

Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe für 14,5 m tiefgehende Containerschiffe

Planergänzungsunterlage III

Ergänzende Kohärenzmaßnahme „Tideanschluss Billwerder Insel“

1.3 Fachbeitrag Hydrologie und Morphologie

Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes
Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Hamburg



Freie und Hansestadt Hamburg
Hamburg Port Authority



**Fahrrinnenanpassung
von Unter- und Außenelbe:
Planergänzungsunterlage III
Tideanschluss Billwerder Insel
Fachbeitrag
1.3 - Hydrologie und Morphologie
BAW-Nr. B3955.03.10.10217**

**Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe:
Planergänzungsunterlage III
Tideanschluss Billwerder Insel
Fachbeitrag 1.3 – Hydrologie und Morphologie**

Auftraggeber: Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Hamburg
Hamburg Port Authority

Auftrag vom: 1.3.2017

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. B3955.03.10.10217

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
Referat: Referat K3
Bearbeiter: Dr. Norbert Winkel, Dr. Holger Weilbeer
Ariane Paesler, Frank Böker

Hamburg, 12.02.2018

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

Zusammenfassung

Die Planfeststellung der Fahrrinnenanpassung der Tideelbe soll um eine weitere Kohärenzmaßnahme ergänzt werden. Hierfür ist von den planenden Behörden vorgesehen, zwei von vier außer Betrieb genommenen Absetzbecken, die im Bereich der Billwerder Insel südlich der Autobahn A1 liegen, zu einem für die Wuchsbedingungen des Schierlings-Wasserfenchels optimierten Biotop umzugestalten und über den Entleerungsgraben und den Holzhafengraben an die Billwerder Bucht anzuschließen und somit dem Tideeinfluss auszusetzen.

Für das vorliegende Gutachten wird die geplante Kohärenzmaßnahme mit Hilfe eines dreidimensionalen (3d) hydrodynamisch-numerischen (HN)-Modells bezüglich seiner Wirkung zunächst bei Normaltiden untersucht und die Änderungen in Bezug auf den Planerischen Ist-Zustand dargestellt. Diese Untersuchungen werden für unterschiedliche Szenarien durchgeführt:

- Spring-Nipp Zyklus mit niedrigem, häufigsten Oberwasser ($350 \text{ m}^3/\text{s}$)
- Spring-Nipp Zyklus mit hohem Oberwasser ($1500 \text{ m}^3/\text{s}$).

Die hoch aufgelöste Modelltopographie des Planerischen Ist-Zustandes sowie der Kohärenzmaßnahme wird unter Berücksichtigung der Sollgeometrie der Kohärenzmaßnahme (im Folgenden Ausbauzustand genannt) erzeugt. Die ausbaubedingten Änderungen der Tidekennwerte in der Elbe ergeben sich aus der Differenz zwischen dem Ausbauzustand und dem Planerischen Ist-Zustand.

Aus diesen Untersuchungen (Kapitel 4) ergeben sich hydrodynamische Änderungen, die lokal auf den Nahbereich der Kohärenzmaßnahme im süd-östlichen Ende der Billwerder Bucht begrenzt sind. So wurde eine Erhöhung der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in der Größenordnung von 10 cm/s analysiert. Die höheren Ebbestromgeschwindigkeiten resultieren aus dem größeren Tidevolumen, das im Ausbauzustand durch den Graben strömt und eine gewisse „Strahlwirkung“ in die Billwerder Bucht aufweist. Eine Erhöhung der maximalen Flutstromgeschwindigkeit ist hingegen nur im Holzhafengraben erkennbar. Dies führt im Anschlussbereich des Holzhafengrabens und in dem Entleerungsgraben zu leicht erhöhten Schwebstoffkonzentrationen. Eine Auswirkung auf das Vogelschutzgebiet Holzhafen ist nicht erkennbar. Das liegt neben dem im Vergleich zum Tidevolumen der Norderelbe verhältnismäßig kleinen zusätzlichen Tidevolumen der Kohärenzmaßnahme auch daran, dass der Holzhafen durch einen Damm von dem Holzhafengraben getrennt ist.

Die Auswirkungen des Anschlusses der Tidebecken an die Billwerder Bucht sind bei einem hohen Oberwasserzufluss etwas ausgeprägter. Daher sind für den Ausbauzustand zunächst ausgewählte Tidekennwerte für diese Abflussverhältnisse dargestellt worden, mit denen das klein- und großräumige Strömungs- und Transportregime im Bereich Billwerder erklärt werden kann (Kapitel 5).

Zur Unterstützung dieser Analysen ist eine mögliche morphologische Entwicklung durch eine zweijährige (01/2010-12/2011) Simulation unter variablen hydrodynamischen und meteorologischen Randbedingungen berechnet worden (Kapitel 6). Dies ist möglich, da die morphologische Struktur (Geometrie und Sedimentinventar) der neu geschaffenen Tidebecken bekannt und

die dort vorherrschende Strömungs- und Sedimenttransportcharakteristik eindeutig ist. Aufgrund dieser klaren Bedingungen sind die Unsicherheiten einer morphologischen Simulation in diesem Teilgebiet kleiner als im Gesamtgebiet. In diesem Fall kann die Simulation eines längeren Zeitraumes die wasserbaulichen Systemanalysen bestätigen und einen Erkenntnisgewinn insbesondere hinsichtlich der zu erwartenden Menge des Schwebstoffeintrags und dessen Abhängigkeit von dem Oberwasserzufluss mit sich bringen.

Die morphologische Entwicklung im Bereich Billwerder Insel ist sowohl durch den lokalen Geschiebetransport als auch durch den Schwebstoffeintrag über die Billwerder Bucht geprägt. Die größten Umlagerungen finden als Folge des Geschiebetransportes nur im Bereich des „Hauptpriels“ und zwischen den Gehölzinseln statt. Eine Sedimentation von Feinsedimenten ist in Depositionsbereichen an den Gehölzinseln zu finden. Die Depositionshöhen erreichen in zwei Jahren eine Mächtigkeit von weniger als 1 cm. Die geringen Sedimentationsraten können dadurch erklärt werden, dass die Schwebstoffe, die eine höhere Sinkgeschwindigkeit aufweisen, bereits im nördlichen Teil der Billwerder Bucht sedimentieren. Nur die Schwebstofffraktionen mit sehr kleinen Sinkgeschwindigkeiten erreichen die Becken, so dass auch die Sedimentationsraten dieser Schwebstofffraktionen nur sehr klein sind. Zudem strömt in der ersten Flutstromphase noch kein Wasser in den Holzhafengraben und in die neu angeschlossenen Becken. Dadurch sind die Menge und der Zeitraum, in dem eine Sedimentation stattfinden kann, begrenzt.

Die Analysen zeigen, dass der Eintrag von Feinsedimenten auch von dem Eintrag durch das Oberwasser abhängt. Langfristig wird der Eintrag von Feinsedimenten im Wesentlichen durch die Menge und der Schwebstoffkonzentration des Oberwasserzuflusses bestimmt. Ein hoher Oberwasserzufluss führt zu einem höheren Eintrag als ein niedriger.

Der „Tideanschluss Billwerder Insel“ führt zu einer leichten Verschiebung der Sedimentationsverhältnisse in der Billwerder Bucht. Die prozentuale Veränderung der Sedimentationsmengen liegt bei 1 % - 2 % und kleiner. Diese Veränderungen sind durch Messungen nicht nachweisbar. Für den Ist-Zustand ohne Tideanschluss der Billwerder Insel (Kohärenzmaßnahme) sind die berechneten Depositionsmuster im Bereich des Holzhafens identisch. Eine Beeinträchtigung dieses Gebietes kann folglich ausgeschlossen werden. Die Kohärenzmaßnahme wirkt sich ebenfalls nicht auf den Hauptstrom der Elbe aus. Daraus folgt, dass die Kohärenzmaßnahme die bisherigen Prognosen der BAW zu den ausbaubedingten Wirkungen der geplanten Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe nicht beeinflusst.

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Unterlagen und Daten	4
3	Bearbeitungskonzept	6
3.1	Mathematische Simulationsverfahren	6
3.2	Physikalische Prozesse	6
3.3	Berechnungsergebnisse	7
3.4	Analyse und Bewertung	8
3.5	Prinzipielle Wirkung des Vorhabens	8
3.6	Untersuchungsumfang	8
4	Großräumige Tidekennwertanalysen - Differenzdarstellungen	9
5	Tidekennwertanalysen für den Ausbauzustand im Bereich Billwerder	25
6	Modellstudien zur morphologischen Entwicklung im Bereich Billwerder	41
6.1	Synoptische Ergebnisse	41
6.2	Transportbilanzen	51
7	Ergebnisse	54
8	Referenzen	56

Bildverzeichnis	Seite
Bild 1: Gebietsbezeichnungen und Tiefenverteilung des Modells im Bereich der Billwerder Bucht.	1
Bild 2: Zu untersuchende Variante mit zwei umgestalteten Becken. (Quelle: WKC Hamburg GmbH, 1.2 Technische Planung, Fahrrinnenanpassung Unter- und Außenelbe, Tideanschluss Billwerder Insel, 30.01.2018).	2
Bild 3: Tiefenverteilung des Modells im Bereich der Billwerder Insel.	3
Bild 4: Tiefenverteilung des verwendeten Modells der Unter- und Außenelbe.	4
Bild 5: Tiefenverteilung des Modells im Bereich des Hamburger Hafens.	5
Bild 6: Jahrgänge der für das Modellgebiet des Hamburger Hafens verwendeten Peilungen.	5
Bild 7: Übersicht der Unter- und Außenelbe mit der Elbe-Kilometrierung.	10
Bild 8: Differenz des Tidehubs (AZ_BI – PIZ_BI) über den Querschnitt integriert bei $Q=350 \text{ m}^3/\text{s}$.	12
Bild 9: Differenz der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit (AZ_BI – PIZ_BI) über den Querschnitt integriert bei $Q=350 \text{ m}^3/\text{s}$.	13
Bild 10: Differenz der maximalen Flutstromgeschwindigkeit (AZ_BI – PIZ_BI) über den Querschnitt integriert bei $Q=350 \text{ m}^3/\text{s}$.	14
Bild 11: Differenz des maximalen Salzgehalts (AZ_BI – PIZ_BI) über den Querschnitt integriert bei $Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$.	15
Bild 12: Differenz des minimalen Tideniedrigwassers (AZ_BI – PIZ_BI) im Bereich Hamburg bei $Q=350 \text{ m}^3/\text{s}$.	16
Bild 13: Differenz des maximalen Tidehochwassers (AZ_BI – PIZ_BI) im Bereich Hamburg bei $Q=350 \text{ m}^3/\text{s}$.	17
Bild 14: Differenz des maximalen Tidehochwassers (AZ_BI – PIZ_BI) im Bereich Billwerder bei $Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$.	18
Bild 15: Differenz des Maximums der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit (AZ_BI – PIZ_BI) im Bereich Billwerder ($Q=350 \text{ m}^3/\text{s}$).	19
Bild 16: Differenz des Maximums der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit (AZ_BI – PI_BI) im Bereich Billwerder ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).	20
Bild 17: Differenz des Maximums der maximalen Flutstromgeschwindigkeit (AZ_BI – PI_BI) im Bereich Billwerder ($Q=350 \text{ m}^3/\text{s}$).	21
Bild 18: Differenz des Maximums der maximalen Flutstromgeschwindigkeit (AZ_BI – PI_BI) im Bereich Billwerder ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).	22
Bild 19: Differenz der mittleren Schwebstoffkonzentrationen (AZ_BI – PI_BI) im Bereich Billwerder ($Q=350 \text{ m}^3/\text{s}$).	23
Bild 20: Differenz der mittleren Schwebstoffkonzentrationen (AZ_BI – PI_BI) im Bereich Billwerder ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).	24
Bild 21: Maximum der maximalen Flutstromgeschwindigkeit im Bereich Billwerder ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).	27
Bild 22: Maximum der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit im Bereich Billwerder ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).	28

Bild 23:	Maximum der maximalen Flutstromgeschwindigkeit im Bereich Billwerder Insel ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).	29
Bild 24:	Maximum der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit im Bereich Billwerder Insel ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).	30
Bild 25:	F:E-Verhältnis der maximalen Strömungsgeschwindigkeit (Mit) im Bereich Billwerder Bucht ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).	31
Bild 26:	F:E-Verhältnis der maximalen Strömungsgeschwindigkeit (Mit) im Bereich Billwerder Insel ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).	32
Bild 27:	Maximaler Schwebstoffgehalt (Mit) im Bereich Billwerder Bucht ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).	33
Bild 28:	Mittlere Schwebstoffgehaltsvariation (Mit) im Bereich Billwerder Bucht ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).	34
Bild 29:	F:E-Verhältnis des adv. Schwebstofftransportes (Mit) im Bereich Billwerder Bucht ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).	35
Bild 30:	F:E-Verhältnis des adv. Schwebstofftransportes (Min) im Bereich Billwerder Bucht ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).	36
Bild 31:	F:E-Verhältnis des adv. Schwebstofftransportes (Mit) im Bereich Billwerder Insel ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).	37
Bild 32:	F:E-Verhältnis des adv. Schwebstofftransportes (Min) im Bereich Billwerder Insel ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).	38
Bild 33:	Maximale Bodenschubspannung für den gesamten Analysezeitraum. Die Farblegende variiert bis 0.14 N/m^2 , das entspricht in etwa dem Bewegungsbeginn von Sand.	39
Bild 34:	Unterschreitungshäufigkeit der Bodenschubspannungsklasse zwischen 0.0 - 0.1 N/m^2 . Die Farbskalierung variiert nur zwischen 0.99 bis 1.00 . Das bedeutet, dass in den rot eingefärbten Bereichen oberhalb des „Hauptprieis“ fast ausschließlich Sedimentationsbedingungen für Feinsedimente vorherrschen.	40
Bild 35:	Abfluss der Elbe 2010 und 2011.	42
Bild 36:	Morphodynamische Entwicklung nach ca. 2 Jahren. Die Änderungen der Sohlage sind im Bereich von $-1,10 \text{ m}$ bis $+1,10 \text{ m}$ dargestellt.	44
Bild 37:	Morphodynamische Entwicklung nach ca. 2 Jahren. Die Änderungen der Sohlage sind im Bereich von $-0,10 \text{ m}$ bis $0,10 \text{ m}$ dargestellt.	45
Bild 38:	Morphodynamische Entwicklung nach ca. 2 Jahren. Die Änderungen der Sohlage sind im Bereich von $-0,01 \text{ m}$ bis $0,01 \text{ m}$ dargestellt.	46
Bild 39:	Morphodynamische Entwicklung im Bereich Billwerder Insel nach ca. 2 Jahren. Darstellungsbereich von $-0,10 \text{ m}$ bis $0,10 \text{ m}$.	47
Bild 40:	Morphodynamische Entwicklung im Bereich Billwerder Insel nach ca. 2 Jahren. Darstellungsbereich von $-0,01 \text{ m}$ bis $0,01 \text{ m}$.	48
Bild 41:	Morphodynamische Entwicklung für den Referenzzustand nach ca. 2 Jahren. Darstellungsbereich von $-0,10 \text{ m}$ bis $0,10 \text{ m}$.	49
Bild 42:	Morphodynamische Entwicklung für den Referenzzustand nach ca. 2 Jahren. Darstellungsbereich von $-0,01 \text{ m}$ bis $0,01 \text{ m}$.	50
Bild 43:	Teilgebiete für den Bereich der Billwerder Bucht	51

Bild 44:	Sedimenteintrag in das Gebiet Billwerder Insel während des 2-jährigen Simulationszeitraumes .Der Einfluss des Oberwasserzufluss ist erkennbar. Die nach der Oberwasserspitze Anfang 2011 einsetzende Episode geringen Zuflusses führt auch zu geringeren Einträgen in das Gebiet Billwerder Insel.	52
Bild 45:	Akkumulation von Feinsedimenten in Teilgebiet 2 während des 2-jährigen Simulationszeitraumes.	53
Bild 46:	Ausbaubedingte Veränderung der Akkumulation von Feinsedimenten in Teilgebiet 2 während des 2-jährigen Simulationszeitraumes (Differenz AZ_BI-PIZ_BI).	53

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Die Planfeststellung der Fahrrinnenanpassung der Tideelbe soll um eine weitere Kohärenzmaßnahme ergänzt werden. Es ist nun seitens der planenden Behörden vorgesehen, zwei von vier außer Betrieb genommenen Absetzbecken, die im Bereich der Billwerder Insel südlich der Autobahn A1 liegen, zu einem für die Wuchsbedingungen des Schierlings-Wasserfenchels optimierten Biotop umzugestalten und über den Entleerungsgraben und den Holzhafengraben an die Billwerder Bucht anzuschließen und somit dem Tideeinfluss auszusetzen.

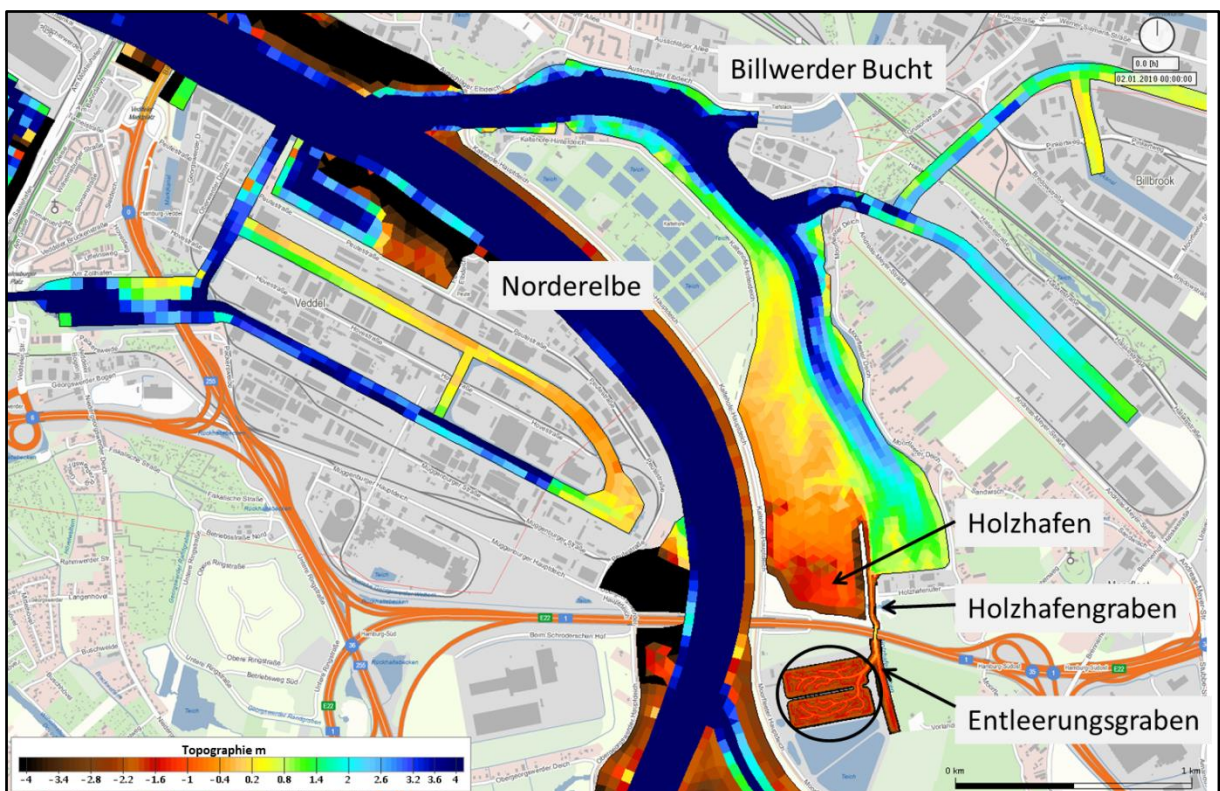


Bild 1: Gebietsbezeichnungen und Tiefenverteilung des Modells im Bereich der Billwerder Bucht.

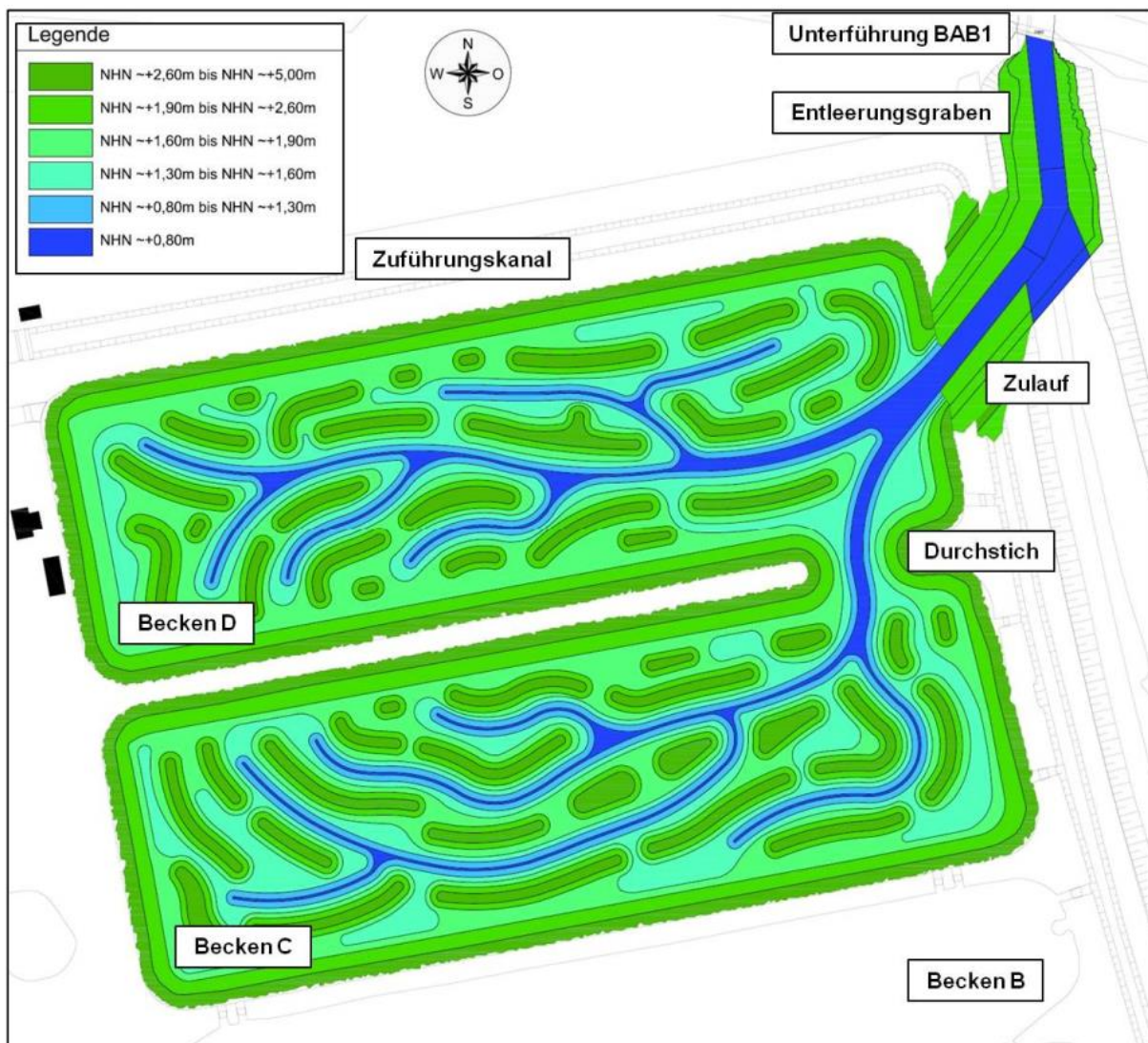


Bild 2: Zu untersuchende Variante mit zwei umgestalteten Becken. (Quelle: WKC Hamburg GmbH, 1.2 Technische Planung, Fahrrinnenanpassung Unter- und Außenelbe, Tideanschluss Billwerder Insel, 30.01.2018).

In Bild 1 sind die Gebietsbezeichnungen und die Tiefenverteilung des Modells im Bereich der Billwerder Bucht zu sehen. Bild 2 zeigt Details aus der Planung. Die Planung der Kohärenzmaßnahme „Tideanschluss Billwerder Insel“ hat das Ziel, neuen Lebensraum für den Schierlings-Wasserfenchel zu schaffen. Kurz zusammengefasst ist die in dem vorliegenden Gutachten untersuchte Kohärenzmaßnahme „Tideanschluss Billwerder Insel“ das Ergebnis eines Optimierungsprozesses, der zum Ziel hatte,

- möglichst geringe Strömungs- und Schwebstoffgehaltsveränderungen in den Wasser- und Wattflächen des Vogelschutzgebietes Holzhafen zu verursachen,
- im Holzhafengraben, durch den die Tide in das neu anzuschließende Gebiet Billwerder Insel einströmt, die Strömungsgeschwindigkeit auf ein Maß zu begrenzen, das keine starken Ufer- und Sohlbefestigungen erfordert (der Holzhafengraben liegt ebenfalls im VSG Holzhafen),

Aus wasserbaulicher Sicht resultieren aus diesen Bedingungen geometrische Vorgaben. Das Tidevolumen in den anzuschließenden Becken sollte möglichst klein sein, damit die Strömungsgeschwindigkeiten im Holzhafengraben nicht unnötig groß werden. Zugleich sollte die Fläche, auf der der Schierlings-Wasserfenchel optimal wachsen kann, möglichst groß sein. Dies betrifft den Bereich zwischen -0,20 m bis -1,30 m unter MThw. Außerdem sollen die Böschungsneigungen kleiner als 1:3 sein und es müssen Gehölzinseln angelegt werden, auf denen ein Auwald wachsen kann, da der Schierlings-Wasserfenchel Halbschatten benötigt.

Mit der unter diesen Bedingungen entwickelten Geometrie werden ca. 3,8 ha Wuchsfläche für den Schierlings-Wasserfenchel geschaffen. Sie sieht diverse Strukturen vor (Bild 2). Das nördliche Becken wird über einen Zulauf an den Entleerungsgraben angeschlossen. Das einströmende Wasser breitet sich gleichmäßig über ein Prielsystem in beiden Becken aus. Die Sohle des Hauptpriels liegt auf 0,80 m NHN, d.h. das Gebiet wird erst im letzten Drittel der Flut gefüllt. Zwischen den Prielen sind Gehölzinseln angelegt, die regelmäßig umströmt werden und an deren Böschungen der Schierlings-Wasserfenchel wachsen soll. Die Umsetzung dieser Geometrie in dem hier verwendeten numerischen Modell ist in Bild 3 zu sehen. Als Sedimentinventar wird eine Mischung aus Feinsand und Mittelsand vorgegeben.

In diesem Gutachten werden die hydro- und morphodynamischen Veränderungen beschrieben, die durch diese Maßnahme zu erwarten sind.



Bild 3: Tiefenverteilung des Modells im Bereich der Billwerder Insel.

2 Unterlagen und Daten

Der Planerische Ist-Zustand (PIZ_BI) beinhaltet die Topographie 2010 mit Aktualisierungen im Hafengebiet (Bild 6), sowie die Solltiefen des Ausbauzustandes der planfestgestellten Vertiefung von Unter- und Außenelbe mit allen Unterwasserablagerungsflächen (Zustand Planänderung III, Projektbüro Fahrrinnenanpassung beim Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg 2010). Dabei werden die Solltiefen an solchen Positionen in der Fahrrinne eingebaut, an denen die durch die verwendeten Peilungen entstandene Tiefe geringer als die Solltiefe ist. Das genaue Vorgehen dazu ist im Gutachten zur ausbaubedingten Änderung von Hydrodynamik und Salztransport, BAW-Nr. A3955 03 10062, H.1a, Bundesanstalt für Wasserbau, 2006 beschrieben. Darüber hinaus werden folgende Maßnahmen berücksichtigt:

- die Maßnahmen der geplanten Westerweiterung des CTH,
- Teilverfüllung des Steinwerder Hafens,
- Rückbau des Kaiser-Wilhelm-Höfts,
- Rückbau des Ellerholzhöfts und
- Neubau der Rethebrücke und der Kattwykbrücke.

Der Ausbauzustand (AZ_BI) ergibt sich aus dem Planerischen Ist-Zustand mit der Kohärenzmaßnahme Billwerder Insel. Das digitale Geländemodell für diesen Bereich wurde der BAW am 07.06.2017 zur Verfügung gestellt.

Die Tiefenverteilung des verwendeten Modells der Unter- und Außenelbe ist in Bild 4 dargestellt und im Detail für das Hamburger Gebiet in Bild 5 zu sehen.

