

**Entwicklung eines vereinfachten Verfahrens
zur Abgrenzung hochwassergefährdeter Bereiche
kleiner Fließgewässer Nordrhein-Westfalens**

Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)

der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt von

Kyne Uhlig

aus

Köln

Bonn, April 2001

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

1. Referent: Prof. Dr. R. Dikau

2. Referent: Prof. Dr. K. Greve

Tag der Promotion:

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINFÜHRUNG	1
1.1	EINLEITUNG HOCHWASSER	1
1.1.1	HOCHWASSER UNTER PHYSISCH GEOGRAPHISCHEN GESICHTSPUNKTEN	1
1.1.2	HOCHWASSER UNTER SOZIO-ÖKONOMISCHEN GESICHTSPUNKTEN	2
1.2	PROBLEMSTELLUNG	4
1.3	ZIEL UND RAHMEN DER ARBEIT	6
1.4	VORGEHEN UND METHODIK	7
2	THEORETISCHE UND METHODISCHE GRUNDLAGEN	9
2.1	HOCHWASSERSCHUTZ	9
2.2	MIT DEM HOCHWASSERSCHUTZ BEAUFTRAGTE ÖFFENTLICHE PLANUNGSTRÄGER	11
2.2.1	RAUMPLANUNG	12
2.2.2	WASSERWIRTSCHAFT	17
2.3	STAND DER FORSCHUNG DER HOCHWASSERMODELLIERUNG	20
2.4	METHODIK DER ARBEIT	22
2.4.1	COMPUTERGESTÜTZTE GEOMORPHOMETRIE	24
2.4.2	HYDRAULISCHE MODELLIERUNG	26
2.5	WERKZEUGE	29
3	HOCHWASSERMODELLIERUNG	31
3.1	UNTERSUCHUNGSGBIETE	31
3.1.1	LUTTER	32
3.1.2	BRANDENBÄUMER BACH / GESEKER BACH	33
3.1.3	WERSE	35
3.2	DATEN UND DATENAUFBEREITUNG	36
3.2.1	DIGITALE HÖHENMODELLE	36
3.2.2	100JÄHRIGE ABFLUßWERTE	40
3.2.3	BAUWERKSPOSITIONEN	41
3.2.4	LAGE DER GEWÄSSER	42
3.2.5	EVALUIERUNGSGRUNDLAGEN	42
3.3	METHODENENTWICKLUNG AM BEISPIEL DES UNTERSUCHUNGSGBIETES DER LUTTER	44
3.3.1	HYDRAULISCHE MODELLIERUNG	45
3.3.1.1	Horizontale Berechnungsschrittweite	46
3.3.1.2	Vertikale Berechnungsschrittweite	49
3.3.1.3	Hydraulischer Radius	49
3.3.1.4	Querprofilabstand	50
3.3.1.5	Rauhigkeitsbeiwert	52

3.3.1.6	Gerinnekasten	55
3.3.1.6.1	Gerinnekasten aus empirischen Vermessungsdaten	55
3.3.1.6.2	Gerinnekasten auf Basis einer Klassifikation des Landesumweltamtes NRW	57
3.3.1.7	Rückstaubereiche	63
3.3.1.7.1	Rückstau durch Auffüllen von Wasserspiegelsenken	63
3.3.1.7.2	Rückstau aufgrund der Abflußbehinderung durch Querbauwerke	63
3.3.1.7.3	Rückstau am Vorfluter	68
3.3.2	COMPUTERGESTÜTZTE GEOMORPHOMETRISCHE ANALYSE	70
3.3.2.1	Ableitung hydraulischer Eingangsparameter	70
3.3.2.1.1	Gerinne	70
3.3.2.1.2	Sohlgefälle	72
3.3.2.1.3	Fließrichtung bzw. Querprofilrichtung	75
3.3.2.2	Diskretisierung der Punkt- zu Flächendaten	76
3.3.2.2.1	Flächenbildung-Morphometrie	77
3.3.2.2.2	Flächenbildung-Oberflächeninterpolation	78
3.3.2.2.3	Bewertung der Flächenbildungsverfahren	79
3.3.2.2.4	Darstellung der hochwassergefährdeten Bereiche im Gebietsentwicklungsplan	82
3.4	SOFTWAREENTWICKLUNG ‘MOHB’	83
3.5	FEHLER UND UNSICHERHEITEN	87
3.5.1	FEHLER UND UNSICHERHEITEN DURCH EINGANGSDATEN	87
3.5.1.1	DGM 5	87
3.5.1.2	Abflußschätzung	89
3.5.2	FEHLER UND UNSICHERHEITEN DURCH PARAMETER UND MODELLANNAHMEN	91
3.5.3	ZUSAMMENFASSUNG DER FEHLER UND UNSICHERHEITEN	92
3.6	ERGEBNISSE DER DREI UNTERSUCHUNGSGEBIETE	93
3.6.1	LÄNGSPROFILBETRACHTUNGEN	93
3.6.1.1	Lutter	97
3.6.1.2	Brandenbäumer / Geseker Bach	99
3.6.1.3	Werse	101
3.6.2	FLÄCHENBETRACHTUNG	103
3.6.2.1	Lutter	104
3.6.2.2	Brandenbäumer / Geseker Bach	105
3.6.2.3	Werse	106
3.7	BEWERTUNG	108
4	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	110
5	LITERATUR	112
6	ANHANG	121

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Räumliche Abgrenzung verschiedener hochwasserrelevanter Flächen anhand eines Auenquerschnittes (verändert nach: UMWELTBUNDESAMT 1998: 246).....	1
Abbildung 2: Rechtliches Beziehungsgefüge innerhalb der Raumordnung bzw. zwischen Raumordnung und wasserwirtschaftlicher Fachplanung (verändert nach: JACOBITZ 1994: 2).....	12
Abbildung 3: Flußdiagramm der Verfahrensentwicklung (vereinfachte Darstellung).....	23
Abbildung 4: Ableitung verschieden komplexer Parameter und Objekte vom digitalen Höhenmodell (verändert nach: Dikau und Friedrich 2000: 59).	25
Abbildung 5: Geometrische Größen der Gerinnehydraulik, Abfluß und Fließformel nach Manning-Strickler (QUELLE: DIKAU et al. 2000: 12).....	27
Abbildung 6: Ermittlung von Fließquerschnitt und benetztem Umfang innerhalb der Gerinnegeometrie (QUELLE: DIKAU et al. 2000: 13).....	28
Abbildung 7: Höhenkorrektur des digitalen Höhenmodells innerhalb der Profilgeometrie in sehr flachen Bereichen (QUELLE: DIKAU et al. 2000: 13).	28
Abbildung 8: Iterationen der hydraulischen Berechnungen (QUELLE: DIKAU et al. 2000: 14).	29
Abbildung 9: Lage der Untersuchungsgebiete innerhalb NRW (Verwaltungseinheit / naturräumliche Gliederung). Die roten Buchstaben stehen für die Lage der Untersuchungsgebiete: L = Lutter, B = Brandenbäumer / Geseker Bach und W = Werse (Naturräumliche Gliederung nach: SCHÜTTLER 1968 a: 12).	31
Abbildung 10: Mittlere Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse der Untersuchungsgebiete. Die roten Buchstaben stehen für die Lage der Untersuchungsgebiete: L = Lutter, B = Brandenbäumer / Geseker Bach und W = Werse (Temperatur aus dem Zeitraum 1931 – 1960 und Niederschlag aus dem Zeitraum 1951 – 1980, Quelle: MINISTER FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN 1989: Karte 2 und Karte 22).	32
Abbildung 11: Photographie Lutter - Stationierung 1,9 km, weitere Photographien: Abbildung 19 ff).	33
Abbildung 12: Photographie Brandenbäumer / Geseker Bach - Stationierung 4,2 km.....	34
Abbildung 13: a) Schräglichtdarstellung des DGM 5 mit dem Ausschnitt Bielefeld. Die heterogenen Ursprungsdaten werden sichtbar: Links: Laserscanning / Rechts: Generierung des digitalen Höhenmodells aus photogrammetrisch erstellten Höhenlinien.b) Ausschnittvergrößerung des Übergangsbereiches der verschiedenen Modelle: Der Höhenversatz wird sichtbar.....	39
Abbildung 14: Einzelschritte der Verfahrensentwicklung bzw. Parameterkombinationen und Variantenberechnungen zur empirischen Optimierung des vereinfachten Verfahrens. Rot markiert sind die letztendlich verwendeten Parameter.....	44
Abbildung 15: Lage der Abschnitte freien Fließens und der Bauwerkspositionen der Referenzdaten an der Lutter. Die unstetige Nummerierung der Bauwerke entstammt den Referenzdaten.	46

- Abbildung 16: Treppenhafte Ausprägung der Querprofilgeometrie der aus dem digitalen Höhenmodell abgeleiteten Profillinien bei Variation der Horizontalschrittweite (Referenzquerprofil 16, Stationierung 1,586 km, orographisch linkes Ufer der Lutter). 47
- Abbildung 17: Variationen des Rauigkeitsbeiwertes an der Lutter, Längsprofilardarstellung. Die Unterbrechungen der berechneten Wasserspiegellinien erklären sich durch Anpassungen an die Stationierung der Referenz, um einen Vergleich zu ermöglichen. Folgende Berechnungsparameter wurden verwendet: GerinneDGM5linie, Gefälle und Fließrichtung aus dem DGM 5 abgeleitet, Abfluß aus den Eingangsdaten (6HQ100), Horizontalschrittweite 5 m, Vertikalschrittweite 0,01 m. 53
- Abbildung 18 a: Ableitung einer durchschnittlichen Gerinnekastengröße an der Lutter auf Basis der vermessenen Referenzquerprofile..... 56
- Abbildung 18 b: Variationen des Gerinnekastens an der Lutter, Längsprofilardarstellung. Die Unterbrechungen der berechneten Wasserspiegellinien erklären sich durch Anpassungen an die Stationierung der Referenz, um einen Vergleich zu ermöglichen. Die Wasserspiegellinie der Berechnung ohne Gerinnekasten liegt fast vollständig hinter der Gerinnekasten_1 Variante. Folgende Berechnungsparameter wurden verwendet: GerinneDGM5linie, Gefälle und Fließrichtung aus dem DGM 5 abgeleitet, Abfluß aus den Eingangsdaten (6HQ100), K_{str} 30, Horizontalschrittweite 5 m, Vertikalschrittweite 0,01 m. 62
- Abbildung 19: Die Nummerierung der Referenzquerprofile entspricht keiner stetigen Abfolge. Das betrachtete Bauwerk liegt zwischen den rötlichen und grünlichen Profillinien. Zu sehen sind zwei Referenzquerprofile unterhalb (orangene und rote Profillinie) und drei oberhalb (hell- bis dunkelgrüne Profillinie) des Wehres 901. Das Referenzquerprofil 704 hat einen nahezu identischen Verlauf wie das Profil 4 und wird deshalb verdeckt. Darüber hinaus sind die entsprechenden Referenzwasserhöhen zu sehen. Die gestrichelte blaue Linie steht in diesem Fall für die gleichbleibende Wasserstandshöhe ober- und unterhalb des betrachteten Bauwerkes. Die durchgehende blaue Linie steht für die oberhalb befindliche Wasserstandserhöhung am Brückenbauwerk 902, welches zwischen den Referenzquerprofilen 702 und 704 stationiert ist. Photographie: unterhalb des Wehres 901. 64
- Abbildung 20: Referenzquerprofile und Wasserstände ober- und unterhalb des Wehres 914 (detaillierte Erläuterung siehe Abbildung 19). In diesem Fall sind die rote und die orangene Querprofillinie identisch, deshalb wird die rote Linie verdeckt. Die kurz gestrichelte Linie steht für den Wasserstand unterhalb des betrachteten Bauwerkes, die lang gestrichelte Linie für den Wasserstand oberhalb. Photographie: oberhalb des Wehres 914. 65
- Abbildung 21: Referenzquerprofile und Wasserstände ober- und unterhalb des Kastens 905 (detaillierte Erläuterung siehe Abbildung 19). Die orangene Profillinie stellt das abflußbehindernde Querprofil 709 unterhalb des betrachteten Bauwerkes dar. Die durchgehende blaue Wasserstandslinie steht für den gleichbleibenden Wasserstand ober- und unterhalb des betrachteten Bauwerkes. Die gestrichelte Linie steht für den tieferen Wasserstand unterhalb des abflußbehindernden Querprofiles 709. Photographie: unterhalb des Kastens 905. 65

Abbildung 22: Referenzquerprofile und Wasserstände ober- und unterhalb des Kastens 906 (detaillierte Erläuterung siehe Abbildung 19). Die durchgehende blaue Wasserstandslinie steht für den gleichbleibenden Wasserstand ober- und unterhalb des Kastens 906. Photographie: unterhalb des Kastens 906.	66
Abbildung 23: Referenzquerprofile und Wasserstände ober- und unterhalb des Trapez 909 (detaillierte Erläuterung siehe Abbildung 19). Die durchgehende Wasserstandslinie steht für die Überschwemmungshöhe oberhalb des Bauwerkes bzw. die gestrichelte für unterhalb. Photographie: oberhalb des Trapez 909.	67
Abbildung 24: Referenzquerprofile und Wasserstände ober- und unterhalb des Trapez 912 (detaillierte Erläuterung siehe Abbildung 19). Die gestrichelte Wasserstandslinie steht für die Überschwemmungshöhe unterhalb des Bauwerkes bzw. die durchgehende Linie für oberhalb. Photographie: oberhalb des Trapez 912.	67
Abbildung 25: Variationen des Rückstaus an der Lutter, Längsprofilardarstellung. Die Unterbrechungen der berechneten Wasserspiegellinien erklären sich durch Anpassungen an die Stationierung der Referenz, um einen Vergleich zu ermöglichen. Folgende Berechnungsparameter wurden verwendet: GerinneDGM5linie, Gefälle und	69
Abbildung 26: Variationen der Gerinne an der Lutter, Längsprofilardarstellung. Die Unterbrechungen der GerinneDGM5linie erklären sich durch Anpassungen an die Stationierung der Referenz, um einen Vergleich zu ermöglichen. Folgende Berechnungsparameter wurden verwendet: Gefälle und Fließrichtung aus dem DGM 5 abgeleitet, A.	71
Abbildung 27: Ableitung des Parameters Sohlgefälle der GerinneDGM5linie auf Basis des digitalen Höhenmodells. Schritt I: Variation der Entfernung der für die Berechnung herangezogenen Flußpunkte.	73
Abbildung 28: Ableitung des Parameters Sohlgefälle auf Basis des digitalen Höhenmodells. Schritt II: Variation der Mittlungen. Die berechneten Sohlgefälle werden einer weiteren Glättung über unterschiedliche Entfernungen unterzogen.	74
Abbildung 29: Ableitung der Fließrichtung bzw. Querprofilrichtung aus dem DGM 5. Die grauen Kästchen stellen die GerinneDGM5linie bzw. die Aneinanderreihung der Tiefenlinienpixel dar. Jeder Mittelpunkt einer Tiefenlinienrasterzelle ist gleichzeitig ein Flußpunkt. Dieser bekommt durch die Richtungsberechnung des jeweils 70 bis 98 m ober- und unterhalb liegenden Flußpunktes eine Fließrichtung zugewiesen. Die entsprechende Querprofilrichtung liegt im rechten Winkel (90°) dazu.	75
Abbildung 30: Unterschiede in der Lage und Anzahl der Punktdaten, die als Ergebnis der hydraulischen Berechnung der Gerinnelinien zur anschließenden Flächenbildung genutzt werden.	76
Abbildung 31: a) Größen- und Formunterschiede der hochwassergefährdeten Teilbereiche der GerinneDGM5- und der GerinneATKISlinie am Brandenbäumer / Geseker Baches aufgrund unterschiedlicher Gerinneverläufe. b) Querprofil der entsprechenden Topographie des DGM 5.	80
Abbildung 32: a) Subeinzugsgebiete der Tiefenlinienrasterzellen abzüglich der oberhalb liegenden Subeinzugsgebiete am Brandenbäumer / Geseker Bach. b) Ausschnitt:	

Größenunterschied der hochwassergefährdeten Teilbereiche der Gerinnelinien aufgrund der Ableitung der Tiefenlinien-Subeinzugsgebiete auf Basis des DGM 5.....	81
Abbildung 33: Funktionale Einheiten der Anwendungssoftware MOHB (Modellierung hochwassergefährdeter Bereiche).....	85
Abbildung 34: Ablaufschema der Anwendungssoftware MOHB (Modellierung hochwassergefährdeter Bereiche).....	86
Abbildung 35: a) Vergleich der Geländehöhen von Querprofil 42 (Lutter, Stationierung 4,2 km, Pegel Hepen) aus der tachymetrischen Vermessung der Referenzdaten mit der Profillinie aus dem DGM 5 (Ursprungsdaten: Höhenpunkte aus photogrammetrisch vermessenen Höhenlinien). b) entsprechender Vergleich von Querprofil 47 (Lutter, Stationierung 4,8 km).	88
Abbildung 36: a) Vergleich der Geländehöhen von Querprofil 70 (Lutter, Stationierung 6,7 km, Teich) aus der tachymetrischen Vermessung der Referenzdaten mit der Profillinie aus dem DGM 5 (Ursprungsdaten: Laserscanning). b) entsprechender Vergleich von Querprofil 81 (Lutter, Stationierung 7,6 km).	88
Abbildung 37: Ergebnisse Wasserspiegellage HW100 Lutter, Längsprofilardarstellung. Die Anzahl der HW100-Werte der GerinneDGM5linie wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit an die Stationierung der Referenzquerprofile angepaßt, d.h. auf 113 reduziert. Folgende Berechnungsparameter wurden verwendet: Gefälle und Fließrichtung.....	94
Abbildung 38: Ergebnisse Wasserspiegellage HW100 Brandenbäumer / Geseker Bach, Längsprofilardarstellung. Die Anzahl der HW100-Werte der GerinneDGM5linie wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit an die Stationierung der Referenzquerprofile angepaßt, d.h. auf 41 reduziert. Folgende Berechnungsparameter wurden verwendet:..	95
Abbildung 39: Ergebnisse Wasserspiegellage HW100 Werse, Längsprofilardarstellung. Die Anzahl der HW100-Werte der GerinneDGM5linie wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit an die Stationierung der Referenzquerprofile angepaßt, d.h. auf 150 reduziert. Folgende Berechnungsparameter wurden verwendet: Gefälle und Fließrichtung.....	96
Abbildung 40: Abweichungen der mit dem vereinfachten Verfahren berechneten HW100 Wasserstände an der Lutter von den jeweiligen Referenzwasserhöhen - Längsprofilardarstellung mit entsprechender Stationierung.....	97
Abbildung 41: Abweichungen der mit dem vereinfachten Verfahren berechneten HW100 Wasserstände an der Lutter von den jeweiligen Referenzwasserhöhen - klassifiziertes Histogramm.	98
Abbildung 42: Abweichungen der mit dem vereinfachten Verfahren berechneten HW100 Wasserstände am Brandenbäumer / Geseker Bach von den jeweiligen Referenzwasserhöhen - Längsprofilardarstellung mit entsprechender Stationierung.	99
Abbildung 43: Abweichungen der mit dem vereinfachten Verfahren berechneten HW100 Wasserstände am Brandenbäumer / Geseker Bach von den jeweiligen Referenzwasserhöhen - klassifiziertes Histogramm.....	100

Abbildung 44: Abweichungen der mit dem vereinfachten Verfahren berechneten HW100 Wasserstände an der Werse von den jeweiligen Referenzwasserhöhen - Längsprofildarstellung mit entsprechender Stationierung.....	101
Abbildung 45: Abweichungen der mit dem vereinfachten Verfahren berechneten HW100 Wasserstände an der Werse von den jeweiligen Referenzwasserhöhen - klassifiziertes Histogramm.	102
Abbildung 46: Hochwassergefährdeter Bereich der Lutter, Übersichtsdarstellung.	104
Abbildung 47: Hochwassergefährdeter Bereich des Brandenbäumer / Geseker Baches, Übersichtsdarstellung.	105
Abbildung 48: Hochwassergefährdeter Bereich der Werse, Übersichtsdarstellung.....	107

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Unterscheidung der gesetzlichen Überschwemmungsgebiete der wasserwirtschaftlichen Fachplanung von den hochwassergefährdeten Bereichen der Regionalplanung.....	19
Tabelle 2: Eckdaten der verwendeten digitalen Höhenmodelle im Vergleich. Angaben sowohl für den jeweils verwendeten Ausschnitt des Modells (ausschlaggebend für die Berechnungsdauer) als auch für die eigentliche Einzugsgebietsgröße (Größenvergleich der Untersuchungsgebiete).....	36
Tabelle 3: Abflußwerte, die als Eingangsdaten in das vereinfachte Verfahren eingehen.	40
Tabelle 4: Aktualität der gewässernahen DGK 5 der drei Untersuchungsgebiete.	41
Tabelle 5: Abweichungen der Wasserstände und Überschwemmungsbreiten von der Referenz an Querprofilen der freien Fließabschnitte der Lutter bei Einsatz unterschiedlicher Horizontalschrittweiten. Die Referenzdaten sind hier die Ergebnisse des vereinfachten Verfahrens mit folgenden Eingangsdaten: Gefälle und Fließrichtung aus dem DGM 5 abgeleitet, Abfluß aus den Eingangsdaten (6HQ100), K_{str} 30, Horizontalschrittweite 1 m, Vertikalschrittweite 0,01 m.	48
Tabelle 6: Berechnung der hydraulischen Radien im Untersuchungsgebiet der Werse auf der Basis unterschiedlicher digitaler Höhenmodelle (Laserscanning / Generierung aus photogrammetrisch vermessenen Höhenlinien). Verwendete Berechnungsparameter: Gefälle und Fließrichtung aus dem DGM 5 abgeleitet, Abfluß aus den Eingangsdaten (19HQ100), Horizontalschrittweite 5 m, Vertikalschrittweite 0,01 m, K_{str} 30.	50
Tabelle 7: Auswirkung der Reduzierung der Querprofilichte auf die räumliche Ausdehnung der hochwassergefährdeten Bereiche. Die Flächengrößen beziehen sich auf den mit der Referenz vergleichbaren Mittelteil des hochwassergefährdeten Bereiches (Anfangs- und Endbereich und fünf Nebenflüßeinmündungen fehlen). Bei der Referenzberechnung verwendete Parameter: Gefälle und Fließrichtung aus dem DGM 5 abgeleitet, Abfluß aus den Eingangsdaten (6HQ100), Horizontalschrittweite 5 m, Vertikalschrittweite 0,01 m, GerinneDGM5linie, K_{str} 10, Flächenbildung anhand Oberflächeninterpolation IDW.	51
Tabelle 8: Rauigkeitsbeiwert und Gerinnelinien. Flächengrößen der hochwassergefährdeten Bereiche der Lutter bei Variation des Rauigkeitsbeiwertes. Die Werte beziehen sich auf den mit der Vorgabe vergleichbaren Gewässerabschnitt von Stationierung 0,5 bis 5,1 km. Darüber hinaus beinhalten die Flächenangaben nur die Bereiche, die direkten Kontakt mit dem Gewässerschlauch haben. Das Überschwemmungsgebiet der Referenzdaten hat eine Größe von 1,484564 km ² . Weitere Berechnungsparameter: Gefälle und Fließrichtung aus dem DGM 5 abgeleitet, Abfluß aus den Eingangsdaten (6HQ100), Horizontalschrittweite 5 m, Vertikalschrittweite 0,01 m.	54
Tabelle 9: Wasserstände und Überschwemmungsbreiten an Querprofilen der freien Fließabschnitte der Lutter bei Einsatz eines Gerinnekastens auf Basis empirisch vermessener Querprofile. Referenz sind die Ergebnisse des Vereinfachten Verfahrens ohne den Einsatz des Gerinnekastens. Weitere Berechnungsparameter: Gefälle und	

Fließrichtung aus dem DGM 5 abgeleitet, Abfluß aus den Eingangsdaten (6HQ100), K_{str} 30, Horizontalschrittweite 5 m, Vertikalschrittweite 0,01 m.	56
Tabelle 10: Klassifikation der Profiltiefen nordrhein-westfälischer Gewässer (nach LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN 1998: 92).	57
Tabelle 11: Gewässerlandschaften – Flachlandgewässer (nach: LANDESUMWELTAMT 1999b: 62ff).	58
Tabelle 12: Gewässerlandschaften – Mittelgebirgsgewässer I (nach: LANDESUMWELTAMT 1999b: 62ff).	58
Tabelle 13: Gewässerlandschaften – Mittelgebirgsgewässer II (nach: LANDESUMWELTAMT 1999b: 62ff).	59
Tabelle 14: Flächengrößen der hochwassergefährdeten Bereiche und Wasserstände der Lutter bei Einsatz unterschiedlicher Gerinnekästen. Referenz sind die Ergebnisse des vereinfachten Verfahrens ohne den Einsatz eines Gerinnekastens, die berechnete Flächengröße beträgt hier 1,351570 km ² . Weitere Berechnungsparameter: Gefälle und Fließrichtung aus dem DGM 5 abgeleitet, Abfluß aus den Eingangsdaten (6HQ100), K_{str} 10, Horizontalschrittweite 5 m (Gerinnekasten_1 und _2 Horizontalschrittweite 1 m), Vertikalschrittweite 0,01 m, GerinneDGM5linie, Flächenbildung anhand Oberflächeninterpolation IDW. Alle Flächenangaben beziehen sich auf den mit den Referenzdaten vergleichbaren Gewässerabschnitt zwischen Stationierung: 0,5 und 5,1 km.	60
Tabelle 15: Mittlere Abweichung von HW100 in Bezug zur Referenz bei der Variantenberechnung Abfluß an der Lutter in Profilabschnitten mit annähernd freiem Abfluß (Eingangsdaten: Fließrichtung und Sohlgefälle: DGM 5, Horizontalschrittweite: 1 m; kein künstlicher Gerinnekasten).....	90
Tabelle 16: Einflußnahme der Fehler und Unsicherheiten durch Parameter und Modellannahmen auf die Berechnungsergebnisse, qualitative Darstellung.	92
Tabelle 17: Statistische Auswertung der Abweichungen der mit dem vereinfachten Verfahren berechneten HW100 Wasserstände an der Lutter von den jeweiligen Referenzwasserhöhen - Größe der Vergleichsmenge: 113 Referenzquerprofile.	98
Tabelle 18: Qualitative Erläuterung der HW100-Abweichungen außerhalb des Toleranzbereiches an der Lutter.	99
Tabelle 19: Statistische Auswertung der Abweichungen der mit dem vereinfachten Verfahren berechneten HW100 Wasserstände am Brandenbäumer / Geseker Bach von den jeweiligen Referenzwasserhöhen - Größe der Vergleichsmenge: 41 Referenzquerprofile.	100
Tabelle 20: Statistische Auswertung der Abweichungen der mit dem vereinfachten Verfahren berechneten HW100 Wasserstände an der Werse von den jeweiligen Referenzwasserhöhen - Größe der Vergleichsmenge: 150 Referenzquerprofile.	102
Tabelle 21: Qualitative Erläuterung der HW100-Abweichungen außerhalb des Toleranzbereiches an der Werse.	103
Tabelle 22: Quantitativer Flächenvergleich von Variantenberechnungen am Brandenbäumer / Geseker Bach.	106
Tabelle 23: Quantitativer Flächenvergleich von Variantenberechnungen an der Werse.	107

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ArcView	Geographisches Informationssystem der Firma ESRI
Ascii	American Standard Code for Information Interchange
ATKIS	Amtlich Topographisch-Kartographisches Informationssystem
Avenue	ArcView interne, objektorientierte Programmiersprache
BauGB	Baugesetzbuch
BGBI	Bürgerliches Gesetzbuch
BÜSG1	preußisches Überschwemmungsgebiet Brandenbäumer / Geseker Bach 1912
BÜSG2	Überschwemmungsgebiet Brandenbäumer / Geseker Bach 2000
DGK 5	Deutsche Grundkarte des Landesvermessungsamtes NRW
DGM 5	Digitales Geländemodell des Landesvermessungsamtes NRW
Dialog Designer	kommerzielle Erweiterung von ArcView zur Erstellung benutzerdefinierter Eingabemasken
DVWK	Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau
EG	Europäische Gemeinschaft
ESRI	Environmental System Research Institute, Redlands / California
EU	Europäische Union
EUREK	Europäisches Raumentwicklungskonzept
<i>F</i>	durchflossener Querschnitt der Gerinnegeometrie
GerinneDGM5 / GerinneDGM5linie	vom DGM 5 abgeleitete Tiefenlinie des entsprechenden Gewässers
GerinneATKIS / GerinneATKISlinie	Gewässerlinie aus dem ATKIS-Datensatz
GPS	Global Positioning System
hq100	100jähriger Spendenwert
HQ100	100jähriger Abflußwert
HW100	100jähriger Hochwasserstand
HW-Bereiche	Hochwassergefährdete Bereiche
IDNDR	International Decade for Natural Disaster Reduction
INTERREG IIC	Europäisches Programm zur transnationalen Kooperation in der Raumplanung
IDW	Inverse Distance Weighted (Interpolationsverfahren)
INS	Inertial Navigation System
IRMA	Internationale Rhein-Maas-Aktivitäten
I_s	Koeffizient der Manning-Strickler Fließformel
k_{str}	Rauhigkeitsbeiwert nach Strickler
LEP	Landesentwicklungsplan
LEPro	Landesentwicklungsprogramm
LPIG	Landesplanungsgesetz
LUA	Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen

LÜSG1	gesetzliches Überschwemmungsgebiet der Lutter von 1997
LWG	Landeswassergesetz
MOHB	Computerprogramm zur Modellierung hochwassergefährdeter Bereiche
müNN	Meter über Normalnull
MURL	Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft NRW
N / A - Modellierung	Niederschlag / Abfluß - Modellierung
NRW	Nordrhein-Westfalen
PC	Personal Computer
Q	Abfluß
r_{hy}	hydraulischer Radius
ROG	Raumordnungsgesetz
SMO	Standard Leistungsbeschreibung für mathematische Modelluntersuchungen von Oberflächengewässern des Landes NRW
Spatial Analyst	kommerzielle Erweiterung von ArcView zur Bearbeitung von Rasterdaten
StUA	Staatliches Umweltamt
U	benetzter Umfang der Gerinnegeometrie
ÜSG	gesetzliches Überschwemmungsgebiet
UNDRO	United Nations for Disaster Reduction Organisation
UNIX	Multitasking-Multiuser-Betriebssystem
v_m	mittlere Fließgeschwindigkeit
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
Windows NT 4	PC Betriebssystem
WRR	Wasserrahmenrichtlinie
WÜSG1	preußisches Überschwemmungsgebiet der Werse von 1909 / 1913
WÜSG2	gesetzliches Überschwemmungsgebiet der Werse von 1999
ZENEB	Zentrum für Naturrisiken und Entwicklungsforschung

VORWORT

*In der Welt gibt es Schmiegsameres
Und Zarteres nicht als Wasser.
Aber im Angreifen des Harten und Starren
Gibt es nichts, was es übertreffen könnte.
Es gibt nichts, wodurch es zu ersetzen wäre.
Darum:
Biegsam besiegt Starr,
Zart besiegt Hart. –
Wahre Worte scheinen oft widersinnig.*

*Lao-Tse, Tao-Te-King, 78. Spruch
(IN: DYCK UND PESCHKE 1995: 429)*

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen eines angewandten Projektes zwischen dem Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft NRW (MURL), dem Landesumweltamt NRW (LUA) und dem Geographischen Institut der Universität Bonn. Die Ergebnisse leisten einen Beitrag zur nachhaltigen Nutzung unserer Flußlandschaften.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. R. Dikau, der als mein Doktorvater die Arbeit während der letzten drei Jahre betreute und durch Anregungen und Diskussionen förderte. Prof. Dr. K. Greve danke ich für die Übernahme des Korreferats. Darüber hinaus danke ich den Mitarbeitern des Projektes und der Arbeitsgruppe für eine gute Zusammenarbeit.

1 Einführung

1.1 Einleitung Hochwasser

1.1.1 Hochwasser unter physisch geographischen Gesichtspunkten

Ein Hochwasser ist definitionsgemäß dann eingetreten, wenn der **ufervolle Abfluß eines Gewässers überschritten** wird und die **Hochwasserwelle die Auen überflutet** (COCH 1995: 182). Auen sind der Talbereich eines Gewässers, dessen Grundwasserstand durch die wechselnde Wasserführung des Gerinnes beeinflusst wird und dessen nicht eingedeichte Gebiete regelmäßigen Überflutungen unterliegen (Abbildung 1). Im Gegensatz zur morphologischen Aue, die den Bereich der historisch natürlichen, unbeeinflussten Auenausdehnung umfaßt, bezieht sich diese Definition der Aue auf die aktuellen wasserwirtschaftlichen Randbedingungen (UMWELTBUNDESAMT 1998: 247ff). Der Begriff der Aue wird meist innerhalb der Biologie verwandt. Zur genaueren Abgrenzung der in der Fachliteratur oft uneindeutig verwendeten Begrifflichkeiten werden die hochwasserrelevanten Flächen in der folgenden Abbildung 1 dargestellt und anschließend definiert.

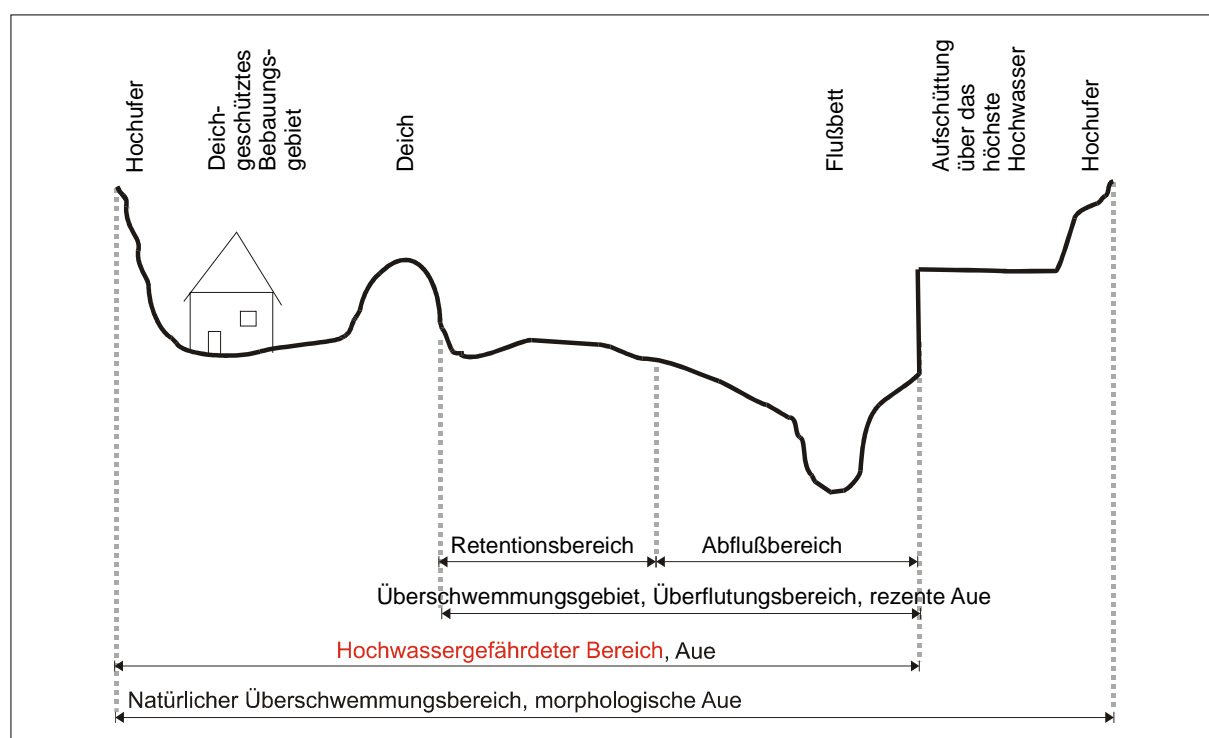


Abbildung 1: Räumliche Abgrenzung verschiedener hochwasserrelevanter Flächen anhand eines Auenquerschnittes (verändert nach: UMWELTBUNDESAMT 1998: 246).

Hochwassergefährdete Bereiche (Überschwemmungsgefährdete Bereiche, Überschwemmungsgefährdete Gebiete, Überschwemmungsbereiche) sind als Flächen definiert, die entweder ungeschützt oder durch Deiche geschützt in der morphologischen Aue liegen und dadurch dem Risiko eines Hochwasserschadens ausgesetzt sind. Der im Falle eines Hochwassers tatsächlich überschwemmte Bereich der Aue wird als **Überflutungsbereich** (rezente Aue) bezeichnet. Ein **Überschwemmungsgebiet** ist dagegen ein Begriff im Sinne des Wasserrechts. Es ist ein per Verordnung oder Kraft Gesetz festgesetzter Teil des Überflutungsbereiches. Das Überschwemmungsgebiet ist in der Regel kleiner als der Überflutungsbereich, da es aufgrund eines Bemessungshochwassers (siehe Kapitel 1.1.2) bestimmt wird, das von tatsächlichen Hochwasserereignissen übertroffen werden kann. Im **Abflußbereich** findet der direkte Abfluß statt. Als **Retentionsbereich** wird die Fläche verstanden, die von einer Hochwasserwelle außerhalb des Abflußbereiches in Anspruch genommen wird. Der Retentionsbereich weist keine bzw. eine sehr geringe Strömung auf. Das **natürliche Überschwemmungsgebiet** (natürlicher Überschwemmungsbereich, natürlicher Überflutungsbereich, natürliche Überflutungsfläche, morphologische Aue) umfaßt die Fläche, die von dem Gewässer in natürlichem Zustand bei einem Hochwasserereignis eingenommen wird (Abbildung 1)(GREIVING 1999: 78, UMWELTBUNDESAMT 1998: 248ff).

Ein Hochwasser ist der durch verschiedene Speichereigenschaften des Einzugsgebietes transformierte **Niederschlag** und stellt somit einen natürlichen Teil des Wasserkreislaufes der Erde dar. Der außergewöhnlich hohe Niederschlag, der möglicherweise durch eine Schneeschmelze verstärkt werden und auf ein Einzugsgebiet mit hoher Abflußbereitschaft fallen kann, ist die primäre Hochwasserursache (PLATE 1996: 509). Die Steigerung der Abflußbereitschaft kann auf natürlichem Wege (z.B. Bodenfrost) oder durch anthropogene Beeinflussungen (z.B. Versiegelung des Bodens) erfolgen. Diese führen zu einer **Verminderungen der Wasserrückhaltespeicher** und stellen die sekundären Hochwasserursachen dar. Hochwasser können auch aus anderen Gründen entstehen (z.B.: Sturmflut, Tsunami, Erdbeben; Klassifikationen in: GEIPEL 1992: 218ff, OFFICE OF THE UNITED NATIONS DISASTER RELIEF COORDINATOR 1991: 33ff). Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit Flußüberschwemmungen aufgrund von Starkregen.

1.1.2 Hochwasser unter sozio-ökonomischen Gesichtspunkten

Ein Hochwasser allein stellt noch keine Naturgefahr oder -katastrophe dar. Erst wenn der Überschwemmungsprozeß Menschenleben oder Vermögenswerte bedroht, spricht man vom

Hochwasser als **Naturgefahr** (KLEEBERG et al. 1996: 28; WEICHSELGARTNER 2000: 122ff). Die UNDRRO (United Nations for Disaster Reduction Organisation) definiert Naturgefahr als einen **"potentiell Schaden verursachenden Prozeß in einer bestimmten Region zu einer bestimmten Zeit"** (OFFICE OF THE UNITED NATIONS DISASTER RELIEF CO-ORDINATOR 1991: 31). Den 'potentiell Schaden verursachenden Prozeß' im Rahmen dieser Arbeit stellt der Hochwasserabfluß in von Menschen genutzten Flußauen dar. Die 'bestimmte Region' grenzt den maximal vom Prozeß betroffenen Überschwemmungsbereich ab (Magnitude). Die 'bestimmte Zeit' definiert die Wiederkehrwahrscheinlichkeit (Frequenz) des Prozesses spezieller Magnitude, im Rahmen der vorliegenden Arbeit eines 100jährigen Bemessungshochwassers (siehe Kapitel 1.1.2).

Hochwasser stellt unter globalen Maßstäben eine bedeutende Naturgefahr dar. Überschwemmungen treten von allen Naturgefahren am häufigsten auf, haben die meisten Todesfälle zur Folge und führen zu den größten volkswirtschaftlichen Schäden (BERZ 2000: F-1ff; MÜNCHENER RÜCKVERSICHERUNGS-GESELLSCHAFT 1997a: 17). In den Industrienationen lassen sich die großen Schäden der letzten Jahre durch standortfremde Flächennutzung der Gewässerauen und die dadurch bedingte Zunahme des Schadenpotentials erklären.

Wenn ein Extremhochwasser eintritt und die Höhe des Bemessungshochwassers überschreitet, kann die Naturgefahr zur Katastrophe werden. Der angestrebte Schutz- bzw. Sicherheitsgrad eines Bemessungshochwassers wird durch seine Wiederholungszeitspanne ausgedrückt. Das statistisch ermittelte Bemessungshochwasser stellt das Hochwasserereignis dar, das zur Dimensionierung einer Schutzmaßnahme dient (DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU E.V. 1989: 1ff).

Das verbleibende Risiko wird als akzeptiertes Restrisiko bezeichnet. Eine Risikobewältigung kann durch die Kombination von Risikoermittlung und nachfolgender Risikohandhabung erfolgen. Bei der Risikoermittlung werden die analytischen Grundlagen für die nachfolgenden Entscheidungen gelegt (z.B. stellt die Abgrenzung hochwassergefährdeter Bereiche einen fundamentalen Teil der Risikoermittlung dar). Die Risikohandhabung setzt die gewonnenen Erkenntnisse in praktisch wirksame Maßnahmen um (PLATE 1999: 115ff; WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN 1998: 112ff).

Ob ein Extremhochwasser zur Hochwasserkatastrophe wird, hängt heute zunehmend mehr von Vorwarnzeiten, Schadenspotential und technischem Hochwasserschutz ab, und weniger von Niederschlagsverteilung und -menge. Hochwasserkatastrophen und deren Ausmaße sind somit das Ergebnis gesellschaftlicher Entscheidungsprozesse. Insofern können selbst Natur-

katastrophen als soziale, und nicht als natürliche Ereignisse verstanden werden. Hochwasser kann unter sozio-ökonomischen Gesichtspunkten als eine Wirkungskette von auslösenden und sekundären Ereignissen verstanden werden, in die der Mensch sowohl als Verursacher als auch als Betroffener miteinbezogen ist. Mit seinen Handlungen und Reaktionen beeinflusst und modifiziert er diese Wirkungskette. Dies erfolgt sowohl am Anfang der Kette durch Einflußnahme auf natürliche Faktoren, die für die Entstehung von Hochwasser verantwortlich sind, als auch durch die Einwirkung auf Determinanten, die den Ereignisverlauf und das Ausmaß der Schäden mitbestimmen (WEICHELGARTNER 2000: 122ff).

In den letzten Jahren erfolgte langsam, aber stetig eine Abwendung der Naturgefahrenforschung von den rein physischen Aspekten hin zu einem interdisziplinären Rahmenkonzept, in dem den sozialen Aspekten bzw. dem Menschen eine tragende Rolle zukommt (DEUTSCHES IDNDR-KOMITEE FÜR KATASTROPHENVORBEUGUNG 1996: 1ff). Dieser Fragestellung kommt innerhalb der vorliegenden Arbeit insofern eine Bedeutung zu, als daß die raumplanerische Auseinandersetzung mit dem Thema Hochwasser eine Konsequenz dieser Entwicklung darstellt.

1.2 Problemstellung

In Deutschland erhöhte sich in den letzten Jahrzehnten das Überschwemmungsrisiko. Die Verwundbarkeit ('Vulnerabilität'), d.h. die Schadensempfindlichkeit gegenüber bestimmten Ereignisstärken, wird durch die Entwicklung einer dichteren und kostenintensiveren Nutzung der flußnahen Bereiche erhöht. Dadurch steigt bei Hochwasserereignissen der zu erwartende Schaden. Die politische Forderung nach **vorbeugendem Hochwasserschutz** zielt darauf ab, diesen anthropogenen Risikofaktor durch entsprechende nachhaltige Maßnahmen zu entschärfen (WISSENSCHAFTLICHER BEITRAT DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN 1997: 115ff). Nach Handlungsbereichen differenziert lassen sich die Maßnahmen zum vorbeugenden Hochwasserschutz in drei Hauptgruppen unterteilen (UMWELTBUNDESAMT 1998: 1; siehe Kapitel 2.1):

- Sicherung und Wiederherstellung natürlicher Überflutungsräume
- Rückhalt von Niederschlagswasser
- Schadensverminderung durch Flächenmanagement

Die Handlungsgrundlage des vorbeugenden Hochwasserschutzes ist die **rechtliche Sicherung der betroffenen Flächen durch die Raumplanung**. Dadurch können standortungeeignete Nutzungen und das damit einhergehende Anwachsen des Schadenpotentials in gefährdeten Bereichen schon während der Planung verhindert werden.

Als politische Konsequenz der beiden großen Rheinhochwasser 1993 / 1995 sollen in Nordrhein-Westfalen die hochwassergefährdeten Bereiche eines 100jährigen Bemessungshochwassers durch die Raumordnung gesichert werden. Die Gefährdungsbereiche sollen in die **Gebietsentwicklungspläne** der Regionalplanung eingehen. Diese gehen aus dem Landesentwicklungsplan hervor und legen die regionalen Ziele der Raumordnung für die Regierungsbezirke im Planungsmaßstab 1 : 50.000 fest. Die textlich konkretisierte und zeichnerische Festlegung von Zielen stellt den rechtlich verbindlichen Rahmen für die lokale Bauleitplanung der Städte bzw. Gemeinden dar (Abbildung 2). Ziel der Ausweisung hochwassergefährdeter Bereiche auf Ebene der Regionalplanung ist im Sinne des vorbeugenden Hochwasserschutzes die Freihaltung und Erweiterung des Retentionsraumes (GREIVING 1999: 75ff). Nicht zu verwechseln sind die hochwassergefährdeten Bereiche mit den schon bestehenden Überschwemmungsgebieten der wasserwirtschaftlichen Fachplanung, die auf Städte- bzw. Gemeindeebene im Maßstab 1 : 5.000 ausgewiesen werden und mit konkreten Genehmigungsvorbehalten und Nutzungspflichten versehen sind (siehe Kapitel 2.1 und Tabelle 1). Die Regionalplanung geht mit ihrem übergeordneten und fachplanungskoordinierenden Anspruch in der Regel der Fachplanung vor.

Mit dem Erlaß des Umweltministeriums Nordrhein-Westfalens vom 17.07.1997 hat das Landesumweltamt den Auftrag bekommen, eine landesweite Karte der hochwassergefährdeten Bereiche für die Gebietsentwicklungspläne zu erstellen. Zur flächendeckenden Darstellung werden drei verschiedene Methoden herangezogen (LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN 2000: 1ff):

- **Verfahren nach dem Stand der Technik** – Die aktuelle Ingenieurpraxis zur Ermittlung der gesetzlich vorgeschriebenen Überschwemmungsgebiete ist eine Kombination der hydrologischen Niederschlag / Abfluß-Modellierung mit einer anschließenden hydraulischen Berechnung der Wasserspiegellagen (siehe Kapitel 2.3). Eine große Anzahl dieser Modelle größerer Einzugsgebiete liegt schon vor.
- **Preußische Überschwemmungsgebiete** – Zu Beginn des 20. Jahrhunderts erfaßte die preußische Wasserwirtschaftsverwaltung durch Einmessen aufgetretener Überschwem-

mungen die natürlichen Überschwemmungsgebiete und dokumentierte diese in Karten (MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, DOMÄNEN UND FORSTEN 1906: 10). Wenn das erfaßte Hochwasser ungefähr einem aktuellen 100jährigen entsprach und keine entscheidenden Geländeänderungen eingetreten sind, kann diese Datengrundlage für Gewässer bis zu einer mittleren Größenordnung herangezogen werden.

- **Vereinfachtes Verfahren** – Alle kleineren Gewässer mit einer Einzugsgebietsgröße > 20 km², für die keine Eingangsdatensätze vorliegen, werden durch eine vereinfachte Bearbeitung nach dem Stand der Technik berechnet. Die Entwicklung dieses Verfahrens stellt den Inhalt der vorliegenden Dissertation dar.

1.3 Ziel und Rahmen der Arbeit

Zur Erstellung der landesweiten Karte der hochwassergefährdeten Bereiche ist eine Übertragung des bestehenden Modellierungsverfahrens der Überschwemmungsgebiete auf die höhere Skala des Zielmaßstabes der Regionalplanung notwendig. Diese Methode des Heraufskalierens („Upscaling“) umfaßt vor allem die flächenmäßige Aggregation bzw. die Integration lokaler, teilflächenbezogener Informationen in Form der Bildung von Summen und Mittelwerten (BECKER 1992 in: DIKAU et al. 1999d). Die Entwicklung und die Evaluierung des vereinfachten Verfahrens erfolgte in einem interdisziplinären Projekt zwischen dem Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft Nordrhein-Westfalen (MURL, Abteilung Raumordnung / Freiraumplanung), dem Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA, Abteilung Hochwasserschutz), einem wasserbaulichen Ingenieurbüro und der Universität Bonn. Die beiden erstgenannten stellen gleichzeitig die Auftraggeber der Forschungsarbeit dar.

Die Projektarbeit umfaßte neben der methodischen Verfahrensforschung auch die dazugehörige **Softwareentwicklung**, d.h. die Umsetzung der entwickelten Methode in das Computerprogramm MOHB (**M**odellierung **h**ochwassergefährdeter **B**ereiche). Die letztendliche Bearbeitung der annähernd 250 betroffenen Einzugsgebiete Nordrhein-Westfalens anhand der im Rahmen dieser Dissertation entwickelten Methode bzw. der daraus programmierten Anwendungssoftware, wird von einem wasserbaulichen Ingenieurbüro durchgeführt. Die hochwassergefährdeten Bereiche finden in der Neuauflage des Gebietsentwicklungsplanes Ende 2001 Eingang.

Durch die Einbindung des Forschungsprojektes in das europäische Programm INTERREG IIC (Transnationale Kooperation in der Raumplanung) erfolgt ein fachspezifischer Erfah-

rungsaustausch über die Landesgrenzen in den europäischen Raum hinaus (BUNDESAMT FÜR BAUWESEN UND RAUMORDNUNG 1998).

1.4 Vorgehen und Methodik

Nach einer einleitenden Diskussion der Hochwasserproblematik folgt die Verankerung der Fragestellung im Bereich der Raumordnung und der wasserwirtschaftlichen Fachplanungen auf Ebene der Regionalplanung. Um das bei der Hochwassermodellierung angewandte vereinfachte Verfahren gegenüber anderen Vorgehensweisen zur Abgrenzung von Überschwemmungsflächen zu beurteilen, wird sowohl ein chronologischer als auch aktueller Überblick über die praktizierten Methoden gegeben. Die anschließende Verfahrensentwicklung basiert auf zwei Grundlagen: Die **hydraulische Modellierung** und die **computergestützte geomorphometrische Analyse**. Unter Verwendung flächendeckend und landesweit vorhandener Datengrundlagen (digitale Höhenmodelle, regionalisierte Abflußschätzwerte, Bauwerkspositionen) wird eine hydraulische Modellierung (stationär gleichförmig) zur Ermittlung der Hochwasserstände innerhalb eines Geographischen Informationssystems durchgeführt. Dessen Aufgaben sind dabei die Aufnahme, Speicherung, Verarbeitung (Analyse) und Wiedergabe der raumbezogenen Daten (BILL UND FRITSCH 1994: 2ff; Definitionen Geographischer Informationssysteme aus der Perspektive unterschiedlicher Disziplinen siehe: GREVE 1996). Die zur hydraulischen Modellierung benötigte topographische Geometrie entstammt dabei dem digitalen Höhenmodell und nicht aufwendigen tachymetrischen Geländevermessungen. Die darüber hinaus benötigten Modellierungsparameter werden durch die computergestützte geomorphometrische Analyse ebenfalls auf Basis digitaler Höhenmodelle berechnet. Die rasche Fortentwicklung leistungsfähigerer Computersysteme, Geographischer Informationssysteme und die Verfügbarkeit hochaufgelöster digitaler Höhenmodelle ermöglichen dabei neue Bearbeitungsmethoden (DIKAU UND FRIEDRICH 2000: 50ff). Betrachtungen zur Güte der digitalen Höhenmodelle, der Sensitivität der Parameter und der unterschiedlichen Fehler- bzw. Unsicherheitsquellen stellen wichtige Teilbereiche zur wissenschaftlichen Bewertung der zu entwickelnden Methodik dar.

Das Verfahren wird an den Einzugsgebietsdaten der Lutter (Regierungsbezirk Detmold / NRW) (Abbildung 9) erarbeitet. Die Evaluierung der Ergebnisse erfolgt anhand von Referenzdaten, die einer herkömmlichen hydrologischen und hydraulischen Modellierung des Gebietes entstammen. Eine zusätzliche Evaluierung erfolgte anhand der Einzugsgebiete des

Brandenbäumer / Geseker Baches (Regierungsbezirk Arnsberg / NRW, Abbildung 9) und des Oberlaufes der Werse (Regierungsbezirk Münster / NRW, Abbildung 9).

Die wichtigste Datengrundlage des vereinfachten Verfahrens stellt das digitale Höhenmodell des Landesvermessungsamtes Nordrhein-Westfalens dar. Da dieses Modell durch verschiedene Herstellungsverfahren aufgebaut wurde, kommt es zu internen Qualitätsunterschieden (siehe Kapitel 3.2.1). Deshalb erfolgt die Erstanwendung des an der Lutter entwickelten Verfahrens bzw. die Evaluierung der Ergebnisse an zwei verschiedenen Einzugsgebieten mit unterschiedlichen digitalen Höhenmodellen: Dem Brandenbäumer / Geseker Bach liegt, genau wie der Lutter, ein digitales Höhenmodell zugrunde, welches aus photogrammetrisch vermessenen Höhenlinien generiert wurde. Der Oberlauf der Werse wird größtenteils durch ein Laserscanning-Höhenmodell abgedeckt. Beide Untersuchungsgebiete befinden sich im Flachland, da in Gebieten mit niedriger Reliefenergie die Sensitivität des Verfahrens erwartungsgemäß größer ist als im Mittelgebirgsbereich der Lutter. Abschließend werden die Ergebnisse und die darauf einwirkenden Faktoren diskutiert. Der Ausblick stellt Forschungsansätze zur Weiterentwicklung des vereinfachten Verfahrens vor.

2 Theoretische und methodische Grundlagen

2.1 Hochwasserschutz

Der Mensch kann das Hochwasser selber nur in geringem Maße beeinflussen. Bei dieser Annahme wird davon ausgegangen, daß die Forschungsfrage einer anthropogen bedingten Klimaveränderung in Verbindung mit einer Niederschlagszunahme nicht abschließend geklärt ist (BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE 1997: 37ff). Der derzeitige Forschungsstand läßt noch kein kleinräumiges Downscaling der Modellierungsergebnisse bzw. eine verlässliche Aussage auf Landesmaßstab zu (LEHNER et al. 2000: D-23). Als Abwehr vor Hochwassergefahren wurde in den letzten zweihundert Jahren dem technischen Hochwasserschutz der Vorzug gegeben. Innerhalb des letzten Jahrzehnts treten jedoch in die Weltbühne der mit dem Hochwasserschutz beauftragten wasserwirtschaftlichen Ingenieure Aspekte einer integrierten und nachhaltigen Betrachtungsweise, die zum vorbeugenden Hochwasserschutz bzw. zum Hochwassermanagement führen werden (GALLOWAY 1999: 235ff).

