

Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG  
Niederlassung Cuxhaven

Antrag auf Planfeststellung  
für den  
Lückenschluss zwischen Europakai  
und Offshore-Basishafen Cuxhaven

Gemäß §§ 68 ff WHG iVm §§ 107 ff NWG

Heft 5

Studie  
Sedimenttransport

DHI WASY, Hamburg

---

## DHI WASY (2017) „Planung Liegeplätze 5-7 in Cuxhaven“

Abschätzung und Modellierung der Sedimente im Rahmen der Planfeststellung

Studie zum Sedimenttransport



Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG

Bericht

Mai 2017

Dieser Bericht wurde im Rahmen des DHI Business-Management-Systems (Bureau Veritas - zertifiziert nach ISO 9001, Qualitätsmanagement) erstellt.



Erstellt von

19/07/2017

X



Signed by: Francois Eugène Robert Leesch

Genehmigt von

20.07.2017

X



Signed by: Oliver Stoschek

# DHI WASY (2017) „Planung Liegeplätze 5-7 in Cuxhaven“

Erstellt für                    Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG  
Vertreten durch            Gabriela Landvogt



*Lage der geplanten Liegeplätze 5-7 in Cuxhaven,  
Google Earth, bearbeitet*

Projektmanager	Francois Leesch
Projektbearbeitung	Janett Brandt, Oliver Stoschek, Francois Leesch
Projektnummer	14804236
Revision	V1.0
Einstufung	Vertraulich

# INHALT

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Vorgehen .....</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Verwendete Unterlagen .....</b>	<b>1</b>
<b>4</b>	<b>Modell .....</b>	<b>2</b>
4.1	Verwendetes Modellsystem .....	2
4.2	Modellaufbau.....	3
4.3	Randbedingungen.....	5
<b>5</b>	<b>Modellzeiträume .....</b>	<b>6</b>
<b>6</b>	<b>Nachweis der Modellgenauigkeit .....</b>	<b>7</b>
6.1	Validierung .....	7
6.1.1	Wasserstand .....	7
6.1.2	Strömungsgeschwindigkeit.....	10
6.1.3	Salzgehalt .....	13
6.1.4	Temperatur.....	15
6.1.5	Fazit .....	16
<b>7</b>	<b>Berechnung der Strömungsdaten.....</b>	<b>17</b>
7.1	Modell.....	17
7.1.1	Strömung.....	17
<b>8</b>	<b>Sedimentologische Untersuchungen .....</b>	<b>22</b>
8.1	Methodik.....	22
8.1.1	Modellansatz .....	22
8.1.2	Modellparameter .....	23
8.2	Modellberechnungen- und Validierungen.....	24
8.2.1	Sohllagen .....	24
8.2.2	Plausibilisierung Amerikahafen .....	25
8.3	Auswertung der Ergebnisse .....	27
8.3.1	Schubspannungen .....	27
8.3.2	Schwebstoffkonzentrationen .....	31
8.3.3	Sohlveränderungen.....	32

<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit.....</b>	<b>33</b>
<b>10</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>34</b>
<b>11</b>	<b>Anhang A: Formeln zur Beschreibung der Feinsedimentationsprozesse im Modell.....</b>	<b>35</b>
<b>12</b>	<b>Anhang B: Peildatendifferenzen für ausgesuchte Zeiträume.....</b>	<b>37</b>
<b>13</b>	<b>Anhang C: Modellierete Schubspannungen .....</b>	<b>43</b>

## ABBILDUNGEN

Abbildung 4-1	Hydrodynamisches numerisches Modell im Bereich der Tideelbe von Kollmar stromaufwärts bis Scharhörn im westlichen Teil der Nordsee und Trischen im östlichen Teil der Nordsee.....	3
Abbildung 4-2	Nahaufnahme des Bereichs Cuxhaven Hafen im Ist-Zustand. Unterschiedliche Maschenweiten werden für die jeweiligen Bereiche genutzt. Im Planungsbereich sind Modellelemente am kleinsten.....	4
Abbildung 4-3	Modellaufbau im Bereich des Hafens von Cuxhaven im Plan-Zustand.....	4
Abbildung 5-1	Karte des Untersuchungsgebiets mit den Lokationen der Messstationen.....	6
Abbildung 5-2	Maximale Ebbstrom- (hellblau) und Flutstromgeschwindigkeit (dunkelblau) an der Position LZ 3c Altenbrucher Bogen im Dezember 2014.....	7
Abbildung 6-1	Validierung der Wasserspiegelauslenkung an der Position Cuxhaven Steubenhöft, Messung (schwarz) und Modell (blau) .....	8
Abbildung 6-2	Validierung der Wasserspiegelauslenkung an der Position Brunsbüttel Mole 1, Messung (schwarz) und Modell (blau) .....	9
Abbildung 6-3	Validierung der Wasserspiegelauslenkung an der Position Kollmar, Messung (schwarz) und Modell (blau) .....	10
Abbildung 6-4	Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten an der Position LZ 3c Altenbrucher Bogen, Messung (schwarz) und Modell (blau) .....	11
Abbildung 6-5	Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten an der Position LZ 4a Steinriff, Messung (schwarz) und Modell (blau) .....	12
Abbildung 6-6	Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten an der Position LZ 1a Brunsbüttel Elbehafen, Messung (schwarz) und Modell (blau) .....	13
Abbildung 6-7	Validierung des Salzgehalts an der Position LZ 3c Altenbrucher Bogen, Messung (schwarz) und Modell (blau) .....	14
Abbildung 6-8	Validierung des Salzgehalts LZ 1a Brunsbüttel Elbehafen, Messung (schwarz) und Modell (blau) .....	15
Abbildung 6-9	Validierung der Wassertemperatur an LZ 3c Altenbrucher Bogen, Messung (schwarz) und Modell (blau) .....	16
Abbildung 7-1	Bathymetrie des Modellgebiets der Tideelbe von Kollmar bis zur Nordsee bei Trischen und Scharhörn. Der markierte Bereich umfasst den Extraktionsbereich der Strömungsdaten.....	17
Abbildung 7-2	Strömungsgeschwindigkeit an der Oberfläche bei Ebbphase für den Plan-Zustand .....	18
Abbildung 7-3	Strömungsgeschwindigkeit in der Mitte der Wassersäule bei Ebbphase für den Plan-Zustand.....	19
Abbildung 7-4	Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle bei Ebbphase für den Plan-Zustand .....	19
Abbildung 7-5	Strömungsgeschwindigkeit an der Oberfläche bei Flutphase für den Plan-Zustand .....	20

Abbildung 7-6	Strömungsgeschwindigkeit in der Mitte der Wassersäule bei Flutphase für den Plan-Zustand.....	20
Abbildung 7-7	Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle bei Flutphase für den Plan-Zustand .....	21
Abbildung 7-8	Modellergebnisse des Wasserstands und der Strömungsgeschwindigkeit am Standort Cuxhaven Steubenhöft .....	21
Abbildung 8-1:	Sedimenttransportprozesse im Bereich der Liegeplätze 5-7 .....	22
Abbildung 8-2:	Lage der Sedimentproben im Bereich der geplanten Liegeplätze 5-7 .....	23
Abbildung 8-3:	Beobachtete Peildatendifferenzen im Bereich der geplanten Liegeplätze.....	25
Abbildung 8-4:	Lage der Zeitreihenextraktion im Amerikahafen .....	26
Abbildung 8-5:	Modellierte Auflandungen im Amerikahafen über den ganzen Simulationszeitraum.....	26
Abbildung 8-6:	Modellierte Auflandungen im Amerikahafen, Detailbetrachtung .....	27
Abbildung 8-7:	Modellierte Schubspannungen entlang der geplanten Liegeplätze .....	28
Abbildung 8-8:	Differenzen der Schubspannungen zum Zeitpunkt der maximalen Schubspannungen .....	29
Abbildung 8-9:	Differenzen der Schubspannungen zwischen Ist- und Planungszustand bei Ebbe.....	29
Abbildung 8-10:	Differenzen der Schubspannungen zwischen Ist- und Planungszustand bei Flut .....	30
Abbildung 8-11:	Modellierte Schwebstoffkonzentrationen bei den Liegeplätzen 4-7 .....	31
Abbildung 8-12:	Veränderung des Schwebstoffkonzentrationsprofils.....	32
Abbildung 12-1:	Maximale Schubspannungen (09.09.2014 bis 13.11.2014) Ist-Zustand.....	43
Abbildung 12-2:	Schubspannungen bei Ebbe Ist-Zustand.....	43
Abbildung 12-3:	Schubspannungen bei Flut Ist-Zustand.....	44
Abbildung 12-4:	Maximale Schubspannungen (09.09.2014 bis 13.11.2014) Planungszustand ..	44
Abbildung 12-5:	Schubspannungen bei Ebbe Planungszustand .....	45
Abbildung 12-6:	Schubspannungen bei Flut Planungszustand .....	45

## 1 Aufgabenstellung

Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG plant die Erweiterung des Hafens in Cuxhaven um die Liegeplätze 5 – 7. Die Aufgabe im Rahmen des Projektes „Planung Liegeplätze 5 – 7 in Cuxhaven“ ist es, die Strömungsdaten des im Modell dargestellten Planzustandes zu bestimmen. Steigende Umschläge und veränderte Schiffsgrößen machen die Erweiterung der vorhandenen Liegeplatzkapazitäten im Seehafen Cuxhaven notwendig. Mit Hilfe von Strömungsdaten sollen Schiffsmanöversimulationen für die geplanten Liegeplätze 5 – 7 durchgeführt werden. Diese Untersuchungen wurden kürzlich in einem Bericht DHI WASY (2017) „Planung Liegeplätze 5-7 in Cuxhaven“ - Untersuchung und Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeiten - Studie Strömungsgutachten“ der DHI WASY [4] zusammengefasst.

Das für die hydrodynamischen Simulationen erstellte dreidimensionale Strömungsmodell wurde nun für einen weiteren Zeitraum validiert und erweitert, um auch den Transport von Schluff und Feinsanden zu berechnen. So kann untersucht werden, ob und in wie fern die geplanten Liegeplätze nach Fertigstellung einen Einfluss auf das lokale Sedimentregime haben.

## 2 Vorgehen

Um die Strömungsverhältnisse im Bereich der geplanten neuen Liegeplätze 5 – 7 ermitteln, wurde zunächst ein dreidimensionales hydronumerisches Modell (3D HD) der Tideelbe verwendet. Für die Evaluierung des Sedimenttransportes wurde auf das HD Modell ein Sedimenttransportmodell (MIKE21 MT) aufgebaut.

Die Strömung im Hafenbereich wird durch die Bauwerke der geplanten Liegeplätze lokal verändert. In das 3D HD Modell wurden die geplanten Bauten der Liegeplätze integriert, um diese Bauwerksauswirkungen hinreichend genau abbilden zu können.

Der Modellzeitraum in diesem Projekt umfasst den Zeitraum 09.09.2014 – 13.11.2014 (etwa zwei Monate). In diesem Zeitraum wurden sowohl Spring- als auch Nipptide beobachtet und es trat eine größere Sturmflut Ende Oktober auf. Außerdem konnten für den Bereich der geplanten Liegeplätze Peildatendifferenzen gebildet und für die Modellvalidierung verwendet werden.

## 3 Verwendete Unterlagen

BSH	Bathymetrie für die Tideelbe im Bereich der Nordsee, 2014 und 2016
DHI	Bathymetriedaten aus der digitalen Seekarte C-Map auf Grundlage von BSH-Vermessungen, Stand 2017
DHI	Eingangswerte der Salinität, Temperatur und Abfluss aus einem Bestandsmodell
NPorts	Planungsunterlagen
WSA Cuxhaven	Messdaten (Temperatur, Salzgehalt, Wasserstand, Landmessung, Wind,

	Strömung, Abfluss) an verschiedenen Messpositionen entlang der Tideelbe, Internetseite „Portal Tideelbe“, <a href="http://www.portaltideelbe">www.portaltideelbe</a>
WSA Cuxhaven	Bathymetrie der Fahrrinne für 2014 und 2016 ab Brunsbüttel flussabwärts bis zum Modellrand
WSA Hamburg	Bathymetrie der Fahrrinne für 2014 und 2016 ab Brunsbüttel flussaufwärts bis zum Modellrand bei Pagensand
NPorts	Peildaten 2007-2017

## 4 Modell

### 4.1 Verwendetes Modellsystem

Das Programmsystem MIKE 3 FM (Finite Volumen) von DHI und die enthaltenen Module bilden die Grundlage der numerischen Berechnungen (DHI, 2014a und 2014b). Für die Lösung der Differentialgleichungssysteme wird eine Lösung der 3-dimensionalen inkompressiblen RANSE Gleichung unter Berücksichtigung der Annahmen von Boussinesq verwendet. Das Modell berücksichtigt u.a. die Kontinuitätsgleichung, die Impulsgleichungen sowie die Änderung von Temperatur, Salzgehalt und Dichte.

Das MIKE 3 Mud Transport (MT) Modul, welches in der Regel an das hydrodynamische (HD) Modul bzw. die Ergebnisse der HD-Berechnungen geknüpft wird, wurde für die Sedimentberechnungen in diesem Projekt verwendet. Das Modul berechnet sämtliche morphologisch relevanten Parameter wie Schubspannungen, Sohlveränderungen durch Sedimentation und/oder Erosion und Sedimentkonzentrationen. Während das Modell vorwiegend für die Berechnung von kohäsiven Sedimenten (Schluff, Ton) eingesetzt wird, können auch optional Feinsandfraktionen (nicht kohäsiv) berücksichtigt werden. Dabei werden die Strömungen und Turbulenzen im HD-Modul berechnet, während die Transport- und Advektion-Dispersion Prozesse im MT-Modul Berücksichtigung finden.

Diese Prozesse können nicht auf physikalisch-basierten, deterministischen Beschreibungen in mathematischen Modellen umgesetzt werden. Die im MT-Modul verwendeten Formeln orientieren sich zwar an robusten Prinzipien des Sedimenttransportes, sind aber im Wesentlichen empirisch abgeleitet. Die wichtigsten Formeln sind in Anhang A beschrieben. Die betreffen sowohl die Eigenschaften der Wassersäule als auch des Sohlmaterials und beschreiben die Bedingungen, welche zur Erosion, Ablagerung sowie zur Verteilung der Sedimente in der Wassersäule führen.

## 4.2 Modellaufbau

Zur Berechnung wurde der entsprechende Modellierungszeitraum mit einem hydrodynamischen numerischen Modell simuliert, welches flussaufwärts von Kollmar bis nach Scharhörn und Trischen in der Nordsee reicht (Abbildung 4-1). Teile dieses Modells wurden bereits für die Berechnungen zum Wärmelastplan und für den Neubau des Vielzweckhafens an der Elbe in Brunsbüttel verwendet und für diese Untersuchung im Bereich Cuxhaven angepasst und um den Abschnitt der angrenzenden Nordsee ergänzt.

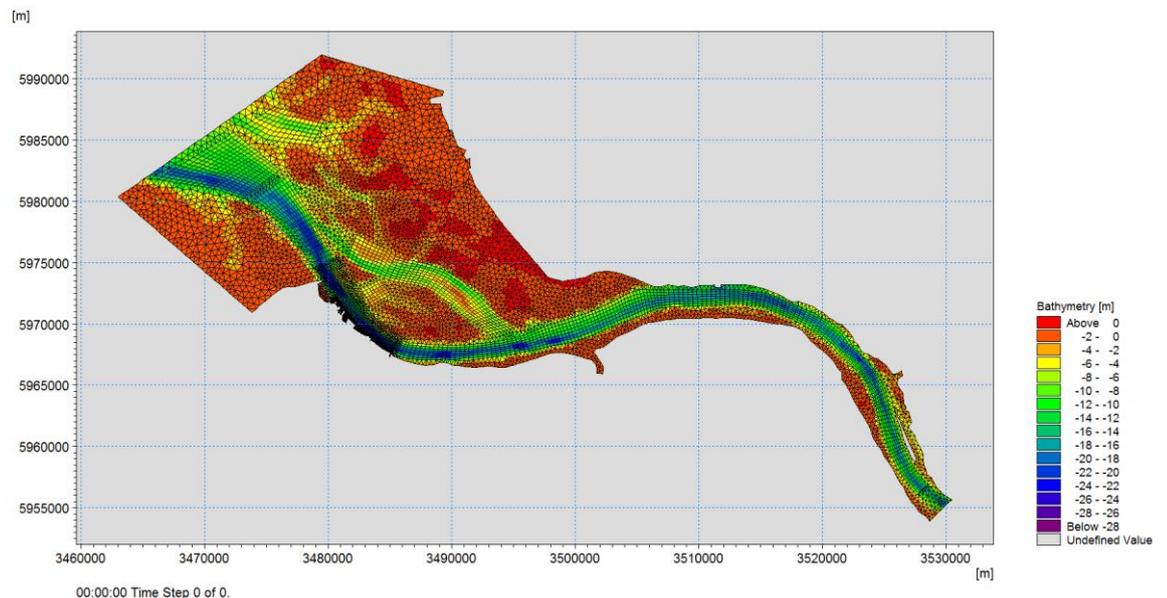


Abbildung 4-1 Hydrodynamisches numerisches Modell im Bereich der Tideelbe von Kollmar stromaufwärts bis Scharhörn im westlichen Teil der Nordsee und Trischen im östlichen Teil der Nordsee

Zur Berechnung der Strömungssituation an den geplanten Liegeplätzen 5-7 wurde das erweiterte Elbmodell verwendet und dessen Berechnungsgitter im Bereich der geplanten Liegeplätze und des Hafens in Cuxhaven sehr fein aufgelöst (Abbildung 4-2). Im Fahrwasser der Elbe wurden quadrangulare Elemente mit einer Maschenweite von 100m gewählt. Im Uferbereich der Elbe wurden feinaufgelöste, triangulare Netzelemente gewählt. Im Umfeld der geplanten Liegeplätze sind die kleinsten Modellelemente mit maximal 1200 m<sup>2</sup> vorzufinden. Die Abstände der einzelnen Knotenpunkte betragen dort ca. 50 m.

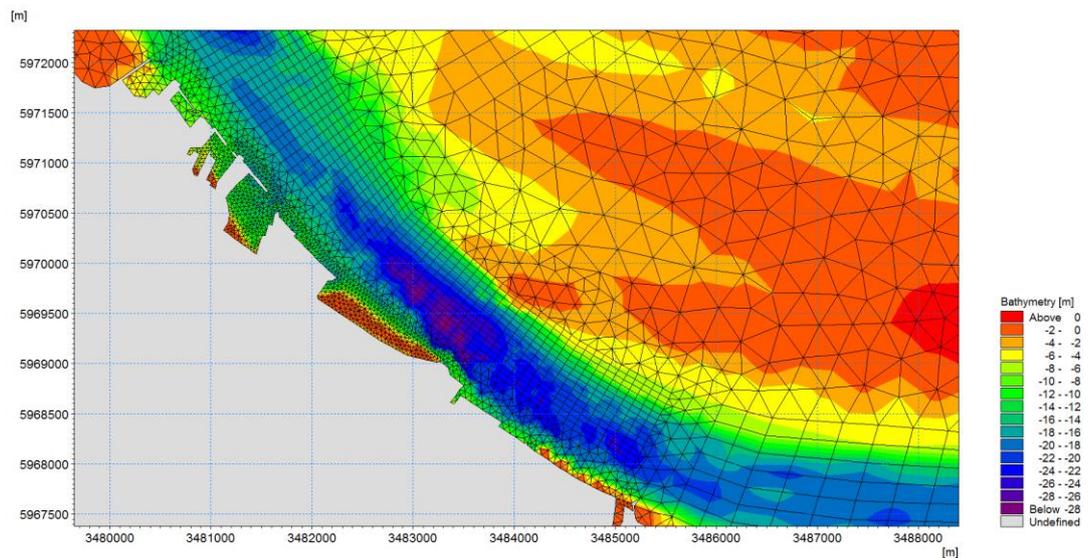


Abbildung 4-2      Nahaufnahme des Bereichs Cuxhaven Hafen im Ist-Zustand.  
 Unterschiedliche Maschenweiten werden für die jeweiligen Bereiche genutzt.  
 Im Planungsbereich sind Modellelemente am kleinsten

Die vertikale Schichtung des Modells ist durch das Sigma-Koordinatensystem gewährleistet worden. Hierbei wurden 10 Schichten gewählt, die unter Berücksichtigung der freien Oberfläche für ein entsprechendes Element äquidistant zueinander sind.

Zur Erstellung der erforderlichen Modellbathymetrie wurde das Berechnungsgitter auf Peildaten von 2014 interpoliert.

Für den Plan-Zustand wurde das Modell im Bereich der geplanten Liegeplätze modifiziert. Die Netzelemente, die nach dem Plan im Bereich der neuen Liegeplätze befinden, wurden entfernt und so die Küstenlinie im Planungsbereich angepasst (Abbildung 4-3).

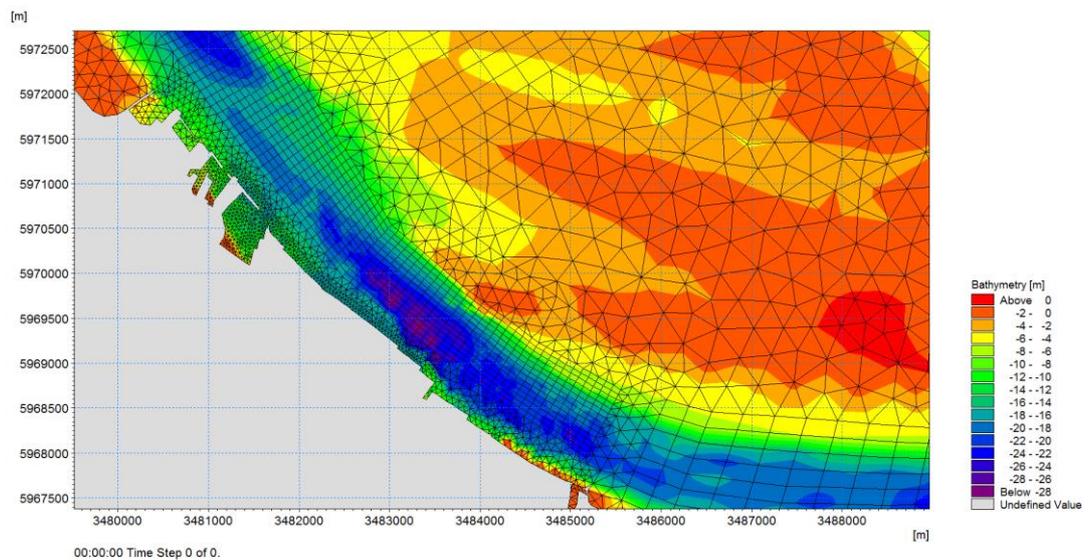


Abbildung 4-3      Modellaufbau im Bereich des Hafens von Cuxhaven im Plan-Zustand.

