

Elbehafen Brunsbüttel „Jetty Westbecken – FSRU-Liegeplatz“

Unterlagen zum Antrag auf Planfeststellung gemäß § 68 Absatz 1 WHG

M7.3.1

Untersuchung zur bauzeitlichen Sedimentverdriftung

| Version | Datum | Beschreibung der Änderungen | Erstellt durch | Geprüft durch |
|---------|------------|---------------------------------------|----------------|---------------|
| 00 | 09.02.2023 | Zulassung vorzeitiger Maßnahmenbeginn | ■ | ■ |
| 01 | 07.06.2024 | Finaler Planfeststellungsantrag | ■ | ■ |
| | | | | |

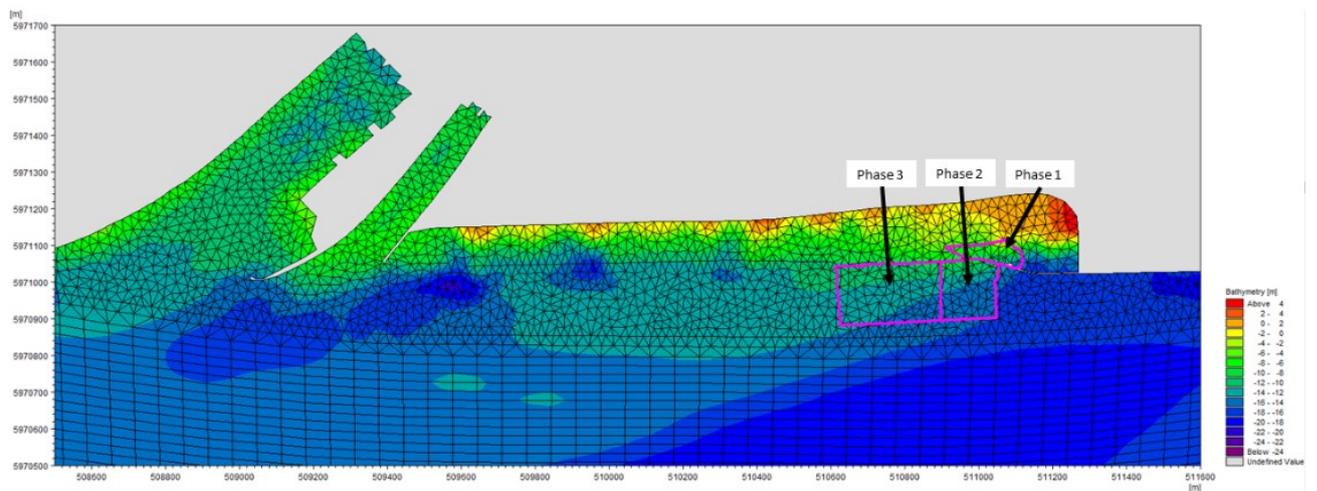
FSRU-Terminal Brunsbüttel

Untersuchung der bauzeitlichen Sedimentverdriftung zur Herstellung der Liegewanne am geplanten Jetty in Brunsbüttel

Bericht
Projekt Nr. 4300369253-R4-0611

24.01.2023

Erstellt für RWE Supply & Trading GmbH



Untersuchung der bauzeitlichen Sedimentverdriftung zur Herstellung der Liegewanne am geplanten Jetty in Brunsbüttel

Report
Projektnummer 4300369253-R4-0611

Erstellt für: RWE Supply & Trading GmbH
Vertreten durch: [REDACTED]

[REDACTED] 09.02.2023

X [REDACTED]

[REDACTED]
Senior Projekt Manager
Signed by [REDACTED]

[REDACTED] 09/02/2023

X [REDACTED]

[REDACTED]
Prokurist
Signiert von: [REDACTED]

Project Manager: [REDACTED]
Quality Supervisor: [REDACTED]
Project No.: 14806725
Classification: **Restricted:** This document may be shared within DHI whereas sharing it outside the DHI Group entities is subject to the client's prior approval.
File name: **Impact** of Dredging_Brunsbuettel_Report_DE.docx

Inhalt

| | | |
|-----------------|--|-----------|
| 1 | Veranlassung | 5 |
| 2 | Allgemeine Vorgehensweise | 6 |
| 3 | Datengrundlagen | 7 |
| 3.1 | Übersicht der verwendeten Daten | 7 |
| 3.2 | Baggerarbeiten im Untersuchungsgebiet | 8 |
| 4 | Hydromorphologisches 3D-Modell der Elbe | 9 |
| 4.1 | Software MIKE 3 Flow Model FM für drei-dimensionale hydrodynamische Modellierung von Oberflächengewässern | 9 |
| 4.2 | MT-Modul für Feinsedimenttransport | 11 |
| 4.3 | Bathymetrie und Berechnungsnetz | 15 |
| 4.4 | Weitere Modellanpassungen | 15 |
| 4.5 | Modellzeitraum und Randbedingungen | 17 |
| 4.6 | Sedimenteigenschaften | 18 |
| 5 | Ergebnisse | 19 |
| 5.1 | Sedimentation | 19 |
| 5.2 | Schwebstoffverdriftung | 21 |
| 6 | Zusammenfassung | 23 |
| 6.1 | Hydromorphologisches Modell | 23 |
| 6.2 | Sedimentation | 23 |
| 6.3 | Schwebstoffverdriftung | 23 |
| 7 | Referenzen | 24 |
| Anhang A | Sensitivitätstest | 25 |
| Anhang A.1 | Initiales Szenario (Szenario 1) | 25 |
| Anhang A.2 | Einfluss der Salinität (Szenarien 2 und 3) | 28 |
| Anhang A.3 | Einfluss der Sinkgeschwindigkeit (Szenario 4) | 30 |

Abbildungen

| | | |
|---------------|--|----|
| Abbildung 1.1 | Planungsgebiet zur Herstellung des AvG-Anlegers nebst Liegewanne /1/ | 5 |
| Abbildung 3.1 | Geplante Liegewanne in Brunsbüttel /1/ | 8 |
| Abbildung 3.2 | Geplante Herstellung der Liegewanne in drei Bausphasen /1/ | 8 |
| Abbildung 4.1 | Tideelbemodell von Geesthacht (oberstrom) bis Steinriff (unterstrom) mit Pegelstandorten. | 9 |
| Abbildung 4.2 | Prinzip eines 3D-Netzes nach σ -Methode | 11 |
| Abbildung 4.3 | Schematische Darstellung der berücksichtigten Prozesse und der Layerdifferenzierung über die Sedimenttiefe im MT-Modul. | 15 |
| Abbildung 4.4 | Bathymetrie und Meshauflösung im Untersuchungsgebiet von Brunsbüttel (Bereich der Liegewanne mit den drei Bauphasen ist hervorgehoben) | 16 |
| Abbildung 4.5 | Wasserstand am Pegel Cuxhaven Steubenhöft (oben) und Abfluss bei Neu-Darchau (unten) für den Modellzeitraum 15.02.2021 bis 08.03.2021 | 17 |
| Abbildung 5.1 | Sohländerung zum Ende des Szenarios 4 in Brunsbüttel. Oben: Bereich westlichen des Hafens; Unten: Bereich westlich und Östlich des Hafens. | 20 |
| Abbildung 5.2 | Maximaler Schwebstoffgehalt im Szenario 3 | 22 |
| Abbildung A 1 | Sohländerung zum Ende des Szenarios 1 in Brunsbüttel | 27 |

| | |
|---|----|
| Abbildung A 2 Sohländerung zum Ende des Szenarios 2 in Brunsbüttel..... | 29 |
| Abbildung A 3 Sohländerung zum Ende des Szenarios 3 in Brunsbüttel..... | 29 |
| Abbildung A 4 Sohländerung zum Ende des Szenarios 4..... | 31 |

Tabellen

| | |
|---|----|
| Tabelle 3.1 Verwendete Daten..... | 7 |
| Tabelle 4.1 Baggervolumen und -gerät in den drei Bauphasen | 18 |
| Tabelle 4.2 Baggergerät und Sedimentmobilisierung..... | 18 |
| Tabelle 4.3 Modellerte Korngrößenverteilung in den drei Bauphasen | 18 |
| Tabelle A 1 Modellkonfiguration in Szenario 1 | 25 |
| Tabelle A 2 Modellkonfiguration in Szenario 2 und 3 | 28 |
| Tabelle A 3 Modellkonfiguration im Szenario 4 | 30 |

1 Veranlassung

Die RWE Supply & Trading GmbH plant am Standort Elbehafen Brunsbüttel den Neubau eines Importanlegers für verflüssigte Gase (kurz AvG), welcher vorrangig für die Einspeisung von Flüssiggas zur Verfügung stehen wird. Das Vorhaben soll am Nordufer der Elbe unmittelbar westlich des bestehenden Hafens und etwa 1,5 km östlich der Zufahrt in den Nord-Ostsee-Kanal realisiert werden. Der Anleger beherbergt eine schwimmenden Speicher- und Regasifizierungsanlage (Floatable Storage and Regasification Unit - FSRU). Die Abbildung 1.1 zeigt einen Lageplan der Hafenanlage.