Der **technische Hochwasserschutz** (aktiver, struktureller, baulicher Hochwasserschutz, structural measures) wehrt die Gefahr durch den Bau von Deichen, Rückhaltebecken und anderen Schutzvorrichtungen bis zu einem bestimmten Bemessungsfall ab (KLEEBERG et al. 1996: 24ff; LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER 1995: 2ff). Technischer Hochwasserschutz allein bietet keine ausreichende Vorsorge, wie die Entwicklung der letzten zwei Jahrhunderte belegt. In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts begann die Periode der Flußbegradigungen, die ufernahen Talflächen wurden nutzbar gemacht und durch Deiche geschützt. Die Auswirkungen waren, neben der Beeinträchtigung des Landschaftsbildes, der Verlust von Retentionsflächen, die Aufhöhung der Hochwasser und eine Eintiefung der Gewässersohle durch die Konzentrierung und Beschleunigung des Abflusses. Der technische Hochwasserschutz birgt die Gefahr, daß das Schadenspotential in den vermeintlich gesicherten Gebieten stark ansteigt und im Falle eines Überschreitens des Bemessungshochwassers ein noch viel größerer Schaden entsteht. Aufgrund der einseitigen Öffentlichkeitsinformation seitens der Verantwortlichen und des dadurch entstandenen trügerischen Sicherheitsgefühles, ist es meist der technische Hochwasserschutz, der trotz aller seiner Nachteile und den meist immensen Kosten von der betroffenen Bevölkerung bevorzugt wird (TUCCI UND VILLANUEVA 1999: 177ff).

Aufgrund langfristiger negativer anthropogener Einflüsse auf die Speicherkapazitäten der Einzugsgebiete (Bewuchs, Boden, Gelände und Gewässernetz) vergrößern sich Frequenz und Magnitude der kleinen bis mittleren Hochwasserereignisse. Diese Hochwasserverschärfungen reichen vom bereits angesprochenen Gewässerausbau, der Versiegelung, der Flurbereinigung, den Waldschäden, dem Trockenlegen der Auen zur wirtschaftlichen Flächennutzung, etc. bis zur vieldiskutierten anthropogen verursachten Klimaveränderung durch den CO₂-Anstieg in der Atmosphäre (KLEEBERG et al. 1996: 27; LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER 1995: 4ff). Ziel des **vorbeugenden Hochwasserschutzes** (passiver, planerischer, dezentraler Hochwasserschutz, non-structural measures) ist eine Dämpfung der Hochwasserereignisse durch eine positive Einflußnahme auf die angesprochenen Speicherkapazitäten. Die Nutzung und Erweiterung der natürlichen Flächenretention soll durch Regenrückhaltung, Versickerung, standortgerechte Landwirtschaft, Renaturierung der Gewässer und Auen etc. gewährleistet werden (FAISAL et al. 1999: 145ff; KLEEBERG et al. 1996: 28ff; LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER 1995: 7ff).

Selbst eine Kombination aus technischem und vorbeugendem Hochwasserschutz kann schadenbringende Extremhochwasser letztlich nicht ausschließen. Als Konsequenz wird die Entwicklung und Umsetzung großräumiger Strategien wie z.B. das **Hochwasserflächenmanagement** (flood management, holistic flood management (SAMUELS 2000: G-1ff), floodplainmanagement, flood risk management, Hochwasser-Risikobewirtschaftung, Hochwassermanagement (PLATE 2000: F-11ff), sustainable river management (DOOGE UND SAMUELS 1999: 399ff)) verfolgt. Hochwasserschutz, wie bisher betrieben, soll dadurch überwunden werden: hektische Betriebsamkeit während des Ereignisses, nachlassender Eifer mit zunehmender Distanz zum Effekt, klares Inabredestellen von Hochwassergefahren überhaupt, in der steten Hoffnung, daß eben dieses Ereignis nicht eintrifft (FISCHER 1999: 155). Dieses integrierende Managementkonzept soll die Erfahrung, daß große Hochwasser immer wieder möglich sind, allen BürgerInnen in latenter Erinnerung halten und zusätzliche Vorsorge durch wasserwirtschaftliche, siedlungspolitische und finanzwirtschaftliche Programme treffen. Diese Art der Hochwasservorsorge steht im Spannungsfeld zwischen staatlichem und eigenverantwortlichem Handeln der BürgerInnen. Es setzt sich aus folgenden fünf Einzelstrategien zusammen (KLEEBERG et al. 1996: 30; LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER 1995: 13ff; PLATE 1999: 115ff):

- **Bauvorsorge:** angepaßte Bauweise durch die betroffenen EigentümerInnen.
- **Verhaltensvorsorge:** durch rechtzeitige Hochwasservorhersage, Ausnutzung des Schadensminderungspotentials durch die Betroffenen selber (SHIDAWARA 1999: 125ff).
- **Risikovorsorge:** bestehend aus einem staatlichen, baulichen Hochwasserschutz, einer eigenverantwortlichen Vorsorge für regelmäßig vorhersehbare Schäden und einer Elementarschadensversicherung durch die Versicherungswirtschaft (MÜNCHENER RÜCKVERSICHERUNGS-GESELLSCHAFT 1997b: 61ff).
- **Katastrophenvorsorge:** Planung der Hilfsmaßnahmen nach einer Katastrophe.
- **Flächenvorsorge:** gesetzliche Sicherung, Entwicklung und Erweiterung der noch bestehenden Überschwemmungsflächen in der Landesregionalplanung und auf Gemeindeebene.

Die Überschwemmungsbereiche der Gewässer haben nicht nur große Bedeutung im Zusammenhang mit dem Hochwasserschutz. Es gibt zahlreiche andere Gründe unterschiedlicher Fachbereiche, die den Schutz, die Entwicklung und die Erweiterung der Überschwemmungsbereiche als unabdingbare Lösung komplexer Probleme erfordern (z.B. in Hinblick auf Trink- und Brauchwasserschutz (JÜRGING 1996: 154), Vermeidung von Stoffeinträgen und Bodendegradation (LANDESAMT FÜR UMWELT UND NATUR MECKLENBURG-VORPOMMERN 1995: 6ff), ökologische Gesichtspunkte (KONOLD 1996: 146ff), Funktionen des Wassers bezüglich Nachhaltigkeit (FALKENMARK 1997: 454ff)).

2.2 Mit dem Hochwasserschutz beauftragte öffentliche Planungsträger

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Raumplanung als Koordinator flächenwirksamer Tätigkeiten bzw. ihrem Beitrag zur administrativen Flächenvorsorge im Sinne des vorbeugenden Hochwasserschutzes. Die Grundvoraussetzung dieser Vorsorge ist die Identifikation und Ausweisung hochwassergefährdeter Bereiche (BÖHM 2000: H-105ff; GRÄFF 2000: H-27ff). Anhand dieser Abgrenzungen können Nutzungsansprüche an knappe Landressourcen mit nachhaltigen Entwicklungsaspekten der gefährdeten Bereiche aufeinander abgestimmt werden. Die Raumplanung realisiert in Kooperation mit den entsprechenden Fachplanungen, vor allem der wasserwirtschaftlichen Fachplanung, den rechtlichen Schutz der Gewässer vor weiteren Beeinträchtigungen. Die folgende Abbildung 2 stellt das Beziehungsgefüge innerhalb der verschiedenen Institutionen dar.

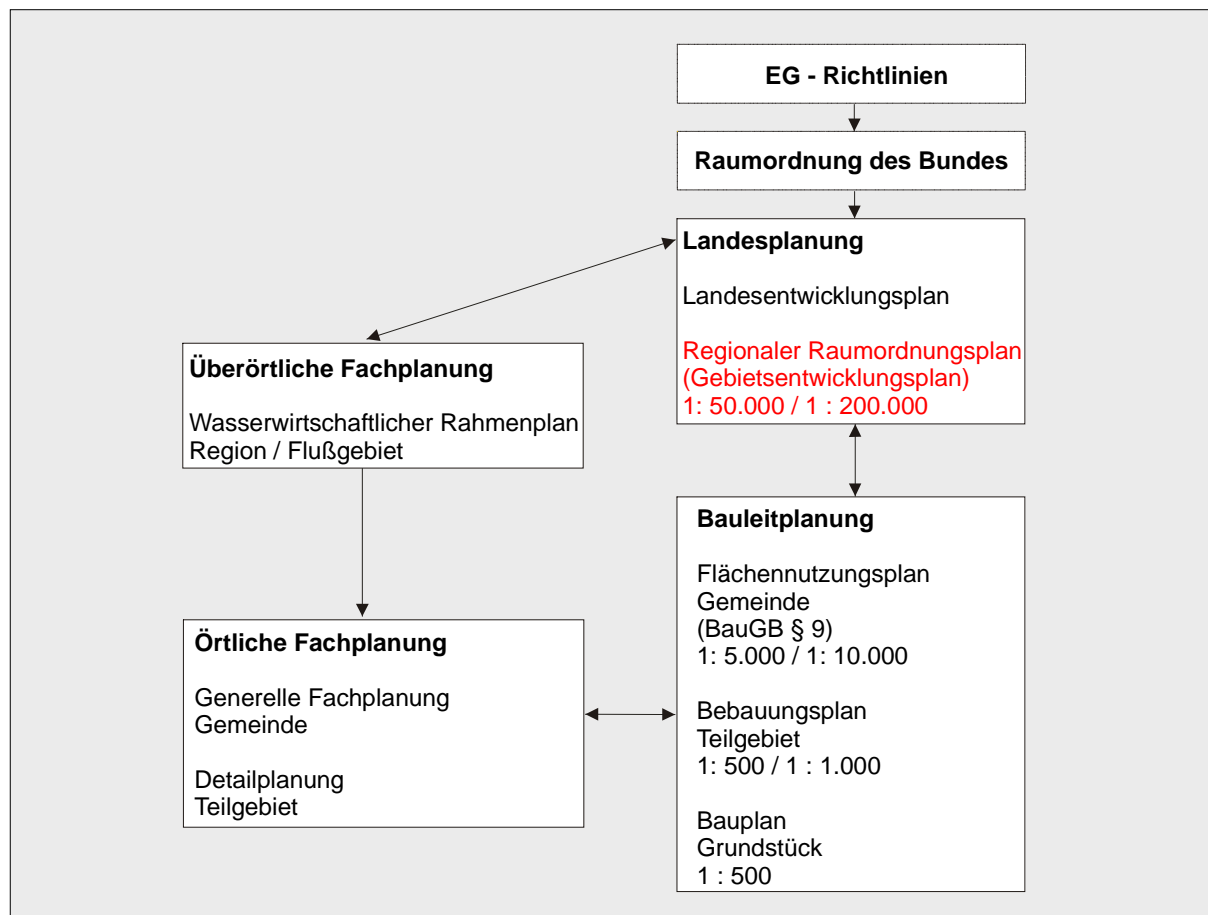


Abbildung 2: Rechtliches Beziehungsgefüge innerhalb der Raumordnung bzw. zwischen Raumordnung und wasserwirtschaftlicher Fachplanung (verändert nach: JACOBITZ 1994: 2).

2.2.1 Raumplanung

Raumplanung kann in Abhängigkeit von den entsprechenden gesetzlichen Vorgaben auf verschiedenen Planungsebenen erfolgen (Abbildung 2). Im folgenden werden diese Ebenen erläutert, um die Einordnung und Bedeutung der Regionalplanung, die den Maßstab dieser Arbeit vorgibt, zu verdeutlichen.

Auf **internationaler Ebene** wurden von der Generalversammlung der Vereinten Nationen die 90er Jahre zur "Internationalen Dekade für die Reduzierung der Naturkatastrophen" (International Decade for Natural Disaster Reduction / IDNDR) erklärt. Eine der Aufgaben des deutschen IDNDR-Komitees war der kritische Dialog mit den Verantwortlichen der inländischen Katastrophenvorbereitung zum Thema vorbeugender Hochwasserschutz (DOMBROWSKY UND BRAUNER 1996: 14; IDNDR 1996: 6ff). Als Folge ist die Gründung eines Zentrums für Naturrisiken und Entwicklungsforschung (ZENEB 2001) an der Universität Bonn geplant.

Die **europäische Raumordnungspolitik** beschränkt sich bislang auf Förderinstrumente und ist nicht mit konkreten und restriktiven Steuerungsinstrumenten ausgestattet. Sie basiert auf Art. 130 des EG-Vertrages und soll im **Europäischen Raumentwicklungskonzept** (EUREK) verankert werden, dessen erster Entwurf 1997 erörtert wurde. Darin werden das "Hochwasserrisiko besonders in transnationalen Einzugsbereichen" sowie die "Entwicklung von regionalen und transnationalen Strategien für das Risikomanagement in Gebieten, die für Naturkatastrophen anfällig sind" angesprochen.

Mit der Gemeinschaftsinitiative INTERREG II C initiiert und fördert die EU erstmals seit 1999 die raumordnerische Zusammenarbeit der Mitgliedsstaaten auf transnationaler Ebene. Teilziel des Projektes ist neben einer nachhaltigen Raumordnung die Verbesserung der Zusammenarbeit bei der Verhütung von Überschwemmungen (IRMA 2000: 1ff; LAMAN 2000: H-1ff). Zur Umsetzung der Initiative wurden mit dem Operationellen Programm: **Internationale Rhein-Maas-Aktivitäten** (IRMA) für die Jahre 1999 bis 2001 ca. 140 Mio. ECU bereitgestellt. Die Kartenerstellung der hochwassergefährdeten Bereiche Nordrhein-Westfalens stellt einen Teil des IRMA-Programmes dar. Das Vorhaben wird durch eine transnationale projektbegleitende Arbeitsgruppe unterstützt, die auch zur Optimierung des vereinfachten Verfahrens beitrug.

Europäische Länder, deren Naturraum mit Hochgebirgen ausgestattet sind, können aufgrund der höheren Risikoanfälligkeit auf Erfahrungen in der Ausweisung hochwassergefährdeter Bereiche und dem Risikomanagement zurückblicken (z. B.: Schweiz und Österreich: EGLI 1996; FINK 1999; GÜNTSCHL 1970; PETRASCHECK 1996).

In **Deutschland** spielt Wasser in der räumlichen Ordnung von jeher eine beherrschende Rolle: als unersetzliches Lebensmittel, schützenswertes Naturgut sowie als Produktionsmittel für Landwirtschaft, Gewerbe und Industrie. Standen früher die Gesichtspunkte der Wassermengenerwirtschaft im Vordergrund planerischer Überlegungen, so bestimmen heute vor allem die Probleme der Wassergüterwirtschaft das Handeln. Der Gewässerschutz stellt ein Interesse der öffentlichen Daseinsvorsorge dar. Dieser Sachverhalt findet sich in den Grundsätzen des **Raumordnungsgesetzes** des Bundes von 1998 (§ 2 Abs. 1 Nr. 8 ROG) wieder (JACOBITZ 1994: 1). Es regelt ebenfalls die drei Ebenen der Raumplanung: Bundes-, Landes- und Regionalplanung.

Die **Raumordnung des Bundes** beschränkt sich auf die Vorgabe von Grundsätzen und die Koordination von raumbedeutsamen Planungen und Maßnahmen in Abstimmung mit den Planungen der EU. Bei den Grundsätzen handelt es sich um allgemeine Aussagen zur Ent-

wicklung, Ordnung und Sicherung des Raumes als Vorgaben für nachfolgende Abwägungs- oder Ermessensentscheidungen (§ 3 Abs. 3 ROG). Ein Grundsatz explizit zum vorbeugenden Hochwasserschutz wurde 1998 in das ROG aufgenommen (Bundesgrundsatz): “Für den vorbeugenden Hochwasserschutz ist [...] zu sorgen, im Binnenland vor allem durch Sicherung und Rückgewinnung von Auen, Rückhalteflächen und überschwemmungsgefährdeten Bereichen.” (§ 2 Abs. 2 Nr. 8 ROG). Auf die Minimierung der Versiegelung und damit des Wasserabflusses in der Fläche zielt ein weiterer Grundsatz: “Die Naturgüter, insbesondere Wasser und Boden, sind sparsam und schonend in Anspruch zu nehmen; [...] bei dauerhaft nicht mehr genutzten Flächen soll der Boden in seiner Leistungsfähigkeit erhalten oder wiederhergestellt werden” (§ 2 Abs. 2 Nr. ROG). Diese Grundsätze können in der Praxis erst gezielt eingreifen, wenn die Bundesländer sie in einer konkreten sachlichen und räumlichen Regelung verankern. Die Träger der Landes- und Regionalplanung müssen den Hochwasserschutz abschließend textlich und zeichnerisch in die Raumordnungspläne aufnehmen. Die auf diese Weise festgesetzten Ziele der Raumordnung sind von den nachgeordneten Planungsebenen bei Genehmigungen und Zulassungsverfahren zu beachten bzw. sie sind einer Abwägung durch die untergeordneten Ebenen nicht mehr zugänglich.

Eine erhebliche Konkretisierung der Rahmenvorgaben zu den Inhalten der Raumordnungspläne wurde mit der Novellierung des ROG vom 1.1.1998 vorgegeben (§ 7 Abs. 4 ROG): Zur Steuerung von Raumfunktionen werden Gebietsabgrenzungen für die Raumordnungspläne empfohlen, durch die Nutzungsprioritäten im Raum geschaffen werden sollen (BUNDESAMT FÜR BAUWESEN UND RAUMORDNUNG 1998: 21). Folgende Abgrenzungen werden daraufhin innerhalb der Planwerke vorgenommen:

- **Vorranggebiete:** unabwägbar Ziele der Raumordnung, deren vorrangige Nutzung nicht vereinbare Funktionen ausschließt.
- **Vorbehaltsgebiete:** abwägbar Ziele der Raumordnung, bei Nutzungsentscheidungen soll der vorbehaltenen Nutzung ein besonderes Gewicht beigemessen werden.
- **Eignungsgebiete:** ebenfalls abwägbar Ziele der Raumordnung, Eignung eines Gebietes für raumbedeutsame Maßnahmen.

Für den vorbeugenden Hochwasserschutz sind vor allem die Vorrang- und Vorbehaltsgebiete von besonderer Bedeutung (FISCHER 1999: 157). Der Einsatz dieser Gebietsabgrenzungen ist in den Ländern sehr heterogen (Übersicht: UMWELTBUNDESAMT 1998: 108).

Die **Landesplanung** ist, wie die Raumordnung des Bundes ebenfalls, integrierend. Einzelne fachliche Gesichtspunkte sind nicht vorherrschend, sondern diese sollen mit dem Ziel eines gesamtäumlichen Ausgleichs in ihren Zielaussagen und Flächenansprüchen koordiniert werden. So wird der vom Bund vorgegebene Rahmen des Raumordnungsgesetzes durch die Landesplanungsgesetze ergänzt und konkretisiert. Die Regelungen der einzelnen Landesplanungen sind sehr heterogen (Zusammenstellung der Regelungen zum Hochwasserschutz der unterschiedlichen Landesplanungsgesetze in: UMWELTBUNDESAMT 1998: 46ff).

In **Nordrhein-Westfalen** bestehen Aussagen zum Hochwasserschutz im **Landesentwicklungsprogramm** (LEPro), das nach § 12 LPIG (Landesplanungsgesetz) Grundsätze und allgemeine Ziele der Raumordnung für die Gesamtentwicklung des Landes und für alle raumbedeutsamen Planungen und Maßnahmen enthält (RICHTER 1994: 73ff). Im LEPro normiert § 33 Abs. 1, daß die wasserwirtschaftlichen Erfordernisse, darunter auch der Schutz vor Hochwasser, miteinander in Einklang zu bringen sind. Der Abs. 2 räumt dem Wiederherstellen natürlicher Retentionsräume Vorrang gegenüber dem Bau von Rückhaltebecken ein. Ferner wird gefordert, notwendige Freiflächen für den Schutz vor Hochwasser zu erhalten bzw. wiederherzustellen. Die Uferbereiche oberirdischer Gewässer sind natürlich oder naturnah zu gestalten, zu entwickeln oder wiederherzustellen.

Darüber hinaus wird der Hochwasserschutz auch im **Landesentwicklungsplan** (LEP) erwähnt, der (gemäß § 13 LPIG auf der Grundlage des LEPro) die Ziele der Raumordnung für die Gesamtentwicklung des Landes festlegt. Eine der Forderungen (Kapitel B.III.4, Unterziel 4.25) lautet: „Überschwemmungsgebiete und Talauen der Fließgewässer sind als natürliche Retentionsräume zu erhalten und zu entwickeln. Einer Beschleunigung des Wasserabflusses ist entgegenzuwirken.“ Weiterhin wird verlangt (Punkt 4.36), daß in den Gebietsentwicklungsplänen „innerhalb der natürlichen Überschwemmungsbereiche keine weitere Inanspruchnahme von Freiraum zugunsten von Siedlungserweiterungen erfolgen darf.“

Im System der räumlichen Planungen kommt der **regionalen Ebene** eine zentrale Rolle zu. Während Bundes- und Landesgesetze generelle Leitbilder ohne bzw. nur mit sehr allgemeinem räumlichen Bezug vorgeben, werden in der kommunalen Bauleitplanung sehr konkrete Festlegungen unter dem Einfluß lokaler Nutzungsinteressen vorgenommen. Der Regionalplan hat die Aufgabe, die übergeordneten Vorgaben inhaltlich und räumlich zu konkretisieren: „In den Regionalplänen werden die Bereiche, z.T. sogar die Flächen und Standorte für landschaftsverbrauchende bzw. umweltbeeinträchtigende Nutzungen einerseits, für Freiraumfunktionen andererseits, wenn auch nicht parzellenscharf, so doch in ihrer Lage eindeutig räumlich festgelegt.“ Auf der regionalen Ebene besteht die Möglichkeit, fachliche Erforder-

nisse integrierend und unabhängig von kommunalen Egoismen festzulegen (KIEMSTEDT et al. 1993: 14). Die Gebietsentwicklungspläne entscheiden ggf. über konkurrierende Raumnutzungen. Auf dieser Ebene findet eine zeichnerische und textlich konkrete Festlegung von Zielen statt, die hinreichend genau sein muß, um Bindungswirkung für die nachfolgende **kommunale Bauleitplanung** (§ 1 Abs. 4 BauGB und § 20 Abs. 1 LPlG) zu entfalten. Regionalplanung läßt sich somit zusammenfassend als das systematische Bemühen um den besseren Zustand einer Sache, die kluge Vorbereitung sinnvollen Handelns, um bestimmte Ziele unter bestimmten Voraussetzungen zu erreichen, bezeichnen – also nicht nur das gedankliche Vorwegnehmen von Entscheidungen, sondern auch das faktische Vorwegdenken von Konsequenzen (FISCHER 1999: 155).

Gehörte die Forderung „Ziele der Regionalplanung sind – soweit möglich – präziser und verbindlicher zu formulieren“ 1993 noch zu einer der drei Grundforderungen für eine verbesserte Berücksichtigung ökologischer Belange in der Regionalplanung (FINKE et al. 1993: IX), so kann in Bezug auf die hochwassergefährdeten Bereiche diese Forderung in Nordrhein-Westfalen in naher Zukunft als nahezu erfüllt angesehen werden. Jedoch genügt allein diese Umsetzung nicht, um die rechtlichen Möglichkeiten einer regionalplanerischen Vorgabe auch auf kommunaler Ebene durchzusetzen. Verschiedene **Umsetzungsprobleme**, die zum Teil auch den Projektablauf der vorliegenden Forschungsarbeit beeinflussen, sollen im folgenden kurz vorgestellt werden:

- **Probleme rechtlicher Art:** Die Anpassungspflicht der Bauleit- und Fachplanungen (z.B. der Wasserwirtschaft) an die Erfordernisse der Raumordnung einschließlich der Versagung entgegenstehender Raumansprüche ist nur dann rechtlich gesichert, wenn die Vorgaben der Regionalpläne räumlich und sachlich hinreichend konkret sind. Diese Forderung ist für die Flächensicherung von Retentionsräumen problematisch, oft fehlen der Regionalplanung ausreichend fachliche Grundlagen für rechtssichere fachplanerische Festlegungen. Darüber hinaus sind die textlichen Festlegungen zum Hochwasserschutz und Darstellungen im Planwerk der Raumordnungspläne der Länder verschieden (UMWELTBUNDESAMT 1998: 105ff). Dementsprechend befindet sich die Ausweisung der unterschiedlich definierten hochwassergefährdeten Bereiche in verschiedenen Realisierungsstadien (GÖTTLE et al. 1999: 185ff). Auch ist der Widerspruch zu beachten, daß Ziele der Regionalplanung „abschließend abgewogen“ sein müssen (§ 3 Nr. 2 ROG), andererseits aber schon aufgrund ihres Maßstabes nicht parzellenscharf alle Belange (vor

allem nicht die privaten) in der Abwägung berücksichtigen können. Deshalb kann für die Zukunft bundesweit mit einem recht strikten Schutz der noch vorhandenen Retentionsräume (mit einigen Ausnahmen) gerechnet werden, eine großräumige Rückgewinnung an Retentionsraum ist jedoch nicht absehbar.

- **politischer Wille:** Obwohl auf der Grundlage von § 21 Abs. 1 LPIG formal die Möglichkeit besteht, von Gemeinden die Anpassung bereits genehmigter Bauleitpläne an die Ziele der Regionalpläne zu verlangen, ist der politische Widerstand oft enorm und die lokalen Interessen überwiegen. Entscheidend für die Durchsetzung der landesplanerischen Instrumente ist neben den fachlichen Grundlagen immer der politische Wille. „Vorbeugender Hochwasserschutz erfordert daher einen langen Atem, Mut und Durchsetzungskraft von politischen Mandatsträgern auf allen Ebenen.“ (UMWELTBUNDESAMT 1998: 45ff). Ein entscheidender Grund für die mangelnde Berücksichtigung der Belange des Hochwasserschutzes ist der fehlende politische Wille auf kommunaler Ebene: Es besteht weder die Bereitschaft, dem Belang Hochwasserschutz gegenüber dem Wunsch nach Wohnraum und Arbeitsplätzen Vorrang zu geben, noch sich außerhalb der Siedlungsgebiete überhaupt mit dem Thema zu beschäftigen.
- **Mangelnde Kooperation:** Ein großer Teil der Defizite bei der Umsetzung von Zielen des Naturschutzes auf regionaler Ebene ist auf die ungenügende Koordination und Kooperation aller Planungsbeteiligten zurückzuführen. Eine mögliche Lösung wäre das Praktizieren eines kooperativen Planungsprozesses (KIEMSTEDT et al. 1993: 150). So könnte die mangelnde Zusammenarbeit aller mit dem Hochwasserschutz beschäftigten Akteure (GREIVING 1999: 80) überwunden werden.

2.2.2 Wasserwirtschaft

Die Festsetzung der hochwassergefährdeten Bereiche kann nur in enger Kooperation zwischen der Raumplanung und der wasserwirtschaftlichen Fachplanung erfolgen. Die Wasserwirtschaft ist ebenfalls in verschiedene Planungsebenen (Abbildung 2) mit entsprechenden Kompetenzen unterteilt, die im folgenden erläutert werden.

Auf **europäischer Ebene** bestehen seit Anfang der 70er Jahre Vorgaben für den Schutz der Wasserqualität. Für den Hochwasserschutz relevante Regelungen liegen mit der EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRR; Kommission der EG, 1998) jedoch erst im Entwurf vor. Neben der Verbesserung der Wasserqualität und der nachhaltigen Wassernutzung, sieht sie eine

einzugsgebietsbezogene Betrachtungsweise der Oberflächengewässer vor, die sich unter anderem auf den Hochwasserschutz auswirken wird (UMWELTBUNDESAMT 1998: 32).

In **Deutschland** ist auf **Bundesebene** die gesetzliche Leitlinie der wasserwirtschaftlichen Fachplanungen in § 1 a Abs. 1 des **Wasserhaushaltsgesetzes** (WHG) fixiert: “Die Gewässer sind als Bestandteil des Naturhaushalts so zu bewirtschaften, daß sie dem Wohl der Allgemeinheit und im Einklang mit ihm auch dem Nutzen Einzelner dienen und daß jede vermeidbare Beeinträchtigung unterbleibt.” Wasserwirtschaftliche Maßnahmen sind auf das Gesamtinteresse der Allgemeinheit auszurichten, nicht allein auf das öffentliche Interesse an einer geordneten Wasserwirtschaft. Ihre Einordnung in das Gesamtkonzept der Raumplanung ist zwingend. Die vorhandenen gesetzlichen Grundlagen regeln die Zusammenarbeit zwischen Raumplanung und wasserwirtschaftlicher Fachplanung.

Nach Art. 75 Nr. 4 des Grundgesetzes besitzt der Bund die Rahmenkompetenz auf dem Gebiet der Wasserwirtschaft. Der Bund gibt dafür das WHG vor, das seit der 6. Novelle (in der Fassung vom 12.11.1996, BGBl) die Belange des Hochwasserschutzes verstärkt berücksichtigt. Der § 1 a Abs. 1 WHG stellt nunmehr klar, daß Gewässer als Bestandteile des Naturhaushalts und als Lebensraum für Tiere und Pflanzen zu sichern und so zu bewirtschaften sind, daß vermeidbare Beeinträchtigungen ihrer ökologischen Funktion unterbleiben. Die Regelungen zum Gewässerausbau wurde dahingehend geändert, daß naturnahe Gewässer erhalten bleiben und nicht naturnahe Fließgerinne soweit wie möglich renaturiert werden sollten. Im § 31 Abs. 5 WHG wird vorgegeben, daß “[...] eine erhebliche und dauerhafte, nicht ausgleichbare Erhöhung der Hochwassergefahr oder eine Zerstörung natürlicher Rückhalteflächen [...]” zu einer Versagung des Planfeststellungsbeschlusses oder der Plangenehmigung zu führen hat. Die für Überschwemmungsgebiete maßgebliche gesetzliche Grundlage (§ 32 Abs. 1 Satz 2 WHG) beinhaltet nunmehr ausdrücklich den Erhalt oder die Rückgewinnung natürlicher Retentionsflächen als Erfordernis.

Auf **nordrhein-westfälischer Landesebene** ist die Festsetzung von Überschwemmungsgebieten im **Landeswassergesetz** (LWG) geregelt. Das LWG füllt den vorgegebenen Rahmen des WHG aus. Der § 113 Satz 1 LWG besagt, daß wer in Überschwemmungsgebieten Veränderungen vornimmt, bei Gewässern 1. Ordnung der Genehmigung durch das zuständige Staatliche Umweltamt bedarf, ansonsten durch die Umweltbehörde. Im übrigen normiert § 114 LWG Genehmigungsvorbehalte und Nutzungspflichten für Grundstücke in Überschwemmungsgebieten, direkte Verbote werden jedoch nicht ausgesprochen.

Die gesetzlichen Überschwemmungsgebiete der wasserwirtschaftlichen Fachplanung (nach § 32 WHG) werden auf **Städte- bzw. Gemeindeebene** ausgewiesen und können bei Existenz

in die Regionalpläne nachrichtlich übernommen werden. Die Überschwemmungsgebiete werden bei Bedarf durch wasserbauliche Ingenieurbüros modelliert (SÖNNICHSEN 2000: F-153ff). Die Bearbeitung der einzelnen Einzugsgebiete ist aufgrund der aufwendigen Geländevermessung und Modellkalibrierung kosten- und zeitaufwendig, darüber hinaus ist die Ausweisung der Überschwemmungsgebiete mit einem hohen organisatorischen Aufwand verbunden. Insgesamt ist deshalb nur ein kleiner Teil derjenigen Flächen ausgewiesen, die aus fachlicher Sicht notwendig wären (BUNDESAMT FÜR BAUWESEN UND RAUMORDNUNG 1998: 20ff). Eine landesweite Ausweisung kann deshalb nur langfristig abgeschlossen werden. Die Überschwemmungsgebiete unterscheiden sich von den hochwassergefährdeten Bereichen hinsichtlich Ermittlungsgenauigkeit, Planungsschärfe, Rechtswirkung und faktischer Bedeutung in der kommunalen Planungspraxis und kommunalpolitischen Realität (FISCHER 1999: 160)(Tabelle 1).

	Hochwassergefährdeter Bereich	Überschwemmungsgebiet
Planungsebene	Gesamtplanung Land / Regionalplanung	Fachplanung Wasserwirtschaft / Lokale Bauleitplanung
Verwaltungsebene	Bezirksregierung	Gemeinde bzw. Stadt
Karte	Gebietsentwicklungsplan	Flächennutzungsplan / Bauleitplan
Maßstab	1 : 50.000	1 : 5.000
Genauigkeit	nicht parzellenscharf	parzellenscharf

Tabelle 1: Unterscheidung der gesetzlichen Überschwemmungsgebiete der wasserwirtschaftlichen Fachplanung von den hochwassergefährdeten Bereichen der Regionalplanung.

Obwohl die rechtlichen Grundlagen zur Zusammenarbeit zwischen Raumplanung und Wasserwirtschaft als ausreichend bezeichnet werden können, sind erhebliche **Schwierigkeiten** festzustellen. Es ist bisher weder der Fachplanung gelungen, die Gewässer zu schützen, noch hat es die Raumplanung vermocht, die konkurrierenden Raumansprüche nach ökologischen Erfordernissen zu steuern. Verantwortlich sind Mängel in der Planungspraxis, die im folgenden erläutert werden (JACOBITZ 1994: 66ff):

- Planungen laufen getrennt voneinander ab bzw. keine Abwägung der wasserwirtschaftlichen Fachplanung bei Eingang in die Regionalplanung.
- Fehlen genauer Zielvorgaben der Raumordnung, wie z.B. Indikatoren oder Richtwerte.

- Raumplanungsbehörden stehen keine fachplanerischen Grundlagen zur Verfügung, z.B. durch Personalmangel.
- Ambivalentes Verhältnis zwischen Raumplanung und wasserwirtschaftlicher Planung, unterschiedliche Sprache, Denk- und Arbeitsweise der Beteiligten.

Diese suboptimale Planungspraxis, vor allem des zuletzt angeführten Problemkreises, beeinflusste auch den Projektablauf der hier vorliegenden Verfahrensentwicklung. Eine Aufforderung der Raumordnung an die wasserwirtschaftliche Fachplanung zur Ausweisung hochwassergefährdeter Bereiche auf Regionalplanungsebene bestand schon seit einigen Jahren. Seitens der Wasserwirtschaft erfolgte jedoch kein Beitrag zur Erarbeitung einer Übergangslösung (neben der Ausweisung von Überschwemmungsgebieten), die zur kurzfristigen Flächensicherung in die Regionalpläne hätte integriert werden können. Erst nach Vergabe eines entsprechenden Auftrages vom MURL an eine externe Institution, das Geographische Institut der Universität Bonn, kam es zur Integration der wasserwirtschaftlichen Fachplanungen in die interdisziplinäre Projektarbeit.

2.3 Stand der Forschung der Hochwassermodellierung

Sowohl die räumliche als auch die zeitliche Skala der Hochwasserbetrachtung hat im Laufe der Zeit eine Ausdehnung erfahren: Die **räumliche Dimension** vergrößerte sich von punktuellen Messungen über Meßnetze, Niederschlag / Abfluß-Modellierung im Mesoskalabereich bis zu einem regionalen Maßstab durch Integration von Satellitenbildern (PASCHE 1996). Die **zeitliche Betrachtung** des Phänomens durch Einzelmessungen wurde ersetzt durch langjährige Meßreihen, parameterreiche Niederschlag / Abflußmodellierungen (BRETSCHNEIDER et al. 1993: 266ff) und Wasserstandsberechnung, der Nutzung leistungsstarker elektronischer Datenverarbeitung, Geographischer Informationssysteme, digitaler Höhenmodelle und flächendeckender Satellitenbilder (CONSUEGRA et al. 1995; MORRIS UND FLAVIN 1996). Dies stellt eine Entwicklung von der reinen Beobachtung über den Aktualismus bzw. die Prozessmodellierung bis hin zur Prognostik dar. Eine Übersicht der angewandten Modellierungsmöglichkeiten gibt der WISSENSCHAFTLICHE BEITRAG DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN (1997: 110ff) bzw. die Leitfibel vorbeugender Hochwasserschutz (BUNDESAMT FÜR BAUWESEN UND RAUMORDNUNG 1998: 73ff). Eine grundsätzliche Klassifikation hydrologischer Modellierungsansätze ist in REFSGAARD (1996: 27ff) enthalten. Die Qualität der Aussage über die Hochwasserabgrenzungen hat sich von der Kartierung einmalig-

ger Extremereignisse zur dynamischen Modellierung von Bemessungshochwassern entwickelt.

Die Wahl der Methodik zur Hochwassermodellierung ist also stark abhängig von der **Betrachtungsskala**. Der in dieser Arbeit vorgegebene Maßstab befindet sich mit Einzugsgebietsgrößen von ca. 100 km² und der Modellierung von statischen Einzelereignissen (statistische 100jährige Wahrscheinlichkeit) im unteren Bereich der Mesoskala. Für diesen Maßstab stellt die aktuelle ingenieurtechnische Praxis zur Berechnung von Überschwemmungsgebieten (siehe Kapitel 2.2.2) eine Kombination der **hydrologischen und hydraulischen Modellierung** dar. Für die hydrologische Modellierung schreibt das Land NRW die Beachtung von Standards nach der "Standard Leistungsbeschreibung für mathematische Modelluntersuchungen von Oberflächengewässern des Landes NRW" (SMO) vor. Diese Standards werden mit der konventionellen Niederschlag / Abfluß (N / A) - Modellierung zur Berechnung eines speziellen Bemessungsabflusses erfüllt. Für die darauffolgende hydraulische Modellierung der eigentlichen Wasserstandshöhen ist in NRW kein spezielles Verfahren vorgeschrieben. Die Erfahrungen bei Anwendung der hydrologisch / hydraulischen Modellierung bezüglich kleinerer Einzugsgebiete ist aufgrund der dort meist fehlenden Datenlage gering, die meisten Modellierungen liegen in mittleren bis großen Einzugsgebieten vor.

Die **N / A - Modellierung** ist ein physikalisch basierter Modellansatz zur Ermittlung des Abflusses. Der gesamte hydrologische Kreislauf vom Niederschlag über die Verdunstung, Versickerung im Boden, Fließvorgänge auf der Oberfläche und im Boden bis hin zum Wellenablauf im Gewässer wird rechnerisch nachgebildet. Ergebnisse dieser Modellierung sind sowohl die räumliche Verteilung der Abflußhöhen als auch die zeitliche Dynamik der Abflußwelle (PASCHE 1996: 144). Die folgende **hydraulische Wasserspiegellagenberechnung** setzt die durch die hydrologische Modellierung erhaltenen Abflußwerte (BRETSCHNEIDER et al. 1993: 268ff) in die räumlich ausschlaggebenden Hochwasserstände um. In der hydraulischen Modellierung werden gegliederte Überschwemmungsräume als eine Reihe von Speicherräumen behandelt, deren Volumen und hydraulische Verbindung den zeitlichen Verlauf der Überflutung bestimmen. Basis der hydraulischen Berechnung sind Talquerprofile, die sich über den Gewässerschlauch und die überfluteten Vorlandflächen erstrecken. Diese Profile werden durch aufwendige tachymetrische Neuvermessungen erhoben. Die in der Praxis meist verwendeten eindimensionalen Spiegellinienmodelle fassen das Gewässer als eine Stromröhre auf, in der die Strömung im Fließquerschnitt durch eine mittlere Fließgeschwindigkeit, einen horizontalen Wasserstand und eine parallel zur Flußachse gerichtete Strömung charakterisiert werden kann. Ergebnisse der Wasserspiegellagenberechnung stellen absolute Über-

schwemmungshöhen bestimmter Jährlichkeiten an jedem Talquerprofil dar, die in topographische Karten eingetragen werden. Unter Zuhilfenahme von Höheninformationen werden die linienförmigen Überschwemmungshöhen der Querprofile zu einem flächenhaften Überschwemmungsgebiet interpoliert. Über die eindimensionalen Spiegellinienmodelle hinaus gibt es dynamische zweidimensionale Berechnungsansätze, die aufgrund ihrer Parameteransprüche jedoch selten verwendet werden. Das zu entwickelnde vereinfachte Verfahren basiert deshalb auf den Erkenntnissen der eindimensionalen Spiegellinienmodelle.

Durch die verbreitete Anwendung und Verfügbarkeit Geographischer Informationssysteme und entsprechender Eingangsdatensätze kommt es immer häufiger zu einer **Implementierung vereinfachter Hochwasserberechnungsverfahren**, die auf den unterschiedlichsten Skalen arbeiten, bzw. Genauigkeitsanforderungen bezüglich ihres Ergebnisses und Einsatzgebietes haben. Oft kommt es zur Integration eines hydrologischen Modells innerhalb eines Geographischen Informationssystems und / oder einer nachgeschalteten Risikoanalyse des berechneten Überschwemmungsereignisses auf Basis weiterer ins System integrierter Raumdaten. Es werden sowohl zeitferne Risikoanalysen von Überschwemmungsereignissen (RÖSGEN 2000; RÖTTCHER UND TÖNSMANN 1999: 34ff) als auch zeitnahe Modellierungen zum Katastrophenmanagement durchgeführt (BEYENE et al. 2000: F-107ff; CORREIA et al. 1998: 229ff; CORREIA et al. 1999a: 23ff; CORREIA et al. 1999b: 1ff; FLÜGEL 2000: 14ff; HEINRICH UND KERN 2000: 4ff; MAHLAU et al. 2000: 315ff; OBERLE et al. 2000: G-145ff; MINISTERIUM FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN 2000: 5ff; SACHER UND NAUJOKS 1998: 5ff).

2.4 Methodik der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und die Evaluierung einer Methode zur Abgrenzung hochwassergefährdeter Bereiche. Das zu entwickelnde Verfahren stellt eine vereinfachte Bearbeitung nach dem aktuellen Stand der Modellierungstechnik dar, die im vorangegangenen Kapitel bereits dargestellt wurde. Die wesentlichen Unterschiede liegen im Verzicht auf die terrestrische Profilvermessung und in der vereinfachenden Annahme stationär gleichförmiger Fließverhältnisse. Die Grundlage für die praktische Anwendung des vereinfachten Verfahrens stellt eine fundierte wissenschaftliche Bewertung der Ergebnisse dar. Die Rahmenbedingungen zur Entwicklung des Verfahrens sind durch den Anwendungsbezug vorgegeben. Es sollen ausschließlich flächendeckende und aktuell verfügbare Datengrundlagen Nordrhein-Westfalens herangezogen werden. Die hydrologische Modellierung wird durch den Einsatz

regionalisierter Abflußschätzwerte ersetzt. Die tachymetrische Neuvermessung der Talquerprofile bei der hydraulischen Modellierung wird durch den Einsatz der Geometriedaten aus dem digitalen Höhenmodell ersetzt. Auch alle weiteren Modellierungsparameter werden vom digitalen Höhenmodell abgeleitet. Darüber hinaus entstammen die Bauwerkspositionen der Deutschen Grundkarte (DGK 5).

Die Methodik wurde im Untersuchungsgebiet der Lutter entwickelt (Dokumentation in den Projektberichten: DIKAU et al. 1999a – c UND DIKAU et al. 2000). Dort liegen Referenzdaten in Form des Datensatzes einer aktuellen ingenieurtechnischen, hydrologisch / hydraulischen Überschwemmungsgebietsabgrenzung vor (HYDROTEC, BACH+PARTNER, 1995, im Auftrag der Stadt Bielefeld). Die Ergebnisse dieser Untersuchung wurden im Vergleich zum entwickelten vereinfachten Verfahren als qualitativ hochwertigere Ergebnisse angenommen und als Referenzdaten zur empirischen Optimierung der Methodik herangezogen ('trial-and-error manual calibration': REFSGAARD UND STORM 1996: 47ff). Einen schematischen Überblick des gesamten Optimierungsverfahrens zeigt die Abbildung 3:

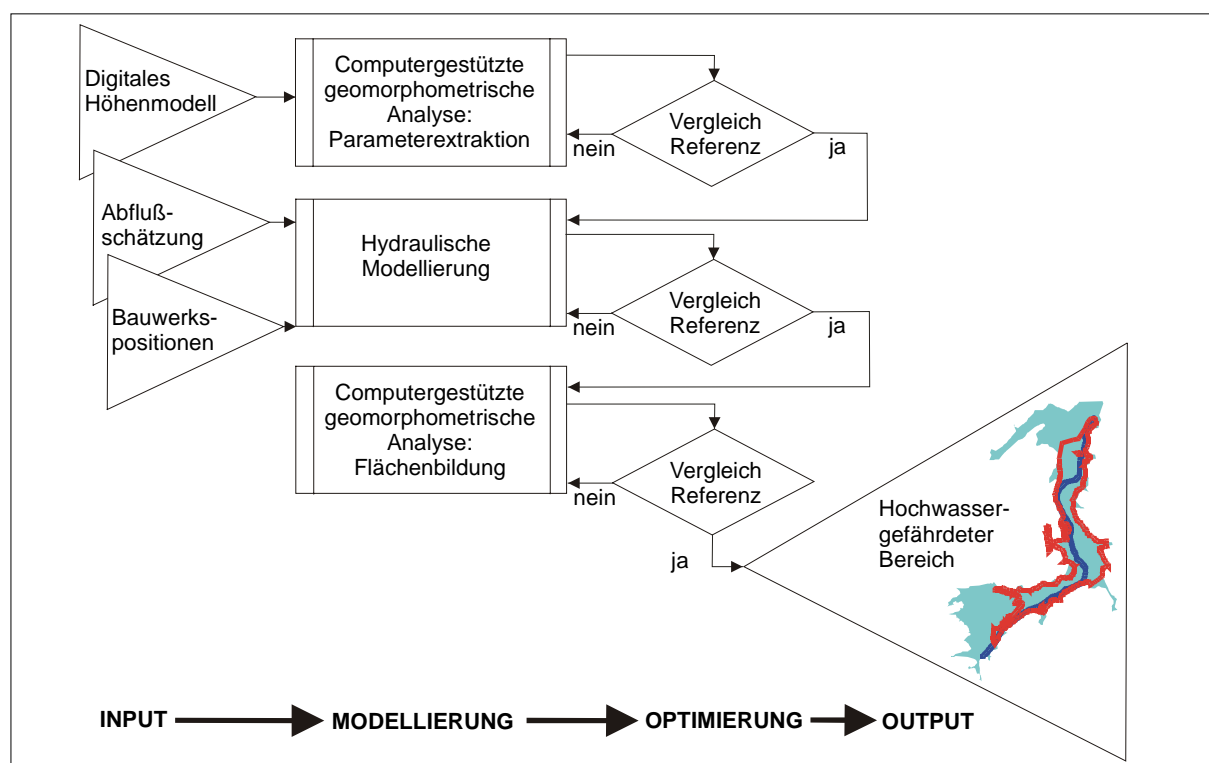


Abbildung 3: Flußdiagramm der Verfahrensentwicklung (vereinfachte Darstellung).

Im folgenden werden die theoretischen Grundlagen der computergestützten Geomorphometrie und der hydraulischen Modellierung in Hinblick auf die eigene Anwendung der Methoden erläutert.

2.4.1 Computergestützte Geomorphometrie

Durch die computergestützte Geomorphometrische Analyse werden Parameter und Objekte vom digitalen Höhenmodell abgeleitet, die im Rahmen der vorliegenden Fragestellung sowohl zur hydraulischen Modellierung als auch zur Diskretisierung der punktuellen Ergebnisse in die Fläche benötigt werden (DIKAU UND FRIEDRICH 2000: 50ff; GÜNDRA et al. 2000: 114ff; SCHMIDT et al. 1998: 55ff).

Die Geomorphometrie beschreibt die geometrisch-topologische Struktur der Landoberfläche durch quantitative Messungen. Ziel der computergestützten Geomorphometrischen Analyse ist die **Ableitung linien- und flächenhafter geomorphometrischer Objekte aus den primären geomorphometrischen Parametern**. Zur Klärung der geomorphometrischen Grundbegriffe folgt eine kurze Erläuterung (DIKAU UND FRIEDRICH 2000: 50ff; SCHMIDT UND DIKAU 1999: 158ff): Der Raumpunkt ist das Grundelement der Geomorphometrie und läßt sich eindeutig durch das Tripel (x, y, z) darstellen. Bei der Verwendung rasterbasierter digitaler Höhenmodelle ist der Raumpunkt einer Rasterzelle gleichzusetzen, dessen z-Wert eine repräsentative Höhe der betreffenden Fläche darstellt (Abbildung 4). In der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich rasterbasierte Algorithmen angewendet. Die im Gegensatz dazu in der hydraulischen Fragestellung häufig verwendete TIN-basierte Herangehensweise (Triangulated Irregular Network oder 'unregelmäßige Dreiecksvernetzung', NICKEL 1996: 129) ist komplexer und erfordert eine intensive Datenvorverarbeitung (BEYENE et al. 2000: 197). Beim rasterbasierten Ansatz entstehen Flächen und Linien durch die Zuordnung mehrerer Raumpunkte zu einer Klasse, sie stellen zusammengesetzte geomorphometrische Grundelemente dar. Eine Struktur entsteht durch die räumliche Anordnung der oben beschriebenen geomorphometrischen Grundelemente. Es entstehen Muster bestimmter Eigenschaften.

Primäre geomorphometrische Parameter sind räumlich kontinuierlich verteilte reliefquantifizierende Größen (z.B. Höhe). Durch verschiedene Berechnungsmethoden lassen sich primäre geomorphometrische Parameter unterschiedlicher Komplexitätsstufen unterscheiden: **Einfache** primäre geomorphometrische Parameter werden durch eine 'moving window' Operation ('gleitendes' oder 'bewegliches Fenster') erzeugt. Diese Operation bewirkt eine Filtrierung, die den Wert einer Rasterzelle in Bezug auf ihre Nachbarzellen so verändert, daß bestimmte Strukturen und Erscheinungen deutlicher hervortreten (z.B. Fließrichtung) oder auch unterdrückt werden (z.B. abflußlose Senken). **Komplexe** primäre geomorphometrische Parameter enthalten geomorphometrische Strukturinformationen und werden durch Analyse der

Gesamtdatenmatrix erzeugt (z.B. Einzugsgebietsgröße oberhalb einer Rasterzelle)(Abbildung 4).

Primäre geomorphometrische Parameter werden zur Ableitung der im vereinfachten Verfahren benötigten **Tiefenlinie** gebraucht. In einem ersten Schritt werden die abflußlosen Senken des digitalen Höhenmodells aufgefüllt. Sie stellen meist Modellfehler dar und würden zu einer diskontinuierlichen Berechnung der Tiefenlinien führen. Der zweite Schritt stellt die Bestimmung der Fließrichtung jeder Rasterzelle auf dem senkenfreien digitalen Höhenmodell dar. Danach wird die Größe des Einzugsgebietes jeder Zelle berechnet. Der Algorithmus zur Ableitung dieser Größe berechnet für jede Rasterzelle die Anzahl der höher bzw. gleichhoch gelegenen Zellen, die in sie entwässern. Der in ArcView implementierte Algorithmus nimmt keine Abfluaufteilung vor, sondern führt den Gesamtabfluß einer höhergelegenen Rasterzelle der tiefsten Zelle zu. Rasterzellen mit hohen Werten bezeichnen Flächen mit konzentriertem Abfluß, entsprechend befinden sich die höchsten Werte entlang der Tiefenlinien. Zur Ableitung des Tiefenliniennetzes wird ein Schwellenwert bezüglich dieser Konzentrationswerte gesetzt. Alle Rasterzellen mit Werten oberhalb des Schwellenwertes sind Bestandteil des abgeleiteten Tiefenliniennetzes. Der Schwellenwert liegt bei 200000 Rasterzellen, dies entspricht einer Mindesteinzugsgebietsfläche von 20 km² und damit den Vorgaben des vereinfachten Verfahrens. Die Tiefenlinie stellt ein linienhaftes geomorphometrisches Objekt dar.

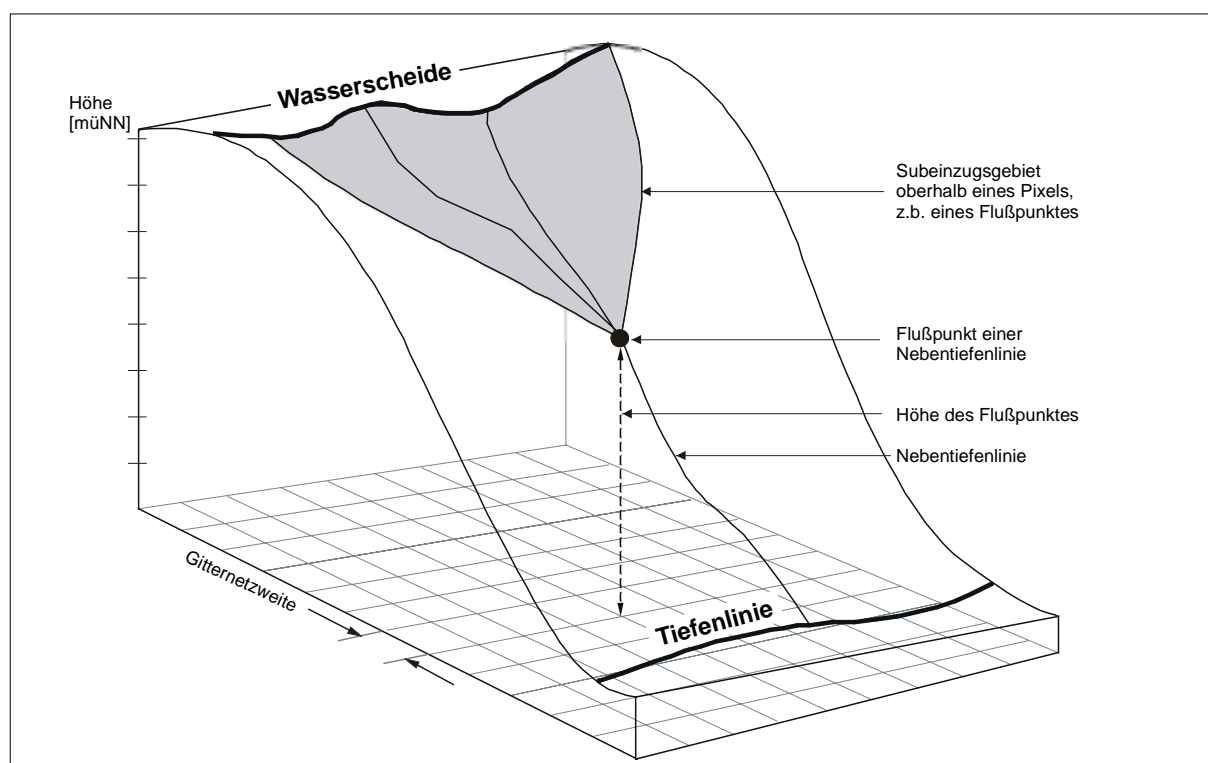


Abbildung 4: Ableitung verschieden komplexer Parameter und Objekte vom digitalen Höhenmodell (verändert nach: Dikau und Friedrich 2000: 59).

Zusammenfassend sind die wichtigsten abgeleiteten Parameter und Objekte, deren Sensitivität bezüglich der Modellierungsergebnisse untersucht werden, folgende: **Tiefenlinie** (Verlauf des Gerinnes auf dem digitalen Höhenmodell), **Fließrichtung** (bzw. Richtung der Querprofile), **Sohlgefälle** (der Flußpunkte), **Einzugsgebietsgröße oberhalb einer Rasterzelle** (zur Diskretisierung der Ergebnispunktdata in die Fläche).