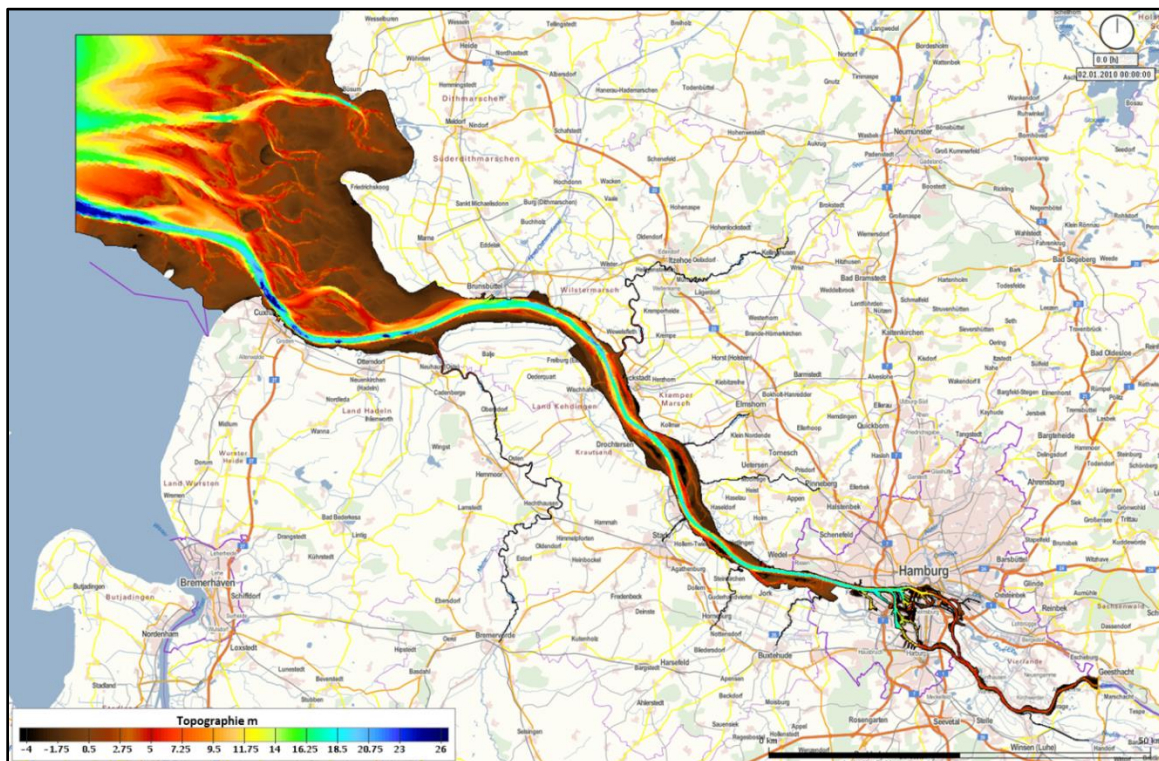


Bild 4: Tiefenverteilung des verwendeten Modells der Unter- und Außenelbe.

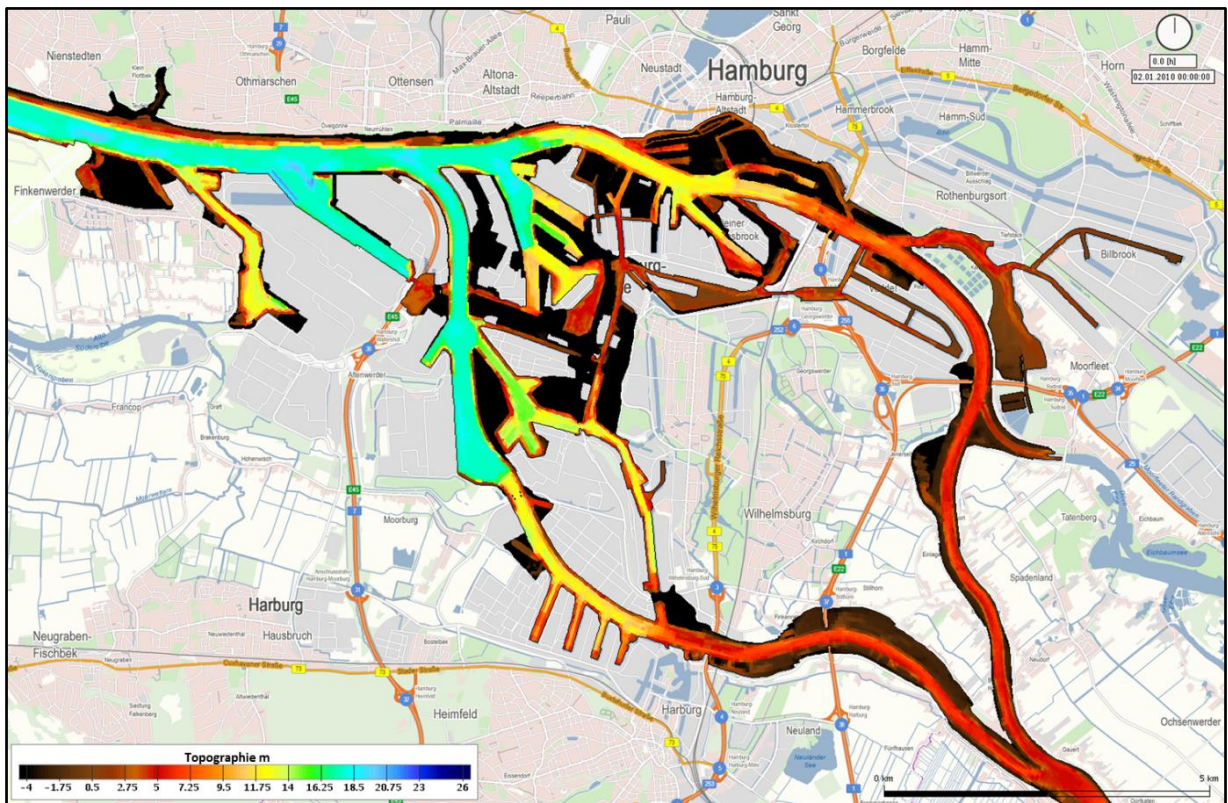


Bild 5: Tiefenverteilung des Modells im Bereich des Hamburger Hafens.

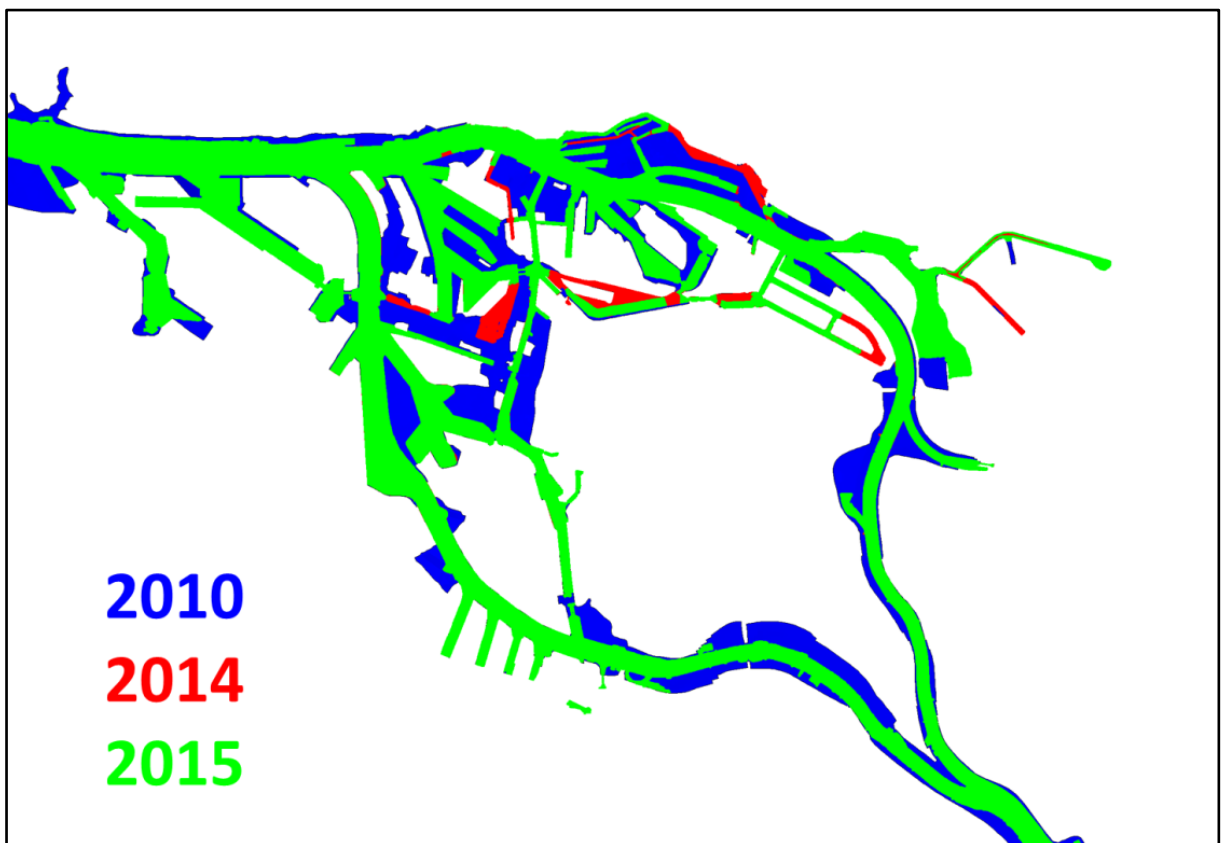


Bild 6: Jahrgänge der für das Modellgebiet des Hamburger Hafens verwendeten Peilungen.

3 Bearbeitungskonzept

3.1 Mathematische Simulationsverfahren

Die Prognose der Wirkung baulicher Veränderungen auf die Tidedynamik und den Transport ist nach dem Stand von Technik und Wissenschaft mit wasserbaulichen Systemanalysen unter zu Hilfenahme einer dreidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modellierung möglich. Das verwendete 3D HN-Modell bildet die physikalischen Prozesse im Elbe-Ästuar mit Hilfe des numerischen Verfahrens *UnTrim* dreidimensional ab.

Bei dem mathematischen Verfahren *UnTRIM* handelt es sich um eine Entwicklung, die von Prof. Vincenzo Casulli (Universität Trient, Italien) durchgeführt wurde. *UnTRIM* ist ein semi-implizites Finite - Differenzen (-Volumen) Verfahren zur numerischen Lösung der dreidimensionalen Flachwassergleichungen sowie der dreidimensionalen Transportgleichung für Salz, Wärme, Schwebstoffe sowie suspendierte Sedimente. *UnTRIM* arbeitet auf einem unstrukturierten, orthogonalen Gitter (UOG). Hierbei wird das Lösungsgebiet von einer endlichen Anzahl konvexer Polygone (Dreiecke, Vierecke) überlappungsfrei überdeckt.

Das Verfahren *SediMorph* ist eine Eigenentwicklung der Bundesanstalt für Wasserbau zur Simulation von dreidimensionalen sedimentologischen Prozessen an der Gewässersohle. Hierzu werden Massenbewegungen infolge Geschiebe- und Suspensionstransport der einzelnen Kornfraktionen sowie des Porenwassers bilanziert. Aus diesen Sedimentströmen werden Sohlhöhenveränderungen bilanziert. Auch die Beschreibung des Aufbaus und der Veränderung des Bodens, d.h. die Verwaltung des Sedimentinventars, die Genese von Dünen etc. ist innerhalb des Moduls *SediMorph* realisiert. Ferner wird der fraktionierte Geschiebetransport berechnet. Auch das Verfahren *SediMorph* arbeitet auf unstrukturierten orthogonalen Gittern.

3.2 Physikalische Prozesse

Die folgenden physikalischen Prozesse werden in dem mathematischen Modell zur Berechnung der Hydrodynamik und des Transports gelöster Stoffe berücksichtigt:

- reynoldsgemittelte Navier - Stokes - Gleichung (RANS)
- lokale Beschleunigung (Massenträgheit)
- advektive Beschleunigung
- Coriolisbeschleunigung
- barotroper Druckgradient
- barokliner Druckgradient
- hydrostatische oder nicht-hydrostatische Druckverteilung
- horizontale turbulente Viskosität (lokal isotrop, zeit- und ortsvariabel)
- turbulente Viskosität in Vertikalrichtung unter Berücksichtigung der vertikalen Dichteschichtung
- Bodenreibung

- Impulseintrag durch den Wind
- Quellen und Senken (Zu- und Abflüsse)
- Transport konservativer Tracer
- advektiver Transport durch die Strömung
- optionaler flux limiter: Minmod, van Leer oder Superbee
- horizontale turbulente Diffusivität (lokal isotrop, zeit- und ortsvariabel)
- turbulente Diffusivität in Vertikalrichtung unter Berücksichtigung der vertikalen Dichteschichtung

3.3 Berechnungsergebnisse

Folgende Berechnungsergebnisse werden durch das mathematische Modell an den diskreten Berechnungspunkten geliefert:

- Wasserspiegelauslenkung der freien Oberfläche
- Strömungsgeschwindigkeit
- Tracerkonzentration (z.B. Salzgehalt, Temperatur, Schwebstoff)
- hydrodynamischer Druck

Dabei liegen die skalaren Größen (Wasserstand, Konzentration usw.) in den Zentrumspunkten und die vektoriellen Größen (Geschwindigkeit) auf den Mitten der Polygonränder vor. Den Veröffentlichungen Casulli et. al. 1998 bis 2005 können Details zu dem mathematischen Modellverfahren UnTrim entnommen werden (Casulli und Walters 2000; Casulli und Zanolli 2002; Casulli 1999; Casulli, V. and Zanolli, P. 1998; Casulli und Zanolli 2005).

Die örtliche Auflösung des Rechengitters und die zeitliche Auflösung der Simulation sind so gewählt worden, dass alle charakteristischen, d.h. das Gewässer prägenden physikalischen Prozesse berücksichtigt und die durch die Baumaßnahmen der Kohärenzmaßnahme „Tideanschluss Billwerder Insel“ vorzunehmenden Änderungen der Topographie aufgelöst werden.

Die durch die Kohärenzmaßnahme bedingten Änderungen werden nicht auf den „Ist-Zustand“ sondern auf den „Planerischen Ist - Zustand“ bezogen. Dieser unterscheidet sich vom Ist-Zustand dadurch, dass weitere bauliche Maßnahmen berücksichtigt werden, die zum Zeitpunkt der Ausführung der zu untersuchenden Maßnahmen mit hoher Wahrscheinlichkeit realisiert sein werden (siehe Kapitel 2). Dabei bleiben die Kalibrierungseinstellungen unverändert. In diesem Fall muss daher der PIZ_BI bereits alle Komponenten der Fahrrinnenanpassung beinhalten. In die Modelltopographie des Planerischen Ist-Zustandes (PIZ_BI) werden schließlich die Maßnahmen der Kohärenzmaßnahme „Tideanschluss Billwerder Insel“ eingebaut. Dieses System stellt den Ausbaurzustand (AZ_BI) dar.

Die mit dem HN-Modell unter Verwendung identischer Modellparameter und seeseitiger Steuerung sowie Oberwasser-Steuerung ermittelten Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten, Salzgehalts- und Schwebstoffverteilungen ergeben die Rechenwerte für das Modell mit der Kohärenzmaßnahme „Tideanschluss Billwerder Insel“. Durch Differenzbildung der berechneten Tide-, Strömungs- und Transportkennwerte mit denen des planerischen Ist-Zustandes werden

für das gesamte Modellgebiet ausbaubedingte Änderungen der Kennwerte ermittelt. Durch diese Vorgehensweise können Änderungen eindeutig der zu untersuchenden Maßnahme zugeordnet werden.

3.4 Analyse und Bewertung

Aus den Ergebnissen der Simulationsrechnungen werden die Tidekennwerte der Wasserstände, der Strömung, des Salzgehaltes und der Schwebstoffverteilung errechnet, um die Wirkungen der Maßnahme zu quantifizieren. Die Analyseverfahren und -parameter sind ausführlich auf den Internetseiten der BAW dokumentiert, siehe:

http://wiki.baw.de/de/index.php5/Analyse_der_Berechnungsergebnisse

Die Rechenwerte aus der Modellsimulation und -analyse bedürfen grundsätzlich der fachwissenschaftlichen Interpretation, um fundierte Prognosen über die Ausbauwirkungen abzugeben. Die Berechnungsergebnisse sind somit nicht die alleinige Grundlage der gutachterlichen Aussagen, weil sowohl die gewässerkundlichen Erkenntnisse über das Untersuchungsgebiet als auch die revier- und methodenspezifischen Erfahrungen des Gutachters in der wasserbaulichen Systemanalyse mit in die Bewertung einfließen müssen.

3.5 Prinzipielle Wirkung des Vorhabens

Die Schaffung von zusätzlichem Tidevolumen ist eine wasserbauliche Maßnahme, deren Auswirkung sehr stark davon abhängt, wieviel Tidevolumen auf welche Weise an welcher Stelle zur Wirkung kommt:

- Ein großes Tidevolumen bewirkt mehr als ein kleines,
- der Anschluss selber darf nicht zu weit oder zu eng sein, damit sich die Wirkung über die ganze Tide entfalten kann, und schließlich
- bewirkt der Anschluss im oberen Bereich eines Ästuars mehr als im unteren Bereich, da das direkt beeinflusste Tidevolumen kleiner ist.

Die wesentliche Wirkung besteht in einer Anhebung des Tideniedrigwassers, einer Reduzierung des Tidehochwassers und infolge dessen auch eine Reduktion des F:E-Verhältnisses der Strömungsgeschwindigkeiten und der Transporte.

Dies gilt auch für die Kohärenzmaßnahme „Tideanschluss Billwerder Insel“, wenngleich auch nur in sehr geringem Umfang, da das Tidevolumen dieser Maßnahme im Vergleich zu dem Tideprisma in der oberen Tideelbe bzw. in der Norderelbe sehr klein ist. Zudem sind die beiden Becken über den Holzhafengraben am südlichen Ende der Billwerder Bucht, also ca. 3 km entfernt von der Norderelbe, angeschlossen. Es ist zu erwarten, dass messtechnisch nachweisbare Auswirkungen nur lokal auftreten

3.6 Untersuchungsumfang

Das Modell ist kalibriert und validiert für den Ist-Zustand des Jahres 2010. Analog zu den Untersuchungen der BAW-Gutachten H1.a und H1.c aus dem Jahr 2006 zur Fahrrinnenanpassung

werden zunächst die Systemzustände für zwei Oberwasserszenarien ($350 \text{ m}^3/\text{s}$ und $1500 \text{ m}^3/\text{s}$) untersucht und in vergleichbarer Weise Tidekennwerte analysiert und dargestellt. Der Analysezeitraum ist der 15.07.2010 06:00 Uhr – 30.07.2010 00:50 Uhr. Der Ausbauzustand unterscheidet sich vom Vergleichszustand nur durch die Berücksichtigung der Kohärenzmaßnahme „Tideanschluss Billwerder Insel“. Es geht also nicht um die Wirkung der Fahrrinnenanpassung, sondern nur um die kleinräumige Wirkung der Kohärenzmaßnahme „Tideanschluss Billwerder Insel“. Ausgewählte Ergebnisse der Tidekennwertanalyse dieser Szenarien werden in Kapitel 4 als Differenzen der Wasserstände, der Strömungsgeschwindigkeiten, der Salzgehalte und der Schwebstoffgehalte dargestellt.

Die Auswirkungen des Anschlusses der Tidebecken an die Billwerder Bucht sind bei einem hohen Oberwasserzufluss etwas ausgeprägter. Daher werden ausgewählte Tidekennwerte, mit denen das Strömungs- und Transportregime erklärt werden kann, in Kapitel 5 für den Ausbauzustand unter Verwendung des Datensatzes dargestellt, der in der Systemstudie mit einem konstanten Oberwasserzufluss von $Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$ berechnet wurde.

Die morphologische Struktur (Geometrie und Sedimentinventar) der neu geschaffenen Tidebecken ist bekannt und die dort vorherrschende Strömungs- und Sedimenttransportcharakteristik ist eindeutig. Aufgrund dieser klaren Bedingungen sind die Unsicherheiten einer morphologischen Simulation in diesem Teilgebiet kleiner als im Gesamtgebiet. In diesem Fall kann die Simulation eines längeren Zeitraumes die wasserbaulichen Systemanalysen bestätigen und einen Erkenntnisgewinn insbesondere hinsichtlich der zu erwartenden Menge des Schwebstoffeintrags und dessen Abhängigkeit von dem Oberwasserzufluss mit sich bringen.

Daher wird ergänzend eine zweijährige morphodynamische Simulation unter variablen hydrologischen und meteorologischen Randbedingungen durchgeführt. Als Simulationszeitraum wird ein zur Topographie passender und charakteristischer Zeitraum gewählt (Januar 2010 bis Dezember 2011). Für diesen Zeitraum wird das Modell kontinuierlich morphodynamisch, aber ohne zeitliche Skalierung der morphodynamischen Entwicklung betrieben¹. Die kontinuierliche Simulation langer hydrologischer Zeiträume ergibt in Verbindung mit den variablen meteorologischen Bedingungen ein großes Spektrum an möglichen Systemzuständen, die mit geeigneten Methoden detailliert analysiert werden können. So kann die Abhängigkeit der morphologischen Entwicklung dieses Gebietes von den hydrologischen und meteorologischen Randbedingungen ermittelt werden. Die Ergebnisse dieser Systemstudie werden in Kapitel 6 beschrieben.

4 Großräumige Tidekennwertanalysen - Differenzdarstellungen

Die hier untersuchte Maßnahme hat großräumig keine Auswirkungen auf die Tidedynamik. Dies wird zunächst anhand einiger Tidekennwerte nachgewiesen, die auf dem Längsprofil entlang

¹ Dieses Vorgehen ist nicht zu verwechseln mit der Modelltechnik, die bei der „langfristigen morphodynamischen Modellierung“ angewendet wird (Vereinfachung des Systems, Multiplikation der Tiefenänderung mit einem Faktor etc.). In dieser Systemstudie werden alle ca. 1400 Tiden des zweijährigen Simulationszeitraumes berechnet.

der Fahrrinntentrasse für die gesamte Tideelbe dargestellt sind. Dabei wird Bezug auf die Kilometrierung der Elbe genommen, deren Ort in Bild 7 abzulesen ist.

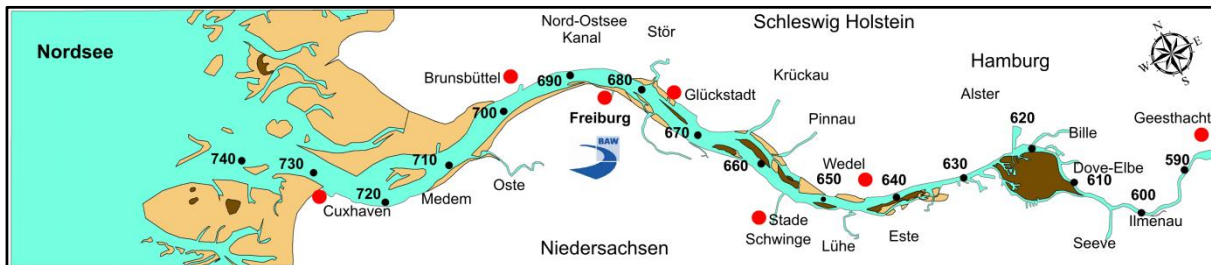


Bild 7: Übersicht der Unter- und Außenelbe mit der Elbe-Kilometrierung.

Der Nachweis, dass großräumig keine Auswirkungen durch das Anschließen der zwei Tidebecke zu erwarten sind, wird anhand der in Bild 8 bis Bild 11 dargestellten Veränderungen des Tidehubs, der Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten und des Salzgehaltes geführt. In allen Tidekennwerten ist in der Differenz der Systemzustände in der querintegrierten Auswertung auf dem Längsprofil keine nennenswerte Differenz zu erkennen.

Daher ist es ausreichend, die Ergebnisdarstellungen auf den Hamburger Raum im Nahbereich der Kohärenzmaßnahme Billwerder Insel zu konzentrieren.

In Bild 12 und in Bild 13 sind die Differenzen $AZ_{BI} - PIZ_{BI}$ des minimalen Tideniedrigwassers und des maximalen Tidehochwassers für den Hamburger Bereich dargestellt, die sich bei einem Oberwasserzufluss von $Q=350 \text{ m}^3/\text{s}$ ergeben. Es sind keine ausbaubedingten Änderungen zu erkennen, die eine Differenz größer als 1 cm anzeigen. Lediglich bei einem Oberwasserzufluss von $Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$ kann man in dem Teilgebiet Billwerder Bucht eine kleine Auswirkung erkennen (Bild 14). Hier ergeben sich im Entleerungsgraben für den Systemzustand mit der Kohärenzmaßnahme ca. 1 cm höhere maximale Wasserstände bei Tidehochwasser.

Dies ist ein Hinweis darauf, dass der Oberwasserzufluss einen Einfluss auf die Auswirkungen und die Entwicklung der Kohärenzmaßnahme „Billwerder Insel“ hat. Etwas deutlicher wird dieser Einfluss bei der Analyse der Strömungsgeschwindigkeiten. Bild 15 und Bild 16 zeigen die Differenzen des Maximums der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit, Bild 17 und Bild 18 die des Maximums der maximalen Flutstromgeschwindigkeit. Die Muster sind jeweils sehr ähnlich, jedoch bei den Analysen des Systemzustandes für das höhere Oberwasser etwas stärker ausgeprägt. Man kann eine Erhöhung der Ebbestromgeschwindigkeit nördlich des Anschlusses über den Holzhafengraben erkennen. Die höheren Ebbestromgeschwindigkeiten resultieren aus dem größeren Tidevolumen, das im Ausbauzustand durch den Graben strömt und eine gewisse „Strahlwirkung“ in die Billwerder Bucht aufweist. Eine Erhöhung der maximalen Flutstromgeschwindigkeit ist hingegen nur im Holzhafengraben selbst erkennbar. Die Erhöhung der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten liegt in der Größenordnung von 10 cm/s.

Eine Auswirkung auf das Vogelschutzgebiet Holzhafen ist nicht erkennbar. Das liegt neben dem im Vergleich zum Tidevolumen der Norderelbe verhältnismäßig kleinen zusätzlichen Tidevolu-

men der Kohärenzmaßnahme auch daran, dass der Holzhafen durch einen Damm von dem Holzhafengraben getrennt ist.

Veränderte Strömungsgeschwindigkeiten beeinflussen den Sedimenttransport. Die Auswirkungen auf den Schwebstofftransport werden durch die mittlere Schwebstoffkonzentration in Bild 19 und Bild 20 verdeutlicht, die für beide untersuchten Oberwasserzuflüsse im Ausbauzustand leicht erhöhte Werte im Anschlussbereich des Holzhafengrabens und in dem Entleerungsgraben aufweisen.

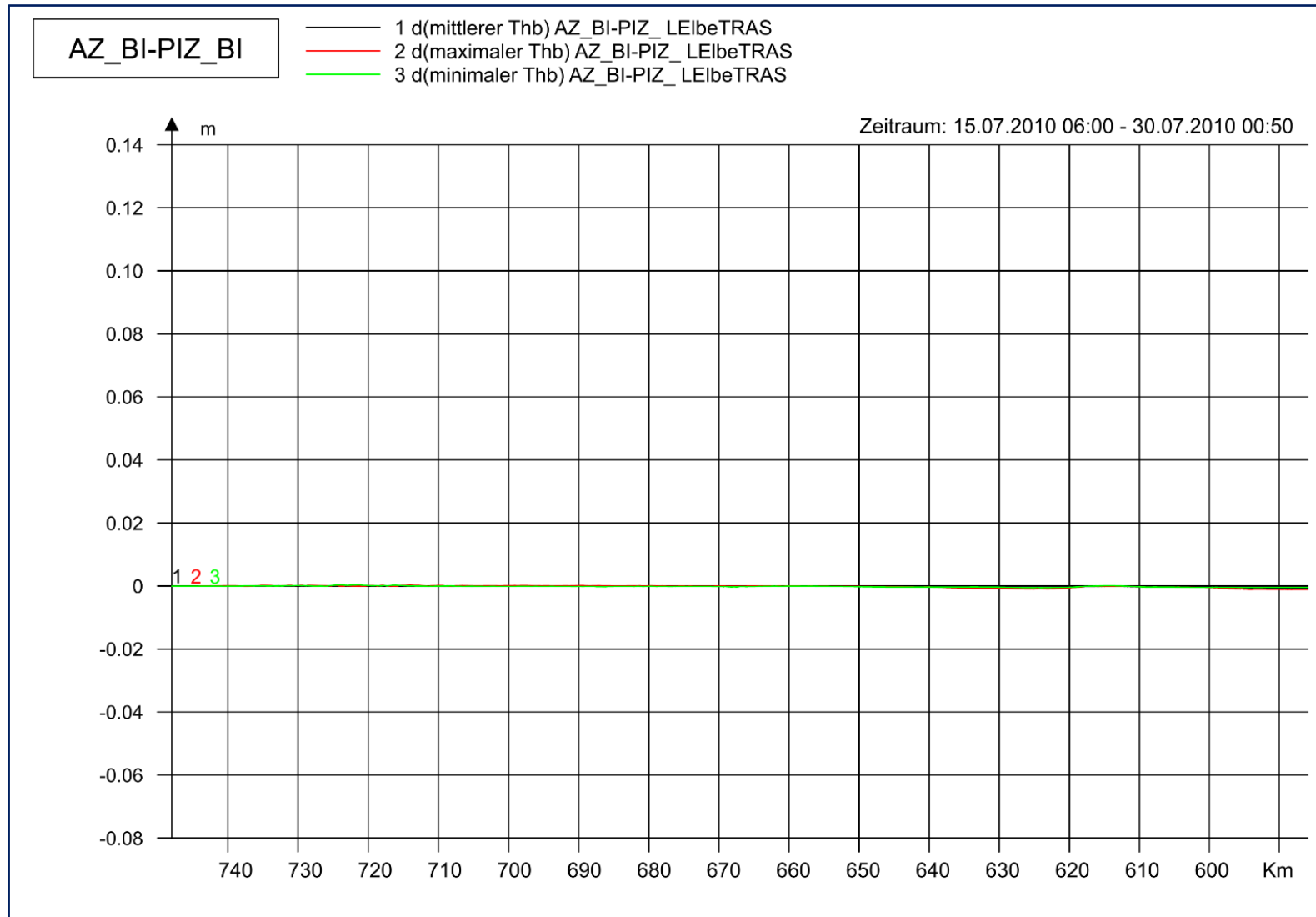


Bild 8: Differenz des Tidehubs (AZ_BI - PIZ_BI) über den Querschnitt integriert bei $Q=350 \text{ m}^3/\text{s}$.

