

Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG  
Niederlassung Cuxhaven

Antrag auf Planfeststellung  
für den  
Anleger für verflüssigte Gase mit  
Südhafen-Erweiterung in Stade-Bützfleth

Gemäß §§ 68 ff WHG iVm §§ 107 ff NWG

Heft 7

Sedimentverdriftung

DHI Wasy GmbH, Berlin

---

# Anleger für verflüssigte Gase bei Stade-Bützfleth

Sedimentverdriftung und Unterhaltung





Hanseatic Energy Hub GmbH

Bericht

April 2022

This report has been prepared under the DHI Business Management System certified by Bureau Veritas to comply with ISO 9001 (Quality Management)



Erstellt von		Genehmigt von
<p style="text-align: right;">10.04.2022</p> <p><b>X</b> </p> <hr/> <p>Approved by</p> <p>Signed by: Stefan Leschka</p>		<p style="text-align: right;">10.04.2022</p> <p><b>X</b> </p> <hr/> <p>Approved by</p> <p>Signiert von: Dominic Spinnreker</p>

# Anleger für verflüssigte Gase bei Stade-Bützfleth

## Sedimentverdriftung und Unterhaltung

Erstellt für: Hanseatic Energy Hub GmbH  
 Vertreten durch: Herrn Schubert  
 (Hanseatic Energy Hub GmbH),  
 Herrn Kokkelink  
 (Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG)



Quelle: Nports GmbH & Co KG

Projektmanager	Dr.-Ing. Stefan Leschka
Qualitätssicherung	Dr.-Ing. Sina Saremi, Almut Windmuller
Projektbearbeiter	Marion Dziengel, Dr.-Ing. Hisham Elsafti

Projektnummer	14805854
Datum Freigabe	-
Revision	1.0 – 07.04.2022: Finale Version
Revisions-Historie	0.3 – 07.04.2022: Aktualisierung der Baggermethodik in der Bauphase 0.2 – 30.03.2022: kleine redaktionelle Änderung eines Absatzes 0.1 – 23.03.2022: vollständiger Entwurf
Einstufung	Geschützt

## INHALT

<b>1</b>	<b>Veranlassung.....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Allgemeine Vorgehensweise .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Datengrundlagen.....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Wirkprognose für die Unterhaltung der Sohle .....</b>	<b>7</b>
4.1	Unterhaltung durch Lufteggen .....	7
4.1.1	Prinzip .....	7
4.1.2	Eggzeiten .....	8
4.1.3	Mobilisierungsraten .....	9
4.2	Hydromorphologisches 3D-Modell der Elbe .....	13
4.2.1	Software MIKE 3 Flow Model FM für drei-dimensionale hydrodynamische Modellierung von Oberflächengewässern .....	14
4.2.2	MT-Modul für Feinsedimenttransport.....	16
4.2.3	Modellaufbau.....	20
4.2.3.1	Bathymetrie .....	20
4.2.3.2	Randbedingungen.....	21
4.2.3.3	Rauheitshöhe .....	22
4.2.3.4	Wirbelviskosität .....	23
4.2.3.5	Sedimentologie .....	23
4.2.4	Modellgenauigkeit .....	26
4.2.5	Validierung des Lufteggens im Modell.....	27
4.3	Ergebnisse .....	29
4.3.1	Wirksamkeit der Unterhaltung durch Lufteggen am AvG .....	29
4.3.2	Sedimentverdriftung.....	31
4.3.3	Änderung der Sohle .....	35
4.4	Zusammenfassung .....	37
<b>5</b>	<b>Bauzeitliche Sedimentverdriftung.....</b>	<b>38</b>
5.1	Methodik der Berechnung der bauzeitlichen Sedimentverdriftung .....	38
5.2	Berücksichtigte Eingangsparameter .....	42
5.3	Ergebnisse .....	43
5.4	Weitere qualitative Schlussfolgerungen.....	46
5.5	Zusammenfassung .....	47
<b>6</b>	<b>Langfristiger Einfluss des AvG und Empfehlungen .....</b>	<b>48</b>
6.1	Sedimentverdriftung.....	48
6.2	Änderung der Sohle .....	48
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Empfehlungen.....</b>	<b>50</b>
7.1	Wirkprognose der Unterhaltung der Sohle am AvG .....	50
7.2	Bauzeitliche Sedimentverdriftung .....	50
7.3	Empfehlungen .....	51
<b>8</b>	<b>Quellen.....</b>	<b>53</b>

## ABBILDUNGEN

Abbildung 1.1.	Übersichtsplan und Lage der überarbeiteten Planung des AvG Stade-Bützfleth (modifiziert von NPorts, 12.02.2020, aus /3/)	4
Abbildung 4.1.	Pneumatische Egge im Hafen Stade-Bützfleth. Oben links: Egge auf dem Ponton, oben rechts: Schleppverband mit Eggponton und Egge, unten links: Gesamtansicht der Egge, unten rechts: Nahansicht der Egge mit ihren Komponenten.	8
Abbildung 4.2.	Gemessene Sohlhöhen der Peilungen in den Monaten Mai, Juni, Juli und August 2019.	10
Abbildung 4.3.	Gemessene Sohländerung im Südhafen Stade-Bützfleth, links: zwischen den Peilungen 4.6. – 8.5.2019, mittig: zwischen den Peilungen 15.7. – 4.6.2019, rechts: zwischen den Peilungen 13.8. – 15.7.2019.	11
Abbildung 4.4.	Tideelbmodell von Geesthacht (oberstrom) bis Steinriff (unterstrom) mit Pegelstandorten.	14
Abbildung 4.5.	Prinzip eines 3D-Netzes nach $\sigma$ -Methode.	16
Abbildung 4.6.	Schematische Darstellung der berücksichtigten Prozesse und der Layerdifferenzierung über die Sedimenttiefe im MT-Modul.	20
Abbildung 4.7.	Oben: Peildaten vom 15.07.2019, unten: Peildaten vom 15.07.2019 im Modellnetz.	21
Abbildung 4.8.	Randbedingungen des Elbmodells, oben: Wasserstände und Abfluss, Mitte: Windgeschwindigkeit und -richtung an der Station Cuxhaven, unten: Schwebstoffgehalte an der Station Hitzacker.	22
Abbildung 4.9.	Räumliche Verteilung der Rauheitshöhe.	23
Abbildung 4.10.	Räumliche Verteilung des Smagorinsky-Faktors.	23
Abbildung 4.11.	Bohrproben mit Bodeninformationen an verschiedenen Punkten des bestehenden Hafens Stade-Bützfleth.	24
Abbildung 4.12.	Probenahmepunkte im Bereich des geplanten AvG mit Sedimentkennzahlen beispielhaft an sieben Punkten.	25
Abbildung 4.13.	Verteilung der kritischen Sohlschubspannung („critical shearstress“) (links) und der Sedimentdichte („density“) (trockene Sedimentdichte) (rechts) im 3D-Modell.	26
Abbildung 4.14.	Links: aufgezeichnete Baggerfahrspuren im Südhafenbecken an drei verschiedenen Tagen, rechts: nachgebildete Baggerfahrspur im Südhafenbecken für die Modellierung.	27
Abbildung 4.15.	Sohländerung zwischen zwei Peilungen (= Differenz der Peildaten 13.8. - 15.7.2019). Links: simuliert ohne Unterhaltung, Mitte: simuliert mit Unterhaltung, rechts: gemessen mit Unterhaltung.	28
Abbildung 4.16.	Sohlhöhe am 13.8.2019 mit Unterhaltung durch Lufteggen. Links: Differenz zwischen simulierten und gemessenen Sohlhöhe, mittig: simulierte Sohlhöhe, rechts: gemessene Sohlhöhe.	29
Abbildung 4.17.	Sohländerung im Planzustand. Links: ohne Unterhaltung, Mitte: mit Unterhaltung, rechts: Differenz der Sohländerung mit und ohne Unterhaltung.	30
Abbildung 4.18.	Bilanzquerschnitte in der Elbe, den Hafenbereichen und Nebengewässern für die Auswertung des Sedimenttransportes.	31
Abbildung 4.19.	Sedimentkonzentrationen in Bilanzquerschnitt. Oben: Querschnitt am Elbekm 657, Mitte: Querschnitt 1 des Südhafens, unten: Querschnitt 1 des geplanten Hafenbeckens des AvG.	32
Abbildung 4.20.	Sedimentkonzentrationen entlang der Elbe. Links: während der Ebbphase, 3.8.2019 11:00Uhr, rechts: während der Flutphase, 3.8.2019 04:00Uhr.	34
Abbildung 4.21.	Sedimentkonzentrationen in der Elbe. Oben: während der Ebbphase entlang der Elbe 3.8.2019 11:00Uhr ohne Unterhaltung (durchgezogene Linie) und mit Unterhaltung (gestrichelte Linie), Mitte: während der Flutphase 3.8.2019 04:00 Uhr, unten: zeitlicher Verlauf der Schwebstoffgehalte am Elbe-km 657 und den entsprechenden Wasserständen am Pegel Stadersand.	35

Abbildung 4.22	Differenz der Sohländerungen zwischen Planzustand mit Unterhaltung und Planzustand ohne Unterhaltung großräumig dargestellt für die Elbe zwischen Hafen Hamburg und Cuxhaven. ....	36
Abbildung 4.23.	Sohlage in [mNHN] an den Punkten der Elbekilometer mit Unterhaltung (durchgezogene Linie), ohne Unterhaltung (gestrichelte Linie) – linke Achse; und deren Differenz in [cm] – rechte Achse. ....	37
Abbildung 5.1.	Aufteilung der Baggerflächen. ....	39
Abbildung 5.2.	Oben links: Positionen der Bohrungen /1/, unten links: Lage der Pegel für Strömungsgeschwindigkeiten (Pagensand) und Wasserspiegellage (Stadersand), rechts: beispielhaftes Bohrprofil an der Position B2 /2/. ....	40
Abbildung 5.3.	Berechnung der Querschnittsfläche aus der Bathymetrie des Elbe-Modells auf Basis der Elementgrößen und der Wassertiefen in einem Querschnitt (oranger Rahmen). ....	41
Abbildung 5.4.	Isolinien für die Schwebstoffkonzentration und maximale Reichweite für Schluff. Oben: Phase Schwimmtiefe, unten links: Phase Hafentiefe, resultierend aus Tieföffelbagger, unten rechts: Phase Hafentiefe, resultierend aus Hopperbagger. ....	45
Abbildung 5.5.	Isolinien für die Schwebstoffkonzentration und maximale Reichweite für Sand. Oben: Phase Schwimmtiefe, unten links: Phase Hafentiefe, resultierend aus Tieföffelbagger, unten rechts: Phase Hafentiefe, resultierend aus Hopperbagger. ....	45
Abbildung 6.1.	Differenz der Sohländerung zwischen dem Planzustand mit Unterhaltung und dem Istzustand im Bereich Stade-Bützfleth. ....	49

## TABELLEN

Tabelle 3.1.	Verwendete Daten. ....	6
Tabelle 4.1.	Unterhaltungsdauern [h] durch die Egge im Nord- und Südhafen sowie für die Monate Mai bis August der Jahre 2019 und 2020. ....	9
Tabelle 4.2.	Prozentuale Verteilung der Unterhaltungszeiten während der Ebb- und der Flutphase im gesamten Hafengebiete. ....	9
Tabelle 4.3.	Berechnungsgrundlagen für den Südhafen, bestehend aus den Unterhaltungsdauern, den Dauern zwischen den Peilungen der Monate Mai, Juni, Juli und August 2019, dem mobilisierten Volumen sowie der entsprechenden Fläche. ....	11
Tabelle 4.4.	Berechnungsgrundlagen für den Nordhafen, bestehend aus den Unterhaltungsdauern, den Dauern zwischen den Peilungen der Monate Mai, Juni, Juli und August 2019, dem mobilisierten Volumen sowie der entsprechenden Fläche. ....	12
Tabelle 4.5.	Berechnete Sedimentations- und Mobilisierungsraten sowie die mittlere Eintiefung und Sedimentation im Nord- und Südhafenbecken. ....	13
Tabelle 4.6.	Kenngrößen der Sedimentmobilisierung durch Lufteggen am AvG und im Südhafen. ....	30
Tabelle 4.7.	Statistische Auswertung der Differenzen des Sedimenttransport mit und ohne Unterhaltung durch Eggen in positive Richtung (in Hauptfließrichtung) und in negative Richtung (entgegen Hauptfließrichtung). ....	33
Tabelle 5.1.	Definition der Bauphasen. ....	38
Tabelle 5.2.	Baggerflächen und durchschnittliche Wassertiefen. ....	39
Tabelle 5.3.	Schluff- und Sand-Anteile. ....	41
Tabelle 5.4.	Angesetzte Sedimentüberlaufanteile. ....	41
Tabelle 5.5.	Eingangsparameter der Berechnungen. ....	42
Tabelle 5.6.	Zusammenfassung der Ergebnisse der Berechnung der bauzeitlichen Sedimentverdriftung. ....	44

## ANHANG

## 1 Veranlassung

Die Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG (NPorts) plant in Stade-Bützfleth den Neubau eines Importanlegers für verflüssigte Gase (kurz AvG) südlich des bestehenden Hafens. Hier sollen LNG-Tanker mit einer Länge von bis zu 345 m und einer Breite von bis zu 54 m sowie Tanker für Propylen- und Ethylenumschlag mit einer Größe von 225 m x 36 m abgefertigt werden. Der geplante AvG liegt am Westufer der Elbe nahe Stade und unmittelbar nördlich der Schwingemündung. Abbildung 1.1 zeigt den Lageplan der Hafenanlage.

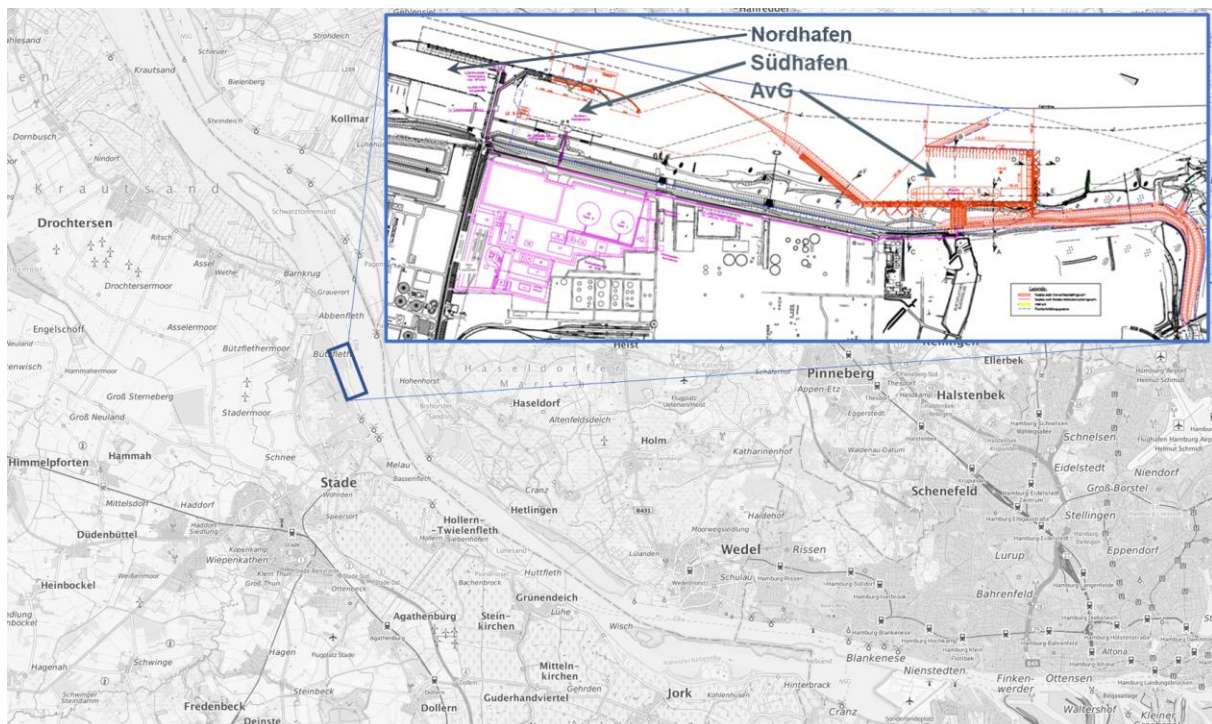


Abbildung 1.1. Übersichtsplan und Lage der überarbeiteten Planung des AvG Stade-Bützfleth (modifiziert von NPorts, 12.02.2020, aus /3/)

NPorts und die Hanseatic Energy Hub GmbH planen nach Herstellung des Anlegers eine Unterhaltung der Sohle im Südhafen und am AvG mittels Eggen mit Luftinjektion (kurz Lufteggen). In der Vergangenheit und bis heute wird bereits regelmäßig im bestehenden Südhafenbecken, etwas nördlich des geplanten AvG Stade-Bützfleth, das Verfahren des Lufteggens für die Unterhaltung eingesetzt. Das WSA Elbe Nordsee hat im Rahmen der Planung des AvG Stade-Bützfleth gefordert, die Wirksamkeit und Auswirkung der geplanten Unterhaltung im Betrieb nachzuweisen.

Dieses Gutachten beschreibt die Auswirkungen des Baus des AvG und dessen Unterhaltung im Betriebszustand mittels Lufteggen auf den Wasserkörper der Elbe. Zunächst wird die allgemeine Vorgehensweise (Kapitel 2) beschrieben, gefolgt von der Datengrundlage (Kapitel 3). Anschließend sind zunächst die Wirkprognose der Unterhaltungsmaßnahmen (Kapitel 4) beschrieben, gefolgt von den bauzeitlichen Sedimentverdriftungen (Kapitel 5). Im Weiteren wird eine langfristige Prognose der Auswirkungen des AvG auf die Elbe sowie einige Empfehlungen gegeben (Kapitel 6).



## 2 Allgemeine Vorgehensweise

Die Untersuchungen wurden in zwei Phasen unterteilt:

1. Bauzeitlichen Auswirkungen und
2. Auswirkungen im Betrieb durch die Unterhaltung der Sohle des Hafens.

**In Phase 1** wurde die bauzeitliche Sedimentverdriftung infolge der Herstellung des AvG anhand von Erfahrungswerten ohne numerische Modellierung in vereinfachter Form abgeschätzt. Hierfür wurden die verwendeten Baggerverfahren berücksichtigt sowie verschiedene hydrografische Situationen betrachtet. Daraus ließen sich die durchschnittliche Sedimentkonzentrationen im Nahbereich des Anlegers in der Elbe sowie Bereiche für zu erwartende Sedimentationen und die durchschnittliche Sedimentationshöhe abschätzen. Für abweichende hydrologische Zeiträume erfolgte eine verbal-argumentative Einstufung der Sedimentverdriftung.

**In Phase 2** wurde die Wirksamkeit des Lufteggens quantifiziert. Hierbei wurde die Wirksamkeit von Mobilisierungsraten im Abgleich mit dem natürlichen Sedimenteintritt und -austrag in den Südhafen ausgewertet. Dafür wurden ferner Peildaten aus fortlaufenden 4 Messungen im Jahr 2019 inkl. der Dauer und Bereich des Eggens geodatentechnisch aufbereitet. Verschiedene Peilungen wurden voneinander abgezogen, um daraus die Sedimentmengen für die Unterhaltung durch das Lufteggen zu ermitteln. Daran wurde das Prinzip des Lufteggens im bestehenden Hafen beschrieben. Zudem wurden die Unterhaltungen über die letzten 3 Jahre zusammen mit den hydrologischen Randbedingungen der Elbe zusammengetragen. Aus dieser Auswertung ergaben sich für die vorherrschenden hydrodynamischen Bedingungen Mobilisierungsraten und Wirkiefen infolge des Unterhaltungsverfahrens, die auf die zu erwartende Unterhaltung am AvG übertragen wurden.

**Für die numerische Untersuchung des Lufteggens** im Südhafen wurden die Zeitfenster und ein möglicher Ablauf des Lufteggens mittels Erfahrungswerte zur Fahrroute und Mobilisierungsrate für das numerische Modell inkl. der natürlichen und anthropogenen Sedimentdynamik vorbereitet. Weiterhin wurde das bestehende hydromorphologische dreidimensionale (3D-) Modell auf Basis des DGM-W-2016, um die Elbvertiefung 2019 / 2020 erweitert, für die Modellierung der Sedimentverdriftung und den Nachweis der Unterhaltung inkl. Sedimenteintritt und -verdriftung vorbereitet. Dieses Modell wurde bereits im Zuge des hydromorphologischen Gutachtens für den AvG Stade-Bützfleth /3/ so weit aufbereitet, dass es die Hafenstrukturen ausreichend genau abbildete. Es lag dieser Untersuchung in einem hydromorphologisch kalibrierten Zustand vor und wurde im Nahbereich um den geplanten AvG Stade-Bützfleth mit neuen Peildaten aktualisiert. Es erfolgte eine numerische Modellierung und Validierung des Verfahrens für einen Zeitraum im Istzustand über 2 Wochen im Jahr 2019. Das so validierte Modell wurde dann für den Planzustand mit AvG für die Abbildung der natürlichen und anthropogenen Sedimentdynamik im selben Zeitraum mit täglicher Unterhaltung des AvG angewandt. Die Auswertung erfolgte für die Sedimentverdriftung und die Sedimentationen in den betroffenen Bereichen nahe dem AvG und der Elbe infolge Unterhaltung des Anlegers sowie in Form einer Bilanzierung natürlicher und unterhaltungsbedingter Transporte über Bilanzquerschnitte.

### 3 Datengrundlagen

In Tabelle 3.1 sind die dem Gutachten zugrunde liegenden digitalen Daten zusammengestellt. Die Literaturquellen sind in Kapitel 8 angeführt.

Tabelle 3.1. Verwendete Daten.

Bereitgestellt durch	Datensatz	Stand
Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG	Lageplan, Querschnitte der Planungen am AvG Stade-Bützfleth (dwg, pdf) für das numerische Modell des Planzustandes	2020
Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG	Peildaten und Solltiefen vom Seehafen Stade (txt, pdf) für das numerische Modell	2019
Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG	Baggerkonzept, Informationen zur Luftegge: Prinzip, Technik, Eggzeiten	1996 bis 2020
Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG	Informationen zu Sohlsedimenten aus Bohrungen im Bereich des bestehenden Hafens	2010
Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG	Informationen zu Sohlsedimenten aus Bohrungen im Bereich des geplanten AvG	2021
Elbclearing GmbH	Technische Daten, Abbildungen zur Luftegge	2012, 2021
Elbclearing GmbH	Dokument zur Beschreibung der Unterhaltung der Solltiefen	1996
Elbclearing GmbH	Luftegge Fahrspur als Koordinaten – Tiefe – Logfile (txt)	2021
Hamburg Port Authority	Zeitreihe der Schwebstoffgehalte an der Station Hitzacker	2019
Portal Tideelbe (WSV)	Zeitreihen der gemessenen Daten Wasserstand, Strömung, Durchfluss an verschiedenen Messpositionen entlang der Elbe als Randbedingungen des numerischen Modells	2019
Portal Tideelbe (WSV)	Digitales Geländemodell mit mittleren Sohllagen Tideelbe (DGM-W)	2016
DHI WASY	Kalibriertes morpho-dynamisches Modell der Tideelbe	2019

## 4 Wirkprognose für die Unterhaltung der Sohle

Für die Abschätzung und nachfolgende Bewertung der Auswirkungen der Unterhaltung der Sohle des AvG auf die angrenzenden Gewässer sowie den Nachweis der Wirksamkeit der Unterhaltungsmaßnahmen im Betrieb wurde das vorgesehene Verfahren des Luftteggens in das hydromorphologische Modell /3/ implementiert und für einen repräsentativen Zeitraum simuliert und ausgewertet.

Zunächst ist in diesem Kapitel das Luftteggens als vorgesehene Unterhaltungsmaßnahme beschrieben. Daran schließt sich die Beschreibung des hydromorphologischen Modells und seiner Komponenten an, bevor die Wirksamkeit des Luftteggens und deren Auswirkungen auf die Schwebstoffverdriftung und die Sohländerungen in der Elbe dargestellt sind.

### 4.1 Unterhaltung durch Luftteggens

Auf Grund der rasanten technischen Veränderungen in der Schifffahrt sind die Anforderungen an Liegeplätze gewachsen, entsprechend tiefe Sohlagen vorzuhalten. Durch den flutstrombedingten Sedimenteintrag in die Tideelbe, die großen Tiefgänge der Schiffe und die hydrodynamischen Begebenheiten vor Ort ist eine stetige Unterhaltung der Liegeplätze notwendig. Die Hafengebiete der Anlage von Stade-Bützfleth sind nicht durchströmt, sodass in den mittleren Tidehochwasser- (MTH<sub>w</sub>-) Bereichen und parallel zu den Zufahrtsbrücken wasserberuhigte Zonen mit starker Sedimentablagerung entstanden sind /4/.

