

# Zwischenbericht

## 2D-Modellierung der unteren Mittelelbe von Wittenberge bis Geesthacht – Pilotmodelle Dömitz bis Hitzacker

Dr.-Ing. M. Promny  
Dipl.-Ing. M. Hammer  
Dipl.-Met. N. Busch

### Kooperationspartner:

- Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein
- Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Mecklenburg-Vorpommern
- Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz

BfG-SAP-Nr.: M39610204029

Anzahl der Seiten: 105

Koblenz, den 25.07.2013 (überarbeitete und aktualisierte Version)





# Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis.....	4
Abbildungsverzeichnis.....	4
Zusammenfassung.....	7
1. Veranlassung.....	9
2. Modellaufbau.....	12
2.1 Rechengitter.....	12
2.1.1 Gitteraufbau.....	12
2.1.2 Gitterweite.....	14
2.1.3 Orthogonalität.....	17
2.1.4 Seitenverhältnis.....	19
2.1.5 Größenverhältnis.....	21
2.2 Modellhöhen.....	22
2.2.1 Ableitung der Höhen aus einem TIN.....	23
2.2.2 Berücksichtigung der Buhnen.....	23
2.2.3 Berücksichtigung von steilem Gefälle.....	24
2.2.4 Berücksichtigung der Deiche.....	24
2.2.5 Umgang mit Deich-Schutz niveaus unter $HQ_{100}$ .....	25
2.3 Vorlandrauheiten.....	27
2.4 Rauheiten im Hauptgerinne.....	31
2.5 Kalibrierung.....	32
3. Validierung.....	41
3.1 Validierung der Wasserspiegellagen.....	41
3.2 Validierung der Fließgeschwindigkeiten.....	44
3.3 Fazit aus Kalibrierung und Validierung hinsichtlich der Modellauswahl.....	48
4. Durchführung beispielhafter Lastfallberechnungen.....	50
4.1 Wasserstand und Strömungsvektoren bei $HQ_{100}$ .....	50
4.2 Abschätzung der Rauheitsänderung zu „grüner Wiese“.....	51
4.3 Berücksichtigung von Maßnahmenvarianten der Bundesländer.....	53
4.3.1 Vorlandabtragungen und Flutmulden in Mecklenburg-Vorpommern.....	53
4.3.2 Maßnahmen in Niedersachsen.....	59
4.3.3 Vegetationsbezogene Maßnahmen.....	63
5. Weiteres Vorgehen.....	71
5.1 Vorgehen bezüglich der Rechengitterauflösung.....	71
6. Unsicherheiten und Fehlerquellen.....	72
6.1 Unsicherheiten der Geometrie.....	72
6.2 Unsicherheiten der Rauheitszuweisung.....	73
6.3 Unsicherheiten der Randbedingungen.....	74
6.4 Unsicherheiten der Naturmessungen.....	74
7. Literatur.....	75
Anhang.....	76

Glossar .....	76
Ergebnisse der Kalibrierung.....	77
Ergebnisse der Validierung.....	88
Strömungsfelder für HQ <sub>100</sub> .....	99

### Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Übersetzung der ATKIS OBA-Codes in Rauheitsklassen.....	27
Tab. 2: Zuordnung der Rauheitswerte nach Nikuradse $k$ in [m] zu den Rauheitsklassen.....	28
Tab. 3: Zuordnung der Parameter zu den <i>trachytope</i> -Rauheitsklassen.....	30
Tab. 4: Kombinierte Rauheitsklassen.....	31
Tab. 5: Abschnitte konstanter Rauheiten im Hauptgerinne.....	33
Tab. 6: Randbedingungen der Kalibrierungsereignisse.....	33
Tab. 7: $A$ -Werte (siehe Gleichung [1]) der Abschnitte im 2. Kalibrierungsdurchgang für die fünf Gitterauflösungen.....	37
Tab. 8: Randbedingungen der Validierungsereignisse.....	41
Tab. 9: Abweichungen der Wasserspiegellagen [cm] der Validierung für beide Ereignisse und alle fünf Gitterauflösungen. Positive Werte bedeuten höhere simulierte Wasserspiegel als fixiert.....	42
Tab. 10: ermittelte Geländehöhen der Maßnahmenvarianten.....	55
Tab. 11: Randbedingung für den Nachweis der Wirkung von Maßnahmen im Pilotmodell.....	57
Tab. 12: Beschreibung der niedersächsischen Maßnahmenvarianten.....	59
Tab. 13: Liste der betrachteten Maßnahmen.....	68

### Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Übersichtskarte des Einzugsgebietes der unteren Mittel- elbe von Wittenberge bis Geesthacht und Lage der Pilotstrecke (rot). Quelle: verändert nach IKSE, 2005.....	10
Abb. 2: Entwurf der Gitterstruktur mittels Spline-Funktionen.....	13
Abb. 3: Beispiel eher der Hauptströmungsrichtung folgender Gitterstruktur.....	14
Abb. 4: Beispiel für von der Hauptströmungsrichtung abweichender Gitterstruktur.....	14
Abb. 5: Räumliche Verteilung der Zellgrößen für das Pilotmodell mit 15 m mittlerer Gitter- weite.....	15
Abb. 6: Räumliche Verteilung der Zellgrößen für das Pilotmodell mit 25 m mittlerer Gitter- weite.....	15
Abb. 7: Räumliche Verteilung der Zellgrößen für das Pilotmodell mit 40 m mittlerer Gitter- weite.....	16
Abb. 8: Häufigkeitsverteilung der Zellgrößen für das Pilotmodell mit 15 m mittlerer Gitter- weite.....	16
Abb. 9: Häufigkeitsverteilung der Zellgrößen für das Pilotmodell mit 25 m mittlerer Gitter- weite.....	17
Abb. 10: Häufigkeitsverteilung der Zellgrößen für das Pilotmodell mit 40 m mittlerer Gitter- weite.....	17
Abb. 11: Orthogonalität des Rechengitters mit einer mittleren Zellengröße von 15 m.....	18
Abb. 12: Orthogonalität des Rechengitters mit einer mittleren Zellengröße von 25 m.....	18
Abb. 13: Orthogonalität des Rechengitters mit einer mittleren Zellengröße von 40 m.....	19
Abb. 14: Seitenverhältnis des Rechengitters mit einer mittleren Zellengröße von 15 m.....	20

Abbildungsverzeichnis (Fortsetzung)

Abb. 15:	Seitenverhältnis des Rechengitters mit einer mittleren Zellengröße von 25 m .....	20
Abb. 16:	Seitenverhältnis des Rechengitters mit einer mittleren Zellengröße von 40 m .....	21
Abb. 17:	Größenverhältnis des Rechengitters in M-Richtung mit einer mittleren Zellengröße von 25 m.....	22
Abb. 18:	Größenverhältnis des Rechengitters in N-Richtung mit einer mittleren Zellengröße von 25 m.....	22
Abb. 19:	Entfernte Buhnen im TIN und Ersatz durch überströmte Wehre am Beispiel um Elbe-km 524.....	24
Abb. 20:	Beispiel für zusätzliche Wehrlinien entlang der Buhnen, Gewässerrandbereichen, Nebengerinnen und Deichen .....	25
Abb. 21:	FLYS-Längsschnitt einer HQ <sub>100</sub> Wasserspiegellage im Bereich Elbe-km 517 - 524.....	26
Abb. 22:	Strömungsvektoren eines HQ <sub>100</sub> sowie die Fließtiefe (Farbskala) bei Deichüberströmung (Deichlinie in Schwarz) .....	26
Abb. 23:	Nikuradse-Rauheit in Abhängigkeit von der Wassertiefe für beispielhafte Werte von A und B .....	32
Abb. 24:	Abschnitte für die Pilotmodellstrecke, unterteilt an Gefällewechsellinien für das Hochwasser 2011 (blau gestrichelte Linien) und Pegeln (rot gestrichelte Linien).....	33
Abb. 25:	Differenz von modellierter Wasserspiegellage minus Fixierung im ersten Kalibrierungsdurchgang für das HW2011.....	34
Abb. 26:	Differenz von modellierter Wasserspiegellage minus Fixierung im ersten Kalibrierungsdurchgang für das MW2005 .....	34
Abb. 27:	Modellierte Wasserspiegellage (blau) und Fixierung (rot) für das MW2005 im ersten Kalibrierungsdurchgang (kombiniert für MW2005 und HW2011 ermittelte Rauheiten) ....	35
Abb. 28:	Modellierte Wasserspiegellage (blau) und Fixierung (rot) für das HW2011 im ersten Kalibrierungsdurchgang (kombiniert für MW2005 und HW2011 ermittelte Rauheiten) ....	35
Abb. 29:	Gebiete, in denen die Buhnenfeldrauheit anhand der Orthofotos angepasst wurde (farblich hinterlegt) .....	36
Abb. 30:	Modellierte Wasserspiegellage (blau) und Fixierung (rot) für das MW2005 im zweiten Kalibrierungsdurchgang (gemittelte Rauheiten) auf dem 25 m-Gitter .....	37
Abb. 31:	Modellierte Wasserspiegellage (blau) und Fixierung (rot) für das HW2011 im zweiten Kalibrierungsdurchgang (gemittelte Rauheiten) auf dem 25 m-Gitter .....	38
Abb. 32:	Vergleich der Modellabweichungen für das MW2005 für alle fünf Gitterauflösungen.....	39
Abb. 33:	Vergleich der Modellabweichungen für das HW2011 für alle fünf Gitterauflösungen.....	39
Abb. 34:	mittlere Modellabweichung und 5 % bzw. 95 %-Quantil der Abweichungen für alle fünf Gitterauflösungen .....	40
Abb. 35:	Wasserspiegellagen aller Kalibrierungs- und Validierungsereignisse und Buhnenhöhen....	41
Abb. 36:	Vergleich der Modellabweichungen für das MW2007 für alle fünf Gitterauflösungen.....	43
Abb. 37:	Vergleich der Modellabweichungen für das HW2006 für alle fünf Gitterauflösungen.....	43
Abb. 38:	Lage der Querprofile der Geschwindigkeitsmessungen zur Validierung .....	44
Abb. 39:	Geschwindigkeiten im Längsschnitt in Natur und Modell beim HW2006.....	45
Abb. 40:	Geschwindigkeiten im Längsschnitt in Natur und Modell beim MW2007 .....	45
Abb. 41:	Geschwindigkeiten im Querprofil Elbe-km 510,8 beim HW2006 .....	46
Abb. 42:	Sohlenlagen im Querprofil Elbe-km 510,8 beim HW2006 .....	46
Abb. 43:	Geschwindigkeiten im Querprofil Elbe-km 506 beim MW2007 .....	47
Abb. 44:	Sohlenlagen im Querprofil Elbe-km 506 beim MW2007 .....	47
Abb. 45:	Geschwindigkeiten im Querprofil Elbe-km 515 beim MW2007 .....	48
Abb. 46:	Sohlenlagen im Querprofil Elbe-km 515 beim MW2007 .....	48
Abb. 47:	Strömungsgeschwindigkeiten bei HQ <sub>100</sub> , gerechnet auf dem 30-m Rechengitter .....	51
Abb. 48:	Berechnete Wasserspiegellagen für HQ <sub>100</sub> und Wasserspiegeldifferenzen Ist-Zustand minus „Grüne Wiese“.....	52
Abb. 49:	Wasserstandsdifferenzen zwischen den Zuständen mit Vorlandrauheiten im Ist-Zustand und „Grüne Wiese“ bei HQ <sub>100</sub> .....	53

Abb. 50:	Maßnahmenvarianten Vorlandabtragungen und Flutmulde zwischen Elbe-km 500 und 511 im rechten Elbvorland in Mecklenburg-Vorpommern .....	54
Abb. 51:	Abflusskurve am Pegel Neu Darchau und Wasserspiegellagen Elbe-km 500 - 520 .....	55
Abb. 52:	25-m-Rechennetz im Bereich der Maßnahme C (violetter Polygon) mit rot markiertem Schnitt (vgl. Abb. 53).....	56
Abb. 53:	Querschnitt durch die Flutmulde (vgl. Abb. 52).....	57
Abb. 54:	Simulierte Wassertiefen und Maßnahmenwirkung bei MW (links) und HQ <sub>10</sub> (rechts).....	57
Abb. 55:	Simulierte Wassertiefen bei HQ <sub>10</sub> ohne eingebaute Maßnahmen (links) bzw. mit den eingebauten Maßnahmen (rechts).....	58
Abb. 56:	Wassertiefendifferenz HQ <sub>10</sub> (inkl. Maßnahmen) - HQ <sub>10</sub> (Ist-Zustand) .....	58
Abb. 57:	Lage der niedersächsischen Maßnahmenvarianten in der Pilotstrecke.....	59
Abb. 58:	Maßnahmenumriss (violett) und Hilfspolygon (weiß) für die Altarmanbindung bei Wehningen .....	60
Abb. 59:	Altarmanbindung bei Wehningen im Modell: Ist-Zustand (links) und nach Anpassung der Modelltopografie (rechts).....	60
Abb. 60:	Schnitt A-A durch die Altarmanbindung bei Wehningen (vgl. Abb. 59) im Ist-Zustand (rot) und nach der Anpassung der Modelltopografie (ocker) .....	61
Abb. 61:	Wassertiefendifferenz im Altarmanschluss bei Wehningen bei MQ (Ist-Zustand minus umgesetzte Maßnahme).....	61
Abb. 62:	Wasserspiegellage bei MQ im Hauptgerinne vor Umsetzung des Altarmanschlusses bei Wehningen (braun) und danach (grün).....	62
Abb. 63:	Geschwindigkeitsdifferenz im Einströmbereich des Altarmanschlusses bei Wehningen bei HQ <sub>100</sub> (Ist-Zustand minus umgesetzte Maßnahme) .....	63
Abb. 64:	Beispiel zu den geplanten vegetationsbeeinflussenden Maßnahmen in Mecklenburg-Vorpommern bei Elbe-km 504,6. (Orthofoto mit Zustand März 2012) .....	64
Abb. 65:	Beispiel bei Elbe-km 519,5 (links) zu den geplanten niedersächsischen Maßnahmen.....	65
Abb. 66:	untersuchte Aufforstungen bei Elbe-km 519 (Hartholzauenwald Eichen - gelb) bzw. Elbe-km 521,5 (Weichholzauenwald Silberweiden - hellrot) .....	66
Abb. 67:	Wasserstandsdifferenzen im Hauptgerinne zum Ist-Zustand bei Umsetzung der Maßnahmen "Vegetationsänderung und Aufforstung" (lila gestrichelte Linie), nur "Vegetationsänderung" (grüne Linie), "Vegetations- und Topographieänderung" (rote Linie), "Vegetations- und Topographieänderung und Aufforstung" (türkis gestrichelte Linie) bzw. nur "Topographieänderung" (braune Linie).....	67
Abb. 68:	Strömungsvektoren (rot) und Fließtiefen bei HQ <sub>50</sub> (Farbskala vom blau bis rot) im Bereich der untersuchten Aufforstungen.....	68

# Zusammenfassung

Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), das Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, das Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Mecklenburg-Vorpommern und das Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz unterzeichneten am 16.08.2012 eine Kooperationsvereinbarung mit dem Ziel:

- die bisherigen Grundlagen für Vorlanduntersuchungen an der Elbe zwischen Wittenberge und Geesthacht zu aktualisieren,
- ein numerisches 2D-Modell der Elbe zwischen Wittenberge und Geesthacht für Vorlanduntersuchungen zu erstellen, zu kalibrieren und zu validieren,
- vereinbarte Lastfälle mit dem erstellten 2D-Modell zur Beurteilung der Wasserstands- und Strömungsverhältnisse im Vorlandbereich mit unterschiedlichen Vegetationsverhältnissen und Vorlandtopographien für die Elbestrecke zwischen Wittenberge und Geesthacht zu berechnen sowie
- Entscheidungshilfen für Aussagen zur Pflege des Vorlands der Elbe mit dem Ziel der Abflussverbesserung zwischen Wittenberge und Geesthacht für die Wasserwirtschaft zu erarbeiten.

Die Ergebnisse der 2D-Modellierung in der BfG sollen zur Umsetzung der Hochwasserisikomanagement-Richtlinie herangezogen werden. Gemäß Vorhabensbeschreibung sollen im ersten Schritt numerischen Modelle einer Pilotstrecke von ca. 30 km aufgebaut werden. Auf der 1. Besprechung der Kooperationspartner am 06.09.2012 wurde festgelegt, dass diese Pilotstrecke den Bereich von Dömitz bis Hitzacker umfassen soll. Hauptzweck sind das Sammeln von Erfahrung bei der Erstellung und Anwendung der Pilotmodelle sowie die Festlegung der mittleren Gitterauflösung für das Gesamtmodell.

Im vorliegenden Bericht werden die wesentlichen Schritte zur Erstellung von fünf Modellen der Pilotstrecke beschrieben, die sich hauptsächlich in deren mittlerer Gitterauflösung (15 m, 20 m, 25 m, 30 m, 40 m) unterscheiden. Die Ergebnisse der Kalibrierung, Validierung und erster Modellrechnungen werden dargestellt.

Die erzeugten Modelle werden als geeignet betrachtet, die Strömungsvorgänge im betreffenden Elbeabschnitt zu beschreiben, insbesondere die Auswirkungen abflussverbessernder Maßnahmen wie Gehölzmanagement und Eingriffe in die Geometrie der Vorländer und Deiche auf Hochwasserstände zu ermitteln. Erste Beispiele für Maßnahmen wurden bereits erfolgreich im Modell abgebildet (Kapitel 4).

2D-Modellierung  
der unteren Mittel-  
elbe von Witten-  
berge bis Geest-  
hacht – Pilotmo-  
delle Dömitz bis  
Hitzacker

# 1. Veranlassung

Grundlage der hiermit dokumentierten Arbeiten ist der Kooperationsvertrag zwischen den Ländern Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) vom 16.08.2012. Die Partner vereinbarten darin die Kooperation bezüglich der nachfolgend beschriebenen Arbeiten. Dabei sollen:

- die bisherigen Grundlagen für Vorlanduntersuchungen an der Elbe zwischen Wittenberge und Geesthacht aktualisiert werden,
- ein numerisches 2D-Modell der Elbe zwischen Wittenberge und Geesthacht für Vorlanduntersuchungen erstellt, kalibriert und validiert werden,
- vereinbarte Lastfälle mit dem erstellten 2D-Modell zur Beurteilung der Wasserstands- und Strömungsverhältnisse im Vorlandbereich mit unterschiedlichen Vegetationsverhältnissen und Vorlandtopographien für die Elbestrecke zwischen Wittenberge und Geesthacht berechnet werden,
- Entscheidungshilfen für Aussagen zur Pflege des Vorlands der Elbe mit dem Ziel der Abflussverbesserung zwischen Wittenberge und Geesthacht für die Wasserwirtschaft erarbeitet werden,
- die Ergebnisse der 2D-Modellierung durch die BfG zur Umsetzung der Hochwasserisikomanagement-Richtlinie herangezogen werden.

Ziel dieser hydraulischen Modellierung ist die Wirkung der Vegetationsverhältnisse (Vorlandverbuschung) sowie die Auswirkungen der Veränderungen in der Vorlandtopografie auf die Wasserstands- und Strömungssituation bei ausgewählten Hochwasserereignissen an der unteren Mittelelbe festzustellen und hinsichtlich der Erstellung eines Unterhaltungs- und Pflegeplans zu bewerten. Gleichermaßen sehen somit alle beteiligten Kooperationspartner in der Wahl eines 2D-Modells das geeignete Instrument, die vorhandenen komplexen Strömungsverhältnisse im Elbevorland modellieren zu können. Aufgabe der BfG ist der Aufbau, die Kalibrierung und Anwendung eines 2D-hydrodynamischen Modells von Wittenberge bis Geesthacht für stationäre Hochwasserzustände und die Berechnung von Lastfällen sowie die Erstellung eines Untersuchungsberichts aus hydrologisch-hydraulischer Sicht. Zur Übersicht des Einzugsgebietes der unteren Mittelelbe dient Abb. 1.

Laut Vorhabensbeschreibung ist die Erstellung eines 2D-Pilotmodells für einen ausgewählten Streckenabschnitt (ca. 30 km) vereinbart. Hierzu gehören:

- Aufbau des numerischen Rechengitters und Implementierung einer Netzstruktur zur Abbildung aller abflussrelevanter Strukturen am Gewässer und in den Vorlandbereichen,
- Festlegung der Vorlandrauheiten gemäß den Bewuchsverhältnissen der Vorländer um das Jahr 2011 (auf Basis von Luftbildern),

2D-Modellierung  
der unteren Mittel-  
elbe von Witten-  
berge bis Geest-  
hacht – Pilotmo-  
delle Dömitz bis  
Hitzacker

- stationäre Kalibrierung des 2D-Modells anhand von Wasserspiegelfixierungen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) um 2011 bei Elbeabflüssen im Mittelwasser- und im Hochwasserbereich,
- Validierung des 2D-Modells anhand einer weiteren unabhängigen Hochwasserfixierung (HW2013, falls verfügbar),
- Durchführung beispielhafter Lastfallberechnungen.

Weitere Detaillierung bezüglich der Vorgehensweise sind in den Niederschriften der Arbeitsgruppensitzungen vom 06.09.2012 und 14.02.2013 festgehalten.

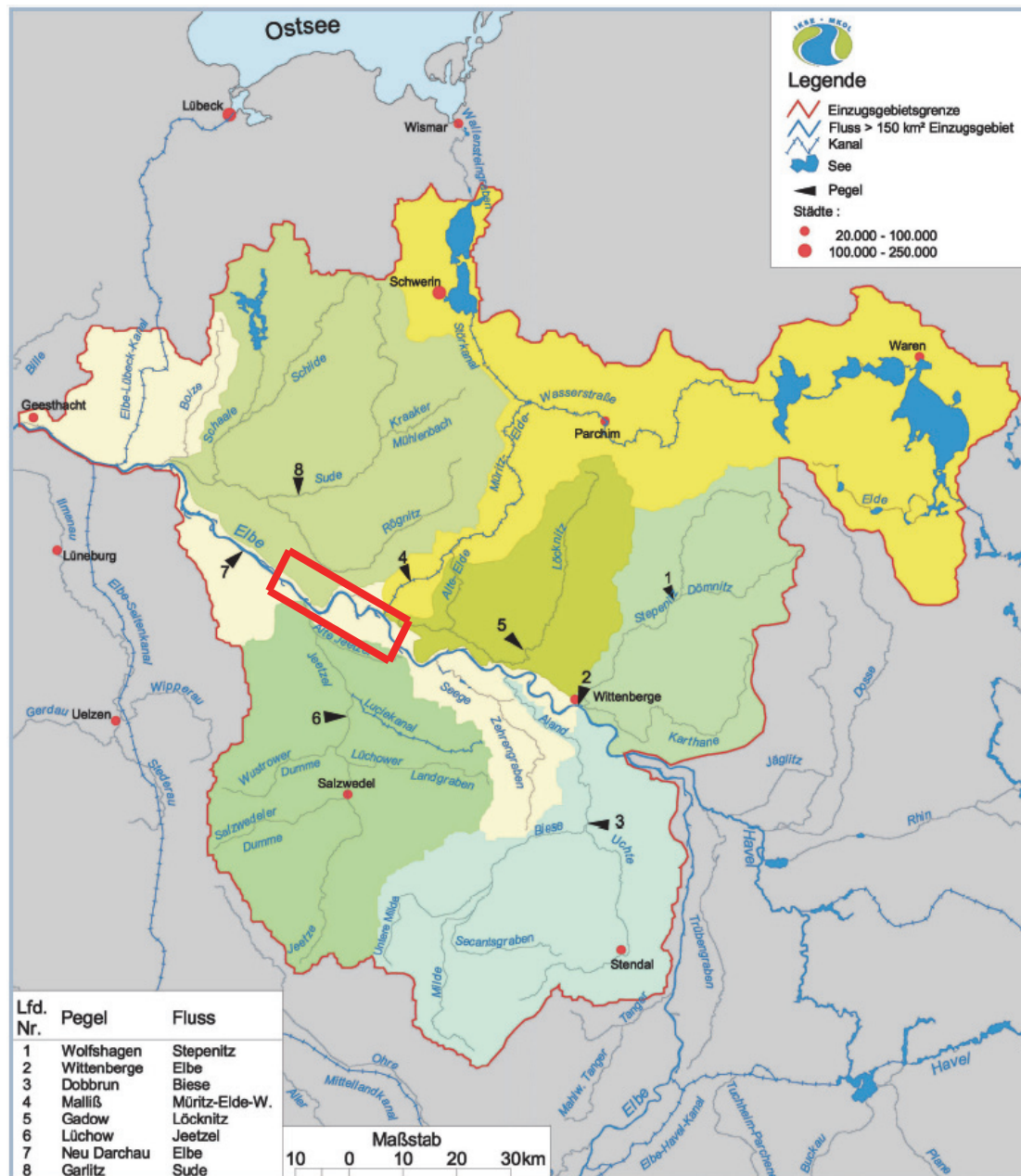


Abb. 1: Übersichtskarte des Einzugsgebietes der unteren Mittel-  
elbe von Wittenberge bis Geesthacht und Lage der Pilotstrecke (rot). Quelle: verändert nach IKSE,  
2005



In der Niederschrift vom 06.09.2012 wurde die Pilotmodellstrecke auf den Abschnitt Dömitz bis Hitzacker (~ Elbe-km 500 - 530) festgelegt. Geeignete Bereiche für die Modellränder wurden bei Elbe-km 496,3 sowie 531,9 vorgefunden, sodass die Pilotmodelle nunmehr eine Strecke von 35,6 km umfassen (Abb. 1). Die etwa 2 km umfassenden Abschnitte von Streckenvor- und Nachlauf dienen der Minimierung der Beeinflussung durch die Randbedingungen.

Gemäß Festlegung auf der Besprechung der Kooperationspartner in Hannover vom 14.02.2013 werden mit dem vorliegenden Bericht die Arbeiten an der Pilotmodellstrecke dokumentiert.

## 2. Modellaufbau

### 2.1 Rechengitter

Gemäß Vorhabensbeschreibung kommt in der BfG das Modellierungssystem Delft3D (Version 4.00.01) zum Einsatz. Delft3D ist eine mehrdimensionale hydrodynamische Modellierungssoftware zur stationären oder instationären Berechnung von Strömungsvorgängen. Die zugrundeliegenden Berechnungsgitter sind strukturierte Rechteckgitter. Um optimale Ergebnisse in Bezug auf Stabilität und Genauigkeit zu erhalten, sind folgende Qualitätskriterien der Rechengitter anzustreben (Deltares, 2011):

- Orthogonalität: Winkel zwischen den Hauptgitterachsen  $\cos \phi < 0,02$
- Seitenverhältnis: Verhältnis der Längen der Zellen in beiden Hauptrichtungen zwischen 1:1 und 1:2
- Größenverhältnis benachbarter Zellen: im Untersuchungsfokus kleiner 1,2 – in Randbereichen auch bis 1,4

Ein Hauptziel der Pilotmodellierung ist das Finden der optimalen Gitterauflösung für die Untersuchung mit dem Gesamtmodell. Dabei sind zwei gegensätzliche Anforderungen gegeneinander abzuwägen und ein im Sinne der Modellierungsziele optimaler Kompromiss zu finden:

Zum einen ist die gewählte Rechengitterauflösung bestimmend für den numerischen Aufwand der Modellierung und durch die Kapazitäten der eingesetzten Rechnerhardware begrenzt. Dabei ist nicht nur der Speicherplatz für die benötigten Zellen ein limitierender Faktor, sondern auch die anwendbare Zeitschrittweite, welche mit kleiner werdender Gitterauflösung zwangsläufig kürzer wird und den Berechnungsaufwand gegebenenfalls erheblich vergrößert.

Andererseits wird durch die Rechengitterauflösung bestimmt, bis zu welcher minimalen Größe geometrische Strukturen noch abbildbar sind.

Zur Entscheidungsfindung des optimalen Kompromisses aus den beiden vorgenannten gegensätzlichen Bedingungen wurden fünf Pilotmodelle erstellt, die sich hinsichtlich der Gitterauflösung unterscheiden, ansonsten jedoch identisch aufgebaut sind. Die verwendeten mittleren Gitterweiten sind 15, 20, 25, 30 sowie 40 m.

#### 2.1.1 Gitteraufbau

Das unter numerischen Gesichtspunkten optimale Gitter besteht aus exakten Quadraten. Zur besseren Abbildung geometrischer Strukturen kann es jedoch sinnvoll sein, die Gitterkanten an die Gewässerstrukturen (Hauptabflussquerschnitt, Deiche) anzupassen. Außerdem ist es

aus Sicht von ökonomischen Rechenzeiten ratsam, wo möglich die Zellen in Hauptströmungsrichtung zu strecken. Dabei müssen jedoch die im vorangehenden Abschnitt genannten Qualitätskriterien eingehalten werden. Folglich stellt der Gitteraufbau einen Optimierungsprozess dar, in dem zwischen Abbildungsgenauigkeit, Performanz und den Gitterqualitätskriterien ein optimaler Kompromiss gefunden wird. Dieser Vorgang wurde an einen erfahrenen Auftragnehmer (HKV Hydrokontor GmbH, Aachen) vergeben. Abb. 2 zeigt, wie mittels Spline-Funktionen (siehe Glossar) im ersten Entwurfsschritt die Orientierung des Rechengitters definiert wird. An den Splines orientieren sich im nächsten Schritt die automatisch generierten Gitterkanten. Dabei entstehen Bereiche, in denen die Gitterkanten der Gewässerstruktur folgen (vgl. Abb. 3), sowie andere – beispielsweise in starken Flusskrümmungen – in denen die Strömungsrichtung von der Richtung der Gitterkanten abweicht (vgl. Abb. 4). Das numerische Berechnungsschema löst jedoch die zugrunde liegenden Gleichungen stets mit der nötigen Genauigkeit, wenn die unter Abschnitt 2.1 erwähnten Qualitätskriterien eingehalten werden. In den folgenden Abschnitten werden die Eigenschaften der erstellten Rechengitter mit den jeweiligen Zielgrößen verglichen.

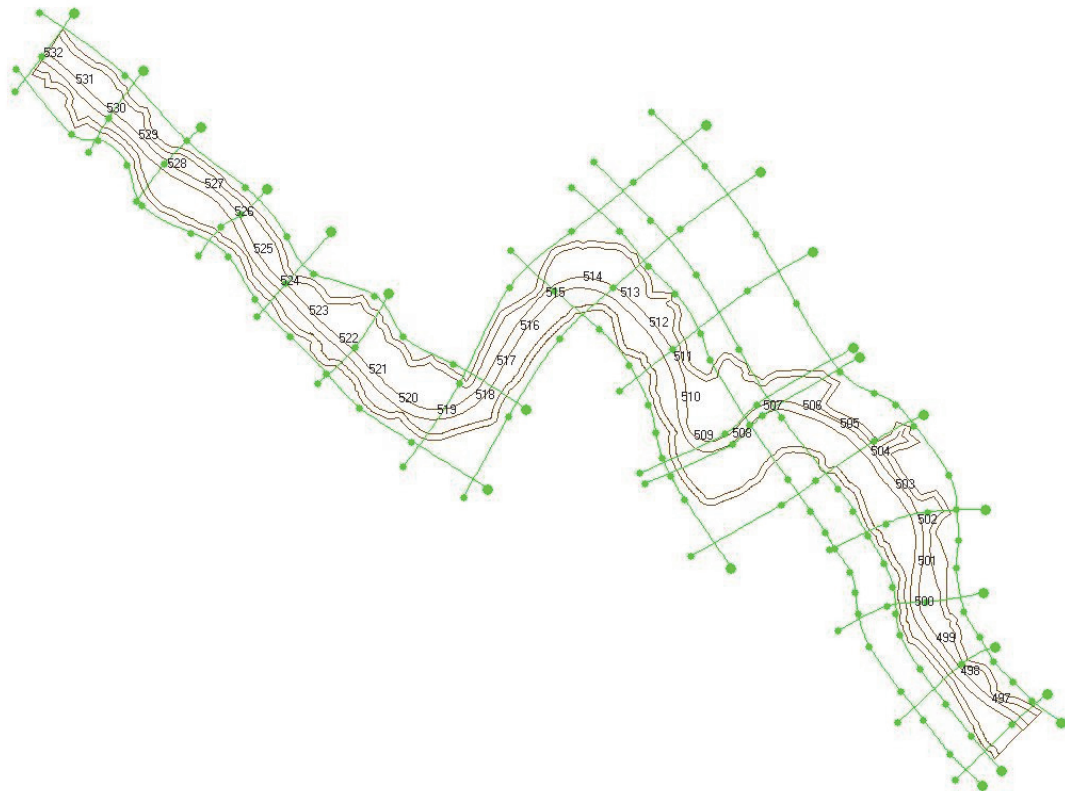


Abb. 2: Entwurf der Gitterstruktur mittels Spline-Funktionen

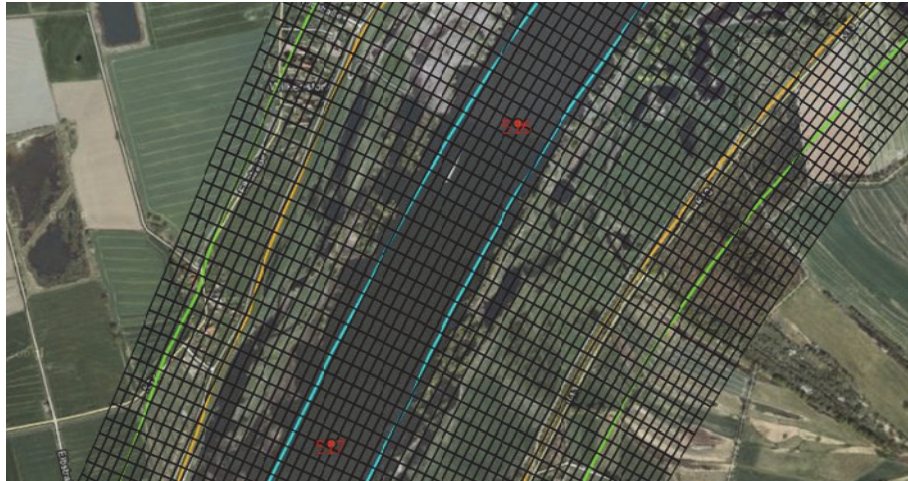


Abb. 3: Beispiel eher der Hauptströmungsrichtung folgender Gitterstruktur

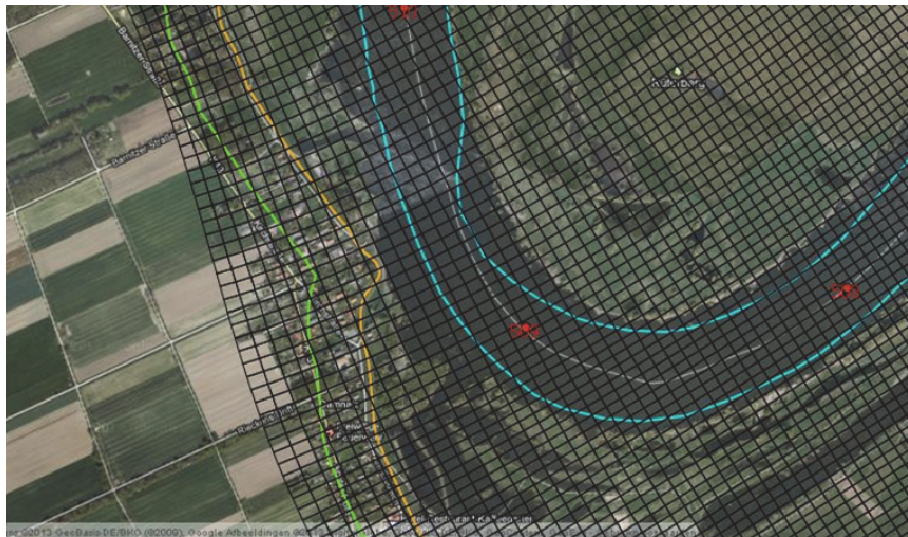


Abb. 4: Beispiel für von der Hauptströmungsrichtung abweichender Gitterstruktur

### 2.1.2 Gitterweite

Die mittlere Gitterweite für die fünf Pilotmodelle beträgt 15, 20, 25, 30 sowie 40 m. Die tatsächliche Zellgröße weicht lokal vor allem in der Nähe von geometrischen Zwangspunkten von diesen Richtwerten ab. Stark verringerte Größen einzelner Zellen in Bereichen mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten sind aus Gründen der Berechnungsstabilität problematisch. Auf der anderen Seite sind deutlich vergrößerte Zellen schlechter geeignet, die Geometrie in Bereichen von geometrischen Strukturen hinreichend genau abzubilden.

Die folgenden Abbildungen zeigen exemplarisch die tatsächlichen Zellgrößenverteilungen in den Pilotmodellen mit 15 m (Abb. 5), 25 m (Abb. 6) sowie 40 m mittlerer Gitterweite (Abb. 7). Die Häufigkeitsverteilungen der entsprechenden Zellgrößen sind in Abb. 8 bis Abb. 10 dargestellt.

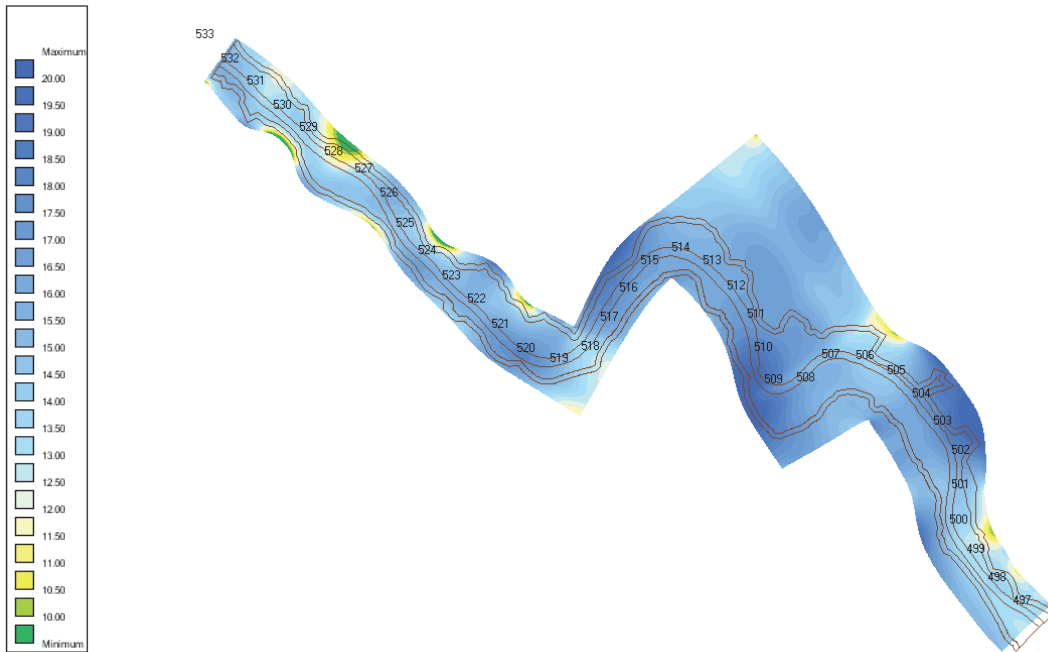


Abb. 5: Räumliche Verteilung der Zellgrößen für das Pilotmodell mit 15 m mittlerer Gitterweite

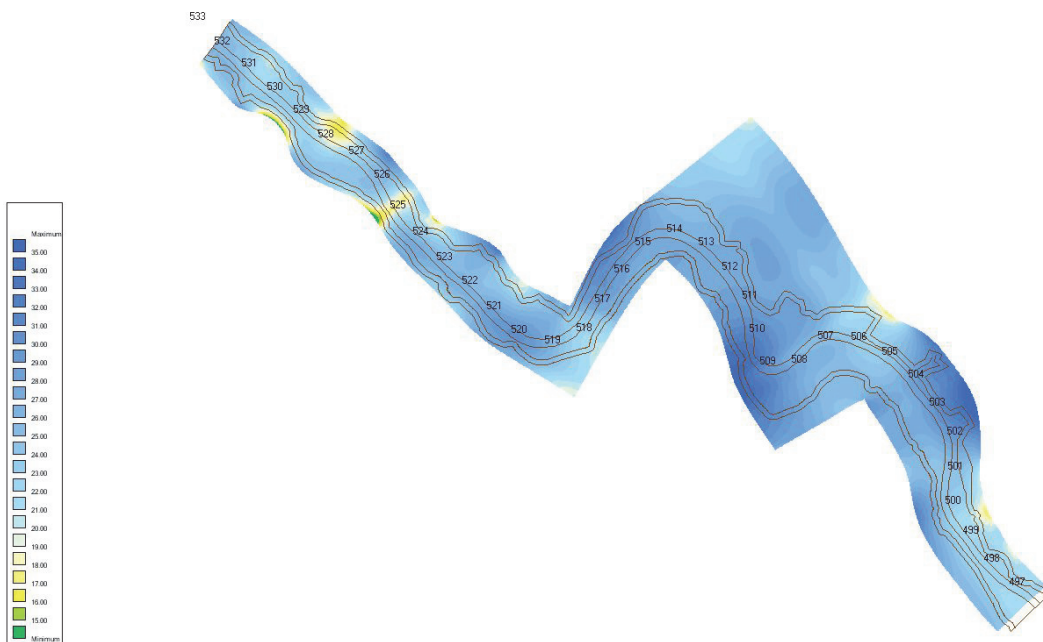


Abb. 6: Räumliche Verteilung der Zellgrößen für das Pilotmodell mit 25 m mittlerer Gitterweite

2D-Modellierung  
der unteren Mittel-  
elbe von Witten-  
berge bis Geest-  
hacht – Pilotmo-  
delle Dömitz bis  
Hitzacker

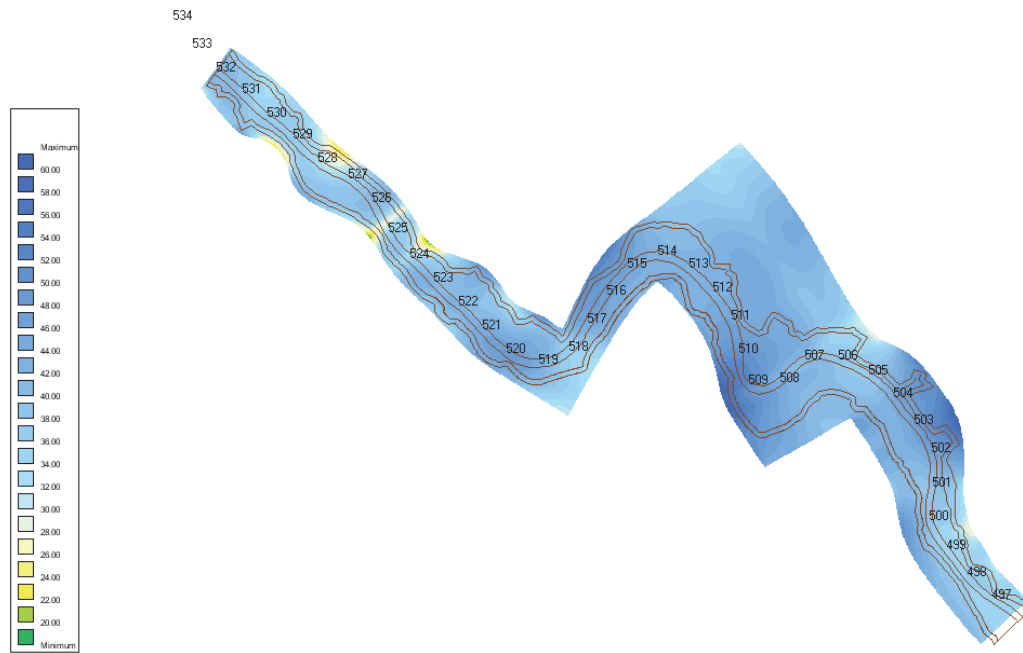


Abb. 7: Räumliche Verteilung der Zellgrößen für das Pilotmodell mit 40 m mittlerer Gitterweite

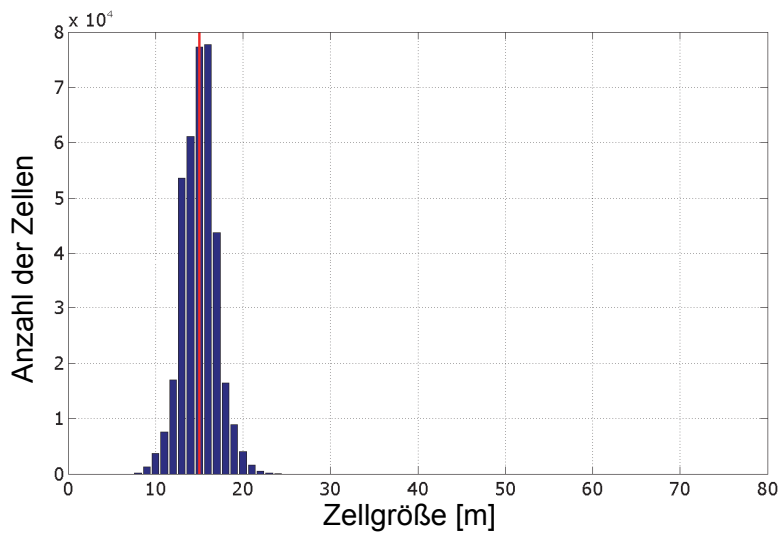


Abb. 8: Häufigkeitsverteilung der Zellgrößen für das Pilotmodell mit 15 m mittlerer Gitterweite



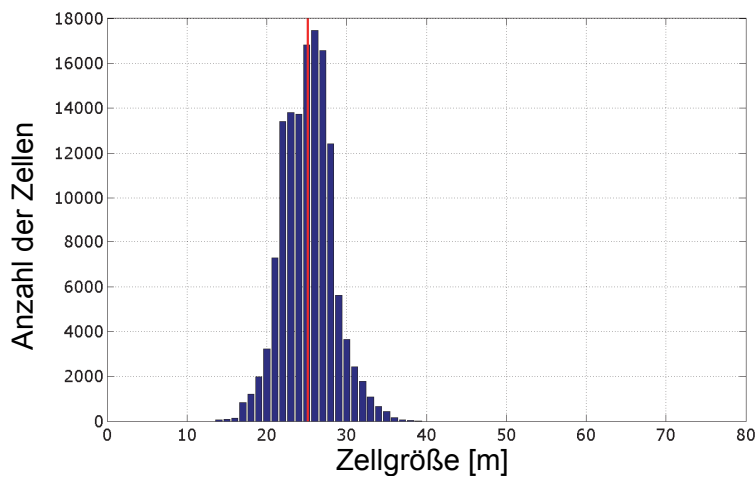


Abb. 9: Häufigkeitsverteilung der Zellgrößen für das Pilotmodell mit 25 m mittlerer Gitterweite

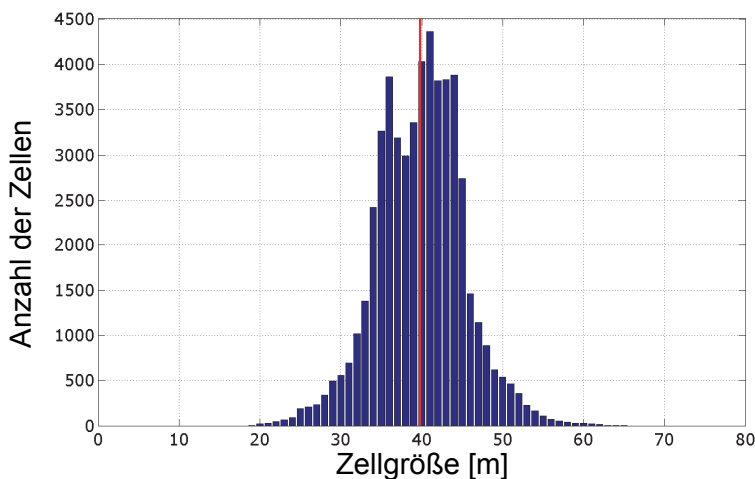


Abb. 10: Häufigkeitsverteilung der Zellgrößen für das Pilotmodell mit 40 m mittlerer Gitterweite

Die Verteilung der Zellgrößen wird für alle drei Auflösungen als gut geeignet für die Modellierung beurteilt. Anders ausgedrückt heißt dies, dass keine der Auflösungen aufgrund dieses Kriteriums auszuschließen ist.

