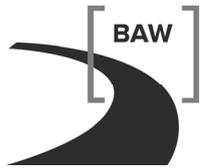




Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Wasserbauliche Systemanalyse
für das
Offshore-Terminal Bremerhaven**

A 3955 02 10135



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Wasserbauliche Systemanalyse für das
Offshore-Terminal Bremerhaven**

Auftraggeber: Bremenports GmbH & Co. KG
Am Strom 2
27568 Bremerhaven

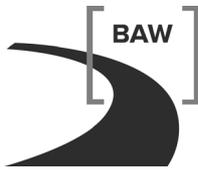
Auftrag vom: 11.11.2010, Az.: 42816850

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A 3955 02 10135

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
Referat: Ästuarsysteme I (K2)
Bearbeiter: Dr.-Ing. R. Schubert
Dr.-Ing. U. Vierfuß
Dipl.-Ing. H. Brand
Dipl.-Ing. U. Schiller

Hamburg, im September 2012

Das Gutachten darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.



Zusammenfassung

Die Bremenports GmbH & Co KG plant die Errichtung eines Offshore-Terminals in Bremerhaven (OTB) für den wachsenden Markt der Offshore-Windkraftanlagen. Verschiedene Randbedingungen führten zu einem Ausführungsentwurf, der eine Anlage des Terminals im Blexer Bogen auf der Seite Bremerhavens vorsieht.

Die Auswirkungen des Terminals auf die Hydrodynamik und auf die Transportprozesse im Weserästuar waren detailliert zu untersuchen. Bremenports als Träger des Vorhabens ist daher nach Rücksprache mit der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung an die BAW mit der Bitte herangetreten, ein Untersuchungskonzept zur Ermittlung maßnahmenbezogener Wirkungen auf abiotische Systemparameter aufzustellen und umzusetzen.

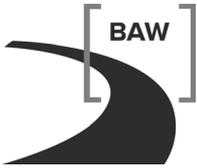
Eine wasserbauliche Optimierung des Terminals wurde von der BAW nicht durchgeführt. Bauzustände wurden nicht untersucht.

Die maßnahmenbedingten Wirkungen sind im Wesentlichen:

- ein lokaler Anstieg der Strömungsgeschwindigkeiten durch die Kontraktion der Strömung,
- ein Anstieg der Wellenhöhen bei Blexen durch die Seegangreflektion an der OTB-Kaje.

Das geplante Terminal ragt in den Fließquerschnitt der Weser hinein (Einengung) und bewirkt somit eine veränderte Stromführung am Prallhang. Dadurch wird die Strömung im verbleibenden Querschnitt zwischen OTB und Blexerener Ufer beschleunigt und im Abschattungsbereich vor und hinter dem OTB reduziert. Die Vertiefung des Zufahrtbereichs und der Liegewanne ergibt nur ein geringes Baggervolumen und die daraus resultierende Zunahme des Durchflussquerschnitts ist von untergeordneter Bedeutung. Durch die bauwerksbedingte Einengung und Umlenkung der Strömung ergeben sich Zunahmen der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 0,25 m/s. Dadurch werden auch bisher schon vorhandene Zonen hoher Strömungsgeschwindigkeiten ausgedehnt; die Strömungscharakteristik des Blexer Bogens wird nicht verändert. Der Abschattungseffekt des Terminals führt zu ufernahen Geschwindigkeitsabnahmen unmittelbar vor und hinter dem Bauwerk. Die nennenswerten Änderungen der abiotischen Systemparameter betreffen die Weser maximal bis zu einem Abstand von ca. 5 km vom Terminal.

Wegen der Strömungsveränderungen ist mit einer morphologischen Reaktion der Gewässersohle im Bereich Blexen / Nordenham zu rechnen. Da nach Nasner (2011) keine Änderung des Erosionsverhaltens zu erwarten ist, wird sich in der Fahrrinne die Wassertiefe örtlich maximal in der Größenordnung von 1,5 m vergrößern, so dass sich der vor dem Terminal liegende Kolk ausdehnen wird. An der Unterwasserböschung am gegenüberliegenden Ufer (Übergang zum Blexerener Watt) kann ein teilweiser Abtrag nicht ausgeschlossen werden. Auch im Bereich der Terminalzufahrt sind morphologische Anpassungsprozesse zu



erwarten, insbesondere eine Kolkbildung an den Ecken des Terminals. Durch die morphologischen Anpassungsprozesse werden die anfänglichen Zunahmen der Strömungsgeschwindigkeiten reduziert.

Es wird empfohlen, die Sohlage im Blexer Bogen jährlich im Herbst (gegen Ende der Periode geringer Oberwasserzuflüsse) auf Veränderungen zu prüfen.

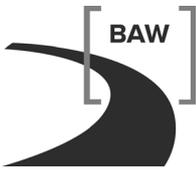
Aufgrund der Strömungsabschattung durch das Terminal ist mit einer Sedimentation im nördlichen und südlichen Bereich zwischen Hafenflanke und Ufer und mit der Neubildung bzw. Erweiterung von Wattflächen zu rechnen.

Das Terminal-Bauwerk wird sich auf die Seegangparameter im Umfeld des Hafens auswirken. Insbesondere werden die senkrechten Wände des Terminals die anlaufenden Wellen reflektieren und dadurch zu einem lokalen Anstieg der Wellenhöhen führen. Zwischen Weser-km 60 und 65,5 wird die signifikante Wellenhöhe im betroffenen Bereich der beiden Weserufer in Deichnähe um bis zu 0,05 m ansteigen (im Anschlussbereich unmittelbar nördlich des OTB bis zu 0,3 m). Dieser Effekt kann durch eine reflektionsmindernde Ausbildung der Kaje reduziert werden.

Die Veränderungen der Wasserstände sind für normale hydrologische Verhältnisse vernachlässigbar gering ($\ll 1$ cm). Bei der Bemessungssturmflut ergibt sich seeseitig ein Anstieg < 1 cm, binnenseits eine Absenkung um etwa 1 cm. Auch diese Änderungen sind unbedeutend, und die Maßnahme ist somit hochwasserneutral..

Im Blexer Bogen wird es im Bereich zwischen der Fahrrinne und dem rechten Ufer vorhabensbedingt zu lokalen Veränderungen / Verschiebungen der Salz- und Schwebstoffkonzentrationen kommen, wenn dort – je nach hydrologischer Situation – Konzentrationsgradienten auf Grund der Lage des Salzkeils bzw. der Trübungszone vorhanden sind.

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Unterlagen und Daten	2
3	Untersuchungskonzept	3
4	Methoden und Verfahren	4
4.1	Vorbemerkung	4
4.2	Hauptmodell des Weserästuars (UnTRIM)	6
4.2.1	Modellgebiet und Gitterauflösung	6
4.2.2	Untersuchungsszenarien	8
4.2.3	Modellkalibrierung und -validierung	10
4.3	Nebenmodell des Weserästuars (Delft3D)	10
4.4	Seegangmodell der Außen- und Unterweser bis Nordenham (SWAN)	10
4.5	Analyse numerischer Modellergebnisse	11
5	Auswirkungen auf die Strömungen und die Wasserstände (mittlere Tide- und Oberwasserverhältnisse)	13
5.1	Wirkungszusammenhänge	13
5.2	Untersuchungsmethodik	16
5.3	Vorhabensbedingte Änderungen der Strömungen	16
5.4	Vorhabensbedingte Änderungen des Tidenhubs und der Wasserstände	26
6	Auswirkungen auf die Transportprozesse (mittlere Tide- und Oberwasserverhältnisse)	29
6.1	Wirkungszusammenhänge	29
6.2	Untersuchungsmethodik	30
6.3	Vorhabensbedingte Änderungen der Salzgehalte	32
6.4	Vorhabensbedingte Änderungen der Schwebstoffgehalte	36
7	Auswirkungen auf die Scheitelwasserstände und Laufzeiten der Sturmfluten	39
7.1	Wirkungszusammenhänge	39
7.2	Untersuchungsmethodik	39
7.3	Vorhabensbedingte Änderungen der Scheitelwasserstände und Laufzeiten	39
8	Auswirkungen auf die Seegangsverhältnisse	44
8.1	Wirkungszusammenhänge	44
8.2	Untersuchungsmethodik	44



8.3	Vorhabensbedingte Änderungen des Seegangs	46
8.4	Folgerungen	56
9	Auswirkungen auf die Morphodynamik und den Sedimenttransport	58
9.1	Wirkungszusammenhänge	58
9.2	Untersuchungsmethodik	60
9.3	Vorhabensbedingte Änderungen der Sohlschubspannungen	62
9.4	Vorhabensbedingte Änderungen der Morphodynamik	66
9.5	Langfristiger morphologischer Systemzustand	69
9.6	Langfristige Vorhabenswirkungen	70
9.7	Unterhaltungsaufwand für den Zufahrts- und Liegewannenbereich	71
10	Berücksichtigung weiterer Vorhaben	73
10.1	Zu berücksichtigende Vorhaben	73
10.2	Vorhaben „Steelwind“	73
10.3	Vorhaben „Xstrata“	77
10.4	Fazit	77
11	Bewertung der Vorhabenswirkungen unter Berücksichtigung von Betroffenheiten	78
11.1	Allgemeines	78
11.2	Deichsicherheit	78
11.3	Anleger und Ufer am Blexener und Nordenhamer Ufer	79
11.4	Fischerei	80
12	Literaturverzeichnis	81
Anhang:		
	Auswertung der Strömungsmessungen im Blexer Bogen nach Messdaten des Instituts für Wasserbau, Bremen, 2011	85

Bildverzeichnis	Seite
Bild 1: Lage des geplanten Offshore Terminals Bremerhaven	1
Bild 2: Modellgebiet des Hauptmodells	6
Bild 3: Berechnungsgitter des Hauptmodells im Bereich des OTB	7
Bild 4: Gesteuerte Wasserstands- und Abflusskurve im Simulationszeitraum Spring-Nippzyklus am seeseitigen Modellrand	8
Bild 5: Gesteuerte Wasserstandskurve der Bemessungsturmflut am seeseitigen Modellrand	9
Bild 6: 3D-Darstellung der Topographie des Blexer Bogens	13
Bild 7: OTB mit Zufahrtsbereich: Differenztopographie	15
Bild 8: Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum (Referenzzustand)	18
Bild 9: Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum (Ausbau)	18
Bild 10: Vorhabensbedingte Änderungen der mittleren Flutstromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum	19
Bild 11: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum (Referenz)	20
Bild 12: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum (Ausbau)	20
Bild 13: Vorhabensbedingte Änderungen der mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum	21
Bild 14: Maximale Flutstromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum (Referenz)	22
Bild 15: Maximale Flutstromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum (Ausbau)	22
Bild 16: Vorhabensbedingte Änderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum	23
Bild 17: Maximale Ebbestromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum (Referenz)	24
Bild 18: Maximale Ebbestromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum (Ausbau)	24
Bild 19: Vorhabensbedingte Änderungen der maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum	25
Bild 20: Änderung des mittleren Tidehubs im Analysezeitraum (Längsschnitt durch die Fahrrinne)	26
Bild 21: Änderung des mittleren Tidehubs im Analysezeitraum	27
Bild 22: Änderung des maximalen Tidehubs im Analysezeitraum	27
Bild 23: Änderung des maximalen Tidehochwassers im Analysezeitraum	28

Bild 24:	Sedimentbelegung der Modellsohle	31
Bild 25:	Mittlere Salzgehalte im Analysezeitraum (Ausbau, tide- und tiefengemittelt)	33
Bild 26:	Vorhabensbedingte Änderungen der mittleren Salzgehalte im Analysezeitraum (tide- und tiefengemittelt)	33
Bild 27:	Maximale Salzgehalte im Analysezeitraum (Ausbau, tiefengemittelt)	34
Bild 28:	Vorhabensbedingte Änderungen der maximalen Salzgehalte im Analysezeitraum (tiefengemittelt)	34
Bild 29:	Maximale Salzgehaltsvariation im Analysezeitraum (Ausbau, tiefengemittelt)	35
Bild 30:	Vorhabensbedingte Änderungen der maximalen Salzgehaltsvariation im Analysezeitraum (tiefengemittelt)	35
Bild 31:	Mittlere Schwebstoffgehalte im Analysezeitraum (Ausbau, tide- und tiefengemittelt)	37
Bild 32:	Vorhabensbedingte Änderungen der mittleren Schwebstoffgehalte im Analysezeitraum (tide- und tiefengemittelt)	37
Bild 33:	Maximale Schwebstoffgehalte im Analysezeitraum (Ausbau, tiefengemittelt)	38
Bild 34:	Vorhabensbedingte Änderungen der maximalen Schwebstoffgehalte im Analysezeitraum (tiefengemittelt)	38
Bild 35:	Flutstromgeschwindigkeiten bei der Bemessungssturmflut (Referenz)	41
Bild 36:	Flutstromgeschwindigkeiten bei der Bemessungssturmflut (Ausbau)	41
Bild 37:	Vorhabensbedingte Änderungen der Flutstromgeschwindigkeiten bei der Bemessungssturmflut	42
Bild 38:	Wasserstandsganglinien der Bemessungssturmflut und Differenzen am Pegel Bremen (Wilhelm-Kaisen-Brücke)	42
Bild 39:	Wasserstandsganglinien der Bemessungssturmflut und Differenzen am Pegel Bremerhaven (Alter Leuchtturm)	43
Bild 40:	Änderung des Scheitelwasserstandes der Bemessungssturmflut	43
Bild 41:	Signifikante Wellenhöhen beim Scheitelwasserstand (Referenz)	48
Bild 42:	Signifikante Wellenhöhen beim Scheitelwasserstand (Ausbau)	48
Bild 43:	Vorhabensbedingte Änderungen der signifikanten Wellenhöhen beim Scheitelwasserstand	49
Bild 44:	Signifikante Wellenhöhen bei Flutstrom (Referenz)	50
Bild 45:	Signifikante Wellenhöhen bei Flutstrom (Ausbau)	50
Bild 46:	Vorhabensbedingte Änderungen der signifikanten Wellenhöhen bei Flutstrom	51

Bild 47:	Signifikante Wellenhöhen bei Ebbestrom (Referenz)	52
Bild 48:	Signifikante Wellenhöhen bei Ebbestrom (Ausbau)	52
Bild 49:	Vorhabensbedingte Änderungen der signifikanten Wellenhöhen bei Ebbestrom	53
Bild 50:	Signifikante Wellenhöhen bei Flutkenterung (Referenz)	54
Bild 51:	Signifikante Wellenhöhen bei Flutkenterung (Ausbau)	54
Bild 52:	Vorhabensbedingte Änderungen der signifikanten Wellenhöhen bei Flutkenterung	55
Bild 53:	Prognosewerte für die Zunahme der signifikanten Wellenhöhen an den Deichlinien	57
Bild 54:	Sohllagen im Frühjahr und Herbst der Jahre 2007 und 2010	58
Bild 55:	Unterwassertopographie im Bereich des OTB	59
Bild 56:	Mittlere integrierte Sohlschubspannung bei Flutstrom (Referenzzustand)	63
Bild 57:	Mittlere integrierte Sohlschubspannung bei Flutstrom (Ausbauzustand)	63
Bild 58:	Vorhabensbedingte Änderungen der mittleren integrierte Sohlschubspannung bei Flutstrom (Ausbauzustand gegenüber dem Referenzzustand)	64
Bild 59:	Mittlere integrierte Sohlschubspannung bei Ebbestrom (Referenzzustand)	65
Bild 60:	Mittlere integrierte Sohlschubspannung bei Ebbestrom (Ausbauzustand)	65
Bild 61:	Vorhabensbedingte Änderungen der mittleren integrierte Sohlschubspannung bei Ebbestrom (Ausbauzustand gegenüber dem Referenzzustand)	66
Bild 62:	Vorhabensbedingte morphologische Änderungen	68
Bild 63:	Angenommener langfristiger morphologischer Systemzustand	69
Bild 64:	Höhendifferenzen des angenommenen langfristigen morphologischen Systemzustands (Bild 63) zum Ausbauzustand gem. Abschn. 4.1	70
Bild 65:	Vorhabensbedingte Änderungen der signifikanten Wellenhöhen beim Scheitelwasserstand, mit Steelwind-Kaje	75
Bild 66:	Vorhabensbedingte Änderungen der signifikanten Wellenhöhen bei Flutkenterung, mit Steelwind-Kaje	75
Bild 67:	Prognosewerte für die Zunahme der signifikanten Wellenhöhen an den Deichlinien unter Berücksichtigung der Steelwind-Kaje	76
Bild 68:	Vorhabensbedingte Änderungen der signifikanten Wellenhöhen beim Scheitelwasserstand, mit Steelwind-Kaje, Wasserstände um 25 cm erhöht	76

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Auf Grund des stark wachsenden Marktes für Offshore-Windkraftanlagen plant Bremenports die Errichtung eines Offshore-Terminals in Bremerhaven (OTB). Verschiedene Randbedingungen (landseitige Transportwege, benötigte Flächen, Abstände zur Fahrrinne und zu avifaunistisch hochwertigen Bereichen) führten zu einem Ausführungsentwurf, der eine Anlage des Terminals im Blexer Bogen auf der Seite Bremerhavens vorsieht (Bild 1).

Die Auswirkungen des Terminals auf die Hydrodynamik und auf die Transportprozesse im Weserästuar waren detailliert zu untersuchen. Bremenports als Träger des Vorhabens ist daher nach Rücksprache mit der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung an die BAW mit der Bitte herangetreten, ein Untersuchungskonzept zur Ermittlung maßnahmenbezogener Wirkungen auf abiotische Systemparameter aufzustellen und umzusetzen.

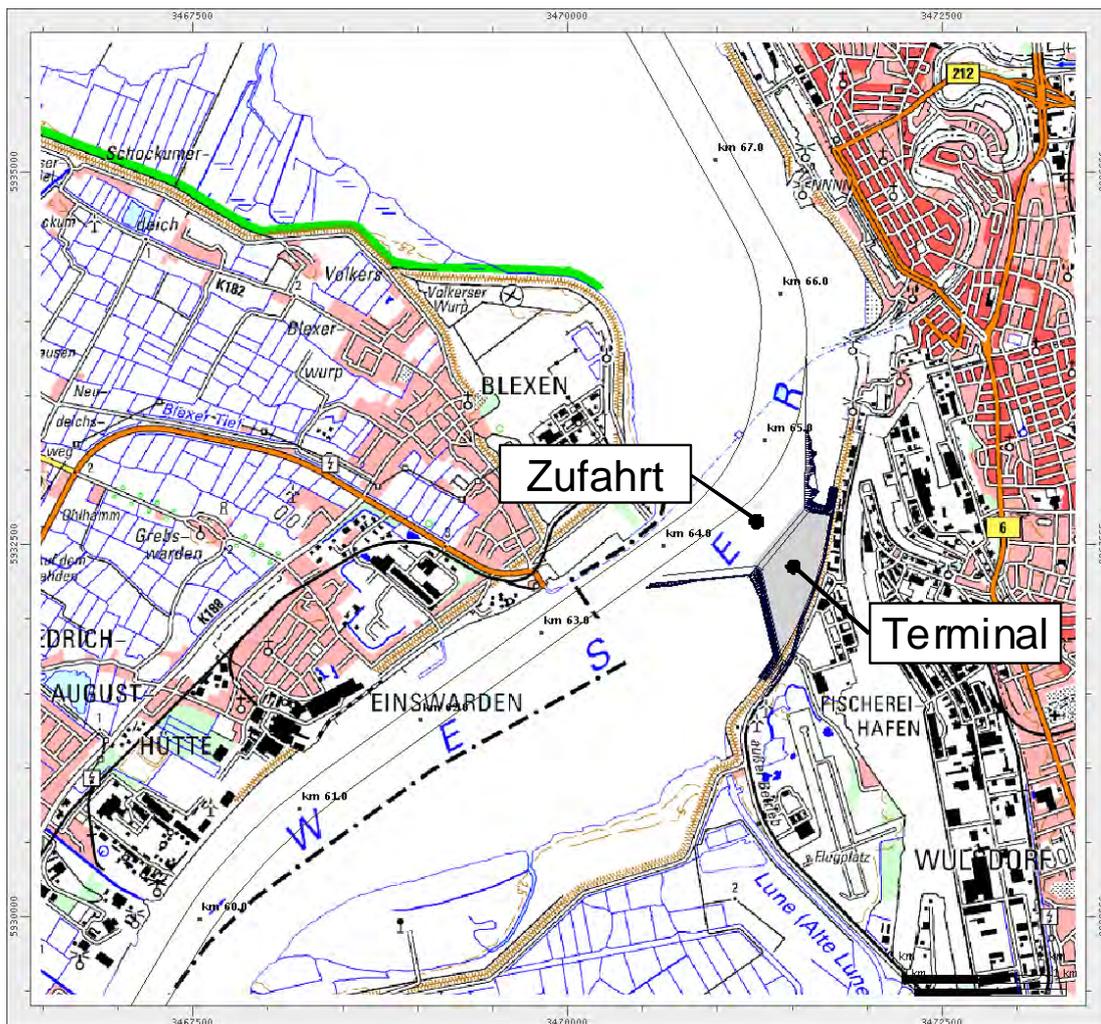
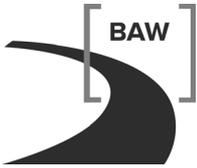


Bild 1: Lage des geplanten Offshore Terminals Bremerhaven



2 Unterlagen und Daten

- [1] Lageplan mit Liegewanne, E-Mail mit 1 Zeichnung, Ulrich Kraus, Bremenports GmbH & Co. KG, 22. Dezember 2010
- [2] Baugrunderkundung im Rahmen einer Machbarkeitsstudie. Notiz, Dr. A. Richwien, Bremenports, 09.04.2009
- [3] Baugrunderkundung im Bereich des OTB. Institut Dr. Nowak, Oldenburg, 19.04.2011
- [4] Schwerlastkai Steelwind, Lageplan Gesamtanlage Planung, Zeichnung 521212/1-1-0.03, Vorabzug Stand 20.04.2012

Für die Bilder im vorliegenden Gutachten wurde Kartenmaterial aus dem WSV-Geoportal verwendet.

3 Untersuchungskonzept

Zu ermitteln waren die maßnahmenbedingten Wirkungen des Offshore-Terminals Bremerhaven (OTB) auf die abiotischen Systemparameter des Weserästuars:

- Strömungen und Wasserstände
- Salz- und Schwebstofftransport
- Scheitelwasserstände und Laufzeiten bei Sturmflut
- Seegang bei Sturmflut
- Morphodynamik und Sedimenttransport

Die im vorliegenden Gutachten dargestellte Hauptuntersuchung soll der Erstellung der Antragsunterlagen dienen und ist als grundlegender Beitrag für die darauf aufbauenden Umweltfolgenabschätzungen konzipiert. Dazu wurden die maßnahmenbedingten Änderungen abiotischer Parameter auf der Grundlage wasserbaulicher Systemstudien ermittelt, bei denen hydro- und morphodynamische numerische Modelle zur Anwendung kamen. Wegen der Reflektionswirkung der Kaje wurden außerdem Untersuchungen mit einem Seegangsmodell durchgeführt. Die Änderungen der Kenngrößen der Hydrodynamik und der Transportprozesse wurden durch Differenzbildung der Kenngrößen zwischen zwei unterschiedlichen topographischen Zuständen des Modells (dem Ausbauzustand OTB und Referenzzustand) berechnet. Die maßnahmebedingten, verfahrensrelevanten Änderungen wurden hieraus unter Einbeziehung des wasserbaulichen Expertenwissens bestimmt.

Das OTB war hinsichtlich der Lage des Terminals sowie der Geometrie und Bathymetrie auf die geplante Weseranpassung abgestimmt. Die Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenweser wurde in den Modelltopographien berücksichtigt. Die Prognosewerte der Vorhabenswirkungen des OTB beziehen sich somit auf den planerischen Ist-Zustand nach Realisierung der Fahrrinnenanpassungen und enthalten ggf. eine daraus resultierende Verstärkung

Im Laufe der Untersuchungen wurden weitere Planungen bekannt, die evtl. die Wirkungen des OTB beeinflussen könnten, und in den voraussichtlichen Untersuchungsrahmen aufgenommen. Diese Vorhaben werden im vorliegenden Gutachten gesondert behandelt (Abschnitt 10).

4 Methoden und Verfahren

4.1 Vorbemerkung

Die eingangs des vorstehenden Abschnitts 3 genannten Systemparameter werden in den Abschnitten 5 bis 9 behandelt. Dort wird auch die angewendete Untersuchungsmethodik genauer beschrieben, da sie von den Parametern selbst und von den noch zu erläuternden Wirkungszusammenhängen abhängig ist.

Eine wesentliche Grundlage für Systemanalysen und für die Quantifizierung der maßnahmenbedingten Wirkungen sind die Simulationen mit 2D- und 3D-HMN-Modellen (hydro- und morphodynamische numerische Modelle) und mit einem Seegangmodell. Daher werden hier in Abschnitt 4 zunächst die angewendeten numerischen Modelle und Modellverfahren erläutert.

Die verwendeten HMN-Modelle bilden die relevanten physikalischen Prozesse im Jade-Weser-Ästuar mit Hilfe des numerischen Verfahrens UnTRIM¹ bzw. Delft3D² dreidimensional ab. Für das Seegangmodell wurde das spektrale Modellverfahren SWAN³ in der in Delft3D integrierten Form verwendet. Die örtliche Auflösung der Rechengitter und die zeitliche Auflösung der Simulationen wurden so gewählt, dass alle charakteristischen, d. h. gewässerprägenden physikalischen Prozesse berücksichtigt und die entsprechend dem Bauvorhaben vorzunehmenden Änderungen der Topographie aufgelöst werden. Die Strömungsmodelle wurden zunächst an Naturmessungen (Wasserstands-, Strömungs- und Salzgehaltmessungen) kalibriert und verifiziert, so dass sie den „IST - Zustand“ der Gewässer- und Tideverhältnisse beschreiben (BAW, 2011). Hierbei basierte die Modelltopographie der Tideweser auf Vermessungen der Jahre 2002 und 2003 (Fächerecholot- und Linienpeilungen, Befliegungsdaten der Wattbereiche), in den Randbereichen und den Vorländern auf Befliegungsdaten des Jahres 1998, da für diesen Zustand ein umfangreicher homogener Messdatensatz an Steuer- und Kalibrierdaten zur Verfügung stand. Anschließend wurde das Modell für die vorliegende Untersuchung mit Hilfe von KoDiBa-Daten (KFKI-Projekt „Entwicklung und Implementierung von Methoden zur Aufbereitung konsistenter digitaler Bathymetrien“) auf den Zustand 2007 aktualisiert. Im Bereich des Offshore-Terminals (Nordenham bis Geestemündung) wurden Peildaten des Jahres 2009 berücksichtigt.

¹ UnTRIM 2007, Version 15.07.2010

² Version 3.28.10

³ Version 40.72 ABCDE

Die verfahrensrelevanten vorhabensbedingten Änderungen werden auf den „Vergleichszustand als planerischer Ist - Zustand“ bezogen. Dieser Referenzzustand unterscheidet sich vom Ist – Zustand zum Einen dadurch, dass Mindertiefen in der Fahrrinne durch die aktuell planfestgestellten Solltiefen ersetzt werden (optimaler Unterhaltungszustand der Fahrrinne), zum Anderen werden alle weiteren baulichen Maßnahmen berücksichtigt, die zum Zeitpunkt der Ausführung der zu untersuchenden Maßnahmen realisiert sein werden. Dabei bleiben die Steuer- und Kalibrierungsdaten unverändert. Die Topographie des Referenzzustands umfasste zusätzlich zum Ist-Zustand das Containerterminal CT 4 (realisiert), den Jade-weserport (in Bau), die Hafenerweiterung Brake (in Bau) und die Fahrinnenanpassung der Unter- und Außenweser (geplant).

In die Modelltopographie des Referenzzustands wurde schließlich das Offshore-Terminal mit angepasstem Zufahrts- und Liegewannenbereich gemäß Arbeitsunterlage [1] eingebaut, so dass ein HN – Modell des „Ausbauzustands“ entstand. Die nun mit dem Modell unter Verwendung der exakt gleichen Modellparameter und Randwertsteuerungen ermittelten Kennwerte (z. B. Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten, Wellenhöhen) ergaben die Rechenwerte für den Ausbauzustand. Durch Differenzbildung der berechneten hydro- bzw. morphodynamischen Kennwerte für den Ausbauzustand und den Referenzzustand wurden über das gesamte Modellgebiet die vorhabensbedingten Änderungen der Kennwerte ermittelt. Durch diese Vorgehensweise können Änderungen eindeutig der Maßnahme zugeordnet werden.

Die Rechenwerte aus den Modellsimulationen und –analysen bedürfen der fachkundlichen Interpretation („wasserbauliches Expertenwissen“), um fundierte Prognosen über die Ausbauwirkungen abzugeben. Die Berechnungsergebnisse sind somit nicht die alleinige Grundlage der gutachterlichen Aussagen, weil in die Bewertung sowohl die gewässerkundlichen Erkenntnisse über das Untersuchungsgebiet, als auch die revier- und methodenspezifischen Erfahrungen des Modellierers in der wasserbaulichen Systemanalyse einfließen müssen.

4.2 Hauptmodell des Weserästuars (UnTRIM)

4.2.1 Modellgebiet und Gitterauflösung

Das Modellgebiet (Bild 2) wurde ausreichend großräumig gewählt, um die maßgebenden physikalischen Prozesse hinsichtlich der vorhabensbedingten Änderungen naturähnlich abzubilden und für alle zu behandelnden Fragestellungen eine Beeinflussung der Ergebnisse durch die Steuerung am Modellrand auszuschließen.

Das Jade-Weser-Modell umfasste folgende Gebiete:

- Außenweser
- Unterweser
- Außen- und Innenjade
- Jadebusen



Bild 2: Modellgebiet des Hauptmodells

Die Nebenflüsse der Weser wurden nicht nachgebildet, weil sie bei der vorliegenden Fragestellung keinen nennenswerten Einfluss auf die Prognose der vorhabensbedingten Wirkungen haben.

Um die Vorhabenswirkungen im Modell naturähnlich abbilden zu können, wurde das Modellgitter im Bereich des geplanten Offshore-Terminals ausreichend verfeinert (Bild 3). Die Kantenlängen im dargestellten Ausschnitt betragen 4 m bis 100 m. Außerhalb dieses Bereichs betragen die Kantenlängen 35 m bis 845 m in der Außenweser und 15 m bis 205 m in der Unterweser.

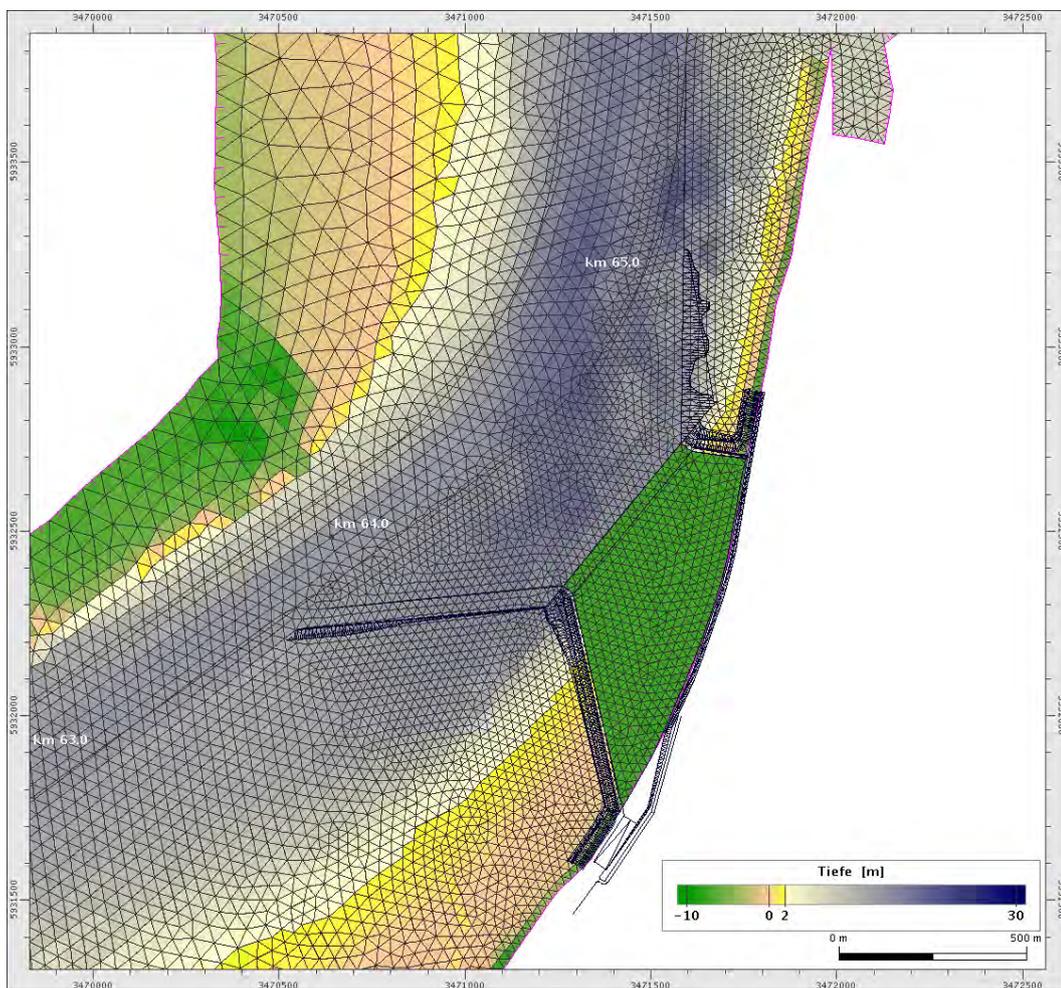


Bild 3: Berechnungsgitter des Hauptmodells im Bereich des OTB

Der offene seeseitige Rand des Jade-Weser-Modells verlief von Spiekeroog bogenförmig entlang der SKN - 20 m Tiefenlinie durch die Deutsche Bucht bis nach Sahlenburg westlich von Cuxhaven (Bild 2).

Die Mittelweser oberhalb von Bremen ist bei normalen hydrologischen Verhältnissen von der Tidedynamik der Unterweser abgekoppelt, da die Tide an der Staustufe Bremen reflektiert

wird. Im Sturmflutfall ist das Wehr jedoch gelegt, denn hoch auflaufende Windfluten (mehr als 2,00 m über MThw) bewirken abflussunabhängig ein komplettes automatisches Umlegen aller Wehrklappen, um die Tide in die obere Haltung einlaufen zu lassen. Das Sturmflutmodell umfasste daher auch die Mittelweser bis zur Staustufe Langwedel.

4.2.2 Untersuchungsszenarien

a) Normaltiden (Spring-Nipp-Zyklus)

Für die Steuerung des Modells wurden Randwerte verwendet, die hinsichtlich der Wasserstände und Strömungen einen charakteristischen Systemzustand der Weser repräsentieren und den Zeitraum eines Spring-Nipp-Zyklus abdecken. Es wurden Randwerte aus dem Juni 2002 gewählt (Bild 4), da aus diesem Zeitraum eine auf Messdaten basierende räumliche und zeitliche Verteilung der Wasserstände am Modellrand vorlag. Folgende Daten wurden verwendet (Bild 4):

- Wasserstände am offenen, seeseitigen Modellrand aus Messungen der BAW,
- tägliche Mittelwerte des Oberwasserabflusses der Weser am Pegel Intschede,
- stündliche Winddaten aus dem Lokalen Modell (LM) des Deutschen Wetterdienstes (DWD), die vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zur Verfügung gestellt wurden.

Als Analysezeitraum wurde der Spring-Nipp-Zyklus vom 02.06. bis 12.06.2002 verwendet.

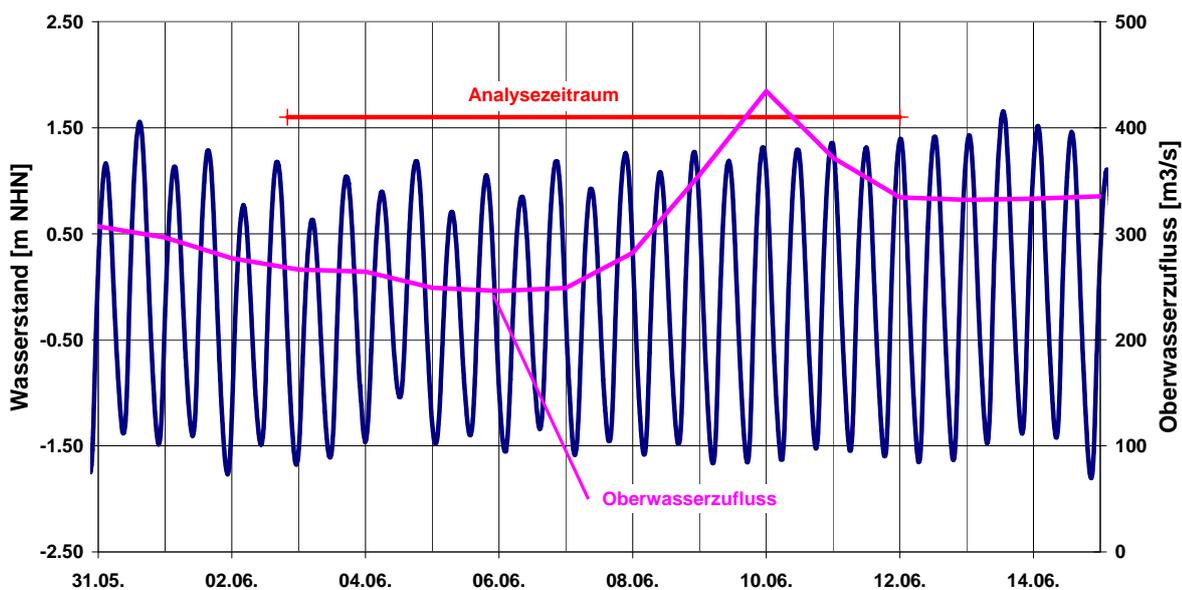


Bild 4: Gesteuerte Wasserstands- und Abflusskurve im Simulationszeitraum Spring-Nippzyklus am seeseitigen Modellrand

Unter normalen meteorologischen Bedingungen werden die hydrodynamischen Verhältnisse im Bereich Bremerhaven durch die Tidedynamik geprägt, die bei zunehmendem Oberwasserzufluss im Weserästuar gedämpft wird. Die größten Vorhabenswirkungen sind bei starken Tidedrömungen zu erwarten, also bei geringen Oberwasserzuflüssen. Die Modellsteuerung der Wasserstände am offenen Nordseerand mit dem beschriebenen Spring-Nipp-Zyklus ist mit Oberwasserzuflüssen von 250 bis 430 m³/s kombiniert (Bild 4), so dass Werte in der Größenordnung des mittleren Zuflusses (320 m³/s) und darunter berücksichtigt sind.

b) Sturmfluten

Als Bemessungssturmflut für die Weser hat das NLWKN eine synthetische Sturmflut auf Basis der Daten vom 3./4. Dezember 1999 so festgelegt, dass bei Bremerhaven der Bemessungswasserstand von 6,37 m NHN erreicht wird (vgl. NLWKN 2006). Dazu hat es den Oberwasserzufluss gegenüber den Messwerten auf 2000 m³/s erhöht und den Wind entsprechend verstärkt. Die zugehörige Wasserstandssteuerung am offenen Nordseerand ist in Bild 5 dargestellt.

