



FTZ WESTKÜSTE

Planung Großschiffsliegeplatz Emden

Wasserbauliche Systemanalyse

Los 6.2

Mai 2016 rev.1

Projekt	Planung Großschiffsliegeplatz Emden Los 6.2 Wasserbauliche Systemanalyse
Auftraggeber Ansprechpartner	Land Niedersachsen vertreten durch Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG Volker Weiß Friedrich-Naumann-Straße 7-9 26725 Emden vweiss@nports.de
Auftragnehmer	FTZ Westküste Hafentörn 1 25761 Büsum
Ansprechpartner	Prof. Dr. Roberto Mayerle FTZ Westküste / CORELAB Otto-Hahn-Platz 3 24116 Kiel rmayerle@corelab.uni-kiel.de
Autoren	Dipl. Geogr./M.Sc. Katharina Niederndorfer Dr. Dipl. Ing. Gerd Bruss Prof. Dr. Roberto Mayerle

INHALT

- 1 Einleitung und Aufgabenstellung 8
- 2 Verwendete Daten 10
- 3 Verwendetes Modell 11
 - 3.1 Software 11
 - 3.2 Modellaufbau 12
 - 3.2.1 Ausgangsmodell..... 12
 - 3.2.2 Anpassung des Ausgangsmodells 13
 - 3.3 Modellvalidierung..... 14
- 4 Untersuchte Fälle 16
 - 4.1 Ausgangszustand 16
 - 4.2 Referenzzustand 1 - GSLP 16
 - 4.3 Referenzzustand 2 - GSLP mit Emsvertiefung 16
- 5 Untersuchte Zeiträume und Szenarien..... 18
 - 5.1 Mittelfristige Betrachtung 18
 - 5.2 Längerfristige Betrachtung 18
 - 5.2.1 Morphologische Beschleunigung 19
 - 5.3 Untersuchung der Seegangsverhältnisse 19
 - 5.4 Untersuchung der Sturmflutkenngößen 20
- 6 Wirkung Referenzzustand 1 - GSLP 21
 - 6.1 mittelfristige Betrachtung 21
 - 6.1.1 Wasserstände und Tidehub 21
 - 6.1.2 Strömungsgeschwindigkeiten..... 21
 - 6.1.3 Salinität 21
 - 6.1.4 Suspendiertes Sediment 22
 - 6.1.5 Sedimenttransport 22
 - 6.1.6 Sohlentwicklung 22
 - 6.2 Längerfristige Betrachtung 23
 - 6.2.1 Sohlentwicklung 23
 - 6.3 Untersuchung Seegangsverhältnisse..... 23
 - 6.4 Untersuchung Sturmflutkenngößen 24
 - 6.5 Zusammenfassung RZ1 24
- 7 Wirkung Referenzzustand 2 - GSLP mit Emsvertiefung..... 26
 - 7.1 mittelfristige Betrachtung 26

7.1.1	Wasserstände und Tidehub	26
7.1.2	Strömungsgeschwindigkeiten.....	26
7.1.3	Salinität	27
7.1.4	Suspendiertes Sediment	27
7.1.5	Sedimenttransport	28
7.1.6	Sohlentwicklung	28
7.2	Längerfristige Betrachtung	28
7.2.1	Sohlentwicklung	28
7.3	Untersuchung Seegangsverhältnisse.....	29
7.4	Untersuchung Sturmflutkenngößen	30
7.5	Zusammenfassung RZ2	30
8	Beweissicherung	32
9	Schlussbemerkung.....	33
10	Literatur	36
A2	Datengrundlage	38
A3	Verwendetes Modell	41
A4	Untersuchte Fälle.....	44
A5	Untersuchte Zeiträume und Szenarien.....	50
A6	Wirkung Referenzzustand 1 - GSLP	53
	A6.1 Mittelfristige Betrachtung	54
	A6.2 Längerfristige Betrachtung	58
	A6.3 Untersuchung Seegangsverhältnisse.....	59
	A6.4 Untersuchung Sturmflutkenngößen	61
A7	Wirkung Referenzzustand 2 - GSLP mit Emsvertiefung.....	62
	A7.1 Mittelfristige Betrachtung	63
	A7.2 Längerfristige Betrachtung	71
	A7.3 Untersuchung Seegangsverhältnisse.....	72
	A7.4 Untersuchung Sturmflutkenngößen	74

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1-1 Lage von Emspier und Emskai im Hafbereich Emden (oben, Google Earth 2012) und geplanter GSLP zwischen Emspier und Emskai (unten, Niedersachsen Ports 2015a, verändert). 8

Abb. 2-1 Sohlentwicklung (m) in der Fahrrinne zwischen Emshörn und Papenburg. Räumlich-, zeitliche Interpolation der Verkehrssicherungspeilungen (schwarze Punktreihen)..... 39

Abb. 2-2 Baggermengen entlang der Ems 2010 (mit Schiffsüberführungen) 40

Abb. 3-1 Emsmodell und Modellgebiet des verwendeten Modells (roter Rahmen) 41

Abb. 3-2 Angepasstes Modellgitter im Bereich der Anlegestellen Emspier / GSLP / Emskai 41

Abb. 3-3 Vertikaler Schnitt durch das Gitter in der Ems bei Emden 42

Abb. 3-4 Modelltopographie (IST-Zustand)..... 42

Abb. 3-5 Volumenanteil der Fraktion kleiner 63µm (Schlick)..... 43

Abb. 4-1 Modelltopographie im Bereich Emspier und Emskai im Ausgangszustand (IST)..... 44

Abb. 4-2 Oben: Modelltopographie im Bereich Emspier und Emskai im Referenzzustand 1 (RZ1), Unten: Differenz der Modelltopographie RZ1-IST 45

Abb. 4-3 Übersichtslageplan zur Vertiefung der Außenems (WSV/WSA Emden 2012b) 46

Abb. 4-4 Lageplan der Wendestelle (WSV/WSA Emden 2012c) 46

Abb. 4-5 Lageplan der Bühnenanpassung (WSV/WSA Emden 2012d) 47

Abb. 4-6 Oben: Modelltopographie im Emden Fahrwasser im Referenzzustand 2 (RZ2) und Lage der Bühnenanpassung, Unten: Differenz der Modelltopographie RZ2-IST..... 48

Abb. 4-7 Tiefenverhältnisse der Fahrrinnensohle im IST-Zustand und RZ2 im Modell..... 49

Abb. 5-1 Wasserstandsganglinie am Pegel Borkum und Oberwasserabfluss der Ems in Versen im Modellzeitraum mit mittelfristigen Auswertungszeitraum 50

Abb. 5-2 Wasserstände und Oberwasserabfluss im längerfristigen Modell mit MorFac 8 (Auswertungszeitraum) 51

Abb. 5-3 Wasserstandsganglinie am Pegel Borkum während der Sturmflut "Xaver" am 5. und 6. Dezember 2013 (COPERNICUS, 2015)..... 51

Abb. 5-4 Vergleich Wasserstände Modell und Messung (LLUR 2014) am Messpunkt Emden Neue Seeschleuse 52

Abb. 6-1 Kartenausschnitt Flächenvergleich. A = Emspier, B = GSLP, C = Emskai 53

Abb. 6-2 Lage der Querschnitte. KN = Knock, EF = Emden Fahrwasser, PO = Pogum..... 53

Abb. 6-3 Differenz der mittleren Tidehoch- und -niedrigwasser und des mittleren Tidehubes..... 54

Abb. 6-4 Differenz der mittleren und maximalen tiefengemittelten Flutstromgeschwindigkeiten 55

Abb. 6-5 Differenz der mittleren und maximalen tiefengemittelten Ebbstromgeschwindigkeiten 55

Abb. 6-6 Differenz der mittleren und maximalen tiefengemittelten Salinität 56

Abb. 6-7 Differenz der mittleren und maximalen tiefengemittelten Schwebstoffkonzentrationen..... 56

Abb. 6-8 Kumulativer Sedimenttransport an den Querschnitten Knock (KN), Emden Fahrwasser (EF) und Pogum (PO) 57

Abb. 6-9 Differenz der Endtopographie RZ1-IST..... 58

Abb. 6-10 Mittelfristige Veränderung der Sohlage im Bereich der GSLP-Liegewanne im RZ1 nach 2 Monaten (26.02. - 27.04.2010)..... 58

Abb. 6-11 Differenz der Endtopographie längerfristig RZ1-IST..... 58

Abb. 6-12 Längerfristige Veränderung der Sohlage im Bereich der Liegewanne im RZ1 nach ca. 11 Monaten 58

Abb. 6-13 Signifikante Wellenhöhen (H_s) und Wellenrichtung in Szenarien mit Wind aus verschiedenen Richtungen (Pfeile)..... 59

Abb. 6-14 Mittlere Wellenperiode (T) in Szenarien mit verschiedenen Windrichtungen (Pfeile)..... 59

Abb. 6-15 Differenz der signifikanten Wellenhöhen (H_s) in Szenarien mit verschiedenen Windrichtungen (Pfeile) 60

Abb. 6-16 Differenz der mittleren Wellenperioden (T) in Szenarien mit verschiedenen Windrichtungen (Pfeile) 60

Abb. 6-17 Wasserstände zum Scheitelwasserstand (Emspier) im Ems-Ästuar (oben) und Wasserstandsganglinie am Emspier (unten)..... 61

Abb. 7-1 Kartenausschnitt des Flächenvergleichs I. A = Emspier, B = GSLP, C = Emskai, D = Bühnenpaar 6/7 62

Abb. 7-2 Kartenausschnitt des Flächenvergleichs II. A = Emspier, B = GSLP, C = Emskai 62

Abb. 7-3 Lage der Querschnitte. KN = Knock, EF = Emders Fahrwasser, PO = Pogum..... 62

Abb. 7-4 Differenz der mittleren Tidehoch- und -niedrigwasser und des mittleren Tidehubes. Flächenvergleich I..... 63

Abb. 7-5 Differenz der mittleren Tidehoch- und -niedrigwasser und des mittleren Tidehubes. Flächenvergleich II..... 64

Abb. 7-6 Differenz der mittleren und maximalen tiefengemittelten Flutstromgeschwindigkeiten. Flächenvergleich I..... 65

Abb. 7-7 Differenz der mittleren und maximalen tiefengemittelten Ebbstromgeschwindigkeiten. Flächenvergleich I..... 65

Abb. 7-8 Differenz der mittleren und maximalen tiefengemittelten Flutstromgeschwindigkeiten. Flächenvergleich II..... 66

Abb. 7-9 Differenz der mittleren und maximalen tiefengemittelten Ebbstromgeschwindigkeiten. Flächenvergleich II..... 66

Abb. 7-10 Differenz der mittleren und maximalen tiefengemittelten Salinität. Flächenvergleich I..... 67

Abb. 7-11 Differenz der mittleren und maximalen tiefengemittelten Salinität. Flächenvergleich II..... 67

Abb. 7-12 Differenz der mittleren und maximalen tiefengemittelten Schwebstoffkonzentrationen. Flächenvergleich I..... 68

Abb. 7-13 Differenz der mittleren und maximalen tiefengemittelten Schwebstoffkonzentrationen. Flächenvergleich II..... 68

Abb. 7-14 Kumulativer Sedimenttransport an den Querschnitten Knock (KN), Emders Fahrwasser (EF) und Pogum (PO)..... 69

Abb. 7-15 Differenz der Endtopographie RZ2-IST..... 70

Abb. 7-16 Mittelfristige Veränderung der Sohlage im Bereich der GSLP-Liegewanne im RZ2 nach 2 Monaten (26.02. - 27.04.2010)..... 70

Abb. 7-17 Differenz der Endtopographie längerfristig RZ2-IST..... 71

Abb. 7-18 Längerfristige Veränderung der Sohlage im Bereich der Liegewanne im RZ2 nach ca. 11 Monaten 71

Abb. 7-19 Signifikante Wellenhöhen für IST (oben) und RZ2 (unten) in verschiedenen Szenarien 72

Abb. 7-20 Mittlere Wellenperiode für IST (oben) und RZ2 (unten) in verschiedenen Szenarien 72

Abb. 7-21 Differenz der signifikanten Wellenhöhen 73

Abb. 7-22 Differenz der mittleren Wellenperioden 73

Abb. 7-23 Wasserstände zum Scheitelwasserstand (Emspier) im Ems-Ästuar (oben) und Wasserstandsganglinie am Emspier (unten)..... 74

TABELLENVERZEICHNIS

<i>Tab. 2-1</i>	<i>Datengrundlage der verwendeten Daten. Modellaufbau und Validierung Gesamtmodell</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 2-2</i>	<i>Datengrundlage der verwendeten Daten</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 5-1</i>	<i>Tidekennwerte und Ems-Oberwasserabfluss für den mittelfristigen Zeitraum</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 5-2</i>	<i>Schließplan des Ems-Sperrwerks bei Gandersum während Xaver 2013 (NLWKN Aurich, mündl. Mitteilung am 22.10.2015).....</i>	<i>52</i>

1 EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG

Zur Erhöhung der Umschlagskapazitäten plant die Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG einen neuen Großschiffsliegeplatz (GSLP) im Hafen Emden. Der neue Liegeplatz soll einen Lückenschluss zwischen den vorhandenen Anlegestellen Emspier und Emskai bilden. *Abb. 1-1* zeigt die Lage des geplanten Liegeplatzes im Hafen Emden.



Abb. 1-1 Lage von Emspier und Emskai im Hafengebiet Emden (oben, Google Earth 2012) und geplanter GSLP zwischen Emspier und Emskai (unten, Niedersachsen Ports 2015a, verändert).

In der Wasserbaulichen Systemanalyse werden die Auswirkungen des GSLPs auf folgende Parameter beurteilt:

- Strömungen und Wasserstände
- Salz- und Schwebstoffgehalte
- Scheitelwasserstände und Laufzeiten von Sturmfluten
- Seegangsverhältnisse
- Morphodynamik und Sedimenttransport

Die Beurteilung erfolgt auf der Grundlage von Modellergebnissen eines dreidimensionalen hydrodynamischen Modells. Es wurden drei Fälle simuliert:

- Ausgangszustand (IST-Zustand) ohne GSLP
- Referenzzustand 1 (RZ1) mit GSLP
- Referenzzustand 2 (RZ2) mit GSLP und mit Emsvertiefung

In der Untersuchung wurden die Referenzzustände jeweils mit dem IST-Zustand verglichen.

Die vorliegende Untersuchung ist in folgende Teile aufgeteilt:

- Vorstellung der verwendeten Daten
- Vorstellung des verwendeten Modells
- Vorstellung der untersuchte Fälle
- Vorstellung der untersuchten Zeiträume und Szenarien
- Darstellung der Wirkung von Referenzzustand 1
- Darstellung der Wirkung von Referenzzustand 2
-
- Beweissicherung
- Schlussbemerkung

Alle Abbildungen, auf die im Text verwiesen wird, finden sich in den, entsprechend der Kapitel nummerierten, Anhängen.

2 VERWENDETE DATEN

Das verwendete Modell basiert auf einem Ausschnitt eines Modells, welches 2013/2014 entwickelt, kalibriert und validiert wurde (FTZ 2014a, 2014b).

Der Modelltopographie liegt das DGMW-2010 des Ems-Ästuars zugrunde, welches von der FSK Norderney hergestellt wurde. Das DGMW-2010 besteht aus einer Zusammenstellung von Messdaten (Laserscandaten und Peildaten) aus den Jahren 2009-2011. Die Modelltopographie wurde mit Daten aus Verkehrssicherungspeilungen entlang der Fahrrinne aus dem Jahr 2010 ergänzt.

Für den Aufbau des morphologischen Gesamtmodells wurden Daten zur Sedimentverteilung im Bereich des Ems Ästuars herangezogen, die aus dem AufMod Projekt stammen (AufMod 2014). Es wurden die Anteile der Fraktionen kleiner 63µm (Ton, Schluff), Feinsand und Mittelsand verwendet.

Für den Modellaufbau und die Modellvalidierung des Gesamtmodells wurden Messdaten von Wasserstand, Oberwasserabfluss, Strömungsgeschwindigkeit und -richtung, Salzgehalt, Schwebstoffkonzentration, Sedimentzusammensetzung und Baggerdaten verwendet. Die für den Modellaufbau und die Modellkalibrierung des Gesamtmodells verwendeten Messdaten sind in *Tab. 2-1* in Anhang 2 dargestellt.

Die morphologische Entwicklung der Sohle im Gesamtmodell wurde anhand der regelmäßig durgeführten Verkehrssicherungspeilungen in der Fahrrinne validiert. Hierzu wurden die Peildaten räumlich und zeitlich interpoliert. Der morphologische Vergleich wurde in den Zeitraum zwischen Ende März und Ende Mai gelegt, da in dieser Phase keine Baggerungen in der Unterems ausgeführt wurden. Eine Darstellung der Interpolation der Verkehrssicherungspeilungen, sowie der Baggermengen in der Ems im Jahr 2010 sind in *Abb. 2-1* und *Abb. 2-2* dargestellt.

Die in diesem Projekt zusätzlich verwendeten Daten sind in *Tab. 2-2* in Anhang 2 zusammengestellt.

3 VERWENDETES MODELL

Zur Simulation der Hydrodynamik sowie der morphologischen Entwicklung der Sohle und des Transportes von Salz und Sediment wurde ein dreidimensionales Modell auf Basis der Software Delft3D-FLOW von Deltares verwendet (Deltares 2014a). Im Folgenden wird näher auf die verwendete Software und auf den Aufbau und die Qualität des numerischen Modells eingegangen.

3.1 SOFTWARE

Das Modell löst primitive nichtlineare Flachwassergleichungen auf einem horizontal gekrümmt-linearen Gitter mit vertikaler Diskretisierung der Wassersäule. Der Transport von Salz und Temperatur wird durch Diffusion-Advektions-Gleichungen simuliert. Kleinskalige Turbulenz wird im Modell nach dem Prinzip der Wirbelviskosität dargestellt (Deltares 2014a).

Relevante Prozesse, welche das Modell erfasst, sind: Gezeitenantrieb, barotrope und barokline Effekte, turbulenzinduzierte Massen- und Impulsströme, Transport von Salz, räumlich variable Bodenrauheit, zeitlich variabler Abfluss, Trockenfallen von Watten und der Einfluss hydraulischer Bauwerke. Im morphologischen Modell werden zudem der Transport von Sediment sowie morphologische Veränderungen der Sohle simuliert.

Modellbedingt werden nicht berücksichtigt: vertikale Beschleunigungen und der Einfluss der Dichte auf das Wasservolumen. Weiterhin werden für die Beantwortung der Aufgabenstellung als vernachlässigbar angesehen: der Einfluss von lokalem Wind, Wellen, Temperatúraustausch mit der Atmosphäre, solare Einstrahlung, Niederschlag und Evaporation. Die Flüssigschlickdynamik und deren Schichtungsverhalten werden durch das Modell nicht zufriedenstellend wiedergegeben.

Der dreidimensionale Transport suspendierter Sedimente wird über die Advektions-Diffusions-Gleichung unter Einbeziehung der hydrodynamischen Parameter berechnet. Insofern gleicht die Berechnung des Sedimenttransportes in der Wassersäule, dem von anderen Konstituenten wie Salz oder Temperatur. Zusätzlich werden Sinkgeschwindigkeit und Austausch der Sedimente mit der Sohle berücksichtigt.

Für nicht-kohäsive Sedimente wird nach dem Konzept der Referenzhöhe von van Rijn (1993) zwischen Geschiebetransport und Transport von suspendiertem Material unterschieden. In Modellen ohne Wellen ist die Referenzhöhe abhängig von der Rauheitshöhe. Der Austausch zwischen Sohle und Wassersäule erfolgt über Diffusion und Absinken. Der Depositionsfluss ist abhängig von der Sedimentkonzentration in der Referenzschicht und der Sinkgeschwindigkeit (Deltares 2014a). Der Erosionsfluss wird über aufwärtsgerichtete Diffusion und den Konzentrationsgradienten zwischen Referenzschicht und Referenzhöhe bestimmt (Deltares 2014a). Die Sinkgeschwindigkeit von nicht-kohäsivem Sediment wird im Modell nach van Rijn (1993) berechnet (Deltares 2014a).

Für die kohäsive Sedimentfraktion (Schlick) werden die Massenströme zwischen Wassersäule und Sohle über die Partheniades–Krone Formel in Abhängigkeit von der Schubspannung berechnet (Partheniades 1965). Wird die benutzerdefinierte kritische Schubspannung für Erosion im Modell überschritten, erodiert das Material an der Sohle. Umgekehrt sedimentiert das Material wenn die benutzerdefinierte kritische Schubspannung für Sedimentation unterschritten wird (Deltares 2014a). Für die Sinkgeschwindigkeit von kohäsivem Material wurden Aggregation und behindertes Absinken berücksichtigt (van Rijn 1993).

Für die Simulation der Seegangsszenarien wurde das, in Delft3D modular integrierte, spektrale Seegangsmodell SWAN verwendet (Holthuijsen et al. 1989, Booij et al. 1999, Ris et al. 1999). Das Modell simuliert die Bildung von windgenerierten Wellen und deren Ausbreitung unter Berücksichtigung von Diffraktion, Refraktion, Dissipation, Reflektion und nicht linearer Welleninteraktion. Die Reflektionswirkung der Kaje wurde über einen Reflektionsfaktor dargestellt. Dieser wurde, unter Annahme der ungünstigsten Umstände, auf den Wert 1 festgelegt (Totalreflektion).

Auf eine Darstellung der zugrunde liegenden Modellgleichungen wird hier verzichtet. Eine detaillierte Beschreibung des Delft3D Modells und seiner Module findet sich in der offen zugänglichen Dokumentation (Deltares 2016).

3.2 MODELLAUFBAU

Das verwendete Modell basiert auf dem Ausgangsmodell, welches in vorangegangenen Untersuchungen entwickelt wurde (FTZ 2014a, FTZ 2014b). Im Folgenden wird auf den Aufbau des Ausgangsmodells und auf die Anpassung des Modelles für die vorliegende Studie eingegangen.

3.2.1 AUSGANGSMODELL

Das Modellgebiet liegt im Ems-Ästuarbereich und reicht von Borkum bis Bollingerfähr (*Abb. 3-1*, Anhang 3). Es schließt das Leda-Jümme Gebiet mit ein. Das Sperrwerk bei Gandersum ist im Modell in der Modellgitterauflösung berücksichtigt. Das Wehr bei Herbrum und der 12 km lange Geiseleitdamm sind als Subgitterstrukturen (local weir) implementiert (Deltares 2014a).

Die Diskretisierung des Modellgebietes erfolgt über ein gekrümmt-lineares Gitter mit ca. 160t Zellen. Die räumliche Auflösung des Gitters reduziert sich vom Randbereich in der Nordsee bis zum Dollart von etwa 1000 m auf 100-200 m. Das Gitter orientiert sich ab etwa Knock bis zur Modellgrenze bei Bollingerfähr an der Fahrrinne und variiert in der Auflösung zwischen < 100 m im Bereich Dollart und < 50 m in der Unterems. In der Vertikalen ist das Modellgitter in 10 Schichten unterteilt, die jeweils 10 % der bestehenden Wassertiefe einnehmen (Sigma-Diskretisierung) (Deltares 2014a).

Die Modelltopographie wurde durch Interpolation des in Kapitel 2 beschriebenen GDMW-2010 auf das Modellgitter generiert. Zusätzlich wurden Verkehrssicherungspeilungen (VKS) hinzugezogen, die vom WSA Emden in regelmäßigen Intervallen abschnittsweise entlang der Fahrrinne in der Unter- und Außenems vorgenommen werden.

Die Sohlrauheit wurde zunächst nach Escobar (Escobar & Mayerle 2006) abgeschätzt und anschließend im Kalibrierungsprozess angepasst. Es sind drei Sedimentfraktionen definiert: Mittelsand (300 µm, mS), Feinsand (100 µm, fS) und Material kleiner 63 µm (Schlick). Die Ausgangsverteilung der Sedimente entspricht der Sedimentverteilung "Sedimentbelegung 2" im FTZ Bericht zur Wirkung einer Sperrwerkssteuerung (FTZ 2014b). Zur Berechnung der Sedimentverteilung wurde zunächst von einer einheitlichen Verteilung von 40% Schlick (< 63µm), 40 % Feinsand und 20 % Mittelsand im gesamten Modellgebiet ausgegangen. Diese Verteilung wurde für 15 Tage mit einem morphologischen Beschleunigungsfaktor (MorFac, Deltares 2014a) von 10 (Morphologische Zeit ca. 5 Monate) bei konstantem Abfluss von 25 m³/s ohne Aktualisierung der Sohlage eingerechnet. Anschließend wurde über drei Tage unter den gleichen Bedingungen die Verteilung einer hohen Schlickkonzentration aus der Wassersäule (20 g/l) auf das Sediment berechnet. Diese schlickhaltige Schicht wurde als Auflageschicht auf

die zuvor berechnete Verteilung verwendet. Die so ermittelte Sedimentverteilung wurde im Untersuchungsmodell vorgegeben. Die Sande werden in den Berechnungen als nicht-kohäsive Sedimente, der Schlick als kohäsives Sediment berücksichtigt. Für suspendiertes Material ist für die Sedimentfraktion kleiner 63 µm eine Ausgangskonzentration von 2 kg/m³ vorgegeben. Der Effekt der Sedimentkonzentration auf die Dichte der Wasser-Sediment Mischung ist im Modell berücksichtigt.

Bei der Berechnung der Sinkgeschwindigkeit von kohäsivem Material sind Aggregation und behindertes Absinken nach van Rijn (1993) berücksichtigt. Bis zu einer bestimmten Referenzkonzentration (hier: 10 g/l) wird eine Sinkgeschwindigkeit unter Einfluss von Aggregation berechnet. Für Konzentrationen über der Referenzkonzentration wird ein behindertes Sinken angenommen. Nachfolgende Gleichungen geben die Sinkgeschwindigkeit im Sedimentgemisch (W_s) in Abhängigkeit von der Volumenkonzentration (C), der Sinkgeschwindigkeit individueller Partikel (W_{s0}) und von vier Koeffizienten (k_1, n, k_2, β) an:

$$W_s = k_1 C^n \quad \text{für Suspensionen } 0,01 - 10 \text{ g/l (Flokulation)}$$

$$W_s = W_{s0}(1 - k_2 C)^\beta \quad \text{für Suspensionen } > 10 \text{ g/l (behindertetes Absinken)}$$

Im Modell wurden die Konstanten auf folgende Werte festgelegt:

$$k_1 = 0,513, n = 1,29, W_{s0} = 13,48, k_2 = 0,008, \beta = 3,43$$

Die Parametrisierung der kritischen Schubspannung für Erosion wurde nach Zanke (1982) abgeschätzt und dann im Kalibrierungsprozess angepasst. Die kritische Schubspannung für Sedimentation wurde der Schubspannung für Erosion gleichgesetzt (Deltares 2014b).

Als hydrodynamische Randbedingung am seeseitigen Rand des Modells sind die gemessenen Zeitreihen der Wasserstände am Pegel Borkum-Fischerbalje vorgegeben. Der Salzgehalt an der seeseitigen Modellgrenze ist auf konstant 29 psu festgelegt. Die flächigen Anfangsbedingungen für die Salzgehalte wurde aus den Messungen (siehe Kapitel 2) entlang der Ems erstellt. Auch für die Sedimentkonzentrationen sind an der seeseitigen Modellgrenze konstante Werte von 0,02 g/l (Schlick), 0,002 g/l (fS) und 0 g/l (mS) vorgegeben. Zur Berücksichtigung der Konzentrationsunterschiede zwischen Niedrig- und Hochwasser an der Modellgrenze, ist bei der Vorgabe der Randwerte eine Anpassungszeit von sechs Stunden definiert (Thatcher-Harleman Zeitversatz) (Deltares 2011a).

An der Flusseiteigen Modellgrenze sind die, an der Station Versen-Wehrdurchstich gemessenen, Abflussdaten vorgegeben. Die Messstelle liegt ca. 40 km stromauf der Modellgrenze bei Bollingerfähr. Um die Strecke zwischen Versen und Bollingerfähr hinsichtlich Fließzeit und Abflusszufuhr zu berücksichtigen, wurden die Abflussdaten aus Versen um 24 Stunden verschoben und um 10 % erhöht. Am Ems-Zufluss im Modell sind die, an der Messstation Herbrum (Wehr Herbrum) gemessenen, Salzgehalte eingesetzt. Die Suspensionskonzentrationen aller Sedimentfraktionen am Ems-Zufluss sind auf 0 g/l festgelegt, da davon ausgegangen wird, dass die über die Ems eingetragene Sedimentfracht vernachlässigbar gering ist.

3.2.2 ANPASSUNG DES AUSGANGSMODELLS

Um die, für die vorliegende Untersuchung notwendige Auflösung zu gewährleisten, wurde das Modellgitter im Bereich der Anlegestellen angepasst und verfeinert (Abb. 3-2, Anhang 3). Um die Rechenzeiten nach der Verfeinerung des Modellgitters möglichst gering zu halten, wurde die stromaufwärtige Modellgrenze von Bollingerfähr nach Oldersum verlegt. Abb. 3-1 in Anhang 3 zeigt die Ausdehnung des verwendeten Modells.

Die Diskretisierung des verwendeten Modellgebietes erfolgt über ein Gitter mit ca. 190t Zellen. Die räumliche Auflösung des Gitters reduziert sich vom Randbereich in der Nordsee bis zum Dollart von etwa 1000 m auf 100-200 m. Das Gitter orientiert sich ab etwa Knock bis zur stromaufwärtigen Modellgrenze an der Fahrrinne und variiert in der Auflösung zwischen < 30 m im Emders Fahrwasser und < 10 m in der Ems vor den Anlegestellen. In der Vertikalen ist das Modellgitter in 10 Schichten unterteilt, die jeweils 10 % der bestehenden Wassertiefe einnehmen (Sigma-Diskretisierung, Deltares 2014a). *Abb. 3-3* in Anhang 3 zeigt einen Schnitt durch das Gitter in der Ems bei Emden.

Am flussseitigen Modellrand sind die Wasserstände, Salz- und Sedimentkonzentrationen aus dem ursprünglichen Ems-Modell vorgegeben, welches sich bis Bollingerfähr erstreckt (FTZ 2014a, FTZ 2014b). Für den Referenzzustand 2 wurden mit dem Gesamtmodell neue Randbedingungen berechnet, welche die oberstromigen Effekte einer Außenemsvertiefung berücksichtigen.

