEN & MICHELSEN 1995, STEEL et al. 1995, DANIELSEN et al. 1997, SORENSEN et al. 1997, MICHELSEN et al. 1998, CLAUSEN et al. 1999) verbinden. Die Abfolge in Dänemark ist ähnlich vollständig wie die am Südrand des Nordwesteuropäischen Tertiärbeckens, allerdings sind in der südlichen Niederrheinischen Bucht durch die Subsidenz des Beckens die oberste Rupel- und die unterste Chatt-Sequenz zu unterscheiden, die in Dänemark und in vielen Teilen des übrigen Arbeitsgebietes eine Sequenz bilden.

Weiter im Norden sind im Rupel der zentralen Nordsee nur die beiden Sequenzen Lower Lark I und Lower Lark II entwickelt (NEAL 1996, NEAL & HARDENBOL 1998), Chatt-Ablagerungen fehlen wie in der Nordseebohrung 2099 ganz. Weiter im Norden wurden in der nördlichen norwegischen Nordsee von JORDT et al. (1995) die beiden Sequenzen CSS-3 und CSS-4 bestimmt, von denen die obere bis in das Chatt reicht.

Abb. 4.2: Einordnung der Oligozän-Sequenzen R 1 bis C 3 des Arbeitsgebiets am Südrand des Nordwesteuropäischen Tertiärbeckens in den aktuellen chrono-, bio- und sequenzchronostratigraphischen Rahmen und Vergleich mit den benachbarten europäischen Ländern; (eigener Entwurf unter Verwendung von Daten aus BERGGREN et al. 1995, MARTINI 1971, BLOW 1969, HARDENBOL et al. 1998, HAQ et al. 1987, 1988, KÖTHE 1990, VANDENBERGHE et al. 1998, MICHELSEN et al. 1998, NEAL 1996, NEAL et al. 1998, JORDT et al. 1995)

4.3 Tektonik und Beckendynamik

Die Mächtigkeitkarten für die neu definierten Rupel- und Chatt-Einheiten ermöglichen eine detaillierte Rekonstruktion des Zusammenspiels von Tektonik und Sedimentation in der Referenzregion. Sie dokumentieren sowohl den Einfluss von reaktivierten variszischen Strukturen als auch von neu angelegten känozoischen Strukturelementen.

4.3.1 Reaktivierte variszische Strukturen

Aachener Überschiebung

Zu Beginn des Rupel dominierten noch mehrere reaktivierte variszische Strukturelemente das Geschehen, von denen der Aachener Überschiebung eine übergeordnete Bedeutung zukam. Die Aachener Überschiebung trennte eine südlich gelegene Hochscholle, auf der überwiegend erodiert wurde, von der nördlich angrenzenden Tiefscholle. Dadurch kam es zwischen RU-1 und RU-3 sowohl im südlichen Rurgraben als auch auf der Erft- und Köln-Scholle zu Erosion, während im Norden abgelagert wurde. Im weiteren Verlauf sank die Köln-Scholle in zwei Phasen von RU-4 bis RU-6 und von CH-2 bis CH-6 entlang der Aachener Überschiebung so stark ab, dass sich im Norden dieser Bruchscholle ein eigenständiges Sedimentationszentrum bilden konnte. Sowohl im Rupel als auch im Chatt war die Aachener Überschiebung maßgeblich dafür verantwortlich, dass die Niederrheinische Bucht in eine nordwestlich gelegene distale und eine südöstliche proximale Beckenregion geteilt war. Durch ‚strike-slip‘-Bewegungen entlang der Störung wurden ‚Pull-apart‘-Becken aufgerissen, durch die die Sedimentationsmuster entlang der tektonischen Linie erklärt werden können.

Von geringerer Bedeutung waren weitere variszisch angelegte Strukturen wie der Waubach-Sattel, die Essener und die Emscher Mulde, die nördlich der Aachener Überschiebung in variszischer Streichrichtung verlaufen. Der Waubach-Sattel wirkte im Zeitabschnitt RU-1 bis RU-2 als geomorphologische Schwelle, entlang der sich wenig bis gar keine Sedimente absetzen konnten. Das Sedimentationszentrum während RU-2 verläuft entlang der Essener und Emscher Mulde.

4.3.2 Känozoische Strukturelemente

Der heutige Bauplan der Referenzregion im belgisch-niederländisch-deutschen Grenzgebiet wird von zahlreichen känozoischen Bruchschollen dominiert, die zu Beginn des Rupel noch nicht angelegt waren. Es dauerte bis zum ausgehenden Chatt, bis die heute vorhandenen Strukturen ihre Form erhielten.

Rurgraben

Der Rurgraben trennte sich im Osten zwischen RU-4 und RU-5 von Süden ausgehend von der Venlo-Scholle. Die Sedimentationsgeschichte des Rurgrabens stand zu Beginn des Rupel unter dem Einfluss der Aachener Überschiebung. Durch deren Reaktivierung bildete sich nördlich der Störung ein regionales Sedimentationszentrum, das nach Norden durch den als Schwelle wirkenden Waubach-Sattel begrenzt wurde. Ab RU-3 kam es durch den zunehmenden Einbruch des nördlichen Rurgrabens entlang der Peelrand-Verwerfung zu einer Verlagerung des Sedimentationszentrums in diesen Bereich des Rurgrabens, bis sich diese Zone ab RU-6 durch eine Kippung der Scholle sukzessive in den mittleren Rurgraben verlagerte. Diese Entwicklung wiederholte sich zwischen CH-1 und CH-5 und deutete sich mit dem erneuten Einbruch des nördlichen Rurgrabens ab CH-6 ein drittes Mal an.

Venlo-Scholle

Die Venlo-Scholle entwickelte sich zwischen RU-1 und RU-6 zu einer eigenständigen tektonischen Einheit in der Niederrheinischen Bucht. Erste Bewegungen erfolgten im Zeitabschnitt RU-1 am späteren Jackerather Horst, weitere Absenkungen sind in RU-3 im Südwesten zu beobachten. Schließlich brach zwischen RU-4 und RU-5 der Rurgraben entlang der Peelrand-Verwerfung von Süden her ab, wodurch die Venlo-Scholle vom Rurgraben getrennt wurde. An ihrem Ostrand wirkte der Viersener Sprung ausgehend von der Aachener Überschiebung zwischen RU-5 und CH-1 mit aufschiebendem Bewegungssinn auf die Venlo-Scholle und trennte sie dadurch von der Krefeld-Scholle.

Das Sedimentationsgeschehen auf der Venlo-Scholle war zu Beginn des Rupel von der Reaktivierung der Aachener Überschiebung bestimmt, durch die sich ein lokales Sedimentationszentrum nördlich der Störung entwickeln konnte. Es wurde nach Norden durch den als Schwelle wirkenden Waubach-Sattel begrenzt, verlor jedoch durch die Heraushebung der südlichen Venlo-Scholle gegenüber den benachbarten Bruchschollen zunehmend an Bedeutung. Unabhängig davon bildete sich im Norden der Venlo-Scholle ein bis RU-5 dominierendes Sedimentationszentrum, das sich über den damals noch nicht wirksamen Viersener Sprung hinweg bis in die Krefeld-Scholle erstreckte. Durch eine Kippung der Venlo-Scholle, bei der der nördliche Teil gehoben wurde, verlagerte sich dieses Ablagerungszentrum zwischen RU-6 und CH-2 in die Mitte der Scholle. Eine erneute Kippung führte dazu, dass das Sedimentationszentrum auf der Venlo-Scholle zwischen CH-3 und CH-6 im Norden der Scholle lag. Während CH-7 akkumulierten die meisten Sedimente im Süden der Scholle, was entweder auf eine weitere Kippschollenbewegung oder eine Horizontalbewegung entlang der Aachener Überschiebung, durch die ein ‚Pull apart‘-Becken entstand, schließen lässt.

Krefeld-Scholle

Die Krefeld-Scholle bildete zusammen mit der Venlo-Scholle bis zum Zeitabschnitt RU-5 einen einheitlichen Block. Ab RU-7 wurde die Krefeld-Scholle durch eine kleinere Störung im Osten in zwei Schollen geteilt. Während es in diesem Zeitabschnitt auf der östlichen Hälfte zur Entwicklung eines lokalen Sedimentationszentrums kam, lagerten sich auf dem westlichen Teil kaum Sedimente ab, möglicherweise kam es partiell sogar zu Erosion. Für das gesamte Chatt sind dagegen keine signifikanten Bewegungen entlang dieser kleinen Störung erkennbar.

Köln-Scholle / Erft-Scholle

Wann die Erft-Scholle und die Köln-Scholle als eigenständige tektonische Einheiten innerhalb der Niederrheinischen Bucht entstanden, ist durch den Mangel an tief reichenden Bohrungen südlich der Aachener Überschiebung nicht zu entscheiden. Nachdem die Köln-Scholle von RU-1 bis RU-3 überwiegend als Sedimentliefergebiet gedient hatte, belegen die benachbarten Bohrungen 356 auf der Köln-Scholle und 381 auf der Venlo-Scholle, dass es von RU-4 bis RU-6 zu einem so starken Absinken der Köln-Scholle entlang der Aachener Überschiebung kam, dass sich im Norden der Köln-Scholle erstmals im Rupel ein eigenständiges Sedimentationszentrum bilden konnte. Diese Tendenz setzte sich von CH-2 bis CH-6 fort und drehte sich im Zeitabschnitt CH-7 um.

Jackerather Horst

Eines der ältesten Strukturelemente der Niederrheinischen Bucht ist der Jackerather Horst. Er wurde bereits im Zeitabschnitt RU-1 als nach Norden abgetreppter Staffelbruch angelegt, möglicherweise durch Bewegungen der in unmittelbarer Nachbarschaft liegenden Aachener Überschiebung ausgelöst. Der Jackerather Horst befand sich allerdings weder im Rupel noch im Chatt in einer Horstposition gegenüber Rurgraben und Venlo-Scholle, vielmehr wirkte er während CH-6 sogar als tektonischer Graben.

Wassenberger Horst

Der Wassenberger Horst entwickelte sich als eigenständige tektonische Einheit seit RU-3 am Schnittpunkt von Peelrand-Verwerfung und Rurrand-Störung sowie Erft-Sprung. Allerdings war der Wassenberger Horst weder im Rupel noch im Chatt in einer Horstposition gegenüber Rurgraben und Venlo-Scholle. Vielmehr bewegte sich der Wassenberger Horst zusammen mit der Venlo-Scholle entlang der westlichen Randstörung in den Zeitabschnitten RU-3, RU-6 und RU-7 gegenüber dem Rurgraben abwärts. Nachdem sich die östliche Randstörung entwickelt hatte, änderte sich der Bewegungssinn an der älteren Westrandstörung und formte dadurch vorübergehend von RU-4 bis RU-5 sowie von CH-2 bis CH-5 einen nach Westen abgetreppten Staffelbruch.

4.3.3 Beckenentwicklung

Im Rupel war die Absenkungsbewegung des Untergrundes der Niederrheinischen Bucht, Belgiens und der Niederlande so gering, dass heute die Schichteinheiten und Ablagerungsentwicklungen über weite Strecken beobachtet werden können, da sich die Mächtigkeiten der flachmarinen Schelf- und Küstenablagerungen nur unwesentlich änderten. Die sedimentäre Entwicklung der Referenzregion ähnelt den Sedimentationsmustern in Nord- und Ostdeutschland, vor allem in der Bohrung Gartow (2098) in Ostniedersachsen. Dafür verantwortlich sind eine ähnliche tektonische Position am Nordrand des Faltenvariszikums sowie Meeresspiegelschwankungen, die sich im gesamten Beckenbereich ähnlich auswirkten. Ab dem Chatt ist jedoch eine unterschiedliche Entwicklung in der Niederrheinischen Bucht zu erkennen, da sich die Bruchschollen zunehmend differenzierten.

Die tertiäre Niederrheinische Bucht befand sich im Rupel und Chatt im Spannungsfeld zwischen alpiner Kompressions- und atlantischer Extensionstektonik. Dominierte zu Beginn des Rupel noch die Einengung durch die Alpen-Orogenese, so gewann die Krustendehnung im Lauf des mittleren und oberen Rupel einen immer größeren Einfluss. Senkrecht zur Hauptspannungsrichtung NNW-SSE, die durch die Alpen-Entstehung auf die mitteleuropäische Erdkruste wirkte, wurden im Arbeitsgebiet mehrere variszische Strukturelemente reaktiviert, die die Sedimentation im Rupel und Chatt nachhaltig beeinflussten.

Durch die atlantische Extensionstektonik wurden seit dem Beginn des Rupel die Bruchschollen angelegt, die heute den Bauplan der Niederrheinischen Bucht beherrschen. Bereits ab Einheit RU-4 und damit sehr viel früher als von ZAGWIJN (1989) angenommen, zeichnete sich die neue Architektur im Untergrund der äußeren Niederrheinischen Bucht immer deutlicher ab. Gleichwohl beeinflussten die variszischen Faltenstrukturen an der Grenze zwischen der äußeren und inneren Niederrheinischen Bucht maßgeblich die Beckendynamik im gesamten Oligozän. Die Umstellung von Kompressions- auf Extensionstektonik ist in der Referenzregion gut zu beobachten.

5. Literatur

- ABRAHAM, M. (1994): Untersuchungen zur sedimentologischen Entwicklung der fluviatilen Deckschichten (Miozän, Pliozän) der Rheinischen Braunkohle.- Bonner Geowiss. Schriften, 15, 227 S., Holos-Verlag, Bonn.
- ALISCH, U. (1994): Genese des Bitterfelder Flözhorizontes.- Exkursionsführer und Veröffentlichung GGW, 194, 39 - 40, Berlin.
- AMOROSI, A. (1995): Glaucony and sequence stratigraphy: A conceptual framework of distribution in siliciclastic sequences.- *Journal of Sedimentary Research*, B 65 (4), 419 – 425.
- ASHRAF, A.R., MOSBRUGGER, V. & UTESCHER, T. (1992): Palynologische Untersuchungen im Neogen der Niederrheinischen Bucht.- In: Kovar-Eder, J. (ed.): *Palaeovegetational development in Europe*.- 91 - 99, Wien.
- ATLAS VAN NEDERLAND (1985): Deel 13: Geologie.- Staatsuitgeverij, 23 pp., 's Gravenhage.
- BACHMANN, G.H., MÜLLER, M. & WEGGEN, K. (1987): Evolution of the Molasse Basin (Germany, Switzerland).- *Tectonophysics*, 137, 77 - 92.
- BALDSCHUHN, R., BINOT, F., FRISCH, U. & KOCKEL, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor – Digital auf 3 CDs.- *Geologisches Jahrbuch*, A 153, 80 S., 3 CD-ROMs, Hannover
- BENDA, L. (ed. 1989): Forschungsbohrung Wursterheide.- *Geol. Jb.*, A 111, 542 pp., Hannover.
- BENEDEK, P.N. (1972): Phytoplankton aus dem Mittel- und Oberoligozän von Tönisberg (Niederrheingebiet).- *Paläontographica*, B 137, 1 - 71.
- BENEDEK, P.N. & MÜLLER, C. (1974): Nannoplankton – Phytoplankton - Korrelation im Mittel- und Ober-Oligozän von NW-Deutschland.- *Jb. Geol. Paläont., Mh.*, 1974, 386 - 396.
- BERGGREN, W.A., KENT, D.V., SWISHER, C.C. & AUBRY, M.P. (1995): A revised Cenozoic Geochronology and Chronostratigraphy.- In: Berggren, W.A., Kent, D.V., Aubry, M.-P. & Hardenbol (eds.), *Geochronology, Time Scales and Stratigraphic Correlation: Framework for an Historical Geology*, SEPM Spec. Publ. 54, 130 - 212, Tulsa.
- BLOW, W.H. (1969): Late Middle Eocene to Recent planktonic foraminiferal biostratigraphy.- *Proc. I. Int. Conf. Planktonic Microfossils*, Geneva 1967, 1, 199 – 422; Leiden.
- BLUMENSTENGEL, H., KREUTZSCH, W., VOLLAND, L. & KNUTH, G. mit Beitrag von W. KNOTH (1996): Revidierte Stratigraphie tertiärer Ablagerungen im südlichen Sachsen-Anhalt, Teil 1: Raum Halle - Merseburg.- *Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften*, Reihe B: Geologie, Paläontologie, Mineralogie, Beiheft 1, 101 S., Halle.
- CLAUSEN, O.R., GREGERSEN, U., MICHELSEN, O. & SORENSEN, J.C. (1999): Factors controlling the Cenozoic sequence development in the eastern parts of the North Sea.- *J. Geol. Soc. London*, 156, 809 - 816, London.
- CREANEY & PASSEY (1993): Recurring patterns of total organic carbon and source rock quality within a sequence stratigraphic framework. - *American Assoc. Geol. Bull.*, 77: 386-401.
- DANIELSEN, M., CLAUSEN, O.R. & MICHELSEN, O. (1995): Stratigraphic correlation of late Palaeocene sand deposits in the Sogne Basin area of the Danish and Norwegian central North Sea.- *Terra Nova*, v. 7, p. 516 - 527.
- DANIELSEN, M., MICHELSEN, O. & CLAUSEN, O.R. (1997): Oligocene sequence stratigraphy and basin development in the Danish North Sea sector based on log interpretations.- *Marine and Petroleum Geology*, 14, 931 - 950, Amsterdam.

- DAVIES, S.J. & ELLIOTT, T. (1996): Spectral gamma ray characterization of high resolution sequence stratigraphy: examples from Upper Carboniferous fluvio-deltaic systems, County Clare, Ireland.- in: Howell, J.A. & Aitken, J.F. (eds.), High Resolution Sequence Stratigraphy: Innovations and Applications; Geol. Soc. Spec. Pubs, 104, 25 - 35, London.
- DERER, C., KOSINOWSKI, M., LUTERBACHER, H.P., SCHÄFER, A. & SÜSS, M.P. (2003): Sedimentary response to tectonics in extensional basins: The Pechelbronn Formation (Late Eocene to early Oligocene) in the northern Upper Rhine Graben, Germany.- In: T. McCann & A. Saintot (eds.): 'Tracing Tectonic Deformation Using The Sedimentary Record'.- Geol.Soc.London, Spec. Publ. 208, 55 - 69.
- DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION (Hrsg. 2002): Stratigraphische Tabelle von Deutschland.
- DILL, H.G., KÖTHE, A., GRAMANN, F. & BOTZ, R. (1996): A paleoenvironmental and paleoecological analysis of fine-grained Paleogene estuarine deposits of North Germany.- Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, 124, 273 - 326.
- DILL, H.G., SCHEEL, M., KÖTHE, A., BOTZ, R. & HENJES-KUNST, F. (1997): An integrated environment analysis - lithofacies, chemofacies, biofacies - of the Oligocene calcareous-siliciclastic shelf deposits in northern Germany.- Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, 131, 145 - 174.
- DOEBL, F. (1970): Die tertiären und quartären Sedimente des südlichen Rheingrabens.- In: Illies, H. & Mueller, St. (eds.): Graben Problems, 56 - 66, (Schweizerbart) Stuttgart.
- DOLL, G. (1984): Zur zyklischen Ausbildung des Tertiärs im Zentrum des Weißelster-Beckens.- Z. geol. Wiss., 5, 575 - 583, Berlin.
- DOLL, G., EISSMANN, L., JUNGE, F. & WOYZEK, U. (1992): Lithofacial and sedimentological studies in the Cenozoic of the Leipzig Lowland Bight.- Excursion guide book, 13th IAS Reg. Meeting, Jena, 67 - 98.
- DOVETON, J.H. (1994): Geologic Log Analysis using Computer Methods.- AAPG Computer Application in Geology, 2, 169 pp., Tulsa.
- DROZDZEWSKI, G., KLOSTERMANN, J., RIBBERT, K.-H., WREDE, V. & ZELLER, M. (1998): Sedimentation und Tektonik im Paläozoikum und Postpaläozoikum der Niederrheinischen Bucht.- Fortschr. Geol. Rheinld. und Westf., 37, 573 - 583, Krefeld.
- ELLERMANN, C. (1958): Die mikrofaunistische Gliederung des Oligozäns im Schacht Kapellen bei Moers (Niederrhein).- Fortschr. Geol. Rheinld. und Westf. 1: 205 - 214.
- ELLERMANN, C. (1963): Beitrag zur Gliederung und Verbreitung des Tertiärs im West-Emsland.- N. Jb. Geol. Paläont., Abh., 117, 111 - 130, Stuttgart.
- FORSTER, A. (in Vorb.): Geochemical Investigations of Paleoenvironmental and Paleogeographic Control on the Evolution of Epicontinental Black Shales, Cretaceous Western Interior Seaway, U. S. A.- Diss. Univ. Bonn.
- GELUK, M.C., DUIN, E.J.T., DUSAR, M., RIJKERS, R.H.B., VAN DEN BERG, M.W. & VA ROIJEN, P. (1994): Stratigraphy and tectonics of the Roer Valley Graben.- Geol. en Mijnbouw, 73, 129-141.
- GERDES, G. KRUMBEIN, W.E. & REINECK, H.E. (1985): Verbreitung und aktuogeologische Bedeutung mariner mikrobieller Matten im Gezeitenbereich der Nordsee.- Facies, 12, 75-96, Erlangen.
- GRADSTEIN, F.M., SANDVIK, K.O. & MILTON N.J. (1998): Sequence stratigraphy - Concepts and Applications.- Norwegian Petrol. Soc. Special Publication No. 8, Amsterdam.
- GRIMM, K.I. & STEURBAUT, E. (2001): Foraminiferal Biofacies Analysis of the Boom Clay Formation in the Rupel area (Oligocene, Belgium) and Correlation with the Mainz Basin (Germany).- Aardk. Mededel., 2001, 11, 9-20; Leuven.