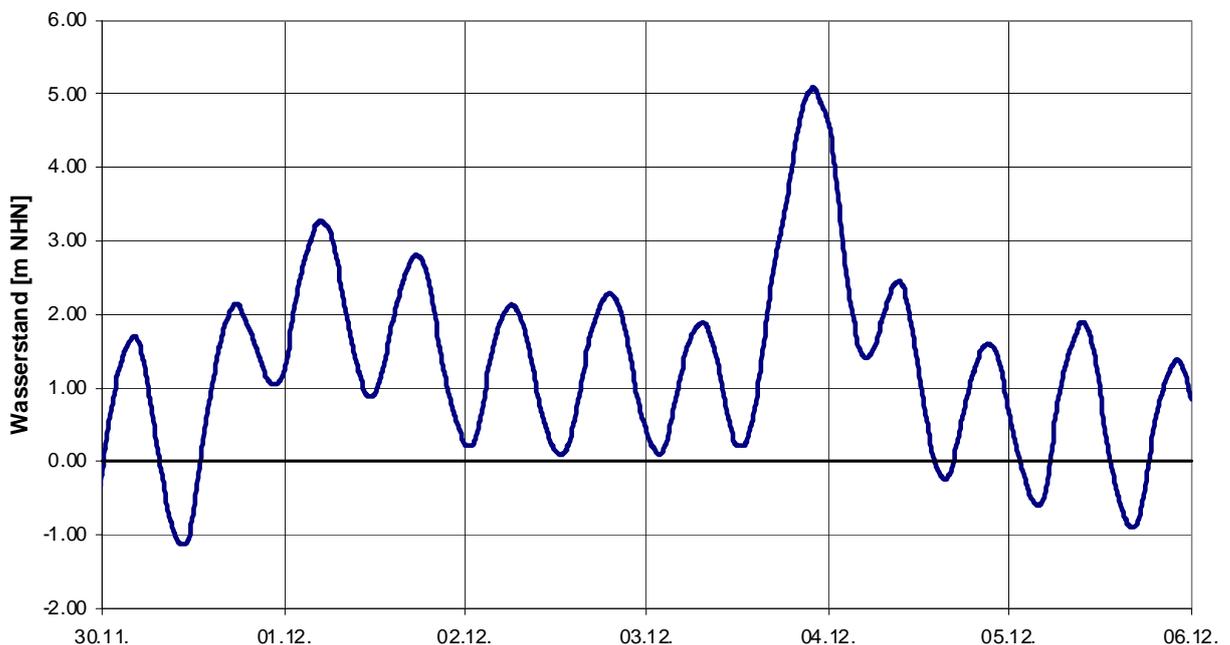


Bild 5: Gesteuerte Wasserstandskurve der Bemessungssturmflut am seeseitigen Modellrand (Oberwasserabfluss 2000 m³/s)

4.2.3 Modellkalibrierung und -validierung

Das verwendete Hauptmodell für die Analyse der Auswirkungen des OTB ist

- durch die notwendige Gitterverfeinerung zur lagerichtigen Abbildung des geplanten Vorhabens und
- durch die Aktualisierung der Topographie

aus dem BAW-Modell hervorgegangen, welches die BAW als Basismodell für ihre Aufgaben verwendet. Über die Kalibrierung und Validierung wird eine gesonderte Dokumentation zur Verfügung gestellt (BAW, 2011).

4.3 Nebenmodell des Weserästuars (Delft3D)

Analog zur Vorgehensweise beim Hauptmodell wurde mit Hilfe des Modellverfahrens Delft3D ein Nebenmodell erstellt. Dieses diente dazu, die im Hauptmodell ermittelten Vorhabenswirkungen zu überprüfen und im Sinne einer Qualitätssicherung zusätzliche Parameterstudien zu ermöglichen sowie eventuelle Prognoseunsicherheiten erkennen und bewerten zu können. Die Erkenntnisse sind in die Interpretation der Ergebnisse aus dem Hauptmodell und in die gutachterlichen Aussagen mit eingeflossen.

Wegen der genannten Zielsetzung und zur effektiven Handhabung wurden für das Nebenmodell abweichende Auflösungen gewählt, mit Kantenlängen zwischen 70 und 2000 m im Jade- und äußeren Außenweserbereich bis zu Kantenlängen zwischen 10 und 60 m im Bereich des Blexer Bogens.

4.4 Seegangmodell der Außen- und Unterweser bis Nordenham (SWAN)

Das Seegangmodell umfasste die Außenweser bis zur SKN - 20 m Tiefenlinie und die Unterweser bis Dedesdorf. Auf die Nachbildung des Jadebusens und der äußersten westlichen und nordöstlichen Randbereiche wurde zu Gunsten einer höheren Auflösung verzichtet, da sie für den Seegang am OTB keine Bedeutung haben. Die Auflösung wurde so gewählt, dass das Einlaufen des Seegangs über die Außenweser in die Unterweser und auch die Auswirkungen des Terminals (z. B. Reflektionswirkungen) naturähnlich simuliert werden konnten. Die Kantenlängen lagen zwischen 13 und 300 m (bzw. bis zu 80 m im Bereich des Blexer Bogens).

Als Modellverfahren wurde das spektrale Seegangmodell SWAN verwendet. Wegen der Beeinflussung des Seegangs durch die Strömung der Weser war eine gekoppelte Simulation

von Tidedynamik und Seegang erforderlich. Dazu wurde die innerhalb des Delft3D-Modellsystems (www.delft3d.com) realisierte Kopplung zwischen SWAN (= Delft3D-WAVE) und dem Strömungsmodul Delft3D-FLOW genutzt. Die Seegangsspektren wurden in der Richtung mit 4° aufgelöst (90 Intervalle), die Frequenzen von 0,05 bis 1 Hz mit 36 Intervallen.

Die senkrechten Uferwände und Kajen am linken Weserufer (Bereich Blexen-Nordenham) wurden hinsichtlich ihrer Reflektionswirkung berücksichtigt. Ihre Lage wurde den digitalen Bundeswasserstraßenkarten der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung entnommen. Der Reflektionsfaktor wurde hinsichtlich der Vorhabenswirkungen (Sekundärreflektionen) auf der sicheren Seite liegend mit 1,0 angenommen (Totalreflektion).

Das Modellsystem SWAN enthält Kalibrierparameter u. a. für die in einem spektralen Seegangmodell nicht aufgelösten Prozesse Sohlreibung, Wellenbrechen, Reflektion. Da keine ausreichenden Naturmessungen für eine Kalibrierung vorlagen, wurden die Standardeinstellungen des Modells verwendet. Diese Vorgehensweise war gerechtfertigt, weil weniger die Nachrechnung eines bestimmten Seegangsszenarios, als vielmehr die relative Wirkung des Offshore-Terminals im Vordergrund stand.

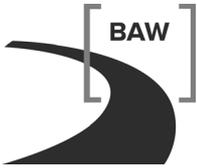
4.5 Analyse numerischer Modellergebnisse

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse wurden abgeleitet

- a) aus der Analyse eines Nipp-Spring-Zyklusses, der insgesamt mittlere Verhältnisse der Hydrodynamik des Weserästuars repräsentiert,
- b) aus der Bemessungsturmflut des NLWKN, die den Bemessungswasserstand von 6,37 m NHN bei Bremerhaven erreicht

Alle Ergebnisse beruhen auf dreidimensionalen Strömungsberechnungen. Die 3D-Simulationsdaten wurden einer Tidekennwertanalyse unterzogen, deren Methodik auf den Internetseiten der BAW ausführlich dokumentiert ist⁴. Die 3D-Daten und –analysen des Haupt- und Nebenmodells ergaben die Grundlage der gutachterlichen Bewertungen und Prognosen. Da die Untersuchungsergebnisse jedoch mit Hilfe zweidimensionaler (tiefengemittelter) Analysebilder repräsentativ und mit besserer Übersichtlichkeit dargestellt werden konnten, wurde im vorliegenden Gutachten auf die Darstellung einzelner Tiefenschichten verzichtet. Die Bildausschnitte wurden jeweils so gewählt, dass die wesentlichen Vorhabenswirkungen zu erkennen sind.

⁴ http://www.baw.de/methoden/index.php5/Analyse_der_Berechnungsergebnisse



Alle nachfolgend beschriebenen maßnahmenbedingten Änderungen wurden durch Vergleichsrechnungen mit dem Referenzzustand (vgl. Abschn. 4.1) ermittelt, so dass die Differenz allein die Vorhabenswirkung beinhaltet.

Bei der Auswertung und Bewertung der Simulationsergebnisse wurden die folgenden zusätzlichen Unterlagen und Informationen genutzt:

- c) Strömungsmessungen im Blexer Bogen (Institut für Wasserbau Bremen, 2011)
- d) Untersuchung der bisherigen langfristigen morphologischen Veränderungen im Blexer Bogen (Nasner, 2011)
- e) wasserbauliches Expertenwissen der BAW u. a. auf Grund
 - zahlreicher eigener Untersuchungen mit HN-Modellen
 - umfangreicher eigener Messungen der Strömungsverhältnisse (seit 2002) und des Transportregimes (seit 2006)

in der Weser.

5 Auswirkungen auf die Strömungen und die Wasserstände (mittlere Tide- und Oberwasserverhältnisse)

5.1 Wirkungszusammenhänge

Das geplante OTB befindet sich am Außenufer des Blexer Bogens der Weser. Der Gewässerabschnitt ist durch eine starke Gezeitenströmung gekennzeichnet, wobei die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten bei Ebbe erreicht werden und eine Größe von rd. 2,0 m/s (tiefengemittelt rd. 1,4 m/s) erreichen.

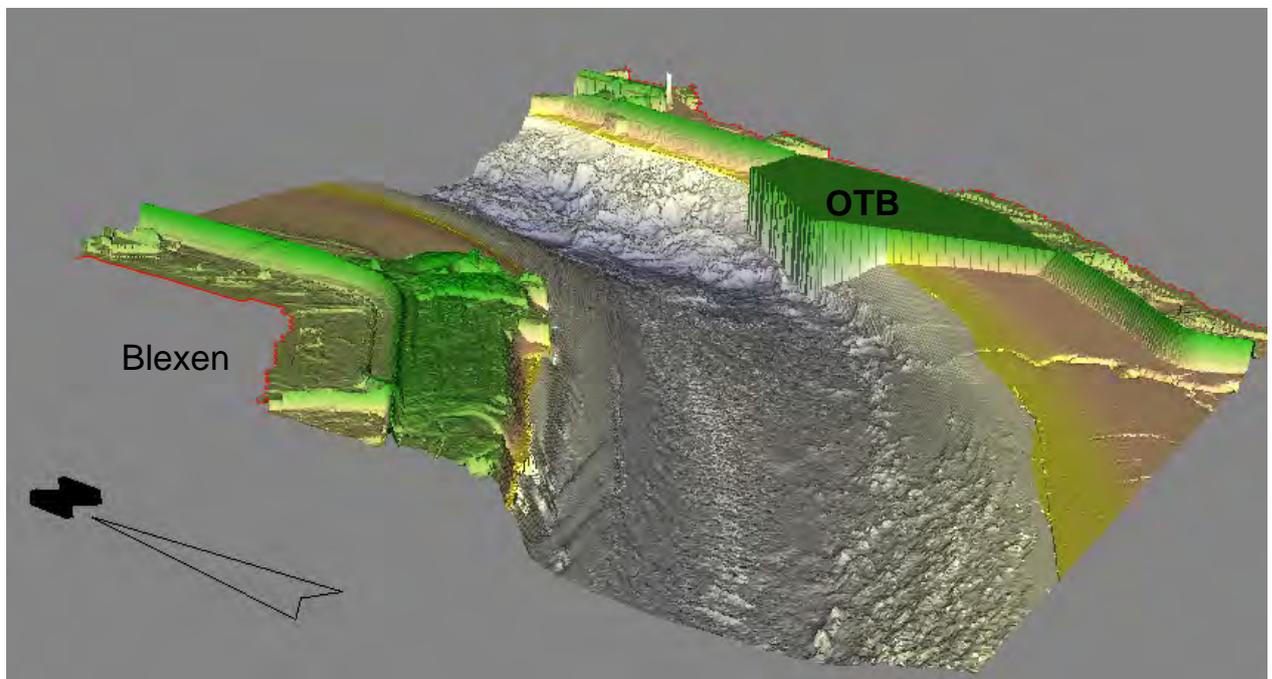


Bild 6: 3D-Darstellung der Topographie des Blexer Bogens (Blick aus südwestlicher Richtung, Überhöhung 1 : 10)

Der Unterweserbereich von UW-km 55 bis 68 zeichnet sich durch zwei gegenläufige Kurven aus. Die Krümmungsradien betragen ca. 6500 m bei Nordenham und ca. 1750 m im Blexer Bogen. Gerade im Blexer Bogen stellt dies einen extremen Krümmungsradius dar, der so in den Ästuarien an der deutschen Nordseeküste nicht nochmals auftritt. Daraus ergeben sich ausgeprägte Krümmungseffekte in den Strömungen (z. B. Ausbildung von Sekundärströmungen).

Der Krümmungseffekt führt grundsätzlich dazu, dass die Strömung sich am Außenufer (Prallhang) konzentriert und dort große Wassertiefen schafft. Bei Flutstrom sind die hydro-

dynamischen Voraussetzungen für eine solche Ausprägung des Geschwindigkeitsprofils gegeben, jedoch wirken folgende Bedingungen entgegen:

- Im östlichen Bereich der Gewässersohle befinden sich erosionsfestere Sedimente und Hartsubstrate (u. a. Bauschutt), die die morphodynamische Reaktion der Sohle und somit die Ausbildung des typischen natürlichen Talwegs behindern (hierauf wird in Abschn. 9.1 weiter eingegangen).
- Die Fahrrinne liegt relativ weit am Innenufer und konzentriert dort auf Grund der großen Wassertiefen die Strömung.

Darüber hinaus ist die Wirkung der Krümmung im Nordenhamer Bogen zu berücksichtigen. Da es sich um eine Gegenkrümmung zum Blexer Bogen handelt, wirkt der Krümmungseffekt dort in die entgegengesetzte Richtung. Zwischen den beiden Krümmungen entsteht eine Diskontinuität (unterschiedliche Ebbe- und Flutwege / -rinnen, Furt) und bei Ebbe wird die normale Ausprägung der Kurvenströmung im Blexer Bogen durch die zum Nordenhamer Ufer verlagerte Anströmung behindert.

Alle genannten Einflüsse führen dazu, dass sich die Strömung der Weser im Blexer Bogen nicht in dem Maße am Außenufer konzentriert, wie man es bei einer so engen Krümmung erwarten könnte.

Vorhabensbedingt ergeben sich mit der Einrichtung des OTB aus hydrodynamischer Sicht folgende Effekte:

- Durch das Terminal selbst wird ein Teil des Gewässerquerschnitts verbaut mit folgenden grundsätzlichen Einflüssen auf die Strömung bzw. die Tidewelle:
 - Für die tide- und oberwasserbedingte Strömung erfolgt eine Einengung mit einer lokalen Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten (lokale Beschleunigung) und der Energiedissipation (lokaler Widerstand). Damit können auch die Wasserstände (u. a. Anstau auf der Anströmseite) und die Tidevolumina im Ästuar (Drosselwirkung) beeinflusst werden.
 - Bei einer Betrachtung der Tide als Welle ergibt sich eine Teilreflektion am Terminal und daraus eine Verstärkung der Amplitude seeseitig und Minderung binnenseitig des Terminals.
 - Ferner ergibt sich auch ein Verlust an Tidevolumen durch das Volumen des Bauwerks selbst. Wegen der relativ geringen Größe und mündungsnahen Lage ist dieser Effekt jedoch von untergeordneter Bedeutung.
- Die Vertiefung des Zufahrtbereichs und der Liegewannen wirkt der Einengung entgegen, da die Wassertiefen lokal vergrößert und somit die Energiedissipation vermindert wird.

Entsprechend der vorliegenden Planung sind jedoch nur geringe Abgrabungen erforderlich, um die geplanten Sohllagen herzustellen (Bild 7), so dass der Einfluss der Einengung überwiegt. Als Differenz der Modelltopographien für den Zufahrts- und Liegebereich (Ausbauzustand – Referenzzustand) wurde ein Volumen von 55 000 m³ feste Masse ermittelt.

Das Ausmaß der hydrodynamischen Wirkungen ist davon abhängig, welche relative hydraulische Bedeutung dem verbauten Gewässerquerschnitt zukommt. Da sich das geplante Terminal großenteils im hochliegenden (teilweise trockenfallenden) Uferbereich befindet und die Durchströmung aus den oben beschriebenen Gründen dort nicht sehr intensiv ist, sind mäßige Auswirkungen auf die Hydrodynamik der Weser zu erwarten.

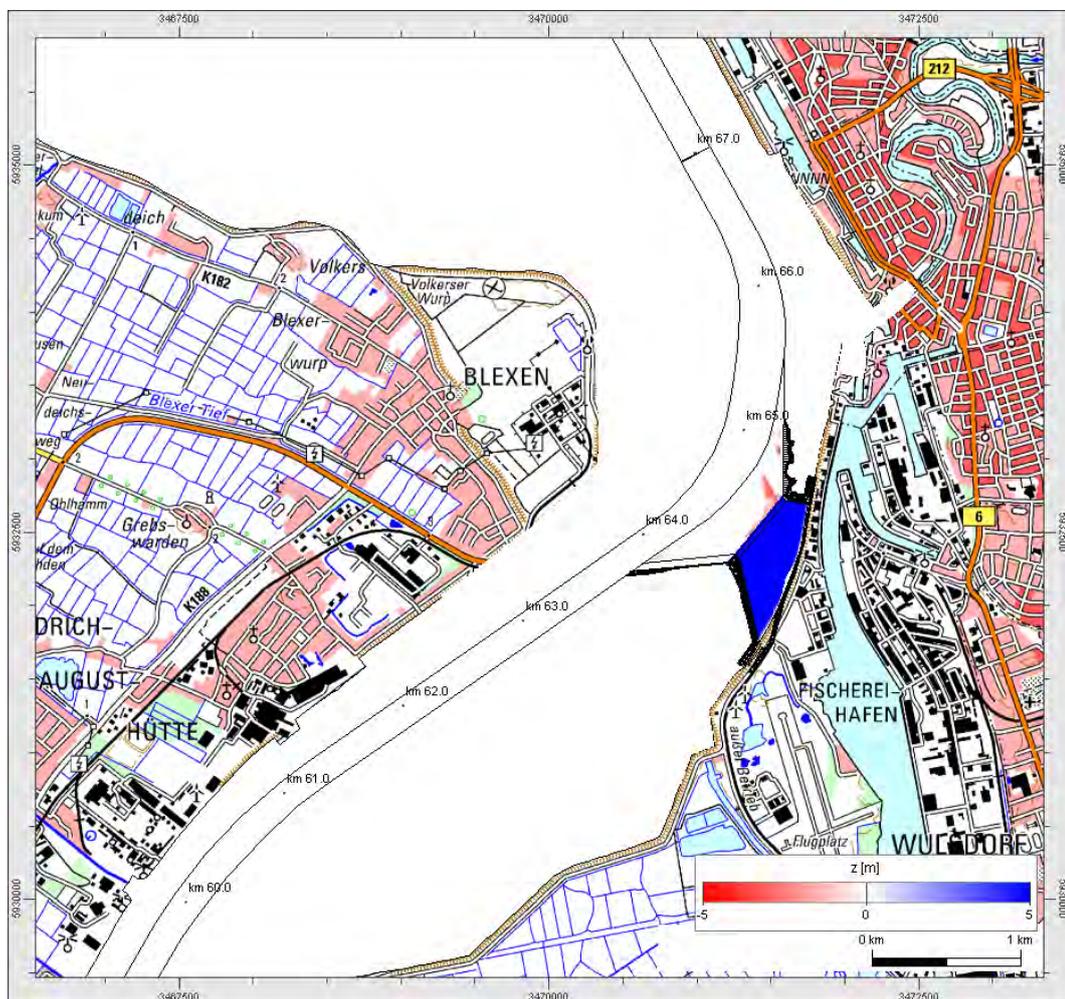


Bild 7: OTB mit Zufahrtsbereich: Differenztopographie
 (Vorhabensbedingte Höhendifferenzen z in [m])

5.2 Untersuchungsmethodik

Durch die Einrichtung des Offshore-Terminals kann es auf Grund der lokalen Querschnittseinengung zu der in Abschn. 5.1 beschriebenen Beeinflussung der Ebbe- und Flutströmung kommen, woraus sich vorhabensbedingte Veränderungen der Tidekennwerte ergeben (z.B. Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten, Tidehoch-, Tideniedrigwasser). Für die Prognose solcher Ausbauwirkungen sind nach dem Stand von Technik und Wissenschaft wasserbauliche Systemanalysen mit Hilfe einer dreidimensionalen hydrodynamischen numerischen Modellierung (einschließlich Salztransport) erforderlich. Mit den verwendeten Modellverfahren können die beschriebenen Auswirkungen sehr zuverlässig und mit hoher Genauigkeit ermittelt werden. Durch die dreidimensionale Auflösung werden insbesondere die Effekte der Kurvenströmung (Sekundärströmungen) und der Salzausbreitung (barokline Effekte) berücksichtigt.

Obwohl davon ausgegangen werden konnte, dass die vorhabensbedingten Wirkungen nicht wesentlich über den Nahbereich des Bauvorhabens hinausgehen, wurde für die HN-Simulationen ein 3D-HN-Modell des gesamten Jade-Weser-Ästuars verwendet, um alle Vorhabenswirkungen unbeeinflusst von der Modellrandsteuerung innerhalb des Modellgebiets zu ermitteln.

Die dargestellten Beträge der maßnahmenbedingten Änderungen beziehen sich auf die Bathymetrie unmittelbar nach Herstellung des Terminals und der Zufahrt ohne morphologische Anpassungsprozesse, auf die in Abschnitt 9 eingegangen wird.

5.3 Vorhabensbedingte Änderungen der Strömungen

Die Wirkungen der Maßnahme sind durch den Vorbau der Hafensfläche in den Strom der Weser geprägt. Der Vorbau der Hafensfläche engt den Fließquerschnitt am östlichen Ufer ein und führt dort zu einer veränderten Stromführung am Prallhang des Weserästuars. Die entgegengesetzte Wirkung der Vertiefung im Zufahrts- und Liegebereich ist demgegenüber geringfügig. Sie führt im Prinzip dazu, dass dieser Bereich hydraulisch leistungsfähiger wird und die Hauptströmungen von Ebbe und Flut sich örtlich zum Offshore-Terminal hin verschieben.

Da die lokale Veränderung der Strömungsgeschwindigkeiten ein wesentliches Merkmal der Vorhabenswirkungen ist, werden die Tidekennwerte der Strömung, d. h. die mittleren und maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten des Analysezeitraums und die vorhabensbedingten Differenzen in den folgenden Bildern dargestellt:

- tiefengemittelte mittlere Flutstromgeschwindigkeiten: Bild 8 bis Bild 10
- tiefengemittelte mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten: Bild 11 bis Bild 13
- tiefengemittelte maximale Flutstromgeschwindigkeiten: Bild 14 bis Bild 16
- tiefengemittelte maximale Ebbestromgeschwindigkeiten: Bild 17 bis Bild 19

Aus der Einengung der Strömung ergeben sich sowohl Strömungszunahmen als auch Strömungsabnahmen, wobei im Wesentlichen die folgenden Wirkungen zu unterscheiden sind:

- Die Vorhabenswirkungen werden durch den Einengungseffekt dominiert, der die Strömungsgeschwindigkeiten über den gesamten Gewässerquerschnitt zwischen Kaje und Gegenufer erhöht. In der Fahrrinne beträgt die Zunahme der tiefengemittelten mittleren Strömungsgeschwindigkeiten bis zu rd. 0,05 m/s, die Zunahme der tiefengemittelten maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten bis zu 0,10 m/s.
- Die geringfügige Vertiefung des Zufahrtsbereichs erhöht die hydraulische Leistungsfähigkeit des eingengten Durchflussquerschnitts nicht wesentlich. Die im Referenzzustand vorliegende Konzentration der Strömung auf den Bereich der Fahrrinne bleibt deshalb erhalten.
- Die Baggerung betrifft hauptsächlich die Liegewanne und eine Untiefe vor dem nördlichen Abschnitt der Kaje (vgl. Bild 7); damit wird die Gewässersohle in diesem Bereich lokal geglättet. Dies macht sich besonders bei voll entwickeltem Flutstrom durch einen Anstieg der Strömungsgeschwindigkeiten bemerkbar (Bild 16). Insgesamt sind die tiefengemittelten Strömungszunahmen im Zufahrtsbereich dort besonders groß, wo zuvor geringe Geschwindigkeiten vorlagen, und betragen bis zu rd. 0,20 m/s.
- Der Abschattungseffekt des Terminals führt zu ufernahen Geschwindigkeitsabnahmen unmittelbar vor und hinter dem Bauwerk.
- Bei Ebbestrom findet eine Verlagerung der Strömung zum Bremerhavener Ufer statt (Weser-km 65 bis 68), so dass in Ufernähe tiefengemittelte Geschwindigkeitszunahmen von etwa 0,05 m/s auftreten (lokal bis zu 0,15 m/s).

Die genannten Wirkungen sind im Wesentlichen auf das nahe Umfeld des OTB beschränkt („lokale Effekte“). Spätestens in einem Abstand von ca. 5 km vom Terminal sind die Geschwindigkeitsänderungen auf unter 0,02 m/s abgeklungen.

Bei der Bewertung der lokalen Geschwindigkeitszunahmen sollte beachtet werden, dass es sich (bei punktueller Betrachtungsweise) zwar um deutliche, signifikante Änderungen handelt. Die Strömungscharakteristik des Blexer Bogens insgesamt wird dadurch jedoch nicht verändert, sondern – wie z.B. der Vergleich von Bild 18 mit Bild 17 zeigt – es werden vorhandene Zonen (Isosfarbflächen) mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten ausgeweitet. Außerdem liegt dem Vergleich der Zustand unmittelbar nach Herstellung des OTB zu Grunde. Mit einer morphologischen Anpassung der Sohle gehen die Zunahmen zurück (vgl. Abschnitt 9).

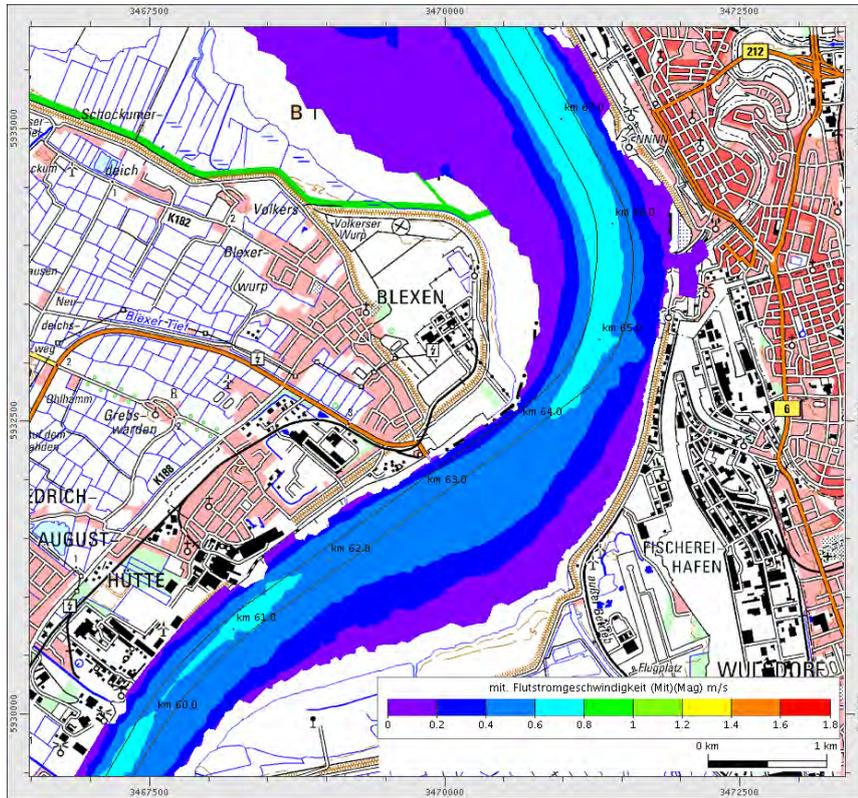


Bild 8: Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum (Referenzzustand)

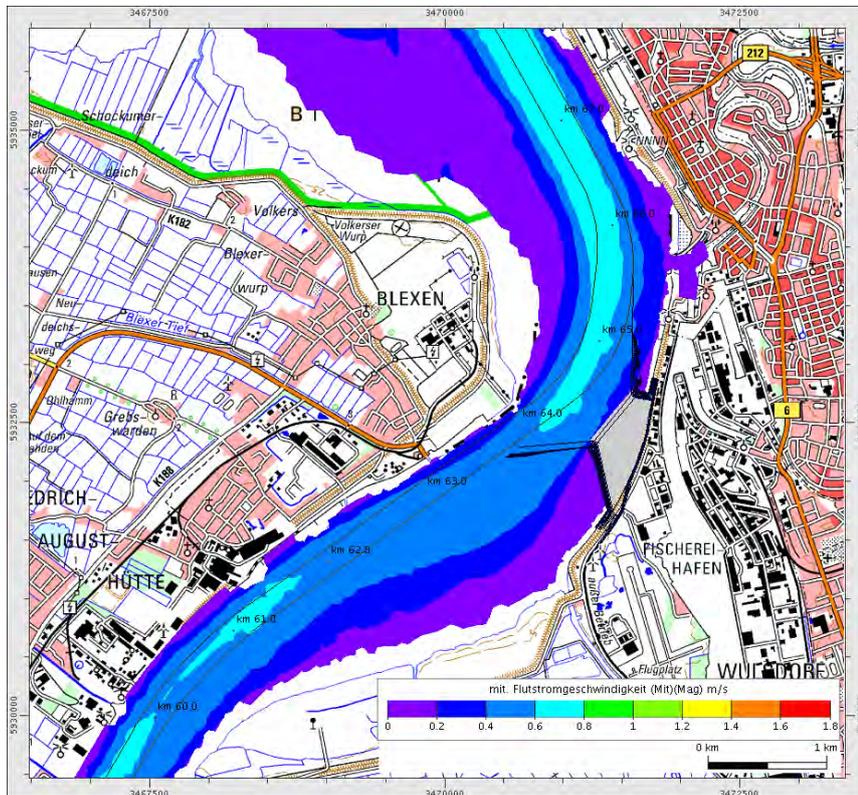


Bild 9: Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum (Ausbau)

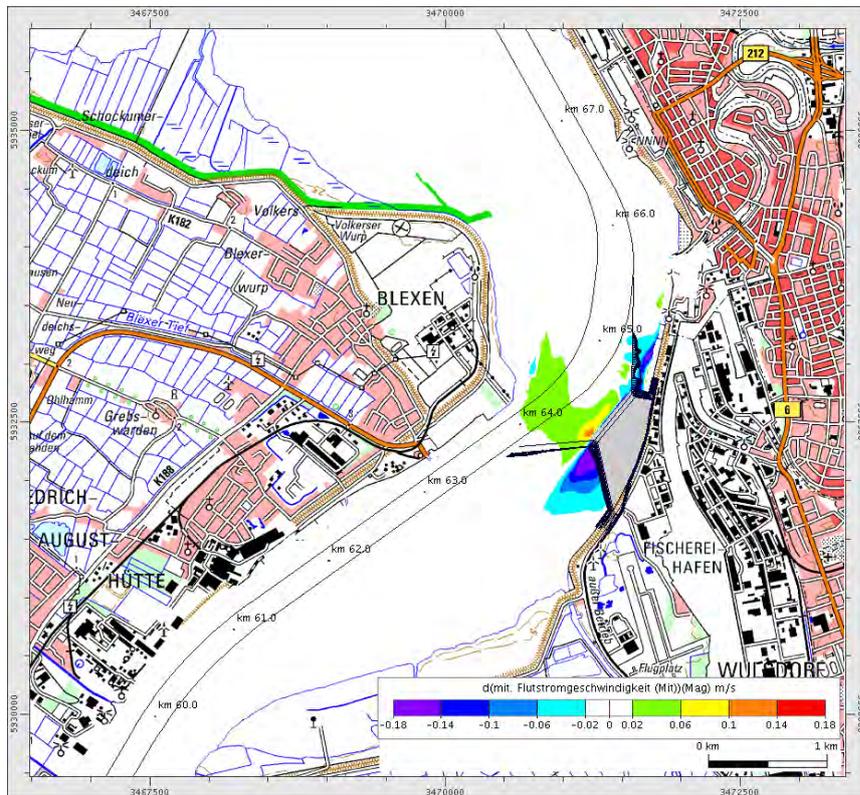


Bild 10: Vorhabensbedingte Änderungen der mittleren Flutstromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum

Bild 8 bis Bild 10:

**Strömungsgeschwindigkeiten im Analysezeitraum
 und vorhabensbedingte Änderungen
 (mittlere Tide- und Oberwasserverhältnisse)**

**Mittlere Flutstromgeschwindigkeiten
 (tide- und tiefengemittelt)**

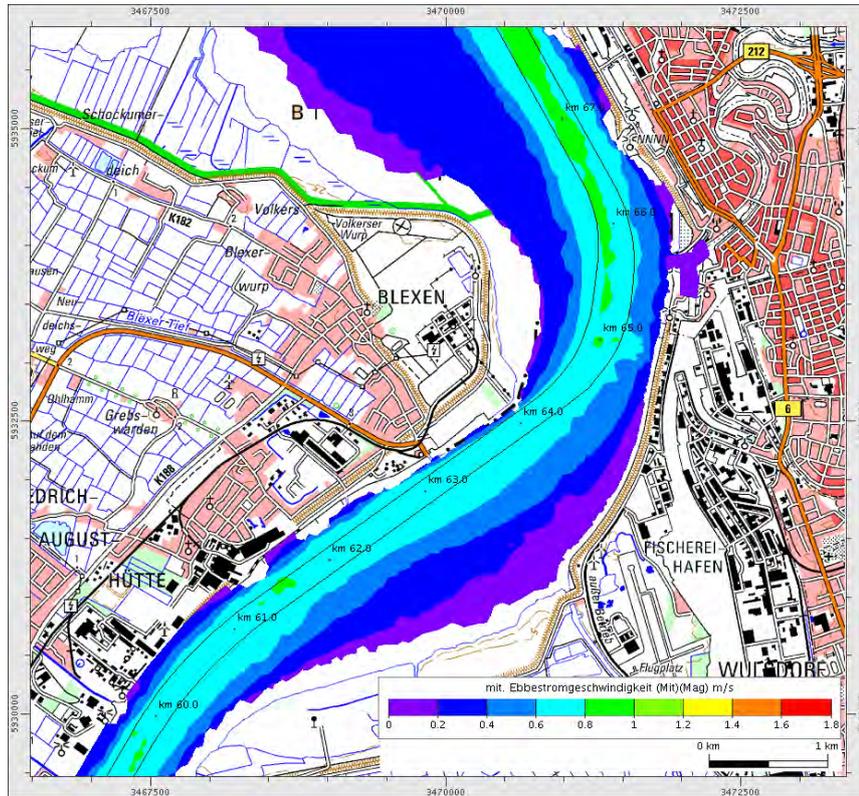


Bild 11: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum (Referenz)

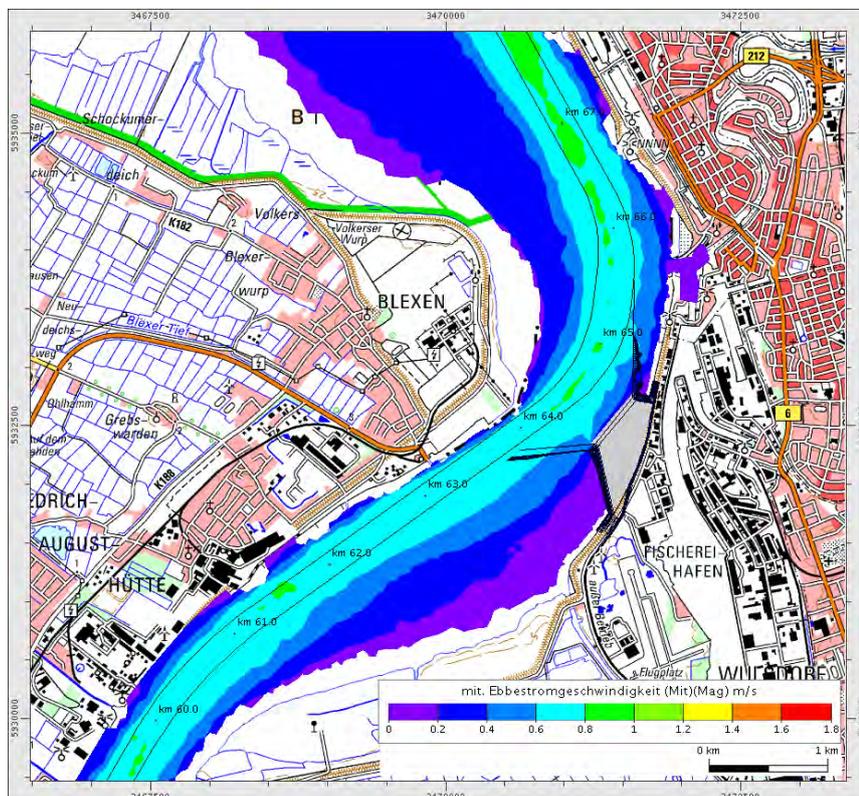


Bild 12: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum (Ausbau)