Abb. 3-4 und *Abb. 3-5* in Anhang 3 geben eine Übersicht über die Modelltopographie und die Ausgangsverteilung der Sedimentfraktion < 63 µm im Referenzmodell.

3.3 MODELLVALIDIERUNG

Für eine Quantifizierung der Modellqualität des Gesamtmodells wird auf den Bericht des FTZ (2014b) verwiesen. Aus den dortigen Vergleichen der Modellergebnisse mit den Messdaten lassen sich zusammenfassend folgende Aussagen zur Modellgüte treffen:

- Die statistische Auswertung belegt die korrekte Reproduktion der Tidenamplitude.
- Der Anstieg des Tidenhubes von Borkum bis Herbrum wird erfasst.
- Die Form der Tidekurve wird reproduziert.
- Im Mittel werden die Strömungen vom Modell tendenziell überschätzt.
- Die Charakteristik der Flutstromdominanz wird abgebildet.
- Im Bereich zwischen Emden und Terborg wird die Flutstromdominanz vom Modell nicht erfasst.
- Der zeitliche Verlauf des Salzgehaltes mit der Tide wird erfasst.
- Der mittlere Salzgradient entlang der Ems wird zufriedenstellend modelliert.
- Das Vordringen der Salinität wird nur geringfügig unterschätzt.
- Die absoluten Suspensionskonzentrationen in der Unterems werden vom Modell deutlich unterschätzt.
- Die Variation der Schwebstoffkonzentrationen mit dem Spring/Nipp Zyklus wird im Modell abgebildet.
- Lage und Verschiebung des Trübungsmaximums in Reaktion auf den Abfluss werden vom Modell naturähnlich erfasst.
- Die Flüssigschlickdynamik wird vom Modell nur ungenügend wiedergegeben.
- Die morphologische Entwicklung in der Unterems wird weitgehend vom Modell reproduziert. Sie wird in einem Bereich oberstrom von Terborg jedoch deutlich überschätzt, was auf eine unzulängliche initiale Sedimentbelegung zurückgeführt wird.

Die grundsätzliche Eignung des Gesamtmodells zur Bewertung hydrodynamischer und morphologischer Einflüsse des geplanten Großschiffsliegeplatzes wurde vom NLWKN im Rahmen dieses Projektes bestätigt. Da das verwendete Modell einen, lokal verfeinerten, Ausschnitt des Gesamtmodells darstellt und an der oberstromigen Grenze mit Randwerten aus dem Gesamtmodell angetrieben wird, ist die Modellqualität des für diese Studie verwendeten Modells vergleichbar der, des verifizierten Gesamtmodells. Entsprechend der

Ausschreibung, die ein bereits verifiziertes Modell voraussetzt, wird auf eine umfassende Darstellung der Verifizierung des verwendeten Modells an dieser Stelle verzichtet.

4 UNTERSUCHTE FÄLLE

Im vorliegenden Bericht wird die Wirkung des GSLPs durch die Gegenüberstellung mit dem Ausgangszustand (IST-Zustand) beurteilt. Außerdem wurde die Wirkung des GSLPs in Kombination mit einer Emsvertiefung betrachtet. Der fiktive IST-Zustand ohne GSLP und mit Emsvertiefung ist nicht Bestandteil der Untersuchung. Die entwickelten Modellszenarien werden im Folgenden dargestellt. Es wird darauf hingewiesen, dass die Lage des Einspülpunktes im Laufe des Projektes angepasst wurde. Das Modell berücksichtigt die Standortvariante 3 vom 02.10.2015 (Sellhorn 2015a). Zum Zeitpunkt der Berichtgebung nach Abschluss der Modellierungen war die Notwendigkeit zur Untersuchung dieser Standortvariante nicht mehr gegeben, da der Anschluss in den Bereich der neuen Anlegestelle verlegt wurde. Aus diesem Grund wird der Einspülpunkt hier als Bestandteil des Modells zwar vorgestellt, in den folgenden Kapiteln jedoch nicht in der Auswertung berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wirkung des Einspülpunktes im Modell lokal begrenzt ist. Es wird davon ausgegangen, dass der Einspülpunkt wenig Einfluss auf die Wirkung der anderen ausbaubedingten Veränderungen hat und die Modellergebnisse daher auch als Grundlage für eine Beurteilung der Referenzzustände ohne Einspülpunkt dienen können.

4.1 AUSGANGSZUSTAND

Für den Ausgangszustand (IST-Zustand) wurde das in Kapitel 3 beschriebene Modell verwendet. Es dient als Referenzmodell und soll den Ist-Zustand vor dem Einbau des GSLPs darstellen. *Abb. 4-1* in Anhang 4 zeigt die Topographie im Bereich Emspier und Emskai im Ausgangszustand.

Die Wirkung der Pfeiler vor der Spundwand der Emspier auf die Strömungsgeschwindigkeiten wird im Modell über eine Subgitterstruktur (porous plate, Deltares 2014a) einbezogen. In dieser Form werden die, mit dem Bauwerk verbundenen Energieverluste, über eine Parametrisierung in der Impulsgleichung als Rauheitsverlust berücksichtigt (Deltares 2014a).

4.2 REFERENZZUSTAND 1 - GSLP

Im Referenzzustand 1 (RZ1) wurde, zur Berücksichtigung des GSLPs, die Lücke zwischen Emspier und Emskai im Modell geschlossen. Die in dieser Studie implementierte Kaje des GSLPs beinhaltet keine Pfeiler vor der Spundwand (Vorzugsvariante 4 vom 23.10.2015). Entsprechend wurden im Modell keine zusätzlichen Energieverluste berücksichtigt. Am neuen Liegeplatz wurde in der Modelltopographie eine Liegewanne von -14,2 mNN angelegt. Zusätzlich wurde ein Einspülpunkt am nördlichen Emsufer ca. 2 km stromab vom geplanten GSLP mit einer Zufahrt (-10,5 mNN) implementiert (Standortvariante 3 vom 02.10.2015, Sellhorn 2015a). *Abb. 4-2* in Anhang 4 zeigt die Topographie im Bereich Emspier, GSLP und Emskai im RZ1 und die Differenz zwischen RZ1 und IST-Zustand.

4.3 REFERENZZUSTAND 2 - GSLP MIT EMSVERTIEFUNG

Hinsichtlich des GSLPs und des Einspülpunktes entspricht der Referenzzustand 2 (RZ2) dem RZ1. Zusätzlich wurde im RZ2 eine Vertiefung der Außenems berücksichtigt, wie sie in Erläuterungsbericht des WSV beschrieben ist (WSV/WSA Emden, 2012a). Sie beinhaltet eine Vertiefung der Sohle um ca. 1 m im Bereich der Fahrrinne zwischen der Einfahrt zum Emdener Hafen bis Ems-km 74,6 (*Abb. 4-3*, Anhang 4) und eine auf -11,5 mNN vertiefte Wendestelle auf Höhe der Emspier (*Abb. 4-4*, Anhang 4). Zusätzlich ist eine Querschnittseinengung bei Ems-km 74 durch Verlängerung des Bühnenpaares 6/7 vorgesehen (*Abb. 4-5*,

Anhang 4), welche durch Anpassung des Geiseleitdamms im Modell berücksichtigt wurde. *Abb. 4-6* in Anhang 4 zeigt die Topographie im Bereich Emspier, GSLP und Emskai im RZ2 im Modell sowie die Tiefendifferenz zwischen RZ2 und IST-Zustand. Die Tiefenverhältnisse der Fahrrinnensohle im IST-Zustand und im RZ2 im Modell sind in *Abb. 4-7* in Anhang 4 dargestellt.

In dieser Studie wird sich bei der Betrachtung des RZ2 auf das innere Emders Fahrwasser konzentriert, da davon ausgegangen wird, dass die Überlagerung der Wirkungen von GSLP und Emsvertiefung kleinräumig in diesem Bereich auftritt. Die Gesamtwirkung der Ausbaumaßnahme Emsvertiefung mit Wendestelle und Bühnenanpassung ist Gegenstand vorheriger Untersuchungen, auf welche an dieser Stelle verwiesen wird (z.B. BAW 2012).

5 UNTERSUCHTE ZEITRÄUME UND SZENARIEN

Die Wirkungsweise des GSLPs in den untersuchten Fällen wird sowohl mittelfristig als auch längerfristig betrachtet. Für die Untersuchung der Wirkung auf die Seegangsverhältnisse wurden Szenarien mit Wind aus unterschiedlichen Richtungen gerechnet. Zur Betrachtung der Effekte des GSLPs auf Sturmflutkennwerte wurde der Sturm Xaver (Dezember 2013) simuliert. Im Folgenden werden die einzelnen Zeiträume und Szenarien näher beschrieben.

5.1 MITTELFRISTIGE BETRACHTUNG

Für die mittelfristige Betrachtung wurde das, in Kapitel 3 vorgestellte, und entsprechend der in Kapitel 4 beschriebenen Fälle angepasste, Modell verwendet. Folgende Parameter wurden im mittelfristigen Zeitraum ausgewertet:

- Wasserstände und Tidehub
- Strömungsgeschwindigkeiten
- Salinität
- suspendiertes Sediment
- Sedimenttransport
- Sohlentwicklung

Im mittelfristigen Modell wurde ein Zeitraum von zwei Monaten (28.02. - 27.04.2010) simuliert. Für die Betrachtung der mittelfristigen Veränderungen von Hydrodynamik, Salinität und Sedimentdynamik wird ein Zeitraum von 30 Tagen herangezogen (28.03.-27.04.2010), der der zweiten Simulationshälfte entspricht und somit die mittelfristig eingeschwungenen Bedingungen repräsentiert. Für die morphologische Betrachtung wurde der gesamte zweimonatige Simulationszeitraum herangezogen, um die Entwicklung der Sohle vom Anfangszustand aus zu berücksichtigen.

Abb. 5-1 in Anhang 5 zeigt die Wasserstandsganglinie am Pegel Emspier und den Oberwasserabfluss am Messpunkt Versen Wehrdurchstich im simulierten Zeitraum.

Die Kennwerte für Wasserstände und Oberwasserabfluss im Simulationszeitraum liegen im Bereich der langjährigen Mittelwerte. *Tab. 5-1* in Anhang 5 zeigt die mittleren Tidehoch- und Tideniedrigwasser am Pegel Borkum Fischerbalje und den mittleren Oberwasserabfluss der Ems in Versen im Vergleich mit den langjährigen Mittelwerten.

5.2 LÄNGERFRISTIGE BETRACHTUNG

Zusätzlich zur mittelfristigen Auswertung, wurde die morphologische Wirkung des GSLPs über einen längerfristigen Zeitraum von ca. 11 Monaten betrachtet. Für die längerfristige Betrachtung wurde das, in Kapitel 3 vorgestellte, und entsprechend der in Kapitel 4 beschriebenen Fälle angepasste, Modell verwendet. Für diese Simulation wurde die Methode der morphologischen Beschleunigung angewandt, die es ermöglicht, längere morphologische Entwicklungen mit kürzeren Rechenzeiten zu realisieren. In den folgenden Kapiteln wird näher auf den Modellaufbau und die Berücksichtigung der morphologischen Beschleunigung eingegangen.

5.2.1 MORPHOLOGISCHE BESCHLEUNIGUNG

Das Konzept der morphologischen Beschleunigung (MorFac) wurde von Lesser et al. (2004) und Roelvink (2006) entwickelt und verschiedentlich (u.a. Ranasinghe et al. 2011) verifiziert. Der MorFac ermöglicht die Unterscheidung zwischen hydrodynamischer und morphologischer Zeitrechnung im Modell. Bei seiner Verwendung wird der Sediment austausch zwischen Wassersäule und Untergrund (Erosions- und Akkumulationsströme) mit einem Faktor (MorFac) multipliziert. Die so gegenüber der hydrodynamischen Zeit beschleunigten morphologischen Änderungen entsprechen einem entsprechend dem MorFac verlängerten morphologischen Entwicklungszeitraum. Die Methode ermöglicht die Abschätzung längerfristiger morphologischer Veränderungen anhand von kürzeren Simulationszeiträumen. Hierbei ist zu beachten, dass sich der MorFac nur auf die Massenbilanz der Sohle auswirkt und keinen direkten Einfluss auf die Suspensionskonzentrationen hat.

Die Wahl der morphologischen Beschleunigung hängt ab von der Art der Randbedingungen, der Modellkonfiguration und der Charakteristik der Hydrodynamik im Modellgebiet. Maximal mögliche Beschleunigungsfaktoren müssen jeweils in Sensitivitätsstudien untersucht und verifiziert werden. Im Ems-Modell sind über den Jahresverlauf insbesondere die Spring-Nipptidedynamik und der Jahresgang des Ems-Oberwasserabflusses zu berücksichtigen. Die Verifizierung der Verwendung des MorFac wurde im vorangegangenen Projekt durchgeführt (FTZ, 2014a).

Für die Verkürzung müssen die hydrodynamischen Randbedingungen auf ein repräsentatives Äquivalent reduziert werden. Hierzu wurden die Zeitreihen der Wasserstände und des Oberwasserabflusses der Ems an den Modellgrenzen angepasst. Bei der Bestimmung repräsentativer Bedingungen werden statistische Kenngrößen zwischen verschiedenen kürzeren Zeiträumen und dem Gesamtzeitraum verglichen. Zudem wurde die ursprüngliche Wasserstandsganglinie gefiltert um den Einfluss meteorologischer Ereignisse über der Nordsee zu reduzieren.

Die Simulationen der längerfristigen morphologischen Entwicklung erfolgte jeweils unter Verwendung einer morphologischen Beschleunigung mit MorFac 8. Für einen morphologischen Entwicklungszeitraum von etwa 11 Monaten (320 Tagen) wurden die Zeitreihen der Wasserstände und des Oberwasserabflusses der Ems an den offenen Modellgrenzen entsprechend der oben beschriebenen Methode reduziert. Für den Oberwasserabfluss wurde eine repräsentative Jahresganglinie auf die hydrodynamische Zeitspanne "gestaucht". *Abb. 5-2* in Anhang 5 zeigt die Wasserstände und den Ems-Oberwasserabfluss für das längerfristige Modell mit MorFac 8. Die Simulationsperiode beginnt und endet bei geringeren sommerlichen Abflüssen, höhere winterliche Abflüsse treten in der Mitte der Periode auf. Randwerte an der flussseitigen Grenze des verwendeten Modells wurden aus entsprechenden Simulationen mit dem Gesamtmodell entnommen.

5.3 UNTERSUCHUNG DER SEEGANGSVERHÄLTNISSE

Für die Betrachtung der Wirkung des neuen GSLPs auf die Seegangsverhältnisse, wurden die signifikante Wellenhöhe und die mittlere Wellenperiode untersucht. Es wurden unterschiedliche Szenarien mit wind-induzierten Wellen berechnet. Unter Berücksichtigung der ungünstigsten Wellenangriffsrichtungen, wurde in den Szenarien Wind aus West, Südwest, Süd und Südost simuliert. Die Windgeschwindigkeit wurde, in Anlehnung an die üblichen Werte zur Bemessung der Deichsicherheit in Ästuaren, auf konstant 25 m/s ("schwerer Sturm" nach DWD) eingestellt. Der Wasserstand wurde auf konstant 1,65 mNN festgelegt und liegt damit etwa beim mittleren Springtidehochwasser in Emden. Diese Situation ermöglicht die Bildung

von relativ hohen Wellenhöhen bei gleichzeitiger Reflektion an den Kajen. Bezüglich der Reflexion wurden die ungünstigsten Verhältnisse angenommen (totale Reflexion).

5.4 UNTERSUCHUNG DER STURMFLUTKENNGRÖßEN

Für die Betrachtung der Wirkung des GSLPs auf die Sturmflutkennwerte Scheitelwasserstand und Laufzeit wurde das Orkantief Xaver herangezogen. Dieses bewirkte am 5. und 6. Dezember 2013, durch lang anhaltende nordwestliche Winde von 9-10 Bft, drei aufeinanderfolgende Sturmfluten in der Deutschen Bucht, wovon eine in die Kategorie "sehr schwer" eingestuft wurde. *Abb. 5-3* in Anhang 5 zeigt die Wasserstandsganglinie am Pegel Borkum während der Kettentide. In Emden lag die höchste Abweichung vom mittleren Tidehochwasser bei etwa 3,5 mNN.

Für die Simulation der Sturmflut wurde das in Kapitel 2 beschriebene Modell rein hydrodynamisch gerechnet weil Sediment- und Morphodynamik die Laufzeit und den Scheitelwasserstand der Sturmflut nicht signifikant beeinflussen und es sich um eine vergleichende Studie handelt. Die Rechenzeiten konnten so wesentlich geringer gehalten werden.

Bei Sturmfluten die höher als 3,70 mNN auflaufen, wird das Ems-Sperrwerk bei Gandersum bei 3,50 mNN geschlossen. Während der Sturmflut Xaver wurde das Emssperrwerk im Zeitraum 5. bis 6. Dezember zweimal geschlossen. *Tab. 5-2* in Anhang 5 zeigt den Schließplan während des Sturms. Der Schließplan wurde in der Simulation berücksichtigt. Für die Umsetzung der Torsteuerung im Modell wurde die Sperrwerkstore als Subgitterstrukturen (barriers) implementiert (Deltares 2014a). In dieser Form werden die, mit dem Bauwerk verbundenen Energieverluste, nicht über die Gitterauflösung, sondern über eine Parametrisierung in der Impulsgleichung als Rauheitsverlust berücksichtigt (Deltares 2014a). Die Torsteuerung erfolgt über eine Steuerungsdatei, die während der Simulation die Lage der Tore zeitlich variabel vorgibt.

Am seeseitigen Modellrand wurden Wasserstandsmessungen bei Borkum vorgegeben. Am flussseitigen Rand wurde ein konstanter Abfluss von 100 m³/s angenommen. Eine Annahme ist in dieser Studie vertretbar, da Aufgrund des geschlossenen Ems-Sperrwerkes zum Scheitelwasserstand, der Einfluss des Oberwasserzuflusses auf den Scheitelwasserstand stromab des Sperrwerkes als äußerst gering eingestuft wird. Der Wind wurde im Modell als ein räumlich und zeitlich variierendes Windfeld berücksichtigt. Die Daten stammen aus dem Regionalmodell COSMO- EU des DWD (Auflösung 7km).

Abb. 5-4 in Anhang 5 zeigt die, am Pegel Emden Neue Seeschleuse simulierten, Wasserstände im Vergleich mit Hochwassermessungen an dieser Stelle während der Sturmflut. Die maximalen Hochwasserstände werden im Modell leicht unterschätzt, der Verlauf der Kettentide wird in der Simulation jedoch ausreichend genau dargestellt, um eine vergleichende Untersuchung vorzunehmen.

6 WIRKUNG REFERENZZUSTAND 1 - GSLP

Im Folgenden wird die Wirkung des Großschiffsliegeplatzes ohne Emsvertiefung (RZ1) dargestellt. Die Untersuchung erfolgt entlang der in Kapitel 5 definierten Parameter in den festgelegten Zeiträumen und Szenarien. Das zugrunde liegende Modell entspricht dem in Kapitel 2 dargestellten Modell. Die Betrachtung erfolgt überwiegend anhand der Differenzen zwischen RZ1 und dem IST-Zustand im Bereich des Emders Fahrwassers. *Abb. 6-1* und *Abb. 6-2* in Anhang 6 zeigen die Position der Anlegestellen im Kartenausschnitt und die Lage der analysierten Querschnitte. Abschließend werden die Änderungen durch den RZ1 zusammenfassend dargestellt.

6.1 MITTELFRISTIGE BETRACHTUNG

In der mittelfristigen Betrachtung werden folgende Parameter untersucht:

- Wasserstände und Tidehub
- Strömungsgeschwindigkeiten
- Salinität
- suspendiertes Sediment
- Sedimenttransport
- Sohlentwicklung

6.1.1 WASSERSTÄNDE UND TIDEHUB

Abb. 6-3 in Anhang 6 zeigt die Differenz der zeitlich gemittelten Tidehoch- und Niedrigwasser und des mittleren Tidehubes zwischen RZ1 und IST-Zustand. Die Differenzen für mittlere Tidehoch- und Tideniedrigwasser liegen unter 0,01 m, wobei erwartungsgemäß der Einfluss bei niedrigen Wasserständen etwas stärker ist. Folglich ist auch der Effekt auf den Tidehub äußerst gering.

6.1.2 STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEITEN

Betrachtet werden die Differenzen der maximalen und zeitlich gemittelten Strömungsgeschwindigkeiten zwischen RZ1 und IST-Zustand. *Abb. 6-4* und *Abb. 6-5* in Anhang 6 zeigen die Differenzen der tiefengemittelten Werte für Flut- und Ebbströmungen. Die mittleren und maximalen Strömungen werden in den vertieften Bereichen vor dem GSLP reduziert. Die Wirkung der Querschnittsveränderung ist über die gesamte Emsbreite zu erkennen. Hinter der Liegewanne kommt es jeweils in Strömungsrichtung durch dreidimensionale Effekte des veränderten Querschnittes zu einer Anhebung der tiefengemittelten Strömungen. Dadurch erhöhen sich die Flutströmungen vor dem Emskai und die Ebbströmungen vor der Emspier. Außerdem kommt es durch eine Verlagerung der Strömung in Richtung des tieferen Profils zu einer Erhöhung der tiefengemittelten Strömungen vor dem neuen GSLP. Hiervon ist insbesondere die Ebbströmung betroffen, deren Stromlinie zur nördlichen Uferlinie tendiert. Die Unterschiede in den mittleren und maximalen Geschwindigkeiten liegen größtenteils unter 0,1 m/s, lokal bei 0,2 m/s und begrenzen sich räumlich auf den veränderten Emsabschnitt.

6.1.3 SALINITÄT

Abb. 6-6 in Anhang 6 zeigt die Differenzen der zeitlich gemittelten und maximalen Salzgehalte für die tiefengemittelten Werte. Insgesamt kommt es im Modell mit Referenzzustand zu einer sehr leichten Reduktion der mittleren Salinität. Die Unterschiede liegen unter 0,1 psu. Dieses Ergebnis resultiert aus dem

komplexen Zusammenwirken von veränderter Hydrodynamik und Morphologie. Die maximale tiefengemittelte Salinität ist nahezu unverändert.

6.1.4 SUSPENDIERTES SEDIMENT

Betrachtet werden die Differenzen der zeitlich gemittelten und maximalen suspendierten Sedimentkonzentrationen zwischen RZ1 und IST-Zustand. *Abb. 6-7* in Anhang 6 zeigt die Differenzen für die tiefengemittelten Werte. Im RZ1 werden die Schwebstoffkonzentrationen leicht erhöht. Der Haupteffekt im stromab- und stromaufwärtigen Lokalbereich der Liegewanne. Insbesondere vor dem Emskai kommt es durch erhöhte Flutgeschwindigkeiten zu höheren Suspensionsgehalten. Die Unterschiede in den mittleren suspendierten Sedimentkonzentrationen liegen im Modell unter $0,02 \text{ kg/m}^3$, die der maximalen Suspensionsgehalte unter $0,06 \text{ kg/m}^3$ und können somit als geringfügig betrachtet werden

6.1.5 SEDIMENTTRANSPORT

Abb. 6-8 in Anhang 6 vergleicht die kumulativen Transporte im RZ1 und IST-Zustand an drei Querschnitten bei Knock, im Emders Fahrwasser und bei Pogum (*Abb. 6-2*, Anhang 6). An keinem der drei Querschnitte ergibt sich eine signifikante Veränderung der Transportmengen und -richtung.

6.1.6 SOHLENTWICKLUNG

Betrachtet wird die Differenz der resultierenden Sohlagen im Referenz- und Ausgangszustand. *Abb. 6-9* in Anhang 6 zeigt die Differenz der Endtopographien von RZ1 und IST-Zustand. Positive Werte deuten eine flachere Topographie an, bzw. weniger Erosion oder mehr Akkumulation im Referenzzustand. Negative Werte zeigen eine tiefere Topographie, bzw. mehr Erosion oder weniger Akkumulation im Referenzzustand. Die neue Liegewanne und die Zufahrt zum Einspülpunkt sind als deutlich tiefer liegende Bereiche erkennbar.

Durch erhöhte Geschwindigkeiten (siehe Kapitel 6.1.2) kommt es relativ zum Ausgangszustand zu weniger Akkumulation bzw. mehr Erosion im stromauf- und stromabwärtigen Nahbereich der neuen Liegewanne und an der nördlichen Uferseite. Im Bereich des Dalbenliegeplatzes und stellenweise vor Emspier und Emskai kommt es durch Rückströmungen zu erhöhter Sedimentation. Reduzierte Strömungsgeschwindigkeiten führen im Flussbereich vor den Liegewannen sowie an den gegenüberliegenden Böschungsbereichen zu leicht erhöhter Akkumulation bzw. verringerter Erosion. Die Unterschiede im Bereich außerhalb der neuen Liegewanne liegen im Modell unter 0,5 m.

In *Abb. 6-10* in Anhang 6 ist die mittelfristige Veränderung der Sohlage im Bereich der neuen Liegewanne vor dem GSLP nach 2 Monaten qualitativ (siehe Kapitel 10) dargestellt. Gelb-rote Werte bedeuten Sedimentation, türkis-blaue Werte bedeuten Erosion. Im betrachteten Zeitraum kommt es überwiegend zu leichter Erosion in der Liegewanne. An der, dem Emskai zugewandten Seite ergibt sich im Modell eine leichte Böschungsverflachung, welche in Form von Akkumulation in der GSLP-Liegewanne und Erosion in der Emskai-Liegewanne ersichtlich wird. Im Südwestlichen Bereich der Liegewanne kommt es im Modell zu einer leichten Auskolkung.

6.2 LÄNGERFRISTIGE BETRACHTUNG

In der längerfristigen Betrachtung wird die längerfristige Wirkung des RZ1 auf die Entwicklung der Sohle untersucht.

6.2.1 SOHLENTWICKLUNG

Betrachtet wird die Differenz der resultierenden Sohllagen im Referenz- und Ausgangszustand. *Abb. 6-11* in Anhang 6 zeigt die Differenz der Endtopographien von RZ1 und IST-Zustand. Positive Werte deuten eine flachere Topographie an, bzw. weniger Erosion oder mehr Akkumulation im Referenzzustand. Negative Werte zeigen eine tiefere Topographie, bzw. mehr Erosion oder weniger Akkumulation im Referenzzustand. Die neue Liegewanne und die Zufahrt zum Einspülpunkt sind als deutlich tiefer liegende Bereiche erkennbar.

Generell zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den mittelfristigen Ergebnissen. Durch die ausbaubedingte Änderung der Strömungsverhältnisse kommt es in den stromauf- und stromabwärtigen Bereichen der neuen Liegewanne, relativ zum Ausgangszustand, längerfristig zu weniger Akkumulation bzw. mehr Erosion. Die Akkumulationstendenz an der Emspier und am Dalbenliegeplatz ist in der langfristigen Simulation leicht verringert.

Der Bereich stromab der GSLP-Liegewanne ist in der längerfristigen Simulation weniger von Erosion betroffen, als in der mittelfristigen Simulation. Die Unterschiede zwischen Referenzzustand und IST-Zustand liegen im Bereich außerhalb der neuen Liegewanne im Modell unter 1 m.

In *Abb. 6.12* in Anhang 6 ist die längerfristige Veränderung der Sohllage im Bereich vor dem GSLP nach etwa 11 Monaten qualitativ (siehe Kapitel 10) dargestellt. Im Bereich der GSLP-Liegewanne kommt es in der längerfristigen Simulation zu Akkumulation von Sediment. Der dem Emskai zugewandte Bereich ist davon stärker betroffen als die der Emspier zugewandte Seite.

6.3 UNTERSUCHUNG SEEGANGSVERHÄLTNISSE

Zur Beurteilung der Wirkung des GSLPs auf die Seegangsverhältnisse werden die signifikante Wellenhöhe (H_s) und die mittlere Wellenperiode (T) betrachtet.

Abb. 6-13 in Anhang 6 zeigt die resultierenden signifikanten Wellenhöhen für die gerechneten Szenarien im Bereich der Anlegestellen für den IST-Zustand und für den RZ1. Die Positionen von Emspier, GSLP und Emskai sind durch helle Linien hervorgehoben. Die höchsten signifikanten Wellenhöhen von ca. 1,2 m ergeben sich in allen Fällen im Szenario mit Winden aus westlicher Richtung, in dem die Wellen der Tiefenlinie des Ästuars folgen. Winde aus südlicher Richtung verursachen im Bereich der Anlegestellen aufgrund der dämpfenden Wirkung des Geiseleitdamms weniger hohe Wellen. Die in *Abb. 6-14* in Anhang 6 dargestellten mittleren Wellenperioden verhalten sich erwartungsgemäß analog zu den Wellenhöhen und liegen im Bereich der Anlegestellen bei etwa 2 s bis 3 s.

In *Abb. 6-15* und *Abb. 6-16* in Anhang 6 sind die Differenzen zwischen RZ1 und IST-Zustand für die signifikante Wellenhöhe und die mittlere Wellenperiode dargestellt. Im Bereich der Anlegestellen werden die signifikante Wellenhöhe und die mittlere Wellenperiode durch die Reflektion der Wellen an der neuen Spundwand des GSLPs leicht erhöht. Dieser Effekt ist am deutlichsten mit Winden aus Süd, da sich in

diesem Szenario die ungünstigste Angriffsrichtung ergibt. Im RZ1 kommt es zu einer Anhebung der signifikanten Wellenhöhe von bis zu 0,2 m. Die mittlere Wellenperiode wird um weniger als 0,2 s verändert.

6.4 UNTERSUCHUNG STURMFLUTKENNGRÖßEN

Betrachtet werden die Wirkung des GSLPs auf die Scheitelwasserhöhe und die Sturmflutlaufzeit in der untersuchten Sturmflut "Xaver". *Abb. 6-17* in Anhang 6 oben gibt eine räumliche Übersicht über die Wasserstände im Modellbereich zum Scheitelwasserstand in Emden für den IST- und den Referenzzustand. Die Lage der Wasserstände zum Scheitelwasserstand unterscheidet sich nur äußerst geringfügig. In der unteren Grafik in *Abb. 6-17* ist die Wasserstandsganglinie zum Scheitelwasserstand an der Emspier dargestellt. Die Unterschiede liegen unter 0,02 m.