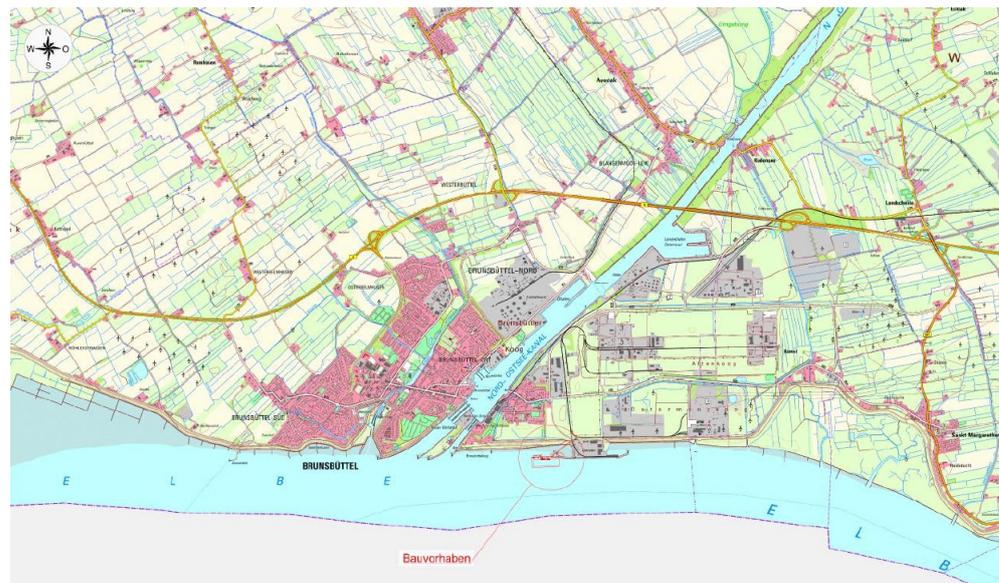


Abbildung 1.1 Planungsgebiet zur Herstellung des AvG-Anlegers nebst Liegewanne /1/

Baggerarbeiten bei der Herstellung der Liegewanne unter wechselnden Strömungsbedingungen haben die Ausbreitung von Schwebstoffahnen im Bereich der Tide-Elbe und des Elbe-Ästuars zur Folge. Das Material setzt sich im Elbe-Ästuar verteilt mit unterschiedlicher Mächtigkeit ab und kann so zu Änderungen der Gewässersohle sowie u.U. den Betrieb der Schleusentore des Nord-Ostsee-Kanals und bodennahe Lebewesen beeinträchtigen.

Dieses Gutachten untersucht die Auswirkung auf das Sedimentationsgeschehen beim Bau des geplanten Anlegers. Zunächst wird die allgemeine Vorgehensweise in Kapitel 2 beschrieben, anschließend die Datengrundlage in Kapitel 3 dargestellt, bevor in Kapitel 4 das verwendete hydromorphologische Modell vorgestellt wird. Die Ergebnisse sind in Kapitel beschrieben.

2 Allgemeine Vorgehensweise

Die Vorgehensweise basiert auf dem Grundsatz möglichst minimal konservative, aber noch auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse zu erzielen. Hierfür bildet ein bei DHI bestehendes hydromorphologisches Modell der Elbe die Grundlage.

Um belastbare und im Hinblick auf die Schwebstoffkonzentrationen auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse zur Sedimentation im Untersuchungsraum durch die Baggerarbeiten für den geplanten Anleger zu erzielen, wurden in der Modellrechnung die drei Baggerphasen zur gleichen Zeit simuliert. Zudem wurde für die Durchführung der Bauphasen eine durchgängige Arbeitszeit von 24 Stunden am Tag angenommen.

Zusätzlich zu der erhöhten Schwebstoffmenge wurde ein Sensitivitätstest zu den Parametern Sinkgeschwindigkeit und Salinität durchgeführt, um insgesamt das Sedimentationsgeschehen möglichst konservativ abzubilden.

Eine Resuspension von der Sohle wird aus Konservativitätsgründen ebenfalls unterbunden, indem ein relativ hoher Wert für die kritische Sohlschubspannung für die Erosion angesetzt wird.

Generell finden bei den Simulationen nur Sedimente aus dem Baggergut Berücksichtigung, da keine Daten der natürlichen Schwebstoffkonzentrationen zur Kalibrierung vorliegen.

Zur Untersuchung der baubedingten Schwebstofffahnen und Veränderungen der Sohle im Untersuchungsraum wurde im Einzelnen wie folgt vorgegangen:

- Prüfung und Übernahme der Datengrundlage
- Übernahme und Anpassung des bestehenden 3-dimensionalen (3D) numerischen Modells der Elbe aus vorheriger Studie /2/
- Auswahl eines repräsentativen Zeitraums für die Bauphase
- Hydromorphologische Simulation der Schwebstoffverdriftung und Sedimentation während der Bauphase
- Ausweisung der baubedingten Sedimentation im Elbe-Ästuar anhand von 2D-Abbildungen

3 Datengrundlagen

Die Datengrundlage und deren Qualität bestimmt maßgeblich die Qualität der Untersuchung. Die verfügbaren Daten werden in diesem Kapitel zusammengestellt.

3.1 Übersicht der verwendeten Daten

Für das numerische Modell und die Berechnung der Baggertätigkeiten wurden die in Tabelle 3.1 angegebenen Datensätze verwendet. Verwendete Literaturquellen sind in Kapitel 7 gesondert aufgeführt.

Tabelle 3.1 Verwendete Daten

| Bereitgestellt durch | Datensatz | Stand |
|--------------------------|---|-----------|
| DHI WASY | Numerisches Modell Tideelbe | 2022 |
| WKC, WSV | Peilungen | 2016-2021 |
| Portal-Tideelbe | Wasserstände am Pegel Cuxhaven, am Sperrwerk Schwinge, Pinnau | 2021 |
| Portal-Tideelbe | Abflussmengen bei Geesthacht | 2021 |
| Helmholtz-Zentrum | Wassertemperatur und Salzgehalt an der Messtation Cuxhaven Ferrybox | 2021 |
| Portal-Tideelbe | Wassertemperatur bei Hanskalbsand | 2021 |
| Hygiene Institut Hamburg | Wassertemperatur an der WGMN-Station Bunthaus | 2021 |
| DWD | Windgeschwindigkeit und -richtung der DWD-Station Cuxhaven | 2021 |
| WKC | Plandaten zum Anleger im Vektorformat | 2022 |
| BMP/WKC | Baggerkonzept | 2022 |
| Ramboll/WKC | Korngrößenverteilung | 2022 |

Alle Daten wurden, wenn nicht bereits vorliegend, in das Koordinatensystem ETRS 1989 UTM 32N (EPSG:25832) überführt.

3.2 Baggerarbeiten im Untersuchungsgebiet

Die Durchführung der Baggerarbeiten zur Herstellung der geplanten Liegewanne erfolgt in 3 Bauphasen nach dem Konzept von WKC /1/. Hierbei wird eine Liegewanne von 395 m Länge, 110 m Breite und einer nautischen Tiefe von 17,60 m hergestellt und voraussichtlich ein Baggervolumen von insgesamt etwa 250.000 m³ mobilisiert. In der Phase 1 erfolgt eine Herstellung der nautischen Tiefe mittels Tieflöffelbagger (Backhoe dredger) aus operativen Gesichtspunkten. Da zum Zeitpunkt der vorgesehenen Arbeiten die FSRU bereits in einer nahegelegenen Interimsposition am bestehenden Elbhafen Brunsbüttel anliegt, ist aus Sicherheitsgründen die Herstellung der Liegewanne in Phase 2 ebenfalls auf einen Tieflöffelbagger beschränkt. Demgegenüber kann für das deutlich größere zu baggernde Volumen in Phase 3 ein Trichternassbagger (Hopper dredger) eingesetzt werden.

Zur Veranschaulichung des Bauvorhabens sind in den nachfolgenden zwei Abbildungen Planungsskizzen zur Liegewanne aus /1/ entnommen und dargestellt.

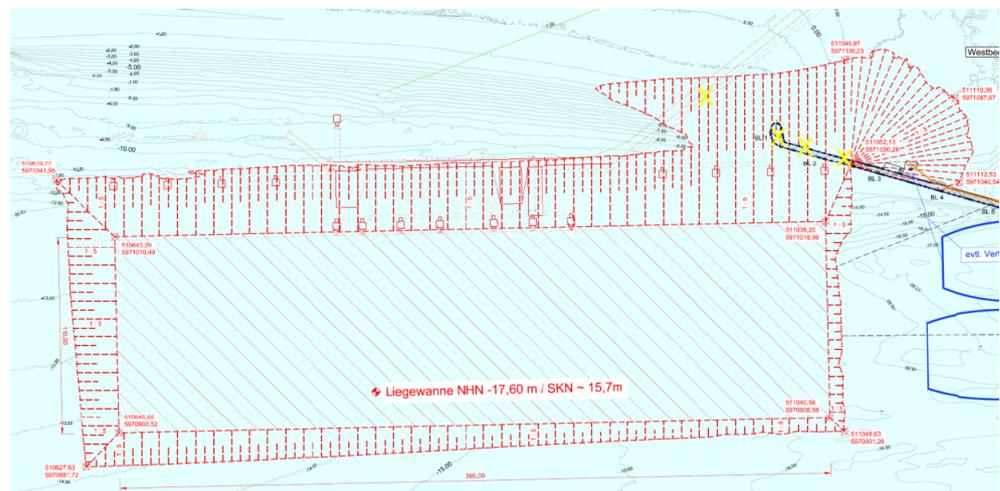


Abbildung 3.1 Geplante Liegewanne in Brunsbüttel /1/

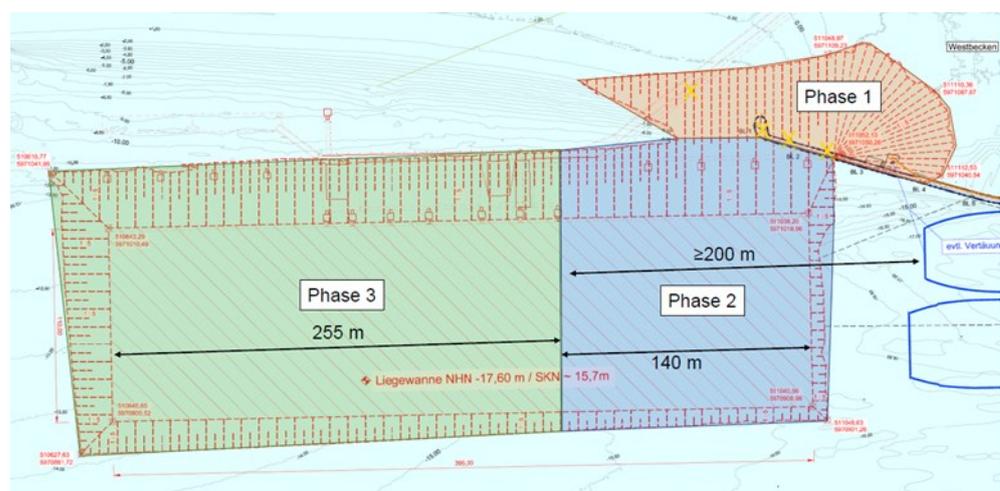


Abbildung 3.2 Geplante Herstellung der Liegewanne in drei Bauphasen /1/

4 Hydromorphologisches 3D-Modell der Elbe

Das hydromorphologische Modell dient der Abbildung aller relevanter Prozesse im Untersuchungsraum. Es dient der Berechnung der geplanten Baggertätigkeiten und deren Auswirkungen auf das Schwebstoffverhalten und das Sedimentationsgeschehen.