### 4.3 Randbedingungen

Für den Betrieb des Modells wurden an den offenen Rändern zur Nordsee Messwerte der Stationen Scharhörn (Wasserstand) und Steinriff (Temperatur und Salzgehalt) verwendet. Die Salzgehalts- und Temperaturmessungen wurden am Fahrrinnenrand vorgenommen und liegen nur in einer Höhenlage vor. Die tiefen Bereiche der Elbe mit ggf. höheren Salzgehalten oder niedrigeren Temperaturen wurden nicht erfasst und führen im Modell ggf. zu Abweichungen.

Der oberstromige Modellrand Richtung Hamburg ist über den Durchfluss gesteuert. Die Durchflussmengen wurden mit einem übergeordneten regionalen Modell der Elbe ermittelt. Eine Beschreibung des Modells findet sich bei den Untersuchungen zum Wärmelastplan Elbe [5]. Das Modell hat bereits in mehreren Projekten seine sehr gute Qualität nachweisen können.

Die Temperatur- und Salzgehaltsrandbedingungen am oberstromigen Modellrand wurden aus Messungen der Dauermessstationen D3 Pagensand entnommen. Hier gilt analog zum unteren Modellrand, dass die Messungen nur in einer Höhenlage am Rand der Fahrrinne vorgenommen wurden. Niedrigere Temperaturen oder höhere Salzgehalte die sich ggf. an der Sohle der Fahrrinne ausbilden wurden nicht erfasst und führen im Modell ggf. zu Abweichungen.

## 5 Modellzeiträume

Zur Modellierung wurde für die Sedimentbetrachtungen (Abschnitt 8) repräsentativer Zeitraum gewählt. Entscheidend für die hier durchgeführte Studie ist die Strömungssituation im Bereich der geplanten Liegeplätze 5-7, da durch die baulichen Veränderungen hier die größte Änderungen der Strömung zu erwarten sind.

Eine Übersicht der verfügbaren Messungen im Bereich der Tideelbe und der geplanten Liegeplätze sind in einer Karte zusammengefasst (Abbildung 5-1). Für die spätere Validierung des Strömungsmodells werden die Stationen Cuxhaven Steubenhöft, Brunsbüttel Mole 1, Kollmar, LZ 3c Altenbrucher Bogen, LZ 4a Steinriff und LZ 1a Brunsbüttel Elbehafen herangezogen.

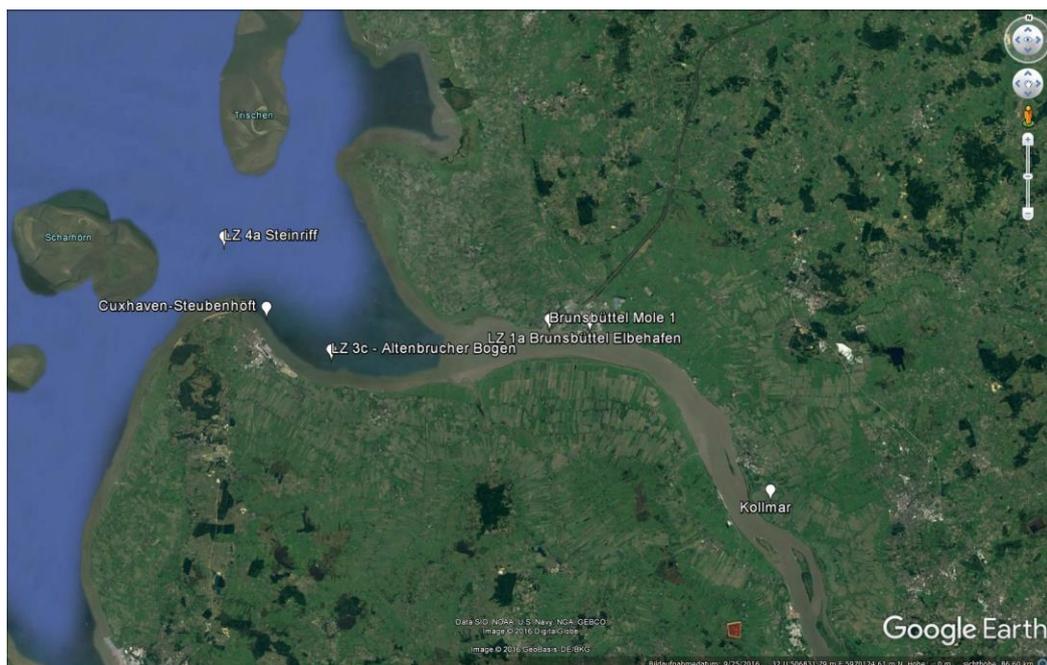


Abbildung 5-1 Karte des Untersuchungsgebiets mit den Lokationen der Messstationen

Als Modellzeitraum für die Untersuchungen wurde der Zeitraum September-November 2014 gewählt (09.09.2014 – 13.11.2014). Die am Pegel Altenbrucher Bogen gemessenen Flut- und Ebbströmungen in diesem Zeitraum sind Abbildung 5-2 zu entnehmen. Zur Einordnung dieser Strömungsgeschwindigkeiten im Verhältnis zu den statistischen Jahreswerten hilft Tabelle 1

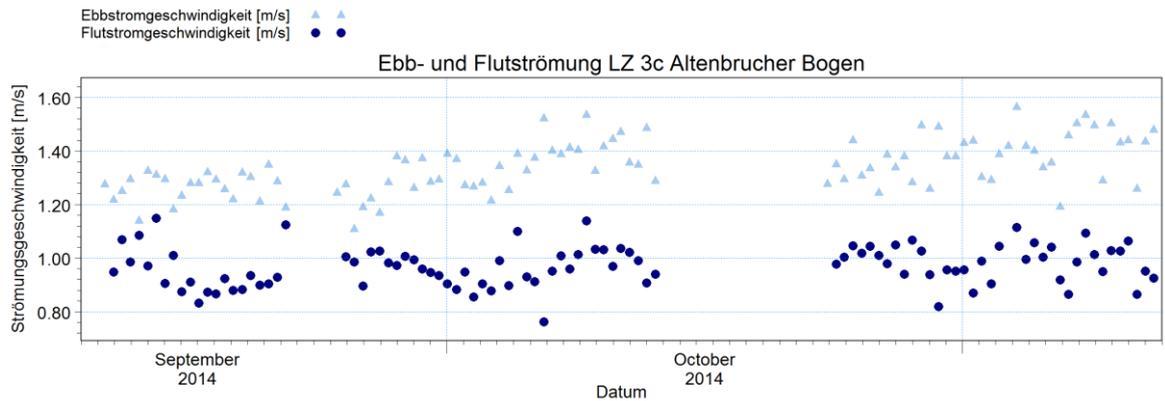


Abbildung 5-2 Maximale Ebbstrom- (hellblau) und Flutstromgeschwindigkeit (dunkelblau) an der Position LZ 3c Altenbrucher Bogen im Dezember 2014.

Tabelle 1 Perzentile und Mittelwerte der Ebb- und Flutstromgeschwindigkeiten aus dem Jahr 2014 zur Einschätzung der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten

Strömungs- geschwindigkeit	25% Perzentil [m/s]	Mittelwert [m/s]	75% Perzentil [m/s]	95% Perzentil [m/s]
Ebbstrom- geschwindigkeit	1.25	1.32	1.38	1.50
Flutstrom- geschwindigkeit	0.97	1.01	1.08	1.16

## 6 Nachweis der Modellgenauigkeit

Die Modellgenauigkeit wird für den Modellierungszeitraum nachgewiesen. In einem Vorgängerprojekt wurde die Modellgüte für einen weiteren Zeitraum nachgewiesen [4]. In diesem Projekt werden die berechneten Ergebnisse mit in-situ Messwerten aus dem Zeitraum 09.09.2014 bis 13.11.2014 verglichen.

### 6.1 Validierung

Zur Validierung des Modells werden die gemessenen Daten zum Wasserstand, Strömung, Salzgehalt und Temperatur mit den Modellwerten für den Zeitraum September 2014 bis November 2014 verglichen.

Für die Darstellung der Modellgüte wird jeweils ein Detailausschnitt des Zeitraums 25.09.2014 bis 30.09.2014 verwendet.

#### 6.1.1 Wasserstand

Die Ergebnisse in Abbildung 6-1 an dem Pegel Cuxhaven Steubenhöft zeigt eine gute Übereinstimmung des Wasserstands. Der Tidenhub wird vollständig modelliert.

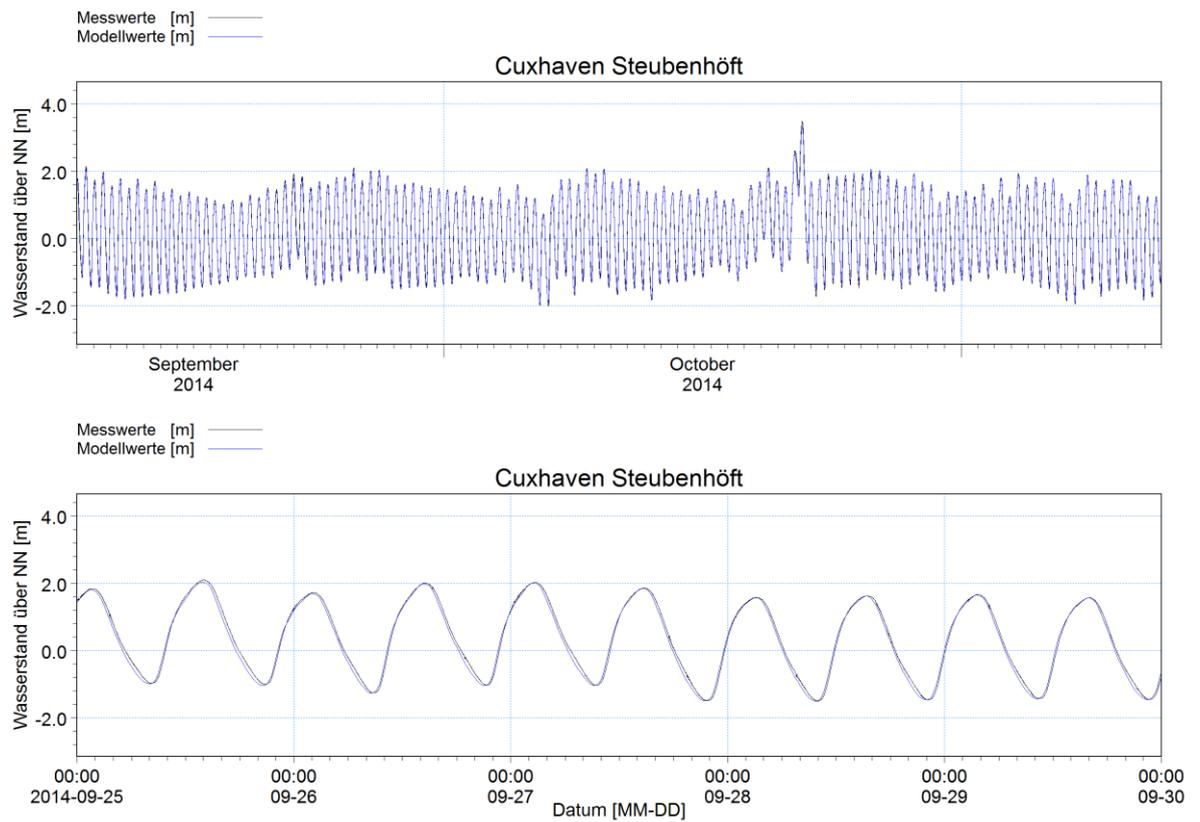


Abbildung 6-1 Validierung der Wasserspiegelauslenkung an der Position Cuxhaven Steubenhöft, Messung (schwarz) und Modell (blau)

Der Pegel Brunsbüttel Mole 1 (Abbildung 6-2) zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit den Modellergebnissen zur Validierung. Lediglich der Wasserstand während des Niedrigwassers wird vom Modell geringfügig überschätzt.

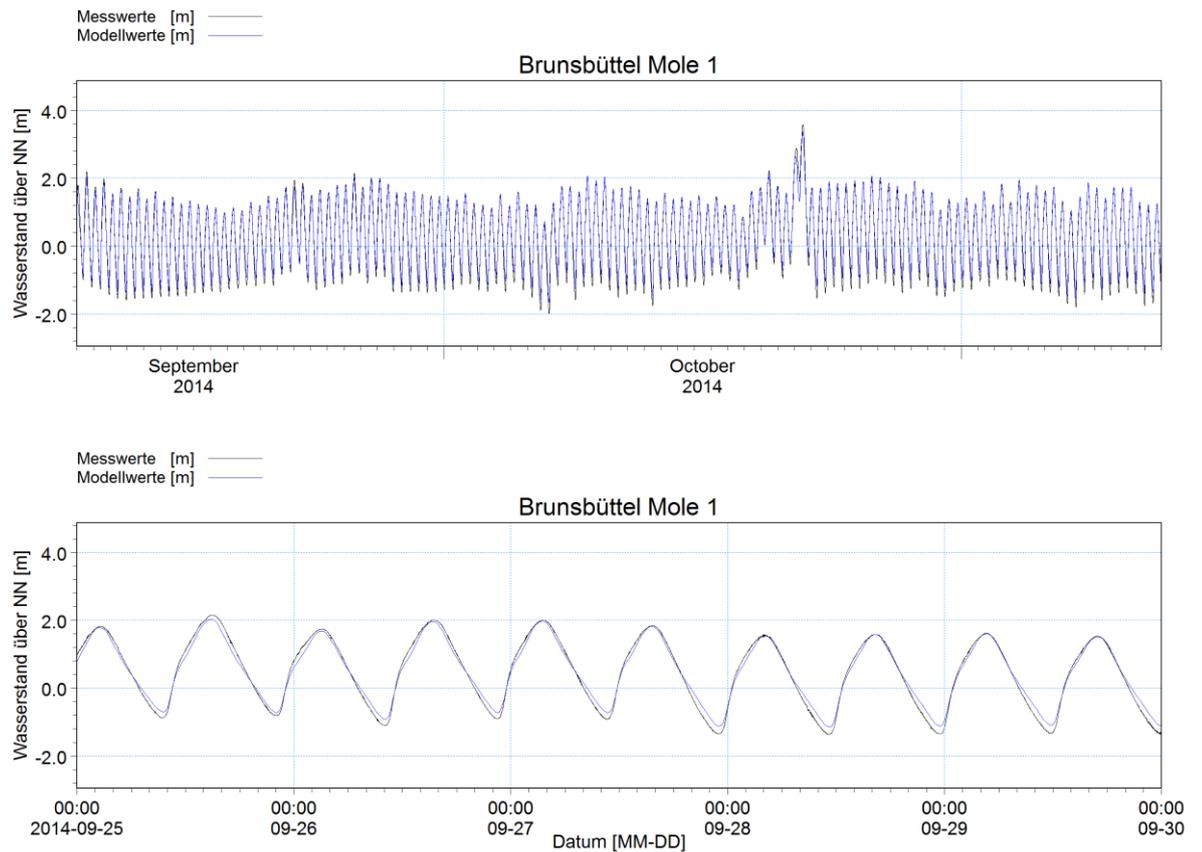


Abbildung 6-2 Validierung der Wasserspiegelauslenkung an der Position Brunsbüttel Mole 1, Messung (schwarz) und Modell (blau)

Der Pegel Kollmar in Abbildung 6-3 gibt den Wasserstand, der durch die Durchflussrandbedingungen am oberstromigen Modellrand erzeugt wird, gut wieder.

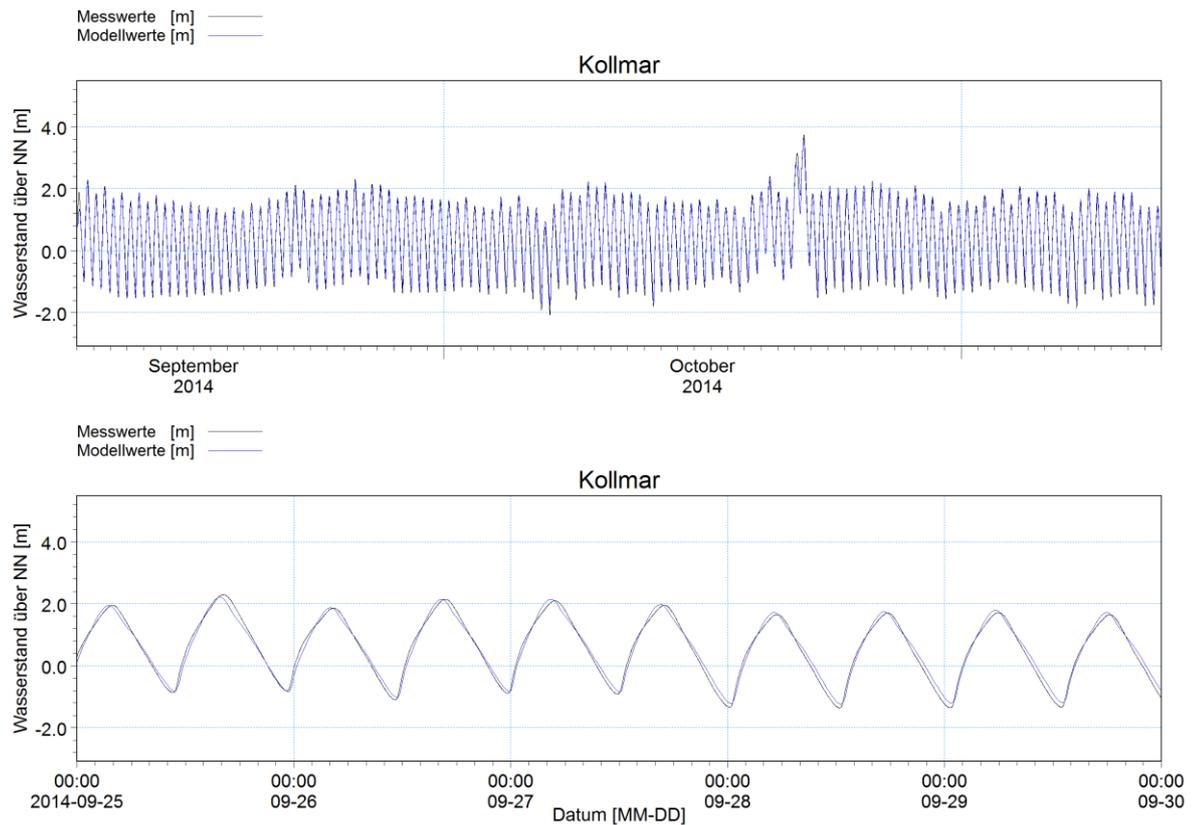


Abbildung 6-3 Validierung der Wasserspiegelauslenkung an der Position Kollmar, Messung (schwarz) und Modell (blau)

## 6.1.2 Strömungsgeschwindigkeit

Hinsichtlich des Vergleichs von gemessenen und simulierten Strömungsmessungen sollte beachtet werden, dass verschiedene Faktoren die direkte Vergleichbarkeit erschweren. In Ästuaren und Flüssen kann die hydrodynamische Situation auf kurzen Distanzen sehr variabel sein – insbesondere über die Tiefe aber auch senkrecht zur Flussachse. Die Messwerte bilden methodisch bedingt relativ kleinräumige Bereiche ab, wohingegen die Rechenzellen im Modell – insbesondere außerhalb des eigentlichen Untersuchungsgebiets – vergleichsweise groß sind. Kleinskalige Variationen im Strömungsmuster werden vom Modell daher nicht erfasst, können allerdings in den Messergebnissen auftreten. Es ist daher zu erwarten, dass die Modellergebnisse im Vergleich zu den Messungen „glatter“ sind.

An der Position LZ 3c Altenbrucher Bogen (Abbildung 6-4) zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Scheitelwerte der Ebb- und Flutströmung. Die Flutstromgeschwindigkeiten werden gut abgebildet, die maximalen Ebbstromgeschwindigkeiten werden vom Modell unterschätzt. Betroffen davon sind vor allem die Strömungsgeschwindigkeiten >1 m/s. Die Kenterung wird gut getroffen, kann lokal aber bis zu 25 Minuten abweichen.

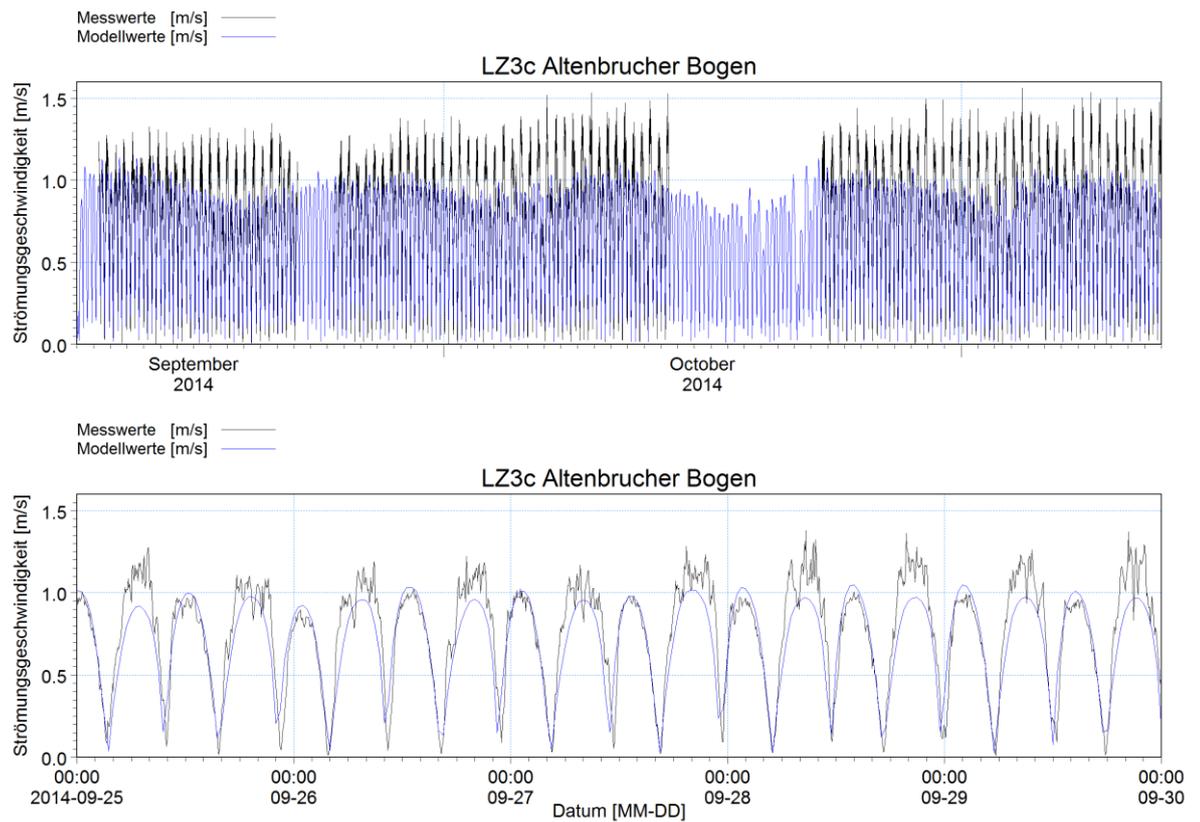


Abbildung 6-4 Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten an der Position LZ 3c Altenbrucher Bogen, Messung (schwarz) und Modell (blau)

An der Position LZ 4a Steinriff (Abbildung 6-5) gibt es ebenfalls eine systematische Abweichung in den modellierten Ebbstromgeschwindigkeiten von den Messwerten, die durchschnittlich ca. 0,4 m/s beträgt. Der Kenterpunkt wird gut getroffen.