Die Unterhaltung der erforderlichen Tiefen in den 3 relevanten Baggerbereichen: Nordhafen, Südhafen und elbseitiger Anleger in Stade-Bützfleth erfolgt durch Schlepper und einer sogenannten pneumatischen Egge, die bei Bedarf an einen Schlepper angehängt wird. Im folgenden Abschnitt wird das Verfahren des Luftteggens genauer beschrieben, gefolgt von der Festlegung der Eggzeiten und der Bestimmung der Mobilisierungsraten für die nachfolgenden Berechnungen.

#### 4.1.1 Prinzip

Die Aufgabe der hydraulischen Egge (Abbildung 4.1) besteht darin, ausreichende nautische Tiefen der Hafengebiete im Gebiet Stade-Bützfleth zu gewährleisten.

An einem schlittenähnlichen Rohrrahmen sind zueinander geneigte fast senkrecht stehende Bleche und innenliegende Seitenbleche eingeschweißt, die im Vortrieb das einströmende Wasser-Schlick-Gemisch den Fächern zuführen. Mit Hilfe der an der Rückwand des Schlittens angeordneten Luft-Wasser-Düsen wird das Gemisch weiter verwirbelt. Die Schlickpartikel werden durch die Formgebung der Einzelfächer (Wirbelkammern) und durch die eingepresste Druckluft in höhere Stromlagen transportiert und somit an der möglichen Ablagerung an der Hafensohle gehindert. Die für die Druckluft, das Druckwasser und die Führung der Egge erforderlichen Geräte sind an Bord des Schleppers oder eines mitgeführten Pontons installiert, ebenso wie die benötigten Zug-, Hubseile, Ausleger, Motor- und hydraulischen Winden /4/.



Abbildung 4.1. Pneumatische Egge im Hafen Stade-Bützfleth. Oben links: Egge auf dem Ponton, oben rechts: Schleppverband mit Eggponton und Egge, unten links: Gesamtansicht der Egge, unten rechts: Nahansicht der Egge mit ihren Komponenten.

Abbildung 4.1 zeigt die Bauweise der Luftegge sowie deren Einsatz am Schlepper. Die Luftegge mit einer Arbeitsbreite von 7m ist an einem Ponton befestigt, wobei die Tiefenführung über einen Galgen mittels Elektrowinde, die über die Brücke fernbedient werden kann, erfolgt. Der Schlepper kann den Ponton inklusive Egge mit einer Geschwindigkeit von 4,6 bis 5,1 Knoten (entspricht 2,37 bis 2,62 m/s) über die Hafensohle bewegen.

#### 4.1.2 Eggzeiten

Den Angaben von NPorts zufolge wird einmal im Monat eine Sohlpeilung im Hafengebiet Stade-Bützfleth vorgenommen, um den Unterhaltsbedarf in den Hafenbecken zu bestimmen, wobei der Südhafen durch die Flussströmung einen etwas größeren Unterhaltsbedarf hat als der Nordhafen. Der Schlepper inklusive Besatzung ist 24 h/Tag im Einsatz. Geeggt wird täglich je nach Verfügbarkeit des Schleppers, der weitere Aufgaben im Hafengebiet übernimmt, wie das Schleppen der Schiffe in den Hafen, Löschbereitschaft bzw. -einsätze auf dem Wasser.

Für die Monate Januar bis Dezember 2019 sowie Januar bis August 2020 wurden die Eggzeiten im Nord- bzw. Südhafen aufgezeichnet. Aus dem Jahr 2019 liegen wöchentliche Aufzeichnungen vor, wobei nicht zwischen den Flut- und Ebbphasen unterschieden wurde. Im Jahr 2020 wurden tägliche Eggzeiten während der Flut- und Ebbphase erfasst und ausgewertet.

Für die Untersuchungen wurden Monate des Sommerhalbjahres gegenüber den Monaten des Winterhalbjahres vorgezogen, da in den Sommermonaten allgemein von einem geringen Abfluss der Elbe auszugehen ist. Es ist tendenziell

von höheren Sedimentationen als im Winterhalbjahr auszugehen, der so ermittelte Sedimenttransport ergibt daher höhere Konzentrationen in der Wassersäule. Die Wahl der Sommermonate für die Untersuchung führt somit zu konservativeren Ergebnissen.

Eine Zusammenfassung der Unterhaltungsdauern für die Monate Mai bis August 2019 sowie 2020 im Nord- bzw. Südhafen zeigt Tabelle 4.1. Tabelle 4.2 beinhaltet die prozentuale Verteilung der Unterhaltungszeiten während der Ebb- bzw. Flutphasen. Die Aussage der Tabelle entspricht den Aussagen von NPorts, dass prinzipiell zu jeder Zeit geeeggt werden kann, die Ebbphase aber bevorzugt werden, weil dabei das aufgewirbelte Sediment am effektivsten aus dem Hafenbecken gespült werden kann.

Tabelle 4.1. Unterhaltungsdauern [h] durch die Egge im Nord- und Südhafen sowie für die Monate Mai bis August der Jahre 2019 und 2020.

<b>Jahr 2020</b>	<b>Eggzeiten [h]</b>			<b>Jahr 2019</b>	<b>Eggzeiten [h]</b>		
<b>Monat</b>	<b>Nord</b>	<b>Süd</b>	<b>Gesamt</b>	<b>Monat</b>	<b>Nord</b>	<b>Süd</b>	<b>Gesamt</b>
Mai	78	131	209	Mai	32	128,5	160,5
Juni	41	128,5	169,5	Juni	41,8	76	117,8
Juli	41,5	47,5	89	Juli	26	87,5	113,5
August	46	44	90	August	41,5	143	184,5

Tabelle 4.2. Prozentuale Verteilung der Unterhaltungszeiten während der Ebb- und der Flutphase im gesamten Hafenbereich.

<b>Jahr 2020</b>	<b>Ebbphase [%]</b>	<b>Flutphase [%]</b>
Mai	63	37
Juni	58	42
Juli	53	47
August	57	43
Gesamt	62	38

### 4.1.3 Mobilisierungsraten

Der Berechnung der Sedimentations- und Mobilisierungsraten liegen Peildaten aus den Monaten Mai, Juni, Juli und August des Jahres 2019 zugrunde. Abbildung 4.2 zeigt die Sohlagen des Südhafenbeckens zu den Zeitpunkten der Peilungen der Monate Mai, Juni, Juli und August 2019. Aus den Differenzen der Peilungen, also den Sohländerungen zwischen den Monaten August und Juli, Juli und Juni sowie Juni und Mai Abbildung 4.3, können jeweils ein mobilisiertes

Volumen und eine geeegte Fläche berechnet werden (siehe Tabelle 4.3 und Tabelle 4.4).

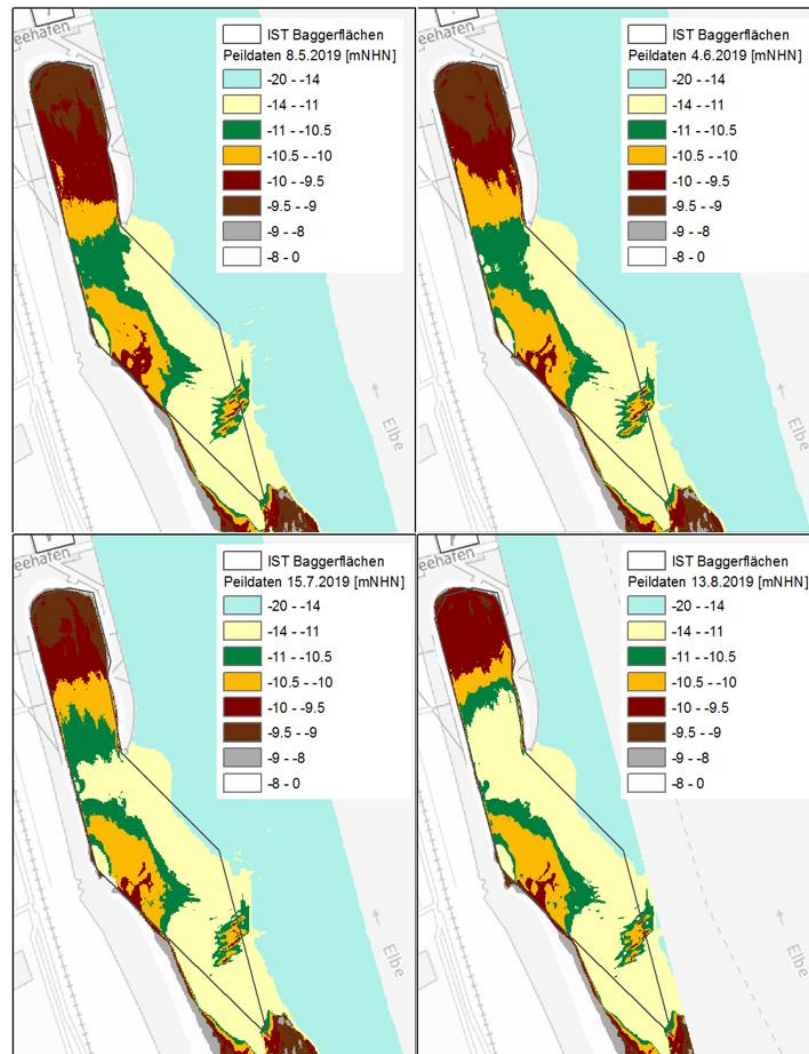


Abbildung 4.2. Gemessene Sohlhöhen der Peilungen in den Monaten Mai, Juni, Juli und August 2019.

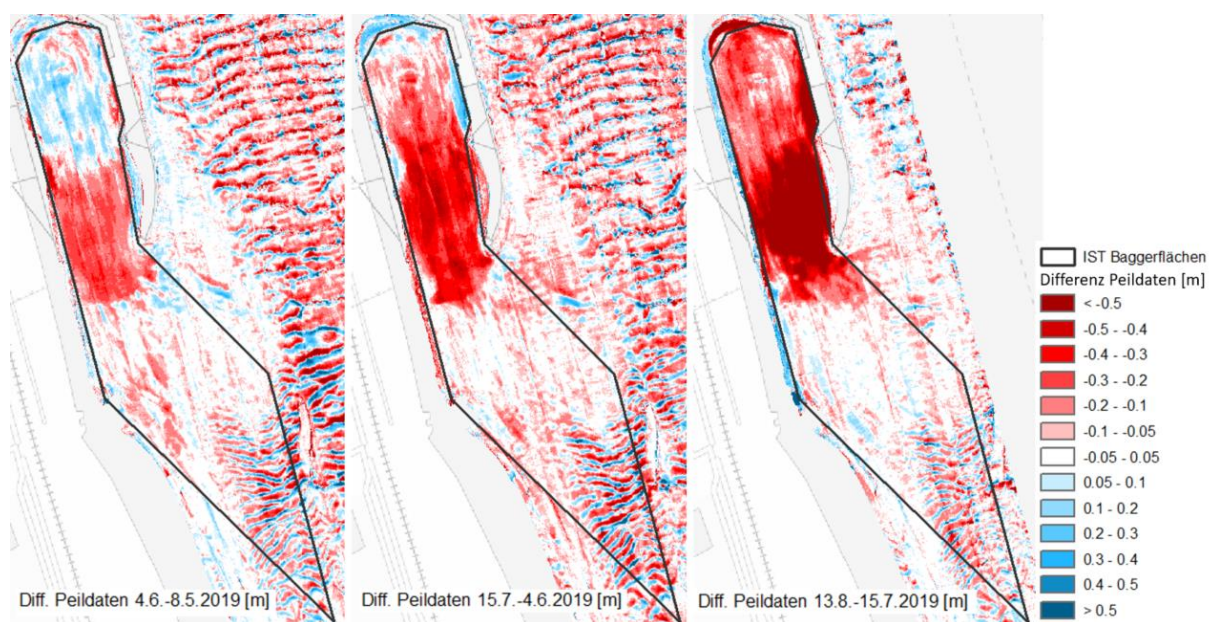


Abbildung 4.3. Gemessene Sohländerung im Südhafen Stade-Bützfleth, links: zwischen den Peilungen 4.6. – 8.5.2019, mittig: zwischen den Peilungen 15.7. – 4.6.2019, rechts: zwischen den Peilungen 13.8. – 15.7.2019.

Die Unterhaltungsdauern der einzelnen Monate aus Tabelle 4.1 werden für die Berechnung der Mobilisierungsraten auf die Unterhaltungsdauern zwischen den Peilungen präzisiert. Tabelle 4.3 und Tabelle 4.4 zeigen jeweils für den Süd- und den Nordhafen die zusammengefassten Berechnungsgrundlagen für die Mobilisierungs- und Sedimentationsraten für die Zeiträume Mai-Juni, Juni-Juli und Juli-August.

Tabelle 4.3. Berechnungsgrundlagen für den Südhafen, bestehend aus den Unterhaltungsdauern, den Dauern zwischen den Peilungen der Monate Mai, Juni, Juli und August 2019, dem mobilisierten Volumen sowie der entsprechenden Fläche.

Eggzeiten zwischen den Peilungen/Kalenderwoche		Dauer Eggen Süd $t_{E,Süd}$ [h]	Dauer zwischen den Peilungen $t_{P,Süd}$ [h]	Anteil Süd [-]	Volumen Süd $dV_{Süd}$ [m <sup>3</sup> ]	Mobilisierungsfläche Süd $A_{E,Süd}$ [m <sup>2</sup> ]
Mai-Juni	KW 19-22	112	648	0,17	-4179	66267
Juni-Juli	KW 23-28	106,5	984	0,11	-13373	88908
Juli-August	KW 29-32	115,5	696	0,17	-22598	87667

Tabelle 4.4. Berechnungsgrundlagen für den Nordhafen, bestehend aus den Unterhaltungsdauern, den Dauern zwischen den Peilungen der Monate Mai, Juni, Juli und August 2019, dem mobilisierten Volumen sowie der entsprechenden Fläche.

Eggzeiten zwischen den Peilungen/Kalenderwoche		Dauer Eggen Nord $t_{E,Nord}$ [h]	Dauer zwischen den Peilungen $t_{P,Nord}$ [h]	Anteil Nord [-]	Volumen Nord $dV_{Nord}$ [m <sup>3</sup> ]	Mobilisierungsfläche Nord $A_{E,Nord}$ [m <sup>2</sup> ]
Mai-Juni	KW 19-22	34,5	648	0,05	-2137	33857
Juni-Juli	KW 23-28	45,8	984	0,05	-18791	58799
Juli-August	KW 29-32	27,5	696	0,04	2482	27260

Aus den Daten Tabelle 4.3 und Tabelle 4.4 können mit der folgenden Gleichung die mittlere Sedimentations- und Mobilisierungsrate im Nord- sowie im Südhafen berechnet werden. Die Formel wird für jeden der drei betrachteten Zeiträume aufgestellt, kann nach S umgestellt, in die Gleichung des nächsten Zeitraumes eingesetzt, nach M aufgelöst und daraus die Mobilisierungsrate für alle Zeiträume berechnen.

$$dV = t_p S A_p - t_E M A_E$$

Mit:

$dV$	Mobilisiertes Sedimentvolumen [m <sup>3</sup> ]
$t_p$	Dauer zwischen zwei aufeinander folgenden Peilungen [h]
$S$	Mittlere Sedimentationsrate [m/h]
$A_p$	Gesamtfläche des Hafenbeckens [m <sup>2</sup> ]
$t_E$	Eggdauer [h]
$M$	Mittlere Mobilisierungsrate [m/h]
$A_E$	Geegte Fläche [m <sup>2</sup> ]

Für den Nord- und den Südhafen ergeben sich die folgenden berechneten Kennwerte (Tabelle 4.5).



Tabelle 4.5. Berechnete Sedimentations- und Mobilisierungsraten sowie die mittlere Eintiefung und Sedimentation im Nord- und Südhafenbecken.

Berechnete Kennwerte	Nordhafen	Südhafen
Sedimentationsrate (natürlich und nach Eggen) [m/h]	0,0002 bis 0,0004 m/h	0,0015 bis 0,0008 m/h
Mobilisierungsrate der Egge [m/h]	0,0169 bis 0,0095 m/h	0,0154 bis 0,0084 m/h
Eggdauer (Sommer 2019)	5% der Zeit	15 % der Zeit
Mittlere Eintiefung infolge Eggen [m]	-0,08 bis -0,33 m	-0,11 bis -0,27 m
Mittlere Sedimentation (überlagert mit Eggen) [m]	0,09 bis 0,11 m	0,06 bis 0,07 m

## 4.2 Hydromorphologisches 3D-Modell der Elbe

Das vorliegende hydronumerische 3D-Tideelbemodell mit Peildaten von 2016 (DGM-W-2016, /3/) wird als Grundlage für die nachstehenden Untersuchungen herangezogen (Abbildung 4.4). Das Modell umfasst den tidebeeinflussten Bereich der Elbe vom Wehr Geesthacht bei Elbekilometer 586 (Oberstrom) bis zum Steinriff bei Elbekilometer 724 (Unterstrom) und erfasst somit eine Länge von 138 Flusskilometern. Im Rahmen der vorangegangenen hydromorphologischen Untersuchung des AvG Stade Bützfleth /3/ wurde bereits das Hafentlayout integriert sowie das Modellnetz verfeinert, um die Hafentstrukturen ausreichend genau abzubilden. Seitens des Auftraggebers bereitgestellte aktuelle Peildaten aus dem Jahr 2019 im Bereich des Südhafens des bestehenden Hafenbeckens wurden eingebunden. Das so aufbereitete Modell beschreibt den Istzustand.

Der Planzustand des Modells beinhaltet zusätzlich die Solltiefen der planfestgestellten Elbvertiefung in der Delegationsstrecke ab Hamburger Hafen bis Wedel (Solltiefen ab -17,4 bis -17,3 mNHN) und der Delegationsstrecke unterhalb Wedel bis zur Elbemündung in die Nordsee (Solltiefen ab -17,3 mNHN bis -18,95 mNHN).

Die folgenden Abschnitte stellen die Modellsoftware für die Hydrodynamik und den Sedimenttransport vor. Anschließend sind der Modellaufbau und die Modellgenauigkeit beschrieben. Weiterhin ist die Validierung des Lufteggens im Modell dargestellt.

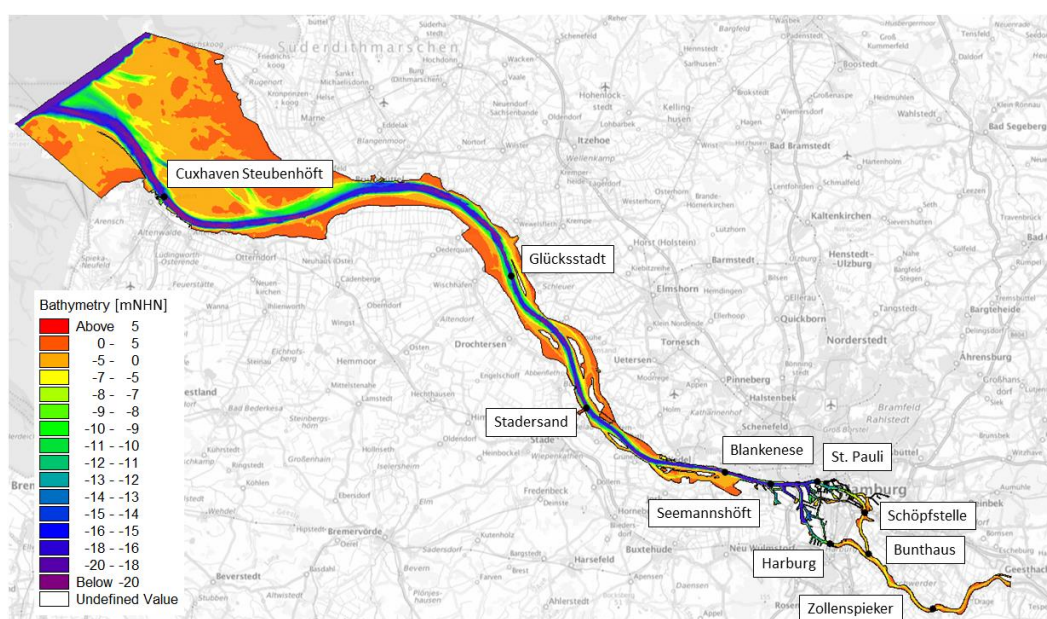


Abbildung 4.4. Tideelbemodell von Geesthacht (oberstrom) bis Steinriff (unterstrom) mit Pegelstandorten.

#### 4.2.1 Software MIKE 3 Flow Model FM für drei-dimensionale hydrodynamische Modellierung von Oberflächengewässern

Das MIKE 3-Programmsystem<sup>1</sup> wurde speziell für die Modellierung von 3-dimensionalen (3D), instationären Strömungsprozessen in Ästuaren und Fließgewässern entwickelt. Die Software basiert auf der Lösung partieller Differenzialgleichungen für inkompressible Flüssigkeiten mit wahlweise hydrostatischem (Flachwassergleichungen) oder nicht-hydrostatischem (Navier-Stokes-Gleichungen).

Zur Berechnung der hydrodynamischen Prozesse werden in den Gleichungen u.A. folgende Einflüsse berücksichtigt:

- Gezeitenströmungen
- Einfluss von Auftrieb und Schichtung auf Grund unterschiedlicher Dichten
- Turbulente Diffusion, Advektion und Dispersion
- Variable Bathymetrien und Sohlrauheiten
- Überflutung und Trockenfallen von gezeitenbeeinflussten Bereichen
- Sohlrauheit nach Nikuradse
- Effekte von Zuflüssen und Rückgabebauwerken
- Turbulenz mit einem gemischten k-ε Modells im vertikalen und einen Smagorinsky-Ansatz in der Horizontalen
- Wirkung von Wind, Salinität oder Temperatur
- Wirkung der Spundwände auf die Hydromorphologie
- Wirkung der Pfeiler auf die Hydromorphologie

Beispielhaft sind hier die Gleichungen für den hydrostatischen Druckansatz wiedergegeben, der in diesem Projekt zur Anwendung kam.

<sup>1</sup> <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21-3>

Die 3D-Kontinuitätsgleichung lautet:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S$$

Unter der Verwendung von kartesischen Koordinaten lauten die zwei horizontalen Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen für die x- und y-Komponenten:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} &= f \cdot u - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} \\ &\quad - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_t \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} &= f \cdot v - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} \\ &\quad - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_t \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \end{aligned}$$

Mit:

$x, y, z$	Kartesische Koordinaten
$u, v, w$	Strömungsgeschwindigkeitskomponenten in x, y, z Richtung [m/s]
$\nu_t$	Wirbelviskosität [m <sup>2</sup> /s]
$t$	Zeit [s]
$f$	Coriolisbeschleunigung = $2\Omega \sin \phi$
$\eta$	Lage der Gewässeroberfläche
$g$	Erdbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]
$\rho_0$	Referenzdichte des Wassers [kg/m <sup>3</sup> ]
$p_a$	Atmosphärischer Druck [N/m <sup>2</sup> ]
$S$	Betrag des Zuflusses aus Punktquellen [m <sup>3</sup> /s/m <sup>3</sup> ]
$u_s, v_s$	Einleitgeschwindigkeit an der Punktquelle [m/s]

Für die Abbildung des Fließwiderstandes an der Sohle kann zwischen den empirischen Ansätzen des Chezy-Koeffizienten  $C$ , der Mannings' Rauheit  $n$  oder der Nikuradse Rauheit  $k_n$  bzw. als äquivalente Sandrauheit  $k_s$ , gewählt werden.

Die Wirbelviskositäten  $\nu_t$  können als konstanter Wert, als zeitveränderliche Funktion der lokalen Gradienten der Strömungsgeschwindigkeiten (Ansatz nach Smagorinsky) oder als Ergebnis eines gemischten  $k$ - $\varepsilon$  Modells (1D- $k$ - $\varepsilon$ -Modell in

der Vertikalen und des Smagorinsky-Ansatzes in der Horizontalen) angegeben werden.

Die räumliche Diskretisierung wird mit Hilfe der elementzentrierten Finite-Volumen-Methode vorgenommen. Die Topographie und Bathymetrie wird in der Ebene in ein unstrukturiertes Netz aus dreieckigen und viereckigen Elementen diskretisiert. Die vertikale Auflösung erfolgt strukturiert nach der  $z$ -,  $\sigma$ - oder der kombinierten  $\sigma$ - $z$ -Methode.

Bei der  $z$ -Methode wird die Gesamtwassersäule in Schichten sogenannte Layer mit gleichbleibender Mächtigkeit aufgeteilt. Die vertikalen Elemente können innerhalb der Wassersäule unterschiedlich mächtig definiert werden, variieren aber weder räumlich noch zeitlich.