2.4.2 Hydraulische Modellierung

Die hydraulische Modellierung ermittelt die zu einem speziellen Abfluß gehörige Wasserstandshöhe in Abhängigkeit zum durchflossenen Querprofil. Anhand der Koordinaten eines Flußpunktes und dessen Fließrichtung wird die Richtung des zu berechnenden Querprofils ermittelt. Die Flußpunkte stellen dabei die jeweils tiefsten Punkte des betrachteten Querprofiles dar und sind somit die niedrigsten Sohlpunkte des Gewässers. Die Flußpunkte werden entlang der beiden zu berechnenden Gerinne (siehe Kapitel 3.3.2.1.1) verschieden abgeleitet: Zum einen werden die Flußpunkte gleichgesetzt mit den Pixeln der Tiefenlinie des digitalen Höhenmodells, zum anderen werden Punkte entlang der tatsächlichen Gewässerlinie gesetzt. Die räumliche Dichte der gesetzten Flußpunkte ist entscheidend für die Qualität des Ergebnis (siehe Kapitel 3.3.1.4). Die Fließrichtung des Gewässers an den jeweiligen Flußpunkten wird anhand des räumlichen Verlaufes des Gewässers auf Basis des digitalen Höhenmodells abgeleitet (siehe Kapitel 3.3.2.1.3). Entlang der Profillinie des ermittelten Querprofils werden in wählbaren Abständen – der Horizontalschrittweite (siehe Kapitel 3.3.1.1) – die Höhenwerte aus dem digitalen Höhenmodell ausgelesen und horizontal integrativ der Gerinnequerschnitt und der benetzte Umfang berechnet.

Aufgrund der photogrammetrischen Herstellungsart fehlt im DGM 5 die Abbildung eines Gerinnekastens, der sowohl den Flußschlauch selber als auch das umgebende Vorland bis zur oberen Böschungskante umfaßt (siehe Kapitel 3.5.1.1). Um dieses Defizit auszugleichen, werden Versuche zum Einsatz angenommener Kästen durchgeführt (siehe Kapitel 3.3.1.6).

Ausgehend von dem ersten Querschnitt wird der Wasserstand iterativ um eine fest eingestellte Schrittweite – der Vertikalschrittweite (siehe Kapitel 3.3.1.2) – erhöht und für den jeweiligen Stand wiederum auf die gleiche Weise die Gerinnegeometrie auf der Basis des digitalen Höhenmodells ermittelt. Aus diesen geometrischen Daten wird der hydraulische Radius ermittelt (siehe Kapitel 3.3.1.3), der zusammen mit dem Sohlgefälle zur Berechnung der Fließgeschwindigkeit nach der **empirischen Fließformel von Manning-Strickler** (BRETSCHNEIDER UND SCHULZ 1985: 18ff) herangezogen wird. Das Sohlgefälle stellt eine

Ableitung des digitalen Höhenmodells dar (siehe Kapitel 3.3.2.1.2). Die Grundannahme der Fließformel von Manning-Strickler ist ein **stationär gleichförmiger** Abfluß. Eine stationäre Fließbewegung gleicht einem zeitinvarianten Durchfluß, d.h. es wird kein zeitlicher Ablauf bzw. keine sogenannte Ganglinie modelliert. Ein gleichförmiges Fließen setzt einen Fließabschnitt von gleicher Form und Beschaffenheit und damit auch mit gleichen Wassertiefen und mittleren Geschwindigkeiten voraus (DYCK UND PESCHKE 1995: 256). Für stationär gleichförmige Fließverhältnisse sind in der Literatur und Anwendung im wesentlichen zwei empirische Formeln gängig. Das ist einerseits die von Manning entwickelte und von Strickler mit neuen Koeffizienten versehene Fließformel für die mittlere Strömungsgeschwindigkeit v_m in Abhängigkeit von Sohlgefälle (I_s), hydraulischem Radius (r_{hy}) und Oberflächenrauheit (k_{str}) (BRETSCHNEIDER UND SCHULZ 1985: 18ff) und die Formel nach Darcy-Weisbach (DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU E.V. 1991: 2ff, PATT et al. 1998: 144ff), die im wesentlichen dieselben bekannten Größen voraussetzen. Es erfolgte die Verwendung der Formel nach Manning-Strickler, da für natürliche Gerinne empirisch ermittelte Rauigkeits-Beiwerte publiziert und praxiserprobt sind (siehe Kapitel 3.3.1.5). Die Fließformel zur Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit v_m lautet (Abbildung 5):

$$v_m = k_{str} * r_{hy}^{2/3} * I_s^{1/2}$$

Der Abfluß Q bestimmt sich unter Heranziehung der mittleren Fließgeschwindigkeit v_m und dem durchflossenen Querschnitt F zu:

$$Q = v_m * F$$

Der hydraulische Radius r_{hy} bestimmt sich als Funktion des durchflossenen Querschnitts und des benetzten Umfangs U (SCHRÖDER et al. 1994: 98):

$$r_{hy} = F * U^{-1}$$

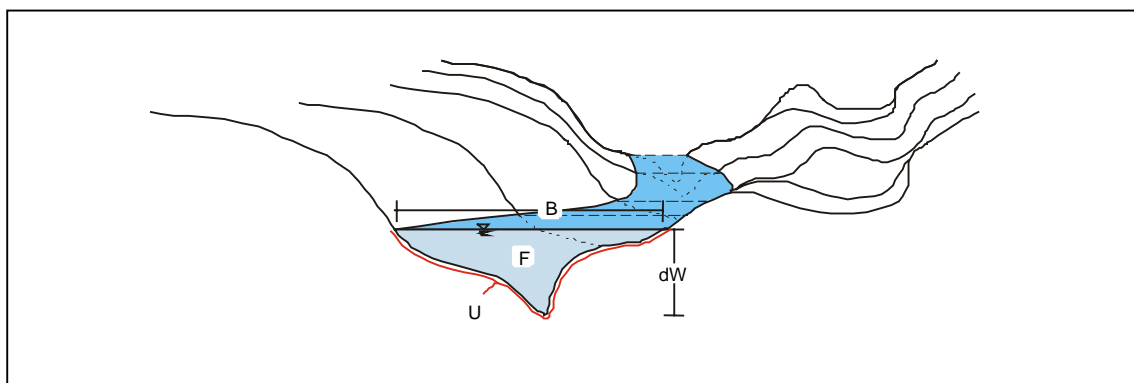


Abbildung 5: Geometrische Größen der Gerinnehydraulik, Abfluß und Fließformel nach Manning-Strickler (QUELLE: DIKAU et al. 2000: 12).

Für die hydraulischen Berechnungen ist zunächst die Gerinnegeometrie, d.h. der durchflossene Querschnitt F und der benetzte Umfang U für das Profil zu ermitteln. Zur Ermittlung der Geometrie wird anhand der Koordinaten eines Flußpunkts, für den eine Profilberechnung erfolgen soll, und der jeweiligen Fließrichtung die Lage und Orientierung eines Querprofils ermittelt. Entlang dieser Profillinie werden in festen Abständen (Horizontalschrittweite) die Höhenwerte aus dem DGM 5 ausgelesen und horizontal integrativ der Gerinnequerschnitt (F) und der benetzte Umfang (U) berechnet (Abbildung 6).

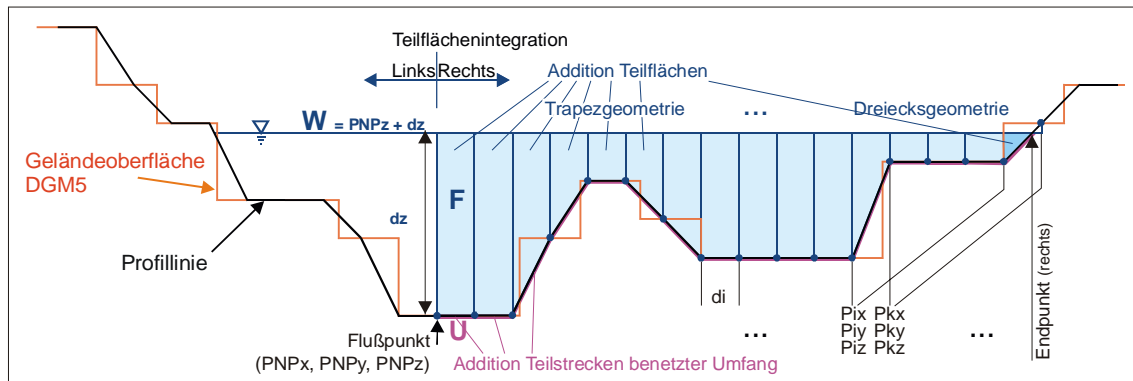


Abbildung 6: Ermittlung von Fließquerschnitt und benetztem Umfang innerhalb der Gerinnegeometrie (QUELLE: DIKAU et al. 2000: 13).

Profilabschnitte, die aufgrund der Rasterung im Höhenmodell völlig horizontal abgebildet sind, werden dabei aus trigonometrischen Gründen geringfügig geneigt (max. 2 ‰). Dieser modelltechnische Eingriff bringt gleichzeitig den Vorteil mit sich, daß auf solchen horizontalen Flächen stufenlos Zwischenwerte der Überschwemmungsbreite unterhalb der Stufung durch die Rasterzellengröße ermöglicht werden. Es wird vermieden, daß eine erhebliche Zunahme an Überschwemmungsbreite auftritt, wenn eine größere völlig horizontale Fläche rechnerisch um einen sehr kleinen Betrag überschwemmt wird. Für die Höhenkorrektur wird zunächst die Breite des horizontalen Bereichs gemessen. Anschließend wird jedem Punkt in diesem Bereich ein geringer Wert hinzuaddiert (Abbildung 7).

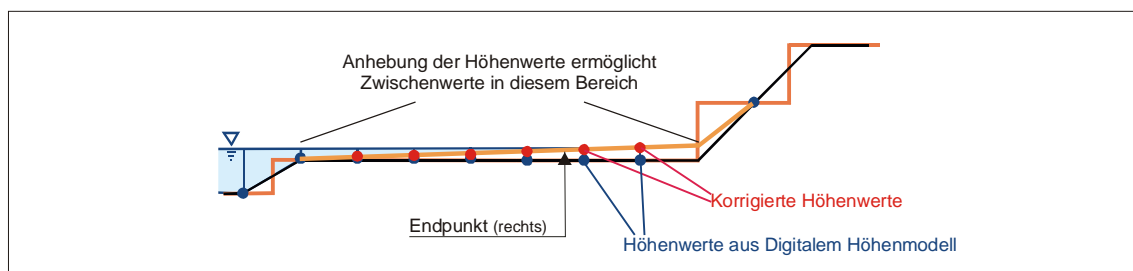


Abbildung 7: Höhenkorrektur des digitalen Höhenmodells innerhalb der Profilgeometrie in sehr flachen Bereichen (QUELLE: DIKAU et al. 2000: 13).

Ausgehend von der Gerinnesohle oder von einem Startwert wird der Wasserstand iterativ um jeweils eine fest eingestellte Schrittweite erhöht (Vertikalschrittweite) und für den jeweiligen Stand die Gerinnegeometrie wie beschrieben ermittelt. Aus der Geometrie wird der hydraulische Radius (r_{hy}) berechnet und dann zusammen mit dem Sohlgefälle (I_s) unter Anwendung der genannten Gleichung nach Manning-Strickler zu jedem Wasserstand der Abfluß ermittelt. Erreicht der Abfluß den vorgegebenen Wert für das Bemessungsereignis (HQ_{100}), wird die Iteration beendet und der zuletzt angenommene Wasserstand mit den Endpunktkoordinaten entlang des Querprofils als Ergebnis (HW_{100}) ausgegeben (Abbildung 8).

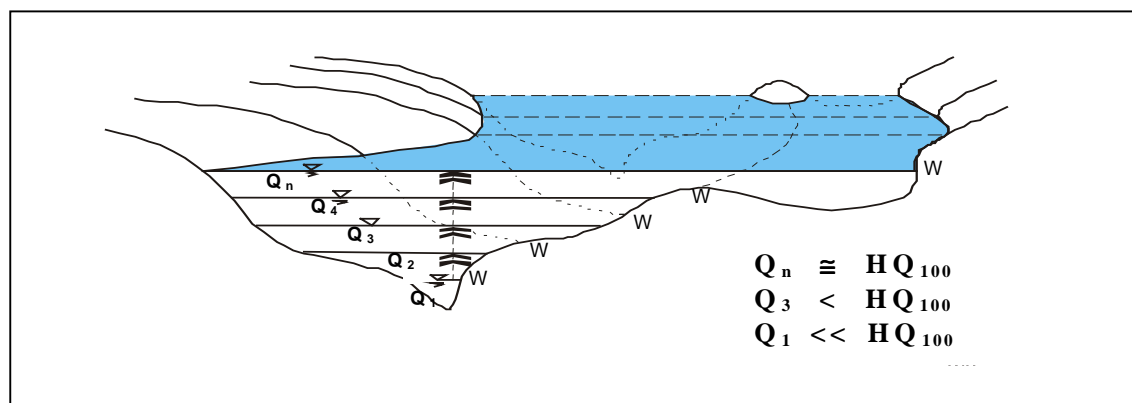


Abbildung 8: Iterationen der hydraulischen Berechnungen (QUELLE: DIKAU et al. 2000: 14).

Fließquerschnitt und Fließgeschwindigkeit ergeben den zu einem Wasserstand zugehörigen Abfluß. Überschreitet der ermittelte Abfluß den vorgegebenen Wert für das Bemessungsereignis, so wird die Iteration beendet und der zuletzt ermittelte Wasserstand mit den Endpunktkoordinaten des hochwassergefährdeten Bereiches entlang des Querprofils ausgegeben. Dieses Ergebnis stellt den Eingangsdatensatz zur weiteren computergestützten geomorphometrischen Analyse dar.

Zusammenfassend sind die wichtigsten Parameter und variablen Modellkomponenten, die einzeln in ihrer Sensitivität bezüglich der Modellierungsergebnisse untersucht werden, folgende: **Horizontal- und Vertikalschrittweite, Hydraulischer Radius, Querprofilabstand, Rauigkeitsbeiwert, Gerinnekasten, Rückstaubereich.**

2.5 Werkzeuge

Als **Software** wurde ein Geographisches Informationssystem eingesetzt. Ein sowohl innerhalb der oberen Landesbehörden Nordrhein-Westfalens als auch in den wasserbaulichen Ingenieurbüros weit verbreitetes Geographisches Informationssystem stellt 'ArcView' dar. Es

wurde zusammen mit zwei kommerziellen Erweiterungen: dem 'Spatial Analyst' (zur Bearbeitung von Rasterdaten) und dem 'Dialog Designer' (zur Erstellung benutzerdefinierter Eingabemasken) zur Entwicklung des Verfahrens genutzt (Produkte des 'Environmental System Research Institute', ESRI, Redlands/California, ESRI 1997). Die Entwicklung der eigenen Softwareerweiterung erfolgte unter dem Betriebssystem UNIX mit der 'ArcView' Version 3.0b und dem 'Spatial Analyst' 1.0a. Die PC-Anpassung der Software wurde mit der 'ArcView' Version 3.1 und dem 'Spatial Analyst' Version 1.1 vorgenommen. Zur Herstellung der Applikation stand die ArcView interne objektorientierte Programmiersprache 'Avenue' zur Verfügung (HERTER et al. 1999). Darüber hinaus wurde bei der Programmerstellung auf nicht kommerzielle Erweiterungen, die im Netz auf der Homepage der Entwicklerfirma erhältlich sind (<http://gis.esri.com/arcscripts/beginsearch.cfm?lang=Avenue>), zurückgegriffen.

Als **Hardware** wurde eine 'sun sparc ultra 2' unter dem Betriebssystem 'sun solaris 5.2' (SYSTEM V, UNIX) genutzt bzw. ein 'PC x86' mit Windows NT 4.

3 Hochwassermodellierung

Nach einer einleitenden Darstellung der drei Untersuchungsgebiete und deren Eingangsdatensätze, wird die Vorgehensweise zur Entwicklung des vereinfachten Verfahrens erläutert. Es folgt eine detaillierte Darstellung der einzelnen Entwicklungsschritte. Die Methodik wird unter Verwendung des Eingangsdatensatzes der Lutter entwickelt und anhand der vorliegenden Referenzdaten empirisch optimiert. Die Referenzdaten stellen Ergebnisse auf Basis aufwendigerer Modellierungen dar und werden als die qualitativ hochwertigere Ergebnisse angenommen. Die beiden weiteren Untersuchungsgebiete (Brandenbäumer / Geseker Bach und Werse) dienen der Evaluierung der getroffenen vereinfachenden Annahmen. Es folgt ein kurzer Überblick zur programmtechnischen Umsetzung in das Softwarepaket ‚MOHB‘. Nach einer abschließenden Diskussion aller eingehenden Fehlerquellen werden die Endergebnisse der drei Untersuchungsgebiete vergleichend dargestellt und bewertet.

3.1 Untersuchungsgebiete

Alle drei Untersuchungsgebiete befinden sich in Nordrhein-Westfalen (Abbildung 9).

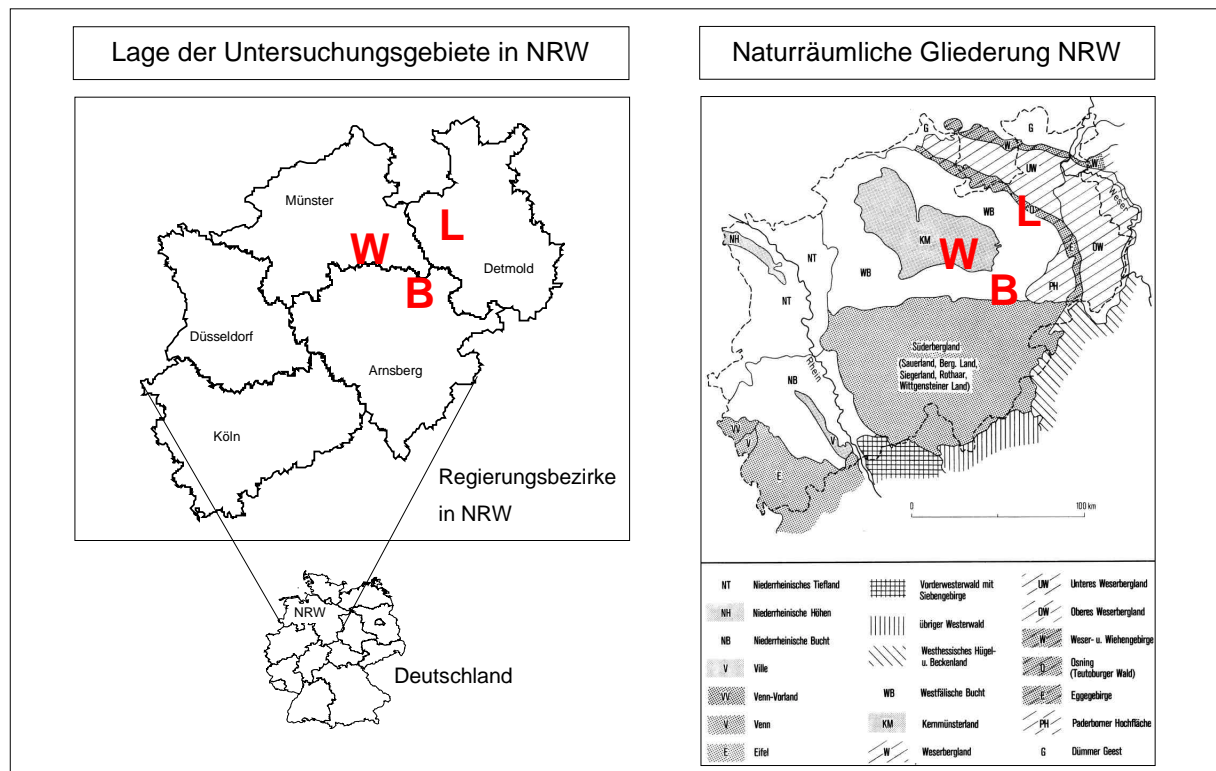


Abbildung 9: Lage der Untersuchungsgebiete innerhalb NRW (Verwaltungseinheit / naturräumliche Gliederung). Die roten Buchstaben stehen für die Lage der Untersuchungsgebiete: L = Lutter, B = Brandenbäumer / Geseker Bach und W = Werse (Naturräumliche Gliederung nach: SCHÜTTLER 1968 a: 12).

Die Auswahlkriterien der Untersuchungsgebiete betreffen die Güte des zugrundeliegenden digitalen Höhenmodells (siehe Kapitel 3.2.1), die unterschiedliche Lage in Flach- und Mittelgebirgsräumen und die Verfügbarkeit von Referenzdaten. Unter der Annahme, dass detailliertere physisch-geographische Rahmenbedingungen aufgrund der starken Vereinfachungen des Verfahrens kaum Auswirkungen auf die Ergebnisse haben, werden die Untersuchungsgebiete im folgenden nur in Kürze skizziert. Die mittleren Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse können der Abbildung 10 entnommen werden.

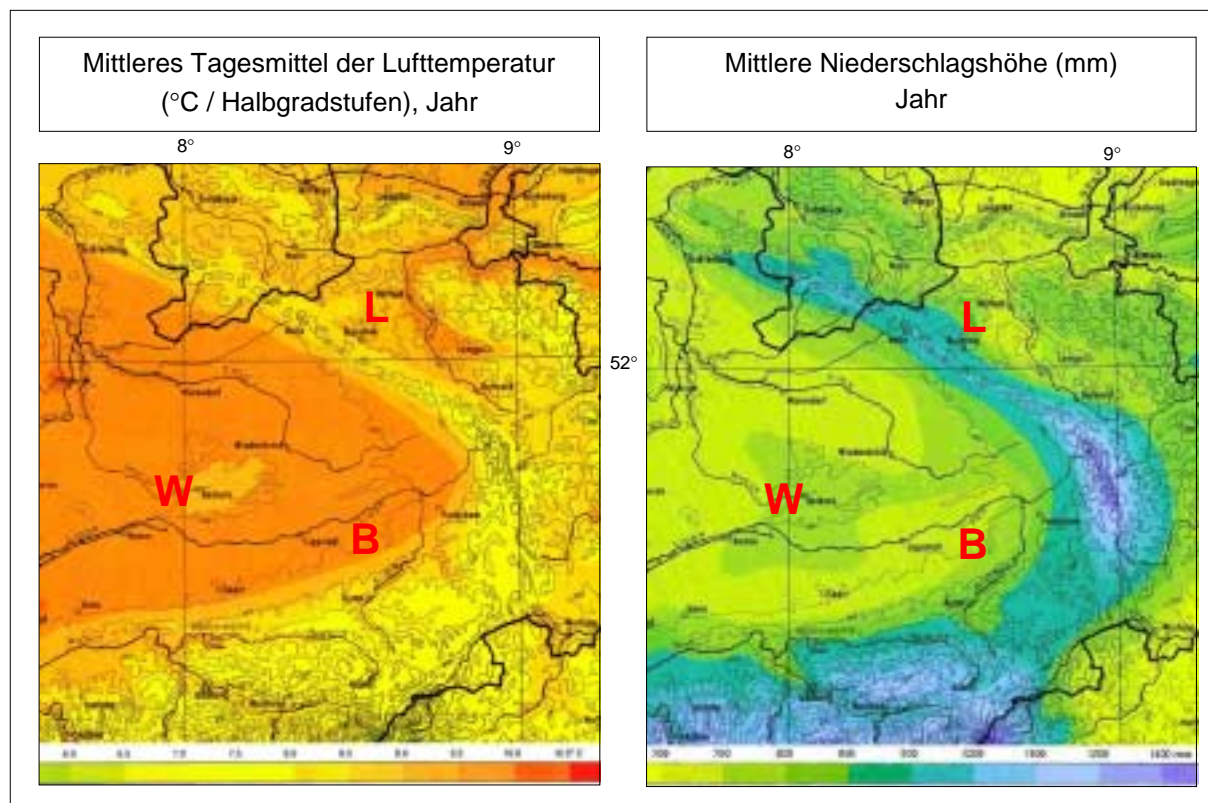


Abbildung 10: Mittlere Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse der Untersuchungsgebiete. Die roten Buchstaben stehen für die Lage der Untersuchungsgebiete: L = Lutter, B = Brandenbäume / Geseker Bach und W = Werse (Temperatur aus dem Zeitraum 1931 – 1960 und Niederschlag aus dem Zeitraum 1951 – 1980, Quelle: MINISTER FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN 1989: Karte 2 und Karte 22).

3.1.1 Lutter

Unter naturräumlichen Aspekten gehört das Einzugsgebiet der Lutter zum Osning (Teutoburger Wald), dessen langgestreckte Schichtkämme sich zwischen der südwestlich gelegenen Westfälischen Bucht und dem nordöstlich anschließenden Unteren Weserbergland erstrecken. Der Osning besteht, wie auch die ihn umgebenen Naturräume, aus mesozoischen Deckschichten, die über dem, in größere Tiefen abgetauchten, paläozoischen Gebirgsrumpf des Rheinischen Schiefergebirges abgelagert wurden (SCHÜTTLER 1968a: 14). Als Folge der sa-

xonischen Bruchfaltung und der anhaltenden Denudationsprozesse, stellt sich der Osning als abwechslungsreiches Relief aus Fest- und Lockergesteinen dar, welches sich deutlich aus der tiefer gelegenen Umgebung heraushebt.

Die Lutter entspringt Karstquellen südwestlich von Bielefeld und fließt als sog. ‘Bielefelder Lutter’ in Richtung Nordost (SCHÜTTLER 1968c: 280) in das leicht wellige Ravensberger Hügelland. Aufgrund der dort vorherrschenden stauwirksamen Liastone (als Teil der mesozoischen Deckschichten) läßt sich der Raum trotz der pleistozänen Lößdecke als Feuchtbörde



charakterisieren (SCHÜTTLER 1968b: 276). Die Lutter entwässert in die Aa, die wiederum der Werre zufließt. Deren Vorfluterbereich ist das Gewässergebiet der Weser.

Abbildung 11: Photographie Lutter - Stationierung 1,9 km, weitere Photographien: Abbildung 20 ff).

Die Fließlänge des betrachteten Gewässers mit einer Einzugsgebietsgröße $> 20 \text{ km}^2$ beträgt 5,5 km (Stationierung 0 bis 5,5 km). Der Bach zählt mit einem Höhenunterschied von 12,9 m und einem mittleren Gefälle von $2,5 \text{ ‰}$ zu den Mittelgebirgsgewässern (LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN 1999 b: Abb.4). Das Einzugsgebiet hat eine Größe von 124 km^2 . Es läßt sich ein flacherer unterer Bereich (3 km Länge; Höhendifferenz 3,2 m; mittleres Gefälle $1,6 \text{ ‰}$) von einem steileren oberen Bereich (2,5 km Länge; 9,7 m Höhendifferenz; mittleres Gefälle $3,6 \text{ ‰}$) abgrenzen. Die Gewässeraue im flußaufwärts gelegenen Teil liegt innerhalb der Stadt Bielefeld. Flußabwärts verläuft das Gewässer in einer ländlich geprägten Region, ist aber dennoch stark verbaut.

Das digitale Höhenmodell wurde ausschließlich aus photogrammetrisch erstellten Höhenpunkten generiert (siehe Kapitel 3.2.1).

3.1.2 Brandenbäumer Bach / Geseker Bach

Die Bäche verlaufen in die westöstlich sich erstreckenden Hellwegbörden, die zum südlichen Teil der Westfälischen Bucht gehören. Die Hellwegbörden und die südlich daran anschließende Haarhöhe haben eine nach nordnordwest geneigte Abdachung, die zur Hauptentwässerungslinie der Lippe führt. Der geologische Bau besteht aus mesozoischen Schichten und pleistozänen Ablagerungen (FEIGE 1968a: 52), über dem abtauchenden paläozoischen Unter-

grund. Die trockenen, lößbedeckten, aber gut bewässerten Hellwegbörden sind im Süden von



der trockenen Haarabdachung und im Norden von der feuchten Lippeniederung eingeschlossen (FEIGE 1968b: 72). Von der Haarhöhe ziehen wenige und nur zeitweilig wasserführende Täler, sog. 'Schledden', zu den Hellwegbörden hinab. Solche Schledden speisen den Geseker Bach, der in westlicher Richtung verläuft. Nach dem Zusammenfluß mit dem Störmeder Bach, der von Süden kommt, heißt das Gewässer Brandenbäumer Bach. Dieser wendet sich nach Norden und vereinigt sich dort mit seinem Vorfluter, der Lippe. Somit gehören die Bäche zum Rheingebiet.

Abbildung 12: Photographie Brandenbäumer / Geseker Bach - Stationierung 4,2 km.

In die Betrachtungen gehen 4,3 km (Stationierung 0 bis 4,3 km) mit einem Höhenunterschied von 3,9 m ein. Mit einem mittleren Gefälle von 1,6 ‰ zählen die Bäche zu den Flachlandgewässern (LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN 1999 b: Abb. 4). Das entsprechende Einzugsgebiet hat eine Größe von 187 km². Es läßt sich ein flacherer unterer Bereich (0,9 km Länge; Höhendifferenz 0,07 m; mittleres Gefälle 1,2 ‰) von einem steileren Reliefanstieg (0,3 km Länge; Höhendifferenz 1,2 m; mittleres Gefälle 1,6 ‰) der zum mäßig ansteigenden oberen Bereich führt (3,1 km Länge; Höhendifferenz 2,6 m; mittleres Gefälle 1,8 ‰), abgrenzen. Die Gewässeraue ist insgesamt ländlich geprägt.

Die Gewässer werden nur bis zur Nebenbacheinmündung der Osterschledde betrachtet, da ab dort die abgeleitete Tiefenlinie (GerinneDGM5) extrem von der tatsächlichen Gerinnelinie (GerinneATKIS) abweicht. Durch Überprüfen anhand einer DGK 5 läßt sich feststellen, daß die generierte Tiefenlinie die Osterschledde anstatt den Geseker Bach nachzeichnet. Die Osterschledde stellt kein Teil des Untersuchungsgebietes dar. Eine Tiefenlinie entlang des Oberlaufes des Geseker Baches wird bei einer Einzugsgebietsgröße > 20 km² nicht abgeleitet (siehe Kapitel 2.4.1).

Das vorliegende DGM 5 vom Landesvermessungsamt NRW setzt sich aus Modellen unterschiedlicher Herstellungsverfahren zusammen (größtenteils Generierung auf Basis der photogrammetrischen Höhenpunkte / Teilbereiche Laserscanning, diese Bereiche liegen jedoch

außerhalb des Flußbereiches im nordöstlichen Teil des Einzugsgebietes - siehe Kapitel 3.2.1 und Anlage II).

3.1.3 Werse

Der betrachtete Oberlauf der Werse verläuft im Kernmünsterland, einem nördlich der Lippe gelegenen Teilbereich der Westfälischen Bucht mit Plateaucharakter. Eine mit mesozoischen Deckschichten gefüllte Mulde, deren Ränder aufgebogen wurden, bilden den zentralen Teil einer Schichtstufenlandschaft, die trotz pleistozäner Überformung für die maßgebliche morphologische Gestaltung verantwortlich ist (BÜSCHENFELD 1968: 240). Eine solche Schichtstufe stellt mit den Beckumer Bergen das Quellgebiet der Werse dar. Das Gewässer verläuft in westliche Richtung durch den undurchlässigen Kleiboden des Kernmünsterlandes, ein stau- nasses aber basenreiches Verwitterungsprodukt der mesozoischen Deckschichten (SCHNEIDER 1968: 74). Dieser Teil wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht. Im Anschluß verläuft die Werse nach Norden und vereinigt sich mit ihrem Vorfluter, der Ems.

In die Betrachtung geht ausschließlich ein 12 km langer Abschnitt des Oberlaufs (Stationierung 45,5 bis 57,5 km) ein, beginnend ab einer Subeinzugsgebietsgröße von 20 km². Auf dieser Länge wird ein Höhenunterschied von 21 m mit einem mittleren Gefälle von 1,9 ‰ überwunden. Das dazugehörige Einzugsgebiet hat eine Größe von 99 km². Der flachere, untere Bereich (7 km Länge; Höhendifferenz 9 m; mittleres Gefälle 1,2 ‰) gehört zum Flachland. Der obere, etwas steilere Bereich kann schon als Übergangsbereich vom Flachland zum Mittelgebirge bezeichnet werden (5 km Länge; Höhendifferenz 12 m; mittleres Gefälle 2,9 ‰)(LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN 1999 b: Abb. 4). Der flußabwärts gelegene Gewässerbereich ist städtisch geprägt (Stadt Ahlen), flußaufwärts dominiert ein ländlicher Charakter.

Das DGM 5 setzt sich aus Modellen unterschiedlicher Herstellungsverfahren zusammen (Generierung auf Basis der photogrammetrischen Höhenpunkte / Laserscanning-Verfahren - siehe Kapitel 3.2.1 und Anlage III).

3.2 Daten und Datenaufbereitung

3.2.1 Digitale Höhenmodelle

Datengrundlage für das vereinfachte Verfahren sind ausschließlich landesweit vorhandene Daten. Die digitalen Höhenmodelle DGM 5 und DGM 25 des Landesvermessungsamtes NRW liegen flächendeckend vor, jedoch eignet sich aufgrund seiner höheren Auflösung nur das DGM 5 für den Einsatz innerhalb des vereinfachten Verfahrens (ausführliche Behandlung dieser Thematik: UHLIG 1998: 86ff; UHLIG 2000: 31ff). Die wichtigsten Eckdaten der verwendeten digitalen Höhenmodelle können der folgenden Tabelle 2 entnommen werden.

	Lutter	Brandenbäumer / Geseker Bach	Werse
Auflösung [m]	10		
Fehler [dm]	+/- 3 bis +/- 5		
Anzahl der Rasterzellen	2.055.393	2.104.608	1.858.017
Untersuchungsgebietsgröße [km ²]	205,5	210,5	185,8
Höhen [m]	73 bis 331	78 bis 373	66 bis 164
Randkoordinaten (Gauß-Krüger-Koordinaten) des Einzugsgebietes	Nord 5770265 Süd 5757755 Ost 3481125 West 3464695	Nord 5729695 Süd 5709765 Ost 3471035 West 3460475	Nord 5740395 Süd 5731805 Ost 3437925 West 3416295
Einzugsgebietsgröße [km ²]	101,8	99,7	98,6
Höhen des Einzugsgebietes [m]	73 bis 321	80 bis 369	67 bis 164

Tabelle 2: Eckdaten der verwendeten digitalen Höhenmodelle im Vergleich. Angaben sowohl für den jeweils verwendeten Ausschnitt des Modells (ausschlaggebend für die Berechnungsdauer) als auch für die eigentliche Einzugsgebietsgröße (Größenvergleich der Untersuchungsgebiete).

Das DGM 5 liegt in verschiedener Qualität vor. Die größten Unterschiede liegen darin, daß der Hauptteil des Modells aus photogrammetrisch erstellten Höhenpunkten generiert wurde, während alle neueren Bereiche auf dem Laserscanning-Verfahren basieren. Im folgenden werden die Unterschiede der Verfahren und die Auswirkungen auf die Qualität des erstellten digitalen Höhenmodells erläutert. Der Betrachtung des digitalen Höhenmodells kommt eine

besondere Bedeutung zu, da es die wesentliche Arbeitsgrundlage darstellt. Aus diesem Modell wird die Gerinnegeometrie (Querprofile, Tiefenlinie, Fließrichtung und Sohlgefälle) abgeleitet. Das vereinfachte Verfahren ist deshalb sehr eng mit der Charakteristik des digitalen Höhenmodells verbunden. Das auf Basis der photogrammetrisch erstellten Höhenpunkte generierte DGM 5 weist folgende Charakteristik auf (FÖCKELER UND KUHN 1990: 22ff):

- Es basiert auf digitalisierten Höhenlinien der DGK 5, die einen unterschiedlichen Aktualitätsstand haben (Herstellungszeitpunkt der gewässernahen DGK 5 der drei Untersuchungsgebiete siehe Tabelle 4). Dadurch kommt es zu einer starken Heterogenität des DGM 5. Gravierende Oberflächenumgestaltungen (z.B. durch Autobahnbau) sind in einigen Bereichen enthalten und können in benachbarten Blättern fehlen. So sind alle Objekte, die in der DGK 5 nicht durch Höhenlinien symbolisiert sind, folglich auch im daraus abgeleiteten Höhenmodell nicht enthalten. Dies sind zum Beispiel Bahn- oder Straßendämme und -böschungen. Demgegenüber enthält das im Laserscanning-Verfahren hergestellte Modell auch künstliche Strukturen wie Gebäude oder Brückenbauwerke, Mobilien oder andere temporär vorhandene oder variierende Objekte. Die Schräglichtdarstellung des Ausschnitts Bielefeld (Abbildung 13) zeigt sehr deutlich u.a. Zuschauerränge von Sportstadien oder Eisenbahndämme.
- Geländeformen werden durch ein regelmäßiges Punktraster mit 10 m Rasterweite dargestellt.
- Die Höhe der Punkte (Gauß-Krüger-Koordinaten) wird in Meter über NN angegeben.
- Die Höhengenaugigkeit beträgt $\pm 0,3$ m bis $\pm 0,5$ m.
- Es steht für ca. 80 % der Landesfläche NRWs zur Verfügung; die fehlenden Bereiche werden derzeit sukzessive durch Laserscannermessungen ergänzt.

Diese Spezifikationen des DGM 5 ziehen folgende Probleme nach sich:

- Durch die Digitalisierung und Berechnung des Punkterasters entsteht ein Informationsverlust gegenüber den DGK 5-Vorlagen.
- Kleinere Gewässer sind topographisch nicht abgebildet.
- Für Siedlungs-, Industrie- und Infrastrukturflächen existieren keine Höhenlinien.

Das DGM 5 basiert mehrheitlich auf Daten, die mit den beschriebenen herkömmlichen Mitteln der Photogrammetrie gewonnen wurden. Eine neue Technik zur Datenerfassung ist die Laserscannermessung. Sie wird nachfolgend kurz vorgestellt und die dadurch bedingte Charakteristik des DGM 5 erläutert (KATZENBEISSER UND LÖFFLER 1996: 367ff; KILIAN UND ENGLISH 1994: 207ff):

- Das Laserscanning ist ein Verfahren zur topographischen Geländeaufnahme von einer fliegenden Trägerplattform (Flugzeug oder Hubschrauber).
- Es ist gekennzeichnet durch einen weitgehend automatisierten Meßablauf mit vollständig digitaler Datenaufzeichnung und anschließend rein computerbasierter Auswertung.
- Es besteht eine reflektorlose Entfernungsmessung zu fast allen natürlichen Oberflächen (landwirtschaftliche Nutzflächen, bebautes Gelände, Vegetationsflächen, Wasserflächen, Sand, Kohle, etc.).
- Aus Laserdistanz -, GPS- und INS-Messung (Lage und Orientierung der Trägerplattform des Scanners im Raum) werden dreidimensionale Koordinaten für jeden Reflexionspunkt des Laserstrahls als primäres Produkt abgeleitet.
- Die Höhengenaugigkeit der Meßpunkte liegt bei $< 0,1$ m.
- Die Punktdichte liegt unterhalb eines Meters. In der Nachbearbeitung wird das DGM 5 mit der 10 m-Rasterweite abgeleitet.
- Die Punktemessung, die neben Vegetation und Gebäuden auch Mobilien (Fahrzeuge, Zirkuszelte, etc.) erfaßt, wird durch entsprechende Algorithmen gefiltert, um eine möglichst getreue Abbildung der Geländeoberfläche zu erreichen.
- Durch die Differenzierung von Mehrfachreflexionen in Waldgebieten ist die Aufnahme des Waldbodens möglich. Die sichere Erfassung anderer problematischer Oberflächen durch entsprechend angepaßte Algorithmen oder Filter befindet sich derzeit noch in der Entwicklung.
- Ein aus Vektordaten bestehender Zusatzdatensatz (zur Veranschaulichung von Kanten, Linienstrukturen, etc.) für die DGM 5 ist in Planung.

Die folgende Schräglichtdarstellung (Abbildung 13) verdeutlicht durch einen visuellen Vergleich die lokal differenzierenden Eigenschaften des DGM 5 als Folge der unterschiedlichen Herstellungsverfahren.

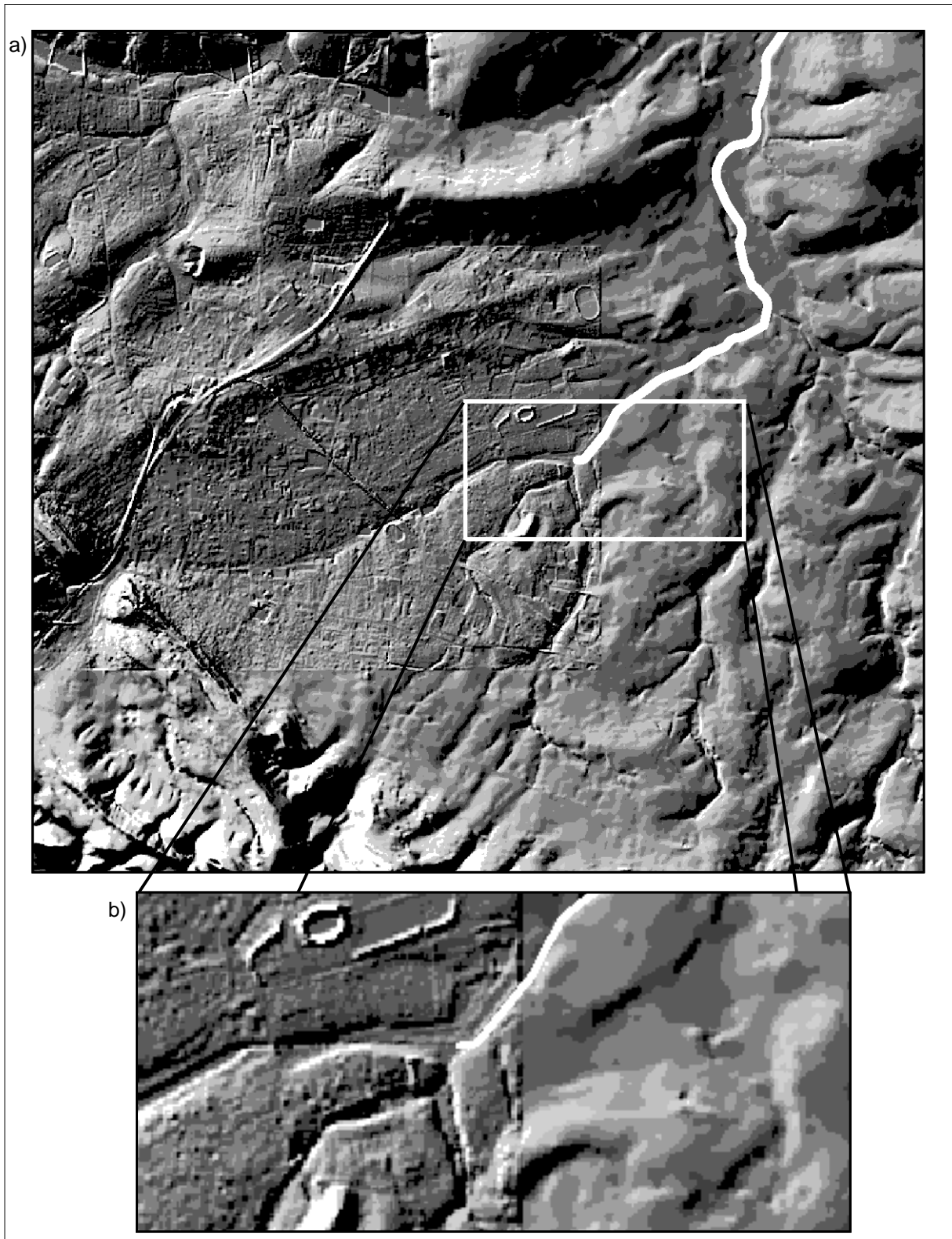


Abbildung 13: a) Schräglichtdarstellung des DGM 5 mit dem Ausschnitt Bielefeld. Die heterogenen Ursprungsdaten werden sichtbar: Links: Laserscanning / Rechts: Generierung des digitalen Höhenmodells aus photogrammetrisch erstellten Höhenlinien. b) Ausschnittvergrößerung des Übergangsbereiches der verschiedenen Modelle: Der Höhenversatz wird sichtbar.

Eine weitere Vertiefung der Höhenmodellbetrachtung erfolgt im Kapitel 3.5.1.1. Dort werden die Fehler des Modells in bezug auf die konkrete Aufgabenstellung der vorliegenden Hochwassermodellierung diskutiert.

3.2.2 100jährige Abflußwerte

Die Abflußwerte (Tabelle 3) entstammen ursprünglich hydrologischen N / A - Modellierungen der entsprechenden Einzugsgebiete (siehe Kapitel 3.2.5).

Abflußwerte	Lutter	Brandenbäumer / Geseker Bach	Werse
HQ100 [m ³ /s] (von / bis Stationierungskilometer)	6HQ100: 67 (0 – 1.166) 77 (>1.166 – 1.766) 70 (>1.766 – 3.067) 65 (>3.067 – 4.109) 43 (>4.109 – 5.429) 32 (>5.429 – 5.465)	2HQ100: 39.6 (0 – 1.855) 19.8 (>1.855 – 4.322)	19HQ100: 63 (>45.5 – 46) 62 (>46 – 47.3) 61 (>47.3 – 47.6) 58 (>47.6 – 48) 45 (>48 – 48.8) 37 (>48.8 – 49.2) 36 (>49.2 – 50) 35 (>50 – 51.3) 34 (>51.3 – 51.9) 30 (>51.9 – 53) 29 (>53 – 53.6) 22 (>53.6 – 54.4) 21 (>54.4 – 55.1) 20 (>55.1 – 55.9) 19 (>55.9 – 56.4) 18 (>56.4 – 57.5) 17 (>57.5 – 57.9) 16 (>57.9 – 58.1) 15 (>58.1 – 62.9)
hq100 [l/s/km ²]	0,663	0,3303	0,6413

Tabelle 3: Abflußwerte, die als Eingangsdaten in das vereinfachte Verfahren eingehen.

Die Dichte der Werte wurde bei der Lutter auf die Subeinzugsgebiete der sechs wichtigsten Nebenflüsse reduziert. Der Brandenbäumer / Geseker Bach wurde auf Basis der modellierten Werte mit zwei Schätzwerten für die beiden wichtigsten Teileinzugsgebiete versehen. Diese Schätzwerte kommen vom StUA Bielefeld und entsprechen in ihrer räumlichen Dichte etwa

den für die folgenden Einzugsgebiete zu erwartenden Werten. Die Werse hat mit 19 verteilten Werten die höchste räumliche Dichte. Der zu den Einzugsgebieten gehörige Spendenwert wurde auf Basis des Abflußwertes am Vorfluter bzw. am Mündungspunkt des entsprechenden Gewässers in Bezug zur Gesamtgröße des Einzugsgebietes ermittelt.

Eine Diskussion der Berechnungsunterschiede bei Eingabe der unterschiedlichen Abflußwerte (HQ100 / hq100) erfolgt in Kapitel 3.5.1.2.. Dort wird die Fehlergröße in Bezug zu den Referenzdaten quantifiziert.

3.2.3 Bauwerkspositionen

Wie auch bei den anderen Eingangsdatensätzen, ist das wichtigste Auswahlkriterium die landesweite Verfügbarkeit. Dadurch mußten diverse in Betracht gezogene Möglichkeiten zum Erhalt von Bauwerksinformationen entlang der Gewässer entfallen (z.B. liegen die digitalen Bauwerkskoordinaten aus der Gewässerstrukturgütekartierung in NRW zum Zeitpunkt der Verfahrensentwicklung für kleinere Gewässer noch nicht flächendeckend vor - LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN 1998: 45ff; Luftbilder und Orthophotos müssen einer aufwendigen manuellen Auswertung unterzogen werden). Die Bauwerkspositionen werden für das vereinfachte Verfahren der digitalen Deutschen Grundkarte (DGK 5) entnommen und als Punkthema digitalisiert. Hiermit ist die Aktualität der DGK5 entscheidend für die Güte des Eingangsdatensatzes (Tabelle 4).

Einzugsgebiet	Aktualität der gewässernahen DGK 5
Lutter	Stand 1962 – 65
Brandenbäumer / Geseker Bach	Stand 1981 – 85
Werse	Stand 1977 – 91

Tabelle 4: Aktualität der gewässernahen DGK 5 der drei Untersuchungsgebiete.

Eine Klassifizierung der in den DGK 5 enthaltenen Bauwerke durch den Bearbeiter ist Voraussetzung zur Nutzung der Datenbasis. Alle größeren Brückenbauwerke, die Bahnlinien, Autobahnen oder Bundesstraßen darstellen, gehen nicht in die Bauwerkstabelle ein (siehe Kapitel 3.3.1.7.2). Diese Bauwerke sind in aller Regel mindestens auf ein 100 jährliches Hochwasser zugeschnitten und tragen dadurch nicht zum Rückstau des abfließenden Wassers bei. Alle anderen Bauwerke gehen unabhängig von ihrer Art (z.B. Brücke, Kasten oder Wehr)

und Größe in die Berechnungen ein. Aufgrund dieser Klassifizierung enthalten die Punktthemen der drei Untersuchungsgebiete entlang der bearbeiteten Streckenabschnitte eine Anzahl von 16 (Lutter), bzw. 15 (Brandenbäumer / Geseker Bach) und 17 (Werse) Bauwerke.

Die Bauwerkspositionen werden in Form ihrer xy-Koordinaten des Gauß-Krüger-Koordinatensystems von der DGK 5 digitalisiert. Mit einem speziell dafür entwickelten Programmmodul (siehe Kapitel 3.4) werden diese Koordinatenpaare an Flußpunkte der beiden Gerinnelinien mit dem geringsten Abstand angehängen. Damit können die Bauwerke entsprechend ihrer Lage entlang des Gewässers bei der hydraulischen Abarbeitung der Flußpunkte beachtet werden.

3.2.4 Lage der Gewässer

Die Gerinnelinien werden einer Neubearbeitung der Gewässer im ATKIS-Datensatz (Amtlich Topographisch-Kartographisches Informationssystem) in Form von Ascii-Daten (xy-Koordinaten des Gauß-Krüger-Koordinatensystems) entnommen. ATKIS-Daten entsprechen hinsichtlich ihrer Erfassungsgenauigkeit etwa den gegenwärtigen topographischen Landeskartenwerken (ARBEITSGEMEINSCHAFT DER VERMESSUNGSVERWALTUNGEN DER LÄNDER DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND 1989: 9). Die untersuchten Flußverlaufslinien (Lutter, Brandenbäumer / Geseker Bach, Werse) entsprechen in ihrer Genauigkeit der DGK 5.

3.2.5 Evaluierungsgrundlagen

Als Evaluierungsgrundlagen und zur Visualisierung der Ergebnisse wurden weitere Daten in das Geographische Informationssystem integriert und mit der Bezeichnung 'Referenzdaten' belegt. Für die Lutter liegen Referenzdaten in Form einer Modellierung von Überschwemmungsgebieten für ein Wiederkehrintervall von 100 Jahren vor (HYDROTEC, BACH+PARTNER, 1995, im Auftrag der STADT BIELEFELD). Diese Untersuchung basiert auf terrestrisch tachymetrisch vermessenen Querprofilen des Gerinnebettes und der Vorländer, einer Ermittlung der Abflüsse mit einem hydrologischen N / A - Modell, einer eindimensionalen hydraulischen Berechnung unter Annahme stationär ungleichförmiger Fließverhältnisse mit dem Programmpaket JABRON (HYDROTEC 1997a - b) und einer Flächenermittlung anhand einer Übertragung von Wasserspiegelhöhen in das Vorland anhand von Höhenlinien und Höhenkoten. Die berechneten Überschwemmungsflächen wurden manuell überarbeitet, um das ge-

gesetzlich festzusetzende Überschwemmungsgebiet zu ermitteln. Konkret liegen folgende Referenzdatensätze vor:

- tachymetrisch vermessene Flußquerprofilinien der Lutter (109 Querprofile auf 5,5 km). Sie dienen dem Vergleich der aus dem digitalen Höhenmodell abgeleiteter Gerinneeometrie (siehe Kapitel 3.2.1) und zur Charakterisierung des Flußschlauches (siehe Kapitel 3.3.1.6.1).
- Längsprofile der Wasserspiegellagen aus aktuellen wasserbaulichen hydraulischen Modellierungen. Sie werden zur Bewertung der berechneten Wasserstände genutzt (siehe Kapitel 3.6.1 bzw. Abbildung 38, Abbildung 39 und Abbildung 40).
- Überschwemmungsgebietsabrenzungen zur Beurteilung der räumlichen Ausbreitung der mit dem vereinfachten Verfahren berechneten hochwassergefährdeten Bereiche (siehe Kapitel 3.6.2):
 - **Lutter:** LÜSG1: hydrologisch / hydraulische Modellierung der Firma Hydrotec, Bach+Partner (eindimensionale hydraulische Berechnung unter Annahme stationär ungleichförmiger Fließverhältnisse mit dem Programmpaket JABRON; HYDROTEC 1997) für die Stadt Bielefeld im Jahre 1995, Umrisse des natürlichen Überschwemmungsgebietes für ein Wiederkehrintervall von 100 Jahren (nicht gesetzlich festgesetzt).
 - **Brandenbäumer / Geseker Bach:** BÜSG1: Preußisches ÜSG von 1912 - im Auftrag des StUA Arnsberg 1999 digitalisiert von der Firma LökPlan. BÜSG2: hydrologisch / hydraulische Modellierung nach 1970 – ÜSG nicht gesetzlich festgesetzt – räumliche Ausdehnung des ÜSG aus Wasserspiegelhöhen, 2000 von der Firma Sönnichsen erstellt
 - **Werse:** WÜSG1: Preußisches ÜSG erstellt zwischen 1909 und 1913 – digitalisiert von der Bezirksregierung Münster 1999. WÜSG2: hydrologisch / hydraulische Modellierung 1999 im Auftrag des StUA Münster von der Firma Hydrotec – Vorlandergänzung vorhandener Gewässerprofile aus dem DGM 5 und rein rechnerische Ermittlung vom ÜSG mittels DGM 5.

3.3 Methodenentwicklung am Beispiel des Untersuchungsgebietes der Lutter

Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Entwicklungsschritte der beiden angewandten Methoden (hydraulische Modellierung und computergestützte Geomorphometrie) beschrieben. Einen schematischen Überblick der gesamten Verfahrensentwicklung zeigt Abbildung 3. Das Verfahren wurde bzgl. der Ableitung verschiedener Parameter, Modellannahmen und der Anwendung unterschiedlicher Flächenbildungsmethoden empirisch optimiert ('trial-and-error manual calibration': REFSGAARD UND STORM 1996: 47ff). Zur Annäherung der Ergebnisse an die Referenzdaten wurden verschiedene Variantenberechnungen bzw. Parameterkombinationen durchgeführt, die der Abbildung 14 zu entnehmen sind und die in den folgenden Unterkapiteln einzeln abgehandelt werden.