### 2.1.3 Orthogonalität

Als erstes der unter Abschnitt 2.1 genannten Qualitätskriterien soll nun die Orthogonalität der erzeugten Rechengitter gezeigt werden. Als Richtgröße für eine gute Gitterqualität wird vom Modellentwickler für den Winkel zwischen den Hauptgitterachsen ein Wert von  $\cos \phi < 0,02$  empfohlen (Deltares, 2011). Die folgenden Abbildungen zeigen die erreichte Orthogonalität für die Rechengitter mit 15 m (Abb. 11), 25 m (Abb. 12) und 40 m mittlerer Gittergröße (Abb. 13). Es ist zu erkennen, dass die Orthogonalität der feineren Gitter – abgesehen von weniger relevanten Randbereichen – sehr gut ist. Lediglich das grobe Gitter mit 40 m mittlerer Maschenweite zeigt größere Bereiche um Elbe-km 524, in denen die Gitterqualität nicht optimal, aber immer noch akzeptabel ist.

2D-Modellierung  
der unteren Mittel-  
elbe von Witten-  
berge bis Geest-  
hacht – Pilotmo-  
delle Dömitz bis  
Hitzacker

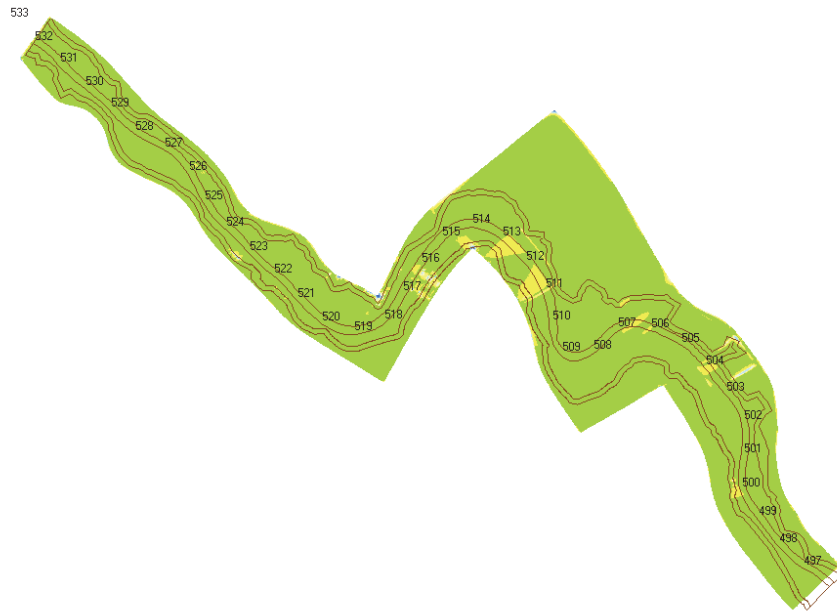


Abb. 11: Orthogonalität des Rechengitters mit einer mittleren Zellgröße von 15 m

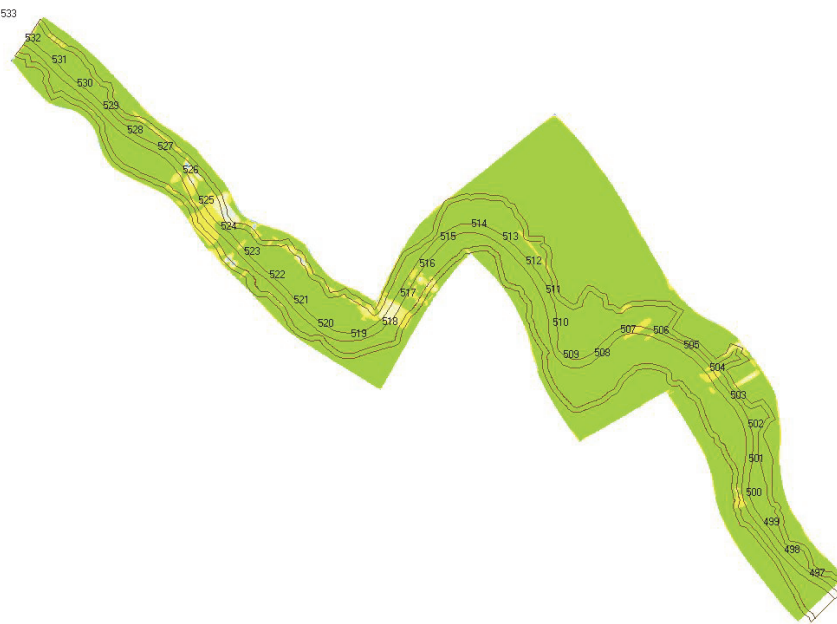


Abb. 12: Orthogonalität des Rechengitters mit einer mittleren Zellgröße von 25 m



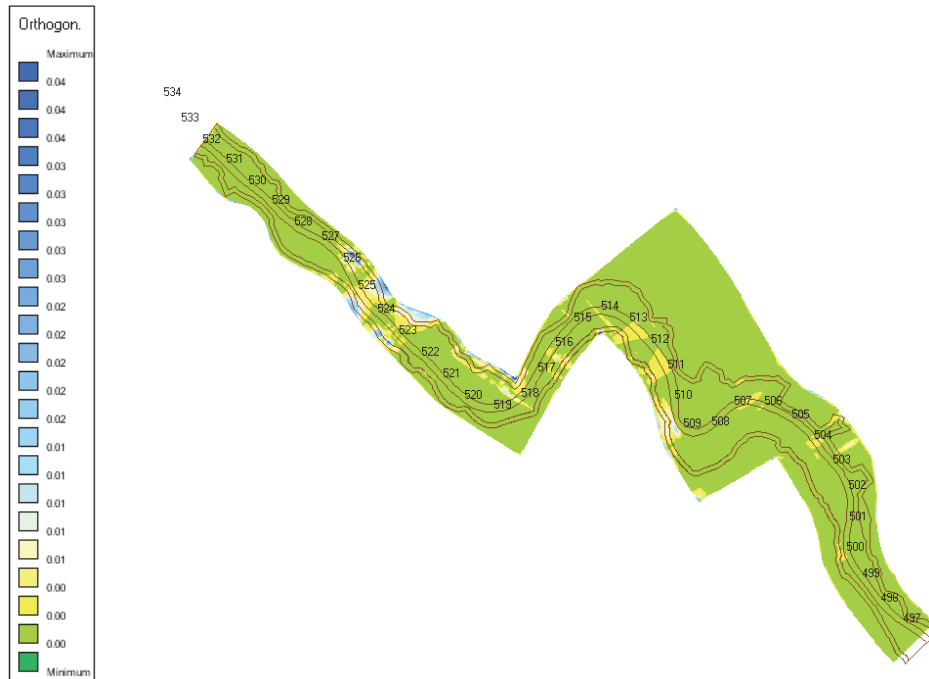


Abb. 13: Orthogonalität des Rechengitters mit einer mittleren Zellgröße von 40 m

### 2.1.4 Seitenverhältnis

Die Hauptrichtungen der Berechnungsgitter werden im Folgenden M (von Einström- zum Ausströmrand) und N (quer zu M) genannt. Das Verhältnis der Längen der Zellen in beiden Hauptrichtungen (*aspect ratio*) soll möglichst zwischen 1:1 und 1:2 liegen. Eine noch größere Streckung führt hingegen zu zunehmenden algorithmisch bedingten Modellierungsfehlern. In der Hauptströmungsrichtung, bei geringen Strömungsanteilen in Querrichtung, sind auch größere Seitenverhältnisse tolerabel, da hierbei der Einfluss auf Modellierungsfehler geringer ist. Abb. 14 bis Abb. 16 zeigen die räumliche Verteilung des Seitenverhältnisses für die Rechengitter mit 15 m, 25 m bzw. 40 m Gittergröße. Die Bereiche um Elbe-km 524 bis 526 sind jeweils die einzigen, wo im Modellgebiet zwischen den Deichlinien Seitenverhältnisse größer als 1:2 auftreten, jedoch tritt die Streckung in Hauptströmungsrichtung auf und ist nach (Deltares, 2011) akzeptabel.

2D-Modellierung  
der unteren Mittel-  
elbe von Witten-  
berge bis Geest-  
hacht – Pilotmo-  
delle Dömitz bis  
Hitzacker

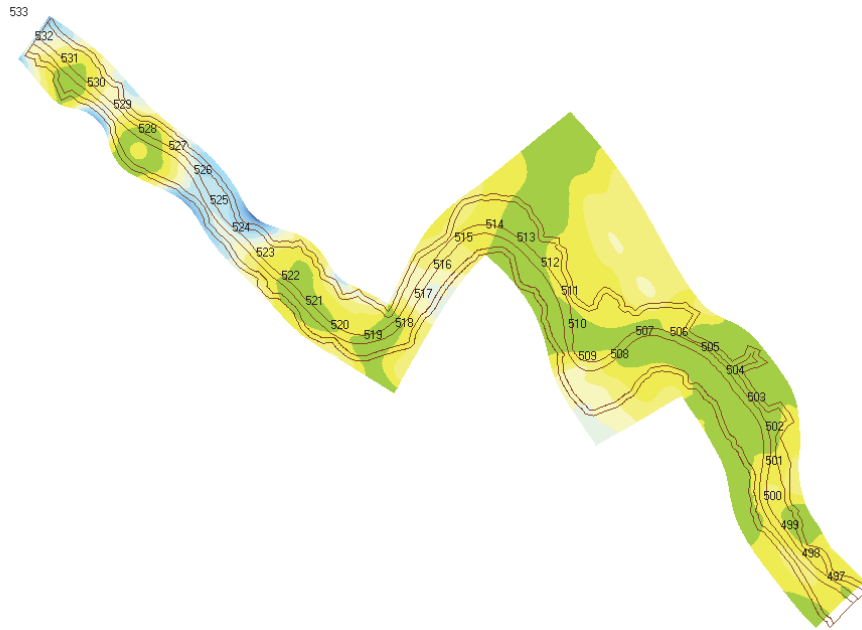
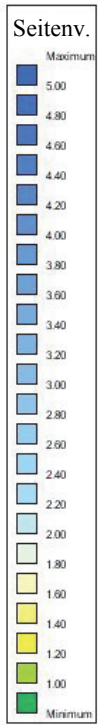


Abb. 14: Seitenverhältnis des Rechengitters mit einer mittleren Zellengröße von 15 m

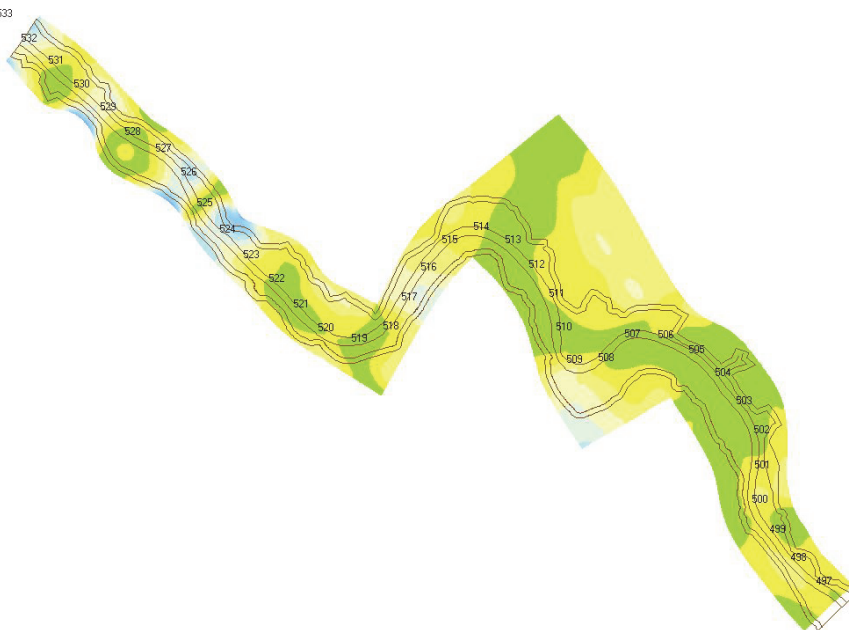
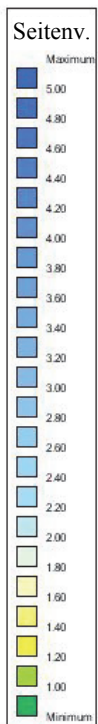


Abb. 15: Seitenverhältnis des Rechengitters mit einer mittleren Zellengröße von 25 m

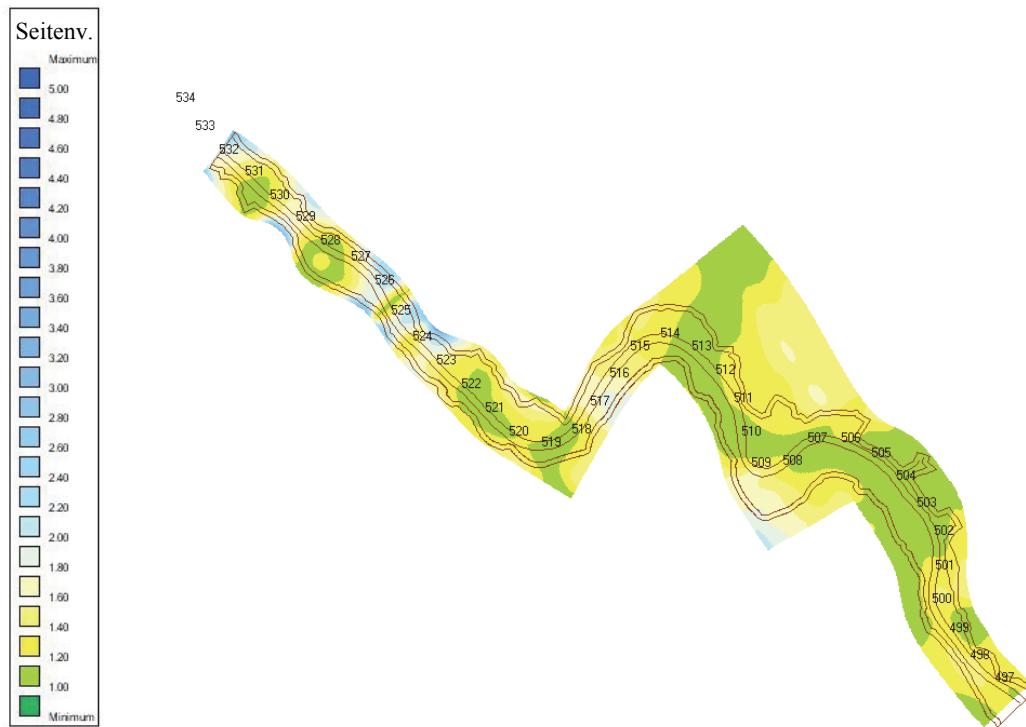


Abb. 16: Seitenverhältnis des Rechengitters mit einer mittleren Zellengröße von 40 m

### 2.1.5 Größenverhältnis

Das Größenverhältnis benachbarter Zellen (*smoothness*) soll im Untersuchungsfokus kleiner 1,2 – in Randbereichen auch bis 1,4 – betragen (Abschnitt 2.1). Diese Werte werden für alle fünf Gitterauflösungen eingehalten. Exemplarisch ist dies in Abb. 17 und Abb. 18 für das 25-m-Gitter und die M-Richtung (Hauptrichtung des Gitters von Einström- zum Ausströmrand) bzw. die N-Richtung (quer dazu) gezeigt. Das Größenverhältnis stellte somit kein Ausschlusskriterium für eine oder mehrere Gitterauflösungen dar.

2D-Modellierung  
der unteren Mittel-  
elbe von Witten-  
berge bis Geest-  
hacht – Pilotmo-  
delle Dömitz bis  
Hitzacker

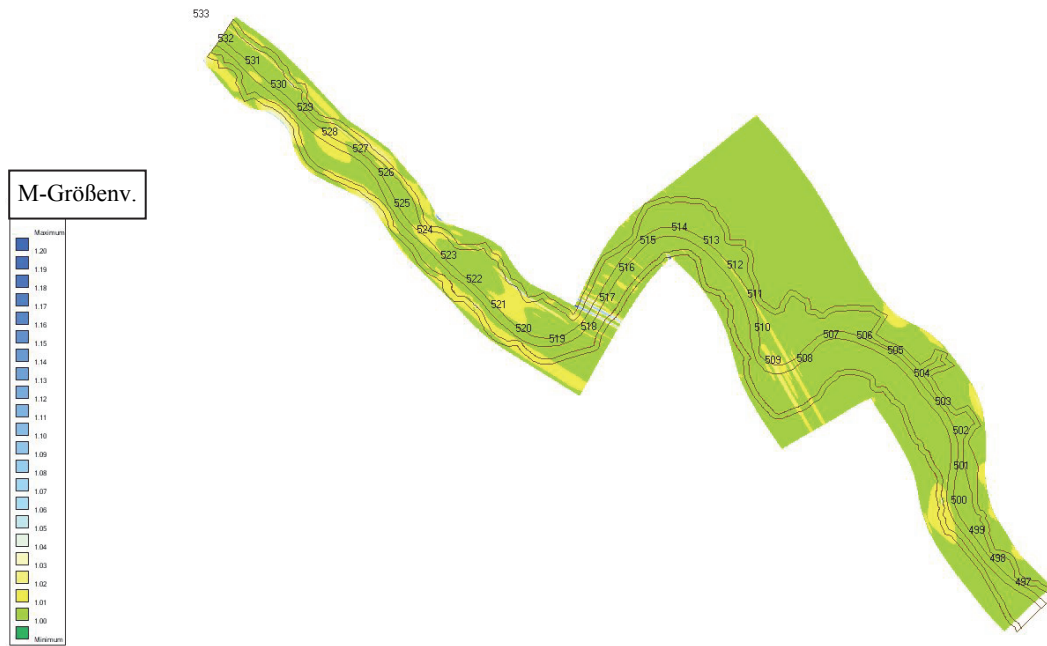


Abb. 17: Größenverhältnis des Rechengitters in M-Richtung mit einer mittleren Zellen-  
größe von 25 m

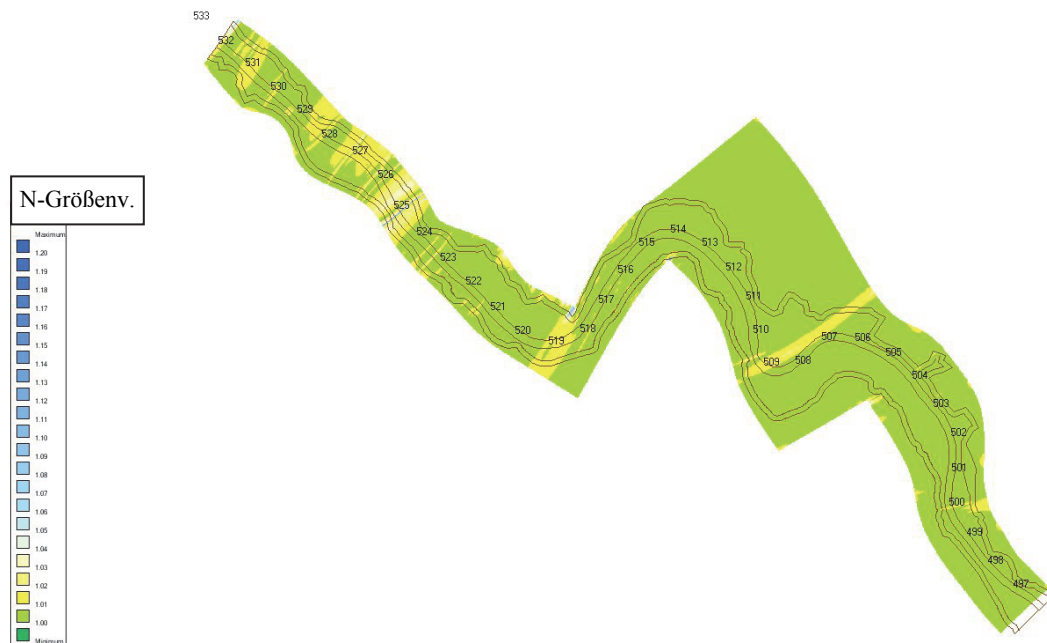


Abb. 18: Größenverhältnis des Rechengitters in N-Richtung mit einer mittleren Zellen-  
größe von 25 m

## 2.2 Modellhöhen

Die Höhendaten stammen überwiegend aus dem offiziellen DGMW der Elbe mit Stand 2006. Dieses digitale Geländemodell (DGM) wurde in der BfG bereits um die Deichrückverle-

gungsmaßnahme im Bereich Lenzen, die 2010 fertig gestellt wurde, mit den vom Land Brandenburg bereitgestellten Bestandsdaten aktualisiert. In den Bereichen Neu Bleckede (Elbe-km 546 bis 555) und Mahnkenwerder (Elbe-km 554,5 bis 556,5) gibt es weitere abgeschlossene Deichbaumaßnahmen, die bei Beginn dieses Projektes in den Höhendaten noch nicht enthalten waren. Hier musste nach aufwändiger Recherche eine nachträgliche Aktualisierung des DGM durchgeführt werden, wozu bereitgestellte Unterlagen der Länder Mecklenburg-Vorpommern und Niedersachsen verwendet wurden.

### 2.2.1 Ableitung der Höhen aus einem TIN

Da die im DGM enthaltene Punktzahl bedingt durch die hohe Auflösung von 2 x 2 m für die Interpolation der Modellhöhen zu hoch ist, wurde zunächst ein unregelmäßiges Dreiecksgitter (*triangulated irregular network* oder TIN) interpoliert. Im Hauptgerinne wurde eine konstante Punktdichte vorgegeben, um hier die bestmögliche Qualität zu erhalten (*resampling*). Außerhalb davon erfolgt die Ausdünnung unter der Maßgabe, eine bestimmte Anzahl von "wichtigen" Punkten des DGM zu erhalten. Die Methode der sog. *very important points* behält hierbei nur Punkte deren Höhen sich zu den Nachbarpunkten entsprechend unterscheiden, das bedeutet in Bereichen mit geringer Änderung der Topographie wenige Punkte, in Bereichen mit starken Gradienten mehr Punkte. Versuche mit unterschiedlichen Ausdünnungsraten haben ergeben, dass nur bei Reduzierung der Ausgangsdaten im Vorland auf 1 % und *resampling* im Hauptgerinne auf 4 x 4 m ein Datensatz mit in Hinblick auf das Gesamtmodell prozessierbarer Punktzahl entsteht. Die Qualität des so erhaltenen Datensatzes kann durch Vergleich der DGM-Höhen mit den Höhen aus dem TIN beurteilt werden. Es zeigt sich, dass für 85,6 % der Punkte die Abweichung < 0,1 m, für 97,8 % < 0,25 m und für 99,9 % < 0,5 m ist. Dies wird als hinreichend genau betrachtet, insbesondere da durch die nachfolgende Interpolation auf das Berechnungsgitter eine betragsmäßig größere Unsicherheit zu erwarten ist (siehe Kapitel 6).

Die Höhen des TIN werden anschließend auf das Rechnetz interpoliert. Es muss beachtet werden, dass die Wasserspiegellagen in Delft3D im Zentrum der Rechengitterzellen definiert sind, die Geschwindigkeiten in der Mitte der Kanten zwischen benachbarten Zellen und die Sohlhöhen auf den Eckpunkten der Zellen. Die Berechnung der Wasserspiegellagen erfolgt standardmäßig in Delft3D mit dem niedrigsten Punkt der vier umliegenden Sohlhöhen (maximale Wassertiefe), die Berechnung der Geschwindigkeiten mit dem Mittel der beiden benachbarten Sohlhöhenpunkte. Laut Deltares (2011) ergibt dieses Vorgehen die besten Modellergebnisse und vergleichsweise wenig Probleme beim Trockenfallen und Wiederbenetzen von Zellen.

### 2.2.2 Berücksichtigung der Buhnen

Mit den vorgesehenen Gitterauflösungen sind die Buhnenkörper nicht entsprechend ihrer realen Geometrie abbildbar. Daher werden die Buhnen aus dem TIN entfernt (Extrapolation der umgebenden Geländehöhen) und stattdessen als überströmbare Wehre abgebildet. Diese verlaufen entlang der nächstgelegenen Gitterkante und weisen als Überfallhöhe die Höhe des Buhnenrückens auf (Abb. 19).

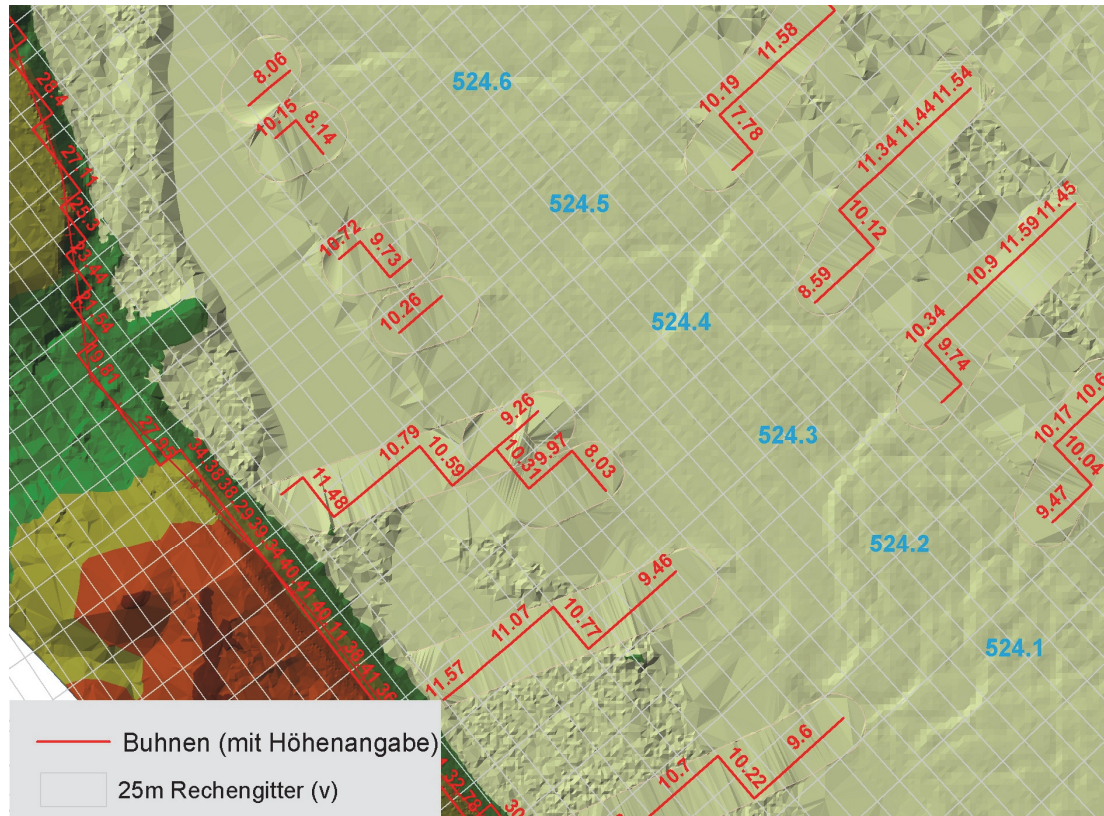


Abb. 19: Entfernte Buhnen im TIN und Ersatz durch überströmte Wehre am Beispiel um Elbe-km 524

### 2.2.3 Berücksichtigung von steilem Gefälle

Durch die Interpolation der Gelände- bzw. TIN-Höhen auf die Rechengitter werden steile Gefälle, beispielsweise entlang von Sommerdeichen, Gewässerrandbereichen und Vorlandgerinnen flacher abgebildet als in der Realität vorhanden. Die Energieverluste der Strömung bei Überwindung dieser Höhenunterschiede sind dann im Modell geringer als in der Realität. Daher werden entlang solcher Lokalitäten zusätzliche Energieverluste durch das Hinzufügen von Kanten im Modell erzeugt.

### 2.2.4 Berücksichtigung der Deiche

Da eine realistische Abbildung der Deichhöhen bei den hier eingesetzten Gitterauflösungen nicht gewährleistet ist (Aufgrund der geringen Deichkronenbreiten im Vergleich zur Gitterweite), werden zusätzlich entlang der Banndeiche Wehrelemente mit den Höhen der Deichkrone eingefügt, welche das realistische Anspringen einer möglichen Überströmung gewährleisten.

Abb. 20 zeigt beispielhaft zusätzlich eingefügte Wehrlinien im Streckenabschnitt um Elbe-km 524 zur Repräsentation von Buhnen (vgl. Abschnitt 2.2.2), Gefällelinien (hier Gewässerrandbereiche und Nebengerinne, vgl. Abschnitt 2.2.3) und Deichen.



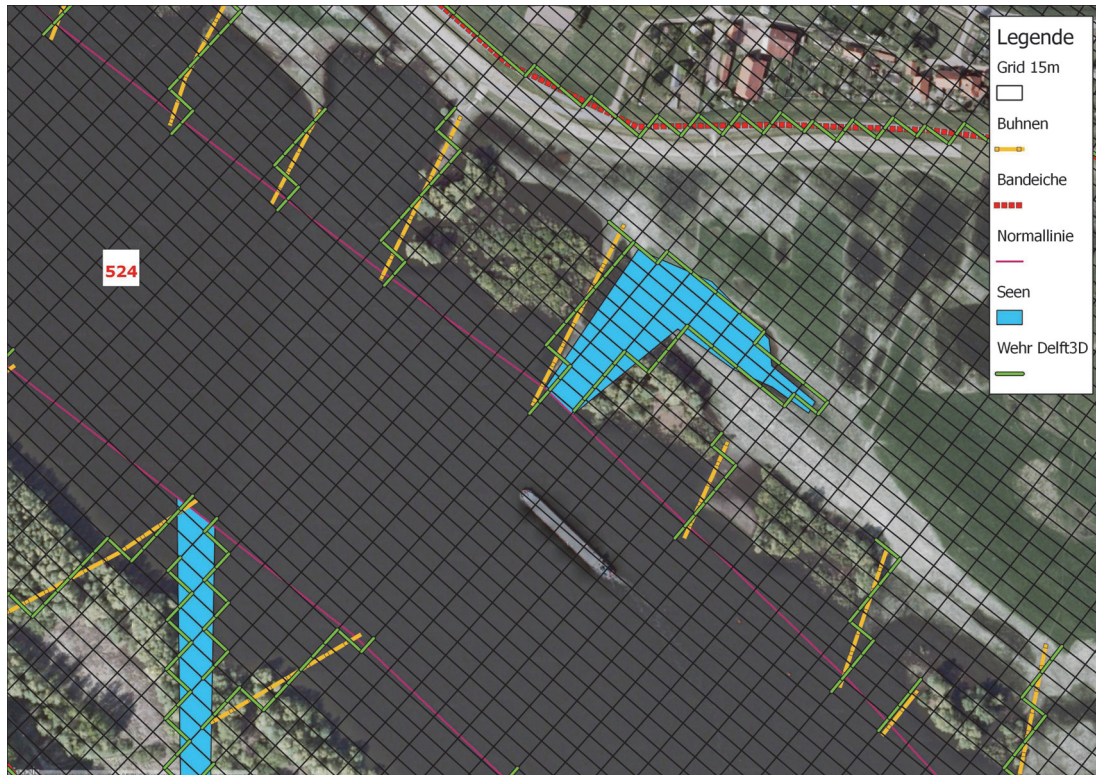


Abb. 20: Beispiel für zusätzliche Wehrlinien entlang der Bühnen, Gewässerrandbereichen, Nebengerinnen und Deichen

### 2.2.5 Umgang mit Deich-Schutzniveaus unter $HQ_{100}$

Im betrachteten Flussabschnitt der unteren Mittel-  
elbe befinden sich Bereiche, in welchen die  
Wasserstände eines  $HQ_{100}$  nicht von den vorhandenen Deichen gekehrt werden. Folglich wird  
an eben solchen Stellen Wasser hinter die Deichlinie transportiert und kann sich dann binnen-  
seits hinter den Deichen ausbreiten. Eine Betrachtung von Szenarien mit Deichüberströmung  
ist in diesem Projekt nicht vorgesehen. Daher erfolgt eine Anpassung der betreffenden Berei-  
che dahin gehend, dass für alle betrachteten Abflüsse keine Deichüberströmung stattfindet.

Diese Bereiche können anhand der mit den Ländern abgestimmten Deichkronenhöhen (Busch  
und Hammer, 2009; Hatz und Busch, 2011) und der 1-dimensional simulierten, stationären  
Wasserspiegellage eines  $HQ_{100}$  mit der Software FLYS dargestellt und verortet werden. Abb.  
21 stellt die simulierte Wasserspiegellage eines  $HQ_{100}$  und die Deichkronenhöhen im Bereich  
Elbe-km 517-523 dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass der dunkelblau dargestellte Wasser-  
spiegel des  $HQ_{100}$  die in rot abgebildete, linke Deichkronenhöhe zwischen Elbe-km 519,6 und  
519,9 übersteigt.

2D-Modellierung  
der unteren Mittel-  
elbe von Witten-  
berge bis Geest-  
hacht – Pilotmo-  
delle Dömitz bis  
Hitzacker

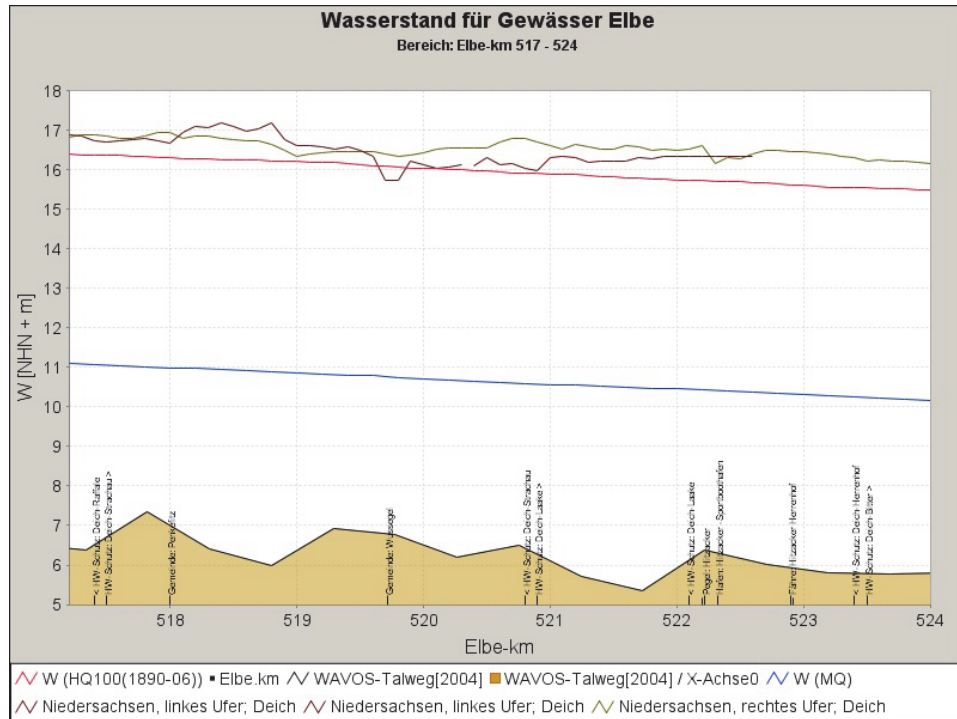


Abb. 21: FLYS-Längsschnitt einer HQ<sub>100</sub> Wasserspiegellage im Bereich Elbe-km 517 - 524

Die bei HQ<sub>100</sub> ohne Deichverteidigungsmaßnahmen überströmten Bereiche wurden zunächst mit FLYS identifiziert und dann anhand von 2-dimensionalen Simulationen mit dem Pilotmodell wie in Abb. 22 anhand der dort in rot dargestellten tiefengemittelten Geschwindigkeitsvektoren nachgewiesen. Man erkennt, dass das Wasser zunächst entlang der Deichlinien strömt, im Zentrum der Abbildung bilden die Strömungsvektoren ein Einströmen von Wasser aus dem Elbehauptschlauch Richtung Norden in das Hinterland ab.

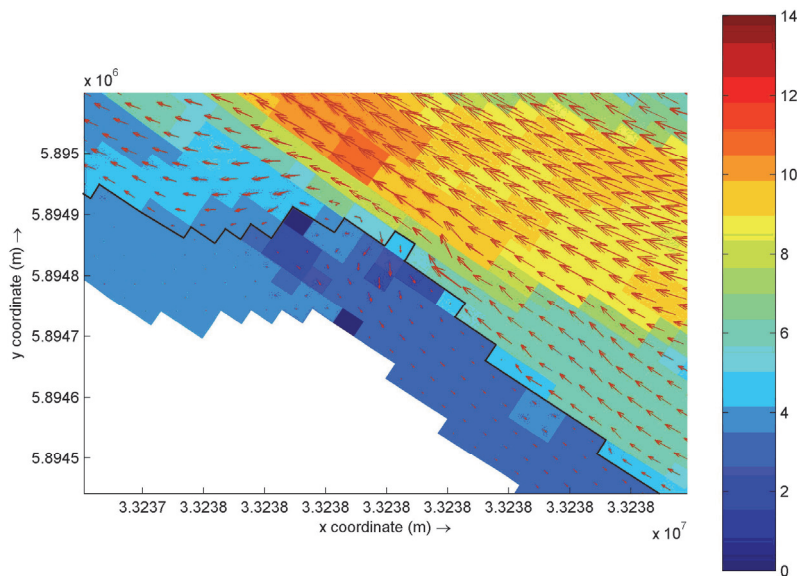


Abb. 22: Strömungsvektoren eines HQ<sub>100</sub> sowie die Fließtiefe (Farbskala) bei Deichüberströmung (Deichlinie in Schwarz)



Um die ungewollte (und auch in der Realität aufgrund von Deichverteidigungsmaßnahmen zunächst nicht zu erwartende) Überströmung der Deiche zu verhindern wird eine pragmatische Lösung angesetzt: Die Deichkronenhöhen der identifizierten Bereiche, an denen bei der Simulation eines  $HQ_{100}$  ein Deichüberströmen auftritt, werden für die Modellrechnungen ab  $HQ_{100}$  auf die fiktive Höhe von 999 m+NHN gesetzt (entspricht einer erfolgreichen Deichverteidigung für alle Abflüsse). Mit Auswahl dieses Deichkronenhöhenwertes ist sichergestellt, dass kein Überströmen der Schutzmaßnahmen an diesen Stellen stattfinden kann und die entsprechenden Bereiche eindeutig und jederzeit reproduzierbar aus dem Modell zu extrahieren sind.

Nach dem Anheben der Deichkronenhöhe in den entsprechenden Bereichen werden die Wasserstände eines  $HQ_{100}$  gekehrt und die Flächen binnenseits der Deiche bleiben trocken.

## 2.3 Vorlandrauheiten

Die Rauheiten der Vorländer werden in den Modellen für verschiedene Rauheitsklassen definiert. Hierbei orientieren sich die gewählten Werte an den Empfehlungen in van Velzen et al. (2003), worin ausführliche Ableitungen für die Rauheiten von Auenvegetation an niederländischen Wasserstraßen zusammengestellt sind. Die flächenhafte Zuordnung der Rauheitsklassen stammt aus den durch die Kooperationspartner und die Biosphärenreservatsverwaltung zur Verfügung gestellten Rauheitskartierungen oder ATKIS-Daten. Rauheitskartierungen spielen in der Pilotmodellstrecke eine untergeordnete Rolle. Wo jedoch Kartierungen vorhanden sind, werden die ATKIS-Daten durch diese überschrieben. Die Übersetzung der ATKIS-Objektart (OBA-Codes) in Rauheitsklassen ist in Tab. 1 gegeben.