Mittels der  $\sigma$ -Methode wird die vertikale Diskretisierung auf Basis der vertikalen Ausprägung der Wasserspiegeloberfläche und der Sohltopographie realisiert (Abbildung 4.5). D.h. die Mächtigkeit der vertikalen Elemente variiert je nach Wassertiefe.

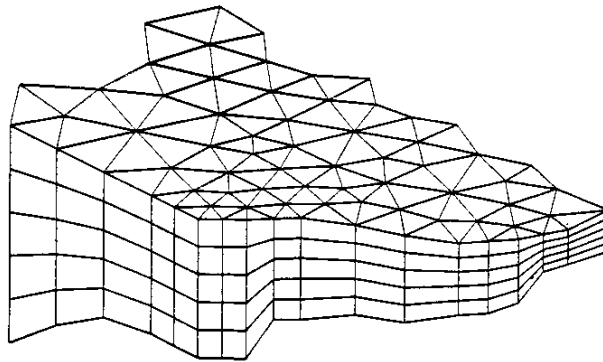


Abbildung 4.5. Prinzip eines 3D-Netzes nach  $\sigma$ -Methode.

Bei der  $\sigma$ - $z$ -Methode können beide Vorgehen miteinander kombiniert werden. Teile der Wassersäule können mit einer gleichbleibenden vertikalen Elementgröße definiert werden, während andere Teile der Wassersäule in ihrer vertikalen Elementgröße variieren.

#### 4.2.2 MT-Modul für Feinsedimenttransport

Das Feinsediment-Transport-Modul (MIKE21/3 FM MT)<sup>2</sup> dient zur numerischen Abbildung von kohäsiven und nicht-kohäsiven Sedimenttransportprozessen und der zugehörigen morphologischen Veränderung an der Gewässersohle.

Neben dem advektiven und diffusiven Sedimenttransport in der Wassersäule, bildet das MT-Modul den vertikalen Austausch zwischen Sedimenten in der Wassersäule und an der Gewässersohle, als auch die zeitliche Veränderung der Sedimente an der Gewässersohle mittels eines schichtenbasierten Evolutionsprozesses ab. Das MT-Modul ist dabei ein additives Modul und erfordert eine Kopplung zur Hydrodynamik MIKE21/ 3 HD (und dessen Gleichungslöser) MIKE21/ 3 HD und zum Transportprozess passiver Komponenten in MIKE21/3 AD FM (und dessen Gleichungslöser).

<sup>2</sup> <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21/sediments/mud-transport>

Für die hier vorliegenden sandigen und kohäsiven (schluffigen) Sedimente ist das MT-Modul besonders geeignet, da es sowohl sandige als auch mehrere kohäsive Fraktionen in ihrer Sediment- und Morphodynamik erfassen kann. Folgende physikalische Prozesse werden mit dem MT-Module berücksichtigt:

- Überlagerung strömungsinduzierter Schubspannungen
- Sedimenttransport für mehrere Fraktionen, kohäsives und nicht kohäsives Sediment
- Flockenbildung infolge Schwebstoffkonzentration
- Effekte infolge vertikaler Dichteschichtung
- Behindertes Absinken
- Morphologische Veränderung der Gewässersohle
- Beschreibung der Sedimente an der Gewässersohle in mehreren Schichten
- Konsolidierungsprozesse

Die beschriebenen physikalischen Prozesse dienen zur Abbildung morphodynamischer Prozesse in Küsten- oder Fließgewässern.

Der 3D-Sedimenttransport in der Wassersäule lautet in allgemeiner Form:

$$\frac{\partial c^i}{\partial t} + \frac{\partial uc^i}{\partial x} + \frac{\partial vc^i}{\partial y} + \frac{\partial wc^i}{\partial z} - \underbrace{\frac{\partial w_s c^i}{\partial z}}_{\text{Absinken}} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v_{Tx}}{\sigma_{Tx}^i} \frac{\partial c^i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{v_{Ty}}{\sigma_{Ty}^i} \frac{\partial c^i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v_{Tz}}{\sigma_{Tz}^i} \frac{\partial c^i}{\partial z} \right) + \underbrace{S^i}_{\text{\&Quellen- \&Senken- \&term}}$$

Mit:

$x, y, z$	Kartesische Koordinaten
$u, v, w$	Strömungsgeschwindigkeitskomponenten in x, y, z Richtung [m/s]
$t$	Zeit [s]
$c^i$	Massenkonzentration bzw. Schwebstoffkonzentration [g/m <sup>3</sup> ]
$w_s$	Sinkgeschwindigkeit [m/s]
$\sigma_{Tx}^i, \sigma_{Ty}^i, \sigma_{Tz}^i$	Turbulente Schmidtzahl $\sigma_T^i = \frac{v_T}{D_T^i}$ [-]
$D_T^i$	turbulenter Diffusionskoeffizient [m <sup>2</sup> /s]
$v_{Tx}, v_{Ty}, v_{Tz}$	anisotrophischer Wirbelviskositätskoeffizient [m <sup>2</sup> /s]
$S^i$	Quellterm [g/m <sup>3</sup> /s]

Die horizontalen und vertikalen Diffusionskoeffizienten können mit verschiedenen empirischen Ansätzen analog zur Hydrodynamik berücksichtigt werden.

Zur Lösung der Transportgleichung werden zunächst die advektiven-diffusiven Terme gelöst und somit der Schwebstofftransport als passive Komponente betrachtet. Der kohäsive Sedimenttransport ist hierbei an das hydrodynamische 3D-Modul MIKE 3 Low Model FM (siehe Abschnitt 4.2.1) gekoppelt. Die

Rückwirkung auf die Hydrodynamik geht dabei über die Fluidichte und die Verformung der kinematischen Viskosität mit ein:

$$\rho_{\text{Sus}} = \rho_{\text{W}} + c \left( 1 - \frac{\rho_{\text{W}}}{\rho_{\text{S}}} \right)$$

Mit:

$c$	Schwebstoffkonzentration [g/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{W}}$	Wasserdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{S}}$	Sedimentdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{Sus}}$	Suspensionsdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$w_{\text{S}}$	Sinkgeschwindigkeit [m/s]

Die Quellen- und Senkenterme werden in einer Splittingmethode separat gelöst. Beide Terme werden zusammen mit den vertikalen Austauschprozessen an der Sohle und deren Update im MT-Modul gelöst.

Alle nachfolgend beschriebenen Parameter werden für die definierten Fraktionen genutzt.

Für die Erosionsraten wurde der lineare Ansatz für konsolidierte, verfestigte Böden nach Partheniades (1965) selektiert:

$$S_{\text{ero}} = \beta_{\text{ero}} \left( \frac{\tau_0}{\tau_{0,\text{ero}}} - 1 \right) \quad \text{für } \tau_0 > \tau_{0,\text{ero}}$$

Mit:

$\beta_{\text{ero}}$	Erodibilitätsfaktor ~ 2,3 10 <sup>-3</sup> bis 6,6 10 <sup>-5</sup> [g/m <sup>2</sup> /s]
$\tau_{0,\text{ero}}$	kritische Erosionsschubspannung [N/m <sup>2</sup> ]
$S_{\text{ero}}$	Erosionsrate [g/m <sup>2</sup> /s]
$\tau_0$	Schubspannung [N/m <sup>2</sup> ]

Die Koeffizienten, wie der Erodibilitätsfaktor  $\beta_{\text{ero}}$  und die Erosionsschubspannung  $\tau_{0,\text{ero}}$ , sind jeweilig sedimentspezifische Größen.

Für die Depositionsrate wird der Ansatz nach Krone (1962) in fraktionierter Form beschrieben zu:

$$D^i = w_{\text{S}}^i \cdot c_b^i \cdot \left( 1 - \frac{\tau_0}{\tau_{c,\text{dep}}^i} \right) \quad \text{für } \tau_0 \leq \tau_{c,\text{dep}}$$

Mit:

$i$	Fraktion (Index) [-]
-----	----------------------

$\tau_{c,dep}^i$	kritische Depositionsschubspannung [N/m <sup>2</sup> ]
$w_s^i$	Sinkgeschwindigkeit [m/s]
$D^i$	Depositionsrate [kg/m <sup>2</sup> /s]
$c_b^i$	Schwebstoffkonzentration in Sohlhöhe [kg/m <sup>3</sup> ]

Die Schwebstoffkonzentration in Sohlhöhe wird nach Rouse parametrisiert.

Die Sinkgeschwindigkeit  $w_s^i$  wird mittels dreier Teilfunktionen beschrieben:

- eine konstante Sinkgeschwindigkeit  $w_s^i$  für Schwebstoffkonzentration unter der Flockenbildungskonzentration ( $c_{floc} = 10$  mg/l)
- eine nichtlineare Sinkgeschwindigkeit (Übergangsbereich) für Schwebstoffkonzentration über der Flockenbildungskonzentration und unter der Grenzkonzentration für ein behindertes Absinken ( $c_{hinder} = 10$  g/l)
- eine nichtlineare Sinkgeschwindigkeit für Schwebstoffkonzentration über der Grenzkonzentration für ein behindertes Absinken ( $c_{hinder} > 10$  g/l)

Die Sinkgeschwindigkeit für den Übergangsbereich zwischen der Flockenbildungskonzentration und unter der Grenzkonzentration für ein behindertes Absinken ( $c_{hinder} = 10$  g/l) wird nach Burt (1986) formuliert zu:

$$w_s = k \cdot c^\gamma \text{ für } 10 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \cong c_{floc} < c < c_{hinder} \cong 10 \frac{\text{g}}{\text{l}}$$

Mit:

$w_{s,r}$	Referenzsinkgeschwindigkeit [m/s]
$c_{gel}$	Grenzswebstoffkonzentration zur Gelbildung [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_s$	Sedimentdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$\Phi_p$	Relative Schwebstoffdichte zur Partikeldichte [-]
$\Phi_* \leq 1$	Relative Schwebstoffdichte zur Gelbildung [-]

Für die Sohlevolution nimmt die vertikale Definition der Sedimenteigenschaften über die Tiefe eine wichtige Rolle ein. Diese werden als Bodenlayermodell beschrieben. Neben einer vertikalen Diskretisierung der Sedimente und deren charakteristischer Eigenschaften wie der kritischen Erosionsschubspannung, des Erodibilitätsfaktors und der Bulkdicke des Sohlmaterials können auch Konsolidierungsprozesse (Ansätze von Teisson et al. (1992) und Sanford und Maa (2001)) mitberücksichtigt werden. Für die vertikale Schichtung wird konzeptionell und im physikalischen Verhalten zwischen drei Schichtarten differenziert, die in Abbildung 4.6 gezeigt sind.

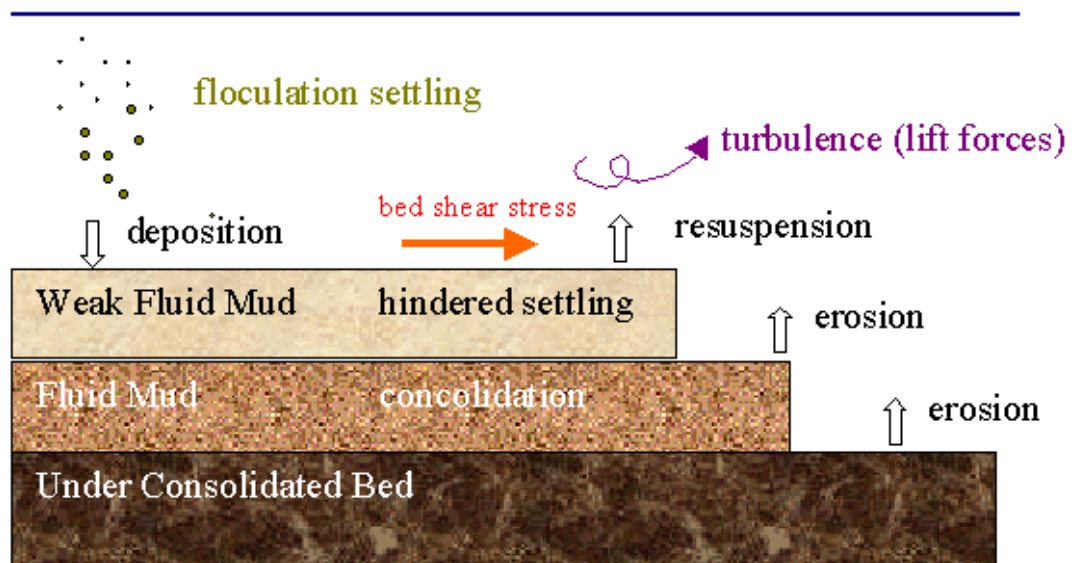


Abbildung 4.6. Schematische Darstellung der berücksichtigten Prozesse und der Layerdifferenzierung über die Sedimenttiefe im MT-Modul.

#### 4.2.3 Modellaufbau

In diesem Abschnitt werden nur die Daten und Modellgrundlagen beschrieben, die für die Modellierung der Sedimentverdriftung angepasst wurden. Weiterführende Informationen zum Modellgitter, zur vertikalen Auflösung, zur Berücksichtigung der Spundwände und Pfeiler zu den Randbedingungen der Hydrodynamik und Morphologie können dem hydromorphologischen Gutachten zum AvG Stade-Bützfleth /3/ aus Kapitel 4 und 5 entnommen werden.

##### 4.2.3.1 Bathymetrie

Die Kalibrierung der Baggerraten erfolgte mit dem Modellnetz des Istzustandes aus dem hydromorphologischen Gutachten. Das Berechnungsgitter wurde im bestehenden Nord- und Südhafen auf Peildaten des 15.07.2019 interpoliert, um die Sohländerungen zwischen den vorliegenden Peilungen vom 15.07.2019 und 13.08.2019 im Modell nachzubilden (Abbildung 4.7).



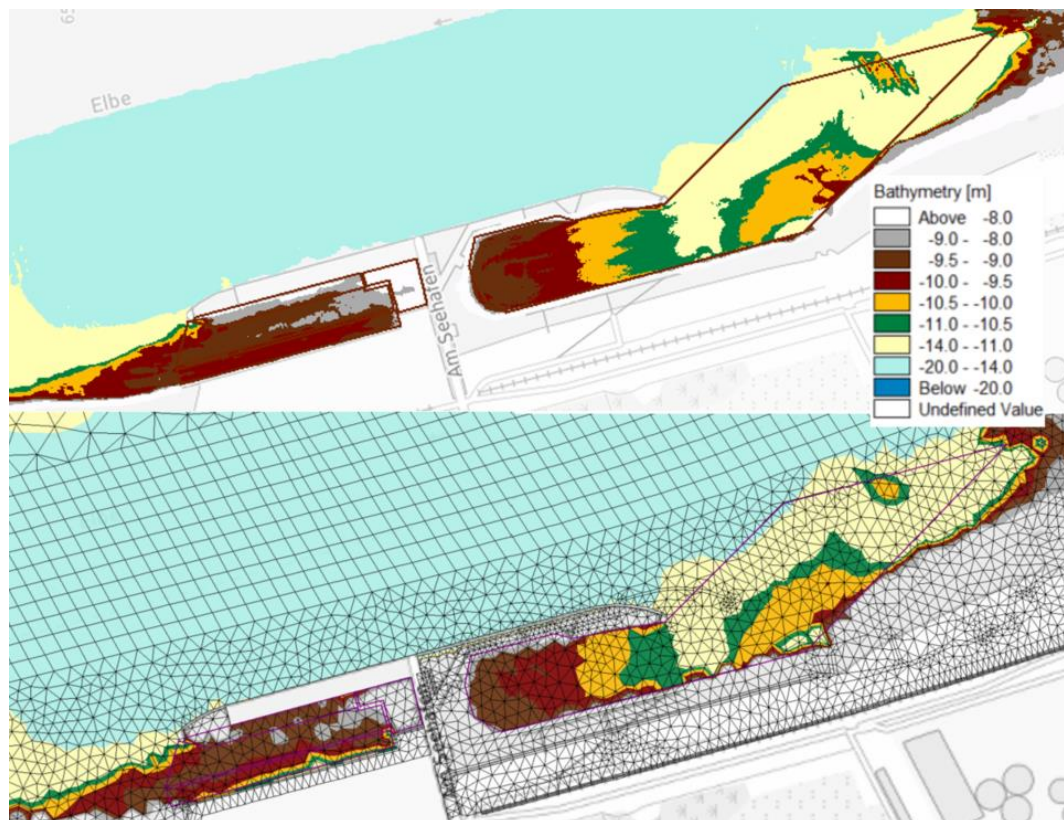


Abbildung 4.7. Oben: Peildaten vom 15.07.2019, unten: Peildaten vom 15.07.2019 im Modellnetz.

#### 4.2.3.2 Randbedingungen

Die Randbedingungen, die in Form von Zeitreihen in das Modell eingehen, werden auf den Modellzeitraum Juli-August 2019 angepasst. Dies betrifft folgende Randbedingungen:

- Die Wasserstände am unteren Modellrand am Elbe km 738 (Interpolation der Wasserstände und Zeitversatz zwischen den Pegeln Cuxhaven Steubenhöft und Bake C) (Abbildung 4.8 oben)
- Die Wasserstände an den Sperrwerken der Pinnau und der Schwinge (Abbildung 4.8 oben)
- Den Abfluss am oberen Modellrand der Station Neu Darchau (Abbildung 4.8 oben)
- Die Windgeschwindigkeit und -richtung der Messstation Cuxhaven (Abbildung 4.8 Mitte)
- Die Schwebstoffgehalte am oberen Modellrand der Station Hitzacker (Abbildung 4.8 unten)

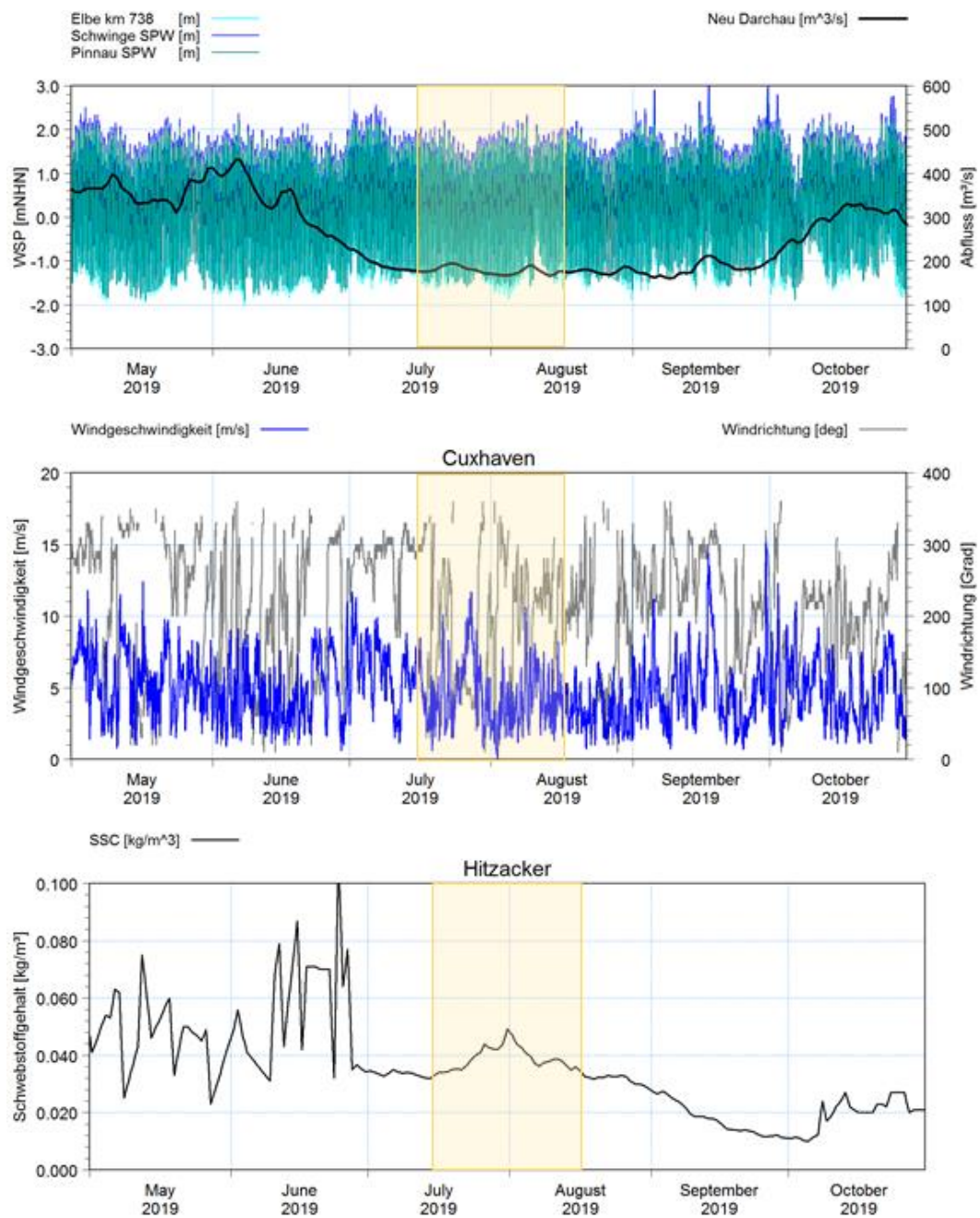


Abbildung 4.8. Randbedingungen des Elbmodells, oben: Wasserstände und Abfluss, Mitte: Windgeschwindigkeit und -richtung an der Station Cuxhaven, unten: Schwebstoffgehalte an der Station Hitzacker.

#### 4.2.3.3 Rauheitshöhe

Die Bodenrauheit ist mit Hilfe des Parameters Rauheitshöhe abgebildet. Die räumliche Verteilung der Rauheitshöhe im Modellgebiet ist in Abbildung 4.9 dargestellt.

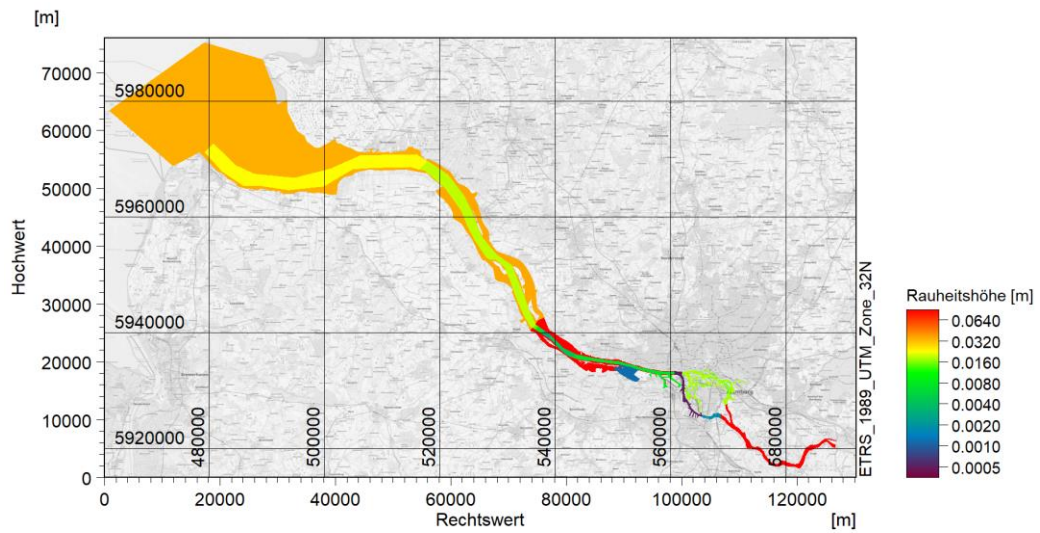


Abbildung 4.9. Räumliche Verteilung der Rauheitshöhe.

#### 4.2.3.4 Wirbelviskosität

Die Wirbelviskosität ist mit Hilfe der Smagorinsky-Formulierung im Modell berücksichtigt. Die räumliche Verteilung des Smagorinsky-Faktors ist in Abbildung 4.10 gegeben.

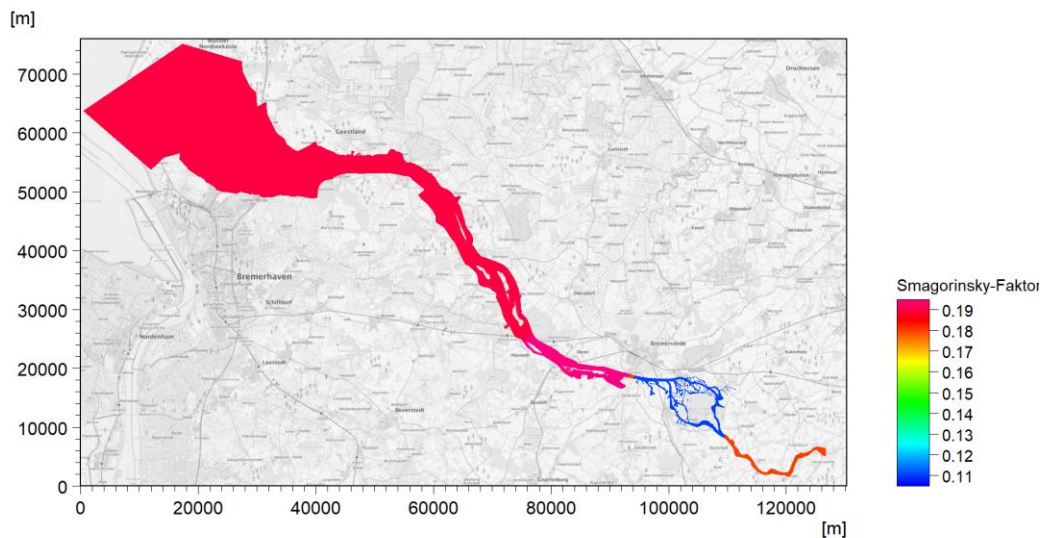


Abbildung 4.10. Räumliche Verteilung des Smagorinsky-Faktors.

