









| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ENV- DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Seite 1 von 51 |

Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie

| | | | | | | |
|-----------------|----------------|--------------|---------------------|--------------------|----------------------|------------------|
| Achte Ausgabe | 07 | 19.09.2023 | T. Wolf | A. Bakhtiari | J. de Groot | |
| Siebte Ausgabe | 06 | 04.08.2023 | O.B.O T. Wolf | A. Breugem | T. Koutrouveli | |
| Sechste Ausgabe | 05 | 26.05.2023 | T. Wolf | J. Kemp | J. de Groot | |
| Fünfte Ausgabe | 04 | 05.05.2023 | T. Wolf | A. Breugem | T. Koutrouveli | |
| Vierte Ausgabe | 03 | 22.02.2023 | T. Wolf | J. de Groot | J. de Groot | |
| Dritte Ausgabe | 02 | 03.02.2023 | T. Wolf | J. de Groot | J. de Groot | |
| Zweite Ausgabe | 01 | 09.12.2022 | G. van Holland | J. de Groot | J. de Groot | |
| Erste Ausgabe | 00 | 15.11.2022 | G. van Holland | J. de Groot | J. de Groot | |
| Status | Ausgabe | Datum | Erstellt von | Geprüft von | Genehmigt von | Anmerkung |





| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 2 von 51 |

Zusammenfassung des Berichts

Die Morphologie des Projektstandorts und des größeren Gebiets des Jadebusens wurde anhand einer Desktop-Studie (Literatúrauswertung) unter Verwendung einer Reihe verschiedener Datenquellen begutachtet. Anhand eines qualitativ validierten numerischen Modells wurden aussagekräftige morphologische Berechnungen durchgeführt, um die Reaktion des Meeresbodens auf die berechneten hydrodynamischen Auswirkungen zu bewerten, die durch die Projektanlagen herbeigeführt wurden (konkret den vorgeschlagenen Grundriss des Wendbeckens, die Vertäudalben/Anlegedalben und die FSRU). Die morphologische Entwicklung nach einem Jahr der Simulation wurde mit der Referenz-Simulation ohne die Projektanlagen verglichen.





Aufgrund des Baus des Anlandeterminals, des fest vertäuten FSRU-Schiffs und der Ausbaggerung des Anlande- und Wendbeckens ist eine Reihe von morphologischen Reaktionen zu erwarten:

- Wenn ein Anlandeterminal gebaut wird, werden die Pfähle die Strömung um diese Bauwerke beeinflussen. Die durch ein Anlandeterminal hervorgerufene erhöhte Reibung kann zu einer Umleitung der Strömung nach Osten und Westen führen. Dies führt zu einer veränderten Strömungsverteilung durch und entlang der Bauwerke, verursacht Kolk um die Dalben und zieht Sedimentation unterhalb des Anlandeterminals nach sich.
- Im Bereich um das Heck und den Bug der FSRU ist erheblicher Kolk sichtbar, wobei die Sedimentation direkt daran angrenzend zu einer lokalen Vertiefung führt.
- Um das Risiko zu mindern, dass der Dalbenbodenschutz dem Kolk der FSRU ausgesetzt ist, wird eine Überwachungsmaßnahme (Bathymetrie-Studie, Gewässerbodenvermessung) empfohlen, um das Ausmaß des Kolklochs zu beurteilen und entsprechend zu handeln (z. B. Hinterfüllung). Unmittelbar nach dem Bau wird ein Zeitabstand von zwei Wochen bis zu einem Monat zwischen den nachfolgenden Sondierungen vorgeschlagen. Sollte sich herausstellen, dass der lokale Kolk und die Sedimentation relativ beständig sind, kann dieser Zeitabstand entsprechend vergrößert werden.
- Weitere morphologische Änderungen sind aufgrund der neuen Strömungsverhältnisse zu erwarten. So wird beispielsweise die Schaffung eines Wendbeckens dazu führen, dass die Strömung in Richtung des Anlandeterminals gezogen wird. Dies wird durch die Umleitung der Strömung noch verstärkt und kann zu einer zusätzlichen Vertiefung entlang des Anlandeterminals führen. Da der Meeresboden zwischen dem Anlandeterminal und dem Fahrwasser ausgebaggert wird, um die Anlandung an das Terminal zu realisieren, ist eine lokale Steigerung der Strömung zu erwarten. Allerdings können diese nach den morphologischen Anpassungen wegen der Strömungseinschränkung, die durch das vorhandene Anlandeterminal und die FSRU entstanden sind, wieder ausgeglichen werden.
- Die Auswirkungen der Dalben, der FSRU und des Wendbeckens treten nach einem Jahr nur sehr lokal auf und erstrecken sich nicht bis zu den Anlandeterminals von Uniper und HES oder die nahe gelegenen





| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 3 von 51 |

Muschelfischerbetriebe. Lediglich in der Nähe des HES-Anlandeterminals kommt es zu einer sich ändernden Dünenwanderung. Diese liegt jedoch im Rahmen der beobachteten natürlichen Schwankungen der Meeresbodenhöhe und dürfte daher die natürliche Entwicklung nicht wesentlich beeinflussen.

- Ein Grund für künftige Unterhaltungsausbaggerungen ist die Wanderung von Bodenformen in das Wendebecken und den Anlandebereich. Aus den verfügbaren Tiefensondierungen ist ersichtlich, dass große Bodenformen südöstlich des Projektgebiets vorhanden sind. Solche Bodenstrukturen deuten darauf hin, dass eine überflüssige Menge an Sediment (Sand) entlang des Meeresbodens wandert. Änderungen der Strömungsmuster und -geschwindigkeiten können die Wanderung dieser Strukturen beeinflussen und dadurch Sediment in den ausgebagerten Bereich eintragen.
- Für den einjährigen morphologischen Simulationszeitraum ist eine Sedimentation von etwa 27.000 m³ (in situ) innerhalb des gesamten Wendebeckens angesetzt. Der Ansatz berücksichtigt nur die Sedimentation von Sand, die vor allem in der Umgebung der Kolke um Bug und Heck der FSRU und in Hangnähe des Wendebeckens aufgrund der Hanganpassung auftritt und daher bei weitem nicht einheitlich über das Wendebecken verteilt ist. Schlammablagerungen wurden im Modell nicht in Betracht gezogen, aber es wird erwartet, dass sie innerhalb des Wendebeckens basierend auf Sohlschubspannungskarten nicht auftreten. Nach anfänglichen Hanganpassungen wird nicht erwartet, dass die jährliche Sedimentation in einem Zeitraum von fünf Jahren wesentlich zunehmen wird. Indem davon ausgegangen wird, dass die Sandwelle, die stromaufwärts an das Wendebecken angrenzt, mit 20 m/Jahr in Richtung des Wendebeckens wandert, wurde eine Einschätzung des Sedimentationsvolumens für eine längere Zeitachse (d. h. zwei und fünf Jahre) vorgenommen. Hier wurde ein zusätzlicher Sedimenteintrag von 1.100 m³ und 19.300 m³ (In situ) in zwei bzw. fünf Jahren angesetzt. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei allen angegebenen Sedimentationswerten um bestmögliche Einschätzungen handelt, die auf den begrenzten verfügbaren Daten (d. h. keine historischen Ausbaggerungsdaten), den Modellannahmen und den inhärenten Unsicherheiten morphologischer Modelle beruhen (siehe z. B. Kamphuis, 2013 und Van Rijn, 1984), und daher entsprechend interpretiert werden sollten. Bathymetrische Vermessungen nach der ersten Ausbaggerungsaktivität können zur Optimierung der Einschätzung herangezogen werden.
- Derzeit sind im Wendebecken 0,5 m Sedimentation zulässig, bevor der Freiraum unter dem Kiel verletzt wird. Angesichts der ziemlich uneinheitlichen simulierten Sedimentation innerhalb des Wendebeckens, die vor allem in der Umgebung der Hänge auftritt und durch die Wanderung von Sandwellen beeinträchtigt werden könnte, wird eine Überwachungsmaßnahme (Bathymetrie-Studie) empfohlen, um die Sedimentationsraten zu bewerten und lokale Bereiche aufzuspüren, in denen eine potenzielle Gefahr der Unterschreitung des Freiraumes unter dem Kiel in naher Zukunft festgestellt werden kann. In Anbetracht des relativ langsamen Wanderungsprozesses wird eine erste Untersuchungsstudie nach Abschluss des Projekts, gefolgt von einer jährlichen Untersuchungsmaßnahme, als ausreichend angesehen, um dieses





| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 4 von 51 |

Phänomen zu überwachen. Sollte sich herausstellen, dass die Sedimentation relativ beständig sind, kann dieser Zeitabstand entsprechend geändert werden.



| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 5 von 51 |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 7 |
| 1.1 | Der Auftrag | 7 |
| 1.2 | Gegenstand des Berichts | 7 |
| 1.3 | Leitfaden für das Lesen | 8 |
| 1.4 | Definierte Begriffe und Abkürzungen | 8 |
| 2 | Daten..... | 11 |
| 2.1 | Bathymetrie | 11 |
| 2.2 | Sedimenteigenschaften und -konzentrationen..... | 12 |
| 2.3 | Historische Ausbaggerungsaktivitäten | 17 |
| 2.4 | Vertikale Referenzebenen..... | 17 |
| 3 | Morphologische Bewertung..... | 19 |
| 3.1 | Einleitung..... | 19 |
| 3.2 | Literaturoswertung..... | 19 |
| 3.2.1 | Beschreibung des hydromorphologischen Systems | 19 |
| 3.2.2 | Sedimentkonzentrationen und Meeresbodenmaterialien..... | 23 |
| 3.2.3 | Beobachtete morphologische Entwicklung in der Umgebung des Projektstandorts..... | 24 |
| 3.2.4 | Schlussfolgerungen aus der Literaturoswertung..... | 31 |
| 3.3 | Erstellung der numerische Modellierung..... | 32 |
| 3.3.1 | Einleitung..... | 32 |
| 3.3.2 | Modelleinstellungen..... | 33 |
| 3.3.3 | Modellvalidierung | 36 |
| 3.3.4 | Modellergebnisse | 38 |
| 3.3.5 | Schlussfolgerungen..... | 43 |
| 4 | Sedimentationsüberwachung | 46 |
| 4.1 | Hintergrund..... | 46 |

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 6 von 51 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.2 | Überwachung | 46 |
| 5 | Schlussfolgerungen | 47 |
| 5.1 | Schlussfolgerungen aus der Literaturlauswertung | 47 |
| 5.2 | Schlussfolgerungen der numerische Modellierung | 48 |
| 6 | Referenzen | 51 |

| | | |
|---|--|---|
|  | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 7 von 51 |

1 Einleitung

1.1 Der Auftrag

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) ist im September 2022 an die Tree Energy Solutions GmbH (TES) herangetreten und hat die gemeinsame Realisierung eines schwimmenden Flüssigerdgas (Liquefied Natural Gas – LNG)-Importterminals (Floating Storage and Regasification Unit – FSRU) angefragt. Das BMWK hat dazu im Februar 2023 die FSRU „Excelsior“ für maximal 60 Monate gechartert. Das Projekt soll in Kooperation mit E.ON und ENGIE realisiert werden. Als Vorhabenträgerin wurde die „FSRU Wilhelmshaven GmbH“ gegründet.





Der KUNDE (ENGIE/TES) hat einen Vertrag mit IMDC geschlossen. Dieser sieht technische Unterstützung durch IMDC für die geplanten wasserseitigen Baumaßnahmen sowie für Modellierungsstudien vor, die in den Genehmigungsantrag einfließen werden.



Abbildung 1-1: Übersicht über den Projektstandort (Quelle: Google Earth).

1.2 Gegenstand des Berichts

Gegenstand des vorliegenden Berichts ist die Bewertung der Morphologie des Projektstandorts und des größeren Jadebusens anhand einer Desktop-Studie sowie die Einschätzung der morphologischen Auswirkungen der wasserseitigen Bauarbeiten auf die Umgebung und die Sedimentationsraten innerhalb des Wendebeckens durch numerische Modellierung. Als Beitrag zum Genehmigungsverfahren wurden die morphologischen Auswirkungen der vorgeschlagenen Arbeiten bewertet.

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 8 von 51 |

1.3 Leitfaden für das Lesen





Der beste Anhaltspunkt für die Bewertung der möglichen Auswirkungen des Anlandeterminals auf die Morphologie sind die beobachteten Auswirkungen ähnlicher Einrichtungen in der Nähe des Projektgebiets. Nach der Auflistung aller in dieser Studie verwendeten Daten (Kapitel 2) werden die Ergebnisse "die Ergebnisse mehrerer vergleichbarer Studien zusammengefasst, die sich auf die Hydrodynamik und Morphologie des Jade- und Weser-Ästuars beziehen (Abschnitt 3.2). Hier besonders relevant ist eine umfangreiche Studie, die kürzlich von der IMP Ingenieure GmbH & Co. KG für Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG für das geplante LNG-Terminal am Standort UNIPER erstellt wurde (LNG Terminal WHV, Fachbeiträge, Morphodynamik, Kolkentwicklung, Ausbaggerarbeiten sowie hydromorphologische Wirkraumabschätzung und Beweissicherung, IMP-Bericht Nr. 429, 25. Mai 2022) (IMP, 2022a).

Ergänzend dazu wurde eine numerische Modellierung durchgeführt (Abschnitt 3.3). Die Modellergebnisse zeigen die ersten Auswirkungen des geplanten Vorhabens und der Ausbaggerung auf die Hydrodynamik, den Sedimenttransport und die Morphologie. Abschließend werden in Kapitel 5 die Schlussfolgerungen dargelegt.





1.4 Definierte Begriffe und Abkürzungen

Die großgeschriebenen Begriffe und Abkürzungen in diesem Dokument beziehen sich auf die in der folgenden Tabelle definierten Begriffe:





| Begriff | Beschreibung |
|---------|--|
| BD | Anlegedalben |
| Behörde | Zertifizierungsbehörde, die für den betreffenden Sektor zuständig ist |
| Berater | International Marine Dredging Consultants (IMDC), die als Ingenieur des Bauherrn für das Projekt ernannt wurden. |
| BMWK | Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz |
| DWD | Deutschen Wetterdienstes |
| ERA5 | Regionalen atmosphärischen Modells |
| FSRU | Schwimmende Speicher- und Regasifizierungseinheit (Floating Storage and Regasification Unit). Die „Excelsior“, die Excelerate Energy gehört, wird für dieses Projekt bereitgestellt. |

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 9 von 51 |

| Begriff | Beschreibung |
|-----------------|--|
| HW | Hochwasser |
| Kunde | ENGIE Deutschland AG |
| Kurzzeitprojekt | Besteht nur aus dem Bau und Betrieb des Liegeplatzes Nr. 3 für einen Zeitraum von höchstens 5 Jahren. Die FSRU wird LNG von einem LNG-Tanker erhalten und der Transport an Land wird über eine Unterwasserpipeline erfolgen. |
| LAT | Niedrigste astronomische Tide |
| LNG | Verflüssigtes Erdgas |
| LNGC | LNG-Tanker |
| LNHE | Laboratoire National „Hydraulique et Environnement“ |
| LW | Niedrigwasser |
| MSL/NHN | Mittlerer Meeresspiegel (Mean Sea Level) |
| MW | Mittel Wasser |
| NLWKN | Nieder-sächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz |
| NORA3 | Regionalen atmosphärischen Modells |
| Referenzprojekt | Die derzeitige Situation des Projektstandorts |
| RMSE | Mittlerer quadratischer Fehler |
| RMSE0 | Bias korrigierte RMSE |
| Schiffsbauwerke | Umfassen alle Baggerarbeiten, den Offshore-Bau von Konstruktionen zum Anlegen und Festmachen, Ausrüstung, Stege, Fender und andere Gegenständen gemäß der Beschreibung des Arbeitsumfangs. |
| SKN | Seekartennull; die Tiefenangaben beziehen sich auf das Seekartennull (SKN) als Tiefenhorizont, hier das Niveau des niedrigsten Gezeitenwasserstandes (LAT) |

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 10 von 51 |

| Begriff | Beschreibung |
|----------------|---|
| SSK | Schwebstoffkonzentrationen |
| (Der) Standort | Dies bezieht sich auf den Projektstandort, nämlich den Kundenstandort in Wilhelmshaven. |
| TES | Tree Energy Solutions (Kundenpartner) |
| TSHD | Laderaumsaugbaggern |
| WSV | Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes |

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 11 von 51 |





2 Daten

Für diese Studie wurden Daten aus verschiedenen Quellen verwendet.

2.1 Bathymetrie

Für die Bathymetrie wurden Daten aus folgenden Quellen bezogen:

- Daten von Emodnet 2020
 - Auflösung: 150 × 150 [m]
 - Quelle: <https://www.emodnet-bathymetry.eu/>
- „DGM-W_2018_Jade_5x5m“
 - Auflösung: 5 × 5 [m]
 - Quelle: https://www.kuestendaten.de/Tideweser/DE/Service/Kartenthemen/Kartenthemen_node.html
- „DGM-W_2012_Unterweser_Nebenfluesse_5x5m“
 - Auflösung: 5 × 5 [m]
 - Quelle: https://www.kuestendaten.de/Tideweser/DE/Service/Kartenthemen/Kartenthemen_node.html
- „014_Zufahrt HES und LNG Anleger_5 m Grid_19.24.01.22_SKN“
 - Auflösung: 5 × 5 [m]
 - Quelle: „vom Kunden beigestellte Daten“
- „047_Zufahrt HES und LNG Anleger_5m Argo_04.-05.03.19“
 - Auflösung: 5 × 5 [m]
 - Quelle: „vom Kunden beigestellte Daten“
- „003_Zufahrt HES und LNG Anleger_5m Argo_06.-09.01.20“
 - Auflösung: 5 × 5 [m]
 - Quelle: „vom Kunden beigestellte Daten“
- „190_Zufahrt HES und LNG Anleger_5 m Argo Grid_09.-18.11.21“
 - Auflösung: 5 × 5 [m]
 - Quelle: „vom Kunden beigestellte Daten“
- „169_Zufahrt HES und LNG Anleger_5 m Argo Grid_02.11.22“

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 12 von 51 |

- Auflösung: 5 × 5 [m]
- Quelle: „vom Kunden beigestellte Daten“
- „011_Zufahrt HESTIA und LNG Anleger_5 m Argo Grid_10.-11.01.23“
 - Auflösung: 5 × 5 [m]
 - Quelle: „vom Kunden beigestellte Daten“

2.2 Sedimenteigenschaften und -konzentrationen

Die Sedimenteigenschaften und -konzentrationen in der Nähe des Projektgebiets wurden der Literatur (IMP, 2022b) und Messkampagne im Rahmen dieser Studie und aus Daten (WSA und IMDC (2023a)) entnommen, einschließlich:

- Korngrößenverteilungen (Abbildung 2-1), aus denen hervorgeht, dass bei Feinstoffen (< 63 µm) der durchschnittliche Prozentsatz 7 % und der maximale Prozentsatz 29 % des am Uniper FSRU-Standort angrenzenden Projektstandorts beträgt.