In der verwendeten Modellierungssoftware Delft3D werden verschiedene Typen von Rauheitsklassen verwendet, welche sich in ihrer Rauheitswirkung unterscheiden. Der einfachste Typ von Rauheitsklassen verwendet festgelegte Rauheiten nach Nikuradse ( $k$  in [m]). Die entsprechende Zuordnung geht aus Tab. 2 hervor.

Tab. 1: Übersetzung der ATKIS OBA-Codes in Rauheitsklassen

OBA-Code	Umschreibung	Rauheitsklasse
2111	Wohnbaufläche	115
2112	Industrie- und Gewerbefläche	115
2113	Fläche gemischter Nutzung	115
2114	Fläche besonderer funktionaler Prägung	115
2121	Bergbaubetrieb	115
2129	Kläranlage, Klärwerk	115

Tab. 1 (Fortsetzung): Übersetzung der ATKIS OBA-Codes in Rauheitsklassen

OBA-Code	Umschreibung	Rauheitsklasse
2201	Sportanlage	114
2202	Freizeitanlage	1820
2213	Friedhof	114
2227	Grünanlage	1820
2228	Campingplatz	1821
2301	Tagebau, Grube, Steinbruch	114
2314	Absetzbecken, Schlammteich	106
3103	Platz	116
4101	Ackerland	121
4102	Grünland	1201
4103	Gartenland	1822
4104	Heide	1212
4105	Moor, Moos	1802
4106	Sumpf, Ried	1804
4107	Wald, Forst	1244
4108	Gehölz	1823
4109	Sonderkultur	1246
4120	Vegetationslose Fläche	111
4199	Fläche, z. Z. unbestimmbar	101
5101	Strom, Fluss, Bach	102
5102	Kanal (Schifffahrt)	106
5103	Graben, Kanal	106
5112	Binnensee, Stausee, Teich	106
5304	Schleusenkammer	106

Tab. 2: Zuordnung der Rauheitswerte nach Nikuradse  $k$  in [m] zu den Rauheitsklassen

Rauheitsklasse	Bezeichnung	$k$ in [m]
101	Default	0,20
102	Gewässersohle	0,15
106	See / Hafen / Ufer	0,05
111	Kiesbank	0,15
114	befestigt	0,35
115	bebaut	0,40
116	versiegelt (glatt)	0,20
121	Ackerland	0,20

Für die Bewuchsflächen mit Ausnahme der Ackerflächen hingegen werden als Typ sogenannte *trachytopes* verwendet, dies sind Zonen gleicher geschwindigkeits- bzw. wassertiefenabhängiger Rauheit. Dabei kommt die Formulierung von Klopstra et al. (1996) zum Einsatz. Darin werden die Rauheiten in Abhängigkeit von den Bewuchsparametern

- Vegetationshöhe  $h_v$ ,
- Strömungsbeiwert  $c_D$  und
- Bewuchsdichte  $n$

sowie den Strömungseigenschaften

- Wassertiefe  $h$  und
- Geschwindigkeit  $u$

für jede Zelle bestimmt (Deltares, 2011). Die dabei berechneten Chézy-Rauheitswerte  $C$  ergeben sich zu

$$C = \frac{1}{h^{3/2}} \left\{ \begin{aligned} & \frac{2}{\sqrt{2A}} \left( \sqrt{C_3 e^{h_v \sqrt{2A}} + u_{v0}^2} \right) + \\ & \frac{u_{v0}}{\sqrt{2A}} \ln \left( \frac{\left( \sqrt{C_3 e^{h_v \sqrt{2A}} + u_{v0}^2} - u_{v0} \right) \left( \sqrt{C_3 + u_{v0}^2} + u_{v0} \right)}{\left( \sqrt{C_3 e^{2\sqrt{2A}} + u_{v0}^2} + u_{v0} \right) \left( \sqrt{C_3 + u_{v0}^2} - u_{v0} \right)} \right) + \\ & \frac{\sqrt{g(h - (h_v - a))}}{k} \left( (h - (h_v - a)) \ln \left( \frac{h - (h_v - a)}{z_0} \right) - a \ln \left( \frac{a}{z_0} \right) - (h - h_v) \right) \end{aligned} \right\}$$

worin

$$A = \frac{nC_D}{2a}$$

$$C_3 = \frac{2g(h - h_v)}{a\sqrt{2A}(e^{h_v \sqrt{2A}} + e^{-h_v \sqrt{2A}})}$$

$$a = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4E_1^2 k^2 (h - h_v)}{g}}}{\frac{2E_1^2 k^2}{g}}$$

und

$$z_0 = ae^{-F}$$

$$E_1 = \frac{\sqrt{2AC_3} e^{h_v \sqrt{2A}}}{2\sqrt{C_3 e^{h_v \sqrt{2A}} + u_{v0}^2}}$$

$$F = \frac{k\sqrt{C_3 e^{h_v \sqrt{2A}} + u_{v0}^2}}{\sqrt{g(h - (h_v - a))}}$$

sowie

$$a = 0,0227h_v^{0,7}$$

Darin sind  $h$  die Wassertiefe,  $h_v$  die Vegetationshöhe und  $n$  Bewuchsdichte, welche sich aus der Anzahl der Stämme je Quadratmeter  $m$  und dem Stammdurchmesser  $D$  zu  $n = mD$  ergibt.

Ferner wird die Geschwindigkeit innerhalb der Vegetation angenähert durch

$$u_{v0} \sqrt{i}$$

worin  $i$  das Wasserspiegelgefälle ist sowie

$$u_{v0}^2 = \frac{h_v}{\frac{C_D h_v n}{2g} + \frac{1}{C_b^2}}$$

mit  $C_b$  als Rauheit der Sohle unter der Vegetation. Im Fall von nicht-überströmter Vegetation vereinfacht sich die Rauheit zu

$$\frac{1}{C^2} = \frac{C_D n h}{2g} + \frac{1}{C_b^2}$$

Zwischen den Rauheiten nach Chezy  $C$  und Nikuradse  $k$  besteht der Zusammenhang

$$C = 18 \log (12 h/k).$$

Für jede Rauheitsklasse vom Typ *trachytope* sind die Parameter Vegetationshöhe  $h_v$ , Strömungsbeiwert  $c_D$ , Bewuchsdichte  $n$  sowie die Rauheit der Sohle unter der Vegetation  $k_b$  in Anlehnung an van Velzen et al. (2003) festgelegt und in Tab. 3 aufgelistet.

Tab. 3: Zuordnung der Parameter zu den *trachytope*-Rauheitsklassen

Rauheitskl.	Umschreibung	$h_v$ [m]	$n$ [1/m]	$c_D$ [-]	$k_b$ [m]
1201	Grünland (landwirtschaftlich)	0,06	45	1,8	0,1
1202	Grasland (natürlich)	0,10	12	1,8	0,1
1212	Buschwerk, Heide	0,56	0,23	1,8	0,1
1221	Unterholz	0,35	0,25	1,8	0,1
1233	Dickicht	5,00	0,17	1,5	0,4
1241	Hartholzwald (forstwirtschaftlich)	10,00	0,011	1,5	0,3
1244	Hartholz (Auwald)	10,00	0,023	1,5	0,4
1245	Weichholz (Auwald)	10,00	0,028	1,5	0,6
1246	Sonderkultur (z. B. Obstplantage)	3,00	0,024	1,5	0,2

Darüber hinaus gibt es noch Rauheitsklassen, die sich aus der Kombination zweier oder mehrerer Rauheitsklassen aus Tab. 1 , Tab. 2 und Tab. 3 ergeben. Diese sind in Tab. 4 aufgelistet.

Tab. 4: Kombinierte Rauheitsklassen

Rauheitsklasse	Anteil 1 (Klasse)	Anteil 1 [%]	Anteil 2 (Klasse)	Anteil 2 [%]
1801	1221	75	106	25
1802	1245	5	1801	95
1804	1233	75	106	25
1820	1202	75	1241	25
1821	1201	75	1241	25
1822	121	95	1233	5
1823	1202	25	1244	75
1824	102	50	1823	50

In jedem fünften Zeitschritt der hydraulischen Berechnung (ein Zeitschritt entspricht 6 s in den Pilotmodellen, die Zeitschrittweite kann sich infolge numerischer Belange im Gesamtmodell ändern) werden die Rauheitswerte der Zellen, in den die Rauheit in Form von *trachytopes* definiert ist, anhand des Wasserstandes in den betreffenden Zellen aktualisiert.

## 2.4 Rauheiten im Hauptgerinne

Im Hauptgerinne kommt ein weiterer Typ von Rauheitsklassen zum Einsatz. Hier wird die Rauheit ebenfalls in Abhängigkeit von der Wassertiefe berechnet, jedoch vereinfacht nach van Rijn (1984). Nach dessen ursprünglichem Ansatz setzt sich die Rauheit der Gewässersohle zusammen aus einem Anteil der Kornrauheit  $k_{90}$  sowie einem empirisch ermittelten Anteil, in dem die Rauheit aus Länge  $L_b$  und Höhe  $h_b$  von Transportkörpern (Dünen) berechnet wird.

$$k = k_{90} + 1,1h_b \left(1 - e^{-25h_b / L_b}\right)$$

Van Rijn beschreibt zwischen Transportkörperhöhe beziehungsweise –länge und Wassertiefe folgende Proportionalitäten:

$$h_b \sim h^{0,7}$$

$$L_b \sim h$$

Dadurch – und nach Vernachlässigung des Anteils der Kornrauheit – kann man in vereinfachter Form

$$k = Ah^{0,7} \left(1 - e^{-Bh^{-0,3}}\right) \quad [1]$$

schreiben, mit  $A$  und  $B$  als Kalibrierparameter. Nach diesem Ansatz wird die Rauheit im Hauptgerinne abschnittsweise durch Kalibrierung ermittelt. Die erhaltenen Rauheiten sind abhängig von der Wassertiefe, entsprechend dem Anwachsen der Formrauheit (Transportkörper) mit zunehmendem Abfluss bzw. Wassertiefe. Abb. 23 zeigt die Nikuradse-Rauheit nach Gleichung [1] in Abhängigkeit von der Wassertiefe für beispielhafte Werte von  $A$  und  $B$ . Ausgehend von  $A = 0,2$  und  $B = 2,5$  zeigt sich, dass bei Verdoppelung bzw. Halbierung der jeweiligen Kalibrierparameter der Parameter  $A$  deutlich sensitiver ist (blaue bzw. grüne Linie in Abb. 23). Die Änderungen der Nikuradse-Rauheit infolge Verdoppelung bzw. Halbierung von  $B$  sind deutlich geringer ausgeprägt. Der Verlauf der Kurven ähnelt sich für Änderungen der Parameter  $A$  und  $B$ . Es wird daher für die Kalibrierung nur der Parameter  $A$  variiert und für  $B$  der Delft3D-Standardwert von 2,5 beibehalten.

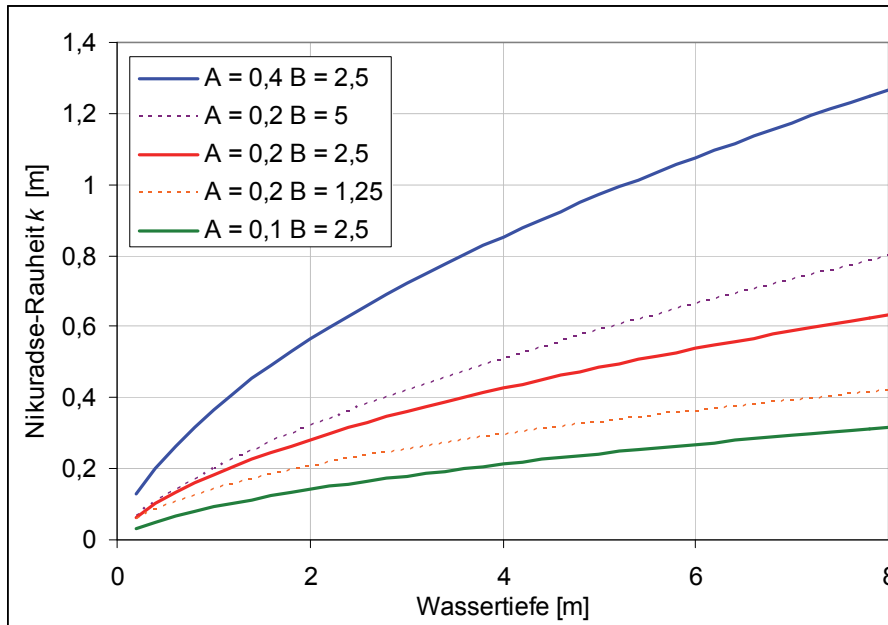


Abb. 23: Nikuradse-Rauheit in Abhängigkeit von der Wassertiefe für beispielhafte Werte von  $A$  und  $B$

## 2.5 Kalibrierung

Die Kalibrierung der Modelle erfolgt, indem die Rauheitswerte im Hauptabflussquerschnitt abschnittsweise variiert werden, bis die optimale Übereinstimmung von gemessenen Wasserständen aus Fixierungen und modellierten Wasserspiegellagen erreicht ist. Die Abschnitte ergeben sich aus der Betrachtung des Wasserspiegellängsgefälles für das Hochwasser 2011, indem an markanten Gefälleänderungspunkten ein Abschnittswechsel eingefügt wird. Zusätzlich werden an Pegeln Abschnittsgrenzen gesetzt. Abb. 24 zeigt die sich ergebenden Abschnitte für die Pilotmodellstrecke. Die Abschnittsgrenzen sind außerdem in Tab. 5 aufgeführt.

Als Kalibrierungsereignisse werden zunächst eine Fixierung um Mittelwasser aus dem Jahr 2005 (MW2005) und das Hochwasser vom Januar 2011 (HW2011) unabhängig voneinander verwendet (Tab. 6). Hierdurch ergeben sich unterschiedliche ereignisabhängige Rauheitswerte im Hauptabflussquerschnitt. Anschließend wird der einheitliche Parametersatz von Rauheitswerten im Hauptabflussquerschnitt ermittelt, mit dem für beide Ereignisse MW2005 und HW2011 die bestmögliche Übereinstimmung von Fixierungen und modellierten Wasserspiegellagen erreicht wird.

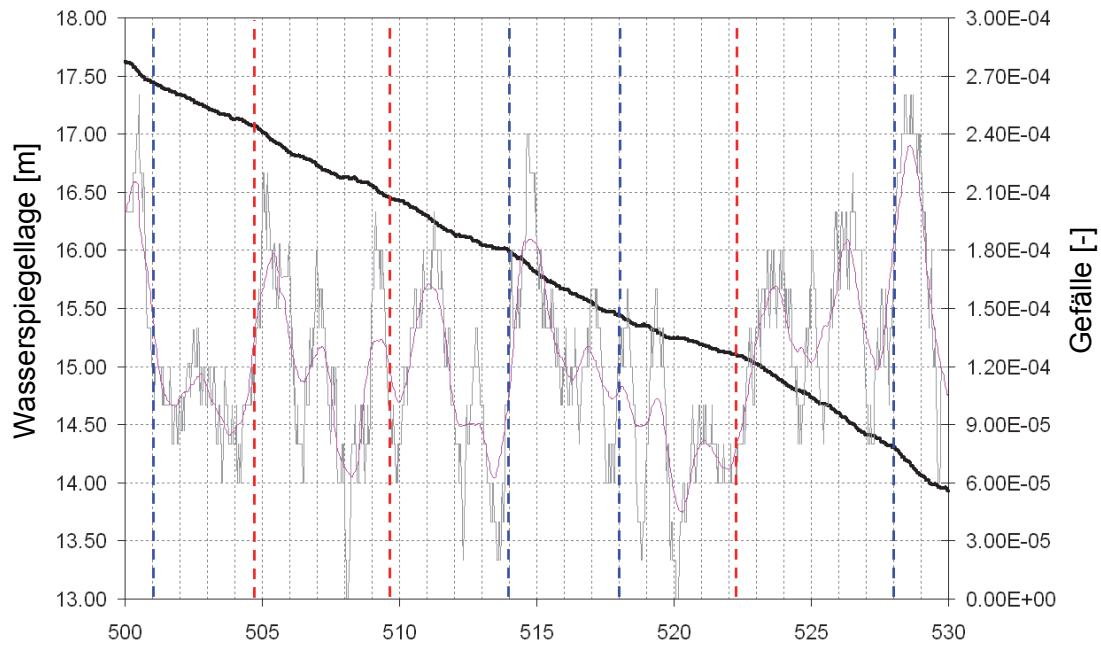


Abb. 24: Abschnitte für die Pilotmodellstrecke, unterteilt an Gefällewechselln für das Hochwasser 2011 (blau gestrichelte Linien) und Pegeln (rot gestrichelte Linien)

Tab. 5: Abschnitte konstanter Rauheiten im Hauptgerinne

Abschnitt	von Elbe-km	bis Elbe-km
1	496,3	501,0
2	501,0	504,7
3	504,7	509,7
4	509,7	514,0
5	514,0	518,0
6	518,0	522,2
7	522,2	528,0
8	528,0	532,0

Tab. 6: Randbedingungen der Kalibrierungsereignisse

Ereignis	Abfluss bei Elbe-km 496,3	Wasserspiegellage bei Elbe-km 532
HW2011	3550 m <sup>3</sup> /s	13,72 m+NHN
MW2005	492 m <sup>3</sup> /s	8,56 m+NHN

Die Ermittlung der Kalibrierungsgrößen erfolgt mit Hilfe von OpenDA ([www.openda.org](http://www.openda.org)) – einem Werkzeug zur automatisierten Iteration von Parametern.

Im ersten Schritt des ersten Kalibrierungsdurchgangs wurden wie oben beschrieben jeweils ein Satz von Hauptgerinne-Rauheitswerten unabhängig voneinander für die Ereignisse MW2005 und HW2011 ermittelt. Die Übereinstimmung der damit simulierten Wasserspiegellagen mit den Fixierungen kann als sehr gut bezeichnet werden. In Abb. 25 und Abb. 26 sind – wie in der gesamten folgenden Auswertung – die Differenzen (Abweichungen) entlang der Gewässerachse jeweils an den Hektometerpunkten dargestellt.

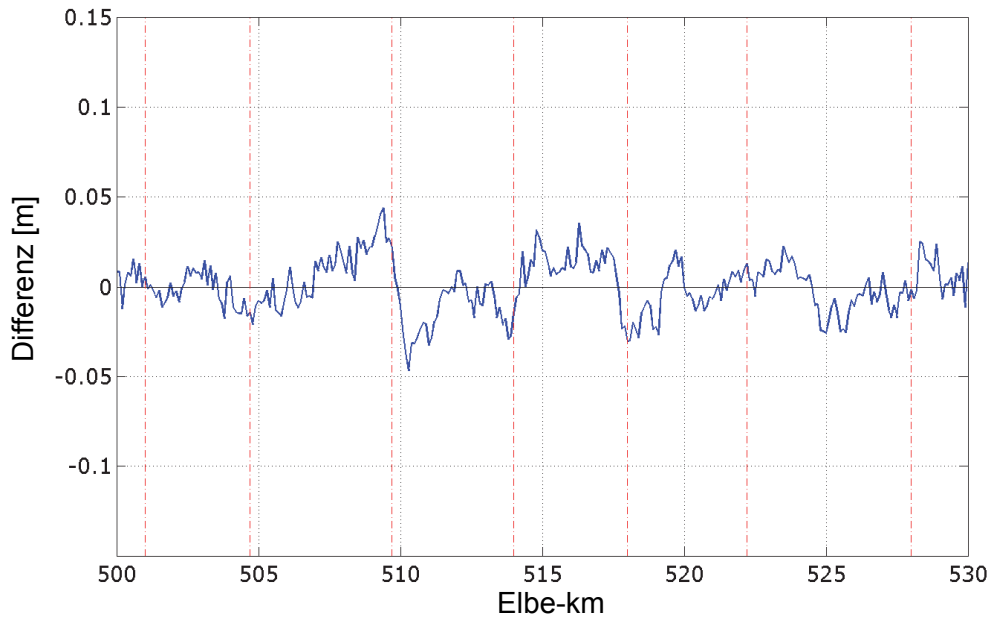


Abb. 25: Differenz von modellierter Wasserspiegellage minus Fixierung im ersten Kalibrierungsdurchgang für das HW2011

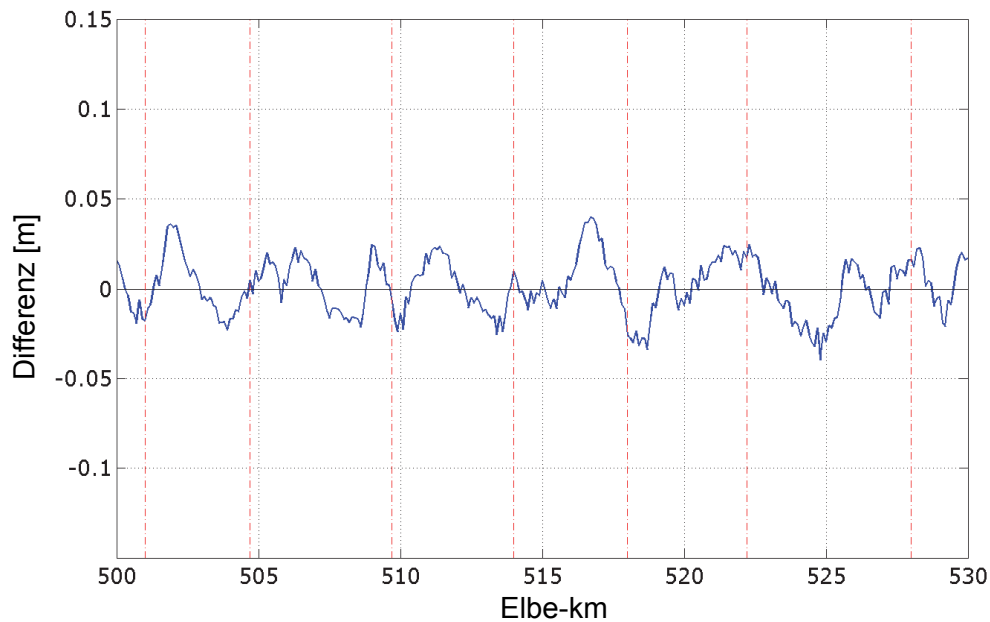


Abb. 26: Differenz von modellierter Wasserspiegellage minus Fixierung im ersten Kalibrierungsdurchgang für das MW2005

Um ereignisunabhängige Rauheitsparameter zu erhalten, erfolgte die Kalibrierung anschließend für beide Ereignisse kombiniert. Dabei wurden in jedem Iterationsschritt zwei Rechenläufe mit den Randbedingungen der jeweiligen Ereignisse und identischen Rauheiten durchgeführt mit dem Ziel, die jeweiligen Abweichungen beider Läufe insgesamt iterativ zu minimieren. Mit den damit ermittelten Rauheiten wurden abermals jeweils die Ereignisse MW2005 und HW2011 simuliert. Dabei zeigt sich, dass im Fall des MW2005 die berechne-



te Wassertiefe mit den kombiniert ermittelten Rauheiten bei weitem zu groß ermittelt wurde (Abb. 27), für das HW2011 jedoch bei weitem zu gering (Abb. 28).

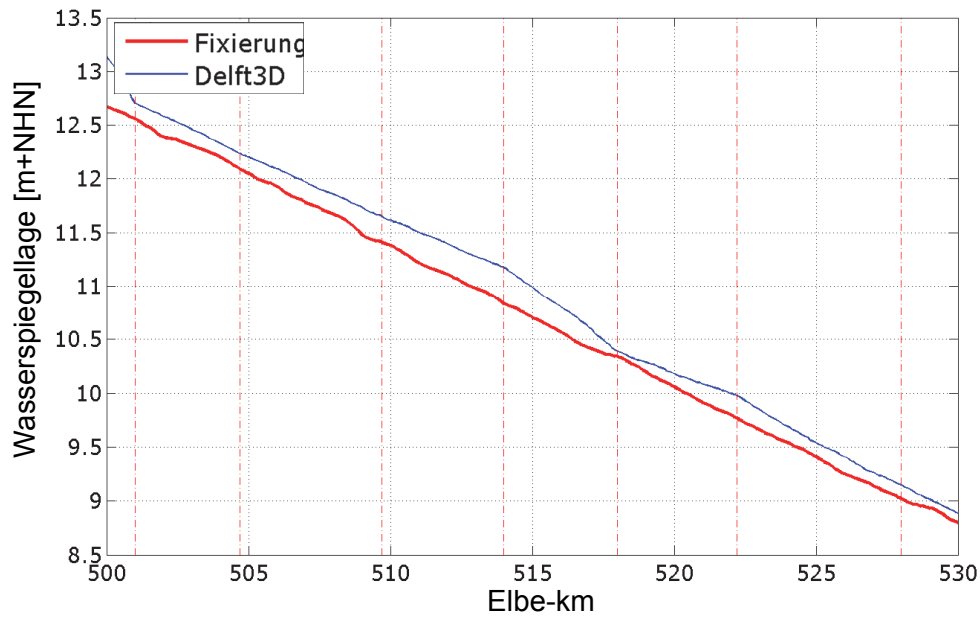


Abb. 27: Modellierte Wasserspiegellage (blau) und Fixierung (rot) für das MW2005 im ersten Kalibrierungsdurchgang (kombiniert für MW2005 und HW2011 ermittelte Rauheiten)

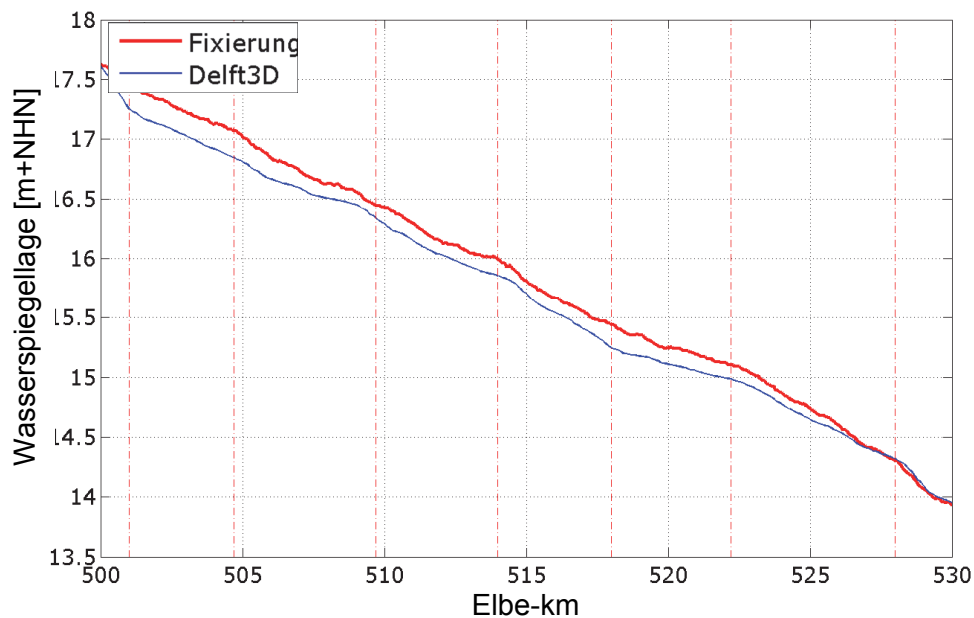


Abb. 28: Modellierte Wasserspiegellage (blau) und Fixierung (rot) für das HW2011 im ersten Kalibrierungsdurchgang (kombiniert für MW2005 und HW2011 ermittelte Rauheiten)

Daraus folgt, dass die Hauptgerinnerauheit in diesem ersten Kalibrierungsdurchgang mit OpenDA unrealistisch hoch eingestellt wurde. Um die großen Wasserspiegelgefälle bei Hochwasser zu simulieren, war zunächst (unrealistisch) viel Rauheit im Hauptgerinne erforderlich. Anders ausgedrückt verfügten Vorland und Bühnenfelder nicht über hinreichend Rauheit, um im Hauptgerinne zu realistischen (geringeren) Rauheiten zu gelangen, die dann für Hoch- und Mittelwasserabfluss eine gute Reproduktion der Fixierungen ermöglicht. Der Vergleich von Luftbildern mit den ATKIS-Daten (vgl. Abschnitt 2.3) ergab, dass offensichtlich das Fehlen von Bewuchs in Bühnenfeldern im ATKIS-Datensatz zu der Unterschätzung der dortigen Rauheit und in der Folge zu den zu hohen Hauptgerinnerauheiten führte.

Als Lösung wurden manuell aus den Orthofotos Bereiche mit ausgeprägtem (Baum-)bewuchs in Bühnenfeldern und auf Bühnen identifiziert und die dort vorhandenen Rauheitsklassen angepasst (ersetzen von Rauheitsklasse 102 durch 1824, Abb. 29).

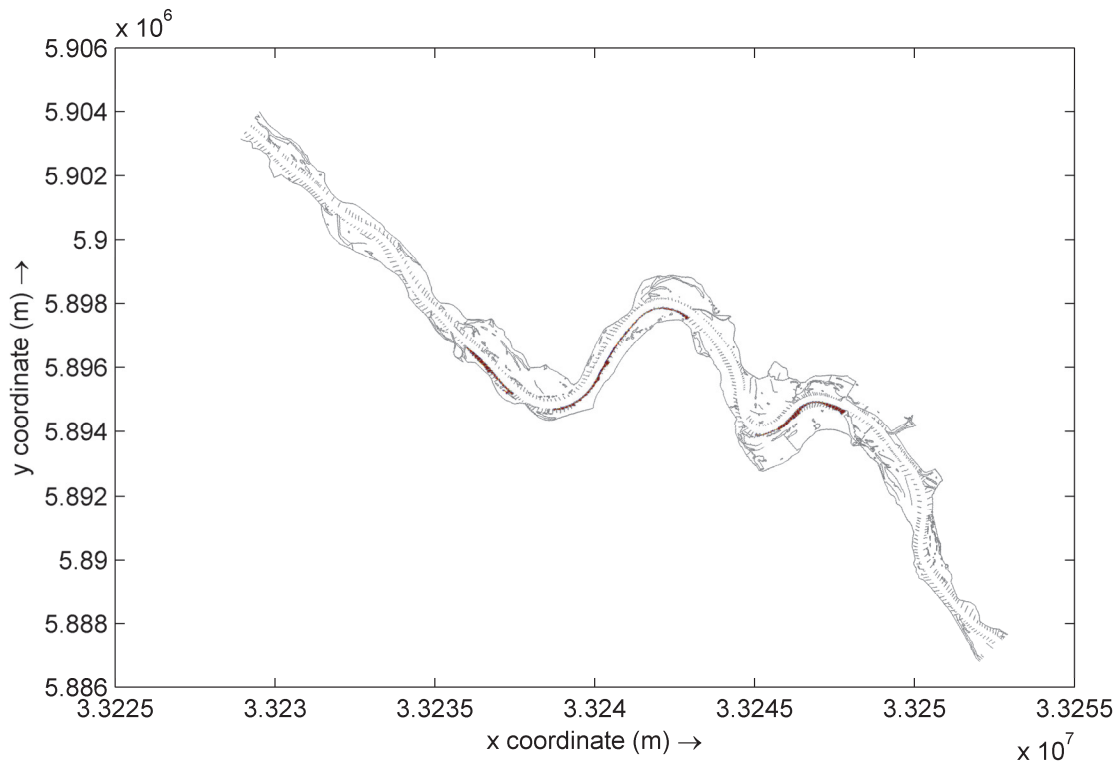


Abb. 29: Gebiete, in denen die Bühnenfeldrauheit anhand der Orthofotos angepasst wurde (farblich hinterlegt)

Mit dem angepassten Rauheitsdatensatz wurde ein zweiter Kalibrierungsdurchgang durchgeführt, für den deutlich bessere Übereinstimmungen von simulierten Wasserspiegellagen und gemessenen Wasserständen aus Fixierungen erreicht wurden. Die somit ermittelten Werte für den Kalibrierparameter  $A$  (siehe Gleichung [1]) und alle fünf mittleren Gitterauflösungen sind in Tab. 7 zusammengestellt.

Die Wasserspiegellagen von Fixierung und Modellierung sind am Beispiel des 25 m-Gitters in Abb. 30 (MW2005) und Abb. 31 (HW2011) grafisch dargestellt. Deutlich erkennbar ist die Verbesserung im zweiten Kalibrierungsdurchgang gegenüber dem Zustand ohne Bewuchs in

Buhnenfeldern und auf Buhnen (Abb. 27 bzw. Abb. 28). Die Tendenz des Modells, die Wasserspiegellage für das MW2005 zu überschätzen und für das HW2011 zu unterschätzen, ist jedoch – wenn auch deutlich weniger stark ausgeprägt – noch vorhanden. Die verbliebenen Abweichungen sind durch die in Kapitel 6 beschriebenen Unsicherheiten begründet.

Tab. 7: *A*-Werte (siehe Gleichung [1]) der Abschnitte im 2. Kalibrierungsdurchgang für die fünf Gitterauflösungen

mittlere Gitter- auflösung	Kalibrier- durchgang	Abschnitt	Abschnitt	Abschnitt	Abschnitt	Abschnitt	Abschnitt	Abschnitt	Abschnitt
		1	2	3	4	5	6	7	8
		km 496,3	km 501	km 504,7	km 509,7	km 514	km 518	km 522,2	km 528
		km 501	km 504,7	km 509,7	km 514	km 518	km 522,2	km 528	km 531,9
15x15 m	2	0,416	0,045	0,083	0,058	0,151	0,026	0,116	0,117
20x20 m	2	0,247	0,050	0,078	0,053	0,139	0,020	0,121	0,113
25x25 m	2	0,301	0,063	0,059	0,050	0,130	0,021	0,115	0,114
30x30 m	2	0,001	0,065	0,116	0,048	0,160	0,036	0,147	0,114
40x40 m	2	0,640	0,032	0,042	0,033	0,142	0,015	0,115	0,100

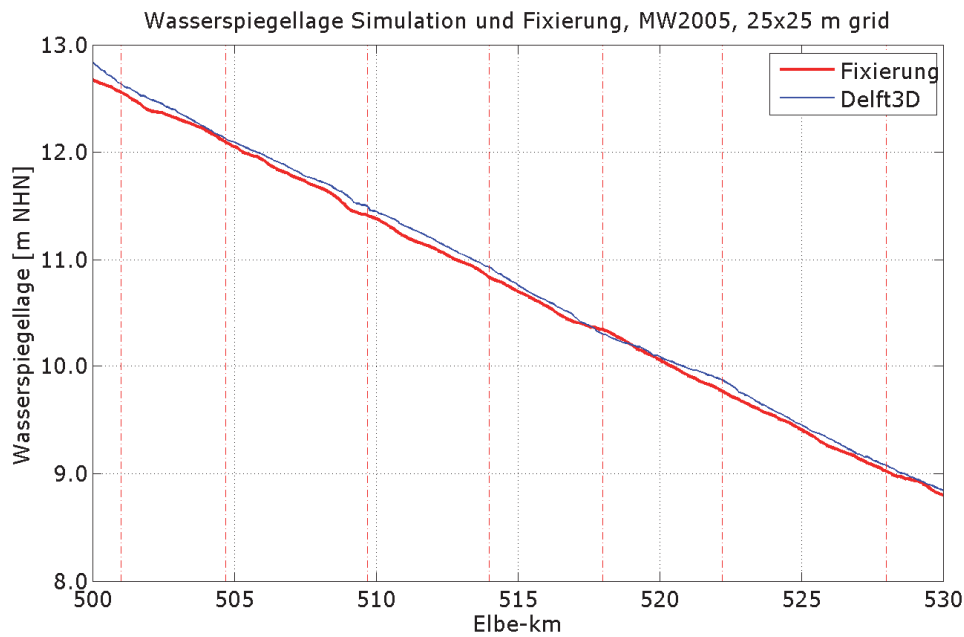


Abb. 30: Modellierte Wasserspiegellage (blau) und Fixierung (rot) für das MW2005 im zweiten Kalibrierungsdurchgang (gemittelte Rauheiten) auf dem 25 m-Gitter

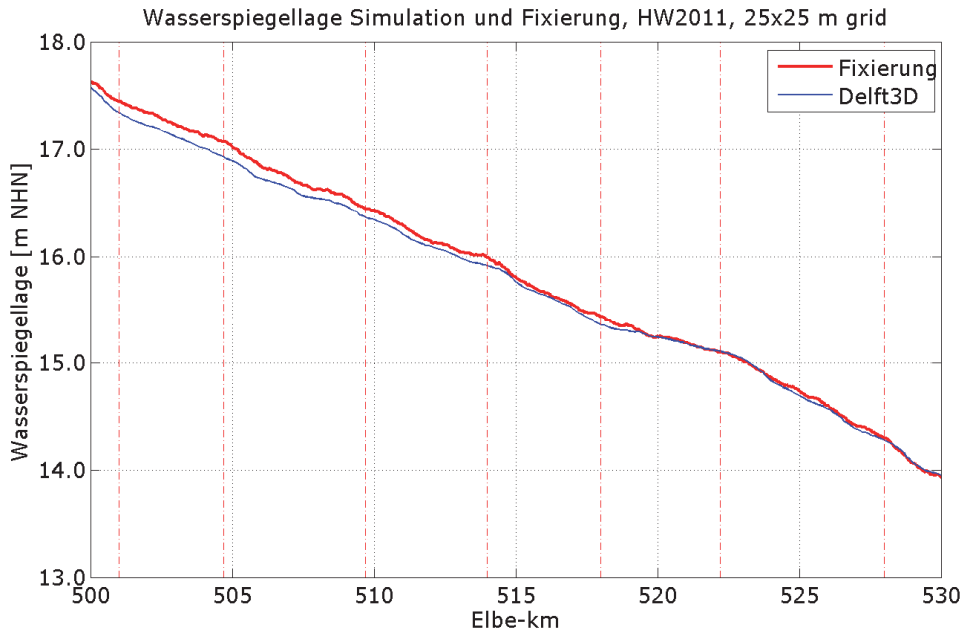


Abb. 31: Modellierte Wasserspiegellage (blau) und Fixierung (rot) für das HW2011 im zweiten Kalibrierungsdurchgang (gemittelte Rauheiten) auf dem 25 m-Gitter

Vergleicht man die Ergebnisse der Kalibrierung für die fünf Gitterauflösungen untereinander, fällt auf, dass die Ergebnisse aller fünf Modelle nahe beieinander liegen, mit Ausnahme der mittleren Auflösung von 30 m, für die besonders die Ergebnisse für das Ereignis HW2011 (Abb. 33) deutlich von den anderen Modellen abweichen. Die scheinbar bessere Kalibrierung für dieses Modell liegt an den stark abweichenden Rauheitswerten, die zudem besonders ausgeprägte Sprünge von Abschnitt zu Abschnitt (vgl. Tab. 7) aufweisen. Diese besondere Rauheits-Parametrisierung des 30 m-Modells wird sich im Laufe der Validierung (siehe folgender Abschnitt) als weniger geeignet erweisen.

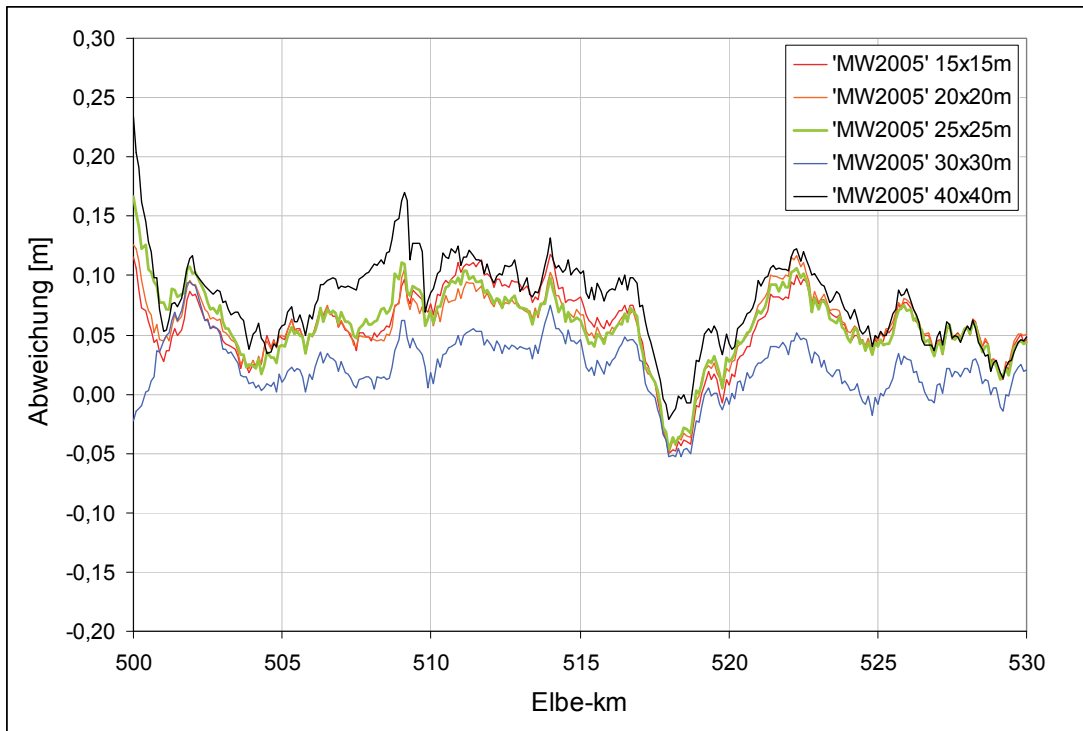


Abb. 32: Vergleich der Modellabweichungen für das MW2005 für alle fünf Gitterauflösungen

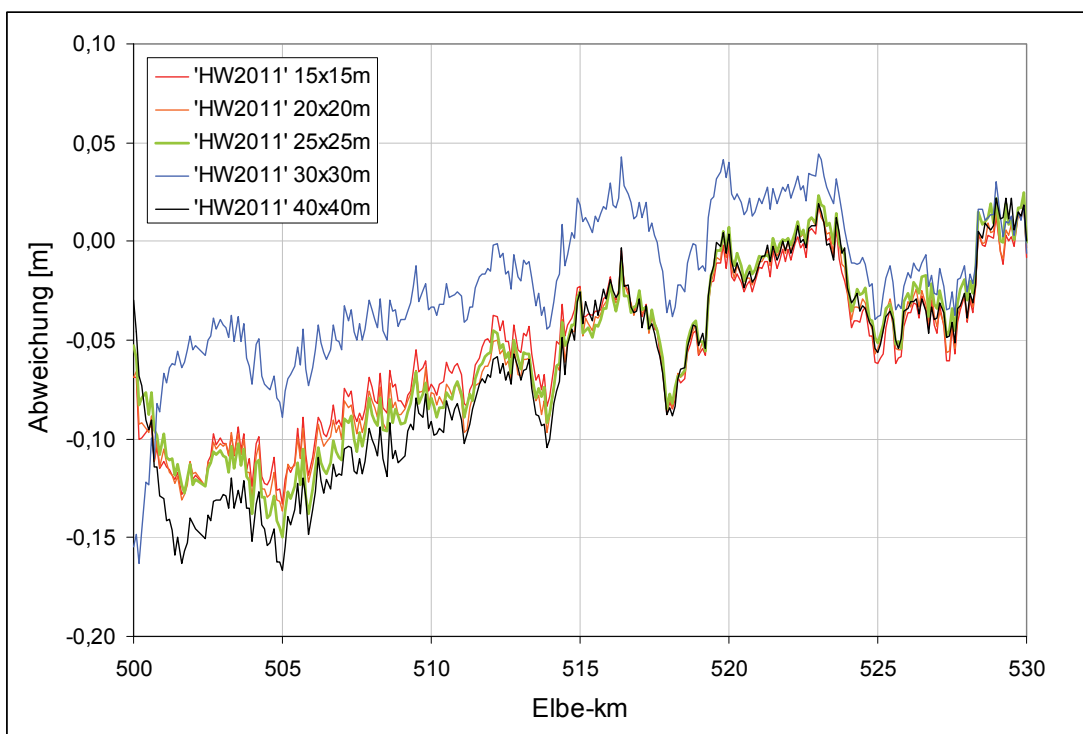


Abb. 33: Vergleich der Modellabweichungen für das HW2011 für alle fünf Gitterauflösungen

Die mittleren Abweichungen der Kalibrierungsergebnisse entlang der Gewässerachse liegen für die Gitterauflösungen von 15 bis 25 m zwischen 5 und 6 cm (Abb. 34). Das Modell mit 30 m Gitterweite hat mittlere Abweichungen von nur 2 cm, erweist sich bei der Validierung jedoch als problematisch. Das 40 m-Modell weist mittlere Abweichungen auf von gut 6 cm (HW2011) bis etwa 8 cm (MW2005). Die Wasserspiegellagen und die Abweichungen für alle fünf Gitterauflösungen und beide Kalibrierungsereignisse sind im Anhang zusammengestellt.