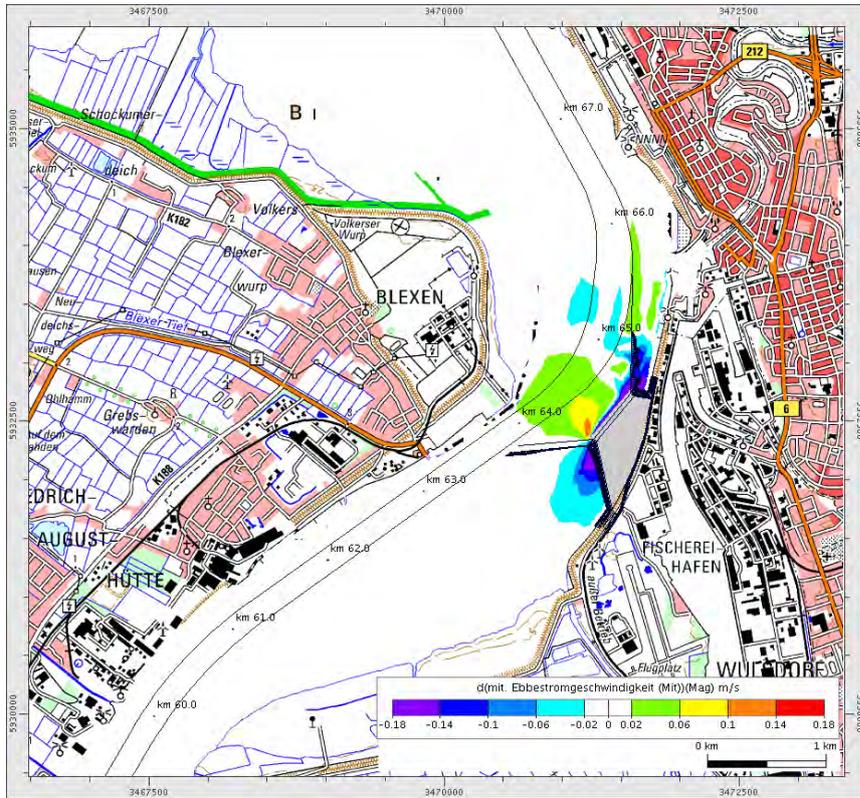


Bild 13: Vorhabensbedingte Änderungen der mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum

Bild 11 bis Bild 13:

**Strömungsgeschwindigkeiten im Analysezeitraum
 und vorhabensbedingte Änderungen
 (mittlere Tide- und Oberwasserverhältnisse)**

Mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten
 (tide- und tiefengemittelt)

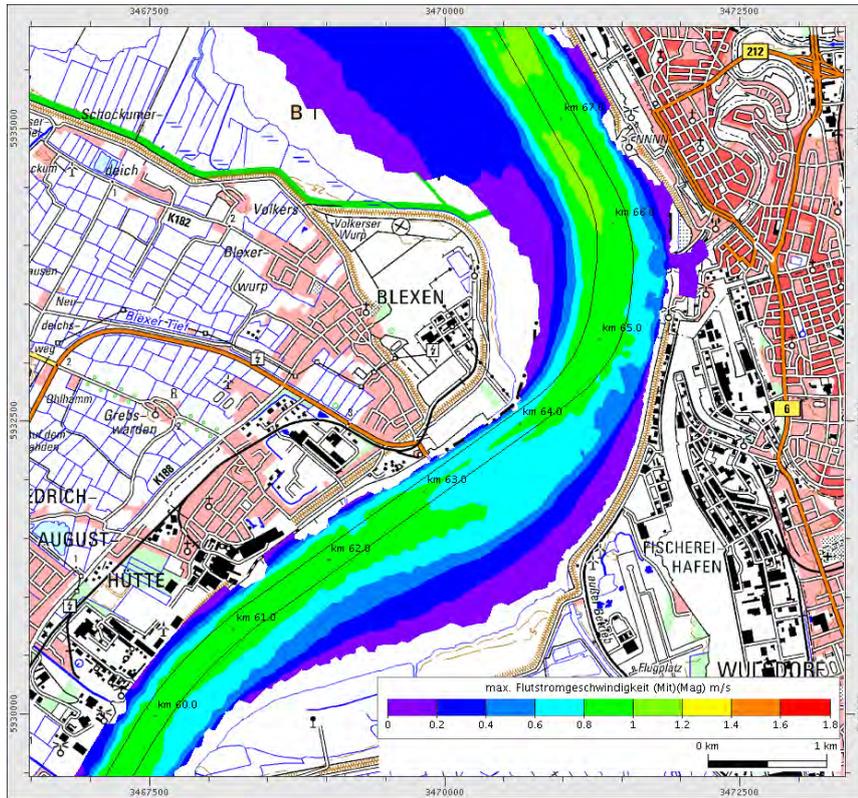


Bild 14: Maximale Flutstromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum (Referenz)

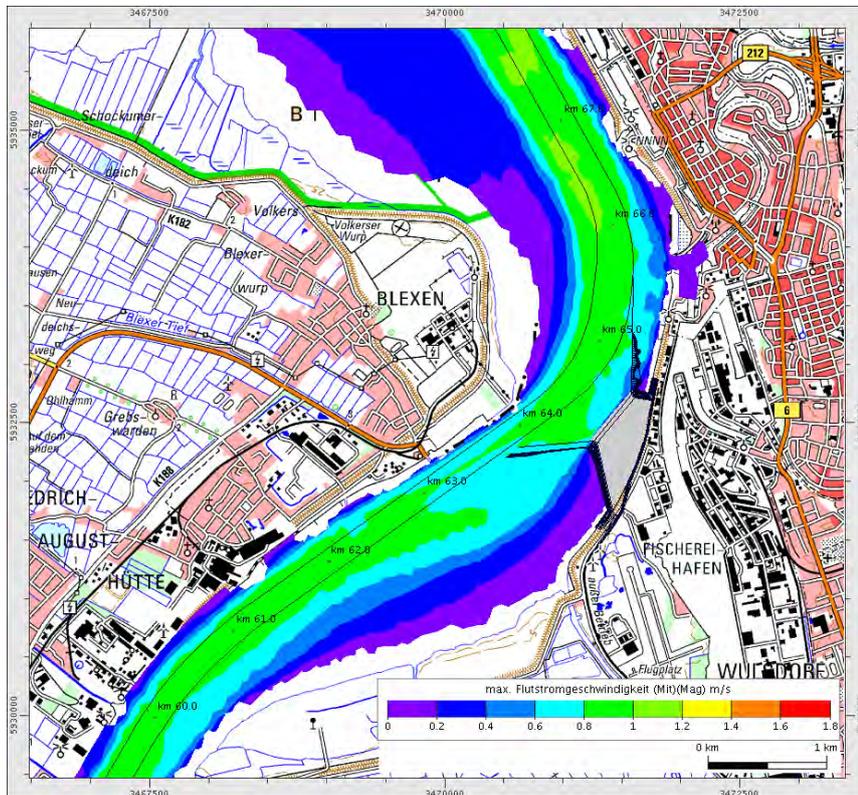


Bild 15: Maximale Flutstromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum (Ausbau)

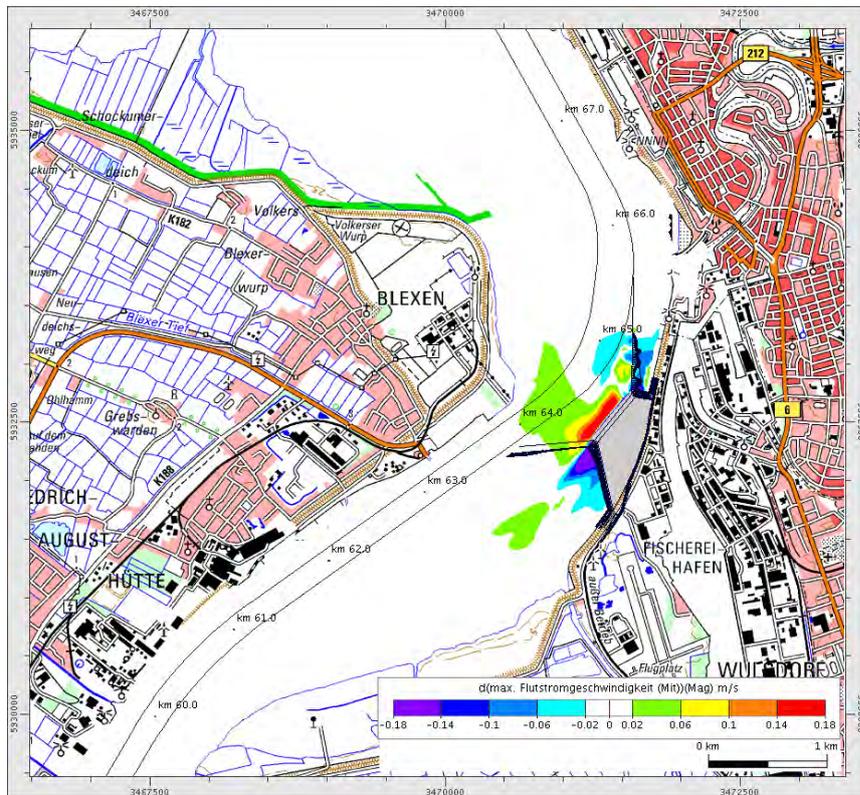


Bild 16: Vorhabensbedingte Änderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum

Bild 14 bis Bild 16:

**Strömungsgeschwindigkeiten im Analysezeitraum
 und vorhabensbedingte Änderungen
 (mittlere Tide- und Oberwasserverhältnisse)**

**Maximale Flutstromgeschwindigkeiten
 (tiefengemittelt)**

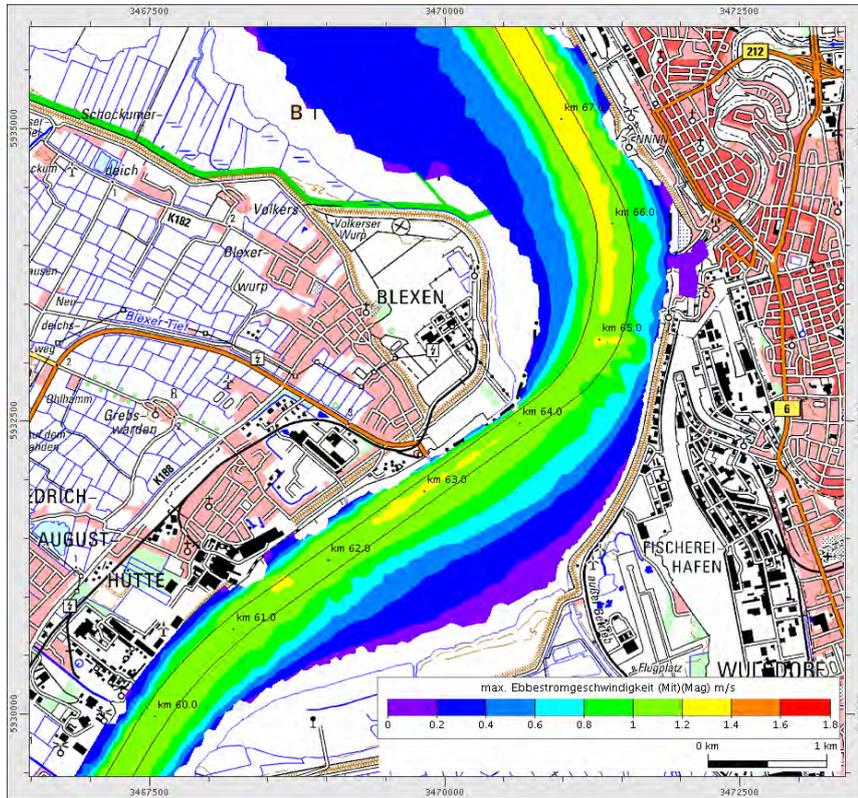


Bild 17: Maximale Ebbestromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum (Referenz)

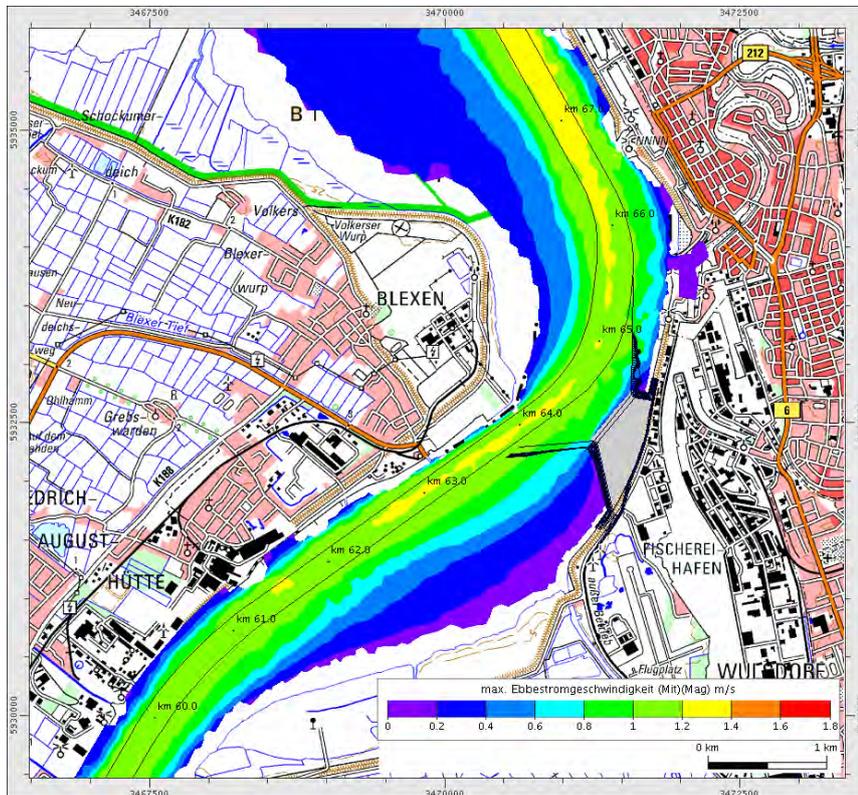


Bild 18: Maximale Ebbestromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum (Ausbau)

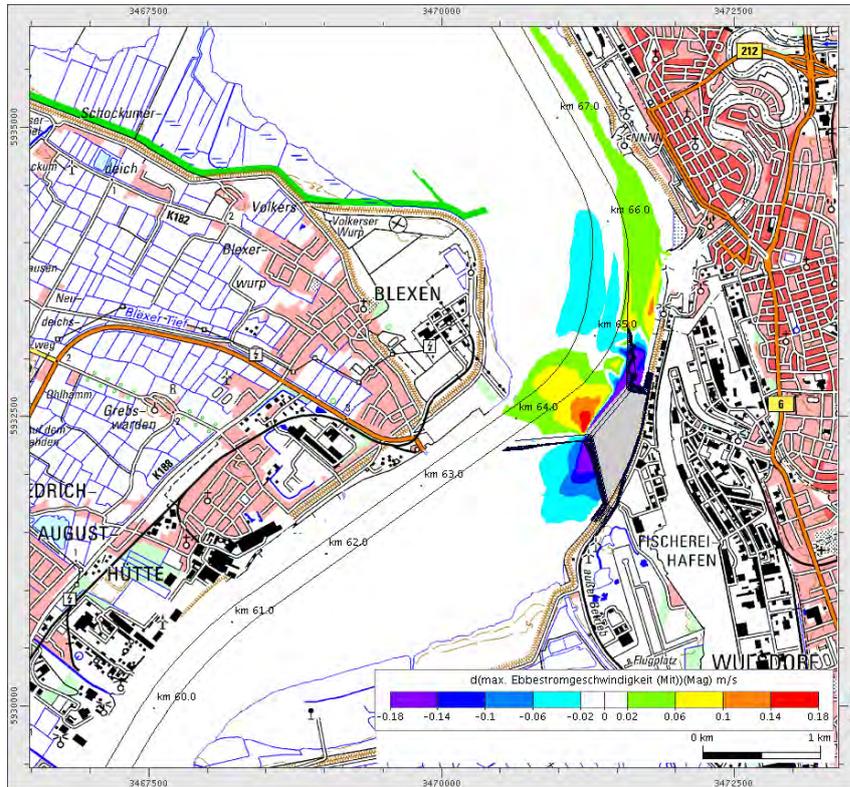


Bild 19: Vorhabensbedingte Änderungen der maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten im Analysezeitraum

Bild 17 bis Bild 19:
Strömungsgeschwindigkeiten im Analysezeitraum
und vorhabensbedingte Änderungen
(mittlere Tide- und Oberwasserverhältnisse)
Maximale Ebbestromgeschwindigkeiten
(tiefengemittelt)

5.4 Vorhabensbedingte Änderungen des Tidenhubs und der Wasserstände

Die Simulation bestätigt die in Abschn. 5.1 beschriebene Teilreflektion der Tidewelle am Terminal. Der Längsschnitt entlang der Fahrrinne von Bremen bis in die Außenweser zeigt, dass die Amplitude seeseitig des Terminals tendenziell verstärkt und binnenseitig tendenziell gedämpft wird (Bild 20). Wegen der Lage des Terminals im relativ schwach durchströmten Randbereich des Gewässers beträgt diese Veränderung des Tidehubs aber nur wenige Millimeter. Auch die lokalen Veränderungen des mittleren und maximalen Tidehubs unmittelbar am Terminal sind kleiner als 1 cm (Bild 21, Bild 22). Die vorhabensbedingten Änderungen des Tidehubs so wie auch der Tidewasserstände Thw, Tmw und Tnw sind deshalb aus wasserbaulicher Sicht vernachlässigbar, d. h. ohne praktische Relevanz (Bild 23 zeigt beispielhaft die berechneten Änderungen des maximalen Thw). Tendenziell wirken die Wasserstandsänderungen in der Unterweser den Wirkungen der Fahrrinnenausbauten entgegen.

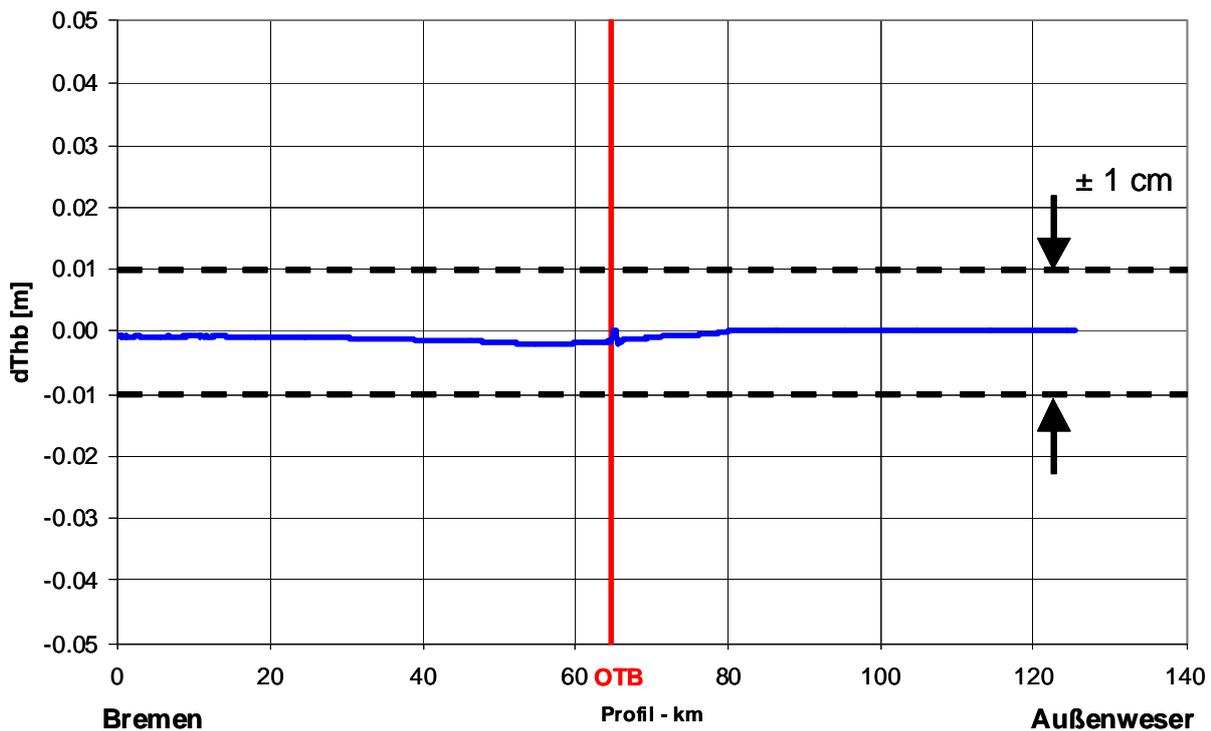


Bild 20: Änderung des mittleren Tidehubs im Analysezeitraum (Längsschnitt durch die Fahrrinne)

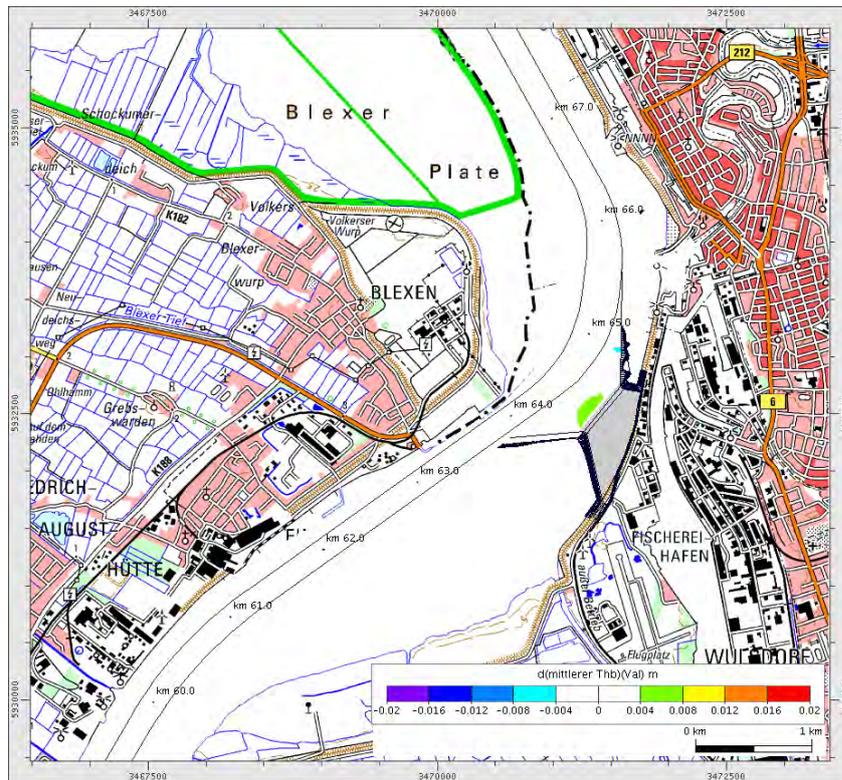


Bild 21: Änderung des mittleren Tidehubs im Analysezeitraum

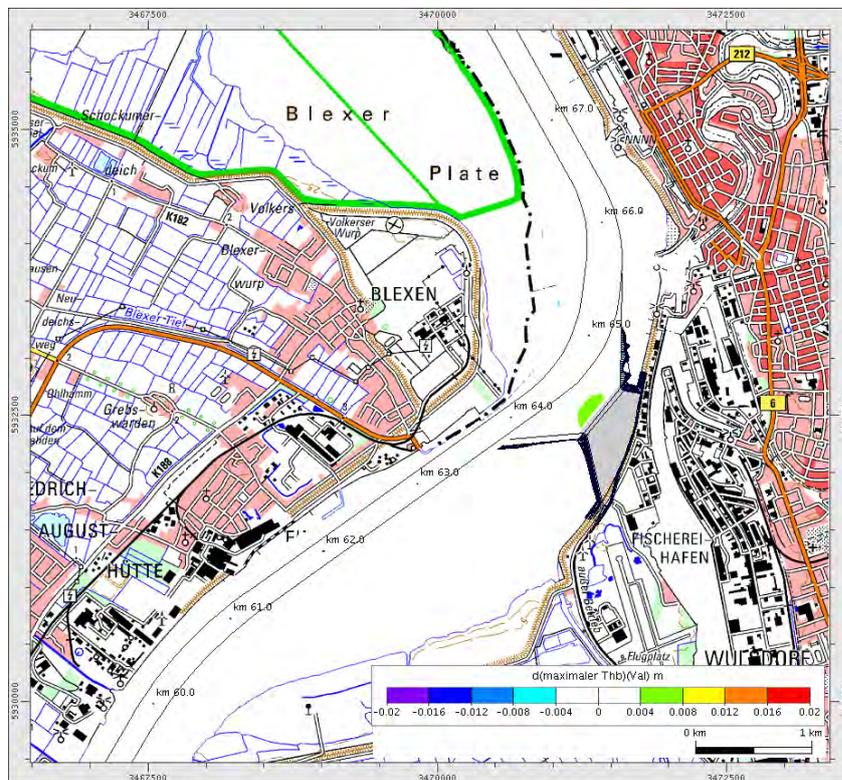


Bild 22: Änderung des maximalen Tidehubs im Analysezeitraum

6 Auswirkungen auf die Transportprozesse (mittlere Tide- und Oberwasser- verhältnisse)

6.1 Wirkungszusammenhänge

In diesem Abschnitt wird auf Stoffe eingegangen, die mit dem Wasser in gelöster Form (Salz) oder in Suspension transportiert werden. Die maßgebenden Transportarten sind der advective Transport (Bewegung zusammen mit dem strömenden Wasser) und der konvektive Transport (Bewegung auf Grund von Dichteunterschieden). Bei den suspendierten Sedimenten haben zusätzlich die Sinkgeschwindigkeit und die Turbulenz Einfluss auf den Transportvorgang, da Partikel sich absetzen oder resuspendiert werden können. Abhängig von der Korngröße und von den Strömungsbedingungen können Sedimente auch als Geschiebe transportiert werden, d. h. durch rollende oder springende Bewegung in unmittelbarer Sohlnähe. Der Übergang zwischen „Geschiebebewegung“ und „Suspensionstransport“ ist fließend. Wegen der hohen Strömungsgeschwindigkeiten und der relativ kleinen Korngrößen im Blexer Bogen ist für die vorliegende Fragestellung der suspendierte Transport maßgebend.

Der Einfluss des geplanten OTB resultiert aus den lokal veränderten Strömungsgeschwindigkeiten (Abschnitt 5) auf Grund folgender Effekte:

- lokale Veränderung des advectiven Transports.
- lokale Veränderung des Erosions- und Sedimentationsregimes

Der konvektive Transport wird indirekt über die Wirkung dieser beiden Effekte beeinflusst.

Zur lokalen Veränderung des advectiven Transports ist folgendes festzustellen: Da die Veränderung der Strömungsgeschwindigkeiten gem. Abschnitt 5 lokal begrenzt ist und sich keine nennenswerte Veränderung der Massenbilanz (kein geändertes Tidevolumen) ergibt, bleiben auch die Auswirkungen der veränderten Advektion lokal begrenzt. Wäre die Stoffverteilung im Bereich des OTB sehr homogen, so würden sich also keine nennenswerten Veränderungen der Suspensionskonzentrationen ergeben. Das OTB liegt jedoch in der Brackwasserzone der Weser. In Abhängigkeit von der Oberwassermenge und damit der Lage des Salzkeils können sich an dieser Stelle Salzgehaltsgradienten in Gewässerlängs- und -querrichtung ergeben. Entsprechendes gilt für die Schwebstoffgehalte in Abhängigkeit von der Lage der Trübungszone. Vorhabensbedingt kann es daher durch die Veränderungen des advectiven Transports zu erkennbaren Veränderungen der Konzentrationen kommen, wenn

- Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten
- Verlagerungen der Strömungen

- Änderungen der Strömungsrichtung (von graduellen Änderungen bis zur Richtungs-
umkehr bei Walzenströmungen im Abschattungsbereich des Bauwerks)

zu einer geänderten lokalen Durchmischung führen, weil Wasservolumina aus Bereichen mit bisher höheren Konzentrationen mit einer veränderten Intensität in Bereiche mit bisher niedrigeren Konzentrationen transportiert werden (und umgekehrt).

Die advektionsbedingten Effekte können bei einer lokalen Veränderung der Erosions- und Sedimentationsmengen über den Nahbereich des OTB hinaus wirksam sein, z. B. wenn sich zusätzlich erodiertes Material nicht ortsnah wieder absetzt, sondern weiter transportiert wird. In diesem Falle würde die vorhabensbedingte Änderung der Schwebstoffkonzentrationen nicht im Bereich des Vorhabens abklingen.

6.2 Untersuchungsmethodik

Die Untersuchung der Salz- und Schwebstoffgehalte konnte zusammen mit der Hydrodynamik (Abschn. 5) mit den gleichen Methoden erfolgen. Dabei wurde das Sedimenttransportmodul Sedimorph verwendet, um bei der Berechnung der Suspensionskonzentrationen die gemessene Sedimentbelegung der Sohle und den Austausch zwischen Sohle und Wasserkörper zu berücksichtigen:

Unter dem Begriff Schwebstoff (Schwebstoffkonzentrationen, Suspensionskonzentrationen) werden hier alle Feststoffe verstanden, die in der Wassersäule in Suspension transportiert werden und die sedimentieren und resuspendiert werden können. Sie sind durch eine u. a. größen- und dichteabhängige Sinkgeschwindigkeit gekennzeichnet und unterscheiden sich dadurch von anderen transportierten Substanzen (z. B. Salz). Die Schwebstoffkonzentrationen und -transporte wurden im Modell in Abhängigkeit von den an der Gewässersohle gemessenen Oberflächensedimenten mit Korngrößen von Feinschluff bis Grobsand modelliert. Biologische und chemische Einflüsse auf die Bildung und das Verhalten von Schwebstoffen wurden nicht berücksichtigt.

Die Verteilung der Oberflächensedimente im Modell (Bild 24) basierte auf den vorliegenden Messungen und Kartierungen der sedimentologischen Verhältnisse. Für die wasserbauliche Systemanalyse mussten die Ergebnisse der unterschiedlichen Probennahmeverfahren und -zeiten in ein vereinfachtes, systemcharakteristisches Ersatzsystem überführt werden. Dazu wurden die flächenhaft kartierten Sedimente der Wattgebiete und die punktuell kartierten Sedimente der Rinnen über einen nach Datensatz-Layern differenzierten Interpolationsalgorithmus in das Modell eingearbeitet, wobei die Kornfraktionen Feinschluff, Mittelschluff, Grobschluff, Feinsand, Mittelsand und Grobsand Berücksichtigung fanden. Bindige Sedimente (Schluffe und feiner) werden als Suspension und nicht bindige Sedimente (Sande) je

nach Korngröße als Geschiebe oder Suspension transportiert. Die Sinkgeschwindigkeiten der als Suspension transportierten Sedimentfraktionen wurden nach Stokes berechnet.

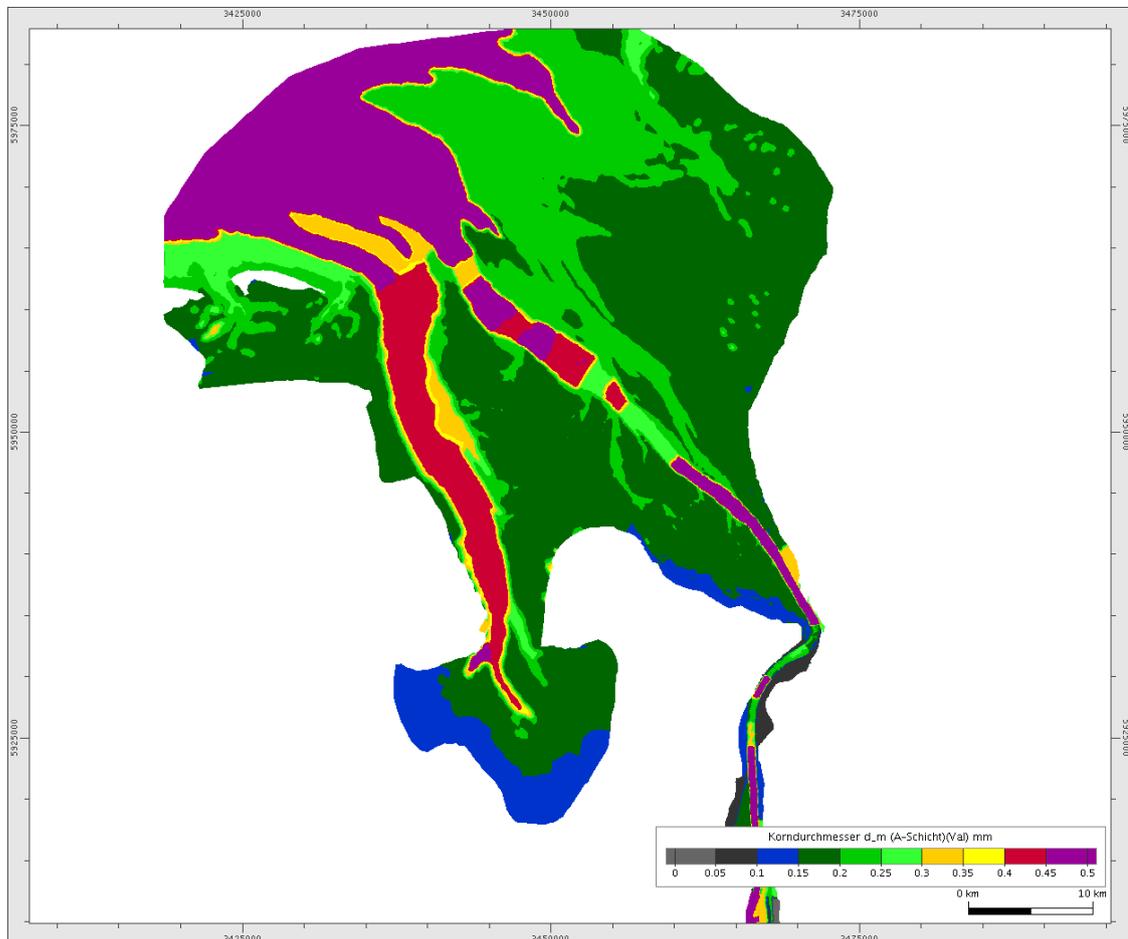


Bild 24: Sedimentbelegung der Modellsohle (dargestellt anhand des mittleren Korndurchmessers)

Wie oben beschrieben hängen die lokalen Vorhabenswirkungen von den Gradienten der Stoffkonzentrationen ab. Diese Gradienten werden im Wesentlichen von der Lage der Brackwasserzone bestimmt und damit sowohl vom aktuellen Oberwasserzufluss, als auch vom Verlauf der Zuflüsse und der Tidemittelwasser in den vorhergehenden Tagen. Hinsichtlich der Schwebstoffe gibt es weitere Abhängigkeiten, insbesondere durch biogene Einflüsse.

Es sind somit unendlich viele Szenarien mit jeweils unterschiedlichen Vorhabenswirkungen möglich. Für die vorliegende Untersuchung wurde ein Beispiel für eine ungünstige Situation gewählt, in der große Vorhabenswirkungen zu erwarten sind. Eine repräsentative Aussage ist möglich, wenn die relativen Veränderungen betrachtet werden; d. h. die vorhabensbedingten Änderungen müssen vor dem Hintergrund der lokalen Variabilität der Ausgangsgröße interpretiert und bewertet werden.

6.3 Vorhabensbedingte Änderungen der Salzgehalte

Im simulierten Beispiel (Bild 25 bis Bild 28) ergeben sich im Blexer Bogen als tiefengemittelte Ergebnisse der 3D-Simulation tidegemittelte Salzgehalte von 2 bis 10 ‰ und maximale Salzgehalte von 4 bis 16 ‰. Sowohl in Richtung der Flussachse als auch in Querrichtung sind Gradienten vorhanden. Diese „Zonierung“ der Salzgehalte⁵ wird durch das Terminal nicht grundsätzlich verändert, aber die vorhabensbedingten Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen führen zu einem veränderten Massenaustausch zwischen den „Zonen“. Wie die Änderungen der maximalen Salzgehalte (Bild 28) zeigen, überwiegen dabei die Salzgehalts-Zunahmen, weil sich hauptsächlich eine Zunahme des Transports vom salzigeren Fahrrinnenbereich in die weniger salzhaltigen Randbereiche stattfindet. Im Tidemittel (Bild 26) treten diese Effekte kaum hervor; dies korrespondiert mit den wesentlich geringeren Gradienten im mittleren Salzgehalt (Bild 25) gegenüber dem maximalen Salzgehalt (Bild 27).

Die vorhabensbedingten Änderungen des mittleren Salzgehalts liegen überwiegend unter 0,4 ‰. Die Änderungen des maximalen Salzgehalts erreichen ufernah bis zu 2 ‰. Bei der Betrachtung der maximalen Salzgehaltsvariation (Bild 29, Bild 30) ergeben sich ähnliche Relationen. Die vorhabensbedingten Änderungen haben damit eine Größenordnung von 10 %, wenn sie vor dem Hintergrund der örtlichen Variabilität innerhalb des Gebiets Blexer Bogen betrachtet werden. Bei einer ortsfesten Betrachtungsweise eines bestimmten Punktes können sich größere relative Änderungen ergeben (z. B. 2 ‰ Anstieg bei 10 ‰ Salzgehaltsvariation an einem Punkt nördlich des OTB, also 20% relative Veränderung). In Bodennähe sind keine größeren Salzgehaltsänderungen als im Tiefenmittel zu erwarten.

Die lokalen Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten (Abschn. 5) führen somit zu lediglich lokalen Änderungen (Verlagerungen) der Salzkonzentrationen. Diese Änderungen sind aus wasserbaulicher Sicht gering im Verhältnis zur natürlichen (örtlichen und zeitlichen) Variabilität der Salzgehalte im Blexer Bogen. In Abhängigkeit von der hydrologischen Situation und damit der Lage des Salzkeils können die vorhabensbedingten Änderungen - bei ähnlicher relativer Größe - nach Ort und Größe variieren; sie bleiben dabei auf den Bereich zwischen Fahrrinne und rechtem Ufer bis zu einem maximalen Abstand von 3 bis 5 km vom OTB beschränkt.

⁵ Der Begriff wird hier bildhaft in Anlehnung an die Isofarbflächendarstellungen gewählt. Tatsächlich gibt es keine Salzgehalts-„Zonen“, sondern fließende Übergänge.