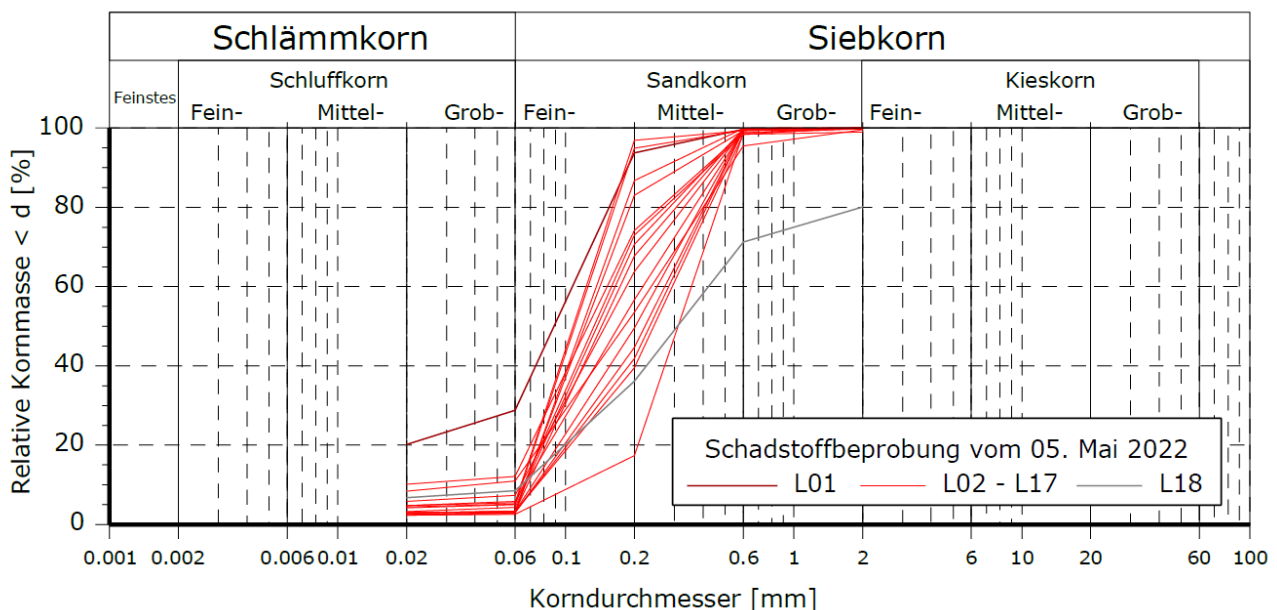






Abbildung 2-1: Korngrößenverteilungen von Sedimentproben, die am 05.05.2022 in der Nähe des LNG-Terminals WHV gezogen wurden (IMP, 2022b).

- Aus drei Sedimentproben, die während der IMDC-Messungsaktivität am Projektstandort (IMDC, 2023a) gesammelt wurden, geht hervor, dass der lokale Anteil an Feinstoffen im Meeresboden (0 %, 5 % und 8 %) mit dem des angrenzenden Uniper-Standorts (durchschnittlich 7 %) übereinstimmt. Allerdings zeigen die drei Proben auch die relativ große Bandbreite der lokalen Zusammensetzung des Meeresbodens.

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 13 von 51 |

- Aus den Sedimentproben, die im Mai 2023 entsprechend den Bodenuntersuchungen gemäß GÜBAK-Anforderungen entnommen wurden, geht hervor, dass der durchschnittliche Anteil an Feinstoffen am Meeresboden (< 63 [μm]) bei ca. 5,5 % liegt. Die stimmt mit dem des angrenzenden Uniper-Standorts (durchschnittlich 7 %) überein.
- Im Rahmen einer kürzlich durchgeführten Untersuchungsaktivität (Geo Ingenieurservice Nord-West GmbH&Co. Kg, 2021) wurden die Bodenverhältnisse am Projektstandort ermittelt. Eine Kombination von Rückstreuungsanalysen aus einer Seitensichtsonarstudie und aus mehreren Proben je Standort gemittelte Meeresbodenproben wurden bewertet (Abbildung 2-2).

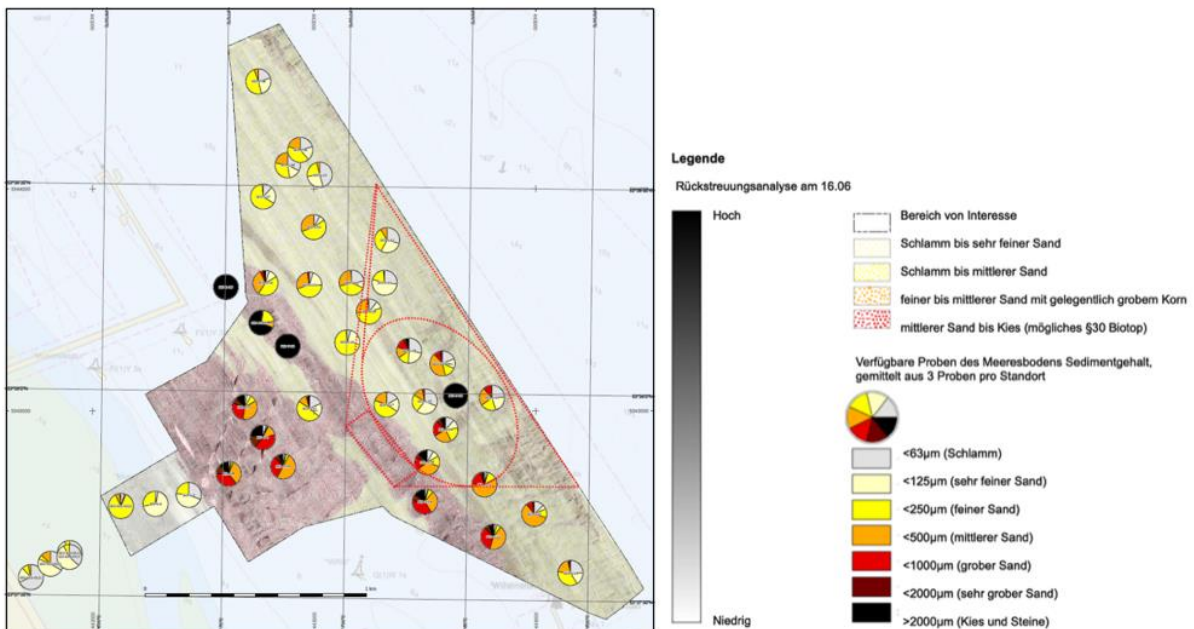






Abbildung 2-2: Bodenverhältnisse aus der Seitensichtsonarstudie 06/2021 und Sedimentproben (Geo Ingenieurservice Nord-West GmbH&Co. Kg, 2021). Rot markiert sind der FSRU-Liegeplatz, die Ausbaggerstelle und das Wendebecken.

- Aus der von der BAW (BAW, 2016) betriebenen Website EasyGSH-DB wurde eine räumliche Verteilung des D50-Meeresbodenmaterials im Jadebusen für das Jahr 2016 gewonnen (Abbildung 2-3).

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 14 von 51 |

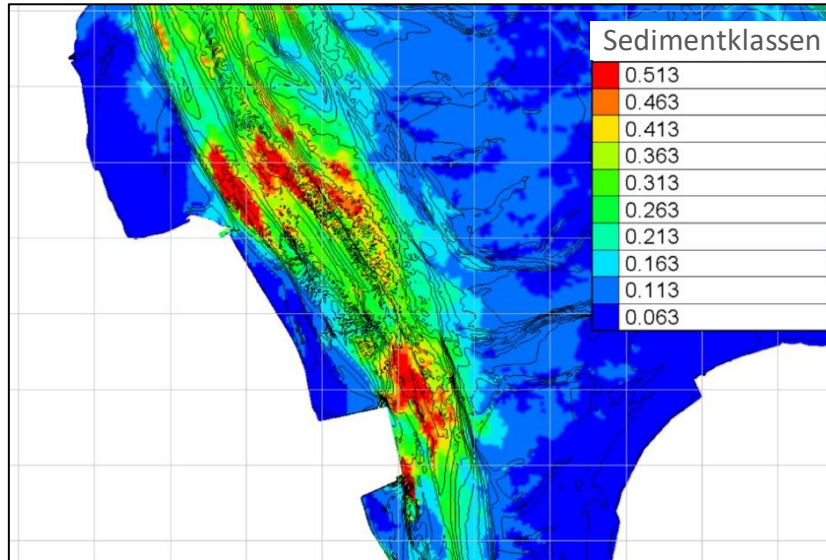






Abbildung 2-3: Räumliche Verteilung von D50 [mm] im Gezeiteinzugsgebiet der Jade (2016) (Quelle: (BAW, 2016)).

- Langfristige Zeitreihen (IMP, 2022) zeigen in dem Gebiet mittlere Schwebstoffkonzentrationen von 100 bis 250 mg/L. Dies stimmt mit den bereits genannten mittleren Konzentrationen von 120mg/l – 220mg/l (Wassersäule) aus dem IMDC - Metoceane Kampagne Bericht (IMDC 2023a). Die höchsten Schwebstoffkonzentrationen liegen im Bereich von 1.000 bis 2.000 mg/L.
- Das WSA hat für vier Stationen in der Jade (d. h. D0, D2, D3 und D4, deren Standorte in Abbildung 2-4 dargestellt sind) Trübungszeitreihen für das Jahr 2018 vorgelegt. Für diese Stationen wird die Trübung in 3 m Höhe über dem Meeresboden gemessen und in Schwebstoffkonzentrationen (SSK) umgerechnet. Es wurde eine Analyse der SSK an den Stationen D3 und D4, die dem FSRU-Standort am nächsten liegen (Abbildung 2-5 bis Abbildung 2-7), durchgeführt. Für die SSK-Werte, gemittelt nach dem Zeitpunkt des oberen Pegelstands, ist eine Spitzenkonzentration von 268 und 213 mg/L während der Gezeiten für D3 bzw. D4 zu erkennen. Dies stimmt mit den bereits erwähnten mittleren Konzentrationen von 250 mg/L aus dem IMP-Bericht ((IMP, 2022b)) überein.

| | | | |
|--|-----------------------|-------|---|
|    | Umgebung | |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven | FSRU: | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | Morphologische Studie | | Seite 15 von 51 |

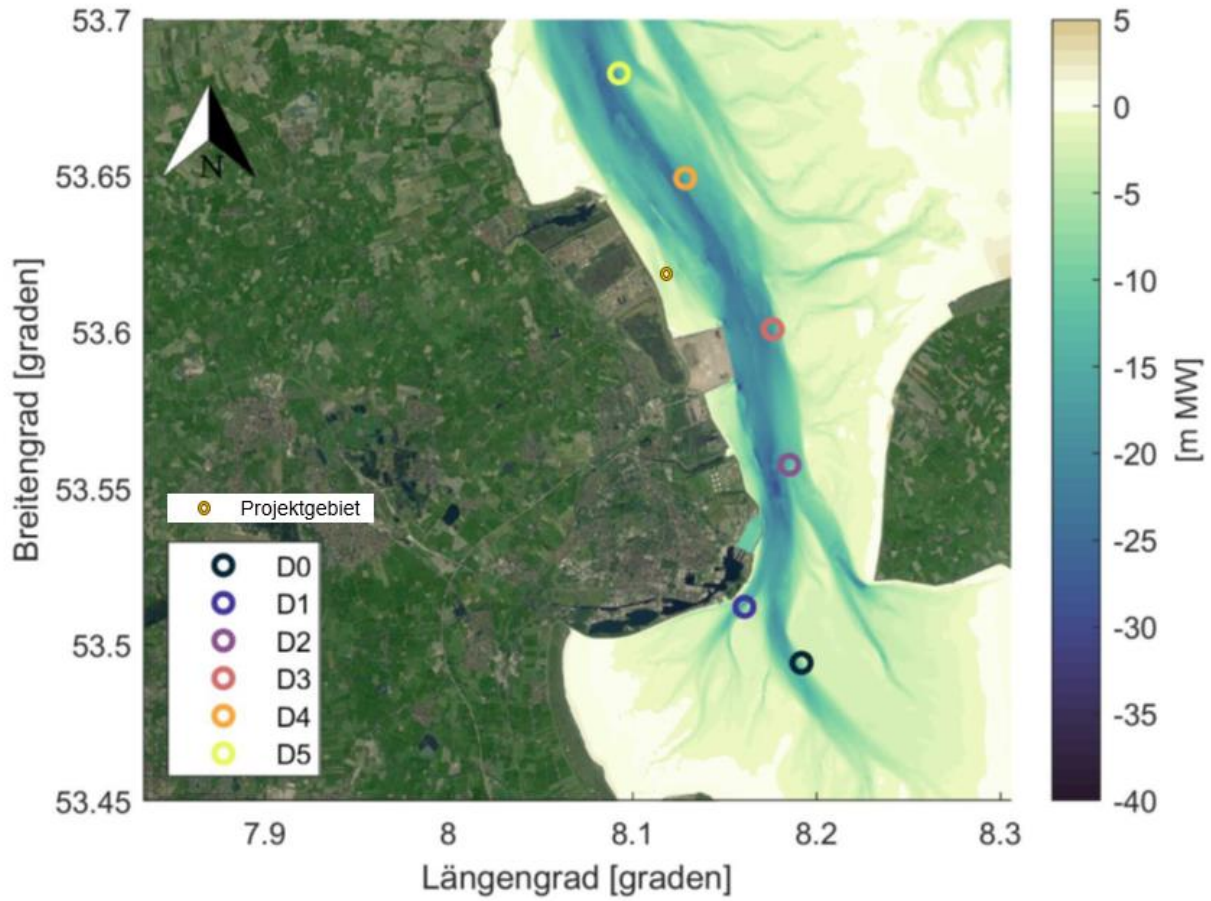






Abbildung 2-4: Standorte der von der WSA erhobenen Fließgeschwindigkeitsdaten (D0 bis D5).

| | | | |
|--|--|-------|---|
|    | Umgebung | |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven Morphologische Studie | FSRU: | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | | Seite 16 von 51 |

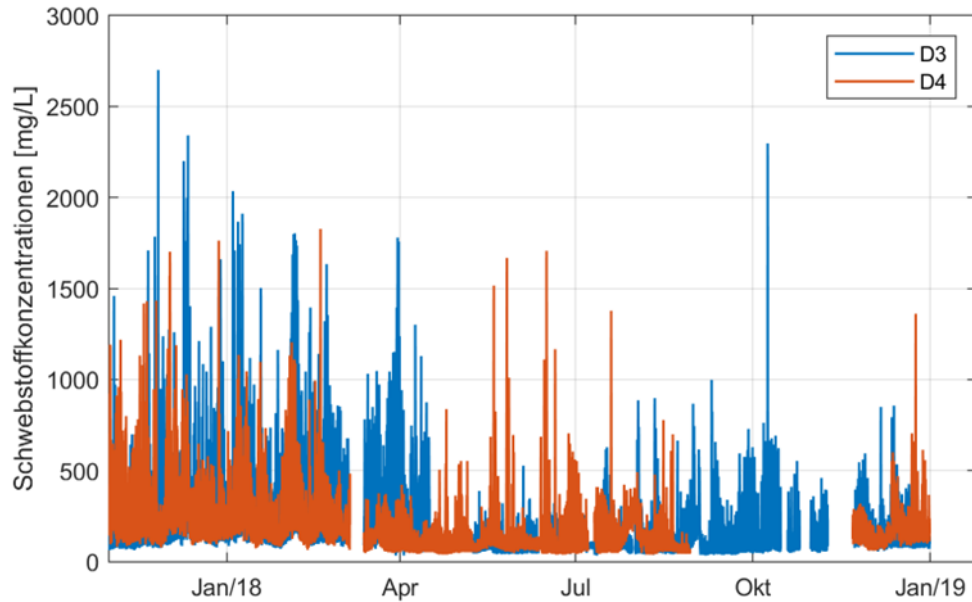


Abbildung 2-5: Zeitreihe der Schwebstoffkonzentrationen [mg/L] für das Jahr 2018, gemessen 3 Meter über dem Meeresboden für die WSA-Stationen D3 und D4.