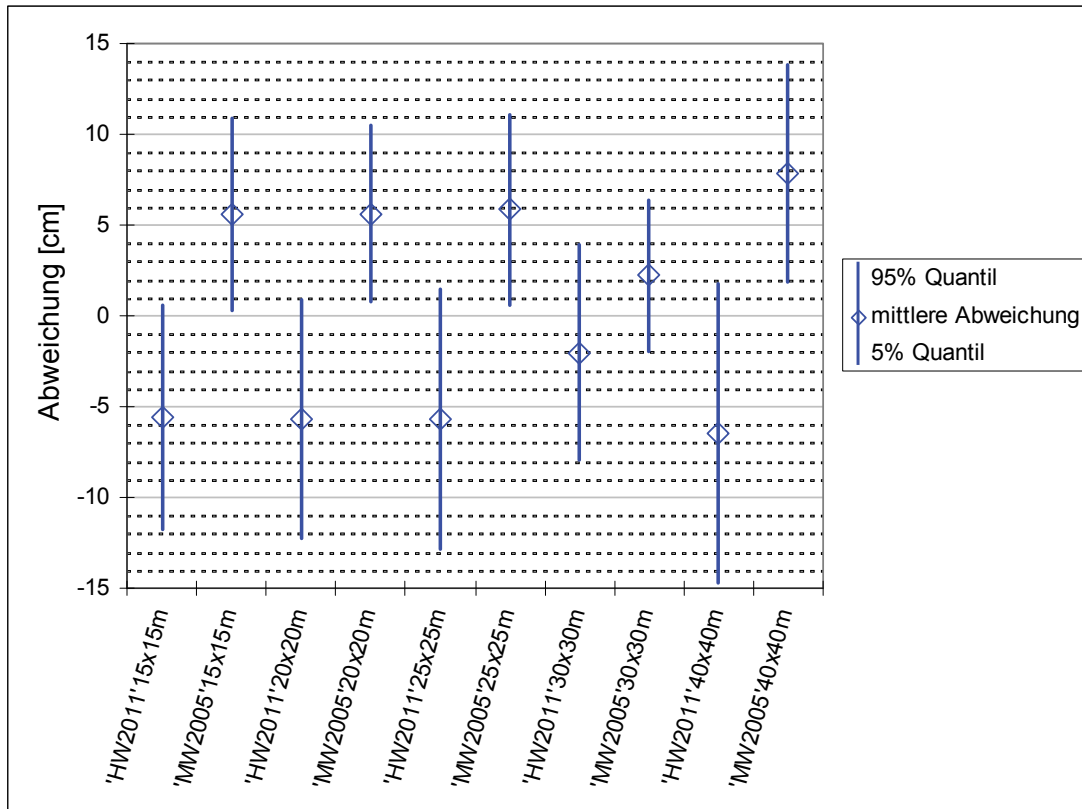


Abb. 34: mittlere Modellabweichung und 5 % bzw. 95 %-Quantil der Abweichungen für alle fünf Gitterauflösungen

## 3. Validierung

### 3.1 Validierung der Wasserspiegellagen

Die Validierung erfolgt anhand zweier weiterer Fixierungen: am Hochwasser 2006 (HW2006) und einer Fixierung um Mittelwasser aus dem Jahr 2007 (MW2007). Die Randbedingungen sind in Tab. 8 zusammengestellt.

Tab. 8: Randbedingungen der Validierungsereignisse

Ereignis	Abfluss bei Elbe-km 496,3	Wasserspiegellage bei Elbe-km 532
HW2006	3592 m <sup>3</sup> /s	13,66 m+NHN
MW2007	986 m <sup>3</sup> /s	10,08 m+NHN

Die Wasserspiegellagen des HW2006 liegen knapp unterhalb vom HW2011 bei leicht höheren Abflüssen. Bei Beibehaltung der sonstigen Modellparameter, insbesondere der Rauheiten, ist demnach mit einer besseren Übereinstimmung der Simulation mit der Fixierung als für das Kalibrierungsereignis HW2011 zu rechnen, wo die Wasserstände unterschätzt werden.

Die Fixierung um Mittelwasser MW2007 unterscheidet sich von der Fixierung MW2005 wesentlich dadurch, dass die Buhnen nun durchweg überströmt sind. Dieses Ereignis stellt somit eine Validierung der Buhnenimplementierung dar. Die Wasserspiegellagen aller Kalibrierungs- und Validierungsereignisse sowie die Buhnenhöhen sind in Abb. 35 dargestellt.

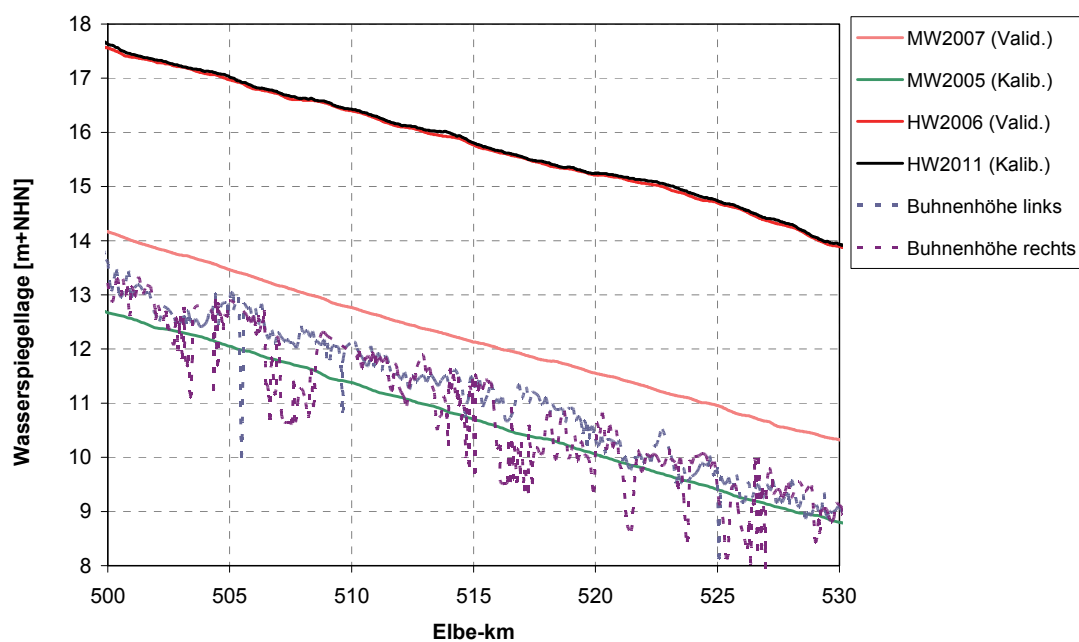


Abb. 35: Wasserspiegellagen aller Kalibrierungs- und Validierungsereignisse und Buhnenhöhen

Als Ergebnisse der Validierung sind die mittleren Abweichungen der Wasserspiegellagen der Kalibrierung für beide Ereignisse und alle fünf Gitterauflösungen in Tab. 9 zusammengefasst. Die Abbildungen der Wasserspiegellagen und Differenzen sind im Anhang aufgeführt. Es ist festzustellen, dass das Ereignis HW2006 wie erwartet noch besser reproduziert wird als das HW2011. Die Wasserspiegellagen für das MW2007 werden durchweg überschätzt und liegen am oberen Rand der akzeptablen Abweichung (mit Ausnahme des 30 m-Gitters, für das eine deutliche Überschätzung vorliegt). Als Ursache kann auf die zugrunde liegenden Unsicherheiten und Fehlerquellen verwiesen werden (Kapitel 6).

Tab. 9: Abweichungen der Wasserspiegellagen [cm] der Validierung für beide Ereignisse und alle fünf Gitterauflösungen. Positive Werte bedeuten höhere simulierte Wasserspiegel als fixiert.

Validierungs- ereignis	Gitter- weite [m]	Abweichungen in den Abschnitten (Elbe-km) [cm]								mittlere Abwei- chung [cm]
		< 501	501,0- 504,7	504,7- 509,7	509,7- 514,0	514,0- 518,0	518,0- 522,2	522,2- 528,0	> 528	
HW2006	15	-0,13	-5,22	-3,43	-0,34	0,02	0,47	0,15	-0,60	-1,18
HW2006	20	0,15	-5,49	-3,99	-1,46	-0,32	0,80	0,58	-0,37	-1,36
HW2006	25	1,21	-5,80	-4,87	-1,23	-0,33	1,08	1,08	0,30	-1,29
HW2006	30	-2,36	0,30	0,73	3,45	4,62	4,52	2,59	0,37	2,34
HW2006	40	0,57	-8,16	-6,22	-2,30	-0,41	0,88	0,58	0,20	-2,10
MW2007	15	4,04	4,20	6,51	9,88	4,72	0,92	4,22	4,89	5,05
MW2007	20	5,27	4,80	5,93	8,38	4,34	2,06	5,05	5,50	5,16
MW2007	25	7,76	4,75	5,62	8,62	4,58	2,36	5,07	5,57	5,32
MW2007	30	9,38	15,10	13,44	15,71	13,13	8,80	7,22	6,09	11,40
MW2007	40	5,87	1,58	5,72	9,72	6,20	3,19	5,39	5,46	5,45

Beim Vergleich der Modellabweichungen der fünf Auflösungen untereinander fällt wie bei der Kalibrierung das Modell mit 30 m mittlerer Gitterweite auf. Hier sind die Ergebnisse der Validierung für das MW2007 deutlich schlechter als für die anderen Auflösungen (Abb. 36) was in der besonderen Rauheitsparametrisierung dieses Modells begründet ist (vgl. Abschnitt 2.5).



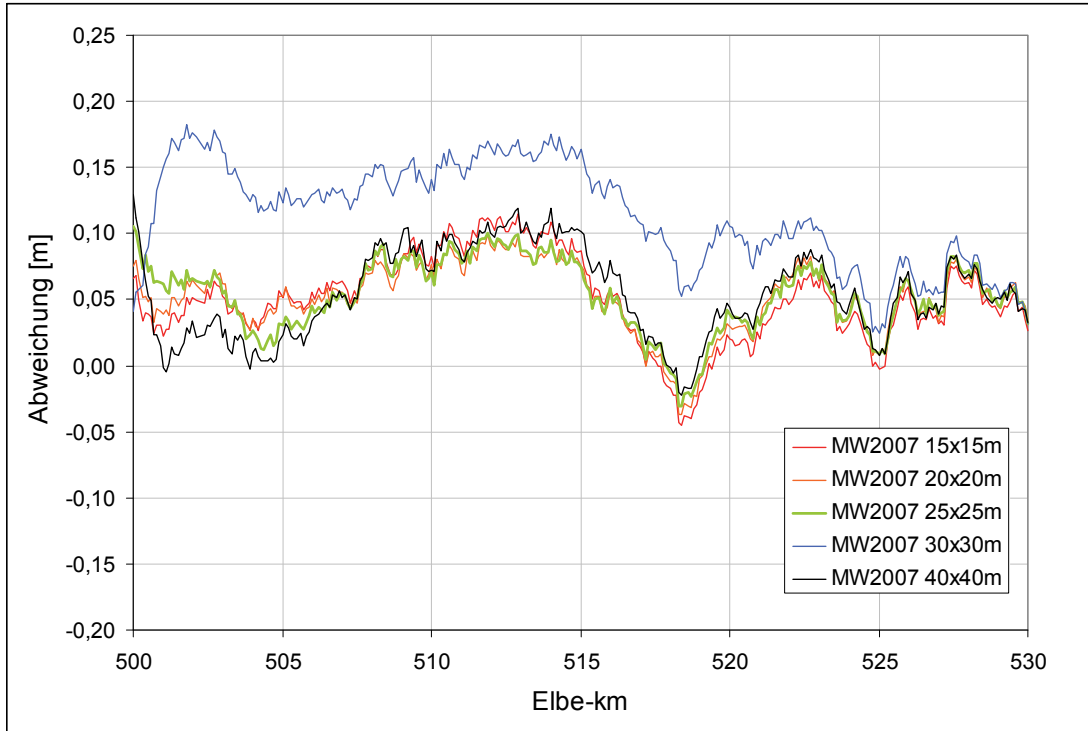


Abb. 36: Vergleich der Modellabweichungen für das MW2007 für alle fünf Gitterauflösungen

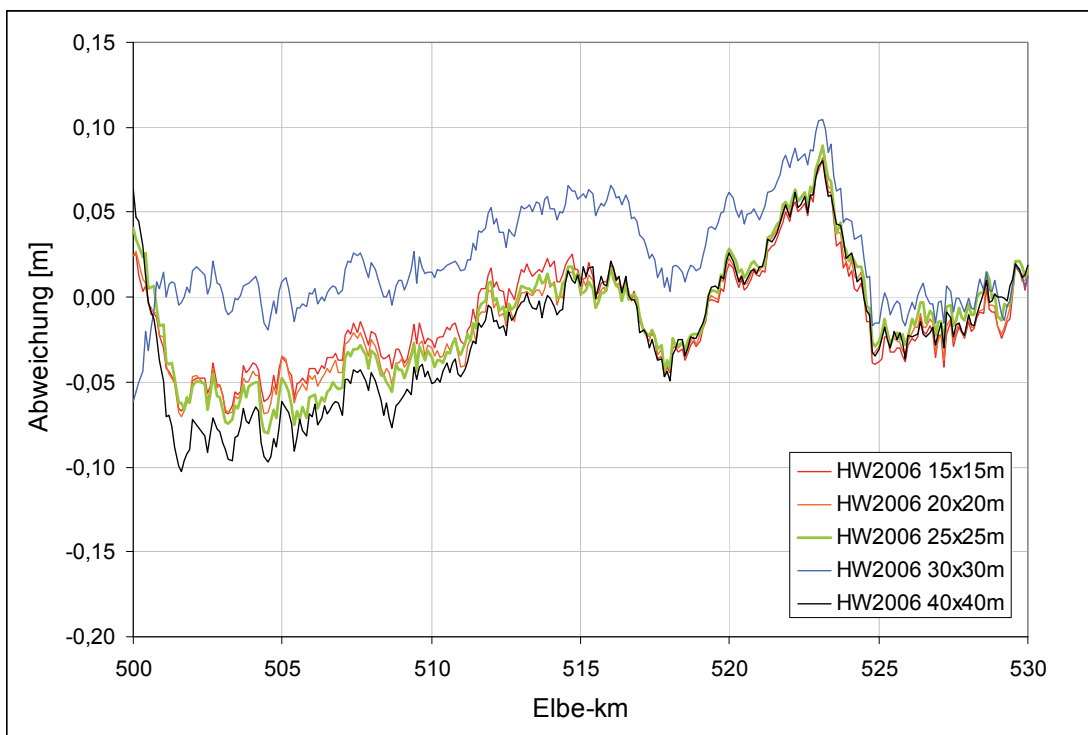


Abb. 37: Vergleich der Modellabweichungen für das HW2006 für alle fünf Gitterauflösungen

### 3.2 Validierung der Fließgeschwindigkeiten

Die Fließgeschwindigkeiten werden anhand von Messungen bei Hochwasser im April 2006 (HW2006) sowie um Mittelwasser im Oktober 2007 (MW2007) validiert. Es stehen Messungen in drei Querprofilen (Abb. 38) zur Verfügung sowie Messungen entlang der Gewässerachse. Die Validierung der Fließgeschwindigkeiten erfolgt für die Gitterauflösungen von 15 m, 25 m und 40 m.

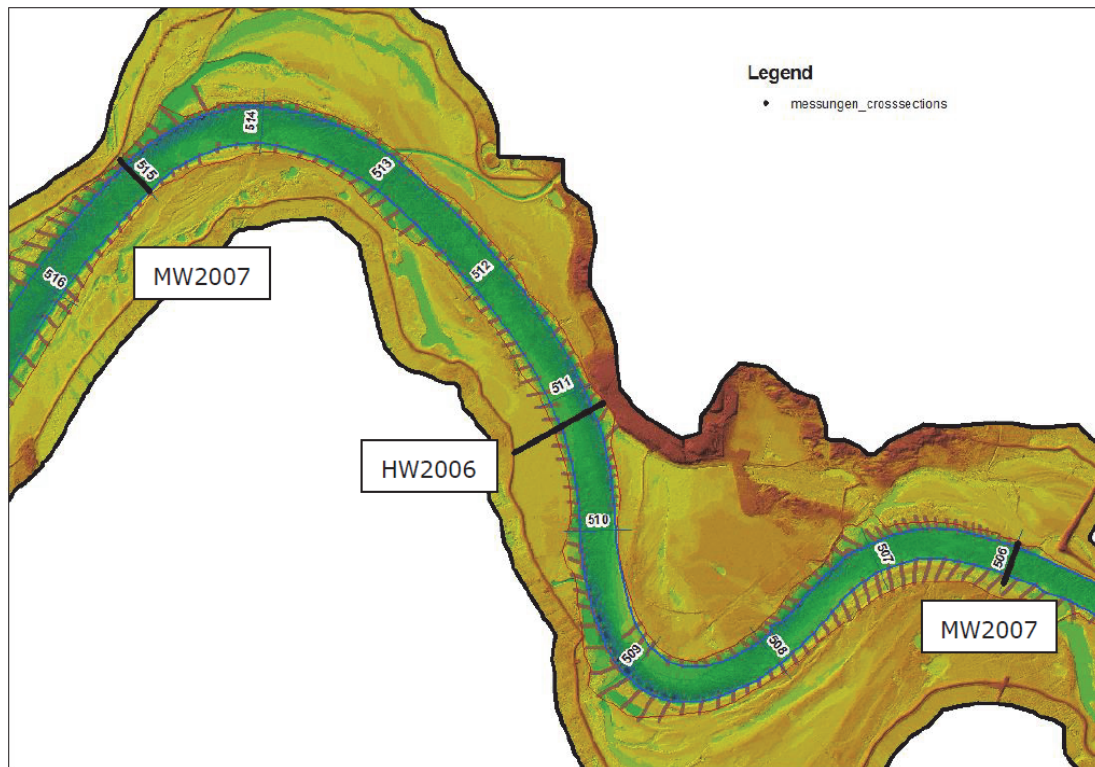


Abb. 38: Lage der Querprofile der Geschwindigkeitsmessungen zur Validierung

Abb. 39 zeigt die in der Natur entlang der Gewässerachse gemessenen Geschwindigkeiten beim HW2006 und die dazugehörigen simulierten Geschwindigkeiten. Das generelle Muster der Werte stimmt dabei gut überein, jedoch sind die modellierten Geschwindigkeiten im Mittel um 0,15 m/s höher. Abb. 40 zeigt den entsprechenden Vergleich für das MW2007, hier sind die Beträge der Abweichungen noch geringer.

Als mögliche Ursachen für die bestehenden Abweichungen kommen in Frage:

- abweichende Abflüsse während der Messung
- Unterschiedliche Aufteilungen in Hauptabflussquerschnitt und Vorland (jedoch sind auch in einem sehr schmalen Abschnitt mit kaum Vorland bei Elbe-km 529 die Abweichungen vorhanden).

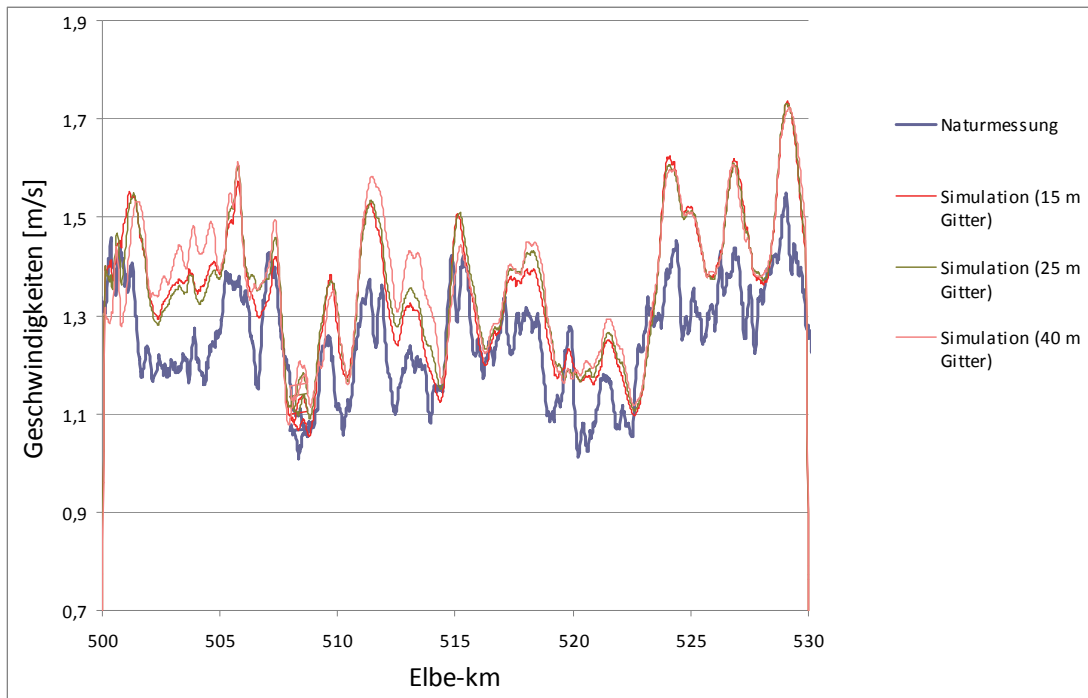


Abb. 39: Geschwindigkeiten im Längsschnitt in Natur und Modell beim HW2006

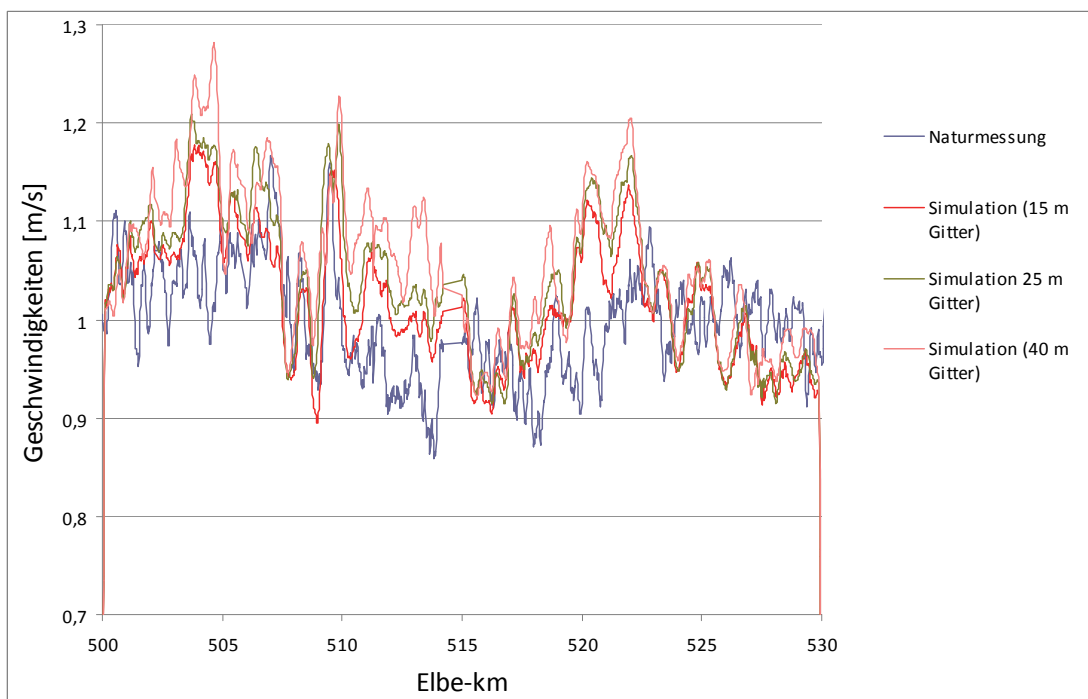


Abb. 40: Geschwindigkeiten im Längsschnitt in Natur und Modell beim MW2007

Beim Vergleich der Geschwindigkeitsmessungen in den Querprofilen sind die dazugehörigen Abflüsse vergleichbar ( $Q_{\text{Natur}} = 3577 \text{ m}^3/\text{s}$  bzw.  $Q_{\text{Modell}} = 3592 \text{ m}^3/\text{s}$ ) und entfallen somit als Fehlerquelle. Die gemessenen Geschwindigkeiten unterscheiden sich dennoch in gewisser Weise von den Modellierungsergebnissen (Abb. 41): im Hauptabflussquerschnitt sind die in Natur gemessenen Geschwindigkeiten homogener und insgesamt niedriger als in den Model-

lierungen. Im linken Vorland sind die modellierten Geschwindigkeiten hingegen geringer. Das Sohlprofil wird mit den Geschwindigkeiten parallel gemessen und kann prinzipiell vom Profil des Modells abweichen (u. A. wegen der aktuellen Morphologie, vgl. auch Abschnitt 6.1). Abb. 42 zeigt die Höhenlagen der Sohle bei der Naturmessung sowie in den drei Modellen unterschiedlicher Gitterauflösung, welche sich im Bereich starker Gefälle durchaus unterscheiden, jedoch die Unterschiede im Vorland nicht erklären können.

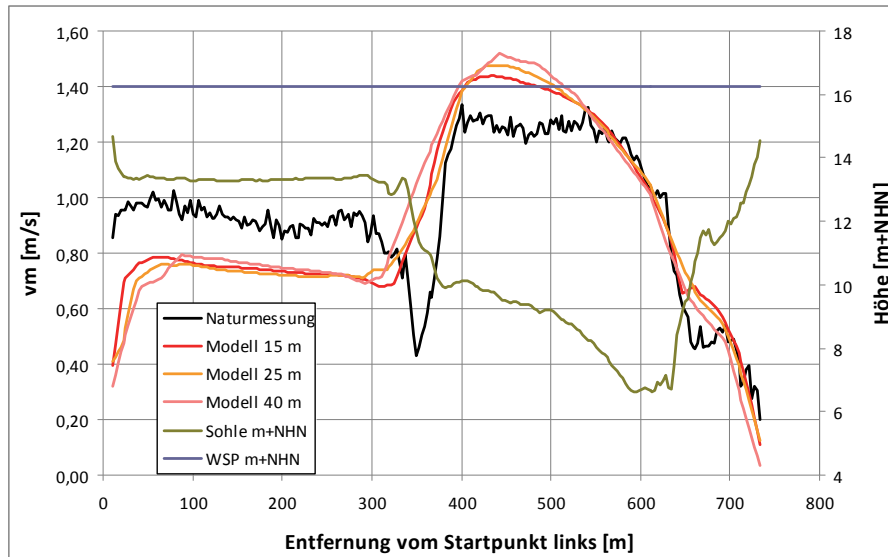


Abb. 41: Geschwindigkeiten im Querprofil Elbe-km 510,8 beim HW2006

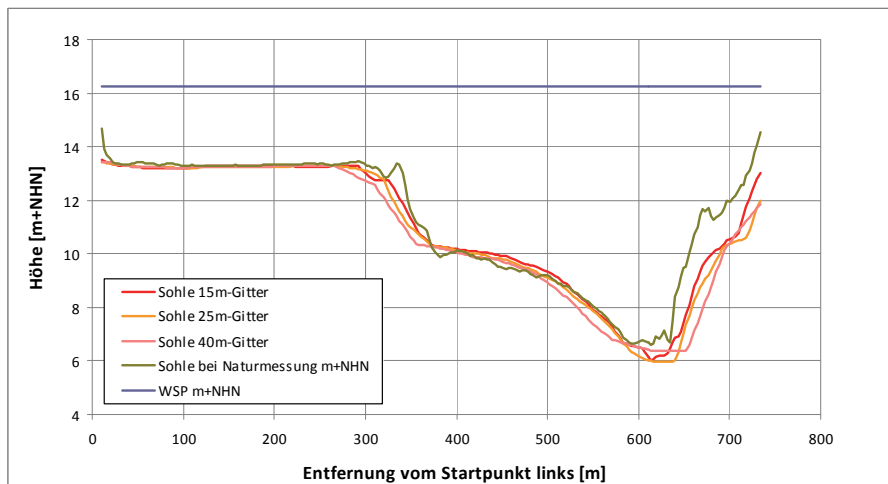


Abb. 42: Sohlenlagen im Querprofil Elbe-km 510,8 beim HW2006

Die Darstellungen für die Messungen beim MW2007 erfolgen analog in Abb. 43 bis Abb. 46. Die Übereinstimmung zwischen Modellierung und Naturmessung ist für das Mittelwasserereignis besser als für das Hochwasser. Die Unterschiede sind auf die Unsicherheiten bezüglich der Rauheiten (vgl. Abschnitt 6.2) sowie der Naturmessungen (Abschnitt 6.4) zurückzuführen. Auch weitere modelltechnische Ursachen, z. B. beim Ansatz für Wirbelviskosität sowie dem numerisches Lösungsschema können vermutet werden. Diese können hier jedoch nicht weiter vertieft werden. Die erhaltene Abbildungsqualität wird als zufrieden stellend betrachtet

und gibt ein Maß für die erwartbaren Modellierungsunsicherheiten bezüglich der Geschwindigkeiten.

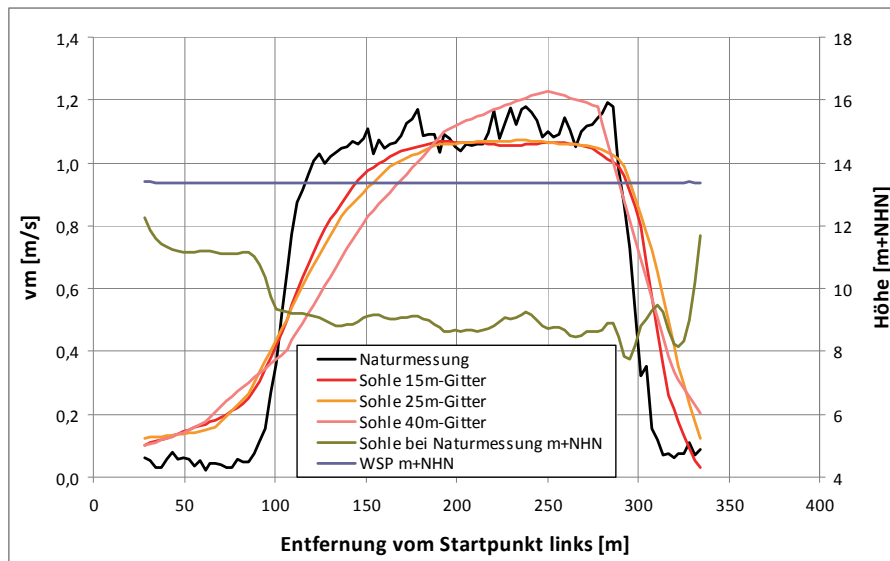


Abb. 43: Geschwindigkeiten im Querprofil Elbe-km 506 beim MW2007

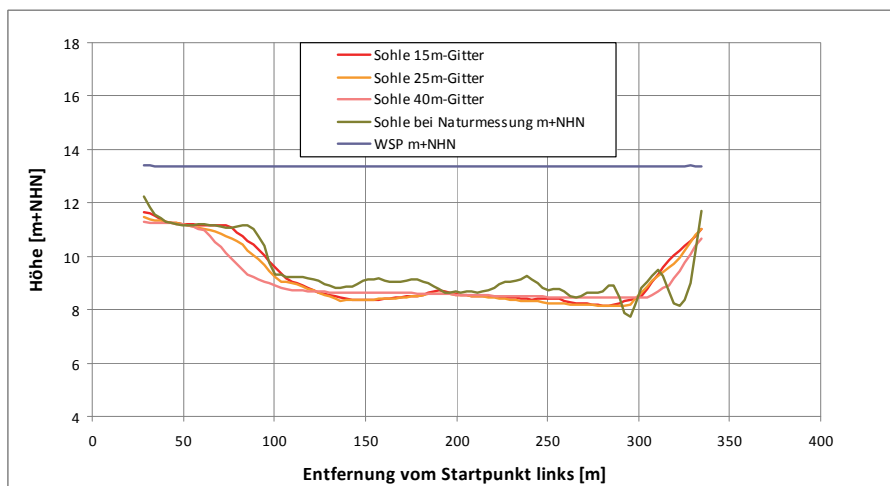


Abb. 44: Sohlenlagen im Querprofil Elbe-km 506 beim MW2007

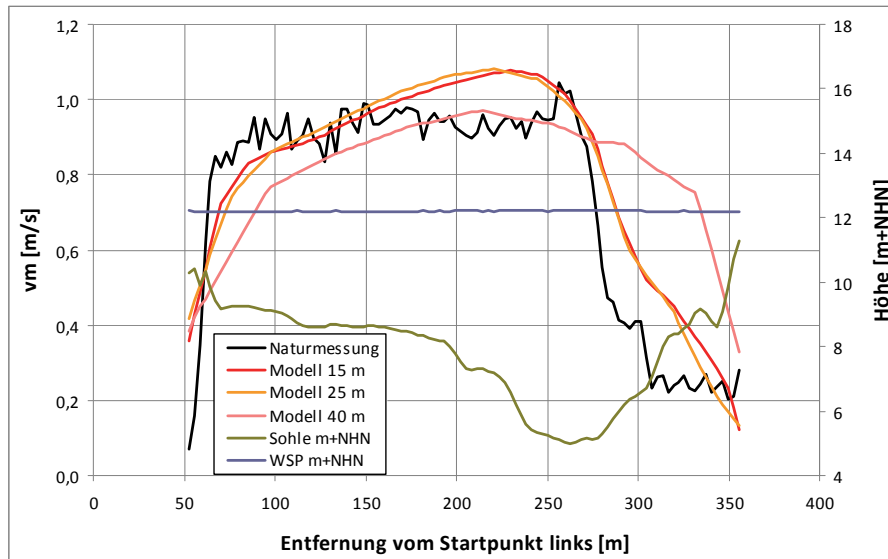


Abb. 45: Geschwindigkeiten im Querprofil Elbe-km 515 beim MW2007

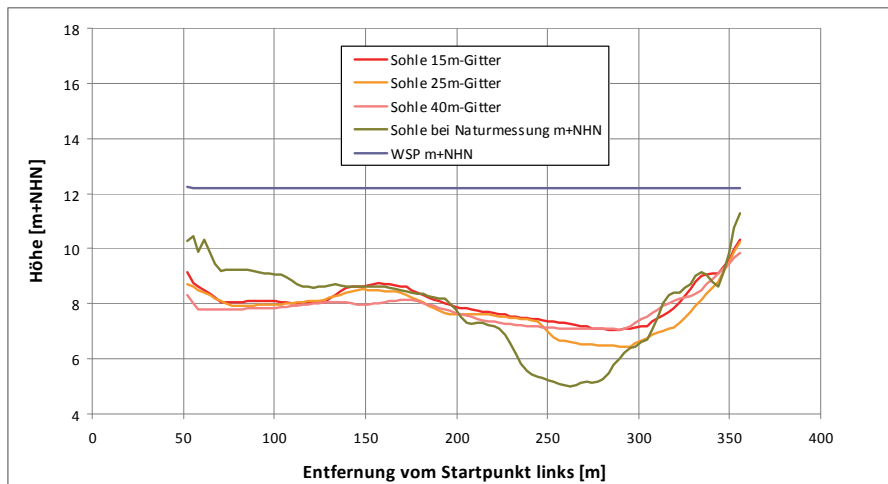


Abb. 46: Sohlenlagen im Querprofil Elbe-km 515 beim MW2007

### 3.3 Fazit aus Kalibrierung und Validierung hinsichtlich der Modellauswahl

Die Modelle – mit Ausnahme der Variante mit 40 m-Gitterauflösung – haben bei der Kalibrierung akzeptable Abweichungen von den fixierten Wasserspiegellagen gezeigt (Abb. 34). Das Modell mit 30 m mittlerer Gittergröße zeigte hingegen bei der Validierung (Tab. 9, Abb. 36) eine deutliche geringere Anpassungsgüte als die anderen Auflösungen. Bei der Validierung der Fließgeschwindigkeiten zeigt sich, dass die Modellabweichungen mit größer werdender Modellauflösungen tendenziell steigen. Dies betrifft vor Allen das 40 m-Modell, während die Abweichungen zwischen den Auflösungen 15 m und 25 m noch gering sind (vgl. z. B. Abb. 39, Abb. 43, Abb. 45).

Folglich sind die beiden Gitter mit 30 m und 40 m mittlerer Auflösung als weniger geeignet zur Erreichung der Modellierungsziele zu bezeichnen. Mit der von der Arbeitsgruppe am 14.02.2013 in Hannover festgelegten mittleren Modellauflösung von 25 m wurden hingegen vergleichbar gute Kalibrierungs- und Validierungsergebnisse erreicht wie mit den feiner aufgelösten Pilotmodellen. In Anbetracht der Rechenzeiterparnis ist diese Auflösung daher für die Verwendung im Gesamtmodell zu favorisieren, wenn (wie in Kapitel 4 gezeigt wird), die Abbildung der geplanten Maßnahmen damit möglich ist.

## 4. Durchführung beispielhafter Lastfallberechnungen

### 4.1 Wasserstand und Strömungsvektoren bei HQ<sub>100</sub>

Das Pilotmodell mit der mittleren Rechengitterauflösung von 30 m<sup>1</sup> wurde eingesetzt, um Wasserstände und Strömungsvektoren im Falle eines HQ<sub>100</sub> zu berechnen. Die verwendeten Randbedingungen für HQ<sub>100</sub> und den Wasserstand am unteren Modellrand des Pilotmodells im Ist-Zustand sind:

$$\begin{aligned} \text{HQ}_{100} (\text{Elbe-km } 496.1) &= 4496 \text{ m}^3/\text{s}; \\ \text{W}_{\text{HQ}_{100}} \text{ Ist-Zustand (Elbe-km } 531.9) &= 14.68 \text{ m +NHN} \end{aligned}$$

Diese entstammen früheren 1-dimensionalen Wasserspiegellagenberechnungen der BfG für stationäre Abflusszustände und wurden aus dem FLYS-Datensatz der Elbe (Stand 25.02.2013) abgeleitet. Weitere Informationen sind Busch und Hammer (2009) zu entnehmen.

Die mit dem 2D-Modell ermittelten Strömungsvektoren für das HQ<sub>100</sub> sind in Abb. 47 im Überblick für die Elbestrecke zwischen km 497 und 531 farblich abgestuft dargestellt. Detailabbildungen der ermittelten Strömungsfelder für HQ<sub>100</sub> für jeweils ca. 5 km lange Streckenabschnitte zwischen km 499 und 530 sind zusätzlich im Anhang zusammengestellt.

---

<sup>1</sup> Zum Zeitpunkt der Berechnungsdurchführung stand das später favorisierte Modell mit 25 m-Auflösung noch nicht zur Verfügung.



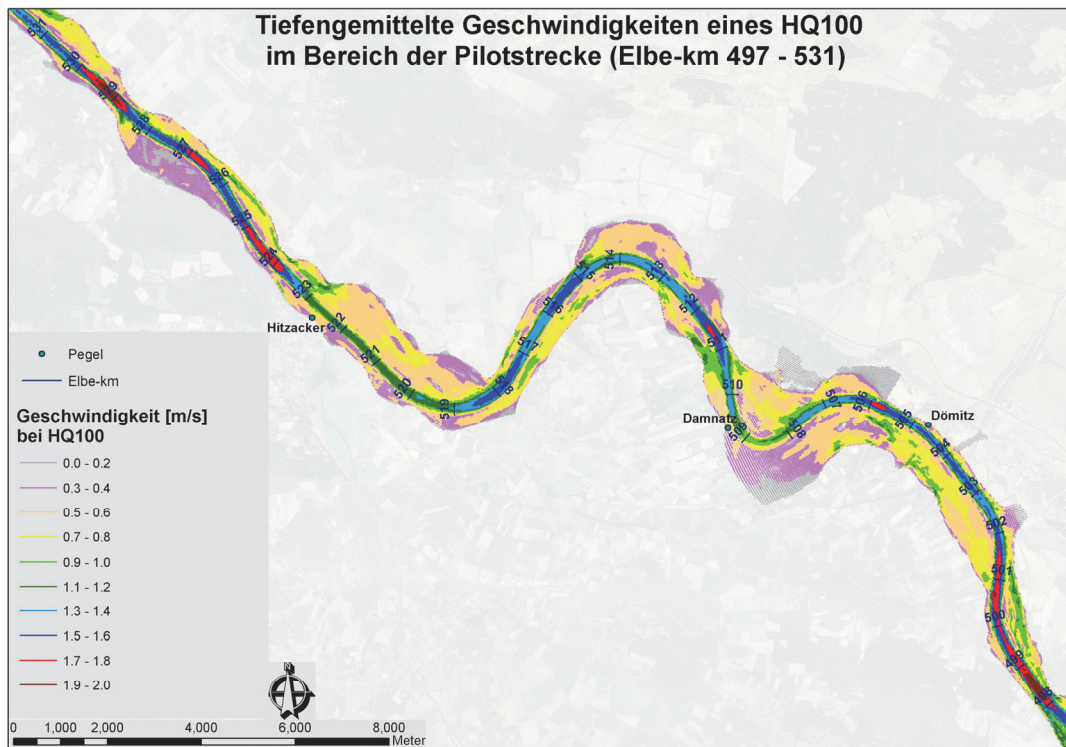


Abb. 47: Strömungsgeschwindigkeiten bei HQ<sub>100</sub>, gerechnet auf dem 30-m Rechengitter

## 4.2 Abschätzung der Rauheitsänderung zu „grüner Wiese“

Der Einfluss des Bewuchses auf die Wasserspiegellagen bei einem HQ<sub>100</sub> in der Elbe wird aus dem Vergleich des Ist-Zustandes mit der fiktiven Situation, dass sämtlicher Bewuchs durch Gras ersetzt wird, deutlich. Dabei werden alle sonstigen Rauheitsflächen (versiegelte Flächen, Gewässer) unverändert gelassen, jedoch der Bewuchs des Modells zu Gras gesetzt. Dieser Modellzustand erhält im Folgenden die Bezeichnung „Grüne Wiese“. Es wird wie in Abschnitt 4.1 das Pilotmodell mit der mittleren Rechengitterauflösung von 30 m verwendet. Für die Ermittlung der unteren Randbedingung im Zustand „Grüne Wiese“ wurde zunächst ein Zwischenzustand mit der ursprünglichen unteren Wasserstandsrandbedingung im Ist-Zustand sowie den Rauheiten entsprechend dem Zustand „Grüne Wiese“ gerechnet (in Abb. 48 als braune Linie dargestellt). Die dabei festgestellte mittlere Wasserstandsabsenkung von 38 cm im oberen, von der unteren Randbedingung nahezu unbeeinflussten Modellbereich (km 496,3 bis 514,1) wurde anschließend auf den unteren Modellrand übertragen. Es ergibt sich für die untere Randbedingung im Zustand „Grüne Wiese“ somit ein Wasserstand:

$$W_{\text{HQ100 Grüne Wiese (Elbe-km 531.9)}} = 14.30 \text{ m +NHN}$$

In Abb. 48 sind die mit dem 2D-Modell ermittelten Wasserspiegellagen im Ist-Zustand als blaue Linie sowie im Zustand „Grüne Wiese“ als grüne Linie dargestellt. Die Differenz der Wasserspiegellagen zwischen Ist-Zustand und dem Zustand „Grüne Wiese“ ist als rote Linie enthalten und auf die sekundäre (rechte) Y-Achse zu beziehen. Wie der Abb. 48 entnommen werden kann, ergeben sich in der Pilotstrecke (km 500 – 530) für den 100-jährlichen Abfluss der Elbe Wasserstandsunterschiede zwischen 37 cm und 55 cm, wenn der heutige Bewuchs im

Elbevorland zwischen Dömitz und Hitzacker vollständig durch Gras ersetzt würde. Die Wasserstandsdifferenzen zwischen Ist-Zustand und „Grüne Wiese“ sind in Abb. 49 zusätzlich flächig dargestellt.