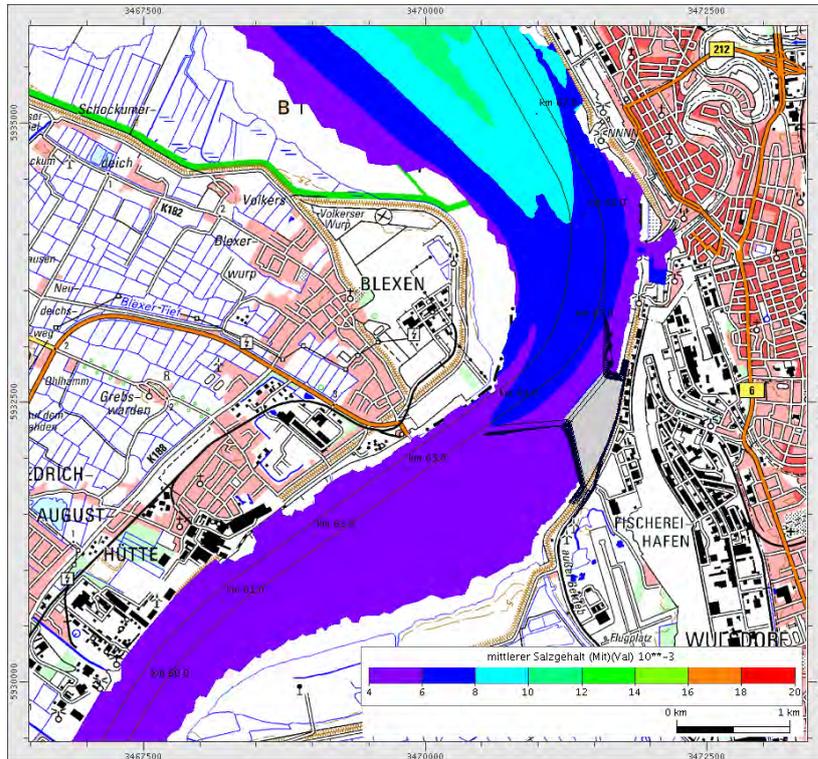


Bild 25: Mittlere Salzgehalte im Analysezeitraum (Ausbau, tide- und tiefengemittelt)

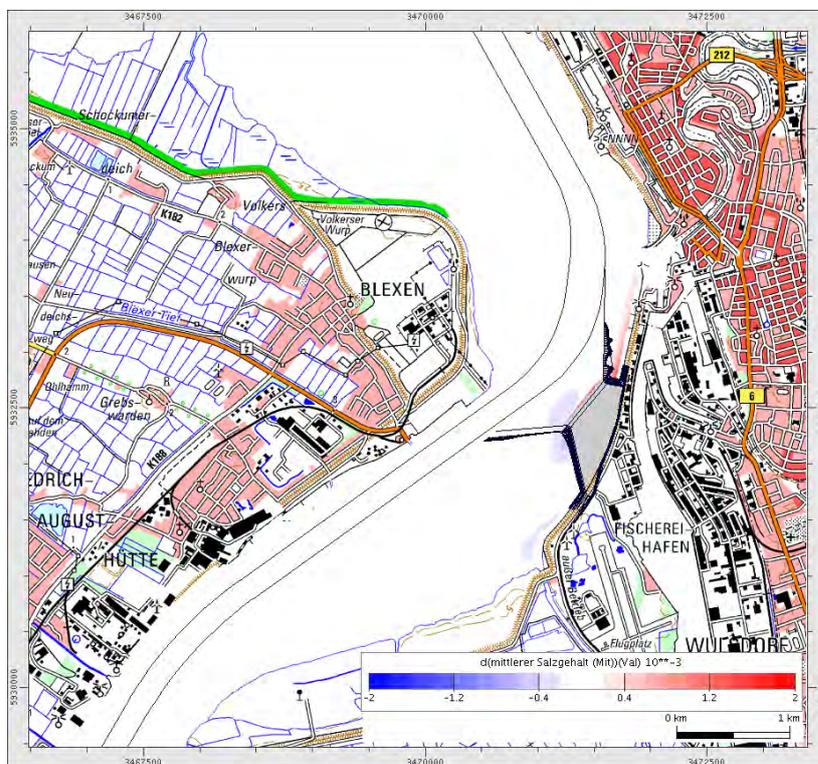


Bild 26: Vorhabensbedingte Änderungen der mittleren Salzgehalte im Analysezeitraum (tide- und tiefengemittelt)

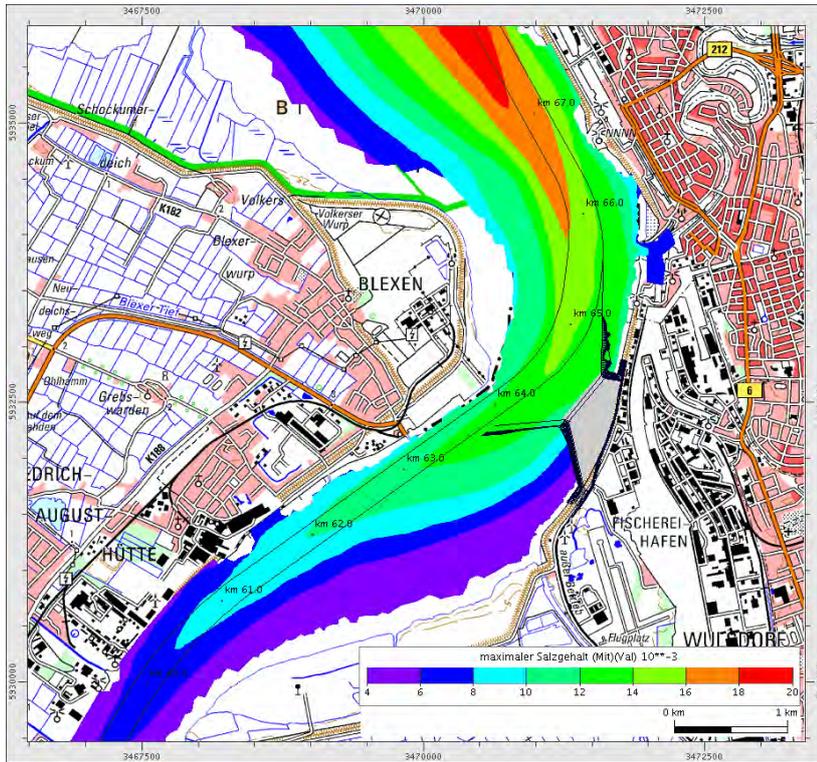


Bild 27: Maximale Salzgehalte im Analysezeitraum (Ausbau, tiefengemittelt)

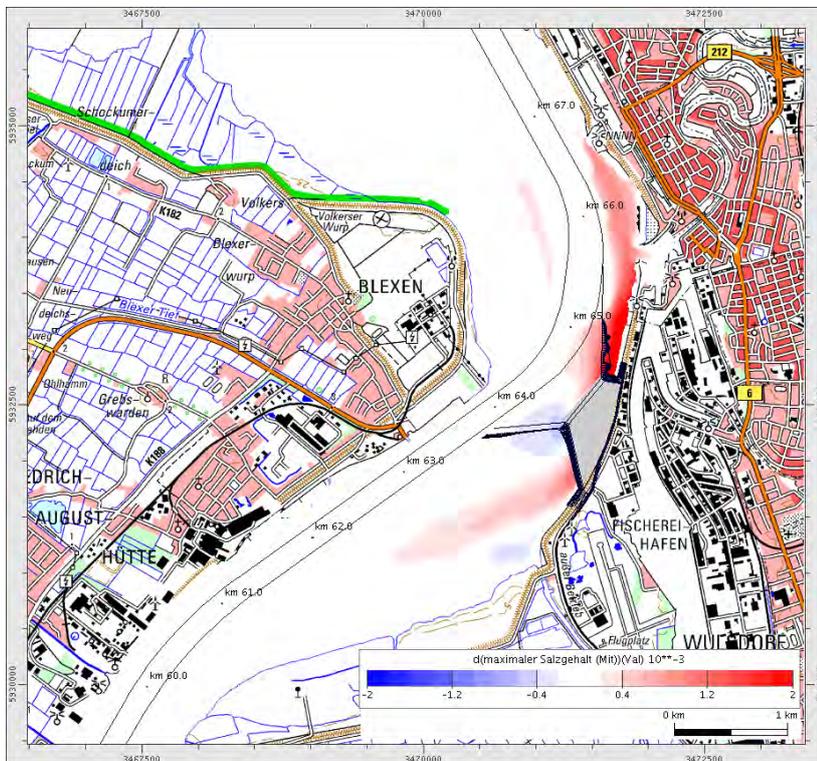


Bild 28: Vorhabensbedingte Änderungen der maximalen Salzgehalte im Analysezeitraum (tiefengemittelt)

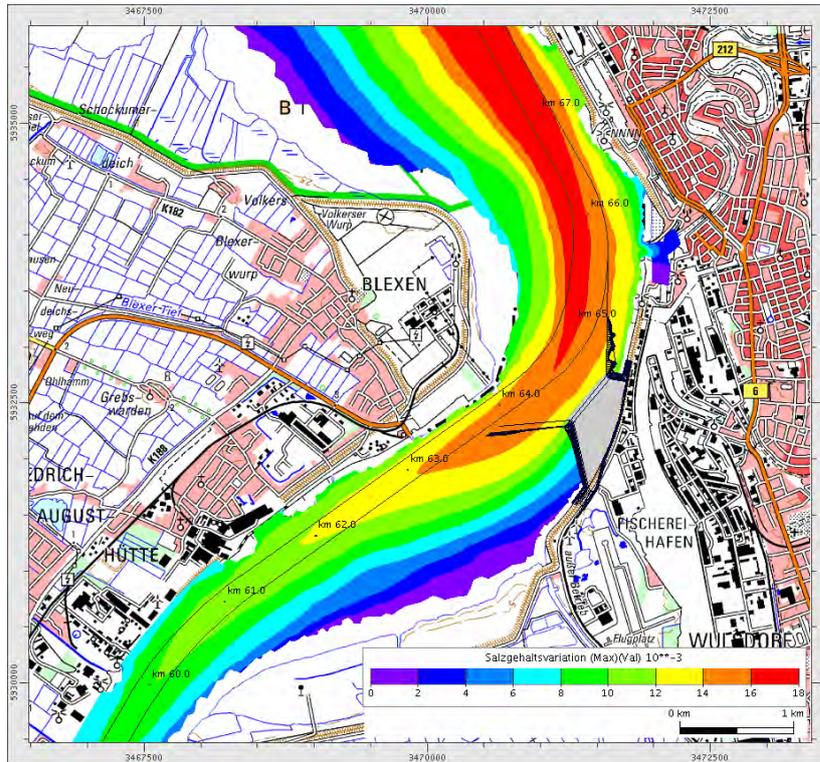


Bild 29: Maximale Salzgehaltsvariation im Analysezeitraum (Ausbau, tiefengemittelt)

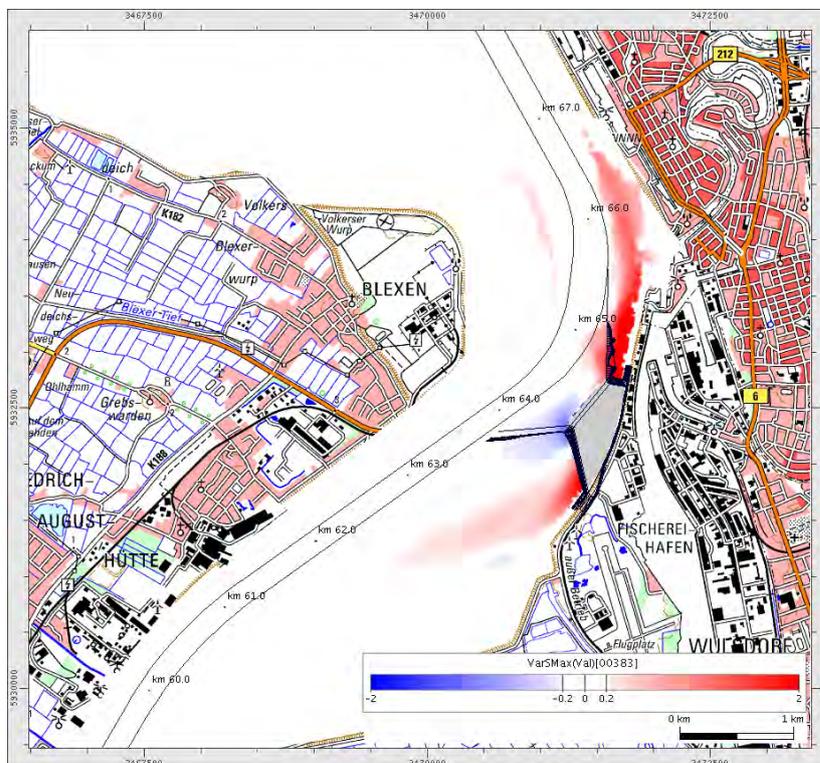


Bild 30: Vorhabensbedingte Änderungen der maximalen Salzgehaltsvariation im Analysezeitraum (tiefengemittelt)

6.4 Vorhabensbedingte Änderungen der Schwebstoffgehalte

Für das simulierte Beispiel wurden die mittleren und maximalen Schwebstoffgehalte und die vorhabensbedingten Änderungen durch eine Tidekennwertanalyse ermittelt (Bild 31 bis Bild 34).

Für die gewählte Situation zeigen die Schwebstoffgehalte im Bereich des OTB im Gegensatz zur Salzgehaltsverteilung (Abschn. 6.3) hauptsächlich quer zur Flussachse Gradienten. Deshalb liegen die vorhabensbedingten Änderungen zwar in derselben Größenordnung von 10% (bezogen auf die örtliche Variabilität innerhalb des Gebiets Blexer Bogen), aber sie zeigen einfachere Änderungsmuster und sind stärker auf den Abschattungsbereich des OTB beschränkt.

Da es sich im Wesentlichen um örtliche Stau- und Verlagerungseffekte handelt, bleiben die Änderungen lokal begrenzt. Sie führen zu keinen großräumigen Änderungen der Transportprozesse und somit zu keinen nennenswerten Wirkungen im weiteren Verlauf des Weserästuars.

In Abhängigkeit von der Lage der Trübungszone können die dargestellten lokalen vorhabensbedingten Änderungen - bei ähnlicher relativer Größe - nach Ort und Größe variieren. Wenn der Rand der Trübungszone im Bereich des OTB liegt, können sich ähnliche relative Änderungen ergeben, wie für den Salzgehalt gezeigt wurde (Abschn. 6.3). Auch in diesem Fall bleiben sie auf den Bereich zwischen Fahrrinne und rechtem Ufer bis zu einem maximalen Abstand von 3 – 5 km vom OTB beschränkt.

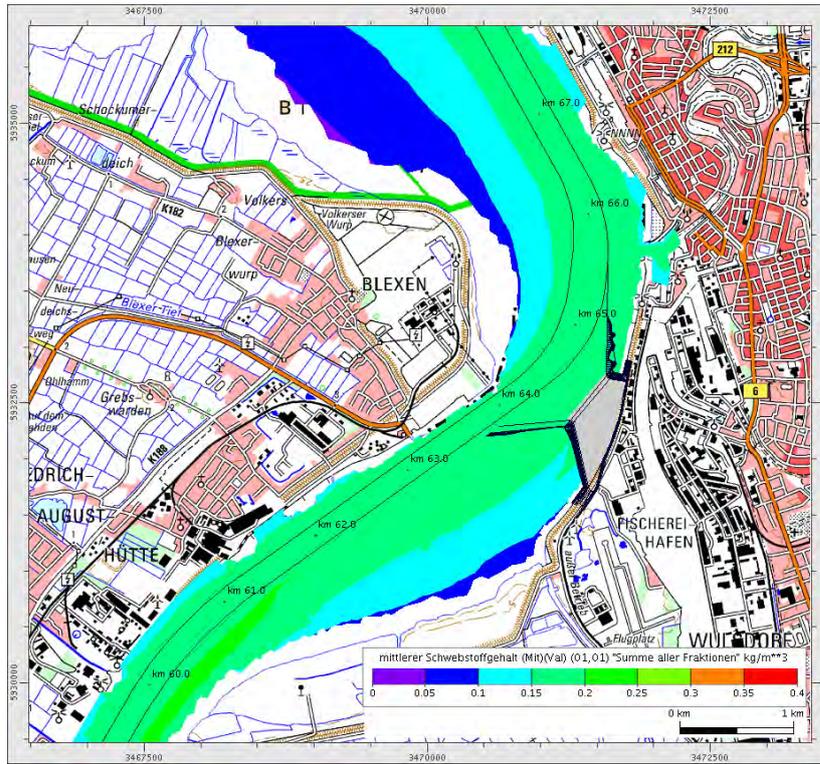


Bild 31: Mittlere Schwebstoffgehalte im Analysezeitraum (Ausbau, tide- und tiefengemittelt)

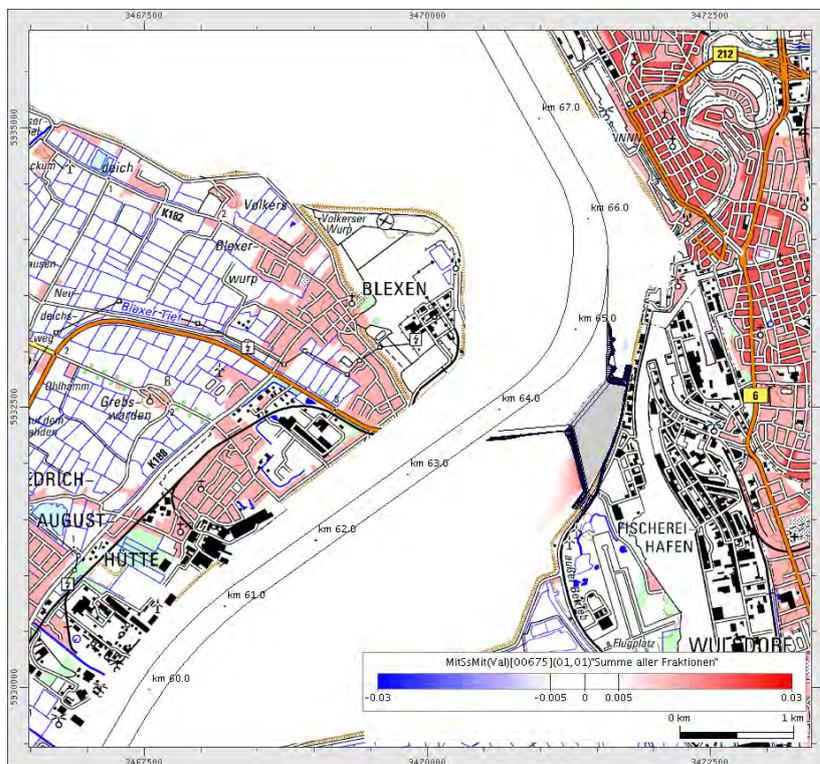


Bild 32: Vorhabensbedingte Änderungen der mittleren Schwebstoffgehalte im Analysezeitraum (tide- und tiefengemittelt)

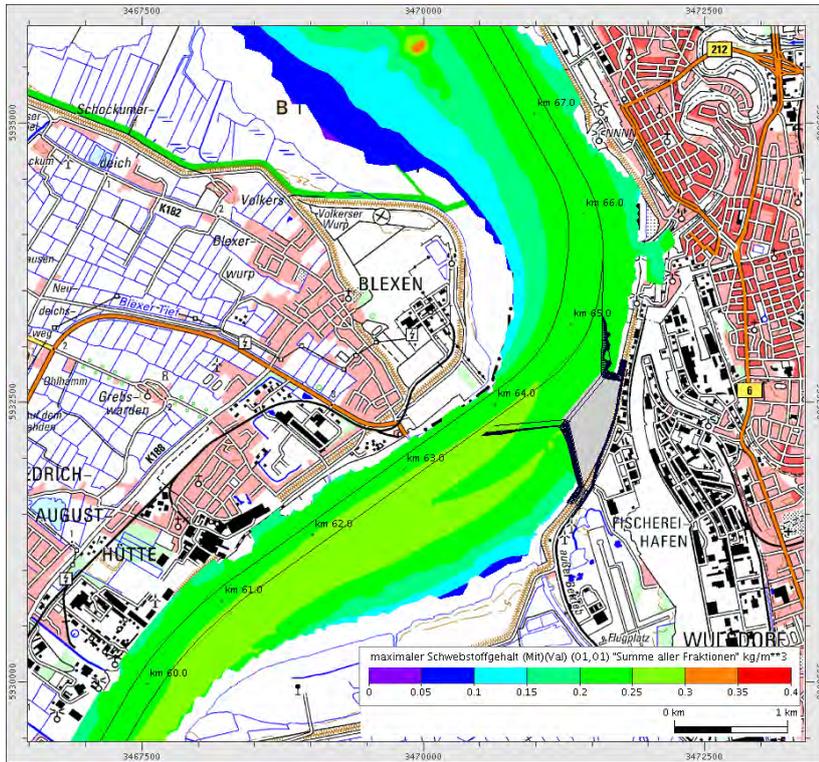


Bild 33: Maximale Schwebstoffgehalte im Analysezeitraum (Ausbau, tiefengemittelt)

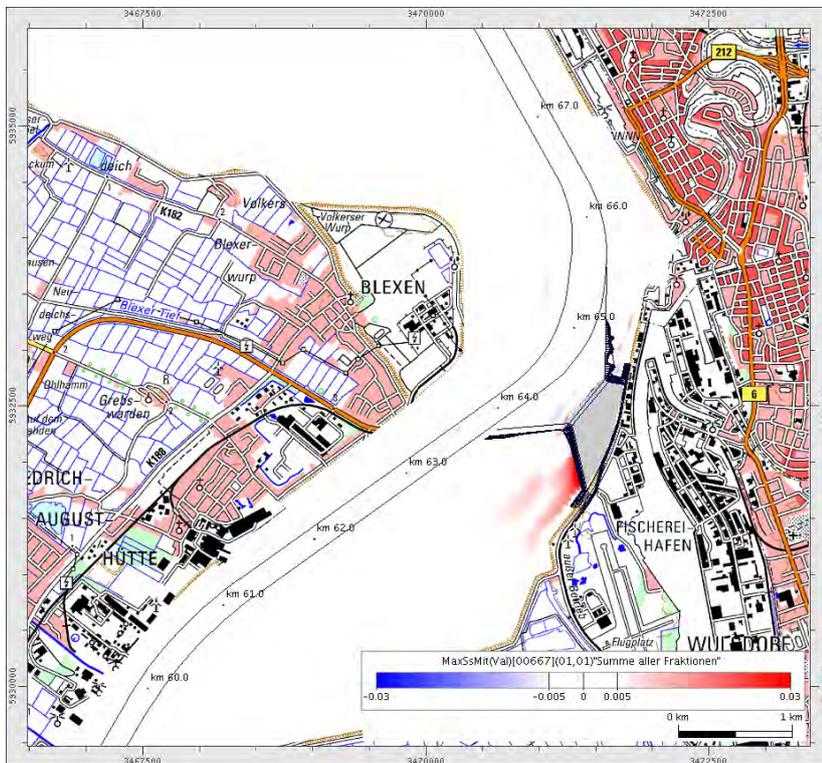


Bild 34: Vorhabensbedingte Änderungen der maximalen Schwebstoffgehalte im Analysezeitraum (tiefengemittelt)

7 Auswirkungen auf die Scheitelwasserstände und Laufzeiten der Sturmfluten

7.1 Wirkungszusammenhänge

Für die Auswirkungen des Vorhabens auf die Strömungen und Wasserstände bei Sturmflut gelten grundsätzlich die gleichen Wirkungszusammenhänge wie bei normalen Tiden (vgl. Abschn. 5.1). Da sich ein großer Teil der Verbauwirkung auf die flachen Seitenbereiche bezieht, können die Auswirkungen bei hohen Wasserständen (mit stärkerer Durchströmung der Seitenbereiche) größer als bei normalen Tiden sein. Aufgrund von Reflektionswirkungen sind Zunahmen der Wasserstände seeseitig des Terminals und Abnahmen oberstrom zu erwarten.

7.2 Untersuchungsmethodik

Die Vorhabenswirkungen waren für den Bemessungslastfall der Weserdeiche nachzuweisen. Die Bemessungsturmflut für die Unterweser wurde auf der Grundlage der Sturmflut vom 3.12.1999 beim NLÖ (heute NLWKN) entwickelt. Durch eine Erhöhung der Windgeschwindigkeiten über der Nordsee erreicht diese synthetische Sturmflut den Bemessungswasserstand BWSt(2100) von 6,37 mNN in Bremerhaven (NLÖ, 2003). Sie ist durch westliche Windrichtungen mit Windgeschwindigkeiten bis zu 28 m/s bei Bremerhaven geprägt. Der Oberwasserzufluss beträgt 2000 m³/s.

Zur Quantifizierung der Vorhabenswirkungen wurde dieses Szenario im Sturmflutmodell (vgl. Abschn. 4.4) mit und ohne die geplante Baumaßnahme simuliert, um insbesondere die folgenden Veränderungen zu quantifizieren:

- Veränderung des Sturmflutscheitelwasserstandes
- Laufzeitänderung des Sturmflutscheitels
- räumliche Ausdehnung der Vorhabenswirkung

7.3 Vorhabensbedingte Änderungen der Scheitelwasserstände und Laufzeiten

Bei auflaufender Sturmflut bewirkt die vorhabensbedingte Einengung des Durchflussquerschnitts eine Beschleunigung der Strömung (vgl. Abschn. 5). In Bild 35 bis Bild 37 ist ein Zeitpunkt mit ausgeprägtem Flutstrom 4½ Stunden vor Erreichen des Sturmflutscheitels in

Bremerhaven als charakteristisches Beispiel dargestellt. Dazu wurde eine synoptische Auswertung gewählt, da eine Tidekennwertanalyse wie in Abschn. 5 für das Sturmflutszenario nicht sinnvoll ist.

Die Zunahmewerte liegen hier großflächig bei bis zu 0,20 m/s (Bild 37). Sie sind damit deutlich größer als bei mittleren hydrologischen Verhältnissen (vgl. Bild 16). Während dort im Stau- und Abschattungsbereich des Terminals Geschwindigkeitsabnahmen festzustellen waren, ergibt sich im Sturmflutfall ufernah eine Zunahme. Sie ist darauf zurückzuführen, dass sich hier bei den großen Wassertiefen des Sturmflutfalls eine ausgeprägte Walzenströmung einstellt.

Wegen der gegenüber normalen Verhältnissen größeren Auswirkung auf die Strömung ergeben sich prinzipiell größere Auswirkungen auf die Wasserstände als in Abschn. 5, wobei eine Reduzierung der Scheitelwasserstände überwiegt: Stromaufwärts des Offshore-Terminals bis Bremen werden die Sturmflutscheitelwasserstände geringfügig (um etwa 1 cm) reduziert, wie Bild 38 am Beispiel des Pegels Bremen zeigt.

Seeseitig des OTB ergibt sich kein nennenswerter Anstieg des Scheitelwertes. Die Differenz liegt, wie am Beispiel des Pegels Bremerhaven (Bild 39) gezeigt, unter 0,01 m. Auch lokal ist kein nennenswerter Anstieg des Scheitelwasserstandes festzustellen. Die Absenkung des Scheitelwasserstandes beginnt am OTB (Bild 40) und wirkt bis Bremen (s. o., Bild 38).

Die Laufzeiten (Eintrittszeitpunkt des Sturmflutscheitels in Bremen) ändern sich nicht signifikant (weniger als 1 Minute).

Hinweis:

Während der Erstellung des vorliegenden Gutachtens wurde die Anhebung des Bemessungswasserstandes in Bremerhaven um 25 cm (von 6,37 m NHN auf 6,62 m NHN) bekannt. Die Steuerkurve für die geänderte Bemessungsturmflut (vgl. Abschn. 4.2.2) lag nicht vor. Grundsätzlich ist folgendes hinsichtlich der Auswirkungen auf die vorhabensbedingten Änderungen festzustellen:

- Durch die Wasserstandserhöhung um 25 cm wird die Verbauwirkung des OTB nicht mehr nennenswert zunehmen.
- Bei ansonsten gleicher Sturmflutdynamik werden die vorhabensbedingten lokalen Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten so wie die Änderungen des Scheitelwasserstandes wegen der Zunahme der Wassertiefe tendenziell abnehmen.
- Falls mit der Anhebung des Bemessungswasserstandes eine Zunahme der Sturmflutdynamik gegeben ist, können die vorhabensbedingten lokalen Geschwindigkeitsänderungen verstärkt werden. Damit wäre eine weitere vorhabensbedingte Abnahme der Scheitelwasserstände in der Unterweser und eine Zunahme seeseitig des OTB verbunden. Dabei sind geringfügige Änderungsbeträge zu erwarten.

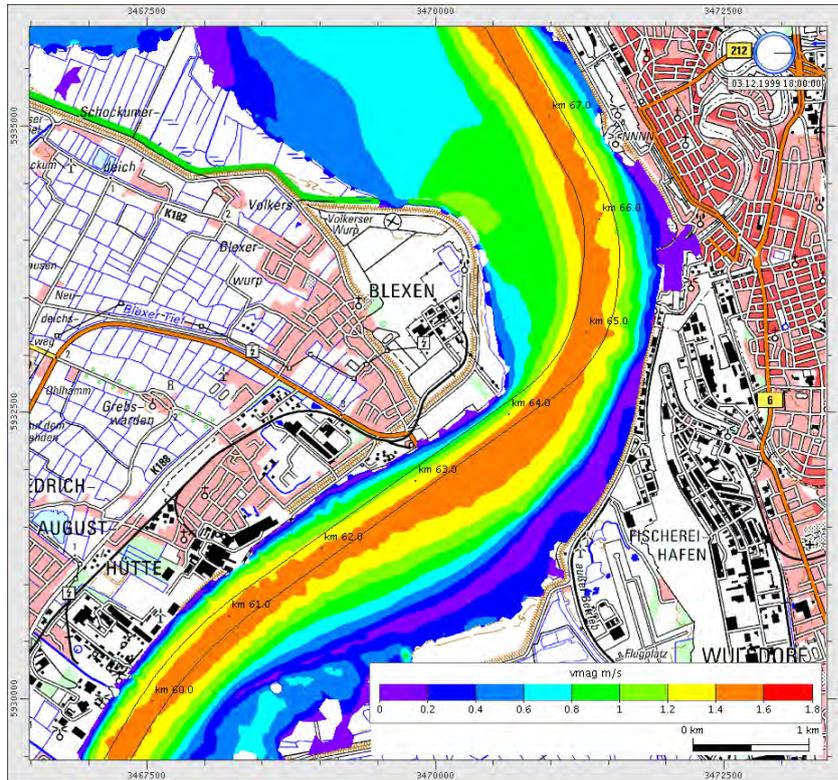


Bild 35: Flutstromgeschwindigkeiten bei der Bemessungssturmflut (Referenz)

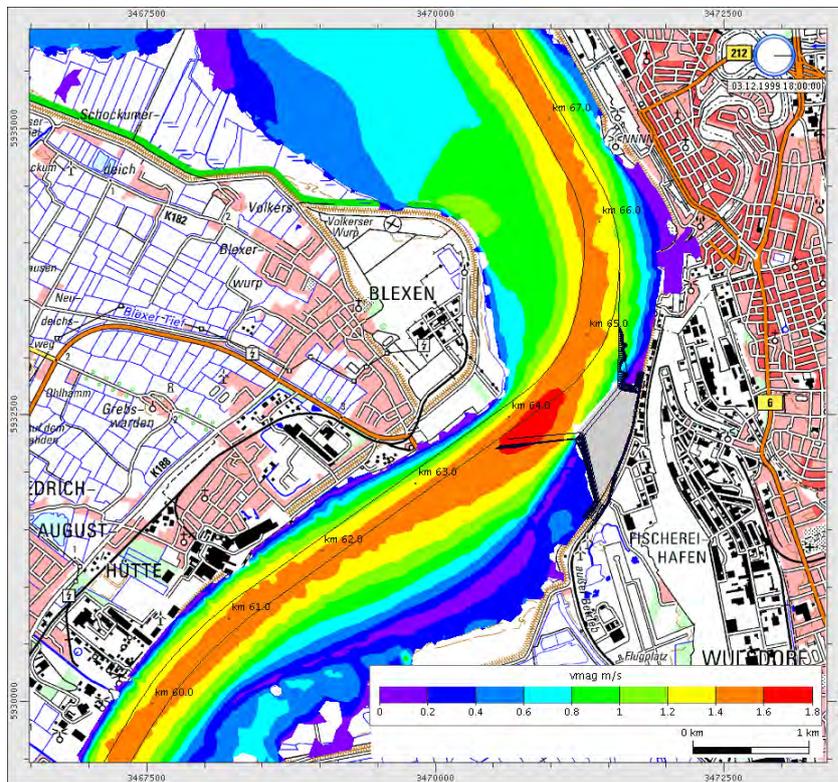


Bild 36: Flutstromgeschwindigkeiten bei der Bemessungssturmflut (Ausbau)

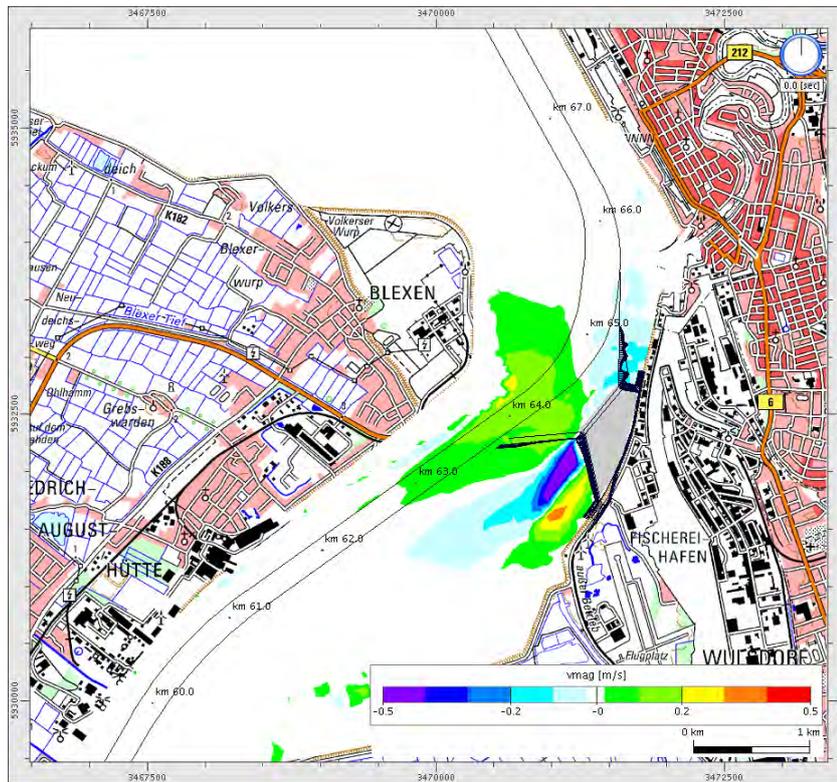


Bild 37: Vorhabensbedingte Änderungen der Flutstromgeschwindigkeiten bei der Bemessungsturmflut

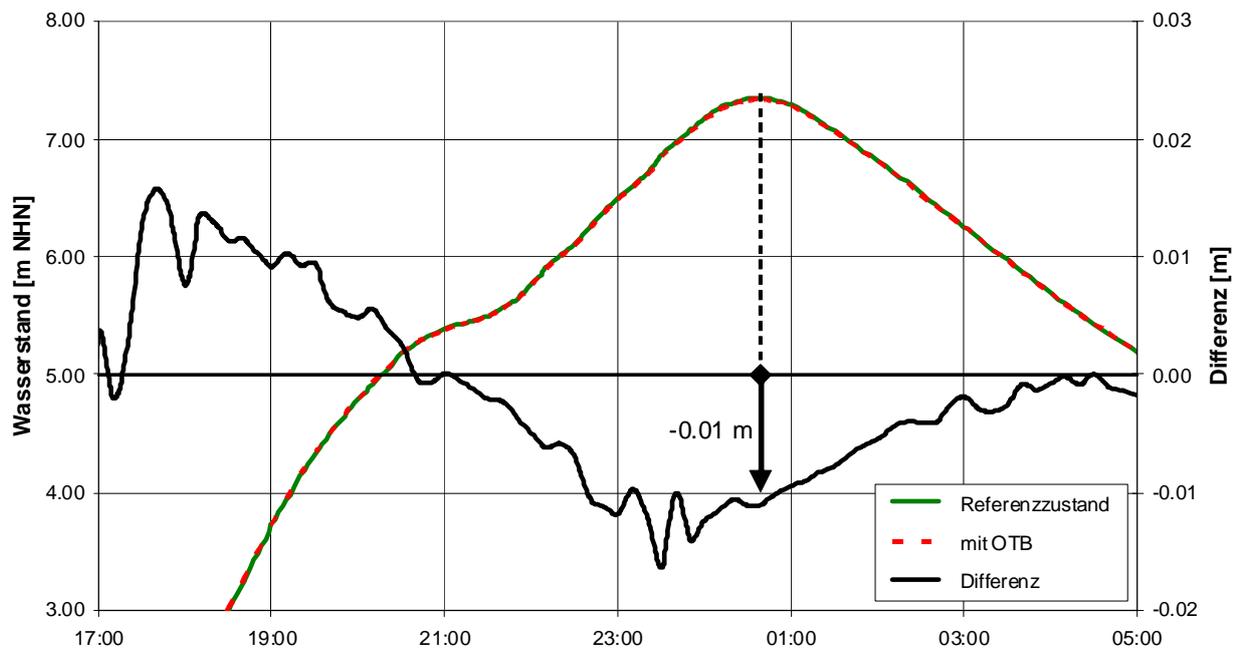


Bild 38: Wasserstandsganglinien der Bemessungsturmflut und Differenzen am Pegel Bremen (Wilhelm-Kaisers-Brücke)

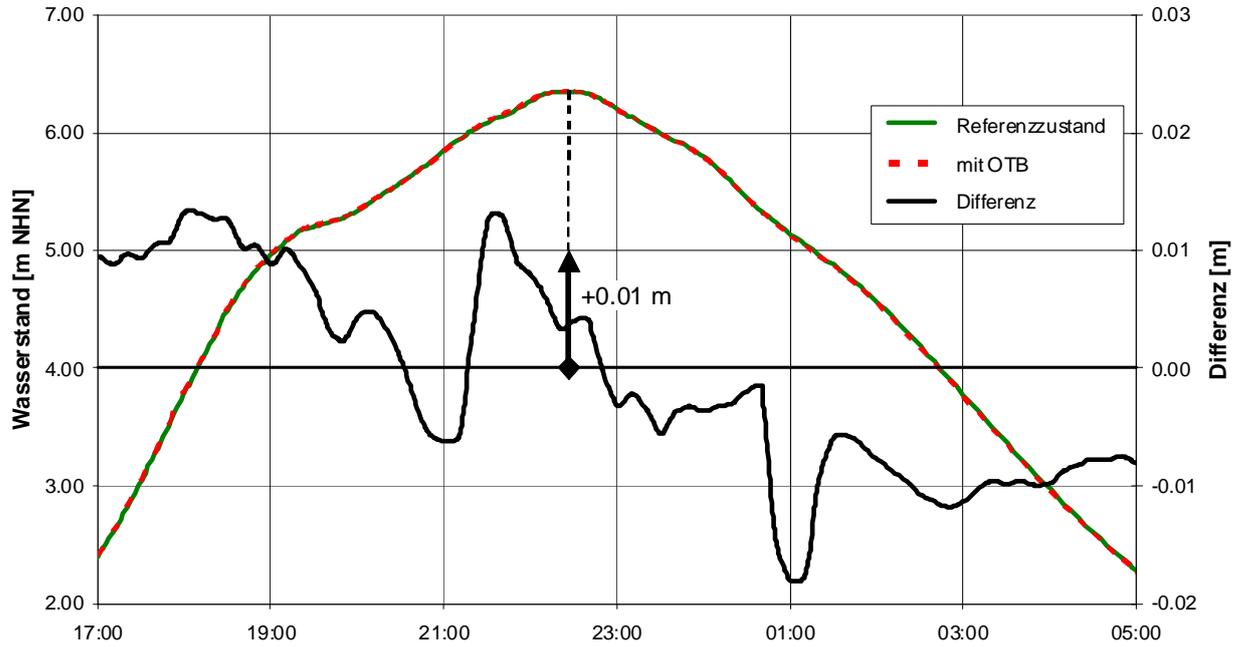


Bild 39: Wasserstandsganglinien der Bemessungsturmflut und Differenzen am Pegel Bremerhaven (Alter Leuchtturm)

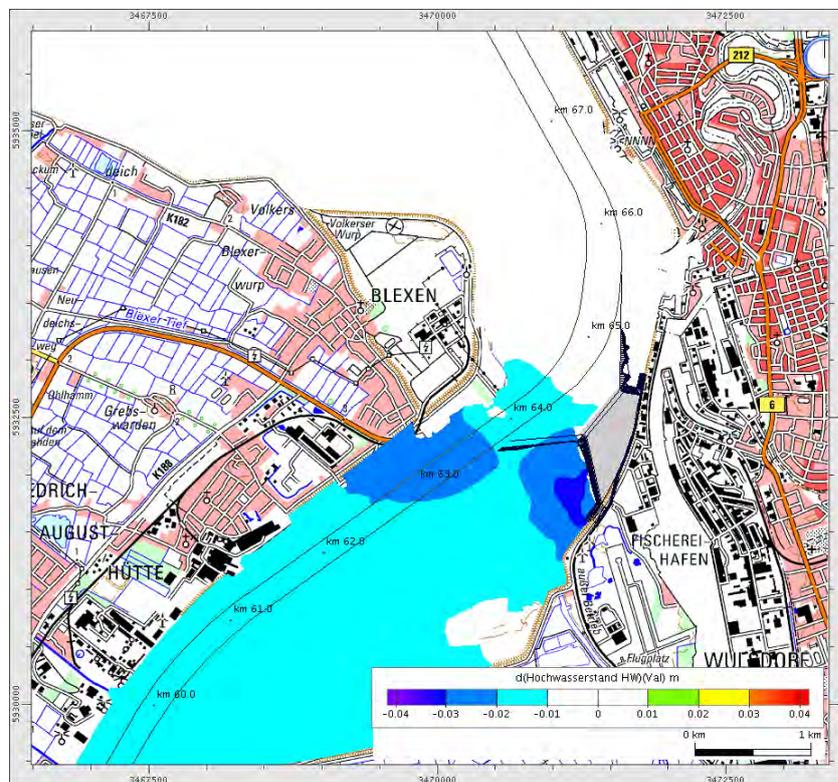


Bild 40: Änderung des Scheitelwasserstandes der Bemessungsturmflut

8 Auswirkungen auf die Seegangsverhältnisse

8.1 Wirkungszusammenhänge

Das geplante OTB befindet sich von See her betrachtet am Ende des Außenweser-Trichters. Für den Seegang an dieser Stelle stehen bei nordwestlichen Windrichtungen beträchtliche Fetchlängen zur Verfügung, so dass relativ große Wellenhöhen auftreten können.