#### 4.2.3.5 Sedimentologie

Die Verteilung der kritischen Sohlschubspannungen und der Sedimentdichte beruht auf der  $d_{50}$  Korngrößenverteilung im Modellgebiet. Diese beiden Faktoren wurden für die Modellierung der Sedimentverdriftung in Form von hinterlegten Karten angepasst.

Im Bereich des AvG und des bestehenden Hafenbeckens können Korngrößeninformationen an verschiedenen Entnahmepunkten verwendet werden. Im bestehenden Nord- und Südhafen liegen Greifer- und Ruttnerproben an sieben Entnahmepunkten vor, aus deren Korngrößenverteilungen die mittlere Korngröße  $d_{50}$  bestimmt werden kann. Abbildung 4.11 zeigt die Korngrößenverteilungen aus den Greiferproben und die Lage der Entnahmepunkte im Hafenbecken.

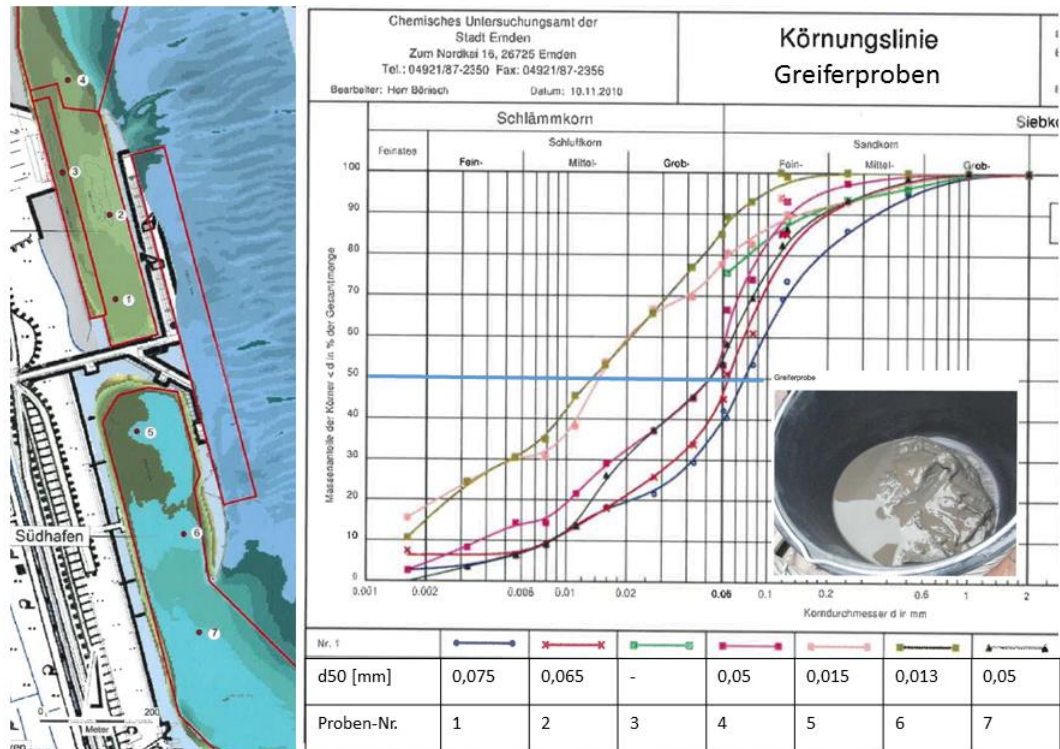


Abbildung 4.11. Bohrproben mit Bodeninformationen an verschiedenen Punkten des bestehenden Hafens Stade-Bützfleth.

Abbildung 4.12 zeigt die Lage der Entnahmepunkte im geplanten Hafenbecken des AvG mit den Sedimentkennzahlen, die im Modell die Lagerungsdichte und die kritische Schubspannung beeinflussen.

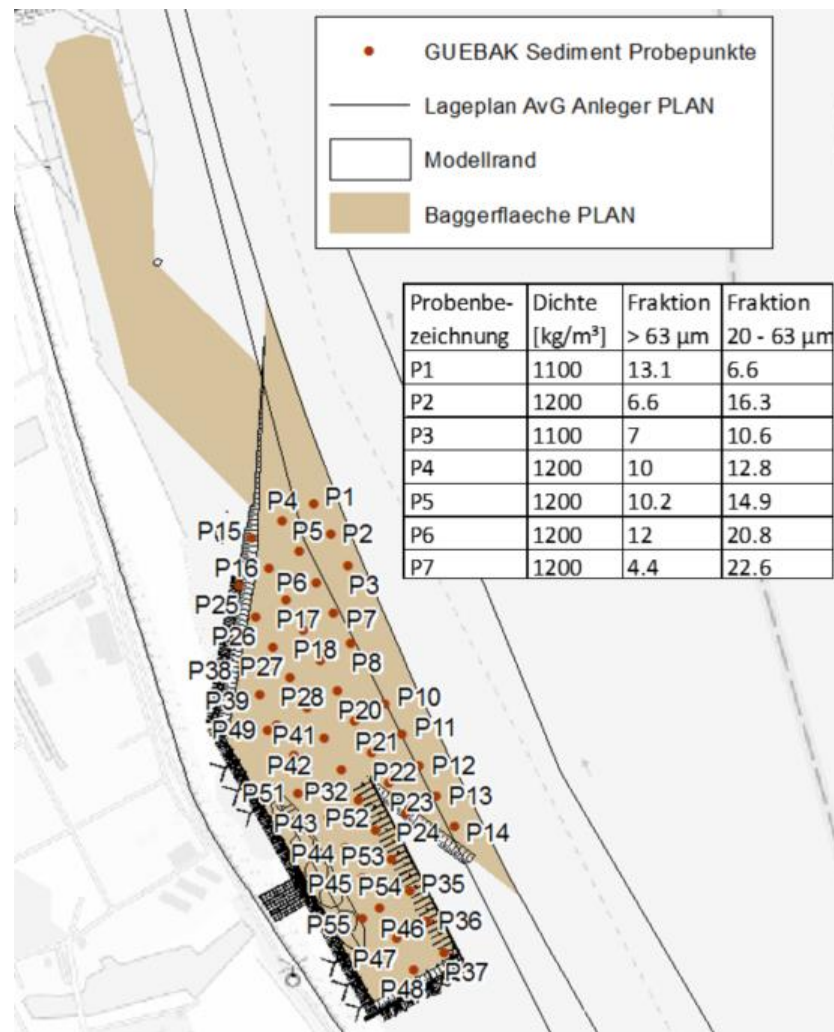


Abbildung 4.12. Probennahmepunkte im Bereich des geplanten AvG mit Sedimentkennzahlen beispielhaft an sieben Punkten.

Die aus den Bodeninformationen angepassten Verteilungen der kritischen Sohlschubspannung und der Lagerungsdichte sind in Abbildung 4.13 zu sehen. Besonders im geplanten Hafenbecken des AvG ergaben die Bodenprobennahmen größere Änderungen der beiden sedimentologischen Modellparameter.

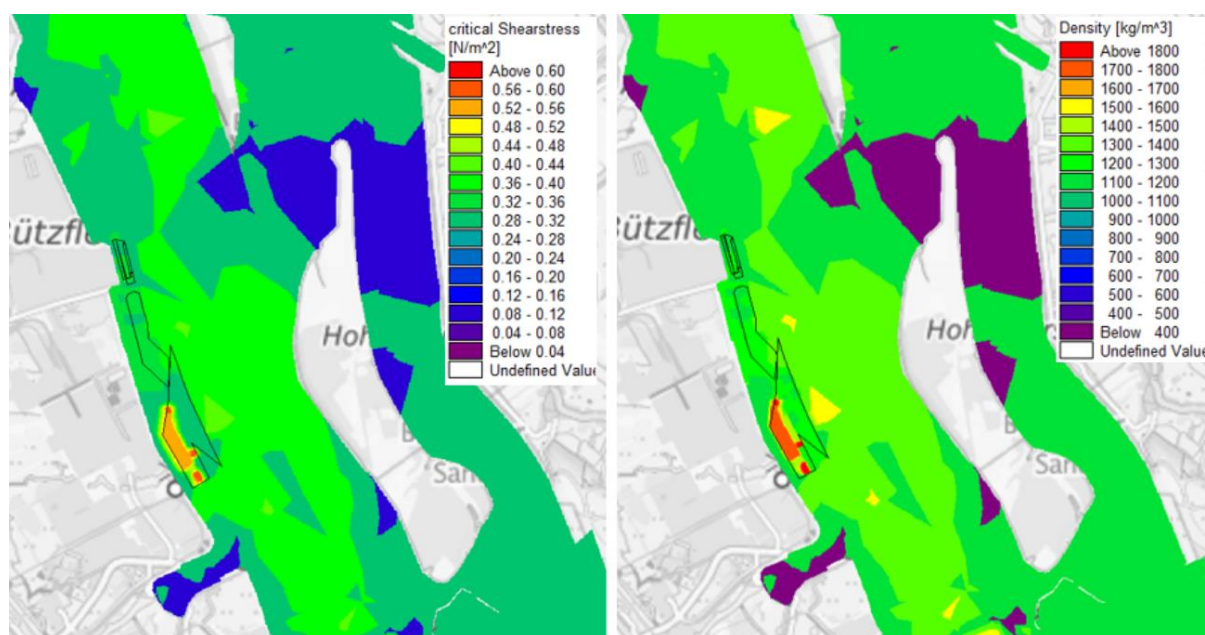


Abbildung 4.13. Verteilung der kritischen Sohlschubspannung („critical shearstress“) (links) und der Sedimentdichte („density“) (trockene Sedimentdichte) (rechts) im 3D-Modell.

Die flächigen Randbedingungen ohne zeitlichen Bezug, wie die Sohrrauheit  $k_s$  sowie die Turbulenzen über die Smagorinsky-Faktoren können direkt aus dem Modell des hydromorphologischen Gutachtens am AvG Stade-Bützfleth übernommen werden.

Neben den sedimentologischen Randbedingungen gehen in diesem Modell zusätzliche Daten für das Baggermodul ein. Das Eggen wird über eine Zeitreihe der Fahrtroute im Modell definiert. Diese Zeitreihe beinhaltet für jeden Punkt auf der Fahrtroute die genauen Koordinaten, die entsprechende Zeit des Erreichens des jeweiligen Punktes sowie eine sogenannte Bagger- und Überlaufrate pro Routenpunkt. Für die Überlaufrate kann aufgrund der Eigenheit der Luftegge, das Sediment lediglich aufzuwirbeln, statt dem System zu entnehmen, ein prozentualer Anteil von 100% angesetzt werden. Weiterführende Angaben zur Modellierung des Eggens sind in Abschnitt 4.2.5 zu finden. Die Baggertätigkeiten während der Bauphase waren nicht Bestandteil der numerischen Modellierung.

#### 4.2.4 Modellgenauigkeit

Für diese Untersuchung wurde das kalibrierte Elbe-Modell aus dem Vorgängerprojekt „Hydromorphologischen Gutachten am AvG Stade-Bützfleth“ /3/ übernommen.

Die Modellgenauigkeit wurde für einen Kalibrierzeitraum im Juli 2016 und für einen Validierungszeitraum im Oktober 2017 ausgewertet. Beide Zeiträume, mit je 2 Wochen, erfassten mit dem Juli 2016 häufige Abflussverhältnisse und mittlere Tiden und mit dem Oktober 2017 eine schwere Sturmflut. Für beide Zeiträume wurden jeweils gemessene Wasserstände, Strömungen, Abflüsse, Temperaturen, Salz- und Schwebstoffgehalte in der Elbe den simulierten Größen gegenübergestellt. Die Wasserstände wurden mit mittleren absoluten Abweichungen von weniger als 10 cm (2,7%), Strömungen mit mittleren Abweichungen von 0,27 m/s (18%), die Abflüsse mit mittleren Abweichungen

unter 30 m<sup>3</sup>/s (15%) bestimmt, was einer guten Modellgüte entspricht. Die Temperaturen wurden mit Abweichungen unter 0,9 °C (4,5%), die Salzgehalte mit mittleren Abweichungen von 1,6 PSU (27%) im Planungsraum und die Schwebstoffkonzentration mit mittleren Abweichungen unter 0,06 kg/m<sup>3</sup> (30%) bestimmt, was einer guten Modellgüte entspricht. Die simulierten Sohländerungen wichen von den gemessenen Änderungen im Hamburger Hafen leicht ab und lagen in der gleichen Größenordnung. Zusammenfassend wird von einer guten Modellgüte ausgegangen /3/.

#### 4.2.5 Validierung des Lufteggens im Modell

Die kontinuierlichen Baggerarbeiten durch die Luftegge werden in dieser Untersuchung mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Peildaten im Südhafen Stade-Bützfleth validiert. Es werden die Daten im Bereich des Südhafenbeckens für den Zeitraum 15.7. bis 13.8.2019 ausgewertet, wobei die gemessene Sohländerung im Südhafenbecken (Abbildung 4.15, rechts) im Modell nachgebildet wird.

Im Modell wird die Baggertätigkeit ähnlich der Realität in einer Baggerfahrspur nachgebildet. In Abbildung 4.14 sind beispielhaft drei Eggrouten aus den Monaten August, September und Oktober des Jahres 2021 dargestellt (Abbildung 4.14, links). Diese dienten als Vorlage für die Abbildung der Eggerouten im Modell (Abbildung 4.14, rechts). Die Fahrspur der Egge wurde auf den gesamten Baggerbereich erweitert und insgesamt etwas vereinfacht, um jeden Bereich des Südhafenbeckens einheitlich abzudecken. Jedem dieser Baggerpunkte auf der Modellfahrspur wurde eine Baggerrate zugewiesen, die auf Grundlage der Peildatendifferenz (Peildaten August 2019 – Peildaten Juli 2019) und der modellierten natürlichen Sedimentation berechnet wurde.

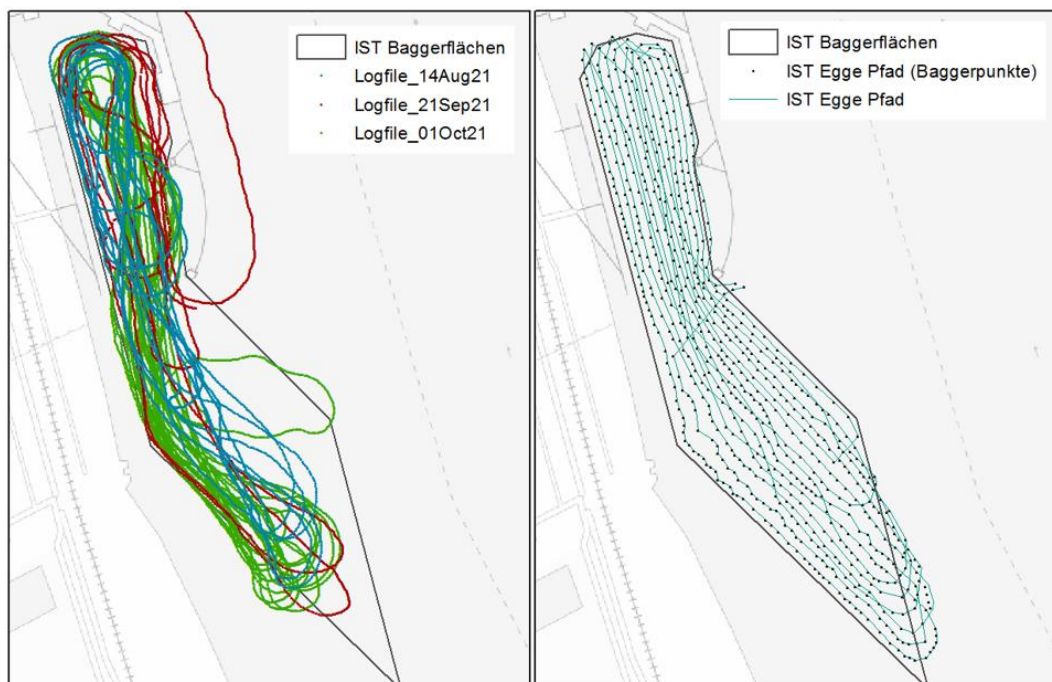


Abbildung 4.14. Links: aufgezeichnete Baggerfahrspuren im Südhafenbecken an drei verschiedenen Tagen, rechts: nachgebildete Baggerfahrspur im Südhafenbecken für die Modellierung.

Die Baggerrate der einzelnen Punkte auf der Route ist weiterhin abhängig von der Länge der gesamten Baggerroute (im Modell beträgt diese rund 15 km), der Geschwindigkeit der Egge (im Modell gleichbleibend bei 2,4 m/s) und der Anzahl der gesamten Baggerrunden im Modellzeitraum von 29 Tagen (ca. 50 Runden). Pro Tag sind im Schnitt 1,7 Baggerrunden erforderlich, die mit einer Geschwindigkeit von ca. 2,4 m/s in 3 h mit einer mittleren Baggerrate von 476 kg/s zurückgelegt werden können, um die gemessene Sohländerung im Modell nachzubilden. Die Fahrtroute der Egge wird im Modell so eingebaut, dass die Egge pro Tag zwischen 8 Uhr und 11 Uhr arbeitet. In den restlichen 21 Stunden der Tage wird nicht geeggt.

Die Modellierung der Sohländerung im Modellzeitraum 15.7. bis 13.8.2019 mit den genannten Baggerraten der entsprechenden Route ist in Abbildung 4.15 mittig dargestellt. Diese zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Sohländerungen im selben Zeitraum (Abbildung 4.15 rechts). Beidem gegenübergestellt ist in Abbildung 4.15 links die simulierte Sohländerung ohne Unterhaltung.

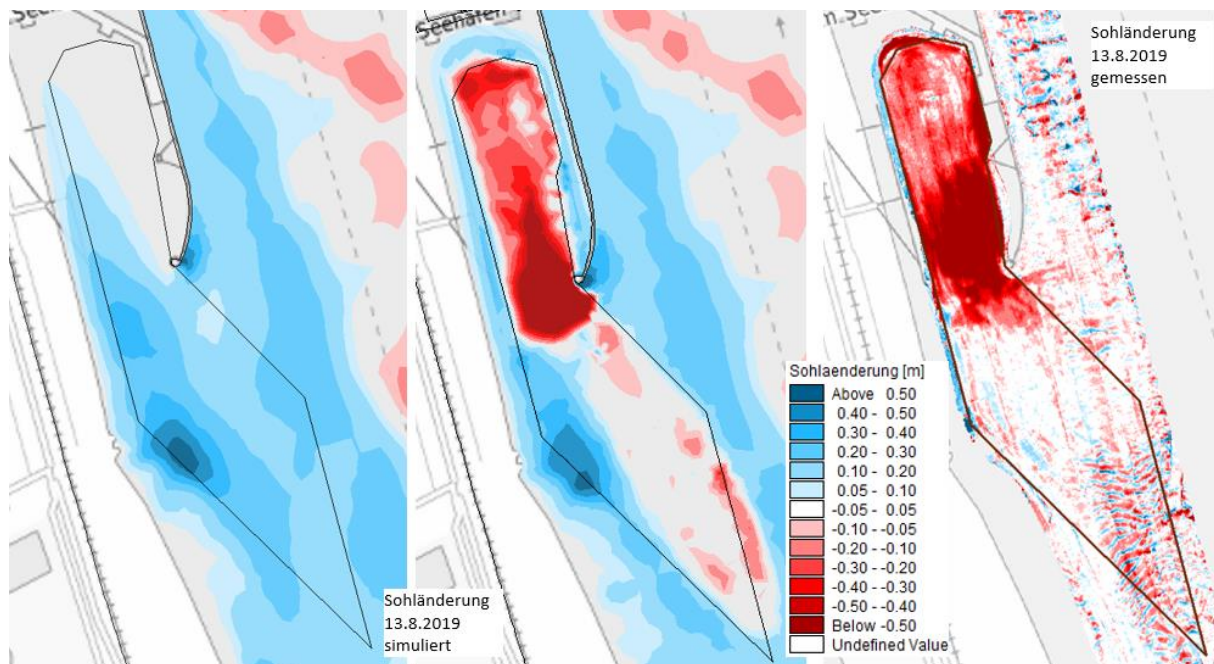


Abbildung 4.15. Sohländerung zwischen zwei Peilungen (= Differenz der Peildaten 13.8. - 15.7.2019). Links: simuliert ohne Unterhaltung, Mitte: simuliert mit Unterhaltung, rechts: gemessen mit Unterhaltung.

Als weitere Darstellung der Validierungsergebnisse kann Abbildung 4.16 links herangezogen werden. Hier ist die Differenz der gemessenen und modellierten Sohlhöhe im Südhafen dargestellt. Lediglich in den Randbereichen des Hafenbeckens, also in Bereichen mit niedriger Strömung, überwiegt die Tendenz des Absinkens der aufgewirbelten Sedimente. Hier wird die Sedimentation vom Modell leicht überschätzt. Außerhalb des Hafenbeckens, in Bereichen mit höheren Strömungen, wird der Sedimenttransport vom Modell sehr gut wiedergegeben. Hier gleichen sich die lokalen Differenzen in negativer wie in positiver Richtung fast vollständig aus. Aus einer statistischen Auswertung der flächigen Differenzen im Unterhaltungsbereich geht eine mittlere Abweichung von 0,19 m hervor, was einer relativen Abweichung von lediglich 1,7 % gegenüber der Sedimentation ohne Unterhaltung entspricht (vergl. Abbildung



4.15, links). Somit kann von einer sehr guten Validierung der Baggertätigkeiten im Modell ausgegangen werden.

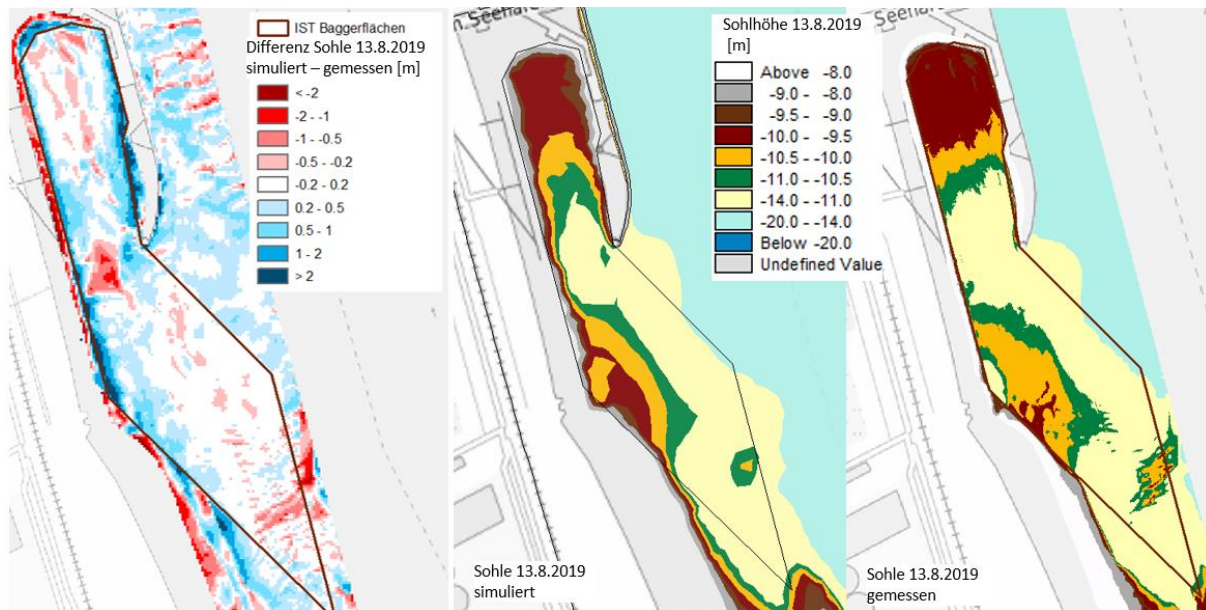


Abbildung 4.16. Sohlhöhe am 13.8.2019 mit Unterhaltung durch Luftegggen. Links: Differenz zwischen simulierten und gemessenen Sohlhöhe, mittig: simulierte Sohlhöhe, rechts: gemessene Sohlhöhe.