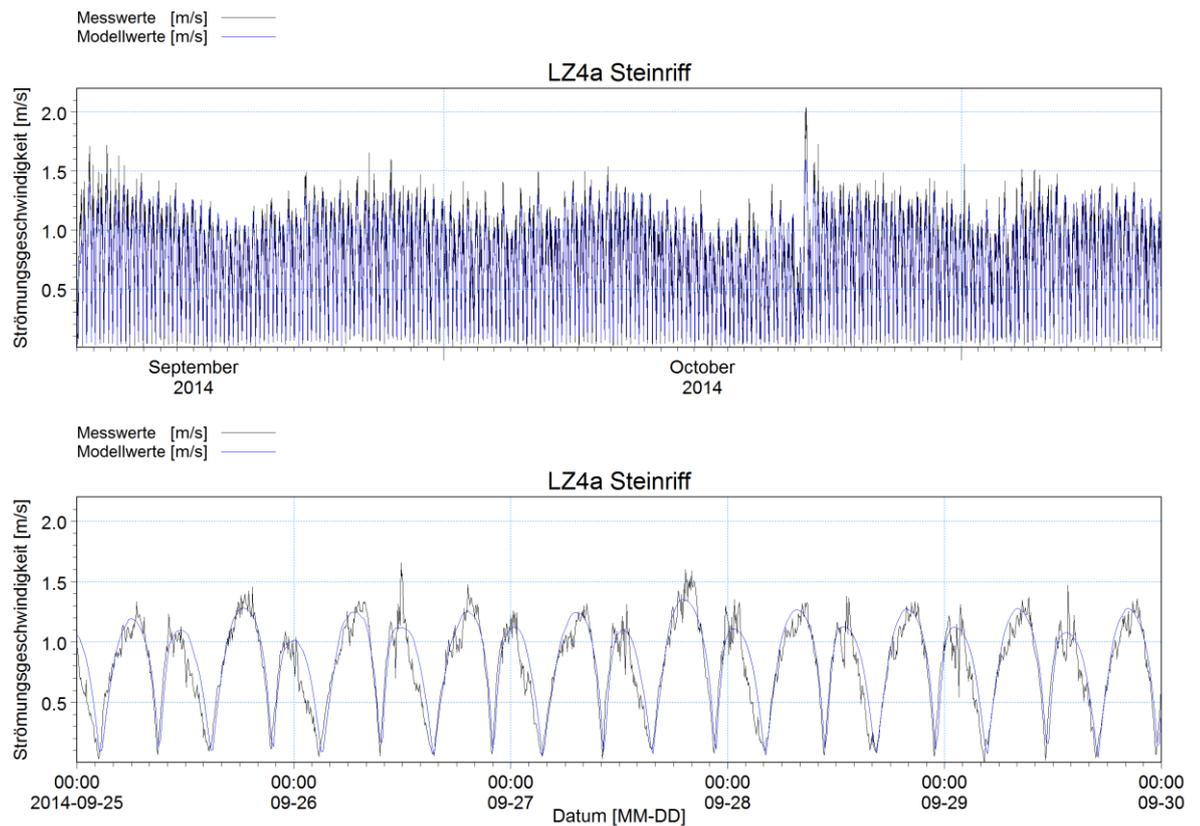


Abbildung 6-5 Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten an der Position LZ 4a Steinriff, Messung (schwarz) und Modell (blau)

Die Modellwerte der Strömungsgeschwindigkeiten an der Position LZ 1a Brunsbüttel Elbehafen zeigen eine tendenzielle Unterschätzung der Messwerte um ca. 0,3 m/s (Abbildung 6-6). Die Abweichung des Kenterpunkts beträgt ca. 30 min.

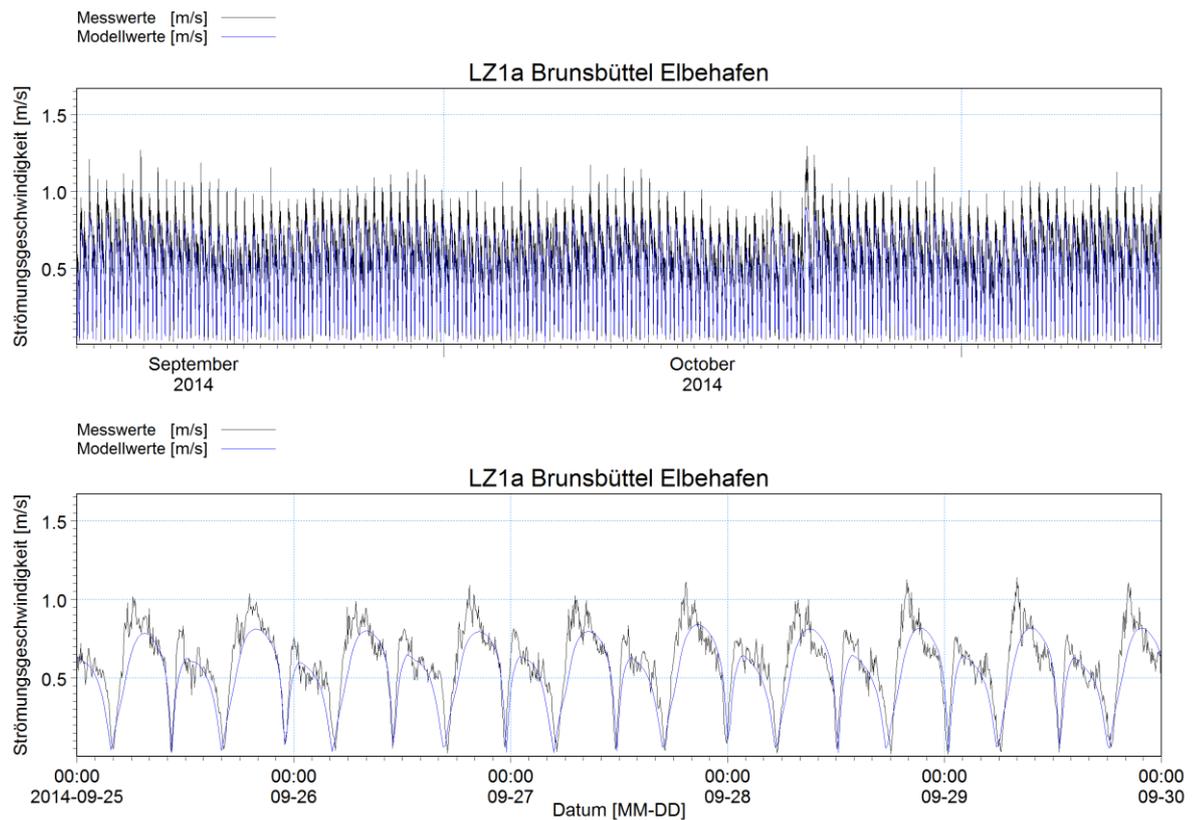


Abbildung 6-6 Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten an der Position LZ 1a Brunsbüttel Elbehafen, Messung (schwarz) und Modell (blau)

### 6.1.3 Salzgehalt

Die Salzgehaltsmessungen im Bereich des LZ 3c Altenbrucher Bogen (Abbildung 6-7) zeigt eine systematische Unterschätzung der Maximal- und Minimalwerte um ca. 2-5 PSU. Der relative Trend des Salzeinstroms wird dargestellt.

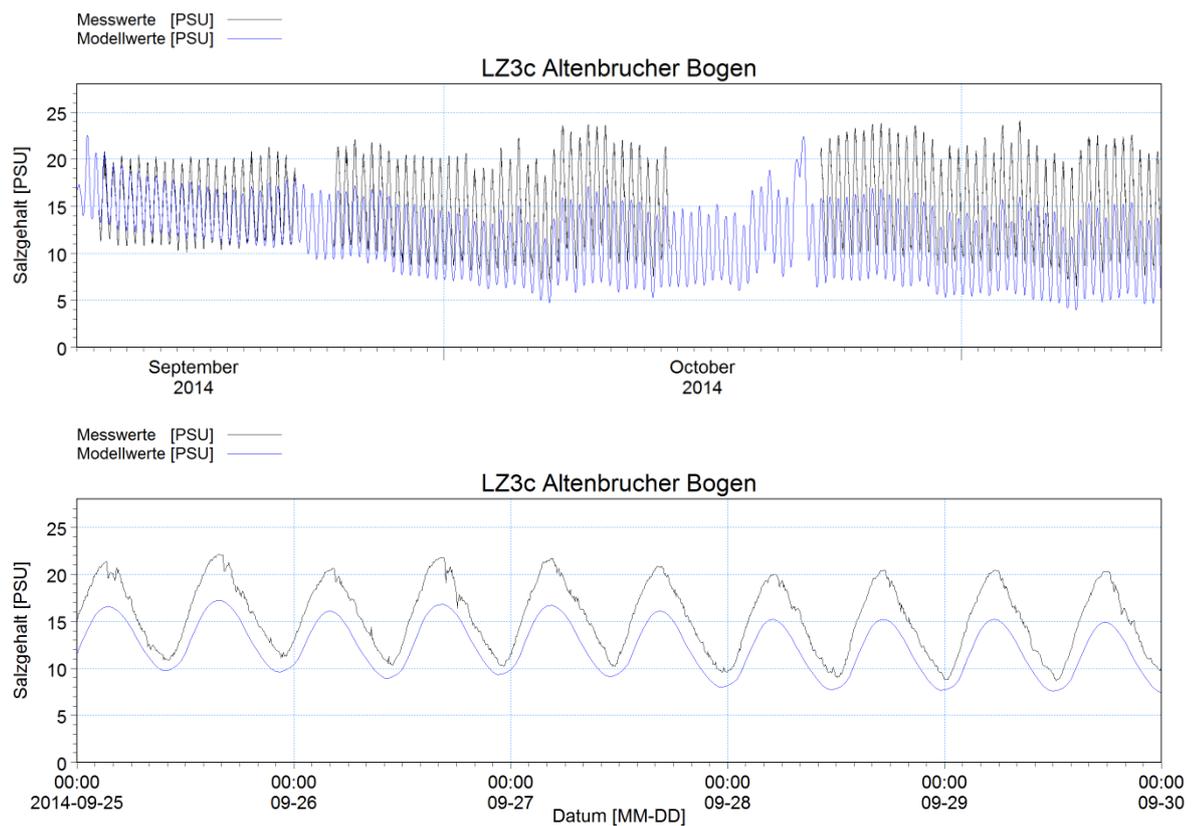


Abbildung 6-7 Validierung des Salzgehalts an der Position LZ 3c Altenbrucher Bogen, Messung (schwarz) und Modell (blau)

Die Salzgehaltsmessungen im Bereich der Position LZ 1a Brunsbüttel Elbehafen (Abbildung 6-8) zeigen eine tendenzielle Überschätzung der maximalen und eine Unterschätzung der minimalen Salzgehalte im Modell, dieser liegt kontinuierlich in einem Bereich von 1-2 PSU über den Messungen. Dieses Verhalten kann sehr wahrscheinlich mit einem lokalen Effekt erklärt werden: das niedrig saline Wasser aus dem NOK wird im Modell nicht abgebildet und führt in der Natur zu dem beobachteten niedrigeren Salzgehalt (begrenzt auf das Umfeld der Einleitung).

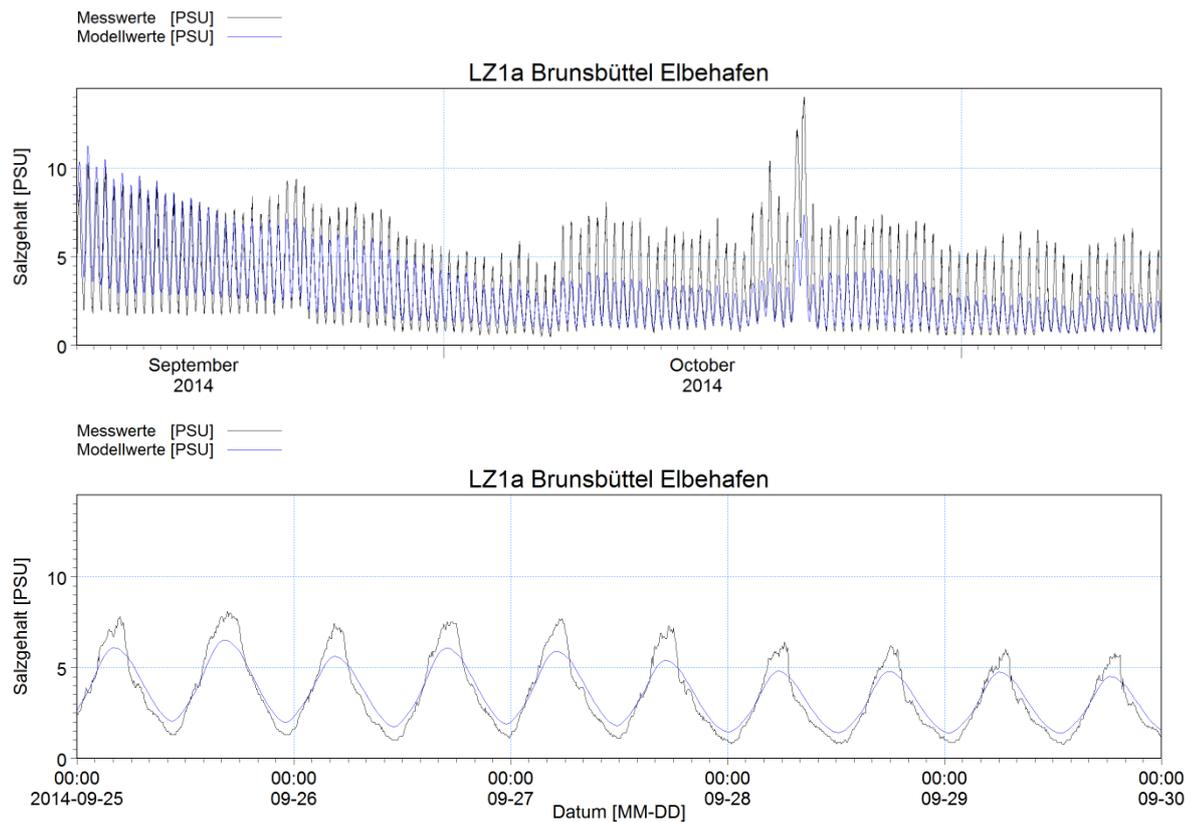


Abbildung 6-8      Validierung des Salzgehalts LZ 1a Brunsbüttel Elbehafen, Messung (schwarz) und Modell (blau)

#### 6.1.4 Temperatur

Im Vergleich von Messergebnissen und Modellergebnissen zeigt sich an der Position LZ 3c Altenbrucher Bogen, dass die Modellierung systematisch die Wassertemperatur überschätzt (Abbildung 6-9). Diese Abweichungen liegen in einem Bereich von ca. 0,5 - 1 °C. Die Wassertemperaturen werden für das Vorhaben gut abgebildet.

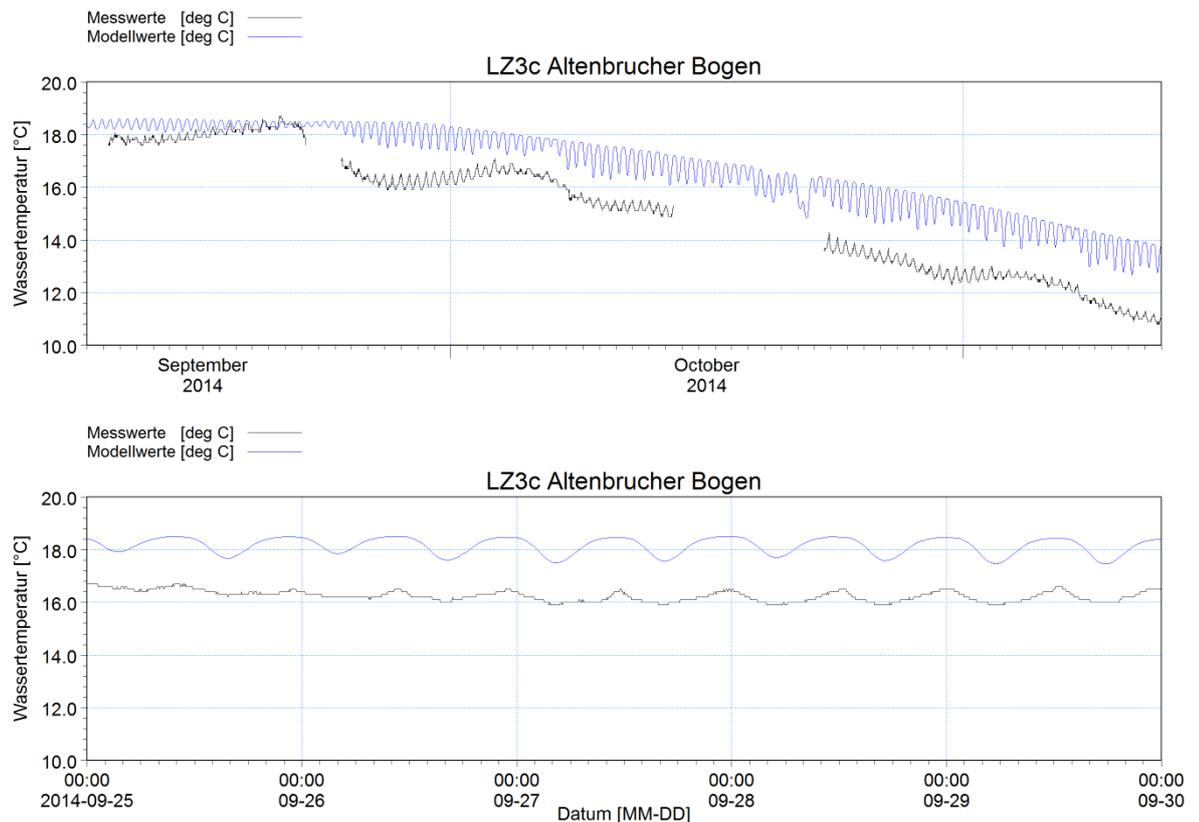


Abbildung 6-9 Validierung der Wassertemperatur an LZ 3c Altenbrucher Bogen, Messung (schwarz) und Modell (blau)

### 6.1.5 Fazit

Die Simulationsergebnisse zeigen eine die weitere Verwendung in den Sedimenttransportberechnungen hinreichend genaue Naturähnlichkeit. Insbesondere werden die für die Berechnung der kornbezogenen Schubspannungen wichtige Strömungsgeschwindigkeiten überwiegend gut wiedergegeben. Im Untersuchungsgebiet liegen die Spitzen der simulierten Strömungsgeschwindigkeiten leicht unter den Messwerten. Die modellierten Werte des Salzgehalts und der Temperatur zeichnen den Gang der Messwerte nach. Somit ist davon auszugehen, dass Dichteunterschiede und somit dreidimensionale Strömungen naturnah auch in dem Bereich der geplanten Liegeplätze abgebildet werden können.

Mit dem neu erstellten hydrodynamischen 3D-Modell (DHI, 2017) werden die Strömungsprozesse im Bereich der geplanten Liegeplätze hinreichend genau abgebildet, um die Auswirkungen auf die Sedimentationsprozesse abschätzen zu können. Bei gleichen externen Randbedingungen im Ist- und Planzustand (gleiche Sedimentfrachten an den Modellrändern) liegt der Fokus auf der Prognose der Sedimenttransportdifferenzen, welche auf die veränderten Strömungsprozesse an den geplanten Liegeplätzen zurückzuführen sind. Dabei ist das um die Beschreibung der Transportprozesse erweiterte Modell in der Lage, Bereiche erhöhter Sedimentation und Erosion auszuweisen. Eine Kalibrierung der absoluten Sedimentfrachten ist aufgrund der fehlenden Datenverfügbarkeit, vorrangig an den Modellrändern, aber nicht möglich.

## 7 Berechnung der Strömungsdaten

Zur Berechnung der Strömungsdaten in Bereich der geplanten Liegeplätze 5-7 wurde der in Kapitel 5 vorgestellte Modellzeitraum verwendet.

Für den Modellzeitraum werden die jeweiligen Parameter der Situation im Plan-Zustand für einen exemplarischen Zeitpunkt der Ebb- und Flutphase flächenhaft gezeigt.

Weiterhin werden für die Parameter Strömungsgeschwindigkeit und Wasserstand Zeitreihen vom Planzustand im Umfeld der Baumaßnahme gezeigt (Abbildung 7-8).

### 7.1 Modell

Die Strömungsdaten und Wasserstände werden aus dem Gesamtmodell (Abbildung 7-1) für den ausgewählten Bereich der geplanten Liegeplätze extrahiert und für die Ebb- und Flutphase betrachtet. Die Auswertungen beziehen sich in den Abbildungen auf die oberflächen- und sohnnahen Strömung (oberste und unterste Modellschicht), sowie die mittlere Modellschicht.