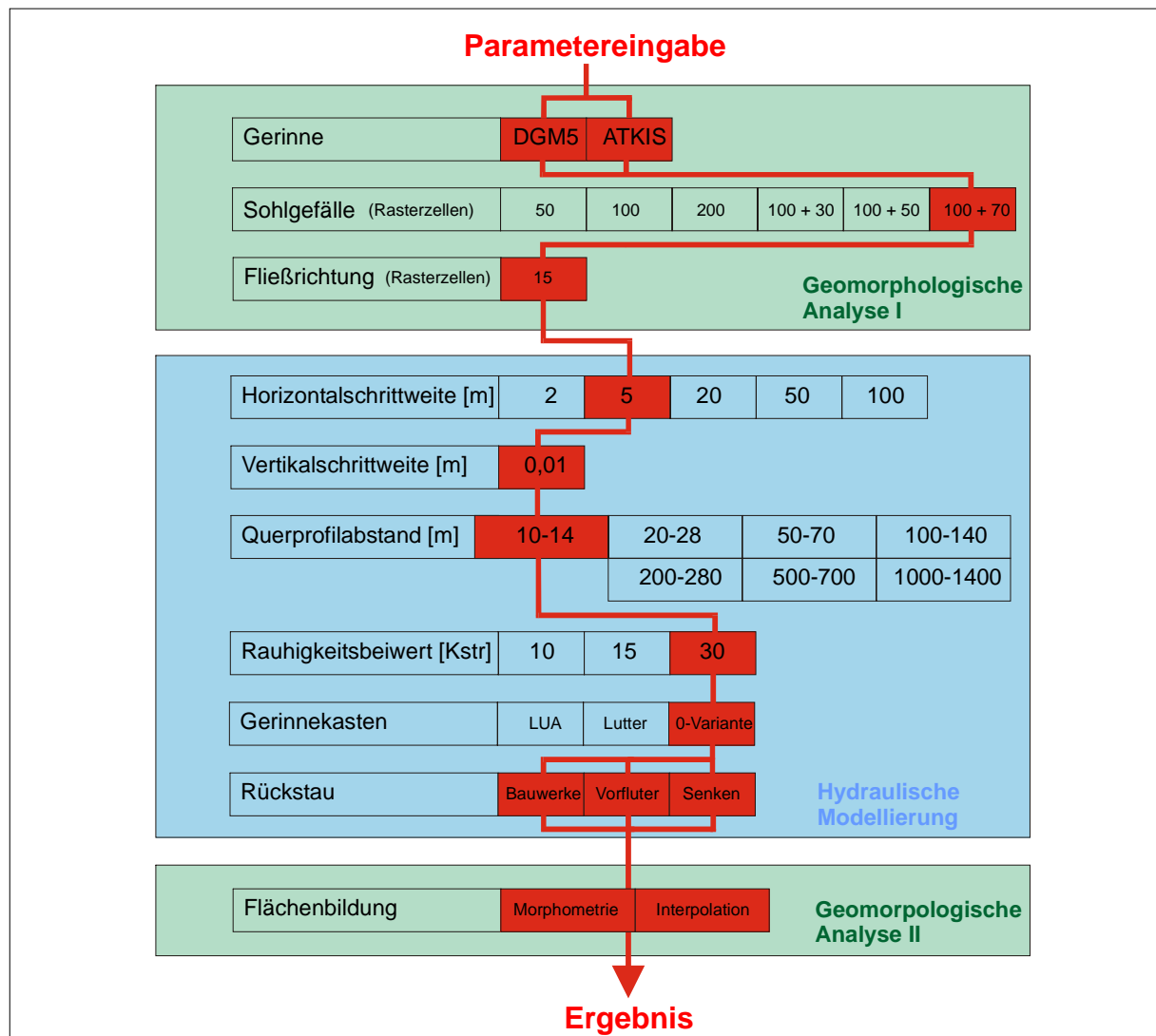


Abbildung 14: Einzelschritte der Verfahrensentwicklung bzw. Parameterkombinationen und Variantenberechnungen zur empirischen Optimierung des vereinfachten Verfahrens. Rot markiert sind die letztendlich verwendeten Parameter.

Die Ergebnisse der Berechnungen bestehen aus zwei Teilen: Zum einen handelt es sich um die punktuellen Hochwasserstände, die der hydraulischen Modellierung entstammen und deren Bewertung anhand ihrer Höhenabweichungen zu den Referenzdaten erfolgen. Zum anderen geht es um die eigentlichen hochwassergefährdeten Bereiche, die in ihrer räumlichen Ausdehnung mit den Referenzdaten verglichen werden. Zwischenergebnisse, deren Bewertung zur Verfahrensentwicklung beitragen, werden in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt. Die Endergebnisse der drei Untersuchungsgebiete, d.h. die nach der abgeschlossenen Verfahrensentwicklung modellierten Hochwasserstände entlang der Gewässer und die dazugehörigen hochwassergefährdeten Bereiche, werden in einem eigenen Kapitel (siehe 3.6) diskutiert.

3.3.1 Hydraulische Modellierung

Die wesentlichen Unterschiede der hydraulischen Modellierung des vereinfachten Verfahrens im Vergleich zur Berechnung der Referenzdaten, liegen im Verzicht auf die terrestrische Profilvermessung und in der vereinfachenden Annahme stationär gleichförmiger Fließverhältnisse entlang des gesamten Gewässers.

Zunächst wurden Abschnitte des Gerinnes ausgewählt, deren Abflußverhalten annähernd dem freien Fließen ohne Rückstau entspricht, da die verwendete empirische Fließformel nach Manning-Strickler grundsätzlich nur für solche Gewässerabschnitte anwendbar ist (siehe Kapitel 2.4.2). Die zusätzlichen Probleme der Wasserstandsmodellierung in gestauten Bereichen, für die im vereinfachten Verfahren kein grundsätzlich anderer Algorithmus zur Anwendung kommt, wurden dadurch zunächst separiert (siehe Kapitel 3.3.1.7). Dieser Schritt ist für die Bewertung des Einsatzes der einzelnen Parameter (Horizontalschrittweite, Vertikal-schrittweite, Rauigkeit etc.) wichtig. Die berechneten Abweichungen von den Referenzdaten sollten so wenig wie möglich mit den Problemen der Rückstauthematik vermischt werden.

Die Unterteilung der Lutter in Abschnitte freien Fließens und Abschnitte mit gestauten Verhältnissen wurde anhand eines Gewässerlängsprofils mit der Sohlhöhe und Energielinie der Referenzdaten vorgenommen. Bei einem annähernd parallelen Verlauf der Linien kann von freien Fließverhältnissen ausgegangen werden. Es wurden fünf freie Fließabschnitte identifiziert, von denen zwei eine Länge > 500 m aufweisen: **Abschnitt 1**: Stationierung 1,4 bis 2,3 km / Referenzquerprofile 15 – 20 und **Abschnitt 2**: Stationierung 4,2 bis 4,8 km / Referenzquerprofile 42 – 47 (Abbildung 15).

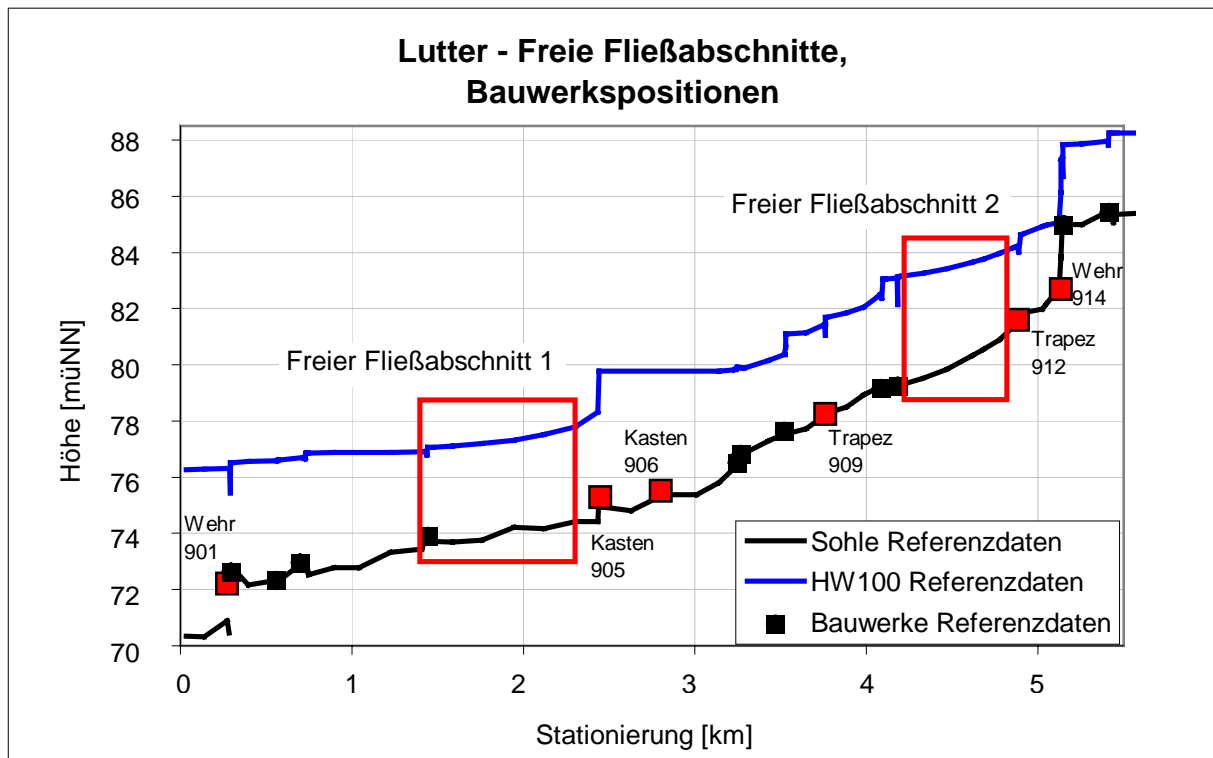


Abbildung 15: Lage der Abschnitte freien Fließens und der Bauwerkspositionen der Referenzdaten an der Lutter. Die un stetige Nummerierung der Bauwerke entstammt den Referenzdaten.

Die verbleibenden Gewässerabschnitte sind in engen Abständen mit Querbauwerken (Brücken, Wehren etc.) versehen und werden im Kapitel 3.3.1.7.2 behandelt. Die im folgenden abgehandelten Modellparameter werden also innerhalb der Abschnitte freien Fließens betrachtet und die Ergebnisse einer detaillierten Analyse im Vergleich zu den Referenzdaten unterzogen.

3.3.1.1 Horizontale Berechnungsschrittweite

Die Horizontalschrittweite ist der gleichbleibende Abstand in der Horizontalen, in dem jeweils Höheninformationen entlang der Querprofilinie aus dem DGM 5 zur integrativen Berechnung der Geometrie des Fließquerschnitts ausgelesen werden. Wie in Abbildung 16 sichtbar wird, führt eine relativ dichte Horizontalschrittweite von 1 m zur treppenhaften Ausprägung der Querprofilgeometrie. Um so größer die gewählte Horizontalschrittweite, um so stärker geglättet bzw. weniger treppenhaft ist die berechnete Querschnittsgeometrie.

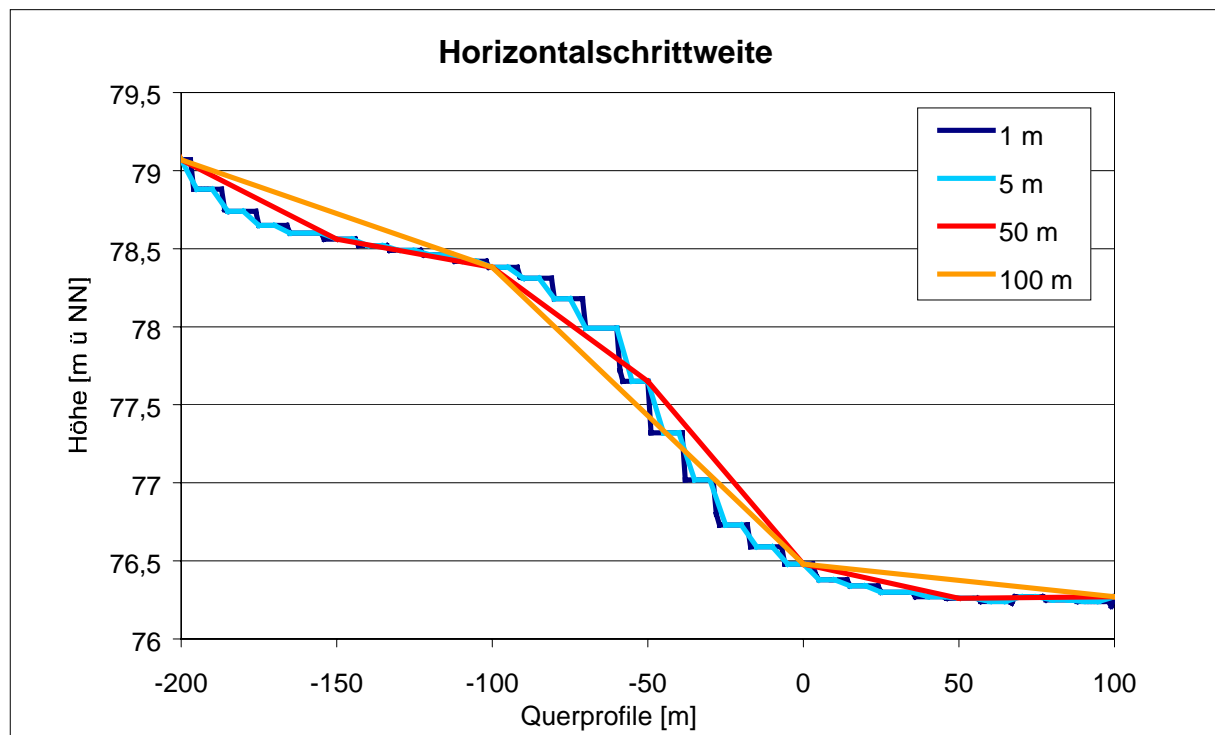


Abbildung 16: Treppenhafte Ausprägung der Querprofilgeometrie der aus dem digitalen Höhenmodell abgeleiteten Profillinien bei Variation der Horizontalschrittweite (Referenzquerprofil 16, Stationierung 1,586 km, orographisch linkes Ufer der Lutter).

Die Referenzdaten geben keine treppenhafte Ausprägung der Querprofile vor (Abbildung 36 und Abbildung 37), ihre unregelmäßige Punktedichte entstand bei der Geländevermessung in Abhängigkeit der vorgefundenen Kanten (HYDROTEC 1997 b). Deshalb ist beim vereinfachten Verfahren eine zu enge Horizontalschrittweite unerwünscht. Jedoch darf die Schrittweite auch nicht zu weit gewählt werden, um eventuell vorhandene Kleinstrukturen des DGM 5 nicht zu übergehen. Durch eine qualitative visuelle Analyse mehrerer Querprofile und deren Erscheinungsbild anhand unterschiedlicher Horizontalschrittweiten kann zusammenfassend festgestellt werden, daß die Auswahl der Punkte bei einer Horizontalschrittweite von 50 oder 100 m relativ zufällig ist. Kleinere Geländeerhebungen oder Senken, die im Falle eines 100jährigen Hochwassers eventuell für die räumliche Ausdehnung der Überschwemmungen entscheidend sind, könnten so vernachlässigt werden. Eine Horizontalschrittweite von 5 m zeichnet die im DGM 5 vorgegebene Topographie in einer hinreichenden Genauigkeit nach, ohne eine zu starke Stufung oder Glättung vorzunehmen.

Um diese Feststellung auch quantitativ zu belegen, wurden vergleichende hydraulische Berechnungen durchgeführt. Es wurde ausschließlich der Parameter Horizontalschrittweite verändert. Die Ergebnisse sind der Tabelle 5 zu entnehmen. Die Referenzberechnung ist in diesem Falle der Rechendurchgang mit einer Horizontalschrittweite von 1 m. Diese Schrittweite

wird zum Vergleich herangezogen, da davon ausgegangen wird, daß dies zu der qualitativ hochwertigsten Abbildung der Topographie des DGM 5 führt.

Horizontalschrittweite	HW₁₀₀	HW₁₀₀	Breite
	Abweichung in Profilabschnitten [m]	Abweichung ge- samt [m]	(hochwasserge- fährdeter Be- reich)[m]
2 m Profil 15-20	0	0	-0,14
Profil 42-47	0		1,03
5 m Profil 15-20	-0,002	0,0005	2,02
Profil 42-47	0,003		3,46
20 m Profil 15-20	0,01	0,025	-0,73
Profil 42-47	0,04		9,17
50 m Profil 15-20	0,005	-0,0075	-2,8
Profil 42-47	-0,02		-0,12
100 m Profil 15-20	0,002	0,021	1,52
Profil 42-47	0,04		7,8

Tabelle 5: Abweichungen der Wasserstände und Überschwemmungsbreiten von der Referenz an Querprofilen der freien Fließabschnitte der Lutter bei Einsatz unterschiedlicher Horizontalschrittweiten. Die Referenzdaten sind hier die Ergebnisse des vereinfachten Verfahrens mit folgenden Eingangsdaten: Gefälle und Fließrichtung aus dem DGM 5 abgeleitet, Abfluß aus den Eingangsdaten (6HQ100), K_{str} 30, Horizontalschrittweite 1 m, Vertikalschrittweite 0,01 m.

Entgegen den Erwartungen unterscheiden sich die Ergebnisse bei Horizontalschrittweiten von 1 bis 100 m nur relativ wenig. Die mittleren Abweichungen der Wasserstandshöhen bewegen sich im Rahmen von 0 (Horizontalschrittweite 2 m) bis 0,025 m (Horizontalschrittweite 20 m). Auch nehmen die Abweichungen bei Berechnungen mit größeren Horizontalschrittweiten nicht zu. Dies kann an der relativ zufälligen Auswahl an Profilmittelpunkten liegen, die bei den vorliegenden Berechnungen zu keinen entscheidenden Abweichungen führten. Jedoch muß mit der Möglichkeit von Extremabweichungen bei Einsatz großer Horizontalschrittweiten gerechnet werden. Einzelne starke Abweichungen zeigen sich bei der Betrachtung der Überschwemmungsbreiten entlang der berechneten Querprofile (z.B. liegt die mittlere Abweichung bei Horizontalschrittweite 20 m, Profil 42 - 47 bei 9,17 m - im Gegensatz dazu mit einer Horizontalschrittweite von 50 m bei nur 0,12 m; Tabelle 5). Die insgesamt stark gestreuten Differenzen der Überschwemmungsbreiten bei einer Horizontalschrittweite ≥ 10 m belegen zusätzlich die Einflußnahme des Zufalls bei zu großen Schrittweiten. Eine Horizon-

talschrittweite von 5 m erscheint auch aus der quantitativen Bewertung heraus angebracht und wird dem vereinfachten Verfahren zugrundegelegt.

Eine punktuelle Verfeinerung der Horizontalschrittweite in sehr flachen Bereichen des digitalen Höhenmodells erfolgt durch eine Korrektur des Modells: völlig horizontal abgebildete Profilabschnitte werden innerhalb der hydraulischen Berechnungen geringfügig geneigt (siehe Kapitel 2.4.2). Damit wird die Querprofilinie in diesen flachen Bereichen weniger treppenstufenartig und kommt den natürlichen Verhältnissen näher.

3.3.1.2 Vertikale Berechnungsschrittweite

Obwohl in flachen Geländebereichen eine Erhöhung des Wasserstandes um 0,01 m zu erheblichen Flächenzunahmen der überfluteten Bereiche führen kann, erscheint eine Verringerung dieser Iterationsschrittweite unter Berücksichtigung der Eigenschaften des DGM 5 nicht angemessen. Die vertikale Auflösung des verwendeten digitalen Höhenmodells beträgt auch 0,01 m (siehe Kapitel 3.2.1). So wurden keine weiteren Untersuchungen durchgeführt, sondern diese Vertikalschrittweite als optimale Auflösung angenommen und dem vereinfachten Verfahren zugrundegelegt. Auch den Referenzberechnungen liegt diese Schrittweite zugrunde (HYDROTEC 1997 b).

Darüber hinaus wirkt sich die schon angeprochene Korrektur des digitalen Höhenmodells in völlig horizontal verlaufenden Bereichen (siehe Kapitel 2.4.2) als lokal begrenzte Verfeinerung der Vertikalschrittweite aus.

3.3.1.3 Hydraulischer Radius

Der hydraulische Radius wird auf Basis der Topographie des digitalen Höhenmodells während der hydraulischen Berechnungen ermittelt (siehe Kapitel 2.4.2). Aufgrund der höheren Auflösung des digitalen Höhenmodells in Bereichen der Laserscanning-Methodik (siehe Kapitel 3.2.1) kann von der Annahme ausgegangen werden, daß es zu einem Auslesen eines vergrößerten benetzten Umfanges der Querprofile kommt. Dies könnte zur Berechnung eines vergrößerten hydraulischen Radius innerhalb dieses Modelltypes im Gegensatz zum DGM 5 auf Basis photogrammetrisch vermessener Höhenlinien führen. Diese Annahme wurde im Untersuchungsgebiet der Welse überprüft, da dort entlang des Gewässers beide Modelltypen vorkommen (Laserscanning DGM 5: Stationierung 45,5 bis 56 km / DGM 5 aus photogrammetrisch vermessenen Höhenlinien: Stationierung 56 bis 58 km). Die Mittelwerte der berech-

neten hydraulischen Radien der entsprechenden Gewässerabschnitte werden miteinander verglichen. Die folgende Tabelle 6 faßt die Ergebnisse für die unterschiedlichen Gerinnelinien (GerinneDGM5 und GerinneATKIS) zusammen.

	DGM 5 (photogrammetrisch vermessene Höhenli- nien)		DGM 5 (Laserscanning)		gesamt	
	Gerinne- DGM5	Gerinne- ATKIS	Gerinne- DGM5	Gerinne- ATKIS	Gerinne- DGM5	Gerinne- ATKIS
Querprofilanzahl	207	265	1044	999	1251	1264
Rhy - mean	0,22	0,22	0,39	0,44	0,36	0,39
Rhy - max	0,35	0,44	1,09	1,4	1,09	1,4
Rhy - min	0,15	0,16	0,13	0,13	0,13	0,13

Tabelle 6: Berechnung der hydraulischen Radien im Untersuchungsgebiet der Welse auf der Basis unterschiedlicher digitaler Höhenmodelle (Laserscanning / Generierung aus photogrammetrisch vermessenen Höhenlinien). Verwendete Berechnungsparameter: Gefälle und Fließrichtung aus dem DGM 5 abgeleitet, Abfluß aus den Eingangsdaten (19HQ100), Horizontalschrittweite 5 m, Vertikalschrittweite 0,01 m, K_{str} 30.

Der mittlere hydraulische Radius auf Basis der Geometrie aus dem DGM 5, welches aus photogrammetrisch vermessenen Höhenlinien erstellt wurde, beträgt bei beiden Gerinnelinien 0,22. Im Laserscanningbereich beträgt er bei der GerinneDGM5linie 0,39 bzw. bei der GerinneATKISlinie 0,44. Diese Werte sind beide größer als der vorhergenannte. Das Ausmaß der Abweichung begründet innerhalb des vereinfachten Verfahrens jedoch keine unterschiedliche Behandlungen der Querprofile oder ein Glätten des Laserscanning-Höhenmodells.

3.3.1.4 Querprofilabstand

Die räumlichen Abstände der zu berechnenden Flußpunkte bzw. der dazugehörigen Querprofile entlang der Gewässerlinie sind ausschlaggebend für die Genauigkeit der Modellierung. In der wasserwirtschaftlichen Praxis ist ein Profilabstand von ca. 100 m in annähernd homogenen Gewässerabschnitten mit einer engeren Scharung rund um abflußbeeinflussende Strukturen (Querbauwerke etc.) üblich.

Die höchstmögliche räumliche Dichte der Querprofile beim vereinfachten Verfahren stellt für die GerinneDGM5linie der 10 bzw. 14 m Abstand dar. Die GerinneDGM5linie stellt die aus dem digitalen Höhenmodell abgeleitete Tiefenlinie (siehe Kapitel 3.3.2.1.1) dar. Jede Tiefen-

linien-Rasterzelle steht mit ihrem Mittelpunkt gleichbedeutend für einen Flußpunkt. Die genannten Abstände sind das Maß für die gerade bzw. diagonale Fließlänge einer Rasterzelle, d.h. die Entfernungen zwischen den Rasterzellen-Mittelpunkten (Abbildung 30). Für die GerinneATKISlinie könnten zwar engere Abstände gewählt werden, da jedoch die dazugehörigen Eingangsparameter auch auf Basis des DGM 5 mit seiner 10 m Rasterweite abgeleitet werden, hätte es nur eine geringe Ergebnisverbesserung zur Folge (z.B. durch einen dichteren Eingangsdatensatz bei den abschließenden Flächenbildungsverfahren). Der Vorteil einer weiten Scharung der Querprofile liegt im Einsparen von Rechenzeit, da die Anzahl der zu berechnenden Querprofile entlang der Gewässer hauptverantwortlich für die zu veranschlagende Gesamtrechenzeit einer Einzugsgebietsmodellierung ist.

Es wurden vergleichende Berechnungen zur Auswirkung der Querprofil-dichte in Bezug auf die Wasserstandshöhen und die dazugehörigen räumlichen Ausdehnungen der hochwassergefährdeten Bereiche im Untersuchungsgebiet der Lutter durchgeführt. Die Referenzberechnung ist in diesem Falle die qualitativ hochwertigere Berechnung mit der höchstmöglichen Querprofilanzahl (Abstände 10 bis 14 m, GerinneDGM5linie). Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 7 zusammengefaßt.

Querprofil-abstände	Größe des hochwassergefährdeten Bereiches [km ²]	Abweichung von der Referenz [km ²]	Qualitative Beschreibung der räumlichen Auswirkungen
1000 - 1400 m	1,208586	- 0,142984	drei überflutete Teilbereiche
500 - 700 m	1,259368	- 0,092202	zwei überflutete Teilbereiche
200 - 280 m	1,284588	- 0,066982	Johannisbachmündung nicht abgebildet
100 - 140 m	1,337981	- 0,013589	geringfügig größer als 200 - 280 m
50 - 70 m	1,317570	- 0,034	Finkenbachmündung nicht abgebildet
20 - 28 m	1,349670	0,0019	minimale Unterschiede zu 10 – 28 m
10 – 14 m	1,351570	0 (Referenz)	Johannisbachmündung abgebildet

Tabelle 7: Auswirkung der Reduzierung der Querprofil-dichte auf die räumliche Ausdehnung der hochwassergefährdeten Bereiche. Die Flächengrößen beziehen sich auf den mit der Referenz vergleichbaren Mittelteil des hochwassergefährdeten Bereiches (Anfangs- und Endbereich und fünf Nebenflußeinmündungen fehlen). Bei der Referenzberechnung verwendete Parameter: Gefälle und Fließrichtung aus dem DGM 5 abgeleitet, Abfluß aus den Eingangsdaten (6HQ100), Horizontalschrittweite 5 m, Vertikalschrittweite 0,01 m, GerinneDGM5linie, K_{str} 10, Flächenbildung anhand Oberflächeninterpolation IDW.

Liegen die Abweichungen der berechneten Wasserstände bei einem Querprofilabstand von 20 bis 28 m noch bei durchschnittlich wenigen Zentimetern bis hin zu maximalen Spitzen von 40

cm, pendeln die berechneten Wasserspiegelstände bei einem Querprofilabstand von 280 m bis über 1 m um die Referenzwerte.

Der qualitative räumliche Vergleich der berechneten hochwassergefährdeten Bereiche zeigt, daß bei einem Querprofilabstand von 20 bis 28 m die Ergebnisse noch mit der Referenz vergleichbar sind. Alle weiteren Scharungen jedoch führen zu gravierenden Flächenveränderungen. Der quantitative Vergleich der Flächen unterstützt dieses Ergebnis: die positive Abweichung bei einem Querprofilabstand von 20 bis 28 m liegt bei $0,0019 \text{ km}^2$. Alle weiteren Scharungen liegen sowohl im negativen Bereich als auch in einer mit dem vereinfachten Verfahren nicht zu vereinbarenden Größenordnung.

Aufgrund der Annahme, daß die Anwendung des vereinfachten Verfahrens in einem Ingenieurbüro mit optimaler Rechnerkapazität erfolgt, wird auf eine Reduzierung der Querprofil-dichte verzichtet, um den zu erwartenden Fehler so gering wie möglich zu halten.

3.3.1.5 Rauigkeitsbeiwert

Im 100jährigen Hochwasserfall weist an kleinen Fließgewässern der weitaus überwiegende Teil des benetzten Radius Bewuchs auf. Deshalb wird für das vereinfachte Verfahren über die gesamte Gerinne- und Vorlandbreite ein einheitlicher Strickler-Beiwert angenommen. Der relativ kleine Bereich des Flußschlauchs selber wird vernachlässigt. Die Strickler-Beiwerte für die Oberflächenbeschaffenheit von Vorländern können der einschlägigen Fachliteratur entnommen werden (DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU E.V. 1990: 267; PATT et al. 1998: 143; SCHMIDT 1984: 71). Als mittlerer Wert wurde $K_{\text{str}} 30$ angenommen.

Verschiedene Variationen des Rauigkeitsbeiwertes wurden im Untersuchungsgebiet der Lutter berechnet. Die Ergebnisse sind als Längsprofil der berechneten Wasserstände in der folgenden Abbildung 17 ersichtlich. Da mit dem mittleren Rauigkeitsbeiwert von $K_{\text{str}} 30$ die Referenzwasserstände unterschritten wurden, erfolgten weitere Variantenberechnungen mit den kleineren Rauigkeitsbeiwerten $K_{\text{str}} 15$ und $K_{\text{str}} 10$. Dadurch kann während der hydraulischen Berechnung ein relativ gleichmäßiger Wasserspiegelanstieg entlang des gesamten Gewässers erreicht werden.

Eine Unterscheidung der Querprofile in Klassen flacher und steiler Charakteristik zum differenzierten Einsatz von Rauigkeitsbeiwerten könnte ein wichtiger Punkt zur Weiterentwicklung des vereinfachten Verfahrens sein (siehe Kapitel 4). Im Hinblick auf den angestrebten Zielmaßstab erscheint eine solche Unterscheidung jedoch nicht angemessen.

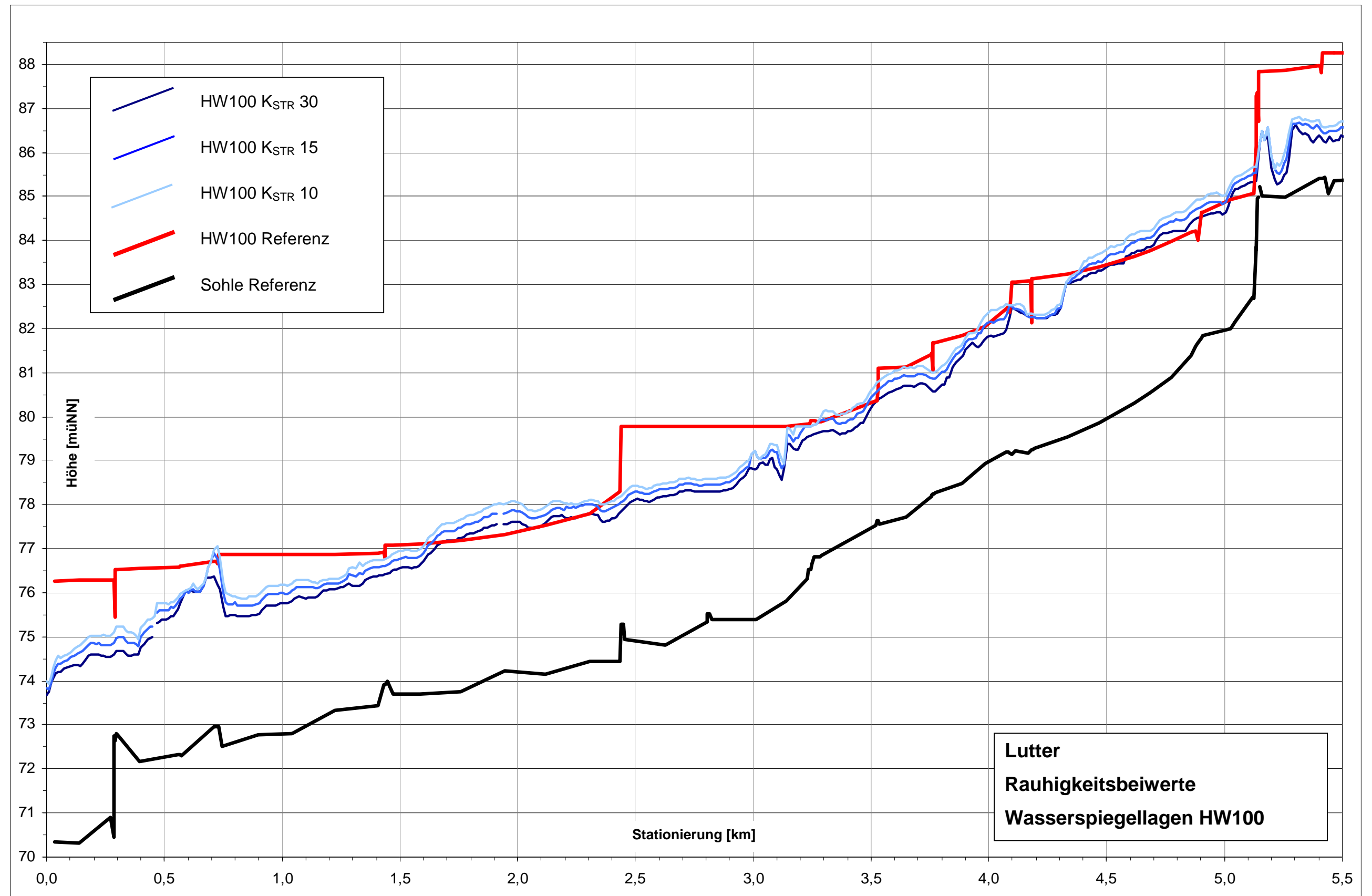


Abbildung 17: Variationen des Rauhigkeitsbeiwertes an der Lutter, Längsprofilardarstellung. Die Unterbrechungen der berechneten Wasserspiegellinien erklären sich durch Anpassungen an die Stationierung der Referenz, um einen Vergleich zu ermöglichen. Folgende Berechnungsparameter wurden verwendet: GerinneDGM5linie, Gefälle und Fließrichtung aus dem DGM 5 abgeleitet, Abfluß aus den Eingangsdaten (6HQ100), Horizontalschrittweite 5 m, Vertikalschrittweite 0,01 m.

Die folgende Tabelle 8 stellt die Unterschiede hinsichtlich der räumliche Ausdehnung der Variantenberechnungen zusammen.

Flächenangaben [km ²] Differenz zur Vorgabe [km²] Abweichung [%]	K_{str} 10	K_{str} 15	K_{str} 30	Differenzen von / bis Variationsbreite Differenzen [km²] Variationsbreite Abweichung [%]
GerinneDGM5linie Flächenbildung – Morphometrie	1,365771 - 0,118793 - 8,0	1,258193 - 0,226371 - 15,2	1,107779 - 0,376785 - 25,4	- 0,12 / - 0,38 0,26 17,4
GerinneDGM5linie Flächenbildung – Ober- flächeninterpolation	1,351570 - 0,132994 - 9,0	1,243588 - 0,240976 - 16,2	1,041585 - 0,442979 - 29,8	-0,13 / - 0,44 0,31 20,8
GerinneATKISlinie Flächenbildung – Morphometrie	1,116910 - 0,367654 - 24,8	1,024293 - 0,460271 - 31,0	0,923467 - 0,561097 - 37,8	- 0,37 / - 0,56 0,19 13,0
GerinneATKISlinie Flächenbildung – Ober- flächeninterpolation	1,217764 - 0,2668 - 18,0	1,083369 - 0,401195 - 27,0	0,936948 - 0,547616 - 36,9	- 0,27 / - 0,55 0,28 18,9
Differenzen von / bis Variationsbreite Differenzen [km²] Variationsbreite Abweichung [%]	- 0,12 / - 0,27 0,13 16,8	- 0,22 / - 0,46 0,24 15,8	- 0,38 / - 0,56 0,18 12,4	

Tabelle 8: Rauigkeitsbeiwert und Gerinnelinien. Flächengrößen der hochwassergefährdeten Bereiche der Lutter bei Variation des Rauigkeitsbeiwertes. Die Werte beziehen sich auf den mit der Vorgabe vergleichbaren Gewässerabschnitt von Stationierung 0,5 bis 5,1 km. Darüber hinaus beinhalten die Flächenangaben nur die Bereiche, die direkten Kontakt mit dem Gewässerschlauch haben. Das Überschwemmungsgebiet der Referenzdaten hat eine Größe von 1,484564 km². Weitere Berechnungsparameter: Gefälle und Fließrichtung aus dem DGM 5 abgeleitet, Abfluß aus den Eingangsdaten (6HQ100), Horizontalschrittweite 5 m, Vertikalschrittweite 0,01 m.

Die Variante K_{str} 30 unterschreitet die Referenz um 25,4 bis 37,8 %, die Variante K_{str} 15 um 15,2 bis 31 % bzw. die Variante K_{str} 10 um 8 bis 24,8 % (Tabelle 8). Auch aus der räumlichen Betrachtung heraus kann keine entscheidende Verbesserung der Ergebnisse durch einen durchgehend niedrigeren Rauigkeitsbeiwert festgestellt werden.

Der Einsatz eines einheitlichen Rauigkeitsbeiwertes von K_{str} 30 bei der hydraulischen Modellierung entspricht den Vorgaben zur Vereinfachung des Verfahrens und ist angemessen im Hinblick auf den angestrebten Zielmaßstab der Ergebnisse.

3.3.1.6 Gerinnekasten

Aufgrund der Herstellungsart fehlt im DGM 5 meist die Abbildung eines Gerinnekastens, der sowohl den Flußschlauch selber als auch das umgebende Vorland bis zur oberen Böschungskante umfaßt (siehe Kapitel 3.2.1 und Kapitel 3.5.1.1). Dies gilt für alle Modellbereiche, die aus photogrammetrisch vermessenen Höhenpunkten generiert wurden. Die Laserscanningmodelle bilden zumindest teilweise die Gerinneböschungen und Wasseroberflächen ab.

Für die Ausbildung eines Gerinnekastens im Gelände sind folgende prägende Hauptfaktoren verantwortlich: die Geologie (bzw. das Flußbettmaterial), die Reliefenergie und der Niederschlag (Menge, zeitlicher Verlauf). Um das entstehende Defizit zwischen Modell und Realität auszugleichen, wurden Versuche zum Einsatz eines angenommenen Gerinnekastens durchgeführt. Dieser Gerinnekasten soll den Fehlbetrag zwischen der Geländeoberfläche des DGM 5 und der tatsächlichen Gewässersohle ausgleichen.

In der Literatur findet sich eine breite Aufbereitung des Themas ‘Morphologie des Gerinnebettes’ (KNIGHTON 1984: 2; ROSGEN 1996: 3ff; SOMMERHÄUSER UND TIMM 1999: 76ff), jedoch werden selten numerische Werte zur morphologischen Beschreibung herangezogen. Die Gewässerstrukturgütekartierung Nordrhein-Westfalen, innerhalb derer Angaben zu speziellen Profiltiefen und Breitenentwicklungen bzw. zur Profilform aufgenommen werden (BLANK et al. 1999: 9), hat noch keinen landesweiten Bearbeitungsstand und kann deshalb nicht als Datenbasis genutzt werden. Bei der Entwicklung des vereinfachten Verfahrens wurden zwei andere unterschiedliche Grundlagen getestet: Zum einen wurde eine mittlere Gerinnekastengröße aus den vermessenen Referenzquerprofilen der Lutter abgeleitet. Zum anderen wurden regionalisierte numerische Größenangaben einer Studie des Landesumweltamtes NRW genutzt.

3.3.1.6.1 Gerinnekasten aus empirischen Vermessungsdaten

Es wurde eine konstante Kastenform von 2,3 m Tiefe und 8 m Breite als Mittel der vermessenen Referenzquerprofile 15 - 20 und 42 - 47 der beiden freien Fließabschnitte abgeleitet (Abbildung 18a). Wider Erwarten unterschied sich die Profillinie der gemittelten quellnahen

Querprofile (42 - 47) nur geringfügig vom Mittel der mündungsnäheren Querprofile (15 - 20), obwohl zwischen den freien Fließabschnitten der wichtigste Zufluß der Lutter (Windwehe) einmündet. Wahrscheinlich läßt sich dieser Tatbestand auf den weitestgehenden Ausbau des Gewässers zurückführen. Die freien Fließabschnitte sollten korrekterweise als annähernd freie Fließabschnitte bezeichnet werden.

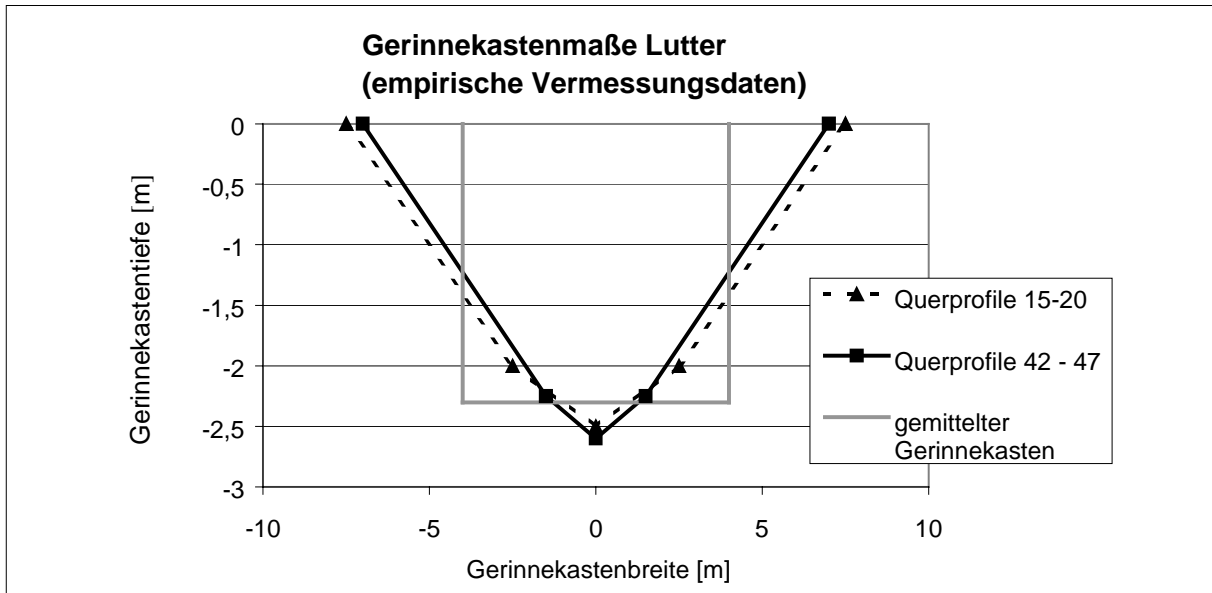


Abbildung 18 a: Ableitung einer durchschnittlichen Gerinnekastengröße an der Lutter auf Basis der vermessenen Referenzquerprofile.

Unter Annahme dieses konstanten Gerinnekastens wurden hydraulische Berechnungen durchgeführt. Die Ergebnisse in Form von Wasserstandshöhen unterschreiten bei Profil 15 - 20 die Berechnung ohne Gerinnekasten im Mittel um 0,08 m bzw. bei Profil 42 - 47 um 0,82 m (Tabelle 9).

Gerinnekasten	W_{100} [m] (gemittelt)	Breite [m] (gemittelt)
Profil 15-20	-0,08	-34,47
Profil 42-47	-0,82	-86,97

Tabelle 9: Wasserstände und Überschwemmungsbreiten an Querprofilen der freien Fließabschnitte der Lutter bei Einsatz eines Gerinnekastens auf Basis empirisch vermessener Querprofile. Referenz sind die Ergebnisse des Vereinfachten Verfahrens ohne den Einsatz des Gerinnekastens. Weitere Berechnungsparameter: Gefälle und Fließrichtung aus dem DGM 5 abgeleitet, Abfluß aus den Eingangsdaten (6HQ100), K_{str} 30, Horizontalschrittweite 5 m, Vertikalschrittweite 0,01 m.

Im ersten freien Fließabschnitt sind die Unterschiede gering. Die Ergebnisse des zweiten Abschnittes erklären sich durch einen insgesamt geringeren Abfluß quellnäherer Bereiche. Die Annahme eines Gerinnekastens mit festen Maßen hat hier eine wesentlich größere Wirkung

als im unteren Gewässerabschnitt. Auch die Überschwemmungsbreite entlang der Querprofile 42 - 47 zeigt extreme negative Abweichungen mit einem Mittel von 86,97 m. Das erklärt sich durch eine geringfügige Geländeanhebung entlang der Gewässerlinie (bzw. der Tiefenlinie des DGM 5) die bei der Berechnungsvariante mit Gerinnekasten nicht mehr überflutet wird. Eine landesweite Übertragung des empirisch ermittelten Gerinnekastens der Lutter ist auf Basis der vorgestellten Berechnungsergebnisse nicht zu empfehlen. Darüber hinaus handelt es sich bei der Lutter um ein extrem ausgebautes Gewässer, welches nicht zur Ableitung eines durchschnittlichen Kastens genutzt werden sollte.

3.3.1.6.2 Gerinnekasten auf Basis einer Klassifikation des Landesumweltamtes NRW

Vom Landesumweltamt NRW liegt eine Klassifizierung der landesweiten Gerinnegeometrien in Bezug auf die daraus resultierende Kastenbreite und -tiefe vor, die der Studie „Leitbilder für kleine und mittelgroße Fließgewässer in NRW“ (LANDESUMWELTAMT 1999b: 62ff) entnommen werden kann. Diese Untersuchung basiert auf einer Erhebung des Ist-Zustandes definierter Referenzgewässer der Fließgewässertypen (LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN 1999a: 23ff). Die Gewässer werden in die zwei Hauptklassen Mittelgebirgs- und Flachlandgewässer unterteilt. Unterklassen definieren sich anhand der Talform bzw. der Substratverhältnisse. Aus dieser Klassifikation ergeben sich vier Gewässerlandschaften im Flachland und sechs im Mittelgebirge, für die es jeweils Größenangaben bezüglich der durchschnittlichen Profil- und Einschnittstiefe gibt.

Die **Profiltiefe** ist das mittlere Tiefen-Breiten-Verhältnis des Gewässerbettes, d.h. die Höhendifferenz zwischen Sohle und Böschungsoberkante im Verhältnis zur Breite des Gewässers an der Böschungsoberkante (Klassifikation Tabelle 10).

Profiltiefe	mittleres Tiefen-Breiten Verhältnis
sehr tief	> 1 : 3
tief	1 : 3 bis 1 : 4
mäßig tief	1 : 4 bis 1 : 6
flach	1 : 6 bis 1 : 10
sehr flach	< 1 : 10
staureguliert	nicht erkennbar

Tabelle 10: Klassifikation der Profiltiefen nordrhein-westfälischer Gewässer (nach LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN 1998: 92).

Die Profiltiefe stellt von den Ausmaßen her das Verhältnis des im DGM 5 fehlenden Kastens dar. Die **Einschnittstiefe** stellt die durchschnittliche Höhendifferenz zwischen Sohle und Böschungsoberkante dar.

Die vorliegenden Maße wurden zu einem gemittelten Gerinnekasten (**Gerinnekasten – 1**) verrechnet. Dazu wurde die mittlere Einschnittstiefe multipliziert mit der Breite aus dem mittleren Breiten-Tiefenverhältnis (= Profiltiefe). In der Tabelle 13 sind die Gerinnekastenmaße für die Gewässerlandschaft ‘Schwach-karbonatisches Deckgebirge’, zu dem das Einzugsgebiet der Lutter gehört, zu sehen. Der Tabelle 11 bis Tabelle 13 können die gemittelten Gerinnekastengrößen der übrigen Gewässerlandschaftsklassen entnommen werden.

Gewässerlandschaft	Sandgebiete	Verwitterungsgebiete und Flußterrassen	Lößgebiete	Niederungsgebiete
Profiltiefe	Sehr flach bis tief < 1 : 10 bis 1 : 3 ~ 1 : 7	Flach bis tief 1 : 10 bis 1 : 3 ~ 1 : 6,5	Mäßig tief bis sehr tief 1 : 6 bis > 1 : 3 ~ 1 : 4	Sehr flach bis mäßig tief < 1 : 10 bis 1 : 4 ~ 1 : 7,5
Einschnittstiefe	10 bis 150 cm ~ 80 cm	50 bis 150 cm ~ 100 cm	40 bis 200 cm ~ 120 cm	10 bis 50 cm ~ 30 cm
Gerinnekasten_1	80 x 560 cm (4,48 m ²)	100 x 650 cm (6,5 m ²)	120 x 480 cm (5,76 m ²)	30 x 225 cm (0,67 m ²)
Gerinnekasten_4	150 x 1500 cm (22,5 m ²)	150 x 1500 cm (22,5 m ²)	200 x 1200 (24 m ²)	50 x 500 (2,5 m ²)

Tabelle 11: Gewässerlandschaften – Flachlandgewässer (nach: LANDESUMWELTAMT 1999b: 62ff).

Gewässerlandschaft	Silikatisches Grundgebirge	Vorland des Silikat. Grundgebirges	Vulkangebiete
Profiltiefe	Sehr flach bis tief < 1 : 10 bis 1 : 3 ~ 1 : 7	Mäßig flach bis tief 1 : 6 bis 1 : 3 ~ 1 : 4,5	Mäßig flach bis tief 1 : 6 bis 1 : 3 ~ 1 : 4,5
Einschnittstiefe	0 bis 200 cm ~ 100 cm	1 bis 100 cm ~ 50 cm	20 bis 150 cm ~ 85 cm
Gerinnekasten_1	100 x 700 cm (7 m ²)	50 x 225 cm (1,12 m ²)	85 x 382,5 cm (3,25 m ²)
Gerinnekasten_4	200 x 2000 cm (40 m ²)	100 x 600 cm (6 m ²)	150 x 900 cm (13,5 m ²)

Tabelle 12: Gewässerlandschaften – Mittelgebirgsgewässer I (nach: LANDESUMWELTAMT 1999b: 62ff).

Gewässerlandschaft	Schwach-karbonatisches Deckgebirge (Lutter)	Muschelkalkgebiete	Verkarstete Kalkgebirge
Profiltiefe	Mäßig flach bis tief 1 : 6 bis 1 : 3 ~ 1 : 4,5	Sehr flach bis tief < 1 : 10 bis 1 : 3 ~ 1 : 7	Mäßig flach bis tief 1 : 6 bis 1 : 3 ~ 1 : 4,5
Einschnittstiefe	0 bis 150 cm ~ 75 cm	20 bis 100 cm ~ 60 cm	50 bis 250 cm ~ 150 cm
Gerinnekasten_1	75 x 337,5 cm (2,53 m ²)	60 x 420 cm (2,52 m ²)	150 x 675 cm (10,12 m ²)
Gerinnekasten_4	150 x 900 cm (13,5 m ²)	100 x 1000 cm (10 m ²)	250 x 1500 cm (37,5 m ²)

Tabelle 13: Gewässerlandschaften – Mittelgebirgs Gewässer II (nach: LANDESUMWELTAMT 1999b: 62ff).

Die abgeleiteten Gerinnekastengrößen liegen zwischen 0,67 und 10,12 m² und sind damit erwartungsgemäß relativ ausgeglichen. Die Lutter hat eine Gerinnekastengröße von 2,53 m² (**Gerinnekasten_1**). Da die Auswirkungen dieses relativ kleinen Kastens bei der Hydraulikberechnung nur eine minimale Wasserspiegelabsenkung zur Folge hat (Tabelle 14 und Abbildung 18 b), wurden weitere Gerinnekästen abgeleitet. Dem Gerinnekasten_2 liegt eine Ver vierfachung (10,12 m²) bzw. dem Gerinnekasten_3 (22,77 m²) eine Verneunfachung der Fläche von **Gerinnekasten_1** zugrunde. Die jeweils berechneten Ergebnisse können wiederum Tabelle 14 und Abbildung 18 b entnommen werden. Auch hier sind die Auswirkungen auf den berechneten Wasserstand äußerst gering. Der **Gerinnekasten_4** unterscheidet sich durch den Einsatz der maximalen Einschnittstiefe und des maximalen Breiten-Tiefenverhältnis (= Profiltiefe). Die Größen dieser Gerinnekästen liegen zwischen 2,5 und 40 m², die Kastengröße im Bereich der Lutter beträgt 13,5 m². Trotz des Einsatzes des maximalen Breiten-Tiefenverhältnisses ist die Kastengröße kleiner als die des Gerinnekastens_3. Da schon hier die Auswirkungen recht gering waren, werden keine weitere Berechnungen mit dem **Gerinnekasten_4** durchgeführt. Die Größe der gemittelten Gerinnekastenform der Vermessungsdaten der Lutter ist mit 18,4 m² ebenfalls kleiner als der Gerinnekasten_3.

Gerinnekästen	Summe HW (insg. 546 Querprofile) [m] Fläche [km²]	Summe HW Differenz [m] durchschn. Höhendifferenz pro Querprofil [cm] Flächendifferenz [km²] Flächendifferenz [%]
Referenz (ohne Kasten)	43959,15 1,351570	
Gerinnekasten_1 2,53 m ²	43953,24 1,348177	5,91, ~ 0,01 0,003393 , 0,2
Gerinnekasten_2 10,12 m ²	43932,13 1,317862	27,02 m, ~ 0,05 0,033708 , 2,5
Gerinnekasten_3 22,77 m ²	43883,09 1,269914	- 76,06 , ~ 0,14 0,081656 , 6,0
Gerinnekasten - Vermessung 18,4 m ²	43843,91 1,225474	- 115,24, ~ 0,21 0,126096 , 9,3

Tabelle 14: Flächengrößen der hochwassergefährdeten Bereiche und Wasserstände der Lutter bei Einsatz unterschiedlicher Gerinnekästen. Referenz sind die Ergebnisse des vereinfachten Verfahrens ohne den Einsatz eines Gerinnekastens, die berechnete Flächengröße beträgt hier 1,351570 km². Weitere Berechnungsparameter: Gefälle und Fließrichtung aus dem DGM 5 abgeleitet, Abfluß aus den Eingangsdaten (6HQ100), K_{str} 10, Horizontalschrittweite 5 m (Gerinnekasten_1 und _2 Horizontalschrittweite 1 m), Vertikalschrittweite 0,01 m, GerinneDGM5linie, Flächenbildung anhand Oberflächeninterpolation IDW. Alle Flächenangaben beziehen sich auf den mit den Referenzdaten vergleichbaren Gewässerabschnitt zwischen Stationierung: 0,5 und 5,1 km.

Es treten einige **Probleme bei der Ableitung der Gerinnekastenmaße** aus den Referenzgewässerdaten auf, die vor der Bewertung der ermittelten Ergebnisse qualitativ erläutert werden sollen:

- Nur die Haupttypen, d.h. die Gewässerlandschaften werden betrachtet, nicht aber die feinere Unterteilung der ‚Hydrologischen Typen‘. Das geschieht aus dem Grund, daß nur erstere in einer Übersichtskarte dargestellt sind und bei der landesweiten Anwendung des vereinfachten Verfahrens lokalisiert werden können. Darüber hinaus stellen die gemittelten Daten nur Größen in Bezug auf Teilabschnitte der Referenzgewässer dar, der gemittelte Gerinnekasten hingegen generalisiert diese Aussagen über das gesamte Gewässer.
- Grundsätzlich beruhen die auf diese Art und Weise abgeleiteten Kästen auf der Annahme potentiell natürlicher Verhältnisse der Referenzgewässer. Bäche und Flüsse sind jedoch in der heutigen Kulturlandschaft - besonders in den Tieflandregionen - einer Vielzahl

menschlicher Eingriffe unterworfen worden. Sogar naturnahe Bäche haben ihr naturraumtypisches Potential oft nur in Teilstrecken behalten können. In Niederungsgebieten sind natürliche Bäche faktisch nicht mehr anzutreffen, alle kleineren Fließgewässer sind hier grabenartig ausgebaut.

- Ausgebaute Bäche haben andere Gerinnekastenmaße als die Referenzgewässer. Es gilt die Faustformel: flaches Profil = naturnah, tiefes Profil = naturfern (SOMMERHÄUSER UND TIMM 1999: 86).

Die Ergebnisse der verschiedenen Kastenberechnungen in Bezug auf die berechnete Wasserspiegellage sind in der folgenden Abbildung 18 b abgebildet. Die dazugehörigen Flächengrößen sind der Tabelle 14 zu entnehmen.