Damit werden die Ergebnisse der 1-dimensionalen Modellierung aus Busch und Hammer, 2009 (siehe dort Abb. 24) im Wesentlichen bestätigt. In der damaligen Berechnung wurden im gleichen Elbeabschnitt bei Änderung des Ist-Zustandes hin zu wasserstandsunabhängigen Rauheiten von  $k = 0,015$  m Wasserstandsdifferenzen von ca. 0,5 bis 0,6 m errechnet.

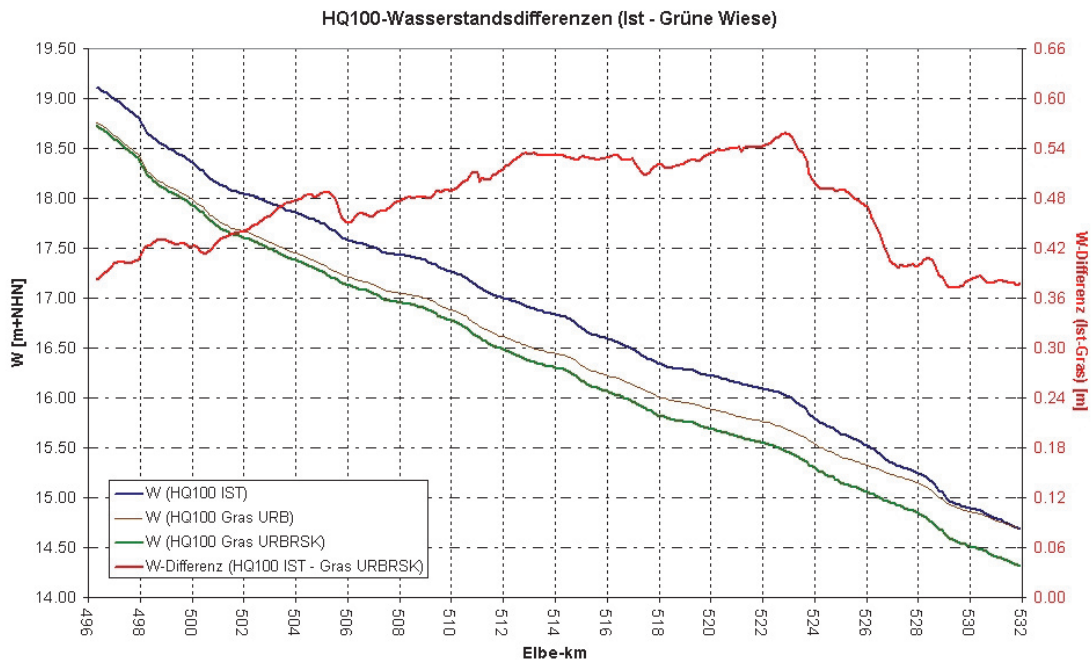


Abb. 48: Berechnete Wasserspiegellagen für HQ<sub>100</sub> und Wasserspiegeldifferenzen Ist-Zustand minus „Grüne Wiese“

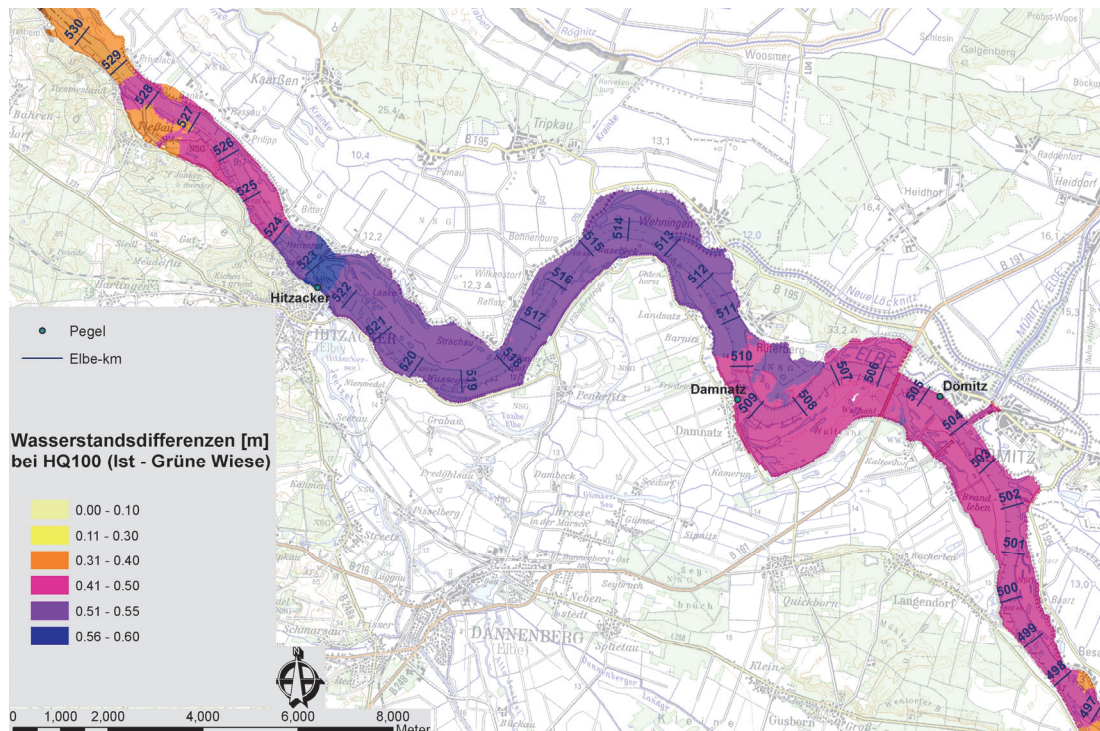


Abb. 49: Wasserstandsdifferenzen zwischen den Zuständen mit Vorlandrauheiten im Ist-Zustand und „Grüne Wiese“ bei HQ<sub>100</sub>

## 4.3 Berücksichtigung von Maßnahmenvarianten der Bundesländer

### 4.3.1 Vorlandabtragungen und Flutmulden in Mecklenburg-Vorpommern

Weitere Rechnungen wurden zur Illustrierung der geplanten Umsetzung von Maßnahmenvarianten der Bundesländer durchgeführt. Im Bereich des Landes Mecklenburg-Vorpommern sind neben möglichen Maßnahmen die Vegetation betreffend auch umfangreiche Vorlandmodifikationen (Vorlandabtragungen und Flutmulden) zu untersuchen.

Als Grundlage wurden die vom Büro Pöyry bis zum 14.03.2013 bereitgestellten Polygone (ArcGIS Shape-Dateien) der Maßnahmenflächen und der Bericht: “Konzeption zur hydro-morphologischen Maßnahmen im Hochwasserabflussprofil der Elbe in Mecklenburg-Vorpommern – Beschreibung der Maßnahmen, 07.03.2011“ verwendet.

In Abb. 50 sind die betrachteten vier Maßnahmenvarianten im rechten Elbvorland in Mecklenburg-Vorpommern innerhalb der Pilotstrecke dargestellt. Diese sind in Fließrichtung von Südost nach Nordwest:

- Fläche A (rot): eine 168.700 m<sup>2</sup> umfassende Vorlandabtragung zwischen Elbe-km 502,0 und 502,5. Die Schwellenhöhe für ein Einströmen ist > 12,85 m+NHN
- Fläche B (hellgrün): eine 311.500 m<sup>2</sup> umfassende Vorlandabtragung zwischen Elbe-km 506,1 und 507,0. Die Schwellenhöhe für ein Einströmen ist > 12,30 m+NHN



- Fläche C (dunkelgrün): eine 148.200 m<sup>2</sup> umfassende Flutmulde zwischen Elbe-km 507,2 und 510,2. Die Schwellenhöhe für ein Einströmen ist > 12,14 m+NHN
- Fläche D (cyan) eine 291.600 m<sup>2</sup> umfassende Vorlandabtragung zwischen Elbe-km 507,7 und 509,5. Die Schwellenhöhe für ein Einströmen ist > 12,07 m+NHN

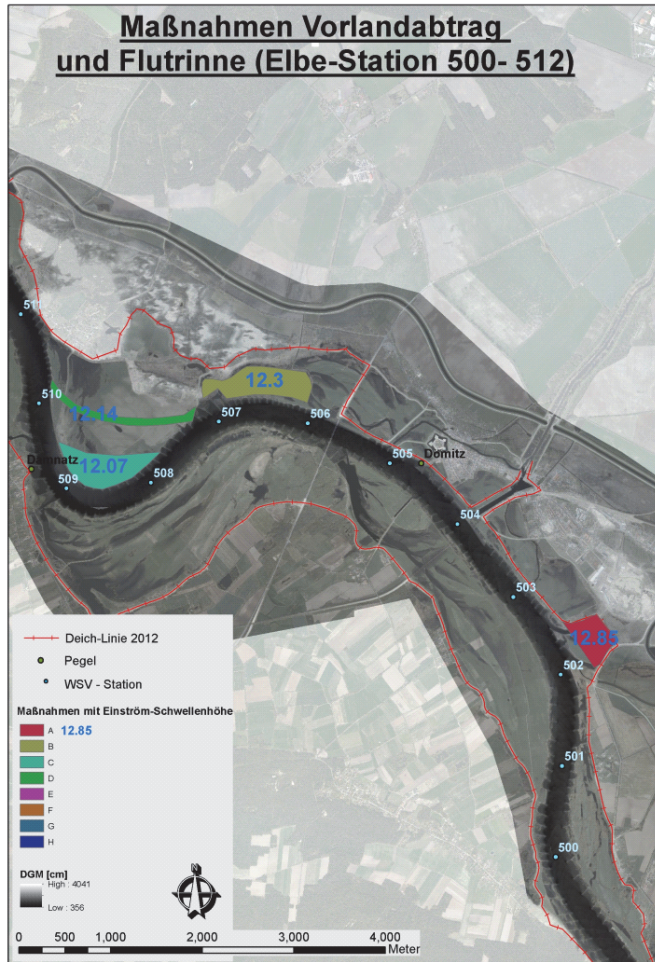


Abb. 50: Maßnahmenvarianten Vorlandabtragungen und Flutmulde zwischen Elbe-km 500 und 511 im rechten Elbvorland in Mecklenburg-Vorpommern

Wichtige Randbedingung für die Maßnahmen ist, dass die Wirkung erst ab Überschreitung des Mittelwasserstandes stattfindet, um eine schiffahrtlich relevante Beeinflussung der Wasserspiegellagen zu verhindern. Zur Ermittlung der entsprechenden Schwellenwerte für die Einströmöffnungen wurde die Wasserspiellage für das MW für die Pilotstrecke aus FLYS ausgelagert. In Abb. 51 sind die geltende Randbedingung am Pegel Neu Darchau für den auf den Zeitraum 1890-2006 bzw. 1997-2006 bezogenen hydrologischen Hauptwert MQ (710 m<sup>3</sup>/s) bzw. MW (272 cm + PNP) als W-Q-Beziehung (Abb. 51 links) und der entsprechende Wasserspiegellagen-Längsschnitt (Abb. 51 rechts) dargestellt.

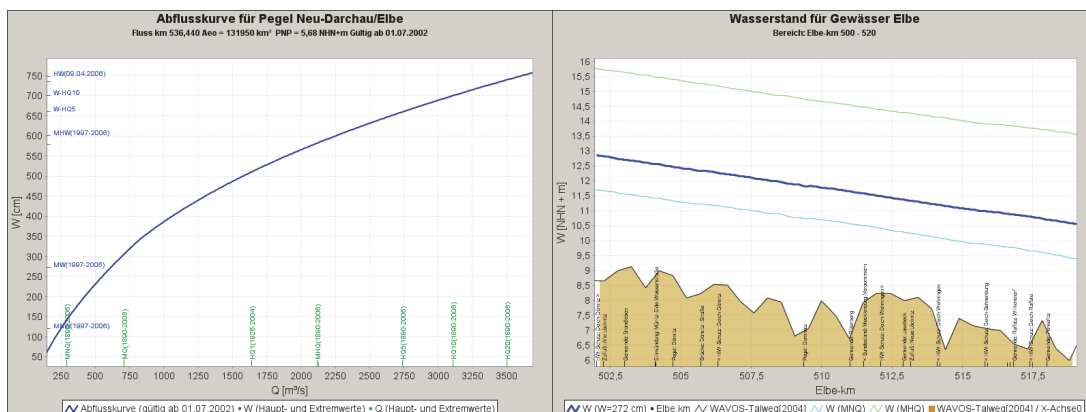


Abb. 51: Abflusskurve am Pegel Neu Darchau und Wasserspiegellagen Elbe-km 500 - 520

Die MW-Wasserspiegellage (blaue Linie in Abb. 51 rechts) wird im jeweiligen Einströmbereich der Maßnahmen um 10 cm erhöht um den sog. “Schwellenwert“ zu erhalten, ab dem eine Durchströmung frühestens stattfinden darf. Die Fläche im Bereich der Vorlandabtragungen wird jeweils auf eine einheitliche neue Geländehöhe gesetzt. Diese wird aus den bereitgestellten Flächen und dem im Bericht angegebenen Abtragsvolumina ermittelt. Die Tiefe der Flutmuldenflächen wird unter Berücksichtigung eines abgeschätzten Gefälles (errechnet aus der Differenz von Einlauf- und Auslaufhöhe) mit 1,19 m bzw. 0,61 m angesetzt.

In Tab. 10 sind die ermittelten Schwellenwerte, Flächen und Höhen für die acht Maßnahmenvarianten in Mecklenburg-Vorpommern aufgelistet.

Tab. 10: ermittelte Geländehöhen der Maßnahmenvarianten

Einström-Station	Schwellenwert	Art	Fläche	Volumina	Abtragtiefe aus Volumina und bereitgestellten Flächenpolygonen	Geländehöhe der Maßnahmenfläche
[Elbe-km]	[m+NHN]		[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m]	[m+NHN]
502,0	12,95	Vorlandabtragung	168.700	150.000	0,89	11,96
506,1	12,40	Vorlandabtragung	311.500	140.000	0,45	11,85
507,2	12,24	Flutmulde	142.700	170.000	1,19	10,95 bis 10,56
507,7	12,17	Vorlandabtragung	291.600	300.000	1,03	11,04
555,0	6,27	Flutmulde	148.200	90.000	0,61	5,56 bis 5,35
555,0	6,27	Vorlandabtragung	226.700	190.000	0,84	5,33
562,0	5,51	Vorlandabtragung	157.400	70.000	0,44	4,97
564,2	5,32	Vorlandabtragung	174.600	60.000	0,34	4,88

Zum tatsächlich beabsichtigten Wirkungsbeginn der Maßnahmen liegen vom Kooperationspartner zum Zeitpunkt der Zwischenberichtserstellung keine detaillierten Angaben vor, darum wird auf eine weitere Höhenmodellierung des Einströmbereichs verzichtet und außer den gesetzten Schwellenwerten die bisherigen Geländehöhen übernommen. Ein Einströmen in die Maßnahmen ab dem Schwellenwert ist nicht unbedingt gewährleistet, da ein auf diesem Höhenniveau gelegener direkter Fließweg im Vorland zur Maßnahmenfläche nicht überall vorhanden ist. Hierdurch kann das “Anspringen“ der Maßnahmen bei unterschiedlichen Wasserständen erfolgen.

In Abb. 52 ist ein Ausschnitt des 25-m-Rechnetzes mit farblich kodierter Geländehöhe von blau (tief) bis grün (hoch) dargestellt. Weiterhin ist das Umringspolygon einer Maßnahme am Beispiel der Flutmulde C (violett) im Bereich des unteren Anschlusses an das Elbehauptgerinne dargestellt. Die Höhen innerhalb des Polygons sind bereits auf die neuen Sollhöhen infolge der Maßnahme angepasst. Aus Datenverarbeitungsgründen wird die Sohlhöhe in den Flutrinnen stufenweise konstant eingebaut, wobei die Höhendifferenzen zwischen aneinander angrenzenden Flächen kleiner als 10 cm sind.

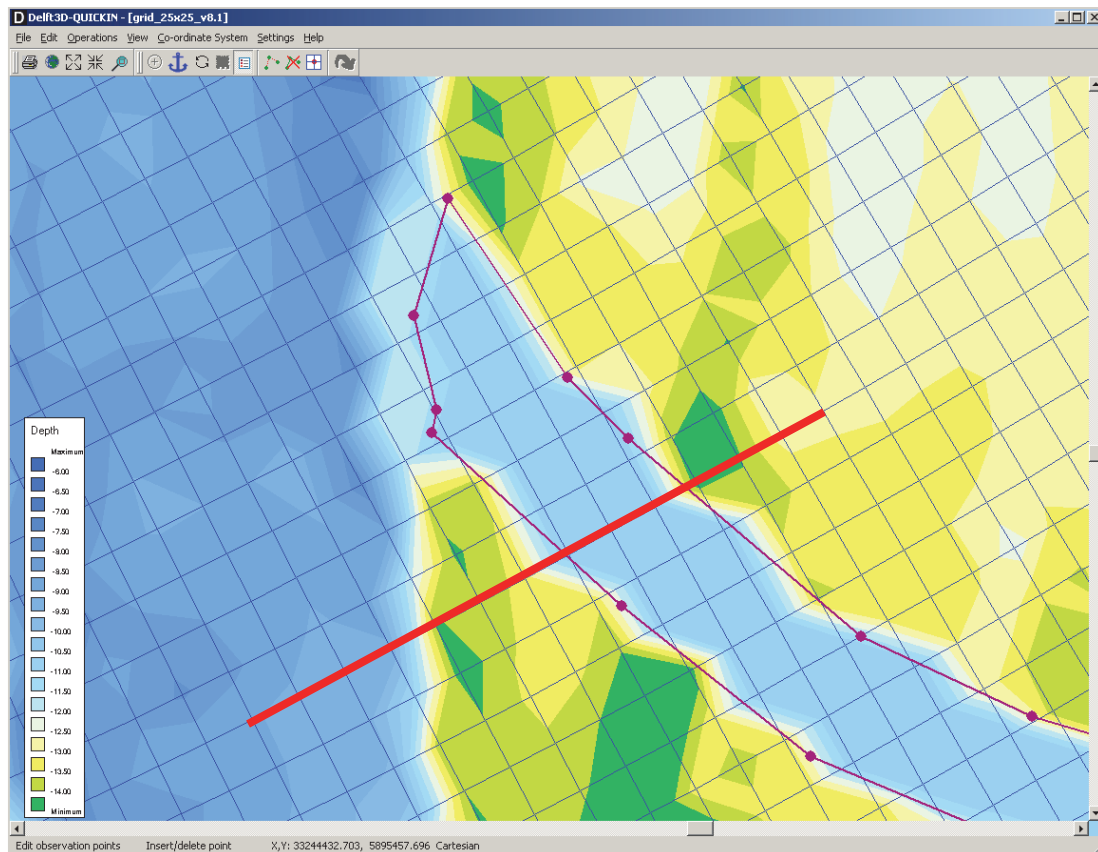


Abb. 52: 25-m-Rechnetz im Bereich der Maßnahme C (violetter Polygon) mit rot markiertem Schnitt (vgl. Abb. 53)

In Abb. 53 ist die Geometrie inklusive der eingebauten Flutmulde in blau dargestellt sowie die ursprüngliche Geländehöhe in rot. Es ist zu erkennen, dass auch im Bereich der eher schmalen Flutrinnen stets mindestens 2 Rechengitterpunkte auf der Sohle des Flutmuldenquerschnitts liegen. Die Geometrie der Maßnahmen wird damit als hinreichend genau abgebildet angesehen.

Die Wirksamkeit des gewählten Modellierungsansatzes wurde anhand von Simulationen auf dem 30-m-Rechengitter der Pilotstrecke mit dem Abfluss eines MW und eines  $HQ_{10}$  nachgewiesen. Die dabei benutzten Randbedingungen sind in Tab. 11 zusammengefasst.

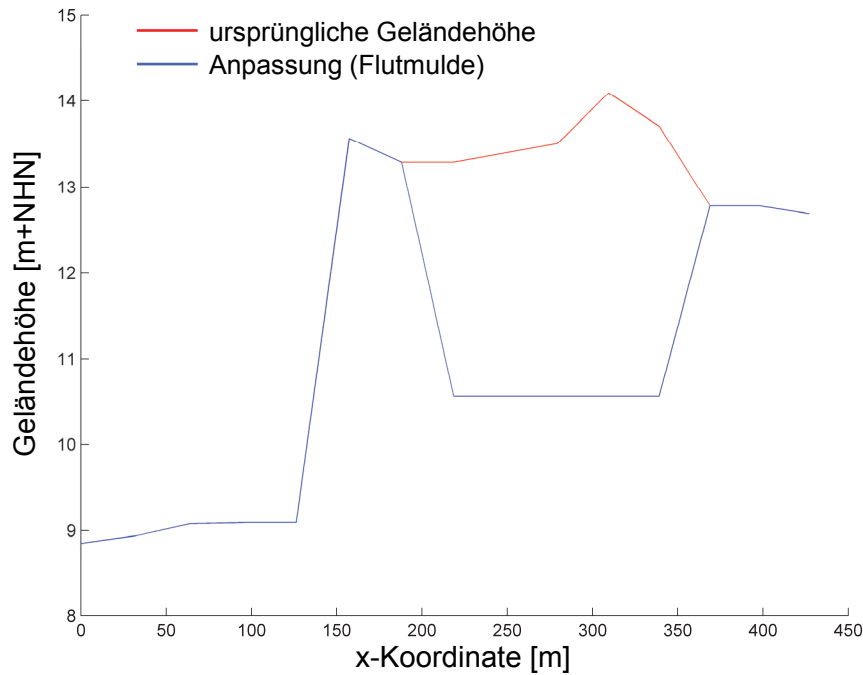


Abb. 53: Querschnitt durch die Flutmulde (vgl. Abb. 52)

Tab. 11: Randbedingung für den Nachweis der Wirkung von Maßnahmen im Pilotmodell

	Station	Rechenlauf MW	Rechenlauf HQ <sub>10</sub>
oberer Modellrand	Elbe-km 496,3	Q = 609,77 m <sup>3</sup> /s	Q = 3152 m <sup>3</sup> /s
unterer Modellrand	Elbe-km 532,0	W = 8,93 m+NHN	W = 13,07 m+NHN

In Abb. 54 wird anhand der simulierten Wassertiefen bei MW (links) bzw. HQ<sub>10</sub> (rechts) deutlich, dass bis wenigstens zum MW-Abfluss keine Durchströmung der Maßnahmen stattfindet. Der geringe Einstau im Unterwasser der Flutmulde bei MW (roter Kreis) kann nötigenfalls durch geeignete Wahl eines unteren Schwellenwertes korrigiert werden.

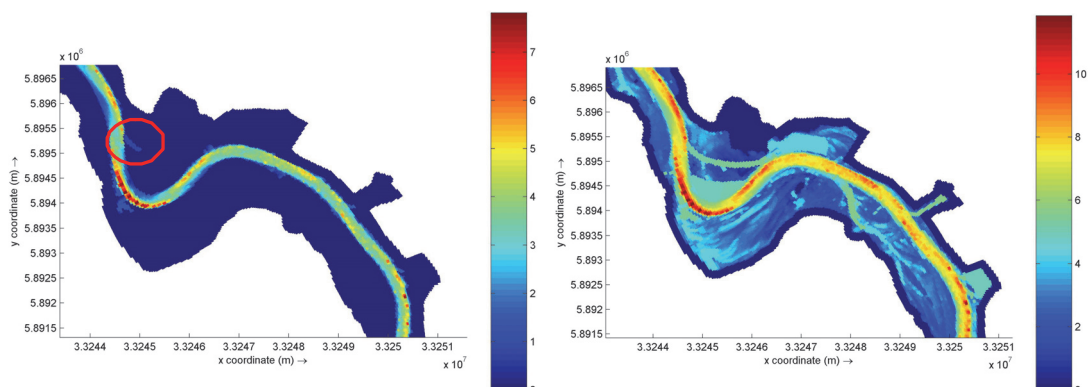


Abb. 54: Simulierte Wassertiefen und Maßnahmenwirkung bei MW (links) und HQ<sub>10</sub> (rechts)

Abb. 55 zeigt die Wassertiefen bei HQ<sub>10</sub> ohne eingebaute Maßnahmen (links) bzw. mit den eingebauten Maßnahmen (rechts). Die Differenz der Wassertiefen zwischen diesen beiden Zuständen ist in Abb. 56 dargestellt. Es erfolgt an dieser Stelle noch keine Interpretation dieser vorläufigen Ergebnisse. Die Darstellungen sollen lediglich die geplante modelltechnische Umsetzung illustrieren.

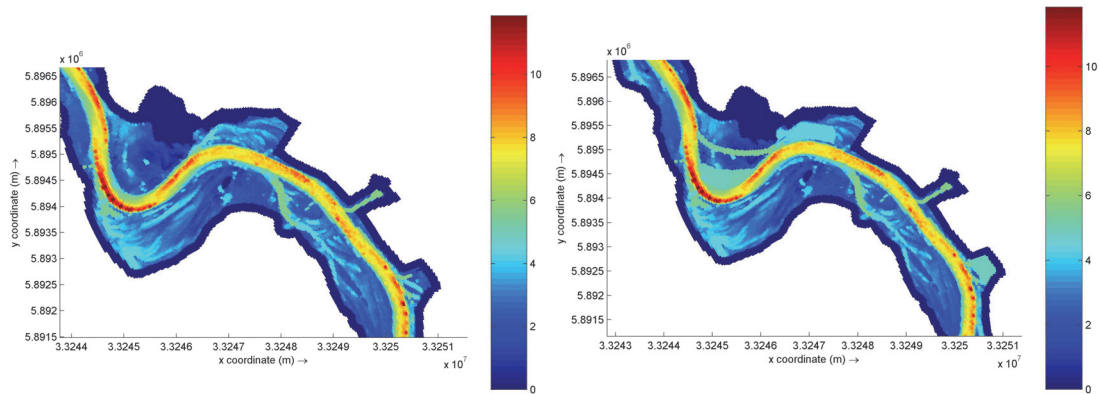


Abb. 55: Simulierte Wassertiefen bei HQ<sub>10</sub> ohne eingebaute Maßnahmen (links) bzw. mit den eingebauten Maßnahmen (rechts)

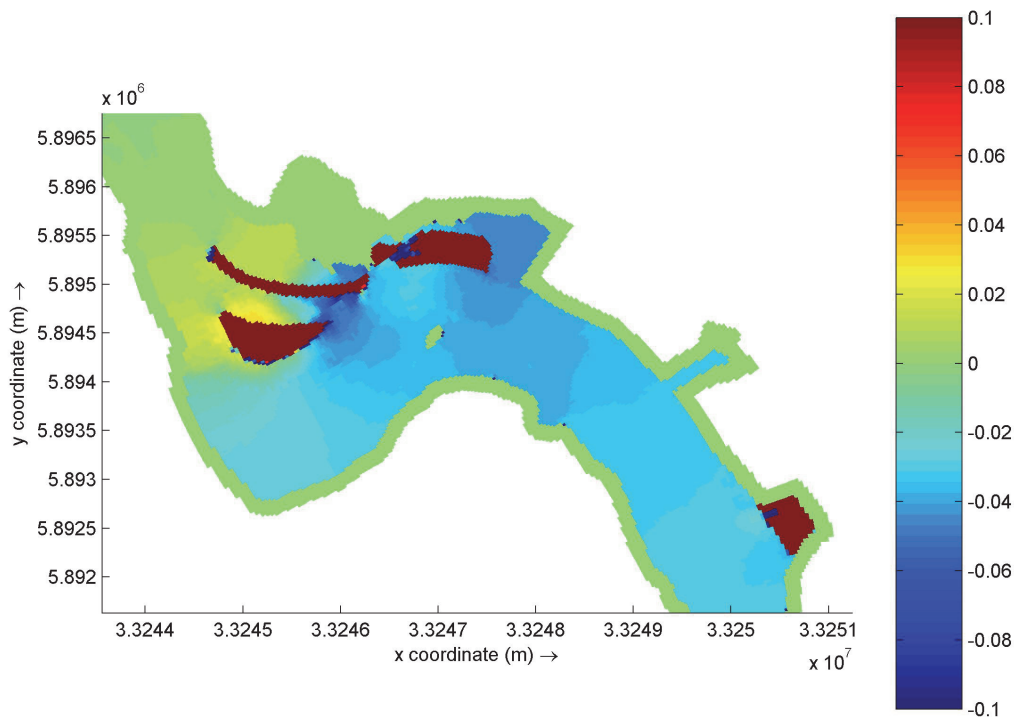


Abb. 56: Wassertiefendifferenz HQ<sub>10</sub> (inkl. Maßnahmen) - HQ<sub>10</sub> (Ist-Zustand)



### 4.3.2 Maßnahmen in Niedersachsen

Im Bereich des Landes Niedersachsen sind neben möglichen Maßnahmen die Vegetation betreffend ebenfalls Vorlandmodifikationen zu untersuchen. Die vom Kooperationspartner bereitgestellten Maßnahmen mit geometrischen Veränderungen des Vorlands teilen sich auf in Altarmanschluss, Flächenabgrabungen, Vertiefung eines Nebengerinnes und Durchstiche von Uferrehnen.

Als Grundlage wurden die bis zum 10.04.2013 bereitgestellten Polygone (ArcGIS Shape-Dateien) der Maßnahmenflächen mit Erläuterungen verwendet. In Abb. 57 und Tab. 12 sind die betrachteten Maßnahmenvarianten mit zugeordneter Nummerierung innerhalb der Pilotstrecke dargestellt.

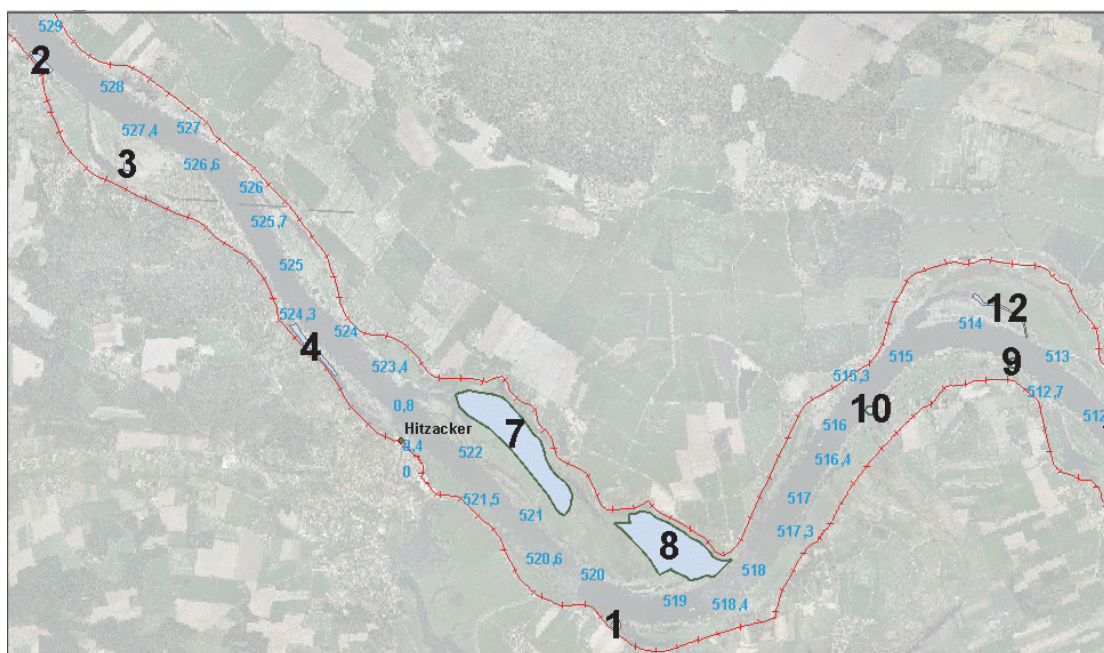


Abb. 57: Lage der niedersächsischen Maßnahmenvarianten in der Pilotstrecke

Tab. 12: Beschreibung der niedersächsischen Maßnahmenvarianten

Num- mer	Einström- Station	Art	Fläche	Umfang
	[Elbe-km]		[m <sup>2</sup> ]	[m]
9	513,3	Uferrehnendurchstich (Anbindung der Fläche bei < MQ)	8082	323
12	514,0	Anschluss Altarm (Sohlbreite 10m, Zulaufhöhe 9,55 +NHN)	22630	1792
10	515,5	Uferrehnendurchstich (Anbindung der Fläche bei < MQ)	8082	323
8	519,0	Kohärenzmaßnahmen (Entwicklung Hartholzauenwald mit Eichen)	468504	3421
1	519,5	Gehölzückschnitt (vollständig)	9204	374
7	521,5	Kohärenzmaßnahmen (Entwicklung Weichholzauenwald-Silberweiden)	505131	4104
4	524,0	Anschluss Altarm (Fläche um 1.50 m vertiefen)	35916	1665
3	527,5	Abgrabung (auf 12 m +NHN)	11949	433
2	528,75	Gehölzückschnitt (vollständig)	24846	804

Die Maßnahmen sind analog zu den in 4.3.1 beschriebenen Maßnahmen in Mecklenburg-Vorpommern im erstellten 2D-Modell umsetzbar, mit Ausnahme der Nr. 12. Auf diese Altarmabbindung bei Wehningen wird daher im Folgenden gesondert eingegangen. Die geplante Sohlbreite von 10 m ist mit der am 14.02.2013 in der Arbeitsgruppe beschlossenen mittleren Gitterauflösung von 25 m nicht direkt abbildbar. Eine mögliche Umsetzung besteht darin, entlang der vorgesehenen Anbindung jeweils eine Gitterzelle auf das Soll-Niveau abzusenken und somit den kleinstmöglichen Anbindungsquerschnitt im Modell abzubilden. Zunächst wird dazu ein Hilfspolygon erzeugt, welches sich einerseits am ursprünglich projektierten Maßnahnumriss orientiert, jedoch der Gittergeometrie folgt (Abb. 58). In Abb. 59 ist diese Umsetzung auf dem 25 m-Rechengitter dargestellt. Die Geländehöhen sind von blau (niedrig) bis gelb (hoch) und das Rechenetztes als blaue Rechtecke illustriert. Links sind die ursprünglichen Höhen, rechts die für die Maßnahmenvariante angepassten Geländehöhen enthalten. Das Hilfspolygon zur Absenkung der Gitterhöhe wird ebenfalls in Abb. 59 gezeigt.

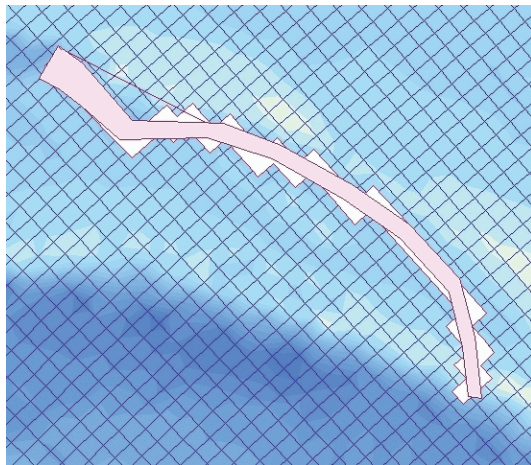


Abb. 58: Maßnahnumriss (violett) und Hilfspolygon (weiß) für die Altarmabbindung bei Wehningen

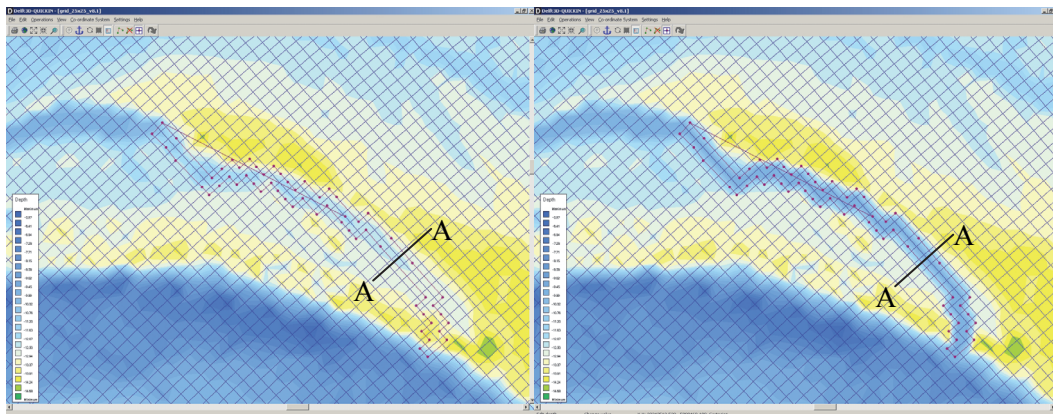


Abb. 59: Altarmabbindung bei Wehningen im Modell: Ist-Zustand (links) und nach Anpassung der Modelltopografie (rechts)

Entlang des in Abb. 59 angedeuteten Schnittes A-A ist in Abb. 60 ein Vergleich der Geländehöhen vor und nach der Anpassung gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die hergestellte Sohl-

breite in der Maßnahme statt der im ursprünglichen Entwurf enthaltenen 10 m in der Umsetzung ca. 25 m (eine Zellenbreite) beträgt.

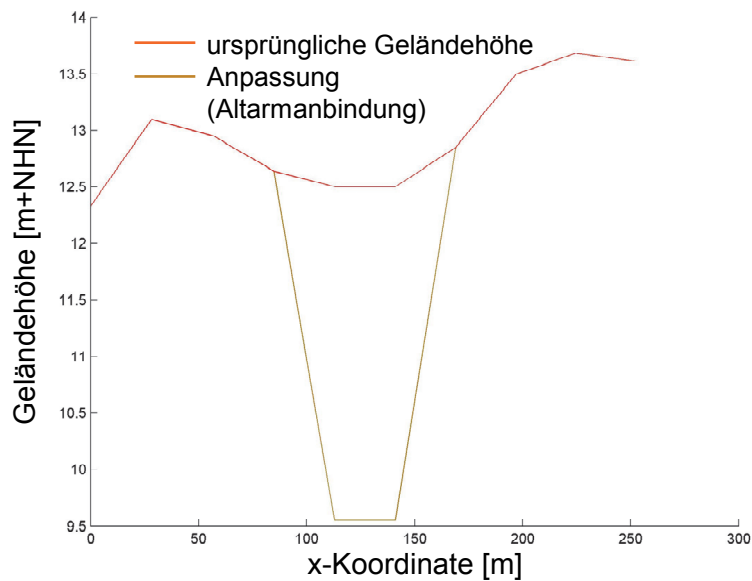


Abb. 60: Schnitt A-A durch die Altarmanbindung bei Wehningen (vgl. Abb. 59) im Ist-Zustand (rot) und nach der Anpassung der Modelltopografie (ocker)

Die Funktion der Maßnahme bei MQ ist anhand der Wassertiefendifferenz in Abb. 61 nachgewiesen. Es ist bereits zu erkennen, dass die Auswirkungen – mit Ausnahme der Wasserstandsänderungen direkt in der Maßnahmenfläche – gering sind. Zur Verdeutlichung ist in Abb. 62 die Wasserspiegellage im Hauptgerinne (Längsschnitt) mit und ohne die Maßnahme gezeigt. Die Ausschnittsvergrößerung verdeutlicht die maximal knapp 2 cm Wasserstandsabsenkung im Bereich von etwa 700 m um den Zulauf.

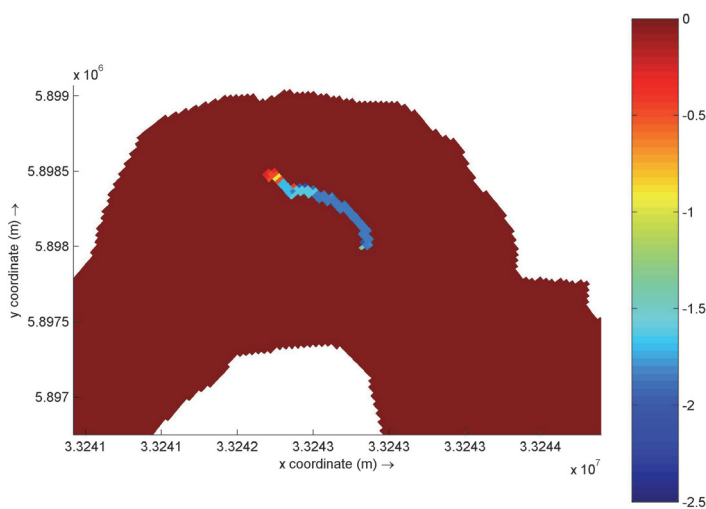


Abb. 61: Wassertiefendifferenz im Altarmanschluss bei Wehningen bei MQ (Ist-Zustand minus umgesetzte Maßnahme)

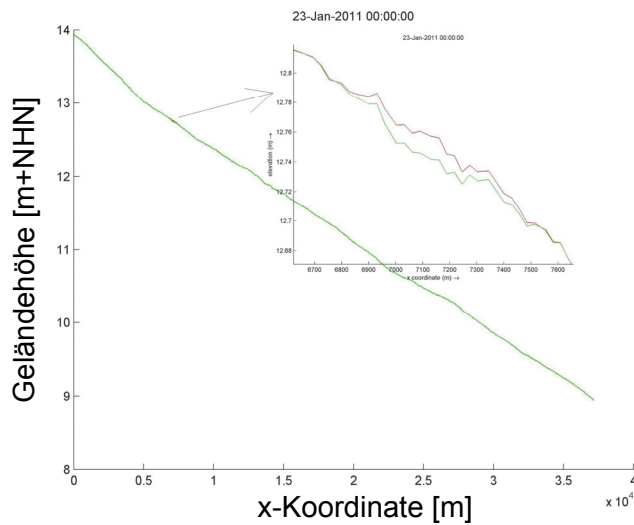


Abb. 62: Wasserspiegellage bei MQ im Hauptgerinne vor Umsetzung des Altarman-schlusses bei Wehningen (braun) und danach (grün)

Bei  $HQ_{100}$ , bei welchem der Maßnahmenbereich komplett überströmt ist, sind die Differenzen im Hauptgerinne nicht mehr signifikant nachweisbar – beide Wasserspiegellagen sind dann bis auf Abweichungen im Millimeterbereich identisch. Dies liegt einerseits am geringen Zuwachs der Fließquerschnittsfläche (Erhöhung um ca.  $90 \text{ m}^2$  bei ca.  $7100 \text{ m}^2$  im Ist-Zustand bei einem Wasserstand von  $16,70 \text{ m}$  am Elbe-km  $514,1$ ) und andererseits an strömungsun-günstigen Einlaufsituation, welche nur in geringem Maße zu einem zusätzlichen Durchfluss im Maßnahmenbereich führt. Feststellbar ist lediglich eine geringfügige Änderung der Strömungsgeschwindigkeit im Einströmbereich der Maßnahme, welche knapp  $0,2 \text{ m/s}$  im Maximum beträgt (Abb. 63).