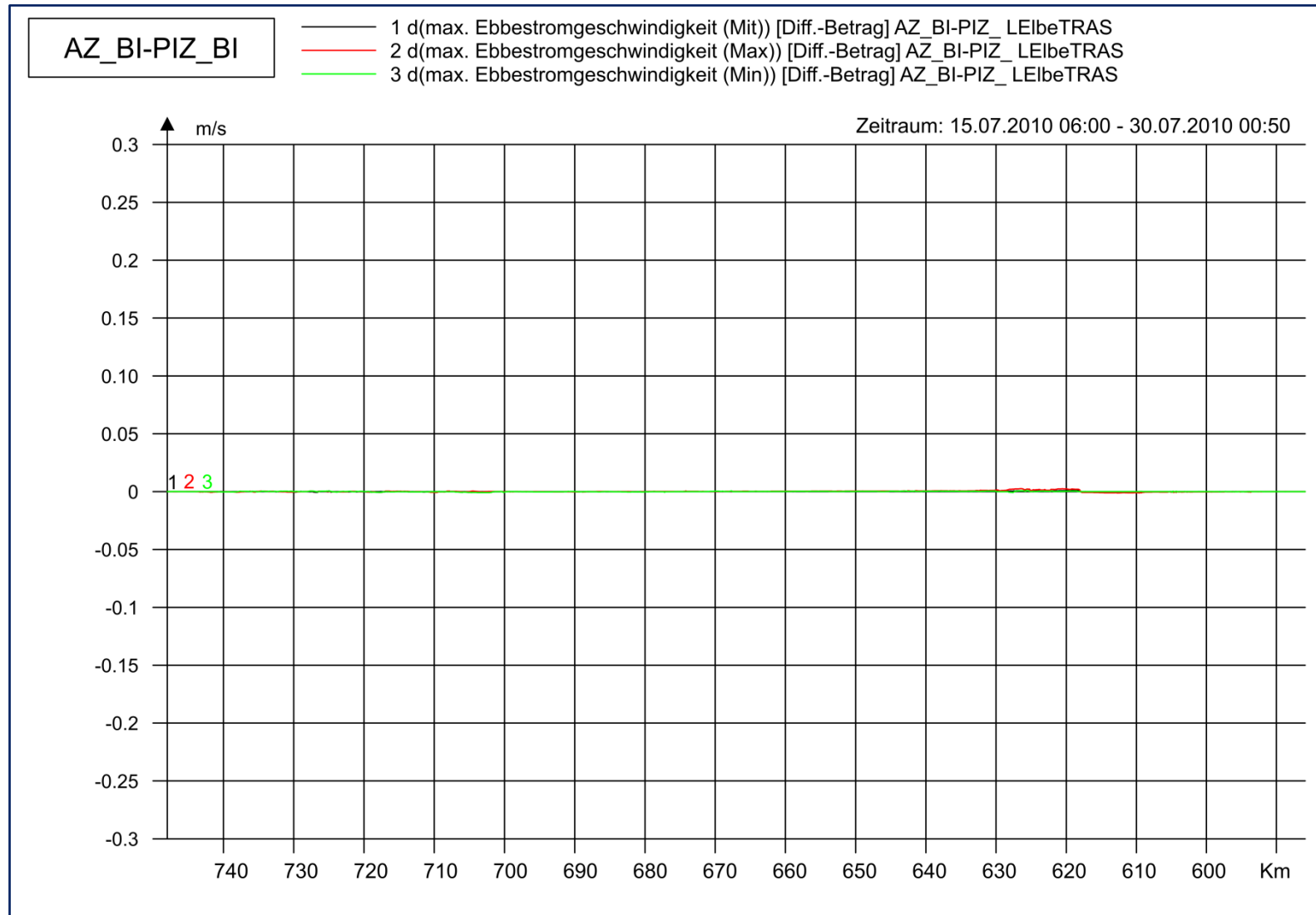


Bild 9: Differenz der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit (AZ_BI – PIZ_BI) über den Querschnitt integriert bei $Q=350 \text{ m}^3/\text{s}$.

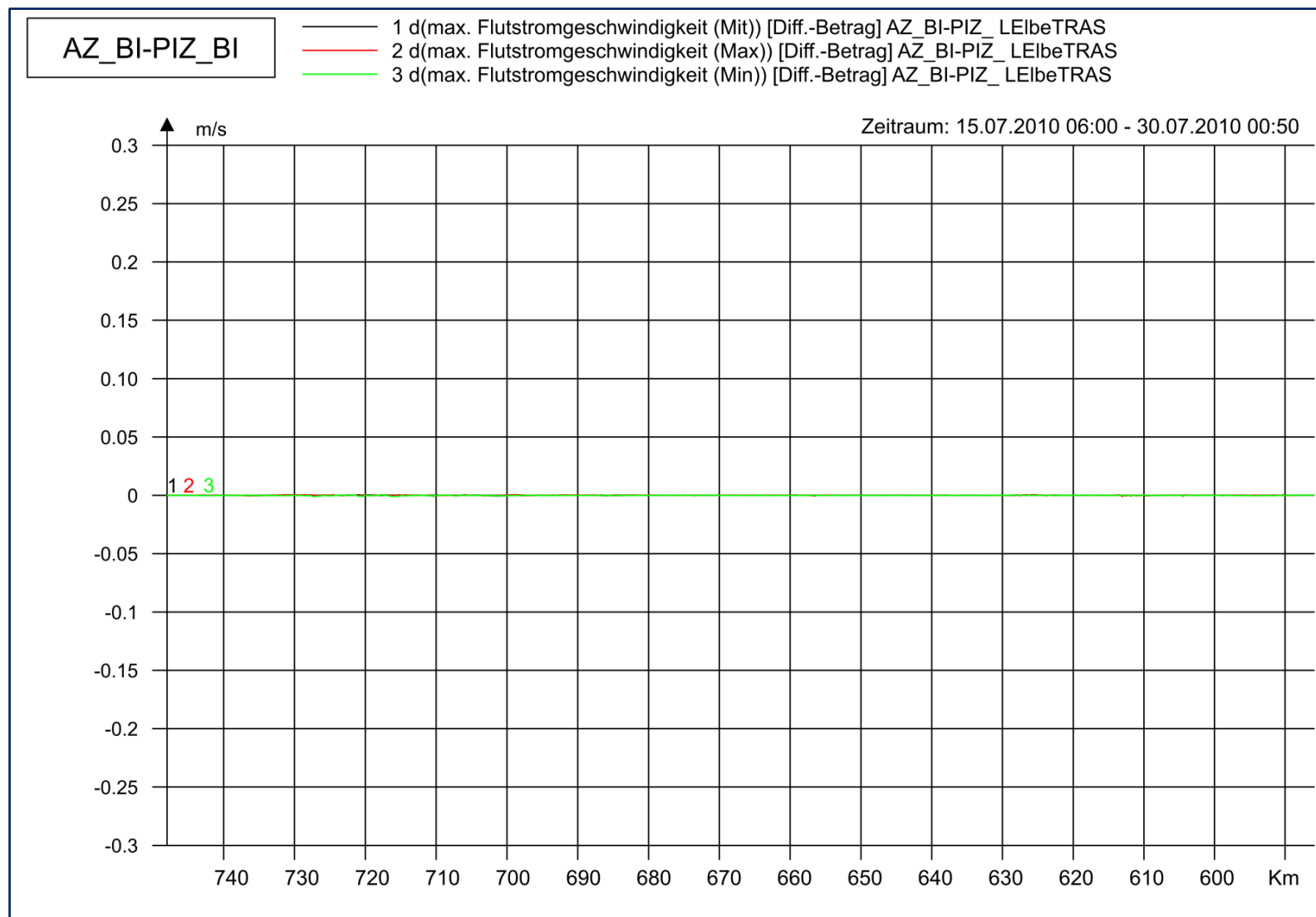


Bild 10: Differenz der maximalen Flutstromgeschwindigkeit (AZ_BI – PIZ_BI) über den Querschnitt integriert bei $Q=350 \text{ m}^3/\text{s}$.

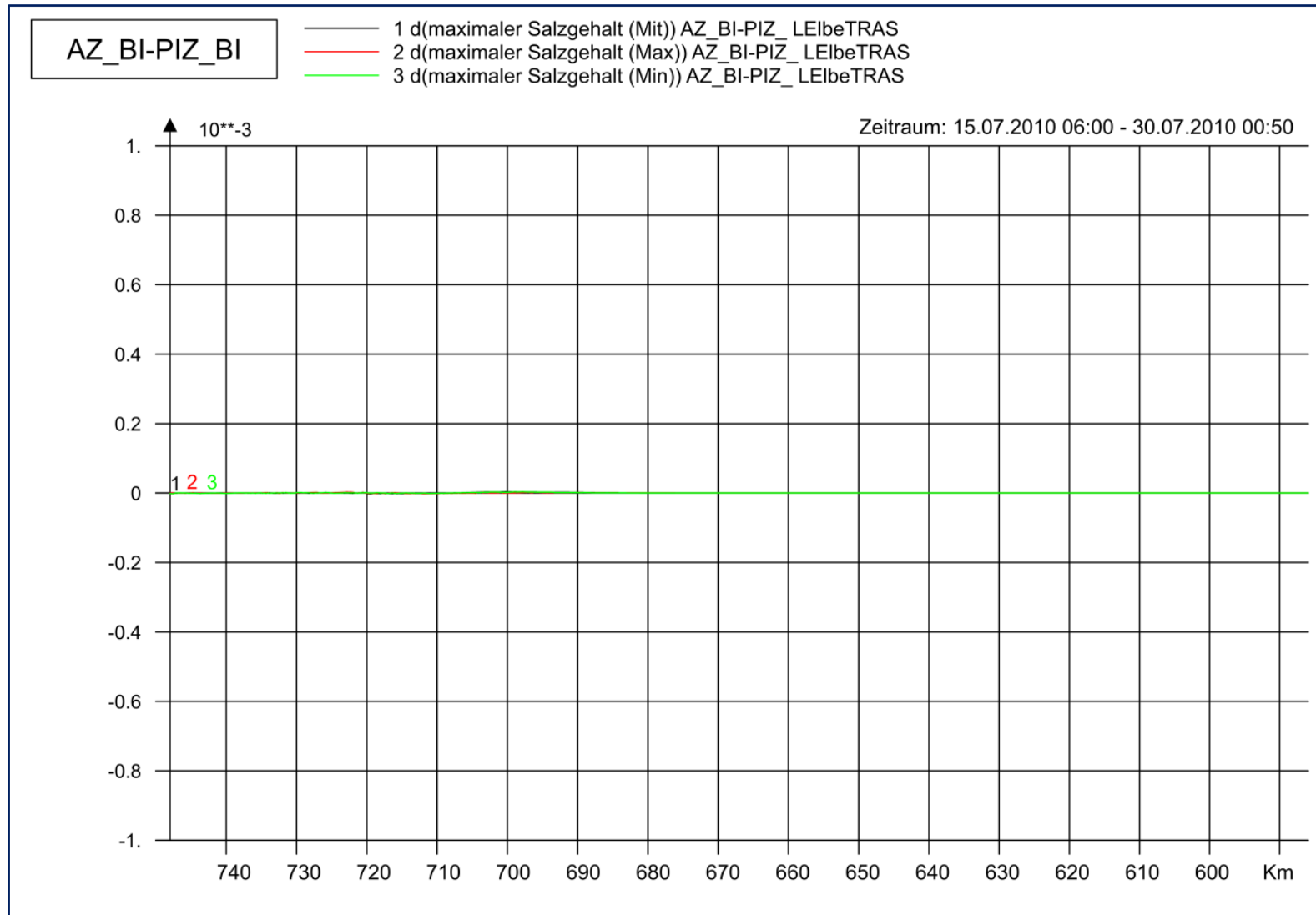


Bild 11: Differenz des maximalen Salzgehalts (AZ_BI – PIZ_BI) über den Querschnitt integriert bei $Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$.

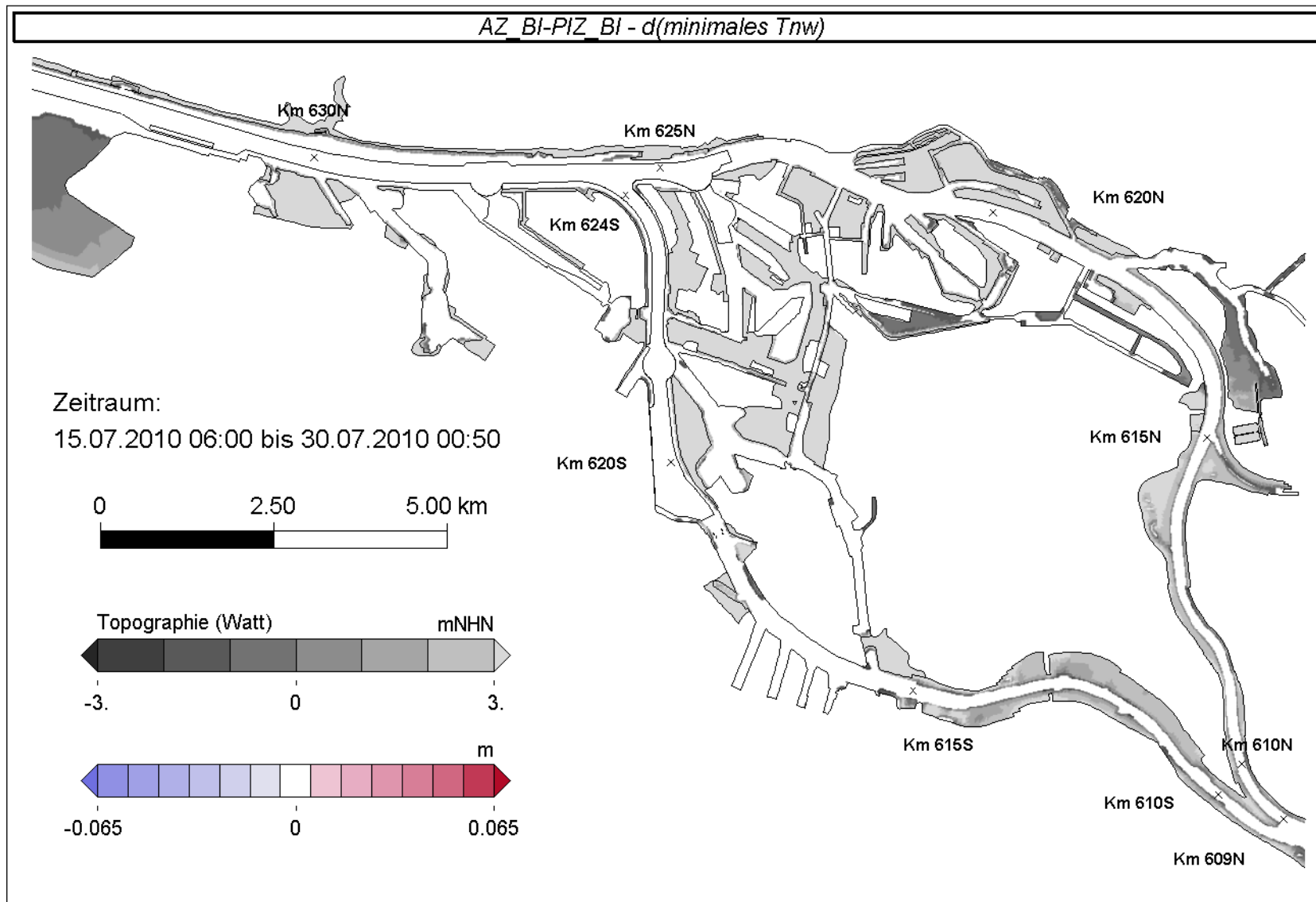


Bild 12: Differenz des minimalen Tideniedrigwassers (AZ_BI – PIZ_BI) im Bereich Hamburg bei $Q=350 \text{ m}^3/\text{s}$.

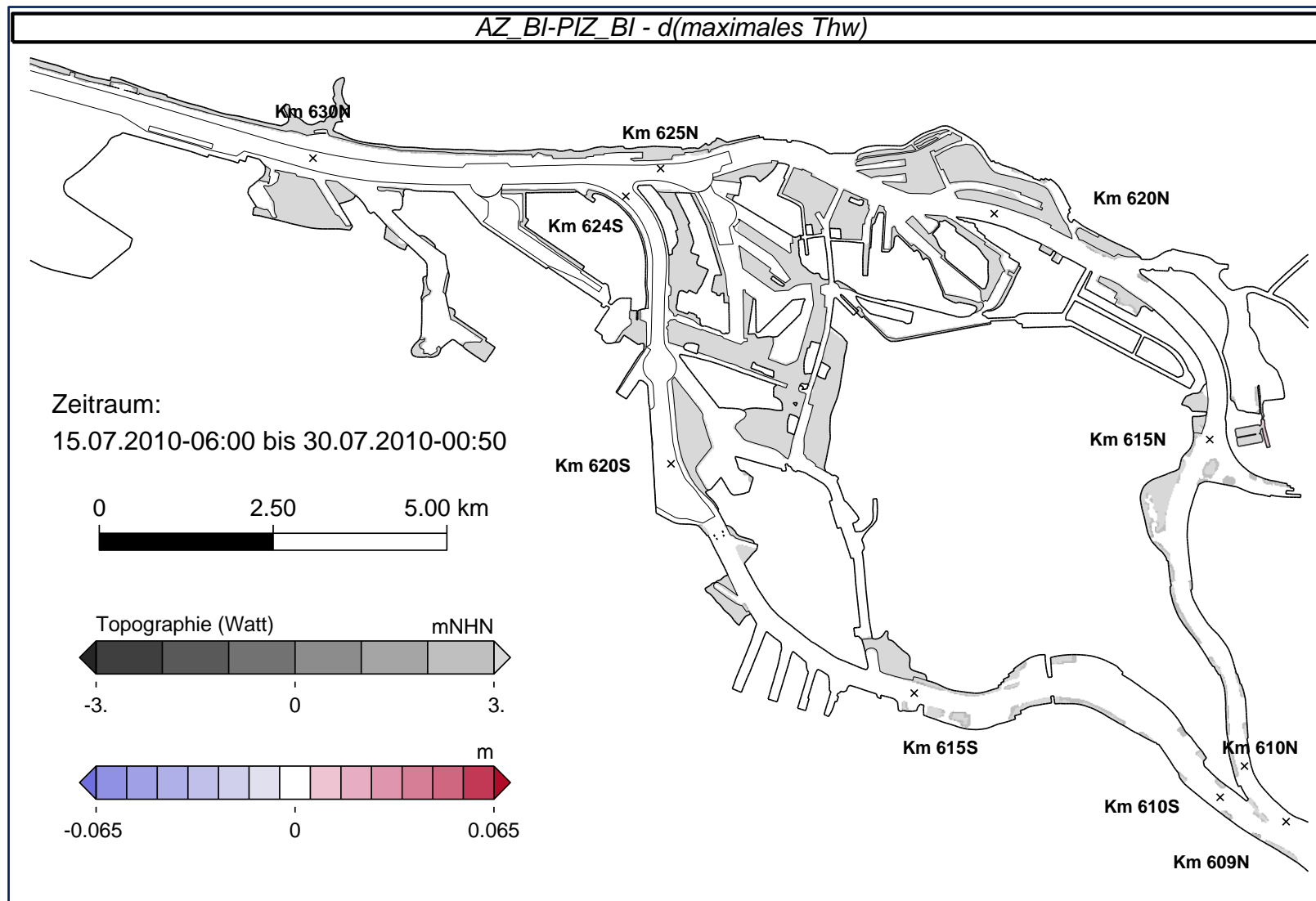


Bild 13: Differenz des maximalen Tidehochwassers (AZ BI – PIZ BI) im Bereich Hamburg bei $Q=350 \text{ m}^3/\text{s}$.

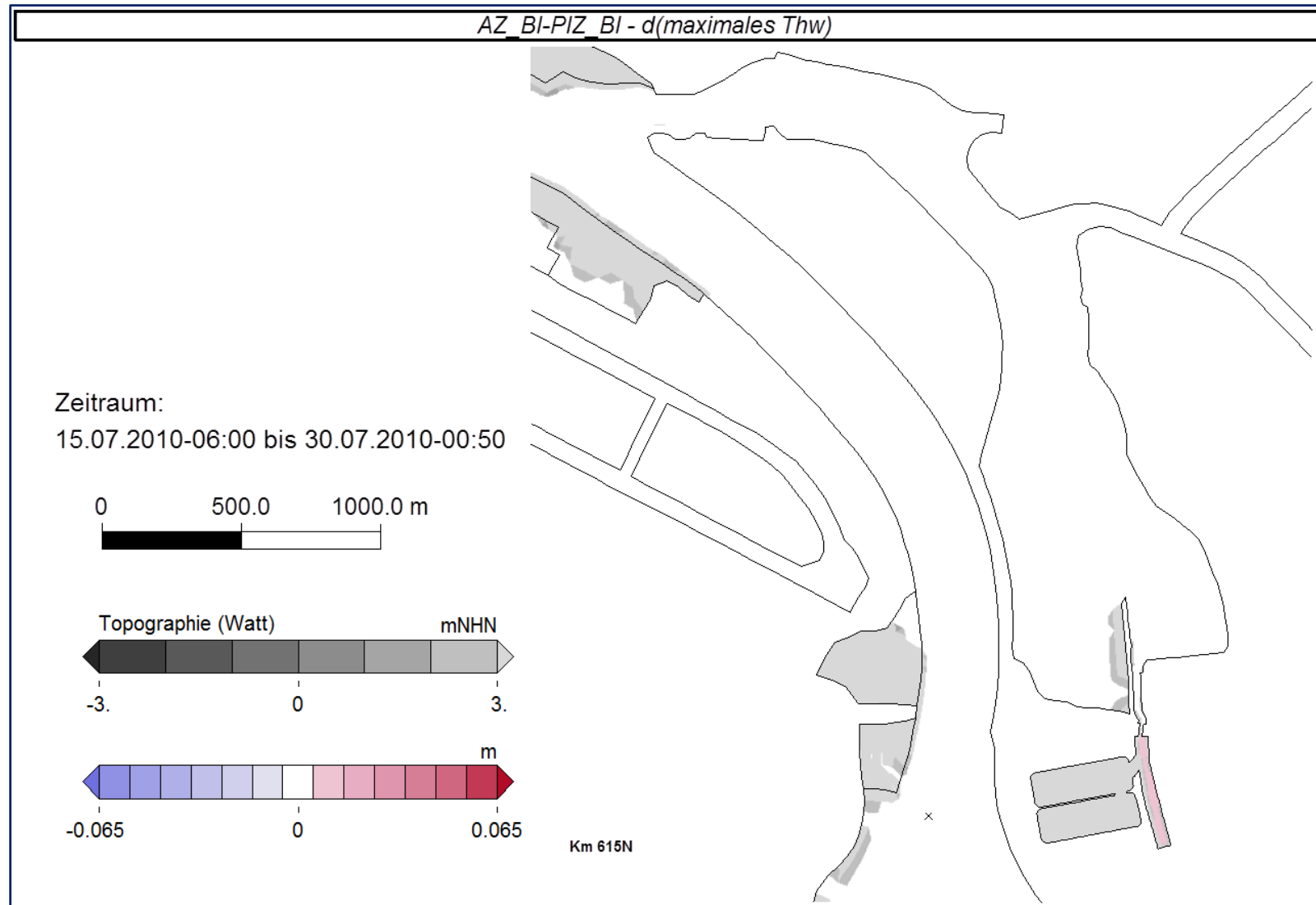


Bild 14: Differenz des maximalen Tidehochwassers ($AZ_{BI} - PIZ_{BI}$) im Bereich Billwerder bei $Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$.

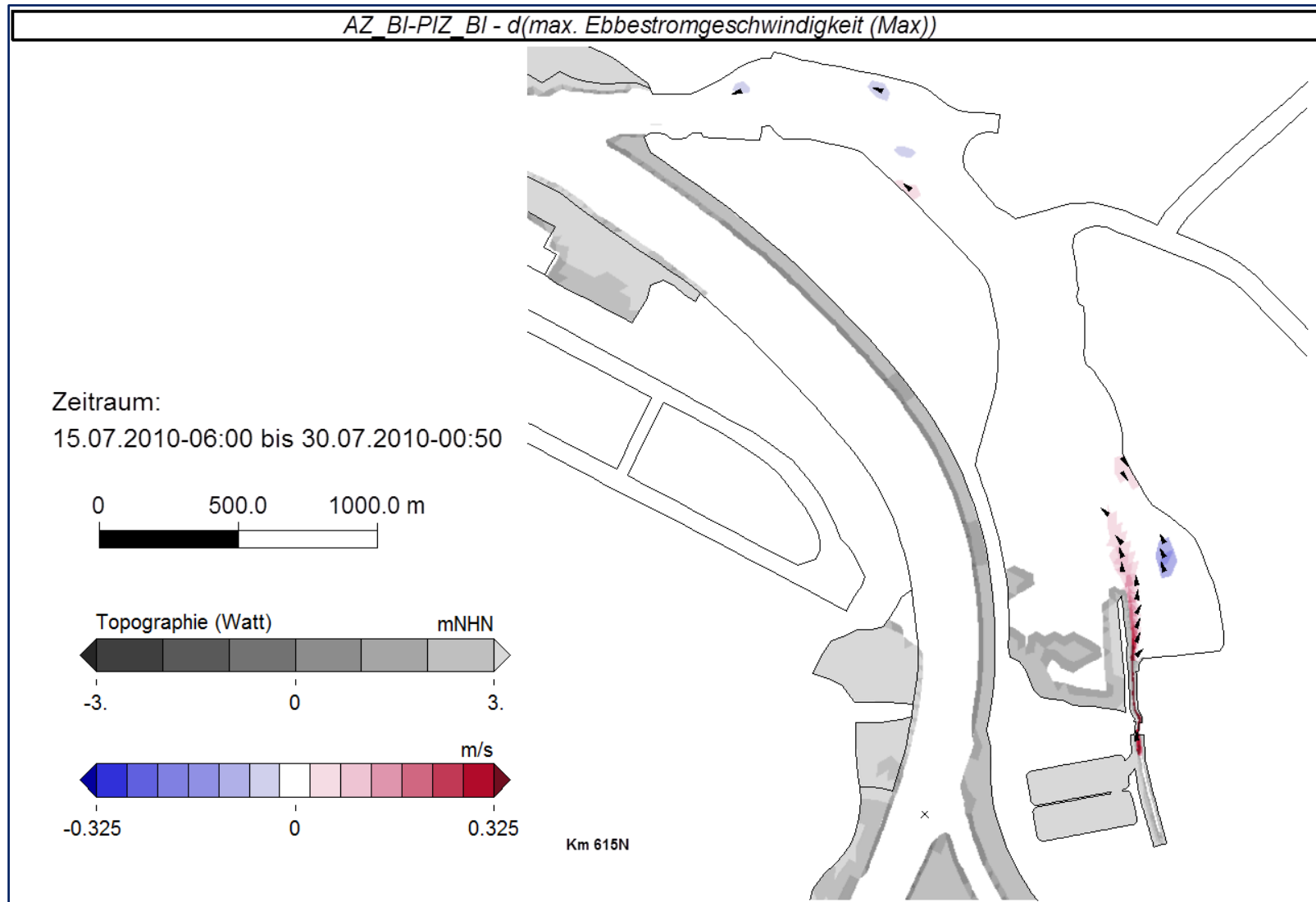


Bild 15: Differenz des Maximums der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit ($AZ_{BI} - PIZ_{BI}$) im Bereich Billwerder ($Q=350 \text{ m}^3/\text{s}$).