Als Grundlage wurde das bestehende 3-dimensionale (3D) regionale hydronumerische Modell des Elbe-Ästuars /2/ verwendet. Das Modell reicht von der Tidegrenze am Wehr Geesthacht bis zur Außenelbe bei Steinriff nördlich von Cuxhaven (Abbildung 4.1).

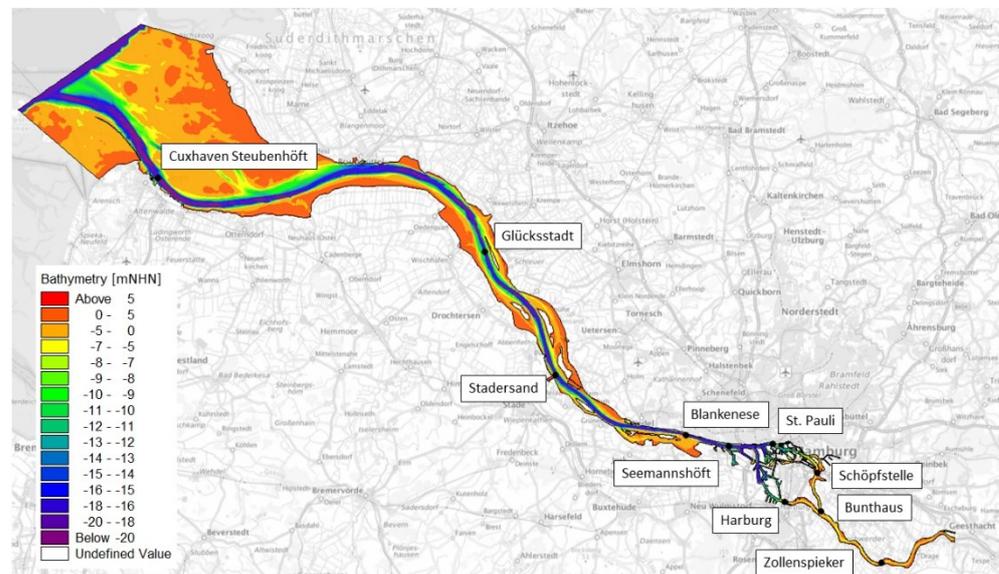


Abbildung 4.1 Tidelbemodell von Geesthacht (oberstrom) bis Steinriff (unterstrom) mit Pegelstandorten.

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

Das MIKE 3-Programmsystem¹ 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

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

- 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.

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:

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

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

Mit:

| | |
|------------|---|
| x, y, z | Kartesische Koordinaten |
| u, v, w | Strömungsgeschwindigkeitskomponenten in x, y, z Richtung [m/s] |
| v_t | Wirbelviskosität [m ² /s] |
| t | Zeit [s] |
| f | Coriolisbeschleunigung = $2\Omega \sin \phi$ |
| η | Lage der Gewässeroberfläche |
| g | Erdbeschleunigung [m/s ²] |
| ρ_0 | Referenzdichte des Wassers [kg/m ³] |
| p_a | Atmosphärischer Druck [N/m ²] |
| S | Betrag des Zuflusses aus Punktquellen [m ³ /s/m ³] |
| 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 ν_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 werden in der Ebene in ein unstrukturiertes Netz aus dreieckigen und viereckigen Elementen diskretisiert. Die vertikale Auflösung erfolgt strukturiert nach der z -, σ - oder der kombinierten σ - 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 σ -Methode wird die vertikale Diskretisierung auf Basis der vertikalen Ausprägung der Wasserspiegeloberfläche und der Sohltopographie realisiert (Abbildung 4.2). D.h. die Mächtigkeit der vertikalen Elemente variiert je nach Wassertiefe.

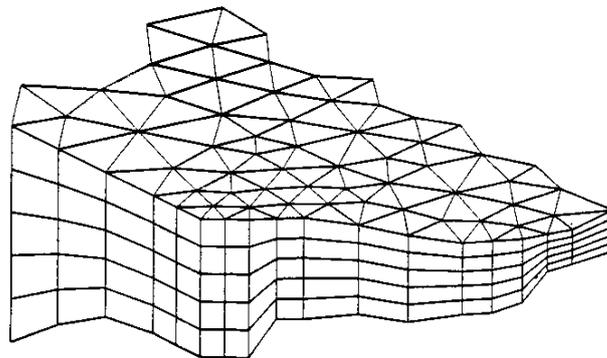


Abbildung 4.2 Prinzip eines 3D-Netzes nach σ -Methode.

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

4.2 MT-Modul für Feinsedimenttransport

Das Feinsediment-Transport-Modul (MIKE21/3 FM MT)² 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

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

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).

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 ³] |
| 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 ² /s] |
| v_{Tx}, v_{Ty}, v_{Tz} | anisotrophischer Wirbelviskositätskoeffizient [m ² /s] |
| S^i | Quellterm [g/m ³ /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) gekoppelt. Die Rückwirkung auf die Hydrodynamik geht dabei über die Fluidichte und die Verformung der kinematischen Viskosität mit ein:

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

Mit:

| | |
|---------------------|--|
| c | Schwebstoffkonzentration [g/m ³] |
| ρ_W | Wasserdichte [kg/m ³] |
| ρ_S | Sedimentdichte [kg/m ³] |
| ρ_{Sus} | Suspensionsdichte [kg/m ³] |
| w_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:

| | |
|-----------------------|--|
| β_{ero} | Erodibilitätsfaktor $\sim 2,3 \cdot 10^{-3}$ bis $6,6 \cdot 10^{-5}$ [g/m ² /s] |
| $\tau_{0,\text{ero}}$ | kritische Erosionsschubspannung [N/m ²] |
| S_{ero} | Erosionsrate [g/m ² /s] |
| τ_0 | Schubspannung [N/m ²] |

Die Koeffizienten, wie der Erodibilitätsfaktor β_{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:

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

Mit:

| | |
|------------------|---|
| i | Fraktion (Index) [-] |
| $\tau_{c,dep}^i$ | kritische Depositionsschubspannung [N/m ²] |
| w_s^i | Sinkgeschwindigkeit [m/s] |
| D^i | Depositionsrate [kg/m ² /s] |
| c_b^i | Schwebstoffkonzentration in Sohlhöhe [kg/m ³] |

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

Die Sinkgeschwindigkeit für den Übergangsbereich zwischen der Flockenbildungskonzentration und unter der Grenzkonzentration für ein behindertes Absinken ($c_{hinder} = 10 \text{ g/l}$) 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 ³] |
| ρ_s | Sedimentdichte [kg/m ³] |
| Φ_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 Bulkichte 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 4.3 gezeigt sind.

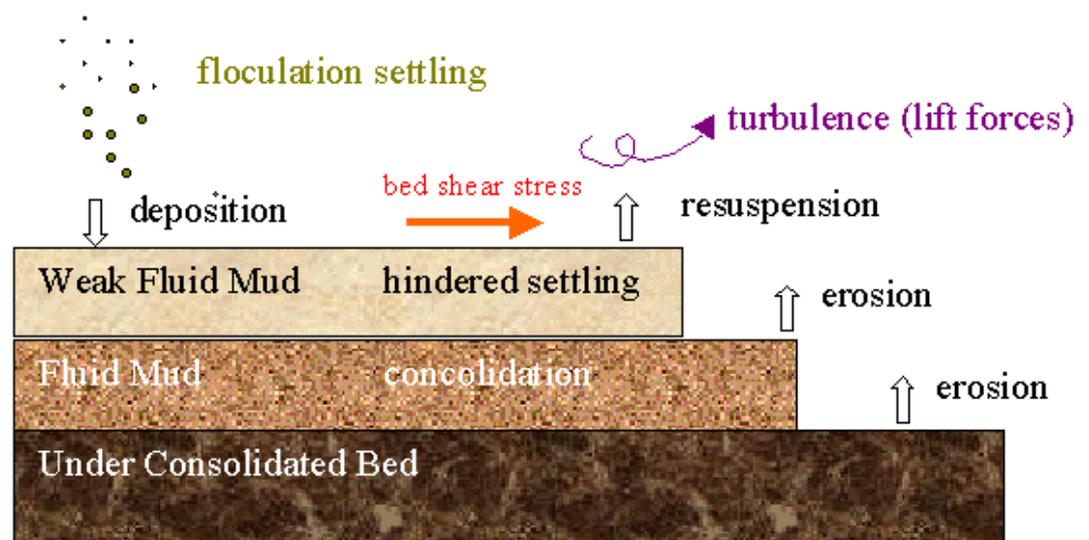


Abbildung 4.3 Schematische Darstellung der berücksichtigten Prozesse und der Layerdifferenzierung über die Sedimenttiefe im MT-Modul.

4.3 Bathymetrie und Berechnungsnetz

In der Fahrrinne von der Nordsee bis zum Hamburger Hafen wird eine garantierte Mindestwassertiefe gemäß der WSV 2019 /3/ zwischen 17,30 m und 18,90 m eingehalten. Die Modellbathymetrie wurde im Rahmen der bereits durchgeführten Temperaturstudie /2/ in dem entsprechenden Bereich angepasst. Im Bereich des Brunsbütteler Hafens und des Nord-Ostsee-Kanals, der hier im Fokus steht, werden aktuelle Bathymetriedaten verwendet (WKC, 2022). Die horizontale Diskretisierung des Netzes besteht aus insgesamt ca. 98.000 quadrangulären und triangulären Elementen. Die quadrangulären Elemente werden verwendet, um den Fahrwasserbereich aufzulösen, während die triangulären Elemente für die angrenzenden Bereiche des Netzes verwendet werden. Die vertikale Auflösung wurde als sogenanntes Sigma-System mit acht Schichten gebildet. Dabei passt sich die vertikale Ausdehnung der Sigma-Schichten in Abhängigkeit von der Wassertiefe adaptiv an.