Die aus dem Modell ermittelte Sturmflutlaufzeit von Borkum bis Emden beträgt ca. 1,5 Stunden. Hierzu wurden die Zeitpunkte des Scheitelwasserstandes verglichen. Mit der gewählten zeitlichen Modellauflösung von einer Minute ergeben sich keine Unterschiede in der Sturmflutlaufzeit zwischen RZ1 und IST-Zustand.

6.5 ZUSAMMENFASSUNG RZ1

In dieser Modellstudie wurde die hydromorphologische Wirkung des geplanten Großschiffsliegeplatzes in Emden untersucht. Neben einem Modell mit Ausgangszustand (IST-Zustand) wurde ein Modell mit dem geplanten Großschiffsliegeplatz simuliert. Diese als Referenzzustand 1 (RZ1) bezeichnete Variante beinhaltet den neuen Großschiffsliegeplatz mit Spundwand und Liegewanne entsprechend Vorzugsvariante 4 vom 23.10.2015. Für die Untersuchung verschiedener Parameter wurden unterschiedliche Perioden und Szenarien simuliert. Die Ergebnisse des Modells mit RZ1 wurden mit denen des Ausgangsmodells verglichen. Zusammenfassend lassen sich im Modell folgende Änderungen durch den RZ1 beobachten:

- Der Einfluss auf die **Wasserstände** und den **Tidehub** ist vernachlässigbar gering. Die Unterschiede liegen unter 0,01 m.
- Die tiefengemittelten **Strömungen** werden im vertieften Bereich vor dem GSLP reduziert. Seitlich kommt es jeweils in Strömungsrichtung zu einer Anhebung der Strömungsgeschwindigkeiten. Durch eine Strömungsumlenkung in Richtung des tieferen Profils kommt es zu einer Erhöhung der tiefengemittelten Strömungen vor dem neuen GSLP. Die Unterschiede in den mittleren und maximalen tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten liegen im Modell überwiegend unter 0,1 m/s, lokal bei 0,2 m/s und begrenzen sich räumlich auf den veränderten Emsabschnitt.
- In der mittelfristigen Betrachtung kommt es zu einer sehr leichten Verringerung der mittleren tiefengemittelten **Salinität**. Die Unterschiede liegen unter 0,1 psu. Die maximale tiefengemittelte Salinität wird nicht signifikant verändert.
- Die tiefengemittelten **Schwebstoffkonzentrationen** werden leicht erhöht. Der Haupteffekt liegt im stromab- und stromaufwärtigen Bereich der Liegewanne. Die Unterschiede der mittleren Werte liegen im Modell unter 0,02 kg/m³, die der maximalen Werte liegen unter 0,06 kg/m³.
- Die bestehenden **Sedimenttransportrichtungen und -mengen** werden nicht signifikant verändert.
- Die generellen Tendenzen in der **mittelfristigen Sohlentwicklung** sind im IST- und Referenzzustand ähnlich. Durch erhöhte Geschwindigkeiten kommt es im RZ1 jeweils stromauf und stromab der neuen Liegewanne zu verringerter Akkumulation bzw. erhöhter Erosion. Im Bereich des Dalbenliegeplatzes und im Flussbereich vor den Liegewannen kommt es zu leicht erhöhter

Akkumulation bzw. verringerter Erosion. Im RZ1 zeigt sich im betrachteten Zeitraum überwiegend leichte Erosion in der Liegewanne. Ebenso überwiegt im süd-südwestlichen Nahbereich der Liegewanne Erosion. An der dem Emskai zugewandten Seite kommt es in der GSLP-Liegewanne zu einer leichten Böschungsverflachung und Akkumulation in der neuen Liegewanne.

- Die Tendenzen der **längerfristigen Sohlentwicklung** sind denen der mittelfristigen Entwicklung ähnlich. Akkumulationstendenzen am nördlichen Ufer werden durch die Umlenkung der Strömung längerfristig reduziert. Im Bereich der neuen Liegewanne kommt es in der längerfristigen Simulation zu Akkumulation von Sediment. Der, dem Emskai zugewandte Bereich ist davon stärker betroffen als die, der Emspier zugewandte Seite.
- Die Ergebnisse der untersuchten Szenarien lassen auf eine geringe Wirkung von RZ1 auf die **Seegangsverhältnisse** (signifikante Wellenhöhe und mittlere Wellenperiode) schließen. Im ungünstigsten Fall wird die signifikante Wellenhöhe durch Reflektion an der Kaimauer des GSLP um ca. 0,2 m erhöht.
- Im gerechneten Sturmflutszenario konnten keine signifikanten Veränderungen der untersuchten **Sturmflutkenngrößen** Scheitelwasserhöhe und Sturmflutlaufzeit festgestellt werden.

7 WIRKUNG REFERENZZUSTAND 2 - GSLP MIT EMSVERTIEFUNG

Die Wirkung des GSLPs in einer Situation mit Emsvertiefung konnte nicht direkt ermittelt werden, da kein Vergleichsmodell ohne GSLP und mit Emsvertiefung simuliert wurde (siehe Kapitel 4). Im Folgenden wird die kombinierte Wirkung des Großschiffsliegeplatzes mit Emsvertiefung (RZ2) dargestellt. Die Untersuchung erfolgt entlang der in Kapitel 5 definierten Parameter in den festgelegten Zeiträumen und Szenarien. Das zugrunde liegende Modell entspricht dem in Kapitel 2 dargestellten Modell. Die Betrachtung erfolgt überwiegend anhand der Differenzen zwischen RZ2 und dem IST-Zustand im Bereich des Emders Fahrwassers. *Abb. 7-1 bis Abb. 7-3* in Anhang 7 zeigen die Kartenausschnitte mit den Positionen der Anlegestellen und der Bühnenveränderung sowie die Lage der analysierten Querschnitte. Abschließend werden die Änderungen durch den RZ2 zusammenfassend dargestellt.

7.1 MITTELFRISTIGE BETRACHTUNG

In der mittelfristigen Betrachtung werden folgende Parameter untersucht:

- Wasserstände und Tidehub
- Strömungsgeschwindigkeiten
- Salinität
- suspendiertes Sediment
- Sedimenttransport
- Sohlentwicklung

7.1.1 WASSERSTÄNDE UND TIDEHUB

Abb. 7-4 und *Abb. 7-5* in Anhang 7 zeigen die Differenz der zeitlich gemittelten Tidehoch- und Tideniedrigwasser sowie des mittleren Tidehubes zwischen RZ2 und IST-Zustand.

Das mittlere Tideniedrigwasser sinkt seewärts der Querschnittseinengung durch die Bühnenverlängerung und wird stromaufwärts leicht angehoben. Die maximalen Veränderungen im mittleren Tideniedrigwasser liegen hier bei 0,01 m. Die Wirkung auf das mittlere Tidehochwasser ist sehr gering und liegt unter 0,01 m. Im Bereich der Wendestelle werden die mittleren Tidewasserstände sehr leicht angehoben (< 0,01 m)

Die Änderung des Tidehubes wird insbesondere durch die Veränderungen des Tideniedrigwassers im Bereich der Querschnittseinengung bestimmt. Der Tidehub nimmt demnach stromab der Querschnittseinengung zu und stromauf davon ab. Die maximalen Veränderungen liegen bei etwa 0,01 m. Im Bereich der Anlegestellen werden die Wasserstände nur sehr geringfügig verändert. Die Unterschiede im Tidehub liegen unter 0,01 m

7.1.2 STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEITEN

Betrachtet werden die Differenzen der maximalen und zeitlich gemittelten Strömungsgeschwindigkeiten zwischen RZ1 und IST-Zustand. *Abb. 7-6 bis Abb. 7-9* in Anhang 7 zeigen die Differenzen der tiefengemittelten Werte für Flut- und Ebbströmungen.

Die tiefengemittelten Flutstromgeschwindigkeiten nehmen stromauf der Querschnittseinengung an den Bühnen 6 und 7 zu. Die mittleren tiefengemittelten Flutströmungen steigen dort um 0,1 m/s, lokal um 0,2

m/s. Die Zunahmen der maximalen Flutströmungen liegen in der Fahrrinne bei 0,2 m/s, lokal bei 0,3 m/s. Die maximalen und mittleren tiefengemittelten Ebbstromgeschwindigkeiten werden auf der stromabwärtigen Seite der Querschnittseinengung verstärkt. Die mittleren Ebbströmungen steigen dort um ca. 0,1 m/s. Die Veränderungen der maximalen Ebbströmungen liegen bei 0,1 m/s bis 0,2 m/s. Im ufernahen Nahbereich der verlängerten Buhnen kommt es durch örtliche Verluste zu einer relativen Verringerung der Strömungsgeschwindigkeiten. In der vertieften Fahrrinne werden die maximalen Flutströmungen tendenziell erhöht. Die Veränderungen liegen unter 0,1 m/s.

Durch die Querschnittsaufweitung werden die mittleren und maximalen Strömungen im Bereich Wendestelle und der GSLP-Liegewanne um bis zu 0,2 m/s reduziert. Im Nahbereich der Wendestelle kommt es durch den Querschnittsunterschied stromauf und stromab lokal zu einer Erhöhung der mittleren und maximalen Strömungsgeschwindigkeiten von überwiegend unter 0,1 m/s, lokal von etwa 0,2 m/s.

7.1.3 SALINITÄT

Betrachtet werden die Differenzen der zeitlich gemittelten und maximalen tiefengemittelten Salzgehalte zwischen Referenzzustand und Ist-Zustand (Abb. 7-10 bis Abb. 7-11 in Anhang 7). Die Veränderung der Salinität wird durch das größere Wasservolumen, welches durch die Vertiefung im RZ2 einströmt, verursacht. Zusätzlich kommt es in komplexer Weise durch die ausbaubedingten Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten zu einer Beeinflussung der Salinität. Insgesamt kommt es im Modell mit RZ2 zu einer Anhebung der mittleren Salinität. Die Unterschiede liegen im Modell im betrachteten Flächenvergleich I zwischen 0,6 psu an der seewärtigen Seite und 1,4 psu an der stromaufwärtigen Seite. Die Wirkung des RZ2 setzt sich in die Unterems fort. Die maximalen Differenzen in der mittleren Salinität liegen bei Pogum bei +1,5 psu. Die maximale tiefengemittelte Salinität wird im betrachteten Abschnitt vergleichsweise weniger angehoben. Die Veränderung liegt bei unter 1 psu.

7.1.4 SUSPENDIERTES SEDIMENT

Betrachtet werden die Differenzen der zeitlich gemittelten und maximalen suspendierten Sedimentkonzentrationen zwischen RZ2 und IST-Zustand. Abb. 7-12 bis Abb. 7-13 in Anhang 7 zeigen die Differenzen für die tiefengemittelten Werte. Im RZ2 werden die mittleren tiefengemittelten Schwebstoffkonzentrationen überwiegend leicht verringert. Die Unterschiede der mittleren Werte liegen unter $0,05 \text{ kg/m}^3$. Die Abnahme ist auf die reduzierten Geschwindigkeiten im Bereich der Wendestelle und auf die Energieverluste im Bereich der verlängerten Buhnen zurückzuführen. Die maximalen tiefengemittelten Suspensionskonzentrationen nehmen in der Wendestelle und im Bereich der Fahrrinne um bis zu $0,1 \text{ kg/m}^3$ zu. Dies ist insbesondere durch die Anhebung der maximalen Flutströmungen bedingt, die in der Fahrrinne und an der stromabwärtigen Kante der Wendestelle wirken. Vor den Anlegestellen werden die mittleren und maximalen Schwebstoffgehalte durch die deutliche Abnahme insbesondere der Flutstromgeschwindigkeiten leicht reduziert. Die Verringerung liegt unter $0,05 \text{ kg/m}^3$. An der Querschnittsverengung werden die maximalen Suspensionsgehalten durch die Intensivierung der maximalen Strömungen, sowie durch die Energieverluste an den Buhnen beeinflusst. Die Konzentrationen werden in diesem Bereich in komplexer Weise sowohl erhöht als auch verringert. Die Unterschiede liegen zwischen $-0,4 \text{ kg/m}^3$ und $+0,2 \text{ kg/m}^3$.

7.1.5 SEDIMENTTRANSPORT

In *Abb. 7-14* in Anhang 7 sind die kumulativen Sedimenttransporte an drei Querschnitten (*Abb. 7-3*, Anhang 7) über einen Zeitraum von 2 Monaten dargestellt. Positive Werte geben stromaufgerichteten Transport, negative Werte geben stromabgerichteten Transport an. Im RZ2 sind die Sedimenttransporte bei Knock annähernd gleich, im Emdener Fahrwasser kommt es im RZ2 durch die Verstärkung des Flutstromes an der Querschnittsverengung und in der Fahrrinne zu einer leichten Erhöhung des stromaufgerichteten Transportes. Bei Pogum sind die Transportmengen noch sehr leicht erhöht.

7.1.6 SOHLENTWICKLUNG

Betrachtet wird die Differenz der resultierenden Sohllagen im Referenz- und Ausgangszustand. *Abb. 7-15* in Anhang 7 zeigt die Differenz der Endtopographien von RZ2 und IST-Zustand. Positive Werte deuten eine flachere Topographie an, bzw. weniger Erosion oder mehr Akkumulation im Referenzzustand. Negative Werte zeigen eine tiefere Topographie, bzw. mehr Erosion oder weniger Akkumulation im Referenzzustand. Die Wendestelle, die neue Liegewanne und die Zufahrt zum Einspülpoint sind als deutlich tiefer liegende Bereiche erkennbar. Tieferliegende Bereiche in der Fahrrinne und im Zufahrtbereich zu den Anlegestellen resultieren ebenfalls aus den Tiefenvorgaben im RZ2. Berücksichtigt werden im Folgenden die Bereiche außerhalb dieser ausbaubedingten Veränderungen.

Durch erhöhte Geschwindigkeiten kommt es relativ zum Ausgangszustand zu weniger Akkumulation bzw. mehr Erosion im stromauf- und stromabwärtigen Nahbereich der Wendestelle. Die Unterschiede in der Endtopographie liegen hier unter 0,5 m. Die durch die Querschnittserweiterung reduzierten Strömungen vor Emspier und Dalbenliegeplatz verursachen im Vergleich zum IST-Zustand vermehrter Akkumulation. Die Unterschiede liegen im Modell unter 1m.

Im Bereich der verlängerten Buhnen, insbesondere an der südlich gelegenen Buhne 7, kommt es zu verstärkter Akkumulation bzw. reduzierter Erosion. Diese Tendenz zu Ablagerungen ergibt sich hauptsächlich durch Sekundärströmungen im Nahbereich der Buhnen, welche die typischen Auflandungsmuster im Bereich von Buhnenfeldern verursachen. Hier kommt es im Modell zu Unterschieden in der Endtopographie von bis zu 2 m. Die Buhnenverlängerung an Buhne 7 führt zu einer Verlagerung der Hauptströmung zum nördlichen Ufer. Im Modell kommt es dort im Bereich der Buhnenveränderung zu leichter Erosion (< 1m).

Abb. 7-16 in Anhang 7 zeigt die mittelfristige Veränderung der Sohllage im Bereich der neuen Liegewanne vor dem GSLP nach 2 Monaten. In der Liegewanne kommt es im RZ2 zu Akkumulation. Diese Tendenz ist deutlicher an der, dem Emskai zugewandten Seite.

7.2 LÄNGERFRISTIGE BETRACHTUNG

In der längerfristigen Betrachtung wird die längerfristige Wirkung des RZ2 auf die Entwicklung der Sohle dargestellt.

7.2.1 SOHLENTWICKLUNG

Betrachtet wird die Differenz der resultierenden Sohllagen im Referenz- und Ausgangszustand. *Abb. 7-17* in Anhang 7 zeigen die Differenz der Endtopographien von RZ2 und IST-Zustand. Positive Werte deuten eine flachere Topographie an, bzw. weniger Erosion oder mehr Akkumulation im Referenzzustand. Negative

Werte zeigen eine tiefere Topographie, bzw. mehr Erosion oder weniger Akkumulation im Referenzzustand. Die Wendestelle, die neue Liegewanne und die Zufahrt zum Einspülpoint sind als deutlich tiefer liegende Bereiche erkennbar. Tieferliegende Bereiche in der Fahrrinne und im Zufahrtsbereich zu den Anlegestellen resultieren ebenfalls aus den Tiefenvorgaben im RZ2. Berücksichtigt werden im Folgenden die Bereiche außerhalb dieser ausbaubedingten Veränderungen.

Die erosiven, bzw. akkumulationsmindernden Tendenzen im stromauf- und stromabwärtigen Nahbereich der Wendestelle sind in der längerfristigen Simulation leicht verstärkt. Die Unterschiede in der Endtopographie liegen hier überwiegend unter 1 m und etwa bei 1 m auf der westlichen Böschungsseite der Wendestelle. Ebenso wie in der mittelfristigen Simulation, verursachen die, durch die Querschnittserweiterung reduzierten Strömungen, vermehrter Akkumulation vor den Anlegestellen. Im den Ergebnissen des längerfristigen Modells sind die Akkumulationstendenzen vor Emskai und Emspier deutlicher ausgeprägt als im mittelfristigen Modell. Die Unterschiede liegen überwiegend unter 1 m, an der Emspier bei etwa 1 m.

Die akkumulativen Veränderungen im Bereich der Bühnenverlängerung sind ähnlich denen in der mittelfristigen Simulation, jedoch deutlicher ausgeprägt. Die Unterschiede in den Endtopographien liegen an den Bühnen 6 und 7 im Modell bei über 2 m. Die Erosionstendenzen am nördlichen Ufer sind nicht verstärkt, jedoch räumlich ausgedehnter.

Abb. 7-18 in Anhang 7 zeigt die längerfristige Veränderung der Sohllage im Bereich vor dem GSLP nach etwa 11 Monaten. Auch im längerfristigen Modell mit RZ2 kommt es im Bereich der GSLP-Liegewanne zu Akkumulation von Sediment. Diese Tendenz ist in der längerfristigen Simulation stärker ausgeprägt als in der mittelfristigen Simulation. Der, dem Emskai zugewandte Bereich ist stärker von Akkumulation betroffen als die, der Emspier zugewandte Seite.

7.3 UNTERSUCHUNG SEEGANGSVERHÄLTNISSE

Zur Beurteilung der Wirkung des GSLPs auf die Seegangsverhältnisse werden die signifikante Wellenhöhe (H_s) und die mittlere Wellenperiode (T) betrachtet.

Abb. 7-19 in Anhang 7 zeigt die resultierenden signifikanten Wellenhöhen für die gerechneten Szenarien im Bereich der Anlegestellen für den IST-Zustand und für den RZ2. Die Positionen von Emspier, GSLP und Emskai sind durch helle Linien hervorgehoben. Die höchsten signifikanten Wellenhöhen von ca. 1,2 m ergeben sich in allen Fällen im Szenario mit Winden aus westlicher Richtung, in dem die Wellen der Tiefenlinie des Ästuars folgen. Winde aus südlicher Richtung verursachen im Bereich der Anlegestellen, aufgrund der dämpfenden Wirkung des Geiseleitdamms, weniger hohe Wellen. Die in *Abb. 7-20* in Anhang 7 dargestellten mittleren Wellenperioden verhalten sich erwartungsgemäß analog zu den Wellenhöhen und liegen im Bereich der Anlegestellen bei etwa 2 s bis 3 s.

In *Abb. 7-21* und *Abb. 7-22* in Anhang 7 sind die Differenzen zwischen RZ2 und IST-Zustand für die signifikante Wellenhöhe und die mittlere Wellenperiode dargestellt. Im Bereich der Anlegestellen werden die signifikante Wellenhöhe und die mittlere Wellenperiode durch die Reflektion der Wellen an der neuen Spundwand des GSLPs leicht erhöht. Dieser Effekt ist am deutlichsten mit Winden aus Süd, da sich in diesem Szenario die ungünstigste Angriffsrichtung ergibt. Die vertiefte Topographie im Bereich der Wendestelle führt in den Szenarien mit Winden aus West, Südwest und Südost zu einer leichten Erhöhung

der signifikanten Wellenhöhen und mittleren Wellenperioden. Die Anhebung der signifikanten Wellenhöhe im RZ2 liegt unter 0,2 m. Die mittlere Wellenperiode wird um weniger als 0,2 s verändert.

7.4 UNTERSUCHUNG STURMFLUTKENNGRÖßEN

Betrachtet werden die Wirkung des RZ2 auf die Scheitelwasserhöhe und die Sturmflutlaufzeit in der untersuchten Sturmflut "Xaver". Abb. 7-23 in Anhang 7 oben gibt eine räumliche Übersicht über die die Wasserstände im Modellbereich zum Scheitelwasserstand in Emden für den IST- und den Referenzzustand. Die Lage der Wasserstände zum Scheitelwasserstand unterscheidet sich nur äußerst geringfügig. In der unteren Grafik zeigt Abb. 7-23 die Wasserstandsganglinie zum Scheitelwasserstand an der Emspier. Die Unterschiede liegen bei unter 0,03 m.

Die aus dem Modell ermittelte Sturmflutlaufzeit von Borkum bis Emden beträgt ca. 1,5 Stunden. Hierzu wurden die Zeitpunkte des Scheitelwasserstandes verglichen. Mit der gewählten zeitlichen Modellauflösung von einer Minute ergeben sich keine Unterschiede in der Sturmflutlaufzeit zwischen RZ2 und IST-Zustand.

7.5 ZUSAMMENFASSUNG RZ2

In dieser Modellstudie wurde die hydromorphologische Wirkung des geplanten Großschiffsliegeplatzes in Emden mit Emsvertiefung untersucht. Neben einem Modell mit Ausgangszustand (IST-Zustand) wurde ein Modell mit dem geplanten Großschiffsliegeplatz und Emsvertiefung simuliert. Diese, Als Referenzzustand 2 (RZ2) bezeichnete Variante, beinhaltet den neuen Großschiffsliegeplatz mit Spundwand und Liegewanne entsprechend Variante 4 vom 15.12.2015. Im RZ2 wurde eine Vertiefung der Außenems berücksichtigt, wie sie in Erläuterungsbericht des WSV beschrieben ist (WSV/WSA Emden, 2012a). Sie beinhaltet eine Vertiefung der Sohle um ca. 1 m im Bereich der Fahrrinne zwischen der Einfahrt zum Emden Hafen bis Ems-km 74,6 und eine auf -11,5 mNN vertiefte Wendestelle auf Höhe der Emspier. Zusätzlich ist eine Querschnittseinengung bei Ems-km 74 durch Verlängerung des Bühnenpaares 6/7 vorgesehen.

Für die Untersuchung verschiedener Parameter wurden unterschiedliche Perioden und Szenarien simuliert. Die Ergebnisse des Modells mit RZ2 wurden mit denen des Ausgangsmodells verglichen. Da kein Vergleichsmodell ohne GSLP und mit Emsvertiefung simuliert wurde (siehe Kapitel 4), war es möglich, die kombinierte Wirkung des GSLPs mit Emsvertiefung zu untersuchen, nicht jedoch die Einzelwirkung des GSLPs im RZ2. Zusammenfassend lassen sich im Modell folgende Änderungen durch den RZ2 beobachten:

- Die mittleren **Wasserstände** und der mittlere **Tidenhub** werden im RZ2 nur sehr leicht und insbesondere im Bereich der Querschnittsverengung verändert. Die Differenzen im mittleren Tideniedrigwasser und im Tidehub liegen maximal bei 0,01 m. Die Unterschiede im mittleren Tidehochwasser liegen unter 0,01 m. Im Bereich des GSLP sind die Unterschiede der Wasserstände und des Tidehubes ebenfalls kleiner als 0,01 m.
- Die tiefengemittelten **Strömungen** werden insbesondere im Bereich der Querschnittsverengung an den Bühnen beeinflusst. Stromab kommt es zu einer Anhebung der tiefengemittelten Ebbströmungen um bis zu 0,1 m/s (mittlere) bzw. 0,2 m/s (maximale). Stromauf werden die tiefengemittelten Flutströmungen um 0,1 m/s bis 0,2 m/s (mittlere) bzw. 0,2 m/s bis 0,3 m/s (maximale) angehoben. Im Bereich der Strömungsschatten der Bühnen kommt es zu einer Reduktion der Strömungsgeschwindigkeiten. Durch die Querschnittsaufweitung werden die mittleren und maximalen Strömungen im Bereich Wendestelle und der GSLP-Liegewanne um bis zu

0,2 m/s reduziert. Hinter den vertieften Bereichen kommt es jeweils in Strömungsrichtung zu einer Anhebung der Strömungsgeschwindigkeiten von überwiegend unter 0,1 m/s, lokal bis ca. 0,2 m/s.

- Die Wirkung des RZ2 auf die tiefengemittelte **Salinität** resultiert größtenteils aus den Veränderungen in Wasservolumen und Strömungsgeschwindigkeiten. Die mittleren tiefengemittelten Salzgehalte werden durch den RZ2 im Emder Fahrwasser um 0,6 psu an der seewärtigen Seite und 1,4 psu an der stromaufwärtigen Seite angehoben.
- Im RZ2 werden die mittleren tiefengemittelten **Schwebstoffkonzentrationen** überwiegend leicht verringert. Die Unterschiede der mittleren Werte liegen unter $0,05 \text{ kg/m}^3$. Die maximalen tiefengemittelten Schwebstoffkonzentrationen sind deutlich von den Veränderungen der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten beeinflusst und nehmen in der Wendestelle und im Bereich der Fahrrinne um bis zu $0,1 \text{ kg/m}^3$ zu. Vor den Anlegestellen werden die mittleren und maximalen Schwebstoffgehalte leicht reduziert ($< 0,05 \text{ kg/m}^3$). An der Querschnittsverengung werden die maximalen Suspensionsgehalte durch die Intensivierung der maximalen Strömungen, sowie durch die Energieverluste an den Buhnen beeinflusst. Die Konzentrationen werden in diesem Bereich in komplexer Weise sowohl erhöht als auch verringert. Die Unterschiede liegen zwischen $-0,4 \text{ kg/m}^3$ und $+0,2 \text{ kg/m}^3$.
- Die bestehenden **Sedimenttransportrichtungen** werden nicht signifikant verändert. Im Emder Fahrwasser kommt es im RZ2 durch die Verstärkung des Flutstromes an der Querschnittsverengung und in der Fahrrinne zu einer leichten Erhöhung des stromaufgerichteten Transportes.
- Die generellen Tendenzen in der **mittelfristigen Sohlentwicklung** sind im IST- und Referenzzustand ähnlich. Durch erhöhte Geschwindigkeiten kommt es im RZ2 relativ zum Ausgangszustand zu weniger Akkumulation bzw. mehr Erosion im stromauf- und stromabwärtigen Nahbereich der Wendestelle. Die, durch die Querschnittserweiterung reduzierten Strömungen vor Emspier und Dalbenliegeplatz, verursachen im Vergleich zum IST-Zustand vermehrte Akkumulation. Im Bereich der verlängerten Buhnen, insbesondere an der südlich gelegenen Buhne 7, kommt es zu verstärkter Akkumulation bzw. reduzierter Erosion. Am nördlichen Ufer kommt es im Bereich der Buhnenveränderung zu leichter Erosion. In der neuen Liegewanne des GSLP kommt es im RZ2 zu Akkumulation. Diese Tendenz ist deutlicher an der, dem Emskai zugewandten Seite
- Die Tendenzen der **längerfristigen Sohlentwicklung** sind denen der mittelfristigen Entwicklung ähnlich. An der Emspier kommt es zu vermehrter Akkumulation bzw. verringerter Erosion. Im Bereich der neuen Liegewanne kommt es in der längerfristigen Simulation zu vermehrter Akkumulation von Sediment. Der, dem Emskai zugewandte Bereich ist davon stärker betroffen als die, der Emspier zugewandte Seite.
- Die Ergebnisse der untersuchten Szenarien lassen auf eine geringe Wirkung von RZ2 auf die **Seegangsverhältnisse** (signifikante Wellenhöhe und mittlere Wellenperiode) schließen. Im ungünstigsten Fall wird die signifikante Wellenhöhe durch Reflektion an der Kaimauer des GSLP um ca. 0,2 m erhöht.
- Im gerechneten Sturmflutszenario konnten keine signifikanten Veränderungen der untersuchten **Sturmflutkenngrößen** Scheitelwasserhöhe und Sturmflutlaufzeit festgestellt werden.

8 BEWEISSICHERUNG

Die Beweissicherung sollte überprüfen, ob sich die tatsächlichen hydrodynamischen und morphologischen Effekte des geplanten Großschiffsliegeplatzes im Rahmen der Prognosen bewegen. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie mit RZ1 deuten darauf hin, dass die Auswirkungen des geplanten Großschiffsliegeplatzes auf Hydrodynamik, Salinität und Sedimenttransport gering und relativ lokal ausfallen werden. Die Schiffsbewegungen im Bereich der Anlegestellen erlauben keinen sinnvollen statistischen Vergleich von Messungen stark fluktuierender Parameter in der Wassersäule. Hauptsächlich sollte daher eine Beobachtung der morphologischen Veränderungen erfolgen. Die Modellergebnisse dieser Studie weisen darauf hin, dass sich der Effekt des Großschiffsliegeplatzes auf die morphologische Entwicklung der Sohle auf den Nahbereich der ausbaubedingten Veränderungen beschränkt. Es kann sowohl zu Auskolkungen in den Randbereichen der Liegewanne, sowie zu Sedimentation in der Liegewanne kommen. Aufgrund der Modellergebnisse kann angenommen werden, dass sich insbesondere die östliche Böschung der Liegewanne noch anpassen wird. An der gegenüberliegenden (Geisedamm) Böschung deuten die Modellergebnisse auf eine Sohlverflachung aufgrund erhöhter Akkumulation bzw. reduzierter Erosion hin.

Als Bewertungsgrundlage zur Beweissicherung könnten regelmäßige Aufnahmen der Gewässersohle, z.B. in Form der monatlichen Peilungen, zur Verkehrssicherung, dienen.