Der Einsatz des **Gerinnekasten_1** führt bei einer Horizontalschrittweite von 5 m zu keiner Abweichung der Ergebnisse von der Referenzdaten. Das liegt an der verhältnismäßig großen Horizontalschrittweite von 5 m, die der geringen Kastenbreite nicht gerecht wird bzw. der erste Schritt schon die Kastenbreite überschreitet. Aus diesem Grunde werden die kleineren Gerinnekästen (**Gerinnekasten_1** und **_2**) mit einer Horizontalschrittweite von 1 m berechnet. Die Abweichung des **Gerinnekasten_1** von der Referenz führt daraufhin zu einer durchschnittlichen Absenkung des Wasserspiegels an den Querprofilen von 1 cm. Bei Vervielfachung der Kastenfläche liegt diese durchschnittliche Abweichung bei 5 cm bzw. bei einer Verneunfachung der Fläche bei durchschnittlich 14 cm pro Querprofil. Auch die räumliche Ausdehnung macht sich erst beginnend mit dem Gerinnekasten_3 bedeutend bemerkbar, dort unterschreitet der hochwassergefährdete Bereich mit 6 % die Fläche der Vorgabe.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß sich erst ab einer Kastengröße von ca. 23 m² eine bedeutende Reaktion in der Wasserspiegellage und der dazugehörigen Fläche bemerkbar macht. Nur eine Verneunfachung des gemittelten Kastens der Gewässerlandschaften erreicht diese Größe, liegt damit aber oberhalb der Angaben zur maximalen Ausdehnung und kann deshalb nicht als Faustformel gebraucht werden. Das Einfügen eines angenommenen Gerinnekastens in das digitale Höhenmodell ist aufgrund der geringen Auswirkung auf das Ergebnis nicht geeignet. Auch die maximalen Ausdehnungen der Fließgewässerlandschafts-Gerinnekästen überschreiten nur in fünf von zehn Fällen eine Fläche von 22 m² (Ausdehnungen zwischen 2,5 und 37,5 m²). Darüber hinaus sollen die Berechnungsergebnisse des vereinfachten Verfahrens die maximal gefährdeten Bereiche darstellen. Unter diesem Gesichtspunkt erscheint eine Absenkung des Wasserspiegels nicht geeignet und die Nutzung der 0-Variante am sinnvollsten.

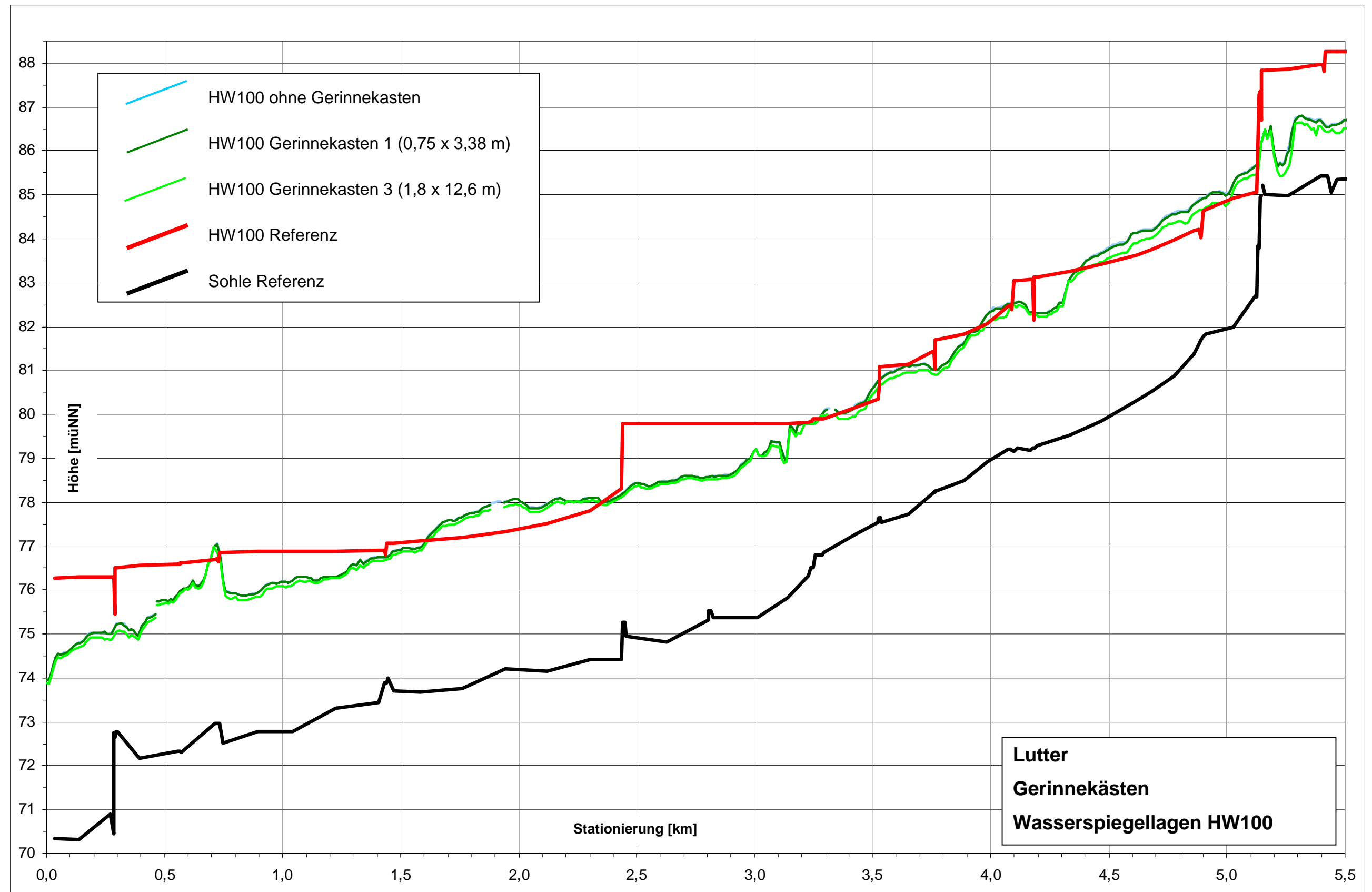


Abbildung 18 b: Variationen des Gerinnekastens an der Lutter, Längsprofildarstellung. Die Unterbrechungen der berechneten Wasserspiegellinien erklären sich durch Anpassungen an die Stationierung der Referenz, um einen Vergleich zu ermöglichen. Die Wasserspiegellinie der Berechnung ohne Gerinnekasten liegt fast vollständig hinter der Gerinnekasten_1 Variante. Folgende Berechnungsparameter wurden verwendet: GerinneDGM5linie, Gefälle und Fließrichtung aus dem DGM 5 abgeleitet, Abfluß aus den Eingangsdaten (6HQ100), K_{str} 30, Horizontalschrittweite 5 m, Vertikalschrittweite 0,01 m.

3.3.1.7 Rückstaubereiche

Die hydraulische Berechnung unter Verwendung der bisher als optimal ermittelten Parameterkombination (Horizontalschrittweite 5m, Vertikalschrittweite 0,01m, Querprofilabstand 10 bzw. 14 m, Rauigkeitsbeiwert K_{str} 30 und Gerinnekasten 0-Variante, siehe Abbildung 14) führt in den annähernd freien Fließabschnitten (siehe Kapitel 3.3.1) zu guten Ergebnissen. Durch die anschließende Integration der verschiedenen Rückstauwirkungen soll vor allem in den staubeeinflußten Fließabschnitten eine Annäherung der Modellierungsergebnisse an die Referenzdaten erfolgen. An verschiedenen Punkten im Gewässer wird von Rückstaubereichen ausgegangen, die durch Aufhöhung der hydraulisch berechneten Wasserspiegellagen Eingang in das vereinfachte Verfahren finden sollen. Folgende drei Rückstauvarianten werden in den anschließenden Unterkapiteln untersucht:

- Auffüllen von Wasserspiegelsenken
- Abflußbehinderung durch Querbauwerke
- Hochwasserführender Vorfluter

3.3.1.7.1 Rückstau durch Auffüllen von Wasserspiegelsenken

Eine grundsätzlich getroffene Annahme bezüglich Rückstau lautet: Eine einmal erreichte Wasserspiegellhöhe kann flußaufwärts nicht mehr unterschritten werden. Der Grund dafür ist das mehr oder weniger stetige Sohlgefälle eines natürlichen Gewässers. Das heißt, das die berechneten Wasserspiegellhöhen entlang des Längsprofils in einem weiteren Schritt überarbeitet werden und dabei Wasserspiegelsenken mit dem Wert des nächst tiefergelegenen Querprofils aufgefüllt werden. Damit erhält das Längsprofil den typischen Stufencharakter eines durch Rückstau beeinflussten Gewässers (Abbildung 25).

3.3.1.7.2 Rückstau aufgrund der Abflußbehinderung durch Querbauwerke

Die staubeeinflußten Gewässerabschnitte der Lutter sind durch eine Vielzahl unterschiedlicher Bauwerke gekennzeichnet. Insgesamt befinden sich zwischen der Gewässerstationierung 0 und 5,5 km 17 Bauwerke (Abbildung 15). Es handelt sich dabei gemäß der Referenzdaten um zwei Wehre, neun trapez- und sechs kastenförmige Brückenbauwerke. Zwölf der Bauwerke haben laut Referenzdaten eine Auswirkung auf die Wasserstandshöhe. Drei Gewässer-

abschnitte von jeweils über 600 m Länge sind bauwerksfrei, zwei dieser Abschnitte stimmen mit den freien Fließstrecken überein (siehe Kapitel 3.3.1). Der dritte bauwerksfreie Abschnitt befindet sich zwischen der Gewässerstationierung 0,77 und 1,45 km und damit in seiner gesamten Länge im Rückstaubereich des unterhalb liegenden Brückenbauwerkes.

Im folgenden werden ausgesuchte Einzelbauwerke der Referenzdaten betrachtet und in ihrer Rückstauwirkung auf den Wasserspiegel untersucht. Das Ziel ist die Ableitung einfacher Regeln zur Berücksichtigung von Bauwerken im Rahmen des vereinfachten Verfahrens. Exemplarisch werden jeweils zwei Vertreter der verschiedenen Bauwerksarten untersucht, von denen jeweils ein Bauwerk eine Auswirkung auf den Wasserstand hat, während für das andere eine Wirkung nicht erkennbar ist. Die Lage der ausgewählten Querbauwerke entlang des Längsprofils der Lutter ist in der Abbildung 15 dargestellt.

- Das **Wehr 901** liegt im Rückstaubereich des Vorfluters (Stationierung 0,274 km) und hat deshalb keinerlei Auswirkung auf den Wasserstand. Eine Erhöhung des Wasserspiegels um 22 cm erfolgt erst oberhalb des knapp hinter dem Wehr befindlichen Brückenbauwerkes 902 (Stationierung 0,294 km)(Abbildung 19).

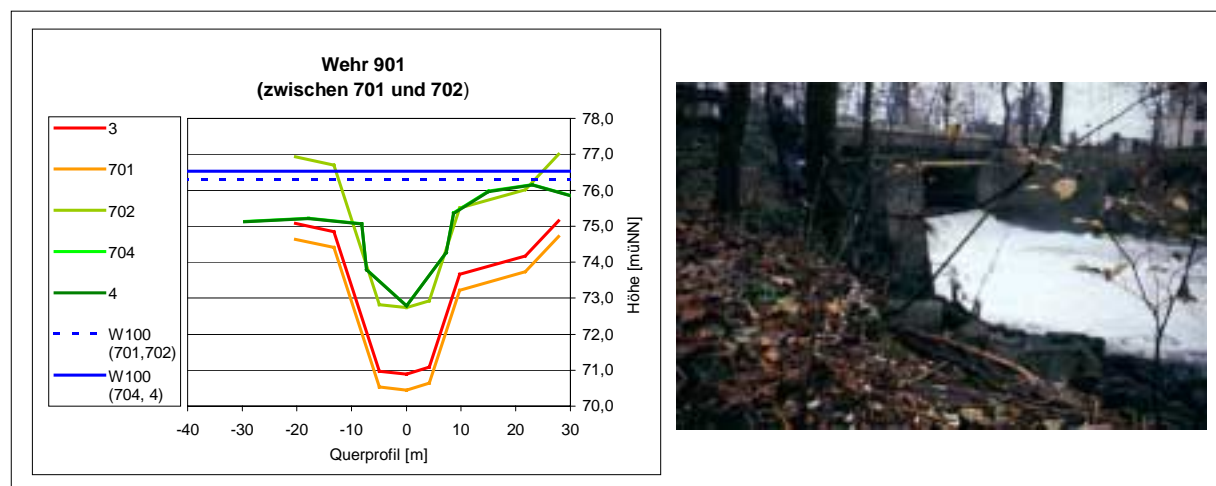


Abbildung 19: Die Nummerierung der Referenzquerprofile entspricht keiner stetigen Abfolge. Das betrachtete Bauwerk liegt zwischen den rötlichen und grünlichen Profillinien. Zu sehen sind zwei Referenzquerprofile unterhalb (orangene und rote Profillinie) und drei oberhalb (hell- bis dunkelgrüne Profillinie) des Wehres 901. Das Referenzquerprofil 704 hat einen nahezu identischen Verlauf wie das Profil 4 und wird deshalb verdeckt. Darüber hinaus sind die entsprechenden Referenzwasserhöhen zu sehen. Die gestrichelte blaue Linie steht in diesem Fall für die gleichbleibende Wasserstandshöhe ober- und unterhalb des betrachteten Bauwerkes. Die durchgehende blaue Linie steht für die oberhalb befindliche Wasserstandserhöhung am Brückenbauwerk 902, welches zwischen den Referenzquerprofilen 702 und 704 stationiert ist. Photographie: unterhalb des Wehres 901.

- Das **Wehr 914** (Stationierung 5,183 km) bewirkt eine Erhöhung des Wasserspiegels um 2,23 m. Die Absturzhöhe des Bauwerkes beträgt 1,16 m. Ein ausschließlicher Zusammen-

hang zwischen der Absturzhöhe und der Höhe des Wasserspiegelanstieges ist nicht erkennbar (Abbildung 20).

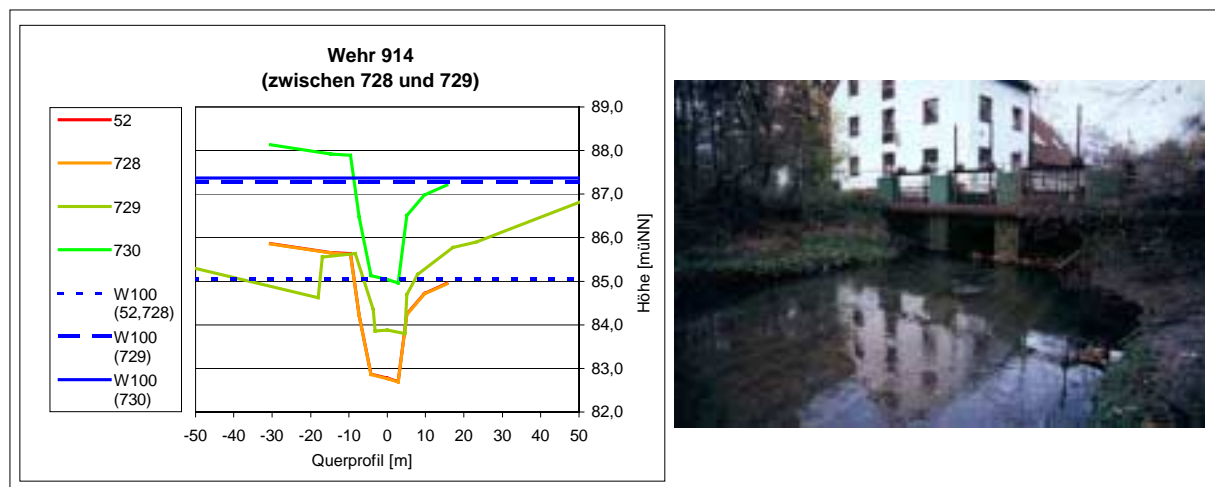


Abbildung 20: Referenzquerprofile und Wasserstände ober- und unterhalb des Wehres 914 (detaillierte Erläuterung siehe Abbildung 19). In diesem Fall sind die rote und die orangene Querprofilinie identisch, deshalb wird die rote Linie verdeckt. Die kurz gestrichelte Linie steht für den Wasserstand unterhalb des betrachteten Bauwerkes, die lang gestrichelte Linie für den Wasserstand oberhalb. Photographie: oberhalb des Wehres 914.

- Der **Kasten 905** (Stationierung 2,449 km) bewirkt keine Wasserstandsänderung (Abbildung 21).

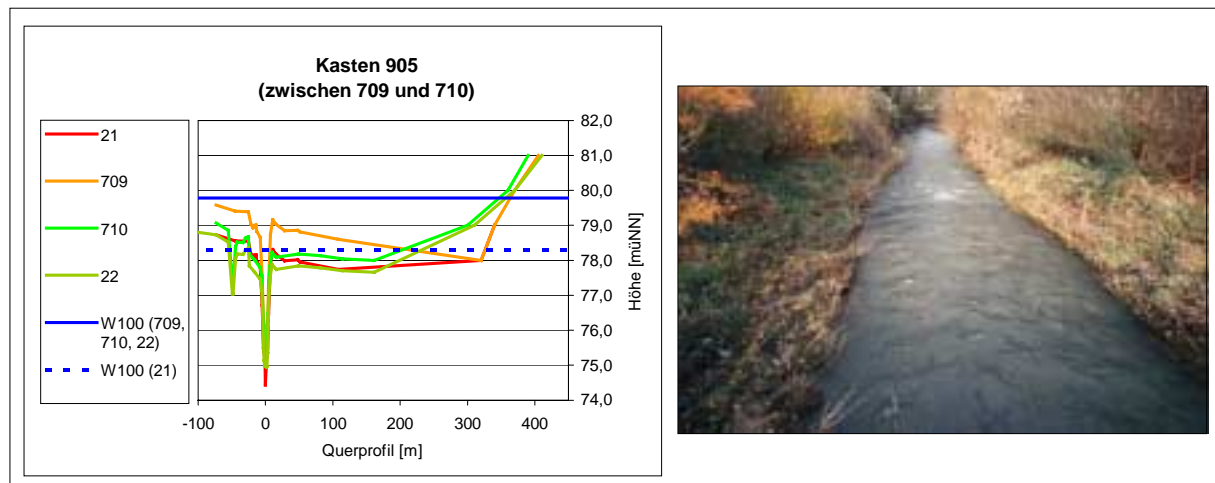


Abbildung 21: Referenzquerprofile und Wasserstände ober- und unterhalb des Kastens 905 (detaillierte Erläuterung siehe Abbildung 19). Die orangene Profilinie stellt das abflußbehindernde Querprofil 709 unterhalb des betrachteten Bauwerkes dar. Die durchgehende blaue Wasserstandslinie steht für den gleichbleibenden Wasserstand ober- und unterhalb des betrachteten Bauwerkes. Die gestrichelte Linie steht für den tieferen Wasserstand unterhalb des abflußbehindernden Querprofils 709. Photographie: unterhalb des Kastens 905.

Der Wasserstand ober- und unterhalb des Bauwerkes bleibt gleich, obwohl nur knapp 80 % ($55 \text{ m}^3/\text{s}$) des HQ100 ($70,44 \text{ m}^3/\text{s}$) durch den angegebene Kastendurchmesser abgeführt werden können (Diese und die im folgenden genannten Abflußabschätzungen an den Bauwerken erfolgen trotz der Bauwerkssituation ebenfalls mit der Fließformel nach Man-

nig-Strickler für stationär gleichförmigen Abfluß, da beim vereinfachten Verfahren keine Bauwerksmaße einfließen sollen. Die hier herangezogene Geometrie der Bauwerke entstammt den Referenzdaten, folgende weitere Parameter werden verwendet: GerinneDGM5, K_{STR} 40, Horizontalschrittweite 1 m und Vertikalschrittweite 0,01 m.). Das nur wenige Meter unterhalb gelegene Querprofil führt durch eine Verengung des Abflußdurchmessers jedoch zu einem starken Rückstau mit einem Wasserspiegelanstieg von 1,47 m. Somit liegt der Kasten 905 im Rückstaubereich einer Querprofilverengung, die nicht auf ein Bauwerk zurückzuführen ist.

- Auch der **Kasten 906** (Stationierung 2,804 km) liegt im beschriebenen Rückstau und hat deshalb keinerlei Wasserstandsänderung zur Folge, obwohl nur ca. ein Drittel ($26 \text{ m}^3/\text{s}$) des HQ100 ($70,44 \text{ m}^3/\text{s}$) durch den angegebenen Kastendurchmesser abfließen können (Abbildung 22).

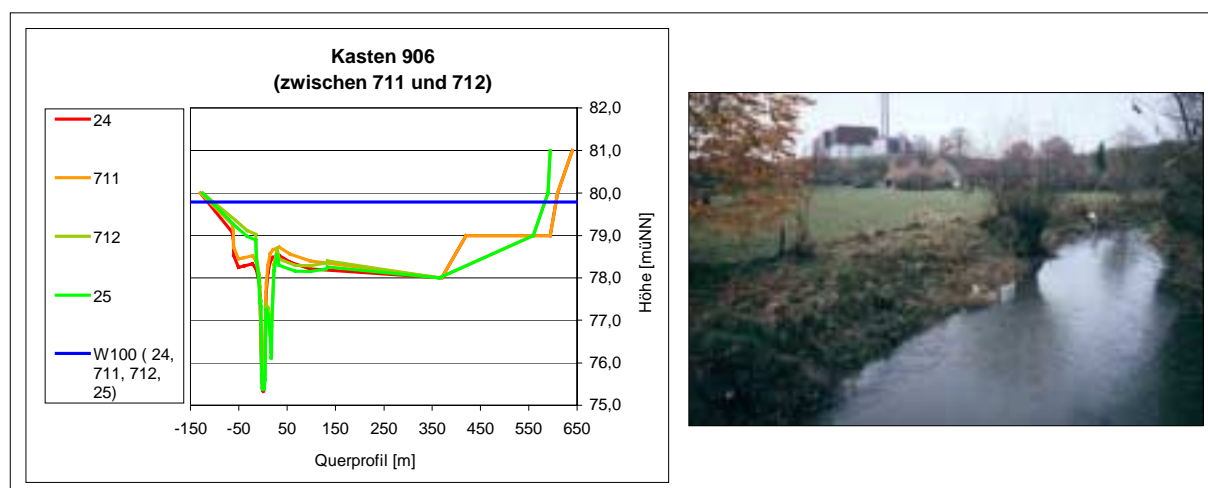


Abbildung 22: Referenzquerprofile und Wasserstände ober- und unterhalb des Kastens 906 (detaillierte Erläuterung siehe Abbildung 19). Die durchgehende blaue Wasserstandsline steht für den gleichbleibenden Wasserstand ober- und unterhalb des Kastens 906. Photographie: unterhalb des Kastens 906.

- Das **Trapez 909** (Stationierung 3,762 km) hat eine Wasserstandsänderung von 0,8 m zur Folge. Nur ca. die Hälfte ($32 \text{ m}^3/\text{s}$) des HQ100 ($65,51 \text{ m}^3/\text{s}$) paßt durch den angegebenen Trapezdurchmesser. Darüber hinaus ist der Fließwiderstand des Bauwerkes durch eine relativ breite Seitenwand wahrscheinlich überdurchschnittlich groß (Abbildung 23).

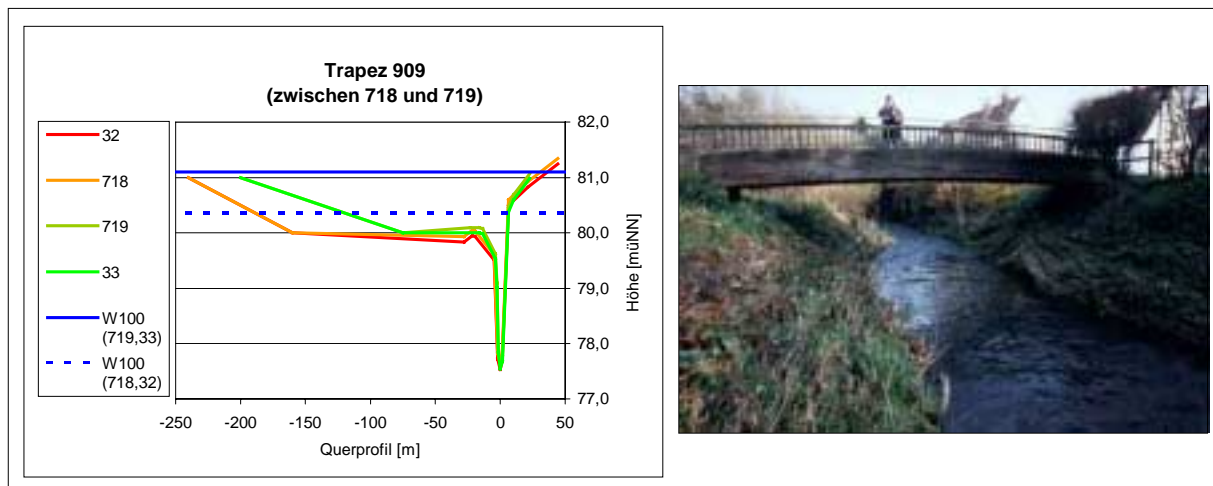


Abbildung 23: Referenzquerprofile und Wasserstände ober- und unterhalb des Trapez 909 (detaillierte Erläuterung siehe Abbildung 19). Die durchgehende Wasserstandslinie steht für die Überschwemmungshöhe oberhalb des Bauwerkes bzw. die gestrichelte für unterhalb. Photographie: oberhalb des Trapez 909.

- Das **Trapez 912** (Stationierung 4,883 km) liegt im Rückstaubereich des unterhalb liegenden Bauwerkes 911 und bewirkt nur eine geringe Wasserstandsänderung. Die Geometrie des Querprofils bildet ein extrem ausgebautes bzw. vertieftes Gerinne ab, in dem ein Hochwasser nahezu problemlos abgeführt werden kann. Ca. drei Viertel ($32 \text{ m}^3/\text{s}$) des HQ100 ($43,48 \text{ m}^3/\text{s}$) paßt durch den angegebenen Trapezdurchmesser (Abbildung 24).

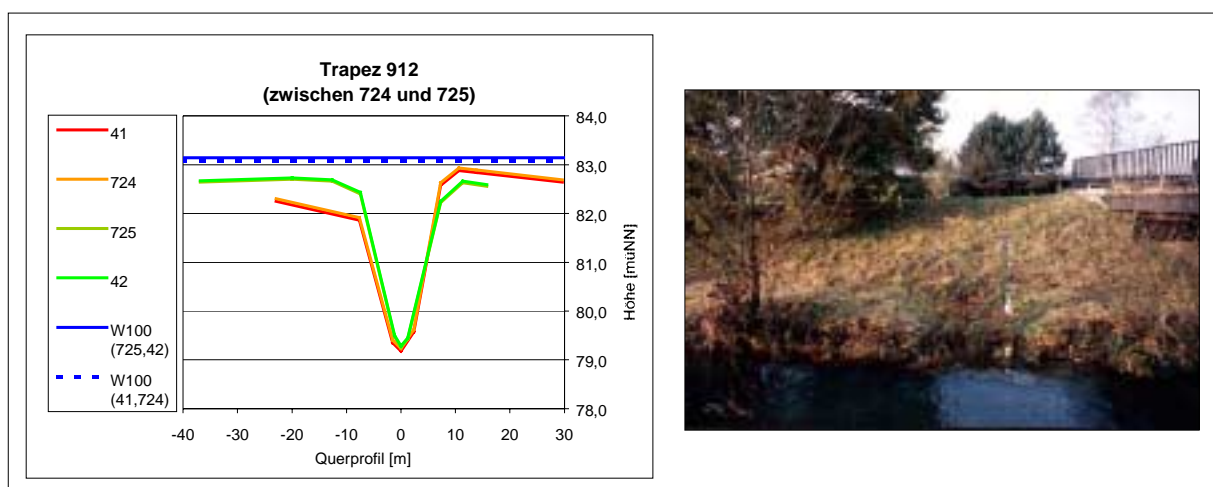


Abbildung 24: Referenzquerprofile und Wasserstände ober- und unterhalb des Trapez 912 (detaillierte Erläuterung siehe Abbildung 19). Die gestrichelte Wasserstandslinie steht für die Überschwemmungshöhe unterhalb des Bauwerkes bzw. die durchgehende Linie für oberhalb. Photographie: oberhalb des Trapez 912.

Die aufgeführten Beispiele zeigen große Diversität in den jeweiligen Dispositionen und Auswirkungen. Es ist schwierig, allgemeine Regeln abzuleiten. Die folgenden Punkte stellen mögliche Optimierungen dar:

- Ein immer wiederkehrendes Phänomen ist der Rückstau des Vorfluters im Hochwasserfall, eine Einbeziehung erscheint deshalb sinnvoll (siehe Kapitel 3.3.1.7.3).

- Die Ableitung vereinfachter Zusammenhänge zwischen der Abflußkapazität und der Rückstauhöhe an den einzelnen Bauwerken erweist sich als schwierig. Um die Bauwerksdimensionen dennoch in die Betrachtung einzubeziehen, werden die Bauwerke aus der DGK 5 heraus nicht nur erfaßt, sondern auch klassifiziert (siehe Kapitel 3.2.3).
- Die Bauwerke können eine individuelle Wasserstandsänderung zugewiesen bekommen. Erfolgt keine entsprechende Angabe, wird dem Bauwerk eine Rückstauhöhe von 1 m (Mittelgebirge) bzw. von 0,2 m (Flachland) zugeordnet. Diese Werte wurden empirisch aus den Ergebnissen der drei untersuchten Einzugsgebiete ermittelt (Abbildung 37, Abbildung 38 und Abbildung 39).
- Die Bauwerke erfahren darüber hinaus eine Differenzierung als ‚rückstaubildend‘ (Aufschlag) und ‚im Rückstau liegend‘ (kein Aufschlag). Durch ein Abarbeiten der Querprofile von der Mündung bis zur Quelle finden Bauwerke, die im Rückstau unterhalb liegender Querbauten liegen, keine Beachtung.

Die Ergebnisse der aufgeführten Rückstauvarianten sind der folgenden Abbildung 25 zu entnehmen. Die Variante Bauwerke beinhaltet die Rückstauwirkung der Querbauten. Jedes Bauwerk erhält einen festen Aufschlag von 1 m auf die Wasserspiegelfläche, die solange flußaufwärts betrachtet konstant gehalten wird, bis ein Flußpunkt mit höherem Wasserspiegel erreicht wird. Dadurch werden alle Bauwerke, die innerhalb des Rückstaubereiches liegen, nicht mit einem Aufschlag versehen. Die Annäherung an die Referenzdaten innerhalb der staubeeinflußten Bereiche läßt sich durch die Aufschläge entscheidend verbessern. Es kommt zur abgestuften Linienführung des Längsprofiles, so wie es auch die Referenzdaten vorgeben.

3.3.1.7.3 Rückstau am Vorfluter

Die Wasserstandshöhe des Vorfluters an der Einmündung des zu berechnenden Nebengewässers ist aus vorhergehenden Berechnungen oder Wasserspiegelangaben anderer Modellierungen bekannt. Diese Rückstauhöhe wird von der Mündung ausgehend als horizontaler Wasserstand entlang des Längsprofiles bis zum nächst höheren Punkt angenommen. Die beiden Rückstauvarianten Bauwerke und Wasserspiegelsenken der Abbildung 25 beinhalten gleichzeitig den Rückstau des Vorfluters (Stationierung 0 bis 0,55 km). Dadurch erklärt sich die Übereinstimmung der mündungsnahen Wasserstände der eigenen Berechnungen und der Referenzdaten.

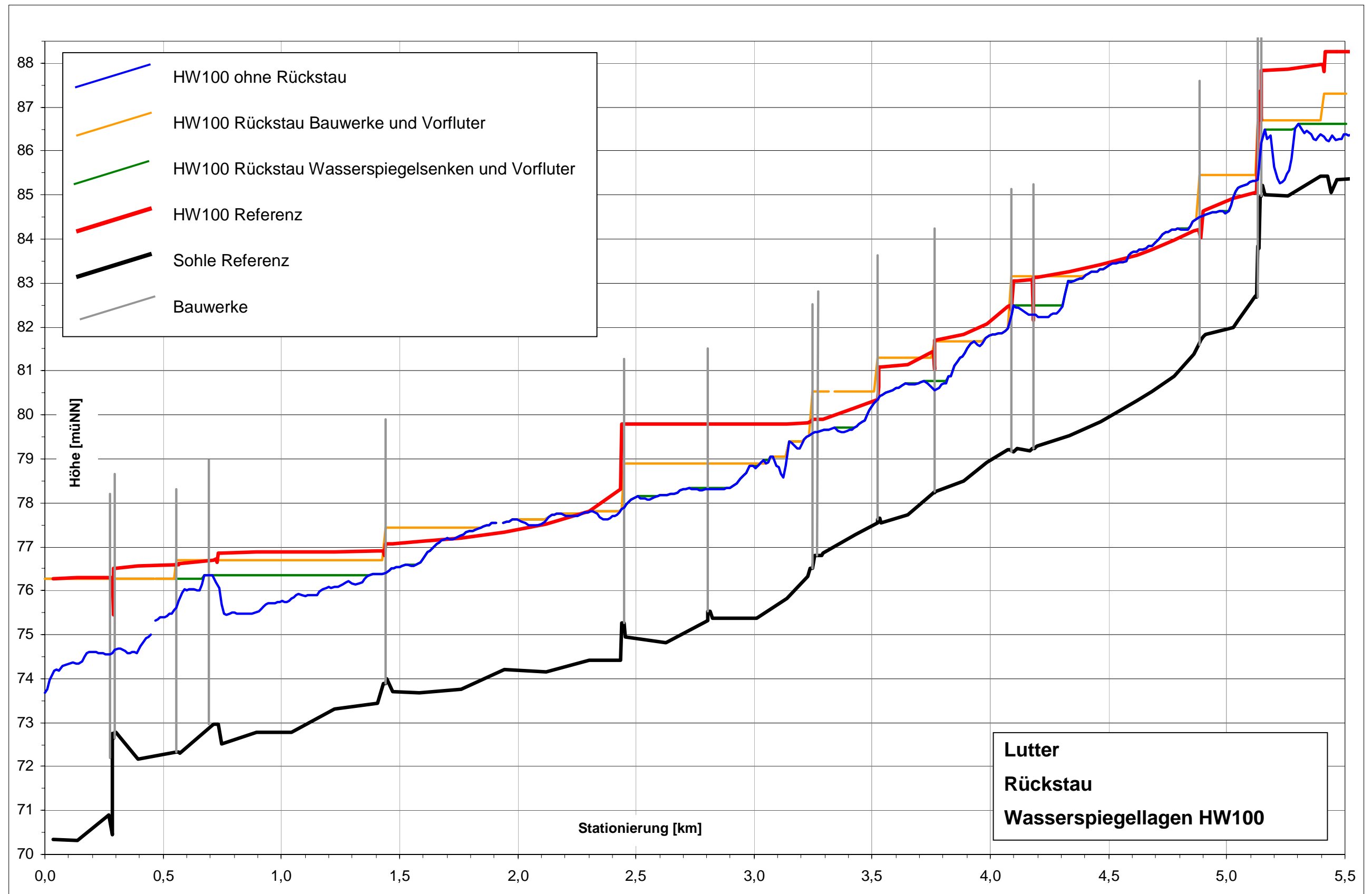


Abbildung 25: Variationen des Rückstaus an der Lutter, Längsprofilardarstellung. Die Unterbrechungen der berechneten Wasserspiegellinien erklären sich durch Anpassungen an die Stationierung der Referenz, um einen Vergleich zu ermöglichen. Folgende Berechnungsparameter wurden verwendet: GerinneDGM5linie, Gefälle und Fließrichtung aus dem DGM 5 abgeleitet, Abfluß aus den Eingangsdaten (6HQ100), K_{str} 30, Horizontalschrittweite 5 m, Vertikalschrittweite 0,01 m.

3.3.2 Computergestützte geomorphometrische Analyse

Durch die computergestützte geomorphometrische Analyse auf der Basis digitaler Höhenmodelle werden sowohl **hydraulische Parameter** abgeleitet, als auch die abschließende **Diskretisierung der Ergebnispunktdata in die Fläche** bewerkstelligt.

3.3.2.1 Ableitung hydraulischer Eingangsparameter

Die hydraulischen Eingangsparameter **Gerinne, Sohlgefälle** und **Fließrichtung** werden im folgenden in ihrer Ableitung erläutert und danach kritisch getestet, um ihren Einfluß auf die Ergebnisse quantifizieren und ggf. Fehler minimieren zu können.

3.3.2.1.1 Gerinne

Als Gewässerlinien werden einerseits die Tiefenlinie des digitalen Höhenmodells herangezogen (‘GerinneDGM5linie’, siehe Kapitel 2.4.1) und andererseits die Gerinnelinie des ATKIS-Datensatzes (‘GerinneATKISlinie’, siehe Kapitel 3.2.4). Zwischen beiden Linien bestehen abschnittsweise erhebliche räumliche Abweichungen, die in der Abbildung der Anlage I dargestellt sind (ausführliche Behandlung dieser Thematik: UHLIG 1998:62ff).

Die GerinneDGM5linie weicht bis max. 200 m von der GerinneATKISlinie ab. Jedoch liegen die Gerinne, bis auf geringe Ausnahmen (z.B. Stationierung 5,2 bis 5,35 km), innerhalb der gemeinsamen Fläche der berechneten hochwassergefährdeten Teilbereiche (Anlage I). Aus diesem Grund können die angesprochenen Abweichungen vernachlässigt werden.

Werden die berechneten Wasserspiegellhöhen im Längsprofil betrachtet (Abbildung 26), liegen die Ergebnisse der GerinneDGM5linie zwischen der Stationierung 0 bis 1,5 km bis max. 0,5 m näher an der Referenz als die Wasserspiegellhöhen der GerinneATKISlinie. Diese liegt wiederum innerhalb der freien Fließabschnitte bis max. 0,5 m näher an der Referenz, die übrigen Abschnitte verlaufen ähnlich.

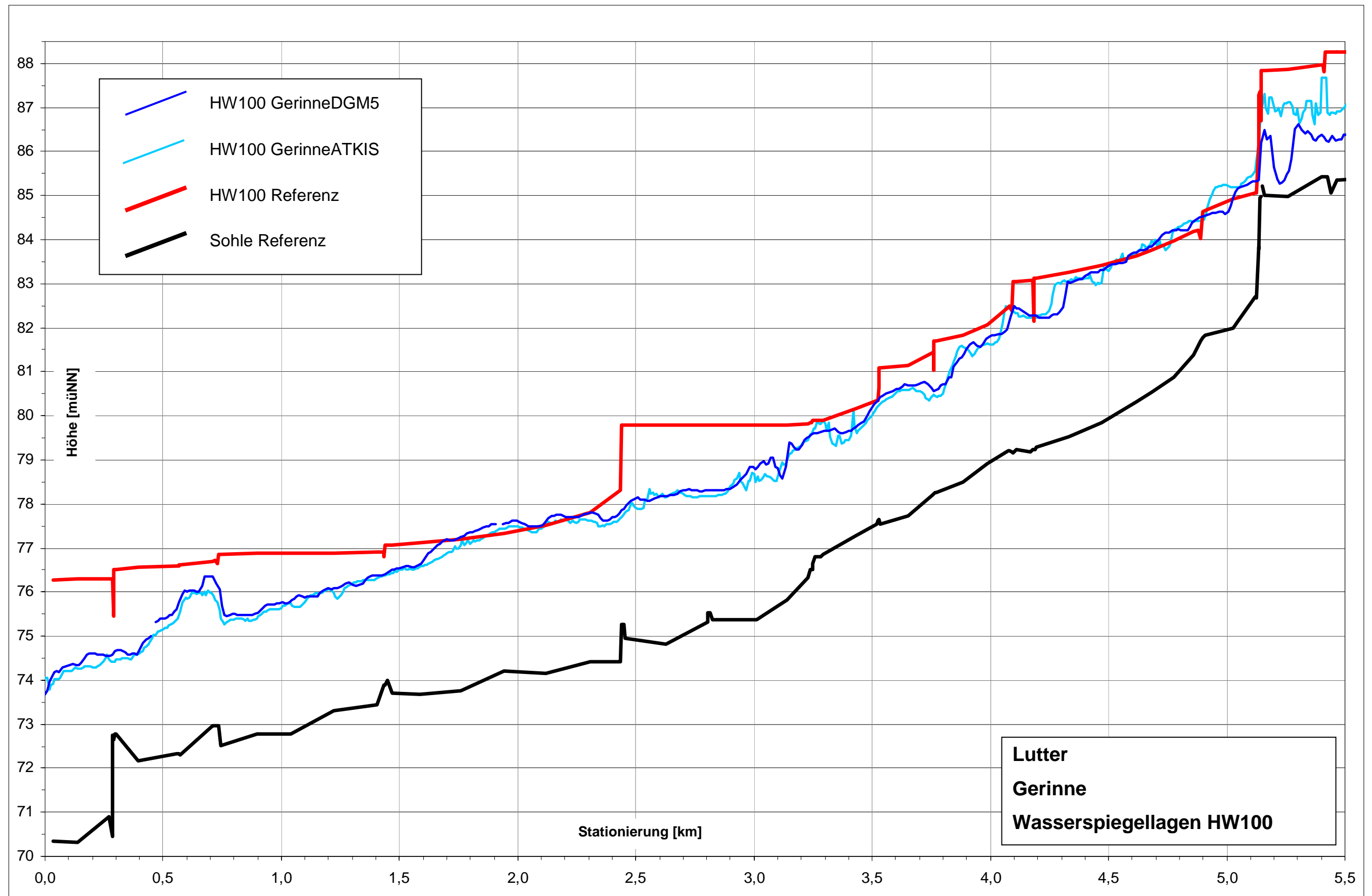


Abbildung 26: Variationen der Gerinne an der Lutter, Längsprofilardarstellung. Die Unterbrechungen der GerinneDGM5linie erklären sich durch Anpassungen an die Stationierung der Referenz, um einen Vergleich zu ermöglichen. Folgende Berechnungsparameter wurden verwendet: Gefälle und Fließrichtung aus dem DGM 5 abgeleitet, Abfluß aus den Eingangsdaten (6HQ100), K_{str} 30, Horizontalschrittweite 5 m, Vertikalschrittweite 0,01 m.

Einen Größenvergleich der räumlichen Ausdehnungen der dazugehörigen hochwassergefährdeten Bereiche enthält die Tabelle 8. Der Bereich der GerinneDGM5linie unterschreitet um 25,4 % (Flächenbildung Morphometrie) bzw. um 29,8 % (Flächenbildung IDW) die Referenz. Die GerinneATKISberechnungen ergeben noch kleinere Bereiche, die die Referenz um 37,8 % (Flächenbildung Morphometrie) bzw. 36,9 % (Flächenbildung IDW) unterschreiten. Die hochwassergefährdeten Bereiche unterscheiden sich sowohl hinsichtlich ihrer Größe als auch in ihrer Form (Anlage I). Dafür bestehen folgende grundsätzliche Erklärungsansätze:

- Die Gerinne können einen räumlich voneinander abweichenden Verlauf mit unterschiedlicher Länge haben. Darüber hinaus werden die Flußpunkte der GerinneATKISlinie im gleichmäßigen Abstand von 10 m gesetzt, die der GerinneDGM5linie jedoch im 10 oder 14 m Abstand (siehe Kapitel 3.3.1.4). Die Anzahl der Flußpunkte und die damit berechnete Ergebnisgenauigkeit unterscheidet sich dadurch geringfügig.
- Sowohl das Sohlgefälle (siehe Kapitel 3.3.2.1.2), als auch die Abflußwerte (siehe Kapitel 3.5.1.2) und die Querprofilrichtung (siehe Kapitel 3.3.2.1.3) der entsprechenden Flußpunkte können voneinander abweichen.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß insbesondere in Bereichen, in denen der Gewässerlauf begradigt, kanalisiert oder umgeleitet wurde, die Tiefenlinie des digitalen Höhenmodells häufig noch das natürliche Gerinne repräsentiert. Da die GerinneATKISlinie in Bezug zum DGM 5 nicht unbedingt an den tiefsten Stellen verläuft bzw. sich eventuell sogar in anderen Ein- oder Subeinzugsgebieten befindet, empfiehlt es sich nicht, ausschließlich auf diese Gerinnelinie zurückzugreifen. Im vereinfachten Verfahren gehen deshalb beide Linien in die hydraulische Modellierung ein. Die Ergebnisse der räumlichen Flächenbildung werden anschließend zusammengefaßt. Damit wird das Verfahren der Vorgabe zur Abgrenzung der maximalen hochwassergefährdeten Bereiche gerecht.

3.3.2.1.2 Sohlgefälle

Das Sohlgefälle eines Flußpunktes wird anhand der Parameter Entfernung und Höhendifferenz (DYCK UND PESCHKE 1995: 250) der jeweils ober- bzw. unterhalb liegenden Flußpunkte berechnet. Die Entfernung wird durch die Hoch- und Rechtswertdifferenz der entsprechenden Gauß-Krüger-Koordinaten, die dem digitalen Höhenmodell entnommen werden, ermittelt.

Die Höhendifferenz wird durch Subtraktion der beiden dazugehörigen Höhenwerte ermittelt. Die Berechnung des Sohlgefälles erfolgt durch folgende Gleichung:

$$g = ((h/100)/(d/1000))/1000$$

Wobei die Variablen g für das Gefälle, h für die Höhendifferenz und d für die Entfernung der beiden Flußpunkte zueinander stehen. Die berechneten Sohlgefälle entlang der Gerinnelinien ergeben stark schwankende Werte. Im Falle der GerinneATKISlinie ergeben sich sogar einige negative Gefällewerte, da die jeweils verwendeten ober- und unterhalb liegenden Flußpunkte nicht immer in stetiger Höhenabfolge liegen. Dieses Problem tritt bei der GerinneDGM5linie unter Verwendung des senkengefüllten digitalen Höhenmodells nicht auf. Hier treten jedoch häufig 0-Werte bei horizontal verlaufenden Gewässerabschnitten auf. Um die angesprochenen Probleme zu lösen, wurden verschiedene Variationen zur Optimierung der Gefällekurve im Längsprofil des Gewässers durchgeführt.

Die erste Veränderung besteht in einer Glättung der Gefällewerte durch die Nutzung entfernter Flußpunkte zur Berechnung von Entfernung und Höhendifferenz. Die folgende Abbildung 27 zeigt verschiedene Entfernungsvarianten.

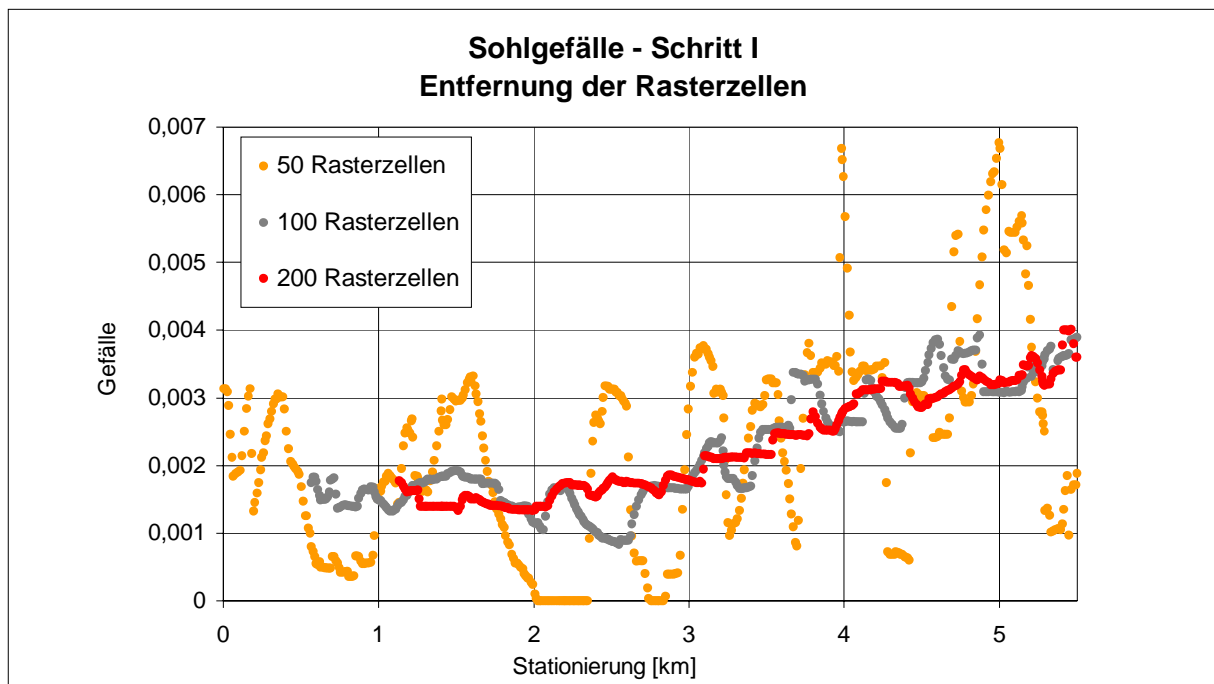


Abbildung 27: Ableitung des Parameters Sohlgefälle der GerinneDGM5linie auf Basis des digitalen Höhenmodells. Schritt I: Variation der Entfernung der für die Berechnung herangezogenen Flußpunkte.

Die Streuung der Werte bei einer Entfernung von 1 bis 1,4 km scheint genügend ausgeglichen, um einzelne Extremwerte herauszufiltern. Der variable Entfernungsbereich erklärt sich durch die unterschiedlichen Fließlängen der Rasterzellen (siehe Kapitel 3.3.1.4). Durch eine

gekrümmte Linienführung des Gewässers kann die räumliche Entfernung der Punkte zueinander variieren. Dies geht jedoch anhand der Hoch- und Rechtswertdifferenzen der Gauß-Krüger-Koordinaten in die Entfernungsberechnung mit ein. Eine Gefälleberechnung anhand von Flußpunkten, die entlang ihrer Fließlinie 2 bis 2,8 km Entfernung aufweisen, erscheint aufgrund der geringen Gesamtlänge der zu bearbeitenden Gewässer nicht angemessen. Durch eine große Flußpunktentfernung fallen in den Mündungs- und Quellbereichen entsprechend große Teile der Fließstrecke aus der Betrachtung heraus, die nachträglich durch Mittlungsverfahren ergänzt werden müssen. Diese Randteilbereiche sollten in Anbetracht der geringen Gesamtlänge der Gewässer nicht zu groß werden. Darüber hinaus gehen bei der 2 bis 2,8 km Entfernungsvariante schon größere Strukturen des Sohlgefälles verloren.

Über die Erhöhung der Flußpunktentfernung hinaus ist eine weitere Glättung erforderlich, um einen mittleren Verlauf des Sohlgefälles abzuleiten. Dafür werden die mit der 1 bis 1,4 km Entfernungsvariante berechneten Sohlgefällewerte unterschiedlichen Mittlungen unterzogen (Abbildung 28).

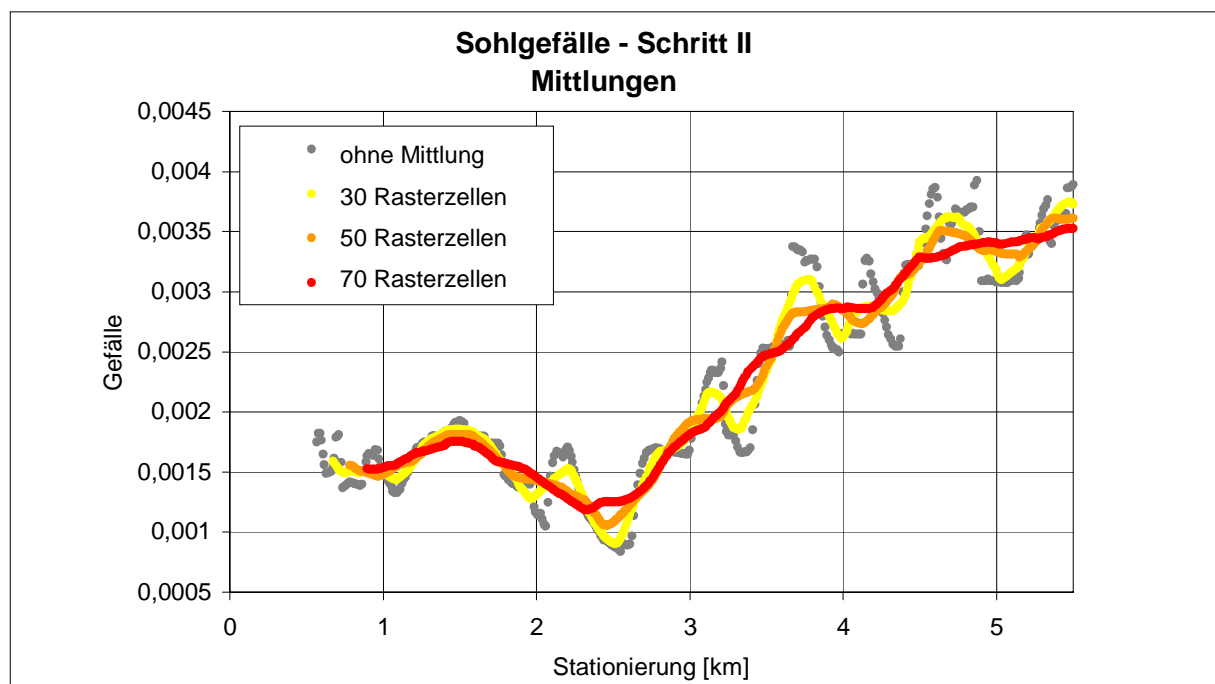


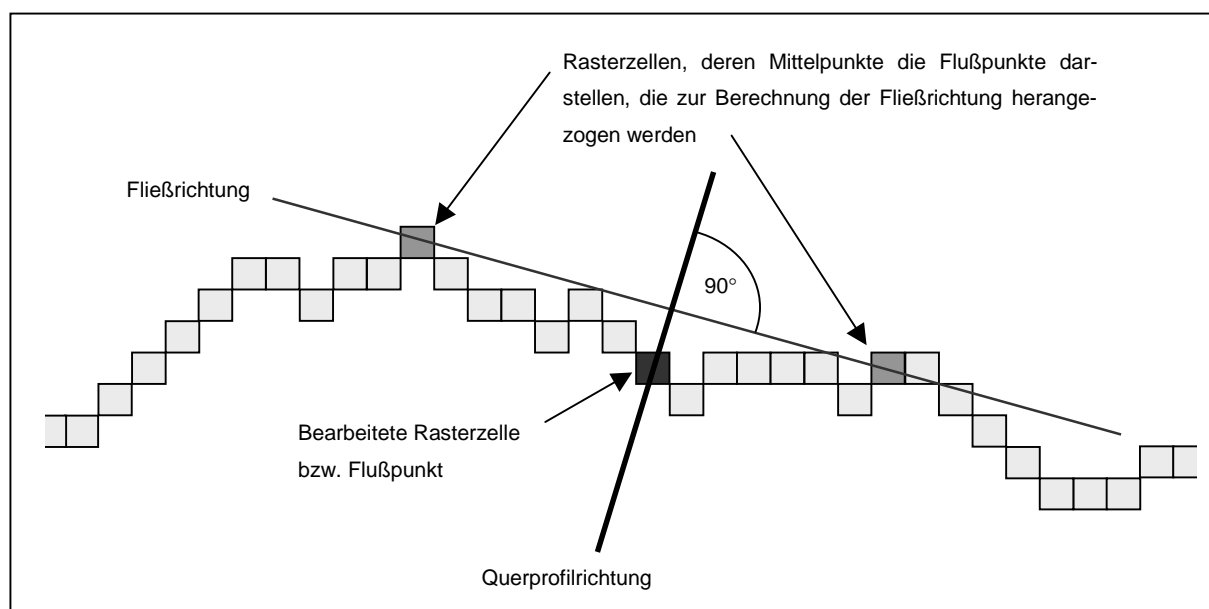
Abbildung 28: Ableitung des Parameters Sohlgefälle auf Basis des digitalen Höhenmodells. Schritt II: Variation der Mittlungen. Die berechneten Sohlgefälle werden einer weiteren Glättung über unterschiedliche Entfernungen unterzogen.