4.4 Weitere Modellanpassungen

Im Vergleich zur Temperaturstudie /2/ bildet das hier verwendete Modell den Ist-Zustand ab und die Liegewanne ist in der Modellbathymetrie zu Beginn der Simulation nicht integriert. Die Abbildung 4.4 zeigt einen Ausschnitt aus dem Modellgebiet bei Brunsbüttel. Dargestellt sind die Bathymetrie und das Berechnungsnetz. Für die vorliegende Untersuchung wurden die Elemente im Bereich des geplanten Anlegers hoch und mit bis zu 500 m² pro Element aufgelöst. Demgegenüber befindet sich die geringste Netzauflösung an der Grenze zur Nordsee mit einer Elementgröße von 370.000 m².

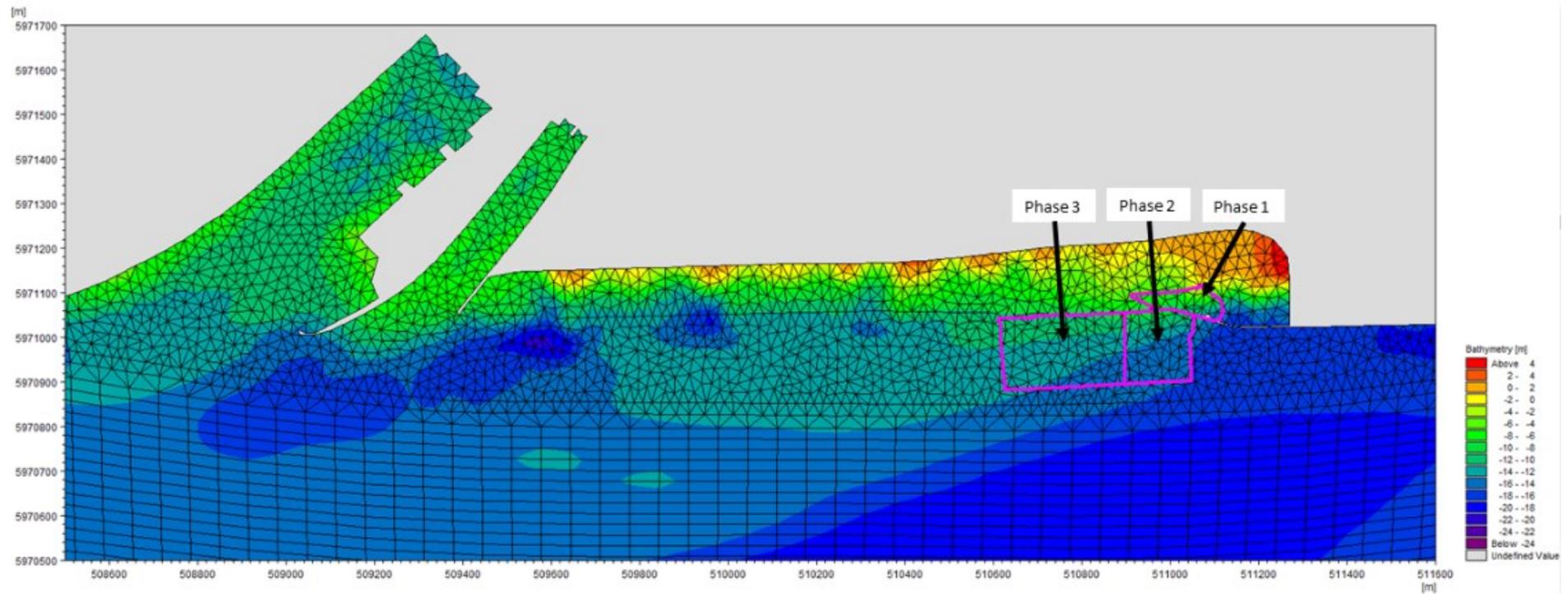


Abbildung 4.4 Bathymetrie und Meshauflösung im Untersuchungsgebiet von Brunsbüttel (Bereich der Liegewanne mit den drei Bauphasen ist hervorgehoben)

4.5 Modellzeitraum und Randbedingungen

Die Auswahl eines dreiwöchigen Zeitraumes, in dem alle erforderlichen Baggertätigkeiten bei zeitgleichem Einsatz des Geräts durchgeführt werden können, erfolgte in Anlehnung an die Temperaturstudie und beinhaltet einen Spring-Nipp-Tide-Zyklus. Im betrachteten Zeitraum vom 15.02.2021 bis 08.03.2021 führte die Elbe einen relativ hohen Oberwasserabfluss (1000 – 1300 m³/s).

Am Unterwasserrand (Steinriff) wurde ein Wasserstand und am Oberwasserrand (Wehr Geesthacht) wurde ein Abfluss als Randbedingung angesetzt (Abbildung 4.5).

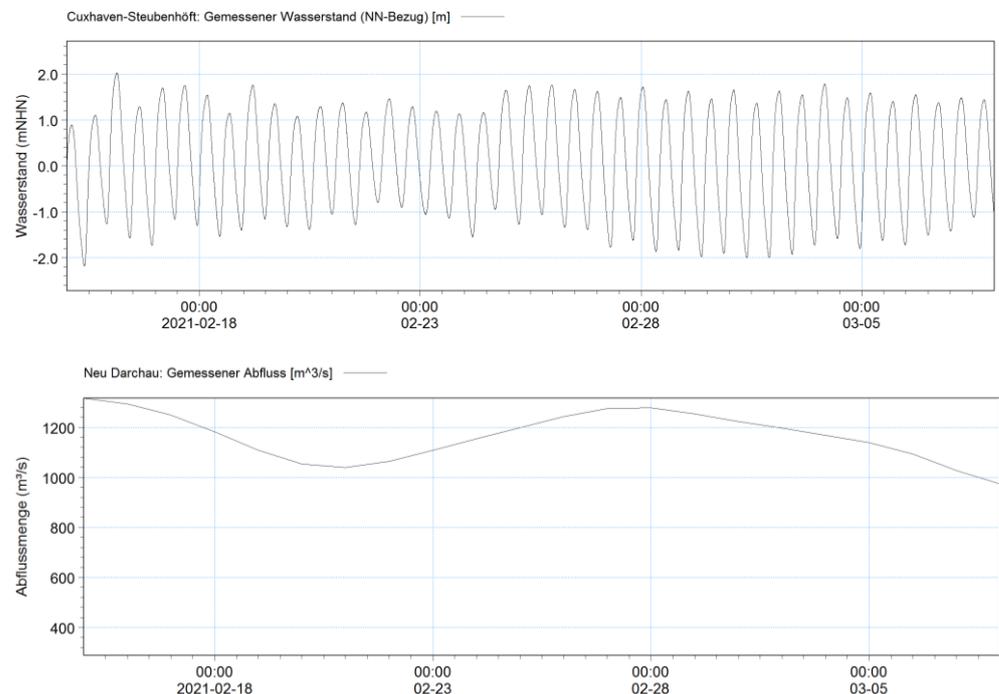


Abbildung 4.5 Wasserstand am Pegel Cuxhaven Steubenhöft (oben) und Abfluss bei Neu-Darchau (unten) für den Modellzeitraum 15.02.2021 bis 08.03.2021

Die nachfolgenden Tabellen (Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2) fassen die Eingangswerte zur Simulation der Baggertätigkeit zusammen. Das Modell rechnet mit einem angenommenen Baggervolumen von insgesamt 240.000 m³ Trockenmasse /1/. Während in Phase 1 und 2 Tieflöffelbagger eingesetzt werden, erfolgt die Umsetzung der Phase 3 mittels leistungstärkerem Trichternassbagger. Die Überlaufraten der Bagger wurden aus vorliegenden Spezifikationen entnommen und mit Ihrer Obergrenze (hier: 3 % sowie 4 %) angenommen und auf diese Weise eine konservative Betrachtung der Mobilisierung gewährleistet. Die Dauer des Baggereinsatzes in den drei Teilbereichen richtet sich nach dem Volumen und dem Gerät und wird dementsprechend simuliert.

Tabelle 4.1 Baggervolumen und -gerät in den drei Bauphasen

| | Phase 1 | Phase 2 | Phase 3 |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|
| Baggervolumen [m ³] | 30.000 | 60.000 | 160.000 |
| Gerät | Tieflöffel- bagger | Tieflöffel- bagger | Trichternass- bagger |
| Baggereinsatz [Tage] | 10 | 20 | 16 |

Tabelle 4.2 Baggergerät und Sedimentmobilisierung

| | Tieflöffelbagger | Trichternassbagger |
|--|------------------|--------------------|
| Bagerrate [m ³ /Tag] | 3000 | 10.000 |
| Freisetzung [%] | 4 | 3 |
| Freisetzungsrate [m ³ /Tag] | 120 | 400 |

4.6 Sedimenteigenschaften

Die Sedimenteigenschaften wurden auf Grundlage von Messungen zur Korngrößenverteilung im Untersuchungsgebiet (Ramboll/WKC 2022) festgelegt. Sie wurden mit Hilfe von Sensitivitätstests (siehe Anhang A) abgesichert. Die Tabelle 4.3 fasst die in der finalen Modellrechnung angesetzten Werte zur Korngrößenverteilung in den drei Bauphasen zusammen.