9 SCHLUSSBEMERKUNG

Die Modelluntersuchungen zeigen, dass der geplante Großschiffsliegeplatz in Emden überwiegend geringe und auf den betroffenen Flussabschnitt beschränkte Auswirkungen auf Hydrodynamik, Salinität und Sedimenttransport haben wird. Aus den gerechneten Modellszenarien sind zudem keine signifikanten Veränderungen von Seegangsverhältnissen sowie von Sturmflutkenngößen zu erkennen. Hinsichtlich der Deichsicherheit und Vorländer ist der GSLP daher als unbedenklich einzustufen. Der Haupteffekt des Großschiffsliegeplatzes auf die morphologische Entwicklung der Sohle beschränkt sich im Modell auf den Nahbereich des GSLPs. Längerfristig kommt es zu Akkumulation von Sediment in der Liegewanne. Die Modellergebnisse deuten darauf hin, dass der östliche Bereich der Liegewanne stärker von Sedimentation betroffen sein wird. Aus den Modellergebnissen kann angenommen werden, dass bestehende Akkumulationstendenzen in den benachbarten Liegeplätzen an Emspier und Emskai durch die veränderten Strömungsverhältnisse mit GSLP leicht reduziert werden. Zusätzlich zu den dargestellten Ergebnissen kann davon ausgegangen werden, dass die Sohlentwicklung im Bereich des GSLPs der generellen Sedimentdynamik im komplexen Zusammenwirken von Strömungen, Tidephase, Tidezyklus und Oberwasserabfluss unterliegt.

Die Wirkung des GSLPs in einer Situation mit Emsvertiefung konnte nicht direkt ermittelt werden, da kein Vergleichsmodell ohne GSLP und mit Emsvertiefung simuliert wurde (siehe Kapitel 4). Die Ergebnisse der Referenzzustände lassen jedoch darauf schließen, dass die Auswirkungen des GSLPs von den Wirkungen der relativ größeren Ausbaumaßnahmen in Verbindung mit der Emsvertiefung überlagert werden. Die Veränderungen der Kennwerte im Bereich der Anlegestellen im RZ2 unterscheiden sich zum Teil von denen im RZ1. Aus den vorliegenden Untersuchungen können, für einen Vergleich der Veränderungen im Bereich der Anlegestellen im RZ1 und RZ2, folgende Punkte festgestellt werden:

- Die Veränderungen der Wasserstände und des Tidehubes sind in beiden Referenzzuständen ähnlich gering.
- Die tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten werden durch die Ausbaumaßnahmen der Emsvertiefung im RZ2 stärker verändert.
- Die tiefengemittelten Salzgehalte werden im RZ1 kaum und im RZ2 im Wesentlichen durch die Ausbaumaßnahmen der Emsvertiefung verändert.
- Die Reduktion der Strömungsgeschwindigkeiten in der Querschnittserweiterung führt im RZ2 zu geringeren mittleren Schwebstoffkonzentrationen.
- Die lokale Reduktion der Strömungsgeschwindigkeiten bewirkt im RZ2 mittel- und längerfristig höhere Sedimentationsraten in der neuen Liegewanne des GSLPs und in den benachbarten Liegewannen der Emspier und des Emskais.
- Die Wirkung auf die simulierten Seegangsverhältnisse ist in beiden Referenzzuständen ähnlich gering.
- Eine signifikante Veränderung der Sturmflutkenngößen ist in beiden Referenzzuständen nicht zu erkennen.

Trotz erheblicher Verbesserungen der Modellierungstechniken und Rechengeschwindigkeiten in den letzten Jahren sei darauf hingewiesen, dass das Wissen um die Grundlagen zum Bewegungsverhalten kohäsiver Sedimente und bodennaher Flüssigschlicke diesen Fortschritten noch immer nachhinkt, Gegenstand aktueller Forschung ist und somit einen Unsicherheitsfaktor darstellt. Die ungenügende Modellierung der Flüssigschlickdynamik sowie der Einfluss der Unsicherheiten in Sedimentverteilung und

Untergrundbeschaffenheit erlauben daher keine absolut-quantitativen Aussagen. Die getroffenen Aussagen über die Wirkung der Maßnahme basieren auf der Auswertung relativer (relativ zum Ausgangsmodell) Modellergebnisse für die Bedingungen der simulierten Perioden.

DANKSAGUNG

Wir danken den Dienststellen Emden und Aurich des NLWKN, der Forschungsstelle Küste Norderney und dem Wasser- und Schifffahrtsamt Emden für die Bereitstellung der Messdaten und Informationen.

10 LITERATUR

- AufMod (2014): Dokumentation sedimentologischer Produkte des Funktionalen Bodenmodells des Projekts AufMod. BSH: 8.
- BAW (2012): Vertiefung der Außenems bis Emden. Gutachten zu den ausbaubedingten Änderungen von Hydrodynamik, Transport und Seegang. BAW-Nr. A3955 03 10144.
- Booij, N., Ris, R. & Holthuijsen, L. (1999): A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *Journal of Geophysical Research* 104 (C4): 7649–7666.
- COPERNICUS (2015): Atlantic-European North West Shelf - Ocean in-situ near real time observations. <http://marine.copernicus.eu/>, 23.06.2015
- Deltares (2014a): Delft3D-FLOW User Manual, Version: 3.15.34158, 28 May 2014. Deltares, Delft.
- Deltares (2014b): Delft3D-WAQ User Manual, Version: 4.99.34158, 28 May 2014. Deltares, Delft.
- Deltares (2016): <http://oss.deltares.nl/web/delft3d/manuals>, 15.01.2016.
- Niedersachsen Ports (2015a): Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG: Präsentation „Neubau eines Großschiffsliegeplatzes Variante 'Lückenschluss'“ vom 25.02.2015.
- NLWKN (2014): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch Weser- und Emsgebiet 2012
- Escobar, C. A. S. & Mayerle, R. (2006): Procedures for improving the prediction of equilibrium grain sizes, bed forms and roughness in tidally-dominated areas. 30th International Conference on Coastal Engineering ICCE, San Diego, California, USA.
- FTZ Westküste (2014a): Hydromorphologische Untersuchungen von Lösungsansätzen zur Verbesserung des ökologischen Zustandes der Unterems. FTZ , Büsum.
- FTZ Westküste (2014b): Morphodynamische Modellierung zur Einschätzung der Erfolgsaussichten einer Steuerung des Ems-Sperrwerks zur Reduzierung von Schwebstoffgehalt und Baggervolumen. FTZ , Büsum.
- Holthuijsen, L., Booij, N. & Herbers, T. (1989): A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents. *Coastal Engineering* 13: 23–54.
- LLUR (2014): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Küstengebiet der Nordsee 2013. Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein.
- Lesser, G., Roelvink, J.A., Van Kester, J.A.T.M., Stelling, G.S. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering* 51: 883-915.
- Partheniades, E. (1965): Erosion and Deposition of Cohesive Soils. *Journal of Hydraulics Division, ASCE* 91(HY 1): 105-139.
- Perels, P. A. J. & Karelse, M. (1982): A twodimensional laterally averaged model fo salt intrusion in estuaries. Tech. Report, Waterloopkundig Laboratorium, Delft Hydraulics Laboratory, 262.
- Ranasinghe, R., Swinkels, C., Luijendijk, A., Roelvink, D., Bosboom, J., Stive, M., Walstra, D.J. (2011). Morphodynamic upscaling with the MORFAC approach: Dependencies and sensitivities. *Coastal Engineering* 58: 806-811.
- Ris, R., Booij, N. & Holthuijsen, L. (1999): A third-generation wave model for coastal regions, Part II: Verification. *Journal of Geophysical Research* 104 (C4): 7649–7666.
- Roelvink, J.A. (2006). Coastal morphodynamic evolution techniques. *Coastal Engineering* 53: 277-287.
- Sellhorn Ingenieurgesellschaft (2015a): Los1 - Standortvarianten Einspülpunkt und Baggerkonzept, 02.10.2015 Rev.1

- Sellhorn Ingenieurgesellschaft (2015b): Los1 - Standortvarianten Einspülpunkt und Baggerkonzept, 12.12.2015 Rev.2
- Talke, S. A. & de Swart, H. E. (2006): Hydrodynamics and Morphology in the Ems/Dollard Estuary: Review of Models, Measurements, Scientific Literature, and the Effects of Changing Conditions. University of Utrecht, Institute for Marine and Atmospheric Research Utrecht (IMAU), Utrecht.
- WSV/WSA Emden (2012a): Planfeststellungsantrag Vertiefung der der Außenems bis Emden. Unterlage B: Erläuterungsbericht
- WSV/WSA Emden (2012b): Planfeststellungsantrag Vertiefung der der Außenems bis Emden. Unterlage C, Blatt 1: Übersichtslageplan vom 10.12.2012
- WSV/WSA Emden (2012c): Planfeststellungsantrag Vertiefung der der Außenems bis Emden. Unterlage C, Blatt 2: Wendestelle Querschnitt und Lageplan vom 10.12.2012
- WSV/WSA Emden (2012d): Planfeststellungsantrag Vertiefung der der Außenems bis Emden. Unterlage C, Blatt 3: Buhne 6/7 Querschnitt und Lageplan vom 10.12.2012
- WSV (2016): Gewässerkundliches Informationssystem, www.pegelonline.wsv.de, Version 4.3.6, 04.01.2016
- van Rijn, L. C. (1993): Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Aqua Publications, Amsterdam.
- Zanke, U. (1982): Grundlagen der Sedimentbewegung. Springer-Verlag, Berlin.

A2 DATENGRUNDLAGE

Tab. 2-1 Datengrundlage der verwendeten Daten. Modellaufbau und Validierung Gesamtmodell

Parameter	Beschreibung	Institution	Erhalten
Topographie im gesamten Modellgebiet	Zusammenstellung von Peil- und Laserscandaten (1x1 und 5x5m Auflösung) 2010	FSK Norderney / WSA Emden	Aug 2012
Topographie in Abschnitten der Fahrrinne	Verkehrssicherungspeilungen 2010	WSA Emden	Feb 2013
Wasserstand	2010. Pegelmessungen: Borkum Fischerbalje, Emshörn, Dukegat, Knock, Pogum, Terborg, Leerort, Weener, Papenburg, Rhede, Herbrum	WSA Emden	Aug 2012
Wasserstand	2010. Pegelmessungen: Emssperrwerk OP und UP, Gandersum, Wehr Herbrum OP und UP.	NLWKN Aurich	Aug 2012
Oberwasserabfluss	2010. Abgeschätzt an den Pegeln Versen (Ems) (Hergeleitet durch H-Q Beziehung)	NLWKN Aurich	Aug 2012
Strömungsgeschwindigkeit und -richtung	2010. Messstellen: Emden-B, Ditzum-A, Terborg, Leerort-B, Grotegaste-A, Weener-A, Weener-B, Mark-A.	NLWKN Aurich / WSA Emden	Aug 2012
Salzgehalt	2010. Messstellen: Knock, Emspier, Pogum, Gandersum, Terborg, Leerort, Weener, Papenburg, Herbrum. Abgeleitet von Leitfähigkeit (mS/cm).	NLWKN Aurich / WSA Emden	Aug 2012
Schwebstoffkonzentration	2010. Messstellen: Knock, Gandersum, Terborg, Leerort, Weener, Papenburg	NLWKN Aurich/WSA Emden	Aug 2012
Baggermengen	Baggermengen 2010	NLWKN Aurich / WSA Emden	Aug 2012
Sedimentzusammensetzung	Kornverteilung der Oberflächensedimente aus der Datenbank des AufMod Projektes	BSH ftp://ftp.bsh.de/outgoing/AufMod-Data/CSV_XYZ_files/	Nov 2013

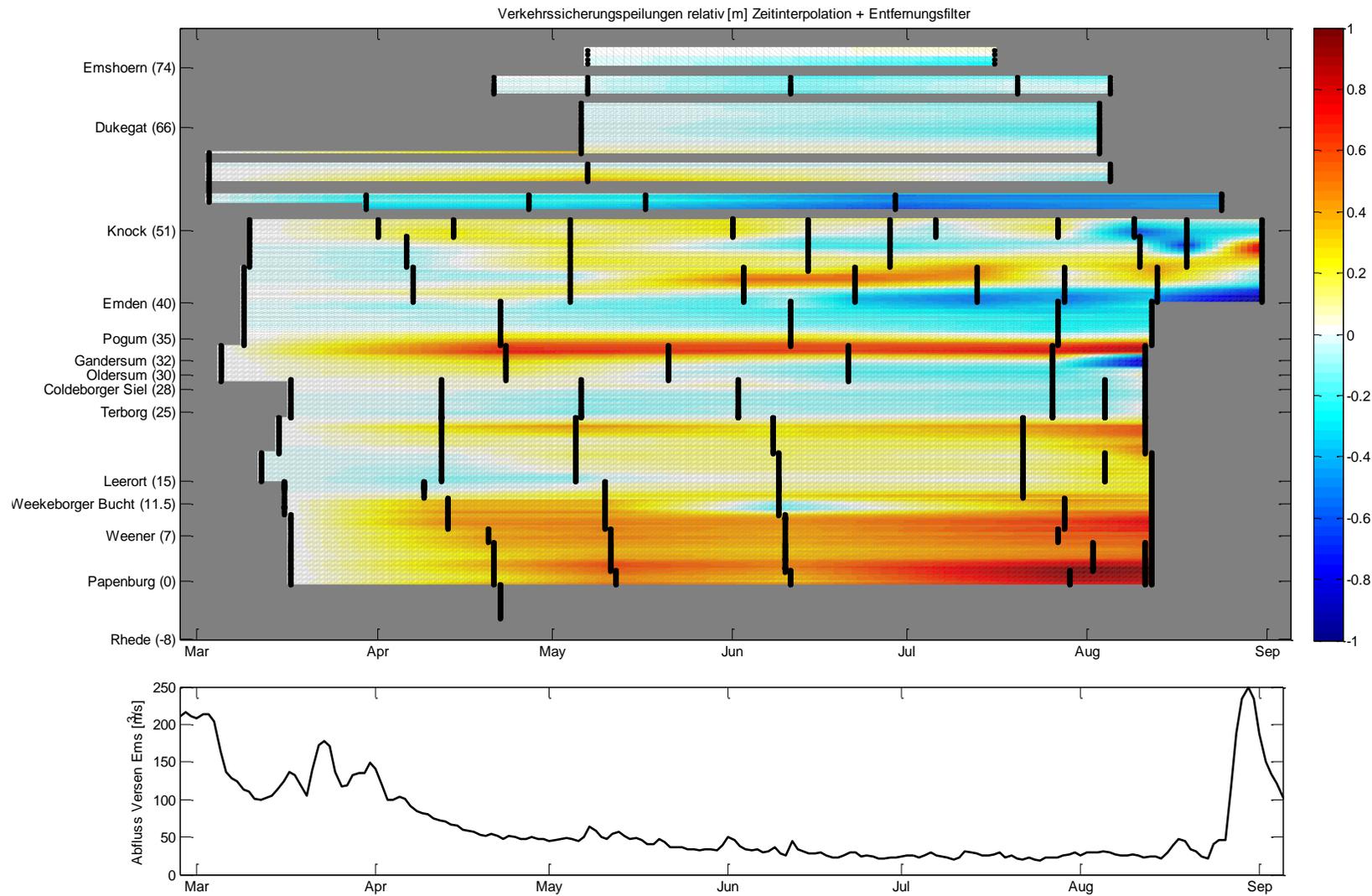


Abb. 2-1 Sohlentwicklung (m) in der Fahrrinne zwischen Emshörn und Papenburg. Räumlich-, zeitliche Interpolation der Verkehrssicherungspeilungen (schwarze Punktreihen)

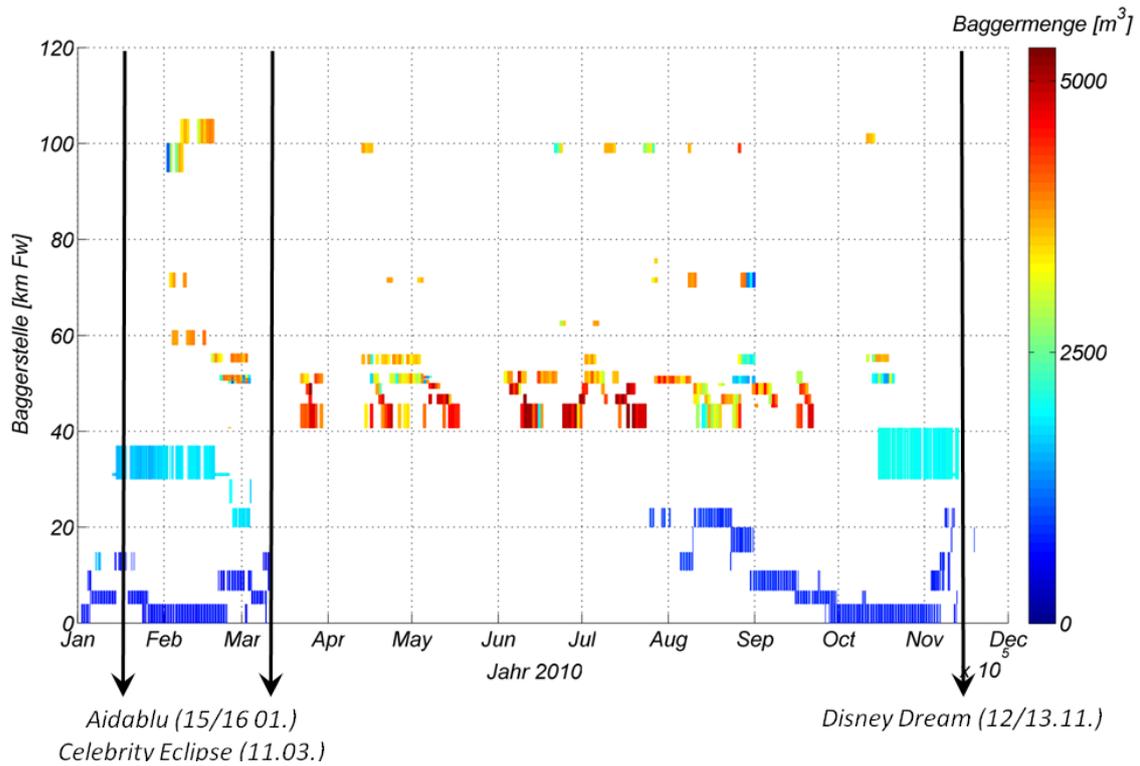


Abb. 2-2 Baggermengen entlang der Ems 2010 (mit Schiffsüberführungen)

Tab. 2-2 Datengrundlage der verwendeten Daten

Parameter	Beschreibung	Institution	Erhalten
Referenzzustände RZ1 und RZ2	Lage und Dimensionen von Liegewanne und Einspülpunkt, Vorzugsvariante GSLP	Sellhorn Ingenieurgesellschaft	Okt 2015
	Informationen zur Emsvertiefung	WSV/WSA Emden	Sep 2015
Wasserstand	2013 Pegelmessung Borkum während des Sturms Xaver (2013)	Copernicus Marine Environment Monitoring Service http://marine.copernicus.eu/	Jun 2015
Schließplan Sperrwerk Gandersum	Schließplan des Sperrwerks während des Sturms Xaver (2013)	NLWKN Aurich	Okt 2015
Wind	Windfeld während des Sturms Xaver (2013). Regionalmodell COSMO-EU	DWD https://www.dwd.de/DE/forschung/wettervorhersage/num_modellierung/01_num_vorhersagemodelle/regionalmodell_cosmo_eu.html	Sep 2015

A3 VERWENDETES MODELL

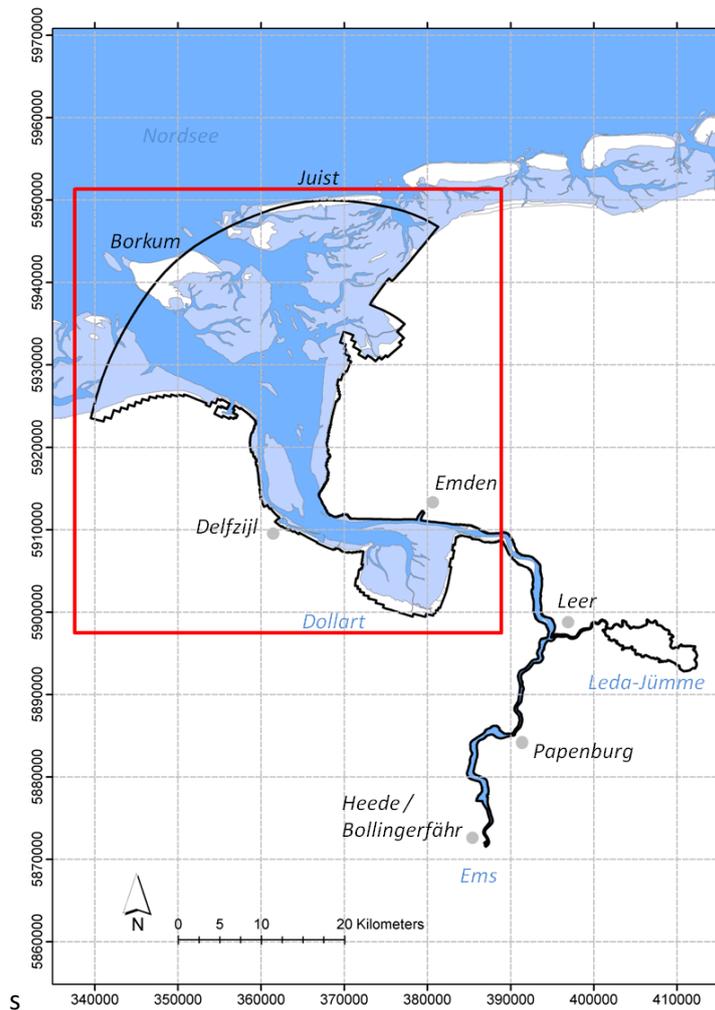


Abb. 3-1 Emsmodell und Modellgebiet des verwendeten Modells (roter Rahmen)

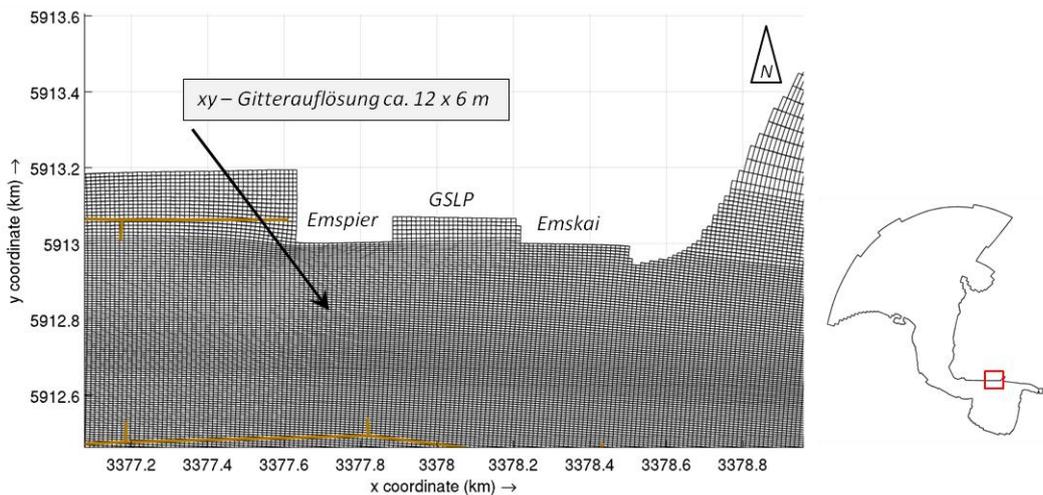


Abb. 3-2 Angepasstes Modellgitter im Bereich der Anlegestellen Emspier / GSLP / Emskai

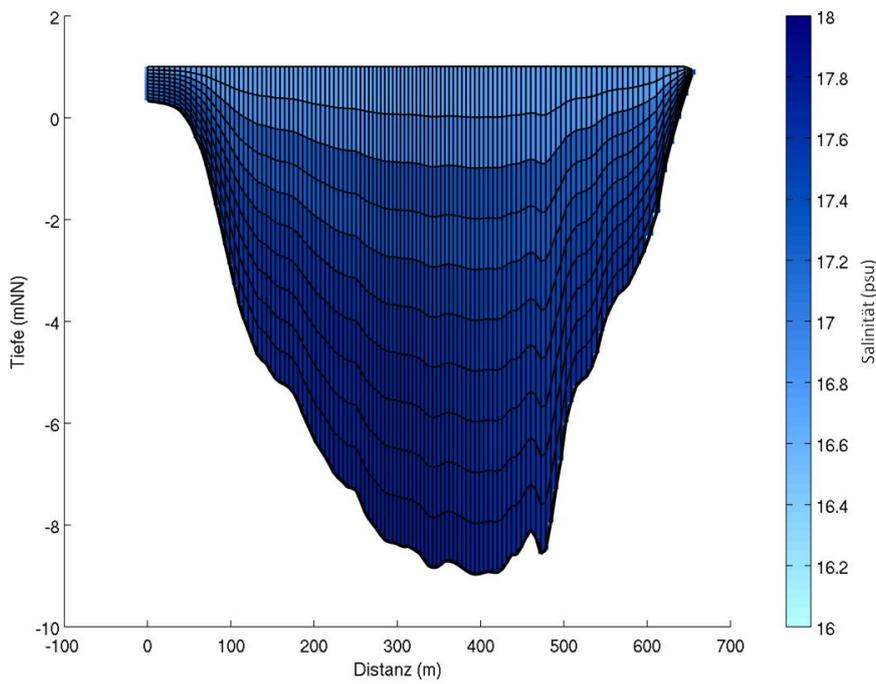


Abb. 3-3 Vertikaler Schnitt durch das Gitter in der Ems bei Emden

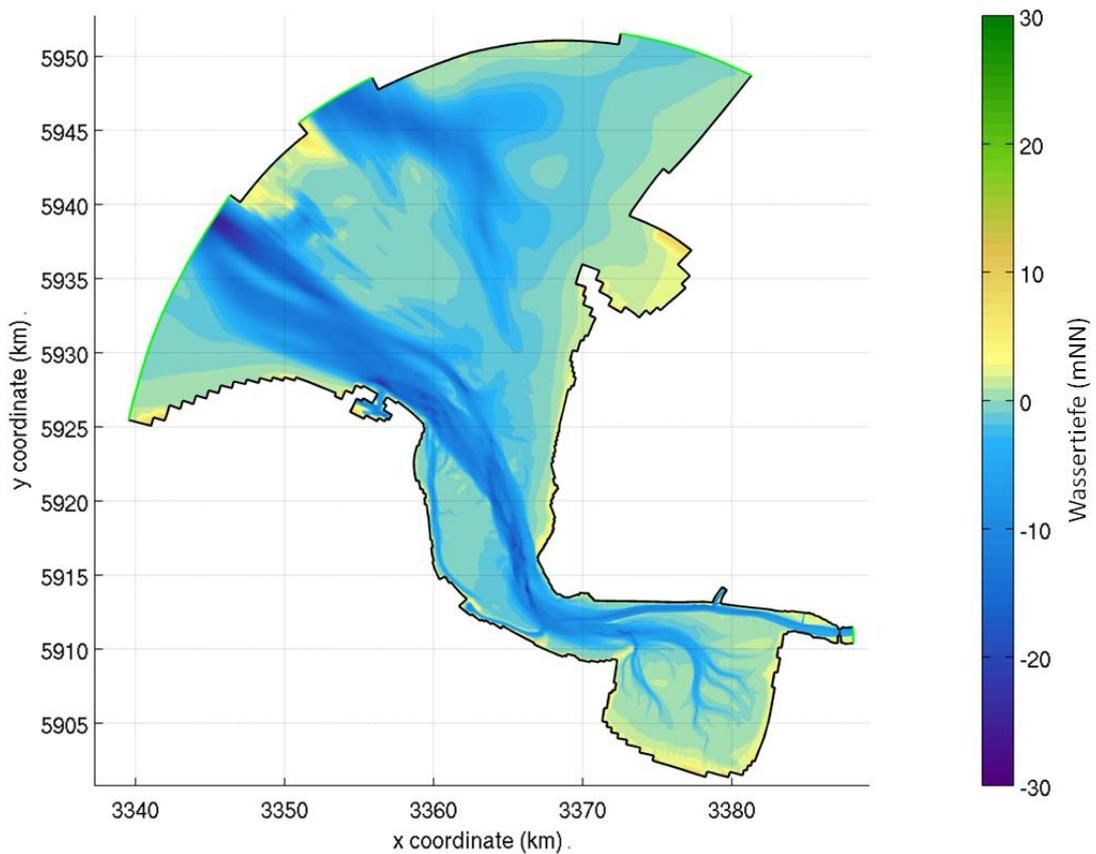


Abb. 3-4 Modelltopographie (IST-Zustand)

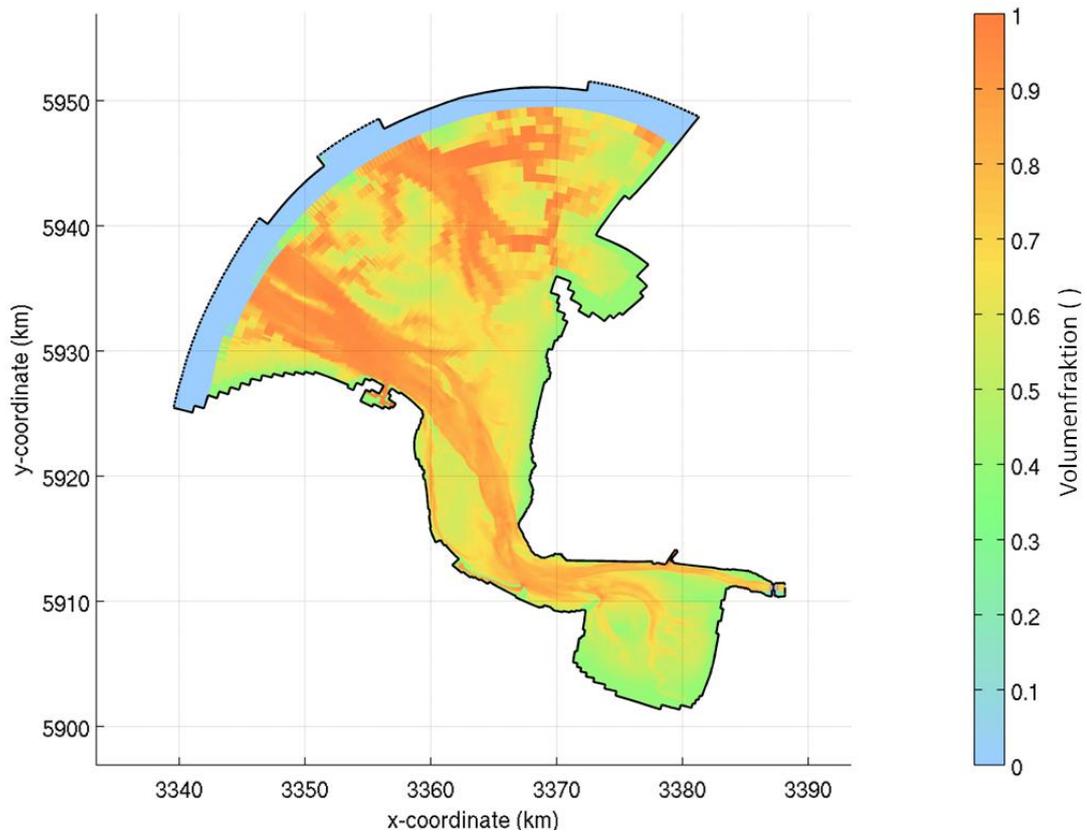


Abb. 3-5 Volumenanteil der Fraktion kleiner 63µm (Schlick)