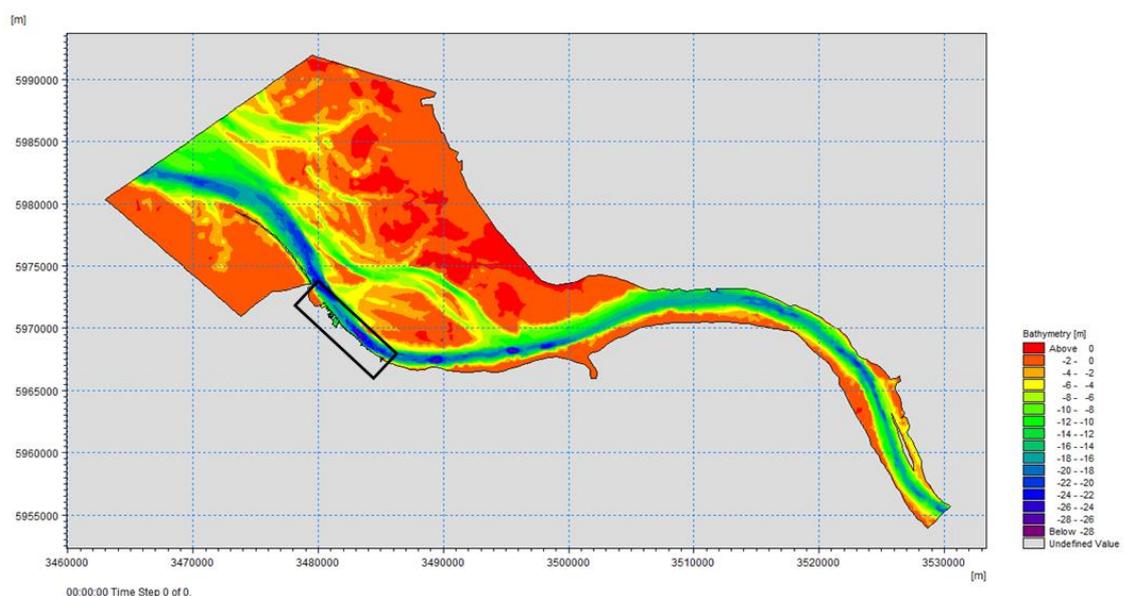


Abbildung 7-1 Bathymetrie des Modellgebiets der Tideelbe von Kollmar bis zur Nordsee bei Trischen und Scharhör. Der markierte Bereich umfasst den Extraktionsbereich der Strömungsdaten

#### 7.1.1 Strömung

Die Abbildung 7-2 zeigt den Plan-Zustand für die Flutphase an der Oberfläche. Die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten sind in den tieferen Bereichen der Fahrrinne und der Medemrinne zu beobachten.

Die Strömungsrichtung ist abhängig von der Tidephase. Während der Ebbphase kommt die Strömung in der Fahrrinne aus Südost und fließt Richtung Nordwest, während der Flutphase ist es umgekehrt. Die Strömungsgeschwindigkeiten sind während der Ebbphase höher als während der Flutphase. Zusätzlich ist während der Ebbphase ein Einstrom aus der Medemrinne anhand der Strömungsvektoren zu erkennen.

Ein Vergleich der Strömungsrichtung in den verschiedenen Tiefen zeigt nur geringe Unterschiede im Bereich der Medemrinne. Hier sind in Sohlhöhe kaum noch Einströmungen in die Fahrrinne zu beobachten. Generell sind mit zunehmender Wassertiefe geringere Strömungsgeschwindigkeiten erkennbar.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Strömungsgeschwindigkeiten an den geplanten Liegeplätzen die gleichen Werte haben, wie an den bestehenden Liegeplätzen, aber geringer sind als in der Fahrrinne. Der Einfluss der Medemrinne auf die Strömung an den Liegeplätzen ist nicht festzustellen.

### 7.1.1.1 Ebbphase

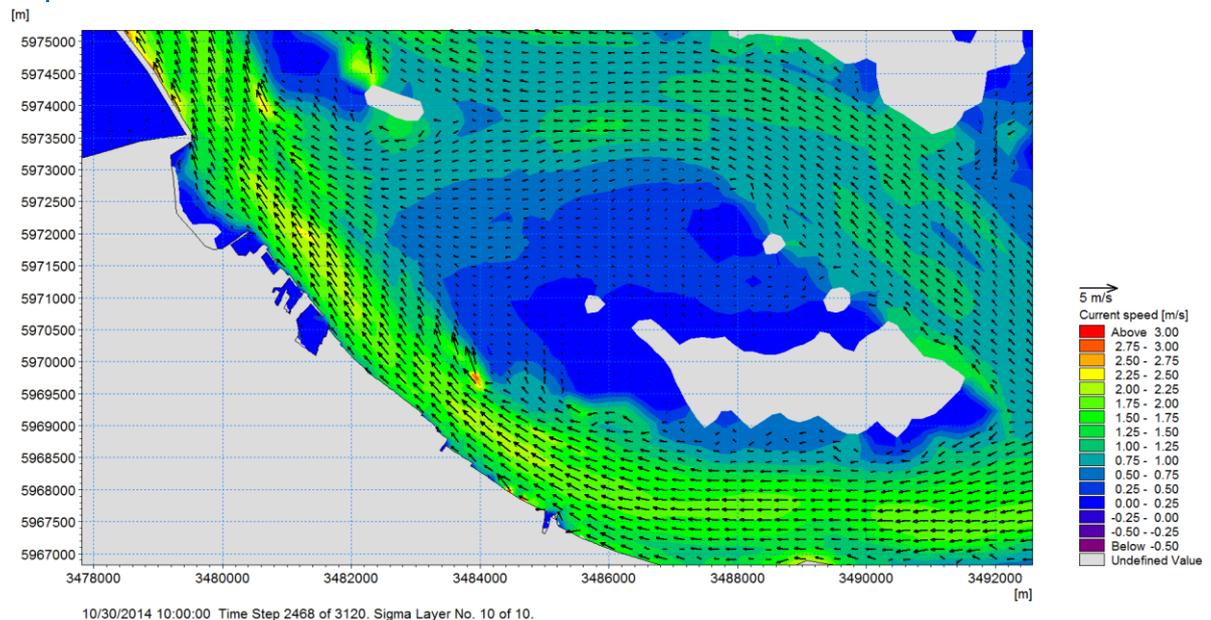


Abbildung 7-2 Strömungsgeschwindigkeit an der Oberfläche bei Ebbphase für den Plan-Zustand

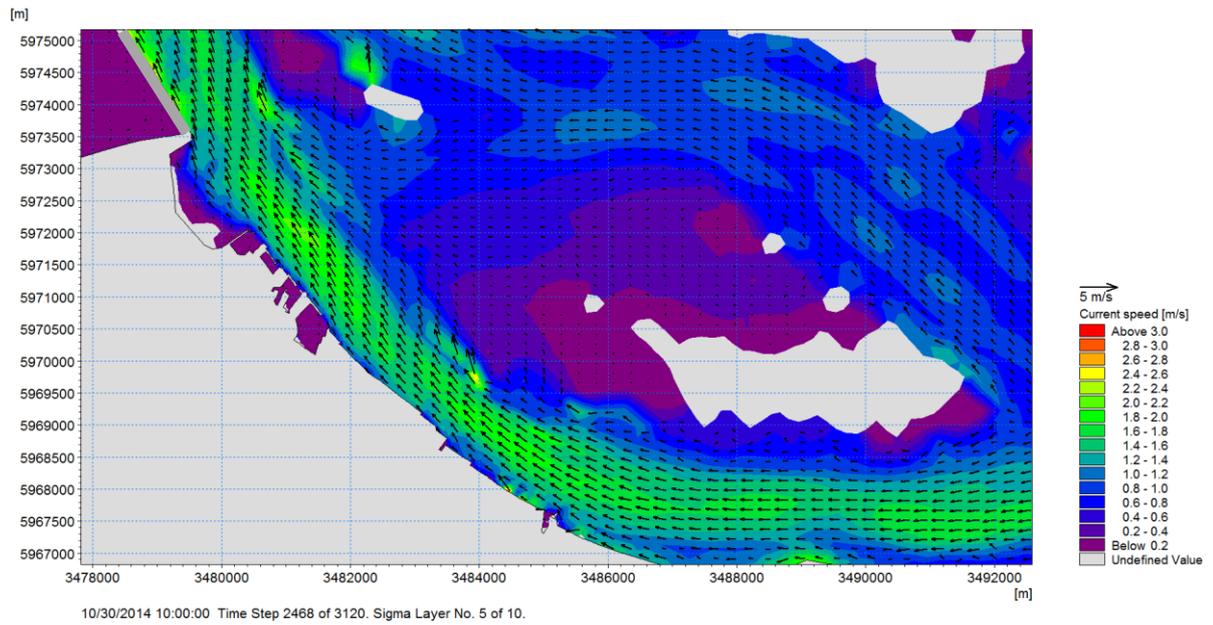


Abbildung 7-3 Strömungsgeschwindigkeit in der Mitte der Wassersäule bei Ebbphase für den Plan-Zustand

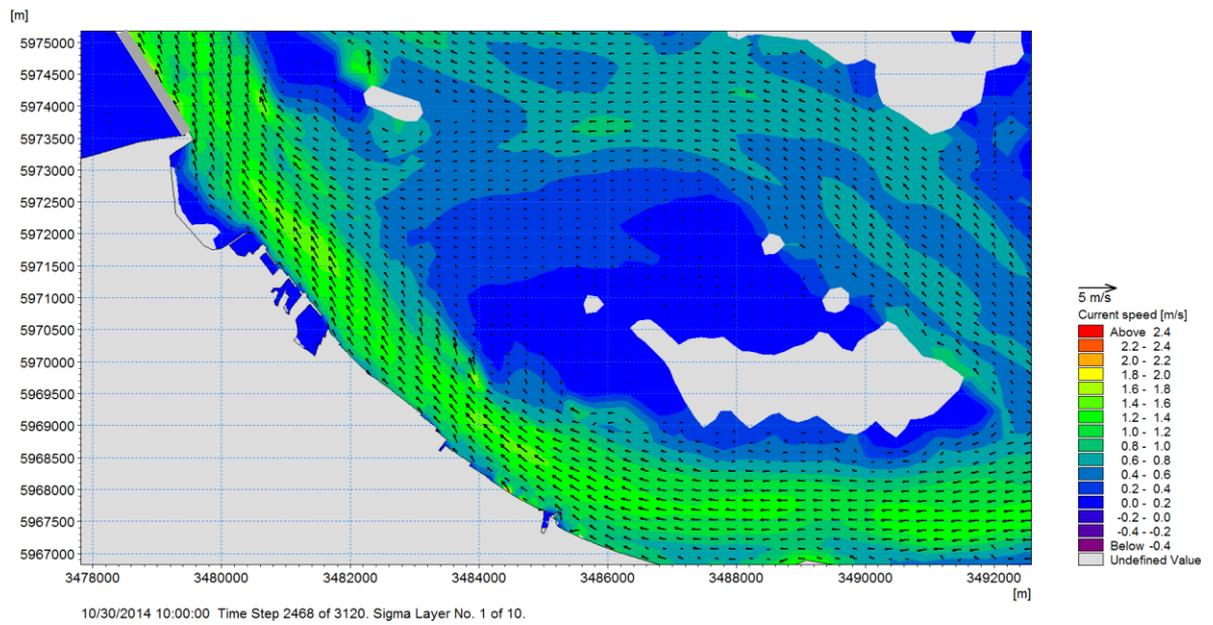


Abbildung 7-4 Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle bei Ebbphase für den Plan-Zustand

### 7.1.1.2 Flutphase

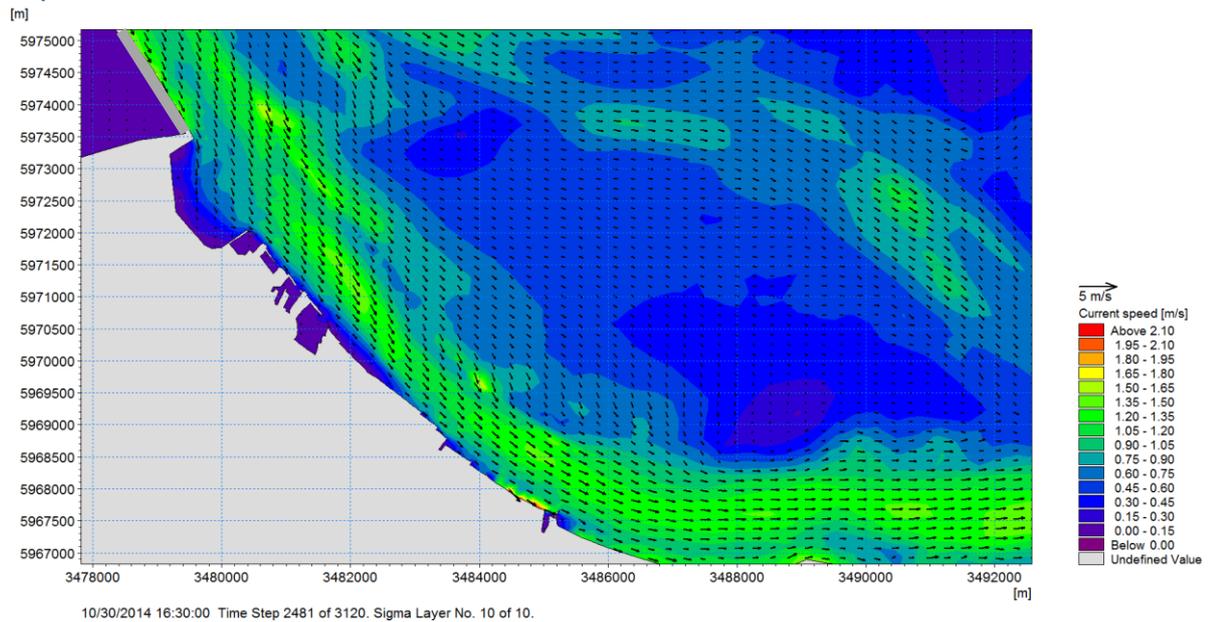


Abbildung 7-5 Strömungsgeschwindigkeit an der Oberfläche bei Flutphase für den Plan-Zustand

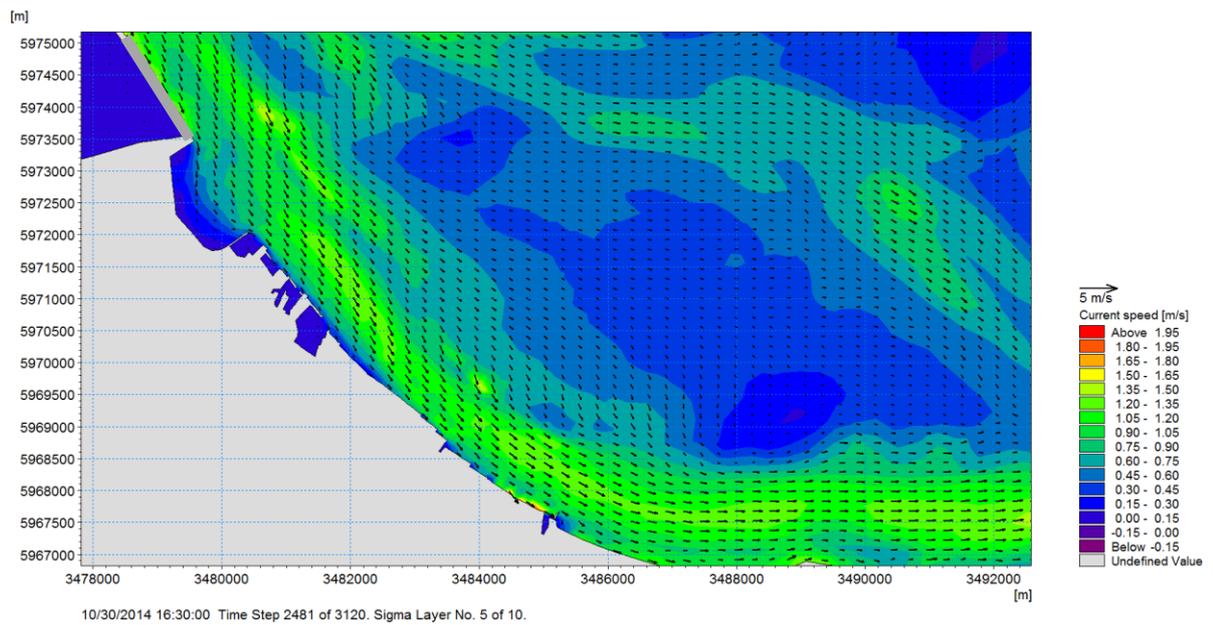
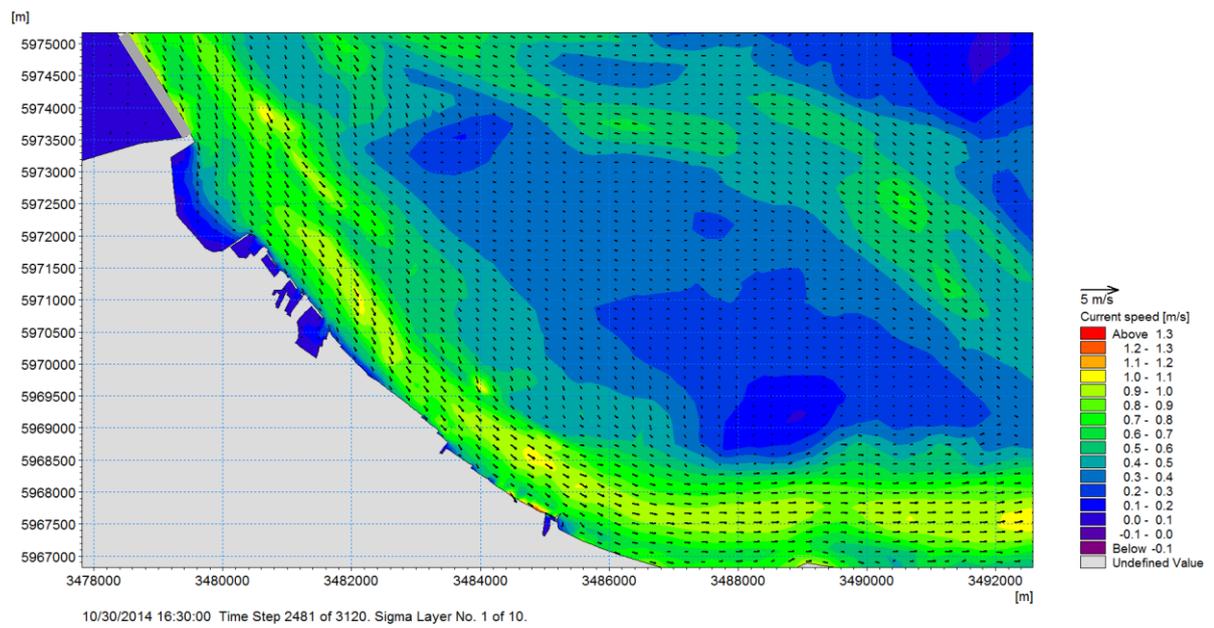


Abbildung 7-6 Strömungsgeschwindigkeit in der Mitte der Wassersäule bei Flutphase für den Plan-Zustand



1

Abbildung 7-7 Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle bei Flutphase für den Plan-Zustand

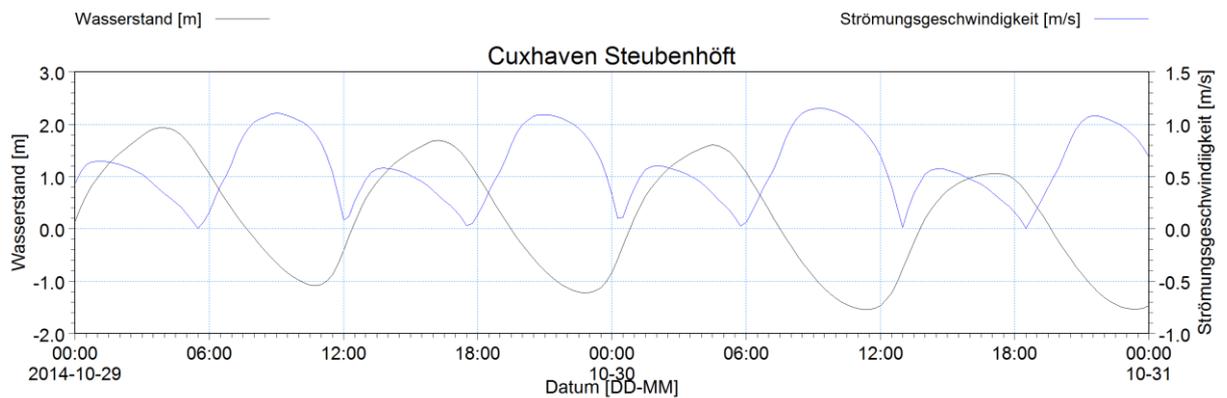


Abbildung 7-8 Modellergebnisse des Wasserstands und der Strömungsgeschwindigkeit am Standort Cuxhaven Steubenhöft

## 8 Sedimentologische Untersuchungen

### 8.1 Methodik

#### 8.1.1 Modellansatz

Zur Bestimmung eines geeigneten Modellansatzes wurden zunächst die Peildaten (Morphologie) (Abbildung 8-1) und die Sedimentproben im Bereich der geplanten Liegeplätze ausgewertet (Abbildung 8-2). Den Differenzenplots der Peildaten in Anhang B ist zu entnehmen, dass in dem Hauptströmungsbereich ab einer Distanz von etwa 150 m zu den geplanten Liegeplätzen morphologisch relevante Sandmengen (nicht-kohäsive Sedimente) bewegt werden und auch zu entsprechenden Dünenwanderungen führen. Der glatte Sohlbereich parallel zu dem Planungsgebiet hingegen deutet auf den Transport von feinsandigem Material hin. Ebenso zeigt eine Auswertung der vorhandenen Sedimentproben im Bereich der geplanten Liegeplätze (Abbildung 8-2), dass gröberes Sohlmaterial für den Bereich der Liegeplätze keine Rolle spielt. Die Sedimentation und ggf. Erosion in diesem Bereich spielt sich ausführlich im Bereich des kohäsiven, feinkörnigen Materials ab (Schluff und Feinsande). Die Präsenz von solchen Bereichen ist typisch für Ästuare und muss mit geeigneten Transportformeln, welche von den Ansätzen des Sandtransportes abweichen, berücksichtigt werden [1].