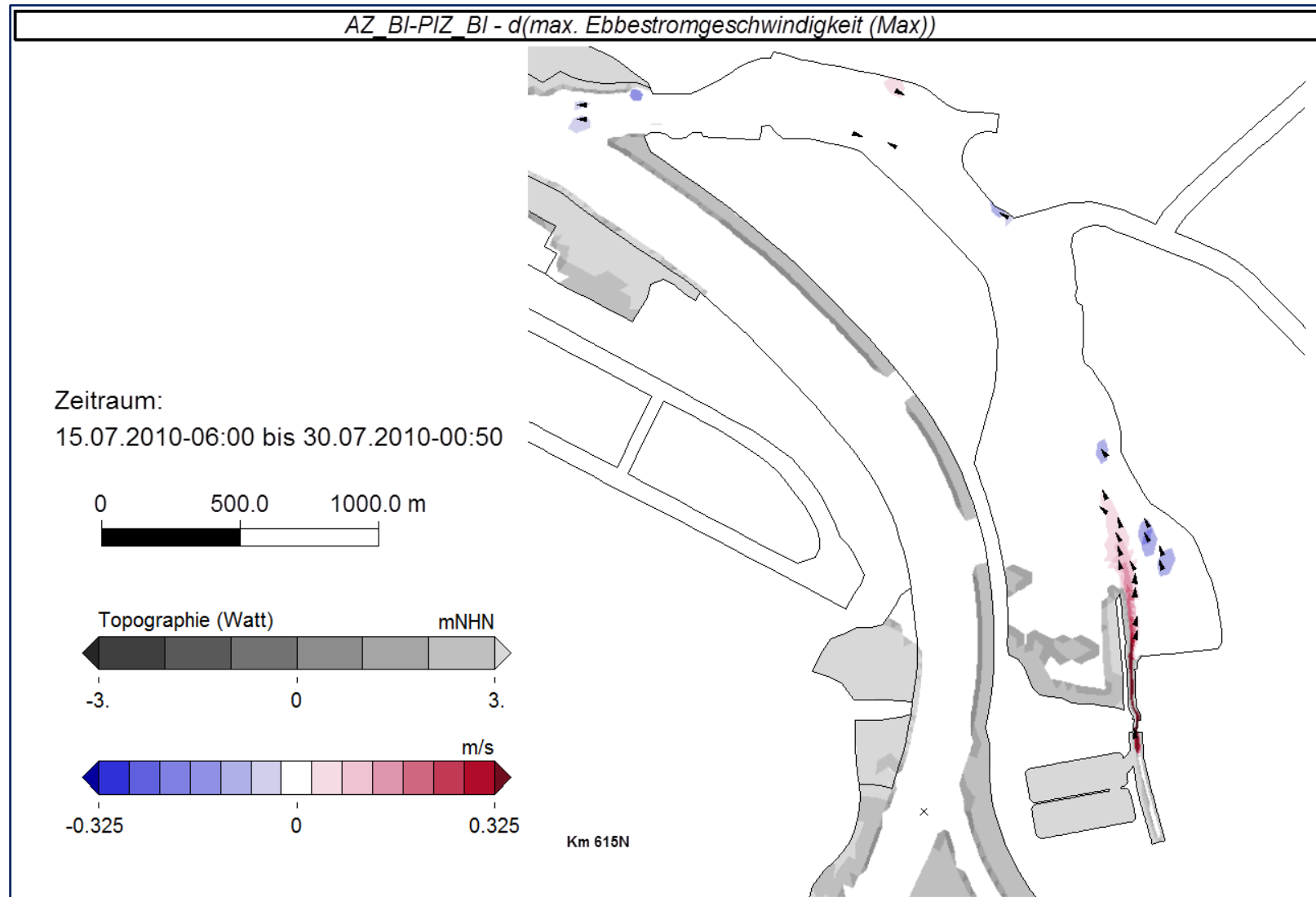


Bild 16: Differenz des Maximums der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit ($AZ_{BI} - PI_{BI}$) im Bereich Billwerder ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).

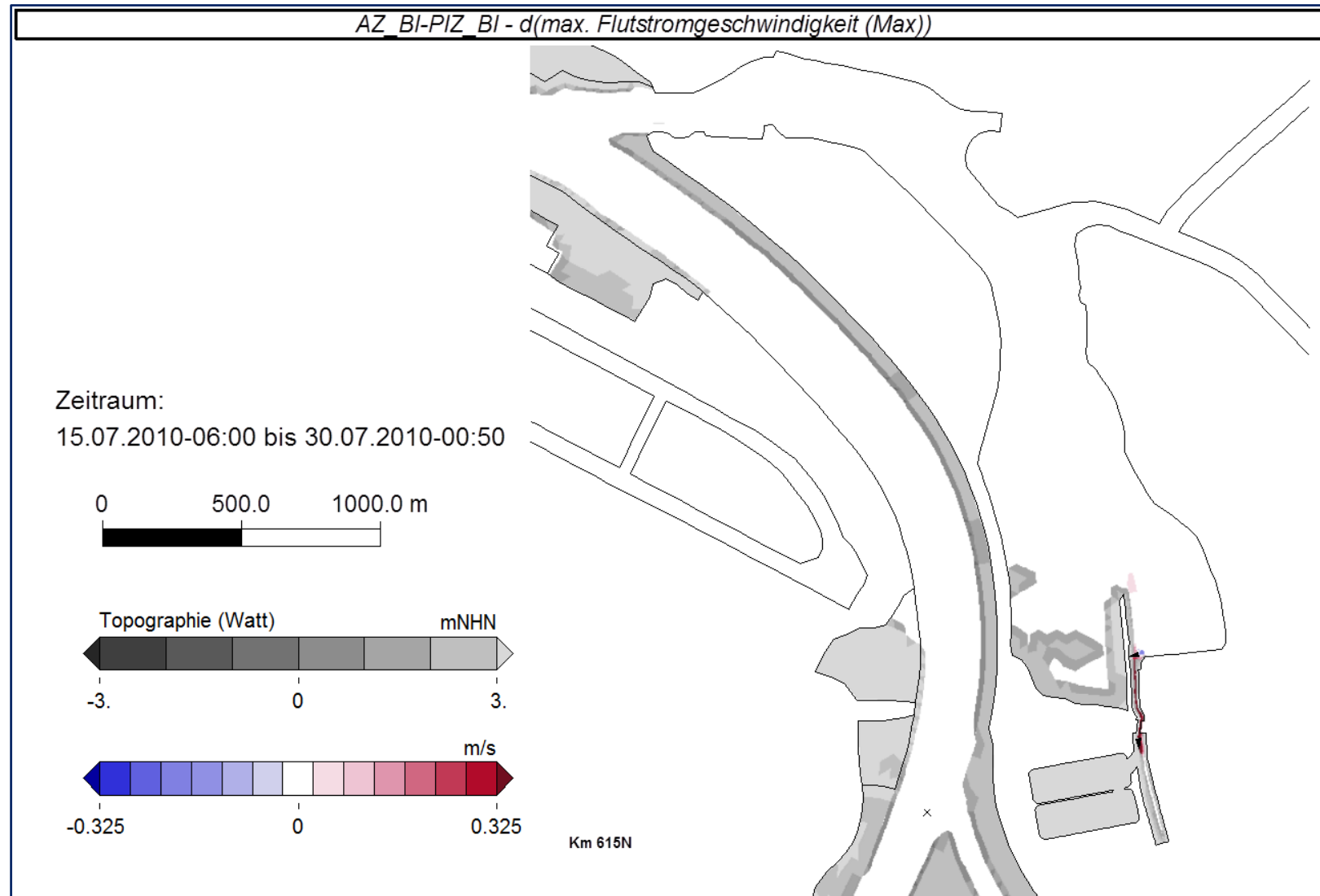


Bild 17: Differenz des Maximums der maximalen Flutstromgeschwindigkeit (AZ_BI - PI_BI) im Bereich Billwerder ($Q=350 \text{ m}^3/\text{s}$).

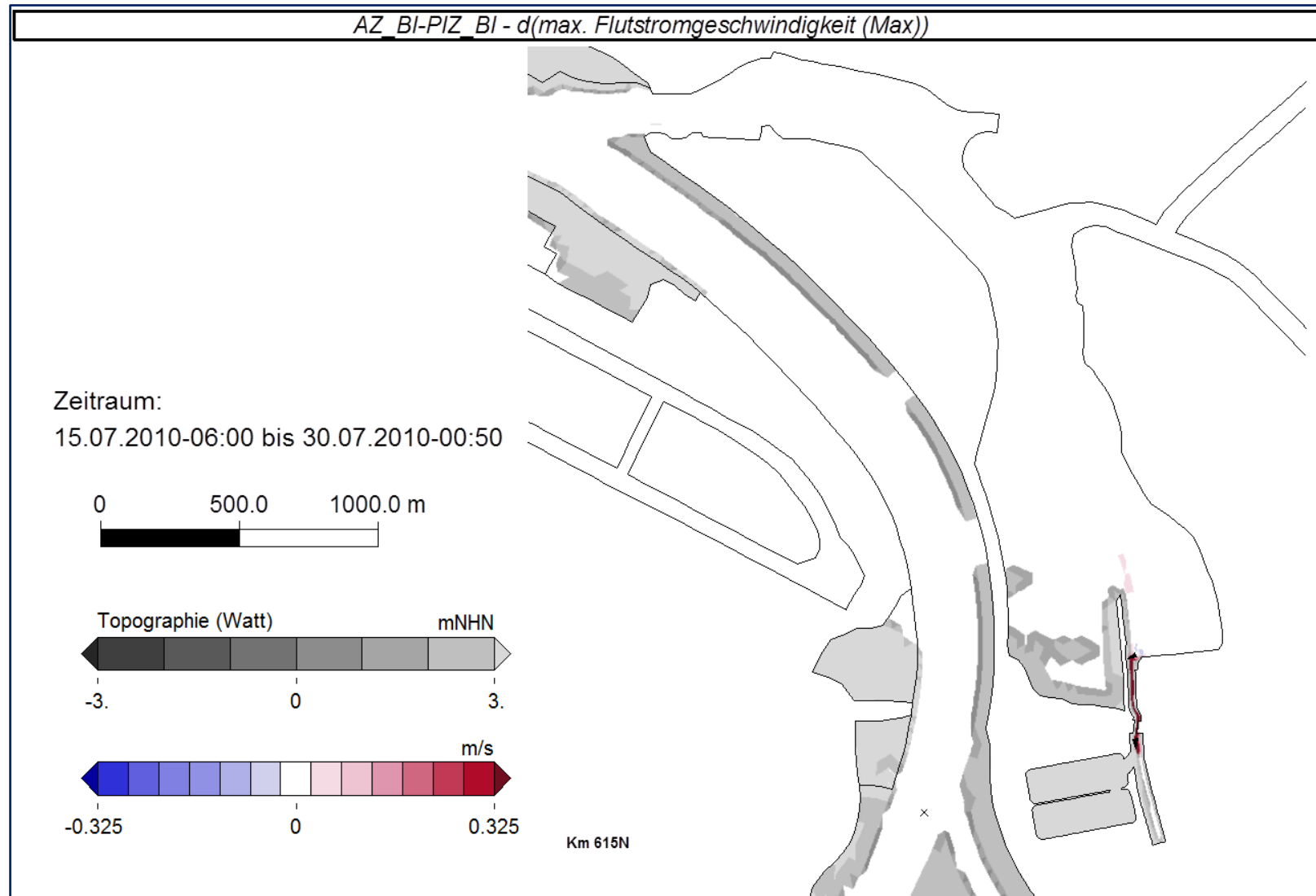


Bild 18: Differenz des Maximums der maximalen Flutstromgeschwindigkeit ($AZ_{BI} - PI_{BI}$) im Bereich Billwerder ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).

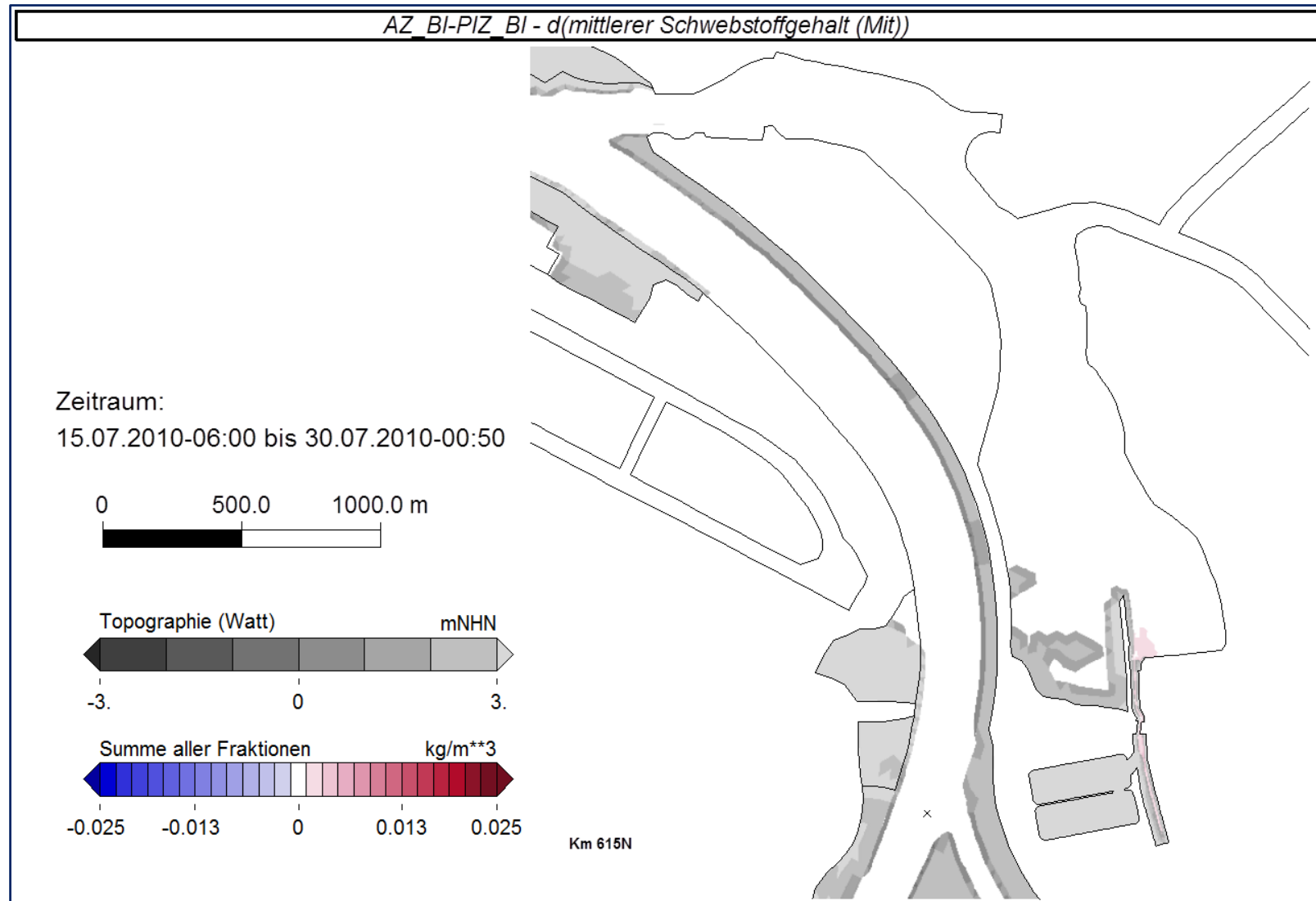


Bild 19: Differenz der mittleren Schwebstoffkonzentrationen ($AZ_{BI} - PI_{BI}$) im Bereich Billwerder ($Q=350 \text{ m}^3/\text{s}$).

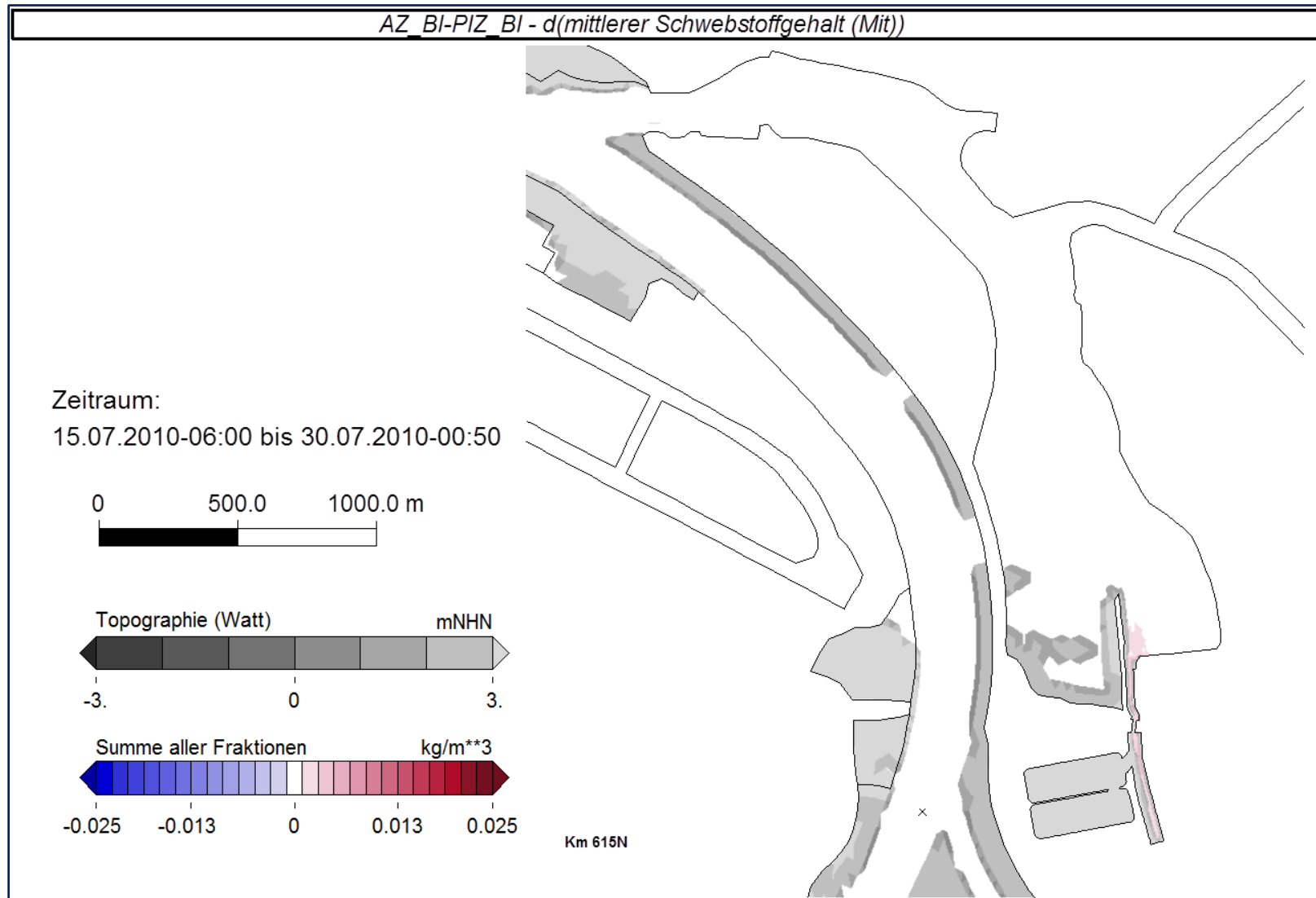


Bild 20: Differenz der mittleren Schwebstoffkonzentrationen ($AZ_{BI} - PI_{BI}$) im Bereich Billwerder ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).

5 Tidekennwertanalysen für den Ausbauzustand im Bereich Billwerder

Die Auswirkungen des Anschlusses der Tidebecken an die Billwerder Bucht sind bei einem hohen Oberwasserzufluss etwas ausgeprägter. Daher werden zunächst ausgewählte Tidekennwerte, mit denen das Strömungs- und Transportregime erklärt werden kann, für den Ausbauzustand unter Verwendung des Datensatzes dargestellt, der in einer Systemstudie mit einem konstanten Oberwasserzufluss von $Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$ berechnet wurde.

Die jeweils größten im untersuchten Zeitraum (Nipp-Spring-Zyklus, 15.07.-30.07.2010) analysierten Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten sind in Bild 21 und in Bild 22 zu sehen. Ein Vergleich dieser beiden Abbildungen zeigt bereits die Flutstromdominanz in dem Bereich Billwerder. Die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten von über 1 m/s treten eingangs der Billwerder Bucht im Bereich des Sperrwerkes auf. Bis zur Abzweigung Moorfleeter Kanal / Tidekanal bleiben sie in den größeren Wassertiefen auf einem Niveau von ca. 0,80 m/s, danach fallen sie auf ca. 0,50 m/s ab². Am südlichen Ende der Bucht, z.B. im Bereich des Holzhafens, sind die Strömungsgeschwindigkeiten sehr gering. Lediglich im Mündungsbereich des Holzhafengrabens steigen die Flutstromgeschwindigkeiten wieder an, da nun das Wasservolumen, das in die neu angeschlossenen Becken strömt, diesen Bereich passieren muss. Die maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten weisen in der Billwerder Bucht ein anderes großräumiges Muster auf. Strömungsgeschwindigkeiten größer als 0,20 m/s treten in der südlichen Hälfte nur im Bereich des Holzhafengrabens und des Entleerungsgrabens auf. Erst nördlich der Abzweigung Moorfleeter Kanal / Tidekanal steigen sie auf ca. 0,30 m/s - 0,40 m/s an.

Diese Analysegrößen sind nochmals für den südlichen Bereich der Billwerder Bucht mit dem Holzhafen und den beiden Becken in Bild 23 und Bild 24 zu sehen. Die größten Strömungsgeschwindigkeiten überschreiten im Holzhafengraben 1 m/s, südlich der Autobahnbrücke im Entleerungsgraben sind sie mit weniger als ca. 0,80 m/s geringer, und in den Becken treten nur in den tiefen Prielen maximale Strömungsgeschwindigkeiten von ca. 0,40 m/s auf.

Auch der Mittelwert des Verhältnisses der maximalen Flutstromgeschwindigkeit zur maximalen Ebbestromgeschwindigkeit (F:E-Verhältnis) ist in der gesamten Billwerder Bucht bis auf wenige Bereiche größer als „1“, d.h. die maximale Flutstromgeschwindigkeit ist größer als die maximale Ebbestromgeschwindigkeit (Bild 25). In Bild 26 ist diese Analysegröße nochmals für den Nahbereich der Maßnahme dargestellt. Im Zulaufbereich wechseln sich flut- und ebbestromdominante Abschnitte ab, in den Prielen der Becken überwiegt die Flutstromdominanz. Der maximale Schwebstoffgehalt ist in Bild 27 als Mittelwert über den Analysezeitraum im Bereich der Bill-

² Am 21.03.2017 wurden in diesem Bereich von HPA Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten und der Schwebstoffkonzentrationen durchgeführt. Die maximale Flutstromgeschwindigkeit betrug 0,51 m/s, für die maximale Ebbestromgeschwindigkeit wurden 0,22 m/s gemessen. Die Strömungsverhältnisse in der Billwerder Bucht werden demnach gut vom Modell reproduziert.

Die Schwebstoffkonzentrationen lagen im Mittel für die Flutphase bei 0,036 g/l, in der Ebbephase bei 0,019 g/l. In dieser Größenordnung liegen auch die Modellergebnisse.

Quelle: Pers. Kommunikation mit HPA, email am 01.06.2017

werder Bucht dargestellt. Bis zur Abzweigung Moorfleeter Kanal / Tidekanal werden Massenkonzentrationen von bis zu $0,05 \text{ kg/m}^3$ erreicht, danach werden sie bis zum südlichen Ende der Billwerder Bucht immer geringer. Es findet eine Sortierung der Sedimente statt, vornehmlich die kleinsten Fraktionen mit der geringsten Sinkgeschwindigkeit erreichen die südlichen Bereiche. Die in Bild 28 dargestellte mittlere Schwebstoffgehaltsvariation verdeutlicht diese abnehmende Schwebstoffdynamik. Die Variation der Schwebstoffgehalte beträgt im nördlichen Teil der Billwerder Buch bis zu $0,05 \text{ kg/m}^3$ und fällt dann auf Werte von ca. $0,01 \text{ kg/m}^3 - 0,02 \text{ kg/m}^3$ ab.

Die schon anhand der Analyse der Strömungsgeschwindigkeiten erkannte Flutstromdominanz dieses Bereiches zeigt sich auch an dem F:E-Verhältnis des advektiven Schwebstofftransportes. Dieser Verhältniswert wird für jede der 28 Tiden in dem untersuchten Nipp-Springzyklus analysiert. Die Dominanz des flutstromorientierten Transportes zeigt sich deutlich in den Mittelwerten (Bild 29), aber auch schon in den Minimalwerten (Bild 30) dieser Analysegröße. Vom Sperrwerk eingangs der Billwerder Bucht an herrscht in den Bereichen größerer Wassertiefen ein flutstromorientierter Transport vor, der sich bis zum Holzhafen und der Billwerder Insel hinzieht. Ein ebbestromorientierter Transport wird ausschließlich in flachen Randbereichen detektiert. Das heißt, selbst bei energiearmen Nipptiden und dem hier untersuchten hohen Oberwasser ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$) findet mit jeder Tide ein Sedimenteintrag statt³. Bild 31 und Bild 32 zeigen diese Größen nochmals etwas detaillierter für den Bereich der Billwerder Insel. Der Schwebstofftransport im Zulaufbereich und in den Prielen zwischen den Gehölzinseln ist stets flutstromorientiert. Es gibt aber auch Phasen, in denen auf den geneigten Flächen Erosion stattfindet und ein ebbestromorientierter Transport analysiert wird (Bild 32).

Für die morphologische Entwicklung der neu gestalteten Becken kann man aus diesen Analysen schlussfolgern, dass es in den tiefer gelegenen Prielen zu einem Transport der sandigen Sedimente kommen wird. Dabei werden morphologische Strukturen entstehen, die Riffel genannt werden. In den höher gelegenen Bereichen können die Schwebstoffe in der Kenterphase der Flut sedimentieren und werden nicht wieder vollständig in der Ebbephase wieder erodiert.

In Bild 33 ist die maximale Bodenschubspannung dargestellt, skaliert bis $0,14 \text{ N/m}^2$. Dieser Wert entspricht in etwa dem Bewegungsbeginn von Sand. Diese Schubspannung wird nur im „Hauptpriel“ übertroffen und gelegentlich zwischen den Gehölzinseln. Nur an diesen Stellen ist überhaupt ein geringer Geschiebetransport zu erwarten. In den übrigen Bereichen können prinzipiell Feinsedimente abgelagert werden. Das zeigt auch das Bild 34, in dem die Unterschreitungshäufigkeit der Bodenschubspannungsklasse zwischen $0,0-0,1 \text{ N/m}^2$ zu sehen ist. Die Farbskalierung variiert nur zwischen $0,99$ bis $1,00$. Das bedeutet, dass in den rot eingefärbten Bereichen oberhalb des „Hauptpriel“ fast ausschließlich Sedimentationsbedingungen für Feinsedimente vorherrschen.