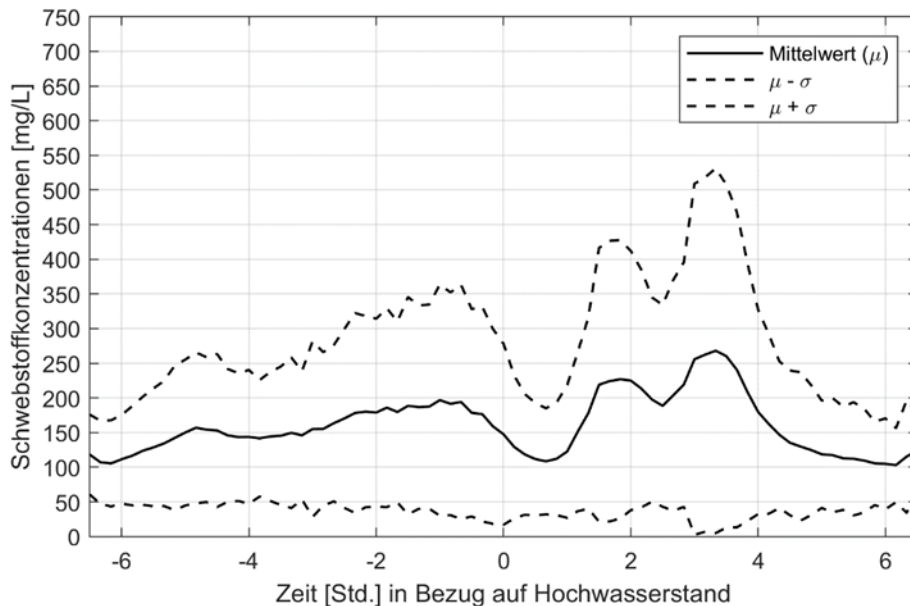






Abbildung 2-6: Schwebstoffkonzentrationen [mg/L] (Mittelwert, plus und minus einer Standardabweichung, über den Messzeitraum 2018) in 3 Metern über dem Meeresboden an der WSA-Station D3 in Bezug auf den Zeitpunkt des oberen Pegelstands an der Hooksielplate.

| | | | |
|--|-----------------------|-------|---|
|    | Umgebung | |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven | FSRU: | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | Morphologische Studie | | Seite 17 von 51 |

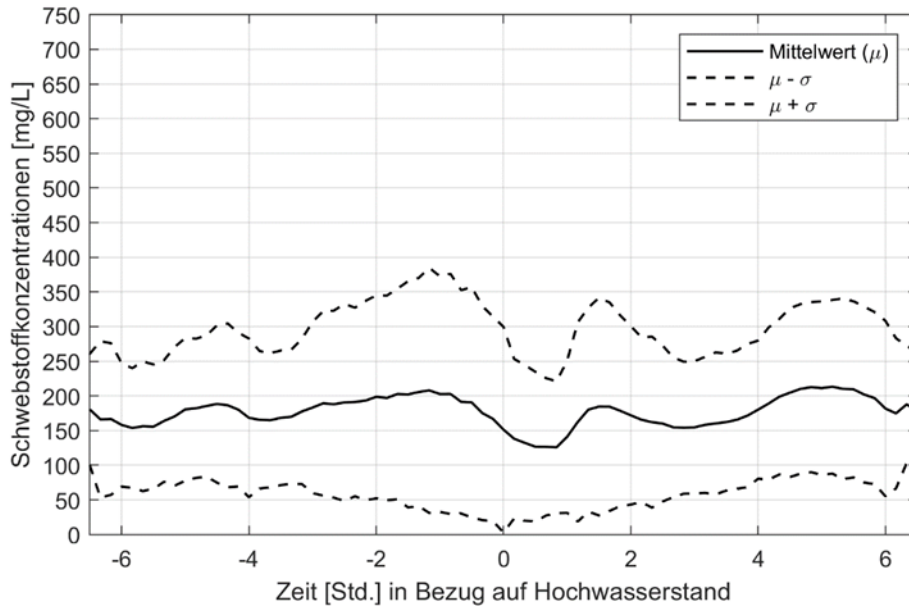


Abbildung 2-7: Schwebstoffkonzentrationen [mg/L] (Mittelwert, plus und minus einer Standardabweichung, über den Messzeitraum 2018) in 3 Metern über dem Meeresboden an der WSA-Station D4 in Bezug auf den Zeitpunkt des oberen Pegelstands an der Hooksielplate.

2.3 Historische Ausbaggerungsaktivitäten

In der Jade wird die Wasserstraße regelmäßig auf die Solltiefe ausgebaggert. Informationen über historische Ausbaggerungsaktivitäten sind jedoch nicht verfügbar. Daher ist es nicht möglich, einen Einblick in den lokalen Sedimenthaushalt zu gewinnen oder ihn für einen qualitativen Vergleich mit simulierten Unterhaltungsvolumen zu nutzen.





2.4 Vertikale Referenzebenen

Die in diesem Bericht gezeigten vertikalen Referenzebenen sind:

MW = Mittel Wasser = NHN = Normalhöhennull

SKN = Seekartennull = LAT (Niedrigste astronomische Tide).

Am Projektstandort betrag: MW [m] = SKN [m] + 2.49 [m].

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 18 von 51 |

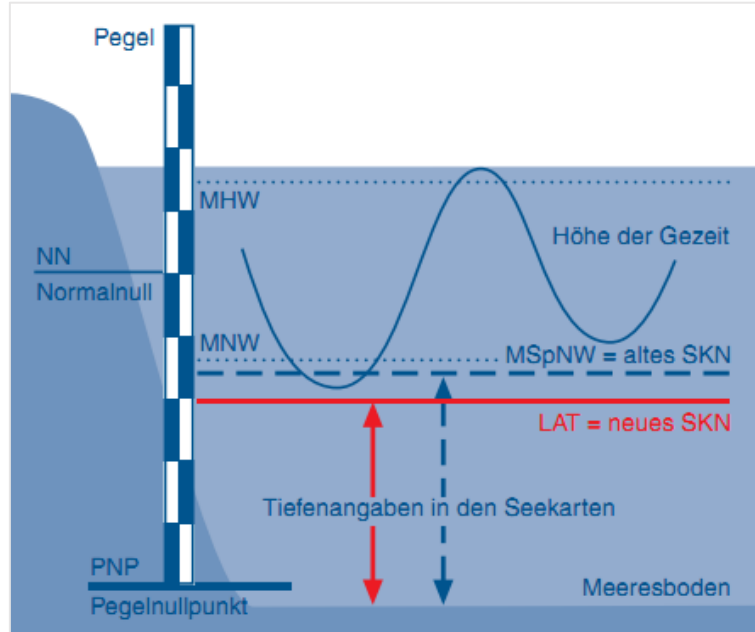






Abbildung 2-8: Nautische Referenzniveaus für den Projektstandort

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 19 von 51 |

3 Morphologische Bewertung

3.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird eine morphologische Bewertung vorgestellt, die auf einer Literaturlauswertung und einer morphologischen numerischen Modellierung beruht.





In der Literaturlauswertung werden das hydromorphologische System, die Sedimenteigenschaften und die beobachtete morphologische Entwicklung in der Umgebung des Projektstandorts beschrieben. Für letztgenannte werden die dokumentierten morphologischen Auswirkungen des Baus der Uniper-Anlandeterminale angesichts der Ähnlichkeiten mit dem aktuellen Projekt bewertet.

Darüber hinaus wird eine morphologische Modellierung vorgestellt, bei der eine Szenario-Analyse verwendet wurde, um die Auswirkungen des Baus der Projektanlagen (d. h. der FSRU und des Wendebeckens) zu bewerten.

3.2 Literaturlauswertung

3.2.1 Beschreibung des hydromorphologischen Systems

Der geplante Projektstandort der FSRU-Vetäuungssystems befindet sich auf der westlichen Seite eines Gezeiteneinzugsgebiets, dem sogenannten Jadebusen (Abbildung 3-2). Der angrenzende Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer ist Teil des Standorts UNESCO-Weltnaturerbes Wattenmeer, und teil die Bucht selbst ist ein Natura-2000-Gebiet. Das Ästuar besteht aus zwei großen Einlaufkanälen, wobei der westliche Kanal in die Jadebusen strömt und der östliche Kanal in die Weser führt. Zwischen dem 16. und 18. Jahrhundert und bei den jüngsten Landgewinnungen, die sogar noch im 20. Jahrhundert erfolgten, wurde der Jadebusen größtenteils eingedeicht, wodurch die Größe des Gezeiteneinzugsgebiets auf die heutigen Ausmaße zurückging. Anzeichen für Entpolderungen lassen sich an Straßennamen erkennen, die sich auf (ältere) Deiche und Entwässerungskanäle in den landwirtschaftlichen Flächen rund um die Bucht beziehen. Aufgrund des nicht vorhandenen Süßwassereintrags wird die Jadebusen eher als Bucht denn als Ästuar bezeichnet. Die Veränderung des Gezeitenprismas wird die Gezeiteneigenschaften erheblich beeinflusst und zu einer späteren morphologischen Anpassung in dem Gebiet geführt haben.

| | | | |
|--|-----------------------|-------|---|
|    | Umgebung | |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven | FSRU: | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | Morphologische Studie | | Seite 20 von 51 |

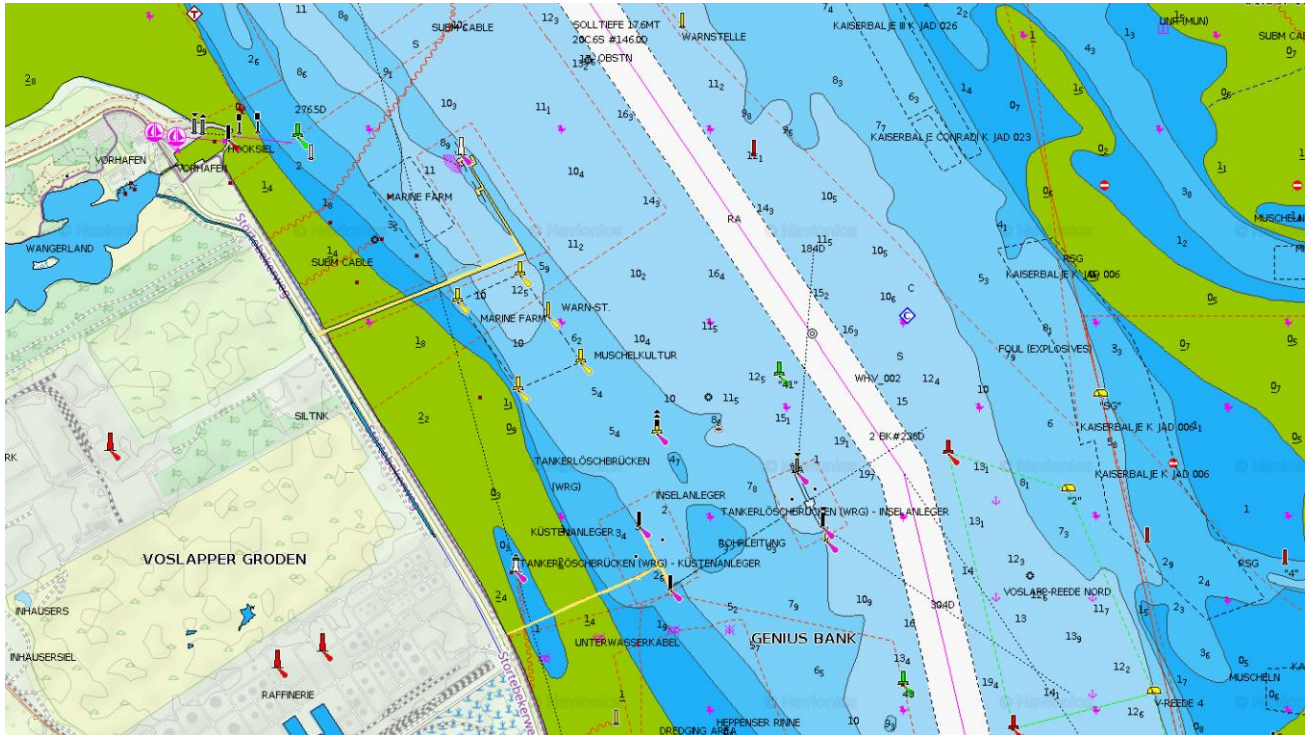






Abbildung 3-1: Schifffahrtskarte, in der die Lage des bestehenden Anlandeterminals angrenzend zum Projektstandort eingezeichnet ist (Navionics).

Auch das Wattenmeer nördlich von Wilhelmshaven wurde im 16. bis 17. Jahrhundert eingedeicht (Voslapper Groden), wodurch die Jade eingedämmt und das Wattenmeer auf einen schmalen Rand entlang des Hauptkanals zur Bucht hin zurückgedrängt wurde (Abbildung 3-3). Ein Teil des Voslapper Grodens ist nun als Naturschutzgebiet ausgewiesen. Infolge der Landgewinnung ist der Hals, der den Jadebusen mit der Nordsee verbindet, zu einem der tiefsten natürlichen Kanäle entlang der deutschen Nordseeküste geworden, wodurch sich die Möglichkeit eines Tiefwasserhafens in Wilhelmshaven ergab.

Seit 1958 wurden entlang des westlichen Ufers mehrere Anlandeterminals für die petrochemische Industrie gebaut, darunter das Flüssigkeits-Großgebäude-Terminal des HES-Wilhelmshaven-Tank-Terminals südlich vom vorgesehenen FSRU-Standort und das Uniper LNG-Terminal Wilhelmshaven im Norden (Abbildung 3-1). Weiter südlich ist seit 2012 das Containerterminal am Jade-Weser-Hafen in Betrieb. Mit dem Bau wurde Anfang 2008 begonnen, wobei hierzu ein Volumen von fast 46 Mio. m³ Sand ausgebaggert wurde. Da er aus dem Uferbereich herausragt, liegt er nahe am Hauptkanal und hat eine natürliche Tiefe von über 18 m.

| | | | |
|--|--|-------|---|
|    | Umgebung | |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven Morphologische Studie | FSRU: | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | | Seite 21 von 51 |

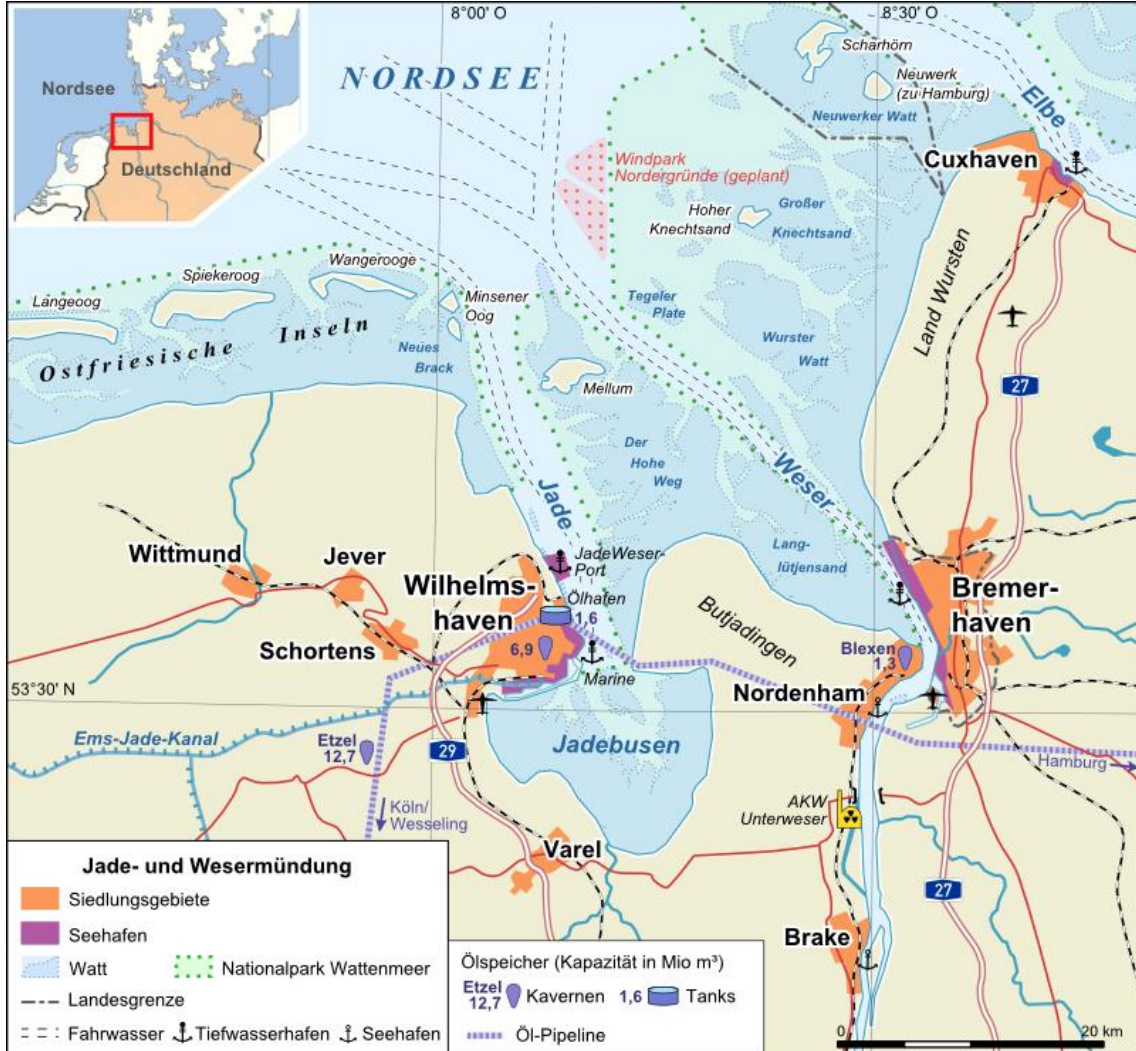






Abbildung 3-2: Lageplan des Jade- und Weser-Ästuars (Quelle https://en.wikipedia.org/wiki/Jade_Bight).

| | | | |
|--|--|-------|---|
|    | Umgebung | |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven Morphologische Studie | FSRU: | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | | Seite 22 von 51 |

Jadebusen und Weserdelta: Entstehung und Ein- bzw. Abdeichung

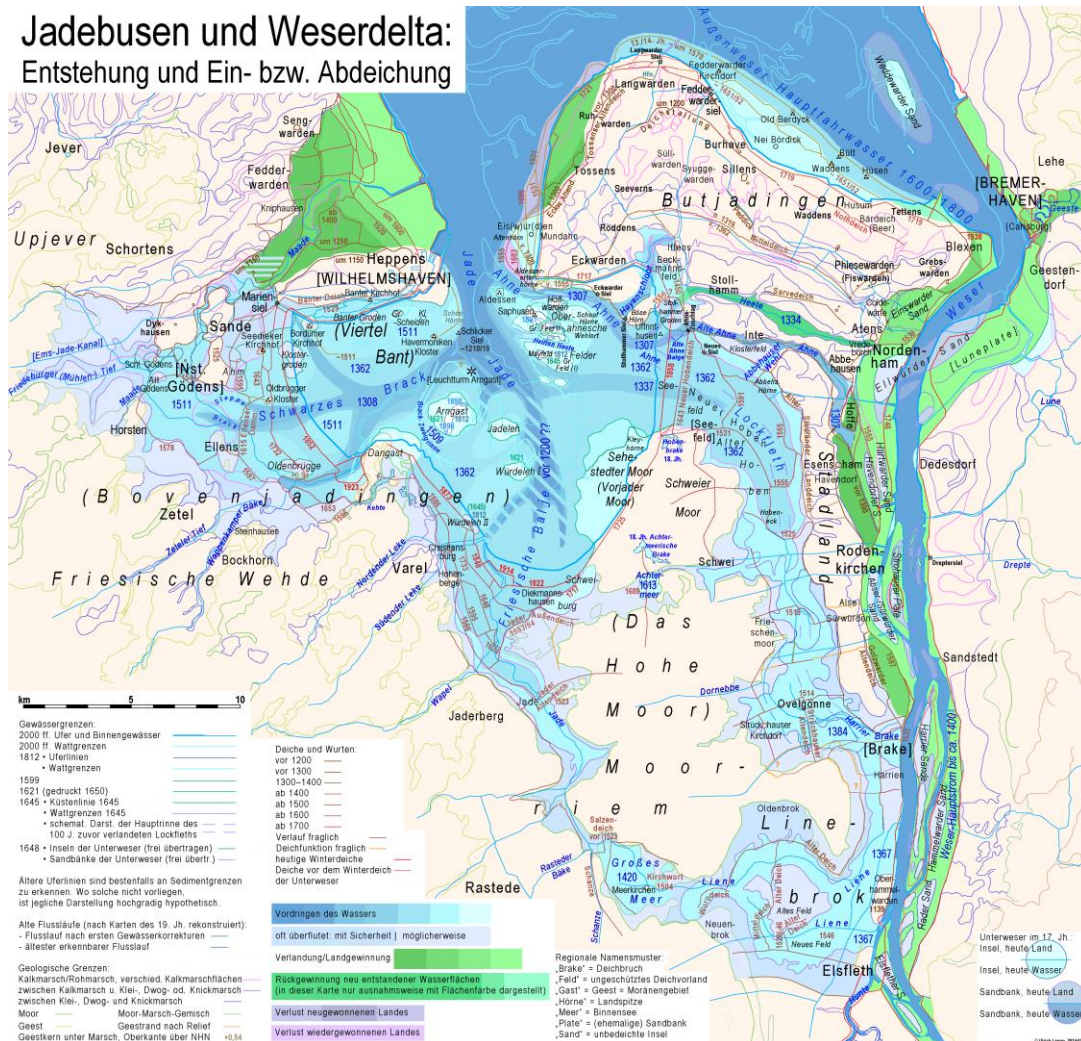






Abbildung 3-3: Entwicklung des Jadebusens und des Zwischenweserdeltas
(Quelle https://en.wikipedia.org/wiki/Jade_Bight).