- GRIMM, K.I., GRIMM, M.C., KÖTHER, A. & SCHINDLER, T. (2002): Der "Rupelton" (Rupelium, Oligozän) der Tongrube Bott-Eder bei Rauenberg (Oberrheingraben, Deutschland).- Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg, 237, 229-253; Frankfurt
- GROSS, G.K., MOSBRUGGER, V. & SCHÄFER, A. (1990): Tertiär der Niederrheinischen Bucht.- 27 pp., Exkursionsführer 5. Sedimentologen-Treffen am 6. - 7. Juni 1990 in Bonn, SEDIMENT 90, Bonn.
- HAGER, H. & PRÜFERT, J. (1988): Tertiär.- In: Hilden, H.D. (ed.): Geologie am Niederrhein.- 32 - 40, 4. Aufl., Krefeld.
- HAGER, H. (1991): Zur Entstehung der rheinischen Braunkohle - eine Frage und ihre Beantwortung 1910 - 1990.- Niederrheinische Landeskunde, 10, 45 - 59, Krefeld.
- HAGER, H. (1993): The origin of the Tertiary lignite deposits in the Lower Rhine region, Germany.- International Journal of Coal Geology, 23, 251 - 262.
- HAGER, H., VANDENBERGHE, N., VAN DEN BOSCH, M., ABRAHAM, M., VON DER HOCHT, F., REISCHER, K., LAGA, P., NICKEL, E., VERSTRAELEN, A., LEROI, S. & VAN LEEUWEN, R.J.W. (1998): The geometry of the Rupelian and Chattian depositional bodies in the Lower Rhine district and its border area: implications for Oligocene lithostratigraphy.- Bulletin of the Geological Society of Denmark, 45, 53 - 62.
- HAQ, B.U, HARDENBOL, J. & VAIL, P.R. (1987): Chronology of fluctuating sea-levels since the Triassic.- Science, 225, 1156 - 1167.
- HAQ, B.U, HARDENBOL, J. & VAIL, P.R. (1988): Mesozoic and Cenozoic Chronostratigraphy and Cycles of Sea-Level Change.- In: Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G., Posamentier, H.W., Ross, C.A. & Van Wagoner, J.C. (eds.): Sea-Level Changes: An Integrated Approach.- SEPM Spec. Publs, 42, 71 - 108, Tulsa.
- HARDENBOL, J., THIERRY, J., FARLEY, M.B., JACQUIN, T., DE GRACIANSKY, P.-C. & VAIL, P.R. (1998): Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphic Framework of European Basins.- In: de Graciansky, P.-C., Hardenbol, J., Jaquin, T. & Vail, P.R. (eds.): Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins.- SEPM Spec. Publs., 60, 3 - 13; Mesozoic and Cenozoic Sequence Chronostratigraphic Chart (Appendix), Tulsa.
- HATZSCH, P. (1994): Bohrlochmessungen.- 143 S., (Enke) Stuttgart.
- HERMANN, K. & HOCHT, F. von der (1990): Ein erster Fund von Bohrspuren in einem Ton und Diskussion der Bohrspuren in der Braunkohle aus dem Tertiär der Niederrheinischen Bucht.- Natur am Niederrhein (N.F.) 5, 2, 63 - 65, Krefeld.
- HOUBYBERGHS, H. (1983): Contribution to the study of planktonic Foraminifera in the Belgian Tertiary.- Leuven Aardkundige Mededelingen, 2, 131 p., Leuven.
- HOTTENROTT, M. (1987): Palynologie und Stratigraphie im Tertiär von Mittelhessen und Umgebung.- N. Jb. Geol. Paläont., Abh., 175 (1), 65 - 79, 4 Abb., Stuttgart.
- HOTTENROTT, M. (1988): Palynologie, Stratigraphie und Paläogeographie im Tertiär von Mittelhessen und Umgebung.- Geol. Jb. Hessen, 116: 113 - 168, 20 Abb., Wiesbaden.
- INDANS, J. (1958): Mikrofaunistische Korrelationen im marinen Tertiär der Niederrheinischen Bucht.- Fortschr. Geol. Rheinld. und Westf., 1, 223-238.
- INDANS, J. (1965): Mikrofaunistisches Normalprofil durch das marine Tertiär der Niederrheinischen Bucht.- Forsch.-Ber. Land NRW, 1484, 85.
- JACOBS, P., SEVENS, E., DE BATIST, M. & HENRIET, J.P. (1991): Grain size, facies- and sequence analysis of West Belgian Eocene continental shelf deposits.- Zbl. Geol. Paläont. Teil 1, 1990, 8: 931 - 955.
- JACOBS, P. & SEVENS, E. (1993): Middle Eocene sequence stratigraphy in the Balegem Quarry (Western Belgium, southern bight North Sea).- Bulletin van de Belgische Vereniging voor Geologie, 102 (1-2): 203 - 213.

- JANNSEN, A.W. (1984): Rapport betreffende de molluskenfauna uit de Boom Klei Formatie, ontsloten in de groeve Roelants te Heide-Boskant, Gemeente Lubbeek (Belgie).- Leiden Rijksmuseum voor Geologie en Mineralogie, rapport 102
- JORDT, H., FALEIDE, J.I., BJØRLYKKE, K. & IBRAHIM, M.T. (1995): Cenozoic sequence stratigraphy of the central and northern North Sea Basin: tectonic development, sediment distribution and provenance areas.- *Marine and Petroleum Geology*, 12, 845 - 879, Amsterdam.
- JUNG, D. & LANGER, W. (1990): Foraminiferen aus dem Oligozän des Schachtes Lohberg 4 bei Hünxe an der Lippe (Niederrheinische Bucht).- *N. Jb. Geol. Paläont., Abh.*, 180, 75-96.
- JÜRGENS, U. (1996): Mittelmiozäne bis pliozäne Randmeer-Sequenzen aus dem deutschen Sektor der Nordsee.- *Geologisches Jahrbuch*, A 146, 217 - 232, Hannover.
- KLETT, M., NICKEL, E. & SCHÄFER, A. (1997): Computer aided analysis of wireline logs - Applications for the Tertiary of NW-Germany.- *Terra Nostra* 97/1, 6, Abstracts, 87th Annual Meeting of the Geologische Vereinigung: Fundamental Geologic Processes, Jülich.
- KLETT, M. & SCHÄFER, A. (1997): Das Tertiär der Niederrheinischen Bucht - Interpretation der Sedimentfazies anhand von Bohrungen und Bohrlochmessungen.- *Zbl. Geol. Paläont., Teil 1*, 443 - 456, Stuttgart.
- KLETT, M. (2000): Sedimentologie des Tertiärs der Niederrheinischen Bucht – Interpretation anhand von Bohrungen und Bohrlochmessungen.- *Bonner Geowiss. Schriften*, 28, 133 S., Nümbrecht.
- KLETT, M., EICHHORST, F. & SCHÄFER, A. (2002): Facies interpretation from well logs applied to the Tertiary Lower Rhine Basin fill.- In: Schäfer, A. & Siehl, A. (eds.): *Rift tectonics and syngenetic sedimentation - the Cenozoic Lower Rhine Basin and related structures.*- *Netherlands Journal of Geosciences / Geologie en Mijnbouw*, 81 (2), 167-176, Utrecht.
- KLOSTERMANN, J., PAAS, W., PRÜFERT, J., SCHLIMM, W., THIERMANN, A. & ZELLER, M. (1990): Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1 : 100 000 - Erläuterungen zu Blatt C 5102 Mönchengladbach.- 95 S., Geologisches Landesamt Nordrh.-Westf., Krefeld.
- KNOX, R.W.O.B., CORFIELD, R.M. & DUNAY, R.E. (eds., 1996): *Correlation of the Early Paleogene in Northwest Europe.*- *Geol. Soc. spec. Publ.*, 101, Oxford.
- KOCKEL, F. (ed., 1996): *Tectonic Atlas of NW-Germany 1 : 300 000.*- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- KÖTHER, A. (1986): Kalkiges Nannoplankton aus dem Paläogen Nordwestdeutschlands.- *Geol. Jb.*, A 89, 3 - 114, Hannover.
- KÖTHER, A. (1990): Paleogene dinoflagellates from Northwest Germany - Biostratigraphy and paleoenvironment.- *Geol. Jahrb.*, A 118, 3 - 111, Hannover.
- KÖTHER, A. (1992): Bericht über Kalk-Nannoplankton- und Dinoflagellaten-Untersuchungen in der Bohrung G-11-1, Deutsche Nordsee.- (unveröff. Bericht, 9 S., Hannover)
- KÖTHER, A. (1994): Kalk-Nannoplankton- und Dinozysten-Untersuchungen an eozänen und oligozänen Kernproben der Bohrungen BKB 283 und BKB 284 bei Emmerstedt, ca. 4 km NW von Helmstedt.- (unveröff. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 11 23 05; Hannover).
- KÖTHER, A. (1995): Biostratigraphische Bearbeitung der Kernbohrung Loburg I/90 (Sachsen-Anhalt) anhand von Dinozysten und Kalknannoplankton.- (unveröff. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 113785; Hannover).
- KRUTZSCH, W., BLUMENSTENGEL, H., KIESEL, Y. & RÜFFLE, L. (1992): Paläobotanische Klimagliederung des Alttertiärs (Mitteleozän bis Oberoligozän) in Mitteldeutschland und das Problem der Verknüpfung mariner und kontinentaler Gliederungen (klassische Biostratigraphien - paläobotanisch-ökologische Klimastratigraphie - Evolutions-Stratigraphie der Vertebraten).- *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, 1986, 1-2, 137 - 253, Stuttgart.

- KRUTZSCH, W. & BLUMENSTENGEL, H. (1993): Exkursionsführer 2: Raum Halle/ Sachsen-Anhalt.- 44 S., Reg. Comm. North. Palaeog. Strat.; 4th Joint Bi-Annual Meeting, 11th - 15th Oct., Hannover 1993
- LEROI, S. (1995): Stratigrafische correlaties in de Rupel Groep tussen België en het Niederrijn gebied in Duitsland.- 41 pp., unveröff. Licentiaatsarbeit, Katholieke Universiteit Leuven.
- LETSCH, W.J. & SISSINGH, W. (1983): Tertiary stratigraphy of the Netherlands.- *Geol. en Mijnbouw*, 62, 305 - 318, Dordrecht.
- LOUTIT, T.S., HARDENBOL, J. & VAIL, P.R. (1988): Condensed sections: The key to age dating and correlation of continental margin sequences.- In: Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G., Posamentier, H.W., Ross, C.A. & Van Wagoner, J.C. (eds.): *Sea-Level Changes: An Integrated Approach*.- *SEPM Spec. Publs*, 42, 183 - 213.
- MARTINI, E. (1971): Standard Tertiary and Quaternary calcareous nannoplankton zonation.- *Proc. II. plankt. Conf. Roma 1970*, 2: 739 – 785, Roma.
- MENGELING, H. (1989): Makroskopische Gesteinsansprache der Schichtenfolge in der Forschungsbohrung Wursterheide.- In: Benda, L., ed.: *Forschungsbohrung Wursterheide*, *Geol. Jb.*, A 111, 33-125, Hannover.
- MICHELSEN, O., (1994): Stratigraphic correlation of the Danish onshore and offshore Tertiary successions based on sequence stratigraphy.- *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, v. 41, 145 - 161.
- MICHELSEN, O., DANIELSEN, M., HEILMANN-CLAUSEN, C., JORDT, H., LAURSEN, G.V. & THOMSEN, E. (1995): Occurrence of major sequence stratigraphic boundaries in relation to basin development in Cenozoic deposits of the southern North Sea.- In: Steel, R.J. et al. eds., *Sequence Stratigraphy on the Northwest European margin*, NPF Special Publication No. 5, 415 - 427, Amsterdam.
- MICHELSEN, O., THOMSEN, E., DANIELSEN, M., HEILMANN-CLAUSEN, C., JORDT, H. & LAURSEN, G.V. (1998): Cenozoic Sequence Stratigraphy in the Eastern North Sea.- In: de Graciansky, P.-C., Hardenbol, J., Jaquin, T. & Vail, P.R. (eds.): *Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins*.- *SEPM Spec. Publs.*, 60, 91-118.
- MITCHUM, R.M. & VAN WAGONER, J.C. (1991): High-frequency sequences and their stacking patterns: sequence stratigraphic evidence of high-frequency eustatic cycles.- *Sediment. Geol.*, 70, 131 - 160, Amsterdam.
- MOSBRUGGER, V. (ed. 1987): The ecology and evolution of fossil floras in W-Germany.- XIV. International Botanical Congress, Guide to Excursion 08, 81 pp., Berlin.
- MOSBRUGGER, V. (1989): Die Pflanzenwelt des Ober-Oligozäns von Rott.- In: W. von Koenigswald (ed.): *Die Fossilagerstätte Rott bei Hennef im Siebengebirge*.- 21 - 32, (Rheinlandia) Siegburg.
- NEAL, J.E. (1996): A summary of Paleogene sequence stratigraphy in northwest Europe and the North Sea.- In: Knox, R.W.O.B., Corfield, R.M., & Dunay, R.E., eds., *Correlation of the Early Paleogene in Northwest Europe*, *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 101, p. 15 - 42, Oxford.
- NEAL, J.E. & HARDENBOL, J. (1998): Introduction to the Paleogene.- In: de Graciansky, P.-C., Hardenbol, J., Jaquin, T. & Vail, P.R. (eds.): *Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins*.- *SEPM Spec. Publs.*, 60, 87 - 90.
- NYSTUEN, J.P. (1998): History and development of sequence stratigraphy.- In: Gradstein, F.M. et al. eds., *Sequence Stratigraphy – Concepts and Applications*. NPF Special Publication No. 8, p. 31 - 116, Amsterdam.
- OEHMS, E.P.N. (1980): Schwermineralogische und mikropaläontologische Untersuchungen im marin beeinflussten Alttertiär des Antweiler Grabens (südliche Niederrheinische Bucht).- *Meded. Tert. Kwart. Geol.*, 17 (3), 225 – 231; Rotterdam.
- PETZELBERGER (1994): Die marinen Sande im Tertiär der südlichen Niederrheinischen Bucht - Sedimentologie, Fazies und stratigraphische Deutung unter Berücksichtigung der Sequenz-Stratigraphie.- *Bonner Geowiss. Schriften*, 14, 112 S., Bonn.

- PFLUG, R. (1982): Bau und Entwicklung des Oberrheingrabens.- Erträge der Forschung, 184, Darmstadt.
- PLATT, N.H. & KELLER, B. (1992): Distal alluvial deposits in a foreland basin setting - the Lower Freshwater Molasse (Lower Miocene), Switzerland: sedimentology, architecture and paleosols.- *Sedimentology*, 39, 545 - 565.
- REINSON, G.E. (1992): Transgressive Barrier Islands and Estuarine Systems.- In: Walker, R. G. & James, N. P, eds. (1992): *Facies Models – response to sea level change*.- Geol. Assoc. Canada, *Geotext* 1, 179 – 194.
- RIDER, M.H. (1996): *The geological interpretation of well logs*.- 2nd. ed., 280 pp, Whittles Publishing.
- RITZKOWSKI, S. (1993): Sequenzstratigraphie des Rupeltons im nördlichen Hessen (Oligozän, Hessische Senke).- *Göttinger Arb. Paläont.*, 58, 135 - 144.
- ROTHAUSEN, K.H. (ed. 1989): *Das Kalktertiär des Mainzer Beckens. Oberoligozän - Untermiozän*.- *Geol. Jb.*, A 110, 398 S.
- SCHÄFER, A. (1994): Die Niederrheinische Bucht im Tertiär - Ablagerungs- und Lebensraum.- In: Koenigswald, W. von & Meyer, W. (eds.): *Erdgeschichte im Rheinland. Wandel in 400 Millionen Jahren*, 155 - 164, München (Pfeil Verlag).
- SCHÄFER, A., HILGER, D., GROSS, G. & VON DER HOCHT, F. (1996): Cyclic Sedimentation in Tertiary Lower Rhine Basin (Germany) - the 'Liegendrücken' of the brown-coal open-cast Fortuna mine.- *Sedimentary Geology*, 103, 229 - 247.
- SCHÄFER, A. & SIEHL, A. (eds. 2002): Preface: Rift tectonics and syngenetic sedimentation – the Cenozoic Lower Rhine Basin and related structures.- *Netherlands Journal of Geosciences / Geologie en Mijnbouw*, 81 (2), 145-147, Utrecht.
- SCHÄFER, A., UTESCHER, T. & MÖRS, Th. (2003): The Cenozoic Lower Rhine Basin, W-Germany – stratigraphy of its basin-fill.- *Newsletter in stratigraphy* [in print].
- SCHENK, N. (1998): Teil 1: Geologische Kartierung im Raum Bottrop-Kirchhellen – Schermbeck (Südwest-Münsterland), Teil 2: Lithologie und Fazies der tertiären Schichten im Raum Bottrop-Kirchhellen – Schermbeck (Südwest-Münsterland).- 126 S., unveröff. Diplomarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- SCHNEIDER, H. & THIELE, S. (1965): *Geohydrologie des Erftgebietes*.- 185 S., Min. für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten NRW, Düsseldorf.
- SISSINGH, W. (1997): Tectonostratigraphy of the North Alpine Foreland Basin: correlation of Tertiary depositional cycles and orogenic phases.- *Tectonophysics*, 282, 223 - 256.
- SISSINGH, W. (2001): Tectonostratigraphy of the West Alpine Foreland: correlation of Tertiary sedimentary sequences, changes in eustatic sea-level and stress regimes.- *Tectonophysics*, 333, 3-4, 361 - 400.
- SISSINGH, W. (2003): Tertiary paleogeographic and tectonostratigraphic evolution of the Rhenish Triple Junction.- *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 196, 229 - 263.
- SONNE, V. (1982): Waren Teile des Rheinischen Schiefergebirges im Tertiär vom Meer überflutet? - *Mainzer geowiss. Mitt.*, 11, 217 - 219, Mainz.
- SORENSEN, J.C. & MICHELSEN, O. (1995): Upper Cenozoic sequences in the southeastern North Sea Basin.- *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 42, 74 - 95.
- SORENSEN, J.C., GREGERSEN, U., BREINER, M. & MICHELSEN, O. (1997): High-frequency sequence stratigraphy of Upper Cenozoic deposits in the central and southeastern North Sea areas.- *Marine and Petroleum Geology*, 14 (2), 99 - 123.
- SPIEGLER, D. (1965): *Biostratigraphie des Rupels aufgrund von Foraminiferen im nördlichen Deutschland*.- *Geol. Jb.*, 82, 447-486, 2 Abb., 2 Tab., 5 Taf., Hannover.

- STANDKE, G., RASCHER, J. & STRAUSS, C. (1993): Relative sea-level fluctuations and brown coal formation around the Early-Middle Miocene boundary in the Lusatian brown coal district.- *Geologische Rundschau*, 82, 295 - 305.
- STANDKE, G., SUHR, P., STRAUSS, C. & RASCHER, J. (1992): Meeresspiegelschwankungen im Miozän von Ostdeutschland.- *Geoprofil*, 4, 43 - 48.
- STEEL, R.J., FELT, V.L., JOHANNESSEN, E.P. & MATHIEU, C. (eds. 1995): *Sequence Stratigraphy on the Northwest European margin*.- Norwegian Petrol. Soc. Special Publication, 5, Amsterdam.
- STEUERBAUT, E. (1986): Late middle Eocene to middle Oligocene calcareous Nannoplankton from the Kallo well, some boreholes and exposures in Belgium and a description of the Ruisbroek sand member.- *Meded. Werkgr. Tert. Kwart. Geol.*, 23 (2), 49-83), Leiden.
- STEURBAUT, E. (1992): Integrated stratigraphic analysis of Lower Rupelian deposits (Oligocene) in the Belgian Basin.- *Ann. Soc. Géol. Belgique*, 115, 1, 287 - 306.
- STOVER, L.E. & HARDENBOL, J. (1993): Dinoflagellates and depositional sequences in the Lower Oligocene (Rupelian) Boom Clay Formation, Belgium.- *Brussel Bulletin Société belge Géologie*, 102, 1-2, 5-77.
- TOBIEN, H. (1986): *Nordwestdeutschland im Tertiär*.- 763 pp., (Boroträger) Berlin - Stuttgart.
- UNGER, H.J. (1989): Die Lithozonen der Oberen Süßwassermolasse Südostbayerns und ihre vermutlichen zeitlichen Äquivalente gegen Westen und Osten.- *Geologica Bavarica*, 94, 195 - 237.
- UTESCHER, T., ASHRAF, A. R., et al. (1992): Zur Faziesentwicklung im Neogen der Niederrheinischen Bucht.- In: J. Kovar-Eder (ed): *Palaeovegetational development in Europe*. 235 - 243, Wien.
- VAN ADRICHEM BOOGAERT, H.A. & KOUWE, W.F.P., eds. (1997): *Stratigraphic nomenclature of the Netherlands. Revision and update by RGD and NOGEPa – Section I Tertiary*.- *Mededelingen Rijks Geologische Dienst*, 50, 39 pp.
- VAN DEN BERG, M.W. (1996): *Fluvial sequences of the Maas – a 10 Ma record of neotectonics and climate change at various time-scales*.- 181 p., Doctor Thesis, University Wageningen, Wageningen.
- VANDENBERGHE, N. (1976): Phytoclasts as provenance indicators in the Belgian septaria clay of Boom (Rupelian age) - Short communication.- *Sedimentology*, 23, 141-145.
- VANDENBERGHE, N. (1978): *Sedimentology of the Boom Clay (Rupelian) in Belgium*.- *Verhandelingen van de Koninklijke Academie vor Wetenschappen, Letteren en Schone Kunsten van België, Klasse der Wetenschappen*, Jg. XL, Nr 147, 137 p., Brüssel.
- VANDENBERGHE, N. (1981): Rupelian.- In: Ch. Pomerol, *Stratotypes of Paleogene stages*. IUGS Comm. Strat., Intern. Subcomm. Paleogene Stratigr., Mém hors Serie no. 2, Bull. Infor. Géol. Bassin Paris, 203-218.
- VANDENBERGHE, N. & VAN ECHELPOEL, E. (1987): Field guide to the Rupelian stratotype.- *Bull. Soc. Géol. Belgique*, 96, 4, 325 - 337.
- VANDENBERGHE, N., LAENEN, B., VAN ECHELPOEL, E. & LAGROU, D. (1997a): Rupelian cyclostratigraphy and glacio-eustasy.- *Terra Nostra* 97/2, 244 - 245, Kurzfassungen der Vorträge und Poster, Sediment '97, 12. Sedimentologentreffen 21.-24.5. 1997, Köln.
- VANDENBERGHE, N., LAENEN, B., VAN ECHELPOEL, E. & LAGROU, D. (1997b): Cyclostratigraphy and climatic eustasy. Example of the Rupelian stratotype.- *C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes*, 325, 305 - 315, Paris.
- VANDENBERGHE, N., LAGA, P., STEURBAUT, E., HARDENBOL, J. & VAIL, P. (1998): Sequence stratigraphy of the Tertiary at the southern border of the North Sea Basin in Belgium.- In: de Graciansky, P.-C., Hardenbol, J., Jaquin, T. & Vail, P.R. (eds.): *Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins*.- *SEPM Spec. Publs.*, 60, 119 - 154.