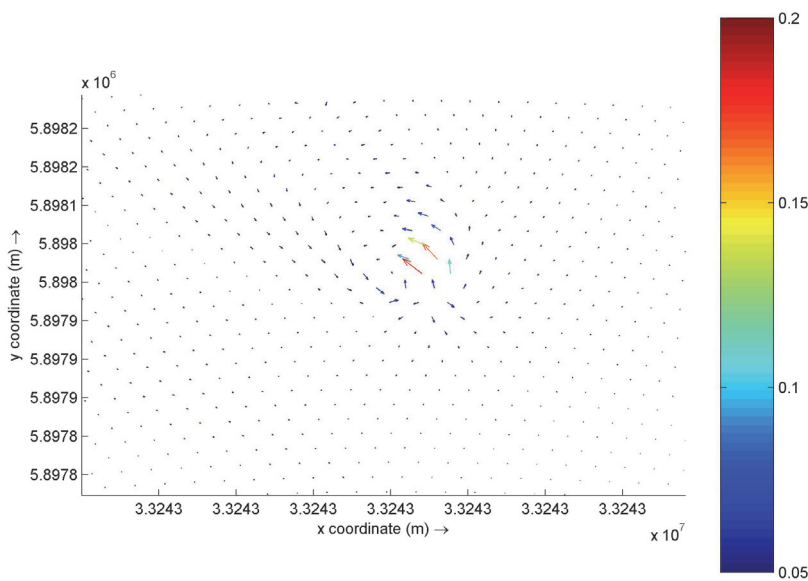


Abb. 63: Geschwindigkeitsdifferenz [m/s] im Einströmbereich des Altarmanschlusses bei Wehningen bei HQ<sub>100</sub> (Ist-Zustand minus umgesetzte Maßnahme)

Die Wirkung einer geeigneten Auswahl von niedersächsischen Maßnahmenvarianten auf die Wasserstandsverhältnisse in der unteren Mittel- elbe wird auf der kommenden Besprechung der Kooperationspartner am 05.06.2013 in Koblenz durch die BfG vorgestellt.

### 4.3.3 Vegetationsbezogene Maßnahmen

In Delft3D ist das Konzept der Sub-Grid-Rauheiten umgesetzt. Es ist sowohl möglich, Gitterzellen mit Rauheiten zu belegen, welche aus beliebig vielen und beliebig detaillierten Teilflächen der Zellen integriert werden. Weiterhin ist es möglich, zusätzliche linien- und punkt- basierte Rauheiten (z. B. Hecken und Einzelbäume, aber auch Brückenpfeiler) zu definieren und deren Rauheitswirkung innerhalb der tangierten Gitterzellen zu berücksichtigen. Unabhängig von der gewählten Gitterauflösung ist die Umsetzung der vegetationsbezogenen Maßnahmen somit problemlos möglich. Im folgenden Abschnitt wird die vorgesehene Umsetzung von vegetationsbeeinflussenden Maßnahmen beschrieben sowie erste Ergebnisse in der Pilotstrecke zwischen Dömitz und Hitzacker erläutert.

Aus Mecklenburg-Vorpommern sind 102 Einzelflächen mit kompletter Entfernung der Gehölze zur Untersuchung gemeldet worden. Die vollständige Abbildung der Einzelflächen ist hier nicht möglich, daher ist in Abb. 64 beispielhaft ein im Ist-Zustand mit Bäumen bewachsener Vorlandbereich bei ca. Elbe-km 504,6 dargestellt, für den der Bewuchs in drei Einzelflächen (rot umrandet) als Maßnahme entfernt werden soll. Die entsprechenden Flächen sind im Ist-Zustand mit der kombinierten Rauheitsklasse 1823 belegt, welche zu 75 % die Klasse Hartholz-Auwald (Rauheitsklasse 1244) und zu 25 % die Klasse 1202 – natürliches Grasland – enthält. Diese Flächen werden im Zustand "Vegetationsänderung" zu 100 % mit der Rauheitsklasse 1202 belegt. Kommen innerhalb einer Zelle mehrere Flächen zum Tragen – bei-

spielsweise natürliches Grasland und Gewässersohle (Klasse 102) – so wird die Gesamtraum-  
heit der Zelle entsprechend der Flächenanteile berechnet.

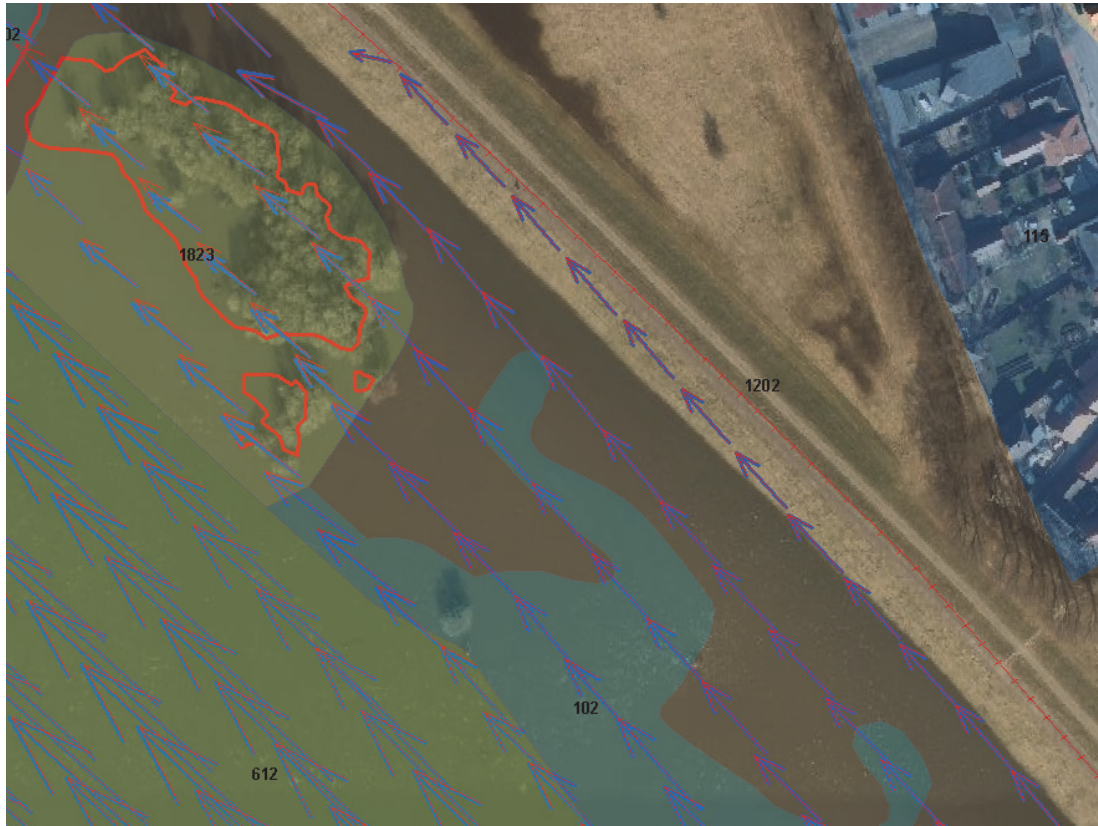


Abb. 64: Beispiel zu den geplanten vegetationsbeeinflussenden Maßnahmen in Mecklenburg-Vorpommern bei Elbe-km 504,6. (Orthofoto mit Zustand März 2012)

Analog ist in Abb. 65 ein Beispiel für die geplanten Maßnahmen in Niedersachsen dargestellt (Elbe-km 519,5 – linkes Vorland). In beiden Abbildungen lässt sich anhand der ebenfalls dargestellten Vektoren der tiefengemittelten Geschwindigkeiten bei einem  $HQ_{50}$  bereits eine qualitative Änderung der Strömungsgeschwindigkeit erkennen. Die dargestellten roten Vektoren sind die Geschwindigkeiten im Zustand "Vegetationsänderung". Diese sind in den Maßnahmenbereichen etwas größer als im Ist-Zustand (blaue Vektoren).



Abb. 65: Beispiel bei Elbe-km 519,5 (links) zu den geplanten niedersächsischen Maßnahmen

Neben den oben beschriebenen Maßnahmen werden die beiden in Abb. 66 gekennzeichneten Aufforstungsmaßnahmen bei Elbe-km 519 bzw. 521,5 getrennt betrachtet, da diese eine betragsmäßig entgegengesetzte Wirkung auf die Wasserspiegellagen im Hauptgerinne haben wie die unter "Vegetationsänderung" zusammengefassten Bewuchsreduzierungen.





Abb. 66: untersuchte Aufforstungen bei Elbe-km 519 (Hartholzauenwald Eichen - gelb) bzw. Elbe-km 521,5 (Weichholzauenwald Silberweiden - hellrot)

Die Maßnahmen "Vegetationsänderung" und "Aufforstung" werden mit dem 25-m Rechengitter der Pilotstrecke auf ihre Wirkung hin untersucht. Dabei wird aus technischen Gründen der Abfluss entsprechend einem  $HQ_{50}$  gewählt, da zum Untersuchungszeitpunkt die Deichhöhen in diesem Pilotmodell - etwa im Bereich der mobilen Maßnahmen im Bereich Hitzacker - noch nicht auf die zur Abfuhr höherer Abflüsse notwendigen Niveaus angepasst wurden.

Zusätzlich erfolgt hier die Darstellungen der Maßnahmenwirkung zur "Topographieänderung", die bereits im Zwischenbericht (Promny et al., 2013) vorgestellt wurden. Die Auswertungen unterscheiden sich von den dort abgebildeten Ergebnissen dahingehend, dass hier mit einheitlichen Abflüssen entsprechend einem  $HQ_{50}$  gerechnet wurde. Alle bisher implementierten, die Topographie betreffenden Maßnahmen aus Niedersachsen und Mecklenburg-Vorpommern werden zusammengefasst betrachtet.

In Abb. 67 sind die Differenzen der Wasserspiegellagen im Hauptgerinne an den Hektometerpunkten der Maßnahmen im Vergleich zum Ist-Zustand dargestellt. Die Maßnahmenkombination "Vegetationsänderung und Aufforstung" ist als violett gestrichelte Linie gezeichnet. Durch Vergleich mit der Darstellung für den Zustand mit nur "Vegetationsänderung" (grüne Linie) wird deutlich, dass die Wirkung der von der Biosphärenreservatsverwaltung eingebrachten Aufforstungen die Wirkung der Gehölzentfernung deutlich überwiegt und entgegen-



gesetzt (wasserspiegelerhöhend) wirkt. Während die Gehölzentfernung bei einem  $HQ_{50}$  lediglich Wasserspiegelabsenkungen von maximal 0,3 cm im Hauptgerinne bewirken, führen die untersuchten Aufforstungen bei gleichem Abfluss zu Wasserspiegelerhöhungen von bis zu 6,5 cm im Hauptgerinne. Die Maßnahmenkombination "Vegetations- und Topographieänderung" (rote Linie) zeigt fast durchgängig Wasserspiegelabsenkungen von bis zu 4 cm, die jedoch ganz überwiegend auf die Maßnahmengruppe "Topographieänderung" (braune Linie) zurückzuführen sind. Bei Kombination aller geplanten Maßnahmen "Vegetations- und Topographieänderung und Aufforstung" (hellblau gestrichelte Linie) ergeben sich im oberen Bereich der Pilotstrecke bis Elbe-km 507 Wasserspiegelabsenkungen. Im anschließenden Abschnitt überwiegen Wasserspiegelerhöhungen, welche von den untersuchten Aufforstungen bei Elbe-km 519 bzw. Elbe-km 521,5 verursacht werden.

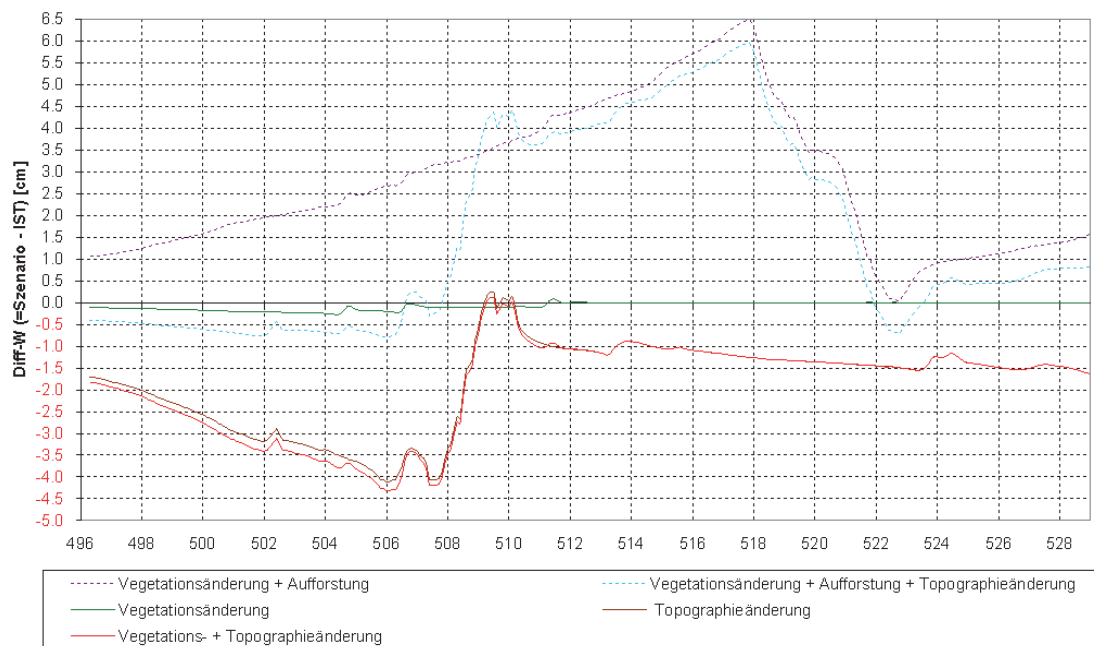


Abb. 67: Wasserstandsdifferenzen im Hauptgerinne zum Ist-Zustand bei Umsetzung der Maßnahmen "Vegetationsänderung und Aufforstung" (lila gestrichelte Linie), nur "Vegetationsänderung" (grüne Linie), "Vegetations- und Topographieänderung" (rote Linie), "Vegetations- und Topographieänderung und Aufforstung" (türkis gestrichelte Linie) bzw. nur "Topographieänderung" (braune Linie)

Die Betrachtung der lokalen Strömungsgeschwindigkeiten (Abb. 68) im Bereich der untersuchten Aufforstungen lässt erkennen, wodurch deren erhebliche Wirkung verursacht wird: vor Allem im Bereich des Hartholzauenwald mit Eichen (vgl. Abb. 66) findet bei  $HQ_{50}$  eine starke Einströmung ins Vorland statt, welche lokal durch die projektierte Aufforstung spürbar verlangsamt wird, wodurch an der Engstelle bei Elbe-km 518 ein Aufstau resultiert.

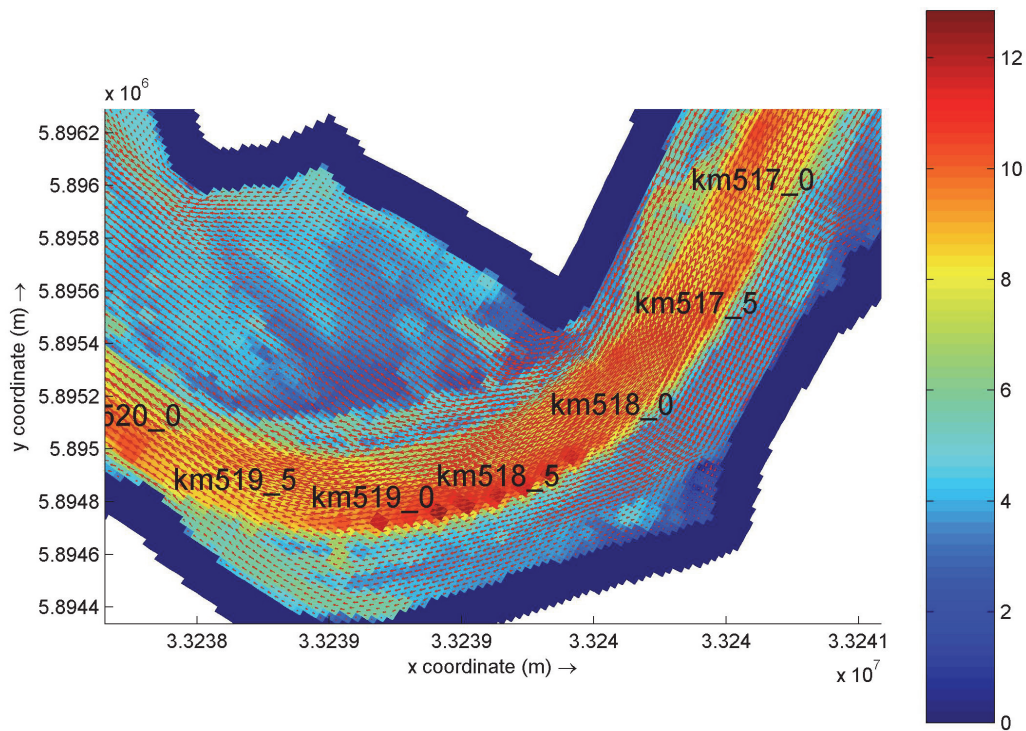


Abb. 68: Strömungsvektoren (rot) und Fließtiefen bei HQ<sub>50</sub> (Farbskala vom blau bis rot) im Bereich der untersuchten Aufforstungen

Tab. 13: Liste der betrachteten Maßnahmen

Station	Beschreibung	eingbracht durch	Fläche [m <sup>2</sup> ]
502,00	Vorlandabtragung	StALU WM	168.859
504,55	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	22
504,56	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	257
504,58	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	12
504,59	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	4.162
504,68	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	1.084
504,69	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	97
504,71	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	994
504,72	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	25
506,10	Vorlandabtragung	StALU WM	311.821
506,41	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	22.309
506,50	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	448
506,53	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	151
506,56	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	176
506,57	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	44
506,60	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	49
506,61	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	49
506,62	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	62
506,66	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	58
506,68	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	276
506,75	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	196

506,76	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	427
506,79	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	855
506,79	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	226
506,80	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	280
506,87	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	2.518
506,93	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	197
506,98	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	5.757
507,01	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	70
507,07	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	89
507,08	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	233
507,11	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	2.823
507,14	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	191
507,15	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	247
507,16	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	41
507,18	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	65
507,20	Flutmulde	StALU WM	142.866
507,22	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	57
507,27	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	252
507,29	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	538
507,31	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	11
507,32	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	55
507,33	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	35
507,36	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	242
507,50	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	1.651
507,70	Vorlandabtragung	StALU WM	291.889
507,71	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	212
507,75	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	45
510,12	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	1.025
510,16	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	25
510,19	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	63
510,20	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	292
510,26	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	402
510,29	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	454
510,31	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	201
510,33	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	296
510,48	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	147
510,49	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	664
510,55	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	97
510,58	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	225
510,64	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	43
510,66	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	2.239
511,10	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	18
511,11	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	24
511,12	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	142
511,13	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	887
511,15	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	168
511,16	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	52
511,17	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	966
511,18	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	71
511,21	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	99

2D-Modellierung  
der unteren Mittel-  
elbe von Witten-  
berge bis Geest-  
hacht – Pilotmo-  
delle Dömitz bis  
Hitzacker

511,22	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	52
511,23	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	1
511,24	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	84
511,25	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	266
511,26	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	31
511,27	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	13
511,28	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	112
511,29	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	190
511,30	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	6
511,30	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	2.499
511,31	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	122
511,31	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	194
511,31	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	6
511,31	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	7
511,31	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	1
511,32	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	11
511,32	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	1.148
511,35	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	385
511,35	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	5
511,38	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	175
511,38	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	317
511,39	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	23
511,40	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	9
511,41	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	121
511,42	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	518
511,43	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	146
511,45	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	1.256
511,46	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	222
511,47	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	464
511,48	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	173
511,49	Gehölzentfernung vollständig	StALU WM	419
513,25	Anbindung bei < MQ durch Uferreihendurchstich	Biosphärenreservatsverwaltung Nieders.	8.091
514,00	Altarmanbindung	LK Lüchow-Dannenberg	29.337
515,50	Anbindung bei < MQ durch Uferreihendurchstich	Biosphärenreservatsverwaltung Nieders.	8.091
519,00	Entwicklung Hartholzauenwald-Eichen	Biosphärenreservatsverwaltung Nieders.	469.064
519,50	Rückschnitt vollständig	LK Lüchow-Dannenberg	9.215
521,50	Entwicklung Weichholzauenwald-Silberweiden	Biosphärenreservatsverwaltung Nieders.	505.753
524,00	Fläche um 1,50 m vertiefen	LK Lüchow-Dannenberg	35.962
527,50	Abtrag auf 12 m ü. NN	LK Lüchow-Dannenberg	11.965
528,75	Rückschnitt vollständig	LK Lüchow-Dannenberg	24.879

## 5. Weiteres Vorgehen

Derzeit befindet sich das numerische Modell für die gesamte Untersuchungsstrecke von Wittenberge bis Geesthacht im Aufbau. Bis Ende September diesem Jahres wird die Kalibrierung dieses Modells abgeschlossen sein. Ebenfalls bis dahin werden seitens der Kooperationspartner der beteiligten Bundesländer Maßnahmenvarianten ausgearbeitet, welche anschließend in Abstimmung aller beteiligter Partner bis Ende Februar 2014 modelliert und ausgewertet werden.

Die vereinbarte Kooperation endet mit der Erstellung eines Gesamtberichtes über die durchgeführten Arbeiten durch die BfG.

### 5.1 Vorgehen bezüglich der Rechengitterauflösung

Die in der Arbeitsgruppe am 14.02.2013 abgestimmte mittlere Modellauflösung von 25 m ist das Maximum an Detaillierung, die derzeit für eine so umfangreiche Untersuchungsstrecke bei Simulation auf Arbeitsplatzrechnern erreichbar ist. Wie in Kapitel 4.3 dargelegt, sind die Auswirkungen der bisher diskutierten Maßnahmen auf die Wasserstände der unteren Mittelelbe mit dieser Gitterauflösung berechenbar.

Wie anhand des Altarmanschlusses bei Wehningen (Abschnitt 4.3.2) im Detail gezeigt wurde, sind Maßnahmen mit Querschnittsabmessungen kleiner als die Gitterauflösung von 25 m nicht direkt abbildbar. Die auf 25 m erweiterte Maßnahme zeigt jedoch eine so geringe Wirkung, dass aus hydraulischer Sicht eine Umsetzung noch kleinerer Querschnittsänderungen nicht sinnvoll erscheint. Es wird deshalb empfohlen, bei der Projektierung weiterer Maßnahmenvarianten eine überschlägige Abflussberechnung (erwartete Fließgeschwindigkeit multipliziert mit der Fließquerschnittsfläche) voranzustellen, um geeignete Maßnahmen zu identifizieren.

Bei der Interpretation der Modellierungsergebnisse sind die in der Modellierung enthaltenen Unsicherheiten und Fehlerquellen zu berücksichtigen, welche im folgenden Kapitel 6 diskutiert werden. Eine feinere Auflösung des Berechnungsgitters kann nur im geringen Maße zur Verringerung der Unsicherheiten beitragen. Sollte es dennoch nötig sein, feiner aufgelöste Teilmodelle bestimmter Bereiche zu erstellen, so ist dies möglich, jedoch nicht im Zeitrahmen der vereinbarten Kooperation. Mit den in Delft3D vorhandenen Werkzeugen lassen sich mit geringem Aufwand durch Unterteilung der vorhandenen Gitterzellen automatisiert Teilmodelle erzeugen, beispielsweise mit mittlerer Gitterauflösung von 12,5 m. Um eine mit dem Gesamtmodell vergleichbare Anzahl von Gitterzellen zu erhalten (und damit die Berechenbarkeit zu gewährleisten), ist in diesem Fall eine Kürzung der Berechnungsstrecke mindestens um den Faktor 4 erforderlich.

## 6. Unsicherheiten und Fehlerquellen

Die Ergebnisse der numerischen Modellierung entsprechen dem Stand der Technik, beinhalten damit jedoch auch wesentliche Vereinfachungen und Annahmen, welche Auswirkungen auf die Ergebnisse haben können. Wesentliche Vereinfachungen sind:

- tiefengemittelte Strömungsberechnung
- Berechnung der Flachwassergleichungen auf Rechengittern bestimmter Auflösung (hier 15 bis 40 m, für das Gesamtmodell 25 m)
- teilweise empirische Ansätze zur Berücksichtigung der Gerinne- und Vegetationsrauheiten
- stationäre Berechnung
- Vernachlässigung von Austausch mit dem Grundwasser

Weitere Annahmen, welche der Modellierung zugrunde liegen:

- Repräsentation des realen Bewuchses durch flächenhafte Nutzungs- bzw. Kartierungsdaten
- abschnittsweise konstante Rauheiten im Hauptgerinne

Für alle genannten Punkte gibt es Ansätze zur Verbesserung der Modellierung, jedoch bedingen diese entweder erheblichen zusätzlichen Arbeitsaufwand (z. B. detaillierte Bewuchskartierungen und Sedimentkartierungen zur Rauheitsermittlung) oder eine Vervielfachung des Berechnungsaufwandes (z. B. 3-Dimensionale Modellierung, Large-Eddy-Simulation). Den Autoren ist keine Modellierung bekannt, in der eine vergleichbar umfangreiche Flussstrecke mit deutlich geringeren Vereinfachungen oder besseren Annahmen durchgeführt worden wäre.

Die Auswirkungen, welche die einzelnen Vereinfachungen und Annahmen auf die Ergebnisse haben, sollen im Folgenden quantitativ abgeschätzt werden.

### 6.1 Unsicherheiten der Geometrie

Die Erstellung der DGMW erfolgte qualitätsgesichert. Dennoch sind die zugrunde liegenden Geometriedaten fehlerbehaftet. Für die Echolotaufnahmen der Sohle ist der Fehler methodenbedingt geringer als der Fehler aus der Vorlandbefliegung. Hinzu kommen im Gewässer jedoch die morphologischen Änderungen seit der Geometrieaufnahme, welche im Mittel wenn überhaupt nur wenige Zentimeter pro Jahr ausmachen, lokal jedoch auch mehrere Dezimeter erreichen können, beispielsweise aufgrund von Kolkbildungen oder dem Fortschreiten von Transportkörpern – insbesondere nach Hochwasserereignissen.

Bei der Prozessierung der Geometriedaten treten weitere Fehlerquellen auf. Nach der aus Datenverarbeitungsgründen notwendigen Umwandlung in das TIN (siehe Abschnitt 2.2.1) weisen 2,2 % der Punkte eine Höhenabweichung zum DGM von größer 25 cm auf. Bei der

anschließenden Interpolation auf die Rechengitter werden abermals Höhenangaben vereinfacht, nämlich innerhalb der jeweiligen Gitterweite (beispielsweise 25 m) gemittelt.

Außerdem sind einige geometrische Strukturen – hier sind vor allem die Buhnen zu erwähnen – aufgrund derer geringer räumlicher Ausdehnung im Vergleich zur Gitterauflösung vereinfacht abgebildet. Die Buhnen werden durch Wehre dargestellt, deren Höhe aus dem Buhnenkataster entnommen sind (jedoch nicht unbedingt der aktuellen Realität entsprechen). Der dabei entstandene Volumenfehler ist als gering anzusehen.

Die lokale Unsicherheit der Geometrie ist insgesamt – insbesondere aufgrund der notwendigen Vereinfachungen – relativ hoch. Die Ergebnisse von Kalibrierung und Validierung zeigen jedoch, dass es möglich ist, reale Ereignisse unter Verwendung plausibler Modellannahmen mit akzeptabler Genauigkeit zu reproduzieren. Die Fähigkeit der Modelle, insbesondere relative Änderungen zum Ist-Zustand – beispielsweise aufgrund von abflussverbessernden Maßnahmen im Vorland – abzubilden, wird aufgrund des Modellierungswerkzeugs auf dem Stand der Technik als gut eingeschätzt.

## 6.2 Unsicherheiten der Rauheitszuweisung

Die Rauheiten der Oberflächen innerhalb der Pilotmodelle wurden in insgesamt 33 verschiedene Klassen eingeteilt, welche überwiegend strömungsabhängig wirken. Diese vergleichsweise hohe Detaillierung kann dennoch bei weitem nicht die Vielgestalt der natürlichen Rauheitswirkung abbilden. Umfangreiche Untersuchungen zur Rauheitswirkung von Bewuchs, welche in hydraulischen Laboren durchgeführt werden, zeigen beispielsweise den Einfluss der Jahreszeit (Vegetationsentwicklung) auf die Rauheit, aber auch die Abhängigkeit der Rauheit von der Durchströmungsrichtung von Ackerkulturen. Die Berücksichtigung solcher Ansätze übersteigt jedoch den leistbaren Umfang für das geplante Untersuchungsprogramm.

Die zur Kalibrierung und Validierung verwendeten Hochwasserereignisse (HW2006 und HW2011) fanden eher in der vegetationsarmen Periode statt (April 2006 bzw. Januar 2011) sodass davon ausgegangen werden kann, dass der kalibrierte Modellzustand eher diesem Zustand entspricht als einer ausgeprägten sommerlichen Vegetation. Die Validierung des Gesamtmodells mit dem HW2013 (Juni 2013) kann dazu beitragen, den Einfluss der sommerlichen Vegetationswirkung auf die modellierten Wasserstände zu erkennen. Der Einfluss, welcher dem Bewuchs insgesamt zufällt, wurde in Abschnitt 4.2 zu zwischen 37 cm und 55 cm für die Änderung des Ist-Zustandes in einen Zustand mit durchgehend „grüner Wiese“ berechnet. Ebenfalls bemerkenswert ist die deutliche Verbesserung im zweiten Kalibrierungsdurchgang, welche durch die Korrektur der Bewuchszuweisung in den Buhnen- und Buhnenfeldbereichen erreicht wurde (vgl. Abschnitt 2.5).

Der durch eventuelle lokale (!) Fehlzuweisung der Rauheit begründete Fehler ist als von untergeordneter Bedeutung einzustufen. Es kann davon ausgegangen werden, dass insbesondere relative Änderungen zum Ist-Zustand – beispielsweise aufgrund von Gehölzmanagementmaßnahmen – durch die implementierten Rauheitsansätze gut abgebildet werden können.

### **6.3 Unsicherheiten der Randbedingungen**

Die Daten der für Kalibrierung und Validierung verwendeten Ereignisse entstammen den gültigen Pegelauswertungen und weisen relativ geringe Unsicherheiten auf. Die getroffenen Vereinfachungen betreffen die Vernachlässigung von seitlichen Zuflüssen, welche aufgrund der Hydrologie der Mittelelbe als gerechtfertigt gelten. Weiterhin vernachlässigt ist der Austausch mit dem Grundwasserkörper, hauptsächlich durch fehlende Detaildaten bedingt.

Den Unsicherheiten der Randbedingungen fällt insgesamt eine untergeordnete Bedeutung zu.

### **6.4 Unsicherheiten der Naturmessungen**

Auch die Strömungsdaten der Naturmessungen (Wasserspiegelfixierungen, Geschwindigkeitsmessungen) sind mit Unsicherheiten behaftet. Die Unsicherheit der Fixierungen wird in Busch et al. (2013) abgeschätzt als „eher im einstelligen [cm]-Bereich“, jedoch maximal zwischen 12 cm und 27 cm.

Die Genauigkeit der ADCP-Geschwindigkeitsmessungen wird von Herstellerseite zu +/-1 % oder +/- 1 cm/s angegeben. In der Praxis können diese Werte jedoch auch deutlich überschritten werden, insbesondere durch fehlerhaften Ortsbezug.

Die in Abschnitt 6.1 bis 6.4 aufgeführten Unsicherheiten müssen bei der Interpretation auffälliger Differenzen zwischen Naturmessungen und Simulation berücksichtigt werden.



## 7. Literatur

Busch, N. und Hammer, N. (2009): Einheitliche Grundlage für die Festlegung der Bemessungswasserspiegellagen der Elbe auf der frei fließenden Strecke in Deutschland. Bericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG-1650, Koblenz.

Busch, N., Vollmer, S. und Hatz, M. (2013): Neue Auswertemethode zum Nachweis von Wasserstandsänderungen im Zusammenhang mit der morphologischen Entwicklung am Bundeswasserstraßen – dargestellt am Beispiel der Mittleren Elbe, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 1, S. 4-14.

Deltares (2011): Delft3D-FLOW User Manual, Version: 3.15, 7. September 2011.

Hatz, M. und Busch, N. (2011): Ermittlung des Einflusses der Flutung der Havelniederung auf Hochwasser an der Elbe im Bereich des HQ<sub>100</sub>; BfG-1726, Koblenz 07.11.2011.

IKSE (2005): Die Elbe und ihr Einzugsgebiet - ein geographisch-hydrologischer und wasserwirtschaftlicher Überblick. Internationale Kommission zum Schutz der Elbe, Magdeburg.

Klopstra, D., H. J. Barneveld and J. M. Van Noortwijk (1996): Analytisch model hydraulische ruwheid van overstroomde moerasvegetatie. Tech. Rep. PR051, HKV consultants, Lelystad, The Netherlands. Commissioned by Rijkswaterstaat/RIZA, The Netherlands.

van Rijn, L. (1984): Sediment Transport, Part III: Bed forms and Alluvial Roughness. Journal of Hydraulic Engineering, 110(12), 1733–1754.

van Velzen, E.H., P. Jesse, P. Cornelissen and H. Coops (2003): Stromingsweerstand vegetatie in uiterwaarden. Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat. ISBN 9036956439, Arnhem, The Netherlands.

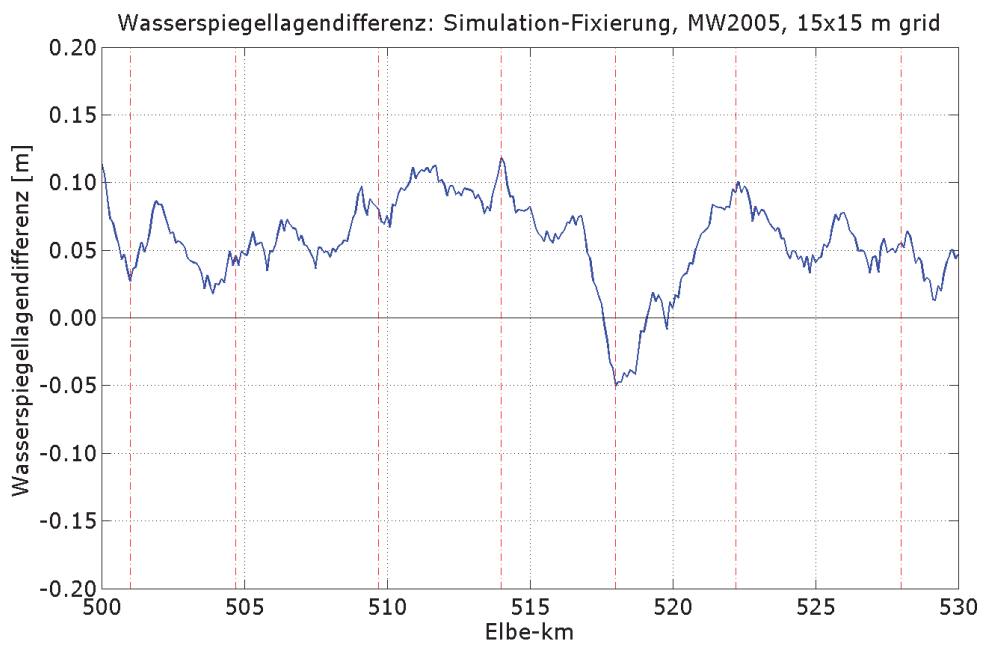
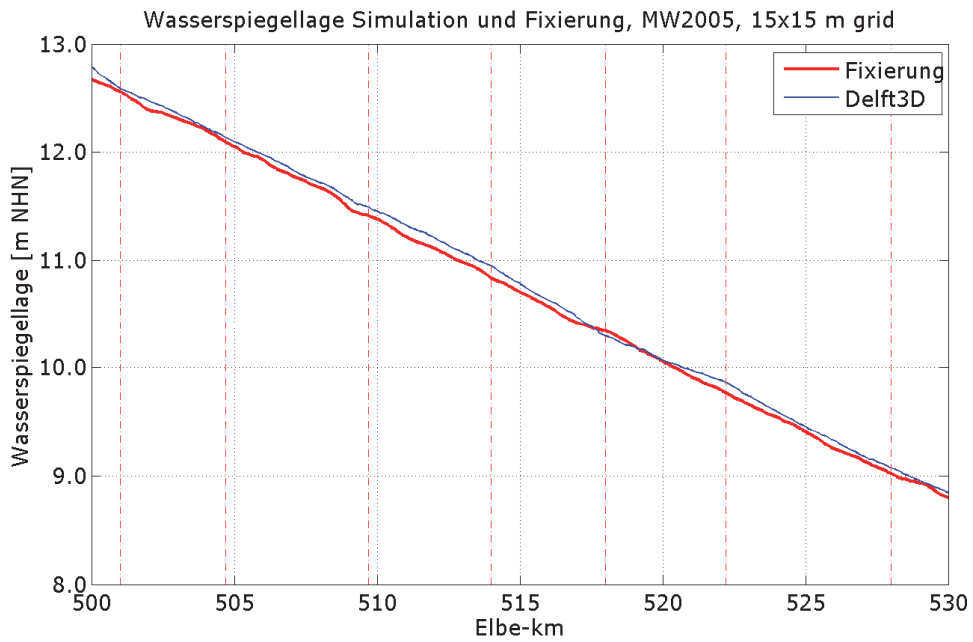
# Anhang

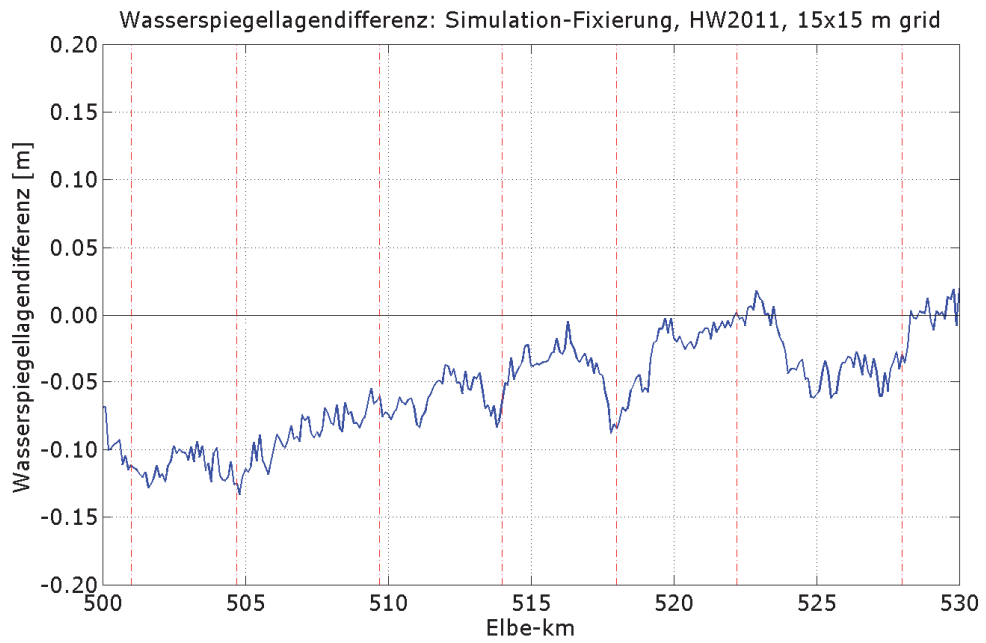
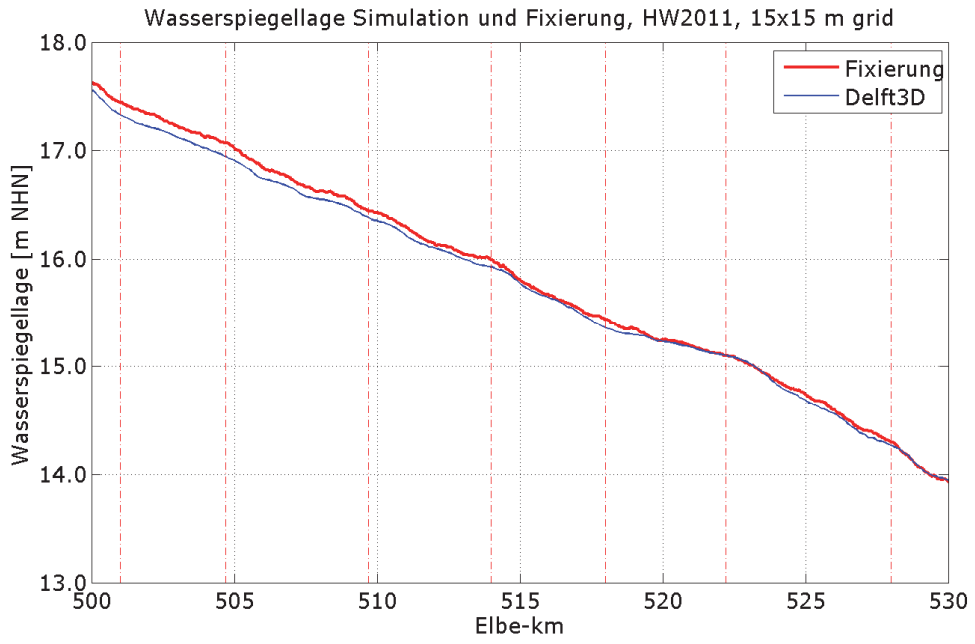
## Glossar

- Kolkbildung** Lokale Eintiefung der Gewässersohle aufgrund erhöhter Strömungsbelastung, beispielsweise im Bereich von Bühnenköpfen
- Spline-Funktion** Ein Spline  $n$ -ten Grades (auch Polynomzug) ist eine Funktion, die stückweise aus Polynomen höchstens  $n$ -ten Grades zusammengesetzt ist. Dabei werden an den Stellen, an denen zwei Polynomstücke zusammenstoßen, bestimmte Bedingungen gestellt, etwa dass der Spline  $(n-1)$ -mal stetig differenzierbar ist.
- Transportkörper** Meint hier hauptsächlich Dünen: periodische aufeinander folgende geometrische Strukturen, in denen der Sedimenttransport an der Sohle stattfindet. Höhen typisch von einigen Dezimetern bis hin zu Metern (bei hohen Wassertiefen und Strömungsgeschwindigkeiten). Längen von mehreren Metern bis mehrere Dutzend Meter.