Wellen und Gezeitengeschwindigkeiten sind die beiden wichtigsten Parameter, die sich auf die morphologische Entwicklung in diesem Gebiet auswirken. Insbesondere bei Sturm können die erhöhten Wasserstände und Wellenhöhen zusammen mit starken Gezeitenströmungen die Fahrinne und das Wattenmeer (neu) formen. Bei durchschnittlichen Verhältnissen wird der Sedimenttransport in der Hauptfahrinne hauptsächlich von den Gezeitengeschwindigkeiten bestimmt. Mit einem durchschnittlichen Tidenhub von etwa 3,5 bis 4 m kann die Region als mittleres Gezeitengebiet eingeordnet werden. Unter durchschnittlichen Verhältnissen betragen die zugehörigen (über die Tiefe gemittelten) Strömungsgeschwindigkeiten bei Flut und Ebbe zirka 1,1 bis 1,15 m/s, während Höchstwerte von 1,65 bis 1,75 m/s verzeichnet wurden (IMP, 2022a).

Die in (IMP, 2022a) mitgeteilten Wellenhöhen reichen von einer maßgeblichen Wellenhöhe von 2,26 m bis zu einer angenommenen maximalen Wellenhöhe von 4,20 m.

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 23 von 51 |

3.2.2 Sedimentkonzentrationen und Meeresbodenmaterialien





Auf der Grundlage langfristiger Zeitreihen der Schwebstoffkonzentration wird in dem Gebiet ein Mittelwert von 100 bis 250 mg/l ermittelt. Während kurzer Zeiträume im Verlauf eines Gezeitenzyklus werden hohe Konzentrationen von benthischen Schwebstoffen mit Werten von 1.000 bis 2.000 mg/l beobachtet (IMP, 2022a). Ähnliche meeresbodennahe Spitzenkonzentrationswerte wurden kürzlich an einem am Projektstandort aufgestellten Messgestell beobachtet (IMDC, 2023a).

Das WSA hat für vier Stationen in der Jade (Abbildung 2-4) Trübungszeitreihen für das Jahr 2018 vorgelegt. Für diese Stationen wurde die Trübung in 3 m Höhe über dem Meeresboden gemessen und in Schwebstoffkonzentrationen (SSK) umgerechnet. Es wurde eine Analyse der SSK an den Stationen D3 und D4, die dem FSRU-Standort am nächsten liegen (Abbildung 2-5 bis Abbildung 2-7), durchgeführt. Für die SSK-Werte, gemittelt nach dem Zeitpunkt des oberen Pegelstands, ist eine Spitzenkonzentration von 268 und 213 mg/L während der Gezeiten für D3 bzw. D4 zu erkennen. Dies stimmt mit den bereits erwähnten mittleren Konzentrationen von 250 mg/L aus dem IMP-Bericht (IMP, 2022b) überein.

Südlich des Jade-Weser-Hafens wurden umfangreiche Untergrunduntersuchungen durchgeführt (IMS, 2009). Im Allgemeinen befindet sich in Oberflächennähe eine Schlickschicht von unterschiedlicher Mächtigkeit, die locker geschichtete Wattsande bedeckt, die sich mit Schlickstreifen abwechseln. Unterhalb des Oberbodens lassen sich pleistozäne Sande vorfinden.

Die Bodenverhältnisse im und um den Projektstandort wurden in (Geo Ingenieurservice Nord-West GmbH&Co. Kg, 2021) während einer Untersuchung im Jahr 2021 (Abbildung 2-2) festgestellt. Eine Kombination von Rückstreuungsanalysen, bestehend aus einer Seitensichtsonarstudie und aus mehreren Proben je Standort gemittelten Meeresbodenproben, wurden bewertet. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass der Sandrücken im Bereich zwischen dem Biotop und dem Fahrwasser durch feinen bis mittleren Sand gekennzeichnet ist. An der Stelle, an der sich das Biotop befindet, ist deutlich gröberes Material zu finden, darunter grober bis sehr grober Sand, Schotter und Steine. Im Bereich südöstlich des Unterbaus der Uniper-Anlage findet sich ebenfalls gröberes Material, in diesem Fall vor allem mittlerer bis grober Sand, mit einigen sehr groben Sanden und Kiesen. Dieser Bereich entspricht dem Ablagerungsbereich der Sedimente, die vom Kolk um das Fundament des Uniper-Unterbaus stammen. Aus drei Sedimentproben, die während der IMDC-Messungsaktivität am Projektstandort (IMDC, 2023a) gesammelt wurden, geht hervor, dass der lokale Anteil an Feinstoffen im Meeresboden (0 %, 5 % und 8 %) mit dem des angrenzenden Uniper-Standorts (durchschnittlich 7 %) übereinstimmt. Allerdings zeigen die drei Proben auch die relativ große Bandbreite der lokalen Zusammensetzung des Meeresbodens.

Im Jahr 2007 sammelte das IMP meeresbodennahe Schwebstoffe, um die Korngrößenverteilung der Schwebstoffe in der Wassersäule zu ermitteln (IMP, 2022a). Bei der Analyse dieser Daten stellte sich heraus, dass die Ablagerungen am Planungsstandort überwiegend sandig waren und 60 bis 80 % (feinen) Sand mit

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 24 von 51 |

einem durchschnittlichen Korngrößendurchmesser von 70 bis 100 μm enthielten. Die Korngrößenverteilungskurven zeigten jedoch einen erheblichen Schlickanteil von 20 bis 40 %.





Aus der von der BAW (BAW, 2016) betriebenen Website EasyGSH-DB wurde eine räumliche Verteilung des D50-Meeresbodenmaterials im Jadebusen für das Jahr 2016 (Abbildung 2-3) gewonnen. Entlang des Wattenmeeres und der verschiedenen seichten Gewässer finden sich Feinsedimente von $< 100 \mu\text{m}$, womit die Beobachtungen in (IMP, 2022a) bestätigt werden. Entlang der Kanäle und des Fahrwassers lassen sich größere Sedimentstoffe von über 500 μm vorfinden. Diese Bereiche mit grobem Material passen zu tieferen Abschnitten und Bereichen mit Strömungseinschränkungen, die durch die verschiedenen Landgewinnungen entstanden sind, wie beispielsweise das Gebiet des Jade-Weser-Hafens.

3.2.3 Beobachtete morphologische Entwicklung in der Umgebung des Projektstandorts

Wie im vorangegangenen Abschnitt dargelegt, wird das morphologische System des Jadebusens hauptsächlich durch Gezeiten und Wellen bestimmt. Aus der Literatur (G. Lang, 2003; Axel Götschenberg, 2008) geht hervor, dass der Gezeitenhauptkanal der Jade einen Nettoeintrag von Sedimenten erfährt, was auf eine meerseitige, flutdominierte Gezeitenasymmetrie sowie auf den vernachlässigbaren Süßwasserablauf und die Geometrie des Jadebusens zurückzuführen ist.

Innerhalb des Gezeitenkanals, insbesondere in der Äußeren Jade, finden sich große untermeerische Dünenfelder, die bekanntermaßen Meeresbodenformen unterschiedlicher Größe aufweisen. Diese Dünen sind besser bekannt als Verbunddünen (Scheiber *et al.*, 2020). Auf der Grundlage aufeinanderfolgender hochauflösender Oberflächen der Bathymetrie wurden komplexe Wanderungsmuster identifiziert, bei denen Dünen in entgegengesetzten Richtungen entlang des Kanals wandern und an bestimmten Stellen frontal aufeinandertreffen (Kubicki *et al.*, 2016). Es ist naheliegend, dass dieses Wanderverhalten durch zwei gegenläufige Restströmungswirbel gesteuert wird, die durch die lokale Form des Gezeitenkanals entstehen. Dies zeigt, dass die Annahme eines von der Flut dominierten Gesamtsystems zu pauschal ist, wenn man versucht, Wanderungsmuster auf lokaler Ebene vorherzusagen. Daher könnten numerische Modellierungsergebnisse nützliche Informationen über lokale Restströmungen und die damit verbundenen Wanderungsmuster liefern.

Die Bathymetrie-Transekte im Projektgebiet (Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5) zeigen, dass in dem Gebiet asymmetrische Dünen vorkommen. Im Falle des Hauptkanals sind die Dünen unmittelbar nördlich der Anlegestelle einheitlich zur stromabwärts gelegenen Seite hin ausgerichtet (Ebbe-Dominanz des Hauptkanals), während unmittelbar südlich der Anlegestelle eine Zone mit zusammenlaufenden Dünen zu beobachten ist (ähnlich wie bei Kubicki *et al.*, 2016).

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven Morphologische Studie | FSRU: Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 25 von 51 |

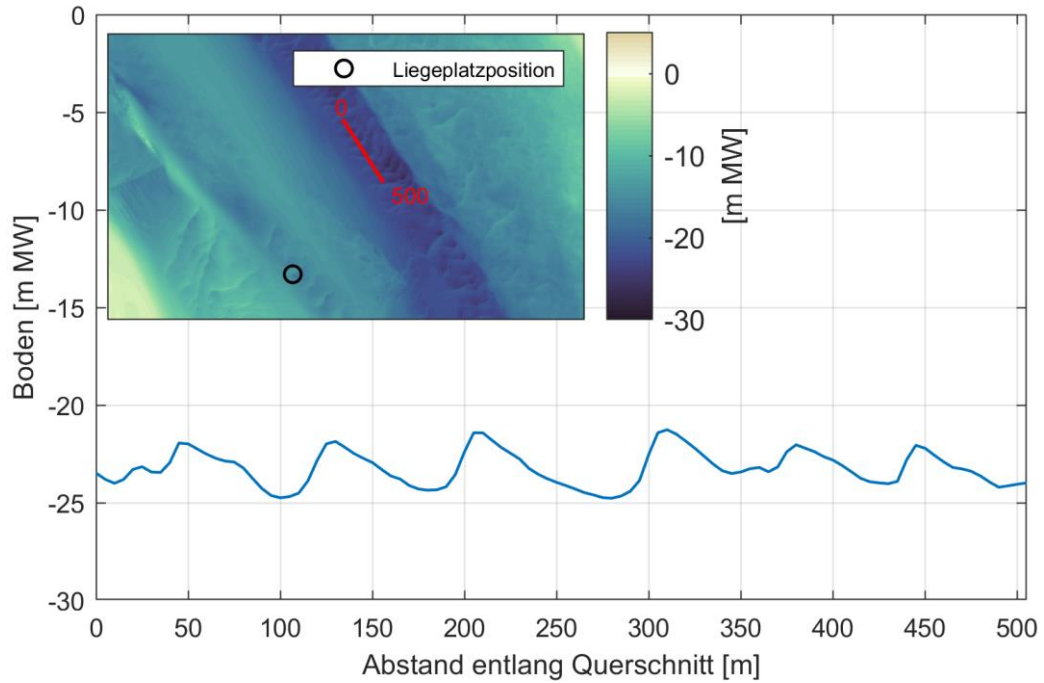






Abbildung 3-4: Bathymetrie-Transpekt [MW] innerhalb des Jadekanals in der Nähe der geplanten FSRU-Anlegestelle.

| | | |
|--|-----------------------|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven | FSRU: Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | Morphologische Studie | Seite 26 von 51 |

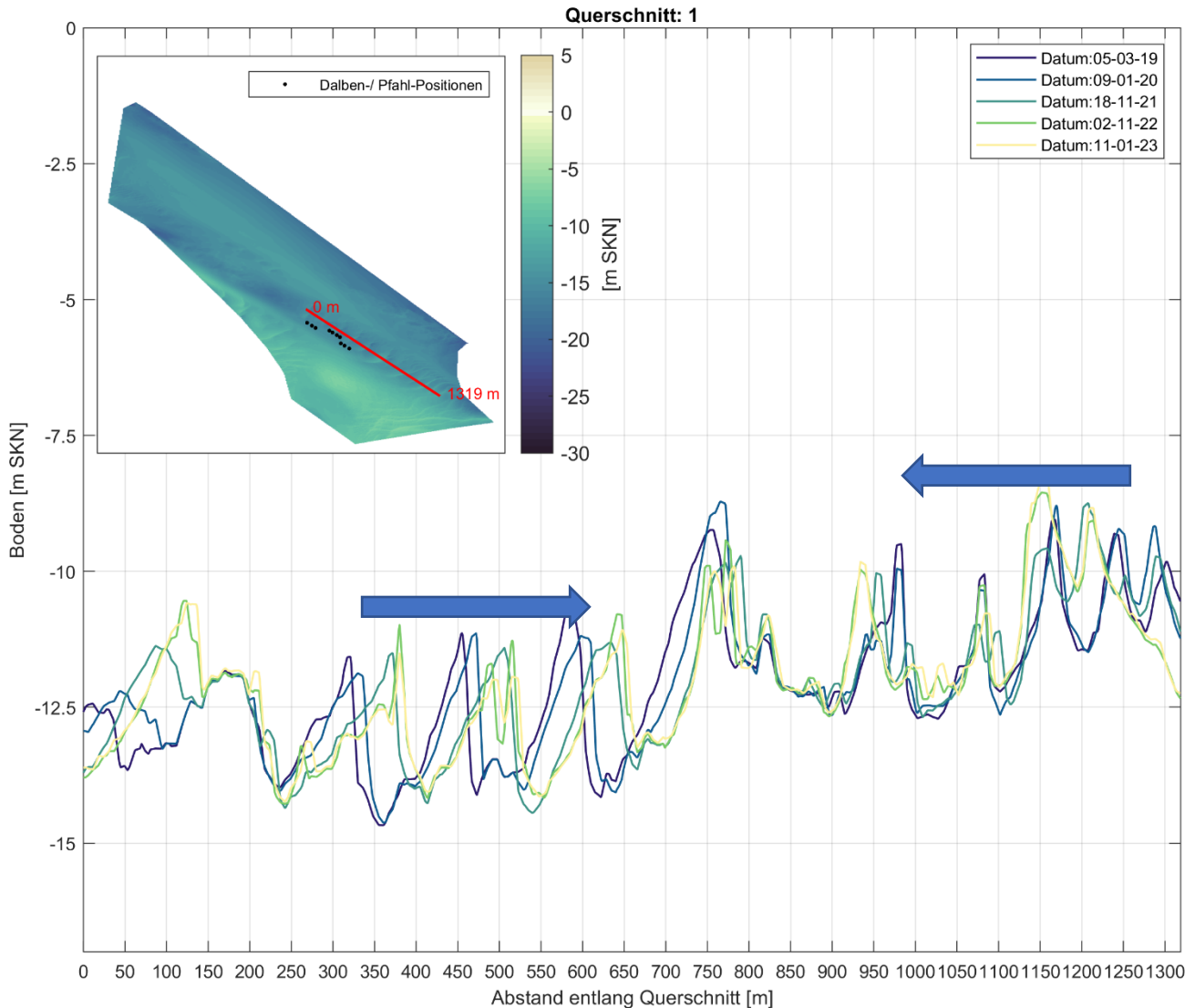






Abbildung 3-5: Höhe des Meeresbodens [m bezogen auf Seekartennull, SKN] aus Bathymetrie-Studien, der entlang eines Transekts mit Sandwellen am vorgesehenen FSRU-Standort entnommen wurde. Die Messwerte entsprechen den Datensätzen für 2019 bis 2023 (d. h., „047_Zufahrt HES und LNG Anleger_5m Argo_04.-05.03.19“ und „003_Zufahrt HES und LNG Anleger_5m Argo_06.-09.01.20“, „190_Zufahrt HES und LNG Anleger_5 m Argo Grid_09.-18.11.21“, „169_Zufahrt HES und LNG Anleger_5 m Argo Grid_02.11.22“ und „011_Zufahrt HESTIA und LNG Anleger_5 m Argo Grid_10.-11.01.23“). Blaue Pfeile kennzeichnen die beobachteten Wanderungsrichtungen.

In (IMP, 2022a) wurde die morphologische Entwicklung anhand gesammelter Daten seit dem Baubeginn des Jade-Weser-Hafens im Jahr 2005 sowie einiger neuerer, lokaler Bathymetrie-Studien (2018–2020 und März/April 2022) bewertet. Der Vergleich der beiden Bathymetrien veranschaulicht übereinstimmende morphologische Merkmale. Anhand neuerer Sondierungen lassen sich die lokalen Auswirkungen des bestehenden Unterbaus und des Anlandeterminals der Umschlaganlage Voslapper Groden (gebaut 1980) auf die lokale Topografie beurteilen. Südlich des Unterbaus ist eine Vertiefung zu erkennen. Um die Stützpfeile des Unterbaus werden Turbulenzen (Wirbel) erzeugt, die zu Kolk auf dem flutdominierten Wattenmeer führen.

| | | | |
|--|-----------------------|-------|---|
|    | Umgebung | |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven | FSRU: | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | Morphologische Studie | | Seite 27 von 51 |

Weiter südlich hat sich das abgeschwemmte Sediment abgesetzt und große (sandige) Meeresbodenformen gebildet.