- VANDENBERGHE, N. & HARDENBOL, J. (1998): Introduction to the Neogene.- In: de Graciansky, P.-C., Hardenbol, J., Jaquin, T. & Vail, P.R. (eds.): Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins.- SEPM Spec. Publs., 60, 83 - 85.
- VAN ECHELPOEL, E. (1991): Kwantitative cyclostratigrafie van de Formatie van Boom (Rupelian, Belgie).- Doctor thesis KU Leuven.
- VAN ECHELPOEL, E. (1994): Identification of regular sedimentary cycles using Walsh spectral analysis with results from the Boom Clay Formation Belgium.- Spec. Publ. Int. Ass. Sediment., v. 19, p. 63 - 76.
- VAN ECHELPOEL, E. & WEEDON, G.P. (1990): Milankovitch cyclicity and the Boom Clay Formation: an Oligocene siliciclastic shelf sequence in Belgium.- Geological magazine, 127 (6), 599 - 604.
- VAN ROIJEN, P., KLOSTERMANN, J., DOPPERT, J.W., CHR., RESCHER, C.K., VERBEEK, J.W., SLIGGERS, B.C. & GLASBERGEN, P. (1984): Stratigraphy and tectonics in the Peel-Venlo area as indicated by Tertiary sediments in the Broekhuizenvorst and Geldern T1 boreholes.- Meded. Rijks geol. Dienst, 38-1, 27 S..
- VAN STAALDUINEN, C.J., VAN ANDRICHEM BOOGAERT, H.A., BLESS, M.J.M., DOPPERT, J.W. Chr., HARSVELDT, H.M., VAN MONTFRANS, H.M., OELE, E., WERMUTH, R.A. & ZAGWIJN, W.H. (1979): The geology of the Netherlands.- Meded. Rijks Geol. Dienst, 31, 2, 9 - 49, Haarlem.
- VAN WAGONER, J.C. et al. (1987): The key definitions of sequence stratigraphy.- In: BALLY, A.W. (ed): Atlas of sequence stratigraphy.- AAPG, Stud. Geol., 27, vol. 1.
- VAN WAGONER, J.C., POSAMENTIER, H.W., MITCHUM, R.M., VAIL, P.R.; SARG, J.F., LOUITIT, T.S. & HARDENBOL, J. (1988): An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions.- In: Wilgus, C.K. et al. (eds): Sea level changes - an integrated approach.- SEPM Spec. Pbls., 42, 39 - 45, Tulsa.
- VAN WAGONER, J.C., MITCHUM, R.M., CAMPION, K.M. & RAHMANIAN, V.D. (1990): Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops.- AAPG Methods in Exploration Series, 7, 36 p., Tulsa.
- VERBEEK, J.W., DE LEEUW, C.S., PARKER, N. & WONG, Th.E. (2002): Characterisation and correlation of Tertiary seismostratigraphic units in the Roer Valley Graben.- In: Schäfer, A. & Siehl, A. (eds.): Rift Tectonics and Syngenetic Sedimentation - the Cenozoic Lower Rhine Graben and Related Structures.- Netherlands Journal of Geosciences / Geologie en Mijnbouw, 81 (2), 159 - 166, Utrecht.
- VERSTRAELEN, A. (1996): Kartering van de Rupel Groep in Belgie en het Niederrijngebied in Duitsland met behulp van geofysische Boorgatmetingen.- 91 S., unveröff. Licentiaatsarbeit, Katholieke Universiteit Leuven.
- VINKEN, R.H., ed. (1988): The Northwest European Tertiary Basin - Results of the International Geological Correlation Programme Project No 124.- Geol. Jb., A 100, 508 S., Hannover.
- VÖLPEL, A. (1958): Zur marinen Sedimentation in der Niederrheinischen Bucht während des Oberoligozäns.- Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf, 1, 57 - 64.
- VON DANIELS, C.H., GRAMANN, F. & KÖTHE, A. (1993): The Oligocene "Septarienton" of Lower Saxony. Biostratigraphy as an equivalent of the Boom Formation of Belgium, with special considerations to its upper and lower boundaries.- Bull. Soc. Belge Geol., 102, 79-89.
- VON DANIELS, C.H. (1992): Bericht über mikropaläontologische Untersuchungen an Proben der Bohrung „Nordsee G-11-1“- 4 S., unveröff. interner Bericht BGR, Hannover.
- WALKER, R. G. & JAMES, N. P, eds. (1992): Facies Models - response to sea level change.- Geol. Assoc. Canada, Geotext 1, 454 p., St. John's.
- WELLE, J. (1993): Oligozäne Mollusken aus dem Schacht Sophia Jacoba 8 bei Erkelenz (Niederrhein) - Systematik, Stratigraphie, Palökologie.- Diss. Univ. Münster, 418 S., 20 Abb., 47 Taf., 8 Anl., Münster.
- WÖLK, E. (1940): Die Gliederung des Deckgebirges in der niederrheinischen Bucht.- Braunkohle, 39, 255 - 260.

- WÖLK, E. (1941): Das niederrheinische Mitteloligozän und seine Stellung innerhalb des nordeuropäischen Mitteloligozäns.- Z. dt. geol. Ges., 93, 80 - 114.
- ZAGWIJN, W.H. (1989): The Netherlands during the Tertiary and the Quarternary: A case history of coastal lowland evolution.- Geologie en Mijnbouw, 68, 107 - 120, Dordrecht.
- ZAGWIJN, W.H. & HAGER, H. (1987): Correlations of continental and marine Neogene deposits in the South-Eastern Netherlands and the Lower Rhine district.- Meded. Werkgr. Tert. Kwart. Geol., 24, 1-2, 59 - 78, Leiden.
- ZIEGLER, F.K. (1994): Die Entwicklung der Ostracoden-Vergesellschaftungen im Mittel- und Oberoligozän der Grube Sophia Jacoba, Schacht 8 (Erkelenz, NW-Deutschland).- Diss. Univ. Münster, 229 S., 37 Abb., 62 Taf., Münster.
- ZIEGLER, P. A. (1990): Geological Atlas of Western and Central Europe.- 2nd ed., 239 S..
- ZIEGLER, P. A. (1994): Cenozoic rift system of western and central Europe: an overview.- Geologie en Mijnbouw, 73, 99 - 127.
- ZIMMERLE, W. (1993): On the lithology and provenance of the Rupelian Boom Clay in northern Belgium, a volcanoclastic deposit.- Bull. Soc. Belg. Géologie, 102 (1-2), 91-103.

Dank

Die Forschungsarbeiten zu dieser Dissertation fanden in zwei Phasen statt: die Grundlagen wurden im Rahmen eines DFG-Projekts 1995 bis 1997 am Geologischen Institut der Universität Bonn gelegt, die Fertigstellung der Arbeit erfolgte nebenberuflich in der Folgezeit. Während dieses langen Zeitraums haben eine Vielzahl von Menschen direkt oder indirekt zu dieser Arbeit beigetragen, denen ich hiermit danken möchte:

- Prof. Dr. A. Schäfer, Bonn, von dem ich die Anregung zu dieser länderübergreifenden Arbeit erhielt. Ihm danke ich nicht nur für die Diskussionen und die Unterstützung in meiner aktiven Forschungszeit am Geologischen Institut der Universität Bonn in den Jahren 1995 bis 1997, sondern insbesondere für seine Geduld, den Zugang zu Institutsressourcen, seine Fragen und die Diskussionsbereitschaft in den Zeiten des forschungsfremden Broterwerbs nach dem Ende der DFG-Förderung.
- Dr. Michael Klett, Bonn für zahlreiche Mittagsdiskussionen über die Korrelierbarkeit der Tertiärschichten in der Niederrheinischen Bucht und manche Hilfestellung bei der Bewältigung von Bohrungsdatenbankspezifischen Tücken.
- Den Firmen und Institutionen Rheinbraun AG, Ruhrkohle AG BAG Niederrhein, Sophia Jacoba GmbH, Erftverband, Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen (ehemals Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen), Wintershall AG, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, PREUSSAG Energie, BEB Erdöl und Erdgas, Mobil Oil und Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, die die Nutzung von Bohrungsdaten gestatteten. Ohne diese umfangreiche Datenbasis wäre diese Forschungsarbeit nicht möglich gewesen.
- Dr. G. Best (BGR, Hannover), Dr. M. Geluk (NITG-TNO Utrecht, Niederlande), Dr. H. Hager (†, ehem. Geologischer Dienst NRW, Krefeld), Prof. Dr. J. Klostermann (Geologischer Dienst NRW, Krefeld), Dr. H. Kockel (ehem. BGR Hannover), Dr. A. Köthe (BGR, Hannover), Dr. H. Kuster (NLfB, Hannover), Prof. Dr. O. Michelsen (Universität Aarhus, Dänemark), Prof. Dr. G. Plint, (University of Western Ontario, Canada), Dr. J. Prüfert (ehem. Geologischer Dienst NRW, Krefeld), Dr. J. Schmitz (Preussag, Lingen), Dr. G. Standke (Geol. Landesamt Sachsen, Freiberg) und Prof. Dr. N. Vandenberghe (Universität Leuven, Belgien) danke ich für die Bereitstellung von ergänzenden Bohrungsdaten, die Einsicht in unveröffentlichte Schriften, Bohrberichte und biostratigraphische Untersuchungen sowie anregende Diskussionen.
- Den Studentischen Hilfskräften Andreas, Anja, Natascha und Martin, die die umfangreichen Bohrlochmessungen und Kartengrundlagen digitalisiert haben.
- Prof. Dr. J. Loeper (Leiter des ZFUW, Universität Koblenz) für 22 Tage „Schreiburlaub“ zur Fertigstellung der Arbeit im Herbst 2003, meiner Mitarbeiterin Frau Lebrecht für die Übernahme von zusätzlichen Aufgaben und den Kollegen am ZFUW für die Anteilnahme in dieser Zeit.
- Am meisten aber danke ich Holger, der in all den Jahren, aber insbesondere im letzten Jahr der Fertigstellung der Arbeit viel Verständnis, ein offenes Ohr für Diskussionen, ergänzende Informationen zur jüngeren Tektonik des Rheinischen Schiefergebirges und der Niederrheinischen Bucht, ermunternde Worte, kritische Fragen und wache Augen beim Korrekturlesen hatte.
- ...und natürlich der unerbittlichen ‚Frau Müller‘.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft förderte diese Arbeit im Rahmen des DFG-Forschungsprojekts „Sequenzstratigraphische Untersuchungen im Tertiär des Norddeutschen Beckens“ (Scha 279/ 9-1 und 9-2) in den Jahren 1995 bis 1997.

Anhang 1: Verwendete Bohrungen

Nr.	Bohrname	Land	Rupel-Profile	Chatt-Profile	Einzelabbildung
006	Burghof	D	Profil 3	Profil 11, Profil 15	Abb. 2.3
008	Garsdorf	D	Profil 3	Profil 11	
029	Tetz	D	Profil 7, Profil 8	Profil 14, Profil 15	
038	Sophia Jacoba	D	Profil 3	Profil 11	
098	Roedgen 1	D	Profil 3, Profil 6	Profil 11, Profil 13	
102	Uedem 1	D	Profil 1	Profil 10	
106	Puffendorf 5	D	Profil 7	Profil 14	
110	Schwalmtal 1001	D	Profil 6	Profil 13	
113	Straeten 1	D	Profil 8		
127	Gerderath	D	Profil 3	Profil 11	
180	Loevenich	D		Profil 15	
185	Hartefeld 1	D	Profil 1, Profil 5	Profil 10, Profil 12	Abb. 2.2, 2.4, 4.1
188	Lamerong 1	D	Profil 1	Profil 10	
193	Dinslakener Bruch 1	D	Profil 5	Profil 12	
197	Baerlag 1	D	Profil 5	Profil 12	
286	Hoevelsberg 2	D	Profil 5	Profil 12	
288	Muehlenberg 1	D	Profil 1, Profil 9	Profil 10	
291	Ankerweide 2	D	Profil 5	Profil 12	
298	Suerth	D		Profil 10, Profil 11	
300	Kanalstrasse	D		Profil 10	
330	Jackerather Horst	D	Profil 3, Profil 7	Profil 11, Profil 14	
331	Broekhuizen vorst	NL	Profil 4, Profil 5	Profil 12	
346	Pulheim - Randkanal	D	Profil 1	Profil 10	
356	Knechtsteden	D	Profil 1	Profil 10	
379	Suechteln-Sittard 1	D	Profil 6	Profil 13	
380	Willich 1001	D	Profil 1	Profil 10	
381	Lanzerath 1	D	Profil 1, Profil 7	Profil 10, Profil 14	
393	GLA 1	D	Profil 1, Profil 6	Profil 10, Profil 13	
395	Grefrath Coca Cola	D	Profil 4		
404	Rheurdt	D	Profil 1	Profil 10	
2007	Dornspijk 2	NL	Profil 1	Profil 10	
2023	Asten 2	NL	Profil 3, Profil 5	Profil 11, Profil 12	
2024	Arcen 1	NL	Profil 4		
2028	Limbricht	NL	Profil 6	Profil 13	
2031	Nijmegen-Valburg	NL	Profil 4		
2058	Wursterheide	D	Profil 2		
2098	Gartow	D	Profil 2, Profil 9		
2099	G11-1 (Nordsee)	D	Profil 1, Profil 2		
2122	Kerkhoven kb186	B	Profil 5	Profil 12	
2123	BKB 284	D	Ergänzung von Profil 2		
2124	Loburg I/90	D	Profil 2		

Die folgenden Bohrungen, Schächte und Aufschlüsse wurden zur Ergänzung der Profilkorrelation und zur Konstruktion von Mächtigkeits- und Verbreitungskarten herangezogen:

Bohr.-Nr.	Bohrname	Land	Bohr.-Nr.	Bohrname	Land
015	Dütshöfe	D	287	Moehne 1	D
019	Herbertskaul	D	289	Huelshorst 1	D
020	Bruehl-Badorf	D	290	Voerde 1	D
025	Brueggen-Kierdorf	D	292	Schafstall 2	D
030	Bergheim 84	D	293	Pompenberg	D
037	Frauwuellersheim	D	294	Warzberg 1	D
070	Juelich	D	295	Barmingholten 1	D
075	Hamforst	D	296	Westhoven	D
084	Matzerath 2	D	297	Koeln Schlachthof	D
085	Matzerath 3	D	299	Hauptverwaltung	D
087	Granterath 1	D	308	Strassenacker 1	D
088	Doverhahn 1	D	326	Grefrath Coca Cola	D
089	Baal 4	D	333	Tgb. Frimmersdorf	D
090	Hetzerath 1	D	357	Schacht Rossenray	D
091	Hetzerath 2	D	378	Viersen 1001	D
092	Hetzerath 3	D	382	Isselburg 1	D
093	Loevenich 2	D	383	Niederwald 3	D
094	Houverath 4	D	384	Victor 8	D
095	Houverath 5	D	385	Wachtendonk 1	D
096	Oerath 1	D	386	Dachsbruch 1	D
097	Tenholt 2	D	387	Bislich 1/57	D
103	Loverich 3	D	388	Victor 5	D
109	Niederwald 1	D	389	Dinslakener Bruch 2	D
111	Victor 2	D	390	Emmelsum 1	D
182	Maria Hauptschacht	D	391	Eppinghoven 1	D
183	Nordstern	D	392	Emmerich 1	D
186	Ork 2	D	394	Brucker Feld 1	D
187	Boschheide 2	D	396	Gestkamp 1	D
189	Grint 1	D	397	Grint 4	D
190	Schieten 1	D	398	Hammfeld 1	D
191	Leucht 2	D	399	Hochwald 1	D
192	Stertgens 1	D	400	Hochwald 2	D
194	Budberger Feld 1	D	401	Leucht 3	D
195	Neukirchen 4	D	402	Mehrum 1	D
196	Niederwald 2	D	403	Oberemmelsum 1	D
198	Lohfeld 1	D	405	Saalloff 2	D
199	Moellen 1	D	406	Sevelener Heide 3	D
200	Heiligenbruch 1	D	407	Tester Berge 4	D
201	Geldern T1	D	408	Warzberg 2	D
202	Damm 1	D	409	Siebenstern 1	D
203	Heilkamp 1	D	410	DU 1/9A	D
204	Hoevelsberg 1	D	411	Sevelener Heide 4	D
			412	Tester Berge 1	D

Anhang 1: Verwendete Bohrungen

Bohr.-Nr.	Bohrname	Land	Bohr.-Nr.	Bohrname	Land
413	Victor 3	D	2114	Koewijde ks2	B
414	Bislich 2/57	D	2115	Driepaalhoeve ks3	B
424	KB 1	D	2116	Dornerheide ks6	B
441	Bottrop 019	D	2117	Donderslagse Heide ks9	B
473	Schwarzer Bach 9	D	2118	Witte Bergen ks12	B
477	Dinslaken I	D	2119	Industrierrein ks19	B
479	Schwarzer Bach 1	D	2120	Ruhmortelsheide ks22	B
485	Schwarze Heide 1	D	2121	Hechtelhof kb174	B
488	Kletterpoth 1/1 A	D	2128	Terhagen	B
490	Huenxer Wald 1	D	2129	Niel	B
600	Schacht Hoerstgen	D	2130	Hingene-Wintham	B
601	Schacht Kapellen	D	2132	Rupelmonde	B
602	Schacht Tönisberg	D	2133	Putte	B
604	Myhl	D	2137	Molenbeersel	B
2002	Veldhoven 1	NL			
2004	Hellevoetsluis 1	NL			
2006	Marslanden 1	NL			
2010	Dongen 1	NL			
2011	De Wijk 2	NL			
2012	Giethoorn 1	NL			
2014	Bolsward 1	NL			
2015	Rijsbergen 1	NL			
2016	Uithuizermeeden 1	NL			
2017	Blijham 1	NL			
2018	Westerbork 1	NL			
2019	Schoonebeek 197	NL			
2020	Tubbergen 8	NL			
2021	Rossum-Weerselo 3	NL			
2022	Eleveld 101	NL			
2027	Ruurlo 1	NL			
2056	Esche 2	D			
2059	Adorfer Moor	D			
2062	Frenswegen Z6	D			
2063	Getelo Z1	D			
2103	Stekene	B			
2104	St. Niklaas 2	B			
2105	Waasmunster	B			
2106	Kruikeke	B			
2107	Mol SCK	B			
2108	Balen	B			
2109	Oelegem	B			
2110	Kontich	B			
2111	Herentals 1	B			
2112	Reet	B			
2113	Herentals 2 zwembad	B			

Anhang 2: Profilschnitte

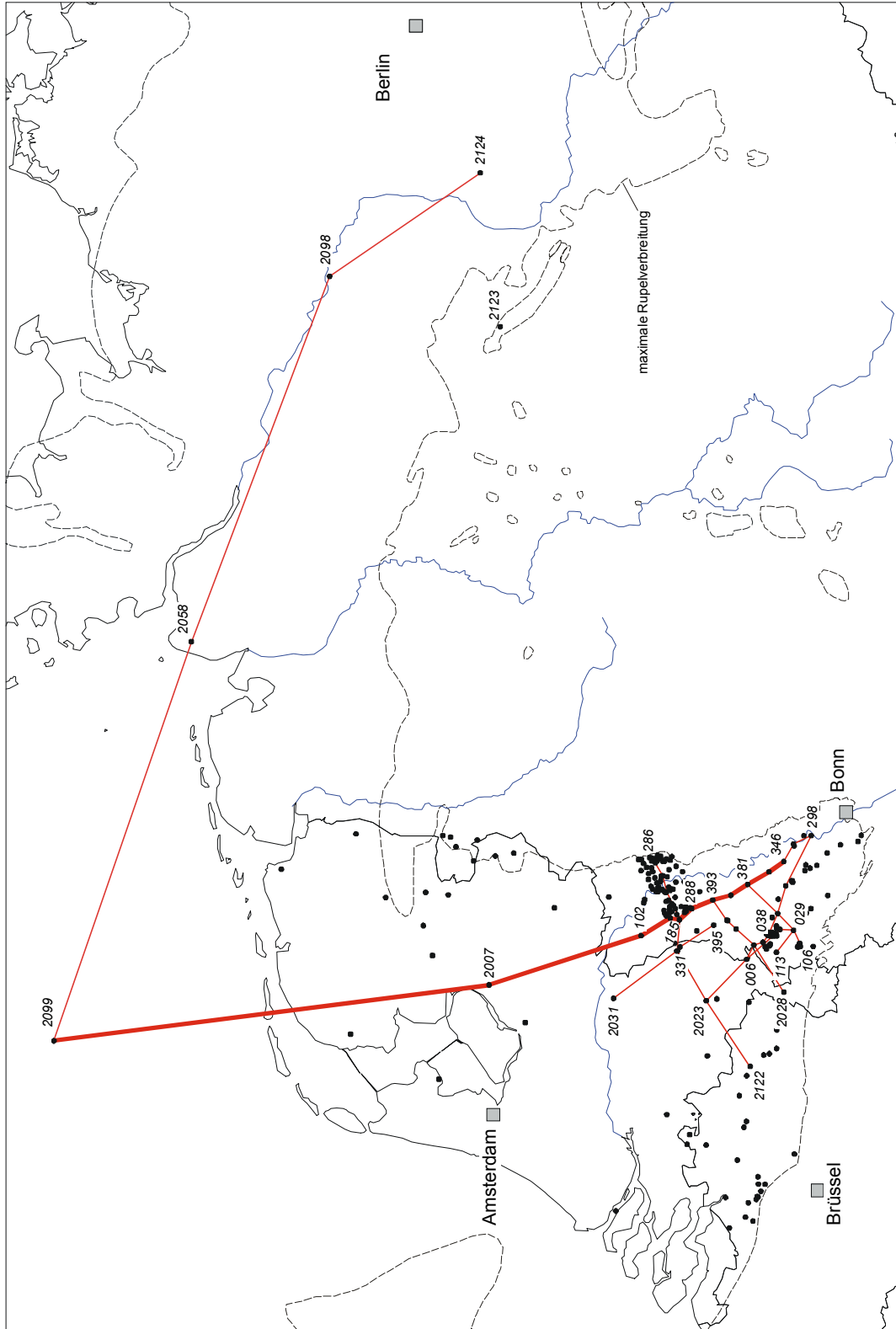
Bezugshorizont Grenze III an der Basis von RU-3:

- Abb. A2.1: Profil 1, Nordsee (D) – südliche Niederrheinische Bucht (D);** Bezug: III
2099 – 2007 – 102 – 188 – 185 – 404 – 288 – 393 – 380 – 381 – 356 – 346
- Abb. A2.2: Profil 2, Nordsee (D) – Sachsen-Anhalt (D);** Bezug: III
2099 – 2058 – 2098 – 2124
- Abb. A2.3: Profil 3, Asten (NL) - südliche Niederrheinische Bucht (D);** Bezug: III
2023 – 006 – 098 – 127 – 038 – 330 – 008
- Abb. A2.4: Profil 4, Nijmegen (NL) – Venlo-Scholle (D);** Bezug: III
2031 – 331 – 2024 – 395
- Abb. A2.5: Profil 5, Nordostbelgien (B) – nordöstliche Niederrheinische Bucht (D);** Bezug: III
2122 – 2023 – 331 – 185 – 197 – 291 – 193 – 286
- Abb. A2.6: Profil 6, Limburg (NL) – Krefeld (D);** Bezug: III
2028 – 098 – 110 – 379 – 393
- Abb. A2.7: Profil 7, Rur-Scholle (D) – Köln-Scholle (D);** Bezug: III
106 – 029 – 330 – 381
- Abb. A2.8: Profil 8, Rur-Scholle (D) – Rur-/Erft-Scholle (D);** Bezug: III
113 - 029
- Abb. A2.9: Profil 9, Niederrheinische Bucht (D) – Gartow (D);** Bezug: III
288 - 2098

Bezugshorizont Grenze IX an der Basis von CH-2:

- Abb. A2.10: Profil 10, Zentralniederlande (NL) – südl. Niederrheinische Bucht (D);** Bezug: IX
2007 – 102 – 188 – 185 – 404 – 288 – 393 – 380 – 381 – 356 – 346 – 300 – 298
- Abb. A2.11: Profil 11, Asten (NL) - südliche Niederrheinische Bucht (D);** Bezug: IX
2023 – 006 – 098 – 127 – 038 – 330 – 008 – 298
- Abb. A2.12: Profil 12, Nordostbelgien (B) – nordöstliche Niederrheinische Bucht (D);** Bezug: IX
2122 – 2023 – 331 – 185 – 197 – 291
- Abb. A2.13: Profil 13, Limburg (NL) – Krefeld (D);** Bezug: IX
2028 – 098 – 110 – 379 – 393
- Abb. A2.14: Profil 14, Rur-Scholle (D) – Köln-Scholle (D);** Bezug: IX
106 – 029 – 330 – 381
- Abb. A2.15: Profil 15, Venlo-Scholle (D) - Rur-/Erft-Scholle (D) mit Spectralogs;** Bezug: IX
006 – 180 – 029

Abb. A2.1: Profil 1, Nordsee (D) – südliche Niederrheinische Bucht (D);
 2099 – 2007 – 102 – 188 – 185 – 404 – 288 – 393 – 380 – 381 – 356 – 346
 Rupelprofil, Bezugshorizont: Grenze III an der Basis von RU-3



Lageplan Profil 1, Profillinie fett

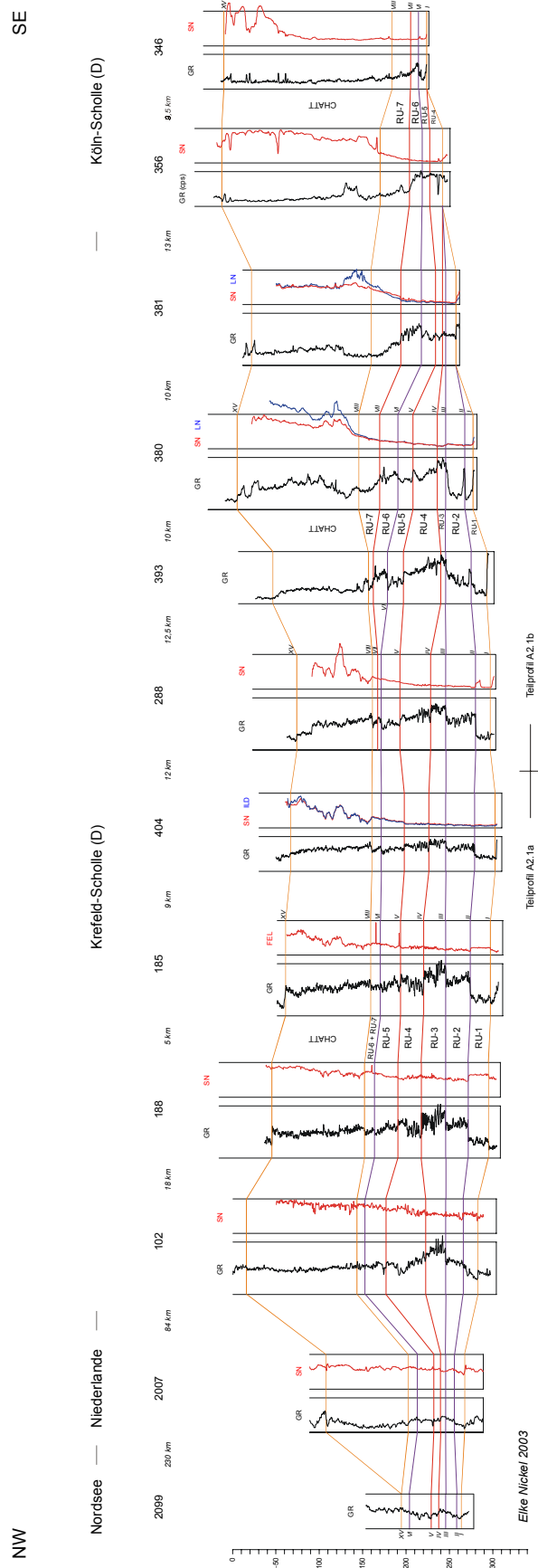


Abb. A2.1: Profil 1, Nordsee (D) – südliche Niederrheinische Bucht (D); 2099 – 2007 – 102 – 188 – 185 – 404 – 288 – 393 – 380 – 381 – 356 – 346
 Rupeprofil, Bezugshorizont: Grenze III an der Basis von RU-3; Gesamtdarstellung, Teilprofile siehe Abb. A2.1a und A2.1b

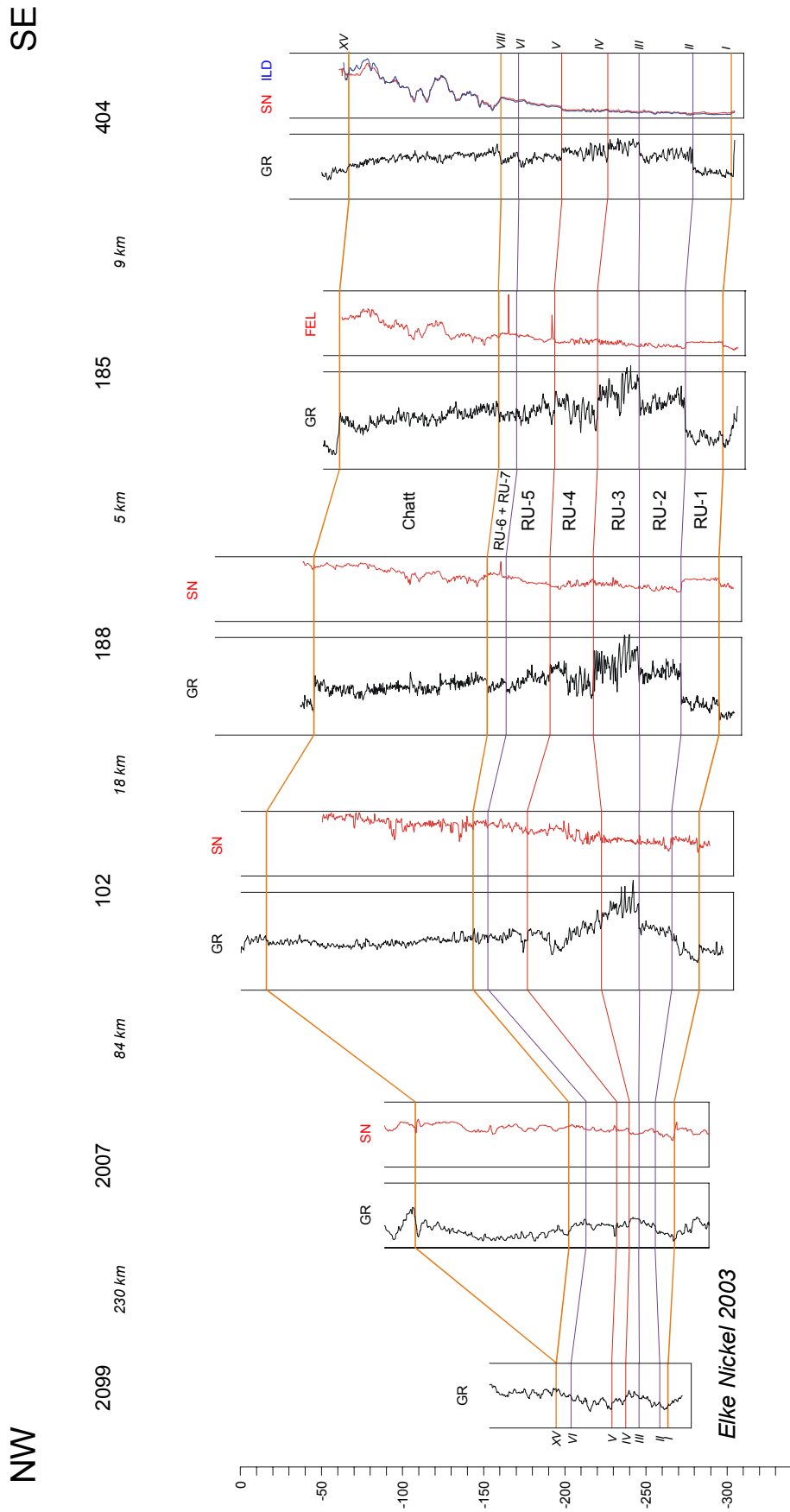


Abb. A2.1a: Profil 1, Teilprofil a; 2099 – 2007 – 102 – 188 – 185 – 404
Rupelprofil, Bezugshorizont: Grenze III an der Basis von RU-3

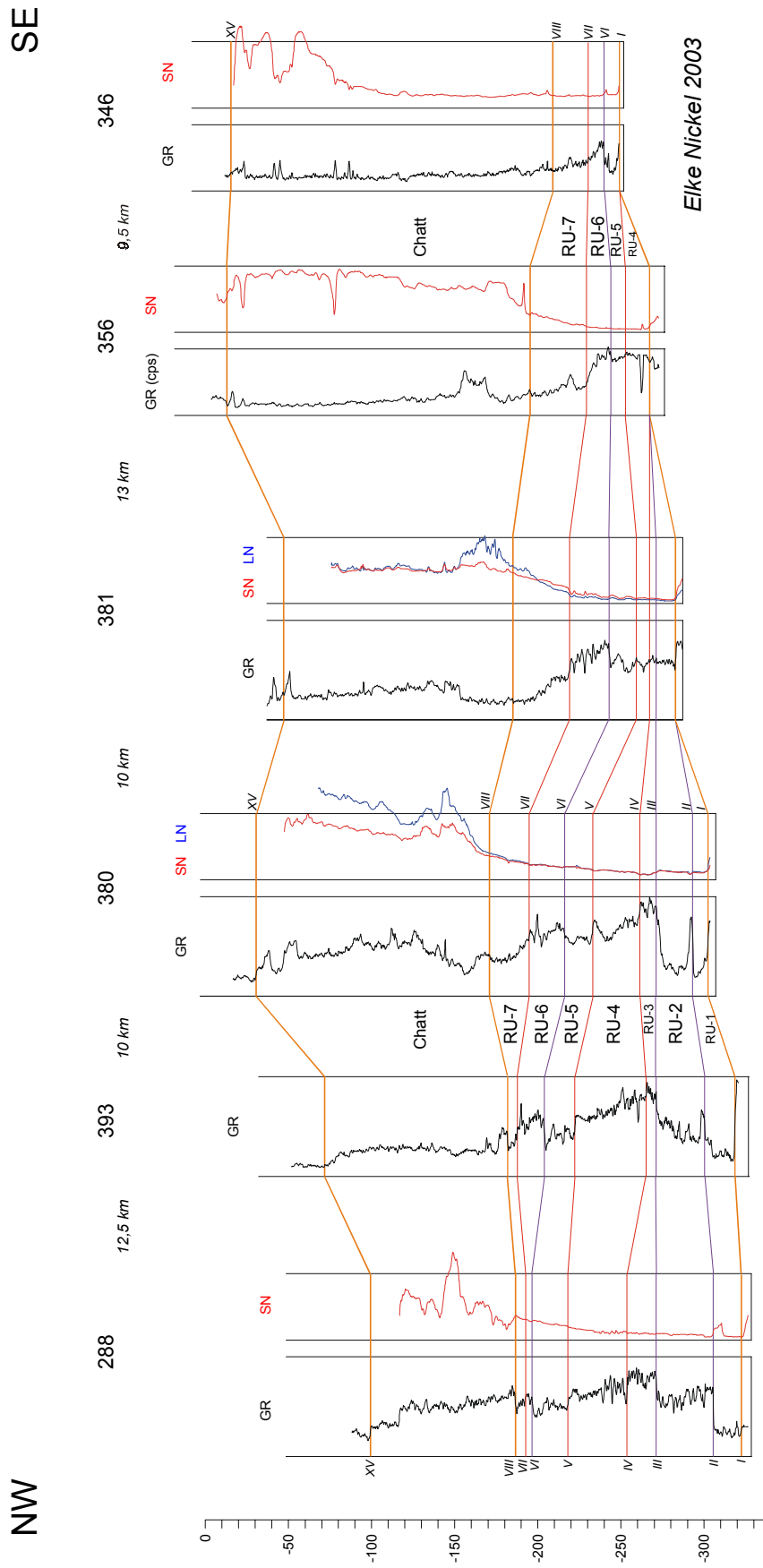
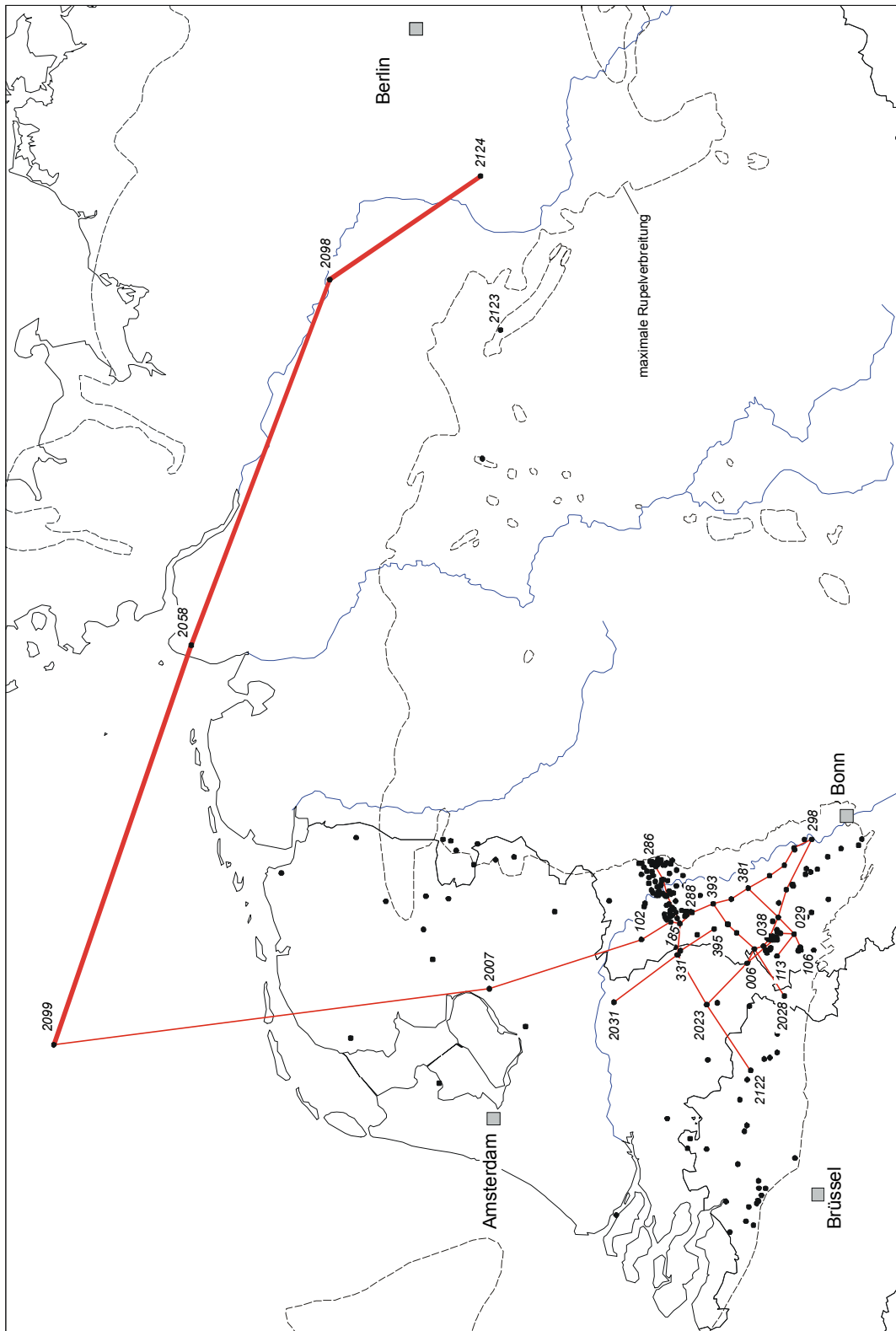


Abb. A2.1b: Profil 1, Teilprofil b; 404 – 288 – 393 – 380 – 381 – 356 – 346
Rupelprofil, Bezugshorizont: Grenze III an der Basis von RU-3

Abb. A2.2: Profil 2, Nordsee (D) – Sachsen-Anhalt (D)
2099 – 2058 – 2098 – 2124
Rupelprofil, Bezugshorizont: Grenze III an der Basis von RU-3



Lageplan Profil 2, Profilinie fett

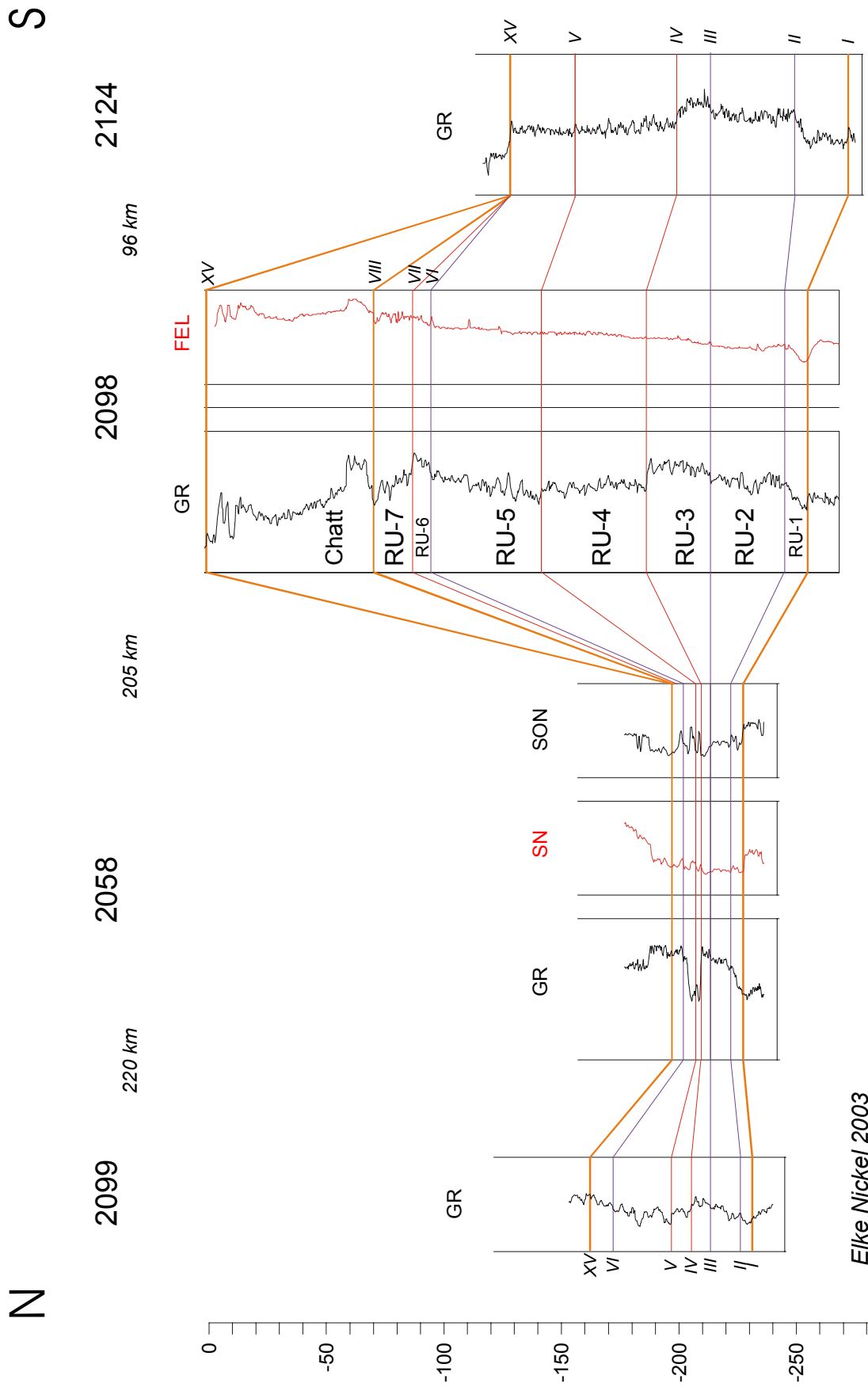
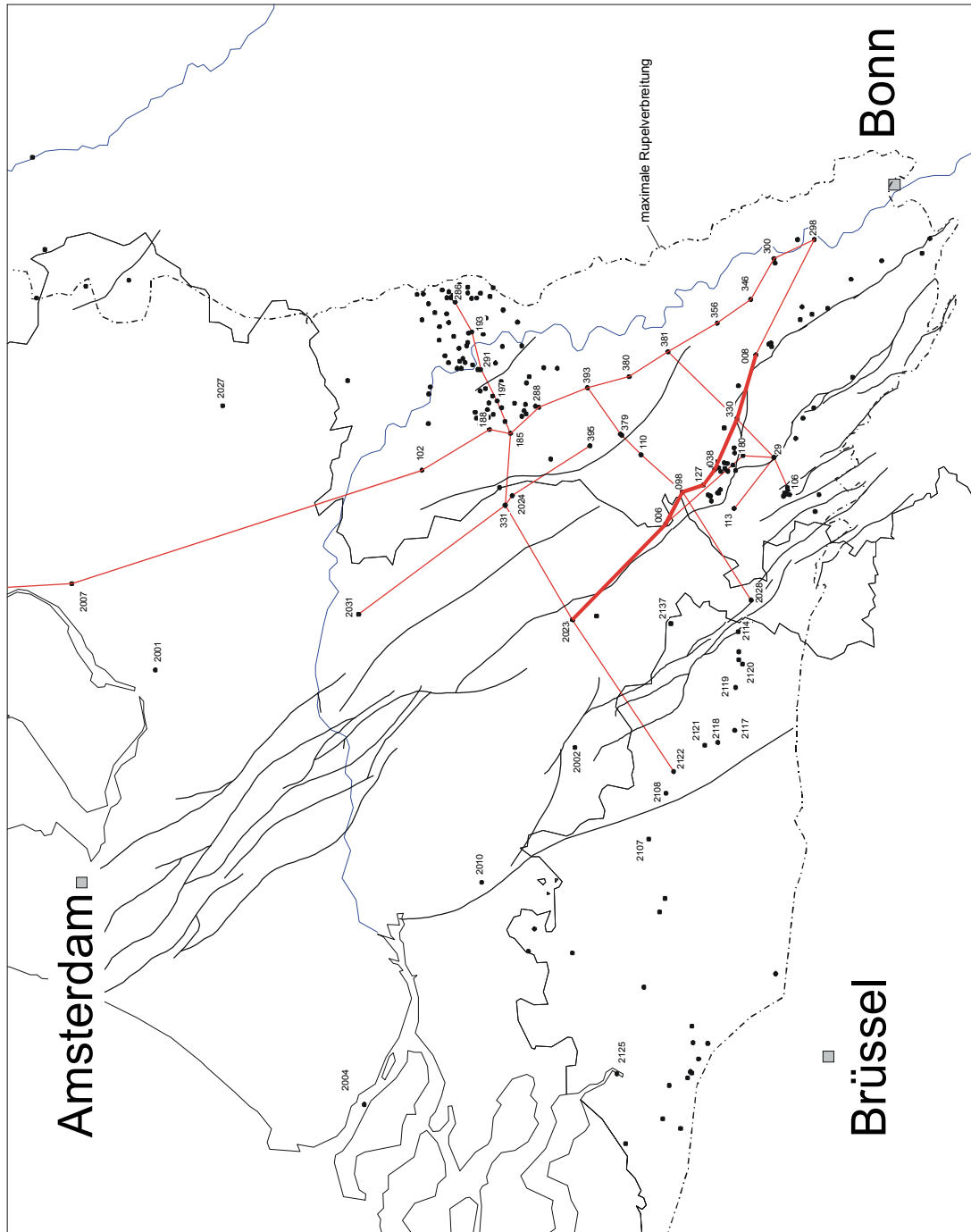