## 4.3 Ergebnisse

Für den Planzustands wurde die Unterhaltung durch Luftegggen und deren Auswirkungen auf die Elbe betrachtet. Zunächst ist die Wirksamkeit des Luftegggens am AvG untersucht, gefolgt von der Sedimentverdriftung in der Wassersäule und der Sedimentation entlang der Elbe.

### 4.3.1 Wirksamkeit der Unterhaltung durch Luftegggen am AvG

Die für den Südhafen validierte Methodik des Luftegggens im morphodynamischen Modell wurde auf das neue Hafenbecken des AvG übertragen und für den Zeitraum von ca. einem Monat (15.7.2019 bis 13.8.2019; 29 Tage) simuliert. Abbildung 4.17 zeigt die Sedimentation während dieses Zeitraums, wenn keine Unterhaltung vorgenommen wird (links), wenn der Bereich unterhalten wird (Mitte) sowie die Auswirkungen der Unterhaltung auf die Sohländerung (rechts) aus der Differenz beider Simulationen.

Wenn keine Unterhaltung am AvG durchgeführt wird, ist mit einer Sedimentation von 10 cm bis 20 cm während des simulierten Zeitraums von 29 Tagen zu rechnen. Wenn der Bereich unterhalten wird, sind lediglich geringfügige Änderungen an der Sohle zu verzeichnen. Durch die Unterhaltung kann eine Sedimentation von bis zu 30 cm vermieden werden. Geht man von einer Egggeschwindigkeit von ca. 2,4 m/s aus, dann wären pro Tag 6 h erforderlich, um den Bereich zu unterhalten. Die für den Planzustand ermittelten Baggerraten und mobilisierten Volumina wurden für das Hafenbecken des AvG und des Südhafens in Tabelle 4.6 zusammengefasst.

Im Vergleich zur Validierung (Abschnitt 4.2.5) fällt zunächst auf, dass die Baggerrate im Südhafen reduziert werden konnte. Dies wird der geänderten Hafengeometrie zugeschrieben. Die Anlage des AvG sowie die Verlängerung der Mole am Südhafen sorgen für einen geringeren Sedimenteintrag, so dass von einer Verringerung des Unterhaltungsaufwands für den Südhafen ausgegangen werden kann. Am AvG wurden gegenüber dem Istzustand geringere erforderliche Baggerraten ermittelt, jedoch ist durch die größere zu unterhaltende Fläche eine längere Eggzeit erforderlich.

Regelmäßige Peilungen im Südhafen und am AvG werden empfohlen, um die hier ermittelten Eggdauern weiter zu optimieren.

Tabelle 4.6. Kenngrößen der Sedimentmobilisierung durch Lufteggen am AvG und im Südhafen.

	AvG	Südhafen
Mittlere Sedimentdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	1390	1233
mittlere Baggerrate [kg/s]	101	176
Eggdauer pro Tag [h]	6	3
Mobilisiertes Volumen pro Tag [m <sup>3</sup> ]	1250	1440

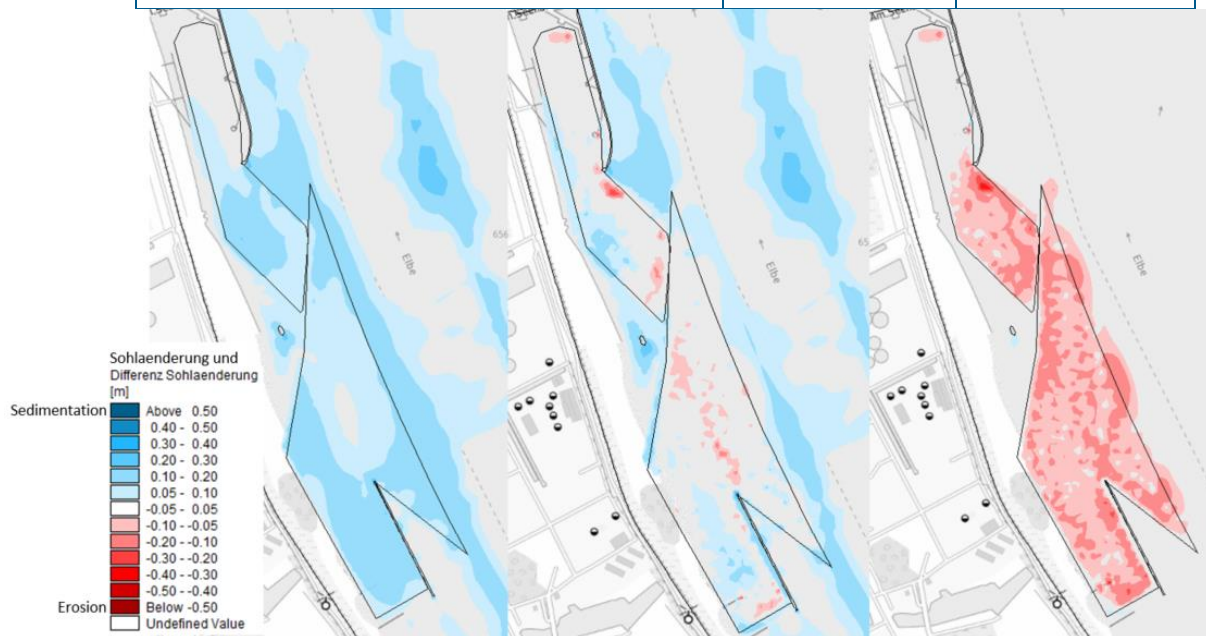


Abbildung 4.17. Söhländerung im Planzustand. Links: ohne Unterhaltung, Mitte: mit Unterhaltung, rechts: Differenz der Söhländerung mit und ohne Unterhaltung.

**Die Sohle am AvG sowie die Zufahrt kann somit mit Hilfe des Lufteggens unterhalten werden. Hierfür ist aufgrund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse mit einem Bedarf von ca. 6h pro Tag auszugehen.**

### 4.3.2 Sedimentverdriftung

Die Sedimentverdriftung im Bereich des AvG und in der Elbe wird anhand von Bilanzquerschnitten, flächigen Ausdehnungen der Schwebstofffahne zum Zeitpunkt einer Flut- und einer Ebbphase während einer Springflut und im Längsschnitt an den Elbekilometerpunkten in der Mitte des Flussschlauchs untersucht.

Die Bilanzquerschnitte wurden in Abstimmung mit dem AG an acht Punkten im Hauptstrom der Elbe, an drei Punkten in Nebengewässern (Schwinge, Pagensander Nebenelbe, Schwarztonnensander Nebenelbe), an drei Punkten im geplanten Hafenbecken des AvG und an vier Punkten im Südhafen positioniert (Abbildung 4.18).

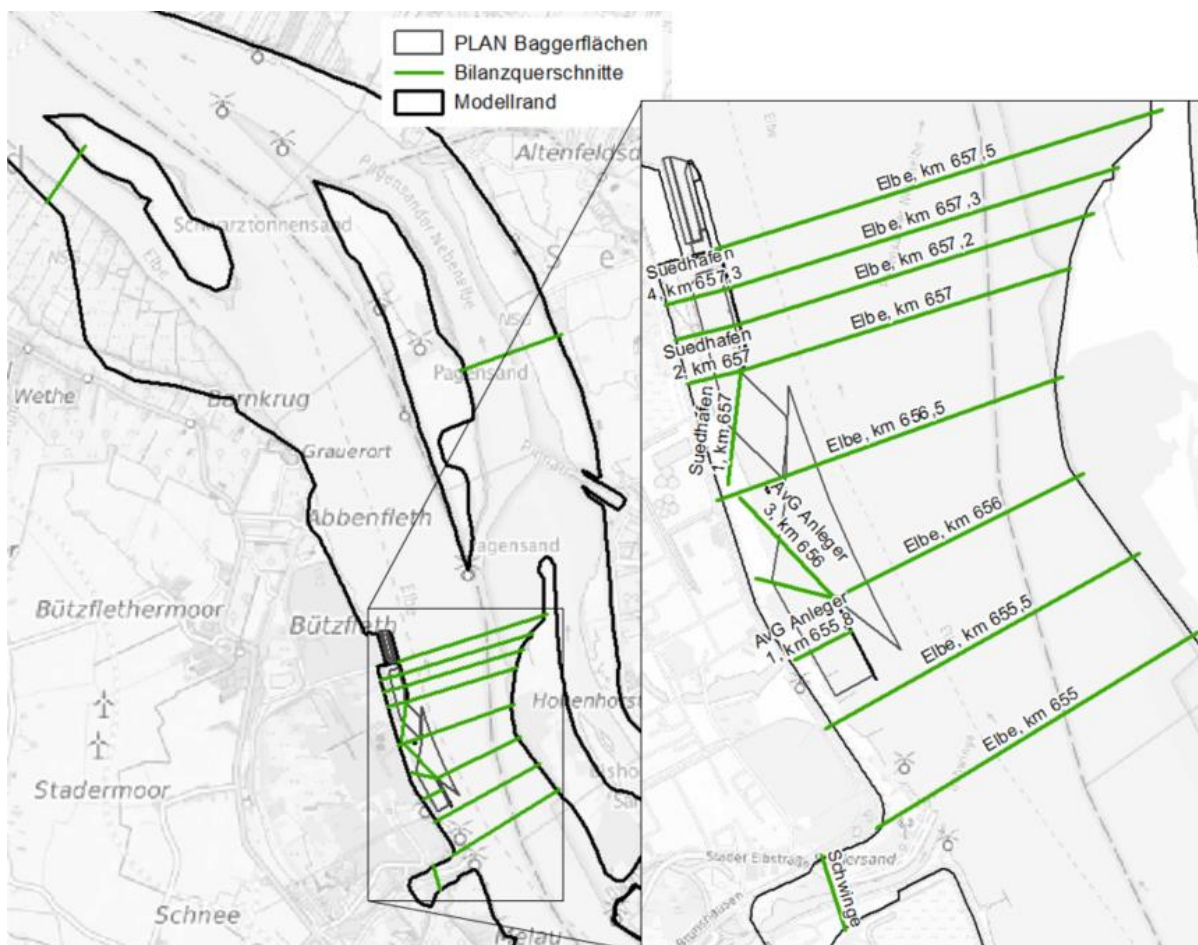


Abbildung 4.18. Bilanzquerschnitte in der Elbe, den Hafenbereichen und Nebengewässern für die Auswertung des Sedimenttransportes.

Für diese Bilanzquerschnitte wurde ein direkter Vergleich des Sedimenttransportes über einen Spring-Nipp-Tidezyklus (21.7. bis 4.8.2019) sowie eine statistische Auswertung der Abweichung in positive und negative Richtung vorgenommen. Die Bilanzquerschnitte wurden so gelegt, dass der positive Sedimenttransport der Hauptfließrichtung der Elbe bzw. des Nebengewässers entspricht und der negative Sedimenttransport entgegen der Hauptfließrichtung gerichtet definiert ist. Im Nahbereich des AvG treten vor allem während der Ebbphase erhöhte Schwebstoffkonzentrationen auf, wie beispielhaft für die Querschnitte am Südhafen und am AvG in Abbildung 4.19 gezeigt ist.

Auswertungen der weiteren Querschnitte sind im Anhang enthalten. Es kann festgehalten werden, dass lediglich im Bereich von Elbe-km 656 bis Elbe km 657,2 um bis zu 40 kg/s erhöhter Sedimenttransport in der Wassersäule zu verzeichnen ist.

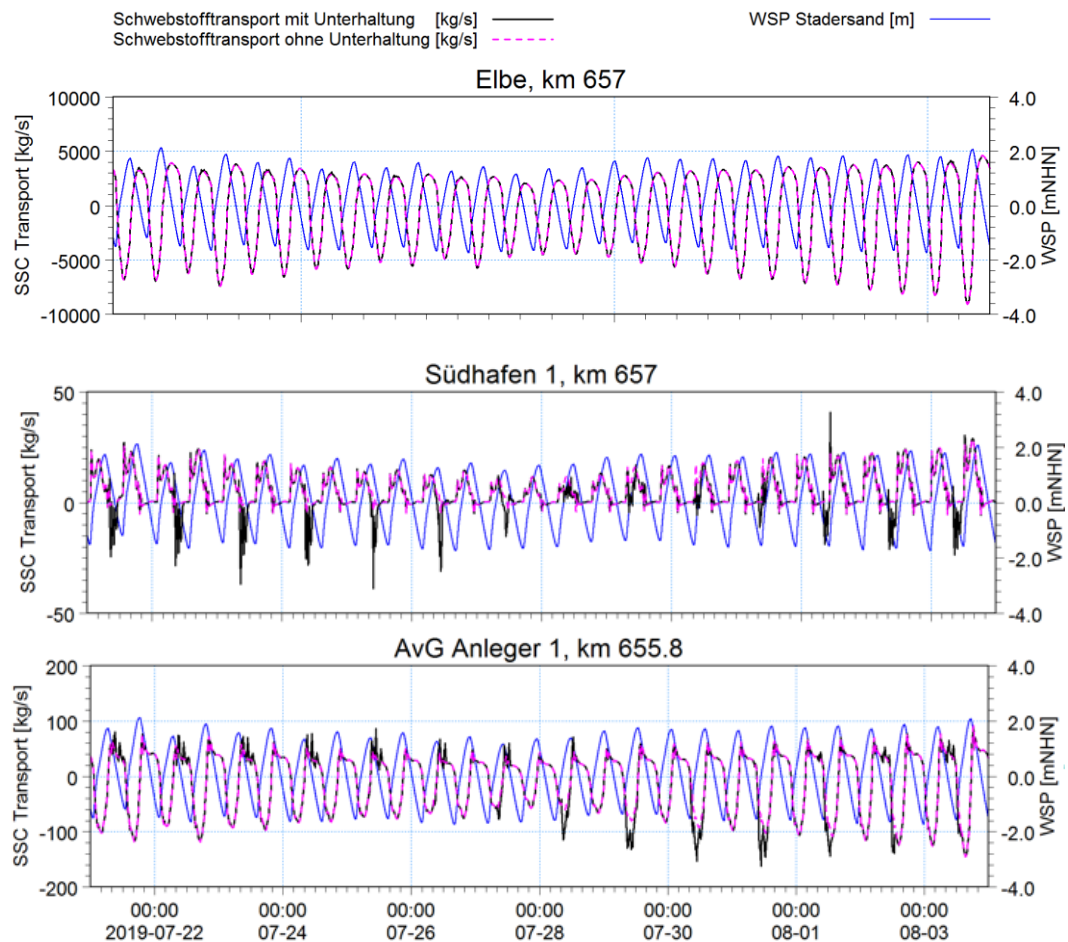


Abbildung 4.19. Sedimentkonzentrationen in Bilanzquerschnitt. Oben: Querschnitt am Elbe-km 657, Mitte: Querschnitt 1 des Südhafens, unten: Querschnitt 1 des geplanten Hafenbeckens des AvG.

Auch die statistische Auswertung der Abweichungen über die gesamten Zeitreihen des Sedimenttransports zeigen diesen Trend. Die größten Änderungen der Sedimentkonzentrationen durch die Unterhaltung der Egge ergeben sich direkt in den Hafenbecken. Im Südhafen werden im Durchschnitt 25% (maximal 36%) mehr Sediment aus dem Hafenbecken hinaus transportiert und ca. 7% mehr Sediment in das Hafenbecken hinein transportiert. Im geplanten Hafenbecken hält sich der Transport in das Becken hinein und aus dem Becken hinaus mit ca. 10% mehr Sediment durch die Sohlunterhaltung die Waage. Im Flussschlauch der Elbe liegt generell eine vergleichsweise höhere Sedimentkonzentration vor, wobei sich durch die Unterhaltung der Egge nur minimale Änderungen bis maximal 1% ergeben. In der Schwinde sind hingegen keine Änderungen des Sedimenttransportes mit der Unterhaltung durch die Egge zu erkennen.

Die geringen Änderungen der Sedimentkonzentration im Wasserkörper der Elbe ist zum einen durch die verhältnismäßig geringe Menge der mobilisierten Sedimente bei der Unterhaltung begründet. Zum anderen ist anzumerken, dass

das Hafenbecken des AvG (ebenso wie die anderen Hafenbecken) als Sedimentfalle wirken, da in ihnen durch die Spundwände strömungsgeschützte Bereiche bestehen, in denen sich mehr Sediment ablagert. Diese werden durch das Lufteggen lediglich zeitversetzt an den Wasserkörper zurückgegeben und vornehmlich während der Ebbströmung mit dem auslaufenden Wasser stromab transportiert.

**Tabelle 4.7.** Statistische Auswertung der Differenzen des Sedimenttransport mit und ohne Unterhaltung durch Eggen in positive Richtung (in Hauptfließrichtung) und in negative Richtung (entgegen Hauptfließrichtung).

<b>Bilanzquerschnitt</b>	<b>prozentuale Abweichung Sedimenttransport mit- ohne Unterhaltung [%]</b>	
	<b>in Hauptfließrichtung</b>	<b>entgegen Hauptfließrichtung</b>
AvG Anleger 1	9	11
AvG Anleger 2	13	9
AvG Anleger 3	11	8
Südhafen 1	6	13
Südhafen 2	10	25
Südhafen 3	6	27
Südhafen 4	7	36
Elbe km 655	-0.1	0.5
Elbe km 655,5	-0.1	0.5
Elbe km 656	0.0	0.3
Elbe km 656,5	0.7	0.2
Elbe km 657	1.1	0.0
Elbe km 657,2	1.1	0.0
Elbe km 657,3	1.1	0.0
Elbe km 657,5	1.1	0.0
Pagensander Nebanelbe	0.0	-0.1
Schwarztonnensander Nebanelbe	0.0	-0.1
Schwinge	0.0	0.0

Für die maximale Ausdehnung der Sedimentfahne wurden während einer normalen Springtide zwei Zeitpunkte während der Ebb- sowie der Flutphase betrachtet (Abbildung 4.20):

- Während der Ebbphase einer mittleren Springflut (Abbildung 4.20, links) kann eine erhöhte Sedimentkonzentration über eine Länge von ca. 11,5 km vom AvG elbabwärts verzeichnet werden, die überwiegend unter  $10 \text{ g/m}^3$  liegen. Im westlichen ufernahen Bereich treten in einem Bereich von ca. 2,5 km Länge Sedimentkonzentrationen über  $100 \text{ g/m}^3$  auf, die bis  $200 \text{ g/m}^3$  erreichen können (Abbildung 4.20, links).
- Während der Flutphase einer mittleren Springflut (Abbildung 4.20, rechts) kann einer erhöhte Sedimentkonzentration über eine Länge von ca. 18 km vom AvG elbaufwärts verzeichnet werden, die jedoch  $10 \text{ g/m}^3$  nicht überschreiten.

Der Grund für das Auftreten einer höheren Sedimentkonzentration während der Ebbphase liegt darin begründet, dass in dieser Tidephase Wasser aus den Hafenbecken herausfließen kann, das mit aufgewirbelten Sedimenten aus der Unterhaltung versetzt ist. Bei der Flutphase fließt überwiegend frisches Wasser in die Hafenbecken und nur geringe Mengen Hafenwasser können in die Elbe gelangen.

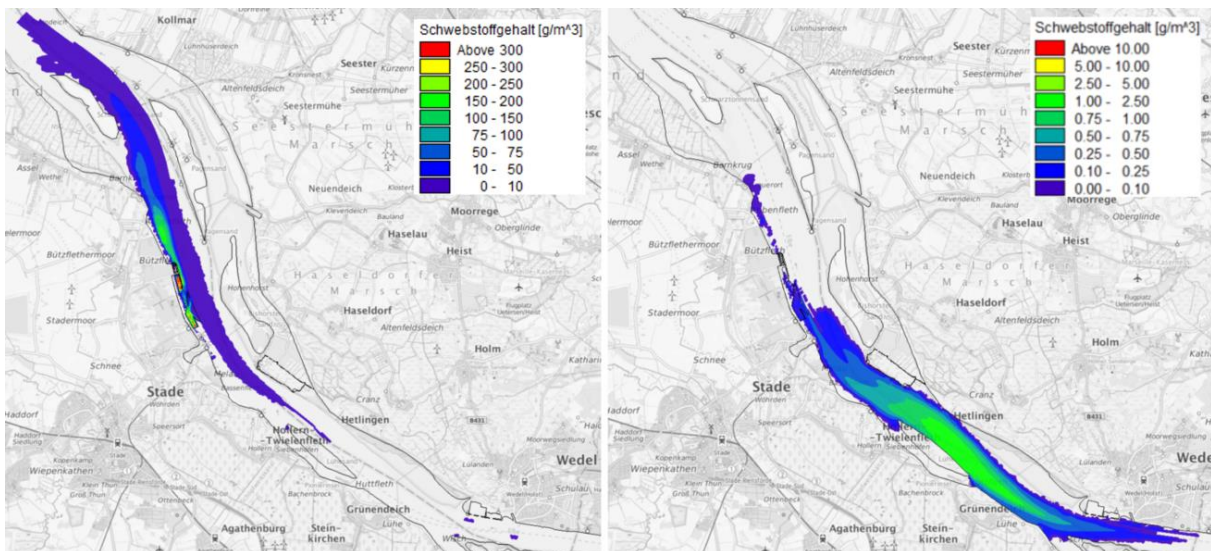


Abbildung 4.20. Sedimentkonzentrationen entlang der Elbe. Links: während der Ebbphase, 3.8.2019 11:00Uhr, rechts: während der Flutphase, 3.8.2019 04:00Uhr.

Die Sedimentkonzentrationen in der Flussmitte lassen gegenüber der Hintergrundkonzentration der Sedimente in der Elbe keine erhöhten Werte durch die Unterhaltung erkennen (Abbildung 4.21).

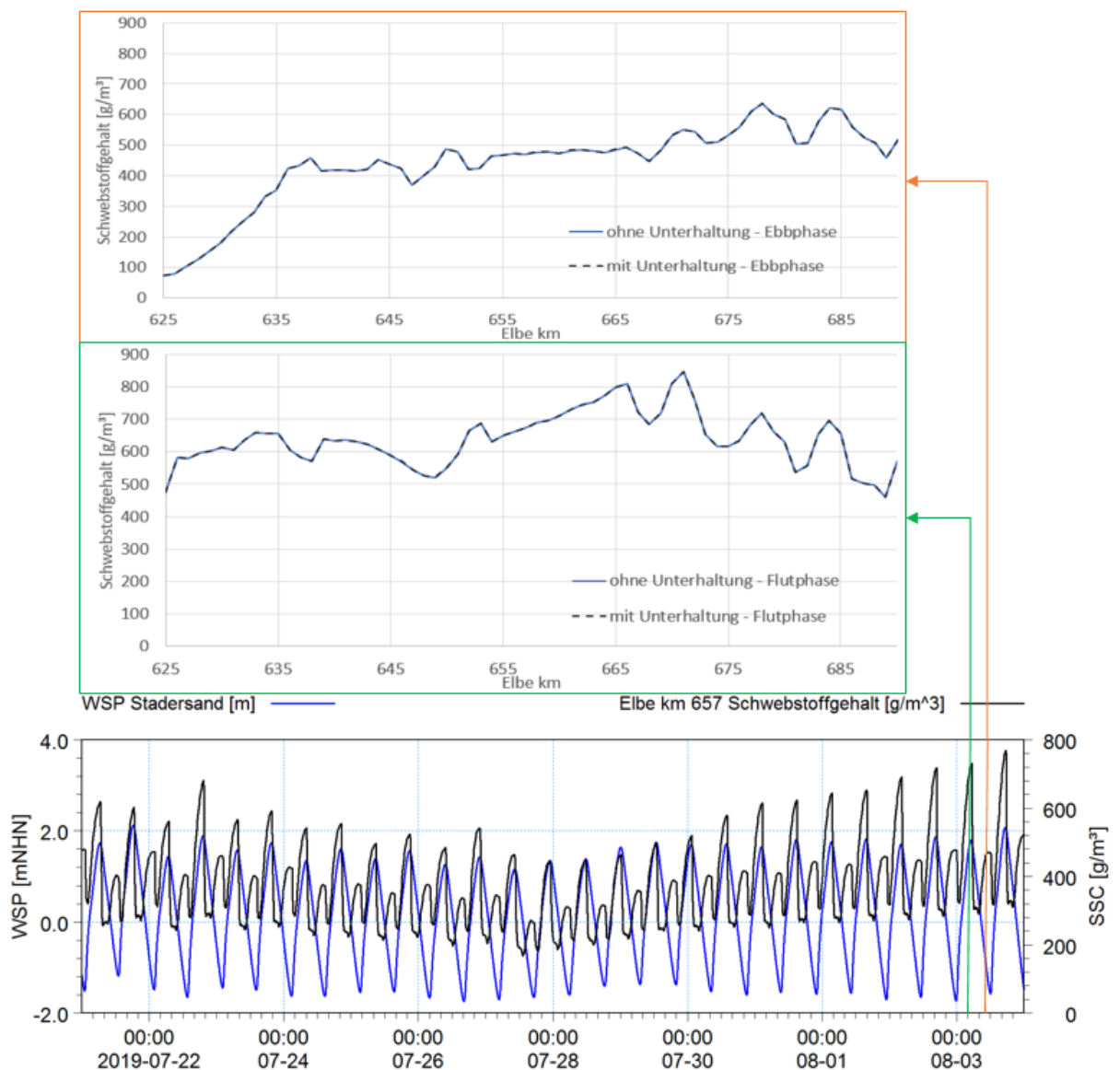


Abbildung 4.21. Sedimentkonzentrationen in der Elbe. Oben: während der Ebbphase entlang der Elbe 3.8.2019 11:00Uhr ohne Unterhaltung (durchgezogene Linie) und mit Unterhaltung (gestrichelte Linie), Mitte: während der Flutphase 3.8.2019 04:00 Uhr, unten: zeitlicher Verlauf der Schwebstoffgehalte am Elbe-km 657 und den entsprechenden Wasserständen am Pegel Stadersand.