A4 UNTERSUCHTE FÄLLE

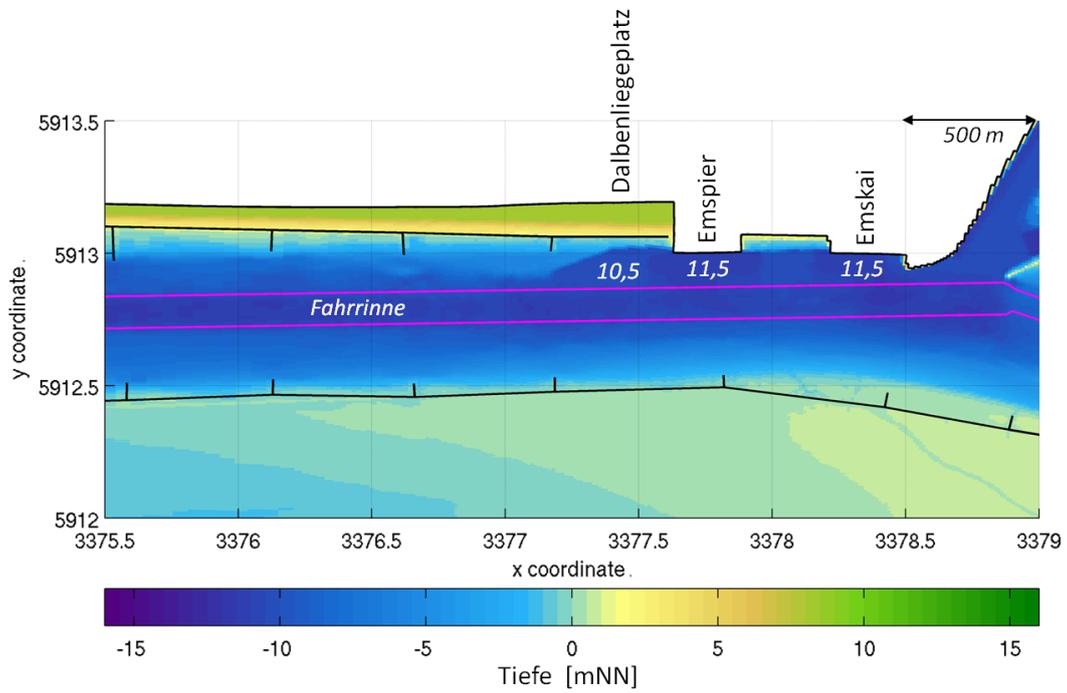


Abb. 4-1 Modelltopographie im Bereich Emspier und Emskai im Ausgangszustand (IST)

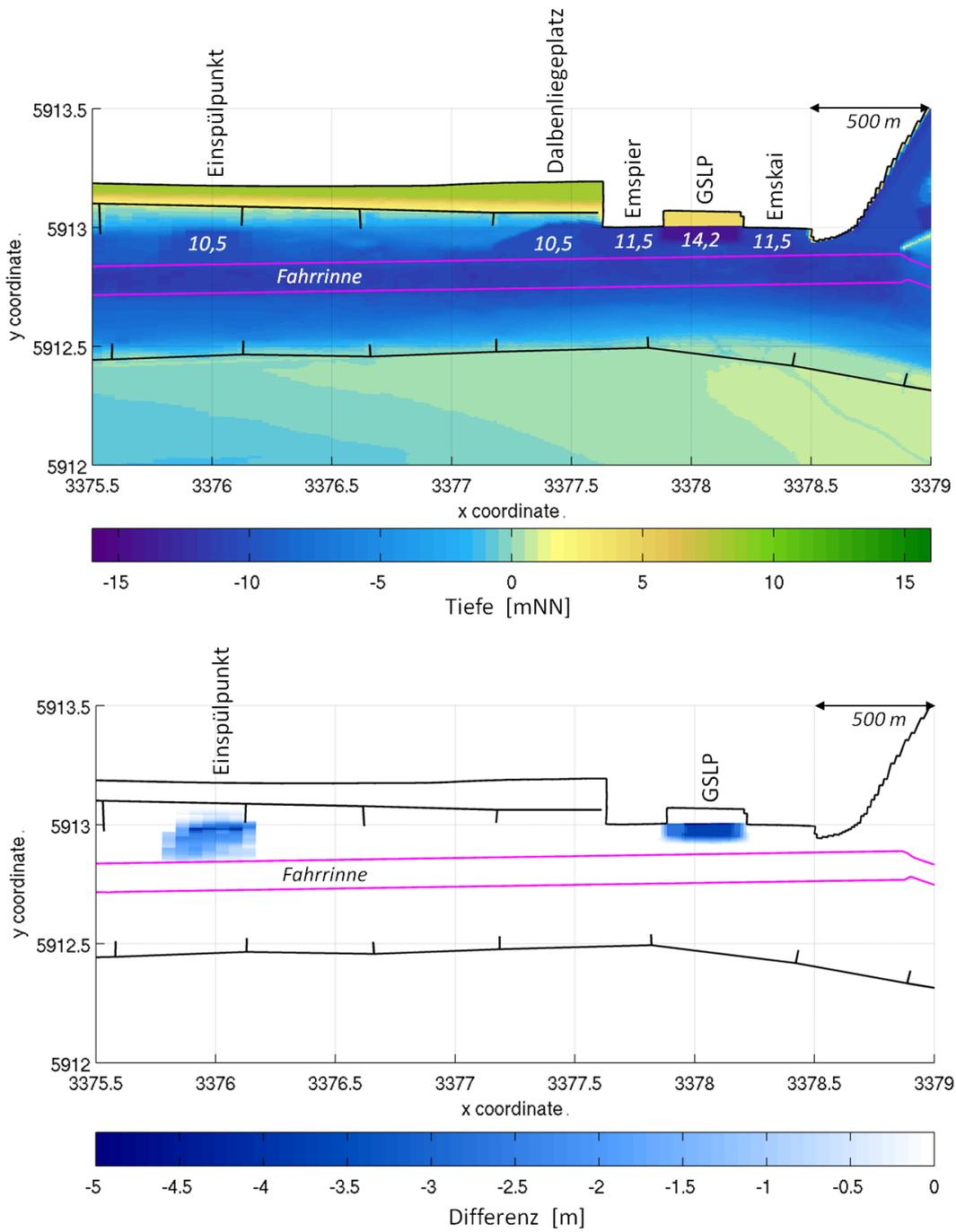


Abb. 4-2 Oben: Modelltopographie im Bereich Emspier und Emskai im Referenzzustand 1 (RZ1), Unten: Differenz der Modelltopographie RZ1-IST



Abb. 4-3 Übersichtslageplan zur Vertiefung der Außenems (WSV/WSA Emden 2012b)

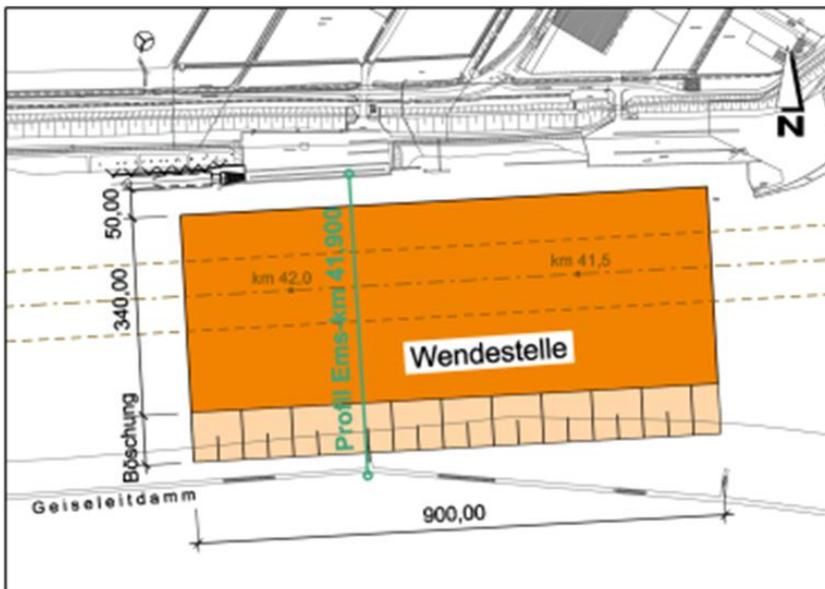


Abb. 4-4 Lageplan der Wendestelle (WSV/WSA Emden 2012c)

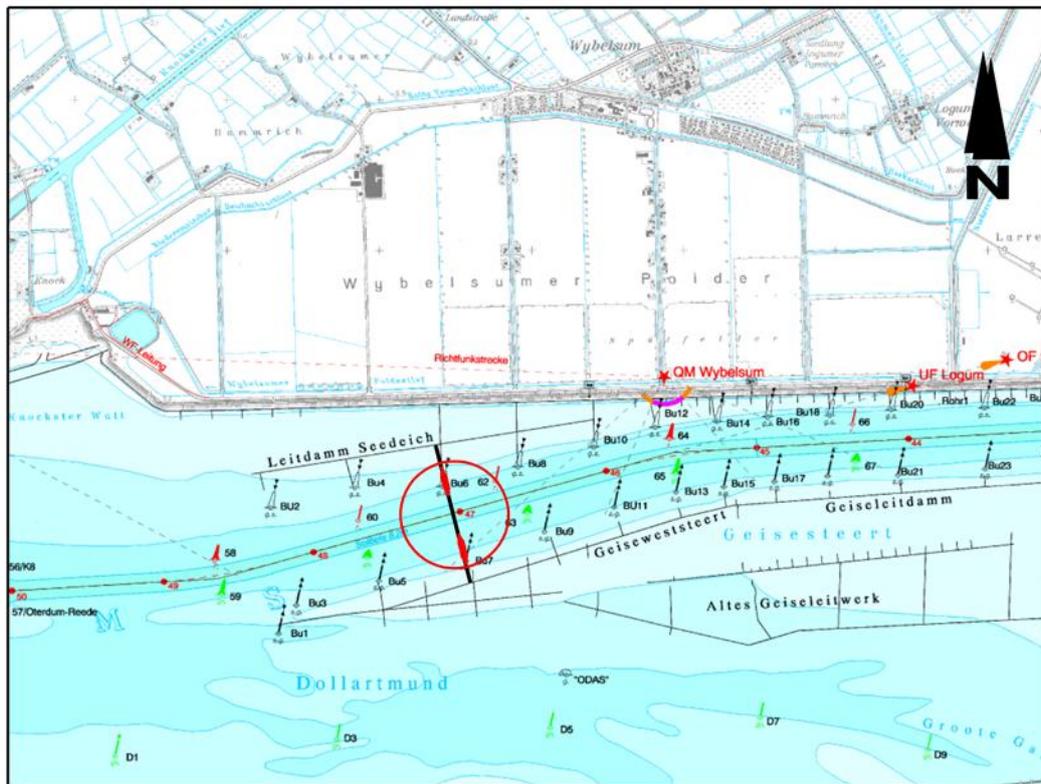


Abb. 4-5 Lageplan der Buhnenanpassung (WSV/WSA Emden 2012d)

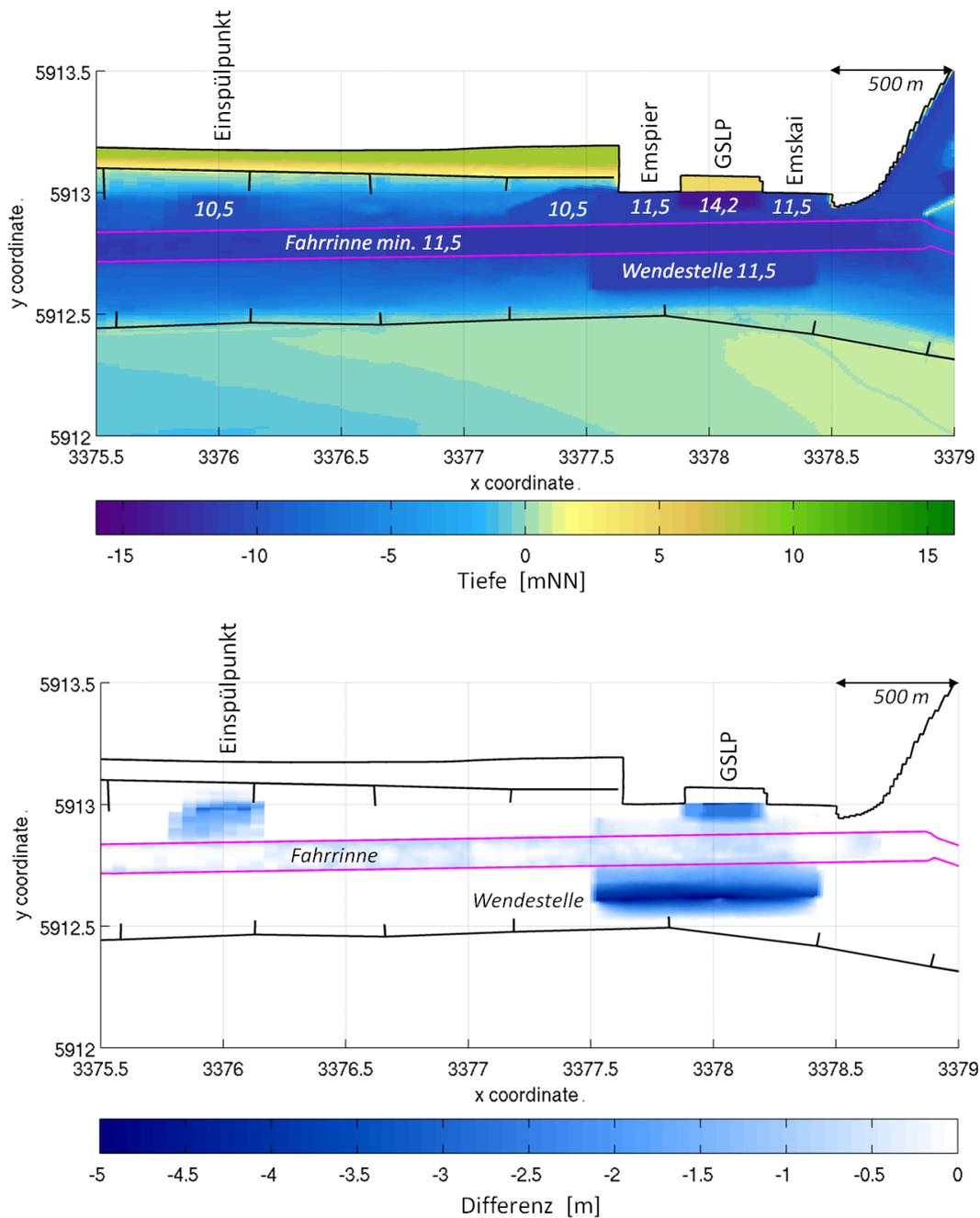


Abb. 4-6 *Oben: Modelltopographie im Emder Fahrwasser im Referenzzustand 2 (RZ2) und Lage der Bühnenanpassung, Unten: Differenz der Modelltopographie RZ2-IST*

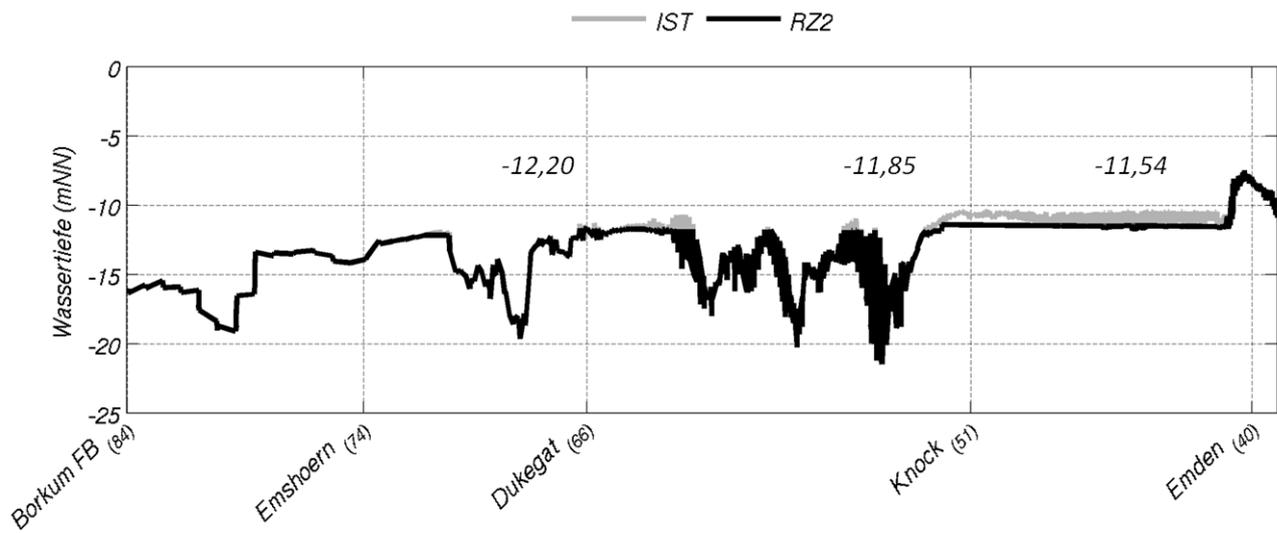


Abb. 4-7 Tiefenverhältnisse der Fahrrinnensohle im IST-Zustand und RZ2 im Modell

A5 UNTERSUCHTE ZEITRÄUME UND SZENARIEN

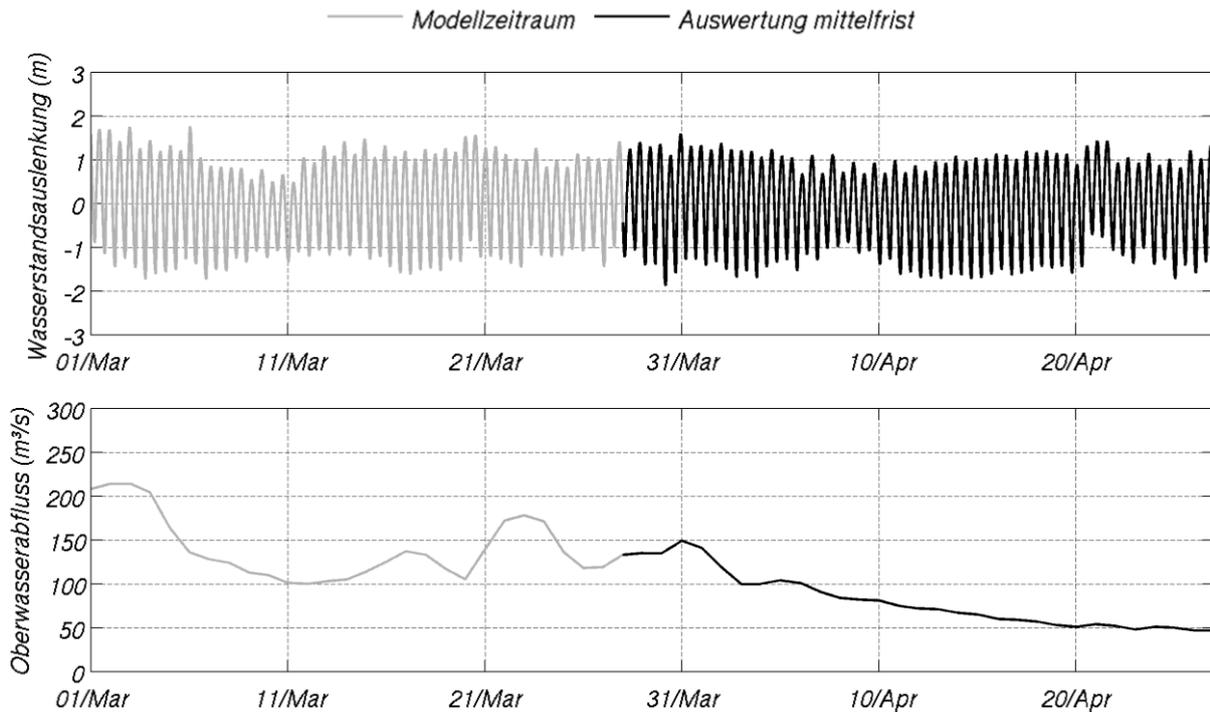


Abb. 5-1 Wasserstandsganglinie am Pegel Borkum und Oberwasserabfluss der Ems in Versen im Modellzeitraum mit mittelfristigen Auswertungszeitraum

Tab. 5-1 Tidekennwerte und Ems-Oberwasserabfluss für den mittelfristigen Zeitraum

Kennwert	Mittel Auswertungszeitraum (Modellzeitraum)	Langfristiges Mittel	Quelle Langfristiges Mittel
mThw Borkum Fischerbalje (mNN)	+1.11 (+1.11)	+1.15	Pegelonline (WSV, 2016)
mTnw Borkum Fischerbalje (mNN)	-1.40 (-1.35)	-1.23	Pegelonline (WSV, 2016)
Oberwasserabfluss Versen (m³/s)	81 (101)	80	DGJ 2012 (NLWKN, 2014)

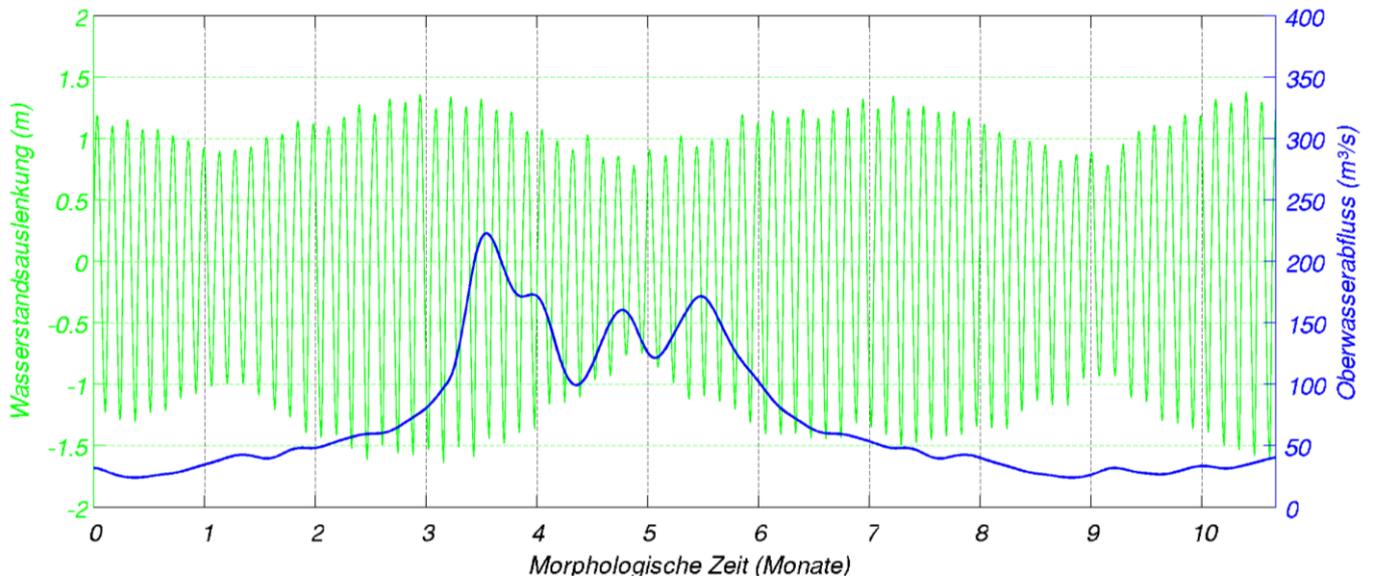


Abb. 5-2 Wasserstände und Oberwasserabfluss im längerfristigen Modell mit MorFac 8 (Auswertungszeitraum)

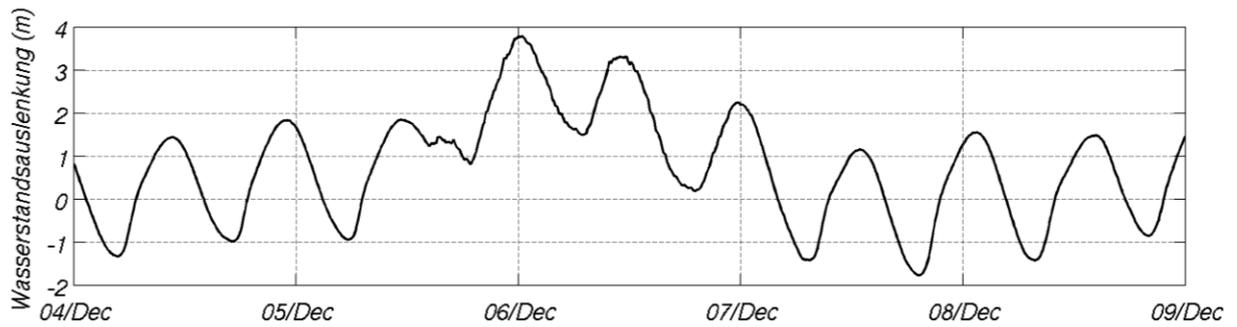


Abb. 5-3 Wasserstandsganglinie am Pegel Borkum während der Sturmflut "Xaver" am 5. und 6. Dezember 2013 (COPERNICUS, 2015)

Tab. 5-2 Schließplan des Ems-Sperrwerks bei Gandersum während Xaver 2013 (NLWKN Aurich, mündl. Mitteilung am 22.10.2015)

Datum	Uhrzeit	Aktion
05.12.2013	23:50	Schließbeginn
06.12.2013	00:01	SPW geschlossen
06.12.2013	05:46	Öffnungsbeginn
06.12.2013	06:26	SPW offen und verriegelt
06.12.2013	11:18	Schließbeginn
06.12.2013	11:30	SPW geschlossen
06.12.2013	15:46	Öffnungsbeginn
06.12.2013	16:26	SPW offen und verriegelt

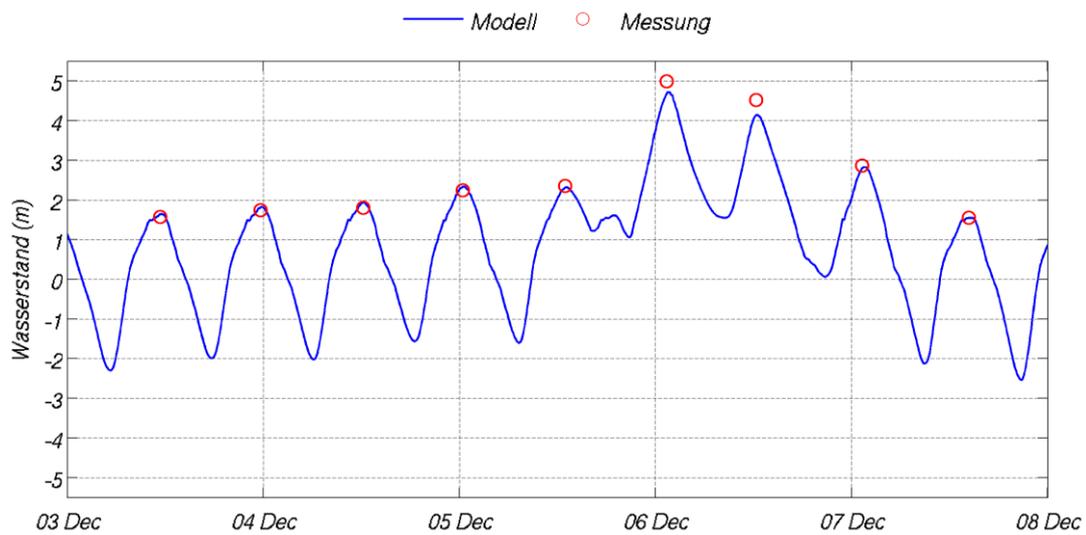


Abb. 5-4 Vergleich Wasserstände Modell und Messung (LLUR 2014) am Messpunkt Emden Neue Seeschleuse