Das Terminal-Bauwerk und die örtlich veränderten Tiefenverhältnisse werden sich auf die Seegangsparameter im Umfeld des Hafens auswirken. Insbesondere werden die senkrechten Wände des Terminals (oder ggf. dort liegende Schiffe) die anlaufenden Wellen reflektieren und dadurch zu einem Anstieg der Wellenhöhen vor der Kaje und am gegenüberliegenden Ufer führen. Die Reflektionswirkung ist am größten, wenn die Reflektionsfläche als glatte senkrechte Fläche ausgebildet wird und so zu einer Totalreflektion der Wellen führt (Reflektionsfaktor = 1).

Starke nordwestliche Winde fallen in der Regel mit erhöhten Wasserständen durch Windstau in der Deutschen Bucht zusammen (Sturmflutsituation). Es war deshalb zu untersuchen, in welchen Bereichen und in welchem Maße vorhabensbedingte Änderungen der Wellenhöhen zu erwarten sind.

8.2 Untersuchungsmethodik

Zur Untersuchung dieser Vorhabenswirkung waren Simulationen in einem Seegangsmodell erforderlich. Mit Hilfe des verwendeten numerischen Modellverfahrens SWAN war es möglich, sowohl die Entstehung und die Umformung des Seegangs in der Außenweser (einschl. des von außen einlaufenden Nordseeseegangs), als auch die Reflektionswirkungen der senkrechten bzw. geböschten Kajenflächen zu simulieren und dabei die Auswirkungen der Strömungen auf die Seegangsausbreitung zu berücksichtigen.

Für die Weser wurde vom NLWKN eine Bemessungssturmflut festgelegt (vgl. Abschn. 7). Diese liefert zwar hinsichtlich der Wasserstände die relevanten Bemessungsparameter und weist zum Zeitpunkt des Hochwasserscheitels sehr hohe Windgeschwindigkeiten auf. Jedoch liegen die Windrichtungen im Untersuchungsgebiet bei West. Da für den Seegang am OTB bei westlichen Windrichtungen nur kurze Fetchlängen vorliegen, ist für dieses Szenario nicht mit den größten Vorhabenswirkungen zu rechnen. Aus diesem Grunde wurden die maximalen Vorhabenswirkungen für die Kombination der folgenden Bedingungen auf der sicheren Seite liegend abgeschätzt:

- Wasserstände und Strömungen gemäß der Bemessungssturmflut des NLWKN
- Seegang für die Windrichtung Nordwest und eine Windgeschwindigkeit von 30 m/s
- Totalreflektion der senkrechten Kajeinfläche, Reflektionsfaktor 0,5 für die geböschten Flanken

Das NLWKN ging bei Untersuchungen zur Sturmflutsicherheit an der Unterweser in ähnlicher Weise vor (NLÖ, 2003): Für die lokale Seegangsentwicklung wurden Windrichtungen von West bis Nordwest untersucht, um den ungünstigsten Fall ansetzen zu können. Dabei wurde der Seegang stationär für den Scheitelwasserstand modelliert und die synchrone Strömung aus dem Tidemodell eingespeist. (Wegen der Verschiebung der Stromkenterung ist im Untersuchungsgebiet zum Zeitpunkt des Sturmflutscheitels noch eine Flutströmung vorhanden.) Für die Windrichtung Nordwest lagen die signifikanten Wellenhöhen am Ort der geplanten Kaje bei etwa 1,5 bis 1,75 m.

Um den Seegang im Verlauf der Sturmflut und damit unter dem Einfluss der Strömung zu beschreiben, wurden für das vorliegende Gutachten - zusätzlich zum Scheitelwasserstand – drei weitere Zeitpunkte analysiert:

- a) ausgeprägte Flutströmung
- b) ausgeprägte Ebbeströmung
- c) Flutkenterung

Für a) und b) wurden die Strömungs-/Wasserstandssituation 4½ Stunden vor und 5½ Stunden nach dem Sturmflutscheitel („3.12.99 22:30“) ausgewählt, für c) die Situation eine Stunde nach dem Scheitel.

Alle Seegangsberechnungen wurden im stationären Modus und ohne Diffraktion durchgeführt.

Die Kombination der Bemessungssturmflut (Westwind) mit dem Seegang für Nordwestwind ergibt zwar kein homogenes Szenario. Dennoch war diese Überlagerung der Wasserstands- und Seegangsbedingungen für den Bereich des OTB sinnvoll, weil das Erreichen des Bemessungswasserstandes von 6,37 m NHN ($BWST_{2100}$) bei Bremerhaven auch bei nordwestlichen Windrichtungen möglich erscheint.

Auch die o.g. Annahme der Totalreflektion an der Kaje dient der Ermittlung eines oberen Wertes für die Prognose der Vorhabenswirkungen. Bei einer reflektionsmindernden Bauweise (z. B. Wellenkammern) sind die Vorhabenswirkungen geringer.

8.3 Vorhabensbedingte Änderungen des Seegangs

Die beschriebene Szenarienkombination der Bemessungssturmflut mit einem durch Nordwestwind (30 m/s) hervorgerufenen Seegang ergibt am Ort der geplanten Kaje signifikante Wellenhöhen von rund 2,0 m beim Sturmflutscheitel (Wasserstand am Pegel Bremerhaven 6,37 m NHN, Bild 41). Die Größe der Wellenhöhe resultiert daraus, dass der Seegang von der Außenweser her fast geradlinig auf diese Stelle trifft. Die genannte Wellenhöhe ist höher als der o. g. bei NLÖ (2003) abgelesene Wert (Abschn. 8.2), so dass eine konservative Ermittlung der Vorhabenswirkungen erfolgt.

Weiter westlich wird die Abschirmung durch das Blexener Ufers wirksam (Bild 41). Dadurch tritt bei typischen Sturmfluten nahe dem linken Weserufer nur schwacher, vom Deich weg gerichteter Seegang auf und am rechten Ufer sind die Wellenhöhen hauptsächlich durch die lokale, auf einer kurzen Fetchlänge basierende Windsee bestimmt.

Durch die Reflektionswirkung des OTB, insbesondere der senkrechten Kajenwand, wird der relativ starke Seegang zum Blexener Ufer gelenkt und dort nochmals von Uferwänden und Anlegern, insbesondere bei den Titan-Werken, reflektiert (Bild 42 und Bild 43). Dadurch gelangt vermehrt Seegangsenergie in die bisher weniger beaufschlagten Bereiche des Blexer Bogens (Blexen bis Friedrich-August-Hütte). Dabei liegen die größten Zunahmen der sign. Wellenhöhen (0,30 m bis über 0,60 m) jeweils vor den reflektierenden Wänden (Bild 43). In Deichnähe liegen die Anstiege zwischen 0,00 und 0,05 m; lediglich im seeseitigen Anschlussbereich des OTB, im Winkel zwischen Terminalflanke und Hochwasserschutzdeich, sind deichnah größere Zunahmen über 0,05 m festzustellen (vgl. hierzu Abschn. 11.2).

Die simulierte Flutstromsituation liegt 4½ Stunden vor dem Sturmflutscheitel (Bild 44 bis Bild 46). Da die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten in der Regel im zentralen Bereich der tiefen Rinne auftreten und sich somit ein gekrümmtes horizontales Geschwindigkeitsprofil ausbildet, werden die bei Flut mit der Strömungsrichtung laufenden Wellen durch Refraktion und Strömungsrefraktion zum Rand der Fahrrinne hin geleitet und von dort durch die abnehmenden Wassertiefen in die Seitenbereiche gebeugt. Es kommt hinzu, dass die Wassertiefen zu diesem Zeitpunkt rund 2,5 m geringer sind (Wasserstand am Pegel Bremerhaven ~3,8 m NHN). Sowohl durch die Refraktion und Strömungsrefraktion als auch in Folge der geringeren Wassertiefe erreicht weniger Seegangsenergie das betrachtete Gebiet und damit sind auch die reflektierten Wellenhöhen (Absolutwerte) geringer als beim Sturmflutscheitel (Bild 46).

In der simulierten Ebbestromsituation (Bild 47 bis Bild 49) wirkt die Strömungsrefraktion als „Seegangsverstärker“, weil die entgegen der Strömungsrichtung laufende Wellen zur Rinnenmitte hin gebeugt werden. Der ins Ästuar einlaufende Seegang wird also bei Ebbe in

der tiefen Rinne gebündelt und mehr Seegangenergie gelangt in den Bereich des OTB. Allerdings sind bis zum Erreichen der vollen Ebbeströmung die Wassertiefen um fast $3\frac{1}{2}$ m gegenüber dem Sturmflutscheitel gefallen (Wasserstand am Pegel Bremerhaven $\sim 3,0$ m NHN), so dass auch diese Situation hinsichtlich der Vorhabenswirkungen günstiger ist (geringerer Anstieg der Wellenhöhen im Vergleich zum Zeitpunkt des Scheitelwasserstandes).

Wegen der gegenläufigen Effekte des abnehmenden Wasserstands (seegangsmindernd) und der zunehmenden Ebbeströmung (seegangsverstärkend) stellt sich die Frage, ob es zwischen dem Sturmflutscheitel und der beschriebenen Ebbesituation einen ungünstigeren Zeitpunkt gibt. Dies ist zum Zeitpunkt der Flutstromkenterung (Bild 50 bis Bild 52) insofern der Fall, als hier vor dem Blexener Ufer die größten Vorhabenswirkungen im betrachteten Bereich des SF-Scheitels festzustellen sind (Bild 52 im Vergleich zu Bild 43). Der Wasserstand liegt hier rd. 0,5 m unter dem Scheitelwert ($\sim 3,8$ m NHN am Pegel Bremerhaven).

Allgemein ist bei der Bewertung der Simulationsergebnisse zu berücksichtigen, dass das Modell die Gradienten der Wellenhöhen im Einflussbereich der Reflektion (und somit die Gradienten der vorhabensbedingten Änderungen) überzeichnet. In der Natur wird die Seegangenergie durch Diffraktion stärker diffundiert, also über ein größeres Gebiet verteilt. Dadurch werden die lokalen Beträge der vorhabensbedingten Änderungen kleiner.

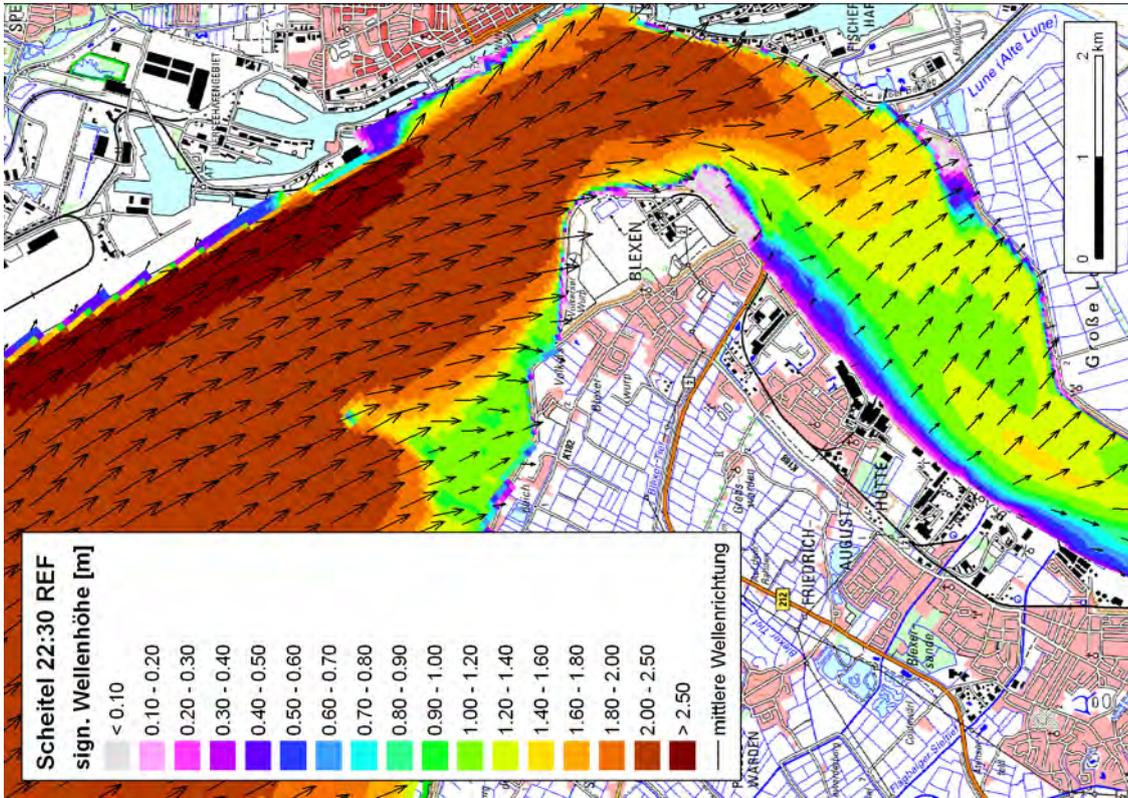


Bild 41: Signifikante Wellenhöhen beim Scheitelwasserstand (Referenz)

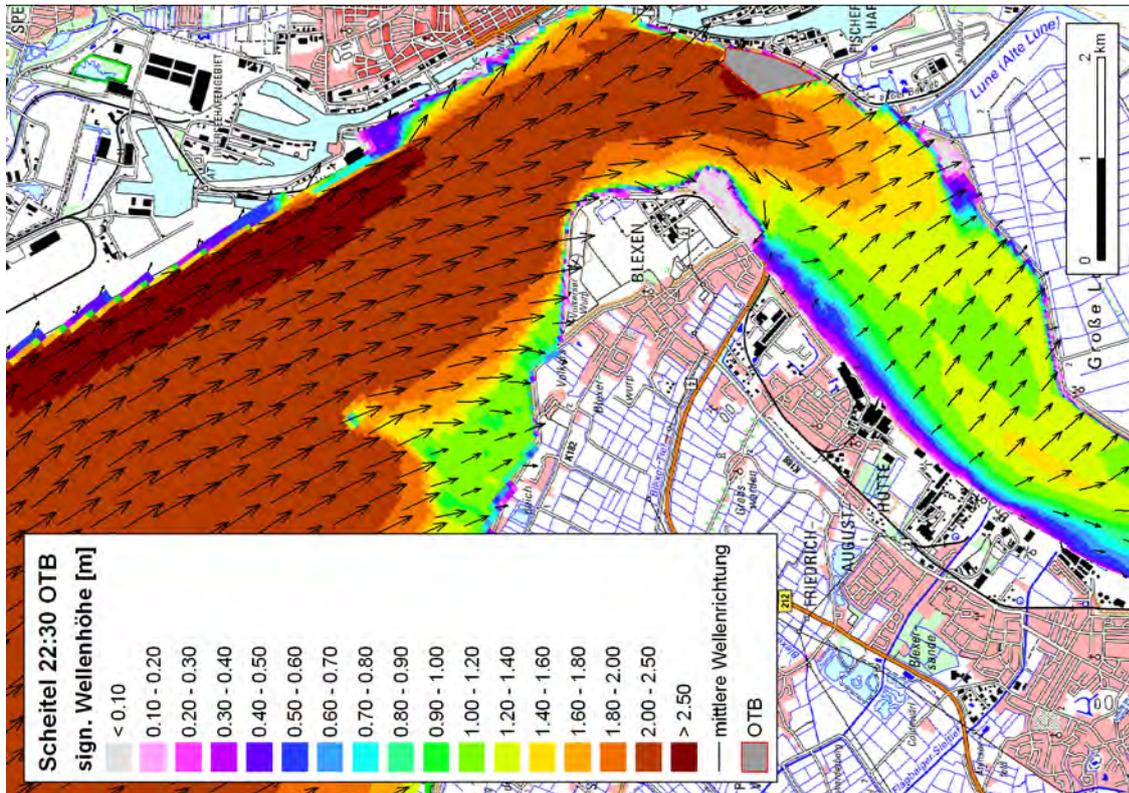


Bild 42: Signifikante Wellenhöhen beim Scheitelwasserstand (Ausbau)

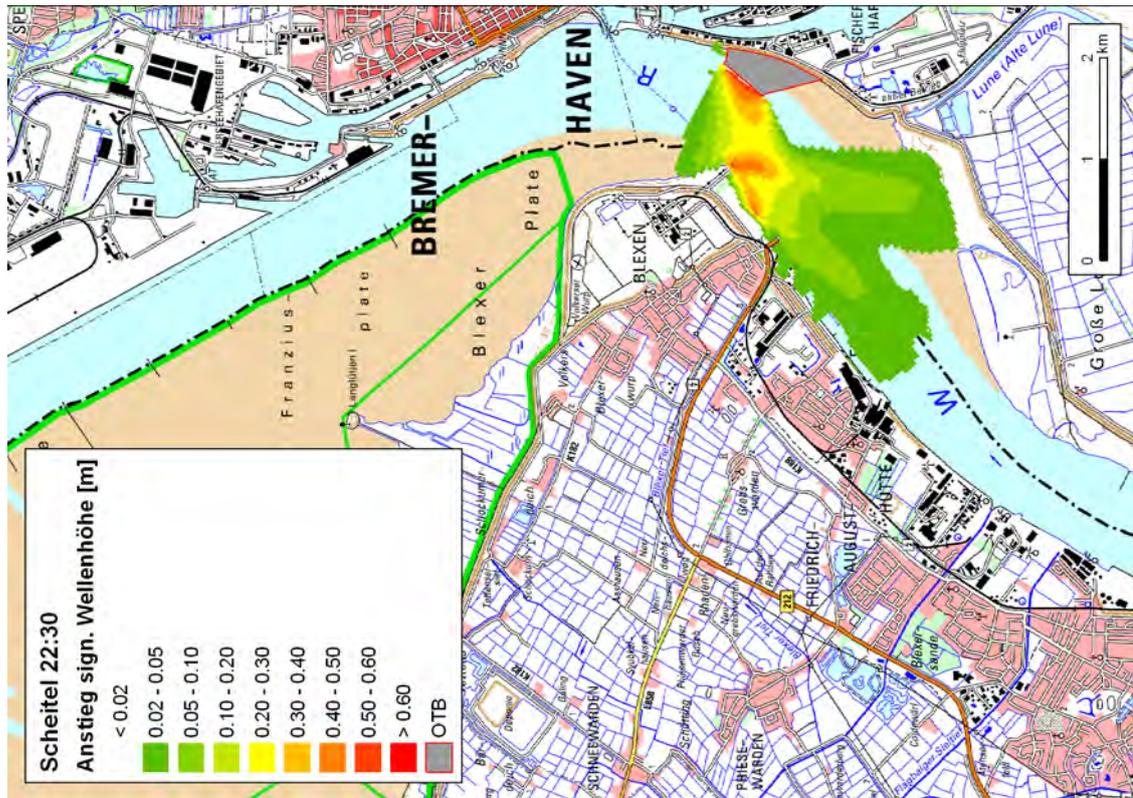


Bild 43: Vorhabensbedingte Änderungen der signifikanten Wellenhöhen beim Scheitelwasserstand

Bild 41 bis Bild 43:

**Signifikante Wellenhöhen und vorhabensbedingte Änderungen
 bei der synthetischen Sturmflut**

Scheitelwasserstand
 („3.12.99 22:30“)

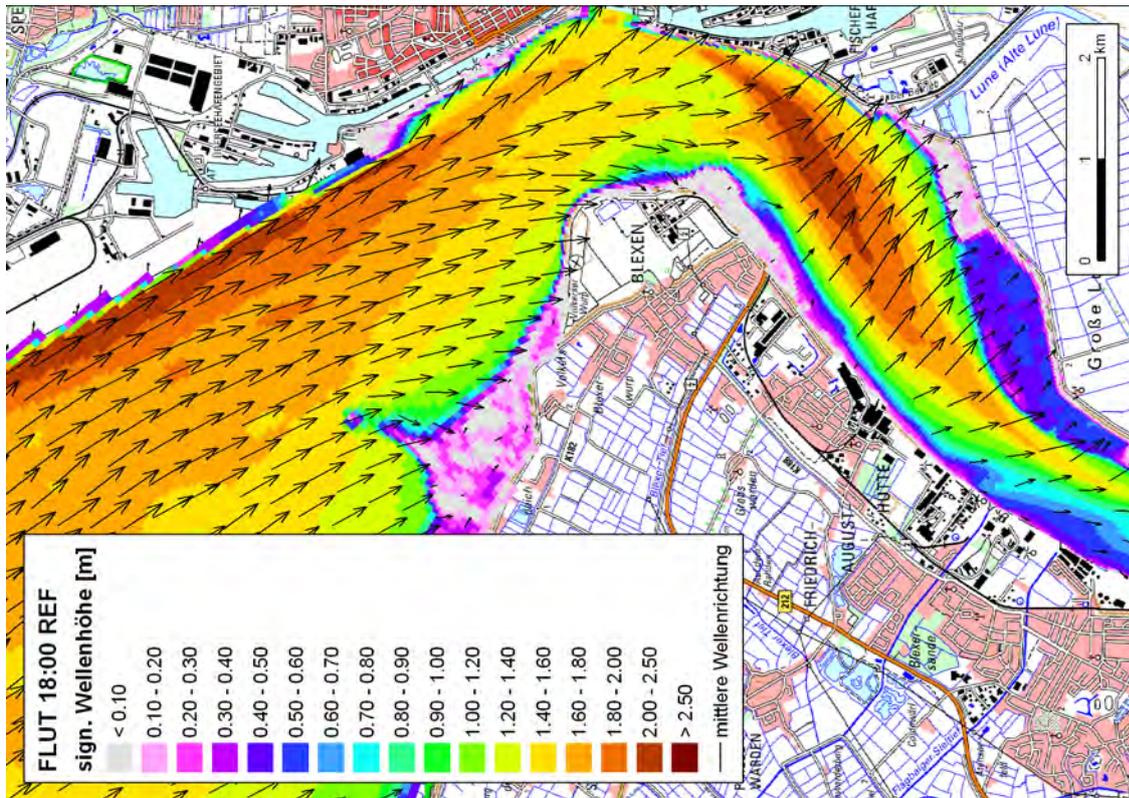


Bild 44: Signifikante Wellenhöhen bei Flutstrom (Referenz)

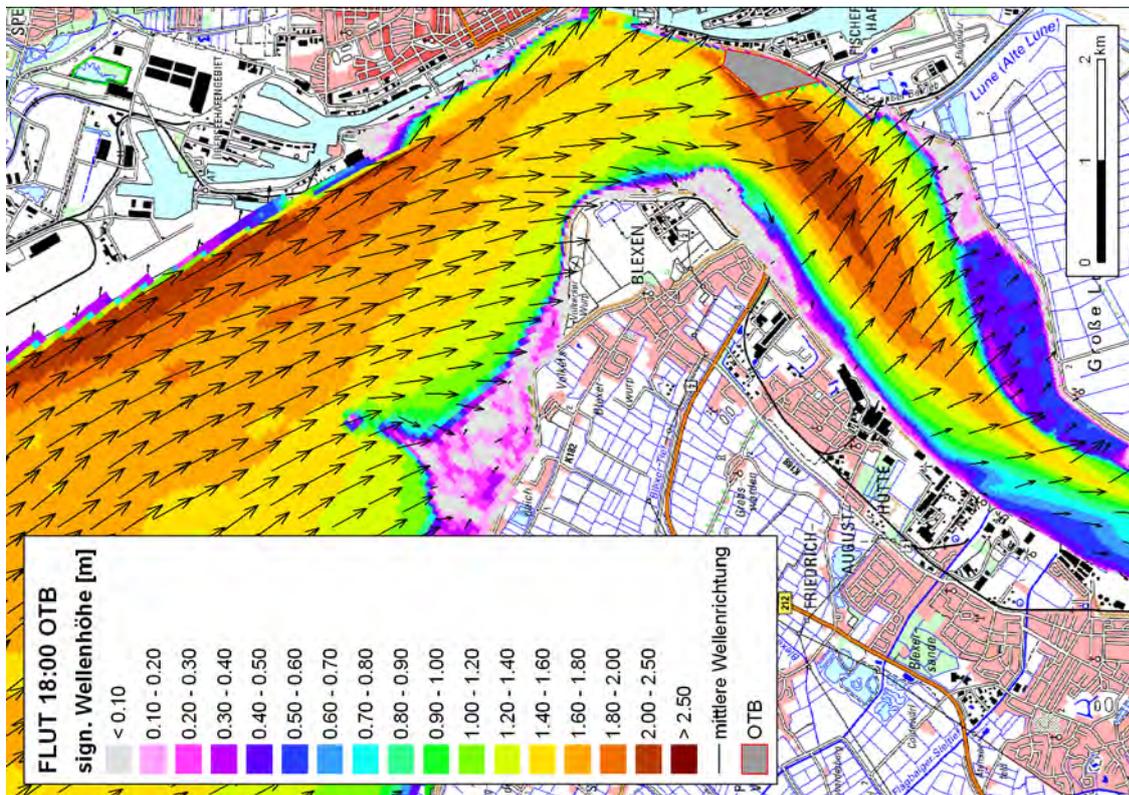


Bild 45: Signifikante Wellenhöhen bei Flutstrom (Ausbau)

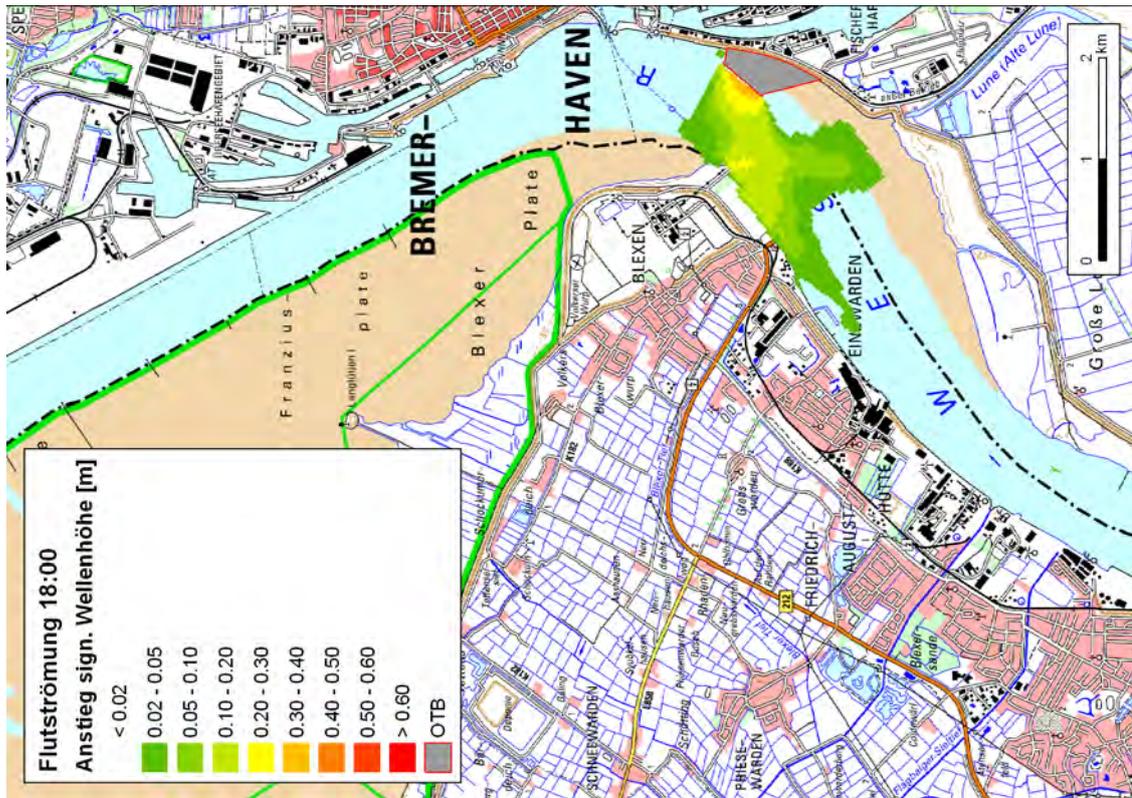


Bild 46: Vorhabensbedingte Änderungen der signifikanten Wellenhöhen bei Flutstrom

Bild 44 bis Bild 46:

Signifikante Wellenhöhen und vorhabensbedingte Änderungen bei der synthetischen Sturmflut

Flutstrom
 („3.12.99 18:00“)

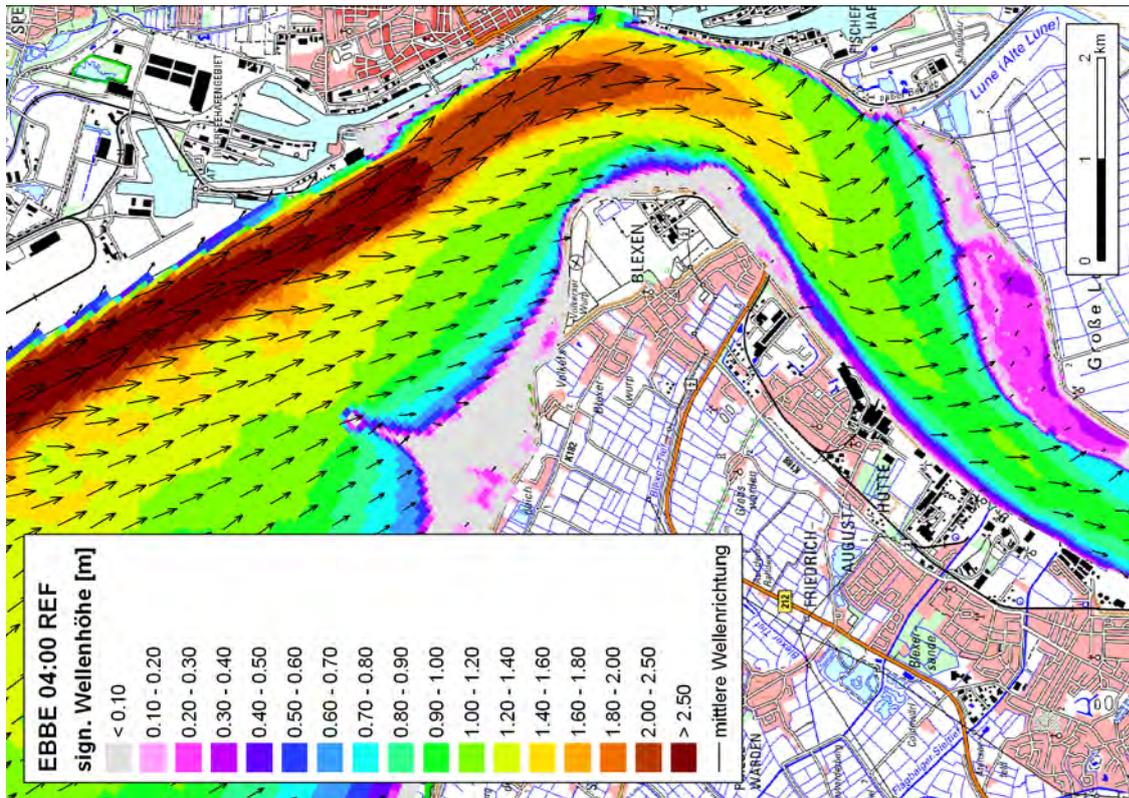


Bild 47: Signifikante Wellenhöhen bei Ebbestrom (Referenz)

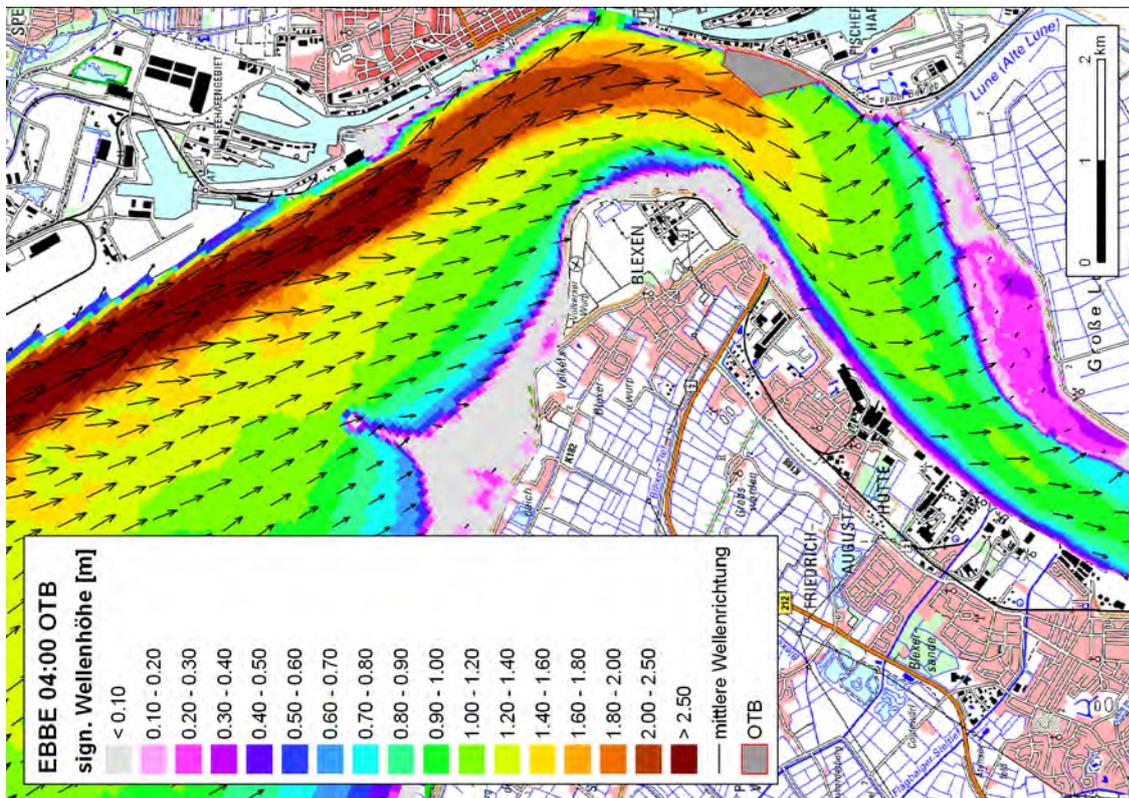


Bild 48: Signifikante Wellenhöhen bei Ebbestrom (Ausbau)