Tabelle 4.3 Modellierte Korngrößenverteilung in den drei Bauphasen

| | Fraktion 1 | Fraktion 2 |
|------------------------|------------|------------|
| Korngröße [mm] | >0,2 | < 0,2 |
| Phase 1 Prozent [%] | 0 | 100 |
| Phase 2 Prozent [%] | 4 | 96 |
| Phase 3 Prozent [%] | 0,5 | 99,5 |

Die Sinkgeschwindigkeit der modellierten Fraktionen entsprechen den gängigen Sinkgeschwindigkeiten der entsprechenden Korngrößen unter Einbeziehung der kinematischen Viskosität und unter Berücksichtigung möglicher Flockulationsprozesse. Für die erste Fraktion mit einer Korngröße von >0,2 mm wurde eine Sinkgeschwindigkeit von 5 m/s definiert. Für die feinere Fraktion wurde in Szenario 3 die Sinkgeschwindigkeit auf 1 m/s und in Szenario 4 (für konservativere Ergebnisse der Sohländerung) auf 3 m/s gesetzt. Die kritische Sohlschubspannung von 0,3 N/m² wurde aus einer vorangestellten Analyse der auftretenden Sohlschubspannungen abgeleitet.

5 Ergebnisse

Die Sedimentation und die Schwebstoffverdriftung werden für den Untersuchungszeitraum statistisch ausgewertet und im Hinblick auf die Fragestellungen des Unterhaltungsaufwands, der Sedimentation an den Schleusentoren des Nord-Ostsee-Kanals und der Ausbreitung der Schwebstofffahnen beschrieben.

5.1 Sedimentation

Die Abbildung 5.1 zeigt das Ergebnis der Modelluntersuchung zur Sohländerung.

Durch die geplante Baggertätigkeit ist damit zu rechnen, dass die freigesetzten Schwebstoffe sowohl im Bereich des Westbeckens mit über 110 mm Sohlerrhöhung als auch entlang der Uferlinie zwischen Planungsgebiet und Höhe der Zufahrt zum Nord-Ostsee-Kanal am stärksten (mehrfach lokal mit über 70 mm) sedimentieren. Unmittelbar vor den Schleusen des Nord-Ostsee-Kanals findet keine sichtbare Erhöhung der Sohle statt. Die Sohlzunahme beträgt im Modell unter 5 mm. Folglich ist von keiner Beeinträchtigung für den Betrieb der Schleusentore des Nord-Ostsee-Kanals bzw. eines zusätzlichen Unterhaltungsaufwand in diesem Bereich auszugehen.

Für den Bereich östlich der bestehenden Hafenanlage zeigt sich ebenfalls eine Akkumulation von sedimentiertem Material. So ist eine Zunahme der Sohle im Ostbecken und entlang der Uferlinie zu erkennen. Die Sohländerungen reichen in Ihrer Mächtigkeit ebenfalls bis zu 110 mm. Diese Bereiche sind allerdings lokal begrenzter im Vergleich zum Bereich westlich der geplanten Liegewanne.

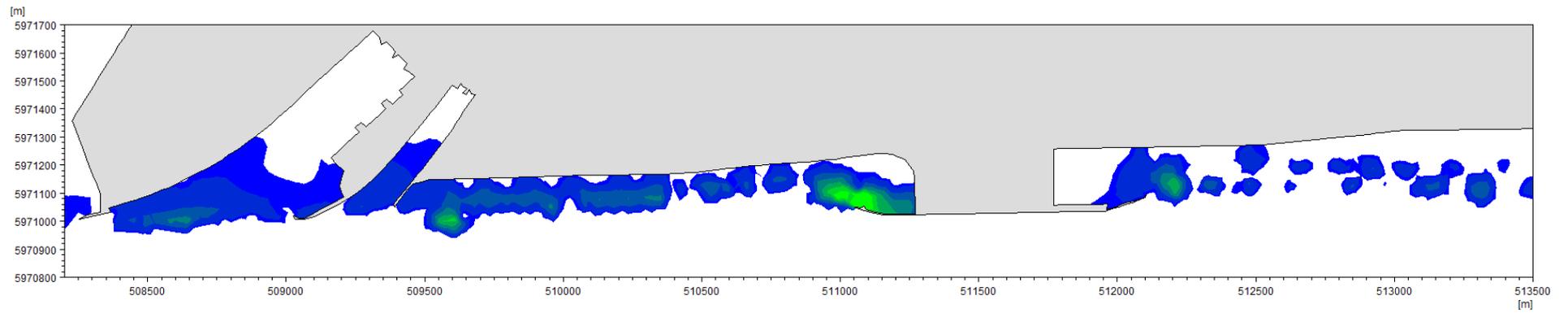


Abbildung 5.1 Sohländerung zum Ende des Szenarios 4 in Brunsbüttel. Oben: Bereich westlichen des Hafens; Unten: Bereich westlich und Östlich des Hafens.

5.2 Schwebstoffverdriftung

Abbildung 5.2 zeigt die Schwebstoffverdriftung der durch die Baumaßnahme mobilisierten Sedimente unter konservativen Randbedingungen (geringe Sinkgeschwindigkeit/, siehe Anhang A, Szenario 3). Die gezeigten Ergebnisse stellen die tiefengemittelten Maximalwerte der Schwemmfracht über den Simulationszeitraum dar. Der obere Teil der Abbildung 5.2 zeigt den Nahbereich um die geplante herzustellende Liegewanne. Die ermittelten Maximalwerte von über 0,3 g/l treten kleinräumig und lokal auf. Die zu erwartende Schwebstofffahne verläuft parallel zum nördlichen Elbeufer. Die Schwebstoffkonzentrationen sind mit der Entfernung zur Baumaßnahme abnehmend. Im unteren Teil zeigt sich die prognostizierte maximale Ausdehnung der Schwebstofffahne, welche in einer Entfernung von bis zu 6 km in westlicher und östlicher Richtung um die geplante Liegewanne in sehr geringer Konzentration von 0,02 g/l darstellbar ist.

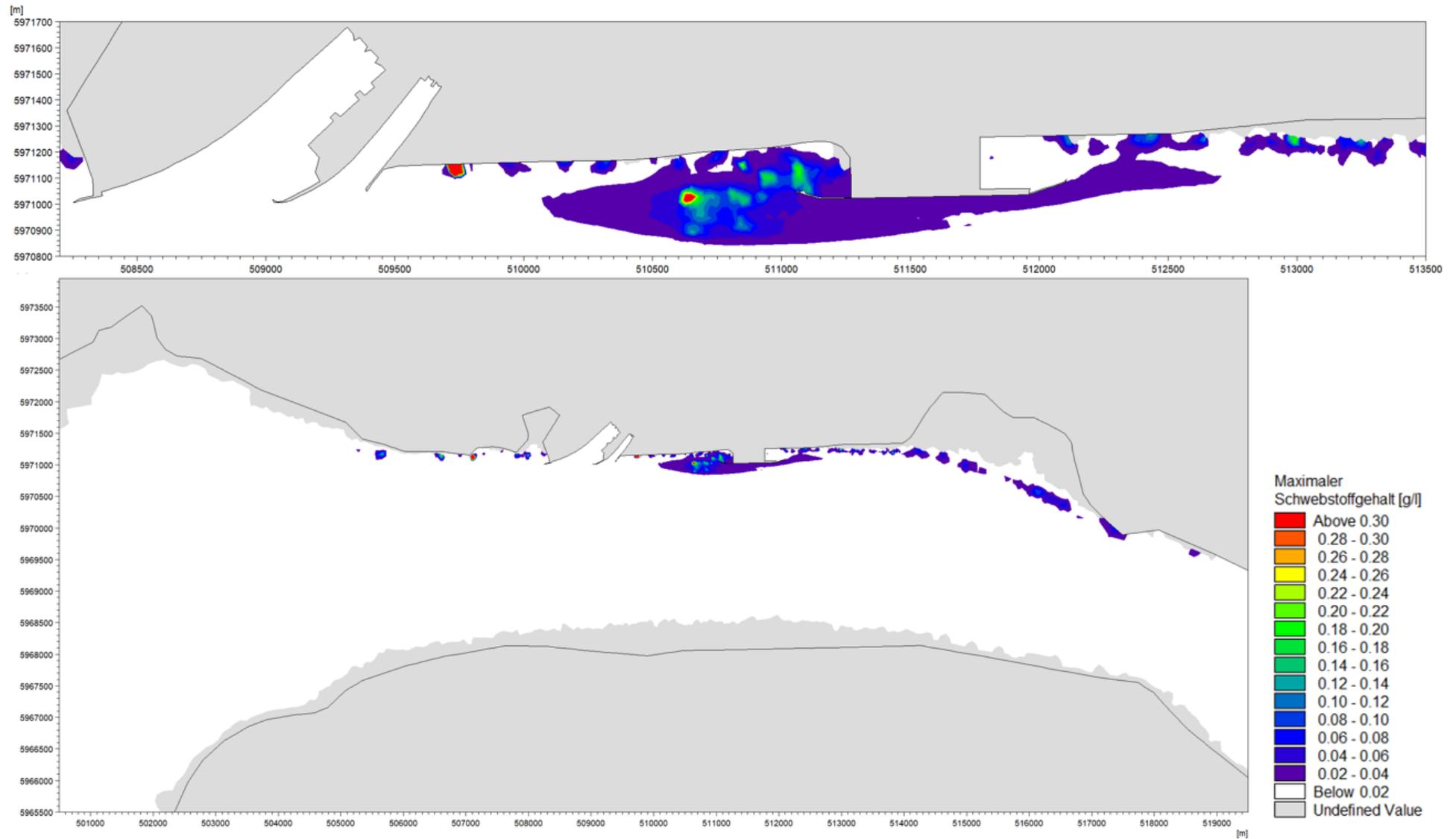


Abbildung 5.2 Maximaler Schwebstoffgehalt im Szenario 3

6 Zusammenfassung

Am Standort Elbehafen Brunsbüttel ist von der RWE Supply & Trading GmbH der Neubau eines FSRU-Anlegers geplant, der zur Gewährleistung der Energiesicherheit beitragen soll. Die vorliegende Studie untersucht die Sedimentdrift und -ablagerung, die während der Bauphase durch die Baggertätigkeiten zur Herstellung der Liegewanne hervorgerufen werden. Grundlage der Untersuchung bildet ein bei DHI WASY bestehendes hydromorphologisches 3D-Modell der Elbe /2/, welches im Bereich des Planungsgebietes in seiner Modellauflösung angepasst wurde.