### 4.3.3 Änderung der Sohle

Die Sedimentation hervorgerufen durch die Unterhaltungsmaßnahmen im Planzustand ist als Fläche (Abbildung 4.22) und entlang der Flussachse (Abbildung 4.23) gezeigt.

In der flächenhaften Darstellung ist durch Differenz der Sohländerungen zwischen dem Planzustand mit Unterhaltung und dem Planzustand ohne Unterhaltung ermittelt worden (siehe Anhang, Abbildung A.3 und Abbildung A.4). Darin ist erkennbar, dass lediglich im unmittelbaren Bereich des Hafens eine erkennbare Änderung der Sohle ermittelt wurden (eine Detailansicht dieses Bereiches stellt Abbildung 4.17, rechts dar). Die Änderungen der Sohle betragen

während des untersuchten Zeitraums (29 Tage) im Bereich zwischen Elbe-km 630 und Elbe-km 675 bis zu 5 mm.

Zudem ist darauf hinzuweisen, dass sich während der Ebbphase vor allem am Westufer Sedimentkonzentrationen ergeben, die die Konzentrationen am Ostufer um den Faktor 10 überschreiten (Abbildung 4.20). Somit ist aufgrund der Verfügbarkeit von zusätzlichen Sedimenten in der Wassersäule eher mit Sedimentation am Westufer als am Ostufer zu rechnen.

Alle Änderungen der Sedimentation liegen damit um ca. eine Größenordnung unterhalb der natürlichen morphologischen Änderungen in der Elbe (siehe Anhang, Abbildung A.2), die im gleichen Zeitraum im Bereich erhöhter Sedimentkonzentrationen in der Wassersäule (Abbildung 4.20, links) Sohländerungen zwischen -0,3 m und 0,3 m aufweisen.



Abbildung 4.22 Differenz der Sohländerungen zwischen Planzustand mit Unterhaltung und Planzustand ohne Unterhaltung großräumig dargestellt für die Elbe zwischen Hafen Hamburg und Cuxhaven.



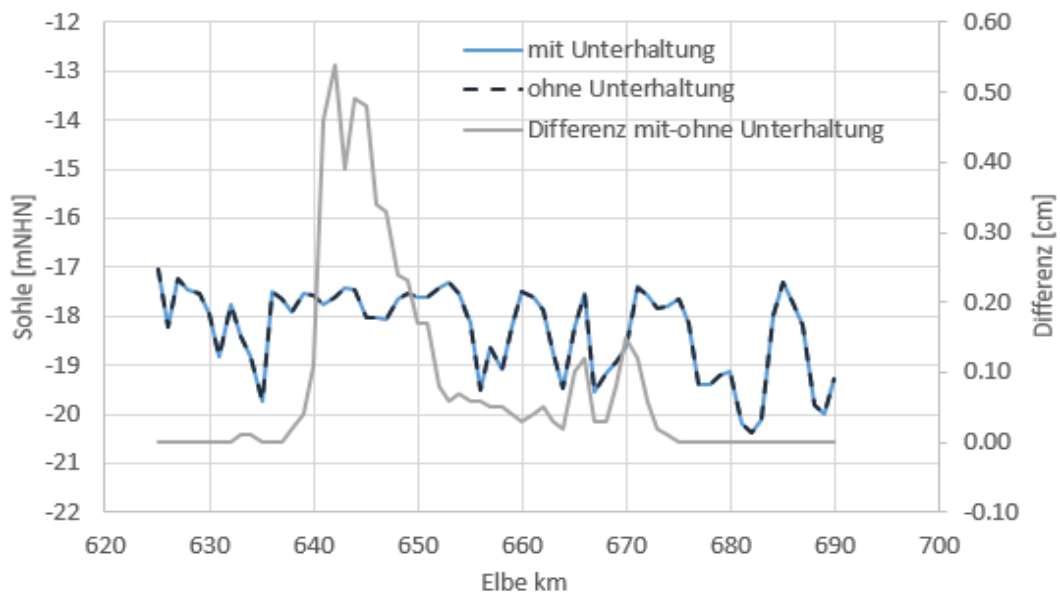


Abbildung 4.23. Sohlage in [mNHN] an den Punkten der Elbekilometer mit Unterhaltung (durchgezogene Linie), ohne Unterhaltung (gestrichelte Linie) – linke Achse; und deren Differenz in [cm] – rechte Achse.

#### 4.4 Zusammenfassung

Das hydromorphologische 3D-Modell /3/ wurde um die Unterhaltungsmaßnahme Lufteggens erweitert, um die Auswirkungen des Lufteggens auf den Sedimenttransport und die Morphologie der Elbe beurteilen zu können und die Anwendbarkeit des Lufteggens für die Unterhaltung des AvG nachzuweisen. Hierfür wurde eine sehr gute Modellgüte nachgewiesen.

Für die Unterhaltung des AvG muss von einem Zeitbedarf von 6 h ausgegangen werden.

Durch die Unterhaltung des AvG kommt es zu einer geringen Zunahme der Sedimentkonzentrationen im Wasserkörper. Es muss mit einer Zunahme im Nahbereich des Südhafens um 24 % und am AvG um 17 % gerechnet werden. In der Elbe nimmt die Sedimentkonzentration praktisch nicht zu, da das durch das Hafenbecken des AvG dem Wasserkörper der Elbe entnommene Sediment durch die Tätigkeit des Lufteggens dem Wasserkörper wieder zugeführt wird. Von einer lokalen Akkumulation der Sedimente durch die Unterhaltung über längere Zeiträume hinweg ist zudem nicht auszugehen, da die Pausen zwischen den Eggzeiten an aufeinander folgenden Tagen mit durchschnittlich 18 h länger sind, als die aufgewirbelten Sedimente für ihr Absetzen auf der Sohle benötigen.

Eine Zunahme der Sedimentation ist mit bis zu 5 mm nur im Bereich der Elbe zwischen km 640 und km 675 nachweisbar. In den Uferbereichen spielen die durch die Unterhaltung des AvG anfallenden Sedimente bei der Sohländerung gegenüber der natürlichen morphologischen Dynamik in der Tideelbe eine untergeordnete Rolle, wobei der Anteil aus der AvG-Unterhaltung durch eine höhere Sedimentkonzentration in der Wassersäule eher am Westufer um den Faktor ~10 höher als am Ostufer angenommen werden kann (Abbildung 4.20, links).

## 5 Bauzeitliche Sedimentverdriftung

Die Auswirkungsprognose für die bauzeitliche Sedimentverdriftung infolge Herstellung des AvG auf den Wasserkörper und die Sohle der Elbe erfolgt über eine vereinfachte Abschätzung ohne zusätzliche numerische Modellierung. Auf Basis definierter Bauablaufprozesse zum Baggern und Verklappen wird eine Abschätzung zur auftretenden Sedimentverdriftung auf Basis der Sedimentmengen, der Tideströmungen in den verschiedenen Bereichen und der Sinkgeschwindigkeit des Sediments getroffen. Über die freigesetzte Sedimentmenge wird die maximale Verdriftungreichweite über die Sinkgeschwindigkeit, die Wassertiefe und die maximale Flut- bzw. Ebbstromgeschwindigkeit abgeschätzt.

Es werden zwei relevanten Bauphasen definiert (Tabelle 5.1). Zunächst wird die Methodik der Berechnung der bauzeitlichen Sedimentverdriftung erläutert, die Eingangsdaten werden genannt und die Ergebnisse der empirischen Abschätzungen werden beschrieben. Unter Berücksichtigung der hydromorphologischen Untersuchungen aus Kapitel 4 werden nachfolgend weitere Schlussfolgerungen aus den vorliegenden Ergebnissen gezogen.

Tabelle 5.1. Definition der Bauphasen.

	1. Phase: „Schwimmtiefe“	2. Phase: „Hafentiefe“
Bauphase Nr.	18	28
Beschreibung	Herstellung der Schwimmtiefe und Rückbau der Buhne	Herstellung der Hafentiefe
Baggerart	Tieflöffelbagger	Hopperbagger und Tieflöffelbagger
Dauer der Bauphase	Von Mo 22.01.24 bis Fr 29.03.24 (50 Tage)	Von Mo 18.11.24 bis Fr 07.03.25 (insgesamt 80 Tage)
Gesamte angenommene Baggerzeit*	1150 Std.	640 Std. (Hopperbagger) und 1150 Std. (Tieflöffelbagger)

\* nach Abstimmung mit dem AG

### 5.1 Methodik der Berechnung der bauzeitlichen Sedimentverdriftung

Die Baggerfläche wurde zunächst in vier Bereiche aufgeteilt (Abbildung 5.1). Die Bereiche A und B wurden aufgrund der Geringfügigkeit in diesem Ansatz jedoch

nicht herangezogen. Für jede Phase wird die durchschnittliche Wassertiefe und Baggerfläche ermittelt (Tabelle 5.2).

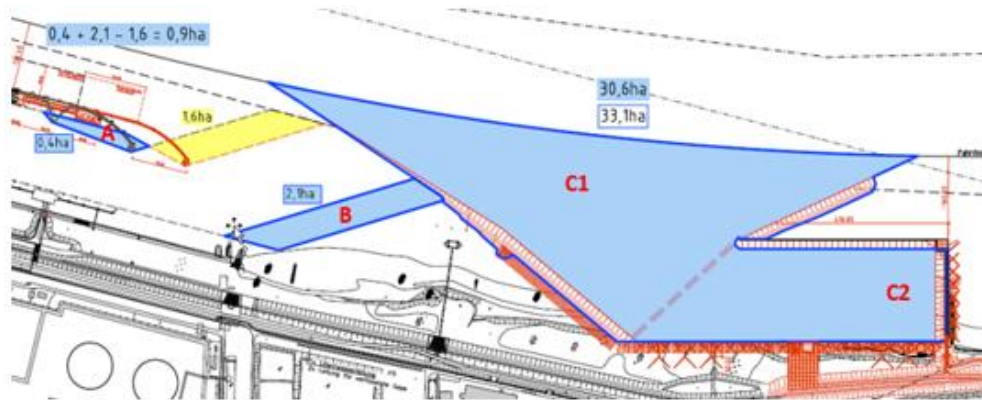


Abbildung 5.1. Aufteilung der Baggerflächen.

Tabelle 5.2. Baggerflächen und durchschnittliche Wassertiefen.

	Fläche mit Tiefe < Zielwassertiefe [m <sup>2</sup> ]	gemittelte Wassertiefe [m]	Zielwassertiefe [m]	Volumen [m <sup>3</sup> ]
Phase 1: Herstellung Schwimmiefe und Rückbau Buhne	105.414	-2,27	6	393.436
Phase 2: Herstellung Hafentiefe	331.000	-8,66	11,4-16,4	2.162.409
			<b>Summe</b>	<b>2.555.845</b>

Aus den vorliegenden Bohrungen (Abbildung 5.2) schließend wurden die Anteile von Schluff und Sand in den jeweiligen Baggerflächen geschätzt (Tabelle 5.3).

Die hydrodynamische Grundlagendaten wurden vom Portal-Tideelbe<sup>3</sup> für die folgenden Messstationen (Abbildung 5.2, unten links) bezogen:

- Ebb-/Flutstromgeschwindigkeit: Pagensand
- Wasserspiegellage: Pegel Stadersand

Um repräsentative Strömungsgeschwindigkeiten für die geplante Bautätigkeit im Jahr 2024 zu erhalten, wurden die Daten für die Ebb- und Flutstromgeschwindigkeiten und die Wasserspiegellagen für die gewählten Baggertage (Bauphasen-abhängig, Tabelle 5.1) der Jahre 2012 bis 2021 extrahiert und an der Oberfläche und sohl nah gemittelt.

<sup>3</sup> <http://www.portal-tideelbe.de/>

Der tidebedingte Abfluss wurde aus Wassertiefen, Tidestromgeschwindigkeiten und Querschnittsfläche (Tabelle 5.5, Abbildung 5.3) für beide Bauphasen berechnet.

Der Sedimentüberlauf für Schluff und Sand sind abhängig von der Baggerart aus Erfahrungswerten berücksichtigt (Tabelle 5.4). Eine Sedimentdichte von 2650 kg/m<sup>3</sup> wurde betrachtet. Die freigesetzten Schluff- und Sandmengen und -massen wurden dann aus Überlaufdaten berechnet. Die Sinkgeschwindigkeiten der Sedimentpartikel sind abhängig von der Korngröße und werden als 0,01 m/s für Sand und 0.0005 m/s für Schluff angenommen.

Basierend auf den Datengrundlage lassen sich die folgenden Parameter berechnen:

- Schwebstoffkonzentration [mg/l] = Freigesetzte Masse [kg/s] / Abfluss [m<sup>3</sup>/s] (x1000)
- Sedimentverdriftung [km] = Stromgeschwindigkeit [m/s] \* Sinkzeit der Sedimente [s] (/1000)
- Durchschnittliche Sedimentationshöhe [cm] = Volumen [m<sup>3</sup>] / (durchschnittliche Flussbreite [m] \* durchschnittliche Verdriftungsstrecke [m] für max oder min Ebb-/Flutstrom gemittelt über Sinkzeit) (\*100)

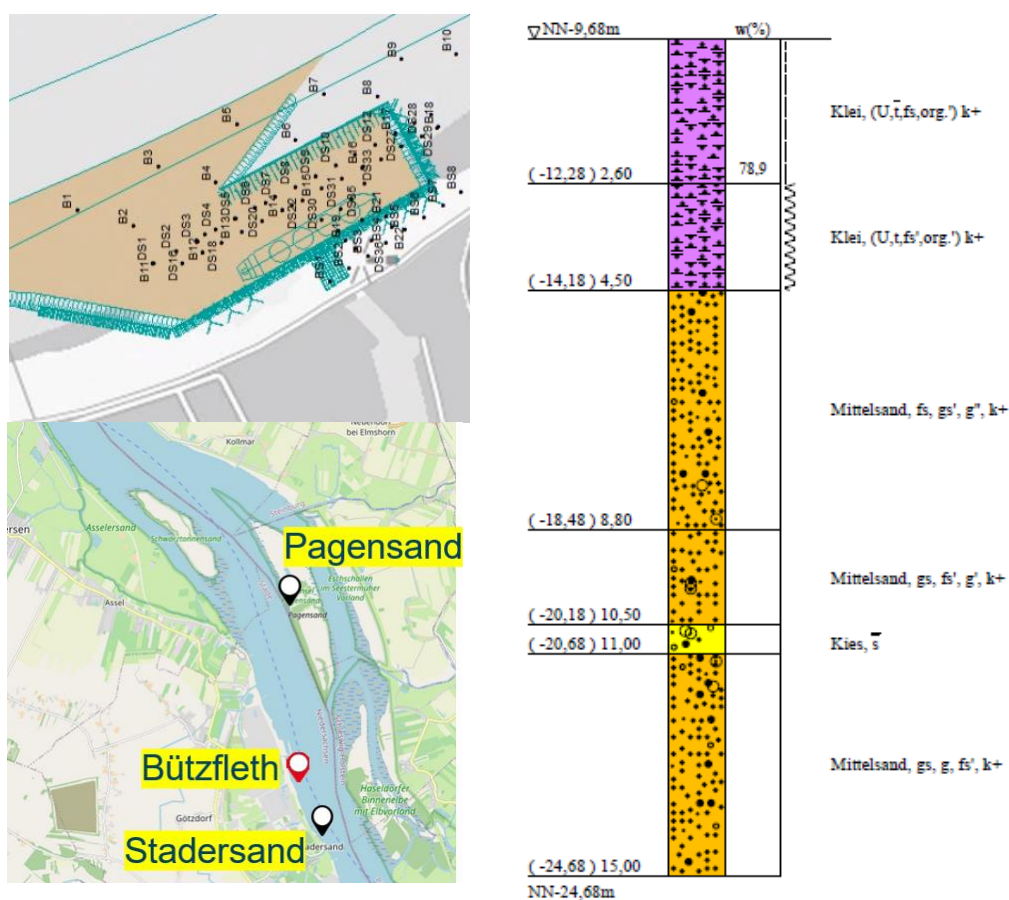


Abbildung 5.2. Oben links: Positionen der Bohrungen /1/, unten links: Lage der Pegel für Strömungsgeschwindigkeiten (Pagensand) und Wasserspiegellage (Stadersand), rechts: beispielhaftes Bohrprofil an der Position B2 /2/.

Tabelle 5.3. Schluff- und Sand-Anteile.

	Flächen- bezeichnung	Anteil Schluff [%]	Anteil Sand [%]
Phase 1: Herstellung Schwimmtiefe und Rückbau Buhne	C1	80	20
	C2	33	67
Phase 2: Herstellung Hafentiefe	C1	44	56
	C2	49	51

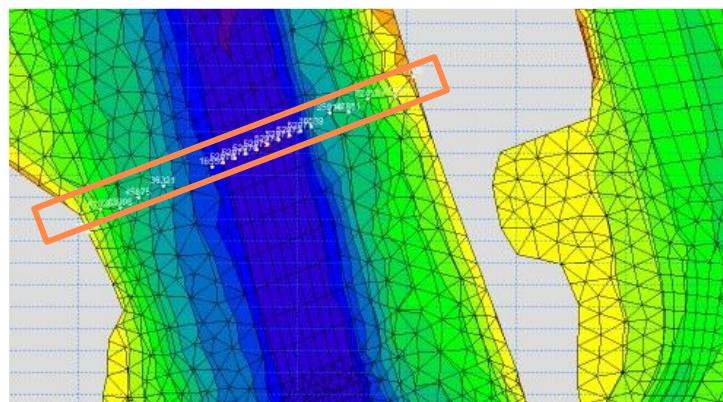


Abbildung 5.3. Berechnung der Querschnittsfläche aus der Bathymetrie des Elbe-Modells auf Basis der Elementgrößen und der Wassertiefen in einem Querschnitt (oranger Rahmen).

Tabelle 5.4. Angesetzte Sedimentüberlaufanteile.

	Tieflöffelbagger (Phase „Schwimmtiefe“)	Hopperbagger (Phase „Hafentiefe“)	Tieflöffelbagger (Phase „Hafentiefe“)
Schluff	15%	10%	15%
Sand	5%	0%	5%

## 5.2 Berücksichtigte Eingangsparameter

Die Datengrundlage für die Berechnungen wird in der Tabelle 5.5 angegeben.

Tabelle 5.5. Eingangsparameter der Berechnungen.

	Phase Schwimmtiefe		Phase Hafentiefe			
Baggerart	Tieflöffelbagger		Hopperbagger		Tieflöffelbagger	
Sedimentart	Schluff	Sand	Schluff	Sand	Schluff	Sand
Baggerzeit [h]	1150		640		1150	
Sedimentüberlaufraten [%]	15	5	10	0	15	5
Sedimentanteil [%]	40	60	46	54	46	54
Mittlere Wassertiefe [m]	~ 2,27		~ 8,66			
Zielwassertiefe [m]	6		11,4-16,4			
Querschnittsfläche Flut [m <sup>2</sup> ]	17.063		17.018			
Querschnittsfläche Ebbe [m <sup>2</sup> ]	13.132		13.178			
Baggervolumen [10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> ]	393		1.500		600	
Freigesetzte Menge [m <sup>3</sup> /s]	5,80x10 <sup>-3</sup>	2,83x10 <sup>-3</sup>	29,6x10 <sup>-3</sup>	-	9,90x10 <sup>-3</sup>	3,90x10 <sup>-3</sup>
Freigesetzte Masse [kg/s]	15,28	7,5	78,58	-	26,23	10,48
Tidebedingter Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	12.250		11.859			
Sinkgeschwindigkeit [m/s]	0,0005	0,01	0,0005	-	0,0005	0,01
Sinktiefe der Sedimente [m]	12,0		3,0		12,0	
Sinkzeit [h:min]	6:40	0:20	1:40	-	6:40	0:20
<b>Flutstrom [m/s]</b>	Max	1,16	1,13	-	-	1,135
	Min	-	0,08	0,51	-	0,23
	Mittl.	0,84	-	-	-	0,83
<b>Ebbstrom [m/s]</b>	Max	-	1,13	1,095	-	1,095
	Min	-	0,16	0,431	-	0,15
	Mittl.	0,77	-	-	-	0,75

Die mittleren und maximalen Ebb- und Flutstromgeschwindigkeiten wurden für eine konservative Abschätzung der Verdriftungsbereichs der Sedimente wie folgt verwendet:

- Bei kurzer Sinkzeit von  $\ll 6h$  (ungefähre Dauer einer Flut- bzw. Ebbphase) wurde die maximale Ebb- bzw. Flutstromgeschwindigkeit verwendet (Schluff aus Hopperbagger, Sand aus Tieflöffelbagger).
- Bei langer Sinkzeit von ca. 6h wurde die mittlere Ebb- bzw. Flutstromgeschwindigkeit verwendet (Schluff aus Tieflöffelbagger). Hierbei wird weiterhin konservativ der seltene Fall berücksichtigt, dass während der Verdriftung keine Strömungsumkehr vorkommt.

Die minimale Ebb- und Flutstromgeschwindigkeit wurde für die maximale Sedimentationshöhe herangezogen.

Die Sinktiefe wurde die mittleren Tiefe über den Elbquerschnitt verwendet. Dieser Annahme liegt die Erkenntnis aus Abschnitt 4.3.2 zugrunde, dass Sedimente sich eher in den flacheren Uferbereichen (vor allem Westufer) absetzen als in der Fahrinne. Daher wurde nicht die maximale Wassertiefe verwendet.

### 5.3 Ergebnisse

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Berechnung der bauzeitlichen Sedimentverdriftung kann aus Tabelle 5.6 entnommen werden. Isolinien für die Schwebstoffkonzentration und maximale Reichweite beider Bauphasen für Schluff und Sand befinden sich zudem in Abbildung 5.4 und Abbildung 5.5.

**Während der Bauphase „Schwimmtiefe“** ergeben sich in der Elbe auf Höhe der Maßnahme (Elbe-km 656,5) mittlere Schluffkonzentration über den Querschnitt verteilt von 0,9 mg/l (Abbildung 5.4, oben) und Sandkonzentration von 0,6 mg/l (Abbildung 5.5, oben). Bei maximaler Ebb- und Flutstromgeschwindigkeit während der Bauphase kann das Sediment die größten Entfernungen zurücklegen. Schluff kann so maximal um 18,6 km flussab und 20,2 km flussauf transportiert werden, bevor er vollständig an der Sohle angekommen ist. Sand hingegen kann aufgrund seiner höheren Sinkgeschwindigkeit lediglich 1,4 km weit Fluss auf und 1,3 km Fluss abtransportiert werden. Somit ergibt sich für Schluff eine entsprechend weiträumig verteilte Fläche, in der über den Querschnitt der Elbe gemittelt Sedimentationshöhen von unter 1 cm erreicht werden. Die Sedimentationshöhen sind bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten größer, da sich das Sediment auf einer kleineren Fläche ablagert. Auch hier werden aber lediglich Höhen von ca. 1 cm erreicht. Sand hingegen kann sich bei hoher und geringer Strömung über die Sohle der Elbe gemittelt bis zu 1 cm bzw. bis zu 3 cm dick absetzen.