³ Dies ist eine qualitative Aussage, eine Quantifizierung für längere Episoden erfolgt in Kapitel 6

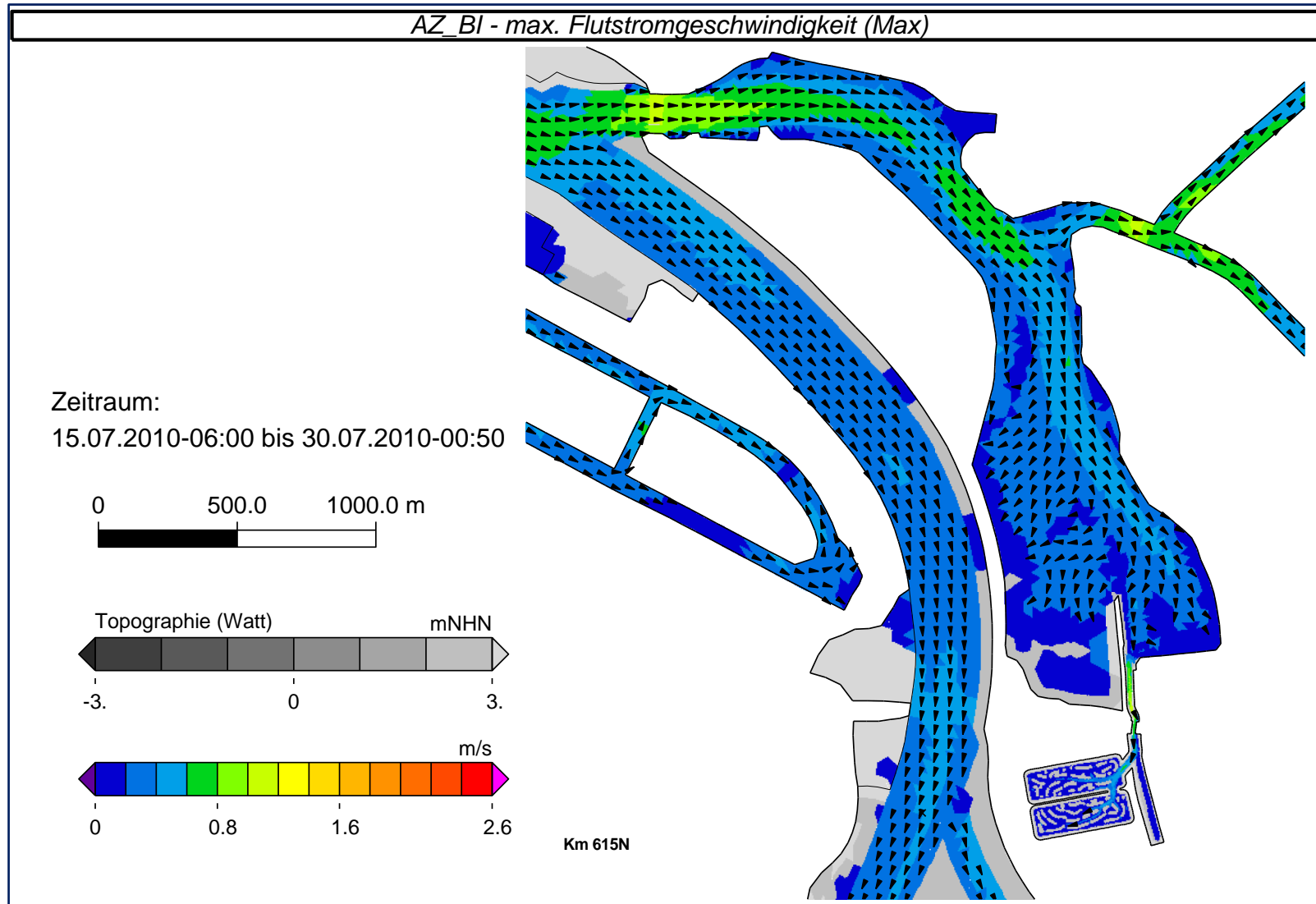


Bild 21: Maximum der maximalen Flutstromgeschwindigkeit im Bereich Billwerder ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).

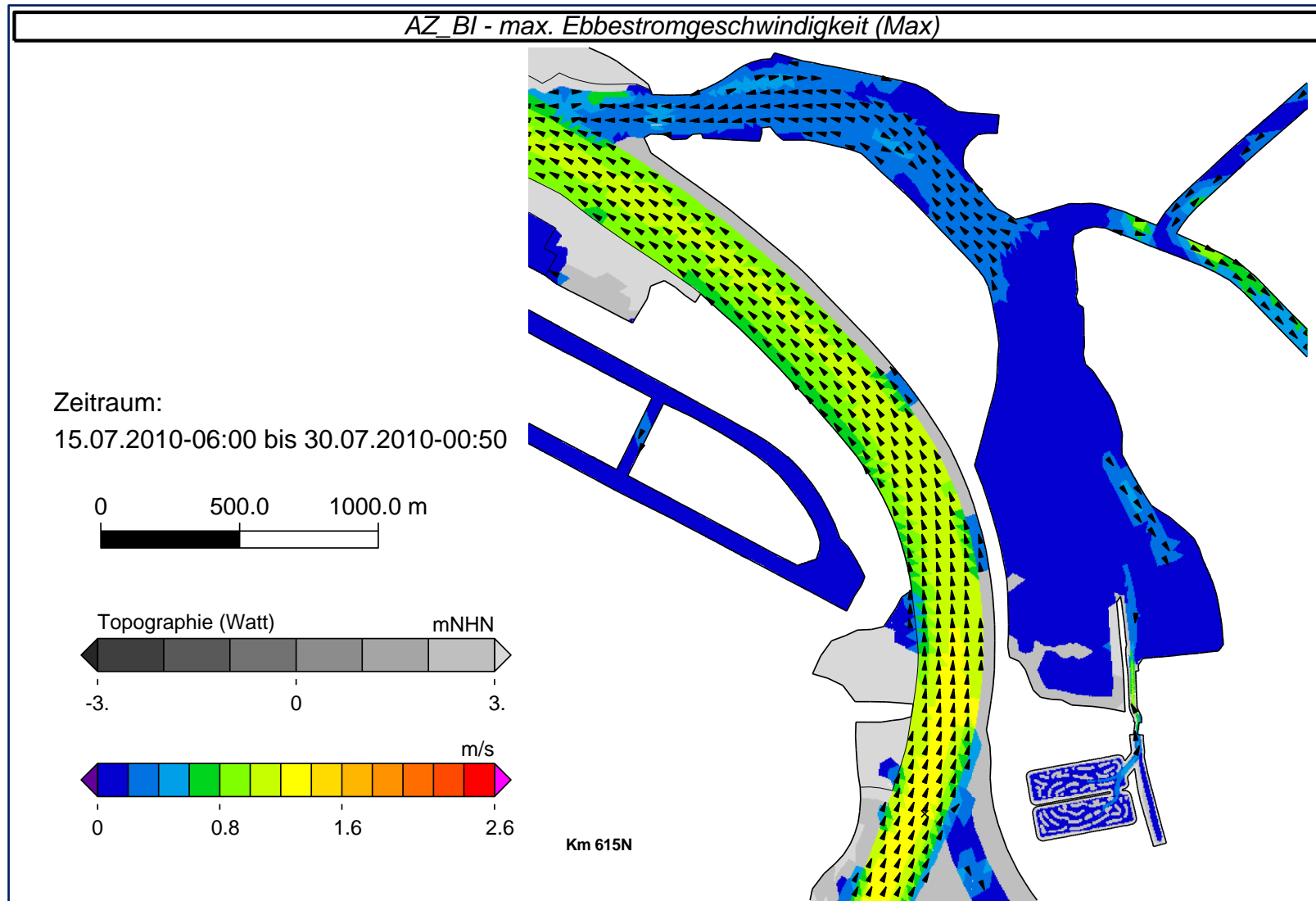


Bild 22: Maximum der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit im Bereich Billwerder ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).

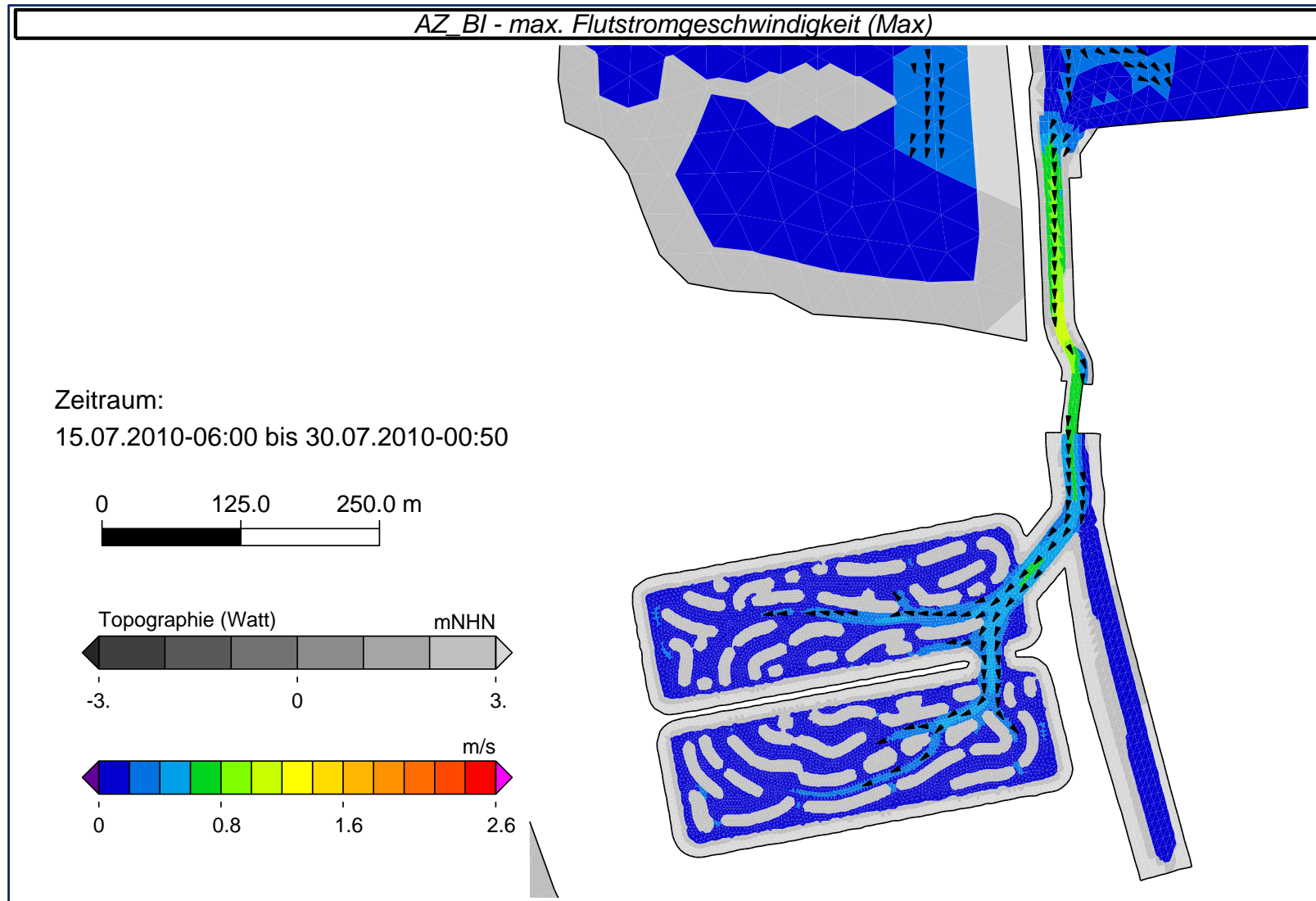


Bild 23: Maximum der maximalen Flutstromgeschwindigkeit im Bereich Billwerder Insel ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).

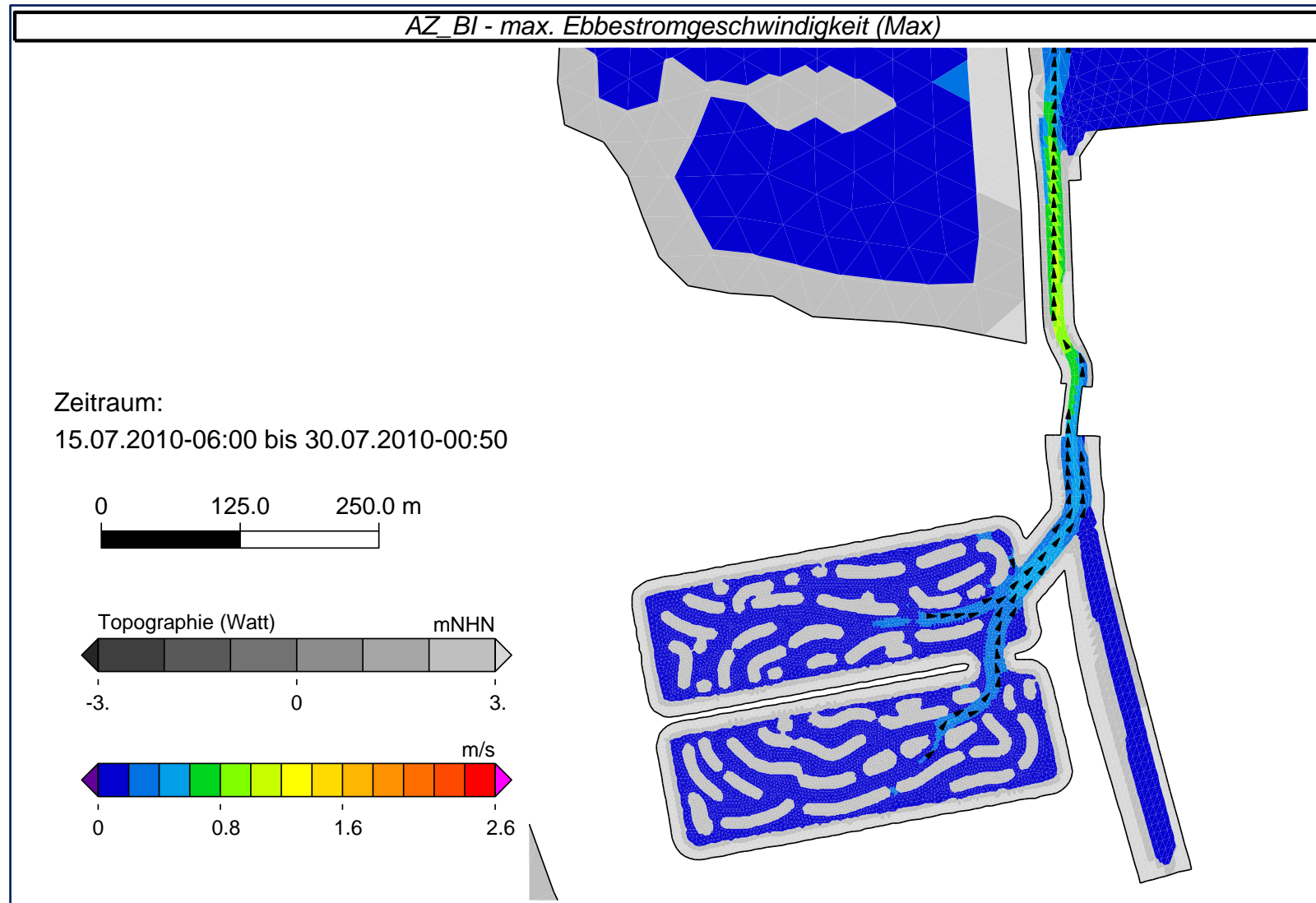


Bild 24: Maximum der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit im Bereich Billwerder Insel ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).

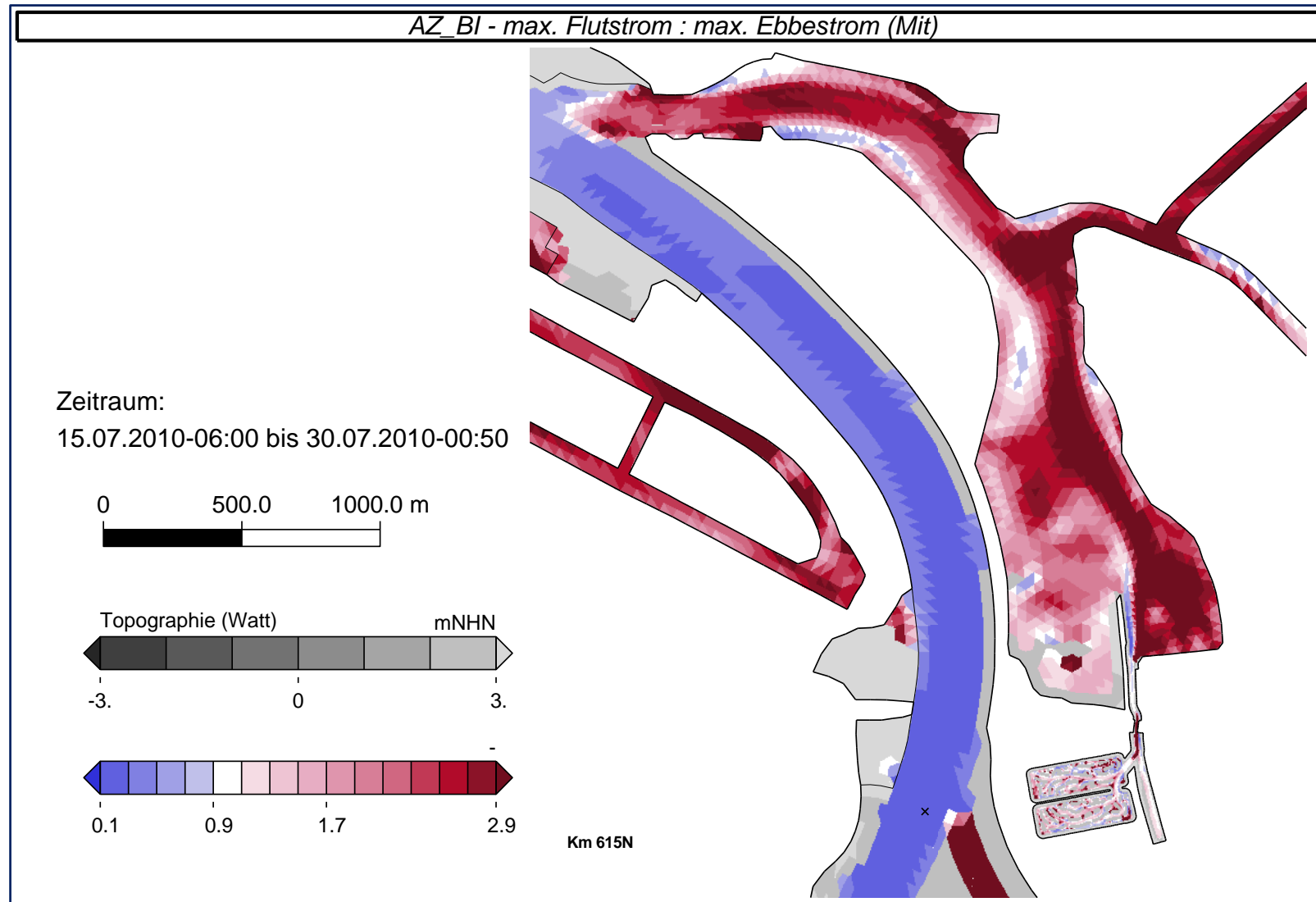


Bild 25: *F:E-Verhältnis der maximalen Strömungsgeschwindigkeit (Mit) im Bereich Billwerder Bucht ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).*

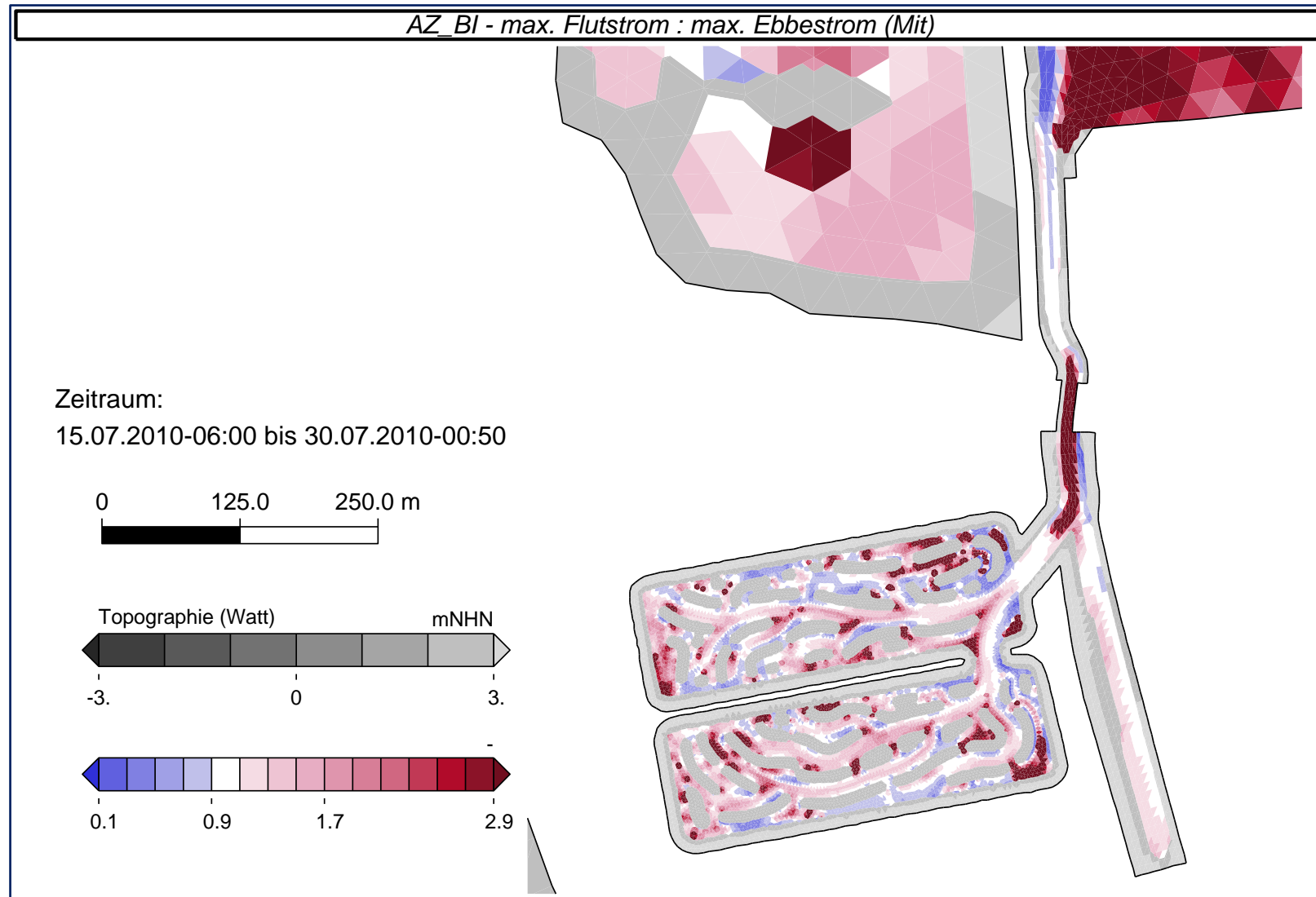


Bild 26: F:E-Verhältnis der maximalen Strömungsgeschwindigkeit (Mit) im Bereich Billwerder Insel ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).

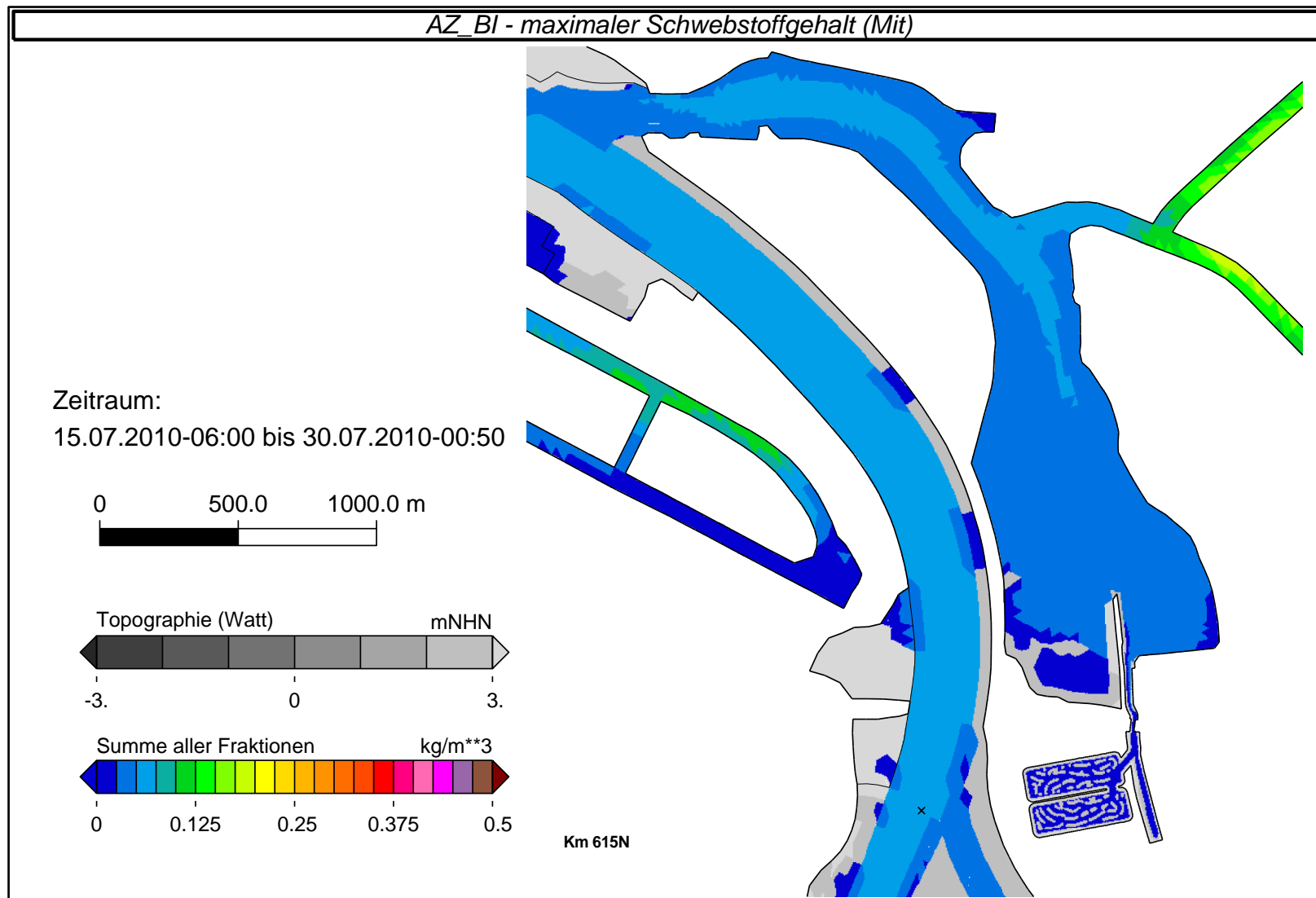


Bild 27: Maximaler Schwebstoffgehalt (Mit) im Bereich Billwerder Bucht ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).

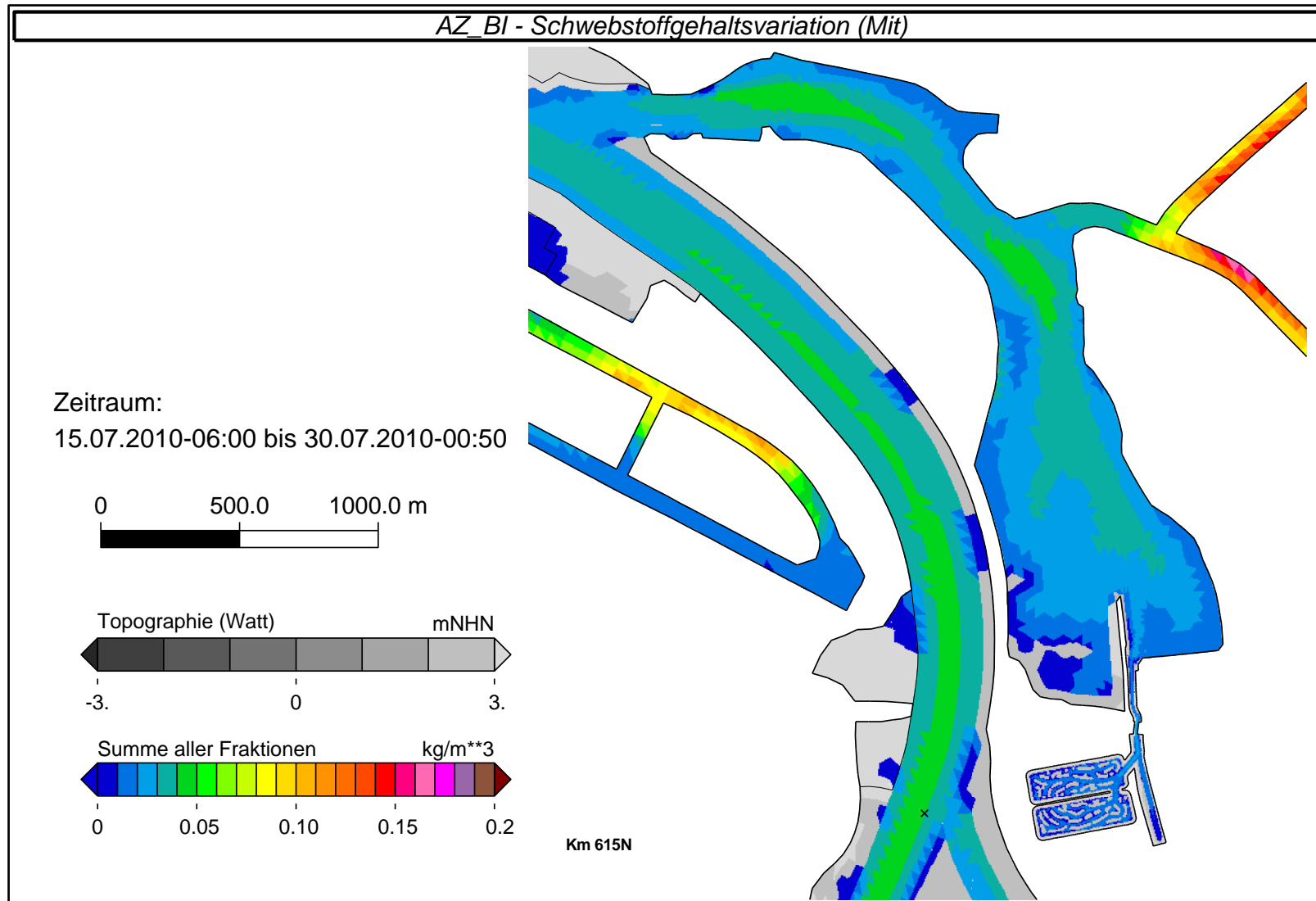


Bild 28: Mittlere Schwebstoffgehaltsvariation (Mit) im Bereich Billwerder Bucht ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).