Abb. A2.2: Profil 2, Nordsee (D) – Sachsen-Anhalt (D); 2099 – 2058 – 2098 – 2124
Rupelprofil, Bezugshorizont: Grenze III an der Basis von RU-3

Abb. A2.3: Profil 3, Asten (NL) - südliche Niederrheinische Bucht (D)
2023 – 006 – 098 – 127 – 038 – 330 – 008
Rupelprofil, Bezugshorizont: Grenze III an der Basis von RU-3



Lageplan Profil 3, Profillinie fett

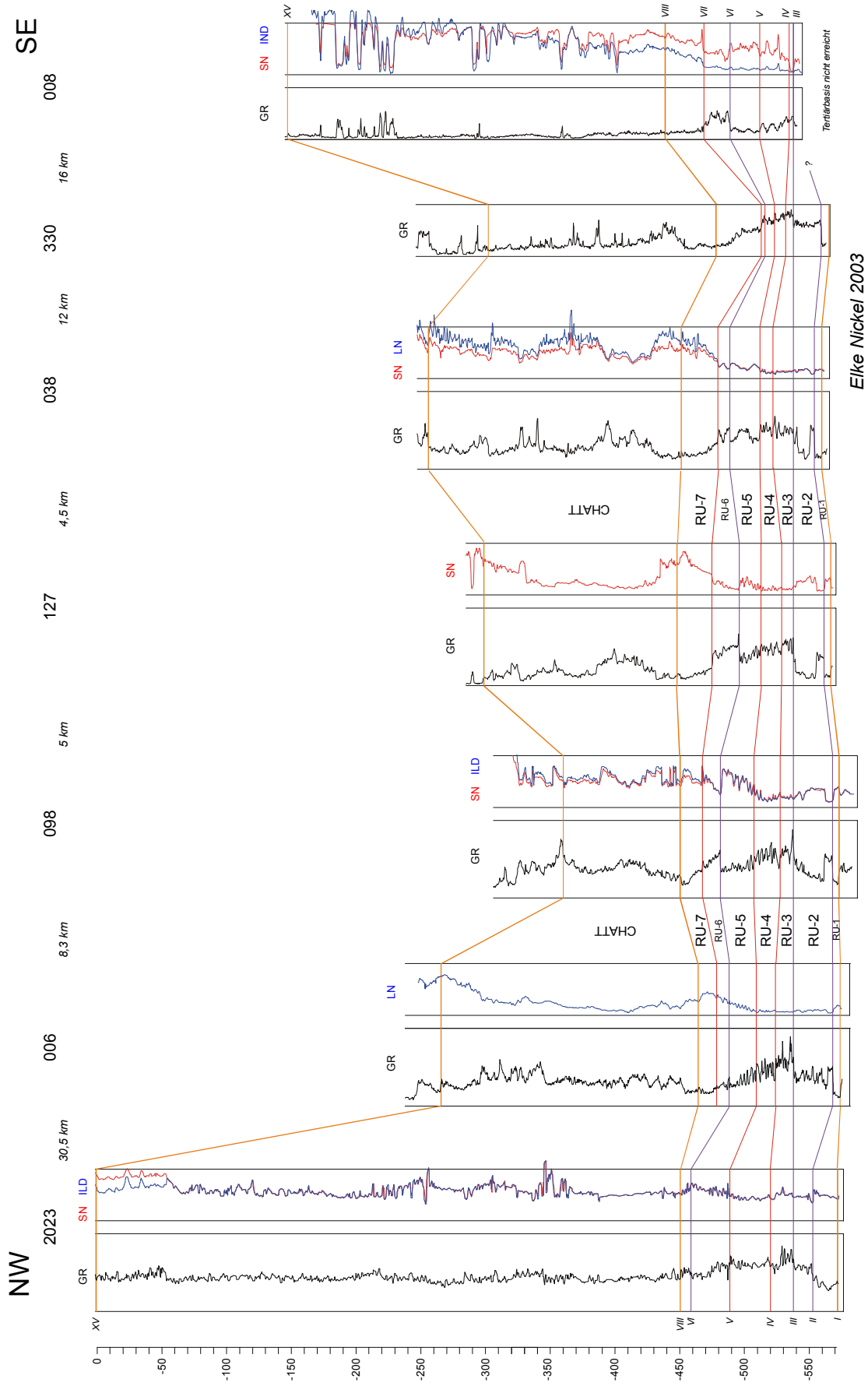
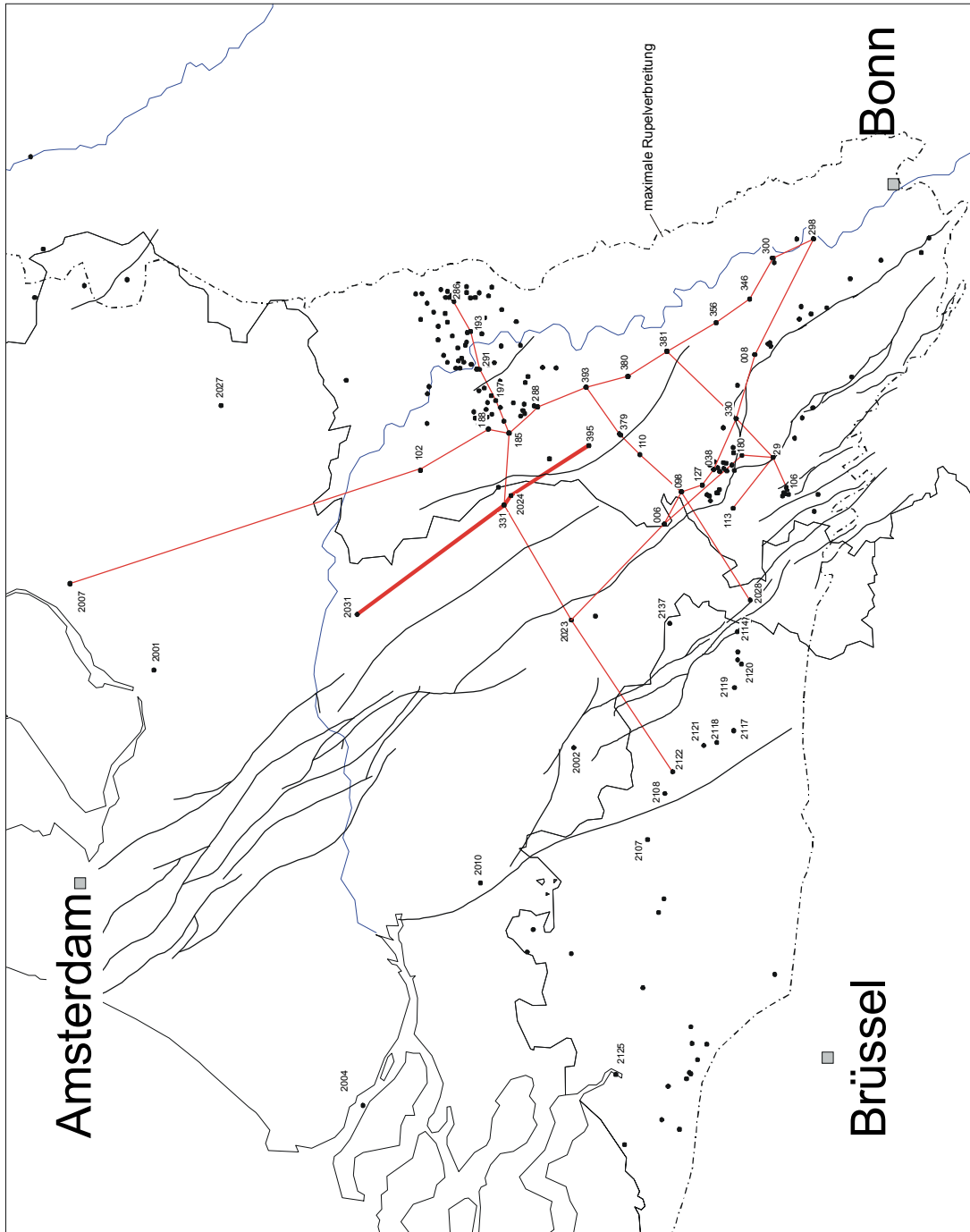


Abb. A2.3: Profil 3, Asten (NL) - südliche Niederrheinische Bucht (D); 2023 – 006 – 098 – 127 – 038 – 330 – 008
 Ruppelprofil, Bezugshorizont: Grenze III an der Basis von RU-3

Abb. A2.4: Profil 4, Nijmegen (NL) – Venlo-Scholle (D); Bezug: III
2031 – 331 – 2024 – 395
Rupelprofil, Bezugshorizont: Grenze III an der Basis von RU-3



Lageplan Profil 4, Profillinie fett

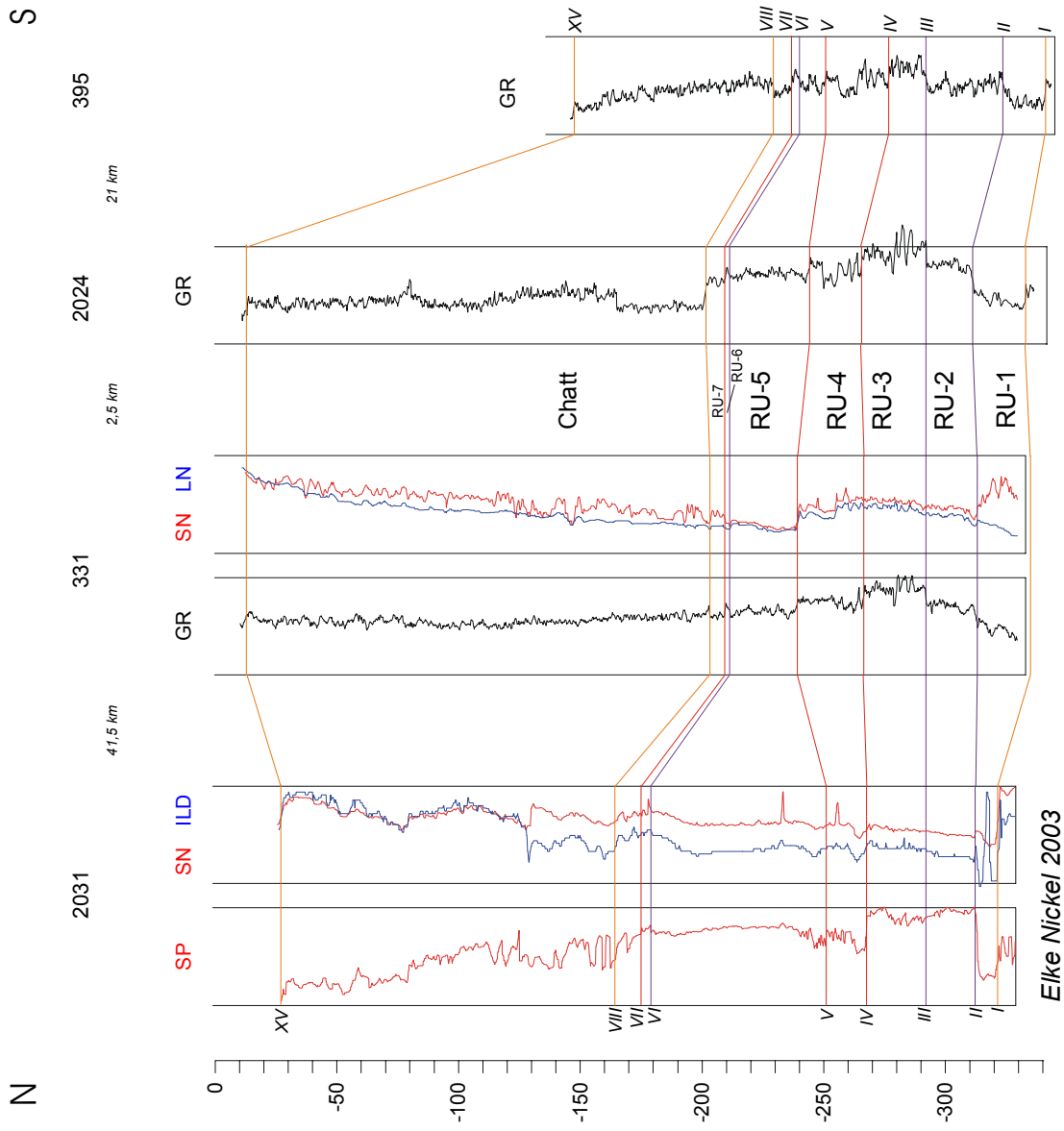
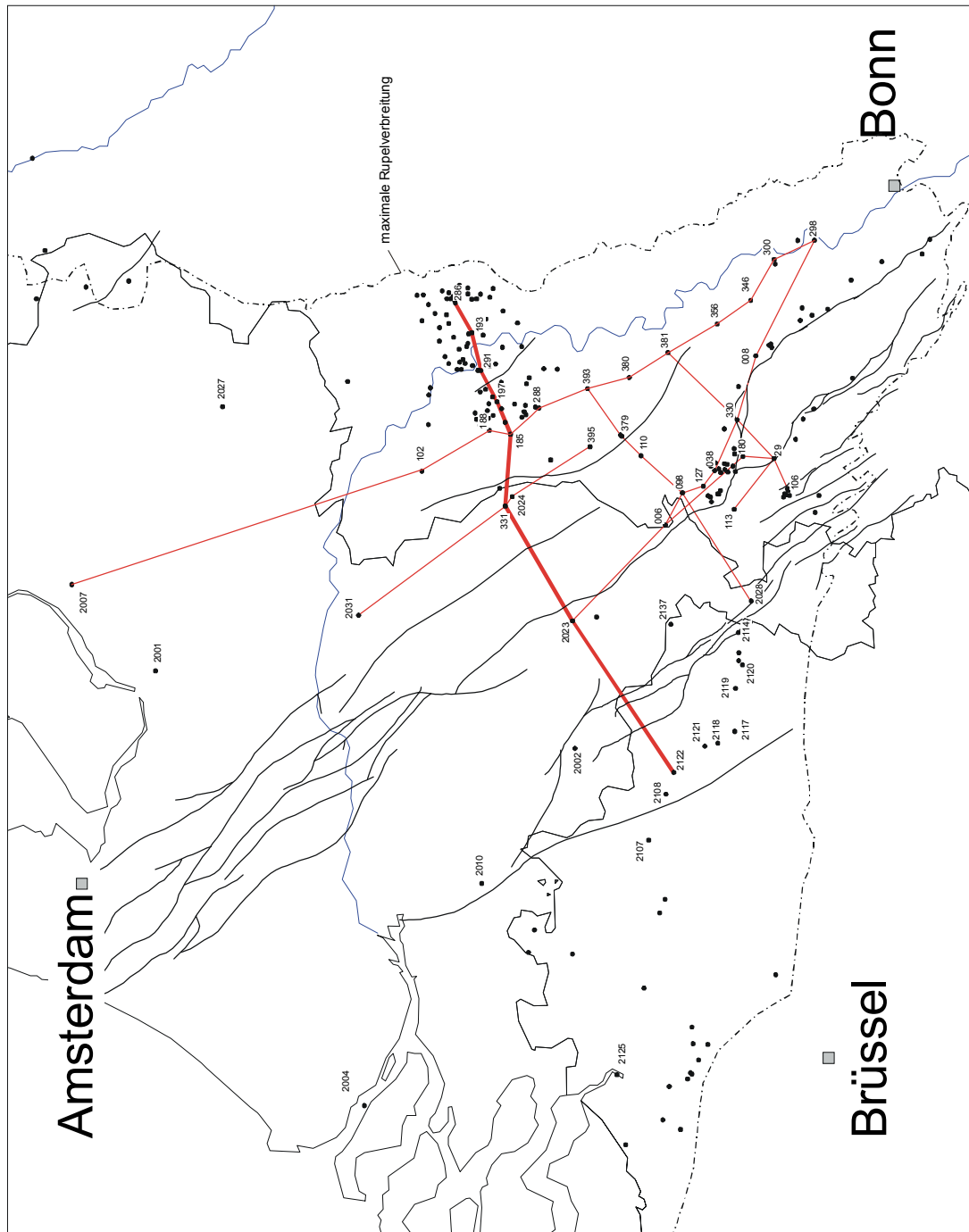


Abb. A2.4: Profil 4, Nijmegen (NL) – Venlo-Scholle (D); 2031 – 331 – 2024 – 395
Rupelprofil, Bezugshorizont: Grenze III an der Basis von RU-3

Abb. A2.5: Profil 5, Nordostbelgien (B) – nordöstliche Niederrheinische Bucht (D)
 2122 – 2023 – 331 – 185 – 197 – 291 – 193 – 286
 Rupelprofil, Bezugshorizont: Grenze III an der Basis von RU-3



Lageplan Profil 5, Profillinie fett

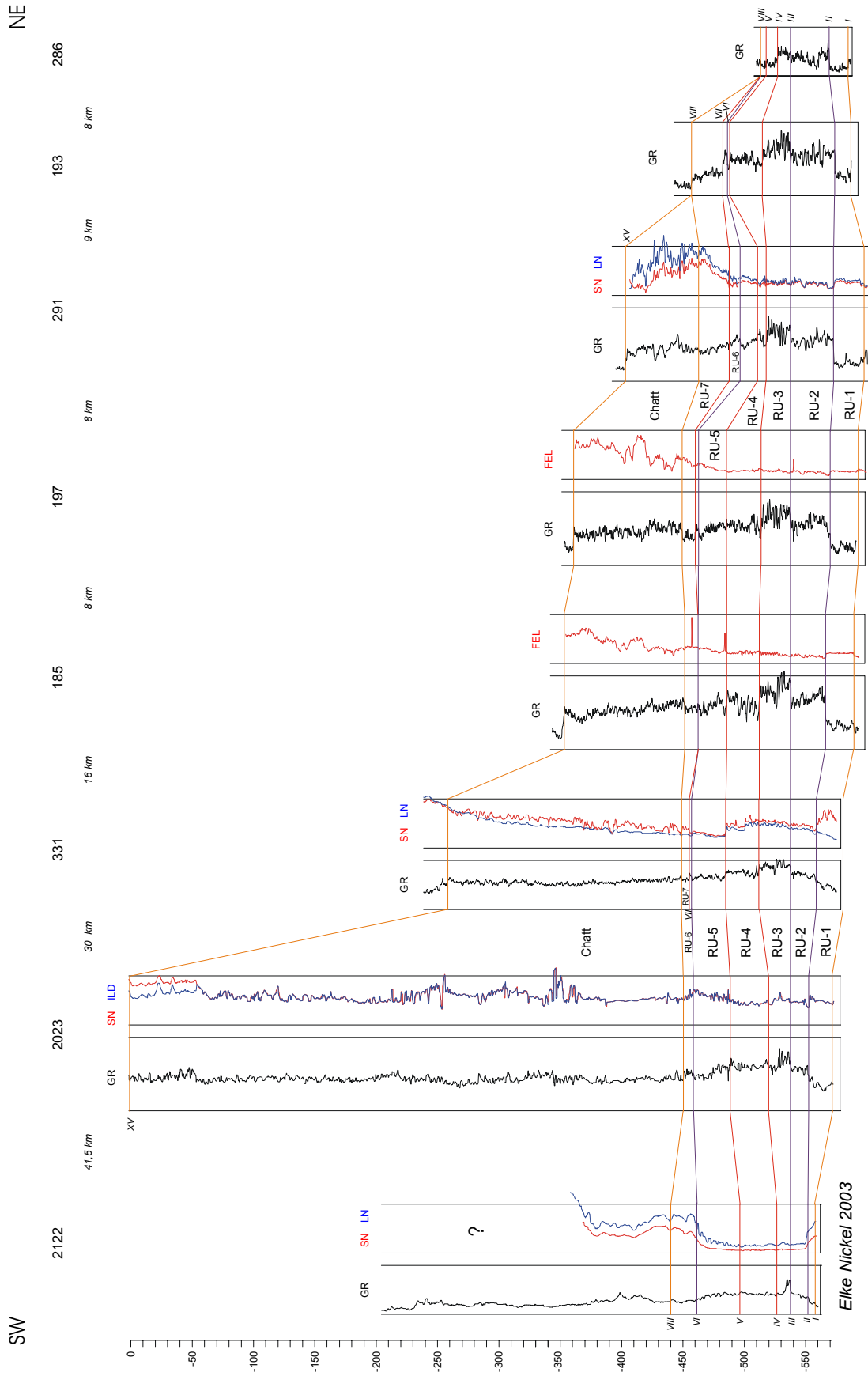
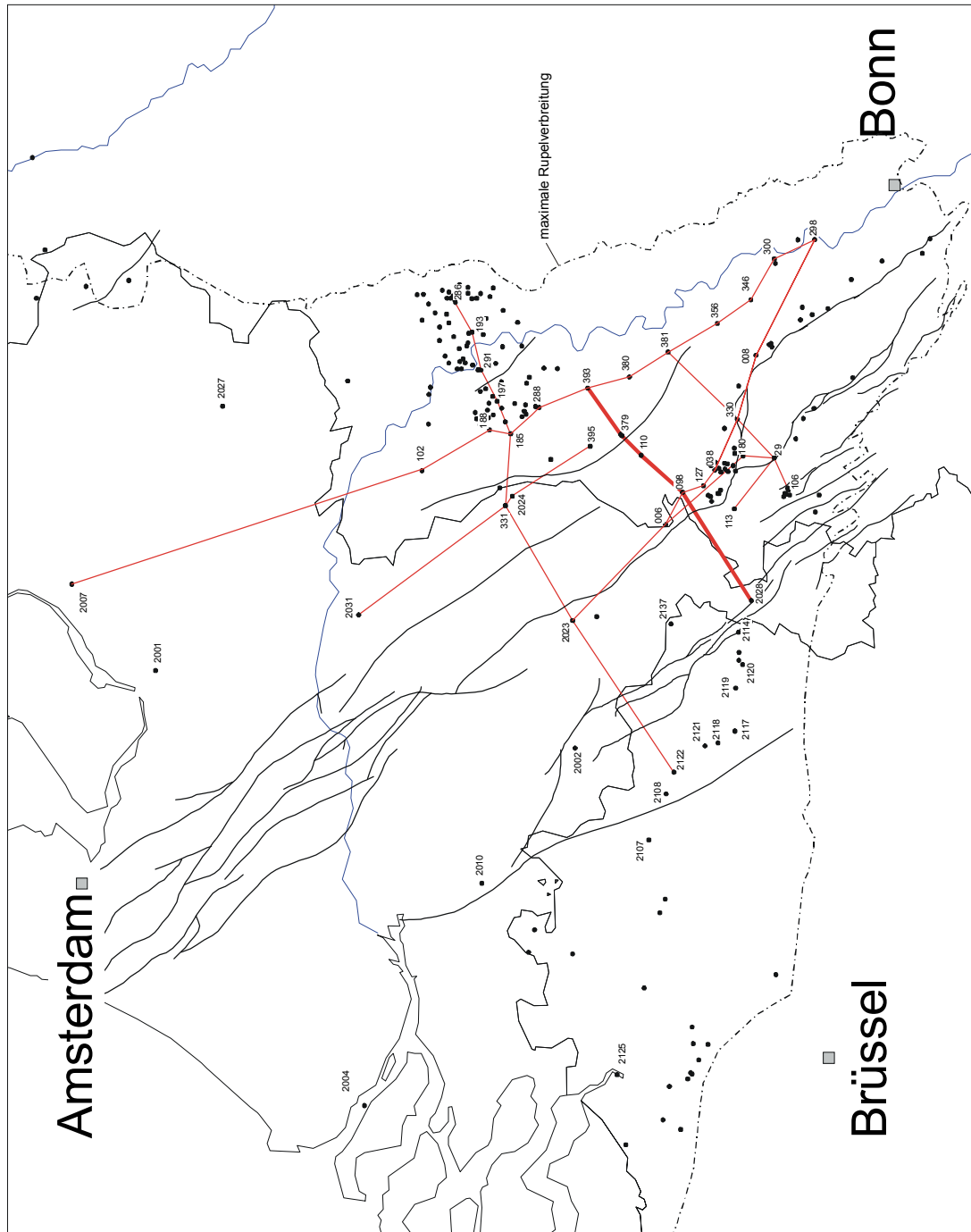