**Während der Bauphase „Hafentiefe“** ergeben sich in Summe aus den beiden parallel stattfindenden Baggereinsätzen mit Tieflöffel- und Hopperbagger bei Elbe-km 656,5 mittlere Schluffkonzentrationen von 6,6 mg/l (Abbildung 5.4, links unten und rechts unten) und Sandkonzentration von 0,7 mg/l (Abbildung 5.5, links unten und rechts unten) über den Querschnitt verteilt. Bei maximaler Strömungsgeschwindigkeit während der Bauphase kann sich der Schluff über eine Länge von 18,0 km flussabwärts und 19,9 km flussaufwärts verteilen. Der Schluff entstammt den Arbeiten mit dem Tieflöffelbagger (Abbildung 5.4, links unten). Die Schluffverdriftungen aus den Hopperbaggerarbeiten reichen flussabwärts ca. 6,6 km und flussaufwärts ca. 6,8 km weit, da Schluff bei diesem

Verfahren lediglich in die sohnnahen Bereiche der Wassersäule aufgewirbelt wird. Die Sedimentationshöhe des durch die Hopperbaggerarbeiten verdrifteten Materials (Schluff) beträgt bei minimaler Strömung bis zu 2 cm, bei maximaler Strömung weniger als 1 cm. Für die Tieflöffelbaggerarbeiten wurde für Schluff sowohl bei maximaler als auch minimaler Strömung mittlere Sedimentationshöhen von unter 1 cm ermittelt. Für Sand kann die mittlere Sedimentationshöhe bei minimaler Strömung bis zu 4 cm und bei maximaler Strömung bis zu 1 cm betragen.

Tabelle 5.6. Zusammenfassung der Ergebnisse der Berechnung der bauzeitlichen Sedimentverdriftung

		Phase Schwimmtiefe		Phase Hafentiefe	
		Tieflöffelbagger	Hopperbagger	Tieflöffelbagger	
Baggerart		Tieflöffelbagger	Hopperbagger	Tieflöffelbagger	
Schwebstoffkonzentration in Querschnittsmitte [mg/l]	Schluff	0,9	4,6	2,0	
	Sand	0,6	-	0,7	
Max. Sedimentverdriftung* [km]	Schluff	Flussabwärts	18,6	6,6	18,0
		Flussaufwärts	20,2	6,8	19,9
	Sand	Flussabwärts	1,3	-	1,3
		Flussaufwärts	1,4	-	1,4
Durchschnittliche Sedimentationshöhe** [cm]	Schluff	Bei minimaler Strömung	-	1-2	-
		Bei maximaler Strömung	-	<1	-
		Bei mittlerer Strömung	<1	-	<1
	Sand	Bei minimaler Strömung	2-3	-	3-4
		Bei maximaler Strömung	<1	-	<1

\* Geschiebetransport nach Absink auf den Boden nicht berücksichtigt

\*\* angenommene durchschnittliche Breite = 1.500 m



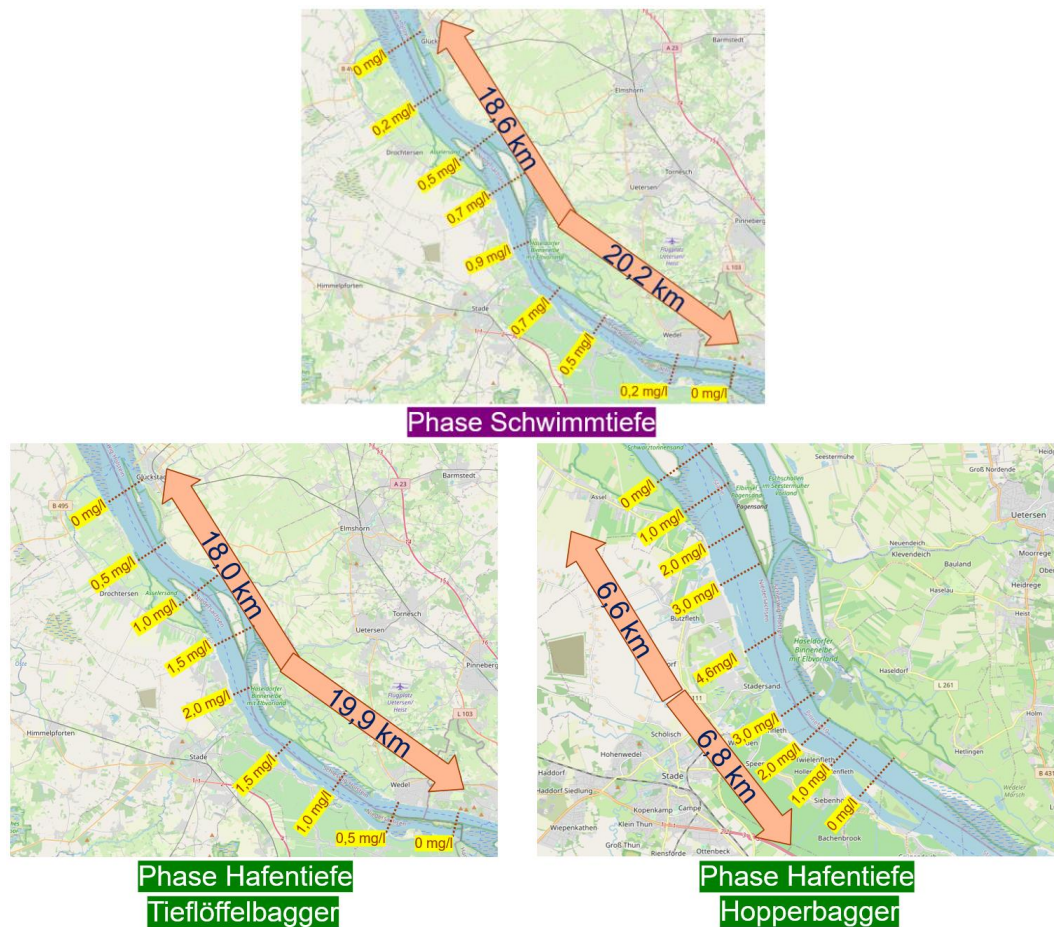


Abbildung 5.4. Isolinen für die Schwebstoffkonzentration und maximale Reichweite für Schluff. Oben: Phase Schwimmtiefe, unten links: Phase Hafentiefe, resultierend aus Tiefloeffelbagger, unten rechts: Phase Hafentiefe, resultierend aus Hopperbagger.



Abbildung 5.5. Isolinen für die Schwebstoffkonzentration und maximale Reichweite für Sand. Oben: Phase Schwimmtiefe, unten links: Phase Hafentiefe, resultierend aus Tiefloeffelbagger, unten rechts: Phase Hafentiefe, resultierend aus Hopperbagger.

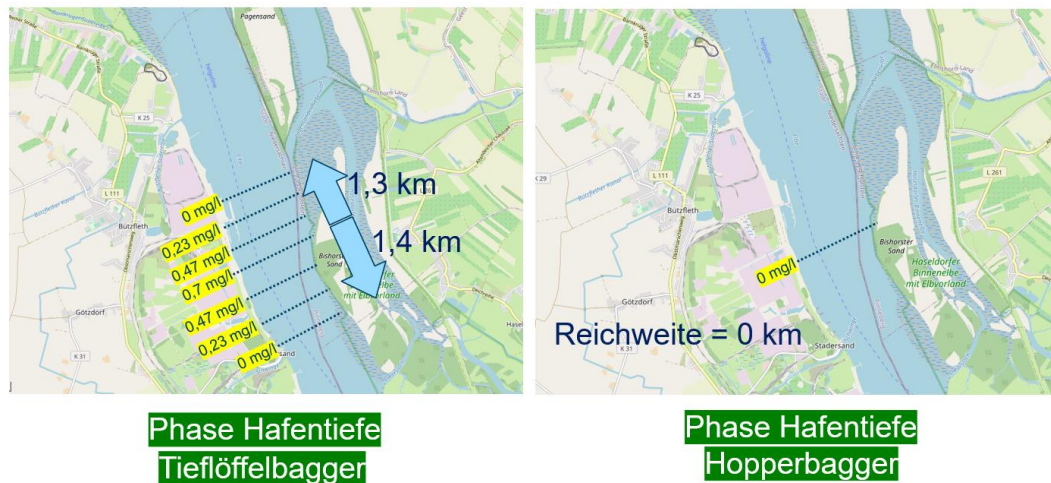


Abbildung 5.5 (Fortsetzung)

## 5.4 Weitere qualitative Schlussfolgerungen

In Kapitel 4 wurde mit Hilfe eines validierten hydromorphologischen Modells (Abschnitt 4.2) die Verdriftung und die Ablagerungen des bei der Unterhaltung der nautischen Tiefe des Hafens aufgewirbelten Materials untersucht. Da die Unterhaltung zwar von der Bauphase verschiedene Mengen mobilisiert, diese jedoch an denselben Orten in die Wassersäule gelangen, die zudem auch denselben hydrografischen Bedingungen ausgesetzt sind, können die numerischen Ergebnisse qualitativ auch im Hinblick auf die Bautätigkeit interpretiert werden, um so die in diesem Kapitel getroffenen Aussagen zu mittleren Sedimentkonzentrationen in der Wassersäule und Sohländerungen örtlich genauer zu beschreiben.

Hinsichtlich der Sedimentverdriftung lässt sich feststellen, dass

- Sich während der Ebbphase vor allem am Westufer der Elbe Sedimentfahnen mit höheren Konzentrationen ausbilden. Am Ostufer sowie in der Fahrrinne die Konzentrationen um eine Größenordnung darunter liegen (Abbildung 4.20, links).
- Während der Flutphase die Sedimentfahne gleichmäßig über den Flussquerschnitt verteilt ist (Abbildung 4.20, rechts). Sie weist jedoch verhältnismäßig geringe Konzentrationen auf, die eine Größenordnung unterhalb der Konzentrationen am Ostufer während der Ebbphase liegen.

Hinsichtlich der Sohländerung lässt sich darüber hinaus festhalten, dass

- Sich in den westlichen Uferbereichen eher Sediment abgelagert als am Ostufer oder in der Fahrrinne.
- Durch das Fehlen der Spundwände während der ersten Bauphase können von der Sedimentation Bereiche flussabwärts als auch flussaufwärts betroffen sein. Während der zweiten Bauphase, in der die Rammarbeiten bereits abgeschlossen sind, sind vorwiegend die Bereiche flussabwärts von der Sedimentation betroffen.

## 5.5 Zusammenfassung

Um die Auswirkungen der Bautätigkeit im Verhältnis zu natürlichem Sedimenttransport und Morphologie in der Elbe beurteilen zu können, wurde mit Hilfe empirischer Methoden über den Fließquerschnitt gemittelte Sedimentkonzentrationen in der Wassersäule und Sohländerungen der Elbe ermittelt.

Die Sedimentverdriftung während der Bauphase „Schwimmtiefe“, die mit einem Tieflöffelbagger durchgeführt werden soll, wurde für Schluff mit maximal ca. 20,2 km bis 18,6 km elbauf- und elbabwärts bestimmt, wohingegen für Sand mit einer Ausbreitung von weniger als 1,5 km in beide Richtungen zu rechnen ist. Während der Bauphase „Hafentiefe“, in der ein Hopperbagger und ein Tieflöffelbagger zur Anwendung kommen sollen, wurde eine maximale Ausbreitung von 7 km für Sand in beide Fließrichtungen und 18 km bis 20 km elbauf- und elbabwärts für Schluff ermittelt.

Die durch den Bau hervorgehobene gegenüber der natürlichen Sedimentkonzentration in der Elbe erhöhte Konzentration um maximal 0,9 mg/l Schluff und 0,6 mg/l Sand während der Bauphase „Schwimmtiefe“ sowie um 6,6 mg/l Schluff und 0,7 mg/l Sand während der Bauphase „Hafentiefe“ nehmen vom Elbquerschnitt am Hafen (Elbe-km 656,5) bis zur o.g. maximalen Verbreitungsgrenze auf Konzentrationen von 0 mg/l ab.

Lediglich über die gesamte Sohle des Verbreitungsraums der gebaggerten Sedimente kann mit empirischen Methoden eine durchschnittliche Sedimentationshöhe geschätzt werden. Sie beträgt durch die Bauphase „Schwimmtiefe“ ca. 2 cm bis 3 cm und durch die Bauphase „Hafentiefe“ bis zu 3 cm bis 4 cm. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Abschnitt 4.3.3 kann jedoch weiterhin angenommen werden, dass sich die Sedimentfahne vorwiegend am westlichen Elbufer ausbreitet und daher auch dort mit Sedimentationen zu rechnen ist. In Flussmitte und am Ostufer treten dazu im Vergleich zum Westufer 10-fach geringere Sedimentkonzentrationen auf, was auch eine dem Ostufer gegenüber verringerte Sedimentation nahelegt.

## 6 Langfristiger Einfluss des AvG und Empfehlungen

Die während des Untersuchungszeitraums von ca. einem Monat ermittelten Ergebnisse werden in diesem Kapitel hinsichtlich ihrer Langzeitwirkung auf die Elbe mit Hilfe des natürlichen sedimentologischen und morphologischen Geschehens eingeordnet. Zunächst wird die Sedimentverdriftung betrachtet, gefolgt von der Änderung der Sohle.

### 6.1 Sedimentverdriftung

Durch die Unterhaltung der Hafenbecken kommt es im nahegelegenen Bereich des Hafens zwischen Elbe-km 656 und Elbe km 657,2 zu einem geringen Anstieg der Sedimentkonzentration. Während der Ebbphase können in einem Bereich von 2,5 km Länge lokal Konzentrationen erreicht werden, die die natürliche Sedimentkonzentration von ca.  $10 \text{ g/m}^3$  überschreiten (Abschnitt 4.3.2). Die langsamste Sinkgeschwindigkeit der feinen Sedimente (Schluff) kann mit  $0,0005 \text{ m/s}$  angenommen werden. Wird weiterhin davon ausgegangen, dass durch das Lufteggen Sedimente bis zu einer Höhe von 3 m aufgewirbelt werden können, so sinken die Schluff-Partikel innerhalb von 6000 s, d.h. über ca. 2 Stunden auf die Sohle. Bei einer Eggzeit von 3 h für den Südhafen und 6h für den AvG und somit weitaus weniger als 22 h täglich kann davon ausgegangen werden, dass es zu einer Akkumulation von Sedimenten kommt, da vor dem Beginn der Arbeiten am folgenden Tag sich die aufgewirbelten Schluff-Partikel des Vortages absetzen konnten. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Hafenbecken als strömungsberuhigte Bereiche als Sedimentfallen für die in der Elbe transportierten Sedimente wirken. Durch das Lufteggen werden somit die in den Hafenbecken gefangenen Sedimente der Wassersäule wieder zugeführt und nehmen wieder am Transportgeschehen in der Elbe teil.

### 6.2 Änderung der Sohle

Durch den Bau des AvG und der Unterhaltung durch Lufteggen kommt es zu den in Abbildung 6.1 aufgezeigten Sohländerungen. In den ufernahen Bereichen des Hauptarms der Elbe kommt es zu einer Abfolge von sedimentierten und erodierten kleinflächigen Bereichen, die als dynamisch und häufig wechselnd angesehen werden können. Gleiches kann auch für Bereiche in größerer Entfernung vom Hafen festgestellt werden (siehe Anhang, Abbildung A.5). Elbabwärts des Nordhafens ist ein größerer Sedimentationsbereich mit Höhen von bis zu 20 cm zu erkennen. Dies ist jedoch durch Bathymetrieunterschiede zwischen dem Istzustand und dem Planzustand in der Elbe begründet und nicht durch die Anlage des AvG.

Gegenüber den dynamischen Sohländerungen der Elbe (siehe Anhang, Abbildung A.2) liegen die hier ermittelten akkumulierten Änderungen durch den Bau und die Unterhaltung von  $\pm 0,2 \text{ m}$  innerhalb der Bandbreite des dynamischen Sedimentations- und Erosionsgeschehens der Elbe von  $\pm 0,3 \text{ m}$ . Unter Berücksichtigung der durch das Lufteggen der Elbe wieder zugeführten Sedimente werden daher keine maßgebenden Auswirkung auf das Sedimentations- und Erosionsgeschehens in der Elbe gesehen.

Langfristig kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass sich am Westufer flussabwärts des Nordhafens aufgrund einer lokal erhöhten Sedimentkonzentration in der Wassersäule eine erhöhte Tendenz zur Sedimentation einstellen wird. Dies ist durch eine bis zu ca. 10 mal höhere Sedimentkonzentration während der Ebbphasen am Westufer verglichen mit der Flussmitte oder dem Ostufer begründet.

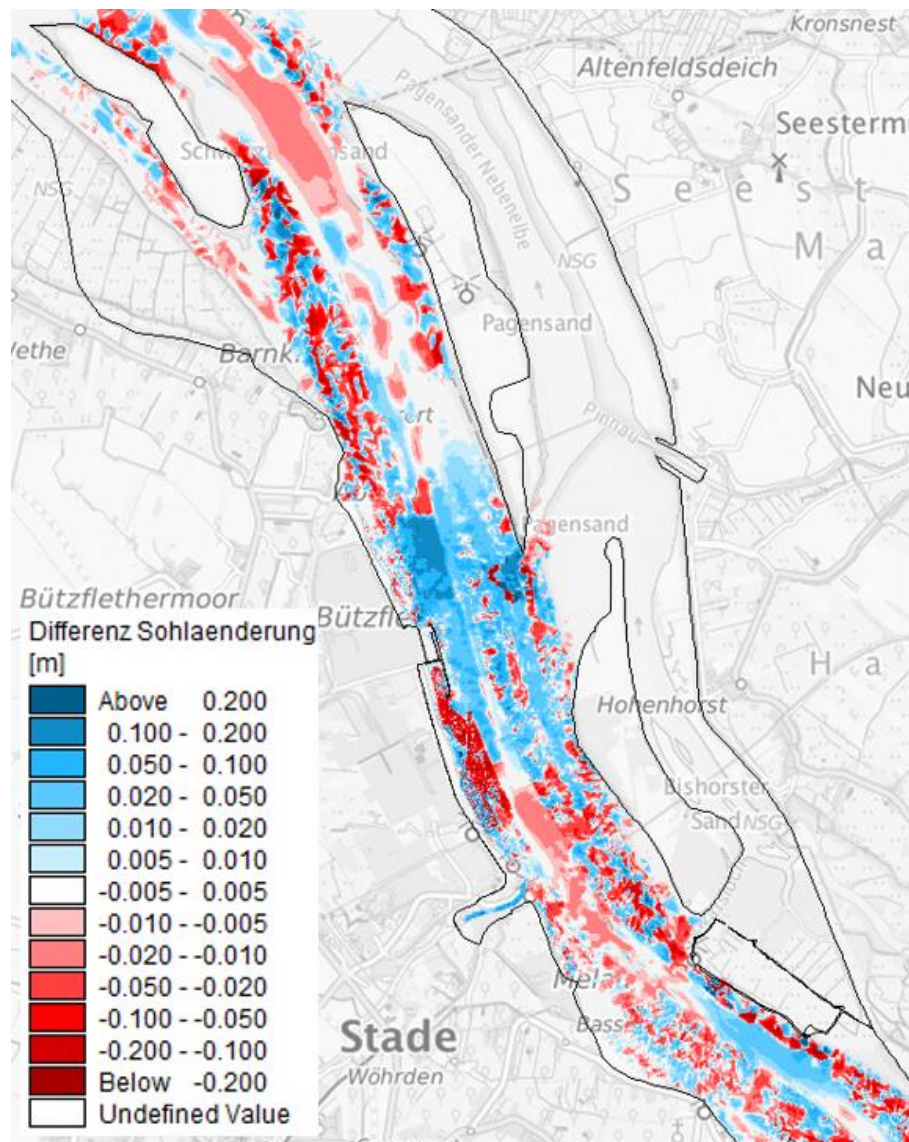


Abbildung 6.1. Differenz der Sohländerung zwischen dem Planzustand mit Unterhaltung und dem Istzustand im Bereich Stade-Bützfleth.

## 7 Zusammenfassung und Empfehlungen

In diesem Bericht wurden die Auswirkungen des Baus und der Unterhaltung des Importanlegers für Flüssiggase (AvG) auf den Sedimenttransport und die Sohländerungen in der Elbe untersucht. Für die Unterhaltung des AvG ist die Verwendung einer pneumatischen Egge (Luftegge) vorgesehen, die im Südhafen bereits seit mehreren Jahren im Einsatz ist. So wurde im Rahmen der Untersuchung auch die Wirksamkeit des Verfahrens für den AvG betrachtet.

### 7.1 Wirkprognose der Unterhaltung der Sohle am AvG

Das hydromorphologische 3D-Modell /3/ wurde um die Unterhaltungsmaßnahme Lufteggen erweitert, um die Auswirkungen des Lufteggens auf den Sedimenttransport und die Morphologie der Elbe beurteilen zu können. Hierfür wurde eine sehr gute Modellgüte nachgewiesen.

Folgende Ergebnisse wurden ermittelt:

- Wirksamkeit des Lufteggens:
  - Für die Unterhaltung des AvG muss von einem Zeitbedarf von 6 h pro Tag ausgegangen werden.
- Sedimentverdriftung:
  - Durch die Unterhaltung des AvG kann es zu einer geringen Zunahme der Sedimentkonzentrationen im Wasserkörper im Nahbereich des Hafens von bis zu 24 % kommen. In der Elbe nimmt die Sedimentkonzentration gegenüber dem Istzustand praktisch nicht zu, da das durch das Hafenbecken des AvG dem Wasserkörper der Elbe entnommene Sediment durch die Tätigkeit des Lufteggens dem Wasserkörper wieder zugeführt wird.
  - Einer lokale Akkumulation der Sedimente durch die Unterhaltung über längere Zeiträume hinweg kann am Westufer nördlich des Nordhafens nicht ausgeschlossen werden.
- Sohländerung:
  - In der Flussachse der Elbe kann es zu einer Zunahme der Sedimentation an einigen Stellen von bis zu 5 mm zwischen Elbe-km 640 und Elbe-km 675 kommen.
  - Langfristig ist eine höhere Sedimentationstendenz im Bereich des Westufers nördlich des Nordhafens möglich. Sie ist um Faktor 10 höher als am Ostufer.
  - Alle durch die Unterhaltung des AvG numerisch ermittelten morphologischen Änderungen spielen bei der Sohländerung gegenüber der natürlichen morphologischen Dynamik in der Tideelbe jedoch eine untergeordnete Rolle.

### 7.2 Bauzeitliche Sedimentverdriftung

Mit Hilfe empirischer Methoden wurden über den Fließquerschnitt gemittelte Sedimentkonzentrationen in der Wassersäule und Sohländerungen der Elbe ermittelt, um die Auswirkungen der Bautätigkeit im Verhältnis zu natürlichem

Sedimenttransport und Morphologie in der Elbe beurteilen zu können. Die zusätzliche qualitative Berücksichtigung der hydromorphologischen Untersuchungen der Unterhaltungsmaßnahmen mit dem 3D-Modell erlaubten weitere Rückschlüsse.

Folgende Ergebnisse wurden ermittelt:

- Sedimentverdriftung
  - Bauphase „Schwimmtiefe“ (Tieflöffelbagger)
    - Für Schluff ist mit einer Ausbreitung von maximal 13 km bis 14 km elbauf- und elbabwärts zu rechnen.
    - Für Sand ist mit einer Ausbreitung von weniger als 1 km in beide Richtungen zu rechnen.
    - Durch den Bau wird von einer Erhöhung der Sedimentkonzentration in der Elbe von maximal 0,9 mg/l für Schluff und von maximal 0,6 mg/l Sand ausgegangen.
  - Bauphase „Hafentiefe“ (Hopperbagger)
    - Für Schluff ist mit einer Ausbreitung von maximal 7 km in beide Fließrichtungen zu rechnen.
    - Sandkonzentrationen sind in dieser Bauphase vernachlässigbar.
    - Durch den Bau wird von einer Erhöhung der Sedimentkonzentration in der Elbe von maximal 6,6 mg/l für Schluff ausgegangen.
  - In beiden Bauphasen nehmen die ermittelten maximalen Sedimentkonzentrationen vom Elbquerschnitt am Hafen (Elbe-km 656,5) bis zur maximalen Verbreitungsgrenze (13 km bis 14 km bzw. weniger als 1 km in beiden Fließrichtungen für Schluff und Sand) auf Konzentrationen von 0 mg/l ab.
  - Die hydromorphologischen Modellergebnisse lassen für beide Bauphasen schlussfolgern, dass sie Sedimentfahne sich vorwiegend am westlichen Elbufer ausbreitet und daher auch dort mit Sedimentationen zu rechnen ist. In Flussmitte und am Ostufer treten dazu im Vergleich 10-fach geringere Sedimentkonzentrationen auf.
- Änderung der Sohle
  - Bauphase „Schwimmtiefe“
    - Die durchschnittliche Sedimentationshöhe wurde auf ca. 1 cm geschätzt.
  - Bauphase „Hafentiefe“
    - Die durchschnittliche Sedimentationshöhe wurde auf bis zu 2 cm geschätzt.
  - Die hydromorphologischen Modellergebnisse lassen für beide Bauphasen schlussfolgern, dass am Westufer eine 10-fach höhere Sedimentation möglich ist als am Ostufer und in der Flussmitte.