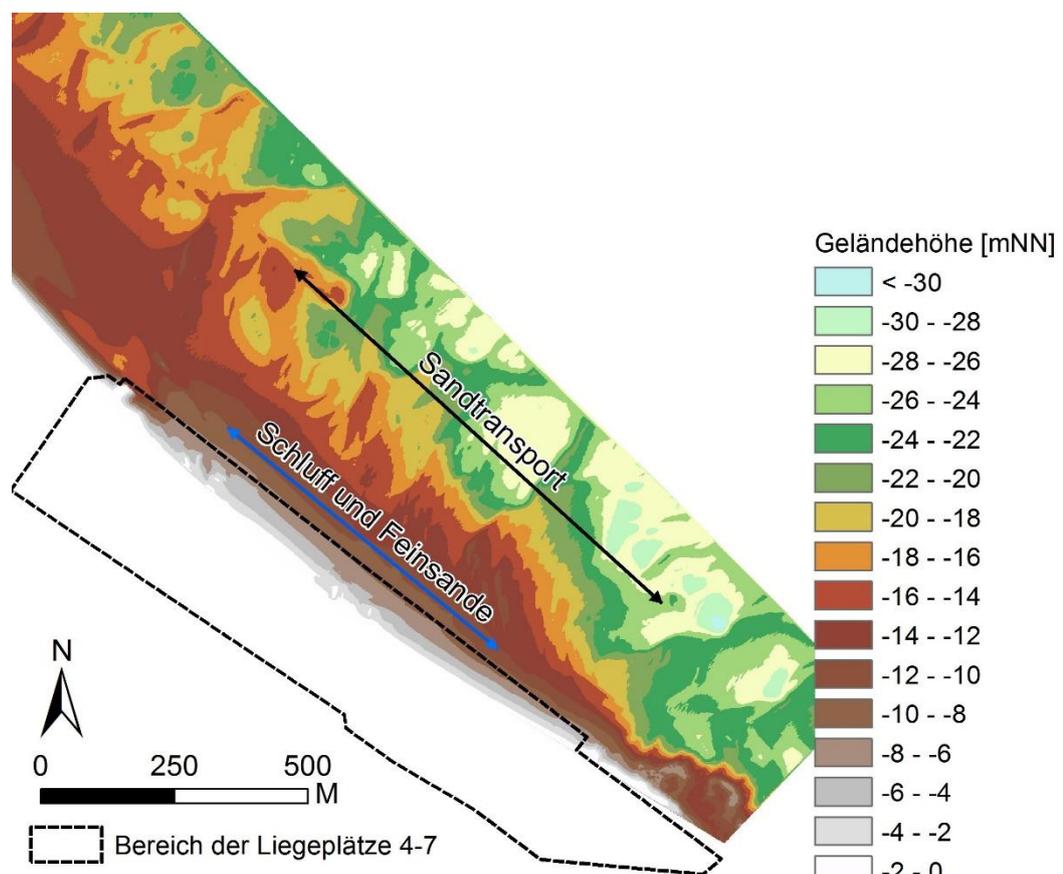


Abbildung 8-1: Sedimenttransportprozesse im Bereich der Liegeplätze 5-7

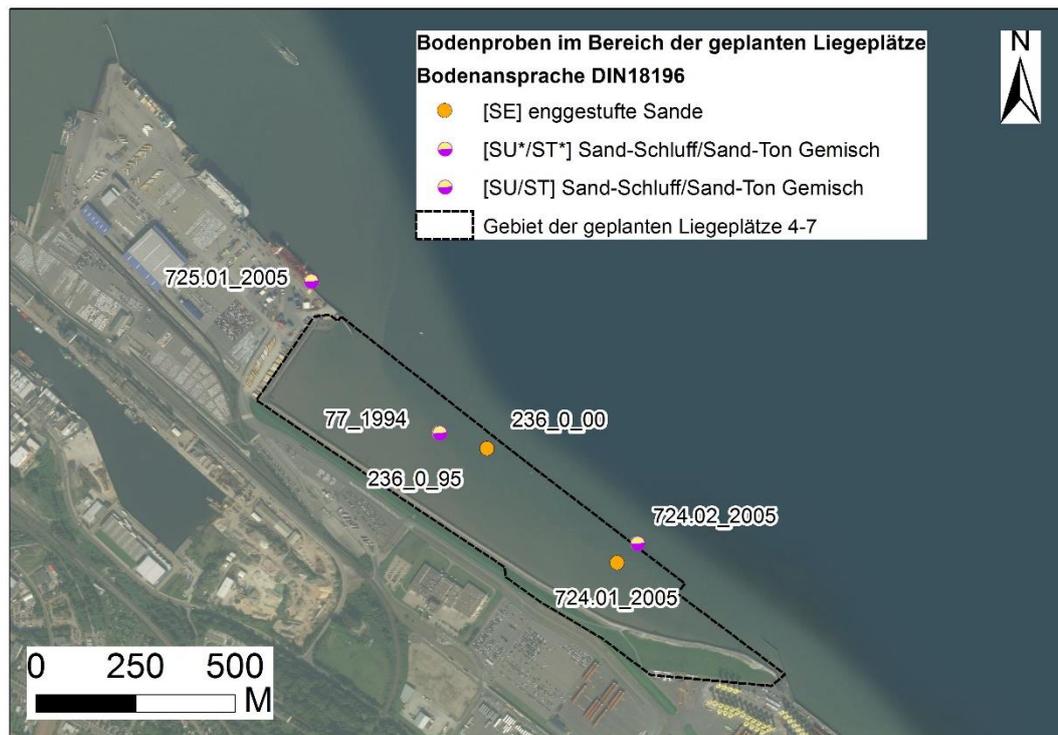


Abbildung 8-2: Lage der Sedimentproben im Bereich der geplanten Liegeplätze 5-7

Nicht-kohäsiver Feinsand (mittlere Korngröße 0,063 – 0,125 mm) kann als suspendiertes Sediment transportiert werden wenn die vertikale Turbulenz ausgeprägt genug ist, um vertikale Geschwindigkeitskomponenten  $>$  Sinkgeschwindigkeiten zu generieren. Die wesentliche Unterscheidung zur mathematischen Beschreibung der Feinsandsedimentationsprozesse liegt in der Definition des Konzentrationsprofils. Während bei schluffigem Material die Zeitskala durch die langsame Anpassung des Konzentrationsprofils auf veränderte Strömungsbedingungen eine geringere Rolle spielt, hat sie bei der Beschreibung des Profils für den Feinsandtransport einen wesentlichen Einfluss, den es in der mathematischen Abstraktion der Konzentrationsverteilung zu berücksichtigen gilt.

Für die sedimentologischen Berechnungen wurde ebenfalls der Zeitraum vom 09.09.2014 bis zum 13.11.2014 gewählt. Dieser Zeitraum beinhaltet eine Spring- und Nipptide und bildet außerdem eine größere Sturmflut (Ende Oktober 2014) ab.

### 8.1.2 Modellparameter

Um die Sedimentationsprozesse im Bereich der geplanten Liegeplätze realistisch abzubilden, muss in der Modellierung eine Vielzahl von Parametern bestimmt werden. Wegen der empirischen Ableitung der Transportformeln sind die entsprechenden Koeffizienten beim Validierungsprozess in einem bestimmten Toleranzbereich anzupassen und sind als kalibrierbare Größen zu verstehen. Die in Tabelle 2 beschriebenen Parametersätze wurden sowohl für den Ist- als auch den Planzustand angewendet.

Tabelle 2: Verwendete Modellparameter

Parameter	Wert	Kommentar/Quelle
Mittlere Korngröße	ca. 0,07-0,15 mm	Indirekt verwendet zur Ableitung der Sinkgeschwindigkeiten und Erosionskoeffizienten
Koeffizient zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeiten für Schluff	5	Berücksichtigung der Flokkulation anhand der Winterwerp Formulierung
Mittlere Sinkgeschwindigkeiten für Feinsand	$1,5 \times 10^{-3}$ m/s	Abgeschätzt Stoke´s law, modifiziert während des Kalibrierprozesses
Kritische Schubspannung ( $\tau_{cd}$ ) zur Initiierung von Feinsandablagerungen	0,2 N/m <sup>2</sup>	Sedimentstudie Brunsbüttel [2] und Untersuchungen zum Amerika-Hafen [3]
Kritische Schubspannung ( $\tau_{cd}$ ) zur Initiierung von Schluffablagerungen	0,25 N/m <sup>2</sup>	Sedimentstudie Brunsbüttel [2] und Untersuchungen zum Amerika-Hafen [3]
Exponent für Erosion	9	
Kritische Schubspannung ( $\tau_{ce}$ ) zur Initiierung der Erosion von weichem Schlamm	0,35 N/m <sup>2</sup>	Kalibrierparameter, typischer Wert für weichen Schlamm
Erodierbarkeit der Sohle	$7 \times 10^{-5}$ kg/m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	Parchure und Mehta (1985)
Dichte des Sohlmaterials	440 kg/m <sup>3</sup>	Obergrenze teilgehärteter Schlamm
Sohlrauhheit	0,001 m	Empfohlener Wert für feines Sediment [1], für gröberes Material würde die Faustregel Äquivalente Sandrauheit $k_N = 2-2,5 \times d_{50}$ gelten
Sedimentkonzentrationen Feinsand/Schluff an den Modellrändern	0,07 und 0,10 kg/m <sup>3</sup>	Sedimentstudie Brunsbüttel [2]
Anteil Feinsand/Schluff	80% 20%	Sedimentkataster <a href="https://www.portaltideelbe.de/">https://www.portaltideelbe.de/</a> aufgerufen Mai 2017

## 8.2 Modellberechnungen- und Validierungen

### 8.2.1 Sohllagen

Die Untersuchungen der Sohllagen anhand von Peildaten zeigen, dass der Ist-Zustand derzeit im Bereich der geplanten Liegeplätze unter Berücksichtigung von Messungenauigkeiten (+/-10 cm) als sehr als stabil zu bewerten ist (Aussage AG und

Anhang B). In einem Transportband etwa 150 m Richtung Elbe lagern sich ausschließlich Schluff und Feinsande ab. Die Strömungsgeschwindigkeiten und Schubspannungen in diesem Bereich sind durch die Tideschwankungen zu wechselhaft, damit sich dort dauerhaft Sedimentmaterial ablagern könnte und gleichzeitig zu niedrig, um Sohlmaterial in großen Mengen zu bewegen. Die Differenzen zwischen modellierten und beobachteten Sohlagenänderungen (wobei die modellierten Sohlagenveränderungen größtenteils gleich null sind) zeigen, dass das Modell diese Prozesse gut abbildet (Abbildung 8-3), während die deutlichen morphologischen Veränderungen im Hauptstrom mit dem angesetzten Modellansatz (Abschnitt 8.1.1) keine Berücksichtigung finden.

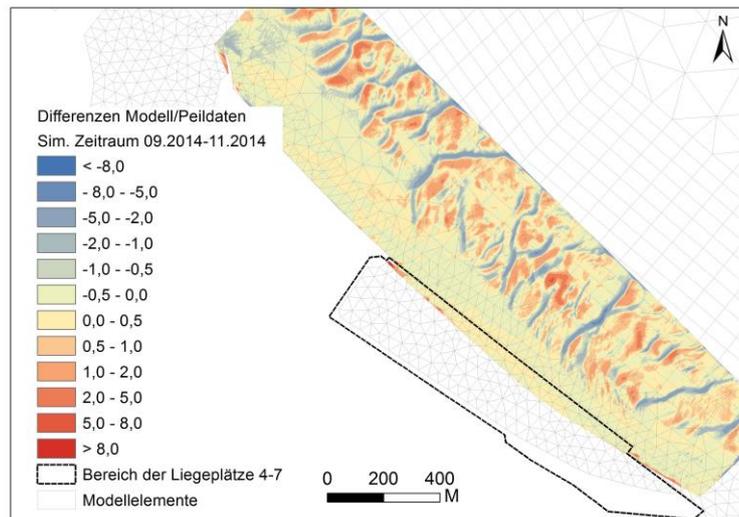


Abbildung 8-3: Beobachtete Peildatendifferenzen im Bereich der geplanten Liegeplätze

## 8.2.2 Plausibilisierung Amerikahafen

Die Sedimentationsprozesse im etwa 1 km nordwestlich des geplanten Bauvorhabens liegenden Amerikahafen wurden in einer bestehenden Studie bereits ausführlich untersucht [3]. Dieser Bereich ist auch im bestehenden Modell abgebildet, und ein Abgleich zwischen den modellierten Transportgrößen im aktuellen Projekt und den Untersuchungen des Amerikahafens wurden als zusätzliche Plausibilisierung der Modellgüte und Modellergebnisse verwendet.

In der bestehenden Studie [3] wurden für das Jahr 2000 Sedimentationshöhen von rd. 7 mm/Tide mit Ablagerungen von bis zu 15 mm/Tide gemessen. Die Ablagerungsmengen in den aktuellen Modellergebnissen entsprechen diesen gemessenen Sedimentationshöhen (Abbildung 8-6), was für eine naturnahe Abbildung der Strömungsprozesse und eine korrekte Einstellung der Modellparameter im Sedimenttransportmodul spricht. Über einen Zeitraum von zwei Monaten mit mindestens einer Springflut, Nipptide und einer Sturmflut lagern sich demnach bis zu 1,4 m Schlamm im Zentrum des Amerikahafens ab. Nach der Sturmflut erhöhen sich die Sedimentationsraten über mehrere Tiden, da frisch aufgewirbelter Feinsand sich progressiv wieder ablagert. Auch die Verteilung der Sedimente im Amerikahafens, mit geringeren Ablagerungsmengen in den Randbereichen des Amerikahafens wird analog zur Detailstudie [3] gut mit dem Modell abgebildet (Abbildung 8-5).

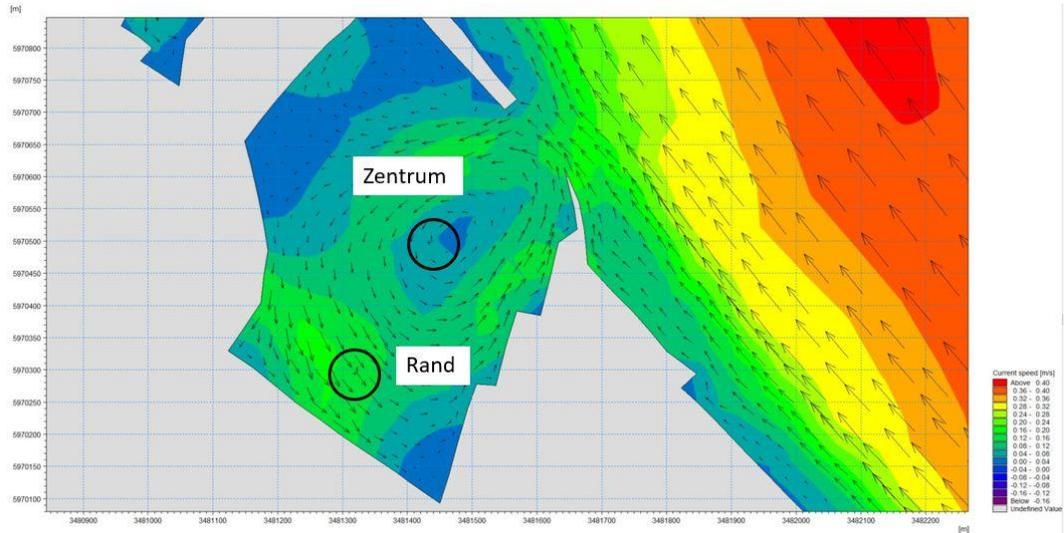


Abbildung 8-4: Lage der Zeitreihenextraktion im Amerikahafen

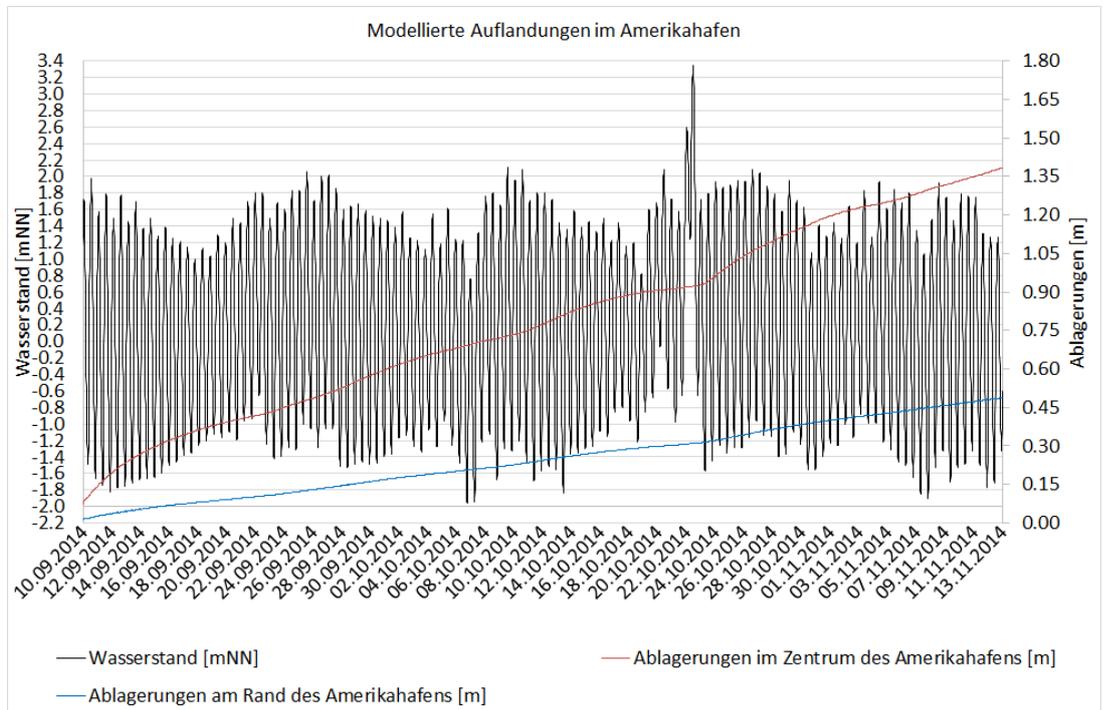


Abbildung 8-5: Modellierte Auflandungen im Amerikahafen über den ganzen Simulationszeitraum

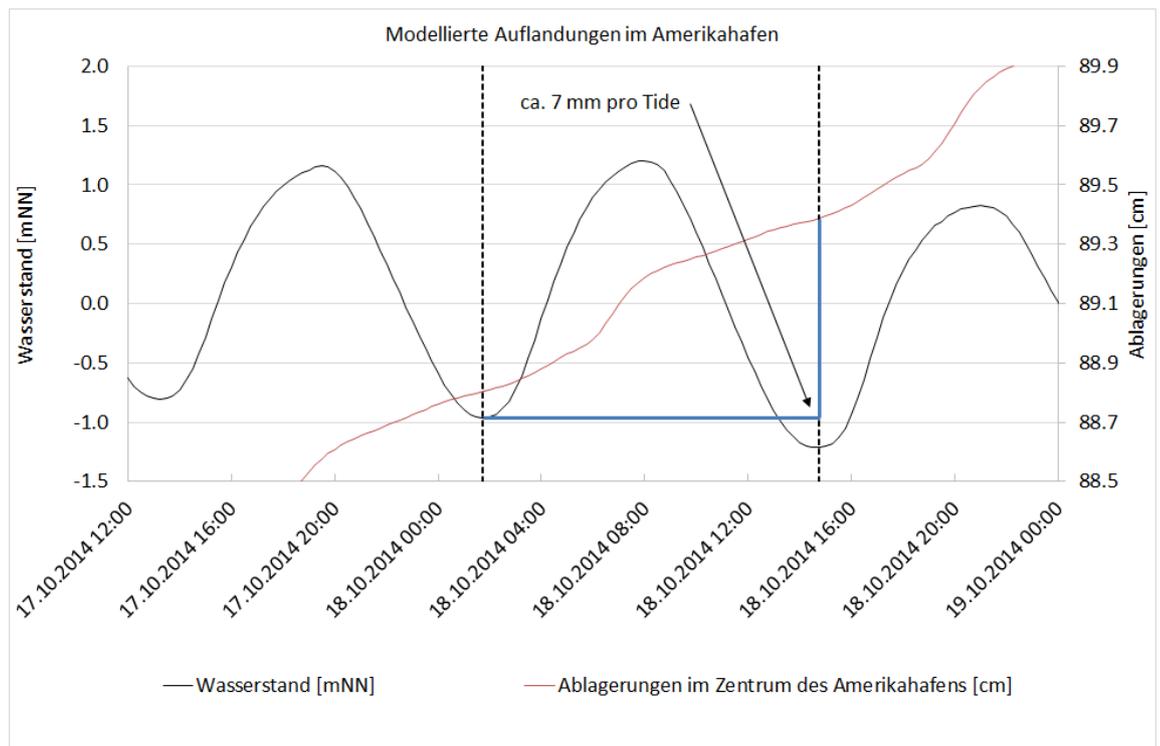


Abbildung 8-6: Modellierte Auflandungen im Amerikahafen, Detailbetrachtung

In der sohnahen Schicht werden im Amerikahafen laut bestehendem Modell etwa 0,05 bis 0,12 kg/m<sup>3</sup> an Schwebstoffen transportiert, bei Flut verdoppelt sich diese Menge. Im aktuellen Modell wurden bei dem modellierten Zeitraum Schwebstoffkonzentrationen zwischen etwa 0,10-0,18 kg/m<sup>3</sup> (Ebbe) und 0,22-0,32 kg/m<sup>3</sup> (Flut) im Bereich des Hafens ausgewiesen, ein weiterer Hinweis dafür, dass das 3D Modell den Schwebstofftransport plausibel abbildet.

## 8.3 Auswertung der Ergebnisse

Mit dem korrekt eingestellten Modell wurde anschließend der Planzustand für den gleichen Zeitraum simuliert und die schwebstoffrelevanten Ergebnisse verglichen.

### 8.3.1 Schubspannungen

Die Modellergebnisse der sohnahen Schubspannungen dienen zur Untersuchung der hydrodynamischen Kräfte, welche sich direkt auf das Sohlmaterial auswirken. Dieser Parameter wird im Modell auch indirekt dazu verwendet, um während der Simulation die Erfüllung der Kriterien zur Ablagerung bzw. zum Bewegungsbeginn der Sedimente abzugleichen.

Die modellierten sohnahen Schubspannungen sind Anhang C zu entnehmen. Bei Ebbe treten durch die Kombination des oberstromigen Zuflusses und der abfließenden Tide im Allgemeinen höhere Schubspannungen als während der Flutphase auf (Abbildung 8-7). Dabei liegen maximalen die Schubspannungen einige Stunden vor Niedrigwasser im Bereich von 1,5 – 3,5 N/m<sup>2</sup> entlang der geplanten Liegeplätze<sup>1</sup>, während bei Flutstrom einige Stunden nach dem Kenterpunkt Schubspannungen < 1,5 N/m<sup>2</sup> zu erwarten sind.

<sup>1</sup> Während des Simulationszeitraums wurden maximale Schubspannungen von 5 N/m<sup>2</sup> erreicht

In der Zeit zwischen den beiden Maxima entsteht ein Zeitfenster von etwa zwei Stunden, wo Feinsande bei entsprechend langsamen Sinkgeschwindigkeiten abgelagert werden könnten. Bei Schubspannungen von  $>0,35 \text{ N/m}^2$  besteht theoretisch die Möglichkeit zur Erosion, allerdings nur von frisch abgelagerten Feinsanden.

Differenzen zwischen Ist- und Planzustand bei den Schubspannungsspitzen sind dabei geringfügig ( $< 0,5 \text{ N/m}^2$ ). Entlang der geplanten Liegeplätze im Planzustand ist durch die fehlenden lateralen Strömungskomponenten, welche im Ist-Zustand an der bestehenden Ausbuchtung zu beobachten sind, die Schubspannungen bei Ebbstrom geringfügig niedriger (Abbildung 8-7, Abbildung 8-8 und Abbildung 8-9). Die Zeiträume, bei denen die in Tabelle 2 genannten kritischen Werte unterschritten, bzw. überschritten werden, ändern sich durch das veränderte Strömungsbild geringfügig (Abbildung 8-7). Demnach sind auch leichte Veränderungen der Sedimentkonzentrationen und Ablagerungen zu erwarten.