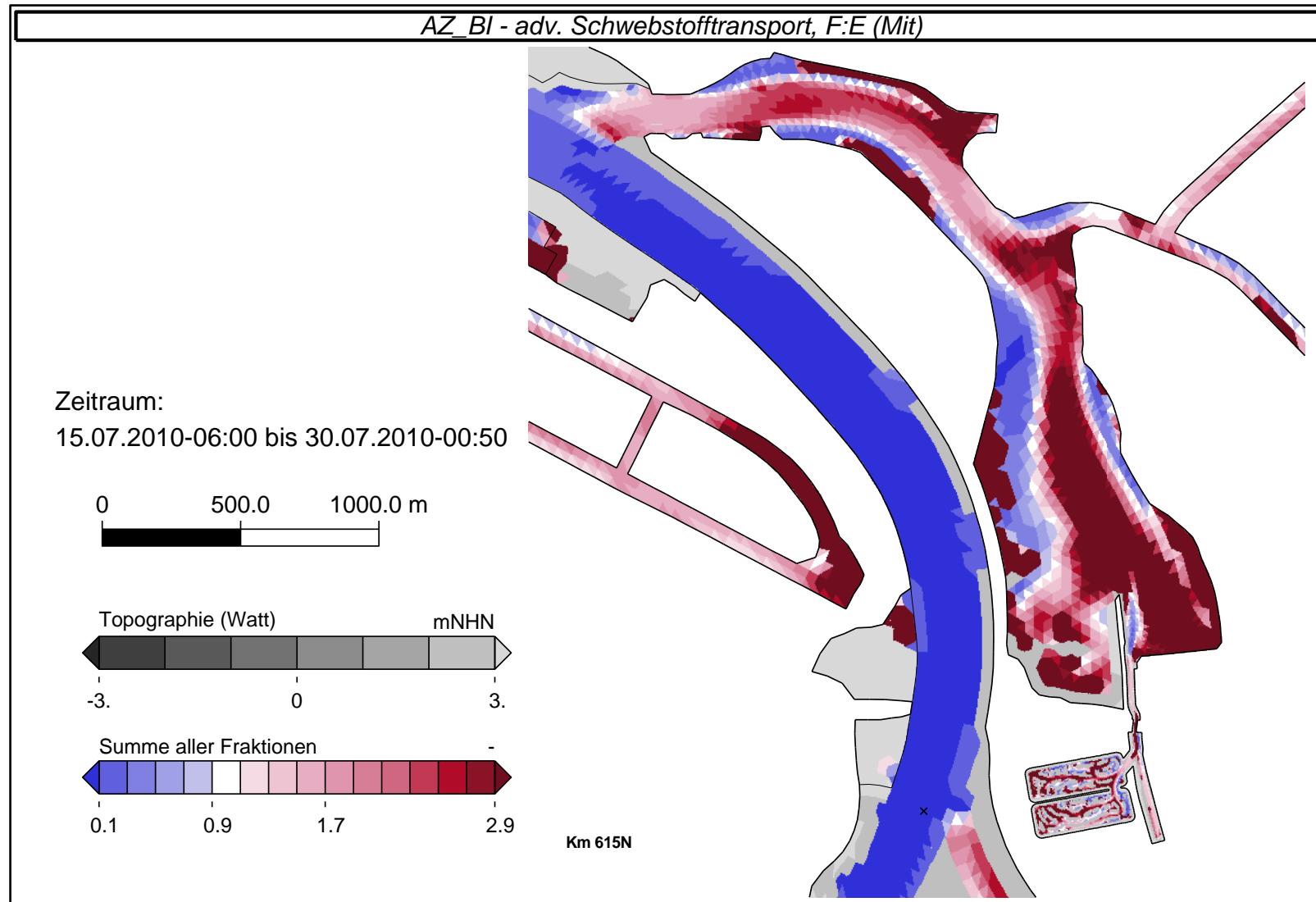


Bild 29: F:E-Verhältnis des adv. Schwebstofftransportes (Mit) im Bereich Billwerder Bucht ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).

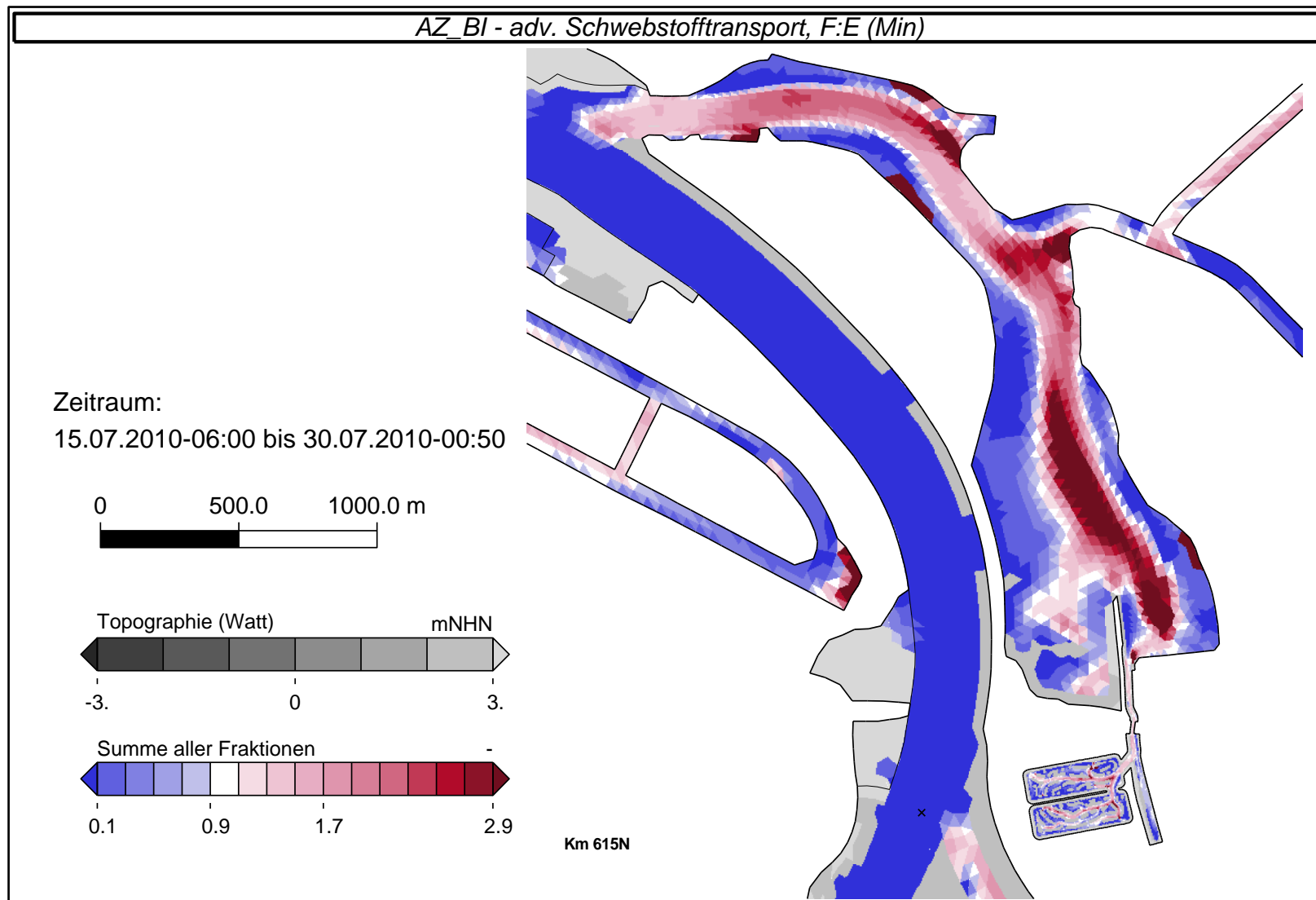


Bild 30: F:E-Verhältnis des adv. Schwebstofftransportes (Min) im Bereich Billwerder Bucht ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).

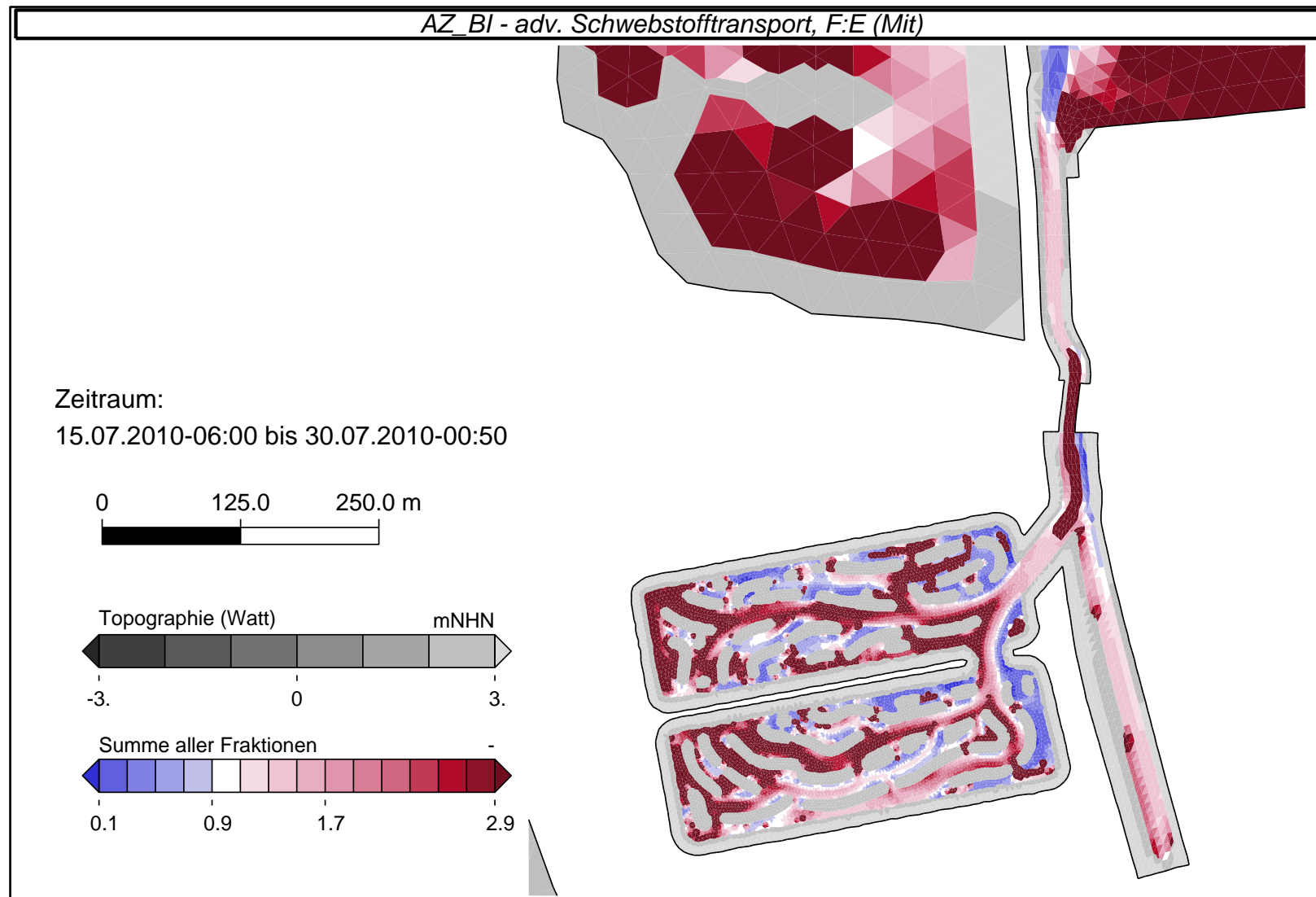


Bild 31: F:E-Verhältnis des adv. Schwebstofftransportes (Mit) im Bereich Billwerder Insel ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).

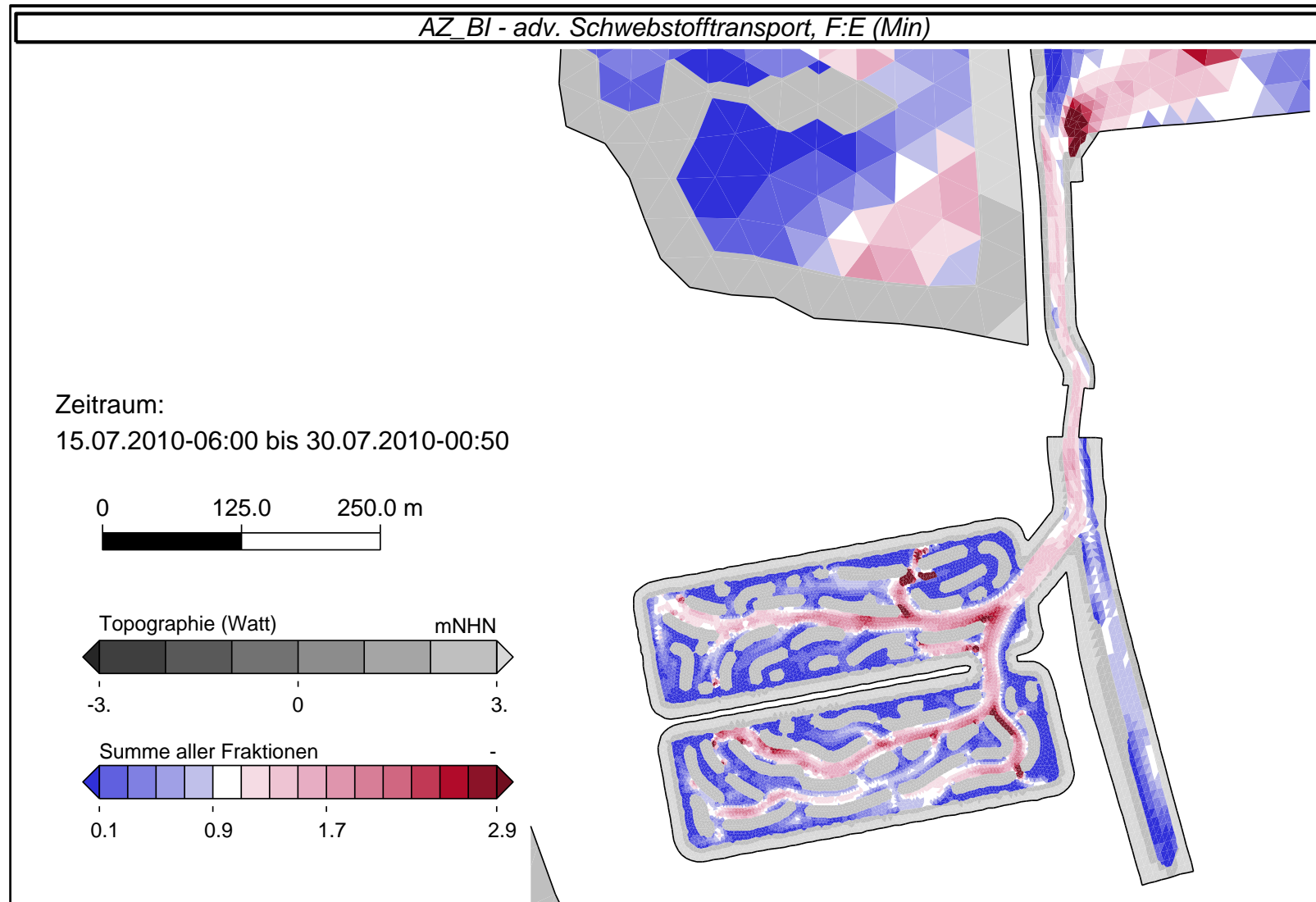


Bild 32 F:E-Verhältnis des adv. Schwebstofftransportes (Min) im Bereich Billwerder Insel ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$).

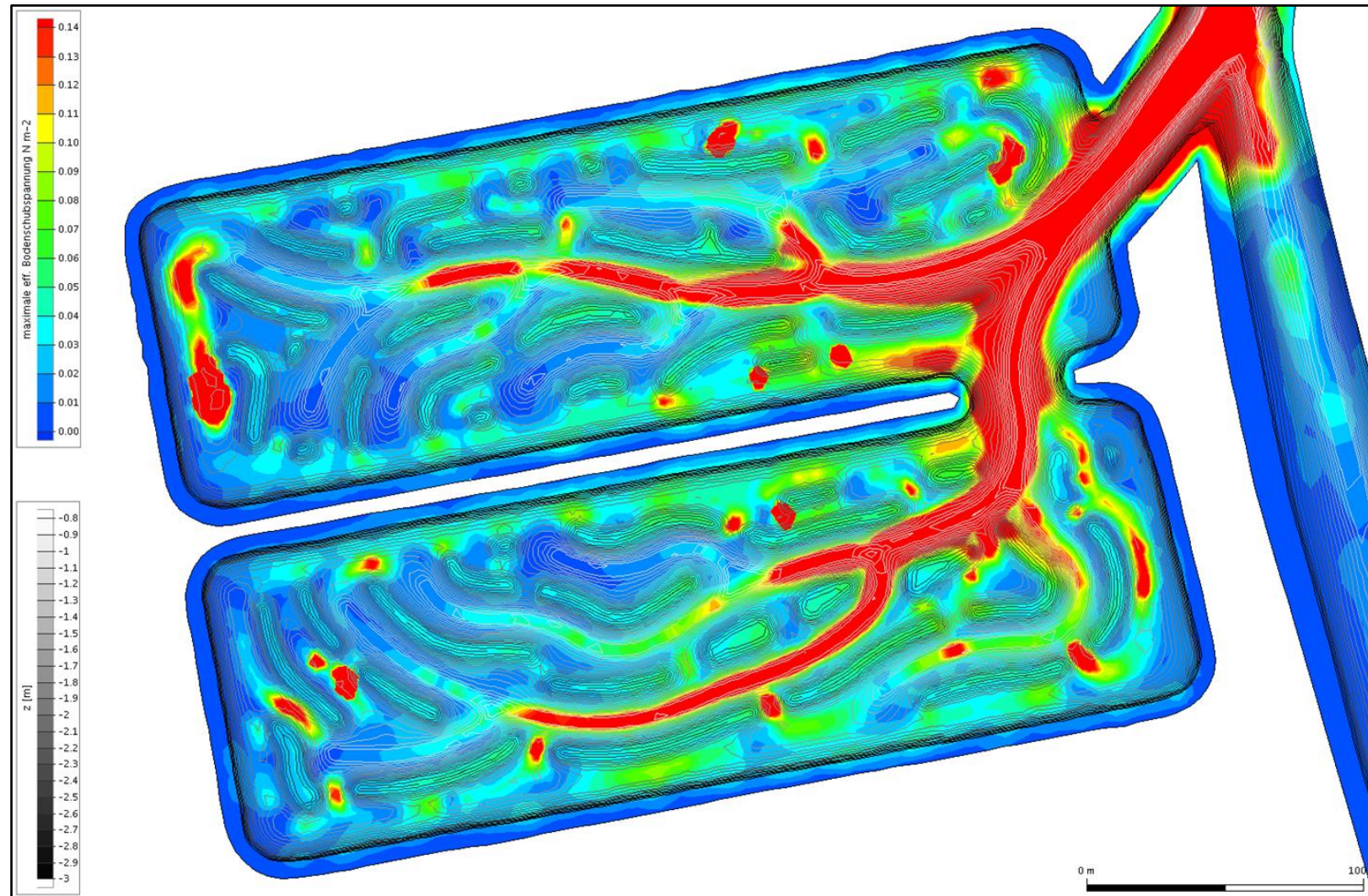


Bild 33: Maximale Bodenschubspannung für den gesamten Analysezeitraum. Die Farblegende variiert bis 0.14 N/m^2 , das entspricht in etwa dem Bewegungsbeginn von Sand.

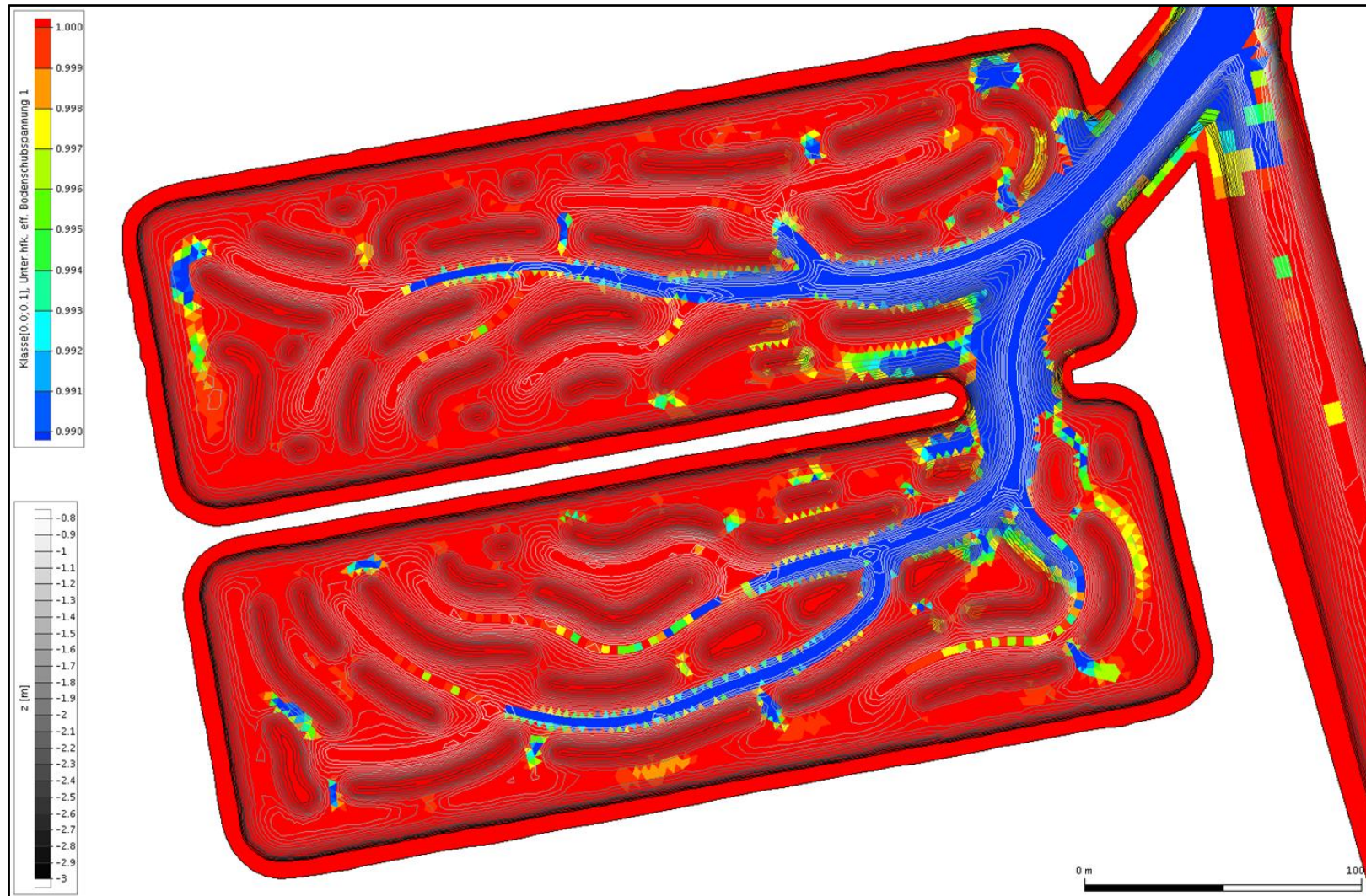


Bild 34: Unterschreitungshäufigkeit der Bodenschubspannungsklasse zwischen 0.0-0.1 N/m². Die Farbskalierung variiert nur zwischen 0.99 bis 1.00. Das bedeutet, dass in den rot eingefärbten Bereichen oberhalb des „Hauptpriels“ fast ausschließlich Sedimentationsbedingungen für Feinsedimente vorherrschen.

6 Modellstudien zur morphologischen Entwicklung im Bereich Billwerder

6.1 Synoptische Ergebnisse

Nachdem in Kapitel 5 das Strömungs- und Transportregime in der Billwerder Bucht und im Bereich der Billwerder Insel mit Hilfe ausgewählter Tidekennwerte beschrieben wurde, soll nun abschließend untersucht werden, welche morphologische Entwicklung im Bereich Billwerder nach Anschluss der Becken an das Tidegeschehen stattfinden wird. Die durchgeführten Systemstudien zeigen für den Eintrag von Schwebstoffen in die Billwerder Bucht eine gewisse Abhängigkeit vom Oberwasser. Die morphologische Struktur (Geometrie und Sedimentinventar) der neu geschaffenen Tidebecken ist bekannt und die dort vorherrschende Strömungs- und Sedimenttransportcharakteristik ist eindeutig. Aufgrund dieser klaren Bedingungen sind die Unsicherheiten einer morphologischen Simulation in diesem Teilgebiet kleiner als im Gesamtgebiet. In diesem Fall kann die Simulation eines längeren Zeitraumes die wasserbaulichen Systemanalysen bestätigen und einen Erkenntnisgewinn insbesondere hinsichtlich der zu erwartenden Menge des Schwebstoffeintrags und dessen Abhängigkeit von dem Oberwasserzufluss mit sich bringen. Die bisherigen Analysen ergänzend wird daher eine mögliche morphologische Entwicklung durch eine längere kontinuierliche Simulation unter variablen hydrologischen und meteorologischen Randbedingungen berechnet.

Als Zeitraum hierfür wird der Januar 2010 bis Dezember 2011 gewählt, also ein Zeitraum von zwei Jahren, für den das Modell kontinuierlich morpodynamisch, aber ohne zeitliche Skalierung der morpodynamischen Entwicklung betrieben wird. Anhand der Analyse der Ergebnisse kann unter anderem festgestellt werden, wie stark die morphologische Entwicklung im Bereich der Billwerder Insel von dem Sedimenteintrag durch den Oberwasserzufluss geprägt wird, der für diese beiden Jahre sehr unterschiedliche Verläufe aufweist (Bild 35). Das Jahr 2010, dargestellt durch die rote Kurve, ist ein abflussreiches Jahr. Das Jahr 2011 hingegen hat nur eine Abflussspitze zu Beginn des Jahres, danach folgt eine lange Phase mit einem eher geringen Abfluss.

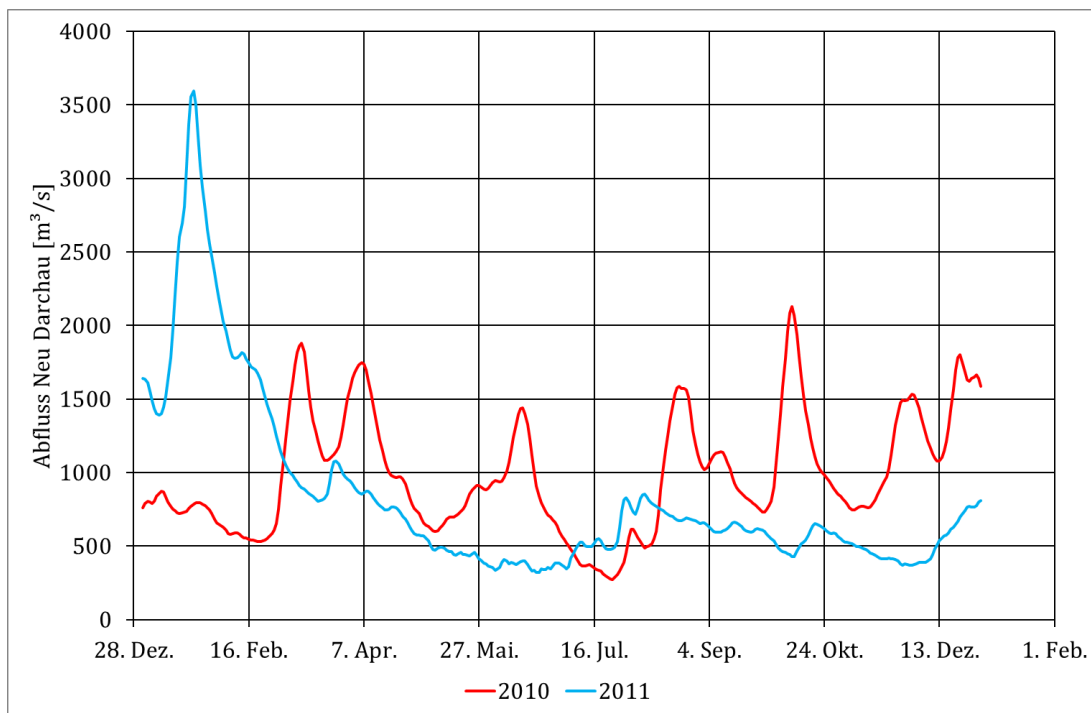


Bild 35: Abfluss der Elbe 2010 und 2011.