A6 WIRKUNG REFERENZZUSTAND 1 - GSLP

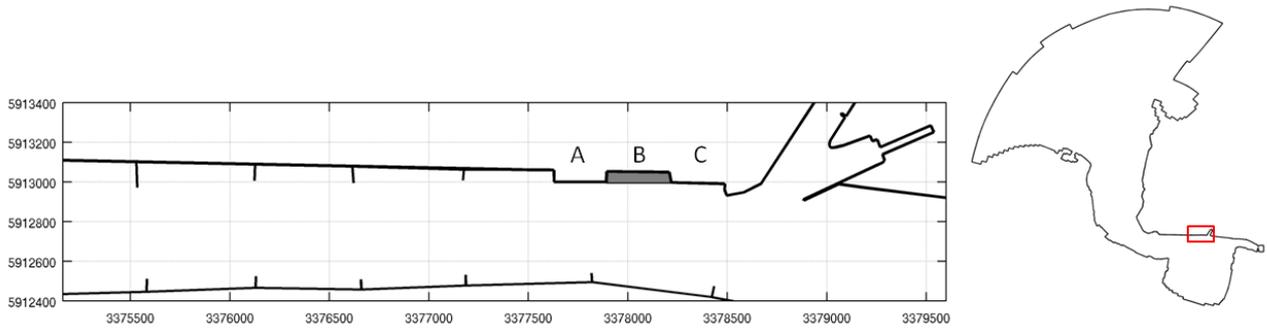


Abb. 6-1 Kartenausschnitt Flächenvergleich. A = Emspier, B = GSLP, C = Emskai

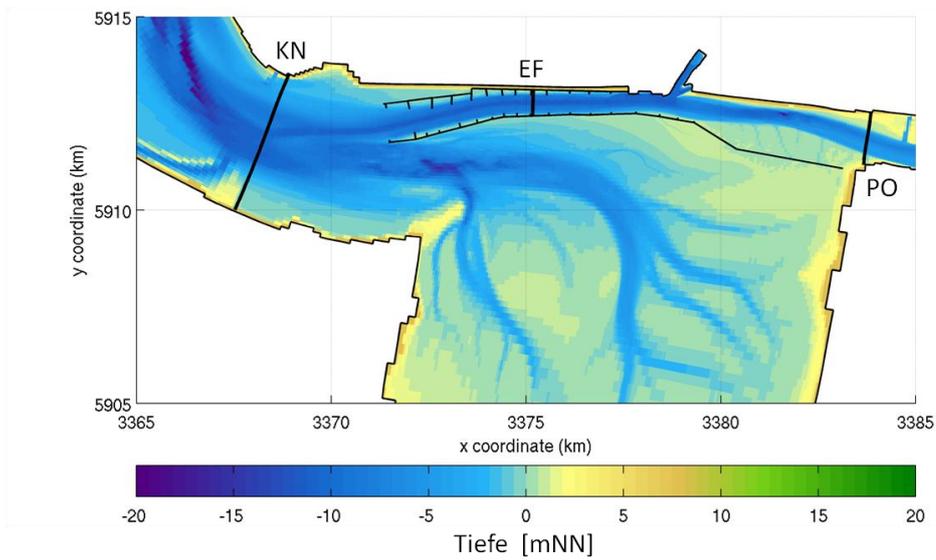


Abb. 6-2 Lage der Querschnitte. KN = Knock, EF = Emders Fahrwasser, PO = Pogum

A6.1 MITTELFRISTIGE BETRACHTUNG

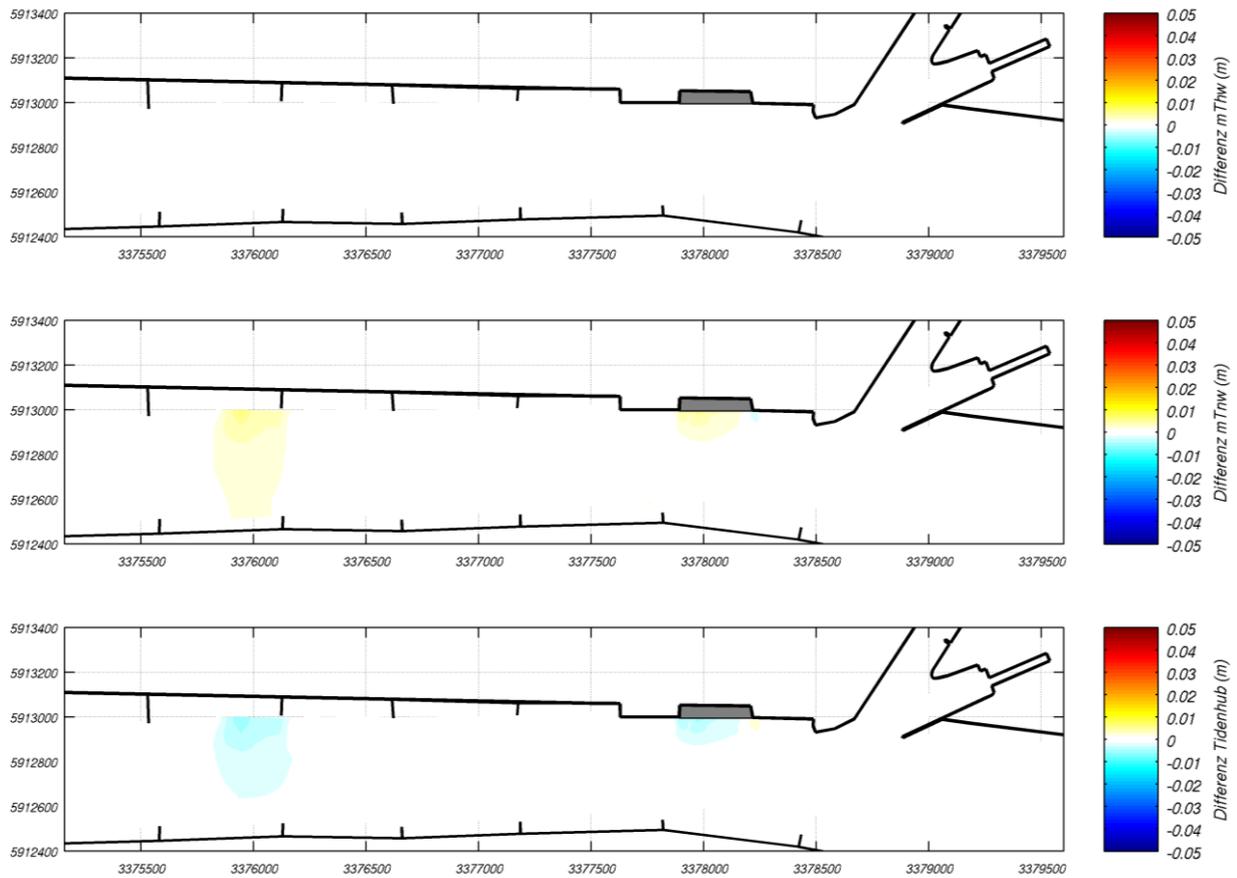


Abb. 6-3 Differenz der mittleren Tidehoch- und -niedrigwasser und des mittleren Tidehubes

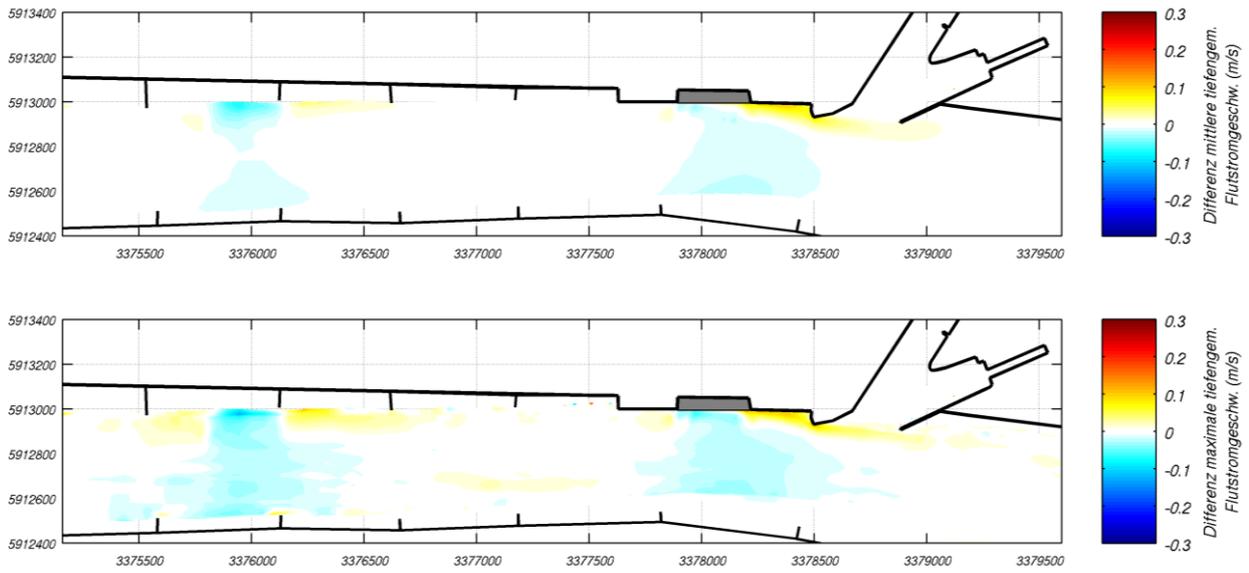


Abb. 6-4 Differenz der mittleren und maximalen tiefengemittelten Flutstromgeschwindigkeiten

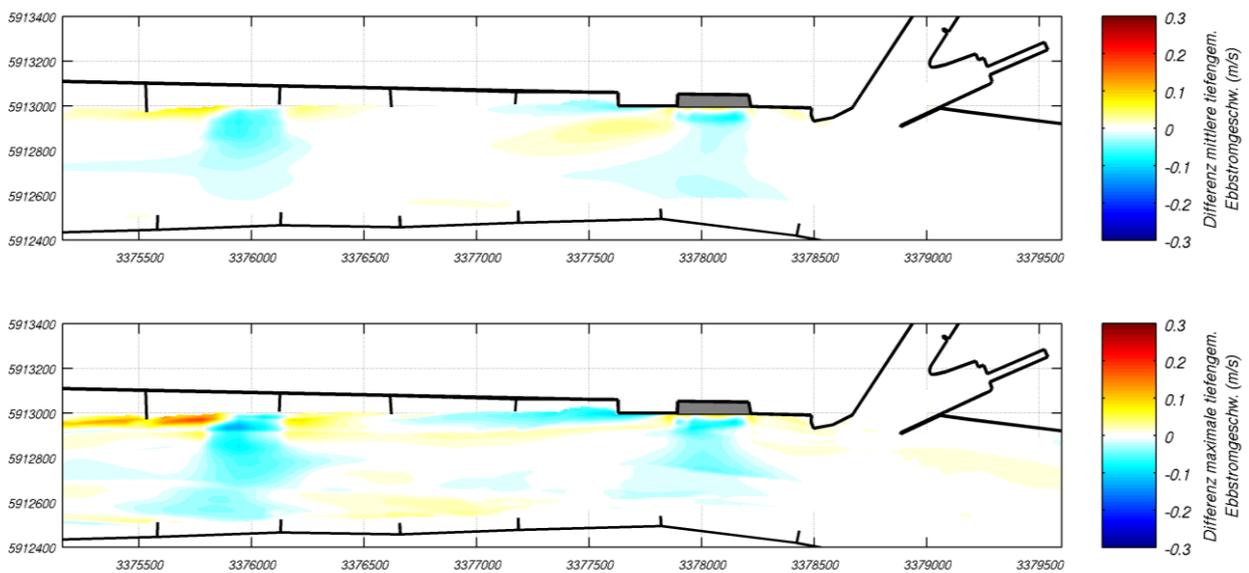


Abb. 6-5 Differenz der mittleren und maximalen tiefengemittelten Ebbstromgeschwindigkeiten

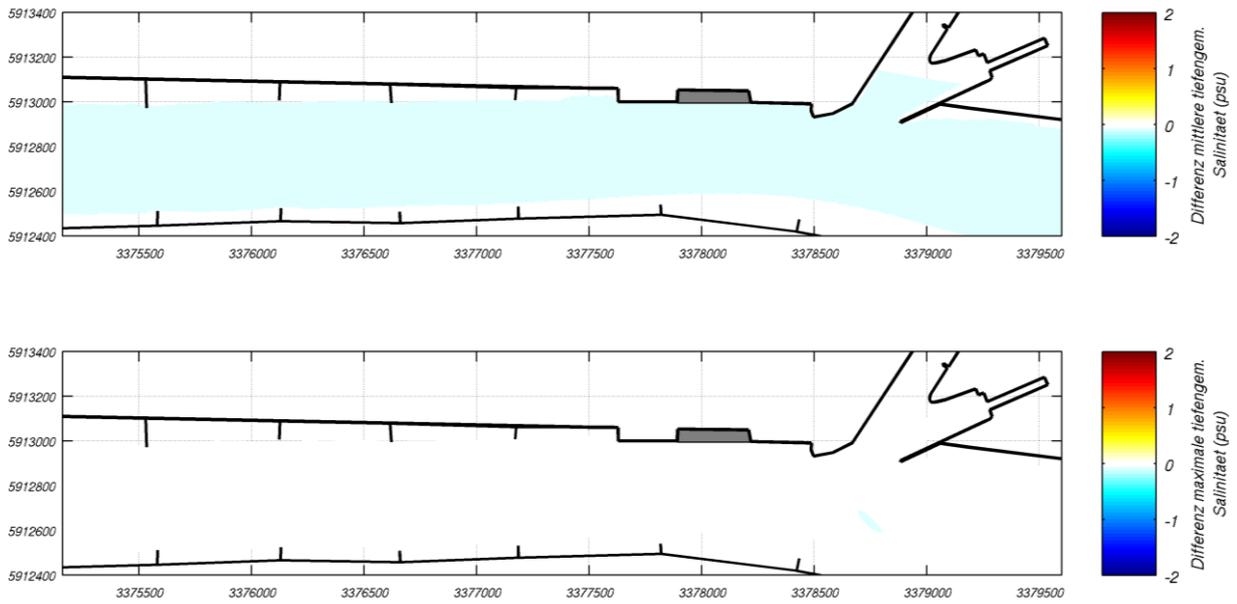


Abb. 6-6 Differenz der mittleren und maximalen tiefengemittelten Salinität

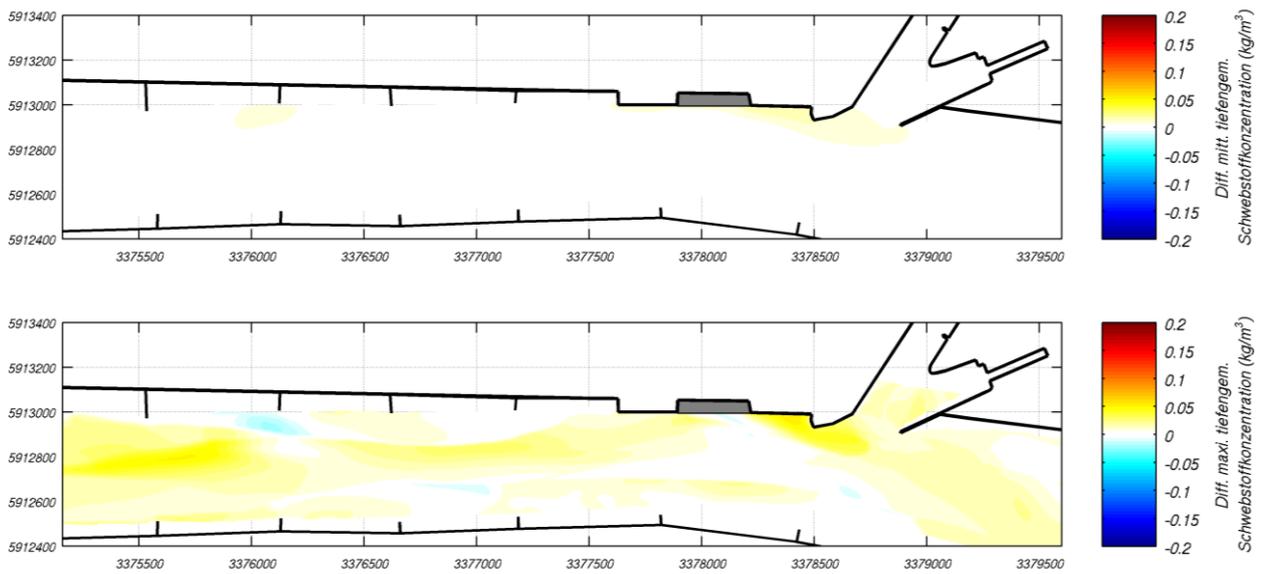
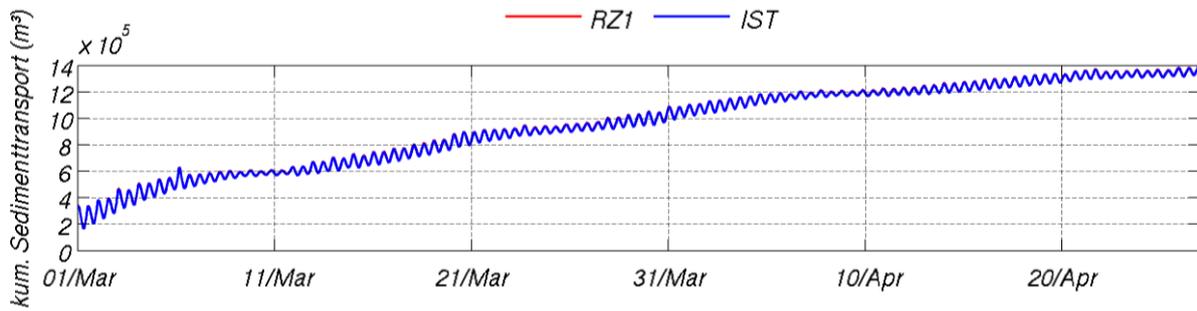
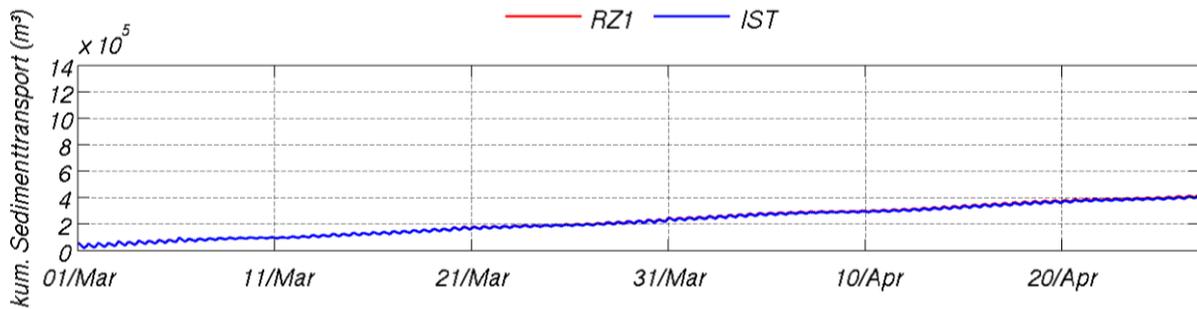


Abb. 6-7 Differenz der mittleren und maximalen tiefengemittelten Schwebstoffkonzentrationen

KN



EF



PO

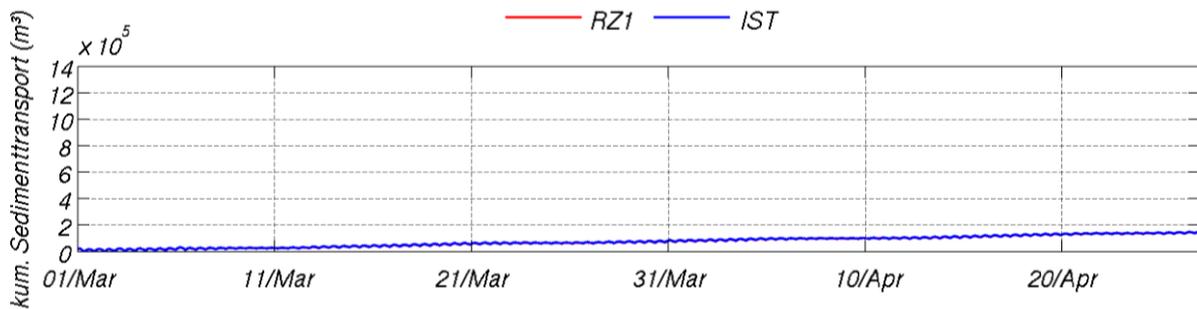


Abb. 6-8 Kumulativer Sedimenttransport an den Querschnitten Knock (KN), Emders Fahrwasser (EF) und Pogum (PO)

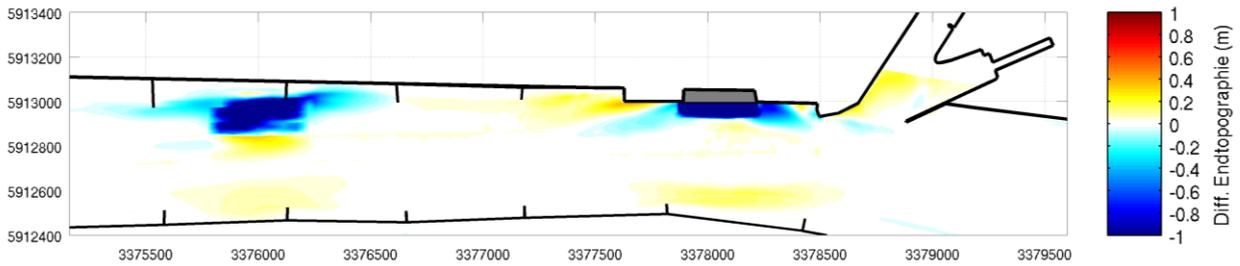


Abb. 6-9 Differenz der Endtopographie RZ1-IST

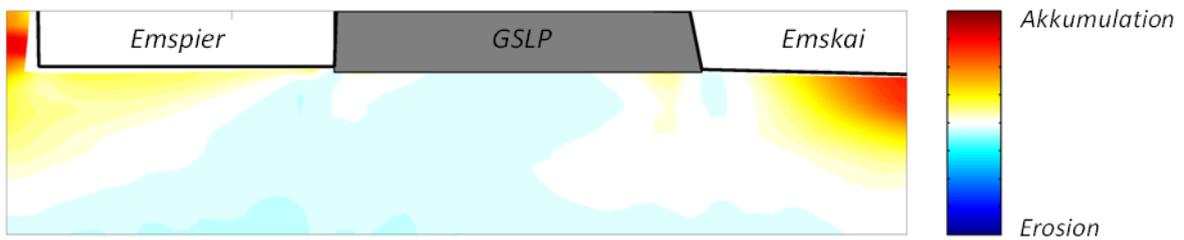


Abb. 6-10 Mittelfristige Veränderung der Sohlage im Bereich der GSLP-Liegewanne im RZ1 nach 2 Monaten (26.02. - 27.04.2010)

A6.2 LÄNGERFRISTIGE BETRACHTUNG

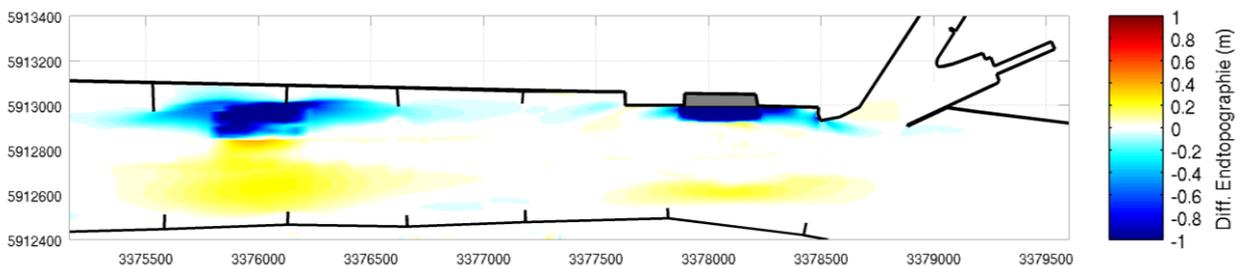


Abb. 6-11 Differenz der Endtopographie längerfristig RZ1-IST

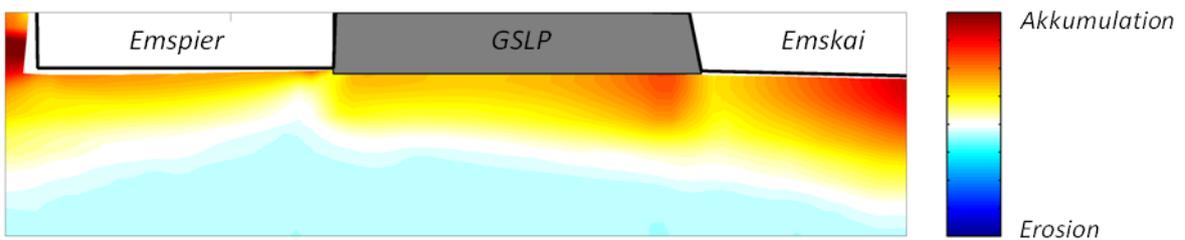


Abb. 6-12 Längerfristige Veränderung der Sohlage im Bereich der Liegewanne im RZ1 nach ca. 11 Monaten

A6.3 UNTERSUCHUNG SEEGANGSVERHÄLTNISSE

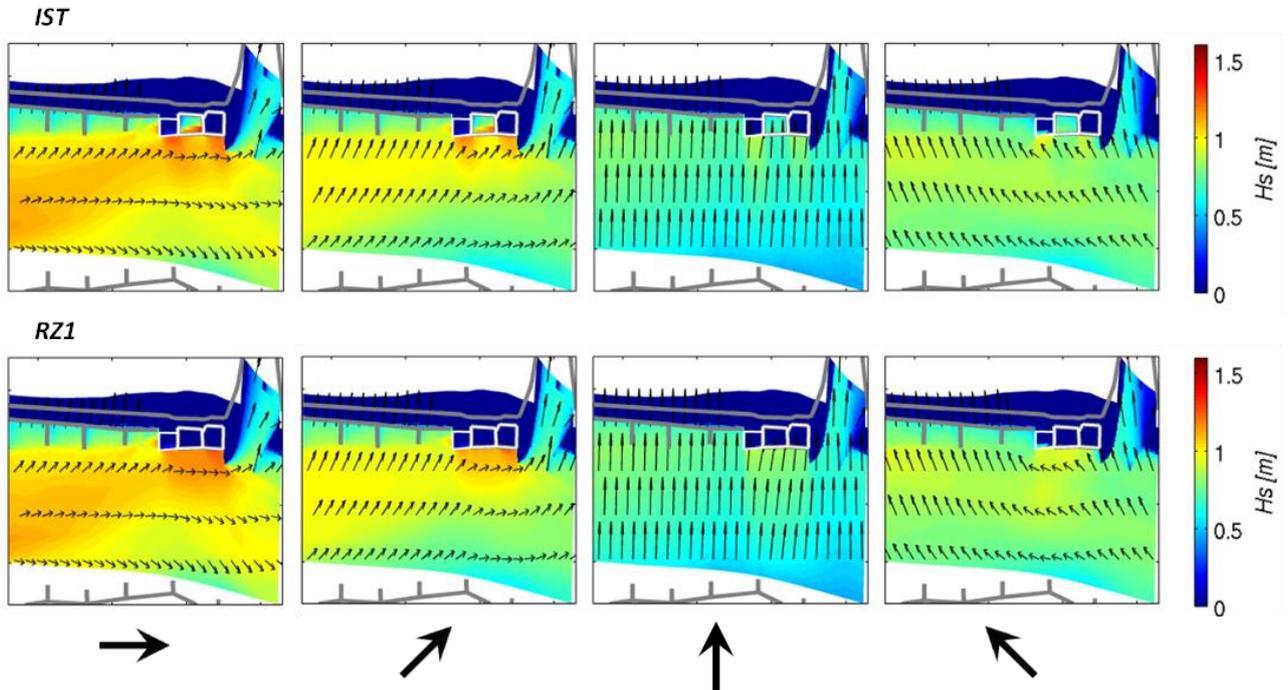


Abb. 6-13 Signifikante Wellenhöhen (H_s) und Wellenrichtung in Szenarien mit Wind aus verschiedenen Richtungen (Pfeile)

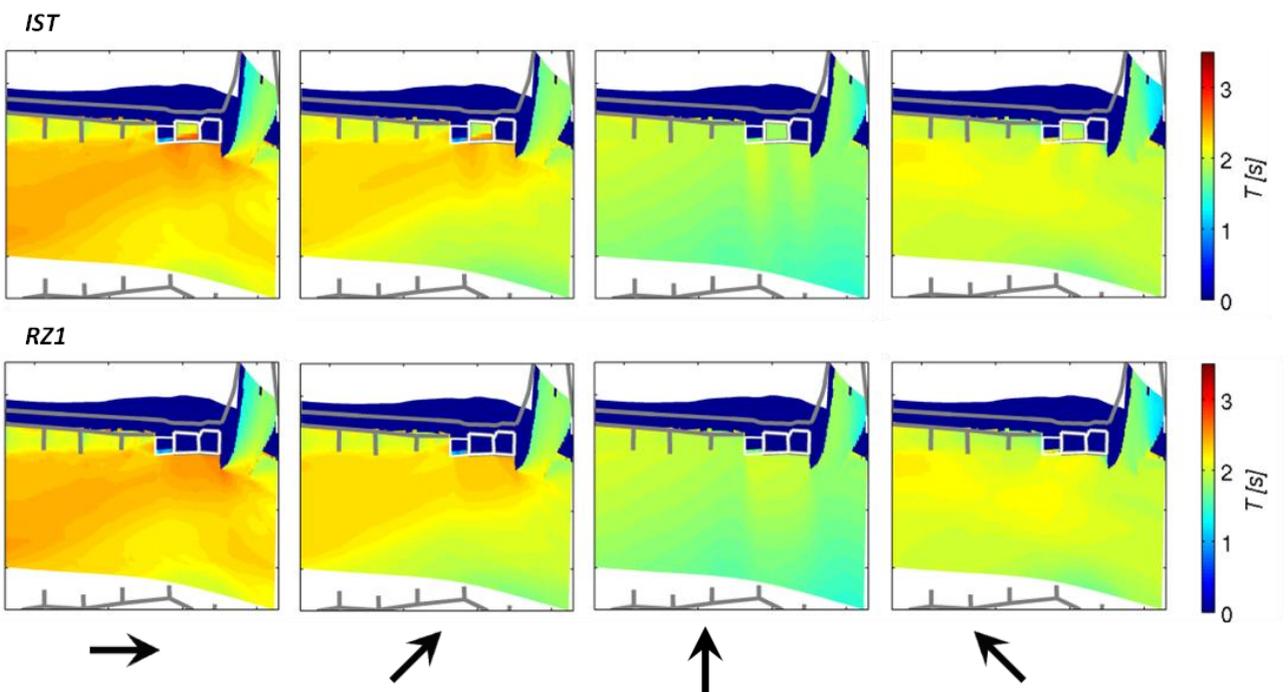


Abb. 6-14 Mittlere Wellenperiode (T) in Szenarien mit verschiedenen Windrichtungen (Pfeile)

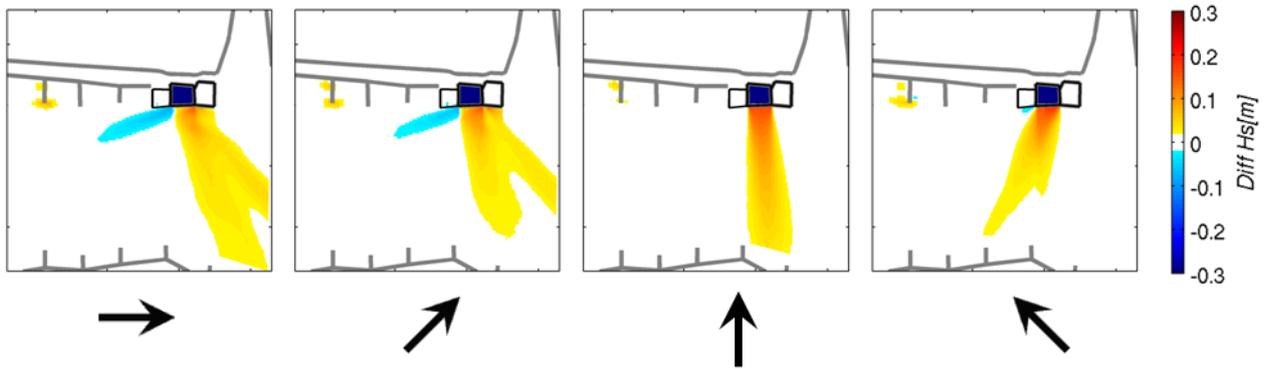


Abb. 6-15 Differenz der signifikanten Wellenhöhen (H_s) in Szenarien mit verschiedenen Windrichtungen (Pfeile)