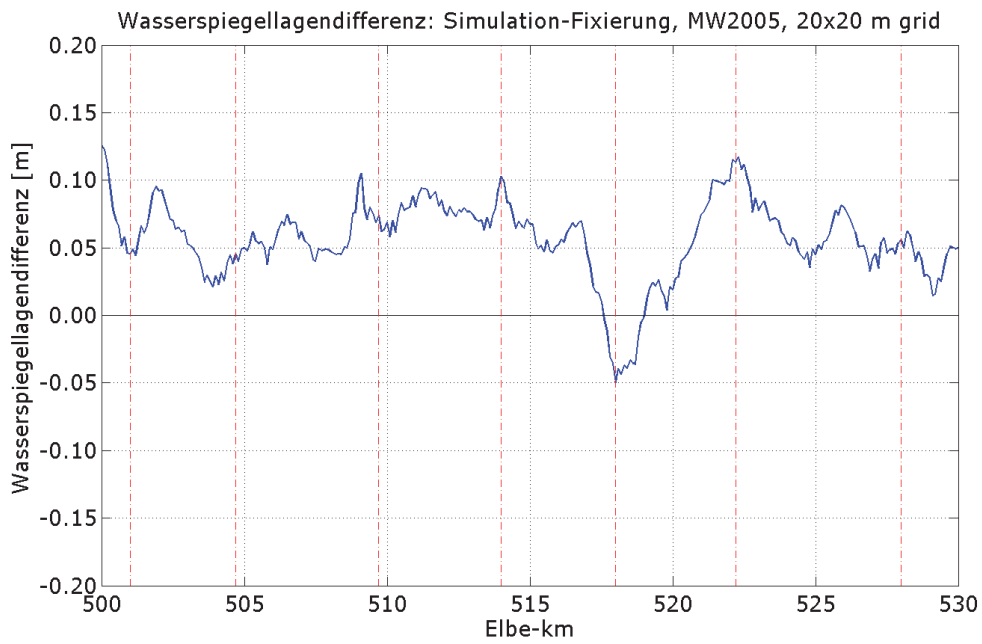
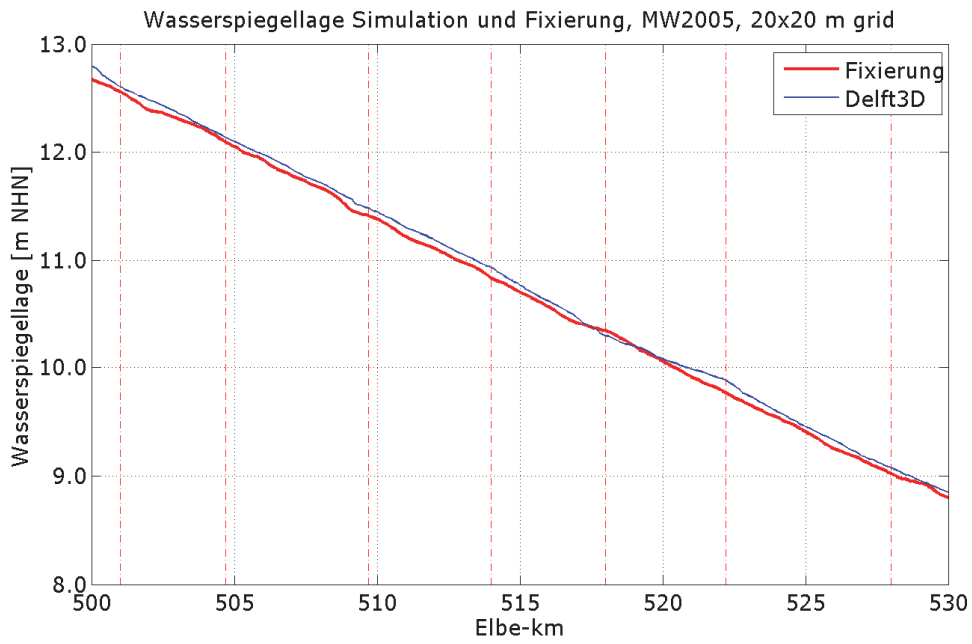
## **Ergebnisse der Kalibrierung**

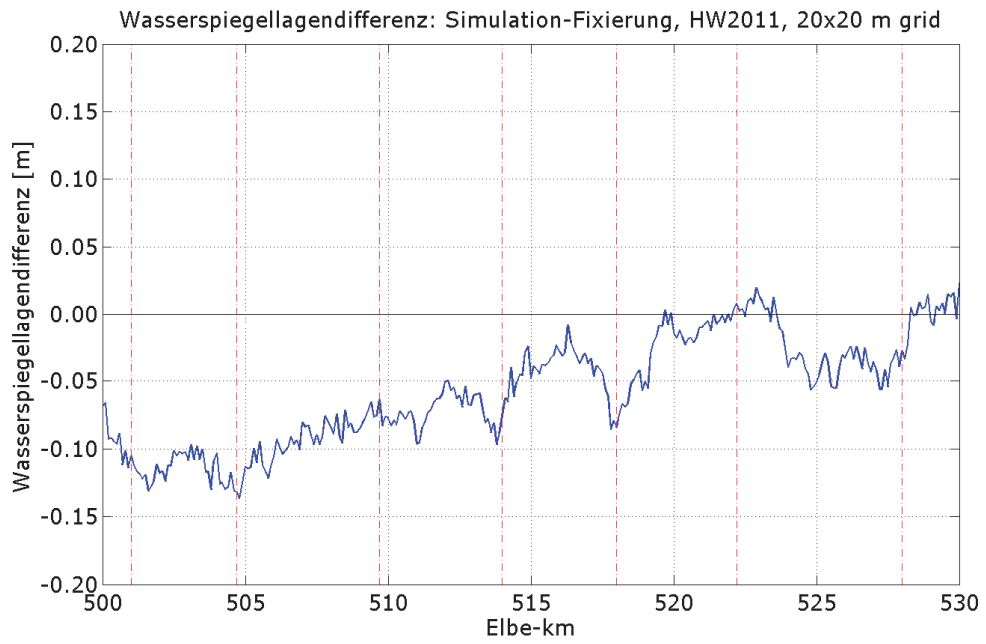
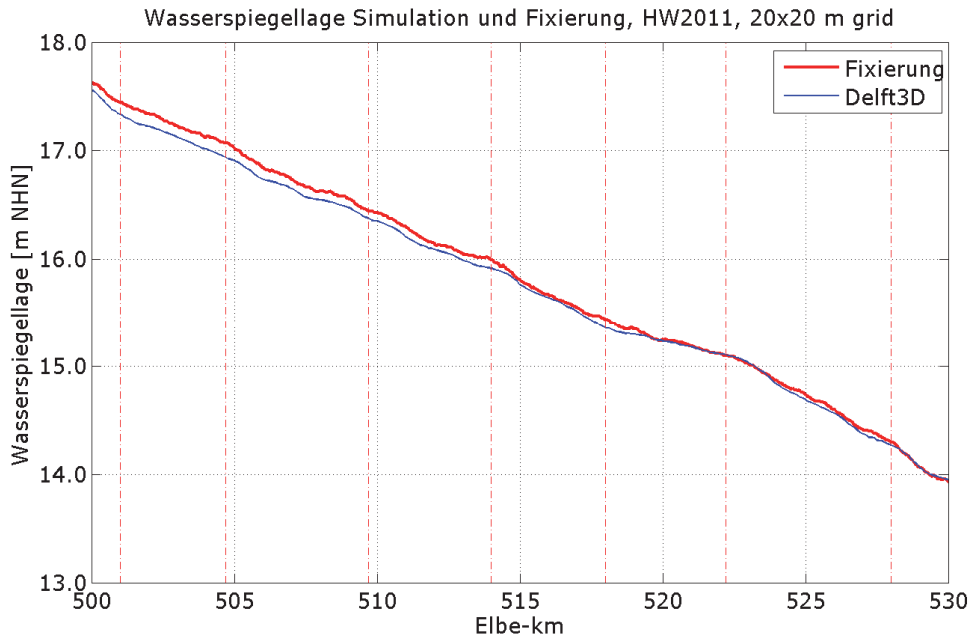
15 m Gitter:



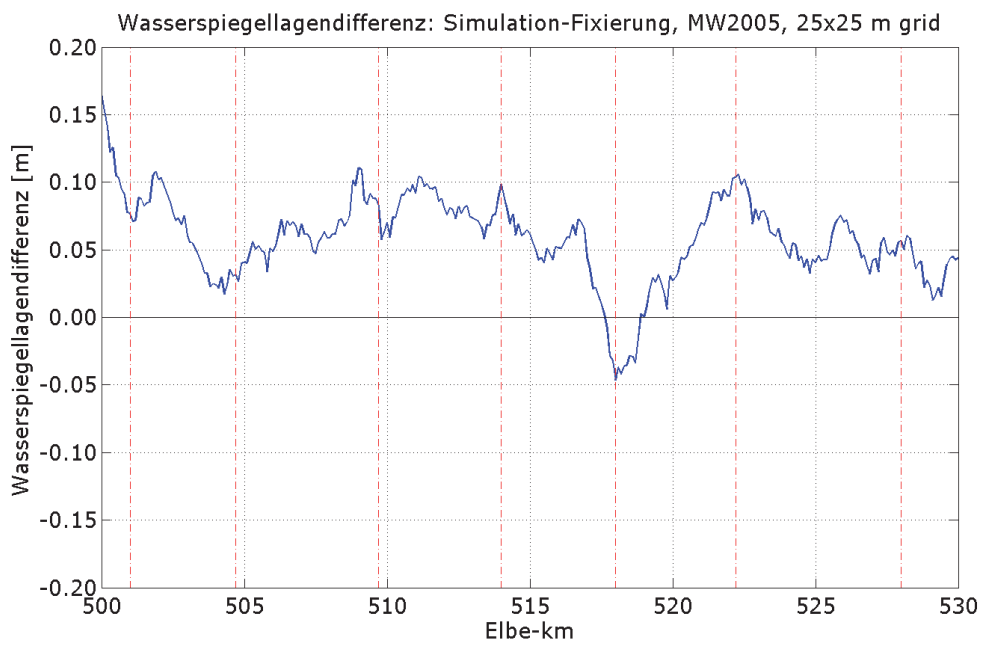
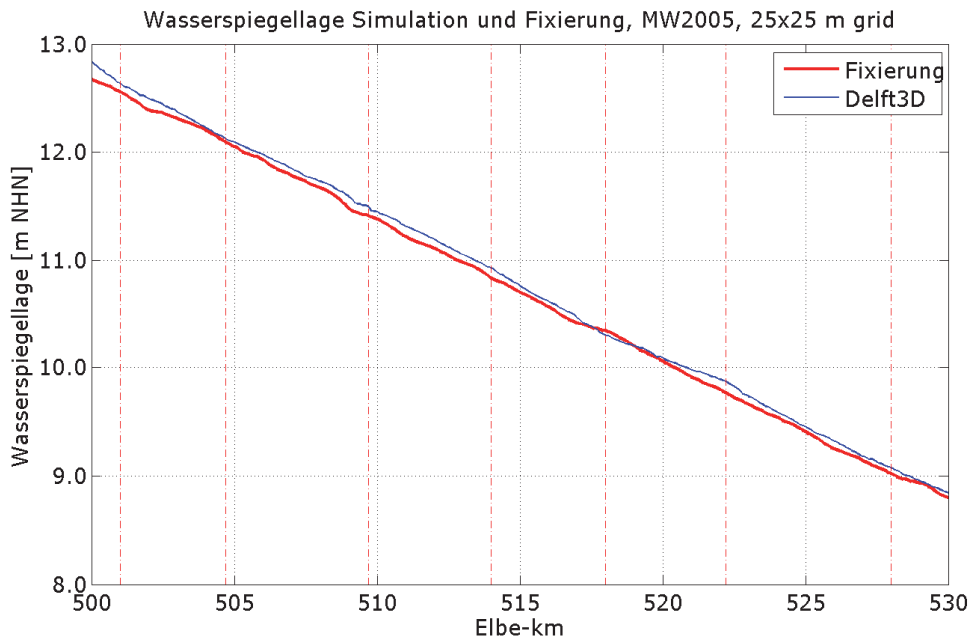


20 m Gitter:

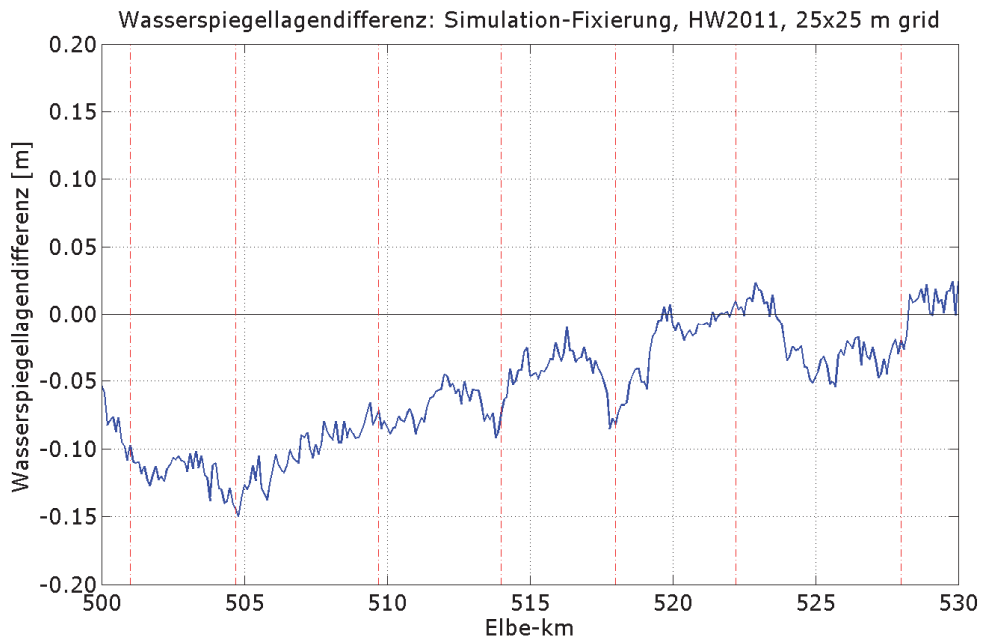
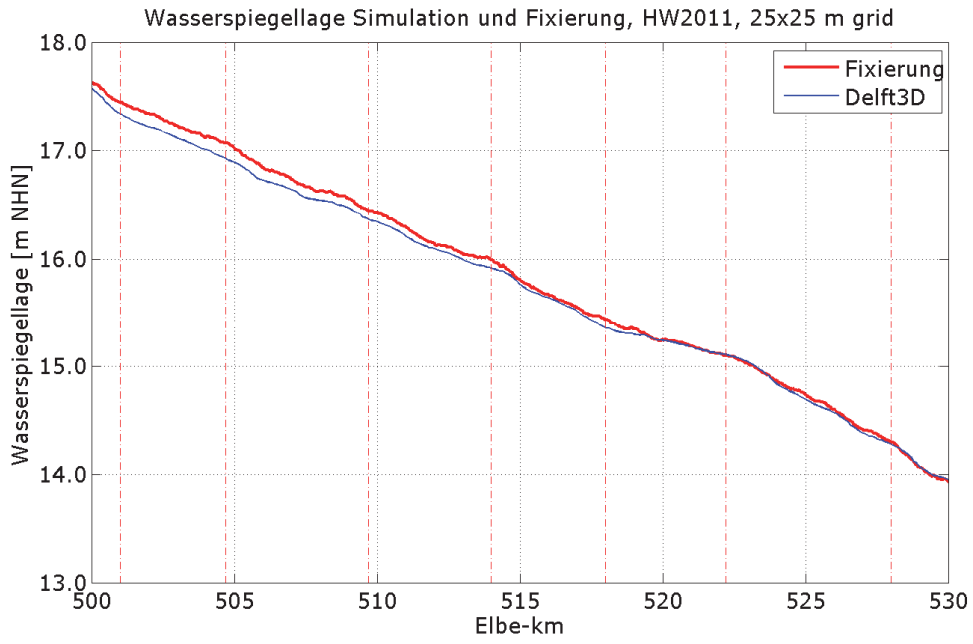




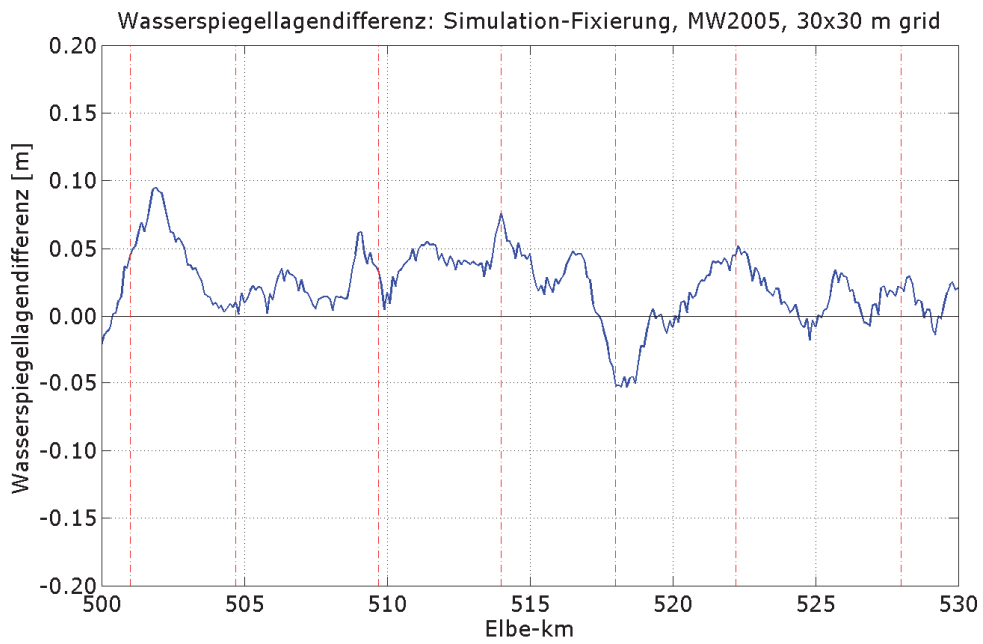
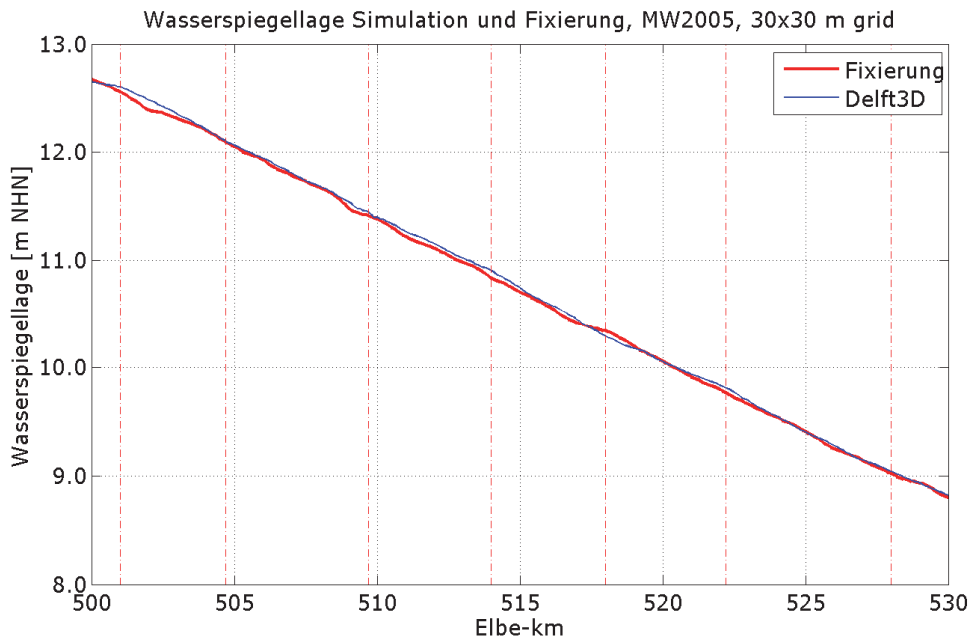
25 m Gitter:

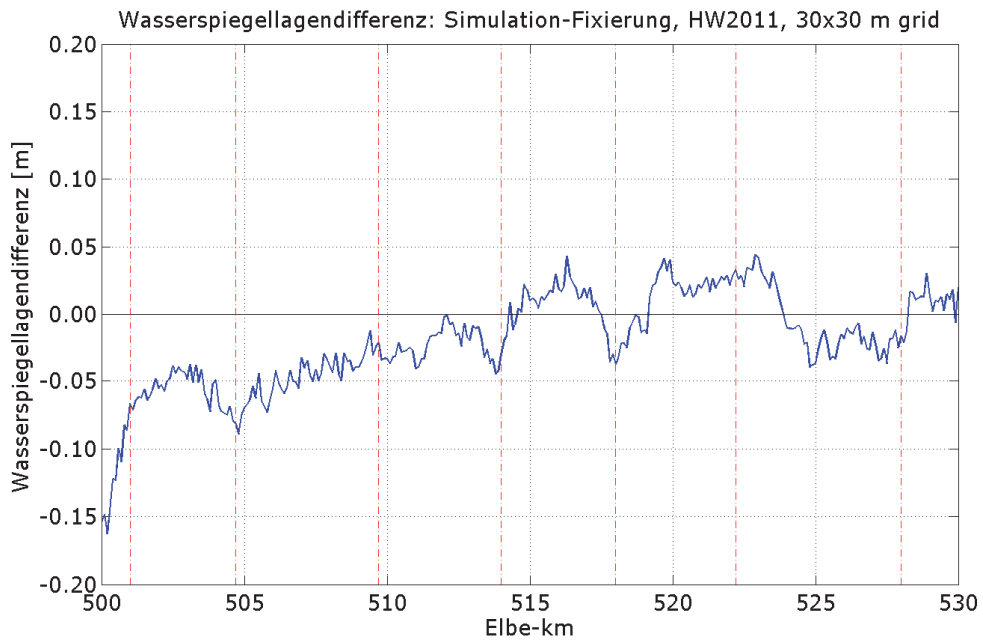
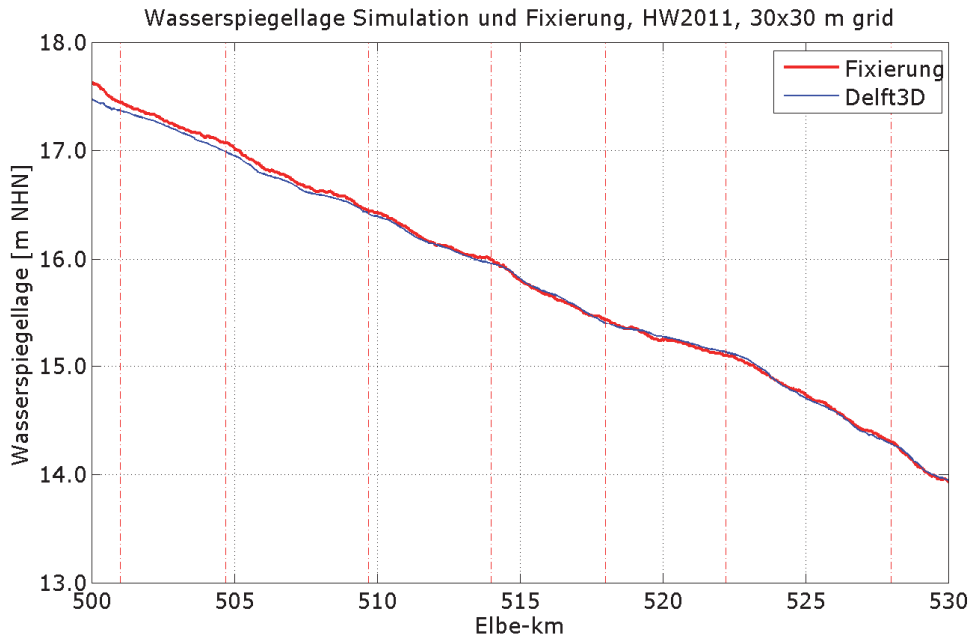




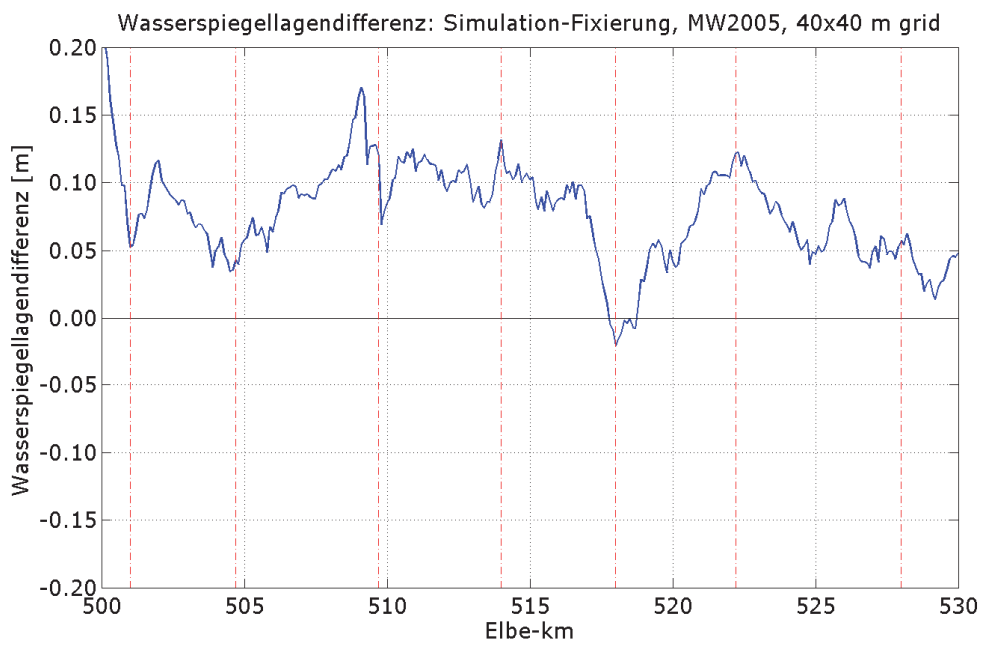
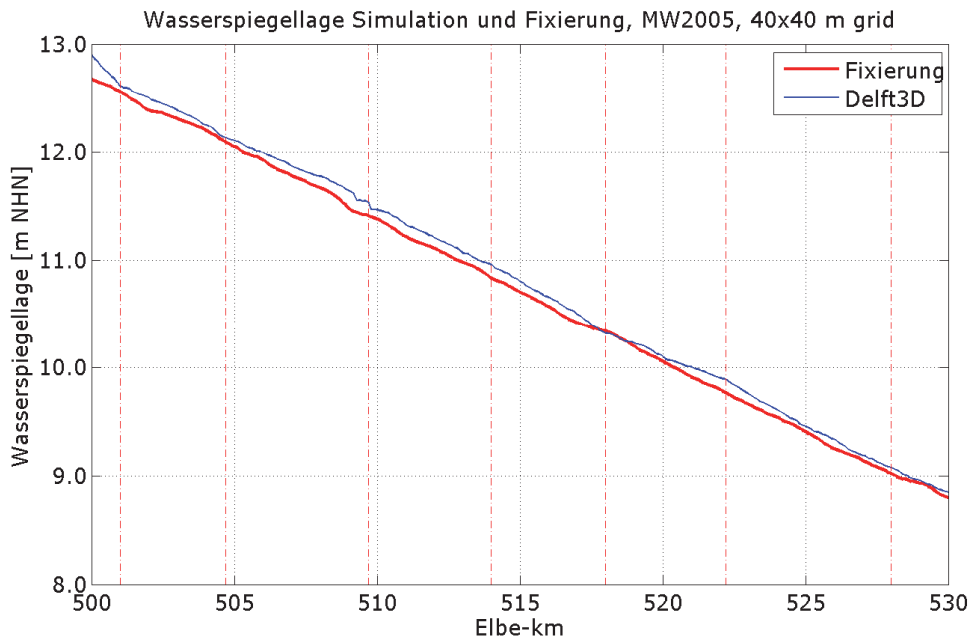


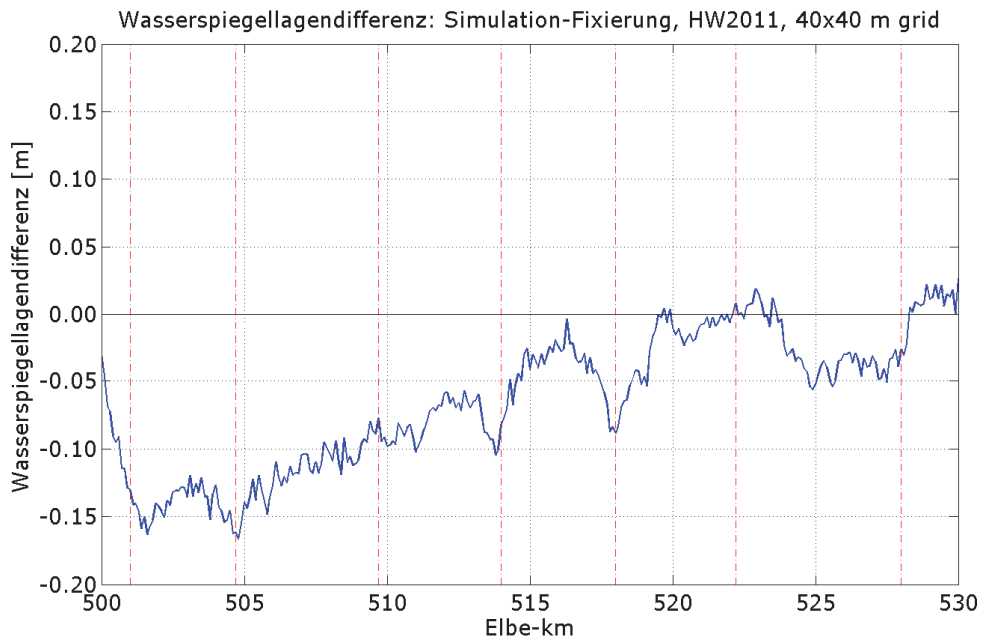
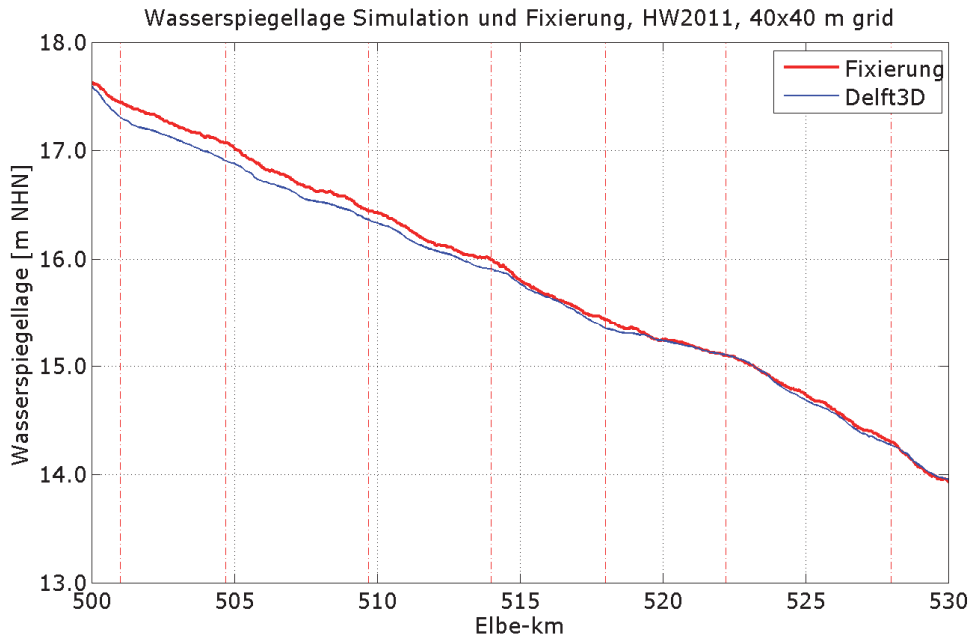
30 m Gitter:





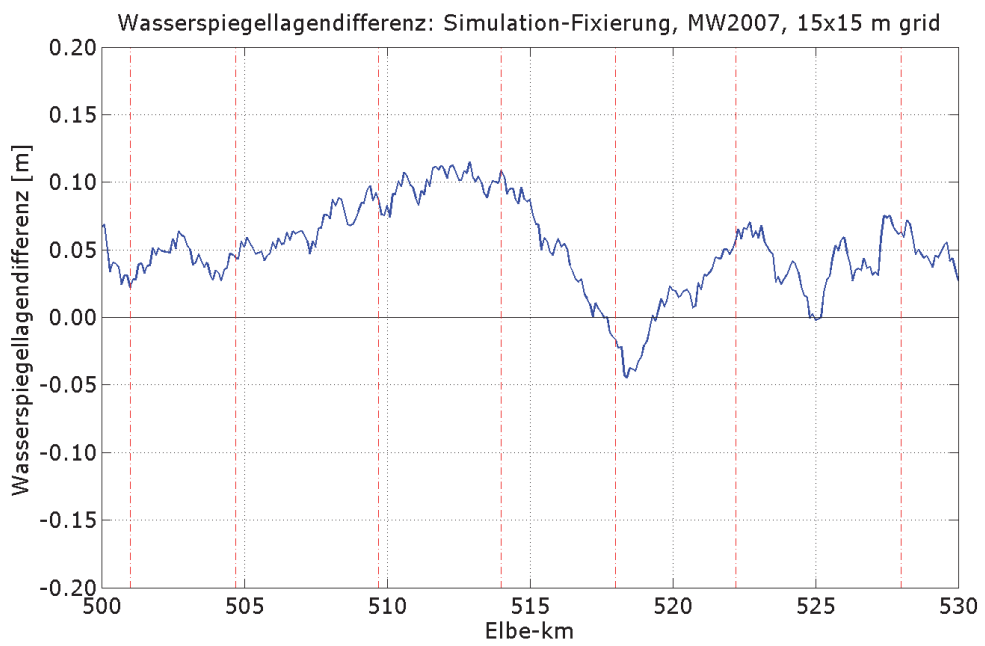
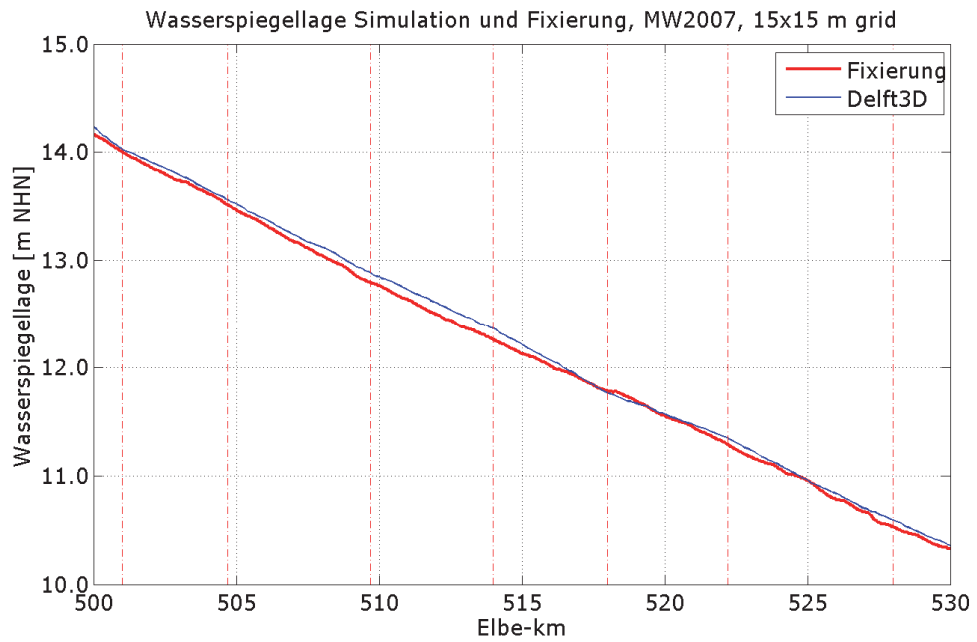
40 m Gitter:





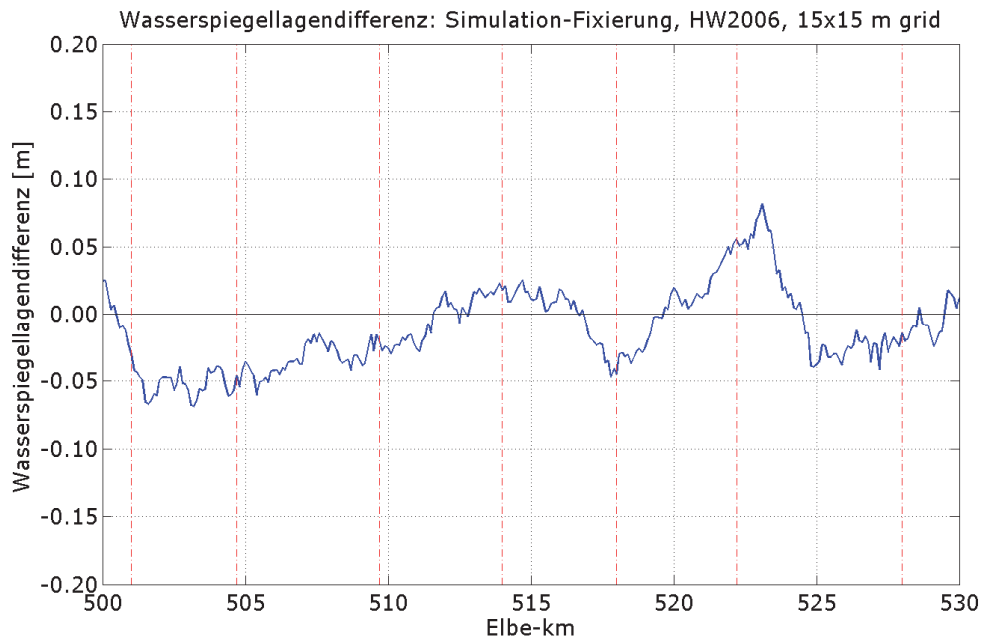
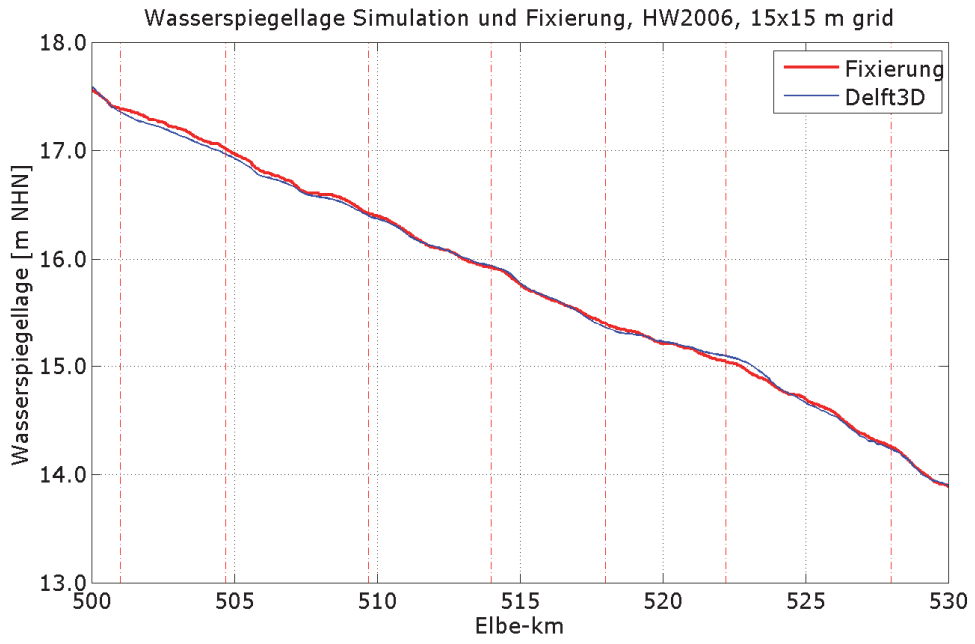
## **Ergebnisse der Validierung**

15 m Gitter:

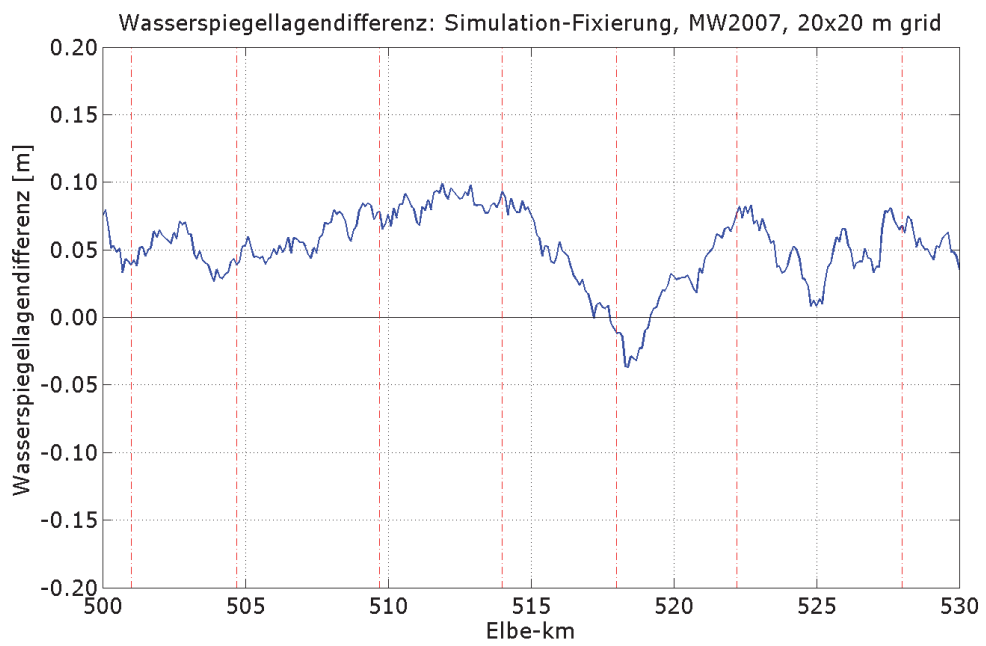
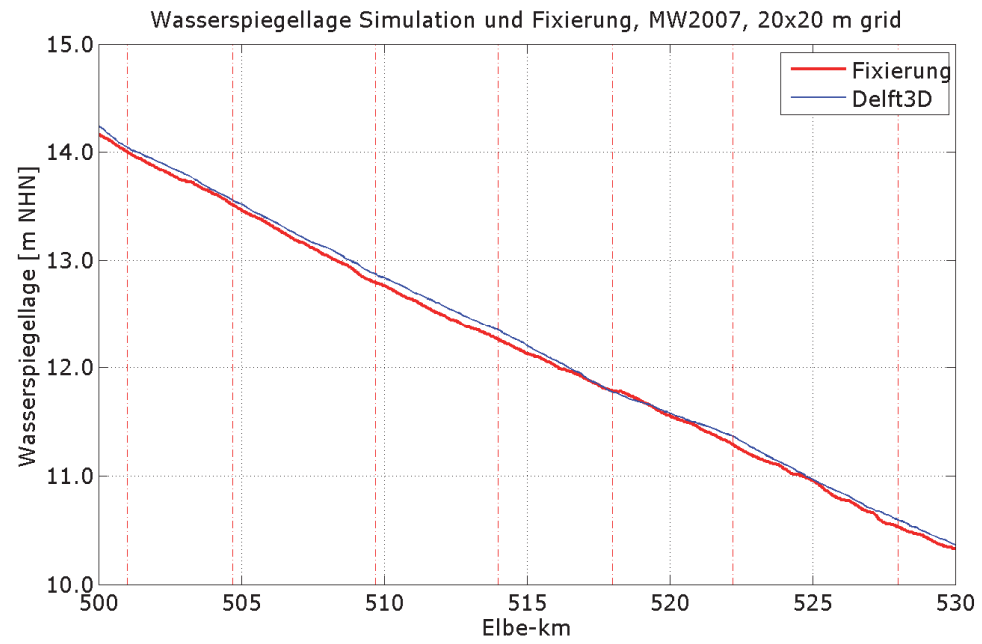