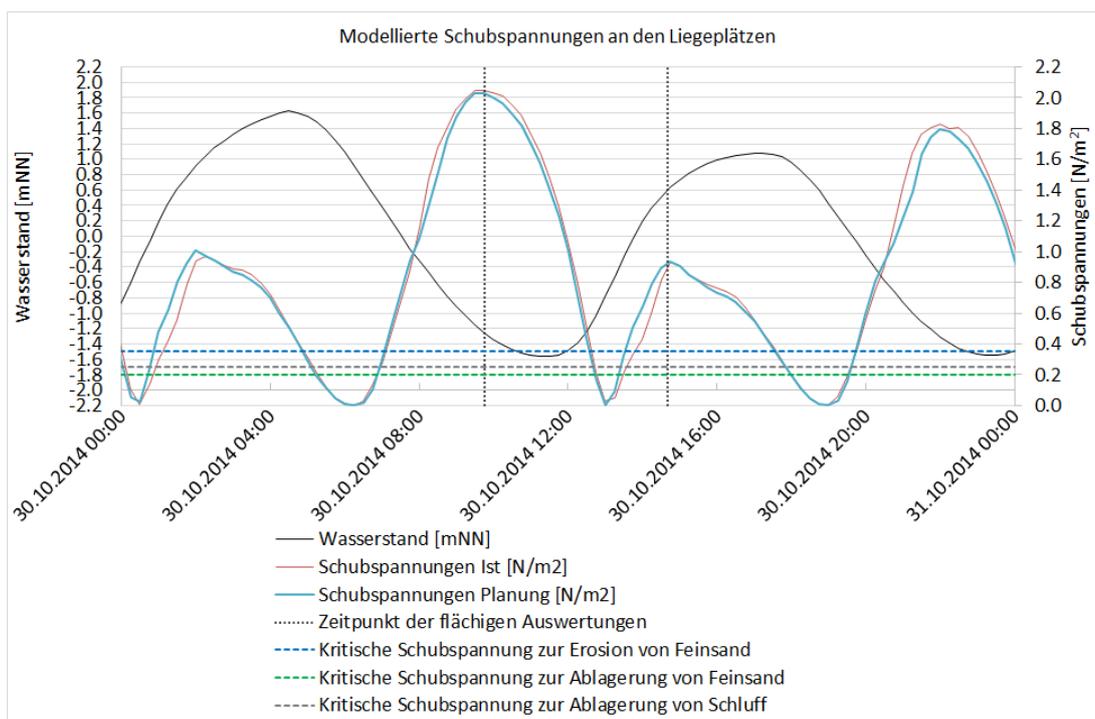


Abbildung 8-7: Modellierte Schubspannungen entlang der geplanten Liegeplätze 5-7

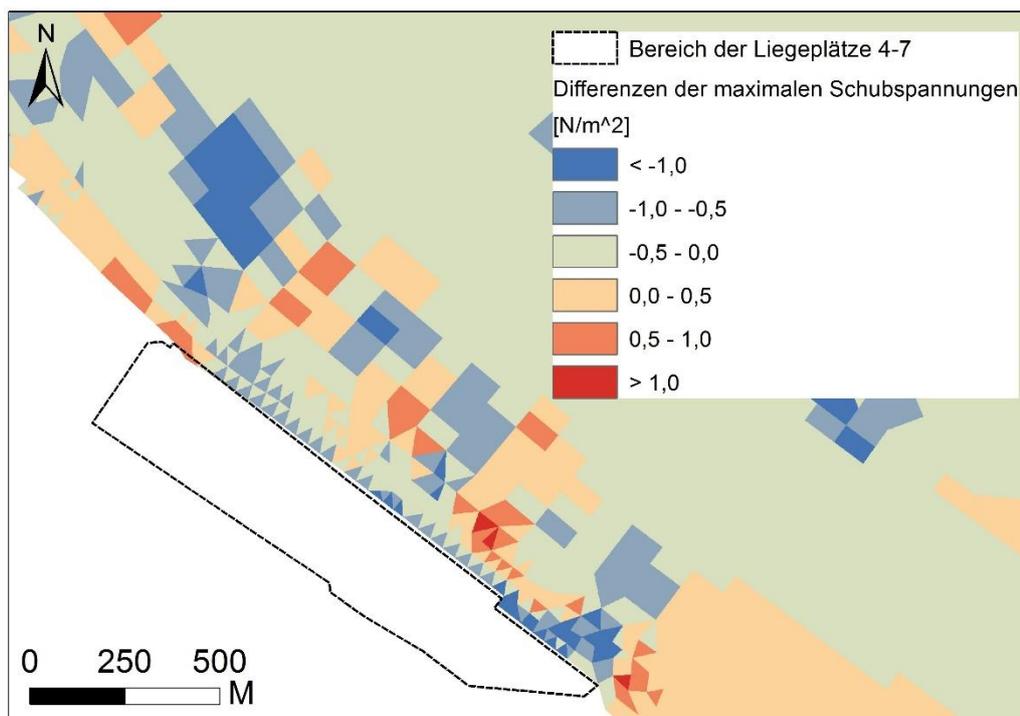


Abbildung 8-8: Differenzen der Schubspannungen zum Zeitpunkt der maximalen Schubspannungen

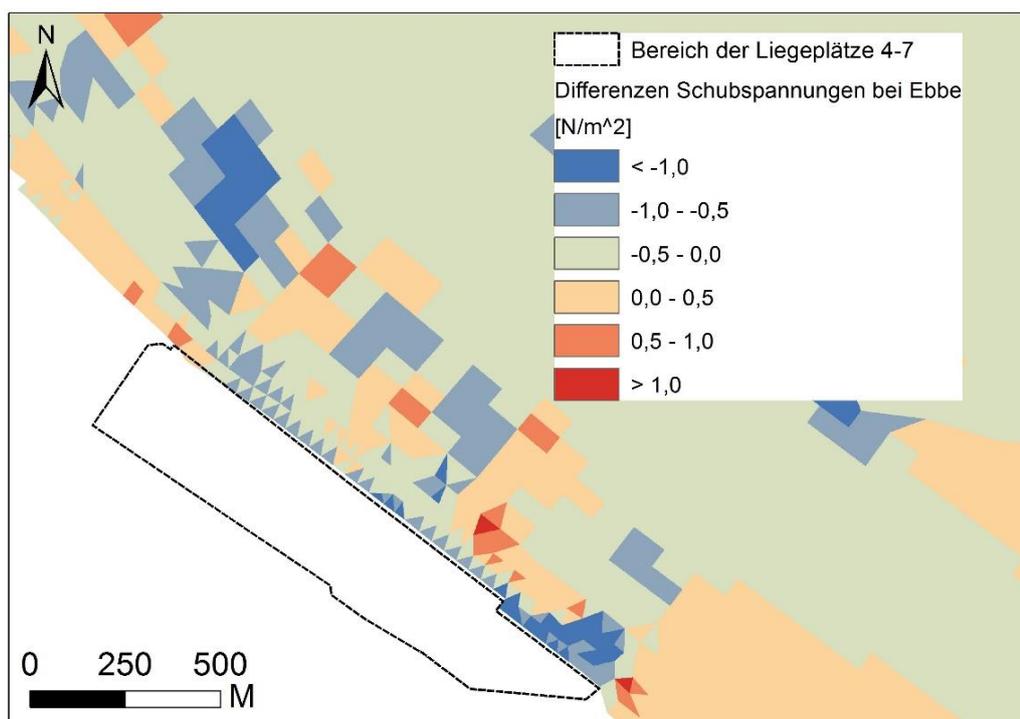


Abbildung 8-9: Differenzen der Schubspannungen zwischen Ist- und Planungszustand bei Ebbe

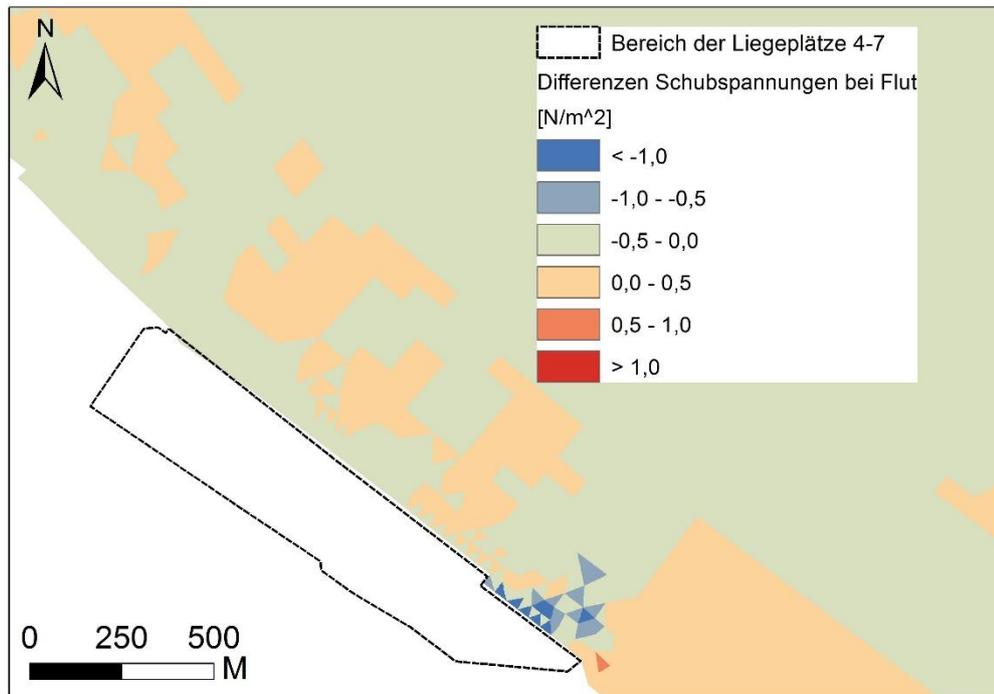


Abbildung 8-10: Differenzen der Schubspannungen zwischen Ist- und Planungszustand bei Flut

### 8.3.2 Schwebstoffkonzentrationen

Die höchsten Schwebstoffkonzentrationen bei den Liegeplätzen treten etwa zwei Stunden vor dem Kenterpunkt Ebbe/Flut und Flut/Ebbe auf, also ca. zwei Stunden nach den höchsten während des Tidezyklus erreichten Schubspannungen auf. Dabei spielt die Dauer der Entwicklung des Konzentrationsprofils (siehe Abschnitt 8.3.1 und Abbildung 8-7) eine wesentliche Rolle.

An der bestehenden Wattfläche besteht ein konstanter Wasseraustausch mit dem Brackwasserbereich der Elbe – ein möglicher Dichteeffekt bedingt durch unterschiedliche Salzgehalte des Flusswassers und des Wassers in diesem Bereich ist also vernachlässigbar. Somit ist davon auszugehen, dass das veränderte Schwebstoffkonzentrationsprofil zwischen Ist- und Planzustand größtenteils auf das leicht veränderte Strömungsbild im Bereich der Liegeplätze zurückzuführen ist. In Abbildung 8-12 sind beispielhaft Schwebstoffkonzentrationsprofile für die beiden Modellzustände an der gleichen Stelle an zwei verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei verschiedenen Tidebedingungen ggf. die Schwebstoffkonzentrationen im Vergleich zum Ist-Zustand leicht erhöht sind, während sie an einem anderen Zeitpunkt niedriger sind. Demnach ist von einer ausgeglichenen Bilanz in der Schwebstofffracht auszugehen und von vernachlässigbaren Abweichungen der Sedimentablagerungen zwischen beiden Zuständen.

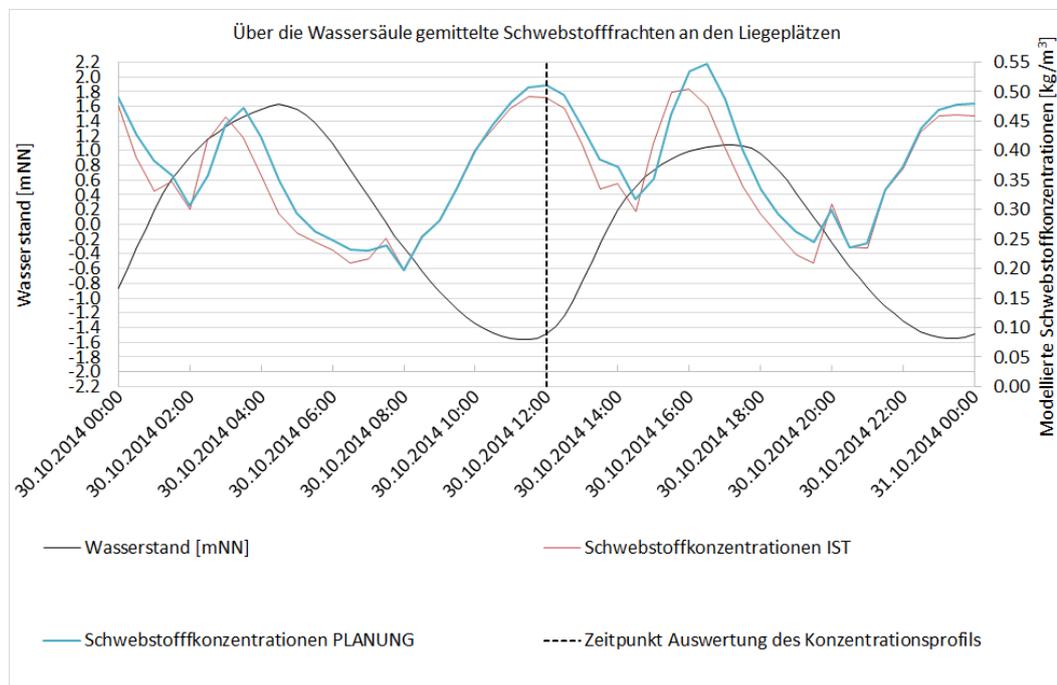


Abbildung 8-11: Modellierte Schwebstoffkonzentrationen bei den Liegeplätzen 5-7

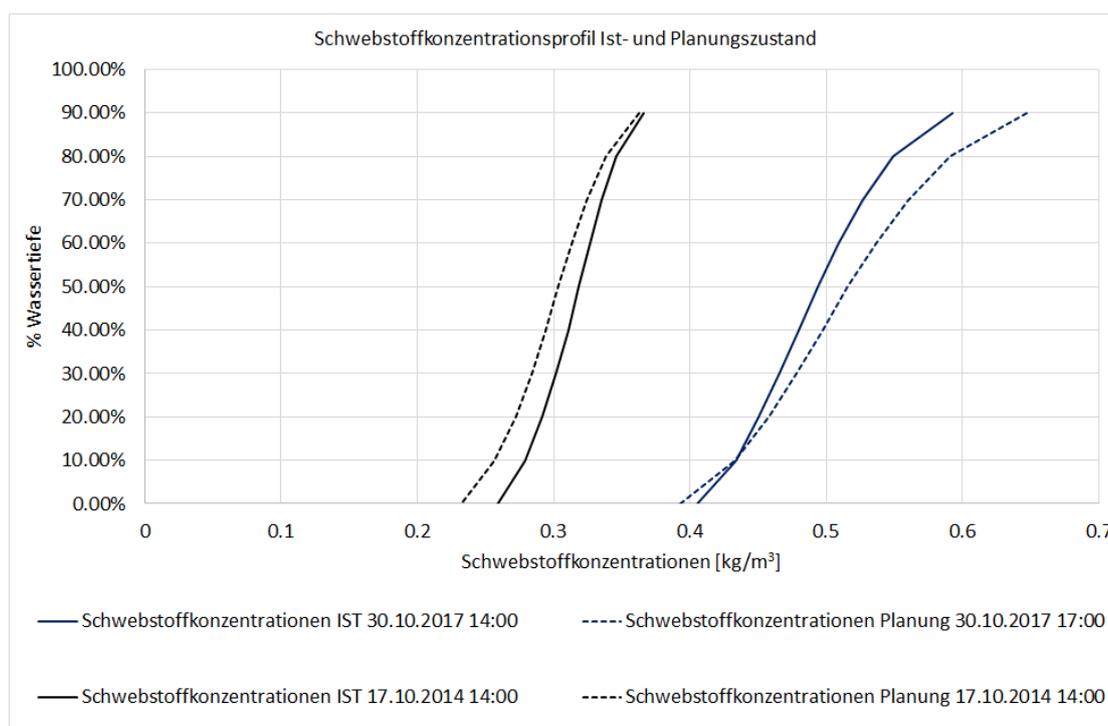


Abbildung 8-12: Veränderung des Schwebstoffkonzentrationsprofils

### 8.3.3 Sohlveränderungen

Die Prozesse, welche ggf. zu Sohlveränderungen zwischen Ist- und Planzustand führen könnten, wurden bereits ausgiebig untersucht und die Modellergebnisse ausgewertet und interpretiert.

Die Modellergebnisse der Sohlablagerungen bestätigen die Ergebnisse, dass die morphologischen Veränderungen nach dem Bau der Liegeplätze 5-7 gegenüber dem Ist-Zustand vernachlässigbar sind. Die geringen Veränderungen der Schubspannungen und Schwebstoffkonzentrationen zwischen Ist- und Planzustand führen nicht zu einer deutlichen Veränderung der Sohlhöhen im Bereich des geplanten Hafens. Im Ist-Zustand besteht nur die Möglichkeit von Feinsandablagerungen auf den bestehenden Flächen. Im Hauptstrom nahe der Elbe sind die Strömungen zu hoch, um Sedimentablagerungen hervorzurufen und zu niedrig, um Erosionsbereiche zu schaffen. An diesen Prozessen ändert auch die Schließung der Fläche durch die geplanten Liegeplätze nahezu nichts, da die sohlnahen Schubspannungen und Sohlkonzentrationen sich nur geringfügig verändern.

## 9 Zusammenfassung und Fazit

Es wurde ein dreidimensionales Strömungsmodell (MIKE3 FM) für den Ist-Zustand aufgebaut und kalibriert. In einem weiteren Schritt wurde der Planzustand (Liegeplätze 5-7) im Bereich der geplanten Liegeplätze und eine Aktualisierung der Planungshöhen in das Modell eingepflegt. Mit dem anhand von Salzgehalt und Temperatur (als Indikator für die Dichteströmung) und Strömungsdaten validierten Modell wurden Sedimentberechnungen für Schluff und Feinsande durchgeführt mit dem Ziel, mögliche Veränderungen im Bereich der Liegeplätze durch die Schließung der Wattfläche und die Profilierung der Sohle auf -17,5 mNN (ca. 5-6 m Ausbaggerungen) modelltechnisch zu erfassen und dadurch ggf. Gegenmaßnahmen im Planungsprozess einzuleiten.

Sohlproben des Ist-Zustands und einer Auswertung der Peildaten ist zu entnehmen, dass sich derzeit im Bereich der geplanten Liegeplätze eine glatte Sohle (ohne Makrostrukturen), welche vorwiegend durch die Ablagerungen von Schluff und Feinsanden entstanden ist, ausgebildet hat. Dieser Zustand ist morphologisch stabil und es ist weder von einer maßgeblichen Erosion noch von Ablagerungen auszugehen.

Das Modell des Ist-Zustands (Simulationen für den Zeitraum 09.09.2014 bis 13.11.2014) bestätigt diese Beobachtungen. Zusätzlich wurde das Modell am 1 km weiter nordwestlich gelegenen Amerikahafen validiert, wo es die gemessenen Ablagerungen und die in einer bestehenden Studie ermittelten Schwebstoffkonzentrationen [3] sehr gut abbildet. Die Validierungen bestätigen die Güte des Modells.

Die Simulationen des Planzustandes zeigen, dass die morphologisch relevanten Kräfte sich durch den Bau der Liegeplätze nur geringfügig verändern. Die lokale Profilierung der Elbböschung führt demnach nicht zu einer signifikanten Veränderung der Schubspannungen. Allerdings verändert sich die Dauer einer möglichen Resuspendierung von Sedimenten über einen Tidezyklus geringfügig, so dass sich dadurch, zusammen mit der erhöhten Tiefe, eine Veränderung im Sedimentkonzentrationsprofil ergibt. Diese Abweichungen wurden modelltechnisch nachgewiesen, sind aber am Ort der geplanten Liegeplätze so gering, dass sich unter Berücksichtigung der geringen Sinkgeschwindigkeiten von Schluff und Feinsanden in Kombination mit den verhältnismäßig schnellen Tideströmungen im strömungsaktiven Bereich der geplanten Liegeplätze nicht zu einer Tendenz erhöhter Erosion oder Sedimentation kommt.