Abb. A2.5: Profil 5, Nordostbelgien (B) – nordöstliche Niederrheinische Bucht (D); 2122 – 2023 – 331 – 185 – 197 – 291 – 193 – 286 Rupelprofil, Bezugshorizont: Grenze III an der Basis von RU-3

Abb. A2.6: Profil 6, Limburg (NL) – Krefeld (D)
2028 – 098 – 110 – 379 – 393
Rupelprofil, Bezugshorizont: Grenze III an der Basis von RU-3



Lageplan Profil 6, Profillinie fett

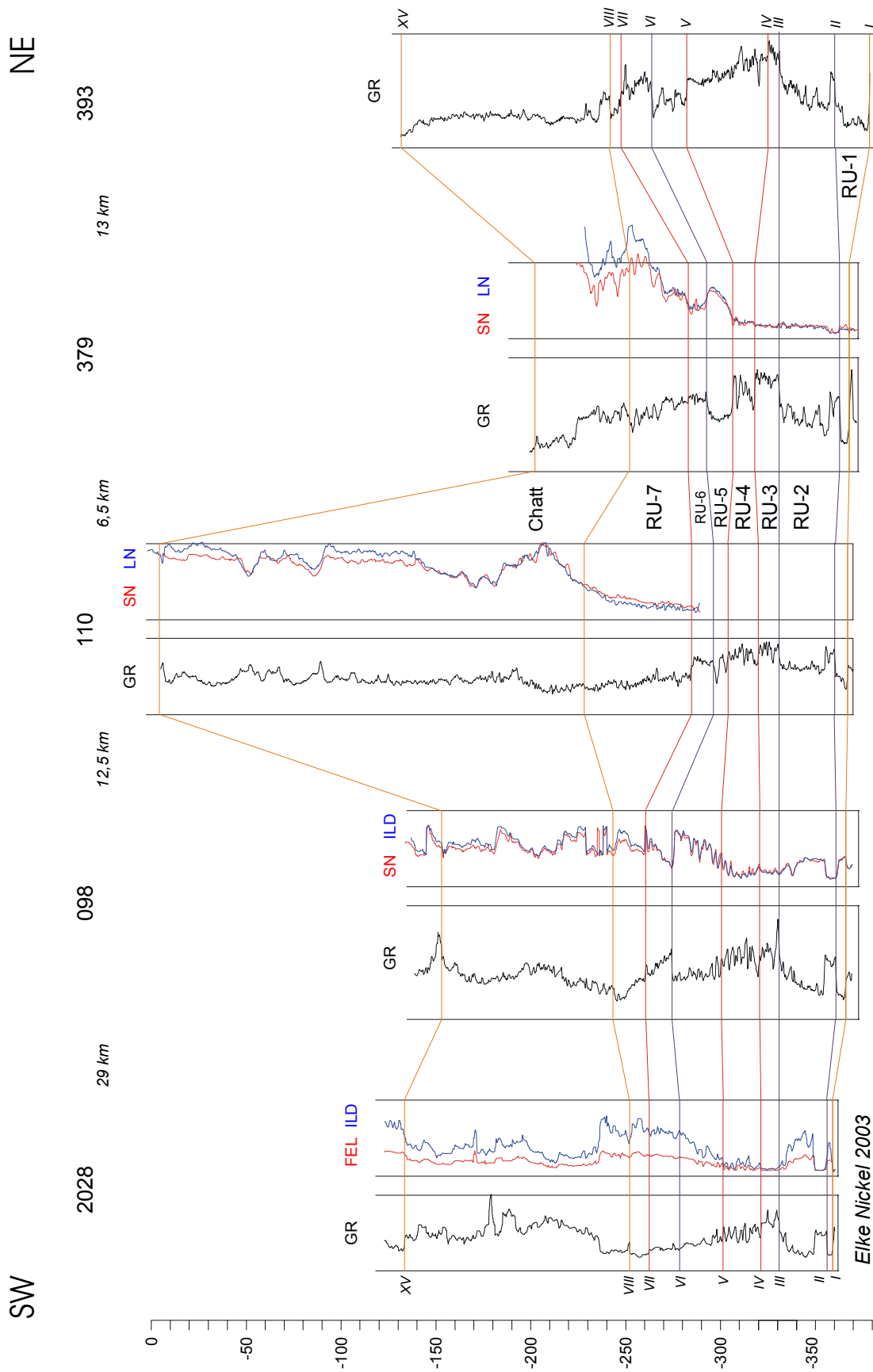
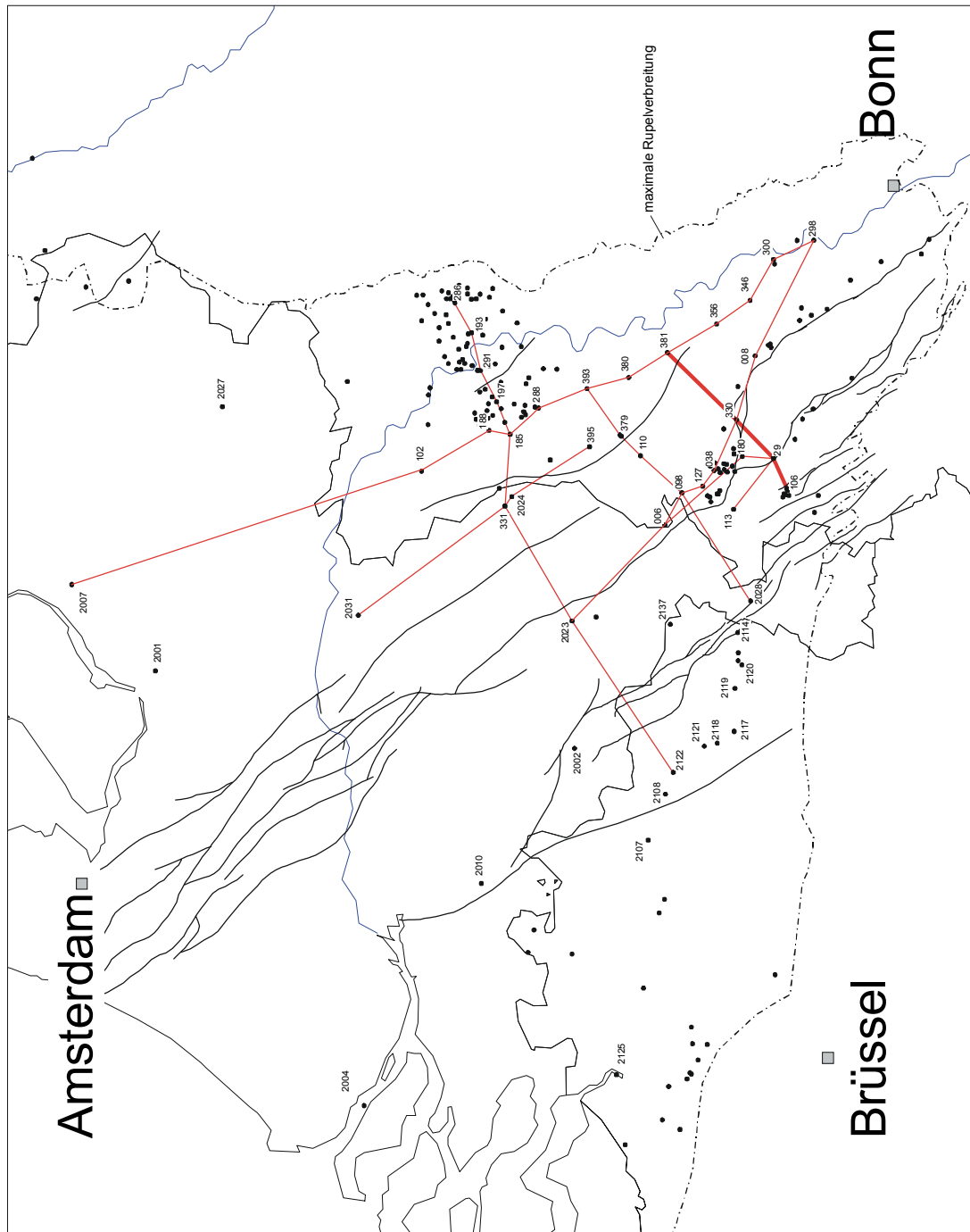


Abb. A2.6: Profil 6, Limburg (NL) – Krefeld (D); 2028 – 098 – 110 – 379 – 393
Rupelprofil, Bezugshorizont: Grenze III an der Basis von RU-3

Abb. A2.7: Profil 7, Rur-Scholle (D) – Köln-Scholle (D)
106 – 029 – 330 – 381
Rupelprofil, Bezugshorizont: Grenze III an der Basis von RU-3



Lageplan Profil 7, Profilinie fett

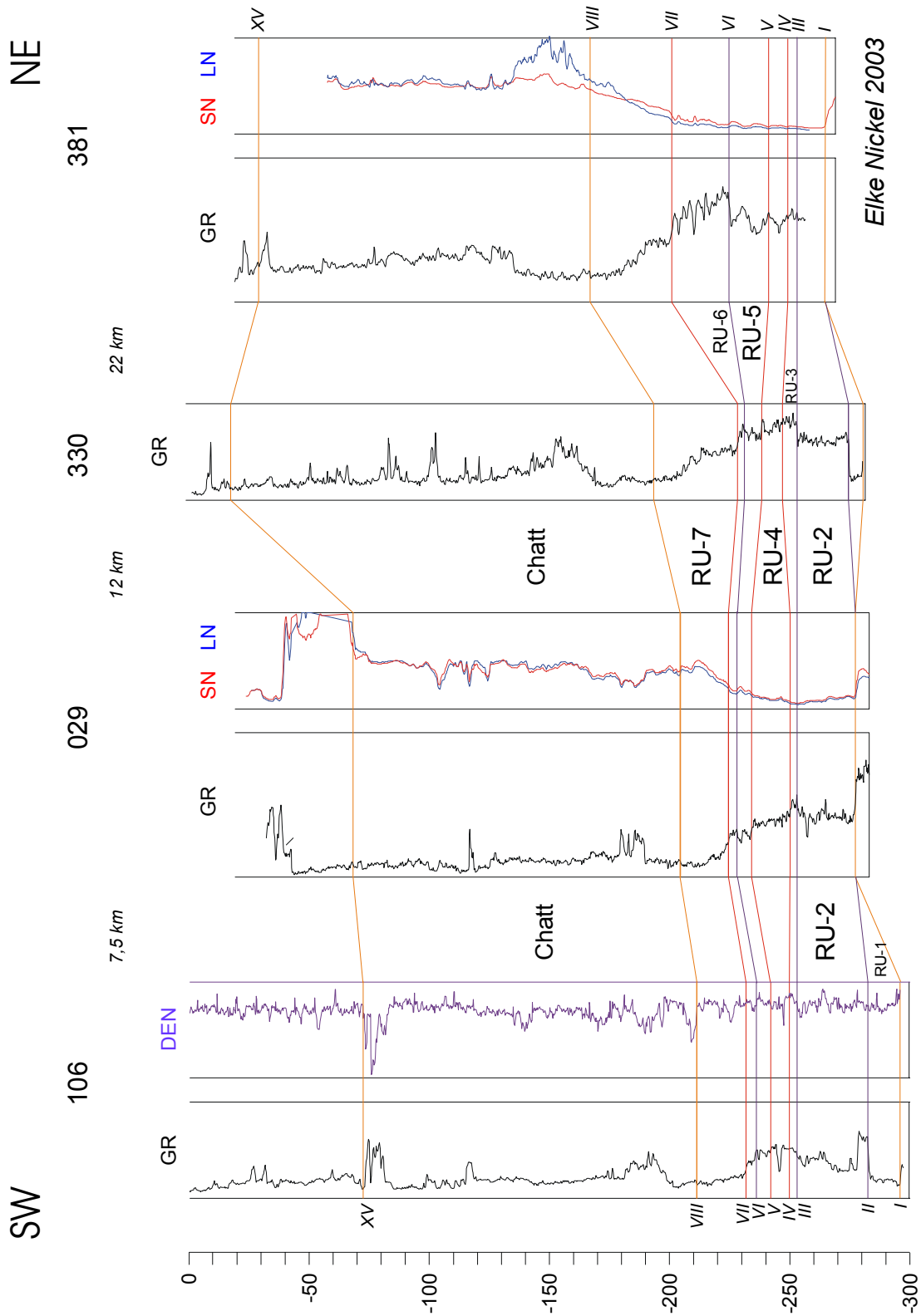
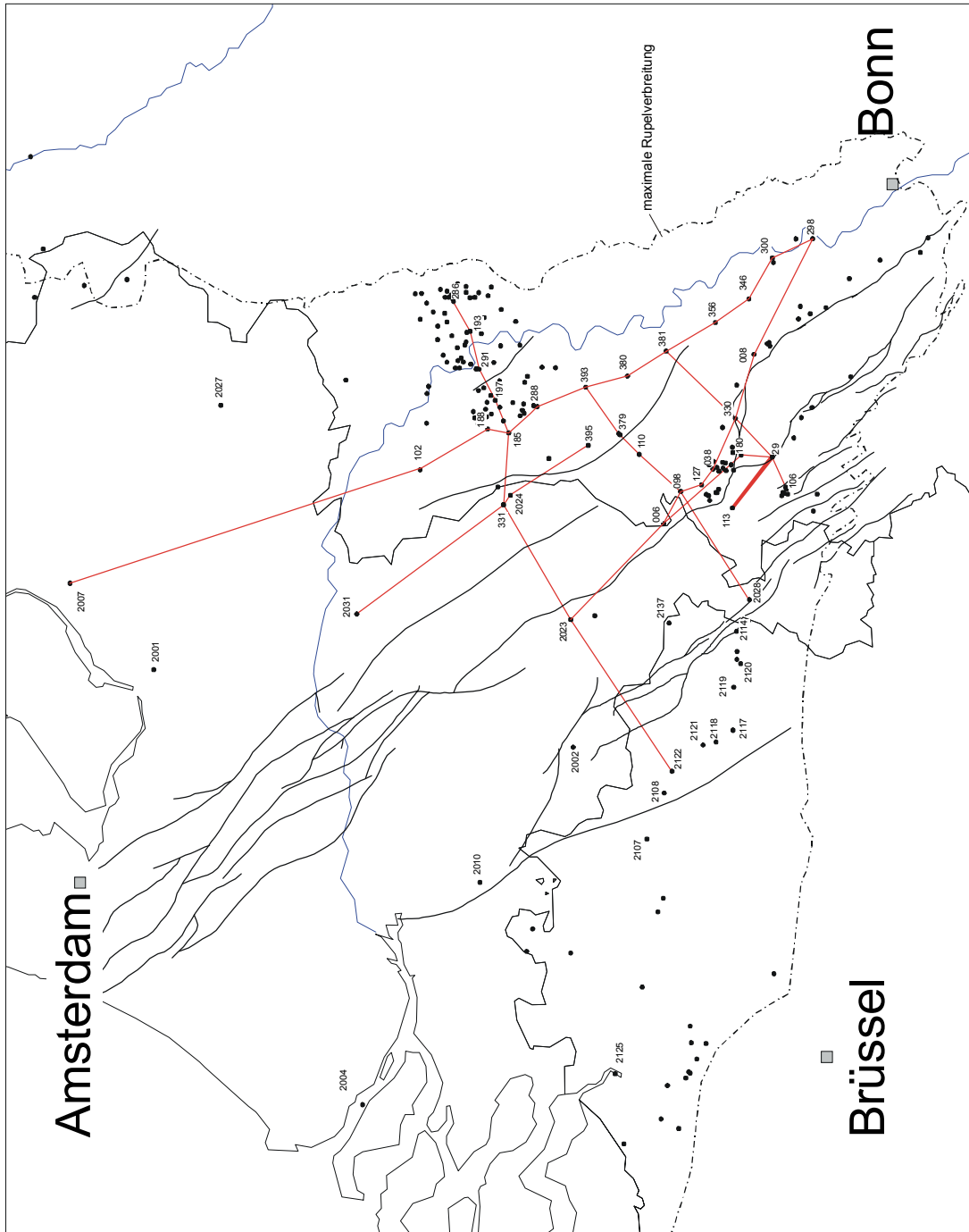


Abb. A2.7: Profil 7, Rur-Scholle (D) – Köln-Scholle (D); 106 – 029 – 330 – 381
Rupelprofil, Bezugshorizont: Grenze III an der Basis von RU-3

Abb. A2.8: Profil 8, Rur-Scholle (D) – Rur-/Erft-Scholle (D)
113 – 029
Rupelprofil, Bezugshorizont: Grenze III an der Basis von RU-3



Lageplan Profil 8, Profilinie fett

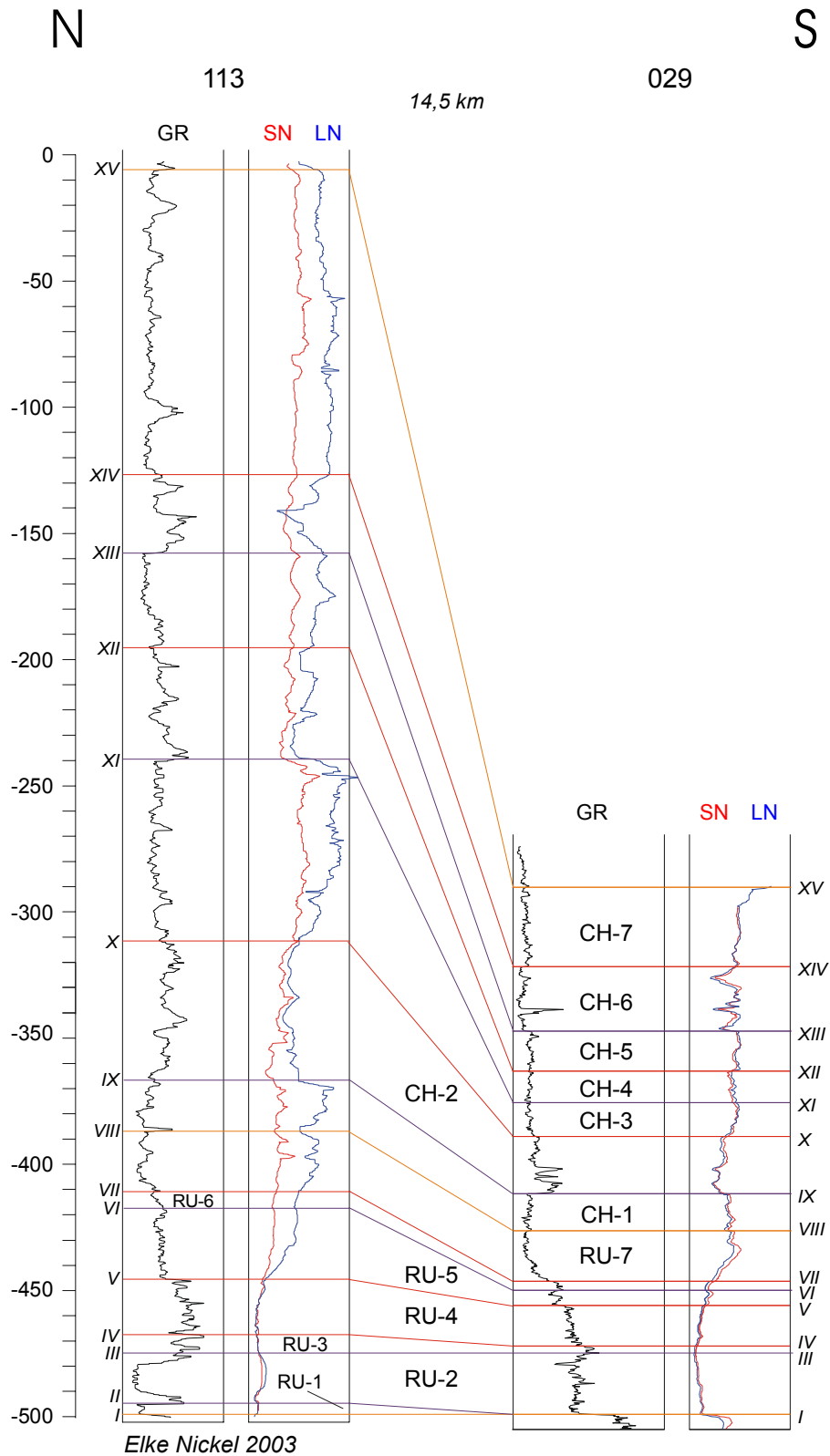


Abb. A2.8: Profil 8, Rur-Scholle (D) – Rur-/Erft-Scholle (D); 113 – 029
 Rupel- und Chattkorrelation, Bezugshorizont: Grenze III an der Basis von RU-3