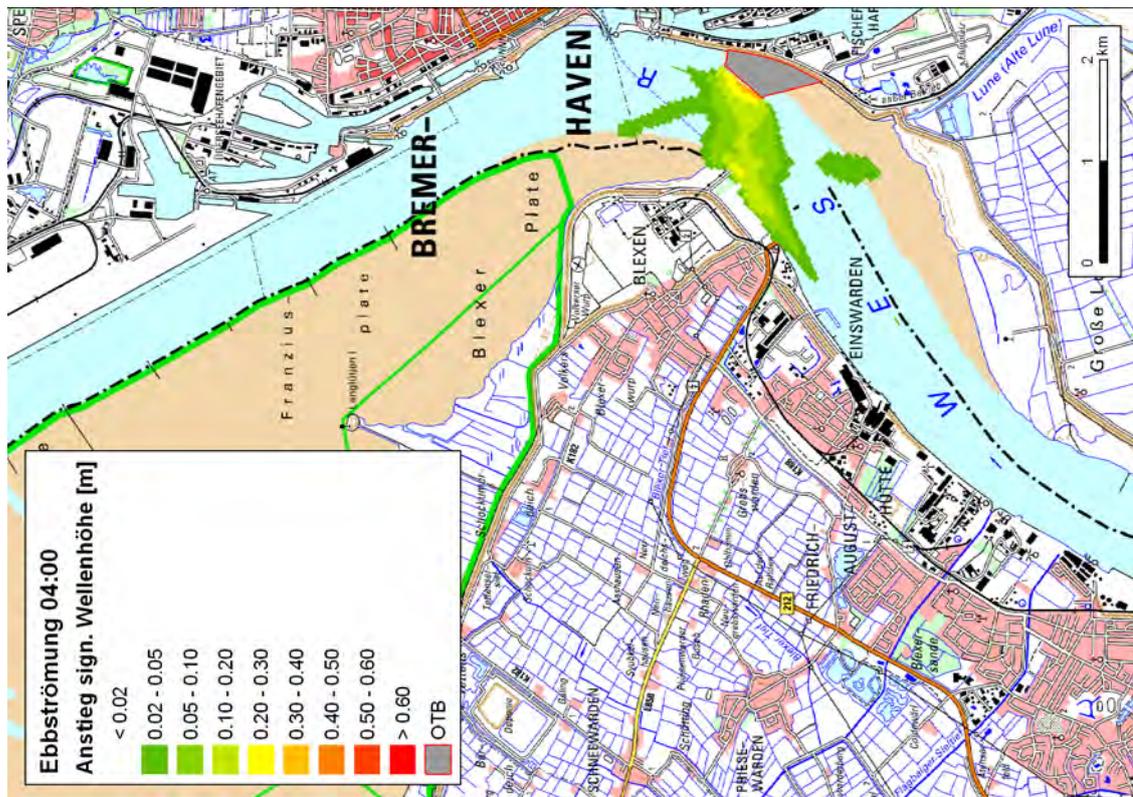


Bild 49: Vorhabensbedingte Änderungen der signifikanten Wellenhöhen bei Ebbestrom

Bild 47 bis Bild 49:

**Signifikante Wellenhöhen und vorhabensbedingte Änderungen
 bei der synthetischen Sturmflut**

Ebbestrom
 („4.1.99 04:00“)

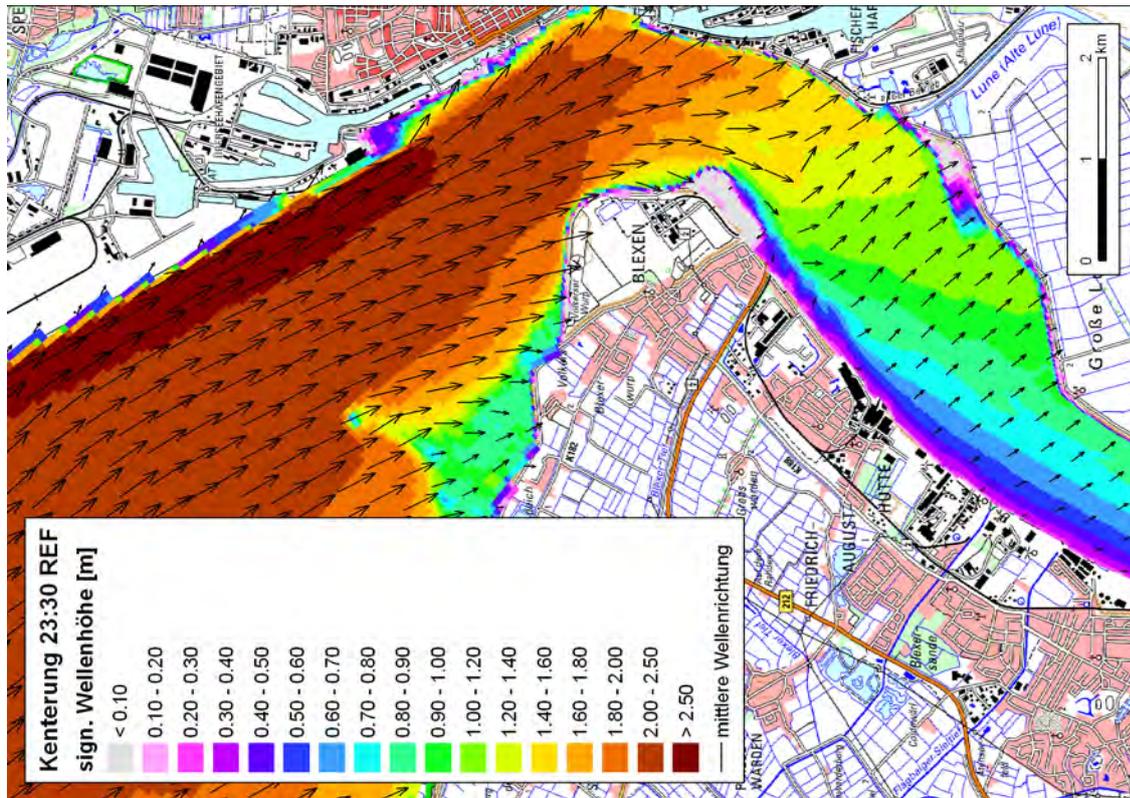


Bild 50: Signifikante Wellenhöhen bei Flutkenterung (Referenz)

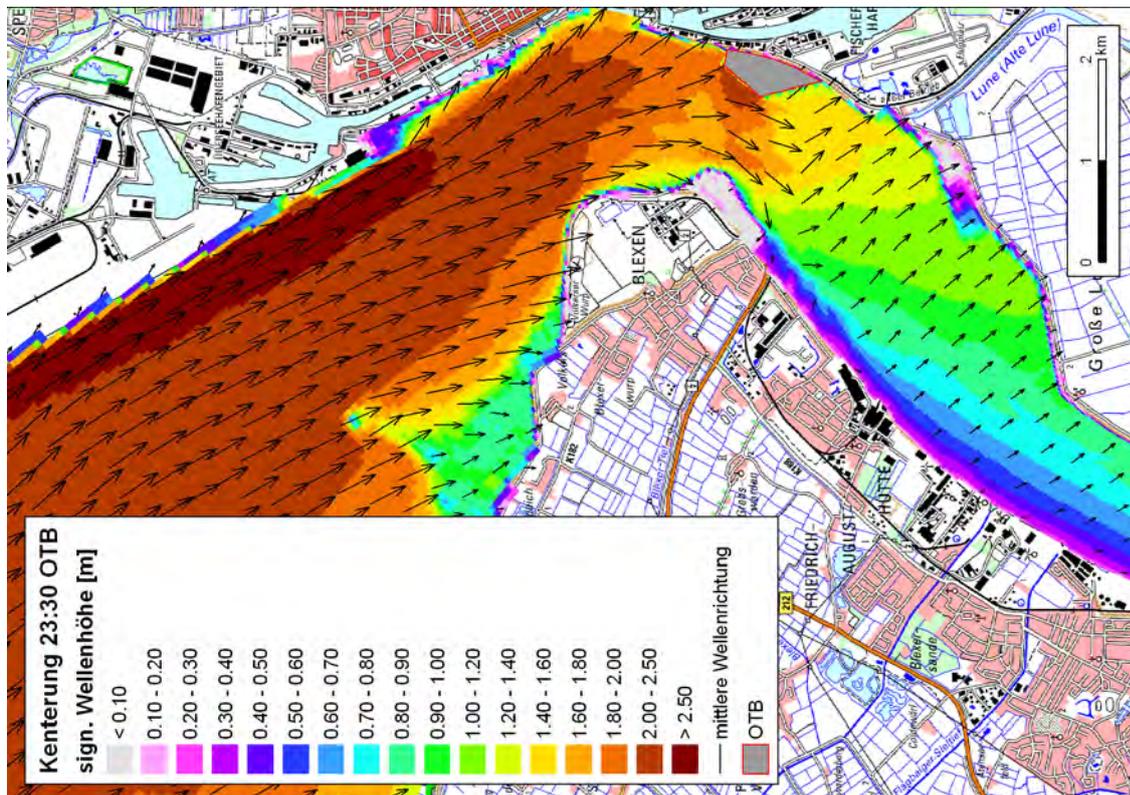


Bild 51: Signifikante Wellenhöhen bei Flutkenterung (Ausbau)

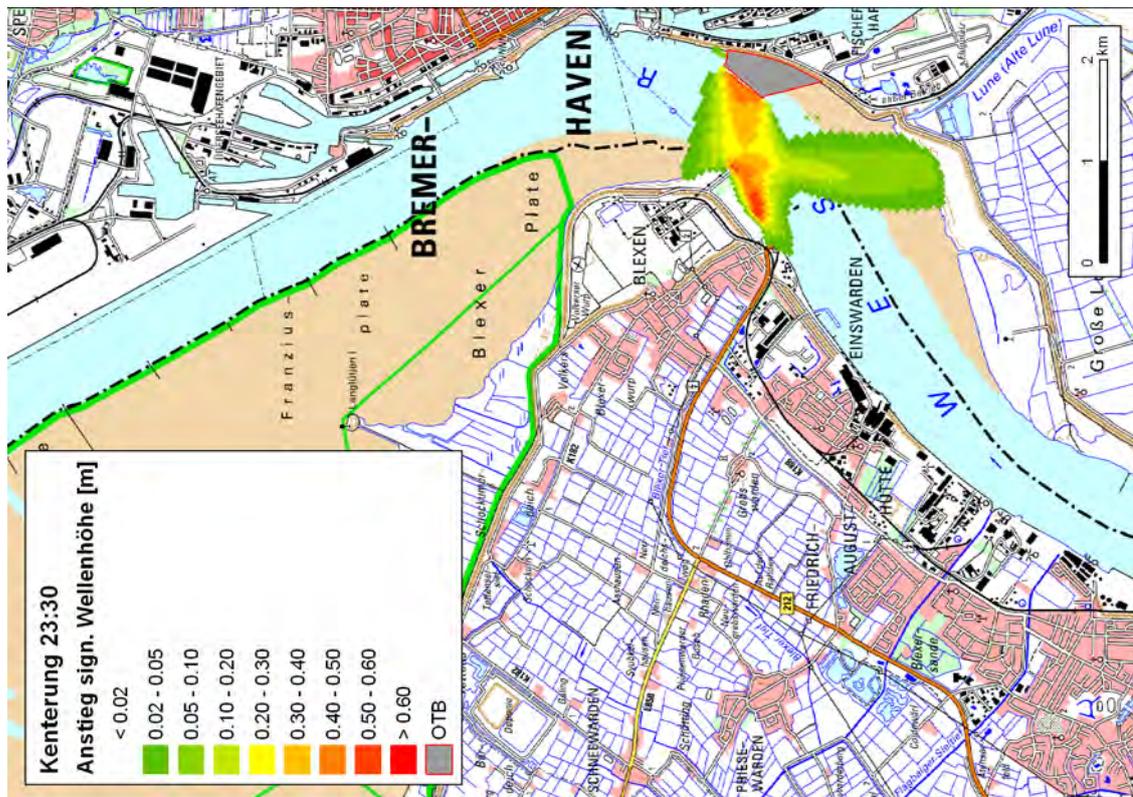


Bild 52: Vorhabensbedingte Änderungen der signifikanten Wellenhöhen bei Flutkenterung

Bild 50 bis Bild 52:

Signifikante Wellenhöhen und vorhabensbedingte Änderungen bei der synthetischen Sturmflut

Flutstromkenterung
 („3.12.99 23:30“)

8.4 Folgerungen

Wegen der Lage am Ende des von der Außenweser gebildeten Trichters können am Offshore-Terminal unter ungünstigen meteorologischen Bedingungen große Wellenhöhen auftreten. In Folge der Seegangsreflektion an der Kaje werden diese Wellenhöhen im Bereich des Terminals verstärkt.

Im Rahmen des vorliegenden Gutachtens wurde der Sturmflutseegang für ein konstruiertes, sehr ungünstiges Sturmflutszenario betrachtet. Auf dieser Grundlage können vorbehaltlich eingehenderer Untersuchungen⁶ auf der sicheren Seite liegend folgende Annahmen über die vorhabensbedingten Zunahmen der signifikanten Wellenhöhen getroffen werden:

- Im ungünstigsten Fall (vgl. Bild 43 / Bild 52) kommt es im Fahrwasserbereich zwischen dem OTB und dem Uferabschnitt Fähranleger – Titan-Anleger zu einem Anstieg der signifikanten Wellenhöhe bis zu 0,70 m. So hohe Anstiege erreichen zwar die betreffenden Uferdeckwerke und Anleger, aber auf Grund des Vorlandes oder der Entfernung nicht die Deiche.
- In unmittelbarer Deichnähe ist an beiden Seiten der Weser mit einem Anstieg von bis zu 0,05 m zu rechnen bzw. bis zu 0,30 m an der nördlichen Anschlussstelle des Terminals an den Seedeich (Bild 53).
- Auf der sicheren Seite liegend ist der Zuschlag von 0,05 m für folgende Bereiche zu berücksichtigen (Bild 53):
 - für die Deichlinie am linken Weserufer etwa vom Turm bei Weser-km 65,5 bis zum Anleger der Friedrich-August-Hütte bei Weser-km 60,5
 - für den rund 2,5 km langen Deichabschnitt südwestlich des OTB und des Lunesiels (rechtes Ufer von Weser-km 61,5 bis 64,0)
- Die Zunahme des Seegangs am Seedeich zwischen rechtem Weserufer und Fischereihafen ist auf die Reflektionswirkung der geböschten Nordflanke des OTB zurückzuführen. Dies betrifft den rund 300 m langen Abschnitt unmittelbar nördlich des Anschlusspunktes. Zu erwarten sind zusätzliche 0,02 bis 0,3 m (nach Norden hin abnehmend, Bild 53).

⁶ Prognosen auf Grund detaillierterer Untersuchungen würden möglicherweise weniger ungünstige Szenarien und geringere Sicherheitsaufschläge erfordern; daher ist zu erwarten, dass die tatsächlichen Betroffenheiten geringer sind.

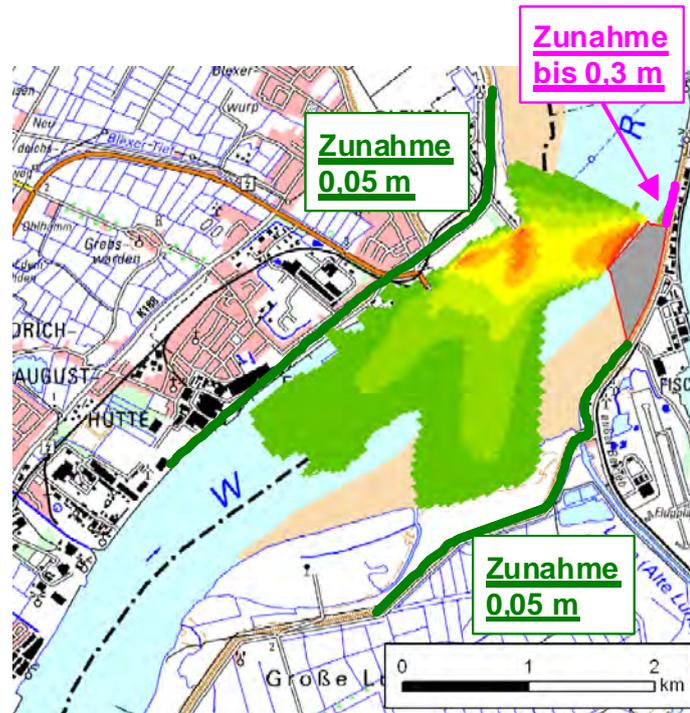


Bild 53: Prognosewerte für die Zunahme der signifikanten Wellenhöhen an den Deichlinien

9 Auswirkungen auf die Morphodynamik und den Sedimenttransport

9.1 Wirkungszusammenhänge

Um die Auswirkungen des Offshore-Terminals auf die Morphodynamik und den Sedimenttransport zu beurteilen, sind einerseits die grundsätzlichen Wirkung der maßnahmenbedingt veränderten Strömung und andererseits die heute vorliegenden morphodynamischen Randbedingungen (Aufbau der sohlennahen Bodenschichten, Sedimenttransport, Sedimentation und Erosion) zu erörtern.

Die Weser im Bereich des Blexer Bogens ist durch sehr hohe Strömungsgeschwindigkeiten, insbesondere bei Ebbe, gekennzeichnet. Jedoch ist das Sedimentmaterial, das bei Greiferproben von der Sohle entnommen werden kann, relativ fein (mittl. Korndurchmesser etwa 0,5 mm) und auch bei Bohrungen wird überwiegend Feinsand und Schluff angetroffen [2],[3]. Das Bettmaterial ist also allgemein nicht erosionsstabil, sondern kann durch die Strömungen leicht mobilisiert werden.

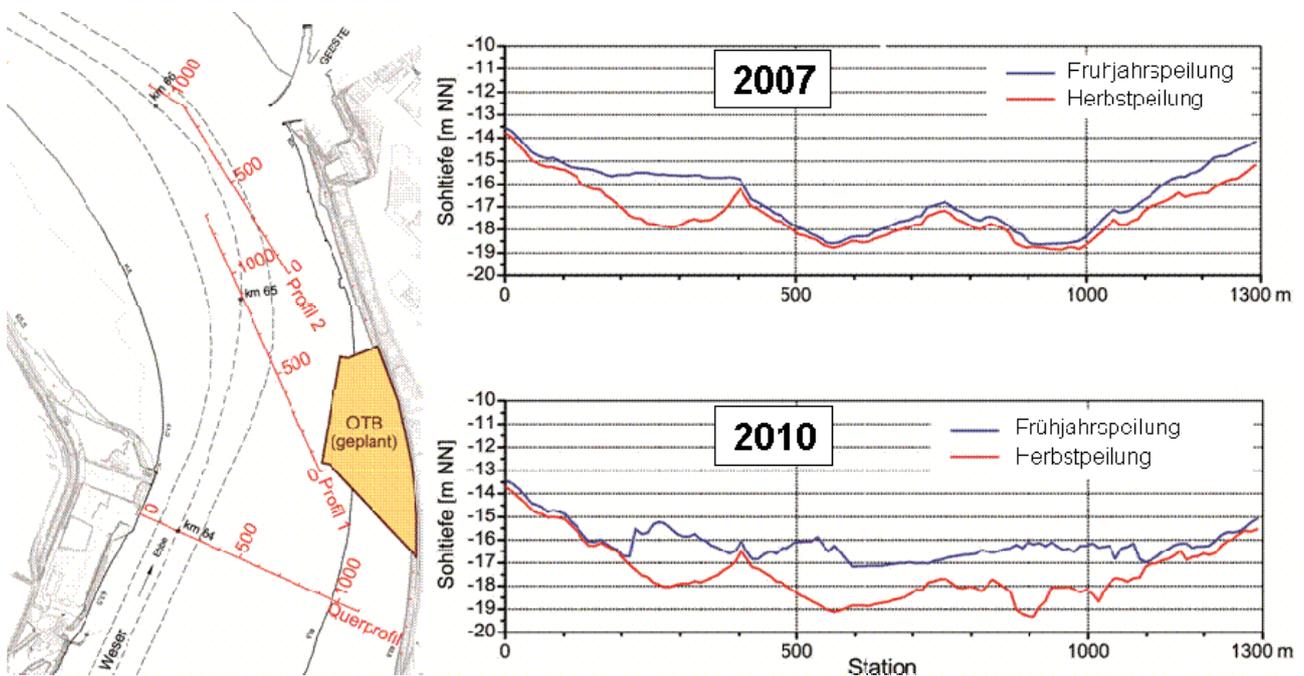


Bild 54: Sohlagen im Frühjahr und Herbst der Jahre 2007 und 2010 (Profil 1 der Auswertungen von Nasner, 2011)

Auswertungen von Peilplänen (Nasner 2011) zeigen starke Sedimentationen auf Grund von hohen Oberwasserabflüssen (Frühjahrssituation), die bei normalen und niedrigen Oberwassermengen von der Tide wieder ausgeräumt werden (Herbstsituation). Bild 54 zeigt diese Fluktuation beispielhaft für zwei ausgewählte Jahre. Dabei lassen die niedrigsten

Sohllagen (Herbstsituationen) im Laufe der untersuchten 13 Jahre von 1998 bis 2010 keinen langfristigen Erosionstrend erkennen. In der heutigen Situation ist die Weser im betrachteten Bereich demnach trotz der Mobilität ihres Bettmaterials und der starken Strömungen stabil. Dies muss darauf zurückgeführt werden, dass zwar große Sedimentmengen bei Ebbe und bei Flut bewegt werden, diese aber langfristig miteinander im Gleichgewicht stehen.

Lokal werden die beschriebenen Fluktuationen der Sohlenlage durch erosionsfestere Materialien beeinflusst. So wurden bei Bohrungen zum Teil auch fest gelagerte Sande, Klei- und Mergelschichten angetroffen. Außerdem liegen bereichsweise Hartsubstrate in Form von Bauschutt vor. Grundsätzlich wären am Außenufer (Prallhang) einer so starken Flusskrümmung wie dem Blexer Bogen durchgängig große Wassertiefen zu erwarten. Stattdessen liegt hier eine sehr ungleichmäßige, „zerklüftete“ Form des Flussbetts vor (Bild 55), die auf die o. g. örtlich begrenzten Einschlüsse von Hartsubstraten und erosionsfesteren Sedimenten zurückzuführen ist.

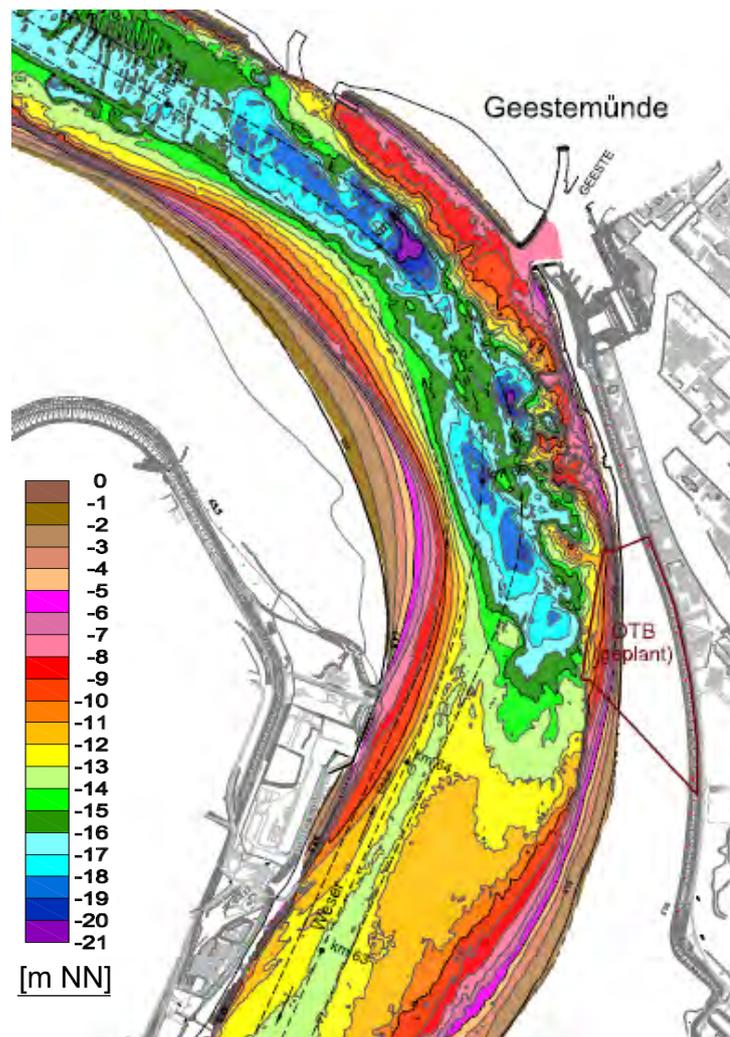


Bild 55: Unterwassertopographie im Bereich des OTB (Herbstpeilung 2010 des WSA Bremerhaven, aus: Nasner 2011)

Auf Grund der in diesem Gutachten beschriebenen Veränderungen der Strömungsdynamik sind die folgenden Auswirkungen auf die Morphodynamik und den Sedimenttransport möglich und somit näher zu erörtern:

- Es ist in Folge der Strömungsveränderungen mit einer morphologischen Reaktion der Gewässersohle im Bereich Blexen / Nordenham zu rechnen, insbesondere mit einem Erosionspotential in den Bereichen mit maßnahmenbedingt erhöhter Strömungsgeschwindigkeit.
- Grundsätzlich könnten morphologische Anpassungsprozesse im Bereich der Hauptströmung die Fließquerschnitte weiter verändern und dadurch die bisher berechneten ausbaubedingten Wirkungen beeinflussen.
- Aufgrund der Strömungsabschattung durch das Terminal ist mit einer Sedimentation im nördlichen und südlichen Bereich zwischen Hafenflanke und Ufer zu rechnen. Damit wird eine Neubildung von Wattflächen bzw. Erweiterung bestehender Wattflächen wahrscheinlich.
- Durch die Umströmung des Bauwerks erfolgt eine erhöhte Turbulenzproduktion, die die lokale Kolkbildung verstärken kann.

Das OTB ist zwar im Verhältnis zur Flussbreite sehr groß, aber der größte Teil der Terminalfläche wird im Bereich von Sohlagen über NHN errichtet (weiße Flächen in Bild 55), die nicht sehr intensiv durchströmt werden (vgl. Abschn. 5). Es ist deshalb mit mäßigen lokalen Vorhabenswirkungen zu rechnen, die das großräumige Sedimenttransportregime nicht nennenswert beeinflussen.

9.2 Untersuchungsmethodik

Nach dem Stand der Technik können numerische morphodynamische Modelle die Reaktion der Flusssohle auf Strömungen und auf veränderte Strömungsbedingungen mit Einschränkungen wiedergeben. Im vorliegenden Falle ist es z. Zt. nicht möglich, das Verhalten der Sohle im Modell exakt nachzubilden, u. a. weil das Sedimentgleichgewicht durch kleine Differenzen großer Flut- und Ebbtransportmengen bestimmt wird. Die in der Wissenschaft vorhandenen Modellansätze für die Beschreibung des Erosions- und Bewegungsverhaltens der Sedimente führen dazu, dass sich bereits für den Referenzzustand – im Gegensatz zur Natur - eine unbegrenzte Erosion der Sohle ergibt. Die Simulation musste deshalb mit einem geeigneten „Tracermaterial“ (Sedimentbelegung der Sohle mit Korndurchmessern von 1 – 2 mm, also mit größerem Material als in der Natur) erfolgen. Diese Vorgehensweise war zulässig, weil davon ausgegangen werden konnte, dass sich das Erosionsverhalten der Sohle

nicht grundsätzlich ändert. Hierzu wurde beim Institut für Wasserbau, Bremen, eine eingehende Analyse der Sohlenstabilität des Blexer Bogens im Ist-Zustand durchgeführt (Nasner, 2011).

Trotz der Einschränkungen sollte die morphodynamische Modellierung als Hilfsmittel zur Prognose der Vorhabenswirkungen angewendet werden, um die Differenz der Simulation mit und ohne das Bauvorhaben analysieren zu können. Die Ergebnisse sind als „Indikator“ zu verstehen und bedürfen der fachwissenschaftlichen Interpretation und Bewertung, die nicht allein auf morphodynamischen Rechenergebnissen beruht, sondern zu einem wesentlichen Teil

- auf den Resultaten hydrodynamischer Simulationen (Strömungsgeschwindigkeiten, Sohlschubspannungen und deren vorhabensbedingte Änderungen) und
- auf Naturbeobachtungen und –analysen.

Da die Simulationsergebnisse nur als Indikator dienen können („qualitative“ Wirkungen), mussten zur Abschätzung der quantitativen Wirkungen andere Kriterien herangezogen werden. Wiederum unter der Voraussetzung, dass sich das Erosionsverhalten der Sohle nicht grundsätzlich ändert, wird der maßnahmenbedingte Anstieg des Erosionspotentials (durch erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten) dann verschwinden, wenn nach einer entsprechenden Eintiefung der Sohle das Geschwindigkeitsniveau des Referenzzustands wieder erreicht wird oder, genauer, die Sohlschubspannungen dadurch wieder auf das alte Niveau sinken (Abschnitt 9.4). Mit diesen Annahmen konnte ein „langfristiger morphologischer Systemzustand“ konstruiert werden (Abschnitt 9.5).

Um die hydro- und morphodynamischen Bedingungen im Blexer Bogen naturähnlich wiederzugeben und großräumige Änderungen ausschließen zu können, wurden die Simulationen nicht mit einem (kleinräumigen) Bauwerksmodell, sondern mit einem (großräumigen) Ästuarmodell durchgeführt. Die o. g. zusätzliche bauwerksbezogene Turbulenzproduktion wurde darin nicht aufgelöst; sie muss bei der Interpretation der Ergebnisse (Bildung von Bauwerkskolken) und der Bauausführung (Sohlensicherung) berücksichtigt werden.

Auch wenn die genannten Unwägbarkeiten bei der Prognose der Vorhabenswirkungen so weit wie möglich durch die beschriebene Vorgehensweise ergründet bzw. reduziert wurden, bleibt dennoch festzuhalten, dass morphodynamische Prognosen nach dem Stand der Technik erheblich weniger belastbar sind als die Prognose hydrodynamischer Auswirkungen.

9.3 Vorhabensbedingte Änderungen der Sohlschubspannungen

Vorhabensbedingt erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten (vgl. Abschn. 5) führen zu erhöhten Sohlschubspannungen. Dieser Parameter spiegelt unmittelbar die potentiell erosionswirksamen Kräfte an der Gewässersohle wider. Er wird hier in Form der effektiven tidephasenintegrierten Sohlschubspannung dargestellt (über die Zeit integrierte effektive Sohlschubspannung, wobei die Integration getrennt jeweils über die Flutstromdauer und über die Ebbestromdauer erfolgt).

Bild 56 zeigt für den Referenzzustand die integrierte Sohlschubspannung des Flutstroms im Mittel des Analysezeitraumes. Hohe Werte konzentrieren sich auf den Fahrrinnenbereich. Stromabwärts von Blexen sind die Werte höher als stromaufwärts. Das Bild entspricht der Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten (vgl. Bild 8), wobei die Unterschiede durch den nichtlinearen Zusammenhang von Strömungsgeschwindigkeit und Schubspannung gespreizt werden.

Bild 57 liefert die entsprechende Darstellung für den Ausbauzustand. Die Unterschiede zu Bild 56 sind trotz der erwähnten Spreizung nicht augenfällig, die morphodynamischen Systemeigenschaften werden demnach nicht grundsätzlich verändert. Erst durch die Darstellung der Differenzen, Bild 58, wird der lokale Effekt der Schubspannungserhöhung im Kontraktionsbereich und –senkung im Abschattungsbereich deutlich (analog zur Änderung der Flutstromgeschwindigkeiten, vgl. Bild 10).

In den folgenden drei Bildern sind die entsprechenden Auswertungen für den Ebbestrom dargestellt: Referenzzustand (Bild 59), Ausbauzustand (Bild 60) und Differenz (Bild 61). Wie schon für die Ebbestromgeschwindigkeiten (vgl. Bild 8 bis Bild 10) gezeigt, sind die vorhabensbedingten Änderungen hier größer als bei Flutstrom. Die ungleichmäßige Form der Gewässersohle bei Bremerhaven (vgl. Bild 55) macht sich durch eine inhomogene Schubspannungsverteilung (fleckige Isofarbflächendarstellung) bemerkbar.

Die Differenzendarstellungen der Schubspannungen (Bild 58 und Bild 61) zeigen lokale vorhabensbedingte Veränderungen. Dabei sind Bereiche mit erhöhtem Erosionspotential und Bereiche mit erhöhtem Sedimentationspotential (in Folge der Strömungszunahmen und -verlagerungen, vgl. Abschn. 5) zu unterscheiden. In welchem Maße sich aus diesen Potentialen morphologische Veränderungen ergeben, bedarf weitergehender Betrachtungen (Abschn. 9.4 ff).

Global ergibt sich vorhabensbedingt kein erhöhtes Erosions- oder Sedimentationspotential.

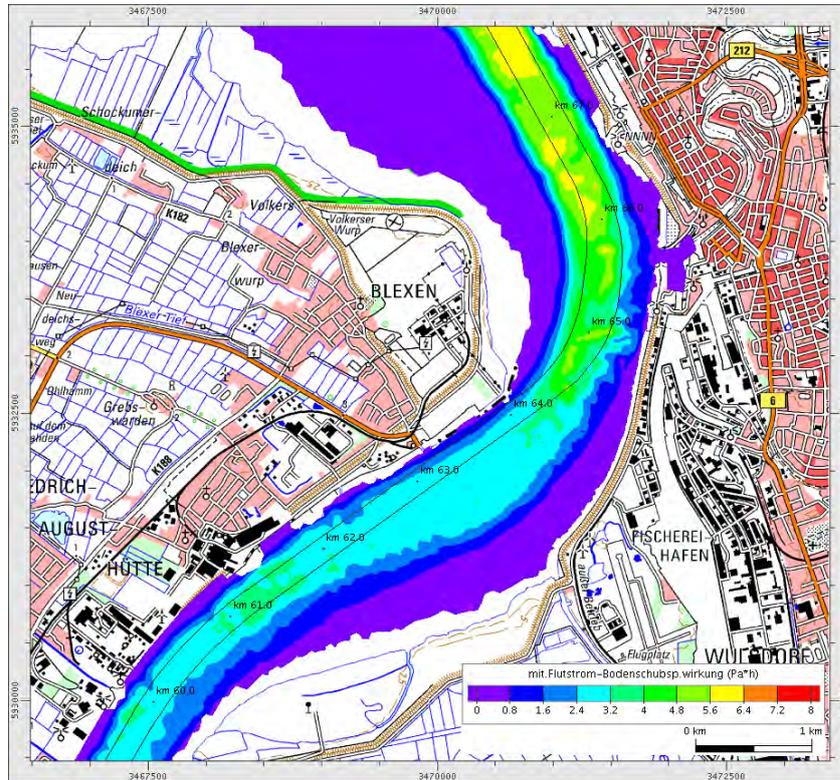


Bild 56: Mittlere integrierte Sohlschubspannung bei Flutstrom (Referenzzustand)

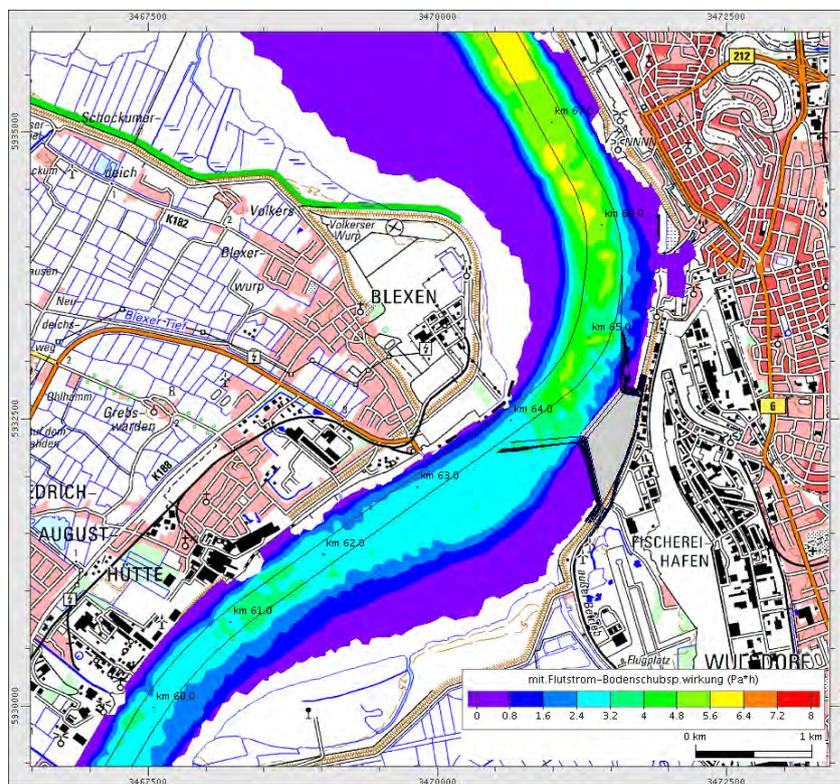


Bild 57: Mittlere integrierte Sohlschubspannung bei Flutstrom (Ausbauzustand)

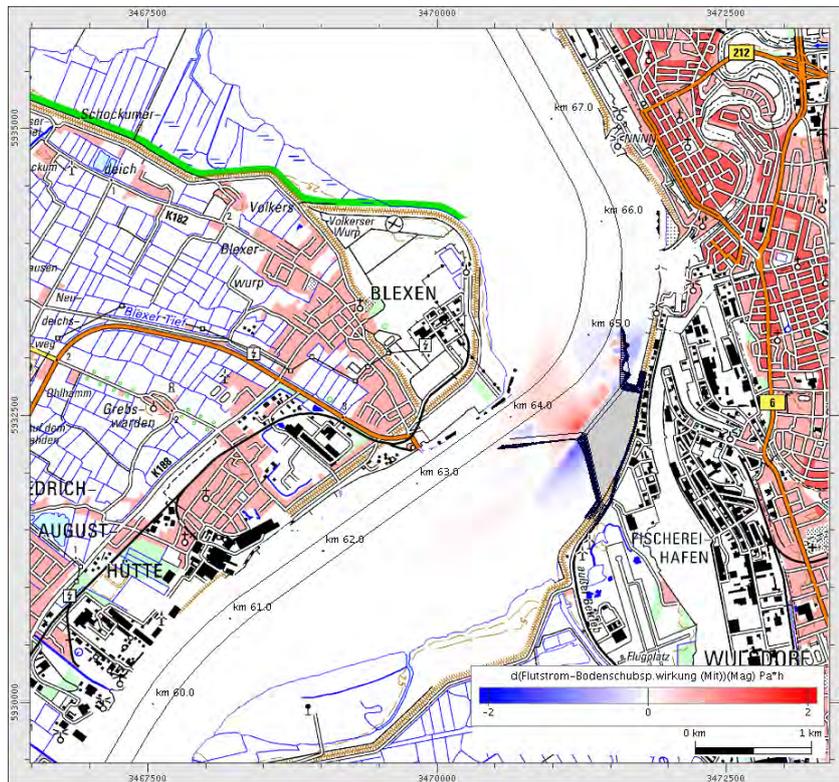


Bild 58: Vorhabensbedingte Änderungen der mittleren integrierte Sohlschubspannung bei Flutstrom (Ausbauzustand gegenüber dem Referenzzustand)