## 10 Literatur

- [1] MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM Mud Transport Module Scientific Documentation (2015)
- [2] Neubau eines Vielzweckhafens an der Elbe in Brunsbüttel, Hydro- und morphodynamisches Gutachten (DHI, 2014)
- [3] Zimmermann, C., Stoschek, O. und Mai, S. (2004) (Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen), Umgestaltung des Lentzkais im Amerikahafen in Cuxhaven
- [4] DHI WASY (2017) „Planung Liegeplätze 5-7 in Cuxhaven“ - Untersuchung und Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeiten - Studie Strömungsgutachten“
- [5] DHI-WASY (2008): Erstellung eines Wärmelastplans für die Tideelbe – Ergebnisse der 3- dimensionalen Temperaturverteilung für die Bereiche Hamburg / Stade / Brunsbüttel. Syke

## 11 Anhang A: Formeln zur Beschreibung der Feinsedimentationsprozesse im Modell

(1) Formel zur Berechnung der Ablagerungen (Krone, 1962):

$$S_D = w_s c_b p_d$$

Wobei:

 $S_D$  = Ablagerungsrate [m/s] $c_b$  = Sohl nahe Konzentration [kg/m<sup>3</sup>] $p_d$  = Ablagerungswahrscheinlichkeit

Die Ablagerungswahrscheinlichkeit wird folgendermaßen berechnet:

$$p_d = 1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}}$$

Wobei  $\tau_b$  die sohl nahe und  $\tau_{cd}$  die kritische Schubspannung [N/m<sup>2</sup>] zur Bestimmung der Ablagerungen beschreibt.(2) Formel zur Berechnung des Sedimentkonzentrationsprofils (Teeter, 1986):Für die Modellierung wurde das Teeter-Profil gewählt. Dabei wird der Bezug zwischen der sohl nahen Konzentration ( $c_b$ ) und der tiefengemittelten Sedimentkonzentration ( $\bar{c}$ ) hergestellt:

$$\beta = \frac{c_b}{\bar{c}} = 1 + \frac{P_e}{1,25 + 4,75 p_d^{2,5}}$$

 $P_e$  wird als Peclet-Zahl bezeichnet und beschreibt das Verhältnis zwischen dem konvektiven ( $C_{rc}$ ) und dem diffusiven Transport ( $C_{rd}$ ):

$$P_e = \frac{C_{rc}}{C_{rd}} = \frac{w_s h}{\bar{D}_z} = \frac{6 w_s}{k U_f}$$

Wobei:

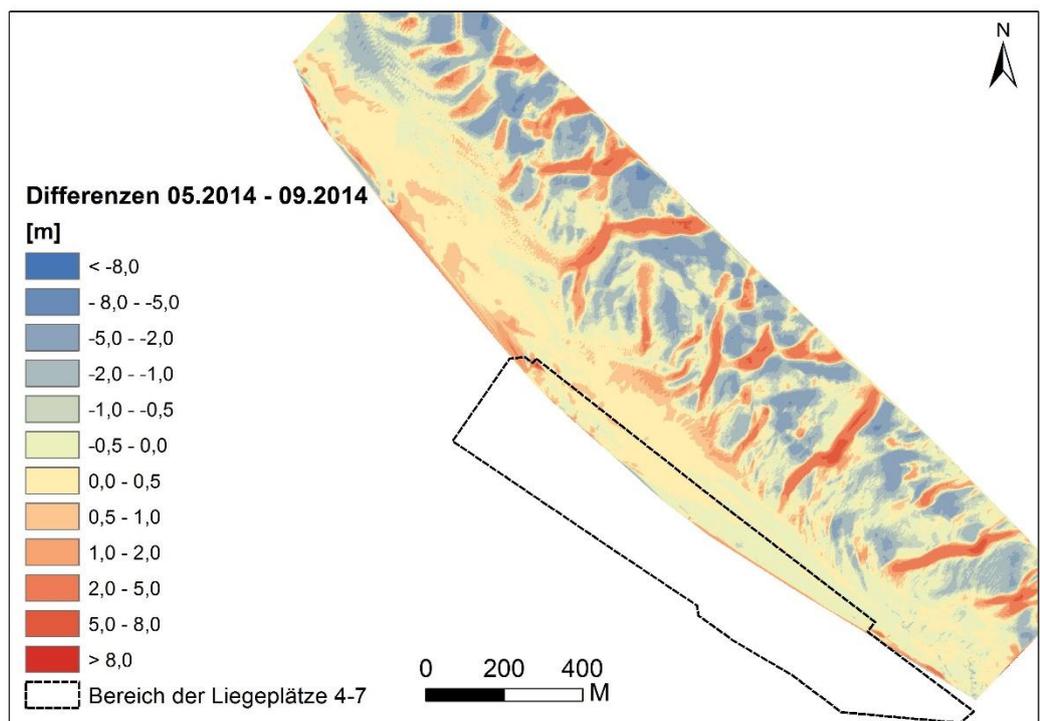
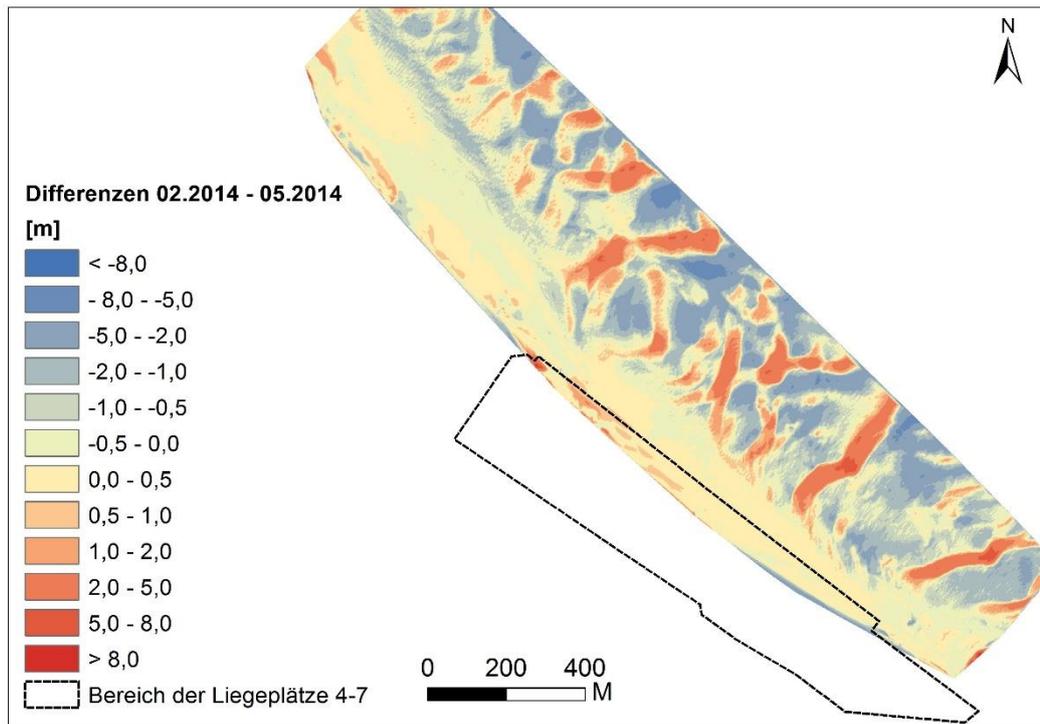
 $k$  = Von Karman's Konstante = 0,4 $w_s$  = Mittlere Sinkgeschwindigkeit [m/s] $\bar{D}_z$  = Mittlere Wirbeldiffusivität [m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>] $h$  = Wassertiefe [m] $U_f = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}}$  = Reibungsgeschwindigkeit [m/s] $\tau_b$  = Sohl nahe Schubspannung [N/m<sup>2</sup>] $\rho$  = Wasserdichte = 1000 kg/m<sup>3</sup> $p_d$  = Ablagerungswahrscheinlichkeit(3) Formel zur Berechnung der Erosion (Parchure & Mehta, 1985)Zur Berechnung der Erosion  $S_E$  wird angenommen, dass das Sohlmaterial aus ungehärtetem Schlamm besteht. Die Erosion wird in Abhängigkeit der sohl nahen Schubspannung ( $\tau_b$  in N/m<sup>2</sup>), der kritischen Schubspannung für den Erosionsbeginn ( $\tau_{ce}$  in N/m<sup>2</sup>) nach Parchure & Mehta (1985) beschrieben:

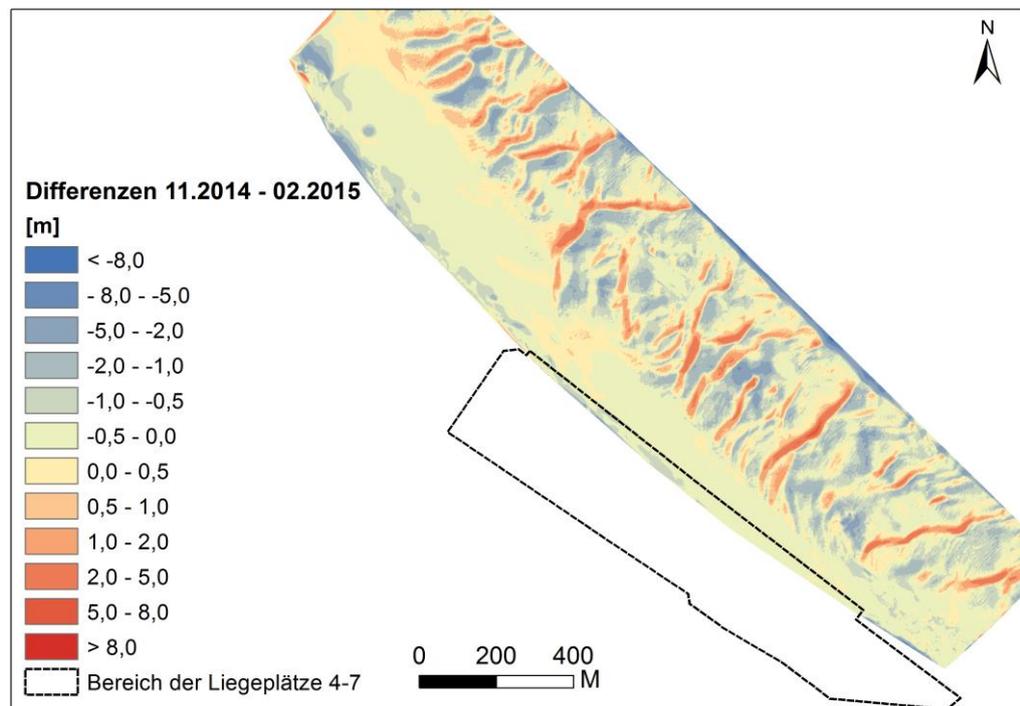
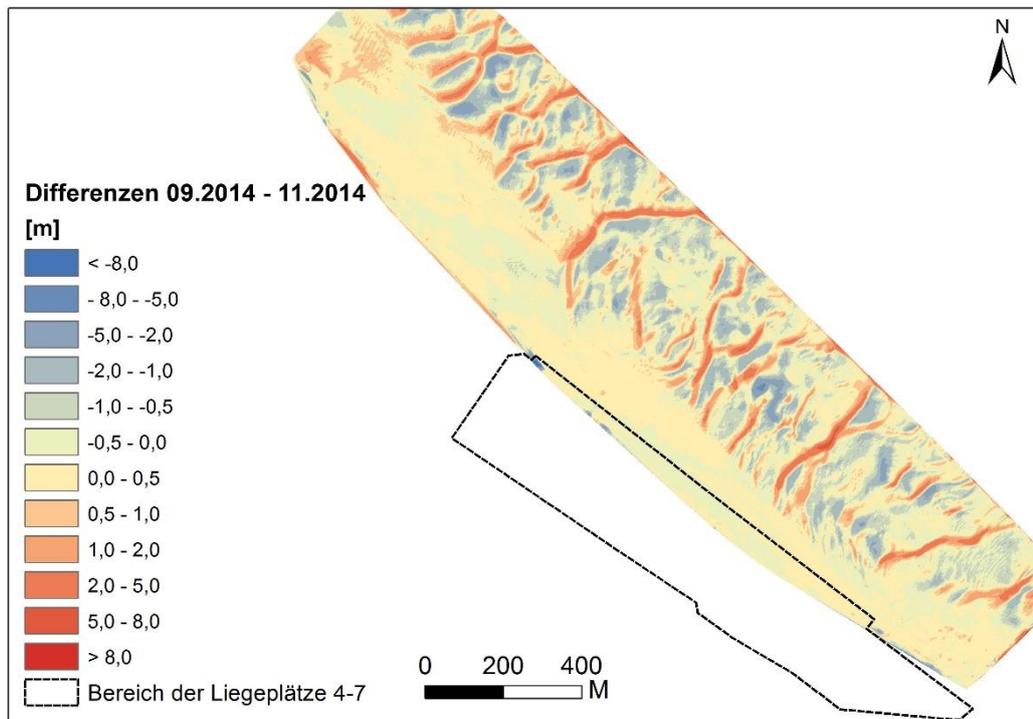
$$S_E = E \exp(\alpha \sqrt{\tau_b - \tau_{ce}})$$

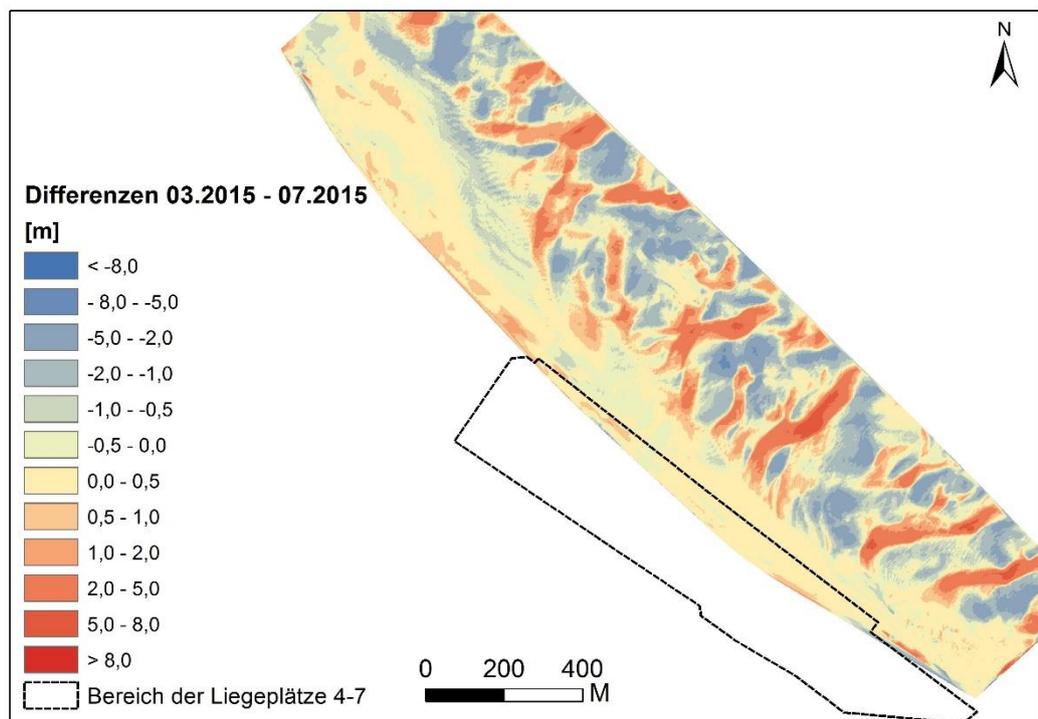
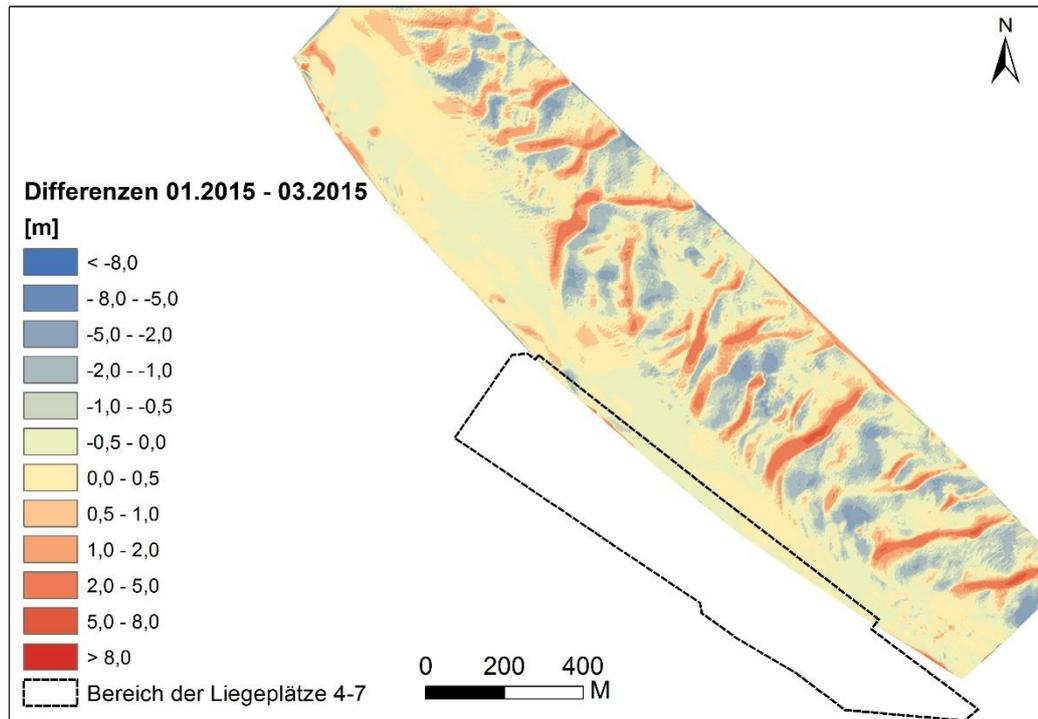
Wobei:

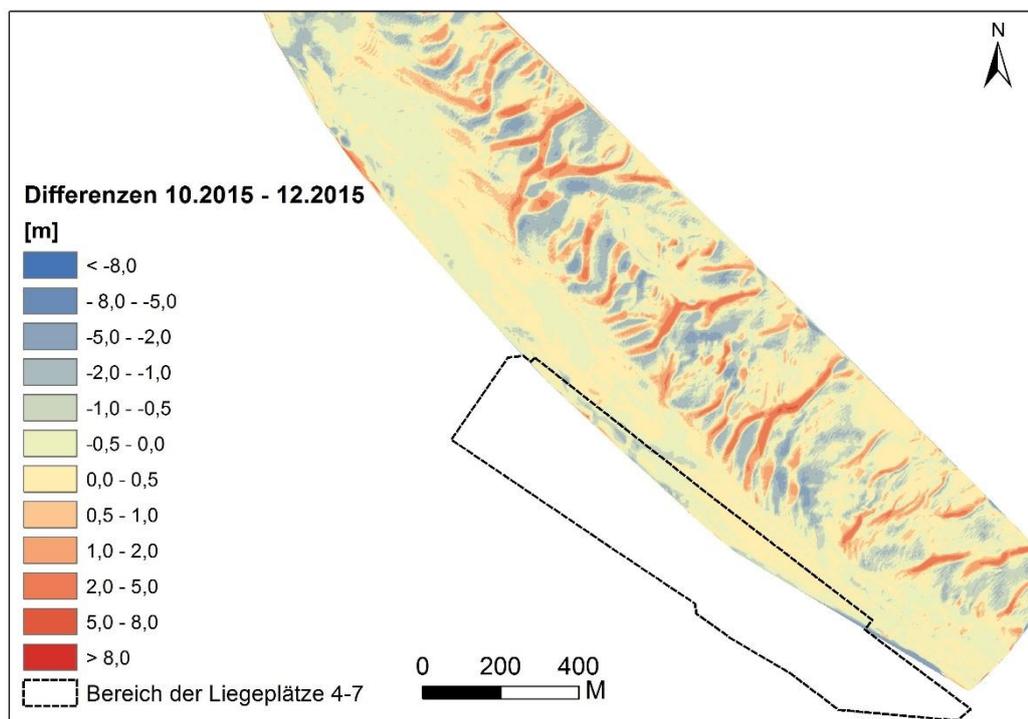
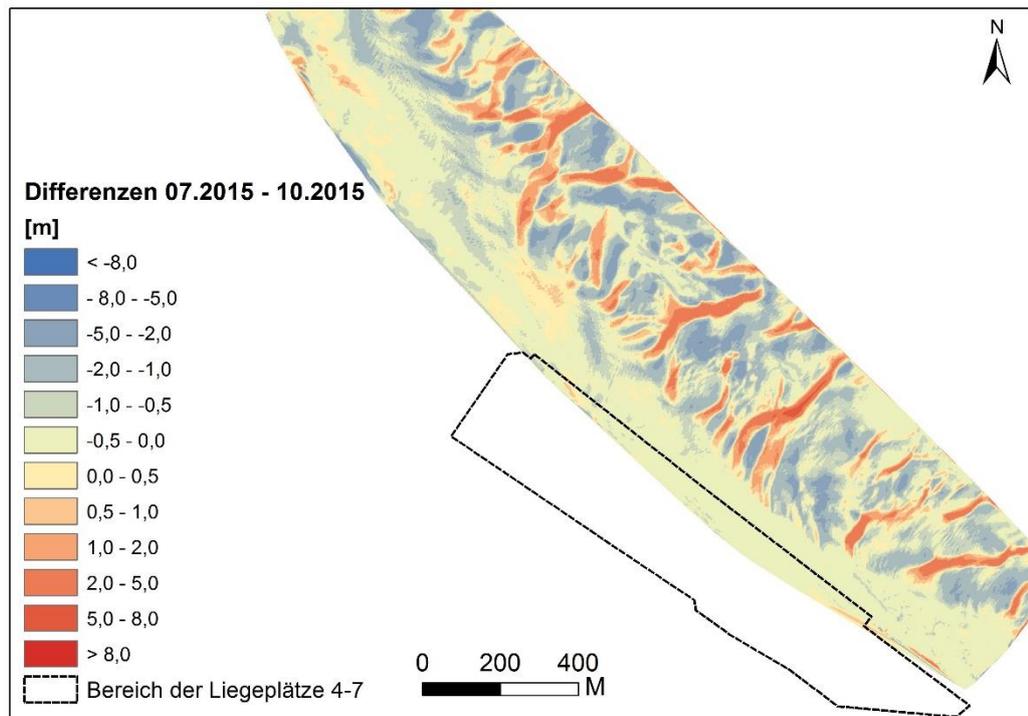
 $E$  = Erodierbarkeit der Sohle [kg/m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>] $\alpha$  = Koeffizient