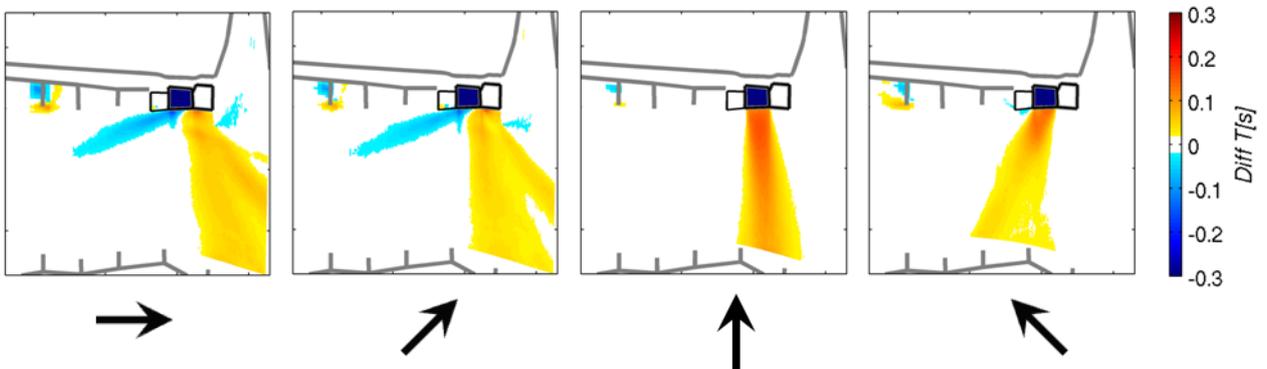


Abb. 6-16 Differenz der mittleren Wellenperioden (T) in Szenarien mit verschiedenen Windrichtungen (Pfeile)

A6.4 UNTERSUCHUNG STURMFLUTKENNGRÖßEN

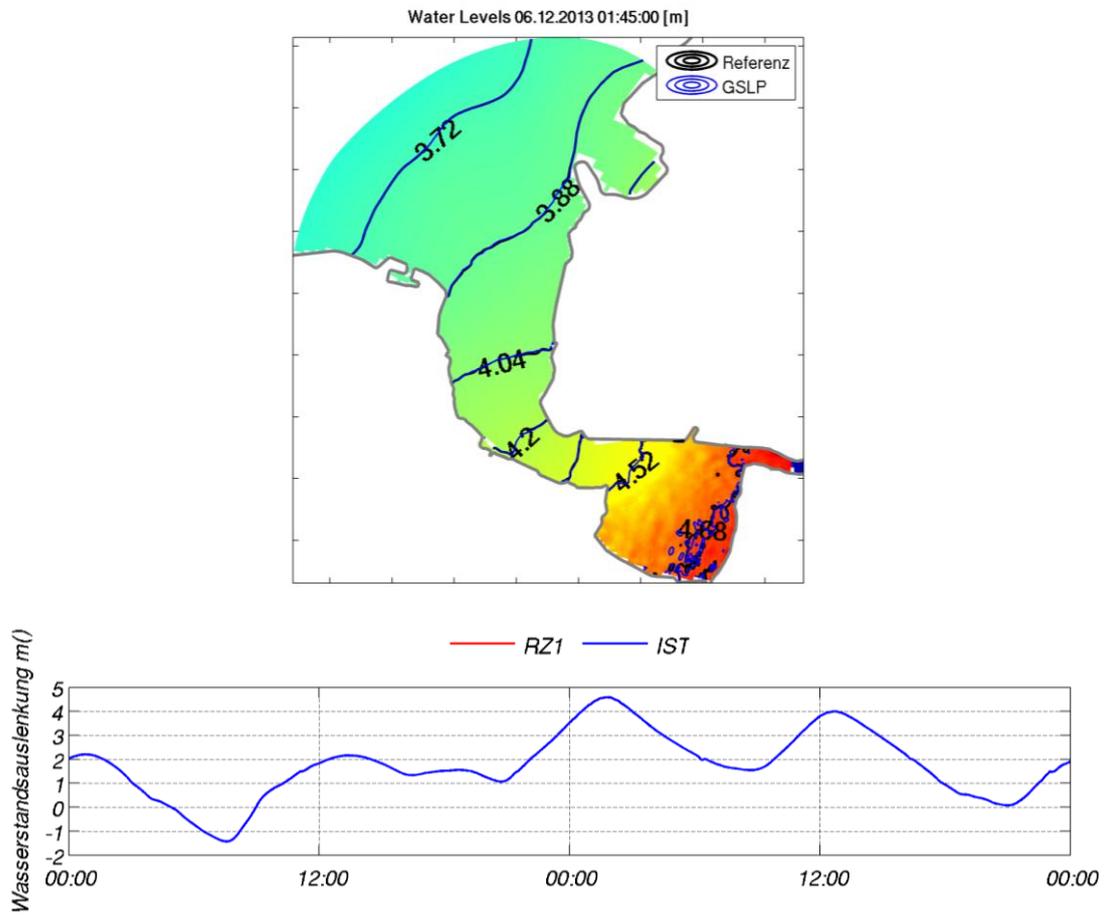


Abb. 6-17 Wasserstände zum Scheitelwasserstand (Emspier) im Ems-Ästuar (oben) und Wasserstandsganglinie am Emspier (unten)

A7 WIRKUNG REFERENZZUSTAND 2 - GSLP MIT EMSVERTIEFUNG

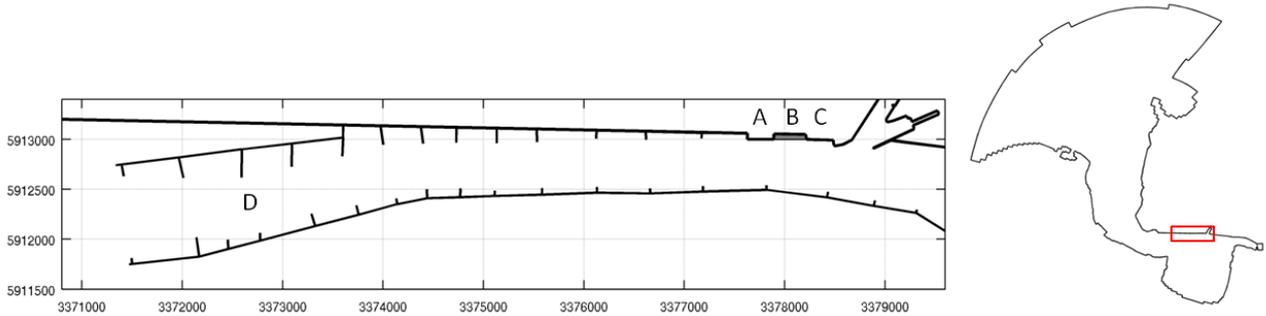


Abb. 7-1 Kartenausschnitt des Flächenvergleichs I. A = Emspier, B = GSLP, C = Emskai, D = Bühnenpaar 6/7

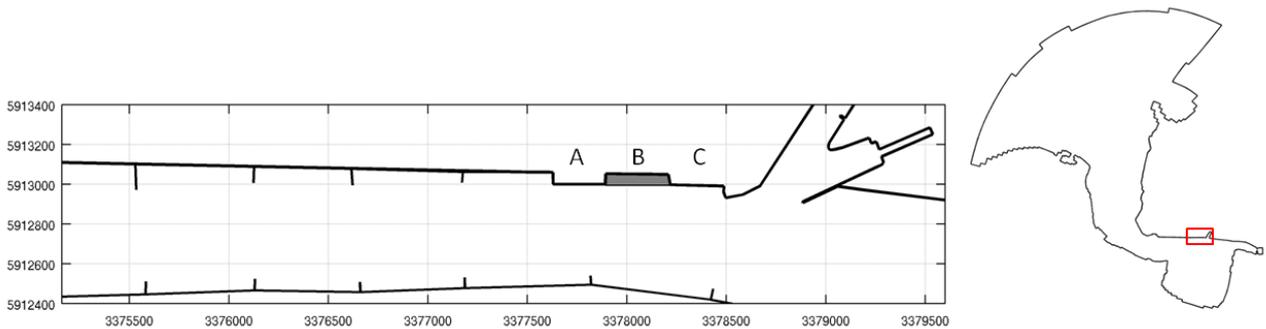


Abb. 7-2 Kartenausschnitt des Flächenvergleichs II. A = Emspier, B = GSLP, C = Emskai

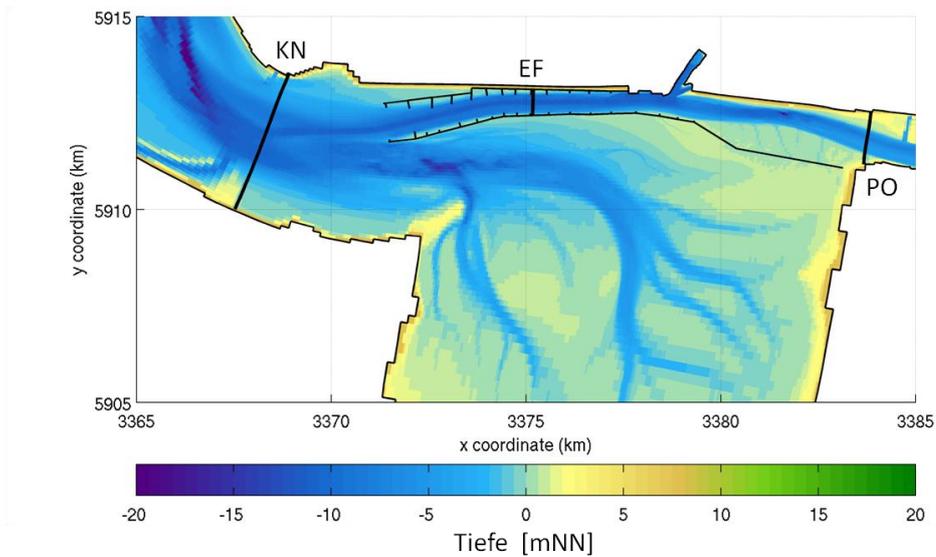


Abb. 7-3 Lage der Querschnitte. KN = Knock, EF = Emders Fahrwasser, PO = Pogum

A7.1 MITTELFRISTIGE BETRACHTUNG

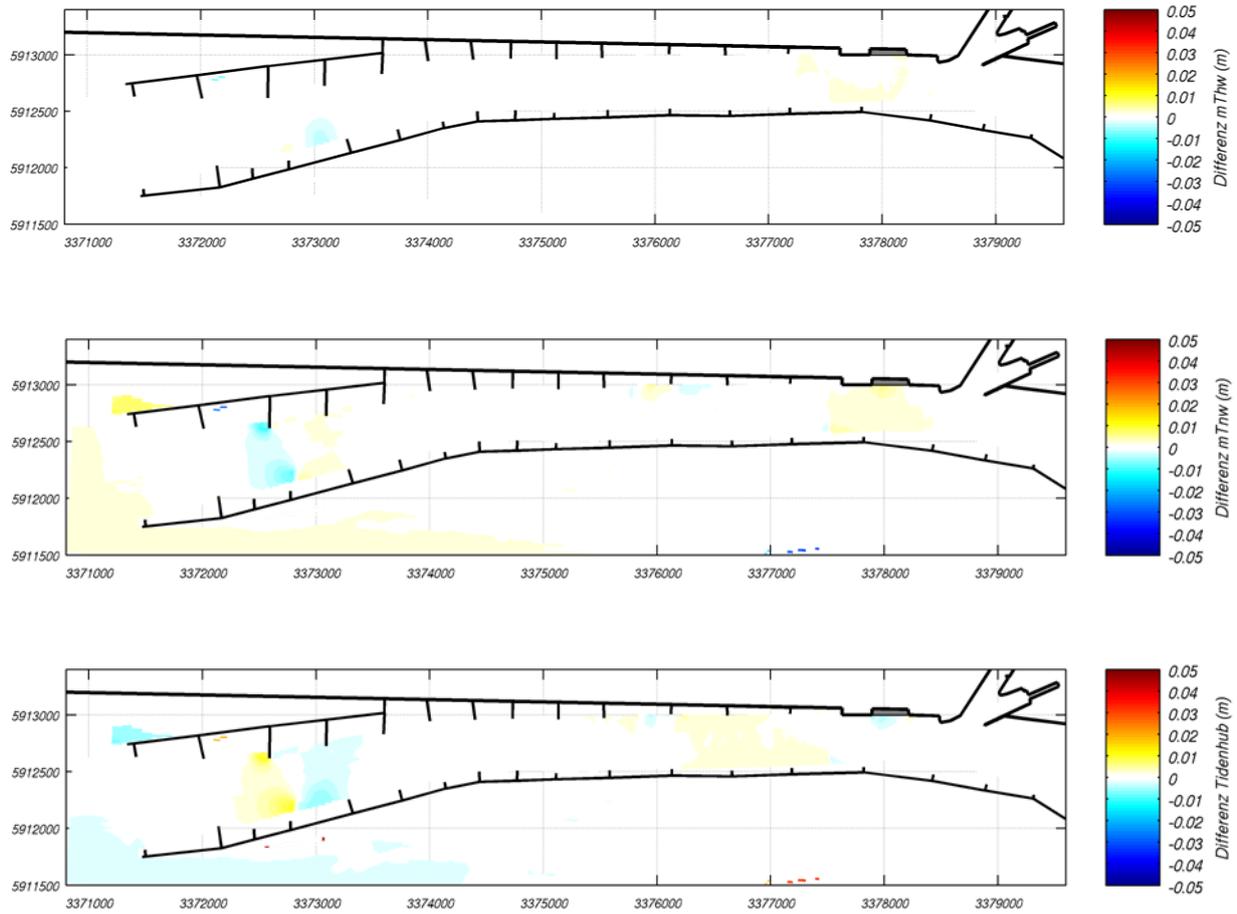


Abb. 7-4 Differenz der mittleren Tidehoch- und -niedrigwasser und des mittleren Tidehubes. Flächenvergleich I

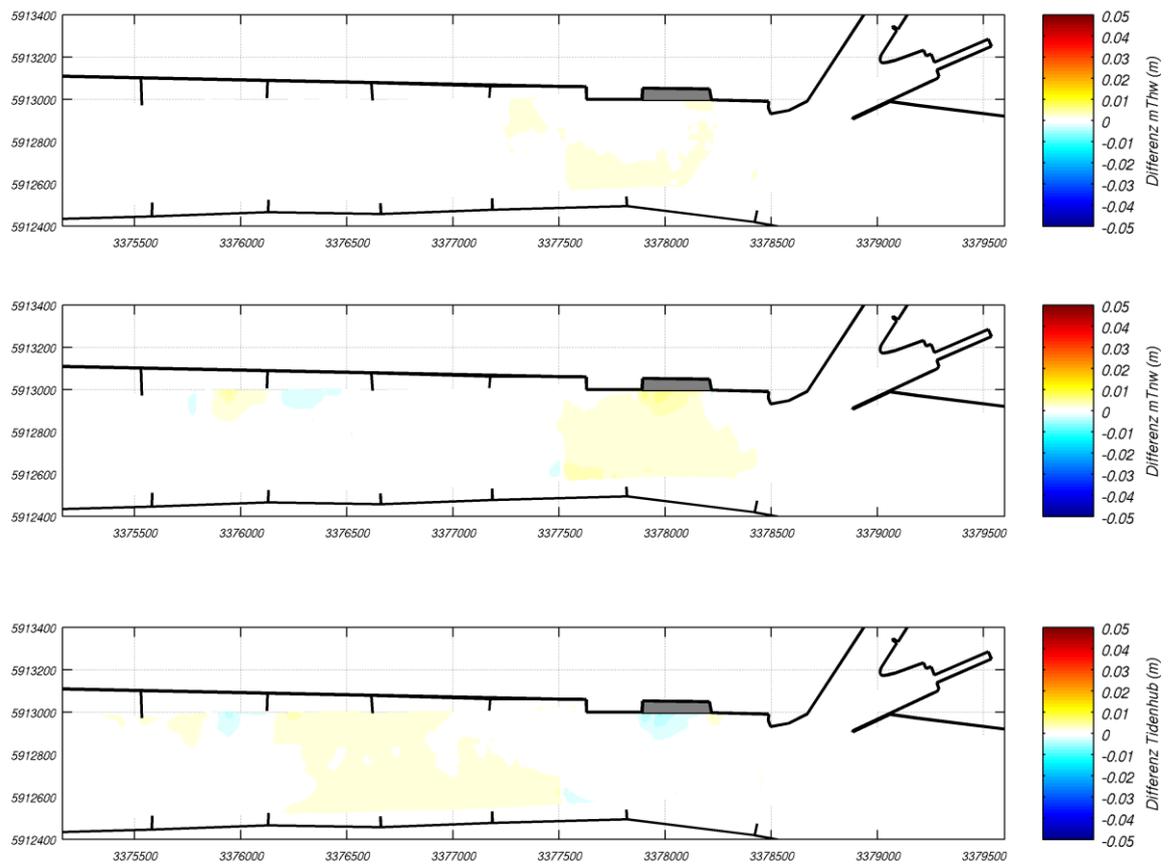


Abb. 7-5 Differenz der mittleren Tidehoch- und -niedrigwasser und des mittleren Tidehubes. Flächenvergleich II

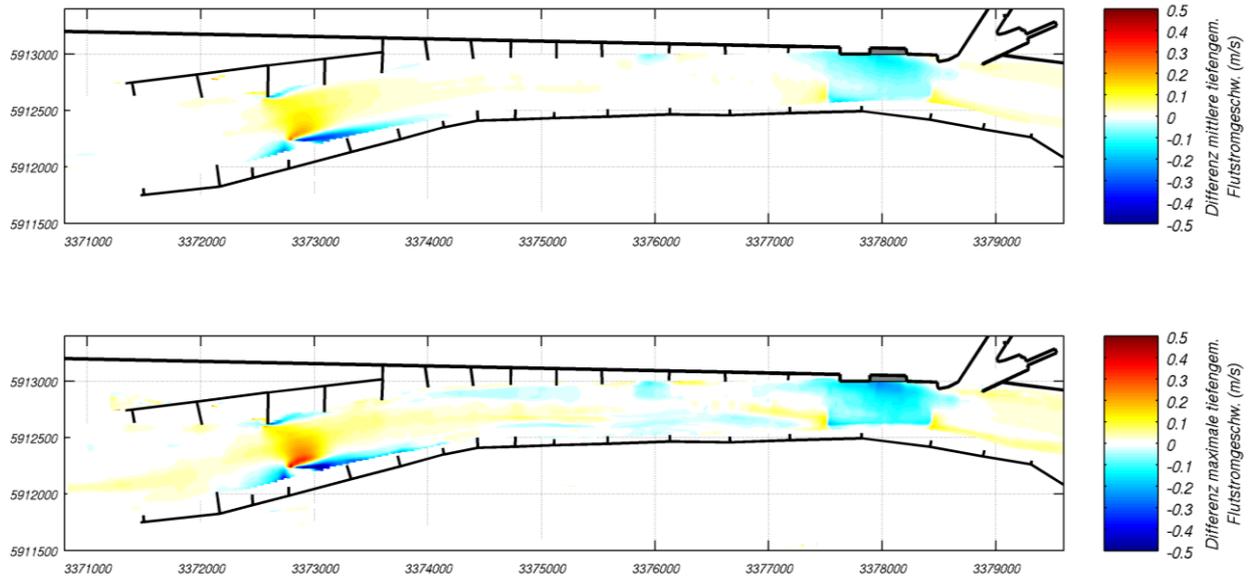


Abb. 7-6 Differenz der mittleren und maximalen tiefengemittelten Flutstromgeschwindigkeiten. Flächenvergleich I

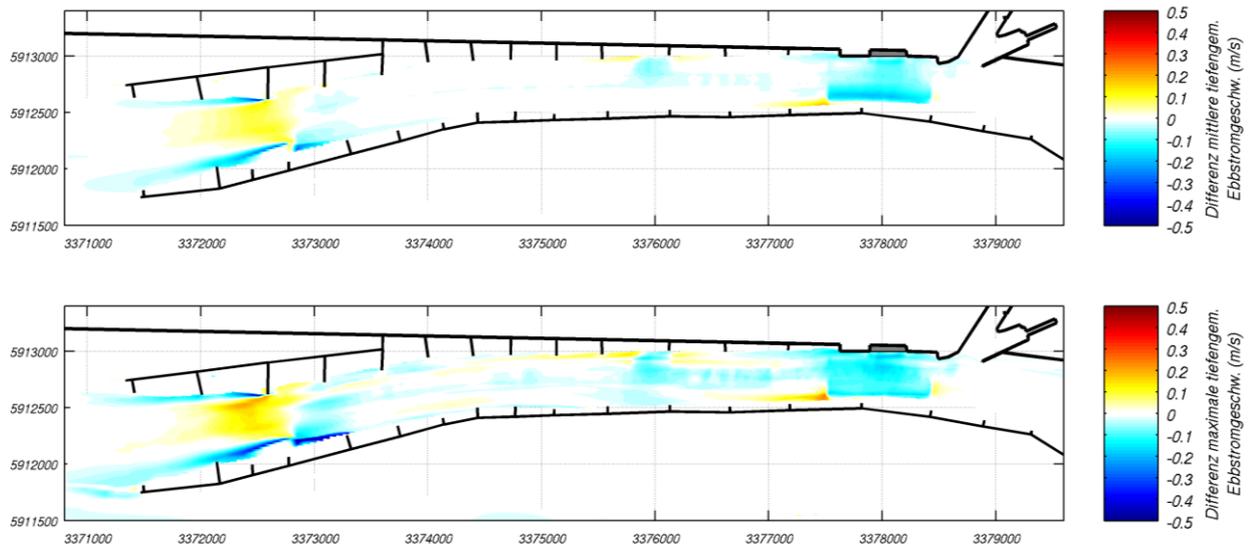


Abb. 7-7 Differenz der mittleren und maximalen tiefengemittelten Ebbstromgeschwindigkeiten. Flächenvergleich I

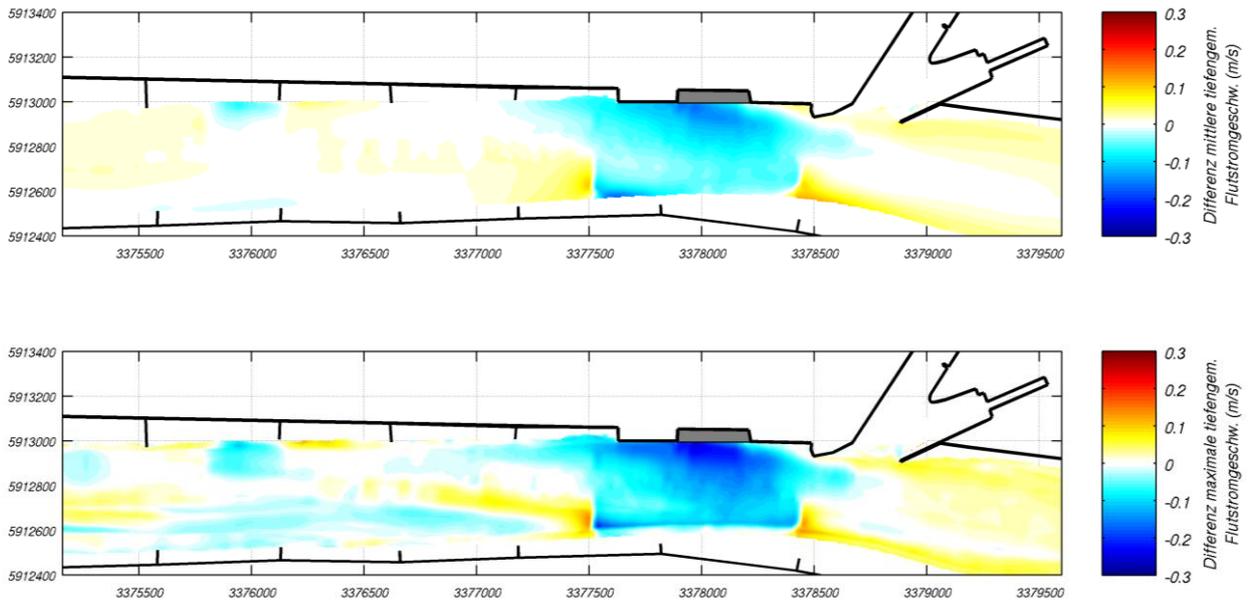


Abb. 7-8 Differenz der mittleren und maximalen tiefengemittelten Flutstromgeschwindigkeiten. Flächenvergleich II

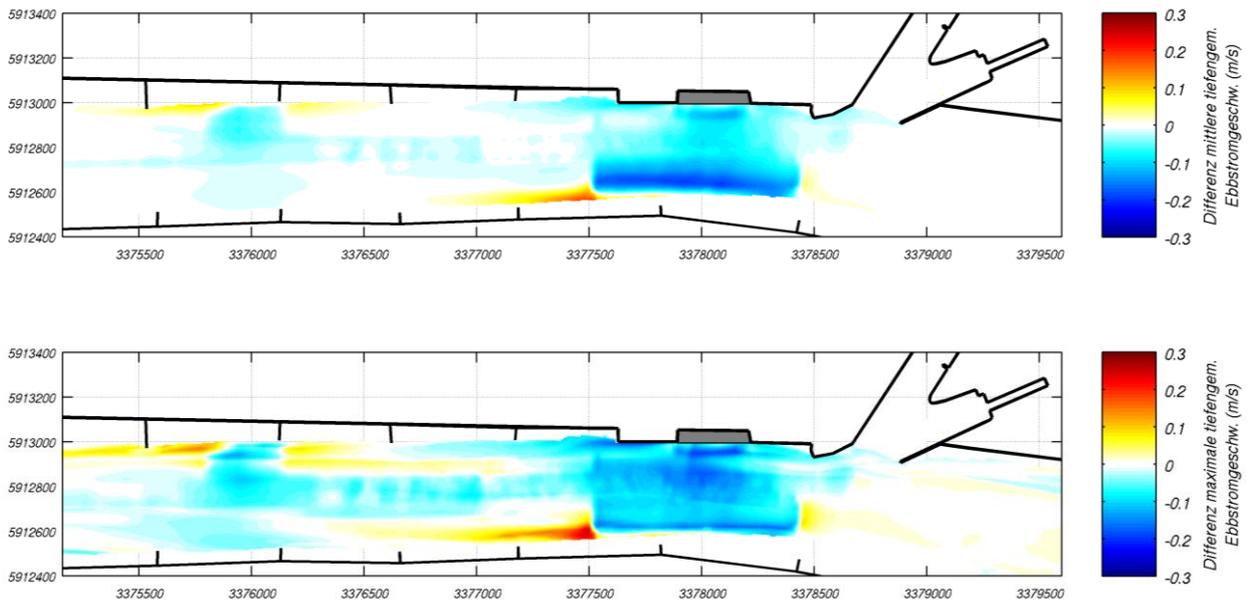


Abb. 7-9 Differenz der mittleren und maximalen tiefengemittelten Ebbstromgeschwindigkeiten. Flächenvergleich II

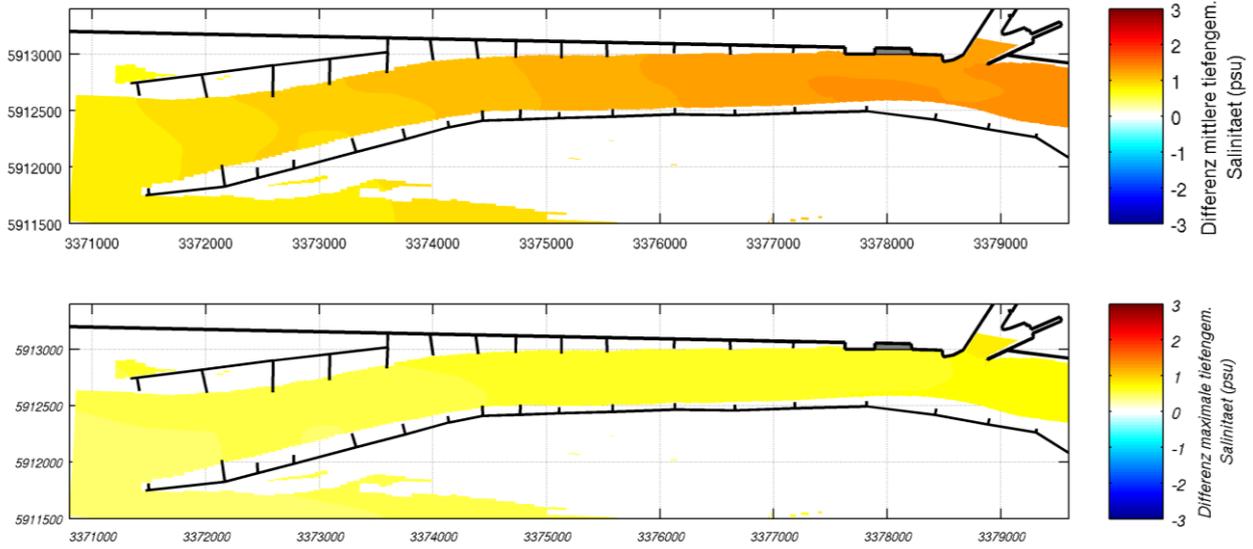


Abb. 7-10 Differenz der mittleren und maximalen tieftengemittelten Salinität. Flächenvergleich I