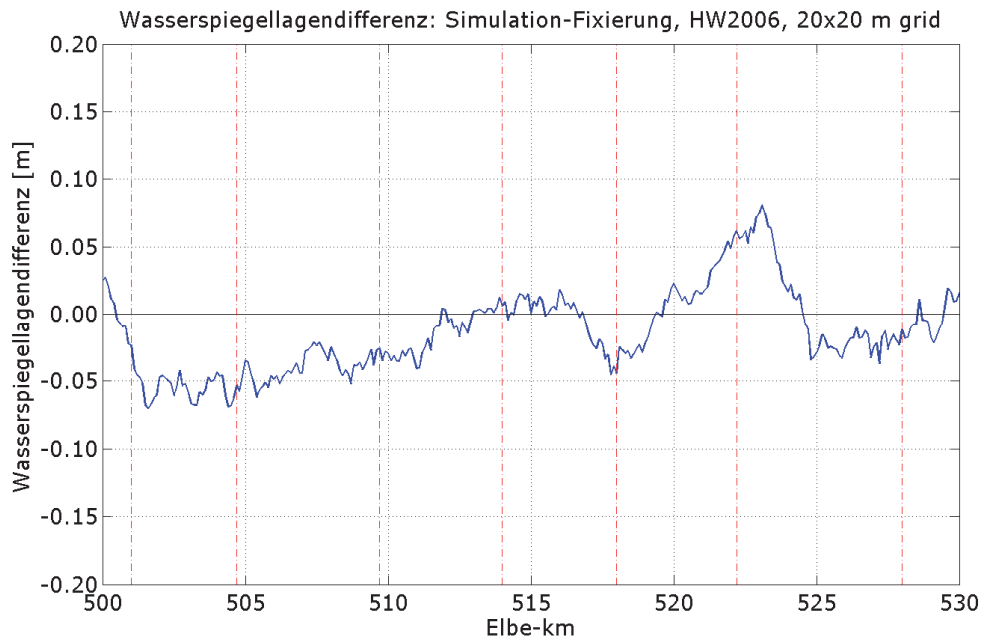
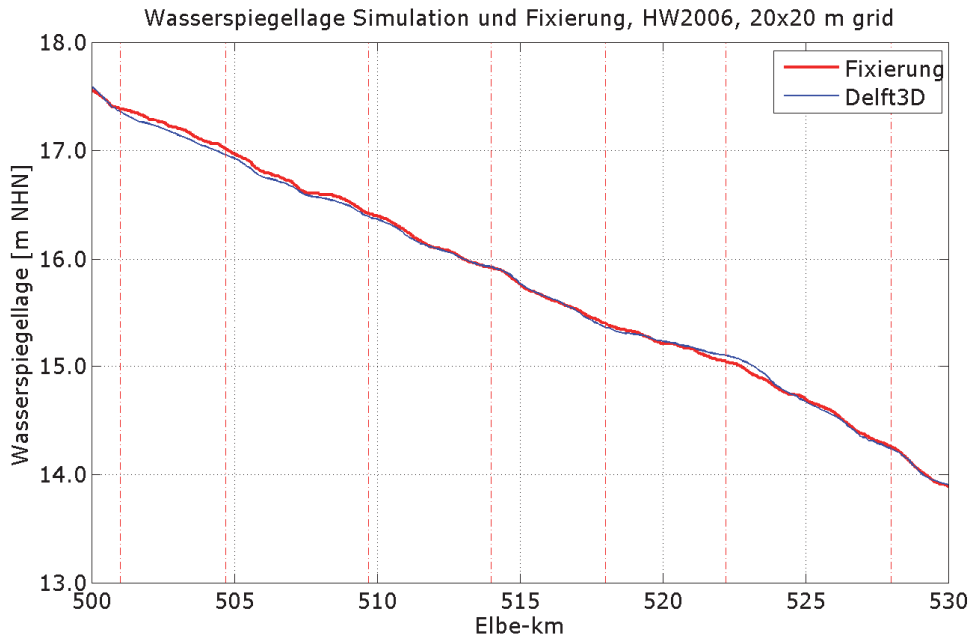
2D-Modellierung  
der unteren Mittel-  
elbe von Witten-  
berge bis Geest-  
hacht – Pilotmo-  
delle Dömitz bis  
Hitzacker



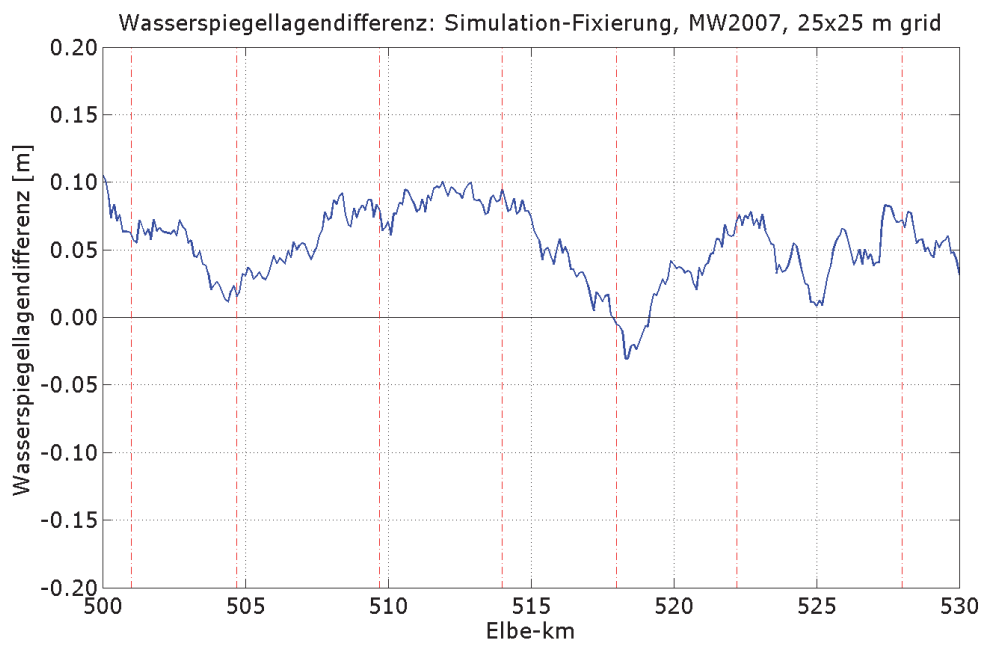
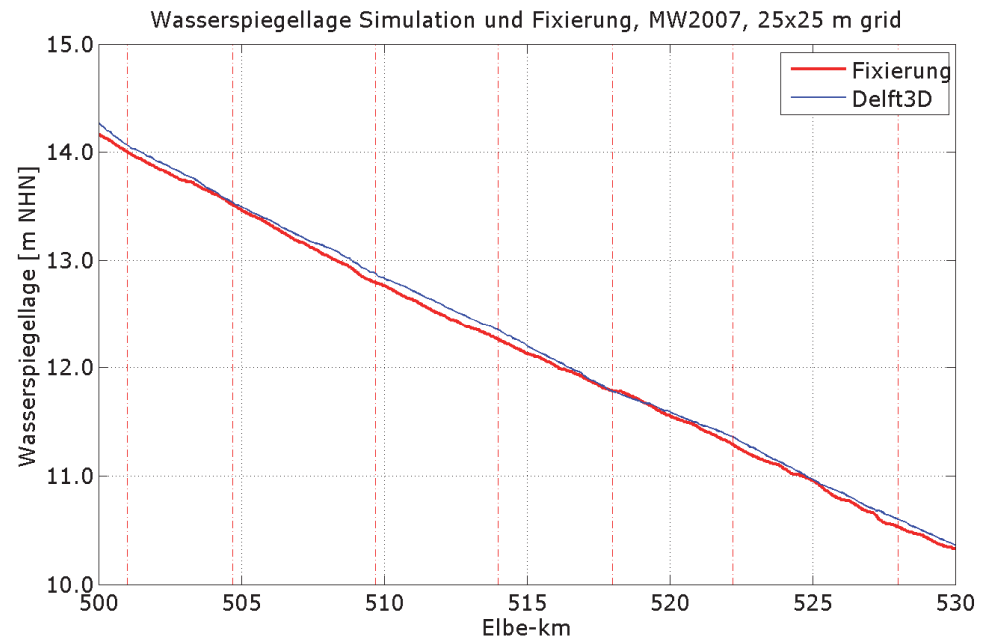
20 m Gitter:



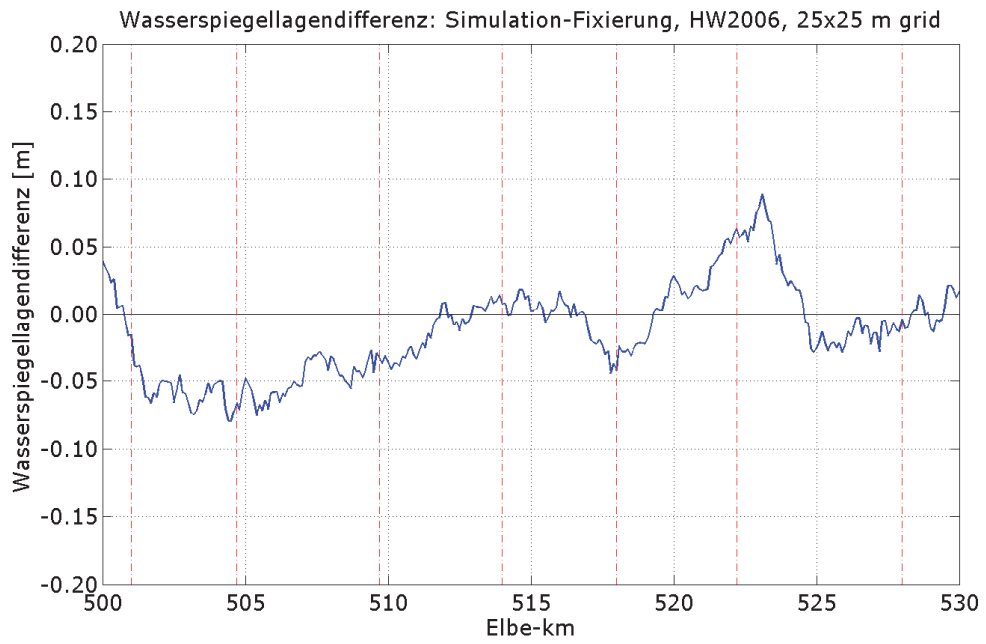
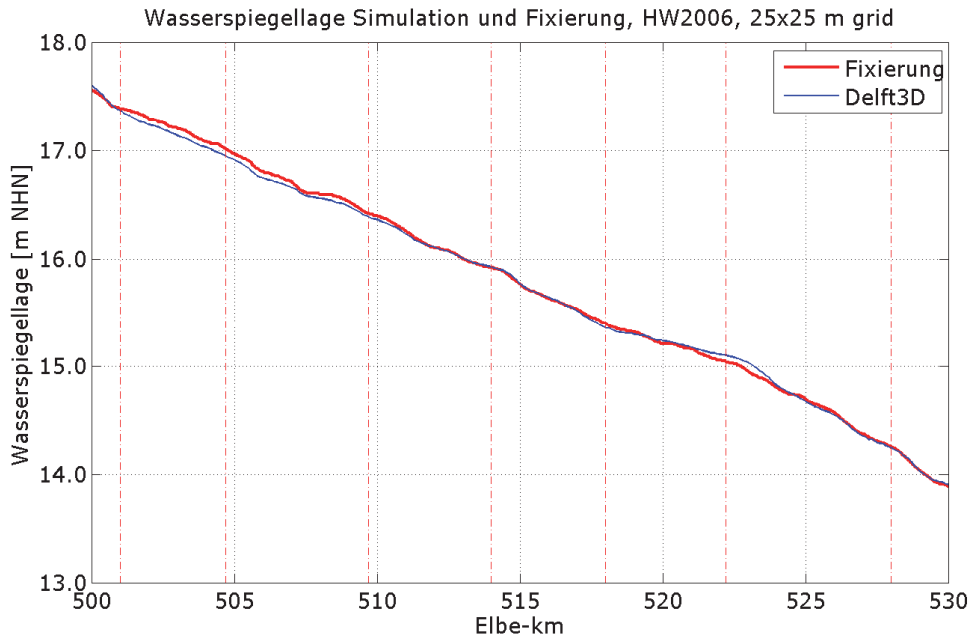
2D-Modellierung  
der unteren Mittel-  
elbe von Witten-  
berge bis Geest-  
hacht – Pilotmo-  
delle Dömitz bis  
Hitzacker



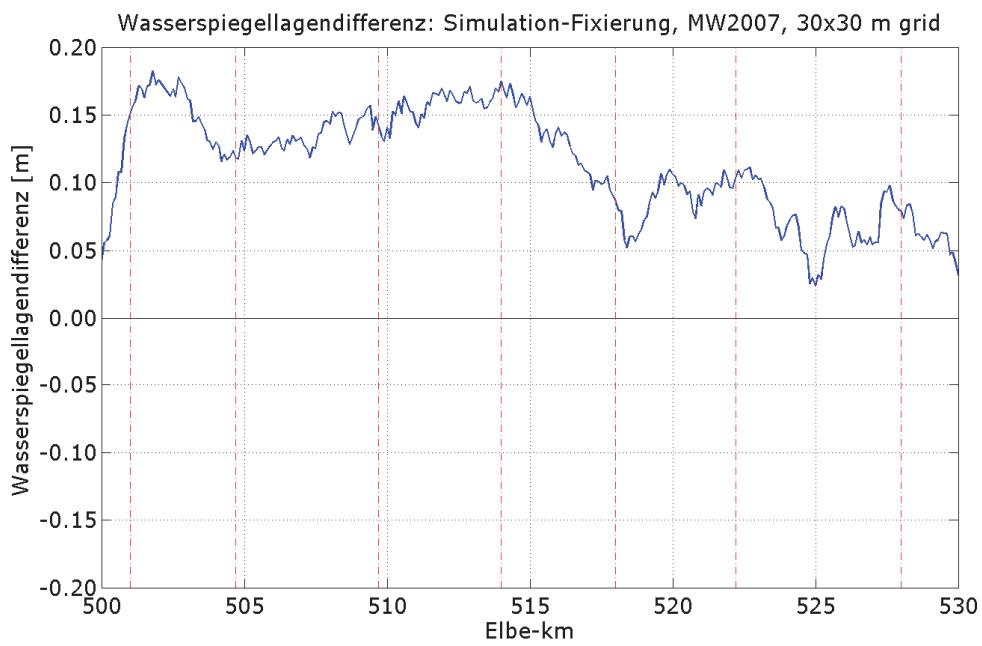
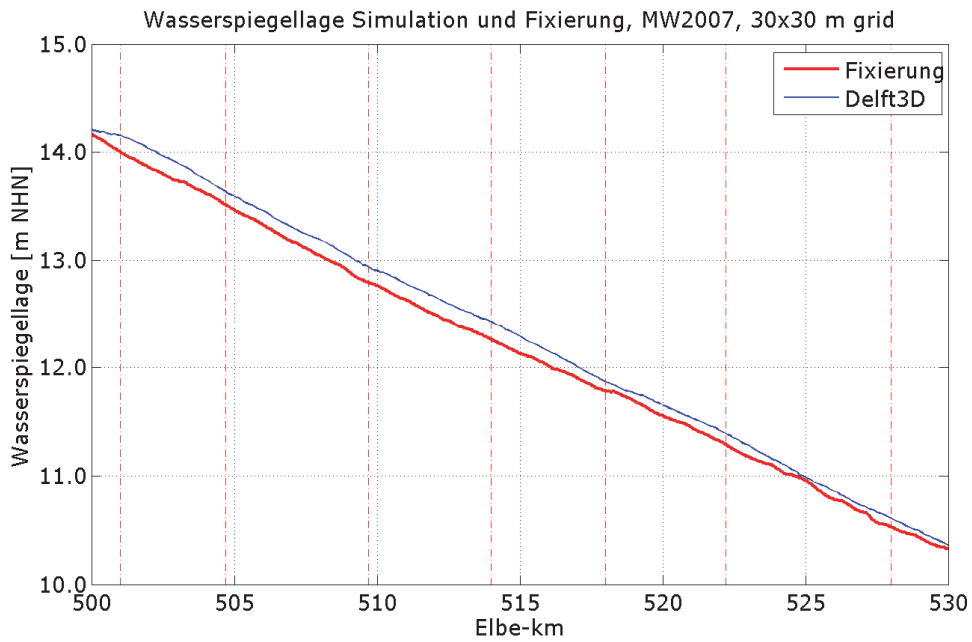
25 m Gitter:



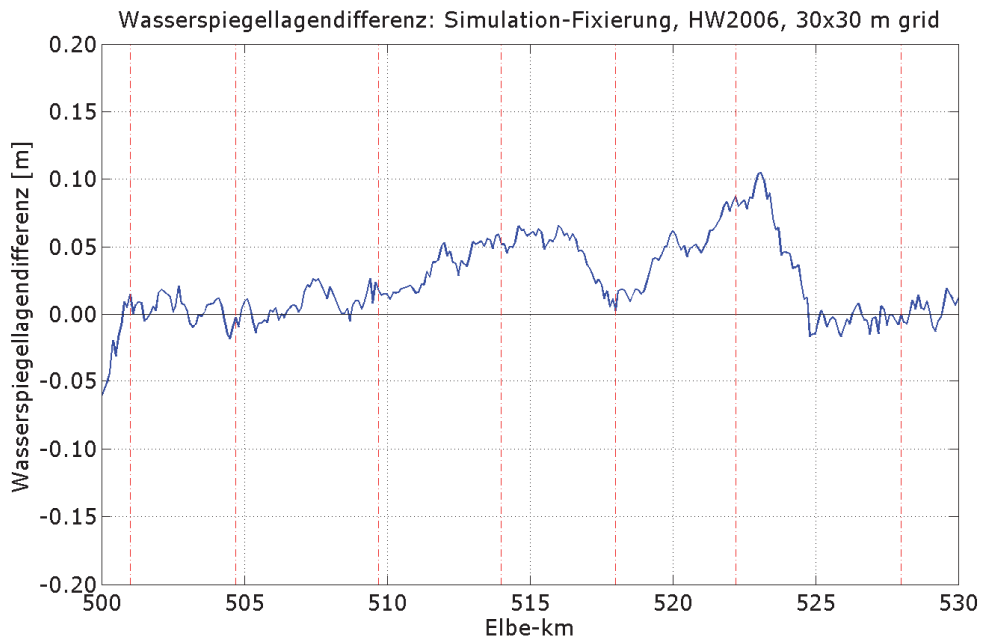
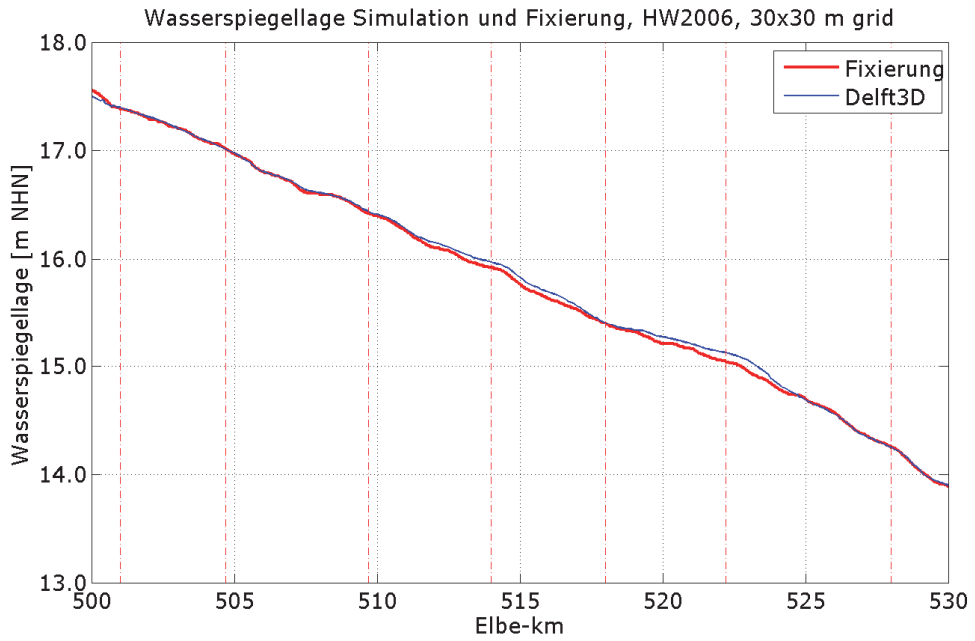
2D-Modellierung  
der unteren Mittel-  
elbe von Witten-  
berge bis Geest-  
hacht – Pilotmo-  
delle Dömitz bis  
Hitzacker



30 m Gitter:

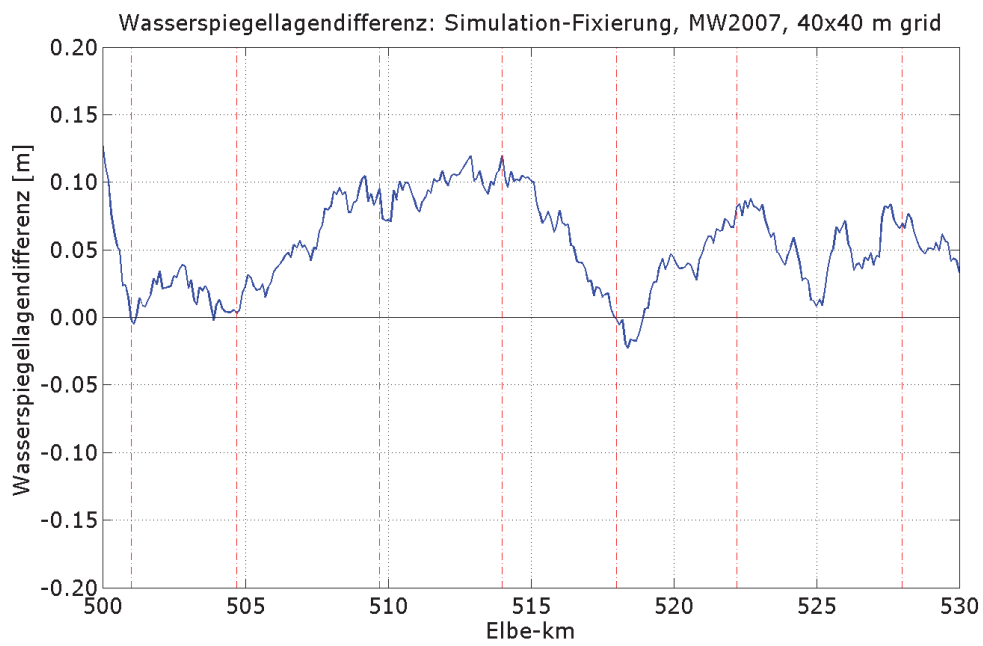
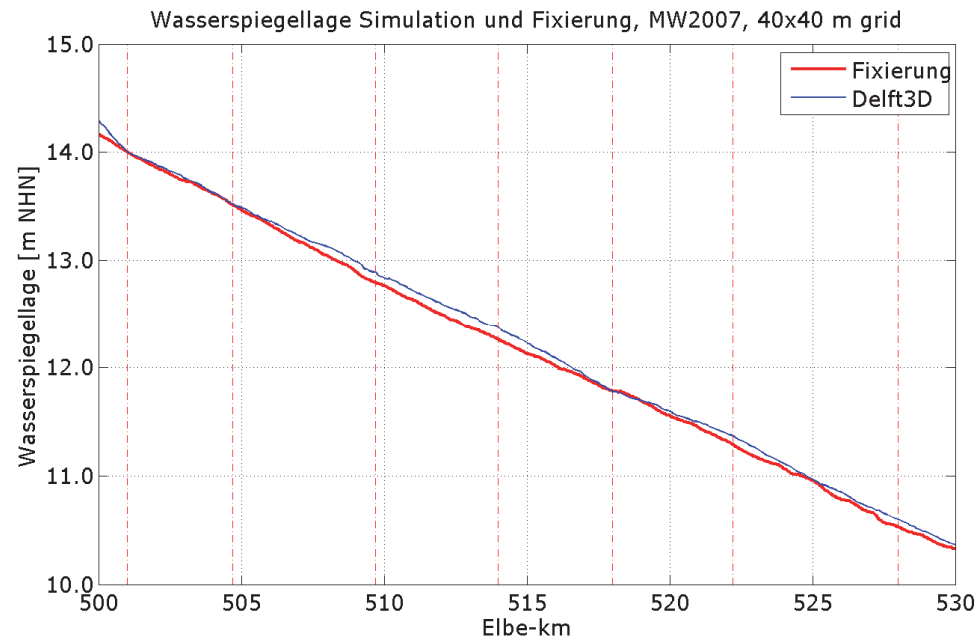


2D-Modellierung  
der unteren Mittel-  
elbe von Witten-  
berge bis Geest-  
hacht – Pilotmo-  
delle Dömitz bis  
Hitzacker

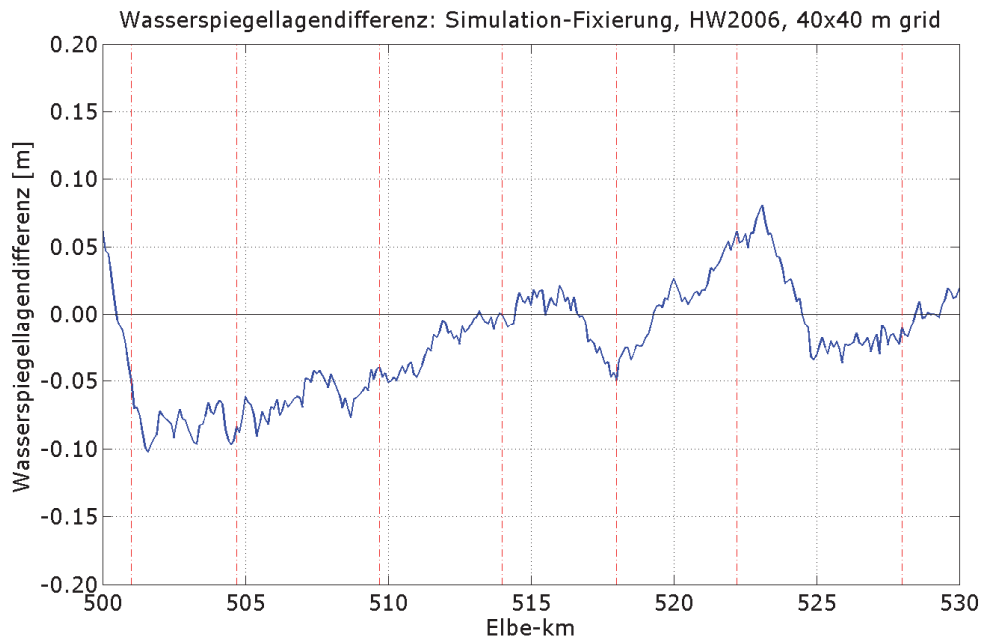
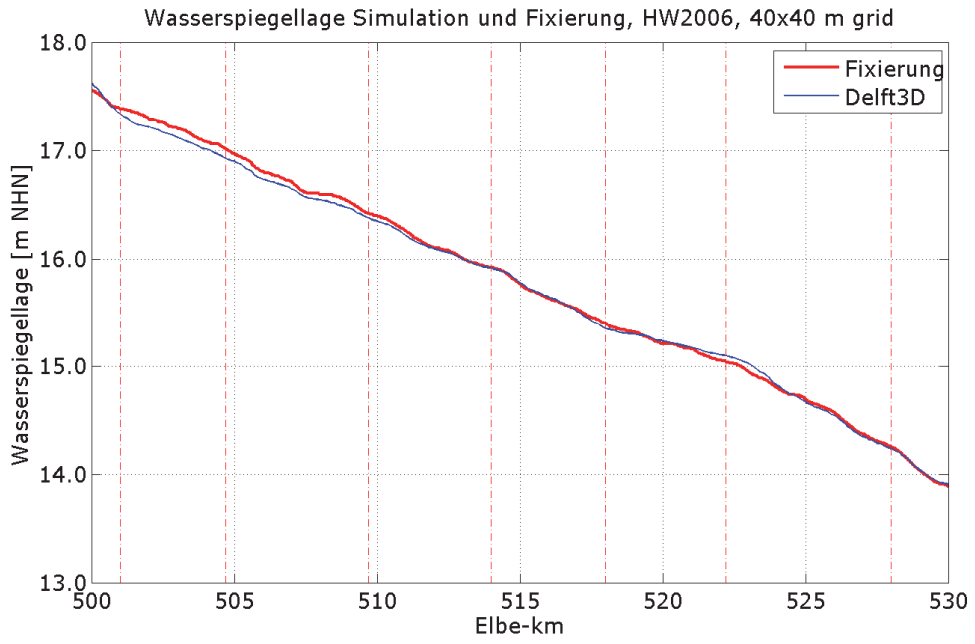




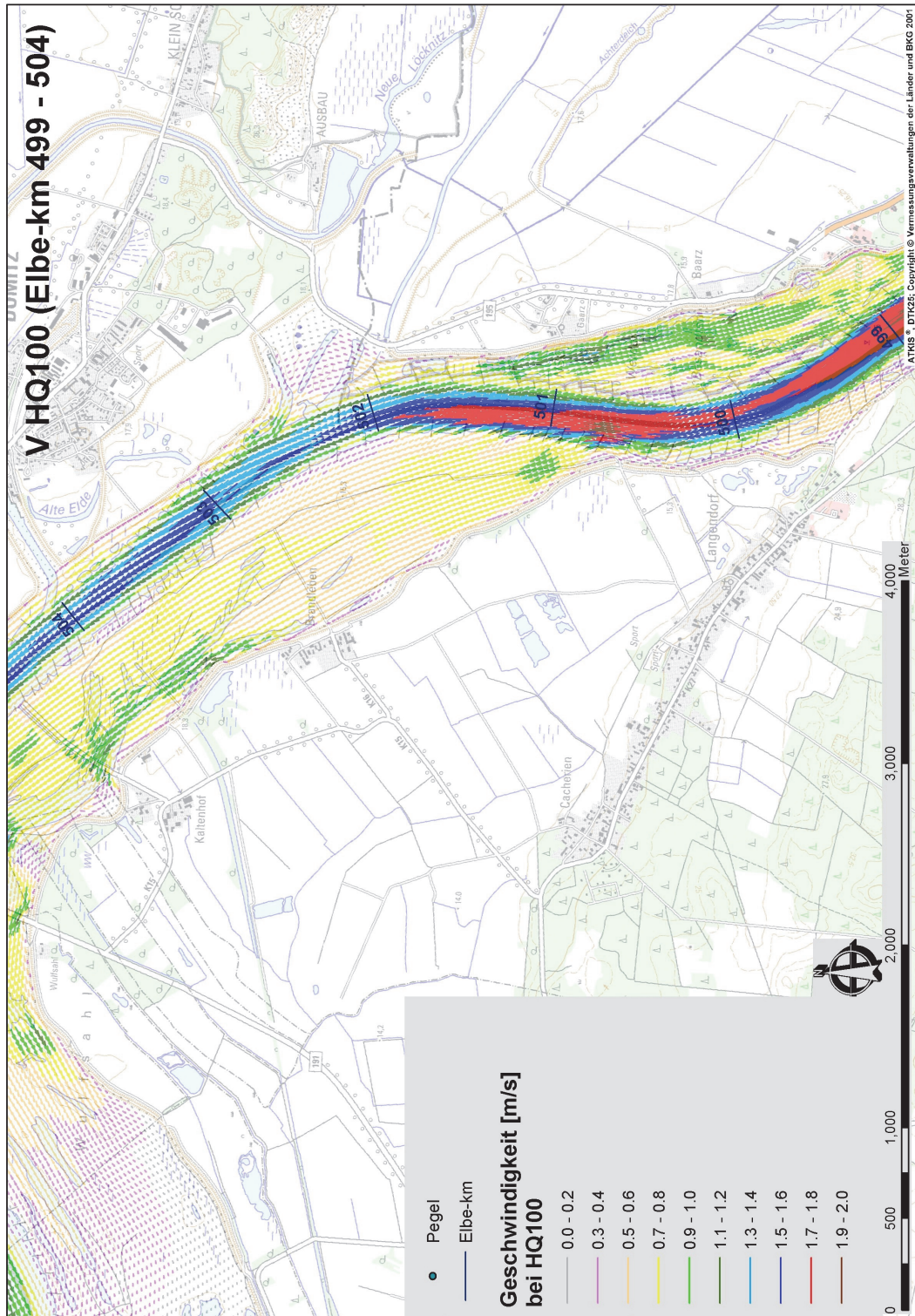
40 m Gitter:



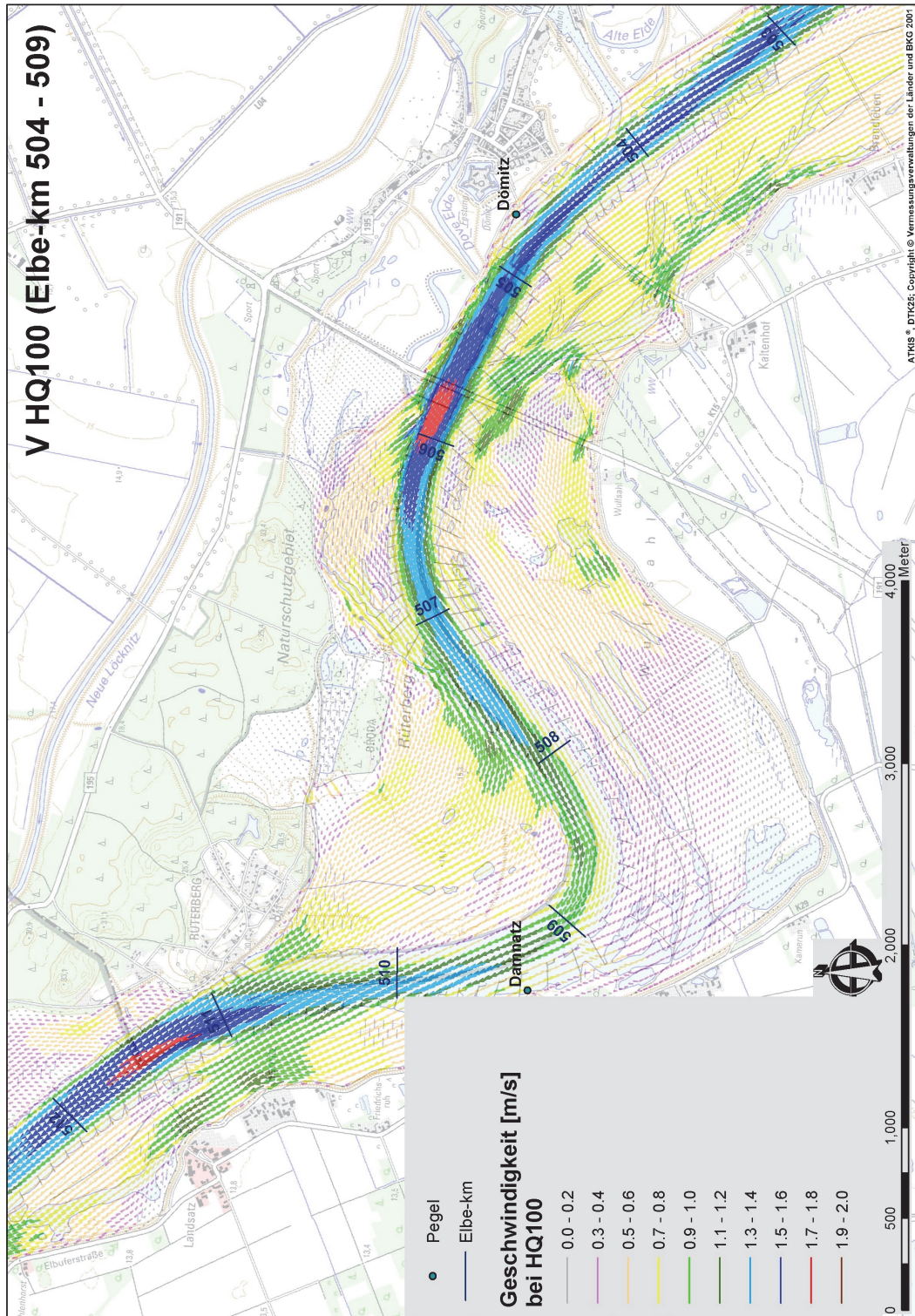
2D-Modellierung  
der unteren Mittel-  
elbe von Witten-  
berge bis Geest-  
hacht – Pilotmo-  
delle Dömitz bis  
Hitzacker



## **Strömungsfelder für HQ<sub>100</sub>**

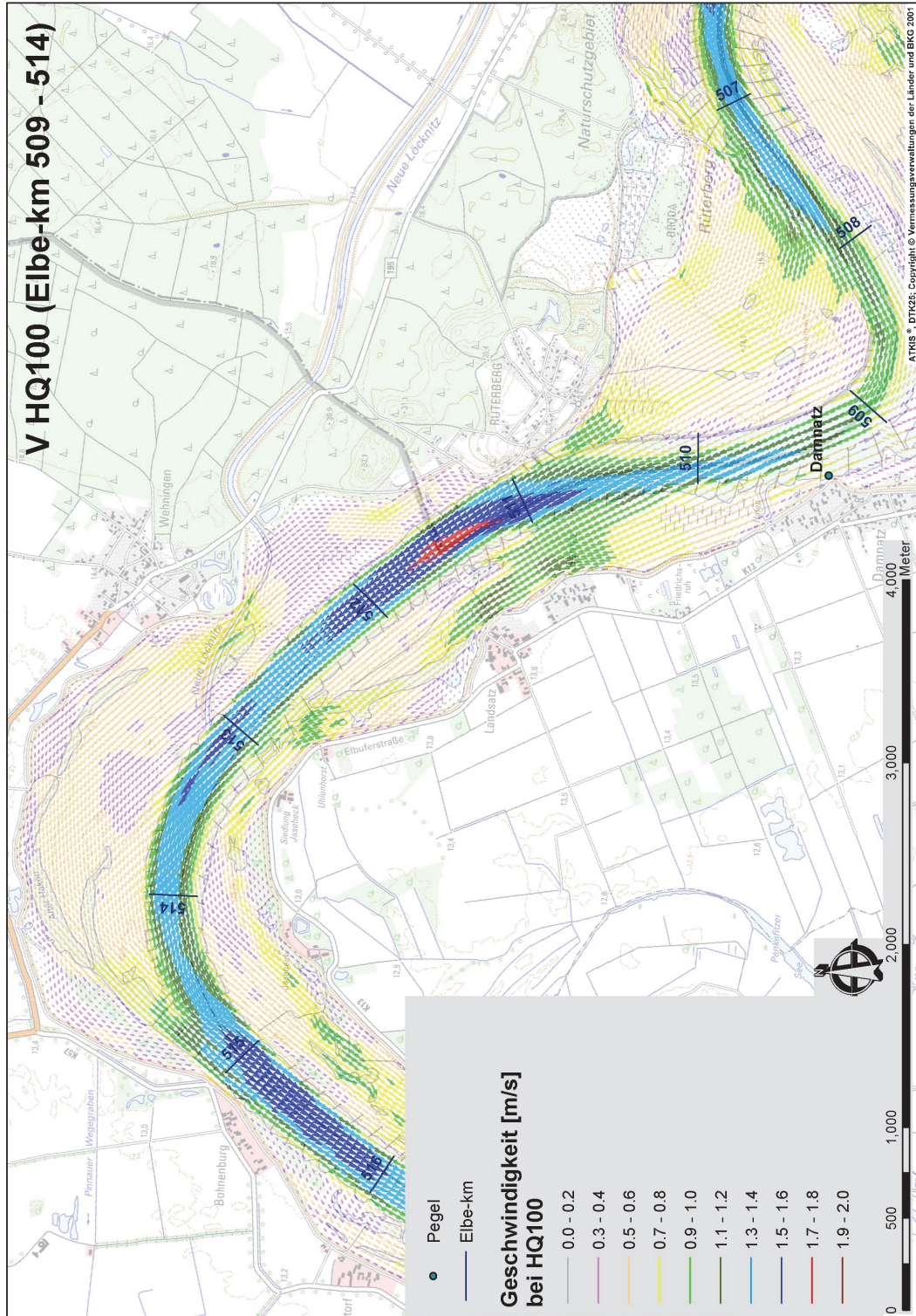


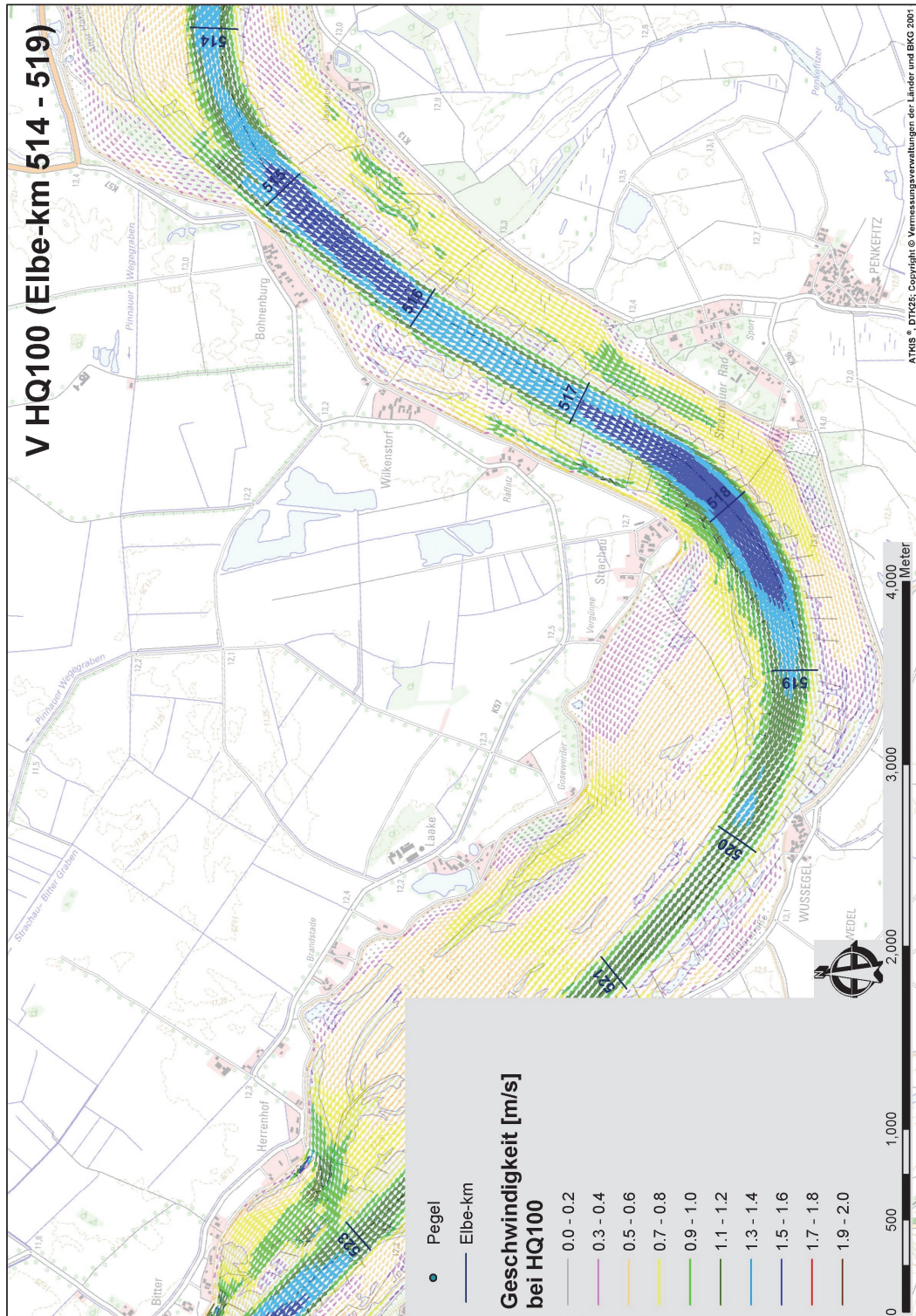






2D-Modellierung  
der unteren Mittel-  
elbe von Witten-  
berge bis Geest-  
hacht – Pilotmo-  
delle Dömitz bis  
Hitzacker







2D-Modellierung  
der unteren Mittel-  
elbe von Witten-  
berge bis Geest-  
hacht – Pilotmo-  
delle Dömitz bis  
Hitzacker