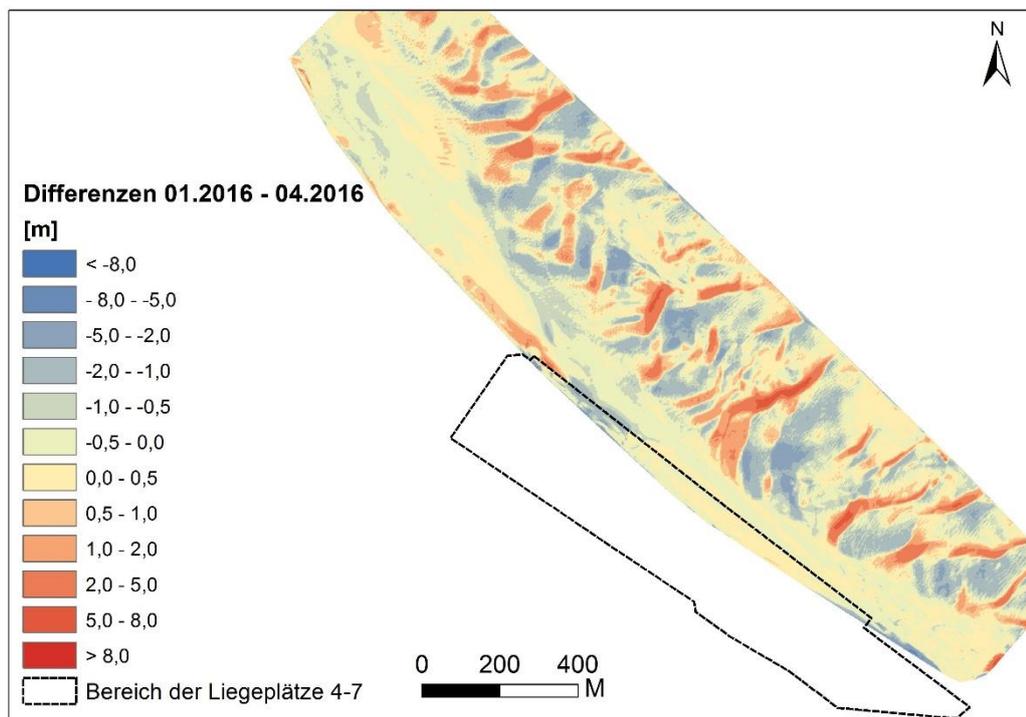
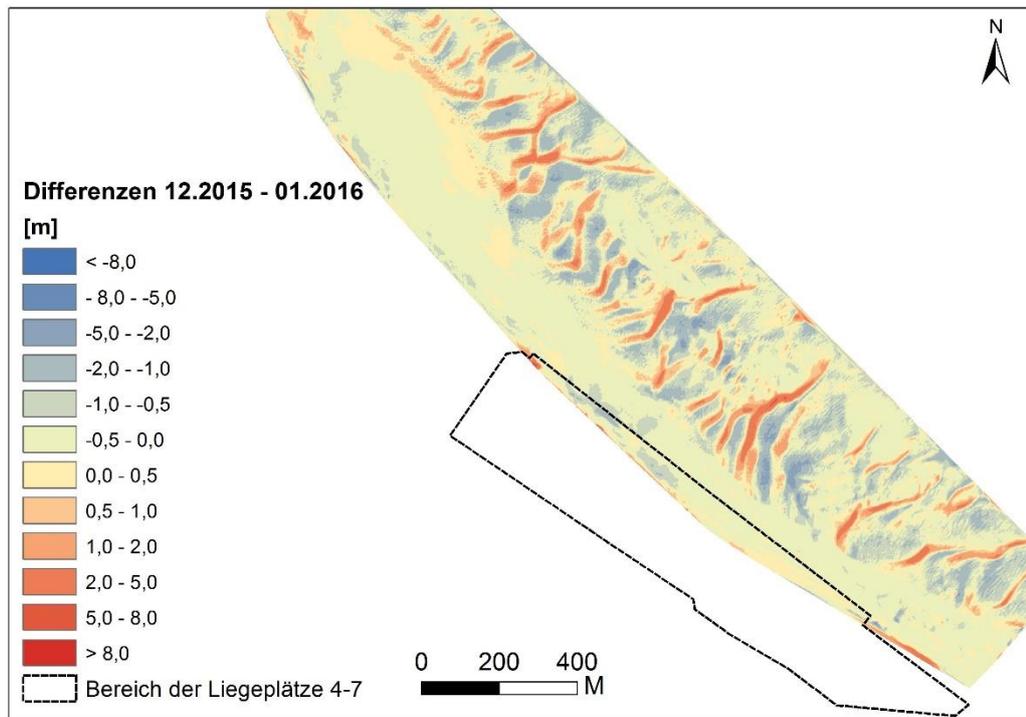
## 12 Anhang B: Peildatendifferenzen für ausgesuchte Zeiträume

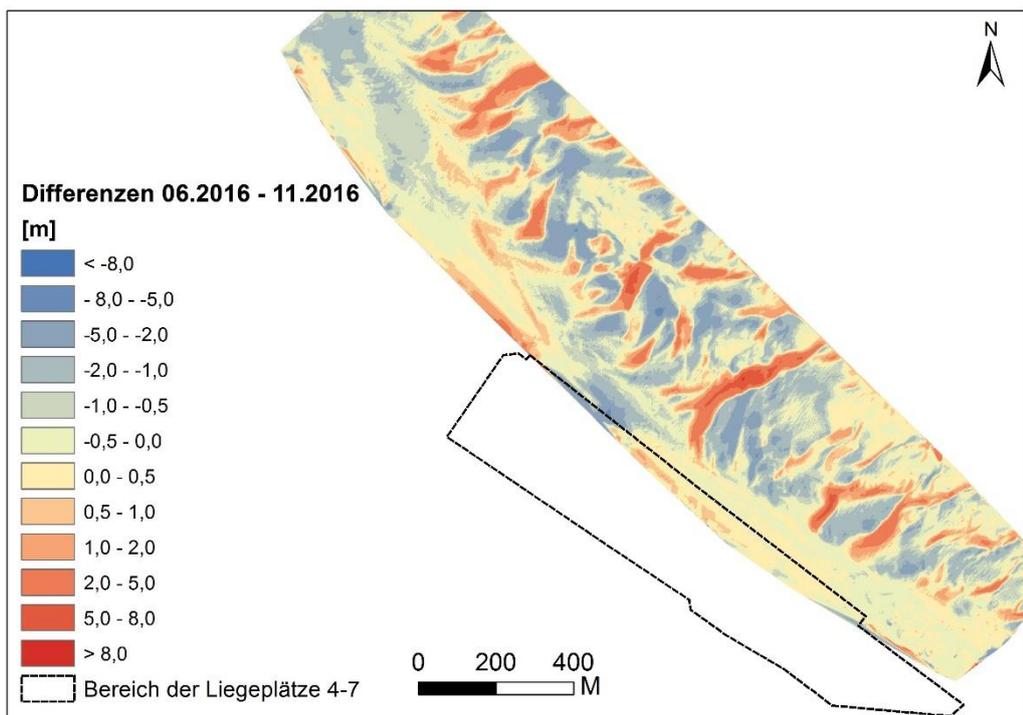
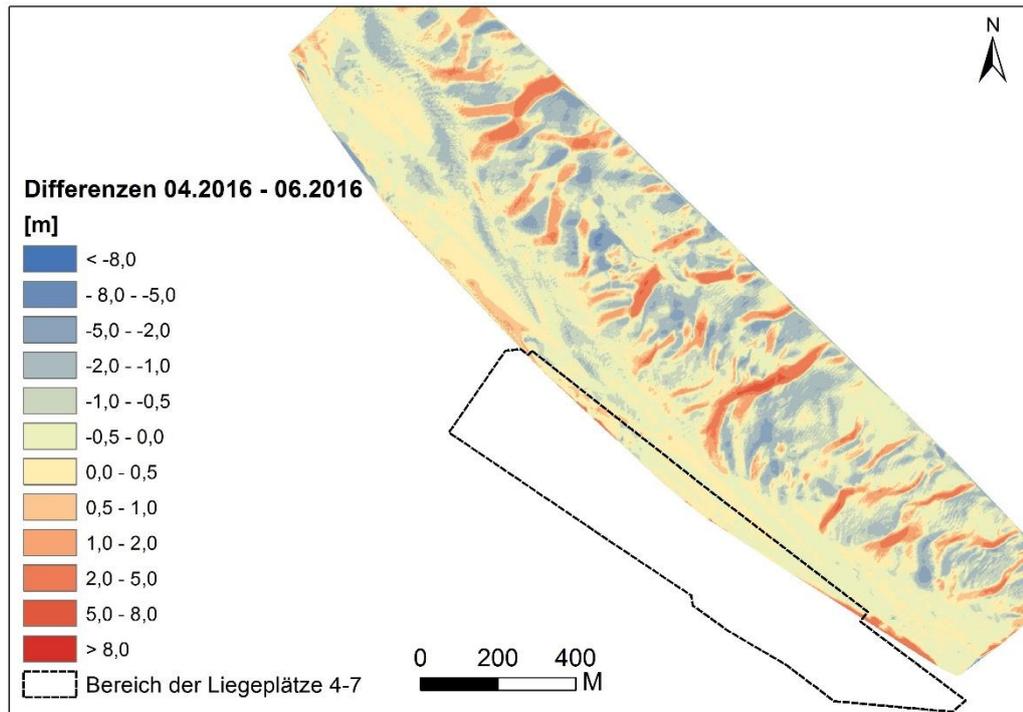












## 13 Anhang C: Modellerte Schubspannungen

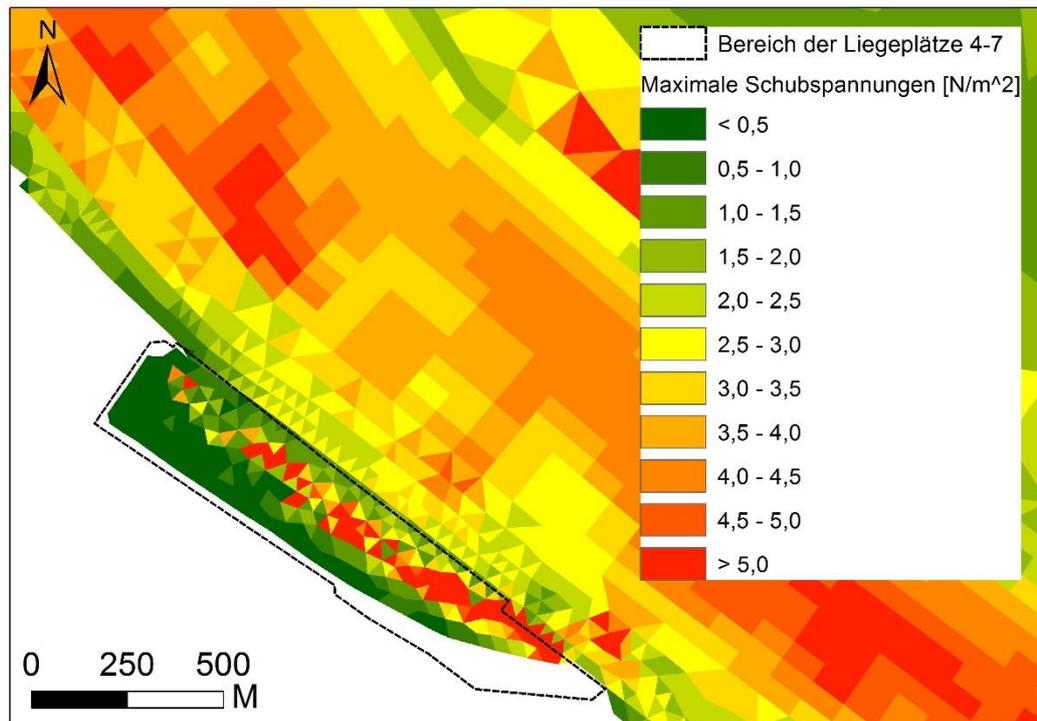


Abbildung 13-1: Maximale Schubspannungen (09.09.2014 bis 13.11.2014) Ist-Zustand

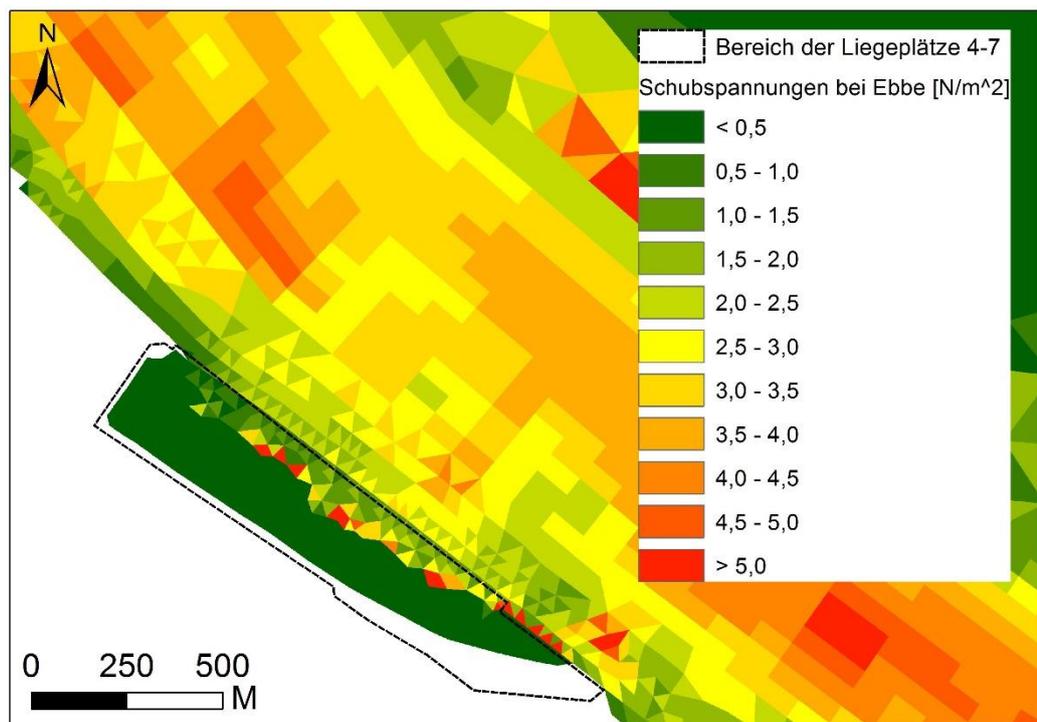


Abbildung 13-2: Schubspannungen bei Ebbe Ist-Zustand

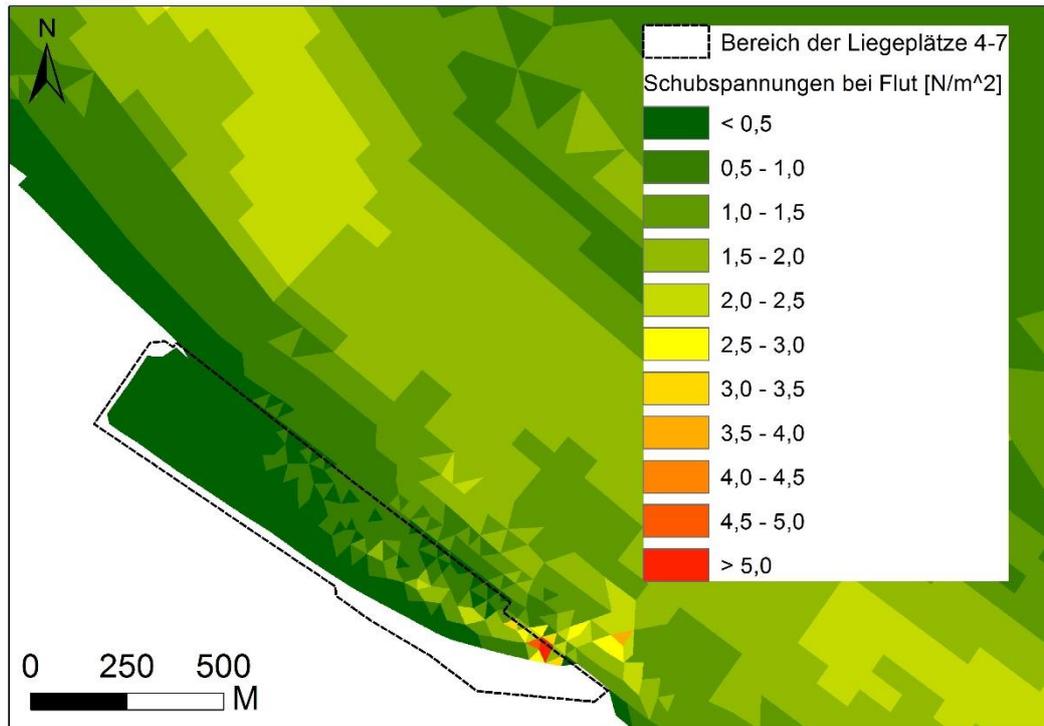


Abbildung 13-3: Schubspannungen bei Flut Ist-Zustand

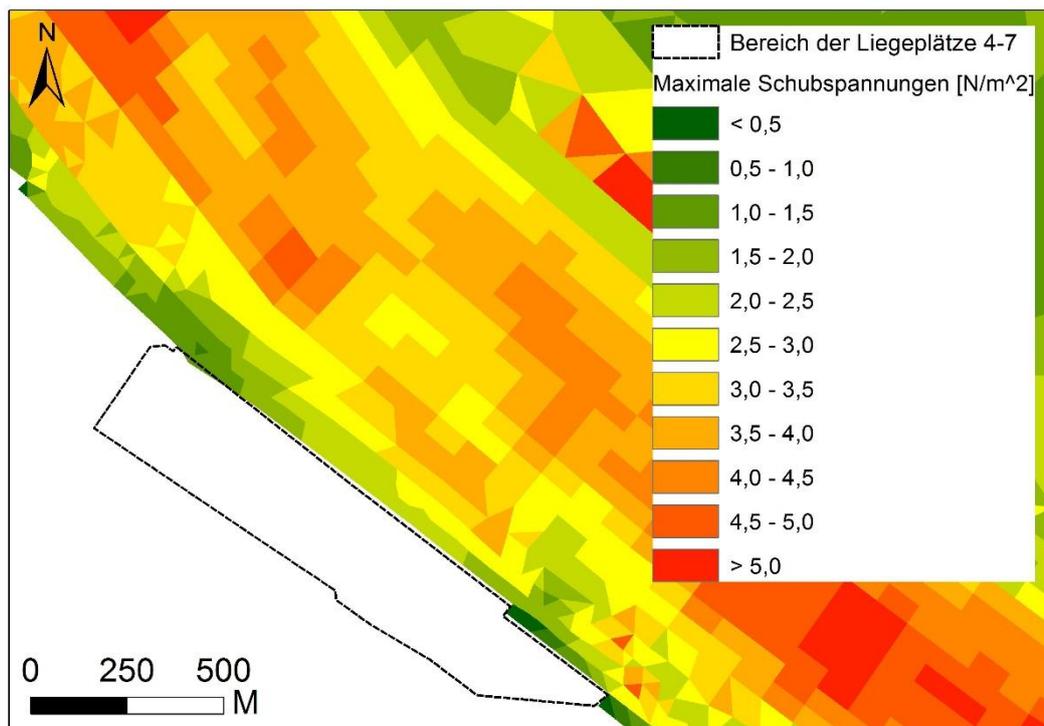


Abbildung 13-4: Maximale Schubspannungen (09.09.2014 bis 13.11.2014) Planungszustand

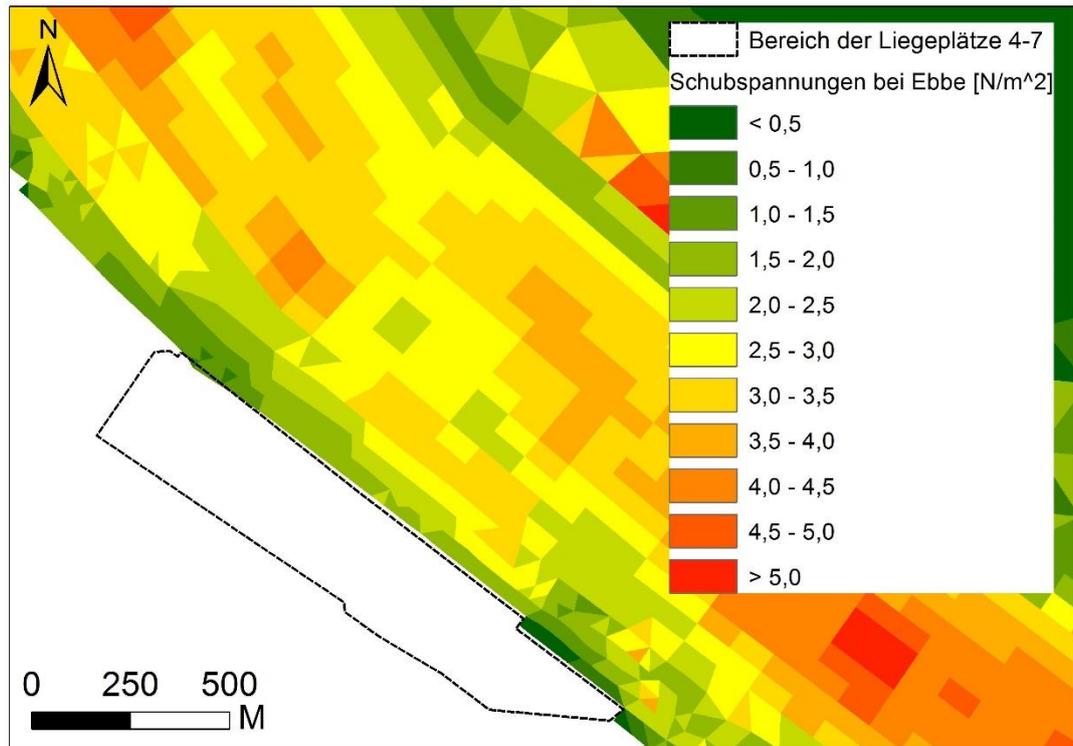


Abbildung 13-5: Schubspannungen bei Ebbe Planungszustand

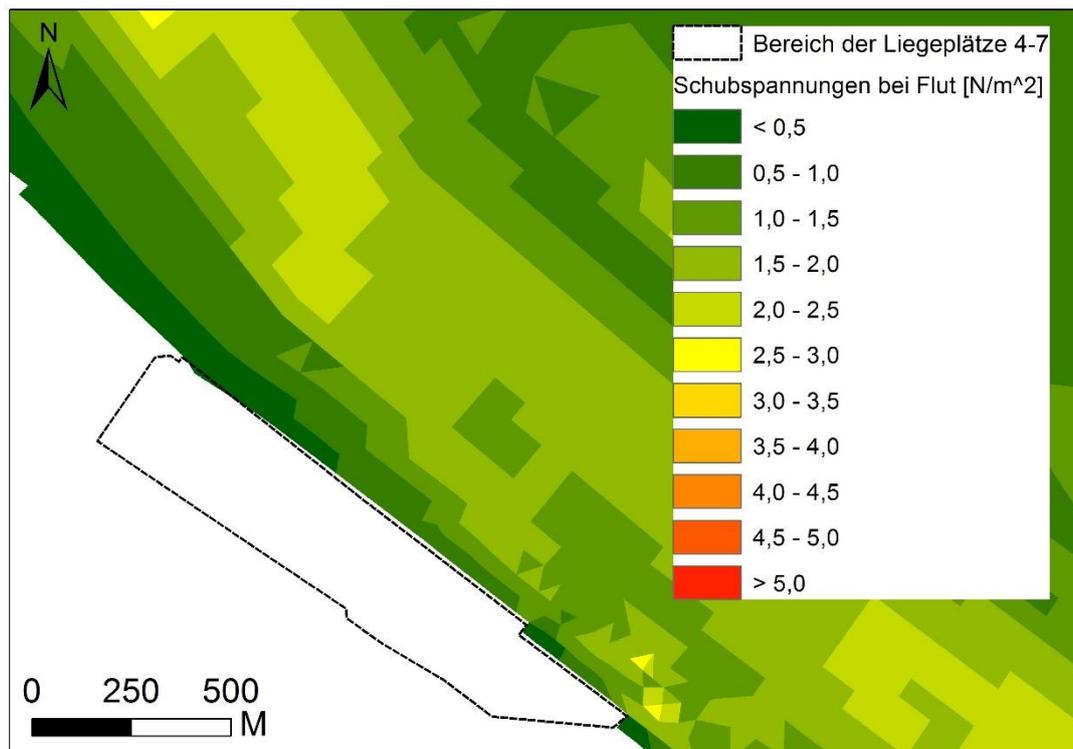


Abbildung 13-6: Schubspannungen bei Flut Planungszustand