Die hauptsächlichen Tiefenkonturen folgen der Hauptrichtung der Gezeiten (NW-SO). Ein auffälliges Merkmal ist ein Höhenrücken (−8 m bezogen auf Normalhöhennull, NHN), der sich unterhalb und stromabwärts des Anlandeterminals gebildet hat. Es ist wahrscheinlich, dass der innere Bereich westlich des Anlandeterminals ausgebaggert wird, während unterhalb des Anlandeterminals die Pfahlreihe eine Leezone geschaffen hat, in der Ablagerungen entstehen können und das Ausbaggern schwierig ist. Darüber hinaus wird der vorhandene Höhenrücken eine Strömungstrennung bewirken und zu erhöhten Geschwindigkeiten und in der Folge zu einer Vertiefung östlich und westlich des Höhenrückens führen.

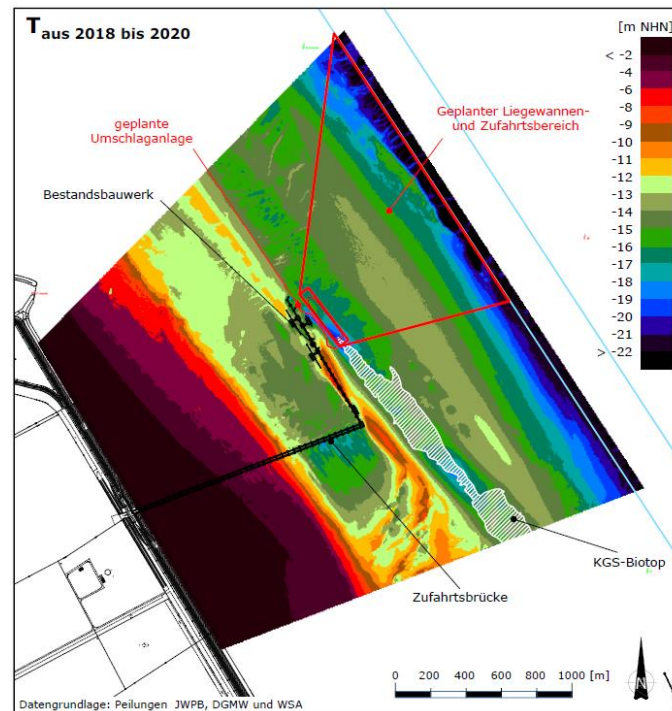






Abbildung 3-6: Tiefensondierungen mit bestehenden Anlagen und Anlandeterminal am UNIPER-Standort(IMP, 2022a).

Das Biotopgebiet liegt in einem abgesenkten Bereich zwischen einem ovalen Sandrücken (unter −13 m NHN) und dem Watt. Das Biotop ist durch das Vorhandensein von Kies-Grobsand-Schillboden-Materialien (KGS) gekennzeichnet. Aufgrund des vorhandenen seichten Gewässers können innerhalb der Wassersenke, in der sich das Biotop befindet, größere Geschwindigkeiten auftreten, die zu natürlichem Kolk und somit zur Aufrechterhaltung dieser Situation führen. Örtlich treten Tiefen bis zu −20 m NHN auf. Auf der Ostseite des Höhenrückens nimmt die Tiefe stark zu und erreicht in der Hauptfahrrinne Werte von über −22 m NHN.

Die differenzierte Darstellung der durchschnittlichen Tiefe, die über den Zeitraum von 2005 bis 2020 und der Erkundung von 2018 bis 2020 berechnet wurde, liefert weitere Informationen sowohl über die großräumigen

| | | | |
|--|-----------------------|-------|---|
|    | Umgebung | |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven | FSRU: | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | Morphologische Studie | | Seite 28 von 51 |

morphologischen Veränderungen in diesem Gebiet als auch über die Auswirkungen des Anlandeterminals auf die umliegende Morphologie. Da das Anlandeterminal nicht perfekt mit der Gezeitenströmung ausgerichtet ist, lassen sich gewisse Auswirkungen aufwärts und abwärts erkennen. Die Sedimentation auf der Leeseite des Anlandeterminals und am Ufer kann als Abschirmeffekt vor den Wellen betrachtet werden, wodurch es zu einer Ansammlung von Sedimenten in der Leezone kommt. Zwischen dem Anlandeterminal und dem Ufer rückt die Wassersenke näher an das Ufer heran und vertieft sich. Südlich des Unterbaus lassen sich (wandernde) Meeresbodenformen erkennen, die mit der Ablagerung dieser Sedimente zusammenhängen.

Der Sandrücken zwischen der Wasserrinne und dem Anlandeterminal weist auf der nördlichen, dem Flutströmung zugewandten Seite eine Vertiefung und auf der südlichen Seite eine neuere Ablagerung auf. Dies könnte auf die erhöhte Reibung, hervorgerufen durch den Unterbau und dem Anlandeterminal, sowie auf den Aufbau des Ufers, wegen des Rückgangs der Wellenbewegung, zurückzuführen sein. Nach dieser Vertiefung bildet sich zwischen dem Sandrücken und dem Anlandeterminal eine Wasserrinne, die sich nach Nordwesten erstreckt und Ebbströmungen anzieht sowie nach Südosten, entlang der Senke, in der sich das Biotop befindet. Die Lage und der Meeresboden des Biotops scheinen ziemlich beständig zu sein, mit einer gewissen Vertiefung in Richtung Südosten. Östlich des Sandrückens, in der Nähe des Fahrwassers, ist eine gewisse Vertiefung zu erkennen, die dem Wachstum des Sandrückens selbst folgt. Auf dem Boden des Hauptkanals sind die typischen Sedimentations-/Erosionsmuster im Zusammenhang mit sich bewegenden (sandigen) Meeresbodenformen zu erkennen. Der in den Abbildungen analysierte Bereich zeigt die dominierende Erosion.

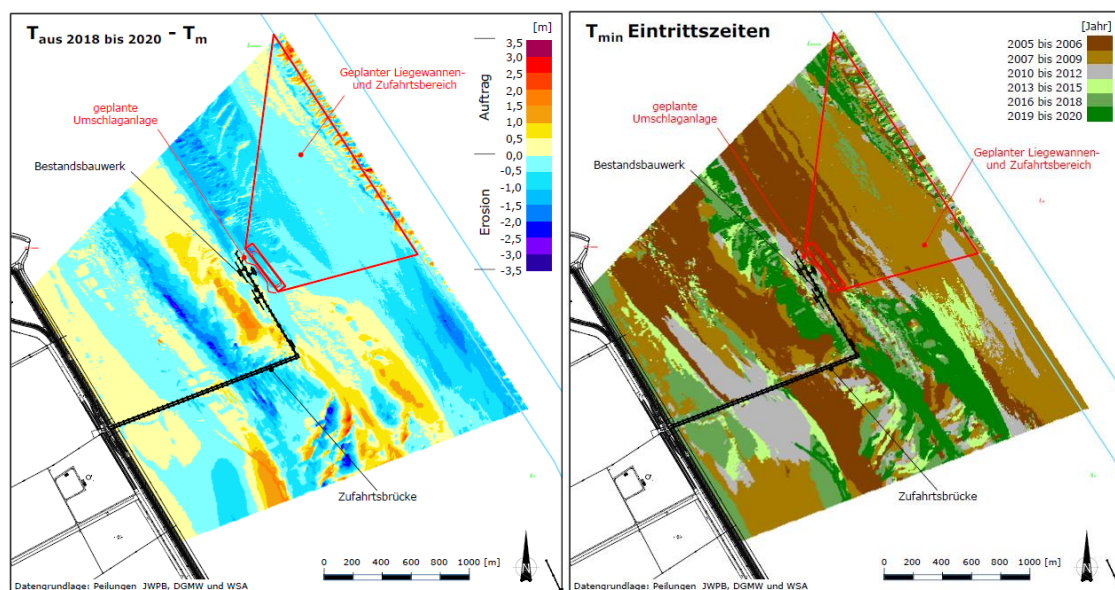






Abbildung 3-7: Tiefendifferenz zwischen der über den Zeitraum von 2005 bis 2020 berechneten Durchschnittstiefe und der Erkundung von 2018 bis 2020 (links) und der Bezug zur Untersuchung für das Vorkommen der Mindesttiefe (IMP, 2022a).

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | Seite 29 von 51 | |

Die Bathymetrie des laufenden Projektstandorts ist in Abbildung 3-8 dargestellt. Es lassen sich die oben beschriebenen Merkmale erkennen: die Sedimentationszone, die sich von dem Uniper-Anlandeterminal aus fortsetzt, der Biotopbereich, der sich in einer Wasserrinne zwischen dem Sandrücken und dieser Sedimentationszone befindet, und der an den Sandrücken angrenzende Hang zur Fahrrinne. Nach Süden wird der Sandrücken schmaler und die Senke, mit dem sich darin befindlichen Biotop, verbreitert sich, um sich mit dem Hauptkanal zu verbinden. Aufgrund der Ausrichtung dieser Wasserrinne kann davon ausgegangen werden, dass sie einer Ebbe-Ablaufrinne entspricht und höchstwahrscheinlich ebbe-dominiert ist (dies wird durch die oben beschriebene Ausrichtung der asymmetrischen Dünen bestätigt). In diesem Bereich sind Sandwellen zu erkennen, die angesichts des Hinweises auf die Ebbe-Dominanz in die Wasserrinne einwandern könnten, was auf die ebbedominierten Strömungsverhältnisse zurückzuführen ist.

Weiter südlich befindet sich die äußere Anlegestelle des HES; im laufenden Projekt, vor der Anlegestelle wird ein Wendebecken ausgebaggert, sodass die Fahrrinne, die an dieser Stelle weiter nach Süden zum JWP-Gebiet abbiegt, lokal verbreitert wird (Abbildung 3-9). Derzeit befindet sich die äußere Anlegestelle der HES direkt am Eingang der Ebbe-Rinne, und es ist Kolk hinter und um der Anlage zu sehen.

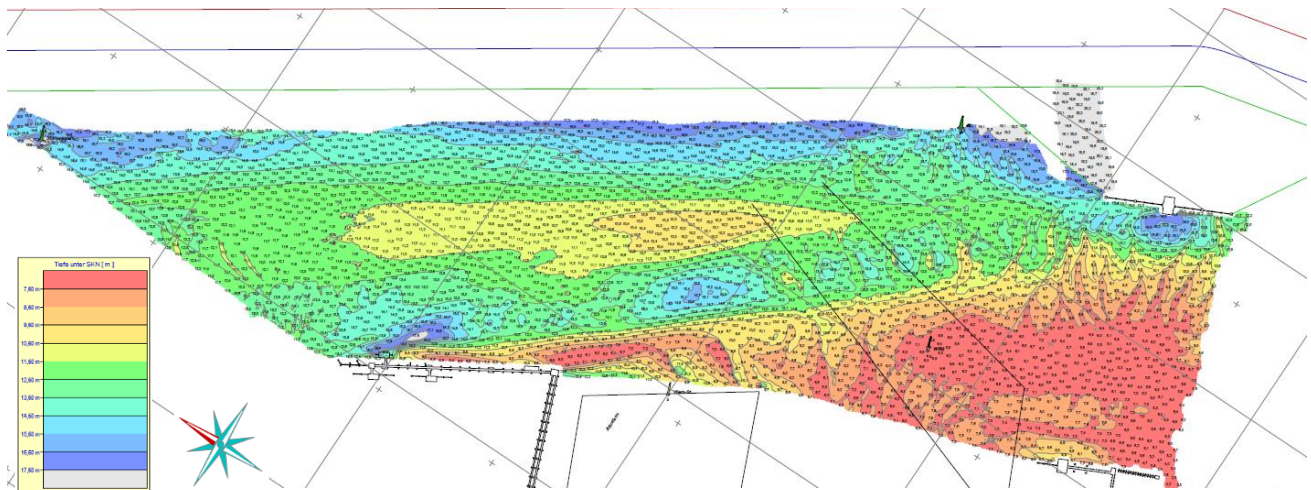






Abbildung 3-8: Bathymetrie-Studie (Tiefe in m unter SKN) am Projektstandort (25/01/2022) (aQua, 2022).

| | | | |
|--|-----------------------|-------|---|
|    | Umgebung | |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven | FSRU: | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | Morphologische Studie | | Seite 30 von 51 |

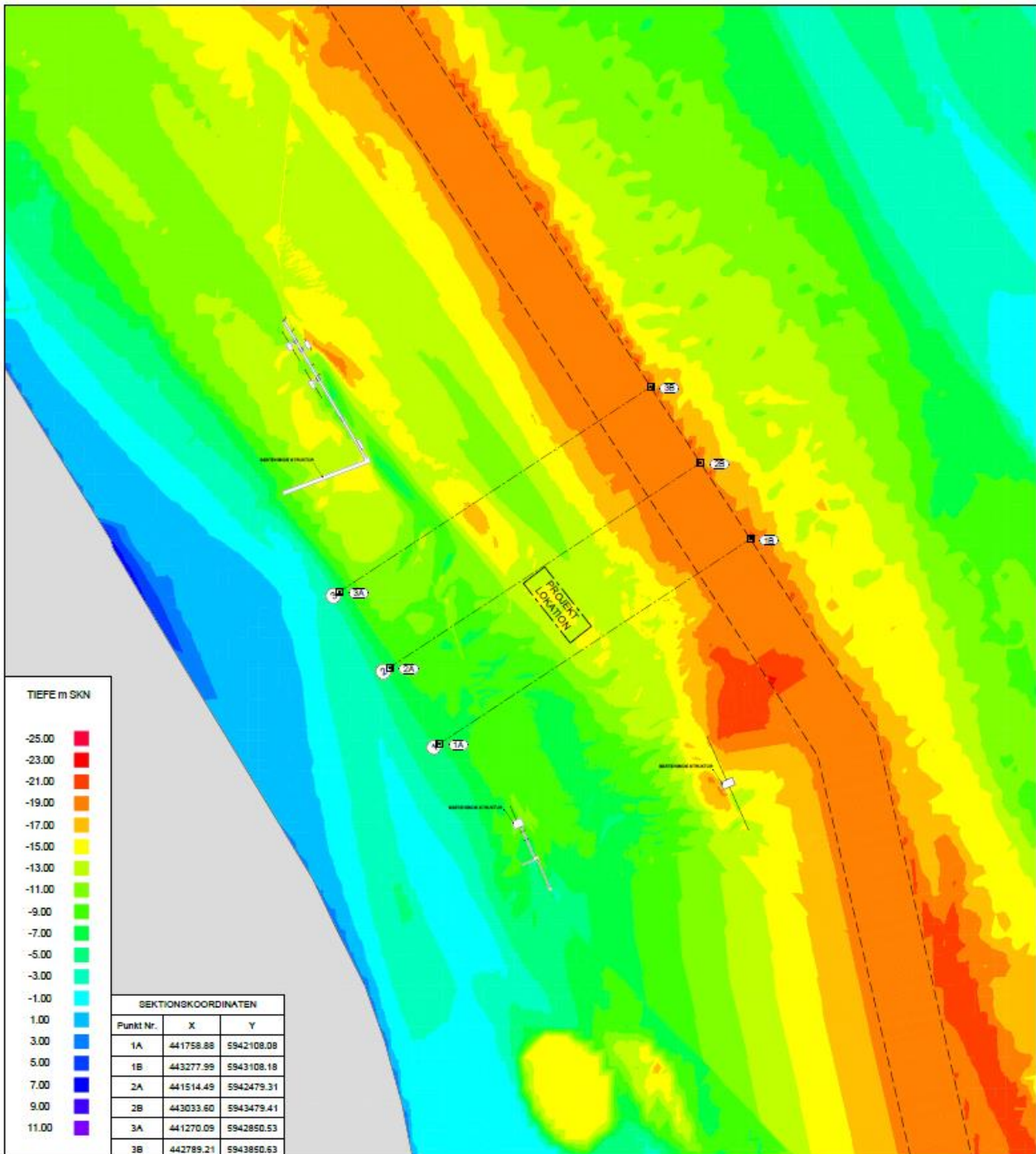






Abbildung 3-9: Übersicht über die vorhandenen Anlagen, den Fahrwasserkanal und den geplanten Projektstandort; Tiefe in [m] SKN (TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DWG-2012.07).

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 31 von 51 |

3.2.4 Schlussfolgerungen aus der Literaturlauswertung





Im Jadebusen, und damit auch am Projektstandort, werden Wellen und Gezeitengeschwindigkeiten die beiden wichtigsten Einflussgrößen auf die lokale morphologische Entwicklung sein. Insbesondere bei Sturm können die erhöhten Wasserstände und Wellenhöhen zusammen mit starken Gezeitenströmungen die Fahrrinne und das Wattenmeer (neu) formen. Bei durchschnittlichen Verhältnissen wird der Sedimenttransport in der Hauptfahrrinne hauptsächlich von den Gezeitengeschwindigkeiten bestimmt. Mit einem durchschnittlichen Tidenhub von etwa 3,5 bis 4,0 m kann die Region als mittleres Gezeitengebiet eingeordnet werden.

Der Gezeitenhauptkanal der Jade erfährt einen Nettoeintrag von Sedimenten, was auf eine meerseitige, flut-dominierte Gezeitenasymmetrie sowie auf den vernachlässigbaren Süßwasserablauf und die Geometrie des Jadebusens zurückzuführen ist. Innerhalb des Gezeitenkanals, insbesondere in der Äußeren Jade, finden sich große untermeerische Dünenfelder, die bekanntermaßen Meeresbodenformen unterschiedlicher Größe aufweisen (bekannt als Verbunddünen). Auf der Grundlage aufeinanderfolgender hochauflösender Oberflächen der Bathymetrie wurden komplexe Wandlungsmuster identifiziert, bei denen Dünen in entgegengesetzten Richtungen entlang des Kanals wandern und an bestimmten Stellen frontal aufeinandertreffen. Die Höhe der Sanddünen (vom Trog bis zum Kamm) schwankt zwischen 2,0 m und 3,0 m, und während der Wanderung der Dünen werden die einstigen Kämmе zu Trögen und umgekehrt. Daher kann die Höhe des Meeresbodens infolge der natürlichen Dünenwanderung um bis zu 3,0 m schwanken.