Eine Mittlung der berechneten Gefällewerte über 50 Flußpunkte erscheint sinnvoll: Ein mittlerer Gefälleverlauf läßt sich an einem flacheren unteren Teil und einem steileren oberen Abschnitt erkennen. Dies kommt der Beobachtung in der Natur und den Referenzdaten am nächsten. Die Mündungs- und Quellbereiche des Gewässers bzw. die jeweils letzten 25 Fluß-

punkte, bekommen ihre Gefällewerte durch eine Mittlung der jeweils letzten 50 Werte von der Mitte zum Rand hin zugewiesen. Abschließend werden negative Werte, deren Vorkommen bei der GerinneATKISlinie möglich ist, durch den nächsten, positiven, mündungsnäheren Sohlgefällewert ersetzt. Dieser Wert charakterisiert meist ein flacheres Querprofil, dessen Einsatz bei der hydraulischen Modellierung zur Berechnung eines höheren Wasserstandes und damit zur Abgrenzung der maximalen hochwassergefährdeten Bereiche führt.

3.3.2.1.3 Fließrichtung bzw. Querprofilrichtung

Von den Gerinnelinien wird die Fließrichtung und, senkrecht dazu, die Querprofilrichtung in Bezug auf die einzelnen Flußpunkte abgeleitet. Die Berechnung der Fließrichtung erfolgt



anhand der räumlichen Position umliegender Flußpunkte zueinander (Abbildung 29).

Abbildung 29: Ableitung der Fließrichtung bzw. Querprofilrichtung aus dem DGM 5. Die grauen Kästchen stellen die GerinneDGM5linie bzw. die Aneinanderreihung der Tiefenlinienpixel dar. Jeder Mittelpunkt einer Tiefenlinienrasterzelle ist gleichzeitig ein Flußpunkt. Dieser bekommt durch die Richtungsberechnung des jeweils 70 bis 98 m ober- und unterhalb liegenden Flußpunktes eine Fließrichtung zugewiesen. Die entsprechende Querprofilrichtung liegt im rechten Winkel (90°) dazu.

Um eine Glättung der Richtungen entlang des Gewässers zu erreichen, werden (wie beim Sohlgefälle auch) nicht die direkt benachbarten Flußpunkte zur Berechnung herangezogen. Es werden die Flußpunkte genutzt, die entlang der Gerinnelinie jeweils 70 m (GerinneATKISlinie) bzw. 70 bis 98 m (GerinneDGM5linie) oberhalb und unterhalb des zu berechnenden Querprofils liegen. Auch hier kann durch eine gekrümmte Linienführung des Gewässers die räumliche Entfernung der Punkte zueinander variieren. Die Richtungsbestimmung dieser bei-

den Flußpunkte erfolgt jedoch anhand ihrer Gauß-Krüger-Koordinaten, somit geht diese Variation in die Berechnung ein. Im Falle der GerinneATKISlinie liegen eindeutige Gauß-Krüger-Koordinaten vor. Bei der GerinneDGM5linie werden die Mittelpunkte der Tiefenliniennrasterzellen abgeleitet und als Flußpunktkoordinaten definiert. Über die Unterschiede der Hoch- und Rechtswerte wird die Richtung der entsprechenden Flußpunkte zueinander anhand folgender trigonometrischer Funktionen (SCHEID 1990: 446ff) berechnet:

$$u = ((p/t).ATan)*(200/Number.GetPi)$$

Wobei die Variablen u für die Fließrichtung, p für die Differenz der Hochwerte bzw. t für die der Rechtswerte der beiden Flußpunkte und $ATan$ für den Kotangens stehen. Es erfolgt eine Umrechnung in das Winkelmaß 'gon' (Maßeinheit der verwendeten Programmiersprache Avenue: 1 gon ist der 100ste Teil eines rechten Winkels; SCHEID 1990: 495; siehe Kapitel 3.4). $GetPi$ steht bei der Umrechnung für die Kreiszahl (SCHEID 1990: 254). Abschließend erfolgt eine Übertragung der Fließrichtung in die entsprechende Querprofilrichtung, die im rechten Winkel dazu verläuft. Die Mündungs- und Quellbereiche des Gewässers bzw. die jeweils letzten sieben Flußpunkte, die durch die zur Mittlung benötigte Punktzahl keinen Gefällewert erhalten, werden durch die Mittlung der jeweils letzten 14 Werte von der Mitte zum Rand hin aufgefüllt.

3.3.2.2 Diskretisierung der Punkt- zu Flächendaten

Die Ergebnisse der hydraulischen Berechnung stellen Punktdaten dar (Abbildung 30).

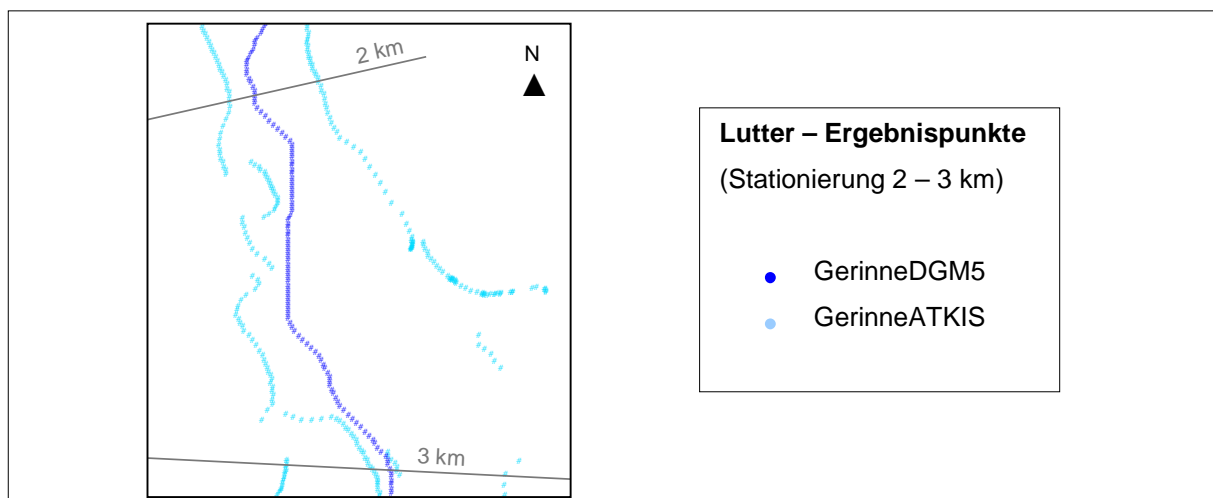


Abbildung 30: Unterschiede in der Lage und Anzahl der Punktdaten, die als Ergebnis der hydraulischen Berechnung der Gerinnelinien zur anschließenden Flächenbildung genutzt werden.

Im Falle der GerinneATKISlinie werden die Gauß-Krüger-Koordinaten der benetzten Querprofilendpunkte, bei der GerinneDGM5linie die Flußpunktkoordinaten jeweils mit den entsprechenden Überschwemmungshöhen zur anschließenden Flächenbildung genutzt. Es werden unterschiedliche Eingangsdatensätze der Gerinnelinien genutzt, da zwei verschiedene Verfahren vergleichend getestet werden sollen. Für das morphometrische Flächenbildungsverfahren (**‘Flächenbildung–Morphometrie’**) können nur die Ergebnisse der GerinneDGM5linie genutzt werden. Für das zweite Verfahren (**‘Flächenbildung–Oberflächeninterpolation’**) werden die Ergebnisse der GerinneATKISlinie verwendet. Ein grundsätzlicher Unterschied zwischen den Verfahren ist die schon angesprochene Dichte des Eingangsdatensatzes: Während bei der Flächenbildung–Oberflächeninterpolation jeweils zwei benetzte Querprofilendpunkte pro Flußpunkt in die Flächenberechnung eingehen, geht bei der Flächenbildung–Morphometrie nur ein Flußpunkt pro Querprofil ein (Abbildung 30). Im folgenden werden die beiden Methoden vorgestellt und bewertet.

3.3.2.2.1 Flächenbildung-Morphometrie

Dieses Verfahren basiert auf den Ergebnissen der GerinneDGM5linie. Hier steht für jede Tiefenlinienrasterzelle ein hydraulisch modellierter Überschwemmungswert zur Verfügung. Um diese punktuellen Werte in die Fläche zu übertragen, wird in einem ersten Schritt das Subeinzugsgebiet jeder Tiefenlinienrasterzelle abgeleitet. Von diesem Bereich wird das Subeinzugsgebiet der jeweils oberhalb liegenden Tiefenlinienrasterzelle subtrahiert (In Abbildung 32 sind diese Flächen am Beispiel des Brandenbäumer / Geseker Baches zu sehen). Dort hinein werden die hydraulisch modellierten Überschwemmungshöhen der dazugehörigen Tiefenlinienrasterzellen übertragen. Es entsteht eine Oberfläche der anzunehmenden Wasserspiegelhöhen, die in einem letzten Schritt mit dem ursprünglichen DGM 5 verschnitten wird. Durch diese Subtraktion entsteht die eigentliche Abgrenzung: alle Bereiche kleiner 0 liegen oberhalb bzw. außerhalb der überfluteten Fläche, alle Bereiche gleich oder größer 0 sind überschwemmt und damit Teil des hochwassergefährdeten Bereiches.

3.3.2.2 Flächenbildung-Oberflächeninterpolation

Innerhalb des verwendeten Geographischen Informationssystems ArcView sind mehrere Oberflächeninterpolationsverfahren, die Punktdaten zu einer flächendeckenden Rasterdatei umwandeln, realisiert (ESRI 1996: 91ff). Die Methode IDW ('Inverse Distance Weighted') wird für das vereinfachte Verfahren als geeignet angenommen. Diese Methode berechnet die fehlenden Punkte einer Fläche, indem sie für diese aus den umliegenden Punktdaten einen gewichteten Interpolationswert berechnet. Das Ergebnis hängt von der Anzahl der betrachteten umliegenden Datenpunkte und deren Wichtung in Abhängigkeit von der Entfernung des zu berechnenden Punktes ab. Die Einstellung dieser beiden Parameter wurde quantitativ untersucht. Die Bewertung der verschiedenen interpolierten Oberflächen erfolgt auf der Basis von Stichproben und anhand folgender Zielvorstellung und Bewertungskriterien:

- Das **Ziel der Flächenbildung** soll eine Oberfläche sein, die die Höhen der Eingangsdaten möglichst genau wiedergibt und in den Übergangsbereichen gleichmäßig interpoliert ist. Nur die punktnahen Bereiche, d.h. entlang der Abgrenzungslinie der hochwassergefährdeten Bereiche und im dazwischenliegenden Innenraum, werden später bei der Verschneidung mit dem DGM 5 verwendet. Alle anderen Bereiche müssen deshalb nicht betrachtet werden.
- Als **Bewertung** der interpolierten Oberfläche werden die **Höhenabweichungen** der Eingangsdatenpunkte von den entsprechenden Höhen der interpolierten Oberfläche herangezogen. Abweichungen im Zentimeterbereich können vernachlässigt werden, da die Höhenungenauigkeit des DGM 5 schon bis zu +/- 50 cm reicht (siehe Kapitel 3.2.1). Desweiteren werden die interpolierten **Übergänge zwischen den Eingangsdatenpunkten** betrachtet und in Hinblick auf einen gleichmäßigen Höhenverlauf bewertet.

Folgende Einstellungen der Interpolationsparameter werden aufgrund der durchgeführten Stichprobenanalyse als geeignet bewertet:

- **Anzahl der umliegenden Punkte** ('nearest neighbor, no. = 3') – Nur drei Punkte werden zur Interpolation einbezogen. Mit dieser geringen Anzahl wird verhindert, daß Punkte, die eventuell nicht in Verbindung mit dem zu interpolierenden Punkt stehen, Beachtung finden.

- **Wichtungintensität** ('power = 6') – Bei Einsatz der hohen Wichtungintensität von sechs weicht die Hälfte der Eingangspunkte mit weniger als 0,1 cm von denen des daraus interpolierten digitalen Höhenmodells ab. Wenige Ausnahmen liegen bei 0,2 cm Höhenabweichung, die übrigen Punkte erfahren durch die Interpolation keine Höhenveränderung. Darüber hinaus verlaufen die Übergänge zwischen den ursprünglichen Punkten bei der Wichtungintensität von sechs gleichmäßig.

Abschließend wird die interpolierte Wasserspiegeloberfläche mit dem DGM 5 verschnitten. Diese Subtraktion der beiden Oberflächen zur Abgrenzung der hochwassergefährdeten Bereiche erfolgt auf gleiche Weise wie bei der erläuterten Flächenbildung-Morphometrie.

3.3.2.2.3 Bewertung der Flächenbildungsverfahren

Die unterschiedlichen hochwassergefährdeten Bereiche der beiden Gerinnelinien sind für alle drei Untersuchungsgebiete in den Anlagen I bis III dargestellt. An der Lutter ergibt ein quantitativer Flächenvergleich der hochwassergefährdeten Bereiche mit den Referenzdaten eine Unterschreitung der Referenz von 25,4 % (Flächenbildung-Morphometrie) bzw. 36,9 % (Flächenbildung-Oberflächeninterpolation)(Tabelle 8). Zusammenfassend lassen sich folgende Gründe für die unterschiedliche räumliche Ausdehnung bei den Flächenbildungsverfahren nennen:

- Unterschiedliche Verfahren zur Generierung der Wasserspiegeloberflächen.
- Die GerinneATKISlinie weicht in ihrer räumlichen Lage von der GerinneDGM5linie ab (siehe Kapitel 3.3.2.1.1). Im Extremfall verlaufen Teilabschnitte der Gerinnelinien in unterschiedlichen Einzugs- bzw. Subeinzugsgebieten. Die GerinneDGM5linie zeichnet den tiefsten Geländeverlauf nach. Die GerinneATKISlinie hingegen kann an erhöhter Stelle im Gelände liegen oder auch hinter einer Erhöhung, die eventuell die Ausuferung des hochwassergefährdeten Teilbereiches der GerinneDGM5linie begrenzt. Diese Situation tritt häufig ein, wenn die GerinneATKISlinie außerhalb des hochwassergefährdeten Teilbereiches der GerinneDGM5linie verläuft bzw. eine künstlich veränderte Gerinneführung aufweist. Gerade im Flachland kann dieses Phänomen zu extremen Ausdehnungen des überschwemmten Bereiches führen. Auffällig bei der Betrachtung der jeweiligen hochwassergefährdeten Teilbereiche ist die Tatsache, daß immer die hochwassergefährdeten Teilbereiche der GerinneATKISlinie die weitaus größere Fläche einnehmen. Die folgende

Abbildung 31 verdeutlicht beispielhaft die angesprochene Thematik: Die dargestellte Situation am Brandenbäumer / Geseker Bach zeigt den unterschiedlichen Verlauf der Gerinnelinien. Die GerinneATKISlinie verläuft außerhalb des hochwassergefährdeten Teilbereiches der GerinneDGM5linie. Der HW_{100} -Wert der GerinneDGM5linie am Querprofil der Abbildung 31 b beträgt 83 m bzw. der GerinneATKISlinie 83,4 m (Referenz 83,25 m).

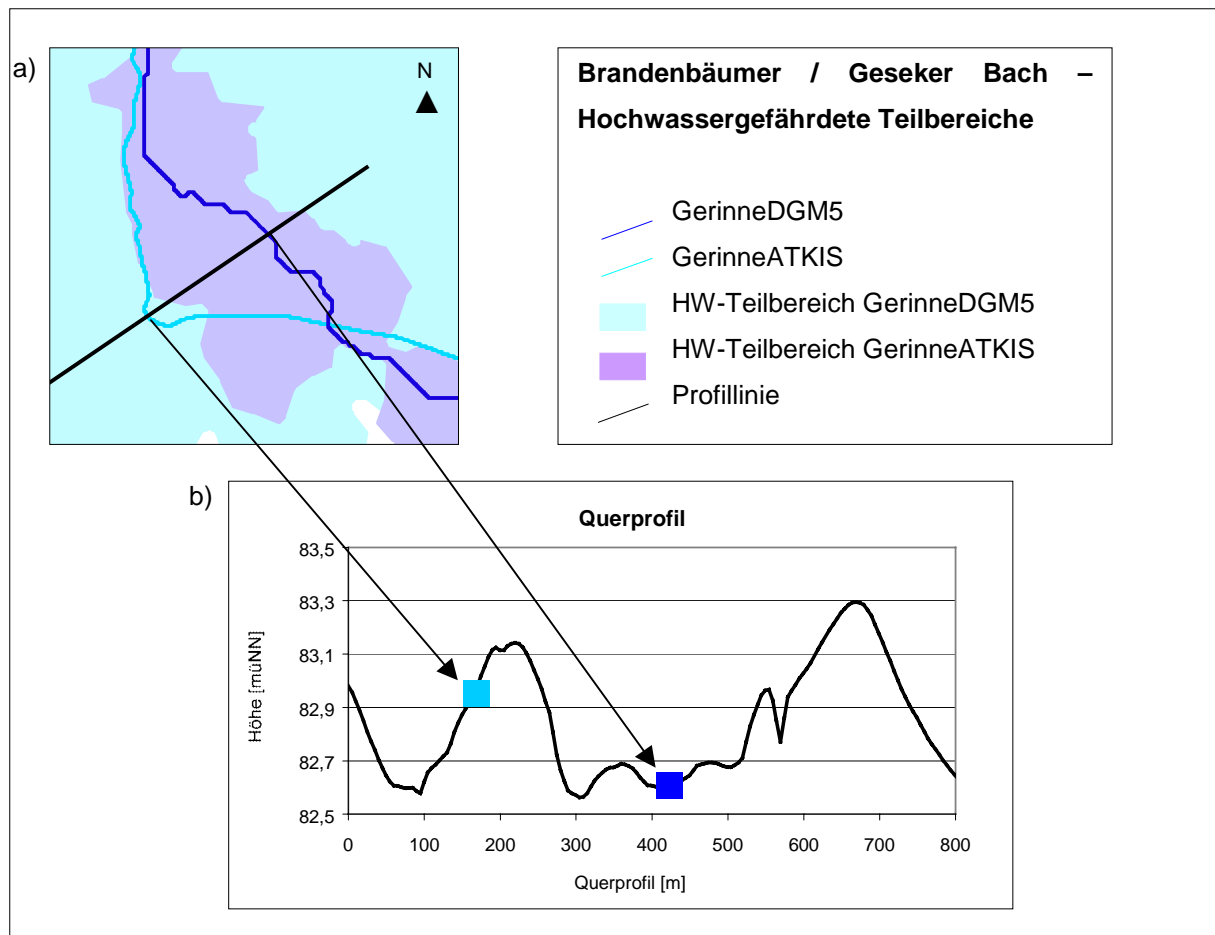


Abbildung 31: a) Größen- und Formunterschiede der hochwassergefährdeten Teilbereiche der GerinneDGM5- und der GerinneATKISlinie am Brandenbäumer / Geseker Baches aufgrund unterschiedlicher Gerinneverläufe. b) Querprofil der entsprechenden Topographie des DGM 5.

Die Überflutung der GerinneDGM5linie dehnt sich innerhalb der ersten größeren Erhebungen links und rechts neben dem Gewässerschlauch aus (Abbildung 31 a). Die Erhebungen sind breit genug (> 20 m) und auch in ihrer länglichen Erstreckung durchgehend, so daß die dahinter liegenden Bereiche nicht überschwemmt werden. Anders verhält es sich hingegen bei der GerinneATKISlinie. Durch die höhere Lage im Gelände (Sohlhöhe bzw. Höhe des DGM 5, Abbildung 31 b) kommt es zur Berechnung eines größeren HW_{100} -Wertes. Das alleine führt schon zur Generierung ausgedehnterer hochwassergefährdeter Bereiche. Darüber hinaus liegt die GerinneATKISlinie jedoch hinter einer Erhe-

bung, die die Überflutungsausdehnung der GerinneDGM5linie begrenzt. Dadurch kommt es zu einer weitläufigen Ausuferung des hochwassergefährdeten Teilbereiches.

- Das morphometrische Flächenbildungsverfahren basiert auf den Subeinzugsgebieten der Tiefenlinienpixeln. Je nach räumlicher Lage dieser Gebiete entstehen entsprechende Abgrenzungen der hochwassergefährdeten Bereiche. Im Falle des Brandenbäumer / Geseker Baches läßt sich dadurch der sehr viel kleinere hochwassergefährdete Teilbereich der GerinneDGM5linie erklären. Die folgende Abbildung 32 erläutert diese Thematik am Einzugsgebiet des Brandenbäumer / Geseker Baches. Jedes gelbe Polygon bildet ein Subeinzugsgebiet eines Tiefenlinienpixels, von dem das jeweils oberhalb liegende Subeinzugsgebiet subtrahiert wurde. Das dunkelgelb markierte Subeinzugsgebiet gehört zu einem mündungsnahen Tiefenlinienpixel mit geringer Überflutungshöhe. Die Ausdehnung des hochwassergefährdeten Teilbereiches der GerinneDGM5linie verläuft genau entlang dieser Subeinzugsgebietsgrenze.

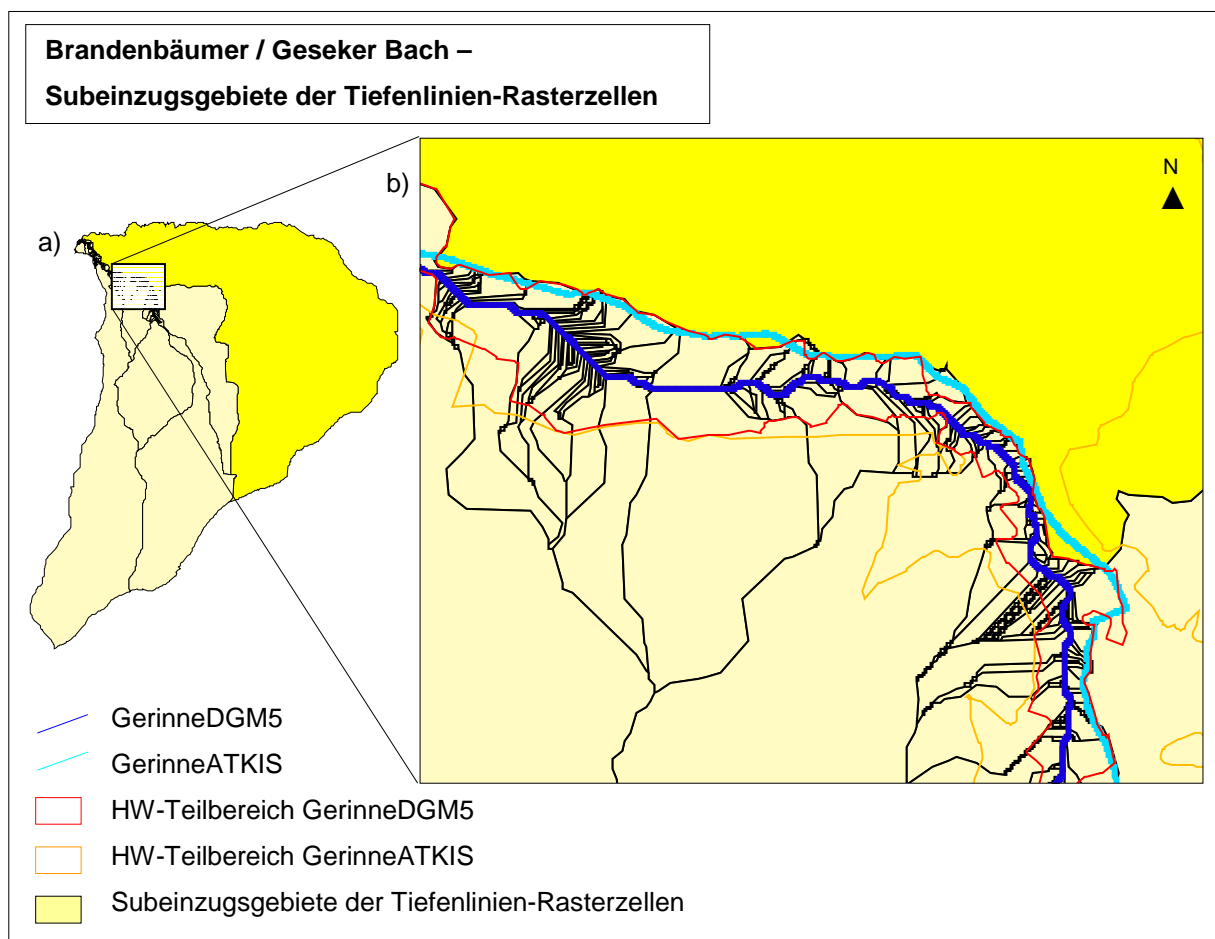


Abbildung 32: a) Subeinzugsgebiete der Tiefenlinienrasterzellen abzüglich der oberhalb liegenden Subeinzugsgebiete am Brandenbäumer / Geseker Bach. b) Ausschnitt: Größenunterschied der hochwassergefährdeten Teilbereiche der Gerinnelinien aufgrund der Ableitung der Tiefenlinien-Subeinzugsgebiete auf Basis des DGM 5.

Durch die subeinzugsgebietsbasierte Generierung der Wasserspiegeloberfläche der GerinneDGM5linie führt die Verschneidung mit dem Höhenmodell in diesem Fall zu keiner Überflutung innerhalb des dunkelgelben Subeinzugsgebietes. Die Ursache ist der geringere Wasserstand im dunkelgelben Einzugsgebiet mit seiner mündungsnahen Zugehörigkeit im Gegensatz zu den benachbarten (der GerinneDGM5linie zugewandten) Subeinzugsgebieten.

Aufgrund der genannten Vor- und Nachteile der Flächenbildungsverfahren werden beide Methoden miteinander kombiniert, um der Vorgabe der maximalen Ausdehnung der hochwassergefährdeten Bereiche gerecht zu werden. Das Endergebnis stellt die Fläche dar, die die hochwassergefährdeten Teilbereiche der beiden Gerinnelinien umhüllt.

3.3.2.2.4 Darstellung der hochwassergefährdeten Bereiche im Gebietsentwicklungsplan

Sowohl raumplanerische als auch kartographische Vorgaben erfordern eine weitere Anpassung der berechneten Flächen zu einem integrierbaren Endergebnis:

- Die hochwassergefährdeten Bereiche sollten weitestgehend **durchgehend** sein. Nicht überflutete Inselflächen kleiner als 25 Hektar werden deshalb durch eine Generalisierung beseitigt, größere nicht überschwemmte Innenbereiche bleiben erhalten.
- Bereiche, die nicht in **Kontakt mit dem Hauptschlauch** der Überflutung entlang des Gewässers stehen, bleiben erst ab einer Mindestgröße von 25 Hektar erhalten. Darüber hinaus werden alle abgetrennten Bereiche unabhängig von ihrer Größe, die nur 20 m Abstand zum hochwassergefährdeten Bereich haben, mit der Fläche des überschwemmten Bereiches verbunden.
- Ein **Sicherheitsbereich** wird ausgewiesen und zum hochwassergefährdeten Bereich addiert. Dazu gehören alle Flächen, die nur 50 cm (Mittelgebirge) bzw. 20 cm (Flachland) oberhalb des überfluteten Bereiches liegen. Auch damit wird wieder dem Ziel Rechnung getragen, die maximal gefährdeten Bereiche auszuweisen.

3.4 Softwareentwicklung ‘MOHB’

Entsprechend der vorangegangenen Entwicklungsschritte wurde auch die Anwendungssoftware ‘MOHB’ (**M**odellierung **h**ochwassergefährdeter **B**ereiche) als ArcView-Erweiterung in der Makrosprache ‚Avenue‘ programmiert. Im folgenden ist der funktionale Programmablauf in einer Übersicht dargestellt (Abbildung 33). Die einzelnen Hauptmodule werden stichwortartig erläutert. Darauf folgt schematisch die chronologische Abfolge der aufgerufenen Scripte (Abbildung 34). Der Sourcecode ist der Arbeit aus Gründen des Umfangs nicht beigelegt. Er ist bei der Autorin erhältlich.

Der Programmablauf ist in den funktionalen Blöcken A) bis F) dargestellt. Es erfolgen jeweils kurze Erklärungen der Funktionen der einzelnen Programmcode-Dateien (Scripte). Für die Namensgebung aller Programmteile wird ein einheitlicher Schlüssel verwendet: Alle Scripte beginnen jeweils mit “mohb_”. Darauf folgt die Zugehörigkeit zu einem bestimmten funktionalen Programmmodul z.B. “select_”. Diese Bezeichnung ist jeweils **rot** bzw. **blau**, wenn die Scripte durch einen Dialog aufgerufen werden. Am Ende steht der spezielle Name des Scriptes z.B. “init_dialog”. Dialoge stellen die Eingabemaske für den Anwender dar, ihnen wird vor die Programmbezeichnung ein “d_” vorangestellt.

A) mohb_**select** = Dateneingabe und Programmstart

mohb_**select**_init_dialog

(der Eingabedialog wird aufgerufen)

d_MOHB_HWG (**Dialog**)

(Eingabedialog)

mohb_**select**_abfluss

(Auswahl Abfluß GRID)

mohb_**select**_atkis

(Auswahl GerinneATKIS Shapefile)

mohb_**select**_bw

(Auswahl Bauwerkstabelle)

mohb_**select**_clearall

(löscht alle Themen aus dem View)

mohb_**select**_dhm

(Auswahl DGM 5 GRID)

mohb_**select**_disable_abfluss

(Wenn ein Zahlenwert eingegeben wurde, kann kein Abfluß GRID mehr selektiert werden)

mohb_**select**_dynamic

(dynamische Abflußberechnung)

mohb_**select**_flach

(Auswahl Flachlandgewässer)

mohb_**select**_gridcalc

(Abfluß GRID wird erstellt)

B) mohb_gerinne = Ableitung der GerinneDGM5linie und Erstellung von Flußpunkttabellen beider Gerinne (ATKIS & DGM5)

mohb_gerinne_dgm5_1	(Tiefenliniennetz wird abgeleitet vom Höhenmodell)
mohb_gerinne_dgm5_2	(Quellpunkt setzen)
mohb_gerinne_dgm5_3	(Quellpunkt setzen, Linie ableiten, Fließlängenberechnung GRID)
mohb_gerinne_cutdgm	(die GerinneDGM5linie wird entsprechend der GerinneATKISlinie an der Mündung abgeschnitten)
mohb_gerinne_cutatkis	(die GerinneATKISlinie wird entsprechend des interaktiv eingegebenen Quellpunktes der GerinneDGM5linie abgeschnitten)
mohb_gerinne_dgm5_4	(Gerinnelinie, Längen zuweisen)
mohb_gerinne_dgm5_5	(Flußpunkttable überarbeiten und bereinigen)

C) mohb_parameter = Anhängen der Berechnungsparameter an die Flußpunkttabellen

mohb_parameter	(Parameter Gefälle & Gon an Tabelle anhängen)
mohb_sort_Vtab50	(mittelt die Werte über 50 Zellen)
mohb_sort_VtabOben	(füllt die Tabellen nach oben hin auf)
mohb_sort_VtabUnten	(füllt die Tabellen nach unten hin auf)
mohb_parameter_abfluss	(Abfluß GRID wird ausgewählt oder erstellt)

D) mohb_bauw = Anhängen der Bauwerkspositionen an die Flußpunkttabellen

mohb_bauw_snap	(Anhängen der Bauwerkspositionen an die Tabellen)
mohb_bauw_appdATKIS	(GerinneATKISlinie in Punkte unterteilen)
mohb_bauw_appdDGM5	(GerinneDGM5linie in Punkte unterteilen)

E) mohb_hydraulik = Hydraulische Berechnung

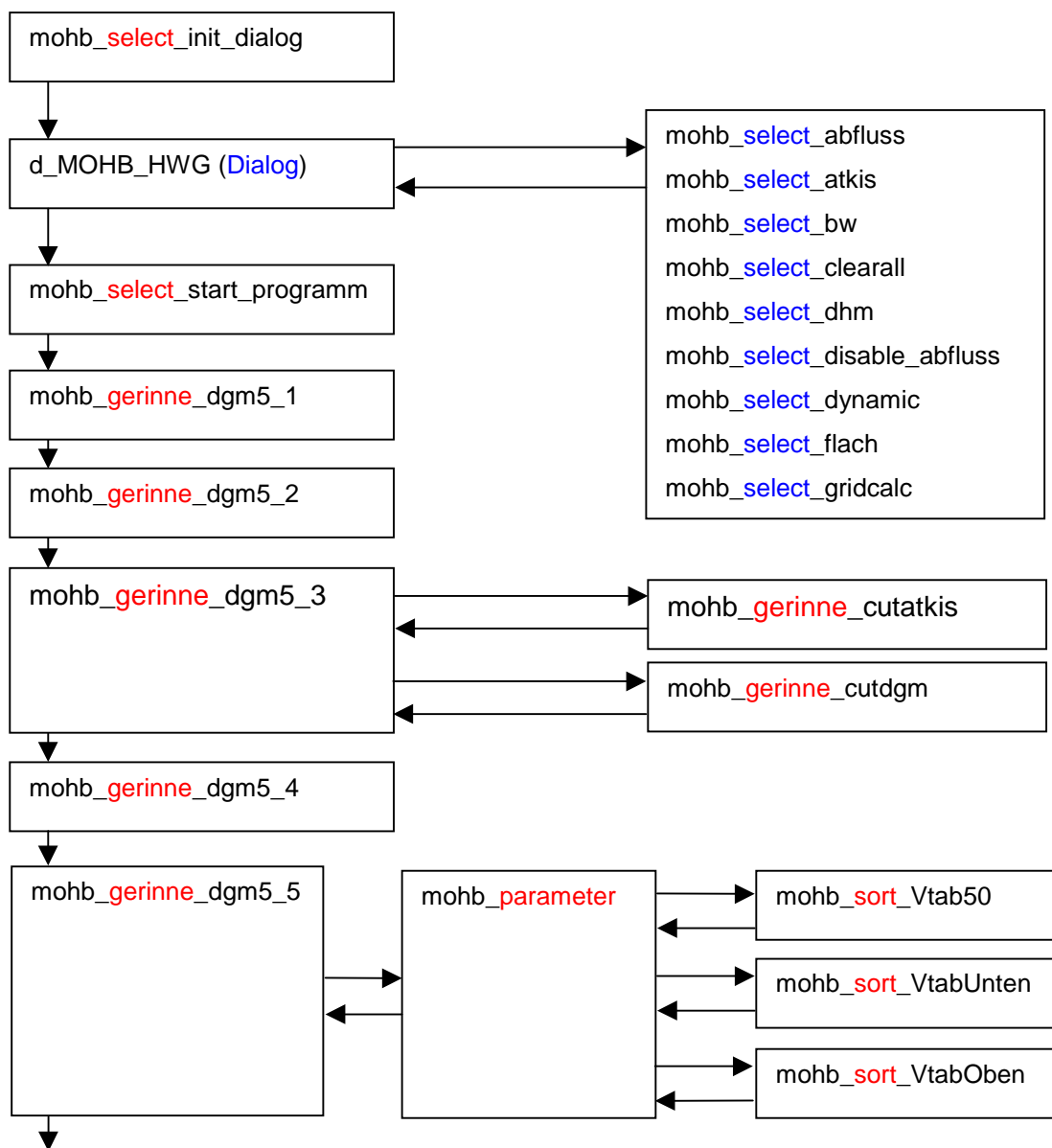
mohb_hydraulik	(Hydraulische Berechnung anhand Flußpunkttabellen und DGM 5)
mohb_hydraulik_flaeche	(Flächenberechnung)
mohb_hydraulik_horizontalintegration	(Horizontalintegration)
mohb_hydraulik_umfang	(Umfangsberechnung)

F) mohb_flaeche = Umsetzen der Ergebnispunkte in den Raum

mohb_flaeche_ende	(Zusammenführung der beiden Teilergebnisse)
mohb_flaeche_idw	(Ergebnisse GerinneDGM5linie: Flächenbildung - Oberflächeninterpolation)
mohb_flaeche_water	(Ergebnisse GerinneATKISlinie: Flächenbildung – Morphometrie)

Abbildung 33: Funktionale Einheiten der Anwendungssoftware MOHB (Modellierung hochwassergefährdeter Bereiche).

Beim folgenden Ablaufschema des Programmes symbolisieren Pfeile die Abfolge der aufzurufenen Scripte, bzw. von welchem Script aus sie jeweils gestartet werden und an welches Script das Ergebnis zur Weiterverarbeitung zurückgegeben wird.



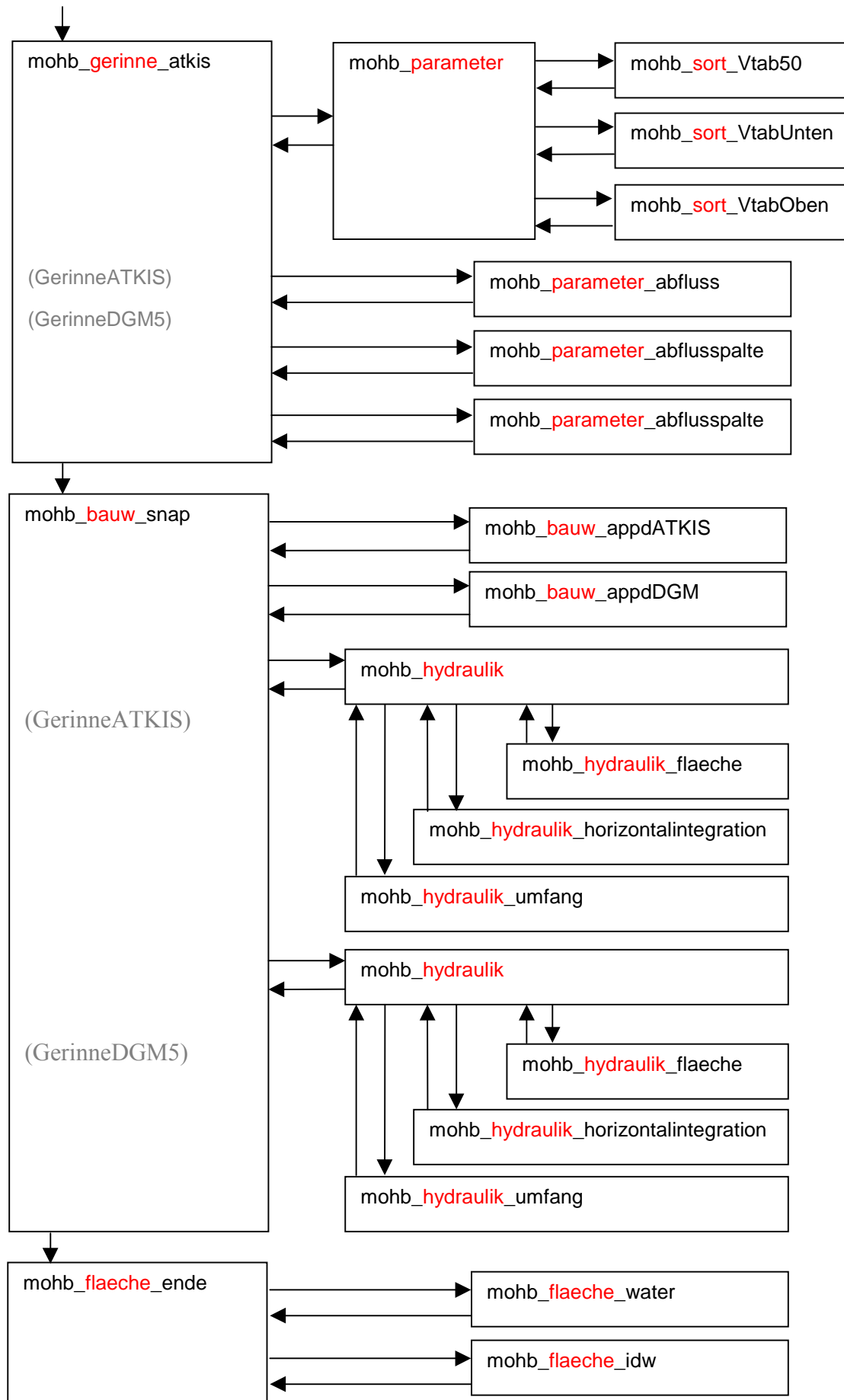


Abbildung 34: Ablaufschema der Anwendungssoftware MOHB (Modellierung hochwassergefährdeter Bereiche).

3.5 Fehler und Unsicherheiten

Die vorangegangene Darstellung der Entwicklungsschritte zeigt verschiedene Fehler- und Unsicherheitsquellen auf, die in das vereinfachte Verfahren eingehen. Es läßt sich eine übergeordnete Klassifikation in drei Teilbereiche vornehmen: zufällige oder systematische Fehler der Eingangsdaten, Fehler durch nicht-optimale Modellannahmen und durch ebensolche Parameterwerte (differenziertere Klassifikation der anzunehmenden Fehler, siehe: HAACK 1997; REFSGAARD UND STORM 1996: 42ff). Die Differenz zwischen gemessenen und berechneten Werten wird als Unsicherheit bezeichnet und ergibt sich aus einer Kombination der genannten Fehlerquellen.

Bevor die berechneten Ergebnisse der drei Untersuchungsgebiete vorgestellt und bewertet werden und somit eine Abschätzung der Modellgüte des vereinfachten Verfahrens erfolgt, werden die in den einzelnen Kapiteln angesprochenen Fehlerquellen zusammengestellt und zueinander in Beziehung gesetzt. Es erfolgt eine qualitative, nach Möglichkeit quantitative Einschätzung der aufgelisteten Fehler. Zur Evaluierung dienen die Referenzdaten, die als die qualitativ hochwertigeren Modellierungsergebnisse angenommen werden (siehe Kapitel 3.2.5). Die Ausweisung eines statistischen Vertrauensintervalles um die simulierte Abflußganglinie ist nicht möglich, da dafür die Fehlerwahrscheinlichkeiten der Eingangsdaten und Parameter benötigt werden, die aus dem vorliegenden Datenmaterial nicht ermittelt werden können (BORMANN 1999: 162ff). So wird abschließend für den Rahmen dieser Arbeit ein Toleranzbereich für eine akzeptierte Fehlergröße festgesetzt.

3.5.1 Fehler und Unsicherheiten durch Eingangsdaten

3.5.1.1 DGM 5

Zur Abschätzung der Fehler des digitalen Höhenmodells DGM 5 bezüglich der vorliegenden, gerinnebezogenen Fragestellung wurden entlang einiger tachymetrisch vermessener Referenzquerprofile an der Lutter die Höhenwerte des Modells im Meterabstand ausgelesen. Diese Profilliniendiagramme werden in den folgenden zwei Abbildungen in einer ca. 10-fachen Überhöhung vergleichend dargestellt. Um dafür eine repräsentative Auswahl der flußmorphologisch unterschiedlich charakterisierten Abschnitte entlang des Gewässerlängsprofils treffen zu können, wurden folgende Kriterien herangezogen:

- anthropogene Überformung: Berücksichtigung sowohl naturnäherer Bereiche (freie Fließabschnitte: Abbildung 35) als auch stärker umgestalteter Bereiche (rückstaubeinflusste Abschnitte: Abbildung 36).
- Räumliche Distanz des Querprofilflußpunktes der Referenzdaten zum entsprechenden Flußpunkt der aus dem DGM 5 ermittelten Tiefenlinie: Berücksichtigung von Bereichen mit identischem Gerinneverlauf (Abbildung 35 und Abbildung 36 b) bzw. mit unterschiedlichem Gerinneverlauf (Abbildung 36 a).
- Qualitätssprünge im DGM 5 bzw. Berücksichtigung der unterschiedlichen Ursprungsdaten: Höhenpunkte aus photogrammetrisch vermessenen Höhenlinien (Abbildung 35) versus Laserscanning-Höhenpunkte (Abbildung 36).

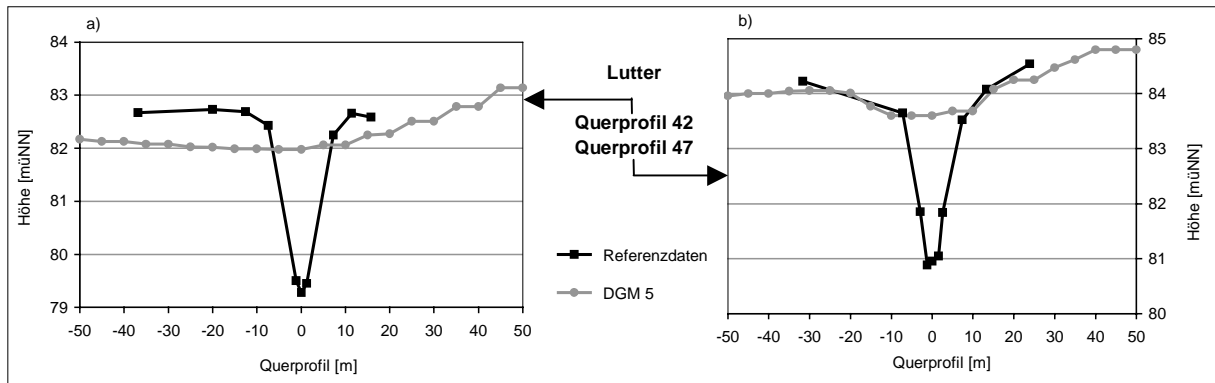


Abbildung 35: a) Vergleich der Geländehöhen von Querprofil 42 (Lutter, Stationierung 4,2 km, Pegel Hepen) aus der tachymetrischen Vermessung der Referenzdaten mit der Profillinie aus dem DGM 5 (Ursprungsdaten: Höhenpunkte aus photogrammetrisch vermessenen Höhenlinien). b) entsprechender Vergleich von Querprofil 47 (Lutter, Stationierung 4,8 km).

Der visuelle Vergleich zeigt, daß in dem photogrammetrisch erstellten Modell (Abbildung 35) weder der Gewässerschlauch, noch die Uferböschungen abgebildet sind. Demgegenüber werden mittels Laserscanningmodell (Abbildung 36) die Uferböschungen gut wiedergegeben.

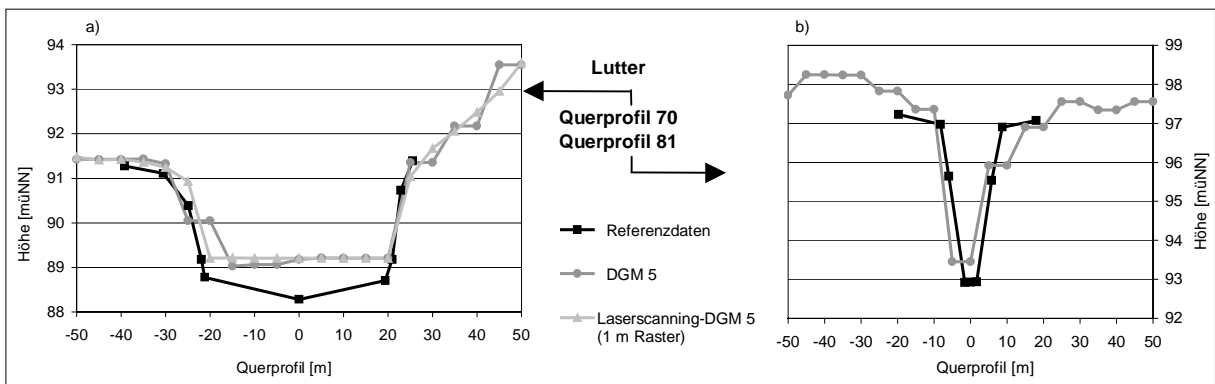


Abbildung 36: a) Vergleich der Geländehöhen von Querprofil 70 (Lutter, Stationierung 6,7 km, Teich) aus der tachymetrischen Vermessung der Referenzdaten mit der Profillinie aus dem DGM 5 (Ursprungsdaten: Laserscanning). b) entsprechender Vergleich von Querprofil 81 (Lutter, Stationierung 7,6 km).

Das Querprofil 70 ist in einem Stauteich positioniert. Es zeigt erwartungsgemäß die Wasseroberfläche, welche die Laserstrahlen reflektiert, zum Zeitpunkt der Aufnahme. Die im Modell repräsentierte Oberfläche kann somit auch unmittelbar im Gewässerbereich zeitabhängig variieren.

Das Querprofil 81 liegt entlang eines Wehres. Dort werden die Höhen im Gerinneschlauch teilweise durch die Rasterzellen des Modells in Unterwasserhöhe und teilweise in Oberwasserhöhe dominiert. Daran zeigt sich ein grundsätzliches Problem digitaler Höhenmodelle: die korrekte Wiedergabe von Geländekanten (hier: Oberwasser - Wehrkrone - Unterwasser) ist bei Rasterdiskretisierung nicht möglich. Neben der, je nach Ursprungsdaten, vorhandenen oder fehlenden Wiedergabe der Gerinneböschungen und der Wasseroberfläche im digitalen Höhenmodell fehlen auch andere Strukturen der Oberfläche, die einen mitunter maßgeblichen Einfluß auf das Abflußgeschehen haben können (siehe Kapitel 3.2.1).

Alle Profile des digitalen Höhenmodells zeigen in Abhängigkeit des Abstands der ausgelesenen Höhenpunkte (hier: 5 m) die Treppenstruktur des Rasterformats. Eine Glättung insbesondere der Uferböschungen wird mit entsprechenden Interpolationsverfahren erreicht werden (siehe Kapitel 3.3.1.1).

Durch die Generierung eines digitalen Höhenmodells mit einem 1 Meter Raster kann die Treppenstruktur vermieden werden. Das Landesvermessungsamt NRW stellte ein Laserscanning-Rohdatensatz mit einer Punktedichte < 1 Meter eines Ausschnittes des Untersuchungsgebietes der Lutter zur Verfügung. In diesem Ausschnitt befindet sich das Querprofil 70. Hier wurde ein digitales Höhenmodell mit einem 1 Meter Raster generiert (siehe Kapitel 3.3.2.2.2) und die entsprechende Profillinie der Geländeoberfläche in Abbildung 36 vergleichend mit den vermessenen Referenzdaten und dem DGM 5 dargestellt. Obwohl die Horizontalschrittweite der ausgelesenen und dargestellten Höhenpunkte auch hier 5 Meter beträgt, kommt es zu einer glatten Struktur der Profillinie. Bei Einsatz eines 1 Meter Rastermodells von Laserscanning-Daten kann die Qualität der Ergebnisse gesteigert werden. Da die Laserscanning-Rohdaten jedoch nicht landesweit vorliegen, kann diese Verbesserung nur als nachfolgende Weiterentwicklung des Verfahrens vorgeschlagen werden (siehe Kapitel 4).

3.5.1.2 Abflußschätzung

Die zur Verfügung stehenden Abflußwerte können auf zwei verschiedene Arten bzw. in unterschiedlichen Auflösungsgenauigkeiten als Eingangsdaten in die Modellierung der Lutter einfließen:

- Das Einzugsgebiet wird anhand der Gewässerstationierungskarte an den wichtigsten Nebenflußeinmündungen in sechs Subeinzugsgebiete unterteilt, für die jeweils ein Abflußwert zur Verfügung steht (Bezeichnung: '6HQ100').
- Ein Spendenwert wird unter Heranziehung der Einzugsgebietsgröße der Tiefenlinienpixel der Gerinnelinie (GerinneDGM5) in Abflußwerte umgerechnet, die in Abhängigkeit zur dazugehörigen Fläche stehen und damit in ihrer Größe stetig von der Quelle bis zur Mündung zunehmen (Bezeichnung: 'hq100').

Um die entstehenden Fehler bzw. Ungenauigkeiten quantifizieren zu können, werden die verschiedenen Abflußwerte unter sonst gleichbleibenden Bedingungen anhand der vereinfachten hydraulischen Modellierung in Wasserstände umgerechnet. Um gerinnemorphologische Einflußfaktoren gering zu halten, geschieht die Berechnung entlang der freien Fließabschnitte (Referenzquerprofile 15 bis 20 und 42 bis 47). Die berechneten Ergebnisse werden mit den Referenzwasserständen verglichen und aufgrund der entstandenen Abweichungen bewertet.

Darüber hinaus wurden auch die Referenzabflußwerte (Bezeichnung: 'Jabron-Abfluß') als Eingangsdaten genutzt. Alle anderen Parameter bleiben wiederum gleich, um die daraus entstehenden Abweichungen (z.B. Gerinnegeometrie aus dem DGM 5 anstatt tachymetrisch vermessener Querprofile) aus dem Vergleich herauszuhalten. Die Berechnungen anhand der Jabron-Abflüsse ergeben in Bezug zu den Referenzdaten in den freien Fließabschnitten eine mittlere positive Abweichung von 0,0035 m (Tabelle 15). Die Einflüsse anderer Faktoren sind somit zu vernachlässigen und eine Betrachtung der durch die unterschiedlichen Abflußeingaben berechneten Abweichungen erscheint sinnvoll.

Variation Abfluß Lutter	Mittlere Abweichung [m] Profil 15-20	Mittlere Abweichung [m] Profil 42-47	Mittlere Abweichung [m] Profil 15-20 und 42-47
Jabron-Abfluß	0,007	0	0,0035
6HQ100	0,002	0,01	0,006
hq100	-0,04	-0,25	-0,145

Tabelle 15: Mittlere Abweichung von HW100 in Bezug zur Referenz bei der Variantenberechnung Abfluß an der Lutter in Profilabschnitten mit annähernd freiem Abfluß (Eingangsdaten: Fließrichtung und Sohlgefälle: DGM 5, Horizontalschrittweite: 1 m; kein künstlicher Gerinnekasten)

Wird 6HQ100 eingegeben, entsteht eine mittlere positive Abweichung von 0,006 m. Eine mittlere negative Abweichung von 0,145 m läßt sich bei Eingabe von hq100 feststellen. Diese starke Abweichung kann verschiedene Gründe haben: Die Abflußwerte hq100 werden auf Basis der Einzugsgebietsgrößen der Tiefenlinienpixel berechnet. Diese können sich von den tatsächlichen Subeinzugsgebieten der Gewässerstationierungskarte unterscheiden. Wenn z.B. die wichtigsten Zuflüsse an anderen Stationierungen in den Bachlauf eintreffen als bei den Referenzdaten, kann es zu stark unterschiedlichen Abflußwerten kommen. Darüber hinaus kann bei einem stark unterschiedlichen Verlauf der beiden Gerinnelinien der Einsatz der Spendenabflußwerte für die GerinneATKISlinie dazu führen, daß die Werte von der Mündung zur Quelle nicht stetig abnehmen. Die Ursache dafür ist wiederum die Tatsache, daß die Spendenwerte anhand der Subeinzugsgebiete der Tiefenlinienpixel in die Fläche übertragen werden und diese Subeinzugsgebiete nur zur GerinneDGM5linie passen.

Die Unterschiede zwischen dem mündungs- und quellnahen Abschnitt freien Fließens sind zu vernachlässigen (Profil 15-20 und 42-47, Tabelle 15). Es kann folglich nicht abgeleitet werden, daß die vereinfachte Hydraulik durch die Variation der Abflußwerte in speziellen Bereichen entlang des Gewässers unterschiedliche Ergebnisqualitäten liefert.

Die Abweichungen bei hq100 sind nicht zu vernachlässigen, so daß eine Verwendung differenzierter Abflußwerte (6HQ100) zu empfehlen ist. Jedoch kann davon ausgegangen werden, daß für die zu berechnenden Einzugsgebiete nur einzelne Schätzwerte zur Verfügung stehen. Liegen jedoch Angaben für wichtige Nebenflüsse vor, sollten diese als differenzierte Abflußwerte in die hydraulischen Berechnungen eingehen.

3.5.2 Fehler und Unsicherheiten durch Parameter und Modellannahmen

Die Auswirkungen der Fehler durch Parameter und Modellannahmen auf das Berechnungsergebnis wird anhand einer qualitativen Zusammenstellung dargestellt (Tabelle 16).

Fehler	Auswirkung
Fehler durch Parameter	
Gerinne	Verwendung beider Gerinnelinien führt zur maximalen Ausdehnung der HW-Bereiche.
Sohlgefälle	Gemittelte Werte dämpfen Fehler des DGM 5, können aber auch tatsächlich vorhandene Spitzenwerte reduzieren.