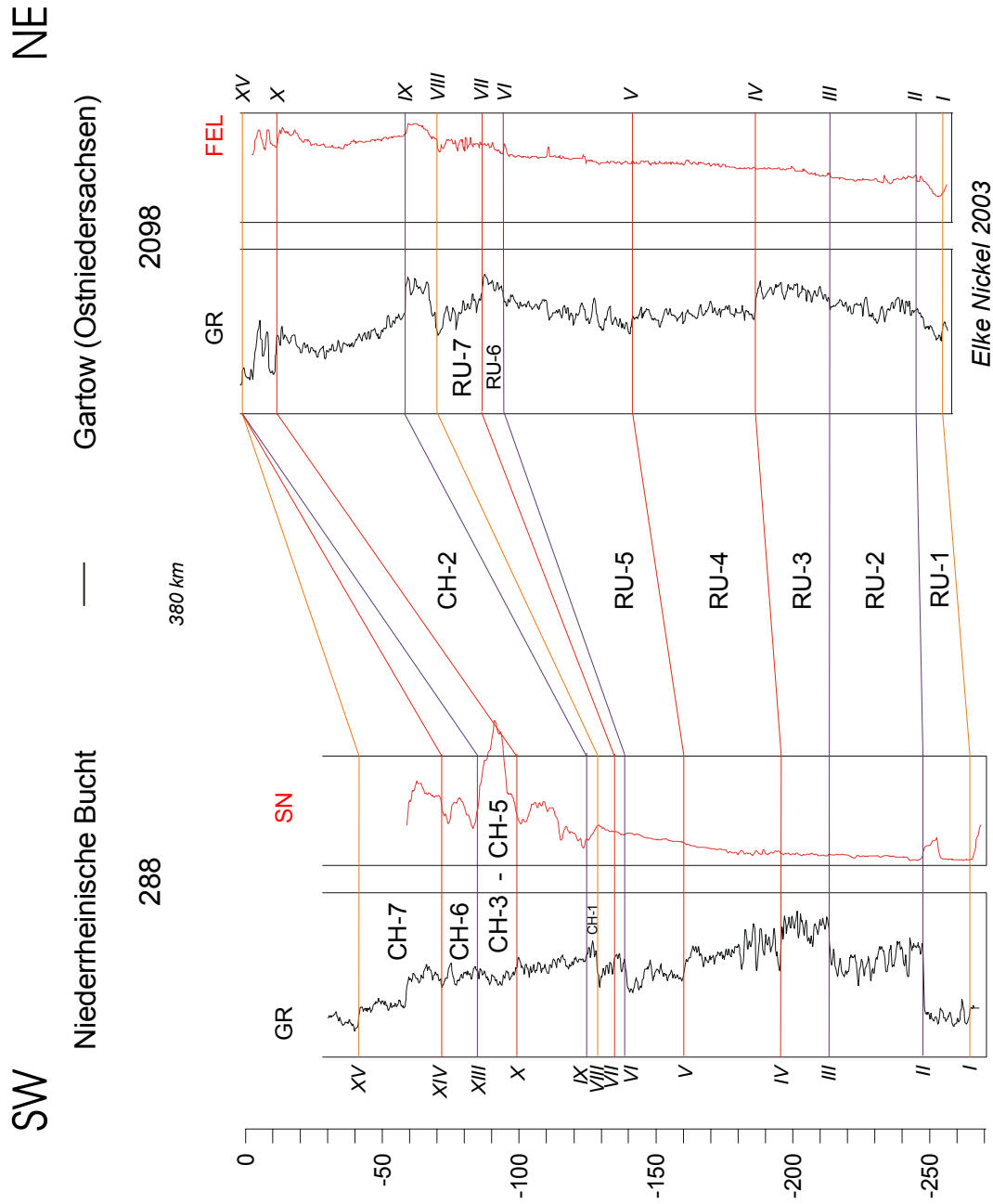
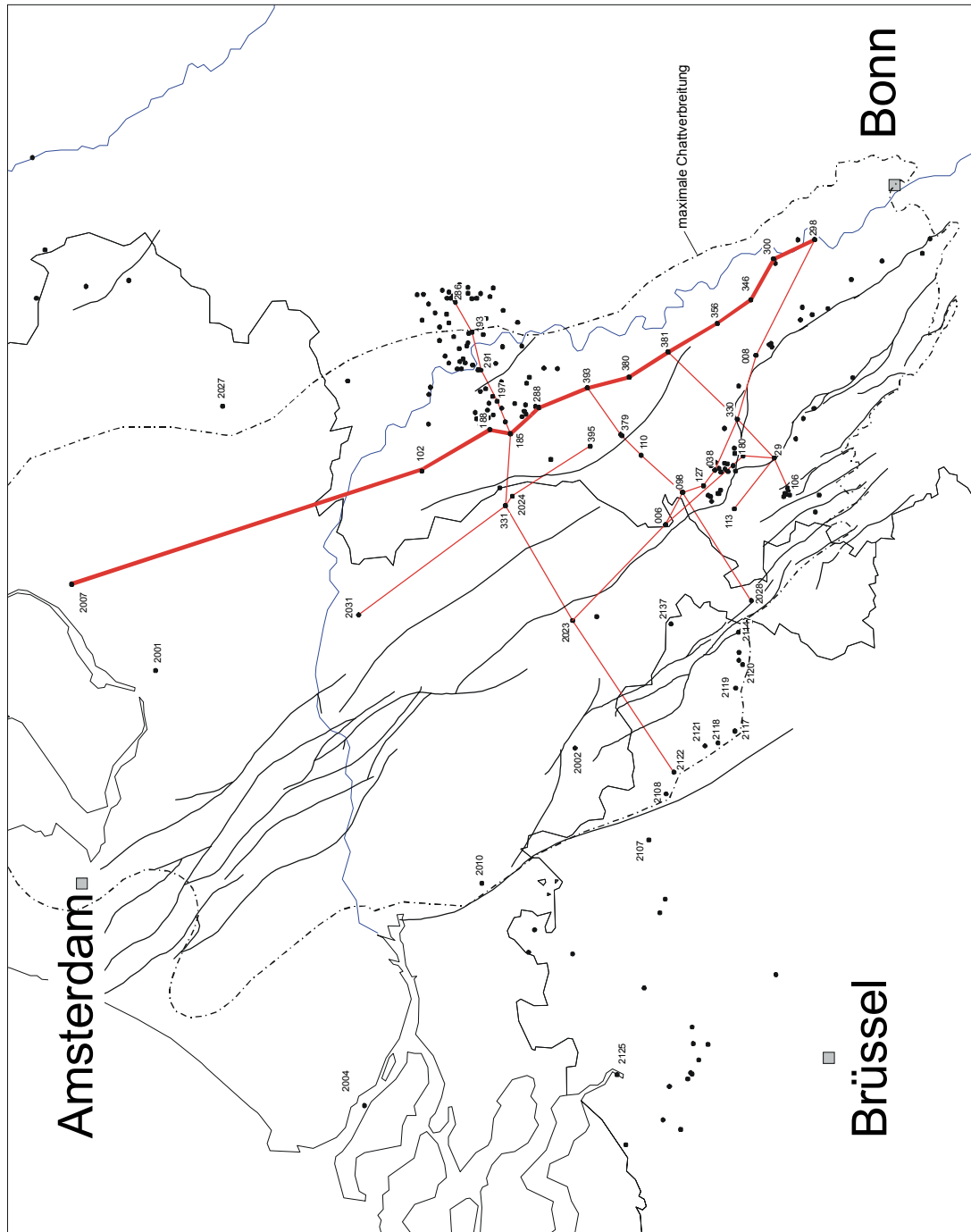


Abb. A2.9: Profil 9, Niederrheinische Bucht (D) – Gartow (D); 288 – 2098
Rupel- und Chattkorrelation, Bezugshorizont: Grenze III an der Basis von RU-3

Abb. A2.10: Profil 10, Zentralniederlande (NL) – südliche Niederrheinische Bucht (D)
 2007 – 102 – 188 – 185 – 404 – 288 – 393 – 380 – 381 – 356 – 346 – 300 – 298
 Chattprofil, Bezugshorizont: Grenze IX an der Basis von CH-2



Lageplan Profil 10, Profillinie fett

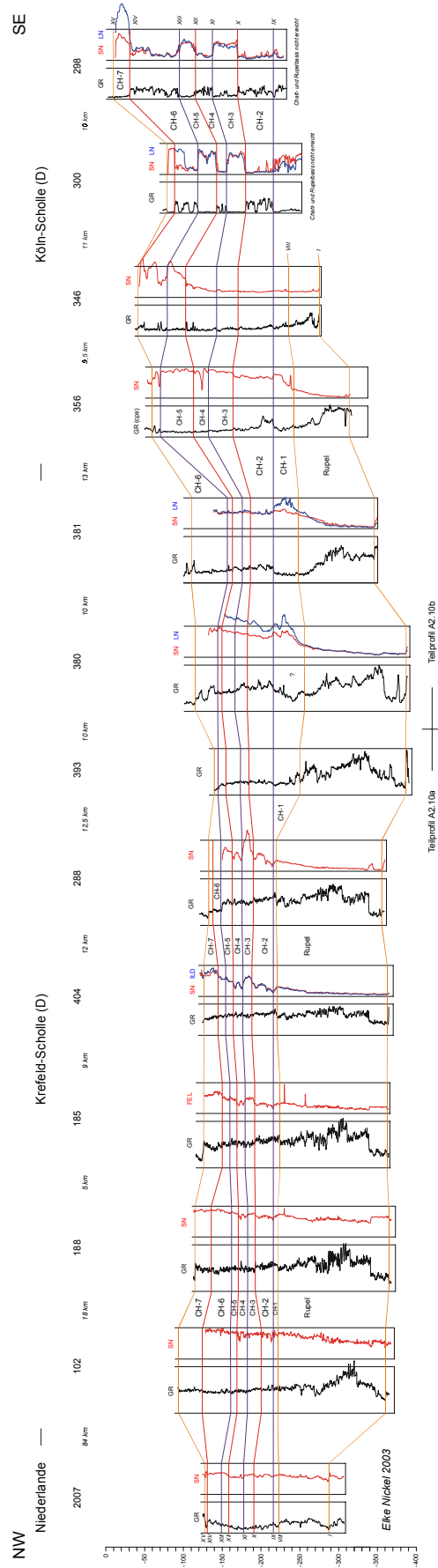


Abb. A2.10: Profil 10, Zentralniederlande (NL) – südl. Niederrheinische Bucht (D); 2007–102–188–185–404–288–393 – 380 – 381 – 356 – 346 – 300 – 298
 Chattprofil, Bezugshorizont: Grenze IX an der Basis von CH-2; Gesamtdarstellung, Teilprofile siehe Abb. A2.10a und A2.10b

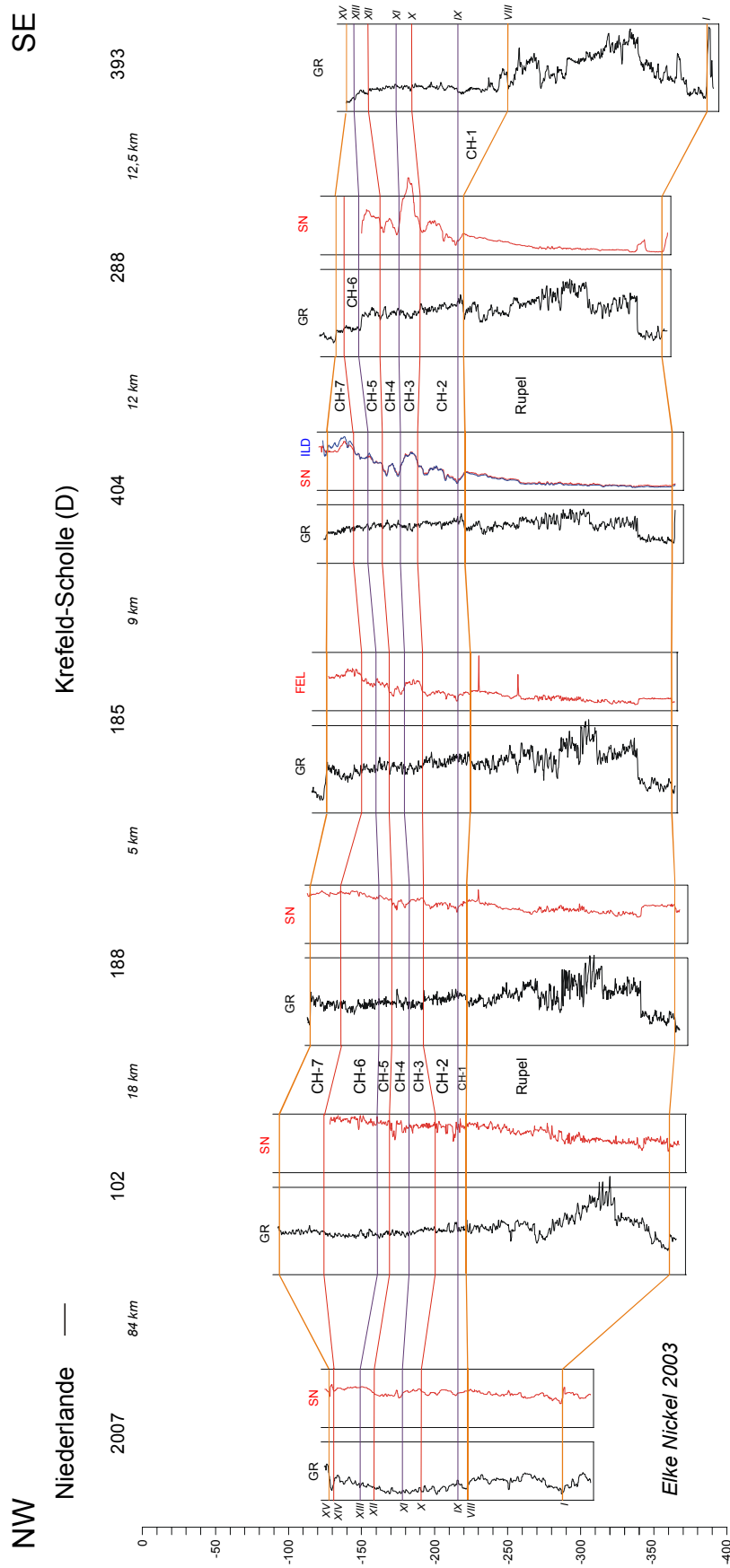


Abb. A2.10a: Profil 10, Teilprofil a; 2007 – 102 – 188 – 185 – 404 – 288 – 393 Chattprofil, Bezugshorizont: Grenze IX an der Basis von CH-2

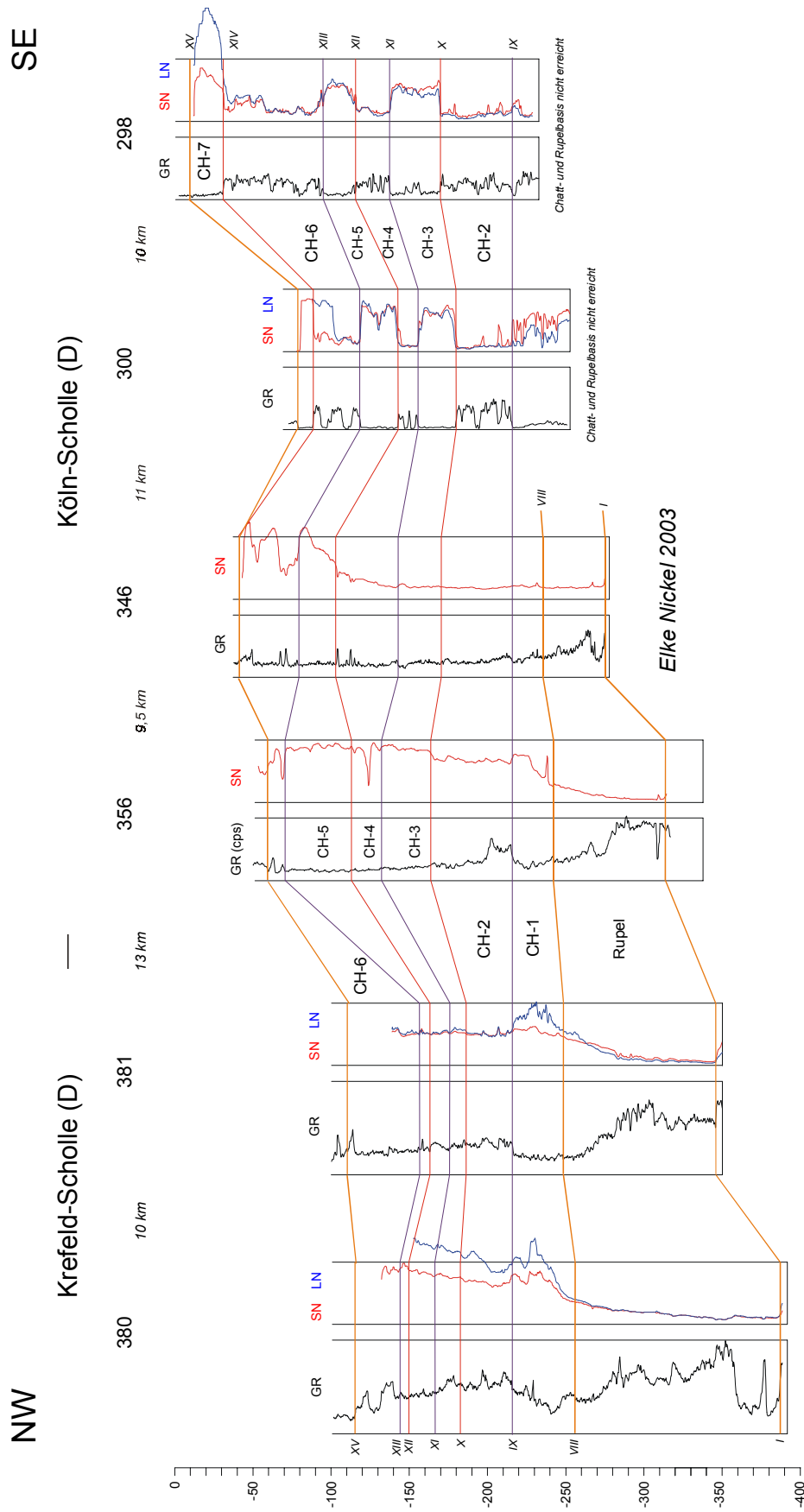


Abb. A2.10b: Profil 10, Teilprofil b; 380 – 381 – 356 – 346 – 300 – 298
 Chatprofil, Bezugshorizont: Grenze IX an der Basis von CH-2

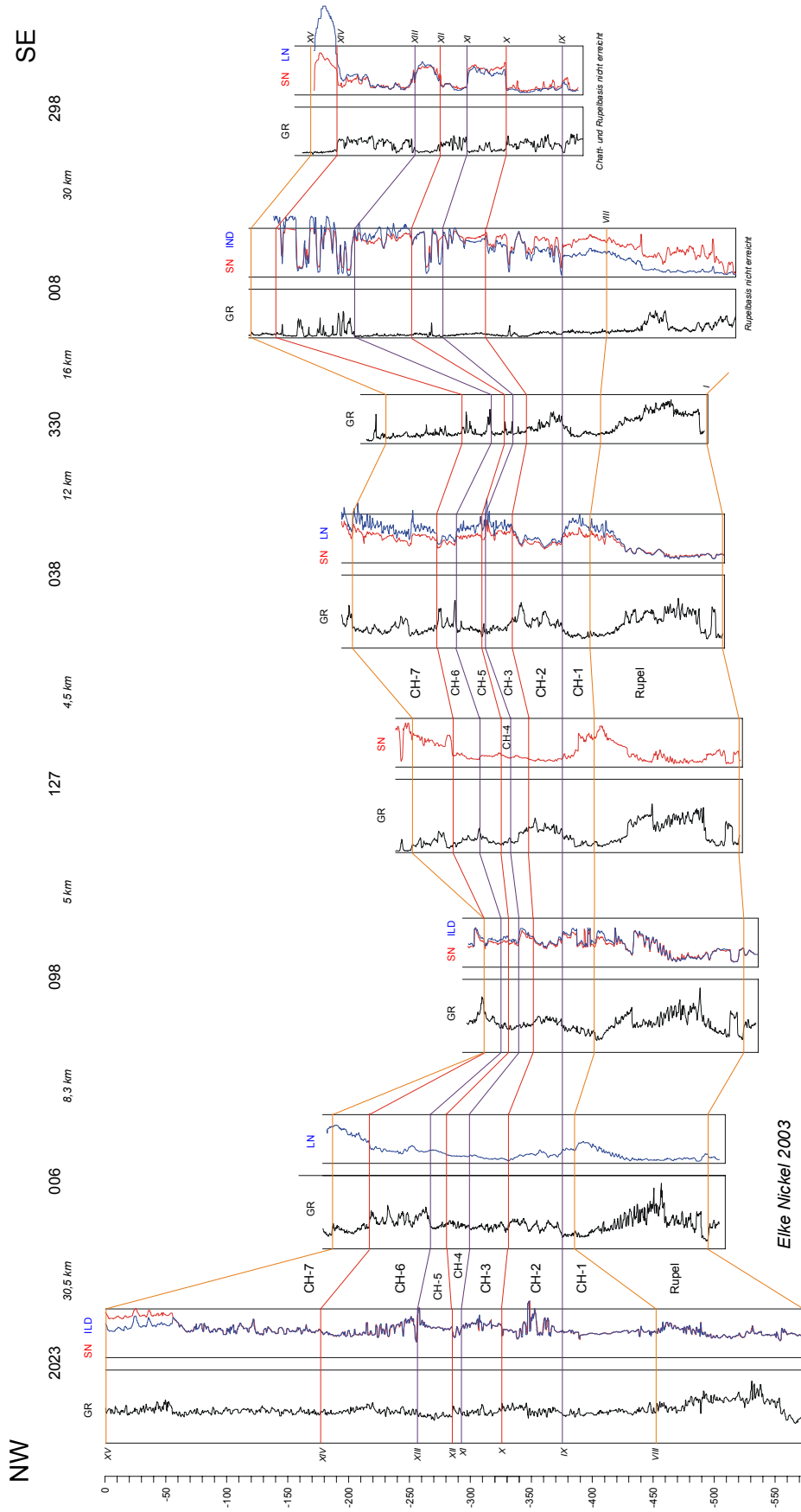


Abb. A2.11: Profil 11, Asten (NL) - südliche Niederrheinische Bucht (D); 2023 - 006 - 098 - 127 - 038 - 330 - 008 - 298
 Chatprofil, Bezugshorizont: Grenze IX an der Basis von CH-2