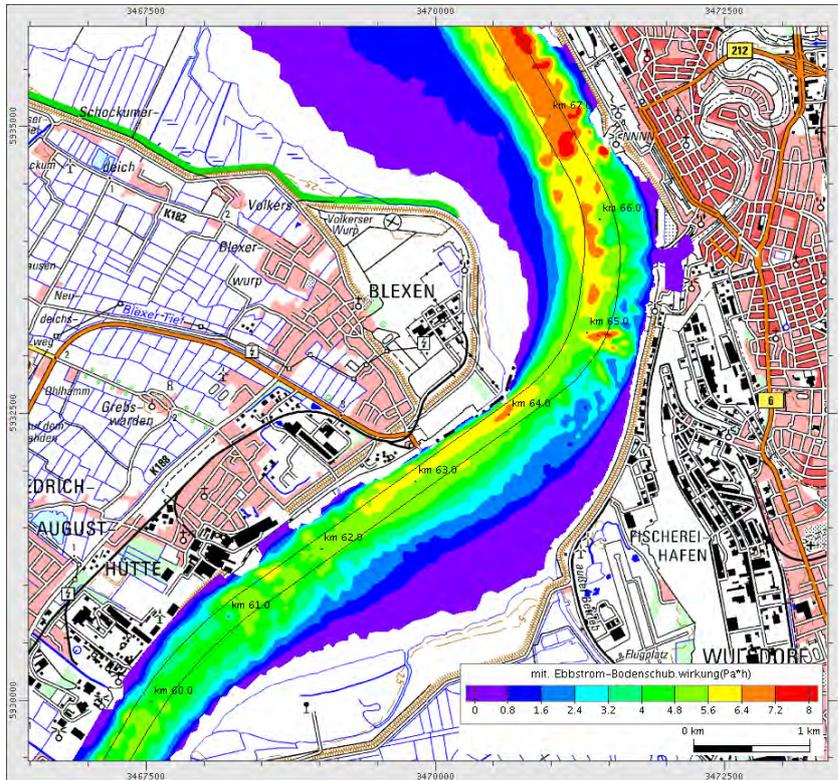


Bild 59: Mittlere integrierte Sohlschubspannung bei Ebbestrom (Referenzzustand)

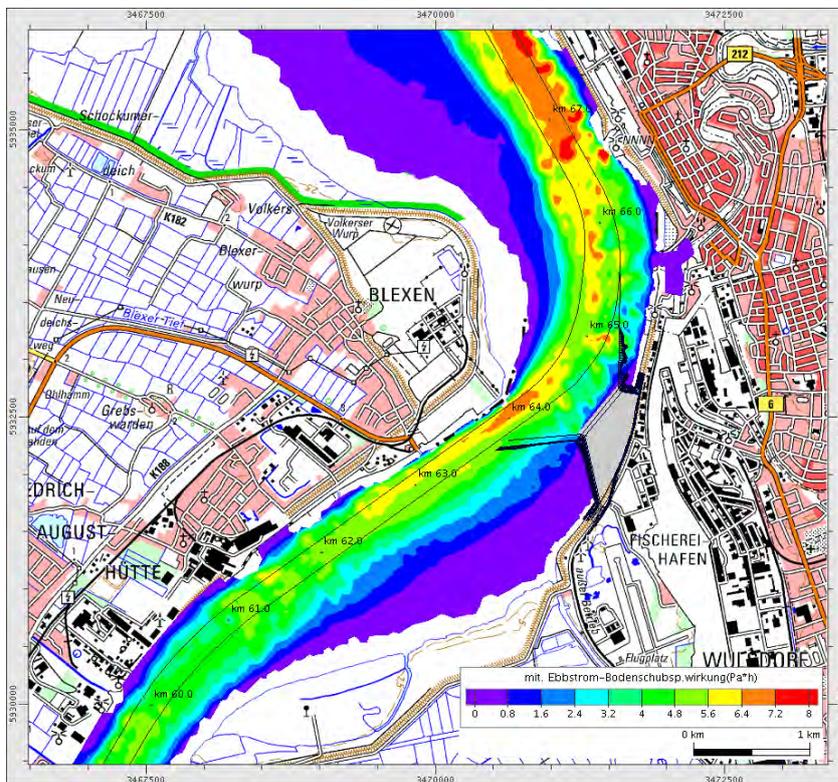


Bild 60: Mittlere integrierte Sohlschubspannung bei Ebbestrom (Ausbauzustand)

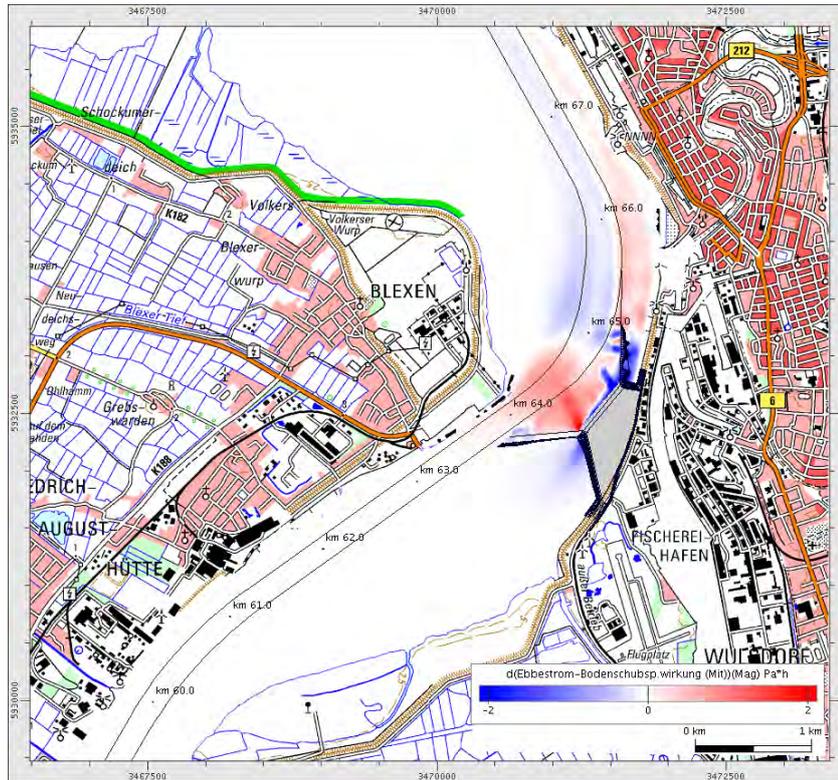


Bild 61: Vorhabensbedingte Änderungen der mittleren integrierte Sohlschubspannung bei Ebbestrom (Ausbauzustand gegenüber dem Referenzzustand)

9.4 Vorhabensbedingte Änderungen der Morphodynamik

Von Nasner (2011) wird ausgeführt, dass die Gewässersohle im gegenwärtigen Zustand „stabil“ ist. Sie unterliegt zwar jahreszeitlichen Schwankungen, weil in Folge der Frühjahrs-hochwasser Sedimentationen eintreten, die im Laufe des Sommers wieder ausgeräumt werden. Die jeweils im Herbst erreichten tiefsten Sohllagen zeigen jedoch keine langfristige Erosionstendenz.

Die Sedimente werden über den Sommer bei niedrigen Oberwasserzuflüssen durch die Tideströmungen ausgeräumt. Damit können die gem. Abschn. 4.2.2 simulierten Verhältnisse (Bild 4, Spring-Nipp-Zyklus mit mittleren Abflüssen) als prägend für die tiefsten Sohllagen angenommen werden und deren vorhabensbedingte Änderungen als maßgebend für die morphologische Reaktion auf das Vorhaben. Die Strömungen und deren vorhabensbedingte Änderungen sind in Abschn. 5.3 dokumentiert.

In der Fahrrinne ändern sich die mittleren tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten (Abschn. 5.3) um bis zu 0,05 m/s bei einem Ausgangsniveau von rd. 0,60 m/s und somit in

einer Größenordnung von 10%. Hinsichtlich der maximalen Geschwindigkeiten beträgt die maximale Änderung 0,10 m/s bei 1,20 m/s. Auch hieraus ergibt sich eine Größenordnung von 10%. Die mittlere Wassertiefe liegt hier bei 14 bis 16 m, die Kolkiefen bei bis zu 20 m (vgl. Bild 55). Da hier davon ausgegangen werden kann, dass sich das Erosionsverhalten nicht ändert (Nasner 2011), wird sich die Wassertiefe in diesem Bereich der Fahrrinne in der Größenordnung von 10% (ca. 1,5 m) vergrößern, bis das zuvor im Referenzzustand vorhandene Geschwindigkeitsniveau näherungsweise wieder erreicht ist. Der vor dem Terminal liegende Kolk wird sich somit entsprechend dem Maß der Geschwindigkeitsänderung in Richtung Südwesten ausdehnen. Diese Ausdehnung wird durch Furtbildung im Wendepunkt der beiden Weserkrümmungen begrenzt, wo die Solltiefen der Fahrrinne nur durch Baggerungen erhalten werden können. Am linken Weserufer reicht dieser Effekt bis in den Bereich des Titananlegers. Die zusätzliche Kolkbildung wird deshalb die Höhe des Anlegers der Titan-Werke nicht erreichen.

Die großen Kolke vor dem OTB dehnen sich bereits heute weit zum gegenüberliegenden Ufer aus, so dass hier große Wassertiefen und steile Böschungsneigungen vorliegen (Bild 55). Da in diesem Bereich eine vorhabensbedingte Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten eintritt (Bild 19) ist in diesem Bereich ein weiterer Abtrag der Böschung nicht auszuschließen.

Im rechten Teil des Gewässers (Zufahrtsbereich des Terminals) ist vor allem im Bereich der südwestlichen, weit vorspringenden Ecke des Terminals eine Anpassung der Sohle zu erwarten, die ggf. durch einen Kolkschutz auf das Niveau der Liegewanne begrenzt werden muss (vgl. z. B. Bild 19). Im übrigen Zufahrtsbereich wurden Strömungszunahmen in ähnlicher Größenordnung wie in der Fahrrinne bei ähnlichen Wassertiefen ermittelt, so dass dort morphologische Anpassungsprozesse in der gleichen Größenordnung zu erwarten sind.

In den Abschattungsbereichen des Terminals wird es zu Auflandungen kommen. Davon betroffen ist der Bereich zwischen Neuem Lunesiel und südlicher Terminalflanke so wie der etwa 500 m lange Uferabschnitt im Anschluss an die nördliche Terminalflanke bis zum Niveau des MThw. Hier ist mit einem Aufwachsen der Sohle, der Neubildung von Wattflächen und einer entsprechenden Verschwenkung der Höhenlinien zu rechnen.

Die Simulation mit Tracermaterial bestätigt die lokal begrenzte Erosion in der Fahrrinne und die starke Kolkbildung in der Nähe der südwestlichen Terminal-Ecke als herausragende Merkmale der morphodynamischen Vorhabenswirkungen (Bild 62). Die dargestellten Sedimentationstendenzen betreffen solche Stellen, die auch im Ausgangszustand deutlich tiefer sind als ihre Umgebung. Dagegen wird die erwartete Sedimentation in den Abschattungszonen nicht angezeigt. Dies liegt zum Einen daran, dass das verwendete Tracermaterial auf die Simulation der Erosionswirkungen ausgelegt ist und nur langsam in die schwach durchströmten Randbereiche gelangt. Zum Anderen erfolgen die stärksten Sedimentationen

im Blexer Bogen über den Winter, wenn hohe Oberwasserabflüsse auftreten und durch See-gang große Sedimentmengen mobilisiert werden (vgl. Bild 54).

Da die morphologischen Wirkungen mit Hilfe der vorliegenden Kenntnisse und Simulationsergebnisse nur abgeschätzt werden können, wird empfohlen, die Sohlage jährlich im Herbst auf Veränderungen zu prüfen, weil gegen Ende der Periode geringer Oberwasserzuflüsse die tiefsten Sohlagen zu erwarten sind und die tatsächliche Entwicklung der Gewässersohle kontrolliert werden kann. Falls wider Erwarten durch das Vorhaben mittelbar oder unmittelbar relativ harte, die Erosion begrenzende Schichten entfernt werden, würde es lokal zu nicht prognostizierbaren Eintiefungen kommen. Dies erscheint unschädlich, soweit sich dadurch lediglich eine Glättung der Gewässersohle (und damit eine Vergleichmäßigung der Strömung) ergibt. Andernfalls kann durch Sohlsicherungsmaßnahmen (Kies- und Steinschüttungen) entgegengewirkt werden.

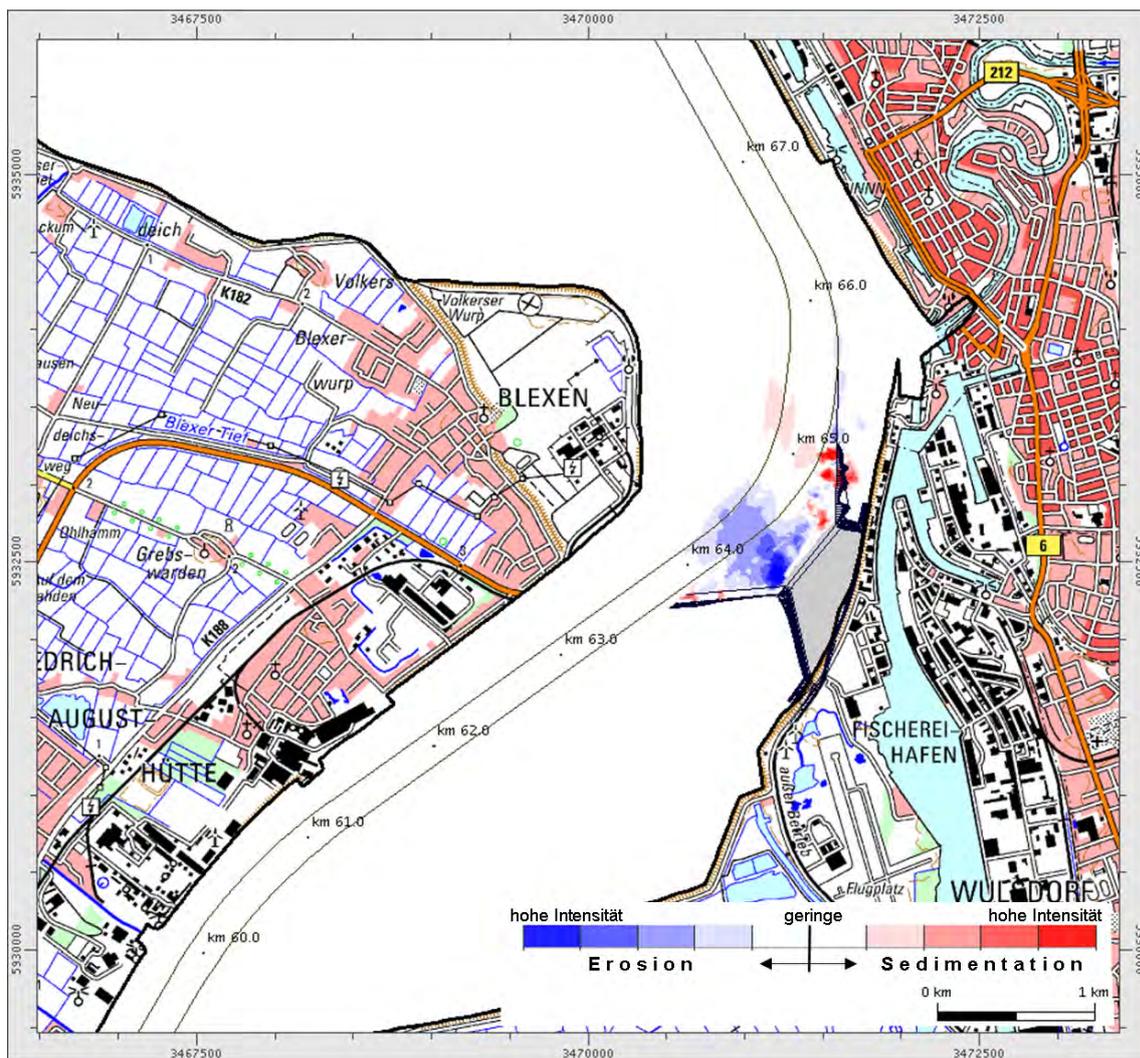


Bild 62: Vorhabensbedingte morphologische Änderungen

9.5 Langfristiger morphologischer Systemzustand

Auf der Grundlage der untersuchten Strömungsbedingungen, der Sedimenteigenschaften im Blexer Bogen und der analysierten morphodynamischen Prozesse kann ein wahrscheinlicher Systemzustand beschrieben werden, zu dem sich der Referenzzustand durch die Wirkungen des OTB entwickeln kann, wenn die maximal zu erwartenden Erosionswirkungen berücksichtigt werden (auf der sicheren Seite liegende Prognosewerte).

Der begründet angenommene langfristige morphologische Systemzustand berücksichtigt, dass der Fahrrinnen- und Zufahrtbereich sich entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 9.4 weiter eintieft und die Abschattungsbereiche aufsedimentieren (vgl. Bild 63 und Bild 64):

- Im Fahrrinnen- und Zufahrtbereich wird sich die Gewässersohle entsprechend der Verteilung der Vorhabenswirkungen (Änderung der Strömungsgeschwindigkeiten, Ergebnisse der morphodynamischen Berechnung) um bis zu 1,5 m vertiefen.
- Auf der Blexer Seite wird die Unterwasserböschung im ungünstigsten Fall auf rd. 500 m Länge um bis zu 50 m zurückweichen.

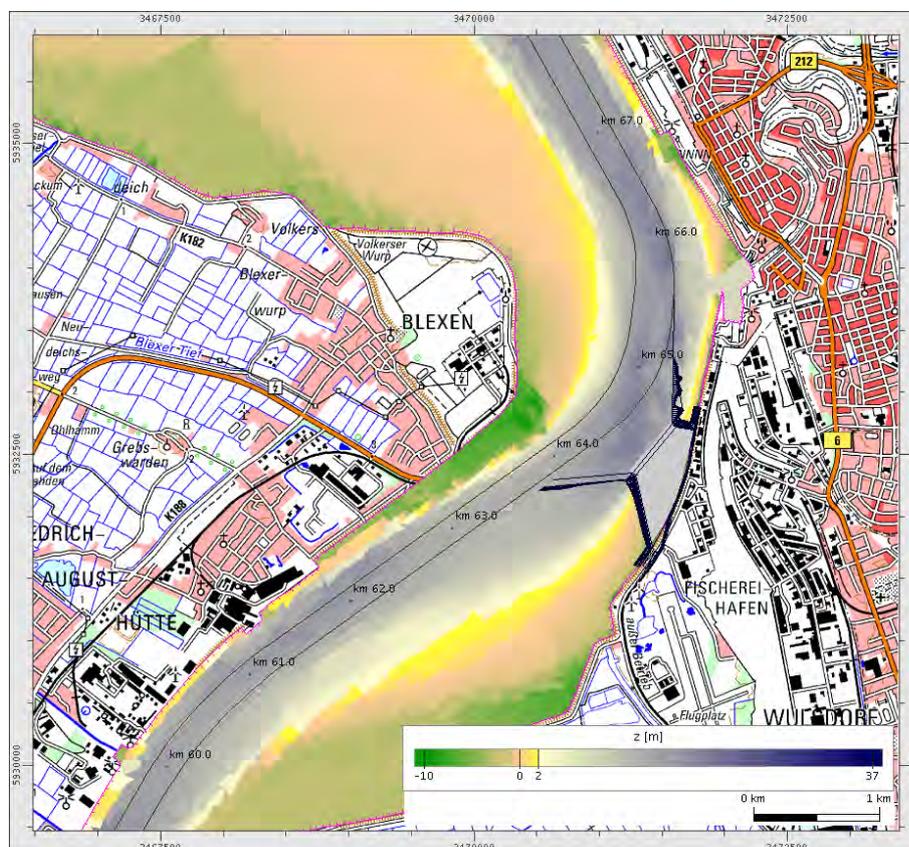


Bild 63: Angenommener langfristiger morphologischer Systemzustand

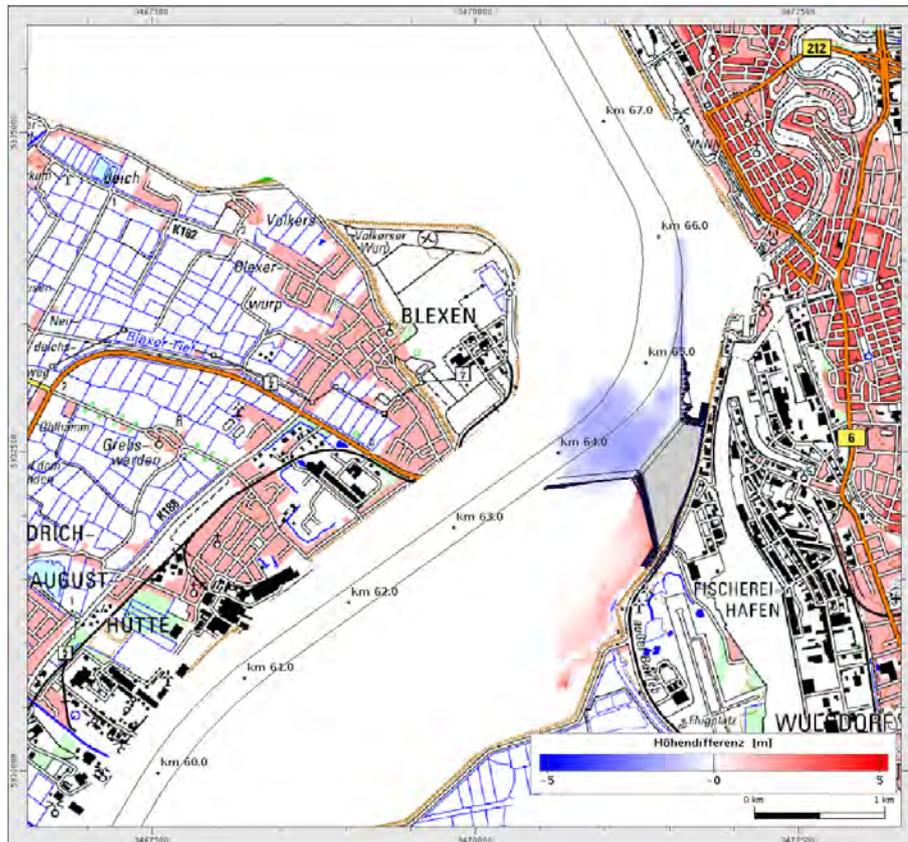


Bild 64: Höhendifferenzen des angenommenen langfristigen morphologischen Systemzustands (Bild 63) zum Ausbauzustand gem. Abschn. 4.1

- Durch die Sedimentation im südwestlichen Abschattungsbereich des Offshore-Terminals werden sich dort die Wassertiefen verringern, wobei die Tiefen- bzw. Höhenlinien sich dem Strömungsverlauf anpassen (Länge des betroffenen Bereichs etwa 1500 m, Breite 400 m).
- Durch Sedimentationen im nordwestlichen Abschattungsbereich sind relativ kleine Veränderungen zu erwarten; sie wurden deshalb in Bild 64 vernachlässigt.

9.6 Langfristige Vorhabenswirkungen

Die größten vorhabensbedingten Erosionswirkungen sind während und unmittelbar nach der Realisierung der Maßnahme zu erwarten, weil dann die Drosselwirkung des Terminals die Querschnittserweiterung durch die Vertiefung des Zufahrtbereichs überwiegt und das hydro-morphologische System zunächst gestört ist. Der morphologische Nachlauf im Bereich vorhabensbedingt erhöhter Strömungsgeschwindigkeiten wirkt diesem Effekt entgegen und mindert die Vorhabenswirkungen langfristig. Daher ist nicht zu erwarten, dass sich die

beschriebenen hydro- und morphodynamischen Veränderungen langfristig verstärken werden.

Diese Prognose wird durch die in Abschn. 9.1 beschriebene Studie zur Stabilität der Kolke im Blexer Bogen gestützt: Auf Grund seiner detaillierten Auswertung von Naturmessungen kommt Nasner (2011) zu dem Ergebnis, dass der geplante Bau des Offshore-Terminals Bremerhaven die morphodynamischen Gegebenheiten praktisch nicht beeinflussen wird.

Die vorhabensbedingten Sedimentationen im Strömungsschatten des OTB werden ebenfalls zu Anfang am intensivsten sein. Mit der sedimentationsbedingten Verringerung der Wassertiefen wird dort die Zufuhr an Sedimenten abnehmen und damit auch die Sedimentationsgeschwindigkeit.

Durch die lokale morphologische Anpassung (Erosion) der Sohle im Fahrrinnen- und Zufahrtbereich vor dem Terminal wird die vorhabensbedingte örtliche Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten (vgl. Abschnitt 5) langfristig reduziert.

Die Auswirkungen des Vorhabens auf die lokalen Salz- und Suspensionskonzentrationen (vgl. Abschnitt 6) werden hauptsächlich durch die lokale Verlagerung der Strömungen und weniger durch die o. g. Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten beeinflusst. Daher werden die lokalen Änderungen der Salz- und Suspensionskonzentrationen in der prognostizierten Größenordnung langfristig bestehen bleiben.

9.7 Unterhaltungsaufwand für den Zufahrts- und Liegewannenbereich

Der Blexer Bogen ist durch eine Sedimentationstendenz bei hohen Oberwasserabflüssen (Winter) und eine Erosionstendenz bei niedrigen Oberwasserabflüssen (Sommer) gekennzeichnet. Diese Tendenzen bleiben grundsätzlich erhalten. Da das geplante Offshore-Terminal die Strömung lokal verstärkt (mit Ausnahme der Abschattungsbereiche, vgl. Abschn. 5.3), ist hinsichtlich des voraussichtlichen Unterhaltungsbedarfs im Zufahrts- und Liegewannenbereich mit keiner Verschlechterung der grundsätzlichen Bedingungen zu rechnen.

Für weitergehende Aussagen zum voraussichtlichen Unterhaltungsbedarf können die Auswertungen der Frühjahrs- und Herbstpeilungen von Nasner (2011) herangezogen werden. Besonders starke Sedimentationen im geplanten Zufahrtbereich wurden in den Frühjahrspeilungen der Jahre 2007 und 2010 festgestellt; das Bild 54 zeigt die zugehörigen, durch den Zufahrtbereich verlaufenden Längsschnitte („Profil 1“). Die Sedimentation fand aber hauptsächlich in den Kolken statt und erreichte dort die Solltiefen nicht (Zufahrt: -13,0 mNHN,

Liegewanne: -14,1 m NHN). Nahe der geplanten Kaje (Station 0 des Profils 1), wo die Sohle höher als -14 m NHN und somit im Bereich der Solltiefe liegt, wurden Sedimentationen von einigen Dezimetern gemessen.

Für die Unterhaltung des Zufahrtsbereichs ist es also von Vorteil, dass im Bereich des OTB große Übertiefen vorhanden sind. Wo die Sohllage mit der Solltiefe übereinstimmt oder z. Zt. darüber liegt, also dicht vor dem OTB, ist jedoch im Winterhalbjahr mit betriebsbehindernden Sedimentationen in Höhe von einigen Dezimetern zu rechnen. Für die Liegewanne kommt hinzu, dass sie zum Teil tiefer als die Zufahrt liegt⁷ („Sedimentfang“) und dass die Kaje nicht optimal nach der Bathymetrie ausgerichtet ist (Ablösung der Ebbeströmung, vgl. Bild 18 f.). Daher ist auch im Sommer ein Unterhaltungsbedarf der Liegewanne nicht ganz auszuschließen. Allerdings wirkt der Verkehr der an- und ablegenden Schiffe der Sedimentation entgegen.

Eine zuverlässige Quantifizierung der erforderlichen Baggermengen ist auf Grund der jährlichen Schwankungen und der Einflüsse aus dem Betrieb nicht möglich. Die Mengen werden zwischen Null (in sedimentationsarmen Jahren) und einem Maximalwert (unter den oben beschriebenen Verhältnissen, Bild 54) schwanken. Mit der Annahme, dass Bereiche oberhalb eines Niveaus -15 m NHN um etwa 3 dm aufsedimentieren, und unter Berücksichtigung der Flächenanteile mit Tiefen nahe der Sollsohle, lässt sich für das Sedimentationsvolumen in einem ungünstigen Winterhalbjahr eine Größenordnung von 50 000 m³ bis 60 000 m³ abschätzen. Darin ist berücksichtigt, dass die Liegewanne in ihrem nordöstlichen Bereich durch eine Stufe vom Zufahrtsbereich abgegrenzt wird (Sandfangwirkung).

⁷ Dies leitet sich aus der genannten Differenz der Solltiefen ab. Da vor dem geplanten Terminal teilweise natürliche Übertiefen vorhanden sind, wird sich nur teilweise ein tatsächlicher Höhenunterschied und damit eine mögliche Sandfangwirkung ergeben.

10 Berücksichtigung weiterer Vorhaben

10.1 Zu berücksichtigende Vorhaben

Die Planfeststellungsbehörde legte im Juni 2012 den voraussichtlichen Untersuchungsrahmen für das wasserrechtliche Genehmigungsverfahren fest⁸ und bestimmte, dass die Vorhaben am linken Weserufer „Steelwind“ und „Xstrata“ in die Modellrechnungen einzubeziehen sind, soweit in den entsprechenden Planfeststellungen Auswirkungen (insbesondere auf das Tidegeschehen) nicht ausgeschlossen wurden. In jedem Fall zu berücksichtigen sind die Auswirkungen der Weseranpassung

Die Auswirkungen der Weseranpassung wurden von Anfang an in die vorliegenden Untersuchungen einbezogen, so dass sie an dieser Stelle nicht betrachtet werden müssen. Dagegen werden die Maßnahmen „Steelwind“ und „Xstrata“ im vorliegenden Kapitel 10 gesondert behandelt.

10.2 Vorhaben „Steelwind“

Die Schwerlastkaje Steelwind soll am Innenufer des Blexer Bogens in südlicher Verlängerung des vorhandenen Kronos-Anlegers errichtet werden (Arbeitsunterlage [4]). Sie befindet sich damit in einem schwach durchströmten Bereich, so dass nur geringfügige lokale Wirkungen auf die Tidebedingungen (Strömungen, Wasserstände) zu erwarten sind. Eine daraus resultierende Verstärkung der Vorhabenswirkungen des OTB auf die Strömungsgeschwindigkeiten und Wasserstände kann ausgeschlossen werden. Diesbezüglich werden sich die jeweiligen Vorhabenswirkungen – soweit überhaupt nennenswert – also lediglich addieren und nicht potenzieren.

Anderes gilt für die Seegangsverhältnisse. Wie in Abschnitt 8 beschrieben, wird das OTB den Seegang zur Blexener Seite hin reflektieren, wo durch dort vorhandene Bauwerke eine erneute Reflektion stattfindet. Diese Sekundärreflektion wird durch das Vorhaben Steelwind verstärkt, weil mit der geplanten rd. 300 m langen Kaje eine zusätzliche Reflektionsfläche geschaffen wird. Hier ist die kumulative Wirkung somit größer als die Summe der Einzelwirkungen. Durch ergänzende Simulationen im Seegangmodell wurden deshalb die Vorha-

⁸ Wasserrechtliches Planfeststellungsverfahren für den Neubau eines Offshore-Terminals in Bremerhaven: Unterrichtung über Inhalt und Umfang der voraussichtlich nach § 6 UVPG beizubringenden Unterlagen über die Umweltauswirkungen des Vorhabens, 13.06.2012

benswirkungen des OTB unter Berücksichtigung der Steelwind-Kaje ermittelt. Dazu wurden der Referenzzustand und der Ausbauzustand um die Reflektionsfläche der Steelwind-Kaje ergänzt.

Bild 65 und Bild 66 zeigen die vorhabensbedingten Änderungen des Sturmflutseegangs analog zu Abschnitt 8 (vgl. Bild 43 und Bild 52).

Wie in Bild 65 für den Zeitpunkt des Sturmflutscheitelwasserstandes und in Bild 66 für den Zeitpunkt der Flutstromkenterung dargestellt, nehmen die signifikanten Wellenhöhen durch die zusätzliche Sekundärreflektion vor dem Blexener Ufer und zur Luneplate hin weiter zu.

Ergänzend zu den Empfehlungen in Abschnitt 8.4 sollte der Zuschlag von 0,05 m auf die signifikante Wellenhöhe daher auch für den Deichabschnitt bis zum Knick bei der Radarstation Luneplate berücksichtigt werden (Bild 67).

Hinweis: Bei einer Anhebung des Bemessungswasserstandes in Bremerhaven um 25 cm (von 6,37 m NHN auf 6,62 m NHN) gelangt mehr Seegangsenergie in den Blexer Bogen, weil sie insbesondere in den flachen Bereichen weniger gedämpft wird. Dadurch nehmen auch die vorhabensbedingten Änderungen etwas zu (Bild 68). Dieser Effekt zeigt sich besonders auf dem Deichvorland der Luneplate. Die Prognosewerte (Bild 67) werden dadurch jedoch nicht verändert.

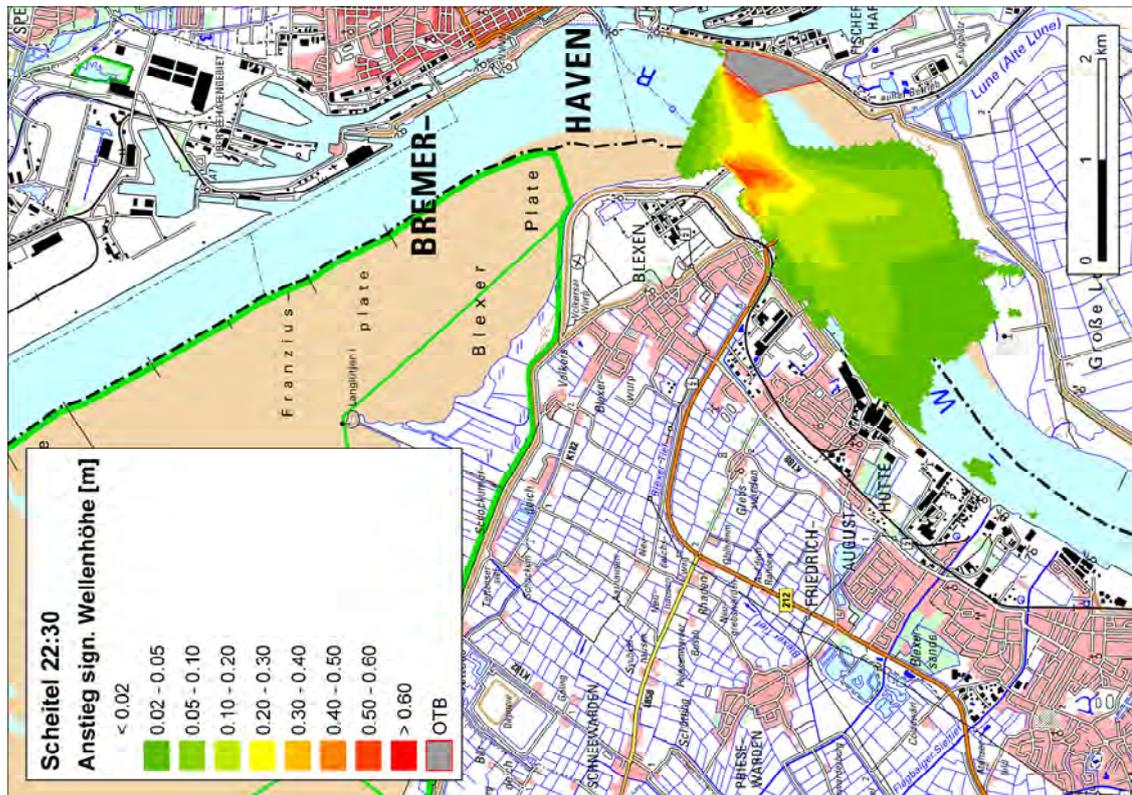


Bild 65: Vorhabensbedingte Änderungen der signifikanten Wellenhöhen beim Scheitelwasserstand, mit Steelwind-Kaje (vgl. Bild 43)

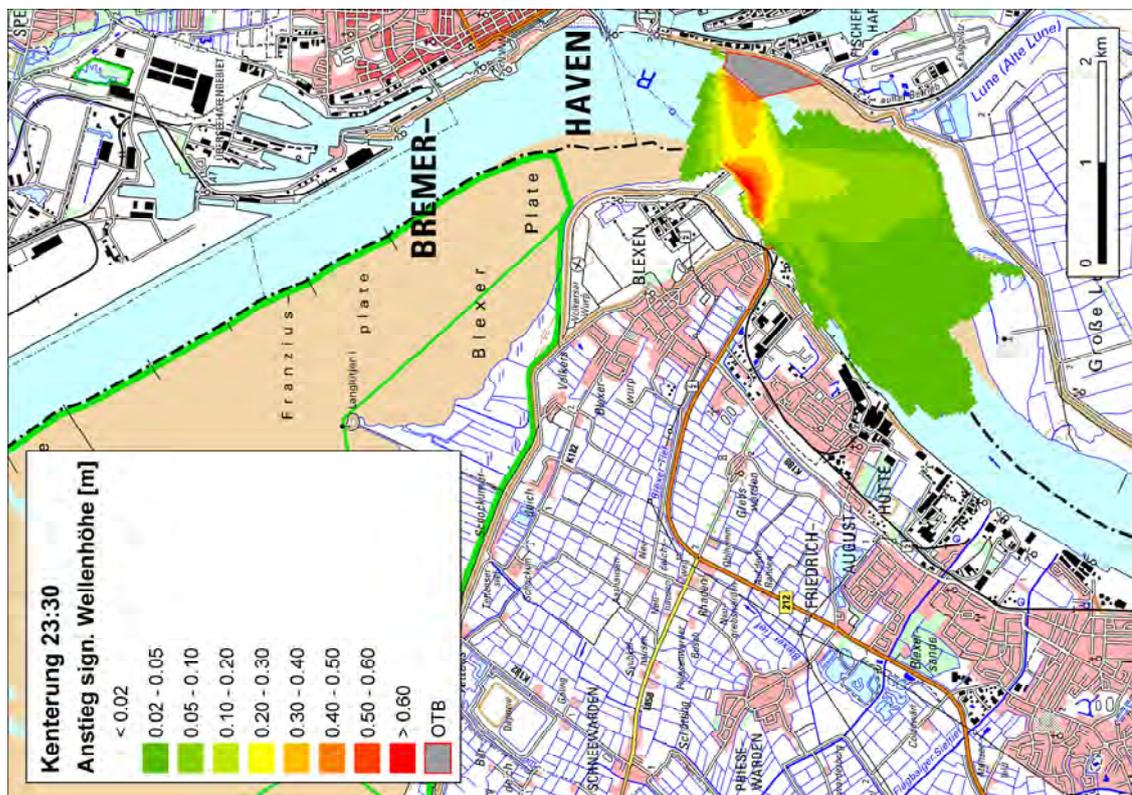


Bild 66: Vorhabensbedingte Änderungen der signifikanten Wellenhöhen bei Flutkenterung, mit Steelwind-Kaje (vgl. Bild 52)

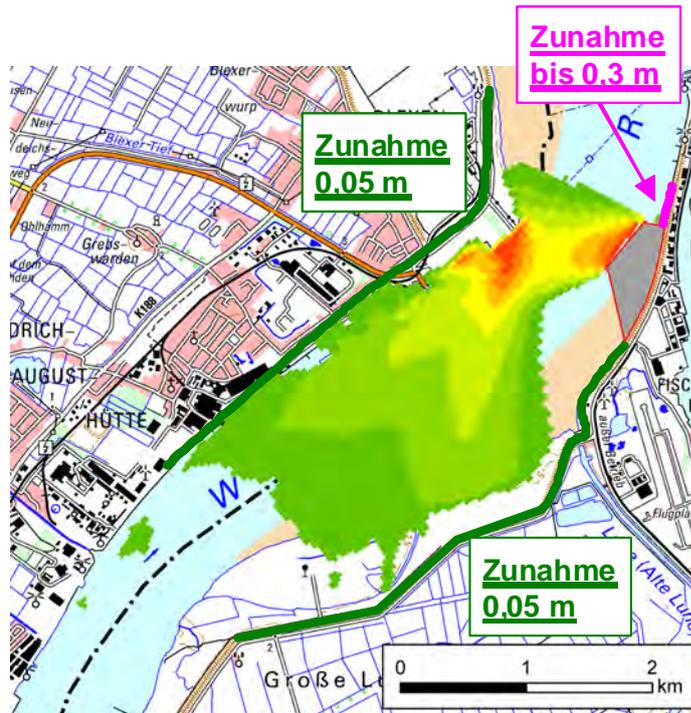


Bild 67: Prognosewerte für die Zunahme der signifikanten Wellenhöhen an den Deichlinien unter Berücksichtigung der Steelwind-Kaje (vgl. Bild 53)

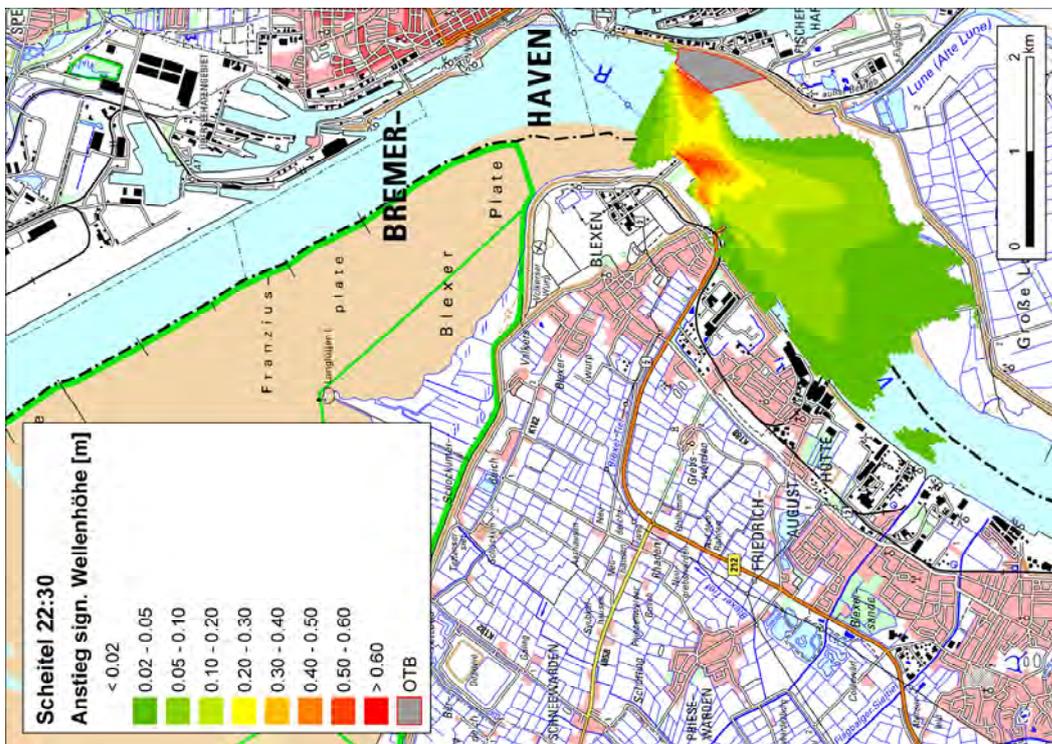


Bild 68: Vorhabensbedingte Änderungen der signifikanten Wellenhöhen beim Scheitelwasserstand, mit Steelwind-Kaje, Wasserstände um 25 cm erhöht (vgl. Bild 65)

10.3 Vorhaben „Xstrata“

Nach aktuellem Kenntnisstand handelt es sich bei dem Vorhaben Xstrata um die Erweiterung eines Dalbenliegeplatzes bei Weser-km 60,5 (linkes Ufer), durch die weder der Abflussquerschnitt der Weser nennenswert beeinträchtigt, noch zusätzliche Reflektionsflächen für Wellen geschaffen werden. Hier wird deshalb davon ausgegangen, dass das Vorhaben Xstrata zwar Auswirkungen auf die lokale Strömung (wenige hundert Meter in Ufernähe) haben kann, aber Wirkungen auf die großräumigen Strömungsbedingungen und den Seegang, sowie verstärkende Wirkungen im Zusammenspiel mit dem OTB auszuschließen sind.