In (IMP, 2022a) wurde die morphologische Entwicklung anhand gesammelter Daten seit dem Baubeginn des Jade-Weser-Hafens im Jahr 2005 sowie einiger neuerer, lokaler Bathymetrie-Studien (2018–2020 und März/April 2022) bewertet. Der Vergleich der beiden Bathymetriem Studien veranschaulicht übereinstimmende morphologische Merkmale. Anhand neuerer Sondierungen lassen sich die lokalen Auswirkungen des bestehenden Unterbaus und des Anlandeterminals der Umschlaganlage Voslapper Groden (gebaut 1980) auf die lokale Topografie beurteilen.

Aufgrund des Baus des Anlandeterminals, des fest vertäuten FSRU-Schiffs und der Ausbaggerung des Anlande- und Wendebeckens ist eine Reihe von morphologischen Reaktionen zu erwarten:

- Wenn ein Anlandeterminal gebaut wird, werden die Pfähle die Strömung um diese Bauwerke beeinflussen. Die durch ein Anlandeterminal hervorgerufene erhöhte Reibung kann zu einer Umleitung der Strömung nach Osten und Westen führen. Dies führt zu einer veränderten Strömungsverteilung durch und entlang der Bauwerke, verursacht Kolk um die Dalben und zieht Sedimentation unterhalb des Anlandeterminals nach sich.
- Weitere morphologische Anpassungen sind aufgrund der neuen Strömungsverhältnisse zu erwarten. So wird beispielsweise die Schaffung eines Wendebeckens dazu führen, dass die Strömung in Richtung des Anlandeterminals gezogen wird. Dies wird durch die Umleitung der Strömung noch verstärkt und kann zu einer zusätzlichen Vertiefung entlang des Anlandeterminals führen. Da der Meeresboden zwischen dem

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 32 von 51 |

Anlandeterminale und dem Fahrwasser ausgebaggert wird, um die Anlandung an das Terminal zu realisieren, ist eine lokale Steigerung der Strömung zu erwarten. Allerdings können diese nach den morphologischen Anpassungen wegen der Strömungseinschränkung, die durch das vorhandene Anlandeterminale und die FSRU entstanden sind, wieder ausgeglichen werden.

- Ein Grund für künftige Unterhaltungsausbaggerungen könnte die Wanderung von Bodenformen in das Wendebecken und den Anlandebereich sein. Aus den verfügbaren Tiefensondierungen ist ersichtlich, dass große Bodenformen südöstlich des Projektgebiets vorhanden sind. Solche Bodenstrukturen deuten darauf hin, dass eine überflüssige Menge an Sediment (Sand) entlang des Meeresbodens wandert. Änderungen der Strömungsmuster und -geschwindigkeiten können die Wanderung dieser Strukturen beeinflussen und dadurch Sediment in den ausgebaggerten Bereich eintragen.





3.3 Erstellung der numerische Modellierung

3.3.1 Einleitung

Der vorgesehene Plan des Wendebeckens, die Dalben und der FSRU wurde mithilfe eines hydrodynamischen TELEMAC-3D-Modells modelliert (siehe TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DOC-2014.07_Bericht über die Umgebungsverhältnisse (IMDC, 2023b)). Mit dem Modell wurden sowohl die durchschnittlichen Gezeitenverhältnisse als auch die Sturmverhältnisse modelliert. Im Folgenden werden die durchschnittlichen Verhältnisse erörtert, da sie in der Regel die längerfristige morphologische Entwicklung bestimmen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Ereignisse die allgemeine Ausprägung der morphologischen Merkmale nicht verändern.

Darüber hinaus wurden aussagekräftige morphologische Berechnungen durchgeführt, um die Reaktion des Meeresbodens auf die berechneten hydrodynamischen Auswirkungen zu bewerten. Die morphologische Entwicklung nach einem Jahr der Simulation wurde mit der Referenz-Simulation ohne die Projektanlagen verglichen. Es gelten die folgenden Annahmen/Einschränkungen:

- Wie im hydrodynamischen Modell wird die FSRU als massives Bauwerk dargestellt (das sich bis zum Meeresboden erstreckt). Dies ist eine konservative Auffassung, die zu einer Überbewertung der Strömungsbeschleunigung um die FSRU und damit zur Kolkbildung an dieser Stelle und zur Ablagerung von abgetragenem Material in der angrenzenden Umgebung führt (siehe TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DOC-2014.07_Bericht über die Umgebungsverhältnisse (IMDC, 2023b)).
- Die anfänglichen (einjährigen) Sedimentationsmuster wurden untersucht und es wurden keine langfristigen morphologischen Auswirkungen berücksichtigt.
- Die Auswirkungen von Wellen wurden nicht berücksichtigt, da die Wellenhöhen bei durchschnittlichen Verhältnissen relativ niedrig sind (siehe TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DOC-2014.07_Bericht über die

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 33 von 51 |

Umgebungsverhältnisse (IMDC, 2023b)) und somit die Orbitalgeschwindigkeiten in Meeresbodennähe am Projektstandort ebenfalls gering sind.





- Die vorhandenen anderen Bauwerke stromaufwärts und stromabwärts des Projektstandorts (d. h. das HES-Anlandeterminal und das Uniper-Anlandeterminal) wurden nicht berücksichtigt; die Fundamentstrukturen des Anlandeterminals wurden im Modellrasternetz ebenfalls nicht miteinbezogen. Allerdings wurden die Dalben durch Hinzufügen einer Impulsquellenkomponente (zur Berücksichtigung der von den Dalben ausgelösten Widerstandskraft) zum Modell an ihren Standorten errichtet.
- Das Vorhandensein des LNGC wurde nicht berücksichtigt. Der LNGC wird nur einmal pro Woche in der Nähe der FSRU anlegen und dort zwischen 1 und 2 Tagen bleiben. Somit wird die langfristige Morphodynamik in der Region nicht beeinträchtigt.
- Schlamm wurde im Modell nicht in Betracht gezogen (eine dynamische räumliche Verteilung von 5 unterschiedlichen Sandkorngrößen wurde in Anlehnung an (BAW, 2016) herangezogen). Basierend auf Sohlschubspannungskarten wird erwartet, dass innerhalb des Wendbeckens keine wesentliche Verschlammung auftreten wird.

3.3.2 Modelleinstellungen

Der Sedimenttransport und die Morphodynamik wurden durch Kopplung von TELEMAC-3D mit GAIA simuliert, dem neuesten Programm für den Sedimenttransport der TELEMAC-Modellierungssuite.

Die morphologischen Einstellungen des morphodynamischen Modells sind in Tabelle 3-1 aufgeführt. Die hydrodynamischen Einstellungen können im Bericht über die Umgebungsverhältnisse TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DOC-2014.07_Bericht über die Umgebungsverhältnisse (IMDC, 2023b) nachgeschlagen werden. In diesem Bericht wird ein Szenario betrachtet, bei dem die folgenden Projektanlagen im Jade-Weser-Modell errichtet worden sind (dargestellt in Abbildung 3-10):

- Wendebcken (gemäß Lageplan), erzielt durch Anpassung der Bathymetrie auf –16,99 m MW.
- FSRU, umgesetzt durch eine Neudefinition des Berechnungsrasters um die Umrisslinie der FSRU. Hier wird die FSRU als eine Struktur dargestellt, die sich über die gesamte Wassertiefe erstreckt (jetzt ist eine Strömung unter der FSRU möglich). Dies ist ein konservativer Ansatz, der zu einer Überbewertung der Auswirkungen der FSRU auf die Strömung führt.
- Dalben, errichtet durch Hinzufügen einer Impulsquellenkomponente (zur Berücksichtigung der von den Dalben ausgelösten Widerstandskraft) zum Modell an ihren Standorten.

| | | | |
|--|-----------------------|-------|---|
|    | Umgebung | |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven | FSRU: | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | Morphologische Studie | | Seite 34 von 51 |

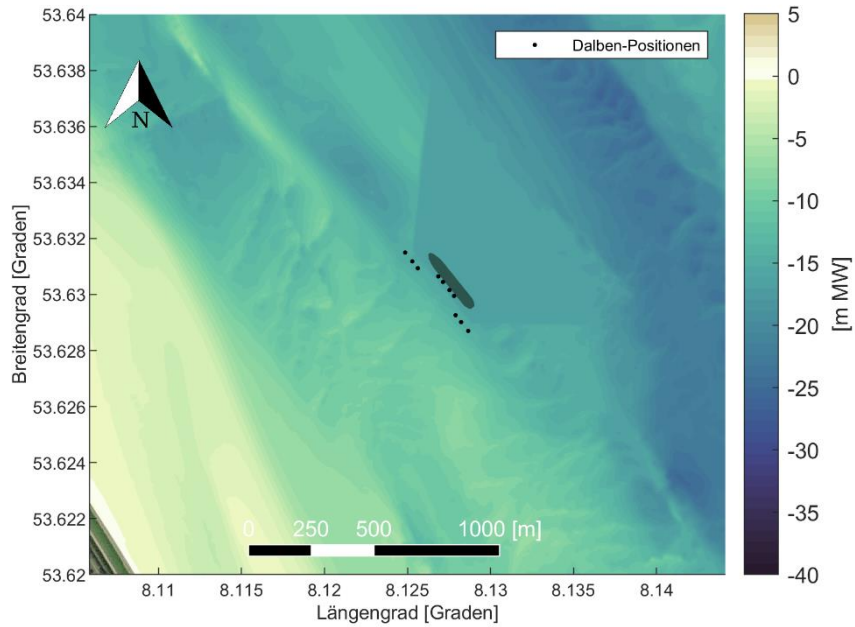


Abbildung 3-10: Bathymetrie der Modellsimulation mit Wendebecken, Dalben und FSRU (TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DOC-2014.06_Environmental Conditions Report).









| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 35 von 51 |

Tabelle 3-1: Einstellungen für das morphodynamische Modell.

| Parameter (Kennwörter GAIA) | Wert |
|--|---|
| Morphologischer Beschleunigungsfaktor (Morfac) | 25 |
| Simulationszeiträume | Ein Jahr (Simulation des durchschnittlichen Spring-Nipp-Zyklus aus dem Bericht über die Umgebungsverhältnisse (siehe TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DOC-2014.07_Bericht über die Umgebungsverhältnisse (IMDC, 2023b)) und Hochskalierung durch Anwendung eines Morfac von 25) |
| Anzahl der Sedimentkorngößen | 5 |
| Sedimenttyp-Klassen | Alle Sedimentkorngößen sind nicht bindungsfähig |
| Sedimentdichte-Klassen | 2650,0 [kg/m ³] |
| Sedimentdurchmesser-Klassen | 100, 200, 300, 400 und 500 µm. Räumliche Anfangsverteilung entsprechend dem D50-Datenfeld (d. h. https://mdi-dienste.baw.de/terria/ , (BAW, 2016)) und auf dem Modellrasternetz in aufgeteilten Klassen interpoliert |
| Transportart | Gesamter Frachttransport |
| Meeresbodenfracht-Transportformel für alle Sande | Engel und Hansen (Gesamtfrachtgleichung) |
| Formel für den Hangeffekt | Ja (Koch und Flokstra, $\beta = 0,3$) |
| Formel für die Abweichung | Ja (Talmon, $\beta_2 = 1,6$) |
| Sedimentgleitung | Nr. |
| Porosität des Meeresbodens | 0,4 (Voreinstellung) |
| Mächtigkeit der aktiven Schicht | 0,25 [m] |
| Quadratischer Reibungskoeffizient | Separat berechnet in GAIA mit einer maximalen Meeresbodenrauigkeit von 0,025 m |

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven Morphologische Studie | FSRU: Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 36 von 51 |

3.3.3 Modellvalidierung

Es wurde eine qualitative Modellvalidierung auf der Grundlage eines Vergleichs zwischen den Modellergebnissen und den Bathymetrie-Studien (die das WSA lieferte) in den Jahren 2019 und 2020 rund um den Projektstandort vorgenommen. Diese Datensätze umfassen Daten von Bathymetrie-Studien, die vor dem Ausbaggern des Wendebekens am Uniper-Anlandeterminale erhoben wurden.

Abbildung 3-11 zeigt die simulierte und die gemessene Meeresbodenhöhe [m MW = m Mittel Wasser] entlang eines Transekts mit Sandwellen am vorgesehenen FSRU-Standort. Das Modell zeigt eine ähnliche Tendenz zur Dünenwanderung wie die Messung, d. h. flut-gerichtet zwischen 200 und 600 m und ebbe-gerichtet zwischen 1.000 und 1.319 m. Die letztgenannte Wanderungsrichtung ist aus den anderen Datensätzen in Abbildung 3-5 offensichtlicher. Vergleicht man die Karten der gemessenen und modellierten Meeresbodenentwicklung für denselben Zeitraum (Abbildung 3-12 und Abbildung 3-13), so lässt sich erkennen, dass beide Karten ähnliche Bereiche mit hoher und niedriger dynamischer Meeresbodenentwicklung aufweisen. So kommt es beispielsweise im mittleren und südlichen Teil des Erkundungsgebiets (in der Nähe des HES-Standorts) zu einer Sandwellenwanderung, während der nördliche Bereich relativ beständig ist. Trotzdem zeigen die Messungen eine leichte Erosionstendenz am nördlichen Standort, während dies beim Modell nicht der Fall ist. Insgesamt erfasst das Modell die Morphodynamik über diesen Zeitraum von einem Jahr ziemlich gut, sodass es als zulässig erachtet wird, die anfängliche Sedimentation und die morphologischen Auswirkungen in einer Szenario-Analyse anzusetzen.

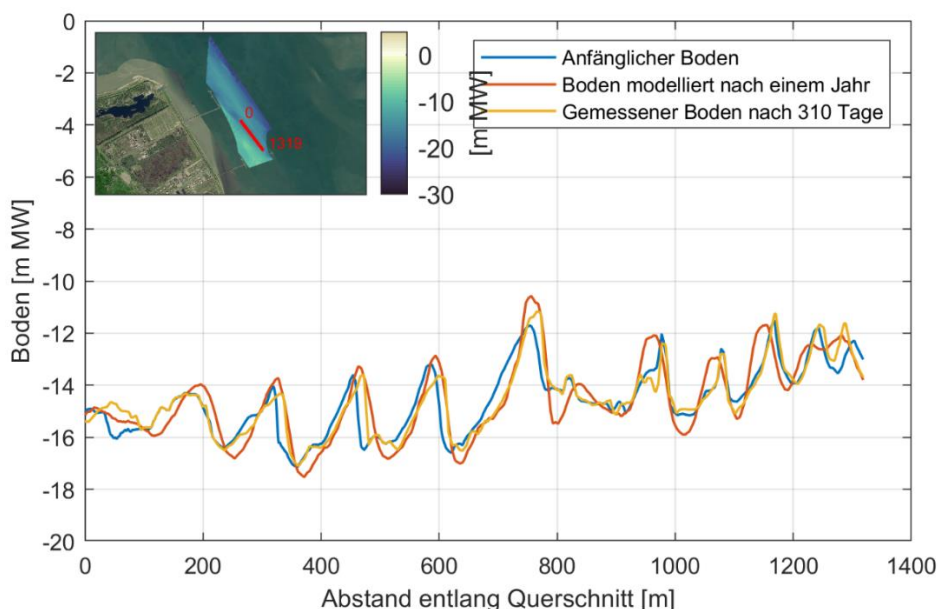






Abbildung 3-11: Simulierte und gemessene Meeresbodenhöhe [m MW] entlang eines Transekts mit Sandwellen am vorgesehenen FSRU-Standort. Die Messwerte entsprechen den Datensätzen 2019 und 2020 mit einem Abstand von 310 Tagen (d. h. „047_Zufahrt HES und LNG Anleger_5m Argo_04.-05.03.19“ und „003_Zufahrt HES und LNG Anleger_5m Argo_06.-09.01.20“). Das Modell beginnt mit dem gemessenen Meeresboden 2019 und simuliert ein Jahr.

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 37 von 51 |

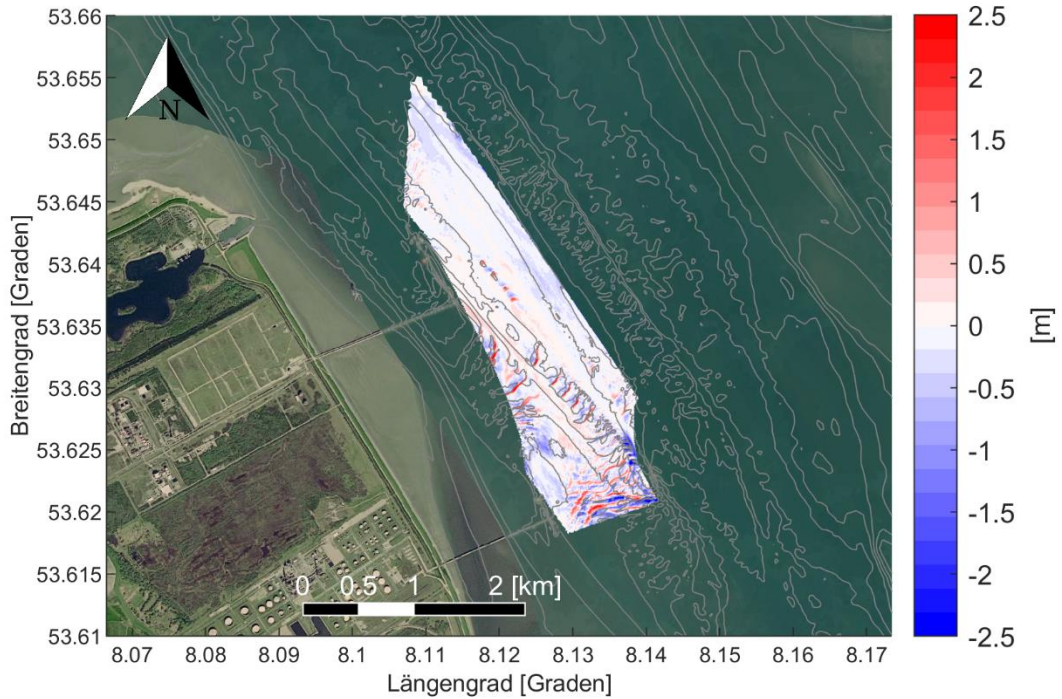


Abbildung 3-12: Gemessene Veränderung der Meeresbodenhöhe [m] in der Zeit von 310 Tagen aus den Datensätzen „047_Zufahrt HES und LNG Anleger_5m Argo_04.-05.03.19“ und „003_Zufahrt HES und LNG Anleger_5m Argo_06.-09.01.20“.