Fließrichtung bzw. Querprofilausrichtung	Berechnungsabstand reduziert kleinräumige Richtungsänderungen, die meist Fehler bei der Ableitung der Tiefenlinie darstellen.
Flächenbildung–Oberflächeninterpolation und –Morphometrie	Verwendung beider Verfahren führt zur maximalen Ausdehnung der HW-Bereiche.
Fehler durch Modellannahmen	
stationär gleichförmiger Abfluß	Unterschätzung in staubeeinflußten Gerinneabschnitten und Überschätzung in freifließenden Abschnitten.
horizontale Berechnungsschrittweite: 5 m	Vernachlässigung kleinräumigerer Höhenunterschiede, Beachtung der nicht-treppenhaften Struktur der Querprofilgeometrie.
vertikale Berechnungsschrittweite: 0,01 m	Keine Fehler, da Auflösung des zugrundeliegenden Höhenmodells.
Querprofilabstand: 10 m (GerinneATKIS) bzw. 14 m (GerinneDGM5)	Hohe Auflösungsdichte (GerinneATKIS) bzw. kein Fehler, da Auflösung des zugrundeliegenden Höhenmodells (GerinneDGM5).
Rauhigkeitsbeiwert: K_{str} 30	Unterschätzung rauher Vorländer, Überschätzung des Abflußschlauches.
0-Variante beim Gerinnekasten	Fehlergröße entsprechend der Gerinnekastengröße.
Auffüllen von ‘Wasserspiegelsenken’	Vernachlässigung unstetiger Wasserspiegel.
Rückstau durch Bauwerke	Fehlergröße stark abhängig von der Eingabegenauigkeit der Rückstauhöhen.
Rückstau am Vorfluter	Keine Fehler, da Eingabe nur optional.
Enddarstellung der hochwassergefährdeten Bereiche	Anpassung an den Zieldarstellungsmaßstab mindert die Genauigkeit des Ergebnisses bezüglich Flächengröße und Anzahl der Teilbereiche.

Tabelle 16: Einflußnahme der Fehler und Unsicherheiten durch Parameter und Modellannahmen auf die Berechnungsergebnisse, qualitative Darstellung.

3.5.3 Zusammenfassung der Fehler und Unsicherheiten

Auf Basis der vorangegangenen Betrachtung der Fehler- und Unsicherheitsquellen und den erworbenen Erfahrungen im Umgang damit, wird eine Toleranzgrenze als Bewertungskriterium für die berechneten Ergebnisse festgesetzt. Die Toleranzgrenze wird bei 1 m Abweichung der berechneten Wasserspiegellagen von den Referenzdaten jeweils im positiven als auch im negativen Bereich veranschlagt. Diese Größe setzt sich aus zwei Teilbereichen zusammen:

0,5 m beträgt der maximale Fehler des digitalen Höhenmodells, das als Basiseingangsdatensatz für das gesamte Verfahren dient. Dazu kommt eine gemittelte Abweichung von einem weiteren halben Meter für alle anderen Fehler- und Unsicherheitsquellen. Alle Abweichungen innerhalb dieses Toleranzbereiches werden als verfahrensinterne Ungenauigkeiten akzeptiert und bedürfen keiner weiteren Erläuterung. Alle Abweichungen, die den Toleranzbereich überschreiten, werden im Rahmen der folgenden Ergebnisdiskussion qualitativ in ihrer Entstehung erläutert.

3.6 Ergebnisse der drei Untersuchungsgebiete

3.6.1 Längsprofilbetrachtungen

Die Güte des Verfahrens wird durch den Vergleich der Referenzwasserstände mit den berechneten Höhen des vereinfachten Verfahrens ermittelt. Die Ergebnisse der drei bearbeiteten Einzugsgebiete sind als Wasserspiegellagen den folgenden Abbildung 37, Abbildung 38 und Abbildung 39 zu entnehmen. Die Wasserspiegelhöhen der GerinneATKISlinie werden durch eine hellblaue Linie dargestellt, bzw. die der GerinneDGM5linie mit einer dunkelblauen und die der Referenzwasserstände mit einer roten Linie. Das schwarze Längsprofil steht für die Referenzsohle, das dunkelgraue für die GerinneDGMlinie bzw. das hellgraue für die GerinneATKISlinie. Die GerinneATKISlinien sind mit einer höheren Punktedichte (alle 10 m) dargestellt als die GerinneDGM5linien. Die GerinneDGM5linien weichen in ihrer räumlichen Lage vom eigentlichen Gewässerverlauf der GerinneATKISlinie ab. Um einen bewertenden Vergleich mit den Referenzdaten vornehmen zu können, müssen für die einzelnen Flußpunkte der Referenz die räumlich nächstliegenden Flußpunkte der GerinneDGM5linie ermittelt werden. Dementsprechend stimmt die Punktedichte der GerinneDGM5linie mit der Anzahl der zur Verfügung stehenden Referenzflußpunkte überein (Lutter 113 Flußpunkte auf 5,2 km; Brandenbäumer / Geseker Bach 41 Flußpunkte auf 4,3 km; Werse 150 Flußpunkte auf 12,5 km). Durch diese geringe Flußpunktanzahl entstehen bei der Darstellung der GerinneDGM5linien schräge Verbindungslinien zwischen entfernt stehenden Flußpunkten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß in den aus der Fehlerbetrachtung abgeleiteten Toleranzbereich von maximal 1m (siehe Kapitel 3.5.3) der Hauptanteil der Abweichungen fällt. Größere Abweichungen werden in den einzelnen Kapiteln der drei Untersuchungsgebiete qualitativ erläutert.

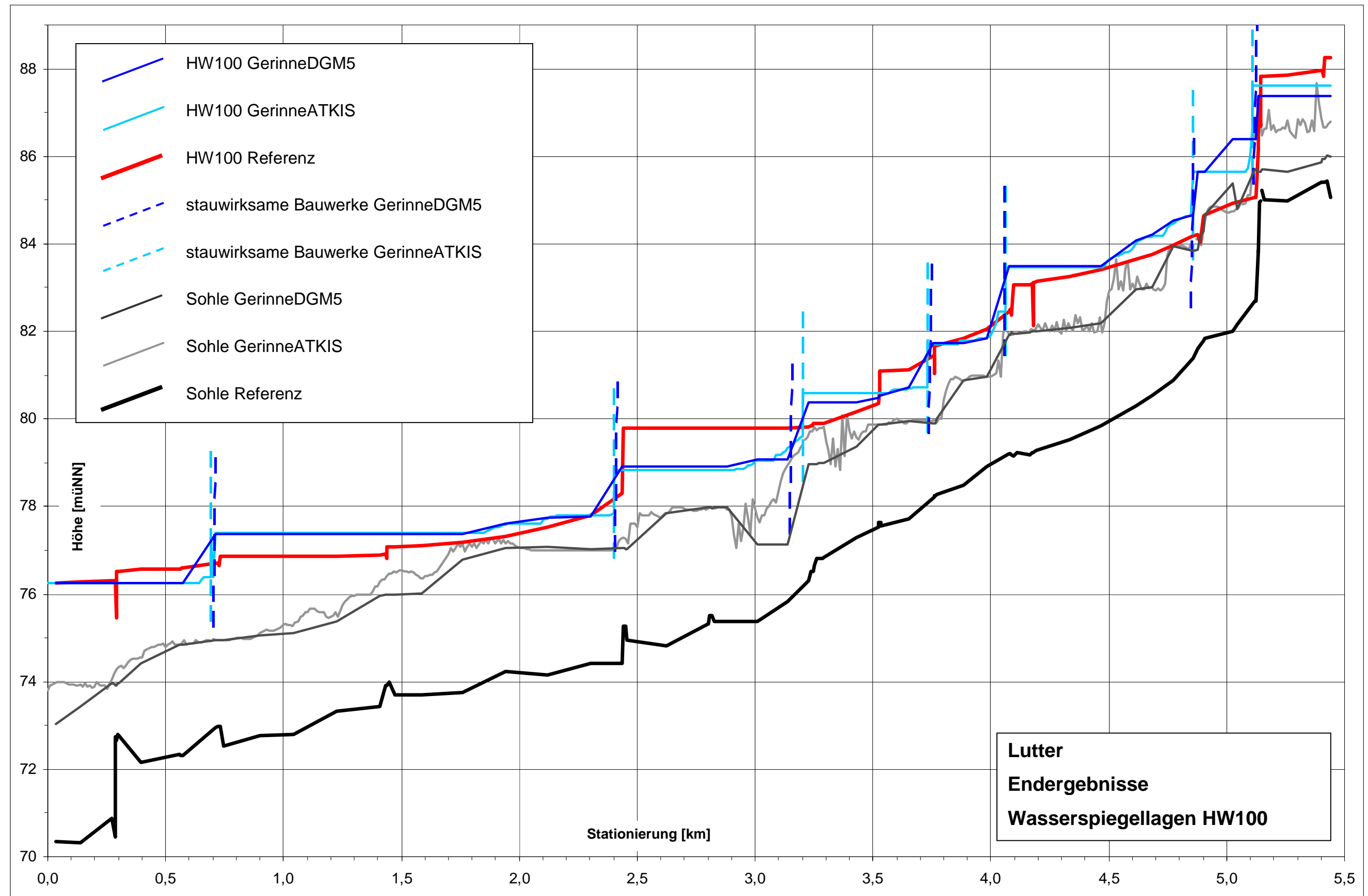


Abbildung 37: Ergebnisse Wasserspiegellage HW100 Lutter, Längsprofilardarstellung. Die Anzahl der HW100-Werte der GerinneDGM5linie wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit an die Stationierung der Referenzquerprofile angepaßt, d.h. auf 113 reduziert. Folgende Berechnungsparameter wurden verwendet: Gefälle und Fließrichtung aus dem DGM 5 abgeleitet, Abfluß aus den Eingangsdaten (6HQ100), K_{sr} 30, Horizontalschrittweite 5 m, Vertikalschrittweite 0,01 m, Rückstauhöhe Bauwerke 1 m, Rückstauhöhe Vorfluter Aar 76,26 m.

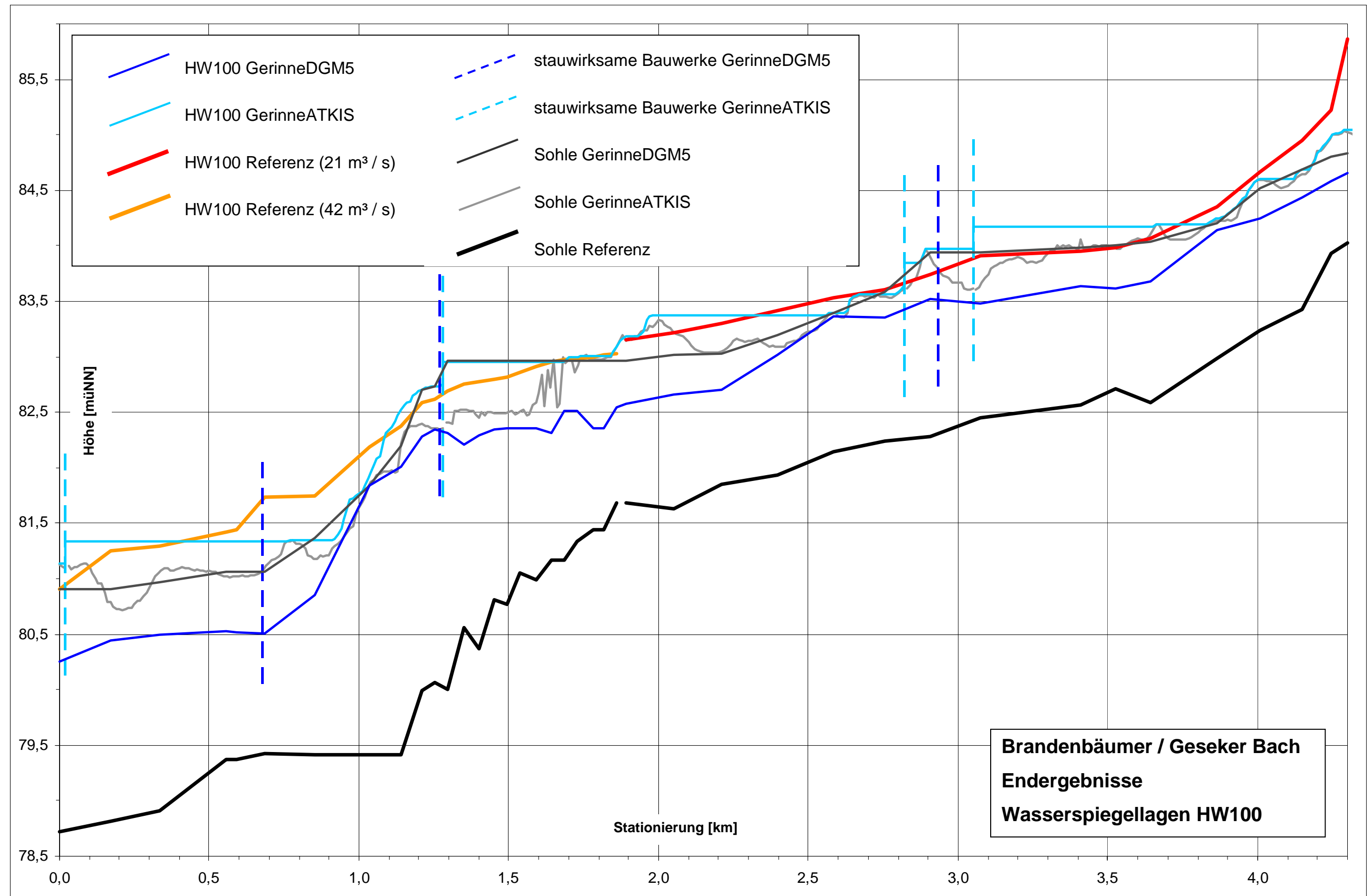


Abbildung 38: Ergebnisse Wasserspiegellage HW100 Brandenbäumer / Geseker Bach, Längsprofilardarstellung. Die Anzahl der HW100-Werte der GerinneDGM5linie wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit an die Stationierung der Referenzquerprofile angepaßt, d.h. auf 41 reduziert. Folgende Berechnungsparameter wurden verwendet: Gefälle und Fließrichtung aus dem DGM 5 abgeleitet, Abfluß aus den Eingangsdaten (2HQ100), K_{str} 30, Horizontalschrittweite 5 m, Vertikalschrittweite 0,01 m, Rückstauhöhe Bauwerke 0,2 m, Rückstauhöhe Vorfluter Lippe 80,91 m.

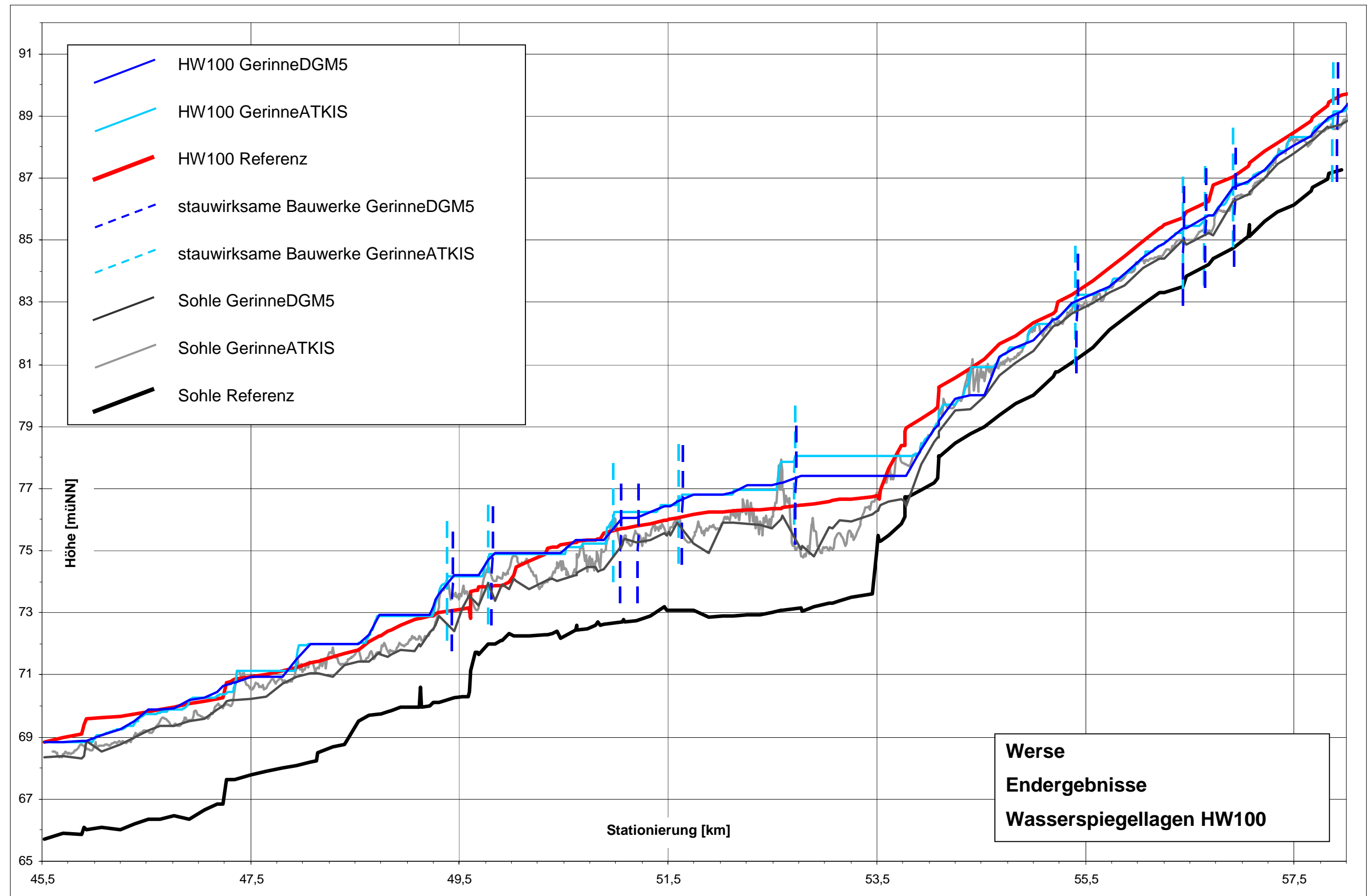


Abbildung 39: Ergebnisse Wasserspiegellage HW100 Werse, Längsprofilardarstellung. Die Anzahl der HW100-Werte der GerinneDGM5linie wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit an die Stationierung der Referenzquerprofile angepaßt, d.h. auf 150 reduziert. Folgende Berechnungsparameter wurden verwendet: Gefälle und Fließrichtung aus dem DGM 5 abgeleitet, Abfluß aus den Eingangsdaten (19HQ100), K_{str} 30, Horizontalschrittweite 5 m, Vertikalschrittweite 0,01 m, Rückstauhöhe Bauwerke 0,2 m, Rückstauhöhe Werse / Mittellauf 68,82 m.

3.6.1.1 Lutter

Entlang der Lutter existieren 113 Referenzflußpunkte mit den entsprechenden Wasserstandshöhen. An diesen Positionen erfolgt ein Vergleich mit den berechneten Höhen der GerinneATKIS- bzw. der GerinneDGM5linie. In Abbildung 40 sind die positiven und negativen Abweichungen der beiden Gerinnelinien (hellblau = GerinneATKIS; dunkelblau = GerinneDGM5) von der Referenz (rote Linie bzw. 0 = keine Abweichung) an der Y-Achse abgetragen. Auf der X-Achse sind die einzelnen Flußpunkte von der Mündung bis zum quellnahen Bereich dargestellt.

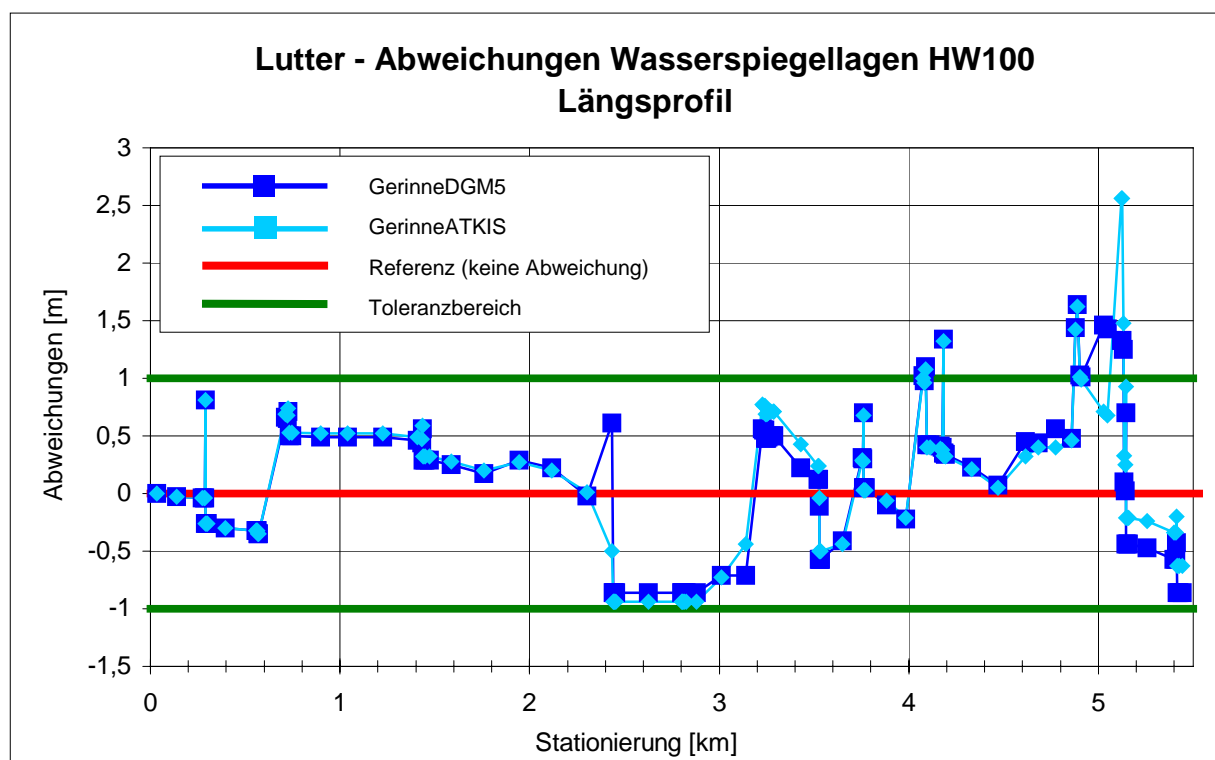


Abbildung 40: Abweichungen der mit dem vereinfachten Verfahren berechneten HW100 Wasserstände an der Lutter von den jeweiligen Referenzwasserhöhen - Längsprofildarstellung mit entsprechender Stationierung.

In Klassen dargestellt entsteht ein übersichtliches Bild der Abweichungen (Abbildung 41). Eine genaue Übereinstimmung der Wasserstandshöhen (= keine Abweichung: Klasse 0 m) befindet sich nur am Vorfluter. Dort wurde die Überschwemmungshöhe der Referenzdaten als erste Wasserstandshöhe ins vereinfachte Verfahren übernommen. Im negativen Bereich reichen die Abweichungen bis maximal 1 m, im positiven Bereich bis 3 m. Auf der positiven Seite kommt es zu einer Normalverteilung mit einem Maximum bei Abweichungen im Bereich 0,25 bis 0,50 m. Im negativen Bereich nimmt die Anzahl der Abweichungen mit der Größe der Abweichungen ab.

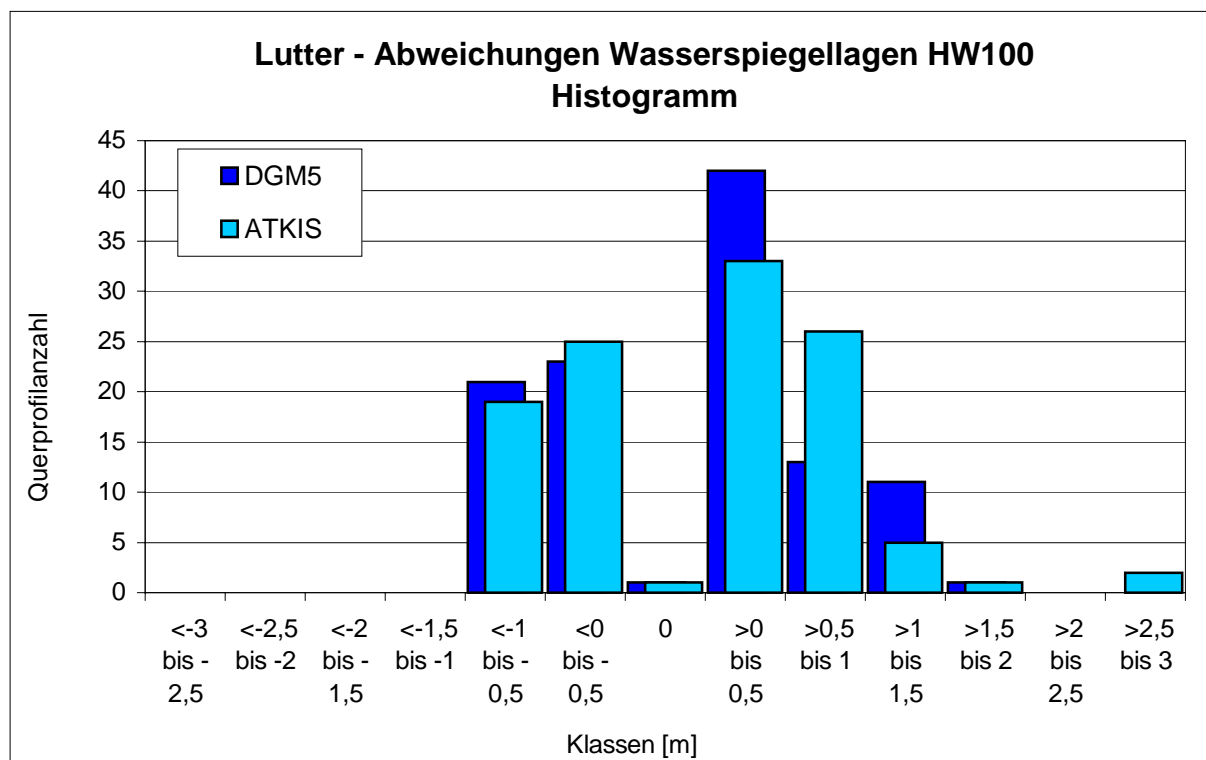


Abbildung 41: Abweichungen der mit dem vereinfachten Verfahren berechneten HW100 Wasserstände an der Lutter von den jeweiligen Referenzwasserhöhen - klassifiziertes Histogramm.

Die statistische Analyse der Abweichungen ergibt einen Mittelwert von 0,54 m (Tabelle 17).

	Gesamtmenge	GerinneDGM5	GerinneATKIS
Mittelwert [m]	0,54	0,54	0,55
Standardabweichung [m]	0,4	0,3	0,43

Tabelle 17: Statistische Auswertung der Abweichungen der mit dem vereinfachten Verfahren berechneten HW100 Wasserstände an der Lutter von den jeweiligen Referenzwasserhöhen - Größe der Vergleichsmenge: 113 Referenzquerprofile.

Von den insgesamt 113 betrachteten Referenzflußpunkten liegen sowohl bei der GerinneDGM5- als auch bei der GerinneATKISlinie neun Abweichungen außerhalb des Toleranzbereiches. Alle befinden sich zwischen der Stationierung 4 und 5,2 km (Abbildung 40). Die Extremabweichungen lassen sich alle durch eine unterschiedliche Topographie bzw. Sohlhöhe zwischen dem vereinfachten Verfahren und der Referenz erklären. Der Sohlanstieg des DGM 5 ist stärker, als der des Referenzlängsprofiles (Abbildung 37). Dementsprechend kommt es durchgehend zu einer Überschätzung der Wasserstandshöhen (Tabelle 18), und zwar ist der Brückenrückstau jeweils stärker als der der Referenz. An der Stationierung 4,2 km kommt hinzu, das die Sohlhöhe der Referenz einen künstlichen Tiefpunkt hat.

	Stationierung	Topographie (Sohle)	Abweichungen + = Überschreitung der Referenz
GerinneATKIS	4,1 km	Sohlanstieg DGM 5 stärker als Referenz	+ : Brückenrückstau stärker als Referenz
	4,2 km		+ : Referenz hat künstlichen Tiefpunkt
	4,9 km		+ : Brückenrückstau stärker als Referenz
	5,1 km		+ : Brückenrückstau etwas früher als Referenz
GerinneDGM5	4 – 4,9 km	Sohlanstieg DGM 5 stärker als Referenz	+ : Brückenrückstau stärker als Referenz
	4,2 km		+ : Referenz hat künstlichen Tiefpunkt
	4,9 – 5,2 km		+ : Brückenrückstau stärker als Referenz

Tabelle 18: Qualitative Erläuterung der HW100-Abweichungen außerhalb des Toleranzbereiches an der Lutter.

3.6.1.2 Brandenbäumer / Geseker Bach

Der Brandenbäumer / Geseker Bach hat auf einer Länge von 4,3 km 41 Referenzflußpunkte. Die Abweichungen bewegen sich im Bereich -1 bis +0,5 m (Abbildung 42).

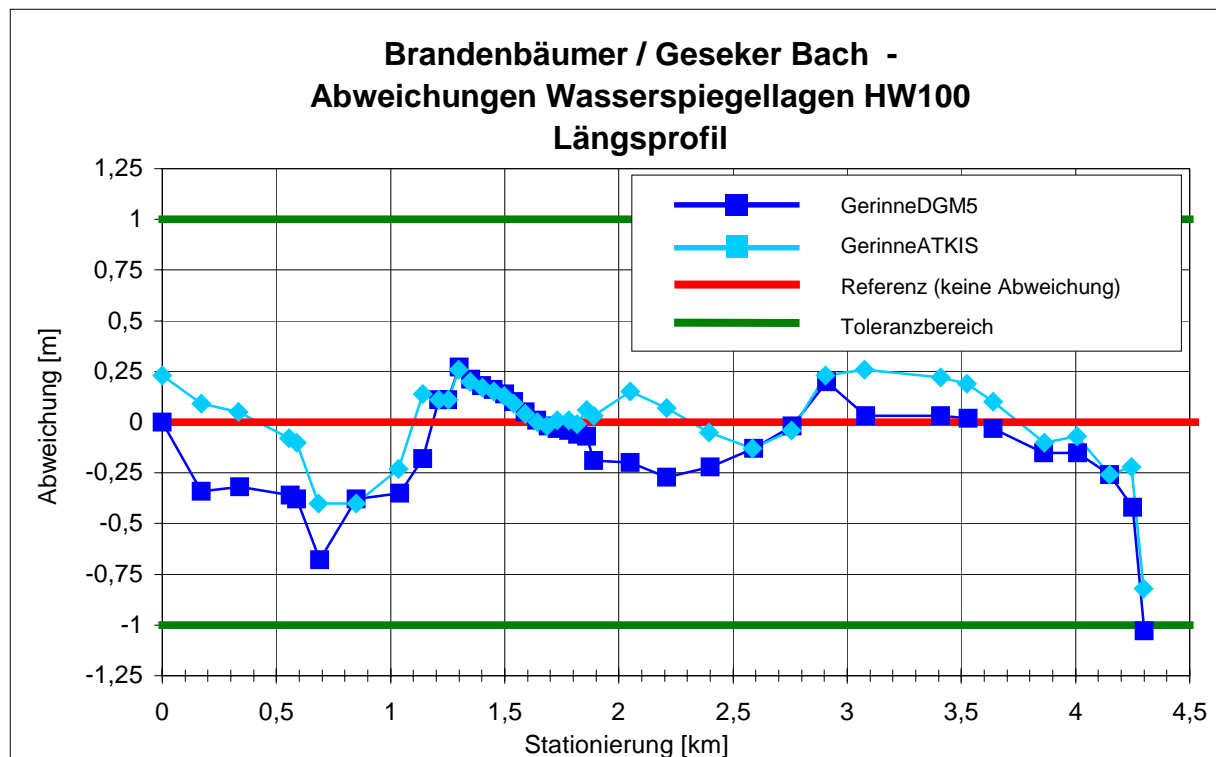


Abbildung 42: Abweichungen der mit dem vereinfachten Verfahren berechneten HW100 Wasserstände am Brandenbäumer / Geseker Bach von den jeweiligen Referenzwasserhöhen - Längsprofildarstellung mit entsprechender Stationierung.

In Klassen dargestellt entsteht ein übersichtliches Bild der Abweichungen (Abbildung 43).

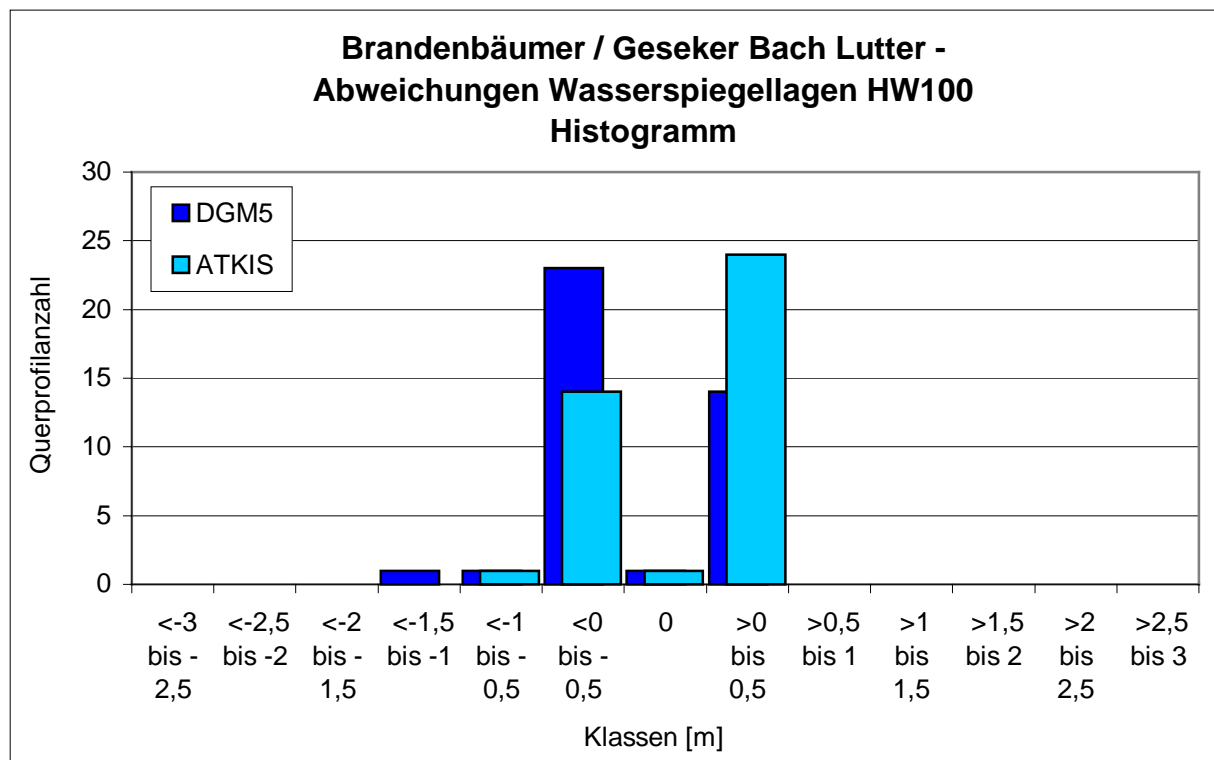


Abbildung 43: Abweichungen der mit dem vereinfachten Verfahren berechneten HW100 Wasserstände am Brandenbäumer / Geseker Bach von den jeweiligen Referenzwasserhöhen - klassifiziertes Histogramm.

Die statistische Analyse der Abweichungen ergibt einen Mittelwert von 0,19 m (Tabelle 19).

Art der Abweichung	Gesamtmenge	GerinneDGM5	GerinneATKIS
Mittelwert [m]	0,19	0,2	0,17
Standardabweichung [m]	0,17	0,2	0,15

Tabelle 19: Statistische Auswertung der Abweichungen der mit dem vereinfachten Verfahren berechneten HW100 Wasserstände am Brandenbäumer / Geseker Bach von den jeweiligen Referenzwasserhöhen - Größe der Vergleichsmenge: 41 Referenzquerprofile.

In Hinblick auf die beiden anderen Untersuchungsgebiete, handelt es sich um die geringsten Abweichungen (weniger als die Hälfte). Außerhalb des Toleranzbereiches gibt es nur eine einzige Extremabweichung: Die GerinneDGM5linie (Stationierung 4,3 km) unterschreitet die Referenz mit einer Abweichung von – 1 m (Abbildung 42). Die HW100-Werte der Referenz steigen plötzlich stark an, obwohl die Referenzsohle diesem Verlauf nicht folgt (Abbildung 38). Aus der vorliegenden Datenbasis ist keine Erklärung für dieses Verhalten der Referenzdaten ableitbar. Es handelt sich um die letzten Werte der Stationierung, der weitere Verlauf ist nicht ersichtlich. Die eigenen Berechnung dagegen bleiben konstant.

Entgegen der Erwartung, daß die Ergebnisse im weniger sensiblen Mittelgebirge die besseren sein müßten, handelt es sich beim Brandenbäumer / Geseker Bach um ein Flachlandgewässer. Jedoch sind die guten Ergebnisse bei der Längsprofilbetrachtung nicht unbedingt übertragbar auf die daraus resultierenden Flächen. Im Flachland reagieren die Flächenbildungsverfahren auf die geringen Höhenunterschiede extrem sensibel.

3.6.1.3 Werse

Entlang der betrachteten 12,5 km der Werse liegen 150 Referenzflußpunkte vor. Die Abweichungen reichen von $-2,5$ bis $+2$ m (Abbildung 44).

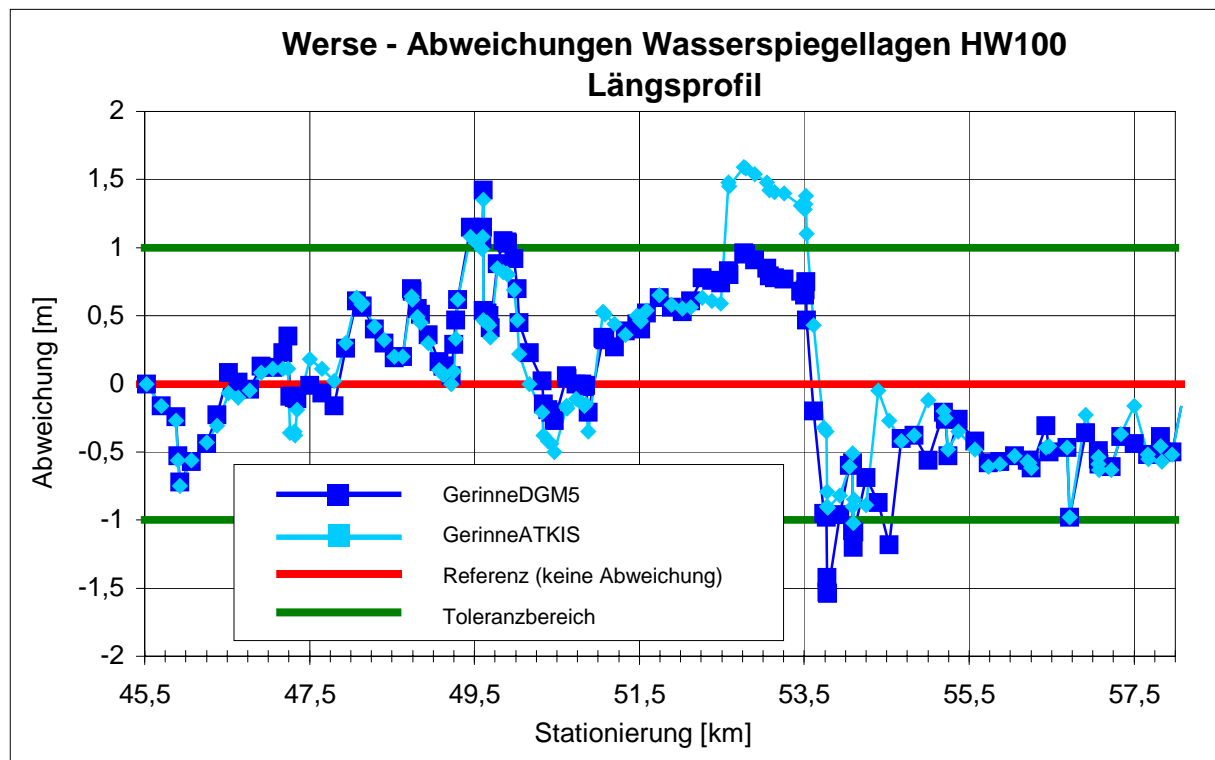


Abbildung 44: Abweichungen der mit dem vereinfachten Verfahren berechneten HW100 Wasserstände an der Werse von den jeweiligen Referenzwasserhöhen - Längsprofildarstellung mit entsprechender Stationierung.

Auffällig ist der markante Wechsel der positiven Abweichungen (vor Stationierungskilometer 53,5) zu den folgenden negativen Abweichungen. An diesem Punkt wechselt der Charakter des Relieftyps vom Flachland zum Mittelgebirgsgewässer. Bei den beiden anderen Untersuchungsgebieten pendeln die Abweichungen mehr oder weniger um die 0-Achse. Auf der negativen Seite liegt eine annähernde Normalverteilung der Abweichungen vor, auf der positiven Seite nimmt die Anzahl der Abweichungen mit der Größe leicht zu (Abbildung 45).

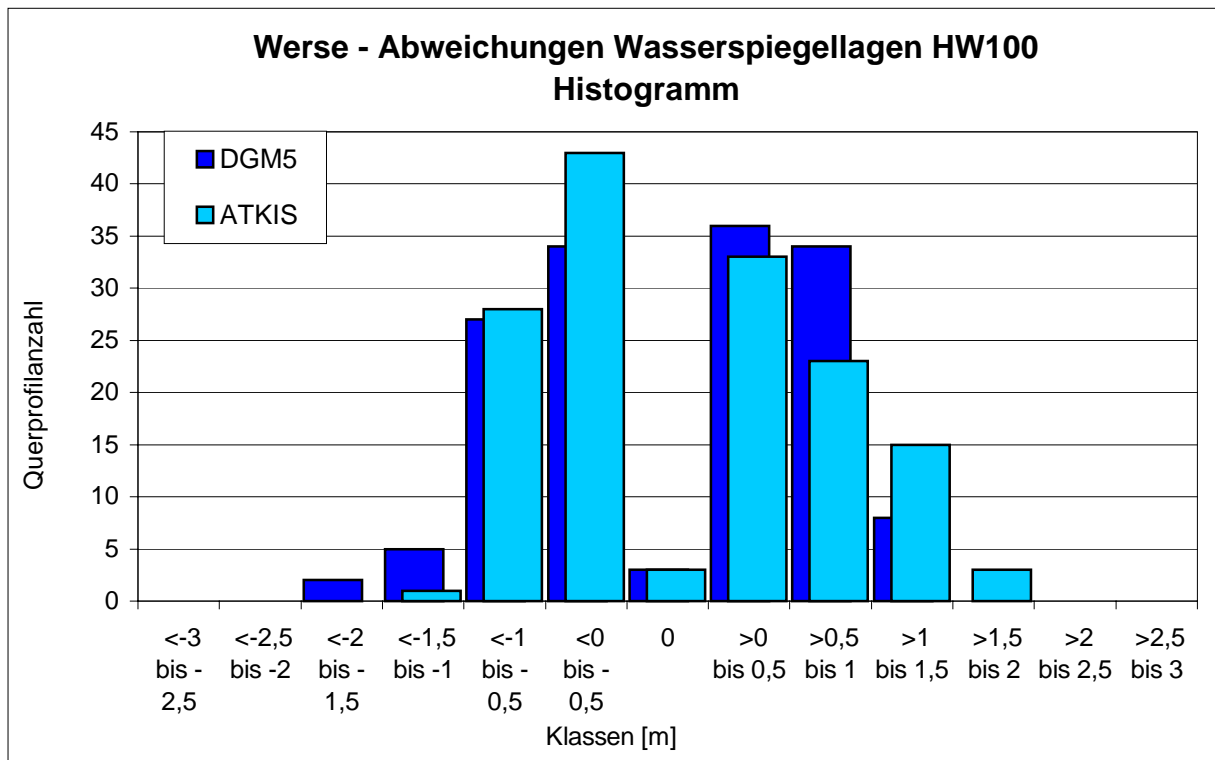


Abbildung 45: Abweichungen der mit dem vereinfachten Verfahren berechneten HW100 Wasserstände an der Werse von den jeweiligen Referenzwasserhöhen - klassifiziertes Histogramm.

Die statistische Analyse der Abweichungen ergibt einen Mittelwert von 0,53 m (Tabelle 20).

Art der Abweichung	Gesamtmenge	GerinneDGM5	GerinneATKIS
Mittelwert [m]	0,53	0,51	0,54
Standardabweichung [m]	0,36	0,35	0,38

Tabelle 20: Statistische Auswertung der Abweichungen der mit dem vereinfachten Verfahren berechneten HW100 Wasserstände an der Werse von den jeweiligen Referenzwasserhöhen - Größe der Vergleichsmenge: 150 Referenzquerprofile.

Damit sind die Abweichungen statistisch vergleichbar mit denen des Untersuchungsgebietes der Lutter. Die Extremabweichungen außerhalb des Toleranzbereiches belaufen sich von den insgesamt 150 betrachteten Referenzflußpunkten auf 14 bei der GerinneDGM5linie, bzw. 19 bei der GerinneATKISlinie (Abbildung 44). Die Abweichungen beruhen schwerpunktmäßig auf unterschiedlichen Sohlverläufen des digitalen Höhenmodells und der vermessenen Referenzdaten (Tabelle 21). Darüber hinaus kommt es bei den meisten positiven Überschätzungen zu einem stärkeren Bauwerksrückstau als in den Referenzdaten. Die Unterschreitung der Referenz bei Stationierungskilometer 53,6 erklärt sich durch mehrere Bauwerke und extreme Sohlanstiege innerhalb der Referenzdaten.

Gerinne	Stationierung	Topographie (Sohle)	Abweichungen + = Überschreitung der Referenz - = Unterschreitung der Referenz
	TKIS	49,5 km	lokaler Sohlanstieg
52,7 km		starker lokaler Sohl- anstieg	+: Bauwerkrückstau
53,7 km		Beginn höherer Re- liefenergie	-: durch > Sohlgefälle < HW100 und Refe- renzdaten hat mehrere Bauwerke und extreme Sohlanstiege
DGMS	49,4 km	lokaler Sohlanstieg	+: Anstieg Sohle früher als Referenz
	49,8 km	lokaler Sohlanstieg	+: Bauwerkrückstau
	53,6 km	Beginn höherer Re- liefenergie	-: durch > Sohlgefälle < HW100 und Refe- renzdaten hat mehrere Bauwerke und extreme Sohlstiege

Tabelle 21: Qualitative Erläuterung der HW100-Abweichungen außerhalb des Toleranzbereiches an der Wersse.

3.6.2 Flächenbetrachtung

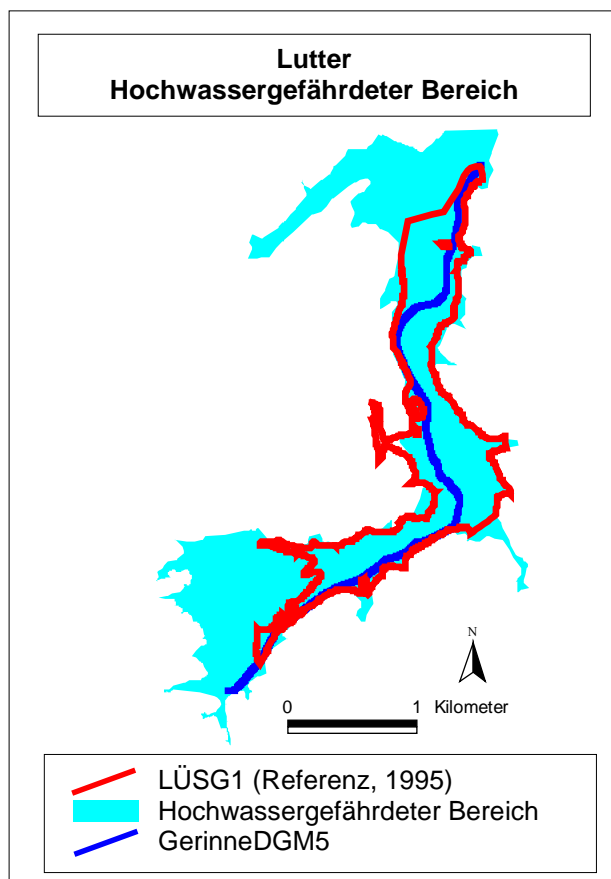
Die berechneten hochwassergefährdeten Bereiche der drei Einzugsgebiete sind auf den folgenden drei Abbildungen (Abbildung 46, Abbildung 47 und Abbildung 48) annähernd im Zielmaßstab 1 : 50.000 des Gebietsentwicklungsplanes dargestellt. Die hellblauen Flächen stehen für die mit dem vereinfachten Verfahren berechneten hochwassergefährdeten Bereiche. Die roten Linien grenzen das natürliche Überschwemmungsgebiet der Referenzdaten ab. Aus Gründen der Kartenlesbarkeit wurde auf die Hinterlegung der DGK 5 in diesem Maßstab verzichtet. Sie stellen jedoch die entscheidende Grundlage zur qualitativen Bewertung der Ergebnisse dar. Deshalb sind die detaillierten räumlichen Ergebnisse der vorliegenden Arbeit in Verbindung mit den Grundkarten als Kartenanhang im Maßstab 1 : 10.000 beigelegt (Anlage I bis III). Darüber hinaus werden dort die unterschiedliche Lage der Gerinnelinien, der hochwassergefährdeten Teilbereiche und der weiteren Referenzüberschwemmungsgebiete ersichtlich (orangefarbene Umgrenzungslinie für die preußischen Überschwemmungsgebiete).

Das Hauptproblem beim Vergleich der berechneten Abgrenzungen mit den Referenzdaten ist die Tatsache, daß die Referenzdaten zum großen Teil manuell oder durch Integration von speziellen Strukturen in das Höhenmodell überarbeitet worden sind, d.h. die Überschwem-

mungsgebiete wurden an Straßen, Dämmen oder ähnlichen Begrenzungen abgeschnitten. Diese Überarbeitung erfolgt beim vereinfachten Verfahren nicht. Dadurch entstehen große Unterschiede in der räumlichen Ausdehnung der berechneten Bereiche und der Referenz. Diese Differenz ist jedoch durch Auswertung der entsprechenden Bereiche anhand einer DGK 5 eindeutig auszumachen. Große Teilbereiche der drei Untersuchungsgebiete fallen unter dieses Kriterium.

3.6.2.1 Lutter

Innerhalb des mit den Referenzdaten zu vergleichenden Abschnittes kommt es zu geringen räumlichen Abweichungen (Abbildung 46 und Anlage I). Häufigste Ursache für diese Unter-



schiede sind Nebenflußeinmündungen, die beim vereinfachten Verfahren keine Beachtung finden, aber bei den Referenzdaten manuell herausgenommen wurden. Die einzige größere Abweichung im Oberlauf erklärt sich durch die Einmündung des Finkenbaches, dessen Überschwemmungsbereich beim vereinfachten Verfahren mit dem der Lutter zusammenfällt. Hier ist die berechnete Fläche größer als die der Referenzdaten.

Abbildung 46: Hochwassergefährdeter Bereich der Lutter, Übersichtsdarstellung.

Dies läßt sich durch die Mindestgröße aller innenliegenden, nicht überfluteten Flächen erklären: Bereiche kleiner als 250.000 m² werden aus Gründen der Darstellbarkeit im Gebietsentwicklungsplan zum überschwemmten Bereich hinzugezählt. Ein nicht überschwemmter Bereich von 200.000 m² Größe im Bereich oberhalb der Einmündung des Finkenbaches, wird aufgrund dieser Regelung zum hochwassergefährdeten Bereich deklariert.

3.6.2.2 Brandenbäumer / Geseker Bach

Auf den ersten Blick erscheint die räumliche Abweichung zwischen dem berechneten hochwassergefährdeten Bereich und der Referenz relativ groß (Abbildung 47 und Anlage II).

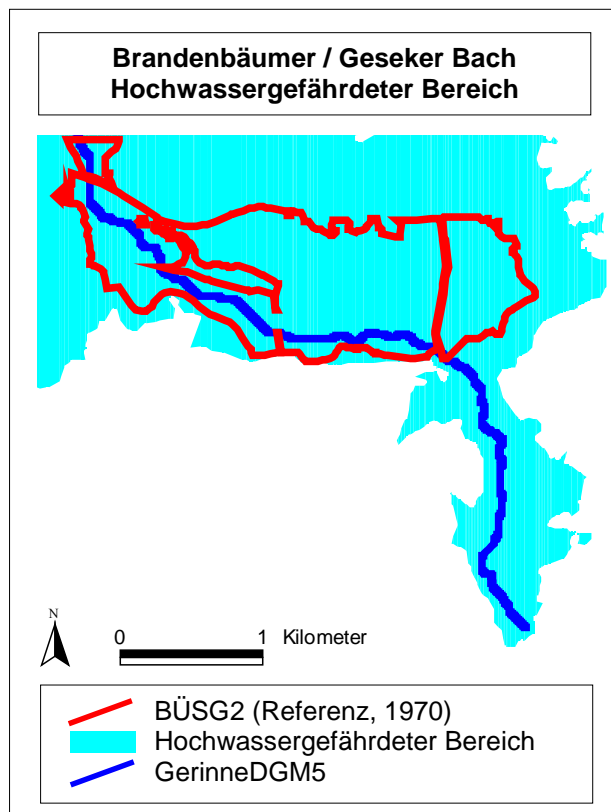


Abbildung 47: Hochwassergefährdeter Bereich des Brandenbäumer / Geseker Baches, Übersichtsdarstellung.

Bei Analyse der vorhandenen Datengrundlagen fällt der größere Teil der Abgrenzungen jedoch aus dem Bewertungsrahmen heraus: Die nördliche Grenze des hochwassergefährdeten Bereiches geht grenzenlos in das Überschwemmungsgebiet der Lippe über. Die nördliche Abgrenzung der Referenz hingegen verläuft entlang einer Straße. Diese Abgrenzung wurde also manuell oder durch Längsstrukturen innerhalb der Modellierung erzeugt, und kann nicht mit dem berechneten

Ergebnis verglichen werden. Die westliche Grenze der Referenz verläuft entlang der Gewässerlinie. Vermutlich grenzt das folgende Überschwemmungsgebiet an diese Grenze an. Auch das preußische Überschwemmungsgebiet bestätigt diese Annahme und unterstützt die Berechnungsergebnisse des vereinfachten Verfahrens in diesem Bereich. An der östlichen Grenze verläuft der berechnete Bereich zwischen 200 und 300 m außerhalb der Referenz. Die Ursache dafür ist die räumliche Abweichung der GerinneATKIS- von der GerinneDG5linie (siehe Kapitel 3.3.2.2.3 und Abbildung 31). Die südliche Begrenzung ist die einzige, die zur Bewertung herangezogen werden kann. Dort ist die Übereinstimmung zwischen dem berechneten Bereich und der Referenz als gut einzustufen.

Der folgende quantitative Flächenvergleich verschiedener Berechnungsvarianten wurde nicht im Vergleich zur Referenz betrachtet, da die Referenz aus oben genannten Gründen nur für eine qualitative Bewertung herangezogen werden kann. Die Ergebnisse der Varianten werden mit dem hochwassergefährdeten Bereich ohne Variation verglichen (Tabelle 22).

Brandenbäumer / Geseker Bach				
Differenzen	HW_keineVariation [km²]	HW_Kstr20 [km²]	HW_Kstr40 [km²]	HW_ohneBauwerk [km²]
keine Differenz	13,155	13,437	13,438	12,988
Differenz [km ²]		0,282	0,283	-0,167
Differenz [%]		2,1	2,2	-1,3

Tabelle 22: Quantitativer Flächenvergleich von Variantenberechnungen am Brandenbäumer / Geseker Bach.