10.4 Fazit

Gegen Ende der im vorliegenden Gutachten beschriebenen Untersuchungen wurde im Scoping festgelegt, dass die Vorhabenswirkungen des OTB unter Berücksichtigung weiterer paralleler Vorhaben ermittelt werden müssen. Dies ist jedoch nur für die Seegangswirkungen in Zusammenhang mit der Steelwind-Kaje relevant. In Ergänzung zu den in Abschn. 5 bis 9 beschriebenen Vorhabenswirkungen muss eine erhöhte Sekundärreflektion an der Steelwind-Kaje entsprechend Abschn. 10.2 und Bild 67 berücksichtigt werden. Die erhöhten Prognosewerte gelten auch bei Berücksichtigung eines um 25 cm erhöhten Sturmflut-Bemessungswasserstandes.

11 Bewertung der Vorhabenswirkungen unter Berücksichtigung von Betroffenenheiten

11.1 Allgemeines

Die Vorhabenswirkungen sind geprägt durch

- die Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten im eingeeengten Bereich zwischen OTB und Gegenufer,
- die Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten im Abschattungsbereich des Terminals,
- die daraus resultierenden Erosionen und Sedimentationen, d. h. die morphodynamische Reaktion der Gewässersohle,
- die Zunahme des Seegangs durch die Reflektionswirkung der Kaje.

Ferner ergibt sich aus den veränderten Strömungsgeschwindigkeiten eine Beeinflussung der lokalen Durchmischung und damit der lokalen Salz- und Schwebstoffkonzentrationen.

Nennenswerte Änderungen der Wasserstände waren nicht festzustellen. Die wesentlichen Vorhabenswirkungen sind innerhalb eines Abstands von maximal 5 km zum OTB abgeklungen.

Die Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten und das daraus resultierende Erosionspotential ist unmittelbar nach Fertigstellung der Maßnahme maximal und verringert sich mit der erwarteten morphologischen Reaktion (Eintiefung) der Gewässersohle.

Bauzustände, die je nach Bauverfahren u. a. zu einer nennenswerten Erhöhung der Suspensionskonzentrationen führen können, wurden im Rahmen der vorliegenden Systemanalyse nicht betrachtet.

Im Folgenden werden die Vorhabenswirkungen hinsichtlich der Betroffenenheiten – soweit auf Grund der vorliegenden Untersuchung erkannt oder vermutet – zusammengefasst.

11.2 Deichsicherheit

Mit nennenswerten Änderungen der Sturmflut-Scheitelwasserstände oder der Laufzeiten der Sturmflut-Scheitelwasserstände in Folge des Vorhabens ist nicht zu rechnen. Eine Betroffenheit der Deichsicherheit kann sich jedoch durch die Seegangsreflektion an der Kaje und

die daraus folgende Zunahme der Wellenhöhen ergeben (vgl. Abschn. 8 und Bild 43/Bild 52 bzw. Abschnitt 10.2):

Die größten vorhabensbedingten Verstärkungen des Seegangs ergeben sich zwischen der Kaje des OTB und dem gegenüberliegenden Blexener Ufer. Sie liegen jedoch nicht unmittelbar am Deich. Die zur Bemessung der Deichhöhe bzw. den Wellenüberlauf relevanten signifikanten Wellenhöhen steigen im Bereich Blexen bis Friedrich-August-Hütte um höchstens 0,05 m an; bezogen auf die maximale Wellenhöhe eines Seegangsspektrums sind dies höchstens 0,1 m. Dies betrifft die Deichlinie am linken Weserufer etwa vom Turm bei Weser-km 65,5 bis zum Anleger der Hütte bei Weser-km 60,5.

Da auch die geböschte Nordflanke des OTB eine Reflektionswirkung hat, ist am Seedeich zwischen rechtem Weserufer und Fischereihafen eine Zunahme des Seegangs zu berücksichtigen. Dies betrifft den rund 300 m langen Abschnitt unmittelbar nördlich des Anschlusspunktes. Zu erwarten sind zusätzliche 0,02 bis 0,3 m bezogen auf die sign. Wellenhöhe (0,05 bis 0,6 m bezogen auf die maximale Wellenhöhe, nach Norden hin abnehmend).

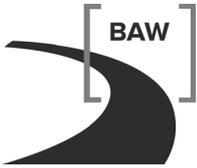
Weiter resultiert aus der zweiten Reflektion am Blexener Ufer eine Seegangsverstärkung im Bereich südwestlich des OTB und des Lunesiels. Unter Berücksichtigung der zusätzlichen Reflektion an der Steelwind-Kaje ist für den Deichabschnitt vom OTB bis zum Radarturm Luneplate mit einem Anstieg der sign. Wellenhöhen um 0,02 bis 0,05 m zu rechnen (0,05 bis 0,1 m bezogen auf die maximale Wellenhöhe).

Mit Ausnahme des erforderlichen Zuschlags im nördlichen Anschlussbereich der Terminalflanke sind die absoluten Zunahmen der Wellenhöhen in Deichnähe gering. Am linken Weserufer (Leelage) betreffen sie allerdings niedrige Ausgangswellenhöhen (Referenzzustand).

11.3 Anleger und Ufer am Blexener und Nordenhamer Ufer

Am Anleger der Titan-Werke ist vorhabensbedingt mit einem Anstieg der Strömungsgeschwindigkeiten von 0,02 bis 0,05 m/s zu rechnen. Tendenziell steigen dadurch die Sedimenttransportmengen in diesem Bereich an. Da die Liegewanne eine Unstetigkeitsstelle für den Sedimenttransport bildet, bedeutet dies tendenziell eine Verstärkung der Sedimentationsmengen. Wegen der geringen Änderungsbeträge ist aber keine nennenswerte Zunahme der Baggermengen zu erwarten.

Durch die Reflektion des Seegangs am OTB kommt es hier zu einer verstärkten Belastung durch Wellen.



Auch der Anleger der Weserfähre Bremerhaven-Blexen liegt im direkten Einflussbereich der Seegangsreflektion vom OTB, so dass hier vorhabensbedingt höhere Wellen auftreten können.

Dies betrifft auch den Uferabschnitt zwischen den Anlegern der Weserfähre und der Titanwerke (Uferdeckwerk).

Für die übrigen Anleger (Nordenhamer Ufer) sind keine nennenswerten Strömungsänderungen zu erwarten. Die Schwebstoffgehalte und Geschiebetransportmengen werden sich hier vorhabensbedingt nicht nennenswert verändern. Die Verstärkung des Seegangs durch vorhabensbedingte Reflektionswirkungen des OTB ist hier geringfügig. Mit einer nennenswerten Verschlechterung der Unterhaltungsbedingungen ist hier nicht zu rechnen.

11.4 Fischerei

Im Bereich des geplanten Offshore-Terminals ergeben sich vorhabensbedingte Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten (über den gesamten Durchflussquerschnitt) und je nach Lage der Brackwasserzone vorhabensbedingte Anstiege der Schwebstoffkonzentrationen (nahe dem OTB und dem rechten Weserufer).

Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg
Hamburg, im September 2012

Im Auftrag

Bearbeiter

gez. Rahlf

gez. Vierfuß

Dipl.-Ing. H. Rahlf

Dr.-Ing. U. Vierfuß

12 Literaturverzeichnis

BAW (Bundesanstalt für Wasserbau): Fahrrinnenanpassung der Unterweser, Fahrrinnenanpassung der Außenweser an die Entwicklungen im Schiffsverkehr sowie Tiefenanpassung der hafenbezogenen Wendestelle – Summationswirkung der Anpassungen von Unter- und Außenweser – Gutachten zur ausbaubedingten Änderung von Hydrodynamik und Salztransport. BAW-Nr. 5.02.10048.00–1, Hamburg, März 2006a

BAW (Bundesanstalt für Wasserbau): Fahrrinnenanpassung der Unterweser und Fahrrinnenanpassung der Außenweser an die Entwicklungen im Schiffsverkehr sowie Tiefenanpassung der hafenbezogenen Wendestelle – Summationswirkung der Anpassungen von Unter- und Außenweser – Gutachten zur ausbaubedingten Änderung von Transportprozessen und Morphodynamik. BAW-Nr. 5.02.10048.00–2, Hamburg, März 2006b

BAW (Bundesanstalt für Wasserbau): Fahrrinnenanpassung der Außenweser an die Entwicklungen im Schiffsverkehr sowie Tiefenanpassung der hafenbezogenen Wendestelle – Summationswirkung der Anpassungen von Unter- und Außenweser – Gutachten zur ausbaubedingten Änderung der Sturmflutscheitelwasserstände. BAW-Nr. 5.02.10048.00–5, Hamburg, März 2006c.

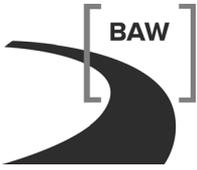
BAW (Bundesanstalt für Wasserbau): Fahrrinnenanpassung der Unterweser an die Entwicklungen im Schiffsverkehr – Summationswirkung der Anpassungen von Unter- und Außenweser – Gutachten zur ausbaubedingten Änderung der Sturmflutscheitelwasserstände. BAW-Nr. 5.02.10048.00–6, Hamburg, März 2006d.

BAW (Bundesanstalt für Wasserbau): Validierung des Weser-Basismodells 2002 für das Verfahren UnTRIM 2007 – SediMorph, Hamburg, 2011. (Im Internet abrufbar unter http://www.baw.de/methoden/index.php5/Validierungsstudien_Jade-Weser)

GRABEMANN, I. und KRAUSE, G.: Dynamik des Suspensionstransports in einem Tide-ästuar. Abschlussbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben MFU 05242, Alfred-Wegeener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, 1986.

GRABEMANN, I.: Die Trübungszone im Weser-Ästuar: Messungen und Interpretation. Dissertation, GKSS 92/E/15, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, 1992.

FIGGE, K. et al.: Schlickuntersuchungen im Wattenmeer der Deutschen Bucht. Die Küste 35, 1980.



INSTITUT FÜR WASSERBAU DER HOCHSCHULE BREMEN: Gutachten über die morphologischen Veränderungen in der Unterweser seit dem 9 m-Ausbau. Erstellt für: Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, Bremen, 2006

INSTITUT FÜR WASSERBAU DER HOCHSCHULE BREMEN: In situ Messungen im Bereich des geplanten Offshore Terminals Bremerhaven (OTB), Bremen, September 2011

NASNER, H.: Offshore Terminal Bremerhaven, Studie zur Stabilität der Kolke im Blexer Bogen, 1998 - 2010. Erstellt für: Bremenports GmbH & Co. KG, Bremen, November 2011

NLÖ (Niedersächsisches Landesamt für Ökologie), Forschungsstelle Küste: KFKI-Forschungsvorhaben Sedimentverteilung als Indikator für morphodynamische Prozesse MTK 0591, Norderney, 21/1999.

NLÖ (Niedersächsisches Landesamt für Ökologie), Forschungsstelle Küste: Ergebnisse der Untersuchungen zur Sturmflutsicherheit an der Unterweser. Norderney, Dienstbericht 09/2003.

NLÖ (Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Hrsg.): Deutsches gewässerkundliches Jahrbuch – Weser- und Emsgebiet 2001 (DGJ 2001). Hildesheim, 2004.

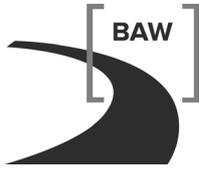
NLWKN (Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz), Forschungsstelle Küste: Ermittlung der Bemessungswasserstände für die Unterweser mit mathematischen Modellen. Norderney, Forschungsbericht 01/2006

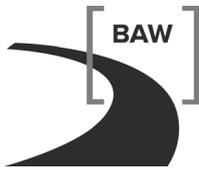
RAGUTZKI, G.: Verteilung der Oberflächensedimente auf den niedersächsischen Watten. Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz. Jahresbericht 1980, Band 32, 1982.

SCHROTTKE, K.: Bed Mobility in the Weser Estuary Turbidity Zone. Hydro International, Vol. 9, No. 7, September 2005.

Wasser- und Schifffahrtsamt Bremerhaven: Entwicklung des morphologischen Nachlaufs nach dem 9 m-Ausbau der Unterweser und dem 14 m-Ausbau der Außenweser. Gewässerkundlicher Bericht 2002-3.

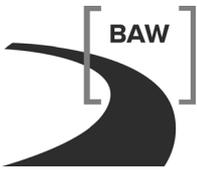
WOLTERING, S. und VISSCHER, G.: Messungen des tideabhängigen Schwebstoffgehalts in der Brackwasserzone der Weser bei Bremerhaven. Wasser & Boden 50/5, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, 1998.





Anhang:

**Auswertung der Strömungsmessungen im Blexer Bogen nach
Messdaten des Instituts für Wasserbau, Bremen, 2011**



Auswertung der Strömungsmessungen des Instituts für Wasserbau, Bremen, 2011⁹ zur Plausibilisierung der Strömungsgeschwindigkeiten des numerischen Modells im Blexer Bogen

Zur Plausibilisierung der Strömungsgeschwindigkeiten des Modells im Blexer Bogen wurden aktuelle ADCP - Messungen des Instituts für Wasserbau der Universität Bremen herangezogen. Da für den Messzeitraum keine Randbedingungen für das Modell vorlagen, wurde ein qualitativer Vergleich von tidephasengleichen Strömungsgeschwindigkeiten durchgeführt.

Für vier aussagekräftige Strömungssituationen wurden dazu die Messergebnisse aus dem Bericht des Instituts für Wasserbau der Hochschule Bremen

„In situ Messungen im Bereich des geplanten Offshore Terminals Bremerhaven (OTB)“, Bremen, September 2011

entnommen und den entsprechenden Auswertungen der numerischen Simulationen gegenübergestellt. Folgende Zeitpunkte wurden ausgewählt:

- kurz nach Ebbekenterung
- voll ausgeprägter Flutstrom
- kurz nach Flutkenterung
- voll ausgeprägter Ebbestrom

Bild A-1 zeigt die Situation ca. 1,1 h nach Ebbekenterung. Links im Bild befindet sich eine vektorielle Darstellung der gemessenen Strömungen in 3 Tiefenhorizonten. Von oben nach unten: ca. 2 m unter Wasserspiegel, Mitte der Wassersäule und bodennah. Zu erkennen ist, dass die höchsten Geschwindigkeiten in den flacheren Bereichen der Innenkurve auftreten, da hier die Kenterung früher als in den tiefen Bereichen erfolgt (Massenträgheit).

Die oberflächennahen Strömungsgeschwindigkeiten betragen in der Innenkurve 50 bis 75 cm/s und in Mitte der Fahrrinne 25 bis 50 cm/s. Die Darstellung der Beträge der Geschwin-

⁹ Institut für Wasserbau der Hochschule Bremen: In situ Messungen im Bereich des geplanten Offshore Terminals Bremerhaven (OTB), Bremen, September 2011

digkeiten des Modells (Bild A-1 unten rechts) bestätigt sowohl die Verteilung als auch die Größenordnung. Messung und Modell zeigen für den tiefen Bereich des Querschnitts in Mitte der Wassersäule etwas höhere Strömungsgeschwindigkeiten als an der Oberfläche. Im tiefsten Bereich des Querschnitts sind bodennah die Strömungsgeschwindigkeiten sowohl in den Messungen als auch im Modell am höchsten. Dies ist zu diesem Zeitpunkt durch die baroklinen Effekte zu erklären. Schwereres salzhaltiges Wasser dringt bodennah in das Ästuar hinein.

Bild A-2 zeigt die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten bei ausgeprägtem Flutstrom ca. 2,6 h nach Ebbekenterung. In den Messungen zeigen die nebeneinander liegenden Strömungsvektoren in unterschiedlichen Farbklassen die in dem Querschnitt herrschende Turbulenz. In den Daten des Modells ist diese in einem deutlich geringerem Maß vorhanden, da die Strömungsgeschwindigkeit über die Fläche der Elementkante gemittelt wird. Wenn dies berücksichtigt wird, kann dem Bild A-2 entnommen werden, dass sowohl die Verteilung als auch die Beträge der Strömungsgeschwindigkeiten durch das Modell gut wiedergegeben werden.

Bild A-3 zeigt die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten ca. 2,1 h nach Flutkenterung. Im Vergleich zu der Verteilung nach Ebbekenterung (Bild A-1) zeigt sich ein deutlich anderes Verhalten. Das infolge geringeren Salzgehalts leichtere „Oberwasser“ fließt oberflächennah ab und erhöht hier die Strömungsgeschwindigkeit. Bodennah wird der Abfluss durch das schwerere Seewasser behindert und führt so zu geringeren Strömungsgeschwindigkeiten. Es stellt sich ein entsprechendes Geschwindigkeitsprofil ein, welches in der Darstellung der Modellergebnisse (Bild A-3 rechts unten) gut zu erkennen ist.

Das Strömungsregime zu dieser Tidephase wird vom Modell recht gut wiedergegeben, auch wenn es so scheint, dass oberflächennah die Verteilung im Modell etwas „strukturiertes“ ausfällt. Dies kann an den lokalen Windverhältnissen zum Zeitpunkt der Messung liegen und spielt für die Plausibilisierung des Modells eine untergeordnete Rolle.

Abschließend wird ein Zeitpunkt mit ausgeprägter Ebbestromgeschwindigkeit betrachtet (Bild A-4). Im Vergleich zu Bild A-3 zeigt sich, dass sich die Strömungsgeschwindigkeiten oberflächennah von im Maximum 80 cm/s auf 120 cm/s und bodennah von 40 cm/s auf 80 cm/s erhöht haben. Weiterhin ist ein ausgeprägtes Profil über die Tiefe vorhanden. Auch für diese Tidephase ist die Übereinstimmung zwischen Messung und Modell als gut zu bewerten.

Insgesamt ist somit eine naturgetreue Wiedergabe der Strömungen im Blexer Bogen durch das numerische Modell festzustellen, insbesondere werden die systemprägenden Eigenschaften (horizontale und vertikale Geschwindigkeitsverteilung, barokline Effekte) gut abgebildet.

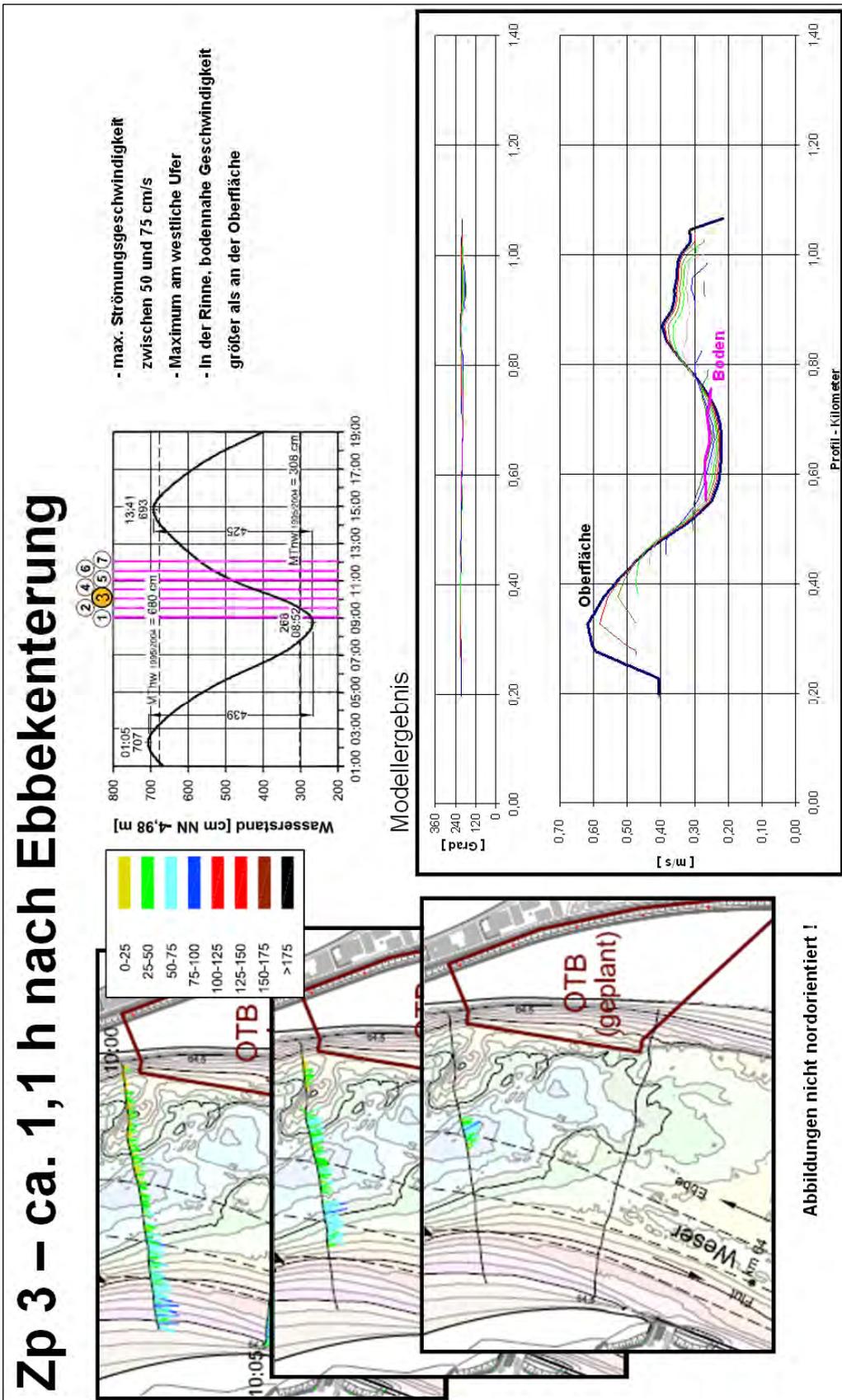


Bild A-1: Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten ca. 1,1 h nach Ebbekenterung

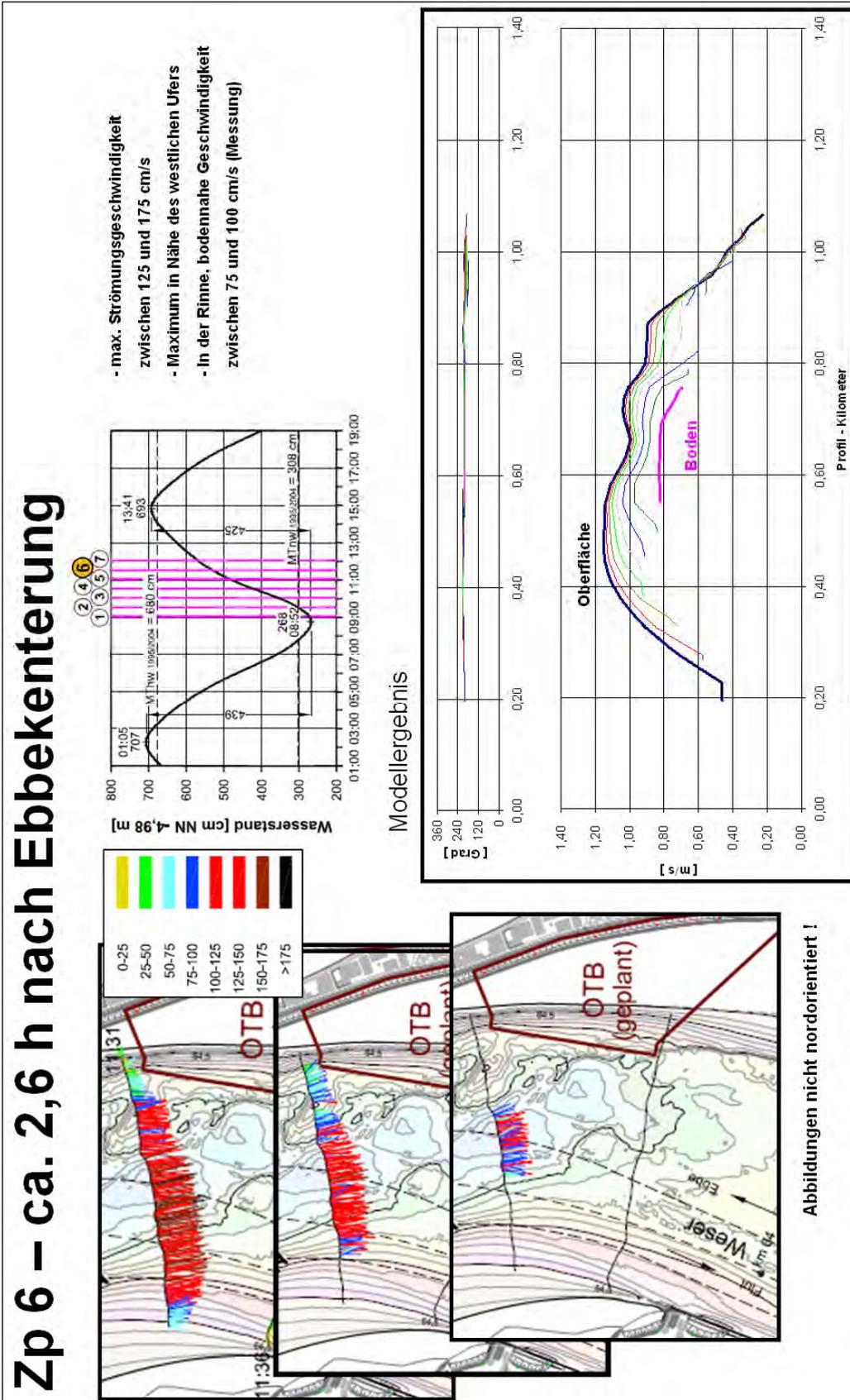


Bild A-2: Ausgeprägte Flutströmung ca. 2,6 h nach Ebbekenterung

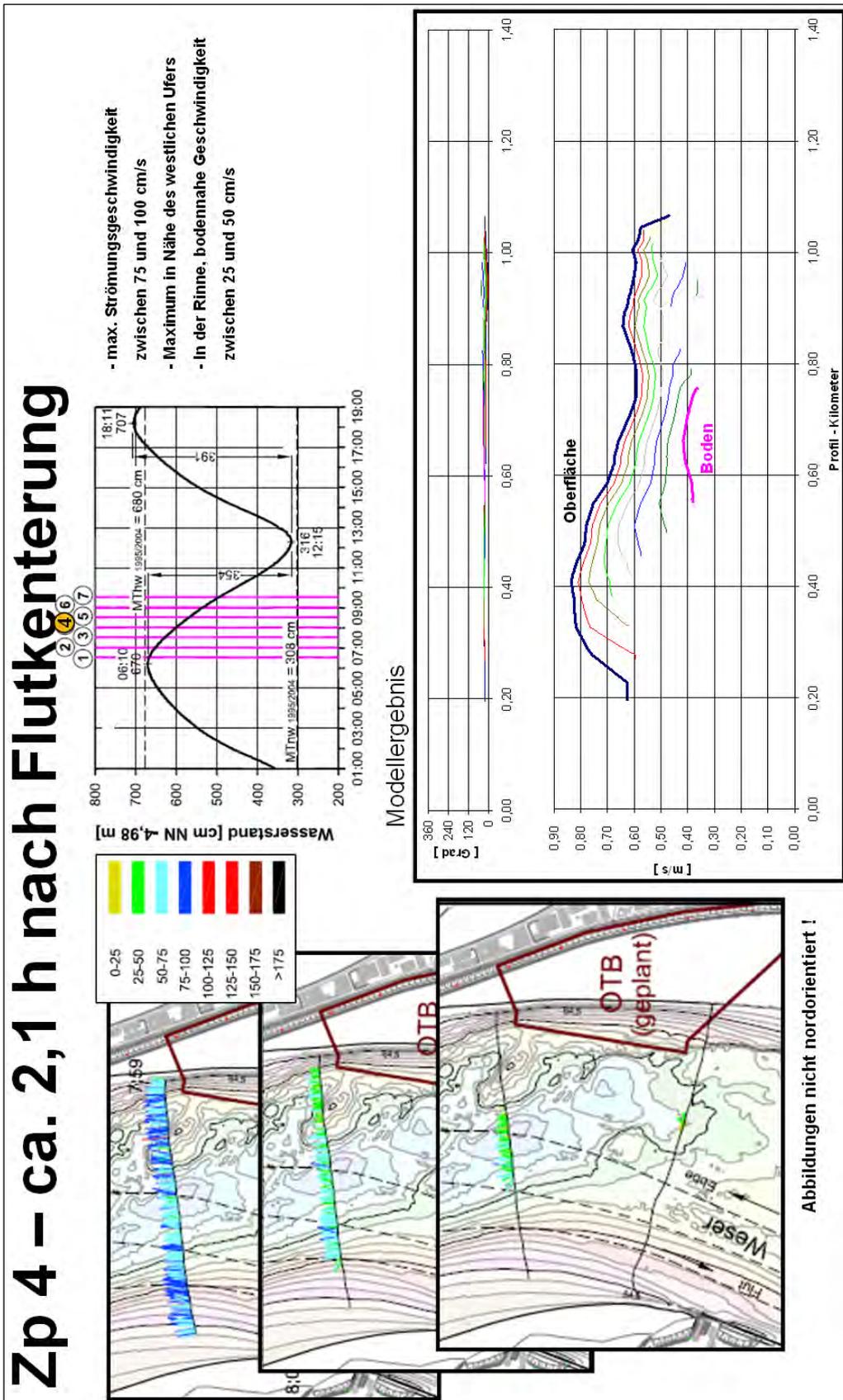


Bild A-3: Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten ca. 2,1 h nach Flutkenterung

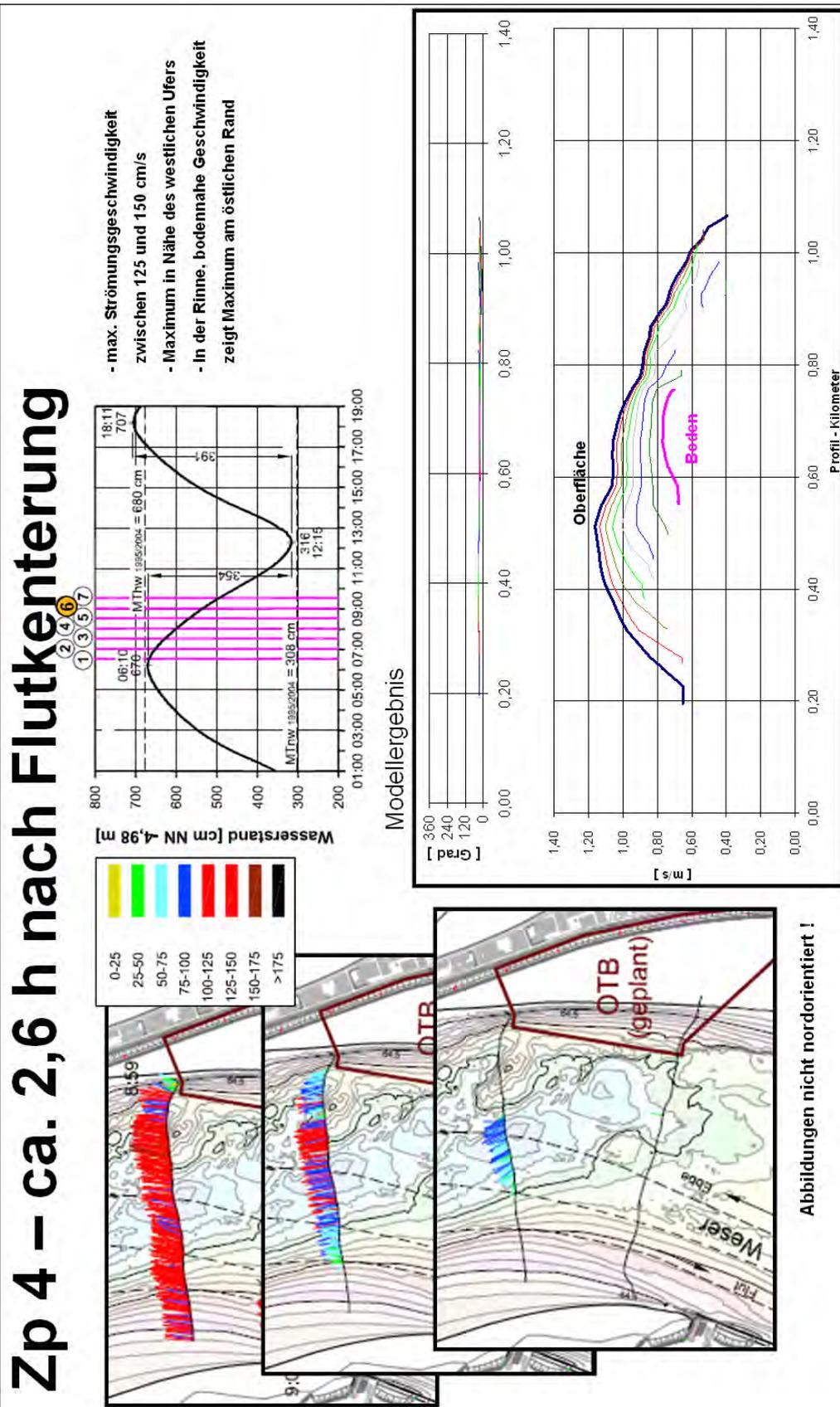


Bild A-4: Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten ca. 2,6 h nach Flutkenterung



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe
Tel. 0721 97 26-0 · Fax 0721 97 26-45 40

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg
Tel. 040 81 908-0 · Fax 040 81 908-373

Am Ehrenberg 8 · 98693 Ilmenau
Tel. 03677 669-0 · Fax 03677 669-33 33

www.baw.de