6.1 Hydromorphologisches Modell

Die Baggerarbeiten /1/ fließen unter konservativen Gesichtspunkten in die Modellrechnungen ein. Dies beinhaltet, dass die in drei Bauphasen unterteilte Planung im Modell zur gleichen Zeit startet und ein durchgängiger Einsatz (d.h. 24h am Tag) des Equipments simuliert wird. Die Überlaufraten des jeweils eingesetzten Baggers wurden aus vorliegenden Spezifikationen entnommen und mit Ihrer Obergrenze angesetzt.

Da für die vorliegende Untersuchung keine Messungen zu den Schwebstoffgehalten im Bereich Brunsbüttel gegeben waren, werden mit der Modellrechnung ausschließlich die aus der Bautätigkeit freigesetzten Schwebstoffe betrachtet und die natürlichen Schwebstoffe werden nicht explizit abgebildet.

Mit einem erhöhten Schwebstoffgehalt erhöht sich die Neigung zur Flockenbildung. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, wurde das Modell zur bauzeitlichen Sedimentdrift, welches den natürlichen Schwebstoffgehalt nicht abbildet, mit entsprechend höheren Sinkgeschwindigkeiten gerechnet.

6.2 Sedimentation

Die Ergebnisse zeigen eine Erhöhung der Sohle im Bereich der geplanten Liegewanne nach dreiwöchiger Modellaufzeit mit einer Mächtigkeit von über 110 mm. Bis etwa 100 m südlich von der Uferlinie treten zwischen dem Anleger und Höhe der Zufahrt zum Nord-Ostsee-Kanal Sohländerungen von etwa 30 mm und lokal über 70 mm auf. Für den Zufahrtsbereich selbst ist mit einer Erhöhung von unter 5 mm von keiner Beeinträchtigung bzw. zusätzlichem Unterhaltungsaufwand während der Bauphase auszugehen.

6.3 Schwebstoffverdriftung

Die flächenhaften Ergebnisse der Schwebstoffverdriftung zeigen eine Ausdehnung der Sedimentfahne entlang des Nordufers der Elbe mit einer Ausdehnung von ca. 6 km östlich wie westlich um die geplante herzustellenden Liegewanne. Die Maxima der Schwebstoffkonzentrationen treten in Nahbereich der Baumaßnahme und lokal begrenzt auf. Die Zufahrt des Nord-Ostsee-Kanal wird durch die Schwebstofffahne nicht beeinträchtigt.

7 Referenzen

- /1/ BPM & WK 2022: Elbhafen Brunsbüttel. Jetty Westbecken – FSRU-Liegeplatz. Unterlagen zum Antrag auf Planfeststellung gemäß § 43 EnWG. Unterlage 4.2.1 (Entwurf)
- /2/ DHI WASY 2022: FSRU-Terminal Brunsbüttel. Hydrodynamische Studie zu den Auswirkungen des Betriebs der FSRU auf die Wasserqualität und die Gewässersohle. Thermische Einleitung (Projektnummer 14806725)
- /3/ WSV (2019): Fahrrinnenanpassung 2019 – Baumaßnahmen - Vertiefung und Verbreiterung der Fahrrinne, aus ZDM - Baumaßnahmen (kuestendaten.de) (Stand 2022 / Zugriff 2022)

Anhang A Sensitivitätstest

Insgesamt wurden vier Modellläufe mit unterschiedlichen Modelleinstellungen über einen Zeitraum von drei Wochen gerechnet. In allen vier Modellkonfigurationen starten die drei Baggerphasen zum gleichen Zeitpunkt. Ziel dieses Vorgehens ist es, das Szenario bzw. die Modelleinstellung zu identifizieren, bei dem die höchste Sedimentation bzw. Sohländerung im Planungsgebiet auftritt, welche dem ungünstigsten anzunehmenden Fall („Worst Case“) entspricht.

Anhang A.1 Initiales Szenario (Szenario 1)

Das erste Szenario wurde mit den in Tabelle A 1 gezeigten vier Sedimentfraktionen durchgeführt. Diese wurden auf Grundlage von Messungen zur Korngrößenverteilung im Untersuchungsgebiet (Ramboll/WKC 2022) bestimmt. Des Weiteren enthält die Tabelle Informationen zu den prozentualen Anteilen der einzelnen Sedimentfraktionen in jeder Baggerphase sowie zu den im Modell angesetzten Sinkgeschwindigkeiten. Da zu letzterem keine Messwerte im Untersuchungsgebiet vorlagen, basieren diese auf Berechnungen mittels Fraktionsgrößen und dem Stokschen Gesetz. Flockungsberechnungen wurden in der vorliegenden Studie ausgeschlossen. Das Modell bildet ausschließlich die beim Baggern freigesetzten und nicht die natürlich vorkommenden Schwebstoffe ab. Eine Flockenbildung und eine damit verbundene Änderung des Sinkverhaltens tritt erwartungsgemäß jedoch erst bei hohen Schwebstoffkonzentrationen auf. Auch nimmt die Flockungsneigung mit steigendem Salzgehalt zu. Um diese Aspekte in der Modellberechnung zu berücksichtigen, wurde für jede Fraktion eine entsprechend erhöhte konstante Sinkgeschwindigkeit angesetzt.

Tabelle A 1 Modellkonfiguration in Szenario 1

| | Fraktion 1 | Fraktion 2 | Fraktion 3 | Fraktion 4 |
|--|------------|---------------|----------------|------------|
| Sinkgeschwindigkeit [mm/s] | 5 | 0,7 | 0,2 | 0,1 |
| Korngröße [mm] | >0,2 | 0,063 - < 0,2 | 0,02 - < 0,063 | < 0,02 |
| Phase 1 Prozent [%] | 0 | 26 | 48 | 26 |
| Phase 2 Prozent [%] | 4 | 15,5 | 53 | 27,5 |
| Phase 3 Prozent [%] | 0,5 | 9 | 60 | 30,5 |
| <i>Salinität wird im Szenario 1 nicht berechnet.</i> | | | | |

Die Abbildung A 1 stellt die Veränderung der Sohle zum Ende des Modelllaufs des ersten Szenarios in Brunsbüttel dar. Die Veränderung der Sohle liegt im betrachteten Bereich entlang der Uferlinie bis etwa 100 m südlich in Richtung Fahrwasser unter 10 mm. Im strömungsberuhigten Bereich des Anlegers

(Westbecken) ist die stärkste Erhöhung der Sohle von bis zu 50 mm zu beobachten.

Die hier berücksichtigte Sinkgeschwindigkeit ist für einzelnen Sedimentkörner repräsentativ. Da es vor allem bei hoher natürlicher Sedimentation auch zu Flockenbildung kommen kann, was eine höhere Sinkgeschwindigkeit zur Folge hat, wird in Szenario 4 eine erhöhte Sinkgeschwindigkeit angesetzt.

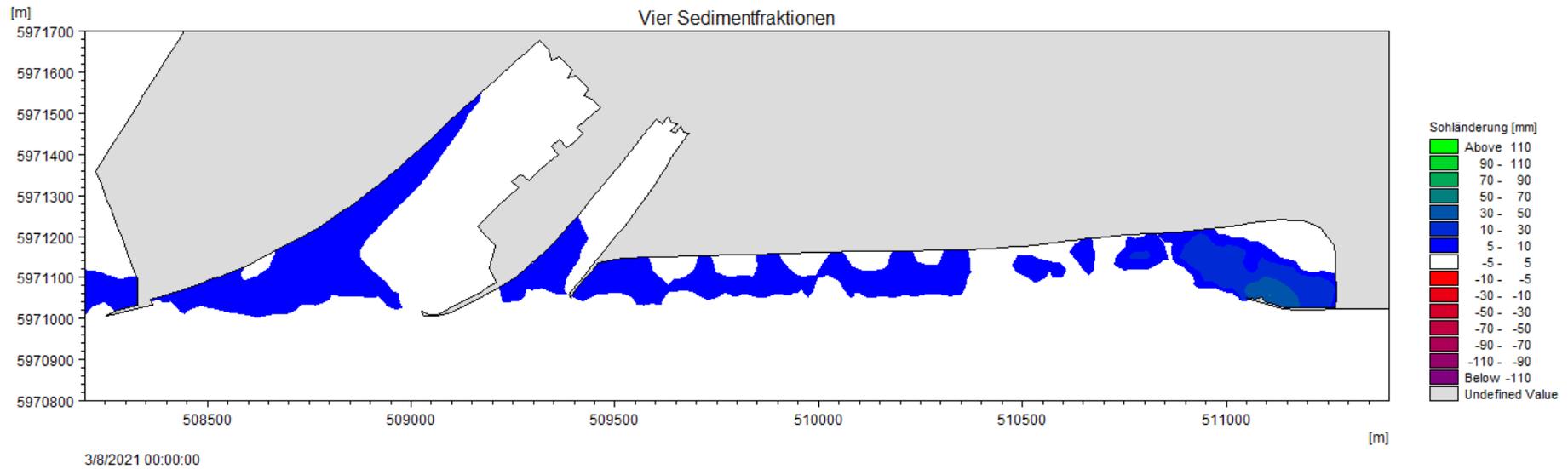


Abbildung A 1 Sohländerung zum Ende des Szenarios 1 in Brunsbüttel

Anhang A.2 Einfluss der Salinität (Szenarien 2 und 3)

In den Szenarien 2 und 3 wurden die in Tabelle A 2 aufgeführten Sedimentfraktionen berechnet und die Sinkgeschwindigkeit der Fraktion 2 wurde auf 1 mm/s erhöht. Die Szenarien 2 und 3 unterscheiden sich hinsichtlich der Salinitätsberechnung. Während die Salinität auch im zweiten Szenario ausgeschlossen wurde, wurde diese im dritten Szenario mit einbezogen.