Der hochwassergefährdete Bereich hat eine Größe von 13,2 km². Bei Einsatz eines Rauigkeitsbeiwertes von 20 bzw. 40 dehnt sich der überflutete Bereich auf eine Größe von 13,4 bzw. 12,7 km² aus. Das ist eine Flächenzunahme von 2,1 bzw. 2,2 %. Entgegen der Annahme vergrößert sich die Fläche auch bei einem größeren Rauigkeitsbeiwert, da durch kürzere Querprofile mehr HW₁₀₀-Werte in die Flächenbildung eingehen. Bei der Berechnung ohne Variation fallen durch die Begrenzung des DGM 5, an die die Berechnungen stoßen, eine große Anzahl von Flußpunkten für die Flächenbildung heraus. Gehen keine Bauwerke in die Berechnungen ein, verringert sich die Fläche um 1,3 % auf 13 km². Alle räumlichen Auswirkungen können als gering bewertet werden.

3.6.2.3 Werse

Die Übereinstimmung zwischen dem hochwassergefährdeten Bereich und der Referenz ist qualitativ betrachtet groß (Abbildung 48 und Anlage III). Bewertet werden ausschließlich die Stationierungskilometer 49 bis 58, weil nur hierfür Referenzdaten vorliegen. Es kommt durch folgende Gründe zu Flächenabweichungen:

- Die kleinteilige Struktur des hochwassergefährdeten Bereiches im Stadtgebiet Ahlen läßt auf einen Ausbau des Gewässers für ein 100-jährliches Bemessungshochwasser schließen. Dafür spricht ebenfalls, daß innerhalb des städtischen Raumes die GerinneATKISline selber nicht zum hochwassergefährdeten Bereich gehört. Ein derartig ausgebauter Gewässerschlauch ist in den Höheninformationen des DGM 5 nicht enthalten und kann durch das vereinfachte Verfahren nicht modelliert werden.
- Beim vereinfachten Verfahren fallen alle innenliegenden, nicht überfluteten Flächen kleiner als 250.000 m² heraus bzw. werden zum überschwemmten Bereich dazugezählt. Die

deichgeschützte Haldenfläche mit 140.000 m² Größe (Stationierung 52,5 km) gehört somit zum hochwassergefährdeten Bereich.

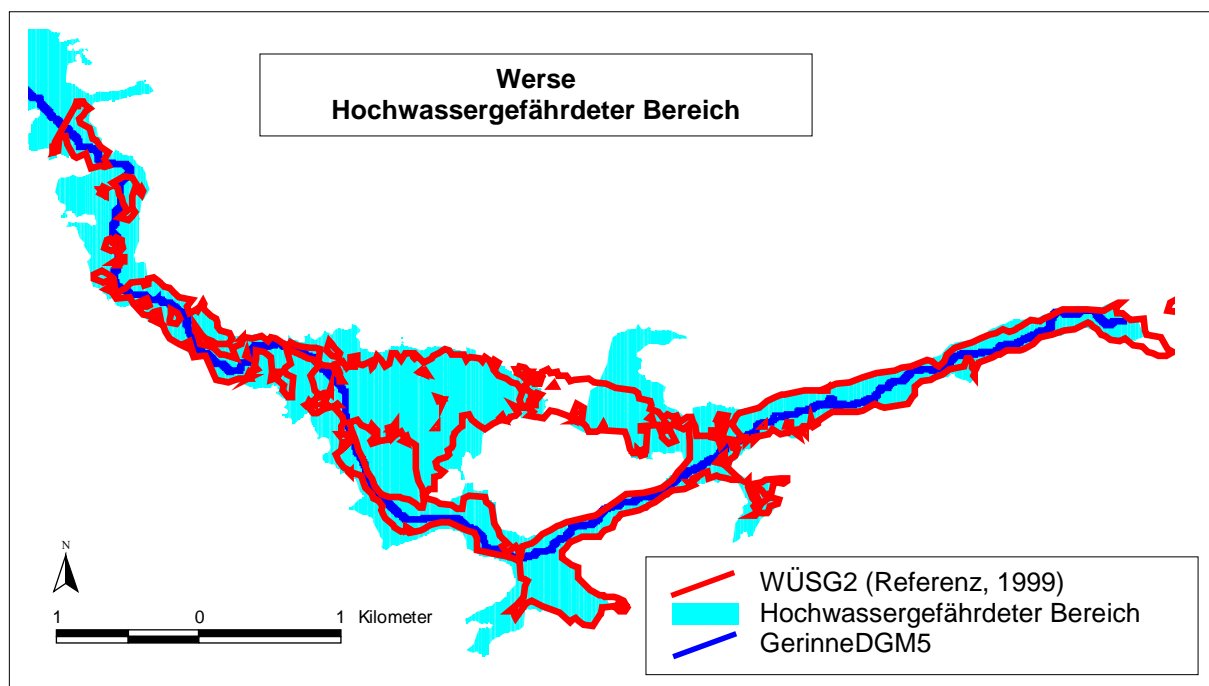


Abbildung 48: Hochwassergefährdeter Bereich der Werse, Übersichtsdarstellung.

Verschiedene Variantenberechnungen zeigt die Tabelle 23. Ohne Variation hat der berechnete Bereich eine Größe von 6,5 km². Unter Verwendung der Rauigkeitsbeiwerte 20 bzw. 40 dehnt sich der überflutete Bereich auf einer Fläche von 6,6 bzw. 6,3 km² aus (0,2 % Flächenüber- bzw. 0,1 % Unterschreitung). Ohne die Berücksichtigung des Rückstaus von Bauwerken erreicht die modellierte Fläche eine Größe von 6,3 km² (1,8 % Flächenunterschreitung).

Werse				
Differenzen	HW_keineVariation [km ²]	HW_Kstr20 [km ²]	HW_Kstr40 [km ²]	HW_ohneBauwerke [km ²]
keine Differenz	6,457	6,626	6,313	6,338
Differenz [km ²]		0,169	-0,144	-0,119
Differenz [%]		2,7	-2,2	-1,8

Tabelle 23: Quantitativer Flächenvergleich von Variantenberechnungen an der Werse.

3.7 Bewertung

Bei der Längsprofilbetrachtung kann in allen drei Untersuchungsgebieten kein signifikanter Unterschied der Ergebnisse von der GerinneATKIS- und GerinneDGM5linie ausgemacht werden. Bis auf wenige Ausnahmen verhalten sich die Abweichungen der beiden Gerinnelinien ähnlich. Als grundsätzliche Erklärung für abweichende Ergebnisse der berechneten HW_{100} -Werte von den Referenzdaten gelten:

- Unterschiedliche Sohlhöhen als Basis der Berechnungen. Dieses ist der wichtigste Grund für die Abweichungen. Da das vereinfachte Verfahren wesentlich auf Höheninformationen des DGM 5 basiert, ist die Höhengenaugkeit des Modells entscheidend für das Maß der Übereinstimmung zwischen dem jeweils berechneten HW_{100} -Wert und der Referenz.
- Der Verlauf der Gerinnelinien durch ein vom digitalen Höhenmodell abgeleitetes verengtes Querprofil führt zur Berechnung eines erhöhten Wasserstandes, der sich durch Rückstauwirkung gewässeraufwärts fortsetzt. Die Verengung kann eine tatsächliche Struktur des DGM 5 oder auch nur eine einzelne fehlerhafte Rasterzelle darstellen. Diese Problematik ist vor allem im Laserscanning-DGM 5 zu erwarten.
- In die hydraulische Modellierung der Referenzdaten gehen, neben den hochaufgelösten Abflußdaten, sowohl zahlreichere Eingangsparameter als auch differenziertere Modellannahmen ein (siehe Kapitel 2.3), die beim vereinfachten Verfahren ausgeschlossen werden.

Die Annahme, das sich bei guter Annäherung der berechneten HW_{100} -Werte an die Referenzdaten auch eine entsprechende räumliche Übereinstimmung ergibt, kann nicht in allen Fällen bestätigt werden. Untersuchungen an zwei Abweichungsbereichen der Lutter zeigen diese Diskrepanz: Der Fehlbereich ab Stationierungskilometer 2,5 hat bei Anpassung der Wasserspiegellage an die Referenz auch eine gute räumliche Übereinstimmung. Der Fehlbereich ab Stationierungskilometer 4,9 erreicht jedoch erst eine ähnlich räumliche Ausdehnung bei einer Unterschreitung der Wasserspiegelreferenz um ca. 1 m (Abbildung 37).

Die Bewertung der Wasserspiegellagen ist das für die wasserwirtschaftlichen Fachplanungen entscheidende Bewertungskriterium einer Modellierung. Da im Endeffekt die hochwassergefährdeten Bereiche jedoch in die Gebietsentwicklungspläne der Raumordnung aufgenommen werden, ist die Beurteilung der flächigen Ausdehnungen entscheidend für die Bewertung des Verfahrens. Da aus den genannten Gründen heraus nur Teilbereiche der Abgrenzungen mit

den Referenzdaten vergleichbar sind, basiert die räumliche Bewertung der berechneten Flächen auf einer visueller Auswertung im Vergleich mit zugrundeliegenden DGK 5 und dem Wissen um angrenzende Überschwemmungsgebiete.

Auf dieser Grundlage kann die Qualität der Ergebnisse im Rahmen der angestrebten Zielgenauigkeit als gut betrachtet werden. Der Integration der mit dem vereinfachten Verfahren abgeleiteten hochwassergefährdeten Bereiche im Regionalplanungsmaßstab von 1 : 50.000 ist damit möglich.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der Entwicklung eines vereinfachten Verfahrens zur Abgrenzung hochwassergefährdeter Bereiche kleiner Fließgewässer Nordrhein-Westfalens im Regionalplanungsmaßstab 1 : 50.000 (Ziel). Zur Anwendung kommen dabei die hydraulische Modellierung und die geomorphometrischen Analyse digitaler Höhenmodelle (Methoden) anhand Geographischer Informationssysteme (Werkzeuge). Damit handelt es sich um eine angewandte Fragestellung aus dem Bereich der Raumplanung, die sich an der Schnittstelle zwischen physischer und anthropogener Geographie befindet.

Die abzuleitenden hochwassergefährdeten Bereiche umfassen sowohl die innerhalb künstlicher Schutzbauwerke gelegenen Überschwemmungsgebiete, als auch die außerhalb befindlichen Auenbereiche, die ohne die Bauwerke überschwemmt sein würden. Das Ziel ihrer Abgrenzung besteht im Sinne des vorbeugenden Hochwasserschutzes in der Flächenvorsorge.

Nach einer Einführung in die Hochwasserproblematik und die mit dem Hochwasserschutz befaßten öffentlichen Planungsträger (Raumplanung und Wasserwirtschaft), wird der aktuelle Forschungsstand der Hochwassermodellierung diskutiert. Der theoretische Grundlagenteil schließt mit einer ausführlichen Diskussion der verwendeten Methoden.

Die Studie basiert auf drei Einzugsgebieten in NRW: Das der Lutter (Mittelgebirgsfluß), des Brandenbäumer / Geseker Baches und der Werse (Flachlandflüsse). Die Entwicklung des vereinfachten Verfahrens erfolgt am Eingangsdatensatz der Lutter, die beiden weiteren Untersuchungsgebiete dienen zur Optimierung und Evaluierung. Als Datenbasis stehen ein digitales Höhenmodell mit 10 m Raster, Abflußschätzungen, Bauwerkspositionen, Gewässerlinien und Evaluierungsgrundlagen zur Verfügung. Die Entwicklungsschritte des Verfahrens umfassen sowohl die Auswahl der als notwendig erachteten Parameter, als auch deren Ableitung und die Definition der Art und Weise, wie diese Parameter in das Verfahren eingehen. Darüber hinaus wird das Verfahren in die Anwendungssoftware MOHB (Modellierung hochwassergefährdeter Bereiche) umgesetzt. Nach einer qualitativen und nach Möglichkeit auch quantitativen Diskussion aller eingehenden Fehlerquellen erfolgt die Ergebnisbewertung:

Auf Basis des Vergleiches berechneter Wasserspiegellagen und der räumlichen Ausdehnung der modellierten hochwassergefährdeten Bereiche mit den entsprechenden Referenzdaten wird festgestellt, daß die Qualität der Ergebnisse im Rahmen der angestrebten Zielgenauigkeit als gut bewertet werden kann (UHLIG et al. 2001). Der Auftraggeber der vorliegenden Forschungsarbeit (MURL / LUA) übergab die Anwendung des vereinfachten Verfahrens ei-

nem wasserbaulichen Ingenieurbüro. Die Integration der Ergebnisse in die Gebietsentwicklungspläne wird Ende des Jahres 2001 abgeschlossen sein. Darüber hinaus kann das vereinfachte Verfahren Vorbildcharakter für andere Bundesländer bzw. Nachbarstaaten einnehmen.

Eine Weiterentwicklung der Anwendungssoftware MOHB kann laut LUA in naher Zukunft für eine ähnliche Fragestellung innerhalb des vorbeugenden Hochwasserschutzes eingesetzt werden: Im Sinne der Rückgewinnung von Retentionsraum (siehe Kapitel 2.2.1) sollen in NRW alle Bereiche abgegrenzt werden, die zur Zeit deichgeschützt sind, aber in Zukunft als Retentionsräume genutzt werden könnten. Diese Flächen werden durch die bestehenden Überschwemmungsgebiete nicht erfaßt (siehe Kapitel 2.2.2). Die Qualität der Modellierungsergebnisse kann durch folgende Weiterentwicklungen gesteigert werden:

- **Rauhigkeitsbeiwert:** Automatisierte Unterscheidung der Querprofile in steilere und flachere Profile bzw. Profilabschnitte, die jeweils mit unterschiedlichen Rauhigkeitsbeiwerten berechnet werden.
- **Bauwerke:** Unterscheidung von Wehren und Brücken bezüglich ihrer Rückstauhöhe, sowie deren Anpassung an die Charakteristik des Querprofiles (flach oder tief).
- **Digitales Höhenmodell:** Einsatz der Laserscanningrohdaten durch Generierung eines digitalen Höhenmodells mit einem 1 m Raster. Da diese Rohdaten vor allem in flachen Bereichen NRWs vorliegen, könnte die Anwendbarkeit des vereinfachten Verfahrens auf einen anderen Maßstab hin erweitert werden.

5 Literatur

- ARBEITSGEMEINSCHAFT DER VERMESSUNGSVERWALTUNGEN DER LÄNDER DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (AdV)(Hrsg.)(1989):** Amtliches Topographisches-Kartographisches Informationssystem (ATKIS). Das Vorhaben der Landesvermessungsverwaltungen zum Aufbau Digitaler Landschaftsmodelle und Digitaler Kartographischer Modelle. Bonn.
- BERZ, G. (2000):** Flood Disasters: Lessons from the Past - Worries for the Future. In: TOENSMANN, F. und M.KOCH (Hrsg.): River Flood Defence. Int. Symposium on River Flood Defence. Kassel Reports of Hydraulic Engineering. Vol. 1. No. 9. Kassel. S. F1 - F9.
- BEYENE, M., C.RUBIN, M.DÖRR (2000):** Flood Plain Mapping with Cellular Algorithms for One-dimensional Water Level Profile Models. In: TOENSMANN, F. und M.KOCH (Hrsg.): River Flood Defence. Int. Symposium on River Flood Defence. Kassel Reports of Hydraulic Engineering. Vol. 1. No. 9. Kassel. S. F107 - F120.
- BILL, R. und D.FRITSCH (1994):** Grundlagen der Geo-Informationssysteme, Bd. 1. Heidelberg.
- BLANK, M., S.VON KEITZ, N.NIEHOFF (1999):** Gewässerstrukturgüte-Management – Herausforderung für die Wasserwirtschaft im 21. Jahrhundert ? In: Wasser & Boden. Berlin. H. 4. S. 7-13.
- BÖHM, H.R. (2000):** Spatial Planning Instruments to improve River Flood Prevention and Awareness. In: TOENSMANN, F. und M.KOCH (Hrsg.): River Flood Defence. Int. Symposium on River Flood Defence. Kassel Reports of Hydraulic Engineering. Vol. 2. No. 9. Kassel. S. H105 - H116.
- BORMANN, H. (1999):** Hochskalieren prozeßorientierter Wassertransportmodelle – Methoden und Grenzen. Dissertation Universität Bonn, Bonn.
- BRETSCHNEIDER, H. und A.SCHULZ (1985):** Anwendung von Fließformeln bei naturnahem Gewässerausbau. In: DVWK Schriften. Bd. 72. Hamburg.
- BRETSCHNEIDER, H., K.LECHER, M.SCHMIDT (Hrsg.)(1993):** Taschenbuch der Wasserwirtschaft. Hamburg.
- BÜSCHENFELD, H. (1968):** Das östliche Münsterland. Landeskundlicher Überblick. In: LANDESUMWELTAMT (LUA)(Hrsg.)(1968): Topographischer Atlas Nordrhein-Westfalen. Bonn. S. 240 - 243.
- BUNDESAMT FÜR BAUWESEN UND RAUMORDNUNG (1998)(Hrsg.):** Leitfibel vorbeugender Hochwasserschutz. Modellvorhaben zum vorbeugenden Hochwasserschutz Rhein-Maas im Rahmen der transnationalen Zusammenarbeit in der Raumordnung (INTERREG IIC). In: Werkstatt: Praxis. Nr. 6. Bonn.
- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (BfG)(Hrsg.)(1997):** Hochwasser. Gedanken über Ursachen und Vorsorge aus hydrologischer Sicht. Koblenz.
- COCH, N.K. (1995):** Geohazards. Natural and Human. New Jersey.

- CONSUEGRA, D., F.JOERIN, F.VITALINI (1995):** Flood Delineation and Impact Assessment in Agricultural Land using GIS Technology. In: Carrara, A. und F.Guzzetti (Hrsg.): Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards. Dordrecht. S. 177-198.
- CORREIA, F.N., F.C.REGO, M.DA GRACA SARAIVA, I.RAMOS (1998):** Coupling GIS with Hydrologic and Hydraulic Flood Modelling. In: Water Resources Management. Vol. 12. S. 229-249.
- CORREIA, F.N., M.DA GRACA SARAIVA, F.N.DA SILVA, I.RAMOS (1999a):** Floodplain Management in Urban Developing Areas. Part I. Urban Growth Scenarios and Land-Use Controls. In: Water Resources Management. Vol. 13. S. 1-21.
- CORREIA, F.N., M.DA GRACA SARAIVA, F.N.DA SILVA, I.RAMOS (1999b):** Floodplain Management in Urban Developing Areas. Part II. GIS-Based Flood Analysis and Urban Growth Modelling. In: Water Resources Management. Vol. 13. S. 23-37.
- DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU E.V. (DVWK)(Hrsg.)(1989):** Wahl des Bemessungshochwassers. Entscheidungswege zur Festlegung des Schutz- und Sicherheitsgrades. In: DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft. Bd. 209. Hamburg.
- DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU E.V. (DVWK)(Hrsg.)(1990):** Hydraulische Methoden zur Erfassung von Rauheiten. In: DVWK Schriften. Bd. 92. Hamburg.
- DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU E.V. (DVWK)(Hrsg.)(1991):** Hydraulische Berechnung von Fließgewässern. In: DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft. Bd. 220. Hamburg.
- DIKAU, R., K. UHLIG, K. BELITZ (1999a):** Modellierung Hochwassergefährdeter Bereiche. Zwischenbericht I – Januar 1999. Bonn. (unveröffentlicht)
- DIKAU, R., K. UHLIG, K. BELITZ (1999b):** Modellierung Hochwassergefährdeter Bereiche. Zwischenbericht II – Mai 1999. Bonn. (unveröffentlicht)
- DIKAU, R., K. UHLIG, K. BELITZ, C. MICHELS (1999c):** Modellierung Hochwassergefährdeter Bereiche. Zwischenbericht III – Dezember 1999. Bonn. (unveröffentlicht)
- DIKAU, R., K.HENNRICH, J.SCHMIDT (1999d):** Untersuchungen zur computergestützten Regionalisierung von geomorphometrischen Reliefmerkmalen und ihre Parametrisierung in Niederschlag-Abfluß-Modellen in Einzugsgebieten unterschiedlicher Größenordnung. In: Kleeberg, H.-B., W.Mausser, G.Peschke, U.Streit (Hrsg.): Hydrologie und Regionalisierung. Ergebnisse eines Schwerpunktprogrammes (1992-1998). Weinheim.
- DIKAU, R. und K.FRIEDRICH (2000):** Digitale Reliefdaten und Reliefmodellierung. In: Zepp, H. und M.J.Müller (Hrsg.): Landschaftsökologische Erfassungsstandards. Ein Methodenbuch. Flensburg. In: Forschungen zur Deutschen Landeskunde. Bd. 244. S. 50 – 74.
- DIKAU, R., K. UHLIG, K. BELITZ, C. MICHELS (2000):** Modellierung Hochwassergefährdeter Bereiche. Endbericht – September 2000. Bonn. (unveröffentlicht)

- DOMBROWSKY, W.R. und C.BRAUNER (1996):** Defizite der Katastrophenvorbeugung in Industriegesellschaften am Beispiel Deutschlands. Untersuchungen und Empfehlungen zu methodischen und inhaltlichen Grundsatzfragen (Kurzfassung). In: Deutsche IDNDR-Reihe (International Decade for Natural Disaster Reduction). Bonn.
- DOOGE, J. und P.SAMUELS (1999):** Overview and conclusions of the second RIBAMOD Workshop. In: European Commission (Hrsg.): Hydrological and hydrogeological risks. Ribamod. River basin modelling, management and flood mitigation, concerted action. The impact of climate change on flooding and sustainable river management.
- DYCK, S. und G.PESCHKE (1995):** Grundlagen der Hydrologie. Berlin.
- EGLI, T. (1996):** Hochwasserschutz und Raumplanung. Schutz vor Naturgefahren mit Instrumenten der Raumplanung - dargestellt am Beispiel von Hochwasser und Murgängen. In: ORL-Berichte (Publikationsreihe des Instituts für Orts-, Regional- und Landesplanung, ETH Zürich), Bd. 100. Zürich.
- ESRI (ENVIRONMENTAL SYSTEM RESEARCH INSTITUTE)(1996):** ArcView®. Spatial Analyst. Advanced Spatial Analysis Using Raster and Vector Data. California.
- ESRI (ENVIRONMENTAL SYSTEM RESEARCH INSTITUTE)(1997):** Getting to Know ArcView® GIS the geographic information system (GIS) for everyone™. California.
- FAISAL, I.M., M.R. KABIR, A. NISHAT (1999):** Non-structural flood mitigation measures for Dhaka City. In: Urban Water. Vol. 1. S. 145-153.
- FALKENMARK, M. (1997):** Society's interaction with the water cycle: a conceptual framework for a more holistic approach. In: Hydrological Sciences, Journal des Sciences Hydrologique. S. 451 - 466.
- FEIGE, W. (1968a):** Vom Sauerland zu den Beckumer Bergen. Landeskundlicher Überblick. In: LANDESUMWELTAMT (LUA)(Hrsg.)(1968): Topographischer Atlas Nordrhein-Westfalen. Bonn. S. 52 - 55.
- FEIGE, W. (1968b):** Von der Lippeniederung zum Haarstrang. In: LANDESUMWELTAMT (LUA)(Hrsg.)(1968): Topographischer Atlas Nordrhein-Westfalen. Bonn. S. 72 - 73.
- FINK, P. (1999):** Ausweisung von Überflutungsflächen in Österreich am Beispiel der Steiermark. In: Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft (Hrsg.): Extreme Naturereignisse und Wasserwirtschaft – Niederschlag und Abfluß. Internationales Symposium. Informationsberichte. München. H. 5. S. 175 – 184.
- FINKE, L., G.REINKOBER, S.SIEDENTOP, B.STROTKEPER (1993):** Berücksichtigung ökologischer Belange in der Regionalplanung in der Bundesrepublik Deutschland. In: Beiträge / Akademie für Raumforschung und Landesplanung. Bd. 123. Hannover.
- FISCHER, K. (1999):** Regionalplanung und überschwemmungsgefährdete Bereiche. In: Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft (Hrsg.): Extreme Naturereignisse und Wasserwirtschaft – Niederschlag und Abfluß. Internationales Symposium. Informationsberichte. München. H. 5. S. 155 – 174.
- FÖCKELER, A. und H.KUHN (1990):** Aufbau und Anwendung von Digitalen Geländemodellen in Nordrhein-Westfalen. In: GIS 4/1990. S. 22 – 27.

- GALLOWAY, G.E. (1999):** Towards sustainable management of river basins: challenges for the 21st century. In: Balabanis, P., A.Bronstert, R.Casale, P.Samuels (Hrsg.): Ribamod – River basin modelling, management and flood mitigation – Concerted action. Belgien. S. 235 – 250.
- GEIPEL, R. (1992):** Naturrisiken: Katastrophenbewältigung im sozialen Umfeld. Darmstadt.
- GÖTTLE, A., K.DEINDL, F.ROTHMEIER (1999):** Ausweisung von Überschwemmungsgebieten in Bayern. In: Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft (Hrsg.): Extreme Naturereignisse und Wasserwirtschaft – Niederschlag und Abfluß. Internationales Symposium. Informationsberichte. München. H. 5. S. 185 –192.
- GRÄFF, H.J. (2000):** Spatial Planning and Precautionary Measures in Vulnerable Areas, espacially behind Defence Works, "Hessisches Ried" Case Study. In: TOENSMANN, F. und M.KOCH (Hrsg.): River Flood Defence. Int. Symposium on River Flood Defence. Kassel Reports of Hydraulic Engineering. Vol. 2. No. 9. Kassel. S. H27 - H40.
- GREIVING, S. (1999):** Das Verhältnis zur räumlichen Gesamtplanung und Wasserwirtschaftlichen Fachplanung – dargestellt am Beispiel des Hochwasserschutzes. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. H 2. Koblenz. S. 75 - 82.
- GREVE, K. (1996):** Geo-Informationssystem oder Geographisches Informationssystem? Die Bedeutung von GIS in der Geographie oder "Was bedeutet das G in GIS?", in: Karlsruher Geoinformatik Report 10 (1996), H. 1. S. 18 - 21.
- GÜNDRA, H., A.ASSMANN, S.JÄGER (2000):** Geomorphometrische Parameter mit hydrologischer Relevanz und die Qualität der zugrunde liegenden Digitalen Höhenmodelle. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. H 3. Koblenz. S. 114 - 121.
- GÜNTSCHL, E. (1970):** Hochwasserschutz und Raumordnung. In: Schriftenreihe der Österreichischen Gesellschaft für Raumforschung und Raumplanung, H. 11. Wien.
- HAACK, B. (1997):** Qualität und Aussage hochwasserrelevanter Daten in Geoinformationssystemen. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Bonn (in Auszügen: <http://www.geo.uni-bonn.de/members/haack/diplomarbeit.html>).
- HEINRICH, B. und F.J.KERN (2000):** Hydrologische Informationssysteme für Umweltverwaltung, Wasserwirtschaft und Forschung auf Bundes- und Länderebene. In: Wasser & Boden. Berlin. H. 3. S. 4 – 8.
- HERTER, M., M.HÖCK, M. JACOBI (1999):** Avenue™ Programmierung in ArcView® GIS. Riemerling.
- HYDROTEC (Hrsg.)(1997a):** Programmsystem JABRON. Berechnung von Wasserspiegellagen. Aachen.
- HYDROTEC (Hrsg.)(1997b):** Anforderungen an die Datengrundlage für 1D Wasserspiegelrechnungen. Arbeitshilfe. Materialien zum Wasserspiegellinienprogramm JABRON. Version 1.0. Aachen.
- IDNDR, DEUTSCHES IDNDR-KOMITEE FÜR KATASTROPHENVORBEUGUNG (Hrsg.)(1996):** Katastrophenvorsorge. Ein Portrait des Deutschen IDNDR-Komitees für Katastrophenvorbeugung e.V. Bonn.
- IRMA (INTERREG RHEIN-MAAS AKTIVITÄTEN) JOINT SECRETARIAT (Hrsg.)(2000):** Fact sheet 1 – 14.

- JACOBITZ, K. (1994):** Wassergüte und Raumplanung – Einführung. In: Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hrsg.): Wassergütewirtschaft und Raumplanung. Forschungs- und Sitzungsberichte der Akademie für Raumforschung und Landesplanung. Bd. 192. Hannover.
- JÜRGING, P. (1996):** Wasserwirtschaftliche und ökologische Folgen der Nutzung von Gewässerauen. In: Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung, H. 37. Berlin. S. 154 - 158.
- KATZENBEISSER, R. und G.LÖFFLER (1996):** DHM-Erfassung mit Laserscannern. In: AVN 10/1996. S. 367 – 379.
- KIEMSTEDT, H., T.HORLITZ, S.OTT (1993):** Umsetzung von Zielen des Naturschutzes auf regionaler Ebene. In: Beiträge / Akademie für Raumforschung und Landesplanung. Bd. 123. Hannover.
- KILIAN, J. und M.ENGLICH (1994):** Topographische Geländeerfassung mit flächenhaft abtastenden Lasersystemen. In: Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung 6/1994. Stuttgart. S. 207 - 214.
- KLEEBERG, H.B., NEUBIBERG, K.H.ROTHER (1996):** Hochwasserflächenmanagement in Flußeinzugsgebieten. In: Wasser & Boden, H. 2. Berlin. S. 24 – 32.
- KNIGHTON, D. (1984):** Fluvial Forms and Processes. London.
- KONOLD, W (1996):** Gewässerauen - Bedeutung und Funktion. In: Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung, H. 37. Berlin. S. 146 - 153.
- LAMAN, J. (2000):** Supporting Flood Prevention along the Rhine and the Meuse. The IRMA-Programme: Preliminary Results and Recommendations. In: TOENSMANN, F. und M.KOCH (Hrsg.): River Flood Defence. Int. Symposium on River Flood Defence. Kassel Reports of Hydraulic Engineering. Vol. 2. No. 9. Kassel. S. H1 - H8.
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA)(Hrsg.)(1995):** Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz. Stuttgart.
- LANDESAMT FÜR UMWELT UND NATUR MECKLENBURG-VORPOMMERN (Hrsg.)(1995):** Ökologisch begründetes Sanierungskonzept für das Gewässereinzugsgebiet der Warnow (Mecklenburg-Vorpommern). In: Schriftenreihe des Landesamt für Umwelt und Natur Mecklenburg-Vorpommern, H. 2. Gülzow.
- LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN (LUA)(Hrsg.)(1998):** Gewässerstrukturgüte in Nordrhein-Westfalen. Kartieranleitung. In: Merkblätter. Nr. 14. Essen.
- LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN (LUA)(Hrsg.)(1999a):** Referenzgewässer der Fließgewässertypen Nordrhein-Westfalens. Teil 1: Kleine und mittelgroße Fließgewässer. In: Merkblätter. Nr. 16. Essen.
- LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN (LUA)(Hrsg.)(1999b):** Leitbilder für kleine und mittelgroße Fließgewässer in Nordrhein-Westfalen. In: Merkblätter. Nr. 17. Essen.
- LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN (LUA)(Hrsg.)(2000):** Erfassung hochwassergefährdeter Bereiche in Nordrhein-Westfalen. Informationsblatt.
- LEHNER, B., J.ALCAMO, P.DÖLL, F.KASPAR (2000):** Towards a global perspective on the risk of river floods. In: TOENSMANN, F. und M.KOCH (Hrsg.): River Flood De-

- fence. Int. Symposium on River Flood Defence. Kassel Reports of Hydraulic Engineering. Vol. 1. No. 9. Kassel. S. D23 – D32.
- MAHLAU, A., V.DIEGMANN, C.PETER (2000):** Floodfill – Katastrophenmanagement und Risikoanalyse im Hochwasserschutz. In: STROBL, BLASCHKE, GRIESEBNER (Hrsg.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT-Symposium. Salzburg 2000. Heidelberg. S. 315-320.
- MINISTER FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (Hrsg.)(1989):** Klima-Atlas von Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf.
- MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, DOMÄNEN UND FORSTEN (Hrsg.)(1906):** Verfügung betreffend das Gesetz zur Verhütung von Hochwassergefahren vom 16. August. In: Ministerialblatt der Preußischen Verwaltung für Landwirtschaft, Domänen und Forsten. Berlin. S. 65-74.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (Hrsg.)(2000):** Potenzielle Hochwasserschäden am Rhein in NRW. Aachen.
- MORRIS, D.G. und R.W.FLAVIN (1996):** Floodrisk map for England and Wales. In: Institute of Hydrology, Report No. 130. Wallingford.
- MÜNCHENER RÜCKVERICHERUNGS-GESELLSCHAFT (Hrsg.)(1997a):** Überschwemmungen und Versicherung. München.
- MÜNCHENER RÜCKVERICHERUNGS-GESELLSCHAFT (Hrsg.)(1997b):** Topics. Jahresrückblick Naturkatastrophen 1996. München.
- NICKEL, A. (1996):** Digitale Geländemodelle zur Bestimmung von Überschwemmungsflächen. In: Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung, H. 37. Berlin. S. 128-133.
- OBERLE, P., S.THEOBALD, O.EVDAKOV, F.NESTMANN (2000):** GIS-supported flood modelling by the example of the River Neckar. In: TOENSMANN, F. und M.KOCH (Hrsg.): River Flood Defence. Int. Symposium on River Flood Defence. Kassel Reports of Hydraulic Engineering. Vol. 2. No. 9. Kassel. S. G145 - G156.
- OFFICE OF THE UNITED NATIONS DISASTER RELIEF CO-ORDINATOR (UNDRO)(Hrsg.)(1991):** Mitigating Natural Disasters. Phenomena, Effects and Options. A Manual for Policy Makers and Planners. New York.
- PASCHE, E. (1996):** Hochwasseranalysen mit Hilfe des DHM. In: Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz (Hrsg.): Das Geoinformationssystem ATKIS und seine Nutzung in Wirtschaft und Verwaltung. Koblenz. S. 143-263.
- PATT, H., P.JÜRGING, W.KRAUS (Hrsg.)(1998):** Naturnaher Wasserbau. Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern. Berlin.
- PETRASCHECK, A.W. (1996):** Grundsätze zur Berücksichtigung der Wassergefahren in der Raumplanung in der Schweiz. In: Interpraevent - Garmisch-Partenkirchen, Bd. 3. S. 59 - 70.

- REFSGAARD, J.C. (1996):** Terminology, Modelling Protocol and Classification of Hydrological Model Codes. In: ABBOTT, B und J.C.REFSGAARD(Hrsg): Distributed Hydrological Modelling. Water Science and Technology Library. Vol. 22. Dordrecht. S. 17 – 39.
- REFSGAARD, J.C. und B.STORM (1996):** Construction, Calibration and Validation of Hydrological Models. In: ABBOTT, B und J.C.REFSGAARD(Hrsg): Distributed Hydrological Modelling. Water Science and Technology Library. Vol. 22. Dordrecht. S. 41 – 54.
- RICHTER, K. (1994):** Ziele der Raumordnung und Landesplanung für die Wasserwirtschaft in Nordrhein-Westfalen. In: Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hrsg.): Wassergütwirtschaft und Raumplanung. Forschungs- und Sitzungsberichte der Akademie für Raumforschung und Landesplanung. Bd. 192. Hannover.
- PLATE, E.J. (1996):** Hochwasser - eine Einführung. In: Geowissenschaften, H. 12. Berlin. S. 509-516.
- PLATE, E.J. (1999):** Risiko und Hochwasserwahrscheinlichkeit. In: Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft (Hrsg.): Extreme Naturereignisse und Wasserwirtschaft – Niederschlag und Abfluß. Internationales Symposium. Informationsberichte. München. H. 5. S. 115 - 126.
- PLATE, E.J. (2000):** Flood management as part of sustainable development. In: TOENSMANN, F. und M.KOCH (Hrsg.): River Flood Defence. Int. Symposium on River Flood Defence. Kassel Reports of Hydraulic Engineering. Vol. 1. No. 9. Kassel. S. F11 - F24.
- RÖSGEN, M. (2000):** Bestimmung von Hochwasserrisikoklassen zur Verwendung in der Versicherungswirtschaft auf Basis eines digitalen Höhenmodells am Beispiel Bonn. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Bonn.
- RÖTTCHER, K. und F.TÖNSMANN (1999):** Kosten-Nutzen-Untersuchung für Hochwasserschutzmaßnahmen am Beispiel der Losse (Nordhessen). In: Wasser & Boden. Berlin. H. 3. S. 34-39.
- ROSGEN, D. (1996):** Applied River Morphology. Colorado.
- SACHER, H. und C.NAUJOKS (1998):** Berechnung von Überschwemmungsgebietsgrenzen mittels modernster Modelltechnik. In: Wasser & Boden. Berlin. S. 5-10.
- SAMUELS, P.G. (2000):** An Overview of Flood Estimation and Flood Prevention. In: TOENSMANN, F. und M.KOCH (Hrsg.): River Flood Defence. Int. Symposium on River Flood Defence. Kassel Reports of Hydraulic Engineering. Vol. 2. No. 9. Kassel. S. G1 - G12.
- SCHEID, H. (1990):** Die Mathematik I. In: Meyers Lexikonredaktion (Hrsg.): Schülerduden. Mannheim.
- SCHMIDT, K.H. (1984):** Der Fluß und sein Einzugsgebiet. Hydrogeographische Forschungspraxis. In: Wissenschaftliche Paperbacks Geographie. Wiesbaden.
- SCHMIDT, J., B.MERZ, R.DIKAU (1998):** Morphological structure and hydrological process modelling. Zeitschrift für Geomorphologie, N.F., Suppl.-Bd. 112. S. 55-66.

- SCHMIDT, J. und R.DIKAU (1999):** Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models - Semantics, methods, future needs. In: Dikau, R. und H.Sauer (Hrsg.): GIS for Earth Surface Systems. Analysis and Modelling of the Natural Environment. Berlin. S. 153-174.
- SCHNEIDER, P. (1968):** Beckum und die Beckumer Berge. In: LANDESUMWELTAMT (LUA)(Hrsg.)(1968): Topographischer Atlas Nordrhein-Westfalen. Bonn. S. 74 - 75.
- SCHRÖDER, W., G.EULER, F.K.SCHNEIDER, D.KNAUF (1994):** Grundlagen des Wasserbaus. Düsseldorf.
- SCHÜTTLER, A. (1968a):** Das Land Nordrhein-Westfalen. In: LANDESUMWELTAMT (LUA)(Hrsg.)(1968): Topographischer Atlas Nordrhein-Westfalen. Bonn. S. 10 - 17.
- SCHÜTTLER, A. (1968b):** Ravensburger Land – Mindener Land – Lipper Land. Landeskundlicher Überblick. In: LANDESUMWELTAMT (LUA)(Hrsg.)(1968): Topographischer Atlas Nordrhein-Westfalen. Bonn. S. 274 - 277.
- SCHÜTTLER, A. (1968c):** Bielefeld und Umgebung. In: LANDESUMWELTAMT (LUA)(Hrsg.)(1968): Topographischer Atlas Nordrhein-Westfalen. Bonn. S. 280 - 281.
- SHIDAWARA, M. (1999):** Flood hazard map distribution. In: Urban Water. Vol. 1. S. 125 - 129.
- SÖNNICHSEN, D. (2000):** Statutory flood plains for flood prevention. In: TOENSMANN, F. und M.KOCH (Hrsg.): River Flood Defence. Int. Symposium on River Flood Defence. Kassel Reports of Hydraulic Engineering. Vol. 1. No. 9. Kassel. S. F153 - 162.
- SOMMERHÄUSER, M. und T.TIMM (1999):** Limnologische Leitbilder zur regionalen Gewässertypologie. In: ZUMBROICH, T.,MÜLLER, A. und FRIEDRICH, G. (Hrsg.)(1999): Strukturgüte von Fließgewässern. Grundlagen und Kartierung. Berlin. S. 73 – 94.
- TUCCI, C.E.M. und A.O.N.VILLANUEVA (1999):** Flood control measures in União da Vitoria and Porto União: structural vs. non-structural measures. In: Urban Water. Vol. 1. S. 177-182.
- UHLIG, K. (1998):** Abgrenzung von Überschwemmungsbereichen unter Anwendung Geographischer Informationssysteme. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Bonn.
- UHLIG, K. (2000):** Abgrenzung hochwassergefährdeter Bereiche unter Anwendung Geographischer Informationssysteme. In: Wasser & Boden. Berlin. H. 4. S. 31-36.
- UHLIG, K., K.BELITZ, R.DIKAU (2001):** Entwicklung eines vereinfachten Verfahrens zur Abgrenzung hochwassergefährdeter Bereiche kleiner Fließgewässer Nordrhein-Westfalens. In: Wasser & Boden. Berlin. (in Vorbereitung)
- UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.)(1998):** Anforderungen des vorsorgenden Hochwasserschutzes an Raumordnung, Landes-/ Regionalplanung, Stadtplanung und die Umweltafachplanungen – Empfehlungen für die Weiterentwicklung – Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Forschungsbericht 296 16 140. Berlin.

WEICHSELGARTNER, J. (2000): Hochwasser als soziales Ereignis. Gesellschaftliche Faktoren einer Naturgefahr. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. H 3. Koblenz. S. 122 - 131.

WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN (Hrsg.)(1998): Welt im Wandel: Wege zu einem nachhaltigen Umgang mit Süßwasser. Jahresgutachten 1997. Berlin.

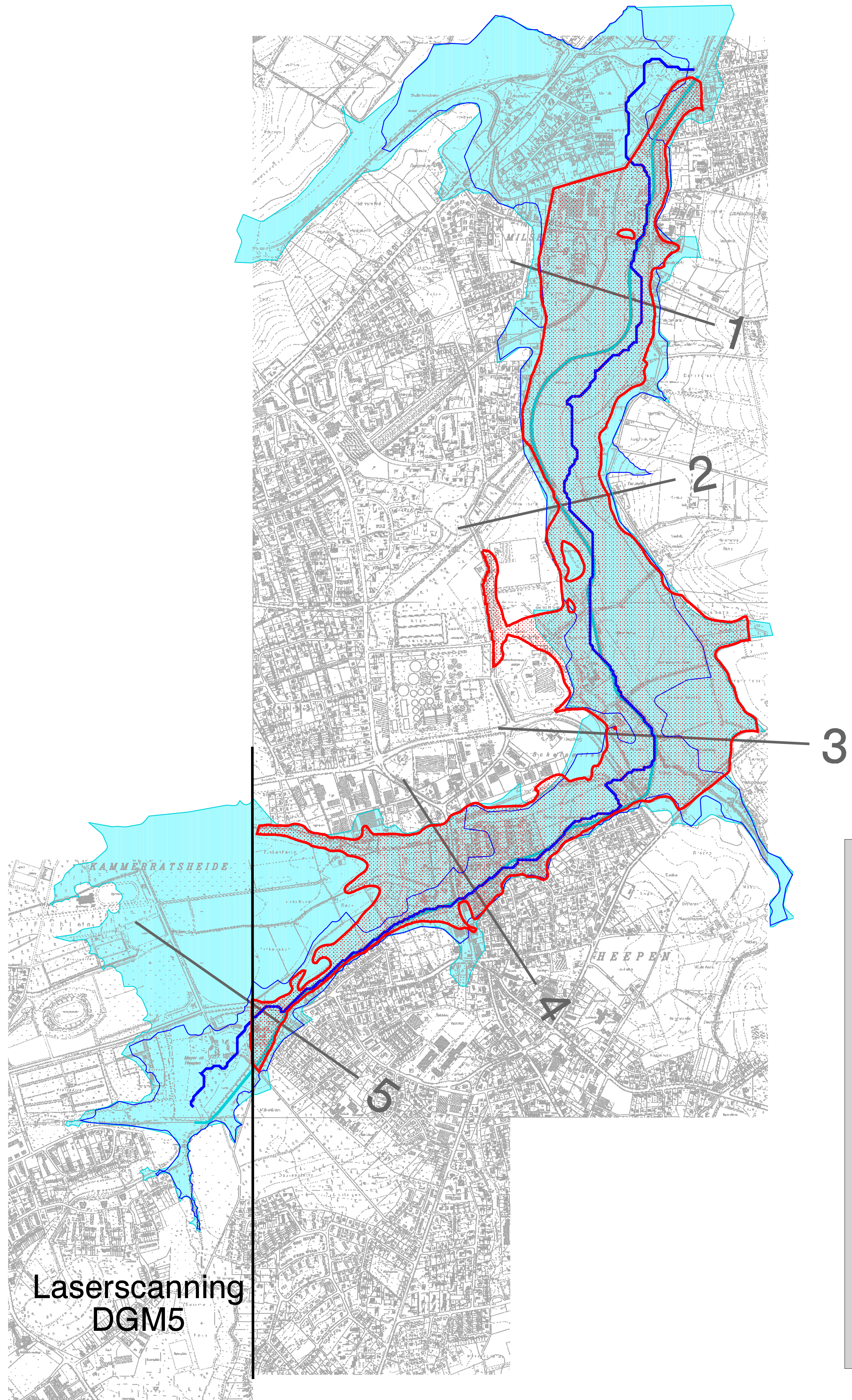
ZENEB (2001): <http://www.giub.uni-bonn.de/zeneb/frameset.htm>.

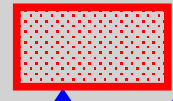


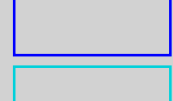

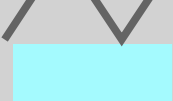

6 Anhang

Als Anhang liegen der Dissertation drei Karten bei. Sie stellen die mit dem vereinfachten Verfahren berechneten hochwassergefährdeten Bereiche im Maßstab 1 : 10.000 dar. Dieser Betrachtungsmaßstab ist zur qualitativen Beurteilung der Ergebnisse entscheidend, da als Bewertungskriterium die zugrundegelegten DGK 5 dienen, die im Maßstab 1 : 5.000 vorliegen. Die Grundkarten sind den hochwassergefährdeten Bereichen hinterlegt. Folgende drei Abbildungen befinden sich im Kartenanhang:

- Anlage I: Hochwassergefährdeter Bereich Lutter.
- Anlage II: Hochwassergefährdeter Bereich Brandenbäumer / Geseker Bach.
- Anlage III: Hochwassergefährdeter Bereich Werse.

Lutter Hochwassergefährdeter Bereich



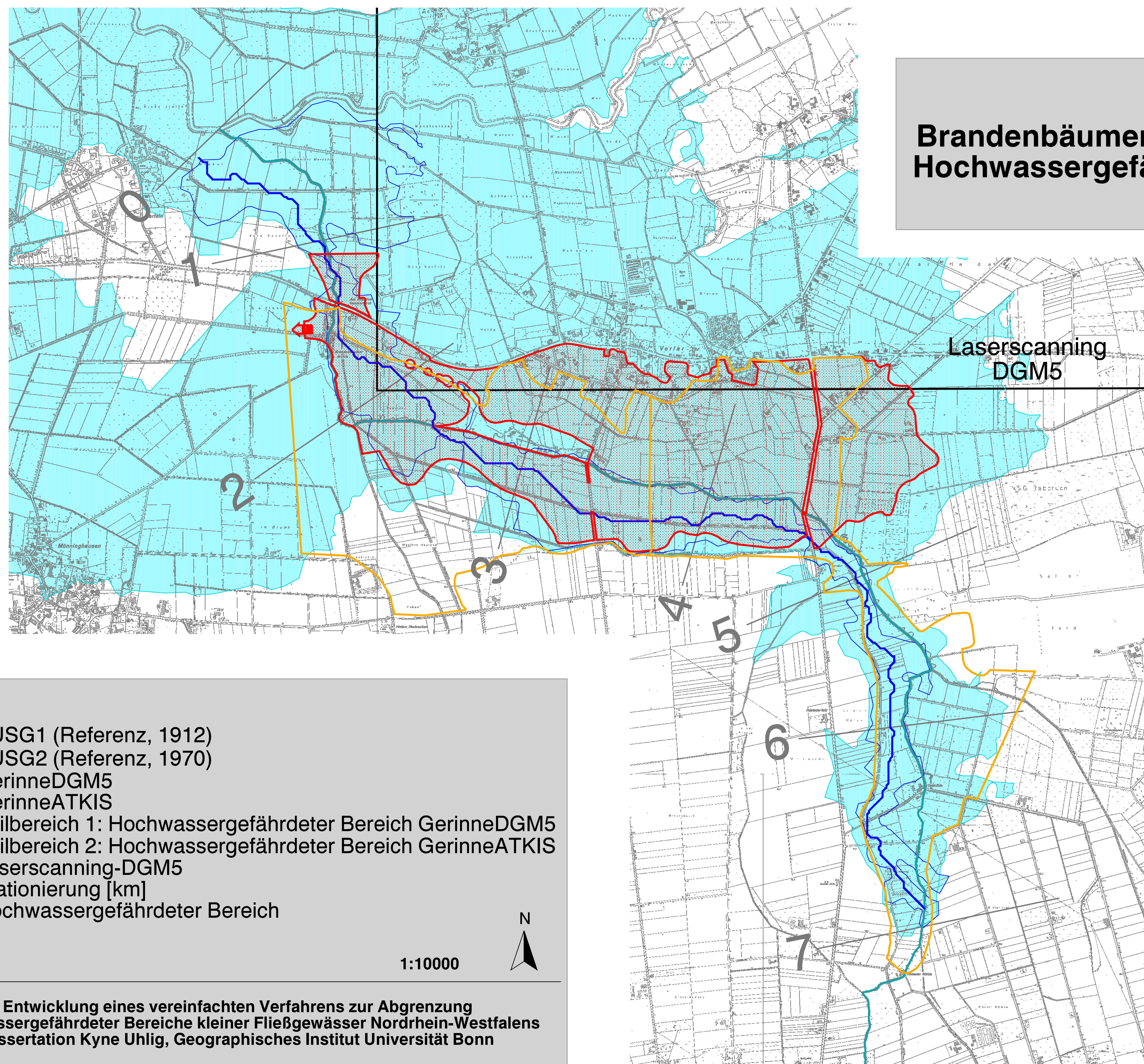
-  LÜSG1 (Referenz, 1995)
-  GerinneDGM5
-  GerinneATKIS
-  Teilbereich 1: Hochwassergefährdeter Bereich DGM5
-  Teilbereich 2: Hochwassergefährdeter Bereich ATKIS
-  Stationierung [km]
-  Hochwassergefährdeter Bereich

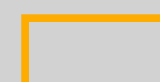



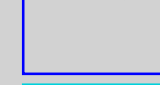




1:10000




Entwicklung eines vereinfachten Verfahrens zur Abgrenzung
hochwassergefährdeter Bereiche kleiner Fließgewässer Nordrhein-Westfalens
Dissertation Kyne Uhlig, Geographisches Institut Universität Bonn

**Brandenbäumer / Geseker Bach
Hochwassergefährdeter Bereich**

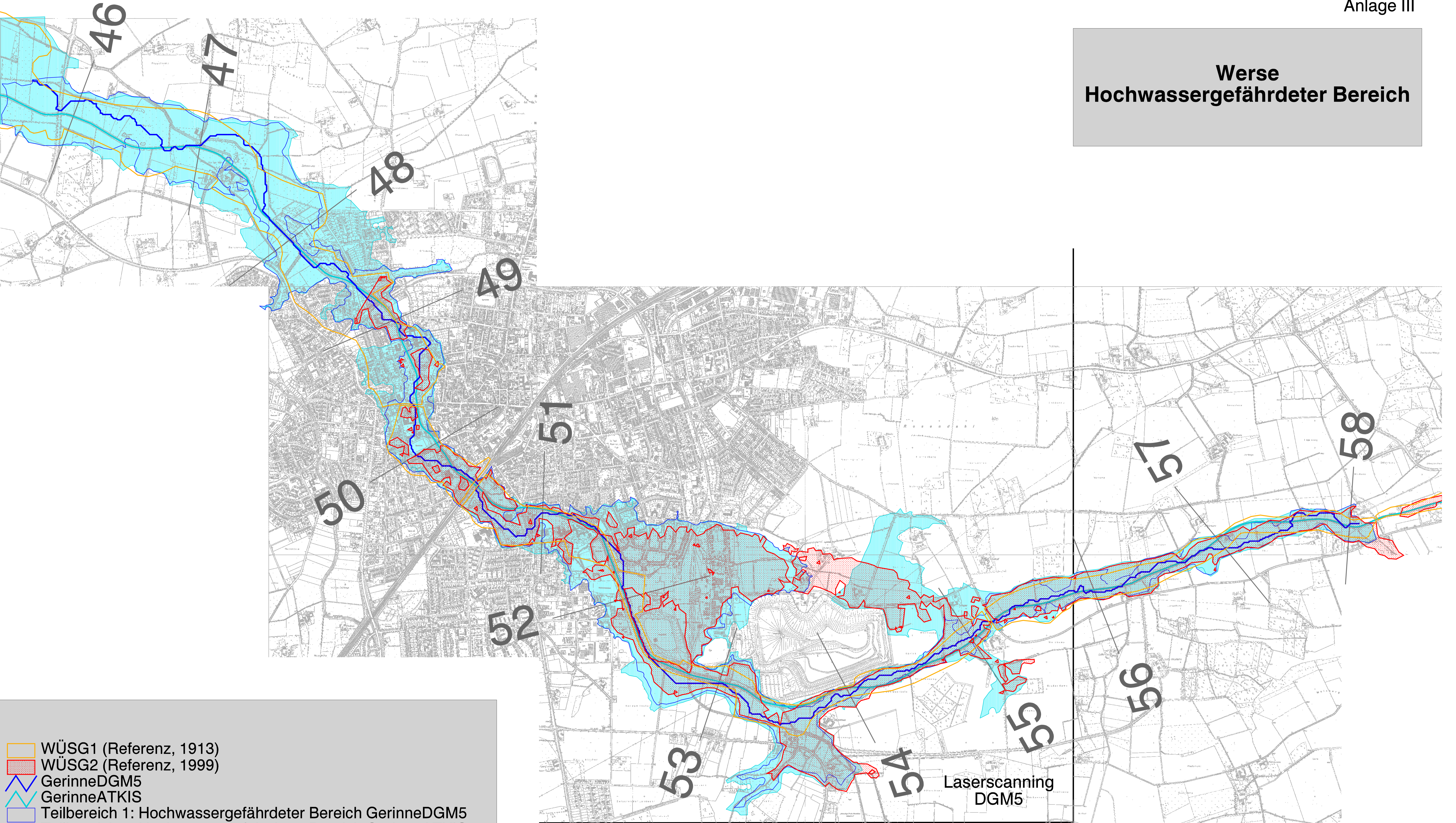


-  BÜSG1 (Referenz, 1912)
-  BÜSG2 (Referenz, 1970)
-  GerinneDGM5
-  GerinneATKIS
-  Teilbereich 1: Hochwassergefährdeter Bereich GerinneDGM5
-  Teilbereich 2: Hochwassergefährdeter Bereich GerinneATKIS
-  Laserscanning-DGM5
-  Stationierung [km]
-  Hochwassergefährdeter Bereich

1:10000 

**Entwicklung eines vereinfachten Verfahrens zur Abgrenzung
hochwassergefährdeter Bereiche kleiner Fließgewässer Nordrhein-Westfalens
Dissertation Kyne Uhlig, Geographisches Institut Universität Bonn**

**Werse
Hochwassergefährdeter Bereich**



- WÜSG1 (Referenz, 1913)
- WÜSG2 (Referenz, 1999)
- GerinneDGM5
- GerinneATKIS
- Teilbereich 1: Hochwassergefährdeter Bereich GerinneDGM5
- Teilbereich 2: Hochwassergefährdeter Bereich GerinneATKIS
- Stationierung [km]
- Hochwassergefährdeter Bereich

Hinweis: Keine Referenzdaten WÜSG 2 unterhalb Stationierung 48,8 km

1:10000



Entwicklung eines vereinfachten Verfahrens zur Abgrenzung hochwassergefährdeter Bereiche kleiner Fließgewässer Nordrhein-Westfalens
Dissertation Kyne Uhlig, Geographisches Institut Universität Bonn