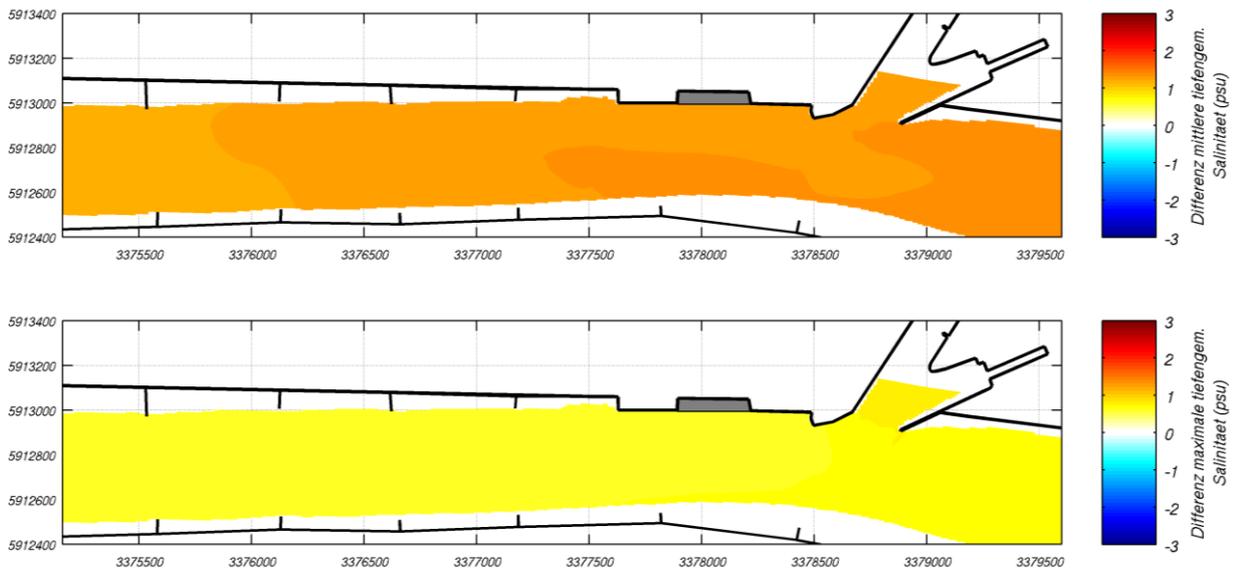


Abb. 7-11 Differenz der mittleren und maximalen tieftengemittelten Salinität. Flächenvergleich II

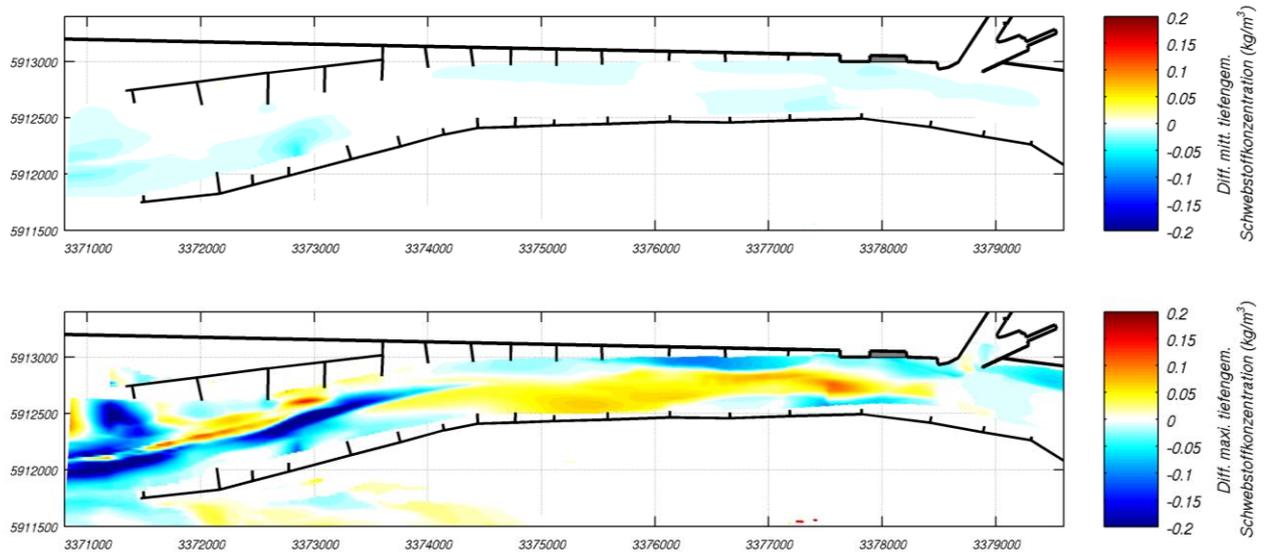


Abb. 7-12 Differenz der mittleren und maximalen tiefengemittelten Schwebstoffkonzentrationen. Flächenvergleich I

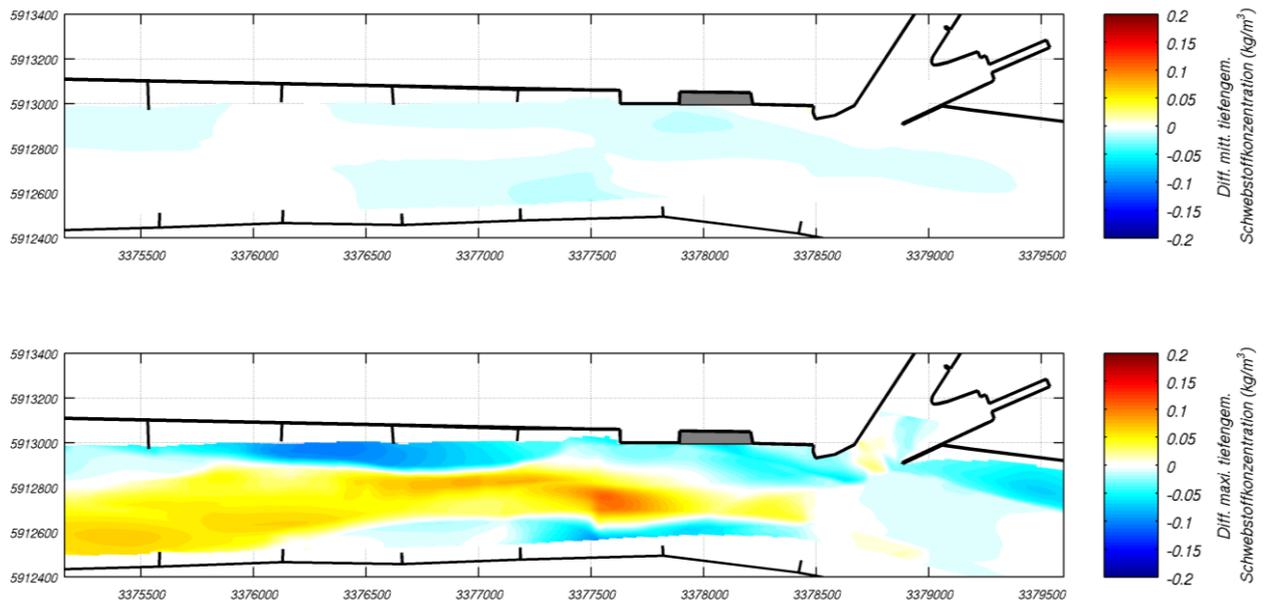


Abb. 7-13 Differenz der mittleren und maximalen tiefengemittelten Schwebstoffkonzentrationen. Flächenvergleich II

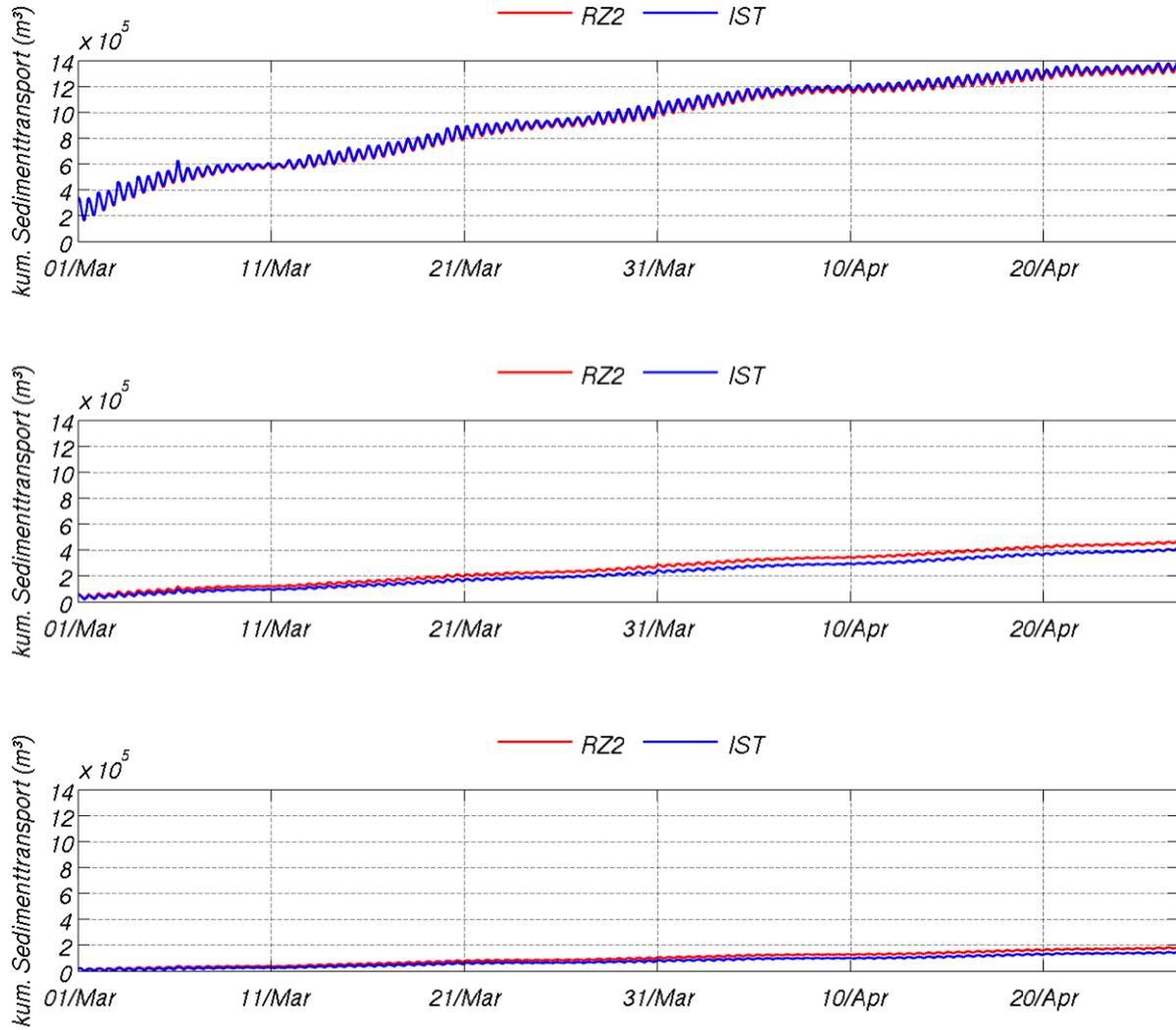


Abb. 7-14 Kumulativer Sedimenttransport an den Querschnitten Knock (KN), Emders Fahrwasser (EF) und Pogum (PO)

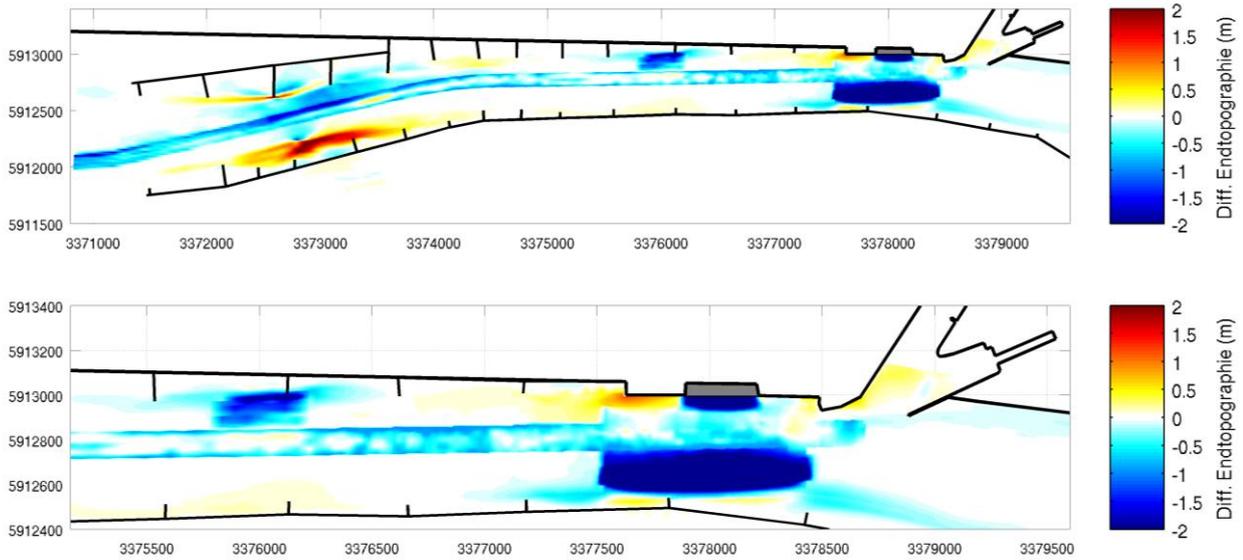


Abb. 7-15 Differenz der Endtopographie RZ2-IST

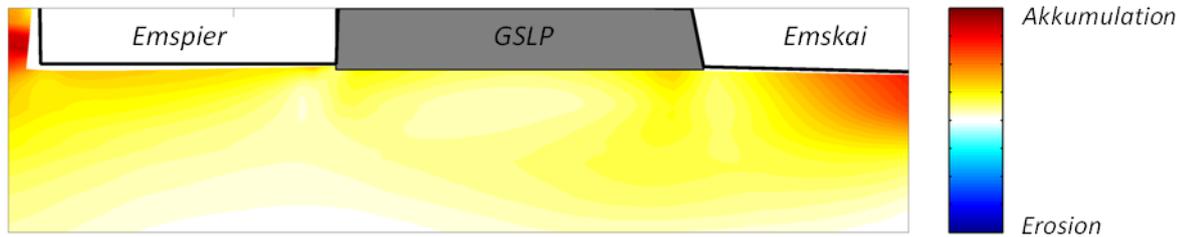


Abb. 7-16 Mittelfristige Veränderung der Sohlage im Bereich der GSLP-Liegewanne im RZ2 nach 2 Monaten (26.02. - 27.04.2010)

A7.2 LÄNGERFRISTIGE BETRACHTUNG

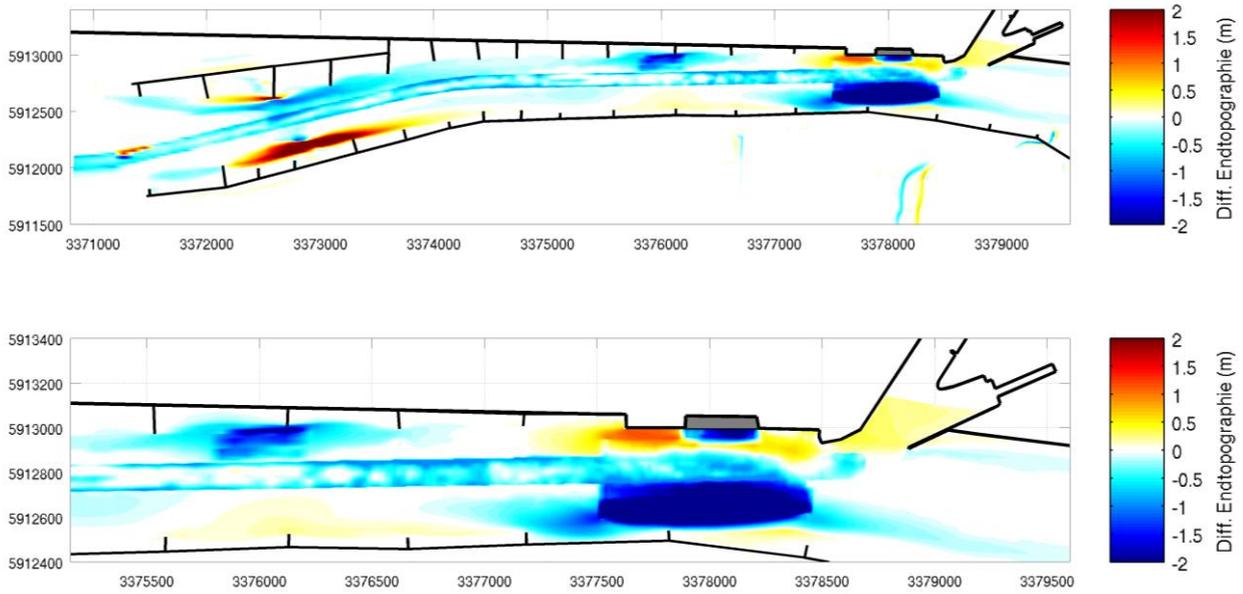


Abb. 7-17 Differenz der Endtopographie längerfristig RZ2-IST

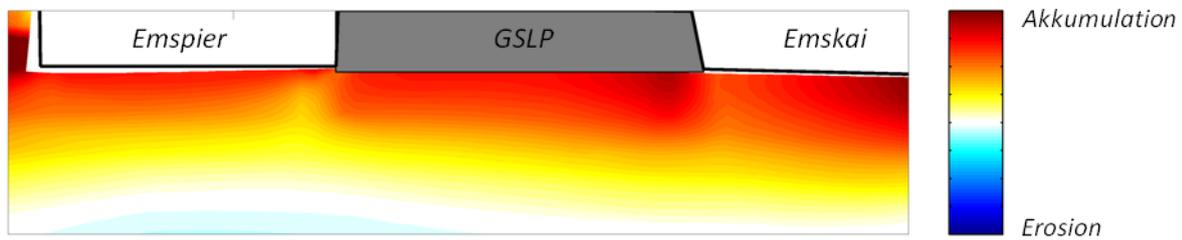


Abb. 7-18 Längerfristige Veränderung der Sohllage im Bereich der Liegewanne im RZ2 nach ca. 11 Monaten

A7.3 UNTERSUCHUNG SEEGANGSVERHÄLTNISSE

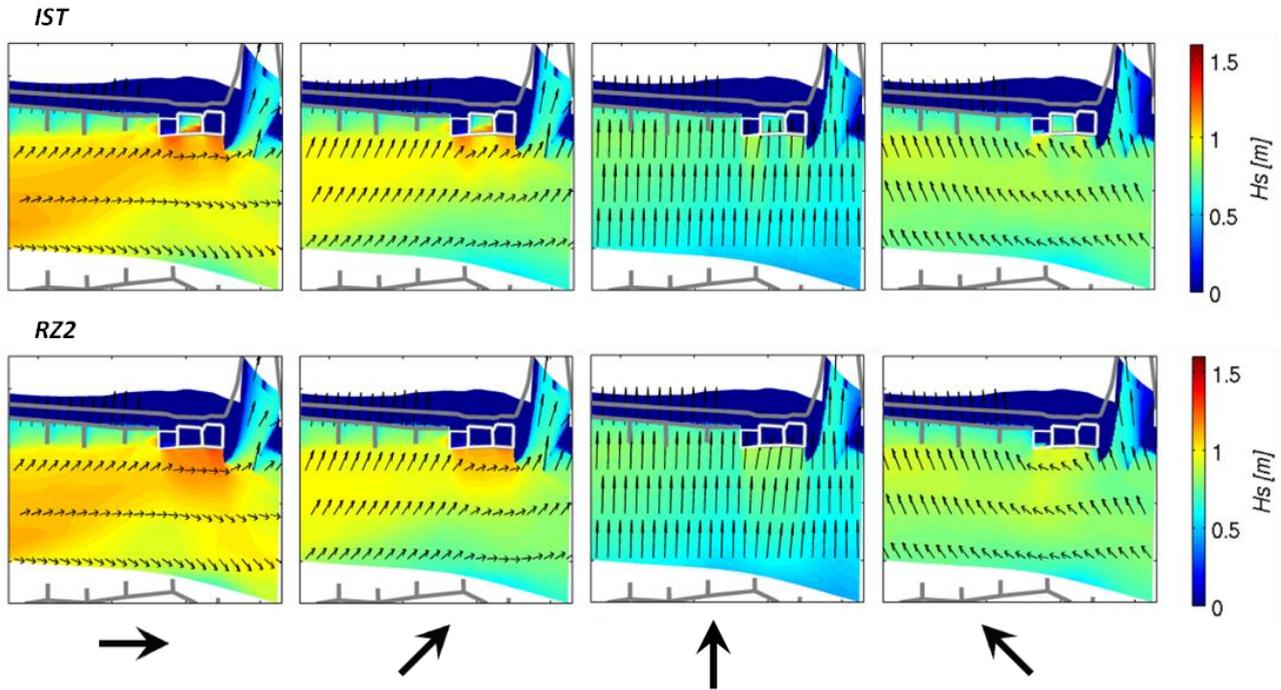


Abb. 7-19 Signifikante Wellenhöhen für IST (oben) und RZ2 (unten) in verschiedenen Szenarien

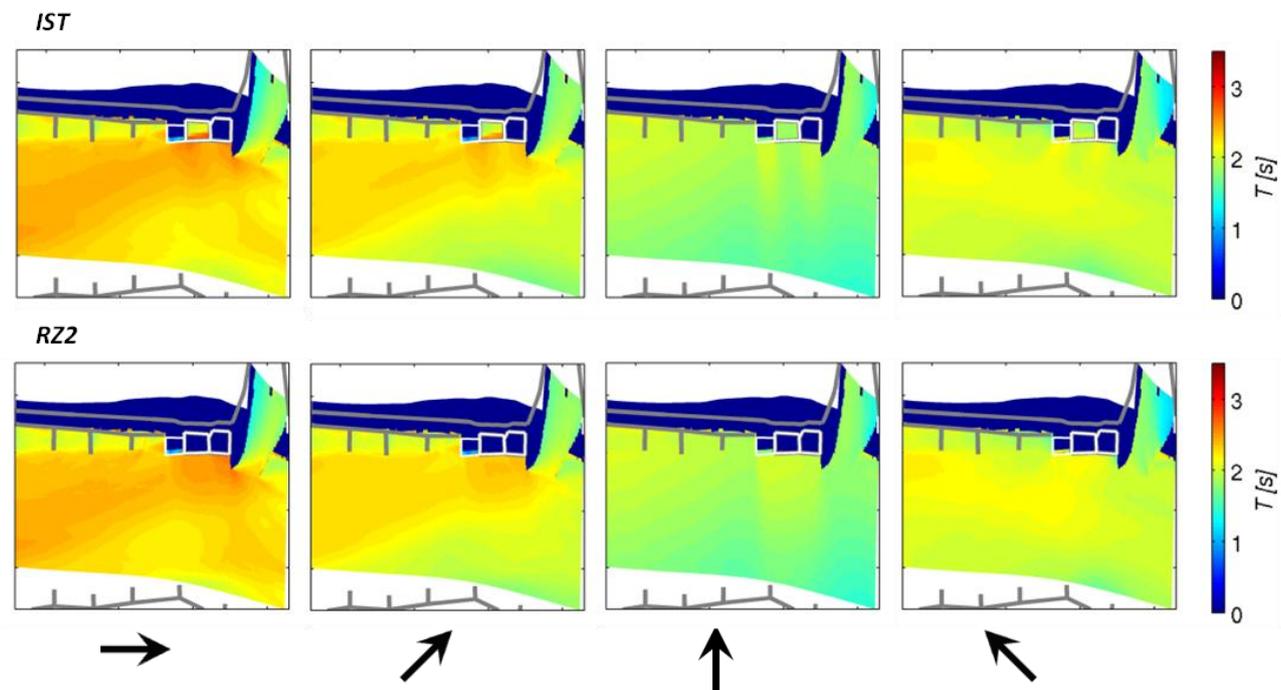


Abb. 7-20 Mittlere Wellenperiode für IST (oben) und RZ2 (unten) in verschiedenen Szenarien

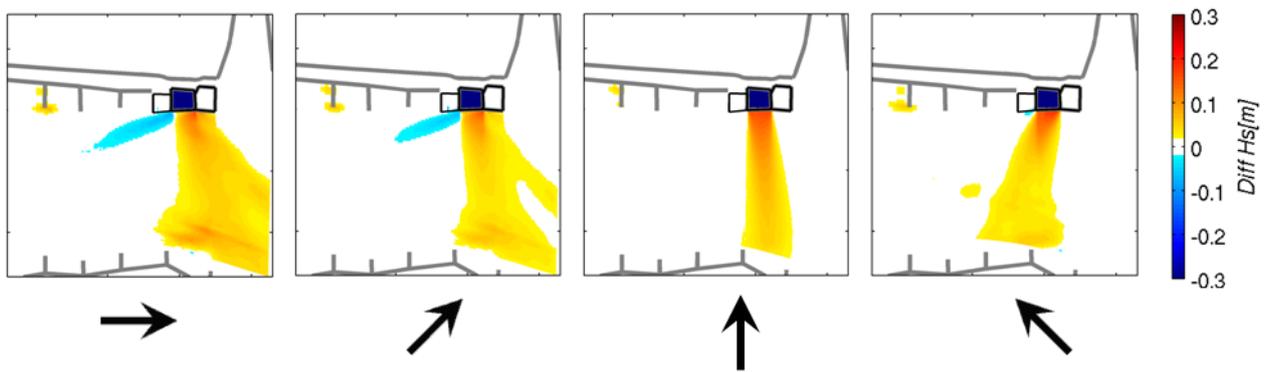


Abb. 7-21 Differenz der signifikanten Wellenhöhen

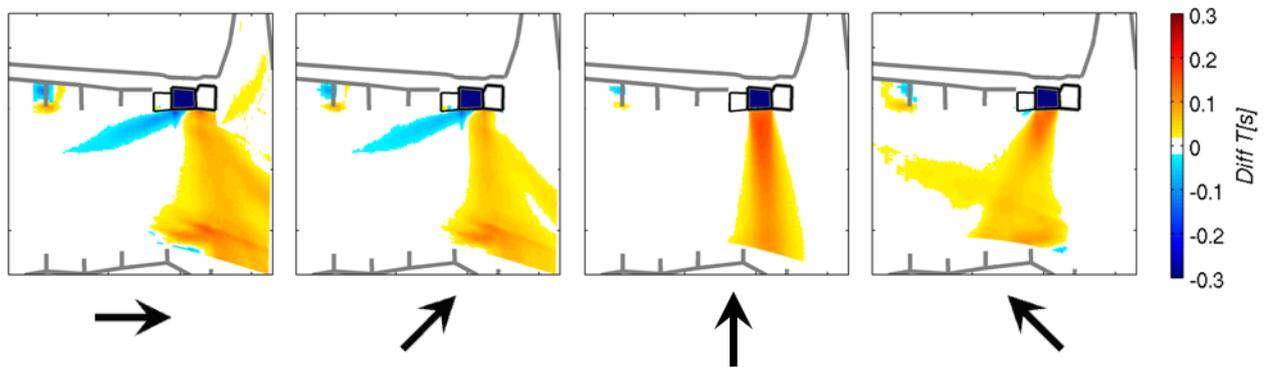


Abb. 7-22 Differenz der mittleren Wellenperioden

A7.4 UNTERSUCHUNG STURMFLUTKENNGRÖßEN

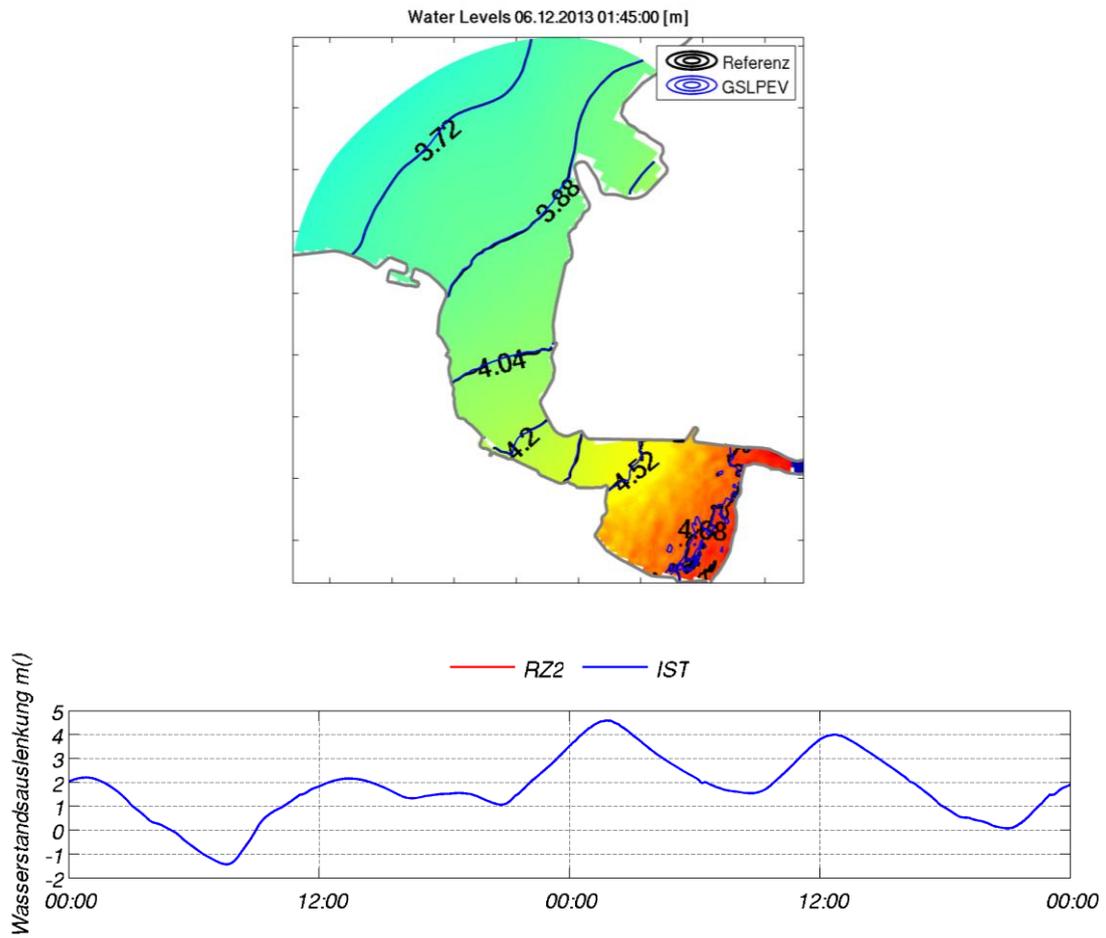


Abb. 7-23 Wasserstände zum Scheitelwasserstand (Empsper) im Ems-Ästuar (oben) und Wasserstandsganglinie am Empsper (unten)