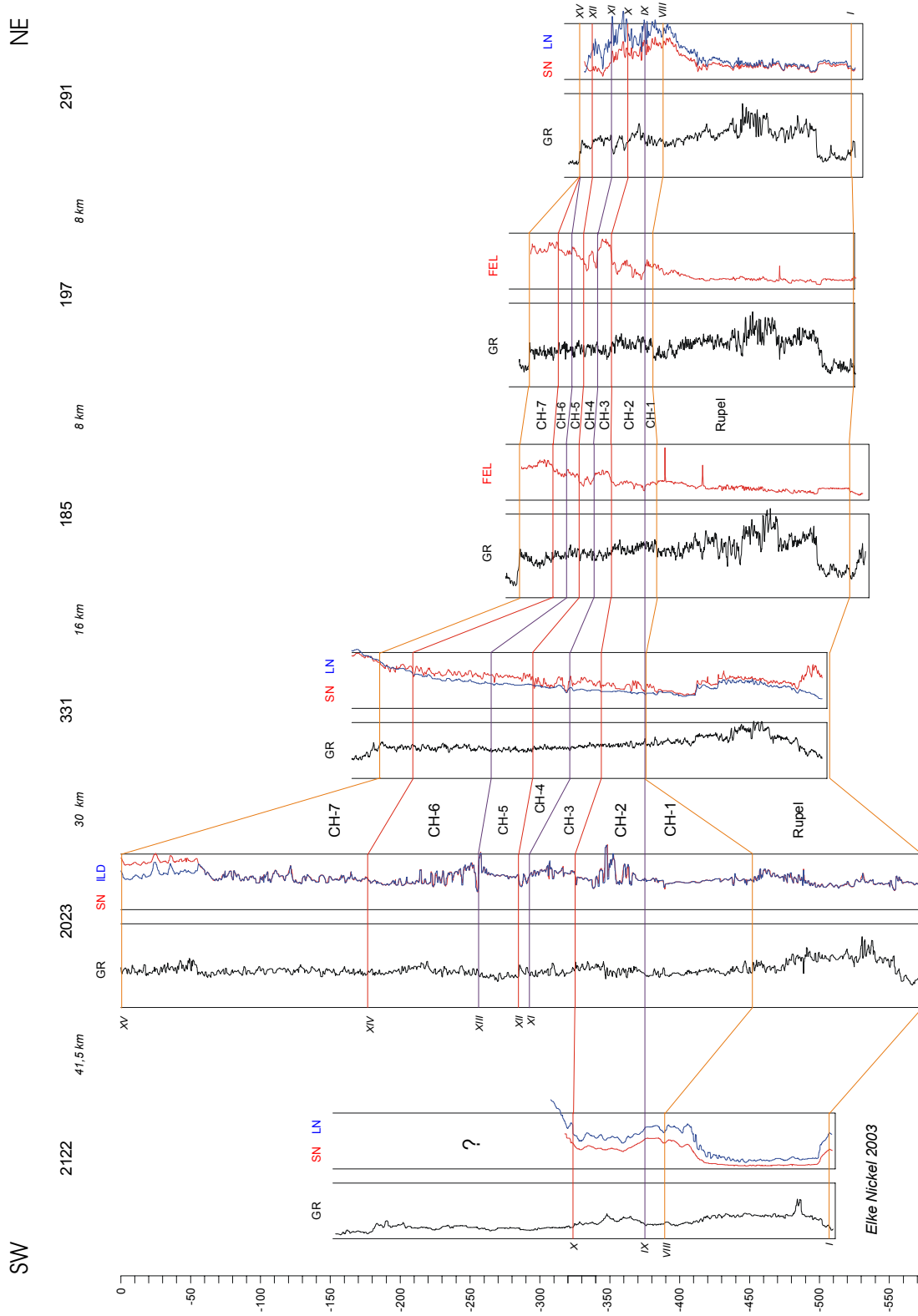
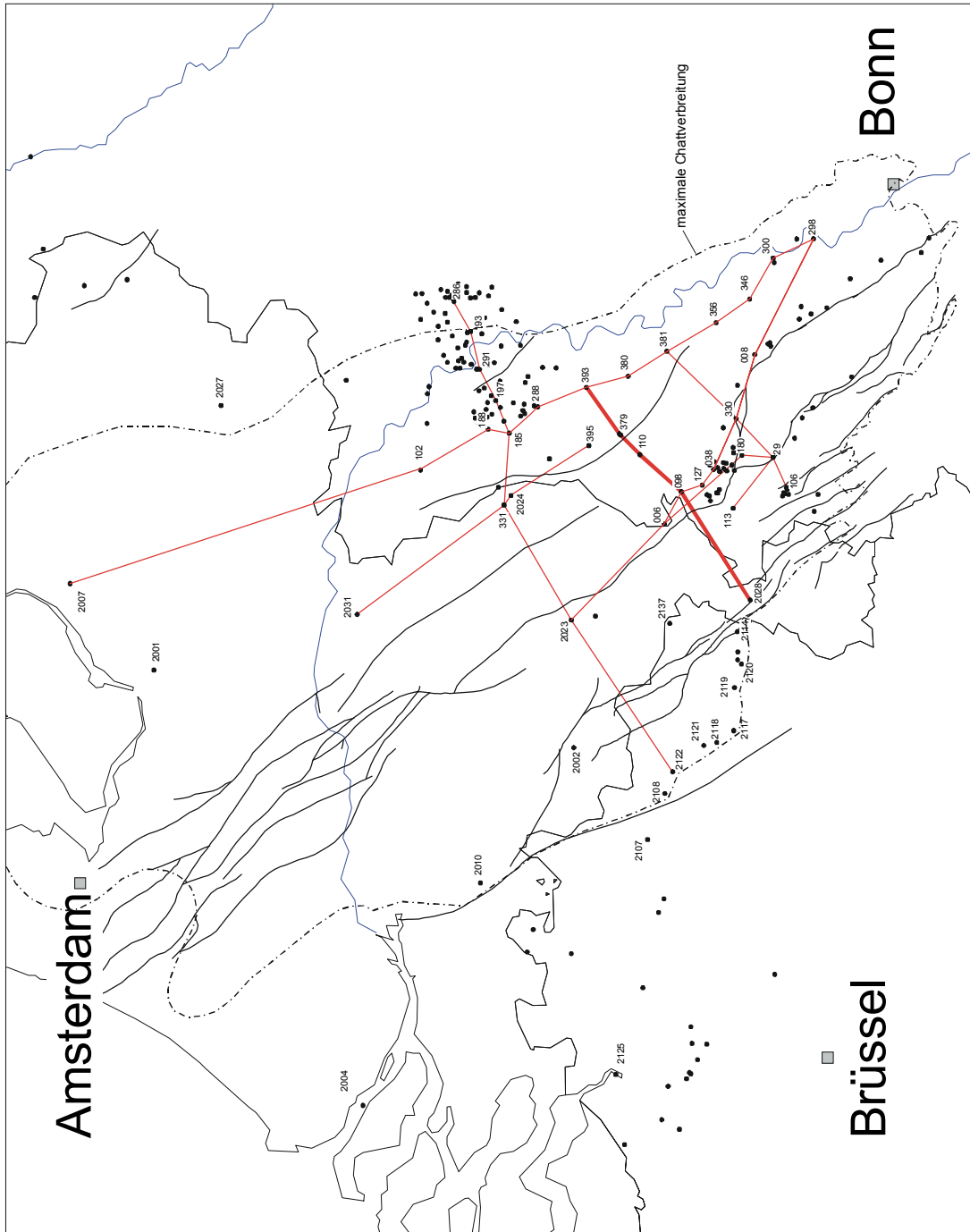


Abb. A2.12: Profil 12, Nordostbelgien (B) – nordöstliche Niederrheinische Bucht (D); 2122 – 2023 – 331 – 185 – 197 – 291
 Chattprofil, Bezugshorizont: Grenze IX an der Basis von CH-2

Abb. A2.13: Profil 13, Limburg (NL) – Krefeld (D)
2028 – 098 – 110 – 379 – 393
Chatprofil, Bezugshorizont: Grenze IX an der Basis von CH-2



Lageplan Profil 13, Profillinie fett

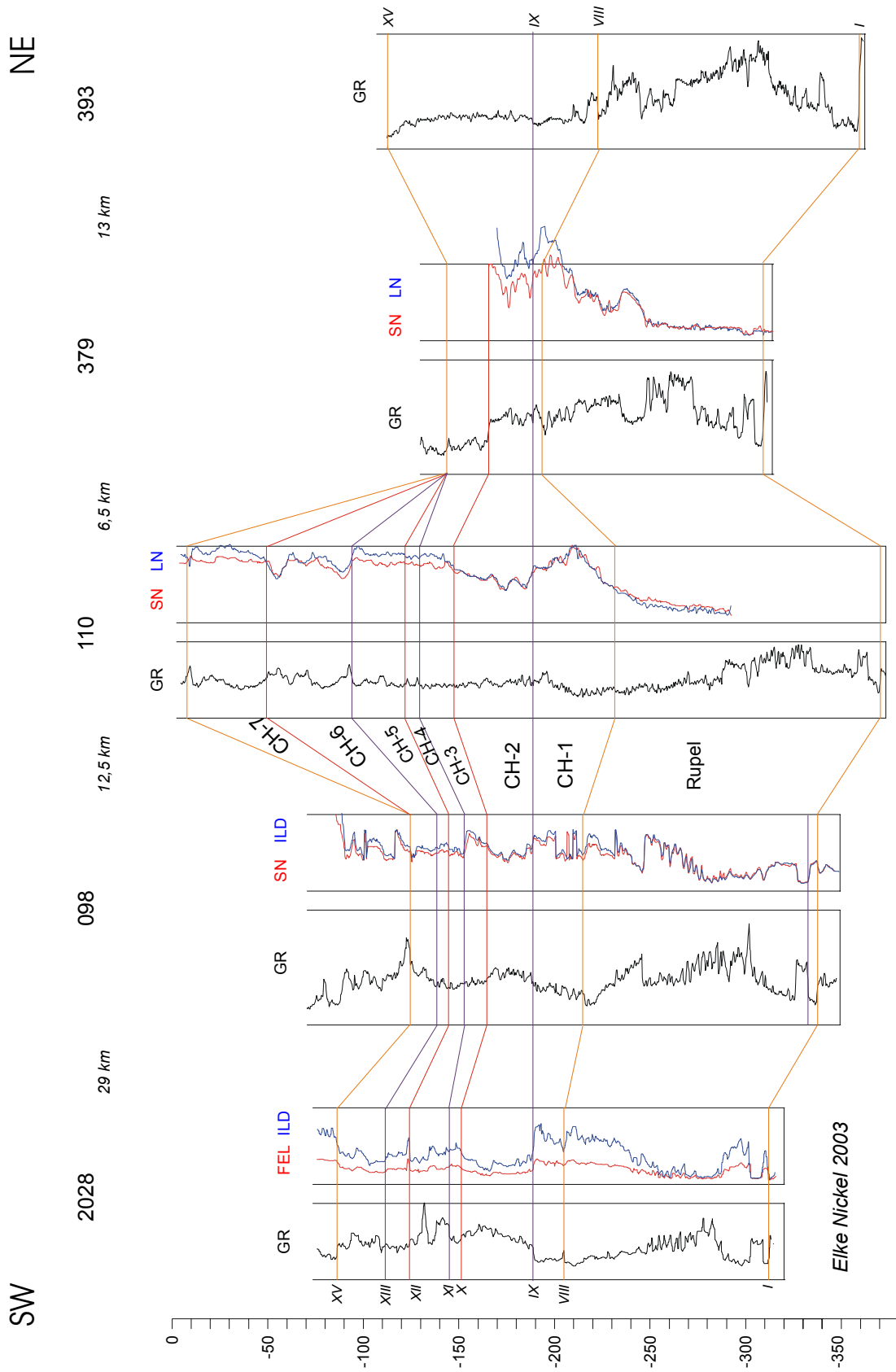
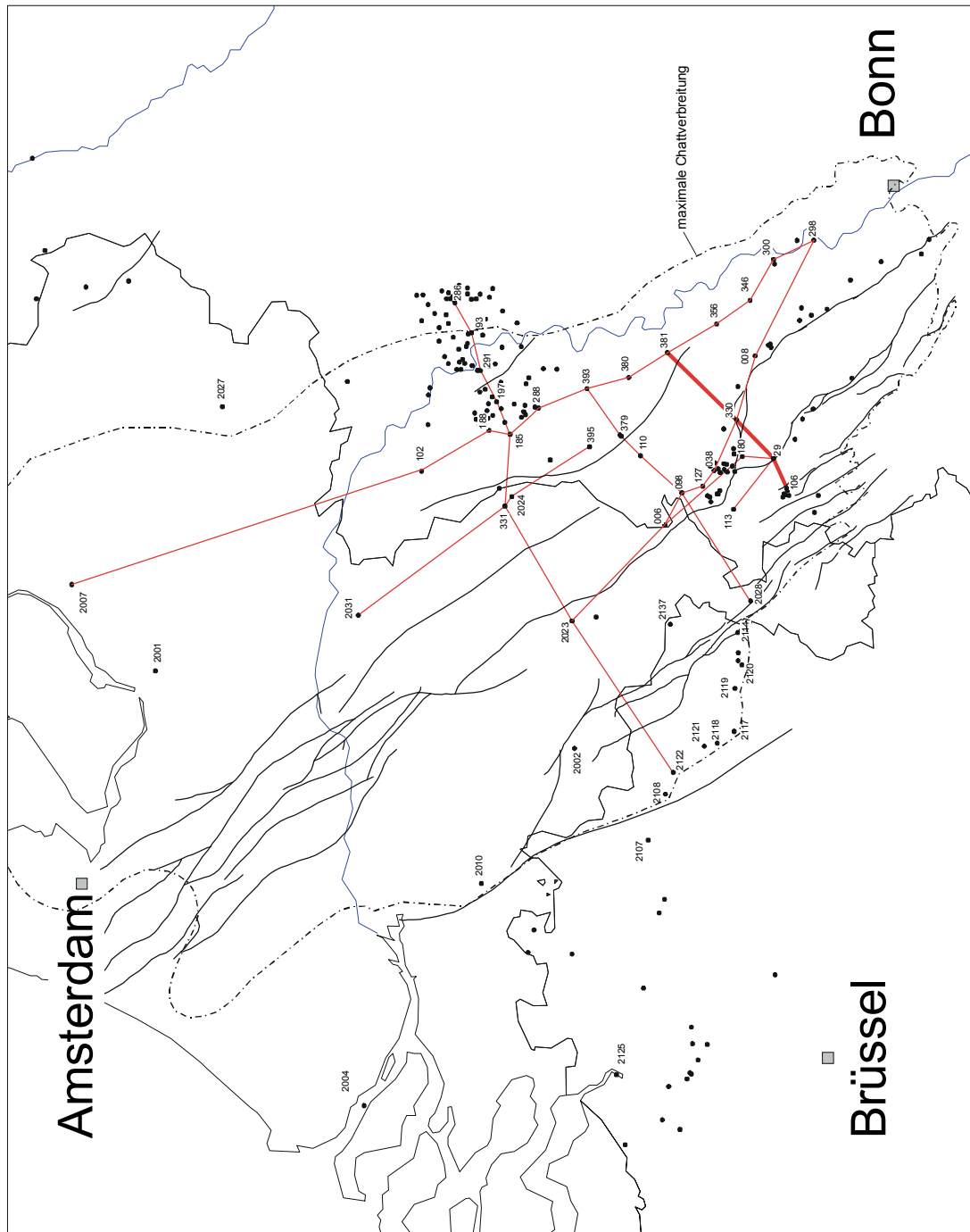


Abb. A2.13: Profil 13, Limburg (NL) – Krefeld (D); 2028 – 098 – 110 – 379 – 393
 Chattprofil, Bezugshorizont: Grenze IX an der Basis von CH-2

Abb. A2.14: Profil 14, Rur-Scholle (D) – Köln-Scholle (D)
106 – 029 – 330 – 381
Chatprofil, Bezugshorizont: Grenze IX an der Basis von CH-2



Lageplan Profil 14, Profillinie fett

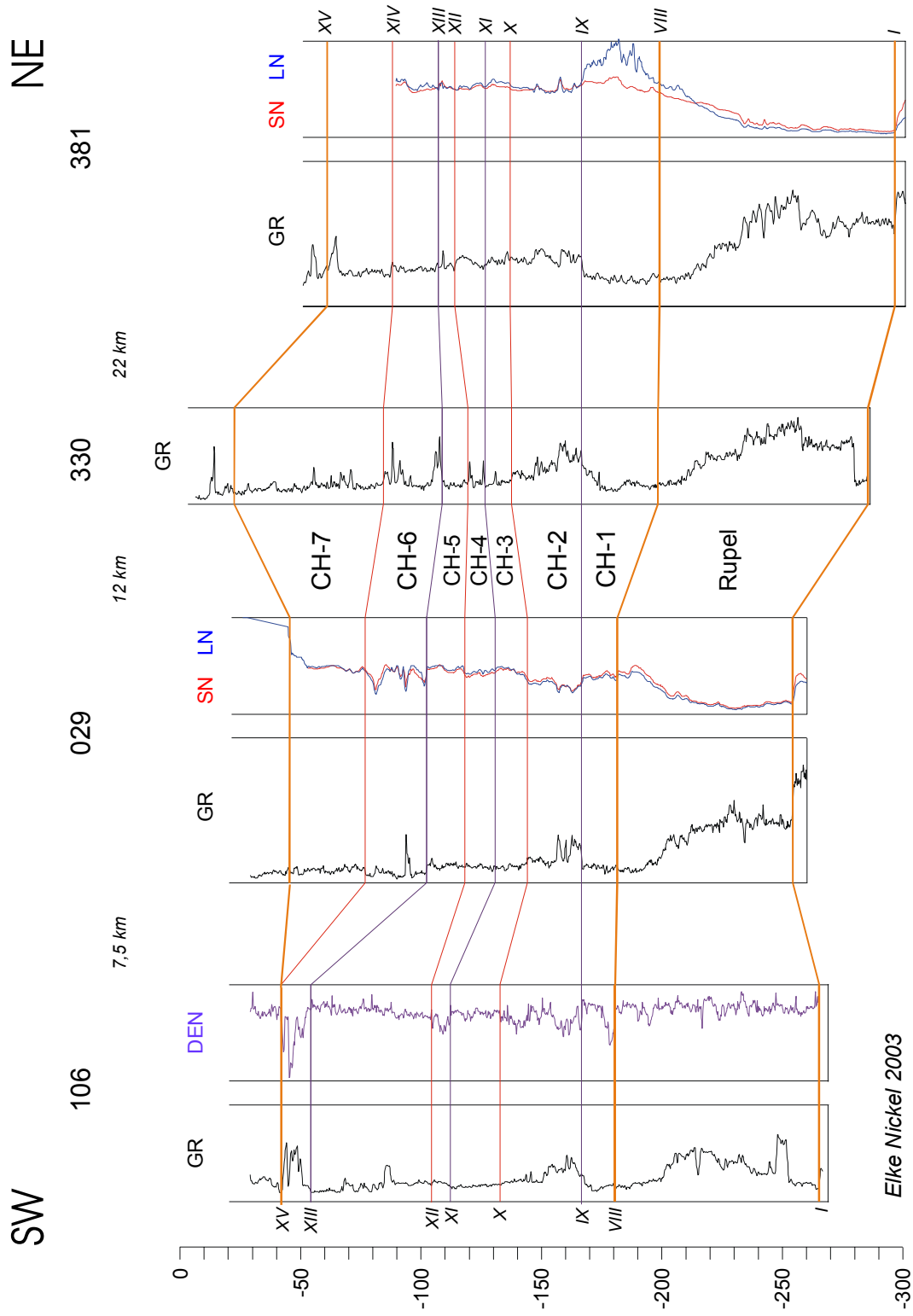
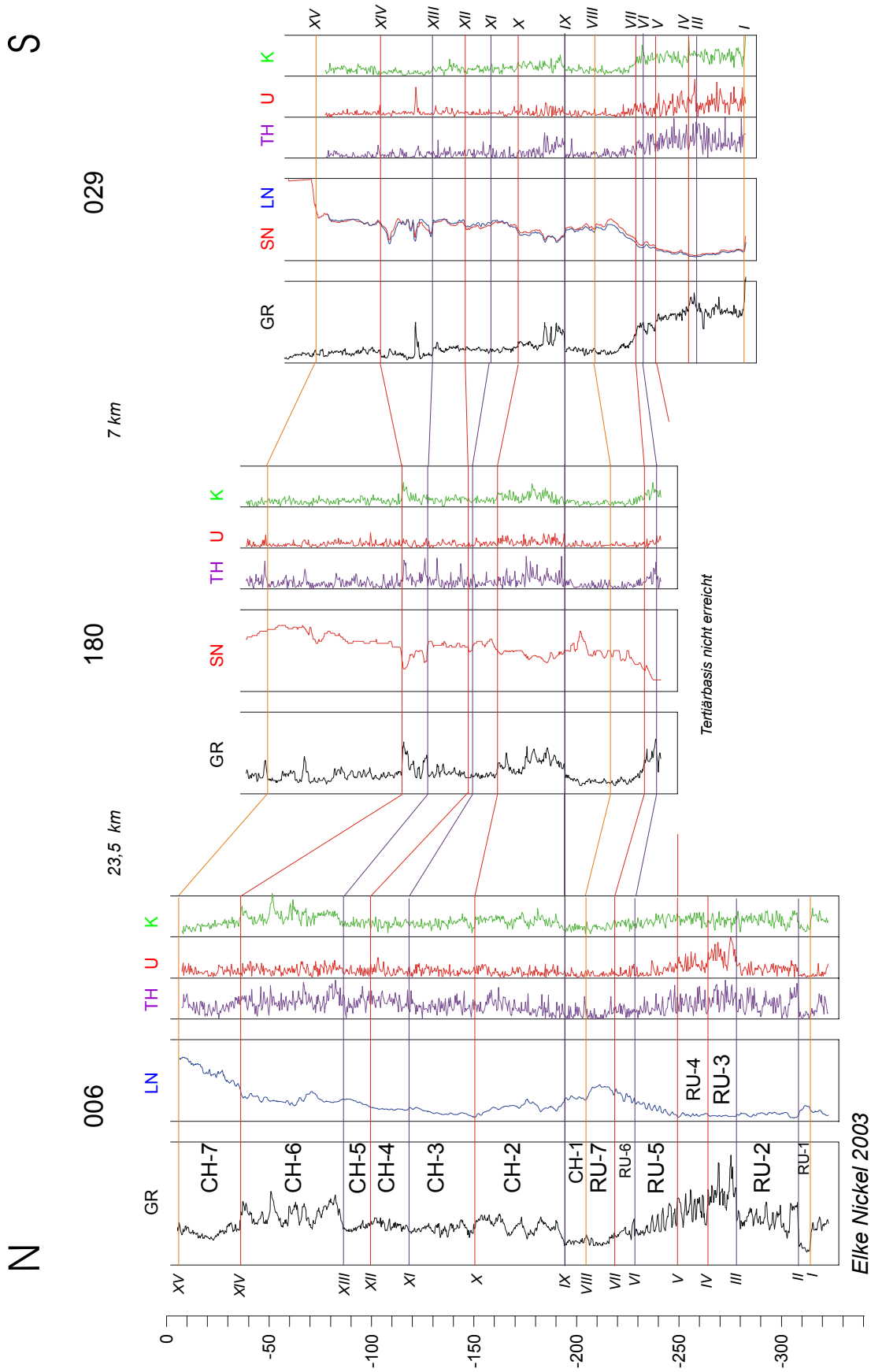


Abb. A2.14: Profil 14, Rur-Scholle (D) – Köln-Scholle (D); 106 – 029 – 330 – 381
 Chattprofil, Bezugshorizont: Grenze IX an der Basis von CH-2



Elke Nickel 2003

Abb. A2.15: Profil 15, Venlo-Scholle (D) - Rur-/Erft-Scholle (D) mit Spectralogs; 006 - 180 - 029
Rupel- und Chattikorrelation, Bezugshorizont: Grenze IX an der Basis von CH-2