Tabelle A 2 Modellkonfiguration in Szenario 2 und 3

| | Fraktion 1 | Fraktion 2 |
|--|------------|------------|
| Sinkgeschwindigkeit [mm/s] | 5 | 1 |
| Korngröße [mm] | >0,2 | < 0,2 |
| Phase 1 Prozent [%] | 0 | 100 |
| Phase 2 Prozent [%] | 4 | 96 |
| Phase 3 Prozent [%] | 0,5 | 99,5 |
| <i>Salinität wird im Szenario 2 nicht berechnet.</i> | | |
| <i>Salinität wird im Szenario 3 berechnet.</i> | | |

Die Abbildung A 2 und die Abbildung A 3 zeigen die Veränderung der Sohle am Ende der Simulationen der Szenarien 2 und 3. Im Vergleich zu Szenario 1 tritt in beiden Szenarien infolge der erhöhten Sinkgeschwindigkeit eine sichtbar stärkere Sedimentation auf. In Szenario 2 ist für den Bereich entlang (und bis zu 100 m südlich) der Uferlinie eine Sohlerhöhung von bis zu 30 mm (im Vergleich zu Szenario 1: +20mm) zu erkennen. Maximal erhöht sich die Sohle im strömungsberuhigten Bereich des Anlegers (Westbecken). So liegt die Sohlerhöhung in Szenario 2 hier bei über 110 mm (+>40mm) und in Szenario 3 bei bis zu 90 mm (+20mm).

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse der Szenarien 2 und 3 lässt die Relevanz der Salinitätsberechnung erkennen. Wird die Salinität in der Modellrechnung einbezogen, resultiert dies in einem längeren Transport der freigesetzten Sedimente im dichtegeschichteten Wasser. Eine Sedimentation von bis zu 10 mm findet in Szenario 3 bis unmittelbar an den Schleusentoren des Nord-Ostseekanals statt (Abbildung A 3). Im gleichen Zuge fällt die Zunahme der Sohle mit bis zu 90 mm (Szenario 3) gegenüber der Änderung von >110 mm in Szenario (Szenario 2) im Bereich des Anlegers geringer aus.

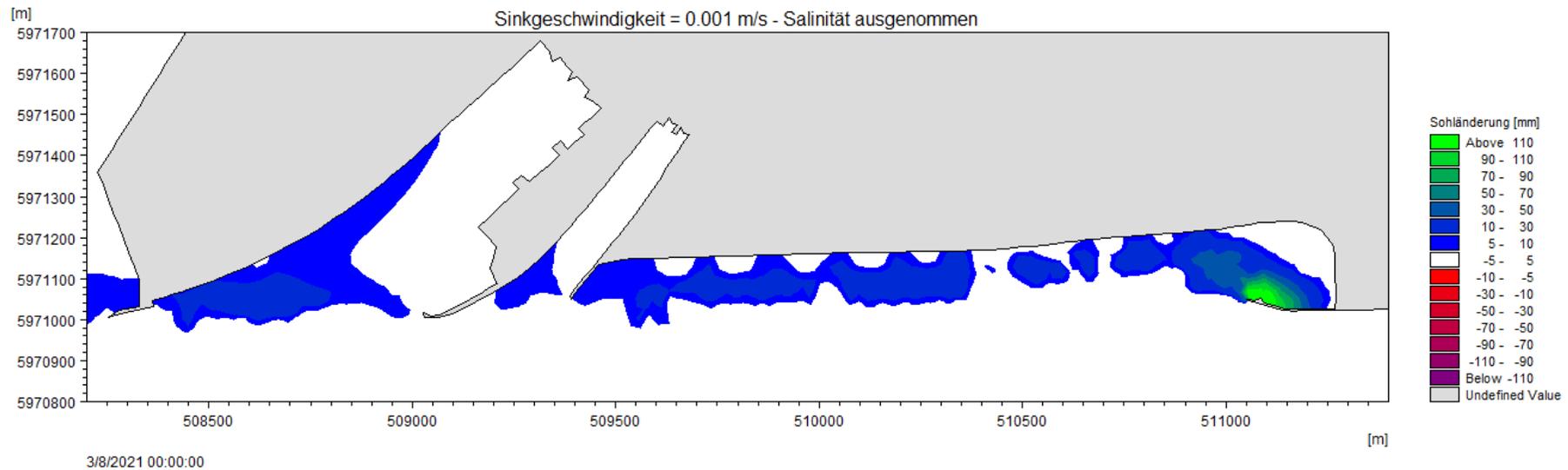


Abbildung A 2 Sohländerung zum Ende des Szenarios 2 in Brunsbüttel

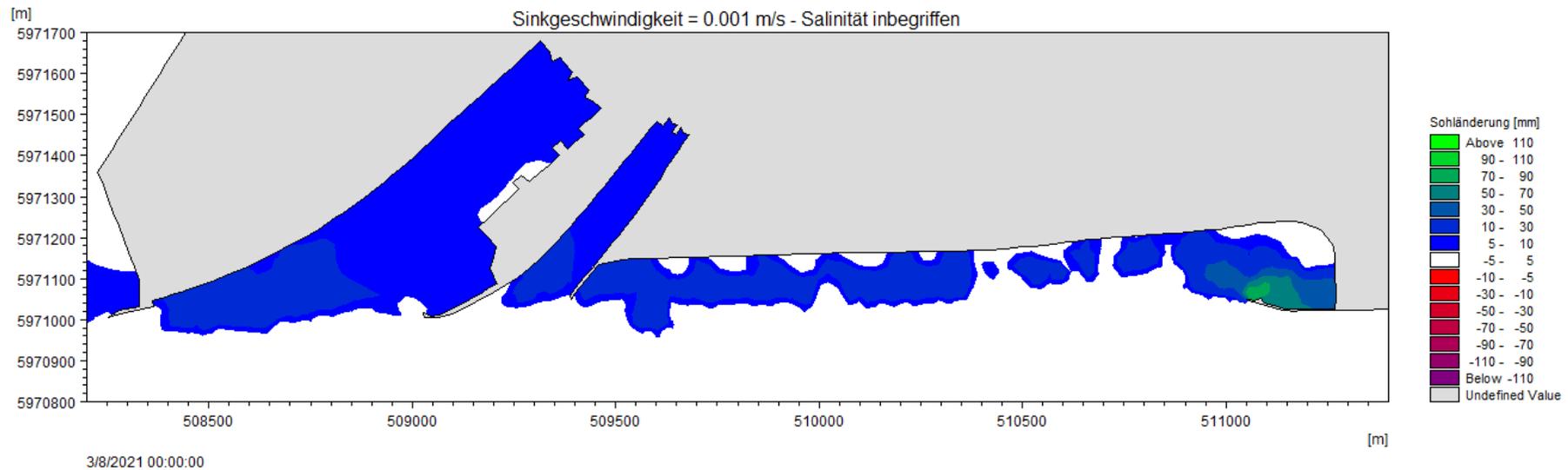


Abbildung A 3 Sohländerung zum Ende des Szenarios 3 in Brunsbüttel

Anhang A.3 Einfluss der Sinkgeschwindigkeit (Szenario 4)

Der vierte Modelllauf wurde mit den Einstellungen aus Tabelle A 3 durchgeführt. In dieser Berechnung ist der Salzgehalt mit einbezogen wie in Szenario 3, jedoch wird zusätzlich die Sinkgeschwindigkeit für die Fraktion 2 weiter auf 3 mm/s erhöht.

Tabelle A 3 Modellkonfiguration im Szenario 4

| | Fraktion 1 | Fraktion 2 |
|--|------------|------------|
| Sinkgeschwindigkeit [mm/s] | 5 | 3 |
| Korngröße [mm] | >0,2 | < 0,2 |
| Phase 1 Prozent [%] | 0 | 100 |
| Phase 2 Prozent [%] | 4 | 96 |
| Phase 3 Prozent [%] | 0,5 | 99,5 |
| <i>Salinität wird im Szenario 4 berechnet.</i> | | |

Das Ergebnis zur Sohländerung des Szenarios 4 ist in Abbildung A 4 dargestellt. Die Sedimente lagern sich im Bereich des Anlegers mit einer Mächtigkeit von über 110 mm ab. Etwa 100 m südlich der Uferlinie treten lokale Sohländerungen von über 70 mm auf. Unmittelbar an den Schleusentoren ist der Abbildung A 4 jedoch keine Veränderung der Sohle zu entnehmen.

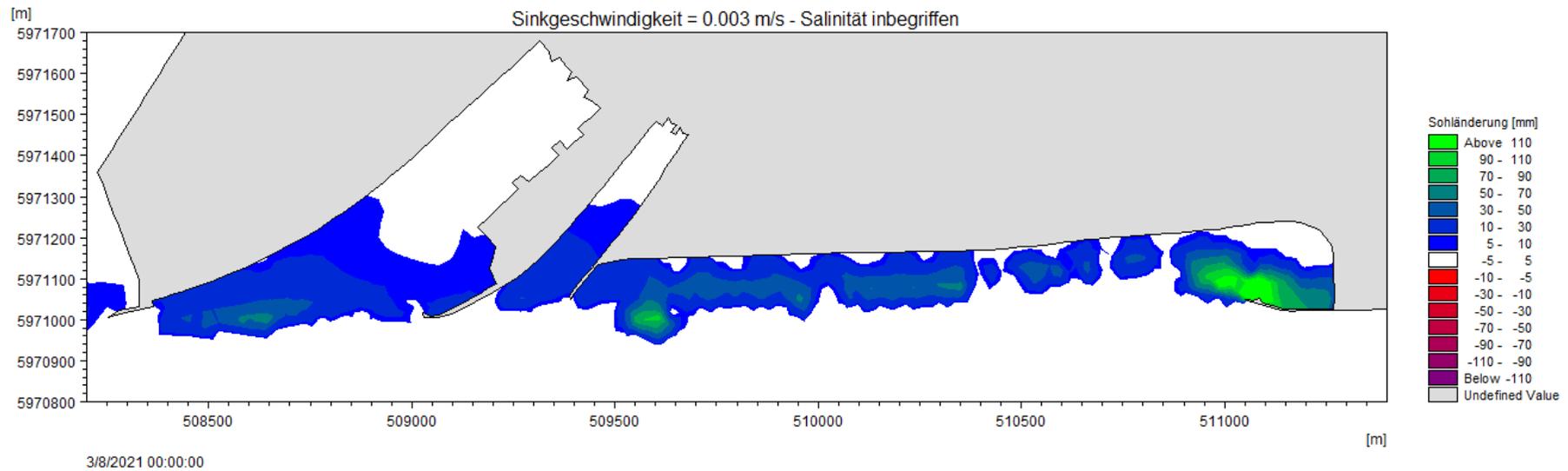


Abbildung A 4 Sohländerung zum Ende des Szenarios 4

FSRU-Brunsbüttel bauzeitliche Sedimentverdriftung

20.12.2022

Agenda

- Aufbau des morphologischen Modells
- Ergebnisse
- Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

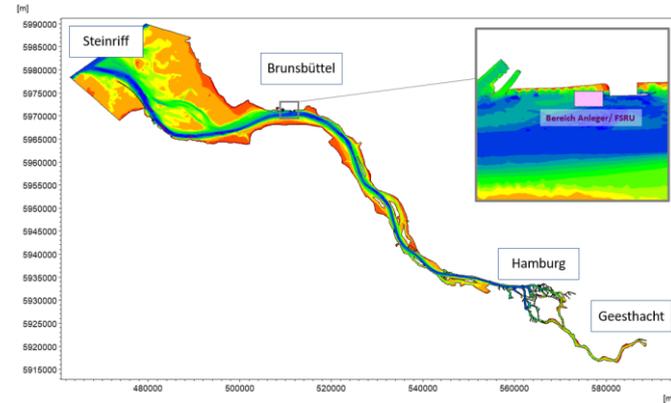
01.