Die morphologischen Änderungen nach zwei Jahren Simulationszeit sind für die Billwerder Bucht in verschiedenen Skalierungen in Bild 36 bis Bild 38 dargestellt. d.h. die Veränderung der Sohllage bezogen auf den Anfangszustand der Simulation. In Bild 36 werden Erosions- und Depositionsbereiche zwischen -1,10 m bis +1,10 m farblich von blau (Erosion) über weiß bis rot (Deposition) gekennzeichnet. In der Norderelbe wechseln sich Erosions- und Depositionsbereiche ab und bilden damit ein typisches Muster für eine morphologische Entwicklung, die von Geschiebetransport sandiger Sedimente geprägt ist. Die Billwerder Bucht zeigt demgegenüber überwiegend flächenhafte homogene Depositionsbereiche. Im nördlichen Teil betragen die Depositionshöhen bis zu 20 cm. Dies entspricht ungefähr dem Erfahrungswert in diesem Bereich und in anderen Seitenbereichen und Nebenarmen dieses Elbabschnitts. Weiter südlich nimmt die Mächtigkeit der Ablagerungen immer weiter ab. In der südlichen Hälfte und im Bereich der Billwerder Insel sind bei dieser Skalierung kaum noch Bereiche farblich gekennzeichnet, d.h. die Änderungen liegen unter 0,05 m.

Zur Plausibilisierung der Modellergebnisse ist es daher notwendig in den folgenden Abbildungen die Skalierung der Farblegende anzupassen. Die Tidekennwertanalysen der voranstehenden Kapitel zeigen einen Sedimentimport in den südlichen Teil der Billwerder Bucht. Dieser Sedimentimport führt zu morphologischen Veränderungen, die so klein sind, dass sie zwar modelltechnisch berechnet, nicht aber messtechnisch bestätigt werden können. Eine Darstellung von morphodynamischen Modellergebnissen im Millimeterbereich suggeriert eine Präzision, die für morphodynamische Prognosen nicht gegeben ist. Sie muss hier ausnahmsweise gewählt werden, um die zu erwartenden Erosions- und Depositionsmuster darstellen zu können.

Die nächste Abbildung (Bild 37) ist daher von -0,10 m bis +0,10 m skaliert, Änderungen darüber oder darunter werden weiß gezeichnet und sind damit quasi ausgeblendet. Die weitere Abstufung der Depositionshöhen südlich der Abzweigung Tidekanal ist gut zu erkennen, morphologische Veränderungen in den neuen Becken sind jedoch auch bei dieser Skalierung kaum zu sehen. Daher zeigt Bild 38 dasselbe Ergebnis nochmals in einer Skalierung von -0,01 m bis +0,01 m. Hier sind nun auch die Depositionsmuster in den Becken gut zu erkennen. Je höher das Gebiet liegt (Bild 1), umso geringer sind die Depositionshöhen.

Die geringen Sedimentationsraten im Süden der Billwerder Bucht können dadurch erklärt werden, dass die Schwebstoffe, die eine höhere Sinkgeschwindigkeit aufweisen, bereits im nördlichen Teil sedimentieren. Nur die Schwebstofffraktionen mit sehr kleinen Sinkgeschwindigkeiten erreichen die Becken, so dass auch die Sedimentationsraten dieser Schwebstofffraktionen nur sehr klein sind. Zudem strömt in der ersten Flutstromphase noch kein Wasser in den Holzhafengraben und in die neu angeschlossenen Becken. Dadurch sind die Menge und der Zeitraum, in dem eine Sedimentation stattfinden kann, begrenzt.

Die morphologische Entwicklung im Bereich Billwerder Insel ist nochmals detaillierter als flächenhafte Darstellung der Tiefenerosion in Bild 39 zu sehen. Die größten Umlagerungen - gut erkennbar als Transportmuster des Geschiebetransportes - finden nur im Bereich des „Hauptpriels“ und zwischen den Gehölzinseln statt, eine Sedimentation von Schwebstoffen ist bei dieser Skalierung nicht erkennbar. An den Verzweigungen des Hauptpriels bilden sich bei dieser Systemstudie Ablagerungen aus, die eine Höhe von ca. 0,10 m erreichen. Die Funktionalität des Prielsystems wird dadurch nicht beeinträchtigt, d.h. die Tide schwingt auch weiterhin komplett in das Gebiet hinein und hinaus. In dem Prielsystem wird sich ein morphodynamisches Gleichgewicht einstellen, da es auch nur eine begrenzte Menge an sandigen Sedimenten gibt, mit denen die morphologische Struktur hergestellt wird. Die morphologische Reaktion in den Prielen wird noch geringer sein, wenn die Sohle mit gröberem Sediment als der in dieser Simulation verwendeten Mischung aus Fein- und Mittelsand hergestellt wird. Die Beständigkeit der morphologischen Struktur (Priele und Gehölzinseln) ist durch die hydrodynamische Belastung nicht gefährdet.

Eine Sedimentation von Feinsedimenten, die als Schwebstoffe über die Billwerder Bucht in das Teilgebiet eingetragen werden, findet in den zuvor identifizierten Bereichen (Kapitel 5) statt. Bild 40 zeigt mit Hilfe der geeigneten Skalierung Depositionsbereiche an den Gehölzinseln. Die Depositionshöhen haben nach zwei Jahren eine Mächtigkeit von weniger als 1 cm erreicht.

Die gleichen Abbildungen sind in Bild 41 und in Bild 42 für den Referenzzustand ohne Tideanschluss der Billwerder Insel zu sehen. Im Bereich des Holzhafens sind die Depositionsmuster identisch, eine Beeinträchtigung dieses Gebietes durch den Tideanschluss der Billwerder Insel kann folglich ausgeschlossen werden.

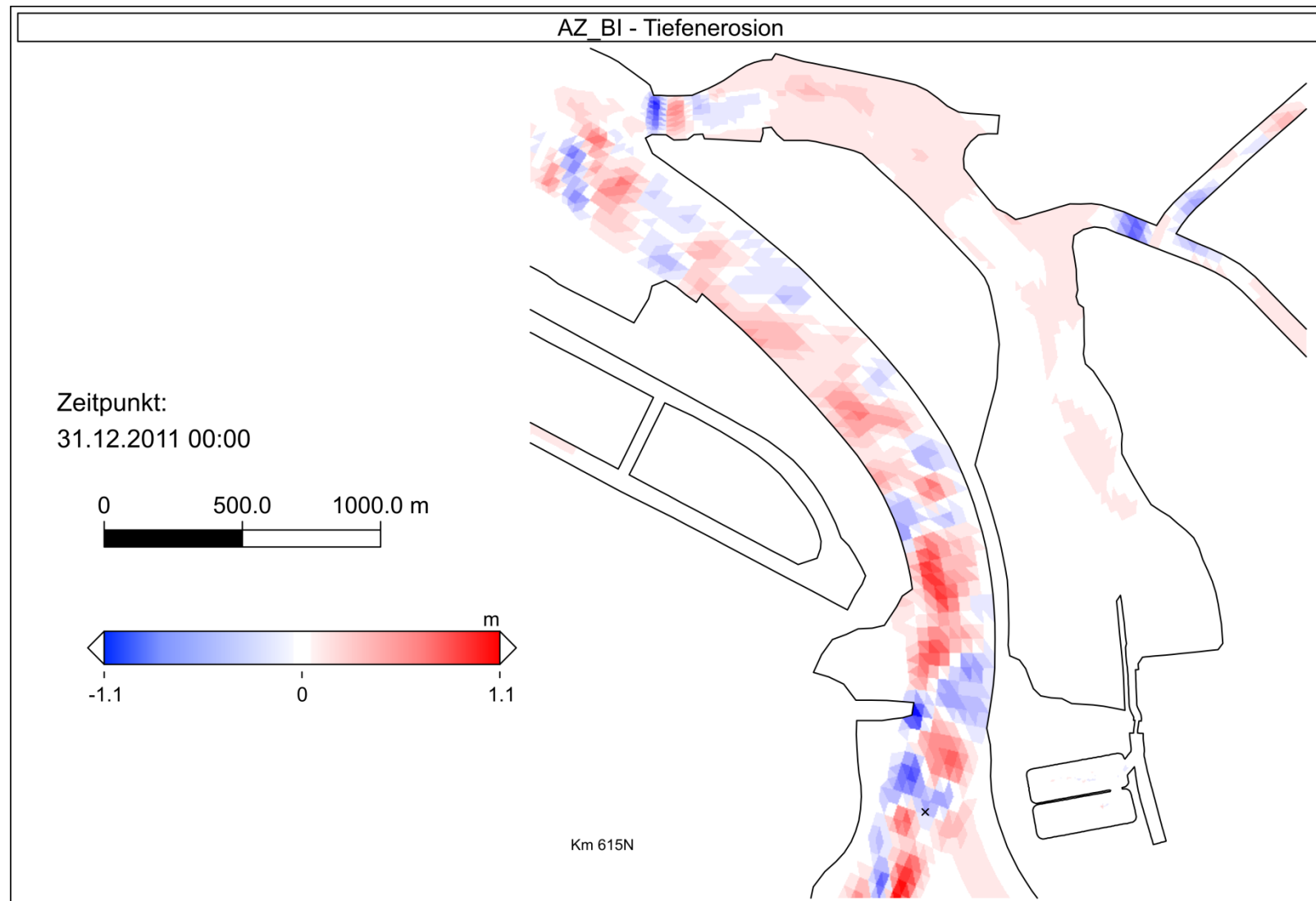


Bild 36: Morphodynamische Entwicklung nach ca. 2 Jahren. Die Änderungen der Sohlage sind im Bereich von -1,10 m bis +1,10 m dargestellt.

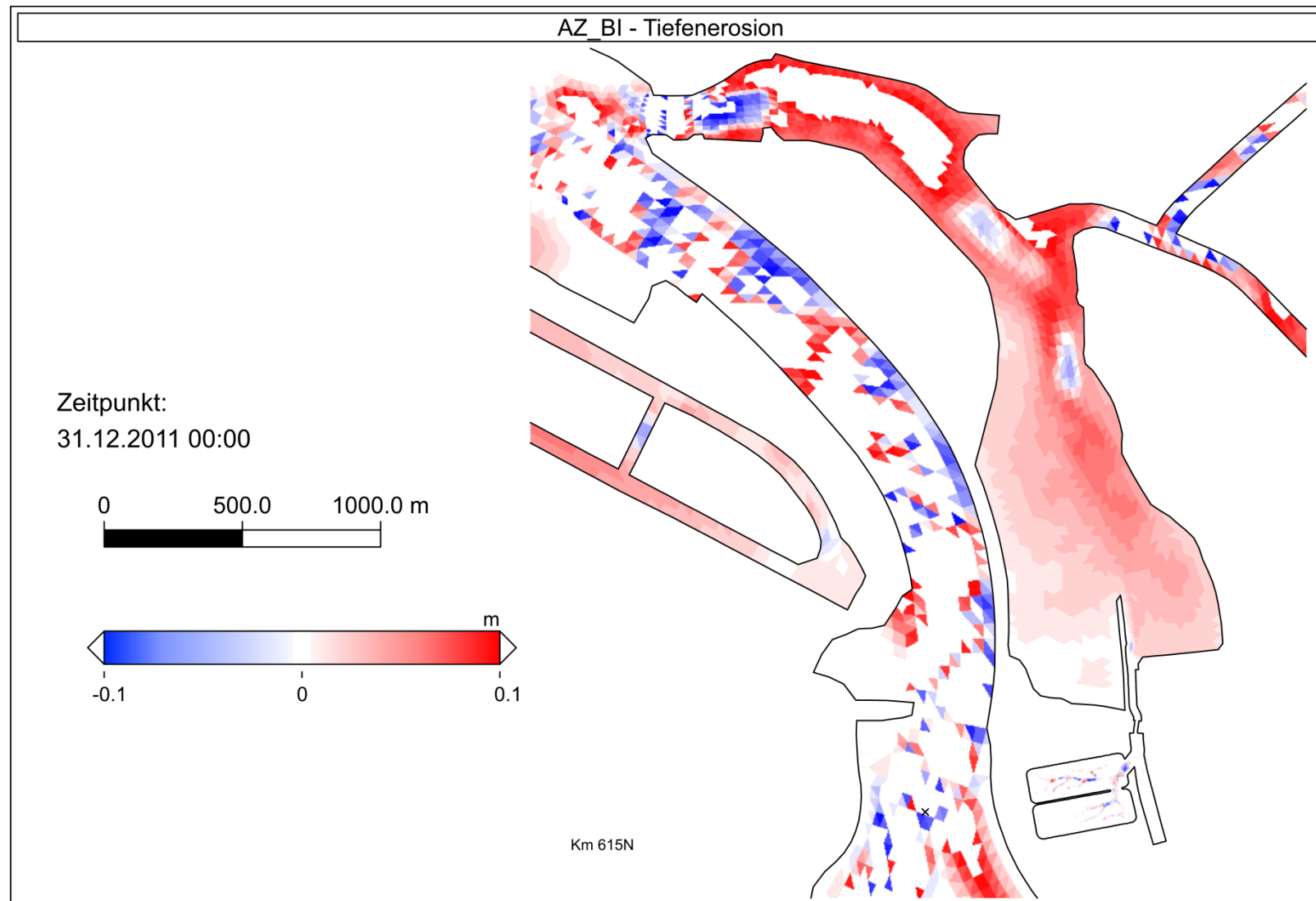


Bild 37: Morphodynamische Entwicklung nach ca. 2 Jahren. Die Änderungen der Sohlage sind im Bereich von -0,10 m bis 0,10 m dargestellt.

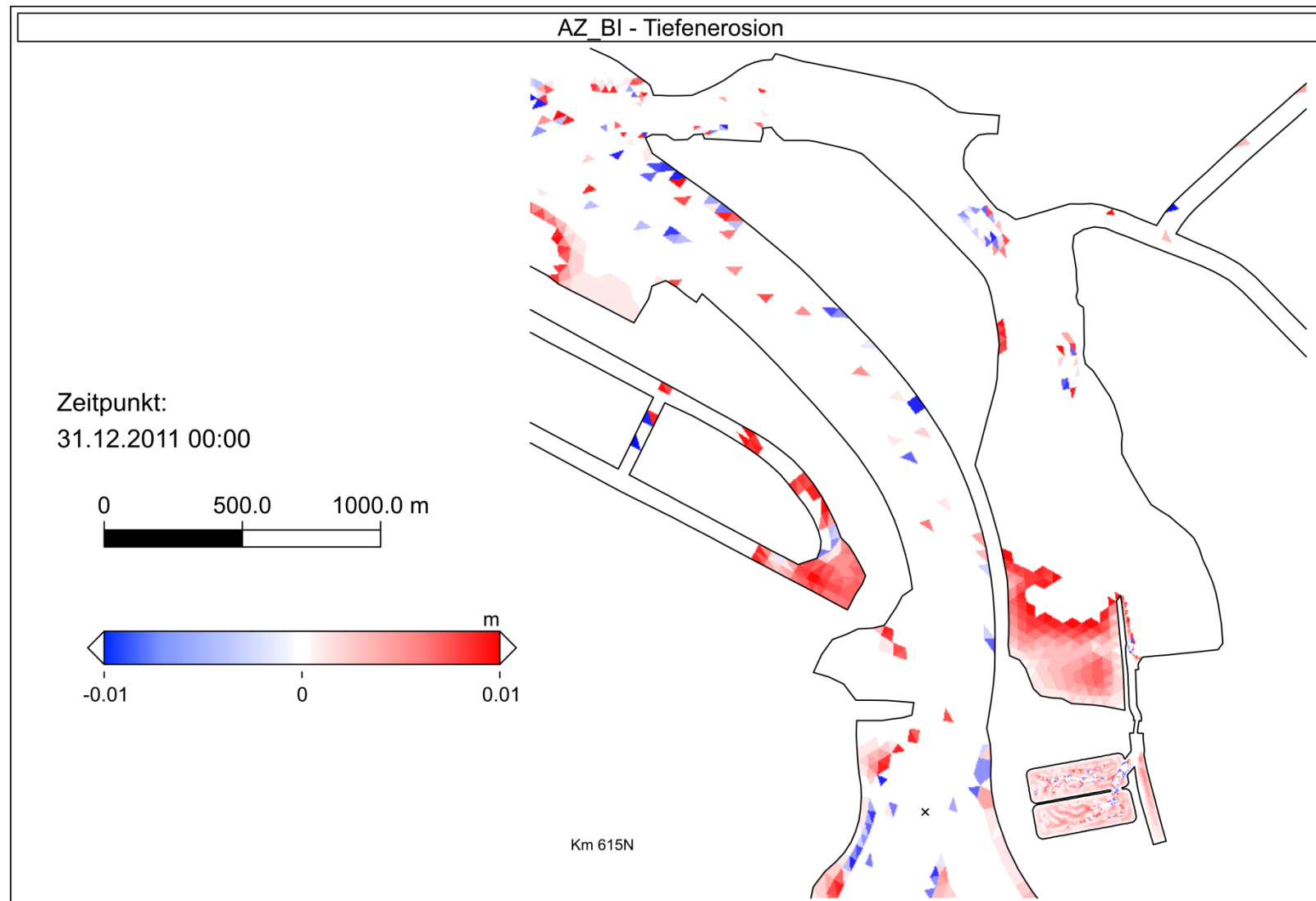


Bild 38: Morphodynamische Entwicklung nach ca. 2 Jahren. Die Änderungen der Sohlage sind im Bereich von -0,01 m bis 0,01 m dargestellt.

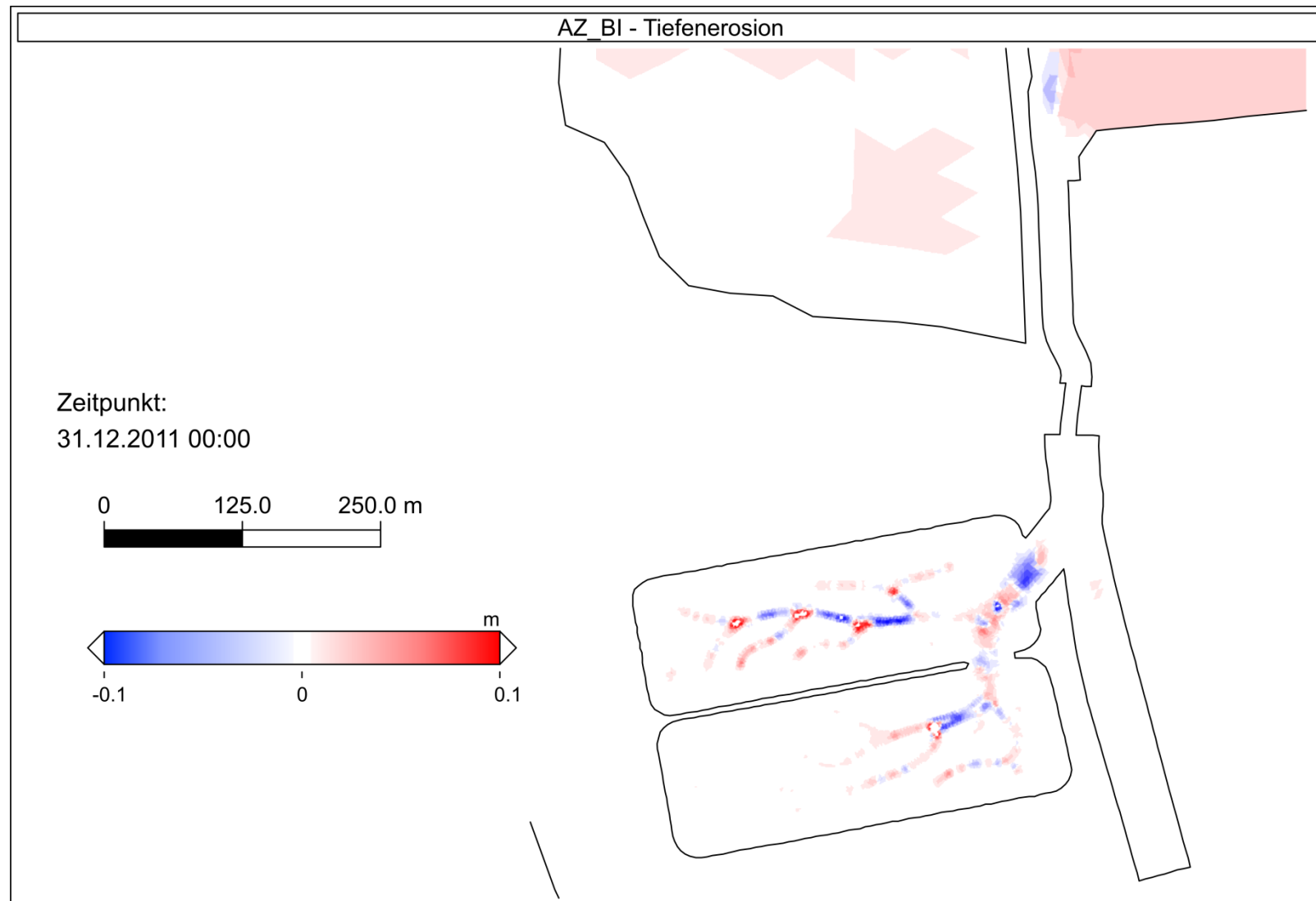


Bild 39: Morphodynamische Entwicklung im Bereich Billwerder Insel nach ca. 2 Jahren. Darstellungsbereich von -0,10 m bis 0,10 m.

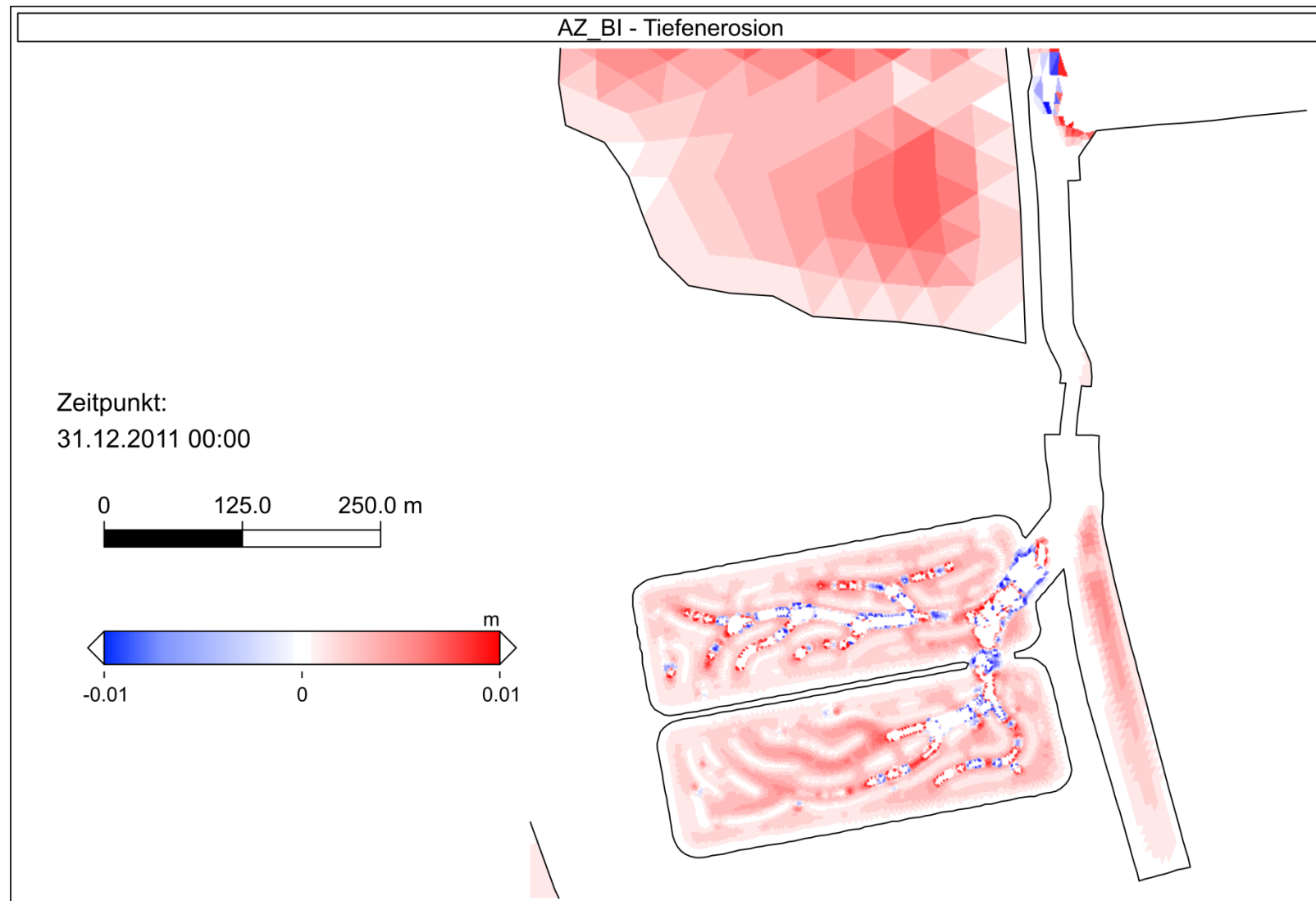


Bild 40: Morphodynamische Entwicklung im Bereich Billwerder Insel nach ca. 2 Jahren. Darstellungsbereich von -0,01 m bis 0,01 m.

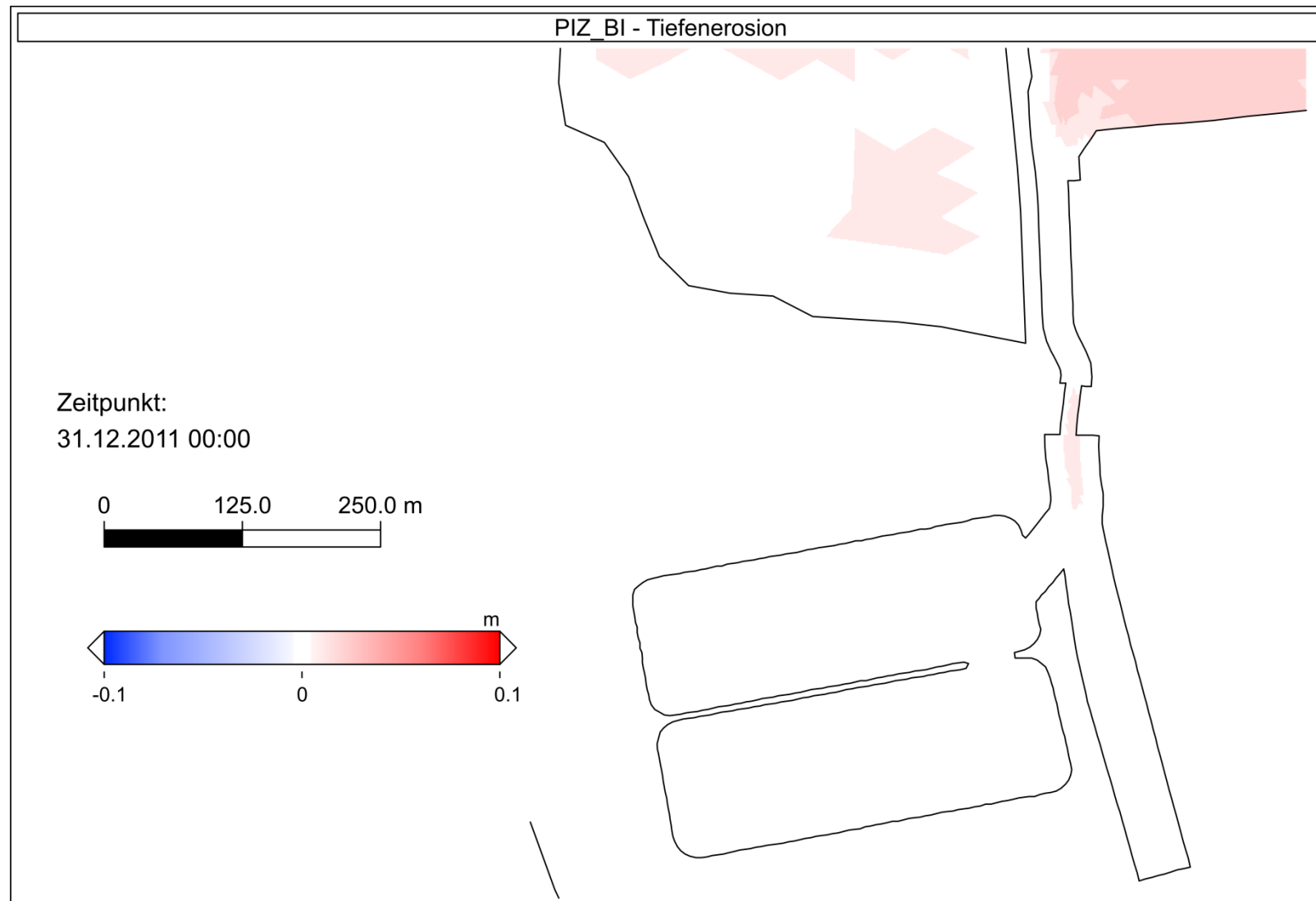


Bild 41: Morphodynamische Entwicklung für den Referenzzustand nach ca. 2 Jahren. Darstellungsbereich von -0,10 m bis 0,10 m.