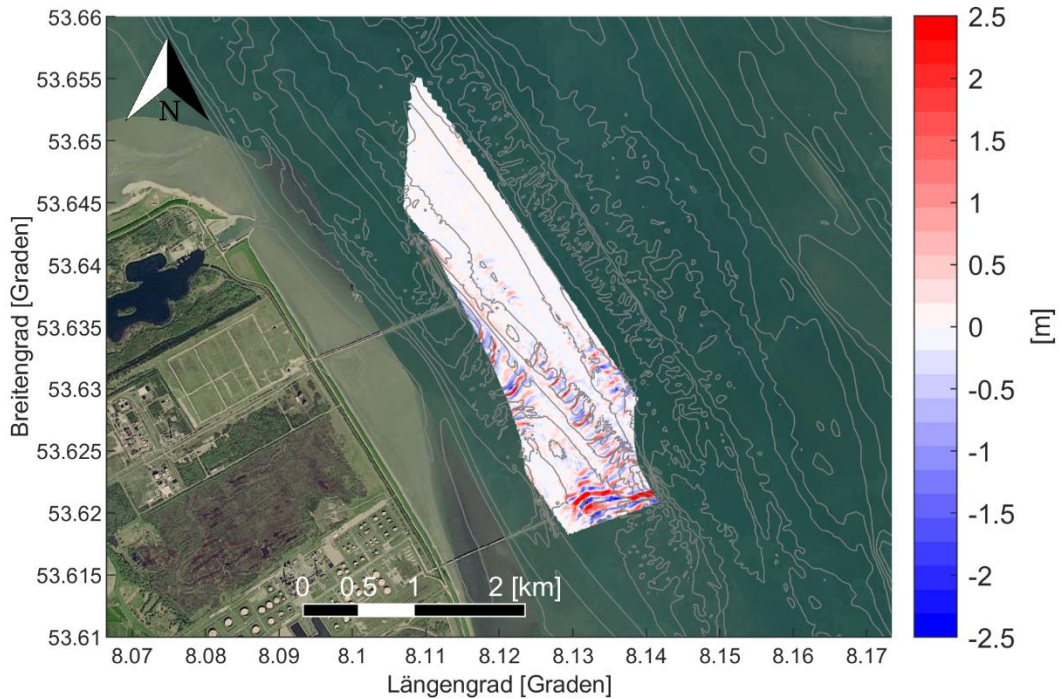






Abbildung 3-13: Simulierte anfängliche Veränderung der Meeresbodenhöhe [m] in einem Jahr ausgehend von dem Meeresboden aus dem Datensatz „047_Zufahrt HES und LNG Anleger_5m Argo_04.-05.03.19“.

| | | |
|---|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 38 von 51 |

3.3.4 Modellergebnisse

3.3.4.1 Hydrodynamische Ergebnisse

Aus dem hydrodynamischen Modell sind die maximalen (über die Tiefe gemittelten) Ebbe- und Flutgeschwindigkeiten in Abbildung 3-14 dargestellt. Die Auswirkungen der FSRU im Besonderen lassen sich an der Verringerung der Fließgeschwindigkeit sowohl abwärts als auch aufwärts der Ästuar-Richtung entlang eines schmalen Streifens im Lee der FSRU erkennen. Ähnlich wie bei den Beobachtungen am bestehenden Uniper-Anlandeterminale im Nordwesten kann dies zu einer lokalen Sedimentation führen, mit der die Strömungsverteilung um die FSRU beeinflusst wird.

Es wird erwartet, dass durch die lokale Vertiefung des Wendbeckens sowie durch die Veränderung der Strömungsverteilung um die FSRU die Strömungsgeschwindigkeit in der Zone neben der FSRU zunehmen wird. Dies ist auch in den Modellergebnissen zu erkennen, in denen die Geschwindigkeiten bei Ebbe nordwestlich des Wendbeckens und bei Flut stromaufwärts des Wendbeckens geringfügig ansteigen.

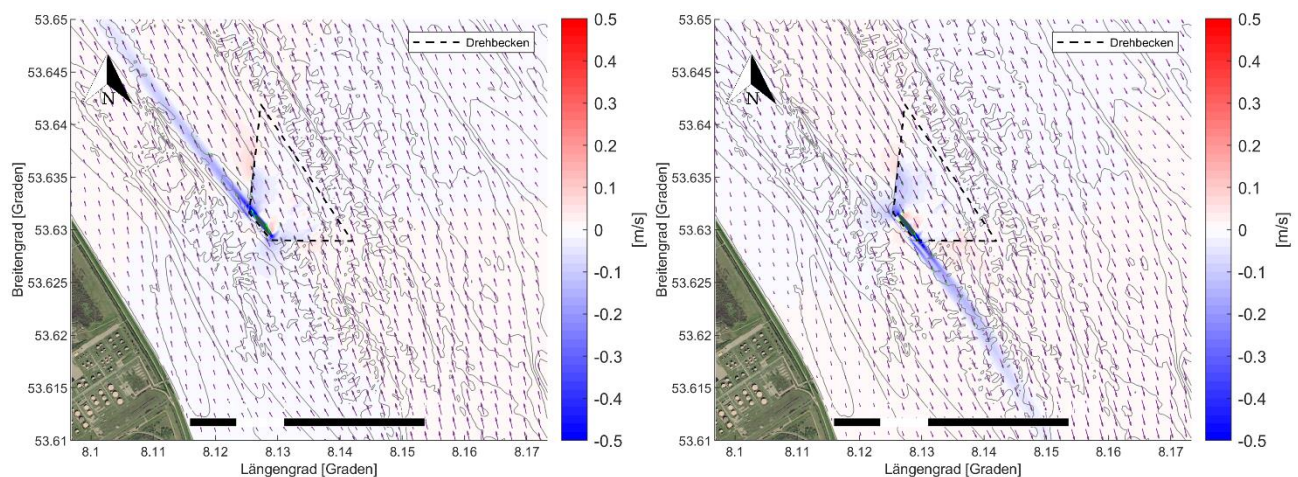






Abbildung 3-14: Durch das Wendbecken, die Dalben und die FSRU verursachte, über die Tiefe gemittelte Strömungsgeschwindigkeitsdifferenz [m/s] (im Vergleich zum Referenz-Szenario), berechnet für den Zeitpunkt der maximalen Ebbe (linke Abbildung) und der maximalen Flut (rechte Abbildung) während eines durchschnittlichen Spring-Nipp-Zyklus. (TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DOC-2014.06_Environmental Conditions Report).

3.3.4.2 Morphologische Ergebnisse in den umliegenden Gebieten

Die anfänglichen Sedimentations- und Erosionsmuster nach einem Simulationszeitraum von einem Jahr sind in Abbildung 3-15 und Abbildung 3-16 dargestellt. Es sind morphologische Veränderungen im Zusammenhang mit der Ausbreitung von morphologischen Merkmalen und Meeresbodenformen zu erkennen. Die Ergebnisse belegen, dass am Projektstandort das Wendbecken dazu neigt, abwärts in Richtung Ästuar zu wandern, und dass lokale Auswirkungen auf die Strömungsgeschwindigkeit entlang der Ränder des Wendbeckens zu Neigungsanpassungen führen. Im Bereich um das Heck und den Bug der FSRU ist erheblicher Kolk sichtbar, wobei die Sedimentation direkt daran angrenzend zu einer lokalen Vertiefung führt. Wie in Abschnitt 3.3.1 erwähnt, wird die FSRU als massives Bauwerk dargestellt (das sich bis zum Meeresboden erstreckt), was zu

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 39 von 51 |

einer Überbewertung der Strömungsbeschleunigung um die FSRU und damit zur Kolkbildung an dieser Stelle und zur Ablagerung von abgetragenen Material in der angrenzenden Umgebung führt. Um das Risiko zu mindern, dass der Dalbenbodenschutz dem Kolk der FSRU ausgesetzt ist, wird ein Kolkschutz vorgeschlagen, über den in TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DOC-2014.07_Bericht über die Umgebungsverhältnisse (IMDC, 2023b) berichtet wird.

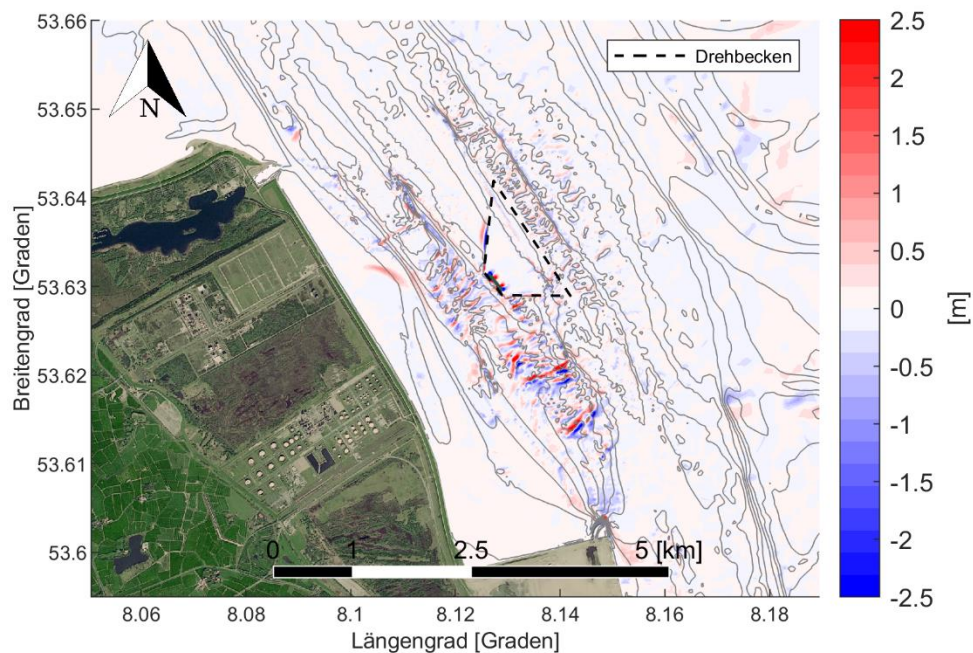






Abbildung 3-15: Die nach einem Jahr berechneten Sedimentations- und Erosionsmuster, simuliert mit einem Wendebecken, Dalben und FSRU.

| | | | |
|--|-----------------------|-------|---|
|    | Umgebung | |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven | FSRU: | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | Morphologische Studie | | Seite 40 von 51 |

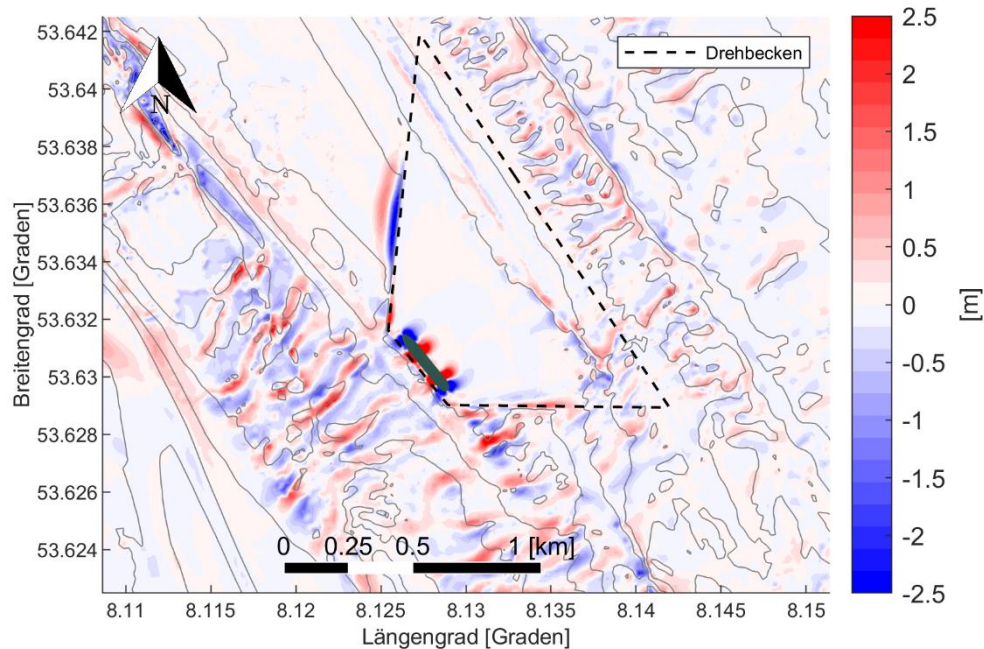






Abbildung 3-16: Die nach einem Jahr berechneten Sedimentations- und Erosionsmuster, simuliert mit einem Wendebucken, Dalben und FSRU, in vergrößerter Darstellung um das Wendebucken.

Die morphologischen Auswirkungen auf das nahe gelegene Gebiet wurden bewertet, indem die morphologische Entwicklung der Referenz-Simulation ohne die Meeresarbeiten (natürlich) von der Simulation mit dem Wendebucken, der FSRU und den Dalben abgezogen wurde (Abbildung 3-17).

Betrachtet man das Gebiet um den Projektstandort, so verdeutlichen die Ergebnisse (Abbildung 3-17), dass die Auswirkungen der Dalben, der FSRU und des Wendebuckens nach einem Jahr sehr lokal auftreten und sich nicht bis zu den Anlandeterminalen von Uniper und HES oder die nahe gelegenen Muschelfischerbetriebe erstrecken. Lediglich in der Nähe des HES-Anlandeterminals kommt es zu einer sich ändernden Dünenwanderung. Diese liegt jedoch im Rahmen der beobachteten natürlichen Schwankungen der Meeresbodenhöhe und dürfte daher die natürliche Entwicklung nicht wesentlich beeinflussen.

Für das KGS-Schutzgebiet außerhalb des Wendebuckens (21 ha) lässt sich eine geringe Sedimentation durch die Projektanlagen erwarten (Abbildung 3-17). Auf einer Fläche von 2 ha kommt es zu einer Sedimentation von mehr als 10 cm.

Darüber hinaus kann für das KGS-Gebiet und die Standorte der Muschelfischerbetriebe das Risiko einer möglichen Verschlämzung ausgeschlossen werden, da die modellierten Sohlschubspannungen (Abbildung 3-18) zeigen, dass selbst bei einem Nipptide-Zyklus die kritische Schubspannung für die Erosion von Schlamm überschritten wird (und sich daher kein Schlamm absetzen kann).

| | | | |
|--|-----------------------|-------|---|
|    | Umgebung | |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven | FSRU: | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | Morphologische Studie | | Seite 41 von 51 |

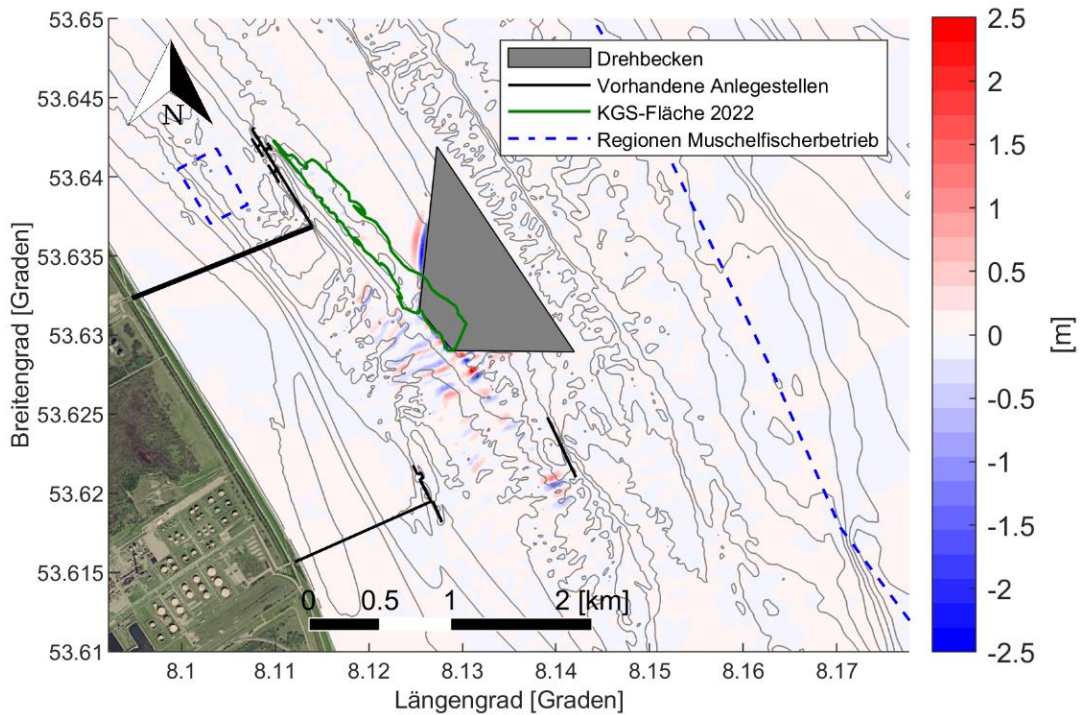


Abbildung 3-17: Relative Sedimentations- und Erosionsmuster bedingt durch Wendebcken, Dalben und FSRU (im Vergleich zur natürlichen morphologischen Entwicklung).

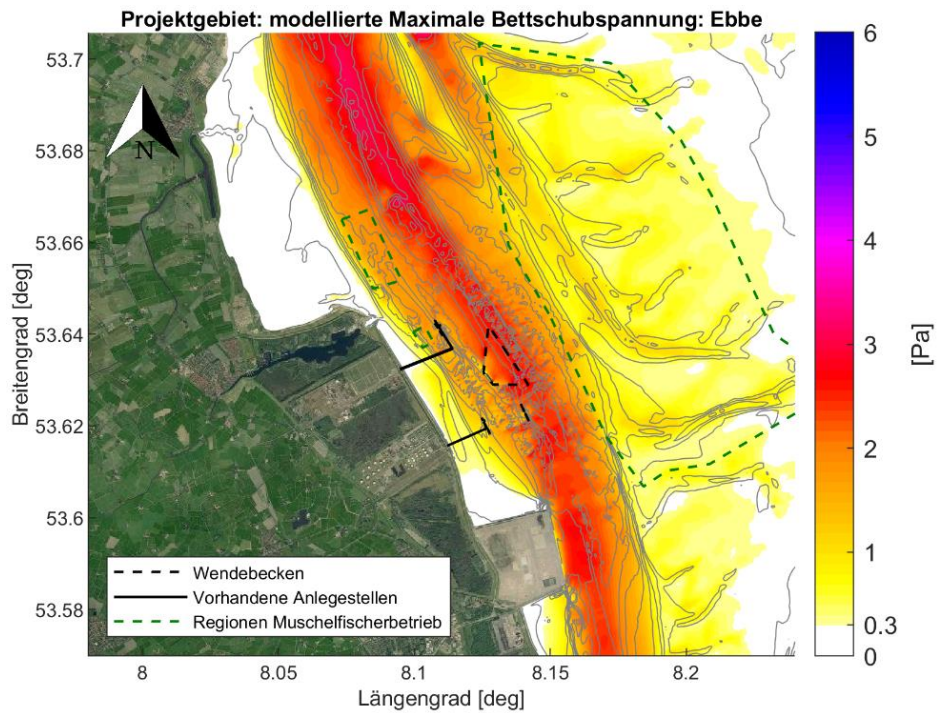










Abbildung 3-18: Simulierte maximale Sohlschubspannungen [Pa] während der Ebbephase in einem Nipptide-Zyklus. Schubspannungen unterhalb der angenommenen kritischen Schubspannung des Schlammes von 0,3 Pa sind weiß markiert.