Aufbau des morphologischen Modells



Aufbau des morphologischen Modells

- Der Simulationszeitraum umfasst Baggerarbeiten von drei Wochen: 15.02.2021 → 08.03.2021
- Kalibrierung mit vorhandenen Daten nicht möglich, daher Sensitivitätstests zu:
 - Sinkgeschwindigkeit
 - Einfluss des Salzgehaltes
- Sediment im Modell:
 - 3 Baggerungsphasen
 - Nur bauzeitliche Verdriftung (keine natürliche Sedimentation)
- Ein hoher Wert für die kritische Sohlschubspannung wurde gewählt, (um Resuspension der Sedimente zu verhindern und anzuzeigen, wo sich die Sedimente absetzen werden).
- Sinkgeschwindigkeit wurde erhöht: berücksichtigt mögliche Flockenbildung aufgrund hoher Schwebstoffgehalte



Das Modell wurde hinsichtlich konservativer Ergebnisse aufgebaut!

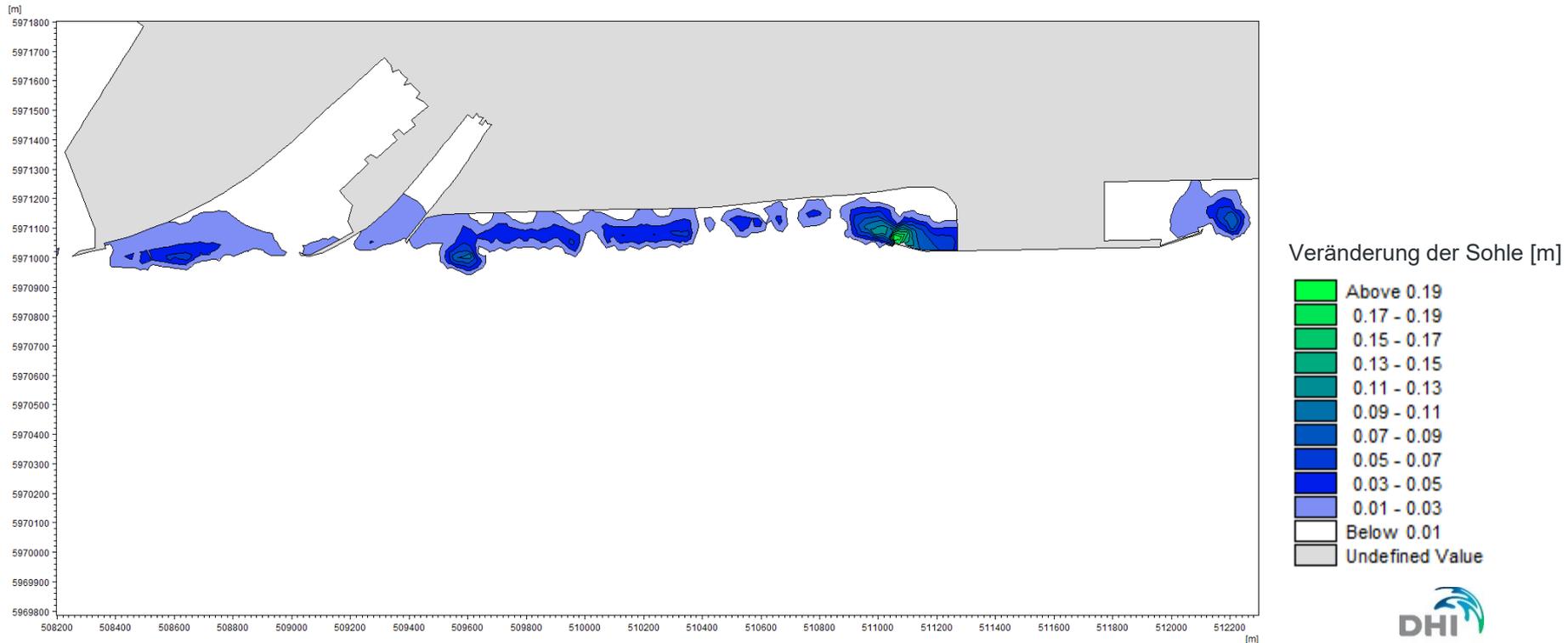
02.

Ergebnisse



Veränderung der Sohle durch Baggararbeiten

- Hohe Sinkgeschwindigkeit und Salzgehalt inbegriffen



03.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Wichtigste Ergebnisse

- Morphologische Modellberechnung
 - Konservative Parametereinstellung zur Sinkgeschwindigkeit, Sohlschubspannung und Flockenbildung
 - Sensitivitätstests zur Sicherstellung des Konservatismus (Keine Daten für Kalibrierung verfügbar)
- Ergebnisse:
 - Sedimentation durch Baggerungen lokal begrenzt mit bis zu 10 cm
 - Unmittelbar an den Schleusen des Nord-Ostsee-Kanals wird eine Sedimentation von bis zu 1 cm erwartet

Danke für Ihre Aufmerksamkeit

[REDACTED]

DHI WASY GmbH
Knochenhauer Straße 20-25
28195 Bremen

Wir digitalisieren, modellieren und visualisieren Wassersysteme.

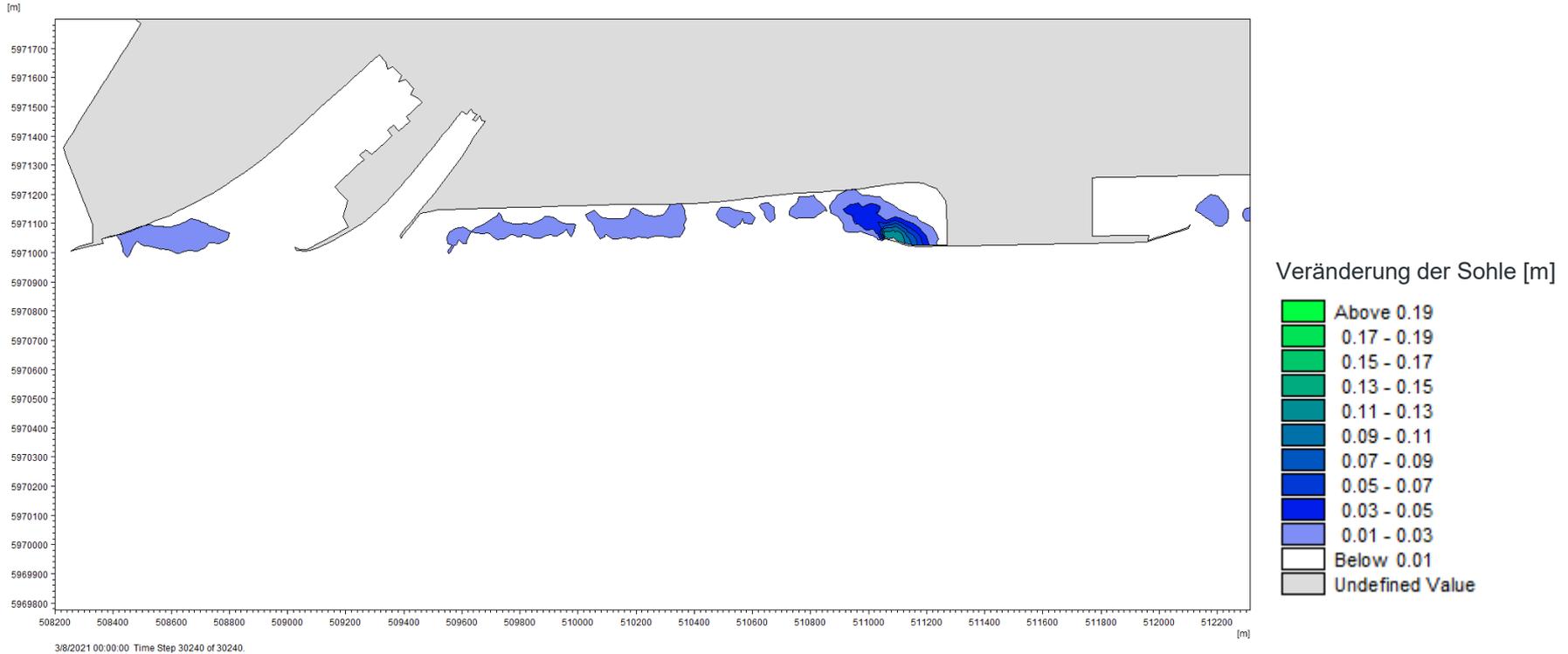


A.

Simulation der Sensitivitätstests



Sinkgeschwindigkeit = 0.001 m/s Salinität ausgenommen



Sinkgeschwindigkeit = 0.001 m/s Salinität inbegriffen