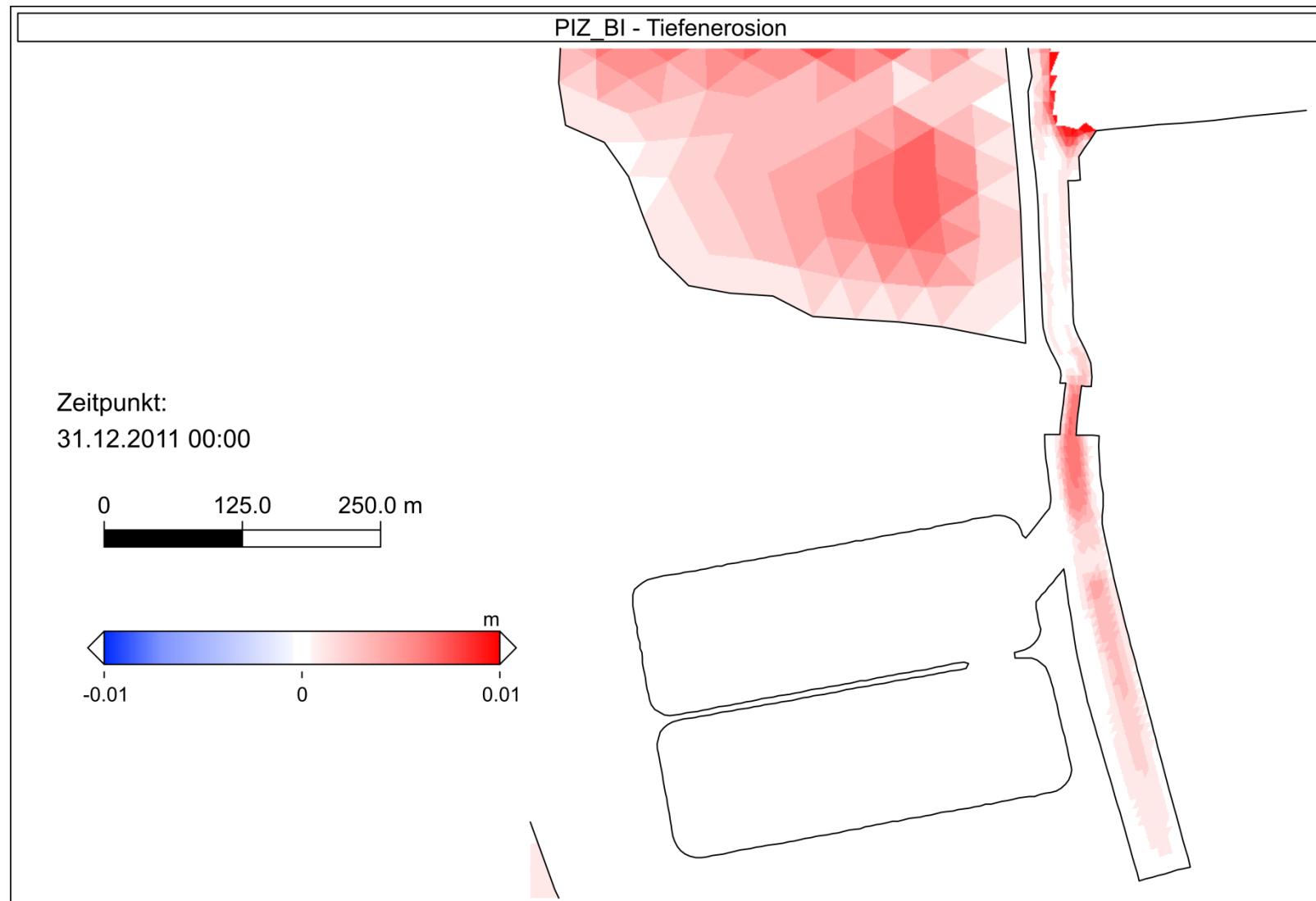


Bild 42: *Morphodynamische Entwicklung für den Referenzzustand nach ca. 2 Jahren. Darstellungsbereich von -0,01 m bis 0,01 m.*

6.2 Transportbilanzen

Von Interesse ist eine detaillierte Bilanzierung der Transporte in bestimmten geographischen Bereichen. Zur weitergehenden Analyse des Tideanschlusses Billwerder Insel werden für den Bereich der Billwerder Bucht vier Bilanzräume (Bild 43) verwendet.

1. Das Teilgebiet C1 umfasst die Billwerder Insel.
2. Das Teilgebiet C2 umfasst den südlichen Teil der Billwerder Bucht.
3. Das Teilgebiet C3 umfasst den nördlichen Teil der Billwerder Bucht.
4. Das Teilgebiet C4 umfasst den Bereich um die Abzweigung Moorfleeter Kanal / Tidekanal.

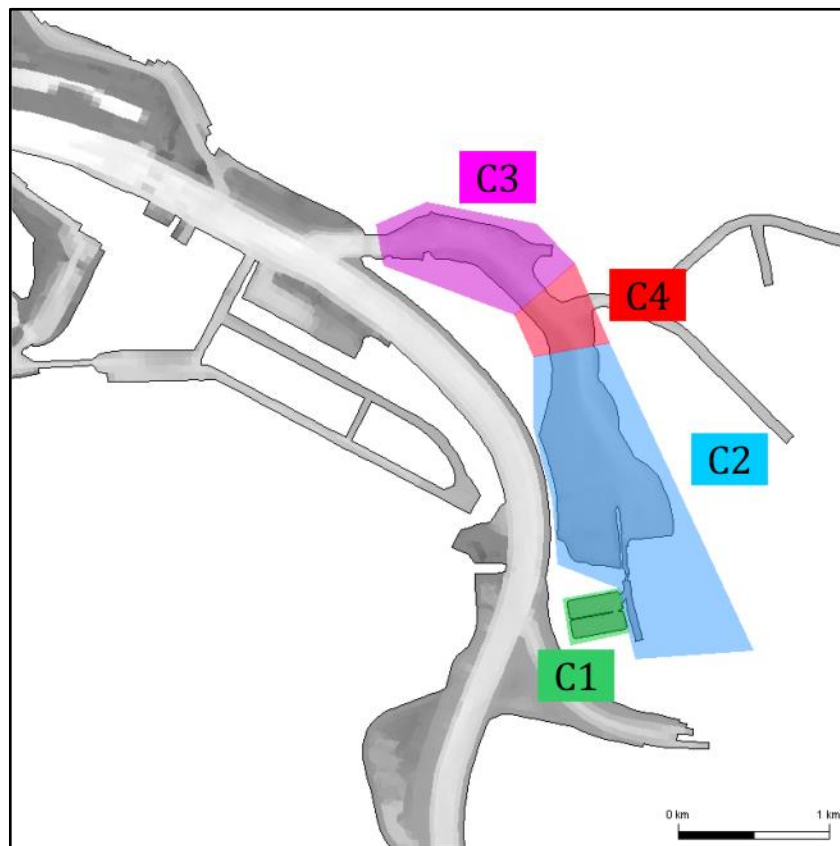


Bild 43: Teilgebiete für den Bereich der Billwerder Bucht

Die Masse der Sedimentfraktionen, die im Bereich der Billwerder Becken während des 2-jährigen Simulationszeitraumes sedimentiert sind, zeigt Bild 44. Der Einfluss des Oberwasserzuflusses ist erkennbar. Die nach der Oberwasserspitze Anfang 2011 einsetzende Episode geringen Zuflusses führt auch zu geringeren Einträgen in das Gebiet Billwerder Insel. Die kleinste berücksichtigte Schwebstofffraktion („Very_Fine_Silt“) mit der geringsten Sinkgeschwindigkeit liefert in den simulierten zwei Jahren mit ca. 140 t den größten Beitrag. Auch für die zweitkleinste Schwebstofffraktion „Fine_Silt“ findet eine Sedimentation statt, jedoch ist dieser Anteil mit ca. 50 t geringer als bei der Fraktion „Very_Fine_Silt“. Die Sortierung der Sedimente ist somit auch in dieser Grafik deutlich zu erkennen. Je größer der Korndurchmesser und damit die Sinkge-

schwindigkeit sind, umso geringer ist der Eintrag in diese Zone. Diesem langfristigen Trend überlagert sind Schwankungen, die durch die unterschiedlichen hydrodynamischen Verhältnisse während eines Nipp-Spring-Zyklus verursacht werden. Insgesamt entsprechen die eingetragenen Sedimentmassen am Ende des Simulationszeitraums bezogen auf die Gesamtfläche der Billwerder Becken im Mittel einer Flächenlast von ca. 2,2 kg/m². Die Räumliche Verteilung dieser Sedimentmassen mit Depositionshöhen in der Größenordnung von ca. 1 cm ist in Bild 40 zu sehen.

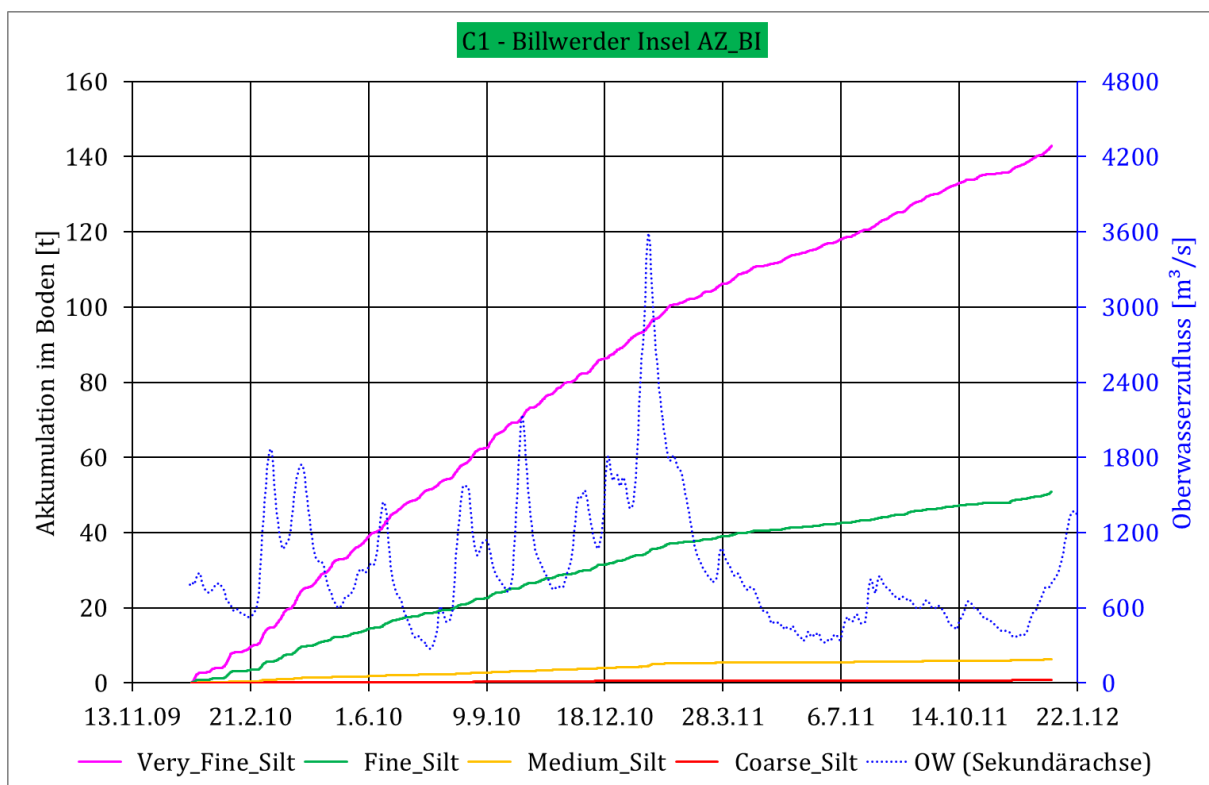


Bild 44: *Sedimenteintrag in das Gebiet Billwerder Insel während des 2-jährigen Simulationszeitraumes. Der Einfluss des Oberwasserzufluss ist erkennbar. Die nach der Oberwasserspitze Anfang 2011 einsetzende Episode geringen Zuflusses führt auch zu geringeren Einträgen in das Gebiet Billwerder Insel.*

Der „Tideanschluss Billwerder Insel“ führt zu einer leichten Verschiebung der Sedimentationsverhältnisse in der Billwerder Bucht. In Bild 46 ist exemplarisch die durch diesen Ausbau bedingte Veränderung der Akkumulation von Feinsedimenten in Teilgebiet 2 – der südlichen Billwerder Bucht – während des 2-jährigen Simulationszeitraumes als Differenz „AZ_BI-PIZ_BI“ dargestellt. Die Sedimentation von „Medium_Silt“ (ca. +220 t) und „Fine_Silt“ (ca. +120 t) nimmt etwas zu, die von „Very_Fine_Silt“ (ca. -70 t) nimmt etwas ab, da diese Fraktion teilweise weiter zur Billwerder Insel transportiert wird.

Bezieht man diese Massen auf die Akkumulation im Ausbauzustand (Bild 45) in diesem Bilanzraum, so ergeben sich prozentuale Veränderungen in der Größenordnung 1 % - 2 % und kleiner.

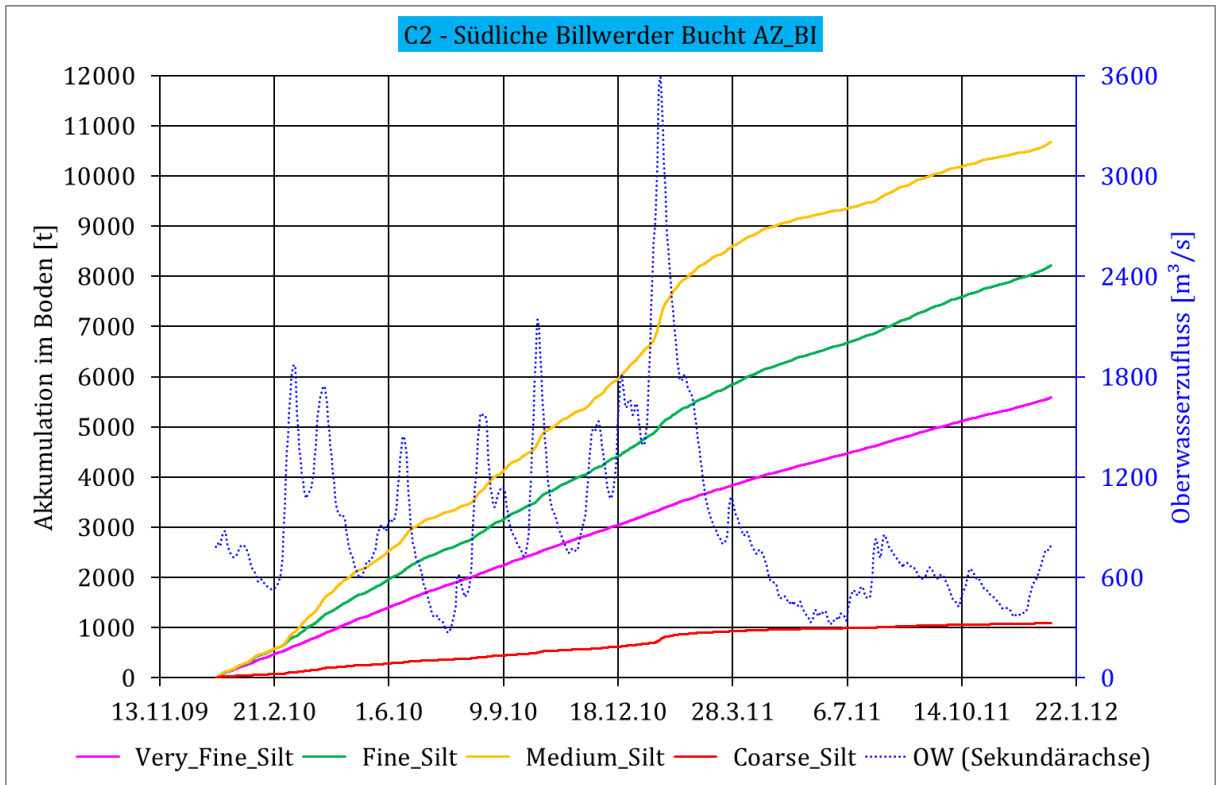


Bild 45: Akkumulation von Feinsedimenten in Teilgebiet 2 während des 2-jährigen Simulationszeitraumes.

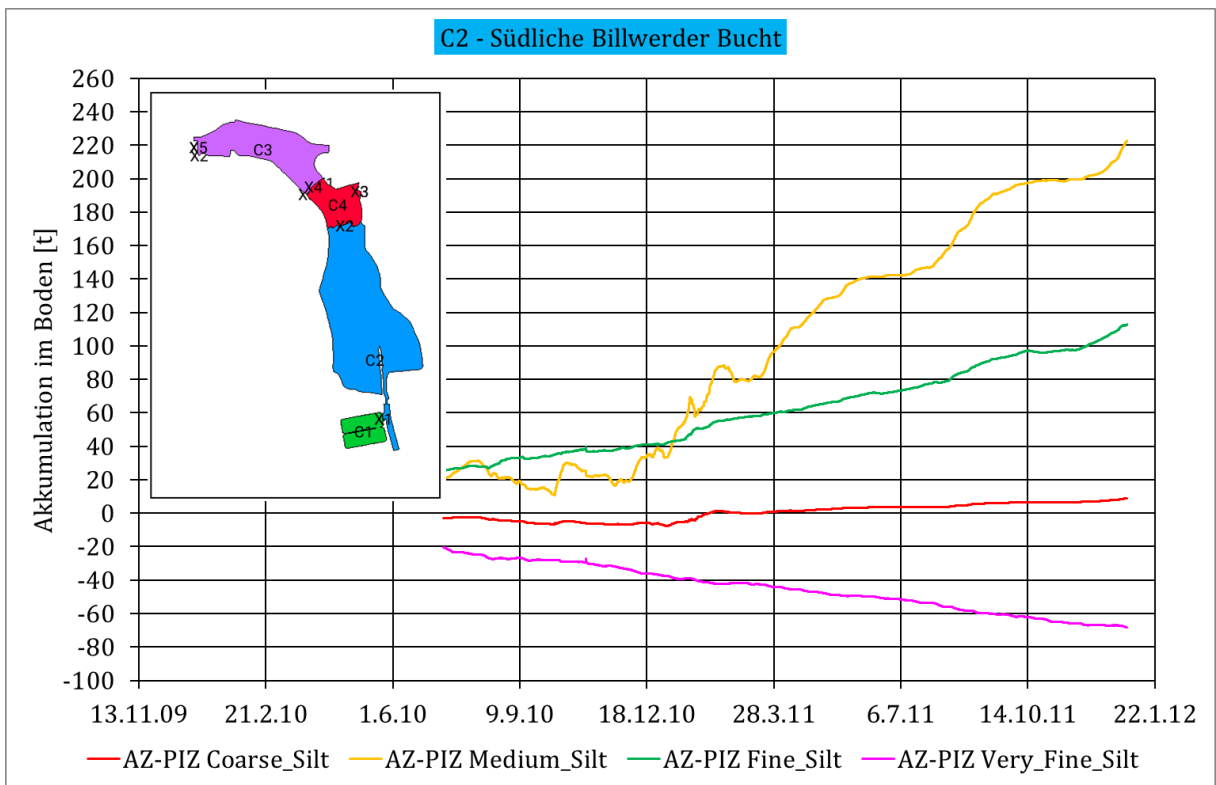


Bild 46: Ausbaubedingte Veränderung der Akkumulation von Feinsedimenten in Teilgebiet 2 während des 2-jährigen Simulationszeitraumes (Differenz AZ_BI-PIZ_BI).

7 Ergebnisse

Die hydro- und morphodynamischen Veränderungen, die durch die untersuchte Kohärenzmaßnahme zu erwarten sind, sind lokal auf den Nahbereich der Maßnahme im süd-östlichen Ende der Billwerder Bucht begrenzt. So wurde eine Erhöhung der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in der Größenordnung von 10 cm/s analysiert. Die höheren Ebbestromgeschwindigkeiten resultieren aus dem größeren Tidevolumen, das im Ausbauzustand durch den Graben strömt und eine gewisse „Strahlwirkung“ in die Billwerder Bucht aufweist. Eine Erhöhung der maximalen Flutstromgeschwindigkeit ist hingegen nur im Holzhafengraben selbst erkennbar. Dies führt im Anschlussbereich des Holzhafengrabens und in dem Entleerungsgraben zu leicht erhöhten Schwebstoffkonzentrationen. Eine Auswirkung auf das Vogelschutzgebiet Holzhafen ist nicht erkennbar. Das liegt neben dem im Vergleich zum Tidevolumen der Norderelbe verhältnismäßig kleinen zusätzlichen Tidevolumen der Kohärenzmaßnahme auch daran, dass der Holzhafen durch einen Damm von dem Holzhafengraben getrennt ist.

Die Auswirkungen des Anschlusses der Tidebecken an die Billwerder Bucht sind bei einem hohen Oberwasserzufluss etwas ausgeprägter. Daher sind für den Ausbauzustand zunächst ausgewählte Tidekennwerte dargestellt worden, mit denen das klein- und großräumige Strömungs- und Transportregime im Bereich Billwerder erklärt werden kann (Kapitel 5). Zur Unterstützung dieser Analysen ist eine mögliche morphologische Entwicklung durch eine zweijährige (01/2010-12/2011) Simulation unter variablen hydrodynamischen und meteorologischen Randbedingungen berechnet worden (Kapitel 6). Dies ist möglich, da die morphologische Struktur (Geometrie und Sedimentinventar) der neu geschaffenen Tidebecken bekannt und die dort vorherrschende Strömungs- und Sedimenttransportcharakteristik eindeutig ist. Aufgrund dieser klaren Bedingungen sind die Unsicherheiten einer morphologischen Simulation in diesem Teilgebiet kleiner als im Gesamtgebiet. In diesem Fall kann die Simulation eines längeren Zeitraumes die wasserbaulichen Systemanalysen bestätigen und einen Erkenntnisgewinn insbesondere hinsichtlich der zu erwartenden Menge des Schwebstoffeintrags und dessen Abhängigkeit von dem Oberwasserzufluss mit sich bringen.

Die morphologische Entwicklung im Bereich Billwerder Insel ist sowohl durch den lokalen Geschiebetransport als auch durch den Schwebstoffeintrag über die Billwerder Bucht geprägt. Die größten Umlagerungen finden als Folge des Geschiebetransportes nur im Bereich des „Hauptpriels“ und zwischen den Gehölz-inseln statt. An den Verzweigungen des Hauptpriels bilden sich Ablagerungen aus, die eine Höhe von ca. 0,10 m erreichen. Die Funktionalität des Prielsystems wird dadurch nicht beeinträchtigt, d.h. die Tide schwingt auch weiterhin komplett in das Gebiet hinein und hinaus. In dem Prielsystem wird sich ein morphodynamisches Gleichgewicht einstellen, da es auch nur eine begrenzte Menge an sandigen Sedimenten gibt, mit denen die morphologische Struktur hergestellt wird. Die morphologische Reaktion in den Prielen wird noch geringer sein, wenn die Sohle mit gröberem Sediment als der in dieser Simulation verwendeten Mischung aus Fein- und Mittelsand hergestellt wird. Die Beständigkeit der morphologischen Struktur (Prielen und Gehölzinseln) ist durch die hydrodynamische Belastung nicht gefährdet.

Eine Sedimentation von Feinsedimenten aus der Billwerder Bucht findet in Depositionsbereichen an den Gehölzinseln statt. Die Depositionshöhen erreichen in zwei Jahren eine Mächtigkeit von weniger als 1 cm. Die geringen Sedimentationsraten können dadurch erklärt werden, dass die Schwebstoffe, die eine höhere Sinkgeschwindigkeit aufweisen, bereits im nördlichen Teil der Billwerder Bucht sedimentieren. Nur die Schwebstofffraktionen mit sehr kleinen Sinkgeschwindigkeiten erreichen die Becken, so dass auch die Sedimentationsraten dieser Schwebstofffraktionen nur sehr klein sind. Zudem strömt in der ersten Flutstromphase noch kein Wasser in den Holzhafengraben und in die neu angeschlossenen Becken. Dadurch sind die Menge und der Zeitraum, in dem eine Sedimentation stattfinden kann, begrenzt.

Die Analysen zeigen, dass der Eintrag von Feinsedimenten auch von dem Eintrag durch das Oberwasser abhängt. Langfristig wird der Eintrag von Feinsedimenten im Wesentlichen durch die Menge und der Schwebstoffkonzentration des Oberwasserzuflusses bestimmt. Ein hoher Oberwasserzufluss führt zu einem höheren Eintrag als ein niedriger. Der „Tideanschluss Billwerder Insel“ führt zu einer leichten Verschiebung der Sedimentationsverhältnisse in der Billwerder Bucht. Die prozentuale Veränderung der Sedimentationsmengen liegt bei 1 % - 2 % und kleiner. Diese Veränderungen sind durch Messungen nicht nachweisbar.

Für den Referenzzustand ohne Tideanschluss der Billwerder Insel sind die Depositionsmuster im Bereich des Holzhafens identisch. Eine Beeinträchtigung dieses Gebietes kann folglich ausgeschlossen werden. Die Kohärenzmaßnahme wirkt sich ebenfalls nicht auf den Hauptstrom der Elbe aus. Daraus folgt, dass die Kohärenzmaßnahme die bisherigen Prognosen der BAW zu den ausbaubedingten Wirkungen der geplanten Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe nicht beeinflusst.

Bundesanstalt für Wasserbau
Hamburg, Februar 2018

Im Auftrag Bearbeiter

Dr. Norbert Winkel

Dr. Holger Weilbeer

8 Referenzen

- Bundesanstalt für Wasserbau (2006): Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe. Gutachten zu Ausbaubedingten Änderungen von Hydrodynamik und Salztransport. Gutachten BAW-Nr. A39550310062-H.1a.Hg. v. Bundesanstalt für Wasserbau.*
- Bundesanstalt für Wasserbau (2006): Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe. Gutachten zu Ausbaubedingten Änderungen der morphodynamischen Prozesse. Gutachten BAW-Nr. A39550310062-H.1c. Hg. v. Bundesanstalt für Wasserbau.*
- Casulli, V. (1999): A Semi-Implicit Finite Difference Method for Non-Hydrostatic, Free-Surface Flows. In: International Journal of Numerical Methods in Fluids (30), S. 425–440.*
- Casulli, Vincenzo; Walters, Roy A. (2000): An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations. In: International Journal for Numerical Methods in Fluids 32 (3), S. 331–348.*
- Casulli, Vincenzo; Zanolli, P. (2002): Semi-implicit numerical modeling of nonhydrostatic free-surface flows for environmental problems. In: Mathematical and Computer Modelling 36 (9-10), S. 1131–1149. DOI: 10.1016/S0895-7177(02)00264-9.*
- Casulli, Vincenzo; Zanolli, Paola (2005): High resolution methods for multidimensional advection-diffusion problems in free-surface hydrodynamics. In: Ocean Modelling 10 (1-2), S. 137–151. DOI: 10.1016/j.ocemod.2004.06.007.*
- Casulli, V. and Zanolli, P. (1998): A Three-Dimensional Semi - Implicit Algorithm for Environmental Flows on Unstructured Grids. In: Proc. of Conf. on Num. Methods for Fluid Dynamics, University of Oxford.*
- Projektbüro Fahrrinnenanpassung beim Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg (2010): Fahrrinnenanpassung Unter- und Außenelbe. Die Planänderung III im Überblick. Eine Information der Vorhabensträger. Hg. v. Projektbüro Fahrrinnenanpassung beim Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg. Online verfügbar unter http://www.zukunftelbe.de/downloads/Faltblatt_Planaenderung3.pdf, zuletzt geprüft am 01.02.2017.*
- WKC Hamburg GmbH, 1.2 Technische Planung, Fahrrinnenanpassung Unter- und Außenelbe, Tideanschluss Billwerder Insel, 30.01.2018*