### 7.3 Empfehlungen

Durch die regelmäßige Durchführung des Lufteggens für die Unterhaltung der Sohlentiefe im Hafenbecken des AvG und der Zufahrt sowie der anderen Hafenbecken kann eine Beeinflussung des Sedimenthaushalts in der Elbe weitestgehend ausgeschlossen werden.

Für eine besonders effiziente Durchführung der Unterhaltungsmaßnahmen wird folgendes empfohlen:

- Die vorwiegende Durchführung des Lufteggens während der Ebbphasen sorgt dafür, dass die Eggzeiten verkürzt und der damit verbundene Energieverbrauch reduziert werden kann.
- Regelmäßige Peilungen im Hafenbecken des AvG analog zu den Peilungen im Südhafen sollten durchgeführt werden, um den Einsatz der pneumatischen Egge weiter zu optimieren.



## 8 Quellen

- /1/ IDAT GmbH, 2021: „Anlage 023908/1a, Bohrungen: Lage- und Übersichtsplan“, Stade-Bützfleth, Anleger für verflüssigte Gase (AvG) und Umbau Südhafen
- /2/ IDAT GmbH, 2021: „Anlage 023908/2.1, Bohrprofile B 1 bis B 5“, Stade-Bützfleth, Anleger für verflüssigte Gase (AvG) und Umbau Südhafen
- /3/ DHI WASY, 2021: „Anleger für verflüssigte Gase bei Stade-Bützfleth , Hydromorphologisches Gutachten“, Juli 2021.
- /4/ Elbclearing. 1996: *“Herstellung und Unterhaltung der vorhandenen Solltiefen im Bützflether Nord- und Südhafen sowie in den Zufahrtbereichen mit Hilfe einer Schlickegge mit Luftinjektionsverfahren”*, 1996.

## Anhang

Der Anhang enthält zusätzliche Auswertungen zur Sedimentverdriftung und Sedimentation, die durch die Unterhaltung der Sohle im Planzustand zu erwarten sind. Abbildung A.1 zeigt die Wasserspiegellagen und die Schwebstoffkonzentration gemittelt über in die Wassersäule während eines Spring-Nipp-Tidezyklus'. Für den Bereich der Tideelbe und den Zeitraum vom 17.7. bis 13.8.2019 (29 Tage) zeigt Abbildung A.2 die natürliche Sohländerung im Istzustand, Abbildung A.3 die natürliche Sohländerung im Planzustand (ohne Unterhaltung), Abbildung A.4 die Sohländerung im Planzustand mit Unterhaltung und Abbildung A.5 die Differenz der Sohländerung im Planzustand mit und ohne Unterhaltung. Detailansichten des Bereichs um den Hafen Stade-Bützfleth sind in Abschnitt 6.2 gegeben.

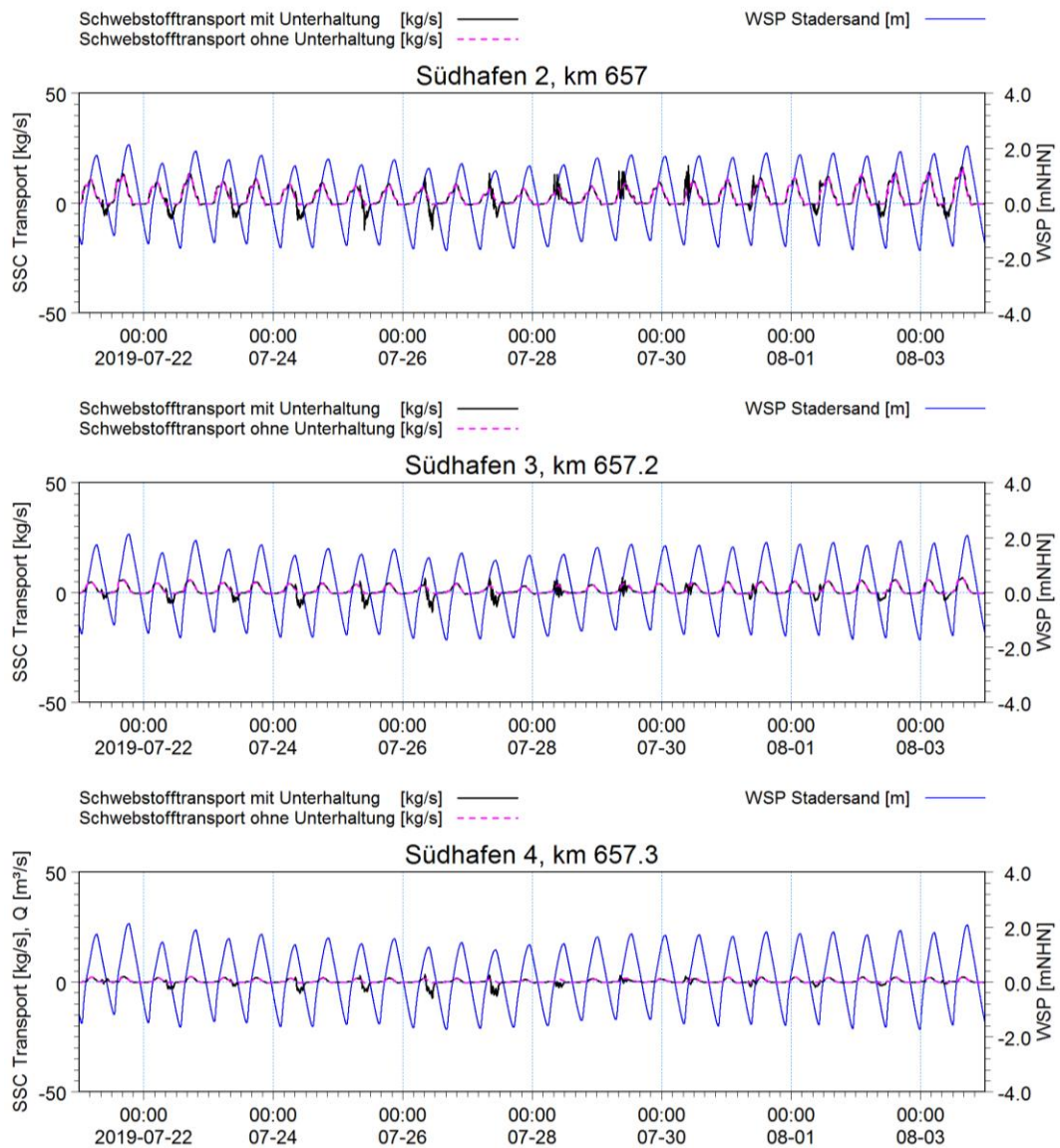


Abbildung A.1. Schwebstofftransport an den Bilanzquerschnitten für einen Spring-Nipp-Tidezyklus (21.7.2019 – 4.8.2019)

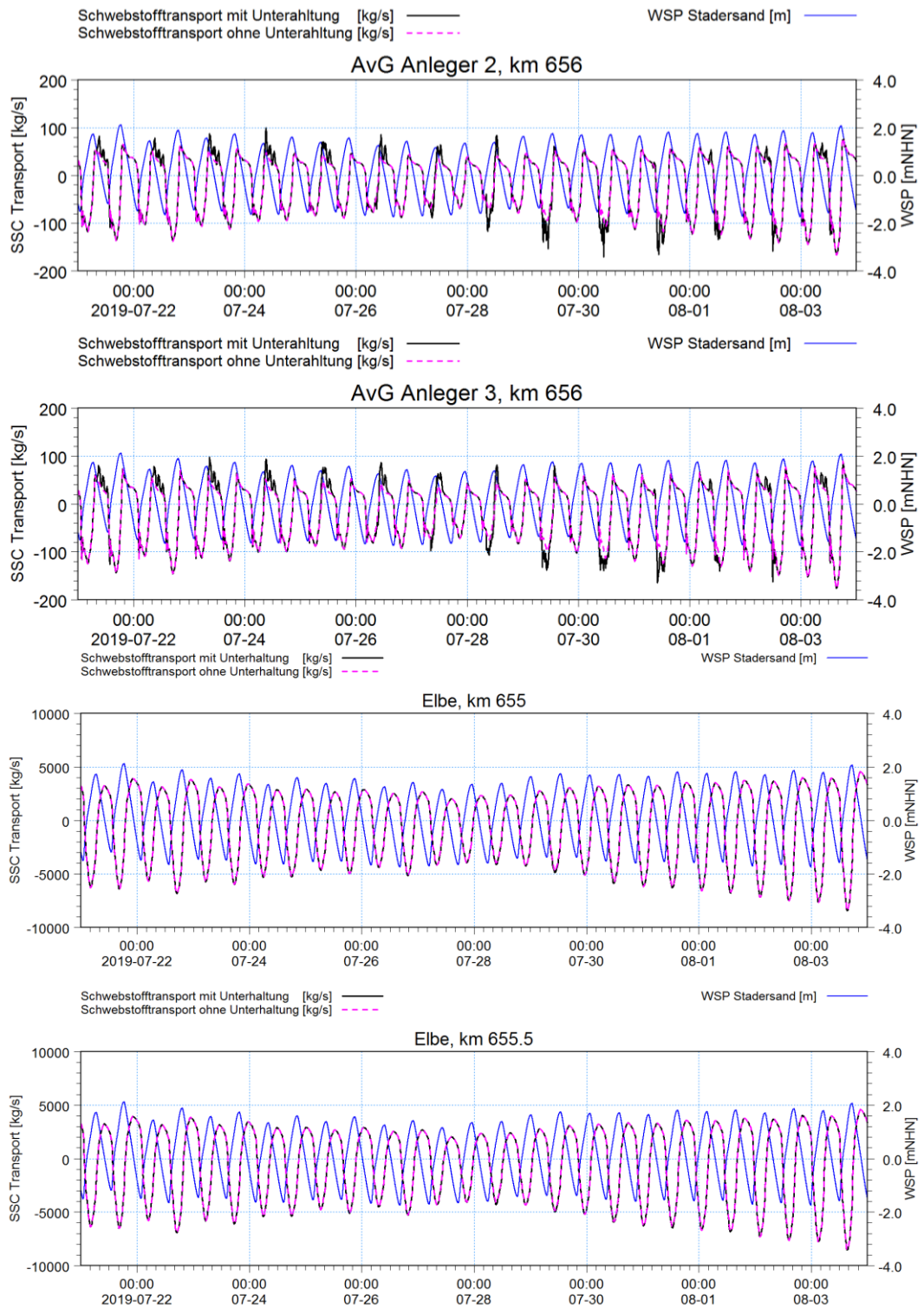


Abbildung A.1 (Fortsetzung)

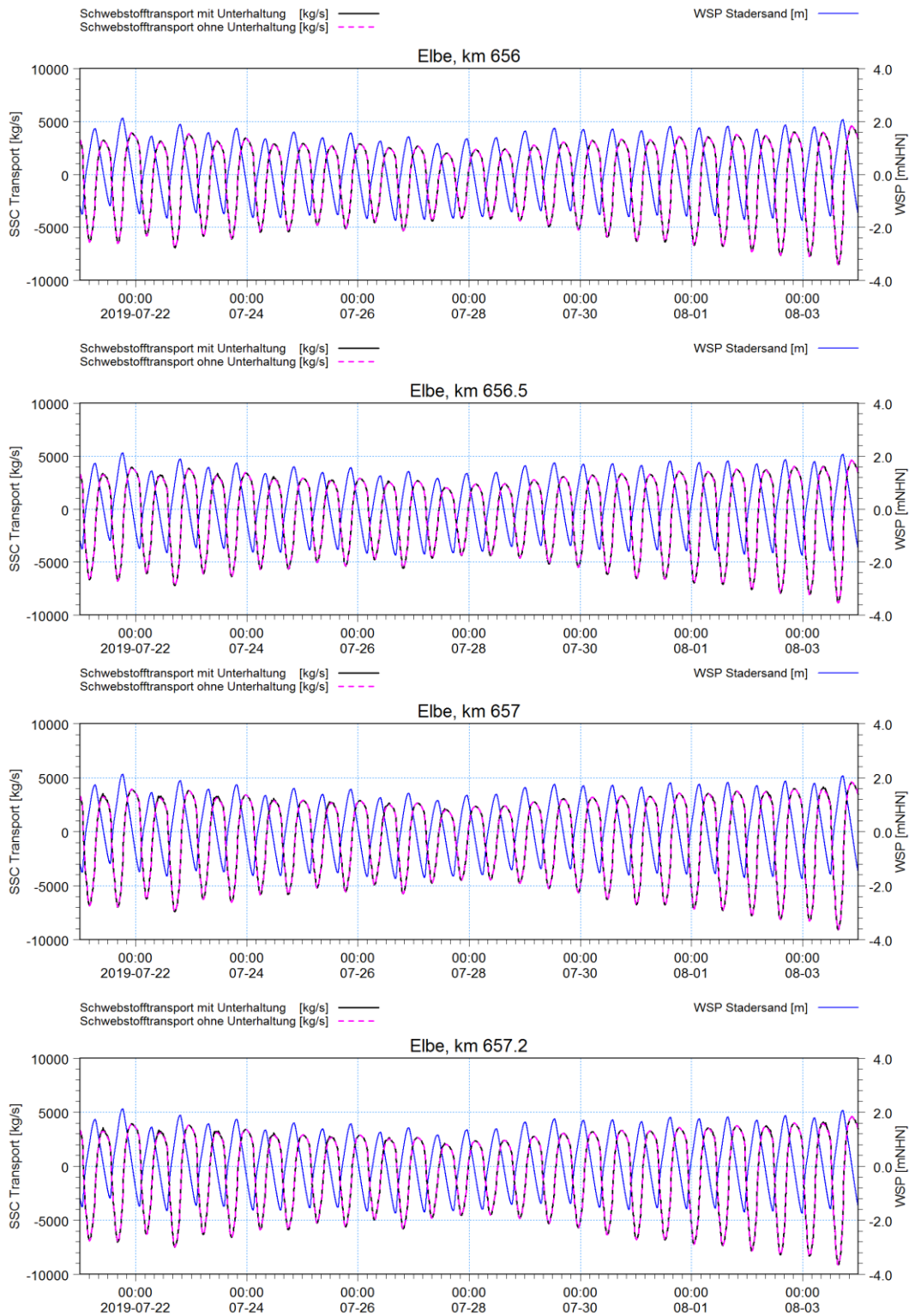


Abbildung A.1 (Fortsetzung)

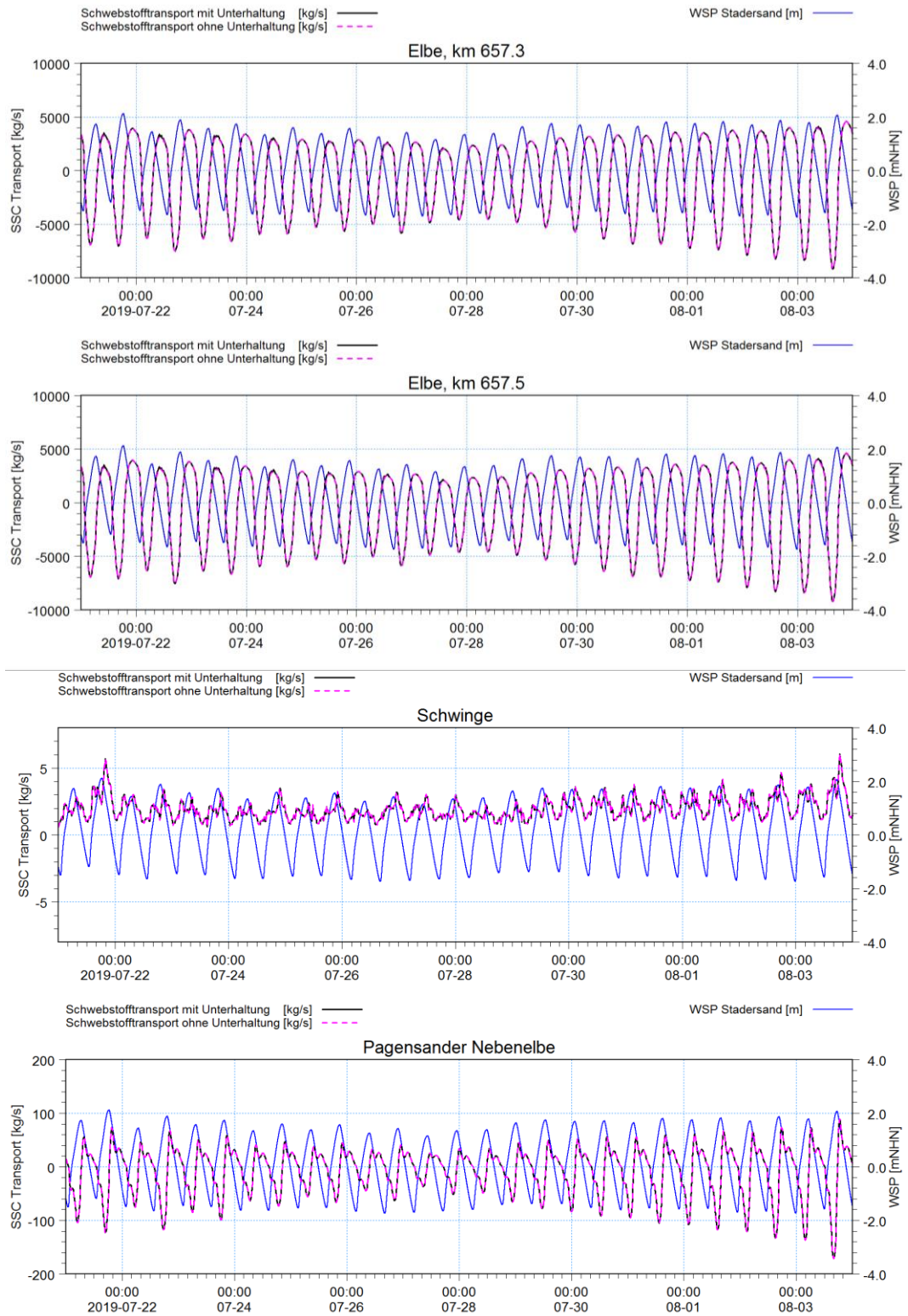


Abbildung A.1 (Fortsetzung)

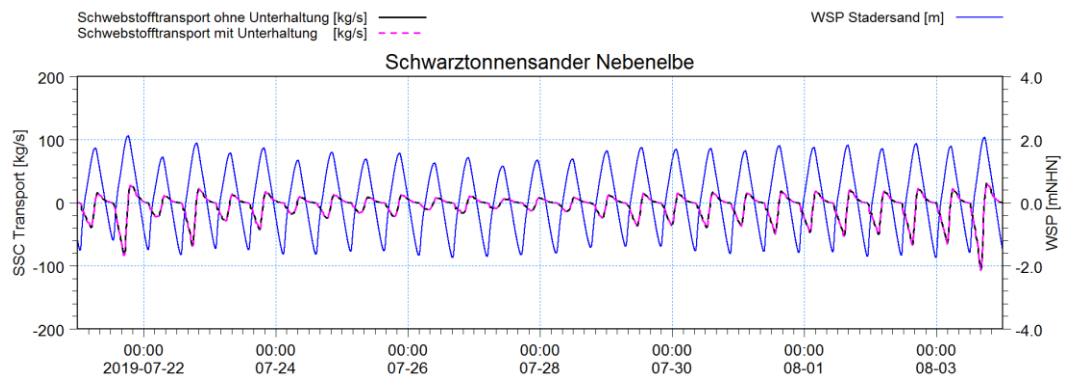


Abbildung A.1 (Fortsetzung)

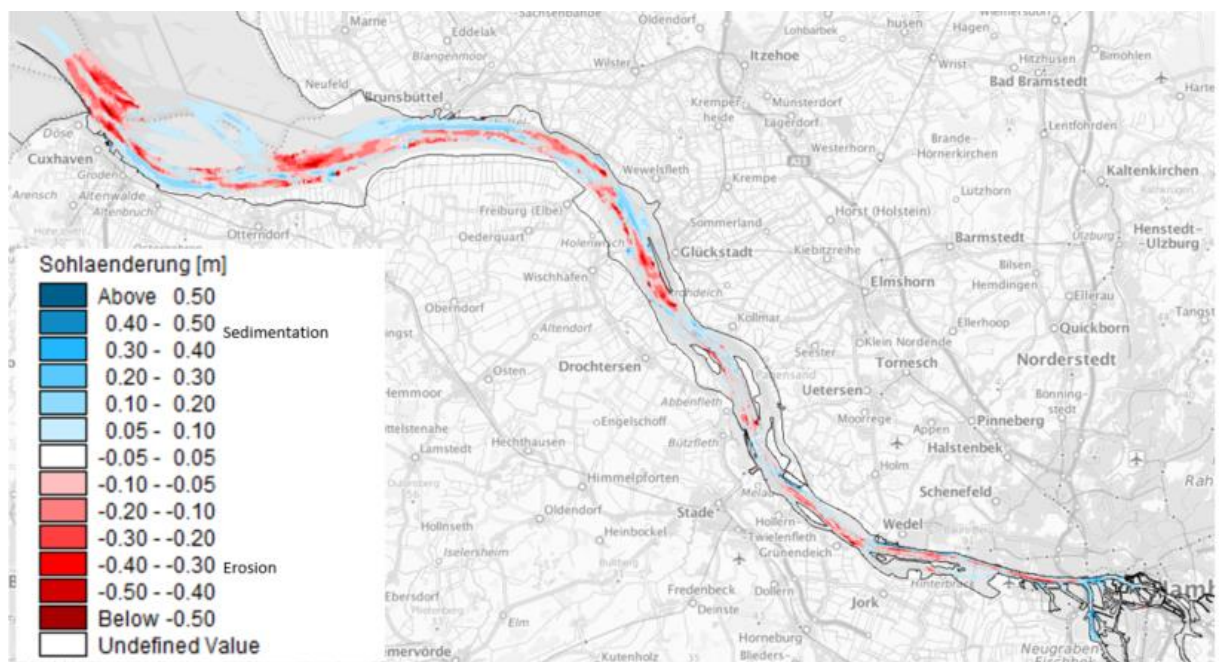


Abbildung A.2. Natürliche Sohländerung im Istzustand.



Abbildung A.3. Natürliche Sohlländerung im Planzustand (ohne Unterhaltung).



Abbildung A.4. Sohlländerung im Planzustand mit Unterhaltung.

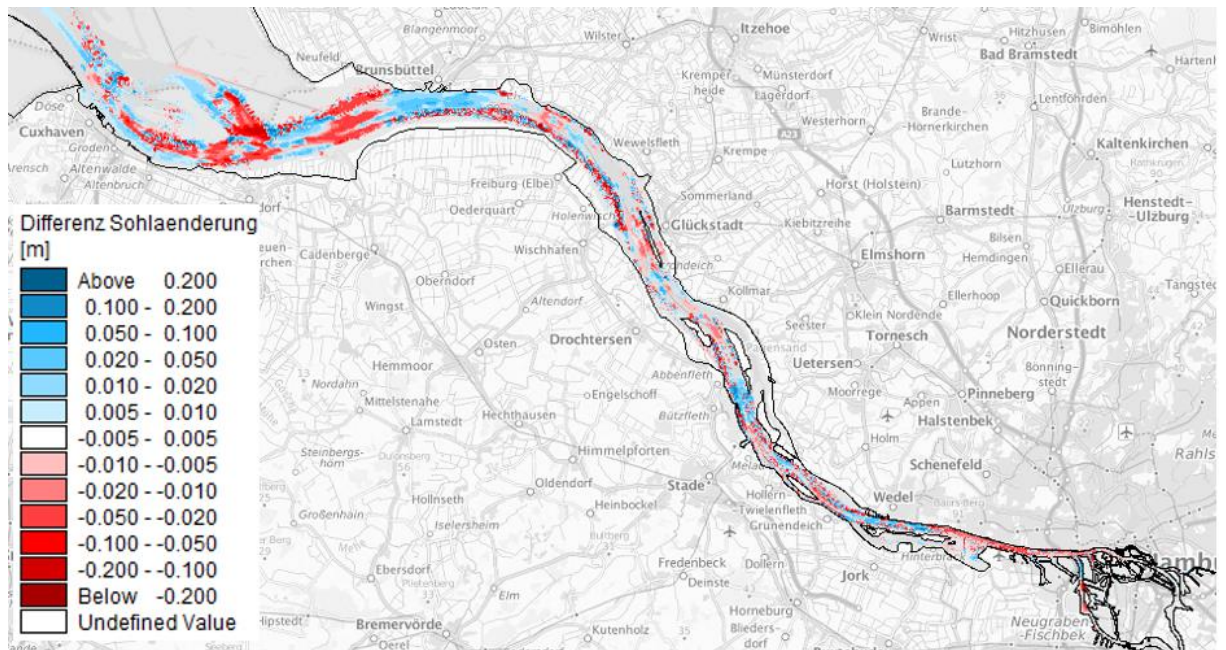


Abbildung A.5. Differenz Sohländerung Planzustand mit Unterhaltung – Istzustand.