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 42 von 51 |

3.3.4.3 Morphologische Ergebnisse im Wendebcken

Für diesen einjährigen morphologischen Simulationszeitraum ist eine Sedimentation von etwa 27.000 m³ (in situ) innerhalb des gesamten Wendebckens angesetzt. Der Ansatz berücksichtigt nur die Sedimentation von Sand, die vor allem in der Umgebung der Kolklöcher um Bug und Heck der FSRU und in Hangnähe des Wendebckens aufgrund der Hanganpassung auftritt und daher bei weitem nicht einheitlich über das Wendebcken verteilt ist. Schlammablagerungen werden im Modell nicht in Betracht gezogen, zumal zu erwarten ist, dass sie innerhalb des Wendebckens auf der Grundlage von Sohlschubspannungskarten nicht auftreten (Abbildung 3-18). Nach anfänglichen Hanganpassungen wird nicht erwartet, dass die jährliche Sedimentation in einem Zeitraum von fünf Jahren wesentlich zunehmen wird. Unmittelbar stromaufwärts des Wendebckens scheinen zwei Sandwellen, die sich direkt im Kielwasser des Hecks befanden und sich auf natürliche Weise in Ebbe-Richtung ausbreiteten (Abbildung 3-5), nun in Flut-Richtung zu wandern (Abbildung 3-19). Unter Vorwegnahme, dass diese Sandwellen um 20 m/Jahr in Richtung des Wendebckens wandern, wurde eine Einschätzung des Sedimentationsvolumens für einer längere Zeitachse (d. h. zwei und fünf Jahre) vorgenommen. Hier wurde ein zusätzlicher Sedimenteintrag von 1.100 m³ und 19.300 m³ (in situ) für einen zwei- bzw. fünfjährigen Zeitraum angesetzt. In Tabelle 3-2 werden die besten Einschätzungen über die Sedimentation nach 1, 2, 3, 4 und 5 Jahren vorgestellt. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei allen angegebenen Werten um bestmögliche Einschätzungen handelt, die auf den begrenzten verfügbaren Daten (d. h. keine historischen Ausbaggerungsdaten), den Modellannahmen und den inhärenten Unsicherheiten morphologischer Modelle beruhen (siehe z. B. Kamphuis, 2013 und Van Rijn, 1984), und daher entsprechend interpretiert werden sollten. Bathymetrische Vermessungen nach der ersten Ausbaggerungsaktivität können zur Optimierung der Einschätzung herangezogen werden, wie aufgeführt in Tabelle 3-2.

Derzeit sind im Wendebcken 0,5 m Sedimentation zulässig, bevor der Freiraum unter dem Kiel verletzt wird. Angesichts der ziemlich uneinheitlichen simulierten Sedimentation innerhalb des Wendebckens, die vor allem in der Umgebung der Hänge auftritt und durch die Wanderung von Sandwellen beeinträchtigt werden könnte, wird eine Überwachungsmaßnahme (Bathymetrie-Studie) empfohlen, um die Sedimentationsraten zu bewerten und lokale Bereiche aufzuspüren, in denen eine potenzielle Gefahr der Unterschreitung des Freiraumes unter dem Kiel in naher Zukunft festgestellt werden kann. In Anbetracht des relativ langsamen Wanderungsprozesses wird eine erste Untersuchungsstudie nach Abschluss des Projekts, gefolgt von einer jährlichen Untersuchungsmaßnahme, als ausreichend angesehen, um dieses Phänomen zu überwachen. Sollte sich herausstellen, dass die Sedimentation relativ beständig sind, kann dieser Zeitabstand entsprechend geändert werden.

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven Morphologische Studie | FSRU: Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | Seite 43 von 51 | |

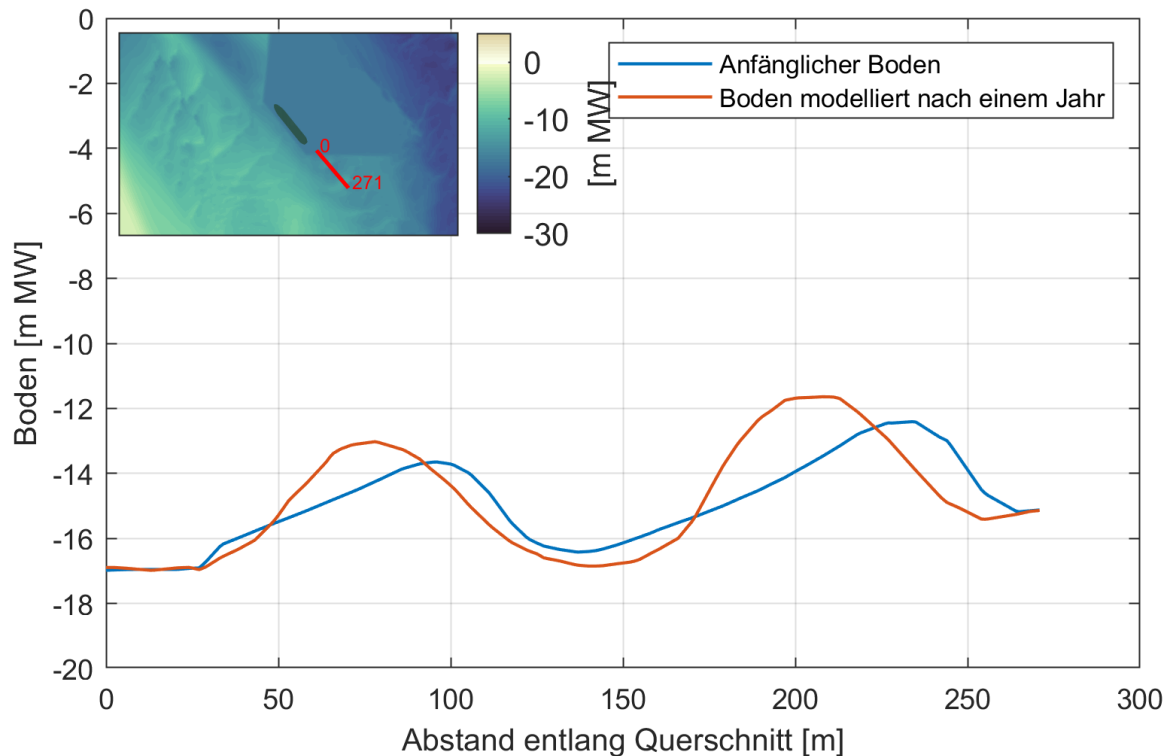






Abbildung 3-19: Die in einem Jahr simulierte Meeresbodenhöhe [m MW] entlang eines Transekts stromaufwärts der FSRU und des Wendbeckens

Tabelle 3-2: Geschätzte Sedimentation (bestmögliche Schätzung) innerhalb von ein bis fünf Jahren (Summe über den gesamten Zeitraum). Basierend auf der Extrapolation der Sedimentation aus einer einjährigen Simulation und der Bewertung der potenziellen Sandwellenwanderung im Wendbecken

| Zeitraum | Bestmögliche Schätzung [m ³] |
|------------|--|
| Ein Jahr | 27.000 |
| Zwei Jahre | 55.000 |
| Drei Jahre | 87.000 |
| Vier Jahre | 122.000 |
| Fünf Jahre | 154.000 |

3.3.5 Schlussfolgerungen

Anhand eines qualitativ validierten numerischen Modells wurden aussagekräftige morphologische Berechnungen durchgeführt, um die Reaktion des Meeresbodens auf die berechneten hydrodynamischen

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 44 von 51 |





Auswirkungen, die durch die Projektanlagen herbeigeführt wurden, zu bewerten. Die morphologische Entwicklung nach einem Jahr der Simulation wurde mit der Referenz-Simulation ohne die Projektanlagen verglichen.

Die Modellergebnisse belegen, dass das Wendebecken dazu neigt, abwärts in Richtung Ästuar zu wandern, und dass lokale Auswirkungen auf die Strömungsgeschwindigkeit entlang der Ränder des Wendebeckens zu Neigungsanpassungen führen. Um das Heck und den Bug der FSRU ist ein erheblicher Kolk sichtbar, und die Sedimentation in angrenzender Umgebung führt zu einer lokalen Vertiefung. Wie erwähnt, wird die FSRU als massives Bauwerk dargestellt (das sich bis zum Meeresboden erstreckt), was zu einer Überbewertung der Strömungsbeschleunigung um die FSRU und damit zur Kolkbildung an dieser Stelle und zur Ablagerung von abgetragenem Material in der angrenzenden Umgebung führt. Um das Risiko zu mindern, dass der Dalbenbodenschutz dem Kolk der FSRU ausgesetzt ist, wird ein Kolkschutz vorgeschlagen, über den in TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DOC-2014.07_Bericht über die Umgebungsverhältnisse (IMDC, 2023b) berichtet wird.

Betrachtet man das weiter vom Projektstandort entfernte Gebiet, so verdeutlichen die Ergebnisse, dass die Auswirkungen der Dalben, der FSRU und des Wendebeckens nach einem Jahr sehr lokal auftreten und sich nicht bis zu den Anlandeterminalen von Uniper und HES oder die nahe gelegenen Muschelfischerbetriebe erstrecken. Lediglich in der Nähe des HES-Anlandeterminals kommt es zu einer sich ändernden Dünenwanderung. Diese liegt jedoch im Rahmen der beobachteten natürlichen Schwankungen der Meeresbodenhöhe und dürfte daher die natürliche Entwicklung nicht wesentlich beeinflussen.





Innerhalb des Wendebeckens scheinen zwei Sandwellen, die sich direkt im Kielwasser des Hecks befanden und sich auf natürliche Weise in Ebbe-Richtung ausbreiteten, nun in Flut-Richtung zu wandern. Dies kann Auswirkungen auf die längerfristige Sedimentation innerhalb des Wendebeckens haben und wird daher im folgenden Absatz über die Sedimentationsvolumina angesprochen.

Für diesen einjährigen morphologischen Simulationszeitraum ist eine Sedimentation von etwa 27.000 m³ (in situ) innerhalb des gesamten Wendebeckens angesetzt. Der Ansatz berücksichtigt nur die Sedimentation von Sand, die vor allem in der Umgebung der Kolklöcher um Bug und Heck der FSRU und in Hangnähe des Wendebeckens aufgrund der Hanganpassung auftritt und daher bei weitem nicht einheitlich über das Wendebecken verteilt ist. Schlammablagerungen wurden im Modell nicht in Betracht gezogen, aber es wird erwartet, dass sie innerhalb des Wendebeckens basierend auf Sohlschubspannungskarten nicht auftreten. Nach anfänglichen Hanganpassungen wird nicht erwartet, dass die jährliche Sedimentation in einem Zeitraum von fünf Jahren wesentlich zunehmen wird. Indem davon ausgegangen wird, dass die Sandwelle, die stromaufwärts an das Wendebecken angrenzt, mit 20 m/Jahr in Richtung des Wendebeckens wandert, wurde eine Einschätzung des Sedimentationsvolumens für eine längere Zeitachse (d. h. zwei und fünf Jahre) vorgenommen. Hier wurde ein zusätzlicher Sedimenteintrag von 1.100 m³ und 19.300 m³ (in situ) für einen zwei- bzw. fünfjährigen Zeitraum angesetzt. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei allen angegebenen

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 45 von 51 |

Sedimentationswerten um bestmögliche Einschätzungen handelt, die auf den begrenzten verfügbaren Daten (d. h. keine historischen Ausbaggerungsdaten), den Modellannahmen und den inhärenten Unsicherheiten morphologischer Modelle beruhen (siehe z. B. Kamphuis, 2013 und Van Rijn, 1984), und daher entsprechend interpretiert werden sollten. Bathymetrische Vermessungen nach der ersten Ausbaggerungsaktivität können zur Optimierung der Einschätzungen herangezogen werden.

Derzeit sind im Wendebecken 0,5 m Sedimentation zulässig, bevor der Freiraum unter dem Kiel verletzt wird. Angesichts der ziemlich uneinheitlichen simulierten Sedimentation innerhalb des Wendebeckens, die vor allem in der Umgebung der Hänge auftritt und durch die Wanderung von Sandwellen beeinträchtigt werden könnte, wird eine Überwachungsmaßnahme (Bathymetrie-Studie) empfohlen, um die Sedimentationsraten zu bewerten und lokale Bereiche aufzuspüren, in denen eine potenzielle Gefahr der Unterschreitung des Freiraumes unter dem Kiel in naher Zukunft festgestellt werden kann. In Anbetracht des relativ langsamen Wanderungsprozesses wird eine erste Untersuchungsstudie nach Abschluss des Projekts, gefolgt von einer jährlichen Untersuchungsmaßnahme, als ausreichend angesehen, um dieses Phänomen zu überwachen. Sollte sich herausstellen, dass die Sedimentation relativ beständig ist, kann dieser Zeitabstand entsprechend vergrößert werden.

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 46 von 51 |

4 Sedimentationsüberwachung

4.1 Hintergrund

Aufgrund der Errichtung des Anlandeterminals, des fest vertäuten FSRU-Schiffs und der Ausbaggerung des Anlande- und Wendbeckens ist eine Reihe von morphologischen Reaktionen zu erwarten, die es zu überwachen gilt.





- Sedimentation
 - Für den einjährigen morphologischen Simulationszeitraum ist eine Sedimentation von etwa 27.000 m³ (in situ) innerhalb des gesamten Wendbeckensbereichs angesetzt. Nach anfänglichen Hanganpassungen wird nicht erwartet, dass die jährliche Sedimentation innerhalb eines fünfjährigen Zeitraums wesentlich zunehmen wird.
 - Bedingt durch die Wanderung der Sandwelle stromaufwärts des Wendbeckens wird ein zusätzliches Sedimentationsvolumen von 1.100 m³ und 19.300 m³ (in situ) für einen zwei- bzw. fünfjährigen Zeitraum angesetzt.
 - Derzeit sind im Wendbecken 0,5 m Sedimentation zulässig, bevor der Freiraum unter dem Kiel verletzt wird.

Um das Risiko von Kolk zu mindern, wird ein Kolkschutz vorgeschlagen, über den in TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DOC-2014.07_Bericht über die Umgebungsverhältnisse (IMDC, 2023b) berichtet wird. Im Hinblick auf das Management des Sedimentationsrisikos wird eine Überwachungsmaßnahme empfohlen.

4.2 Überwachung

Angesichts der ziemlich uneinheitlichen simulierten Sedimentation innerhalb des Wendbeckens, die vor allem in der Umgebung der Hänge auftritt und durch die Wanderung von Sandwellen beeinträchtigt werden könnte, wird eine Bathymetrie-Studie empfohlen, um die Sedimentationsraten zu bewerten und lokale Bereiche aufzuspüren, in denen eine potenzielle Gefahr der Unterschreitung des Freiraumes unter dem Kiel in naher Zukunft festgestellt werden kann.

- **Methode:** Bathymetrie-Studie
- **Häufigkeit:** Eine erste Erkundung nach Projektabschluss, gefolgt von einer jährlichen (Frühling und Herbst) Kontrollmaßnahme -, wird als ausreichend für die Überwachung dieses Phänomens angesehen und sollte für bis zu 5 Jahre nach Inbetriebnahme der FSRU stattfinden. Sollte sich herausstellen, dass die Sedimentation relativ beständig ist, kann dieser Zeitabstand entsprechend geändert werden.
- **Standort:** Wendbecken plus eine Zone von 100 m um das Wendbecken herum.

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 47 von 51 |

5 Schlussfolgerungen

In dieser Studie wurde die Morphologie des Projektstandorts und des größeren Jadebusengebiets anhand einer Desktop-Studie (Literaturoberprüfung) bewertet, und die morphologischen Auswirkungen der gegenwärtig geplanten Meeresarbeiten auf die Umgebung und die Sedimentationsraten innerhalb des Wendbeckens wurden durch ein numerisches Modell bewertet. Zusätzlich zu den Schlussfolgerungen werden Empfehlungen für Maßnahmen zur Entschärfung potenzieller Risiken abgegeben.

5.1 Schlussfolgerungen aus der Literaturoberprüfung





Im Jadebusen, und damit auch am Projektstandort, sind Wellen und Gezeitengeschwindigkeiten die beiden wichtigsten Einflussgrößen auf die lokale morphologische Entwicklung. Insbesondere bei Sturm können die erhöhten Wasserstände und Wellenhöhen zusammen mit starken Gezeitenströmungen die Fahrrinne und das Wattenmeer (neu) formen. Unter durchschnittlichen Bedingungen wird der Sedimenttransport in der Hauptfahrrinne hauptsächlich von den Gezeitengeschwindigkeiten bestimmt. Mit einem durchschnittlichen Tidenhub von etwa 3,5 bis 4 m kann die Region als mittleres Gezeitengebiet eingeordnet werden.

Der Gezeitenhauptkanal der Jade erfährt einen Nettoeintrag von Sedimenten, was auf eine meeresseitige, flutdominierte Gezeitenasymmetrie sowie auf den vernachlässigbaren Süßwasserablauf und die Geometrie des Jadebusens zurückzuführen ist. Innerhalb des Gezeitenkanals, insbesondere in der Äußeren Jade, finden sich große untermeerische Dünenfelder, die bekanntermaßen Meeresbodenformen unterschiedlicher Größe aufweisen (bekannt als Verbunddünen). Auf der Grundlage aufeinanderfolgender hochauflösender Oberflächen der Bathymetriemessungen wurden komplexe Wanderungsmuster identifiziert, bei denen Dünen in entgegengesetzten Richtungen entlang des Kanals wandern und an bestimmten Stellen frontal aufeinandertreffen.

In (IMP, 2022a) wurde die morphologische Entwicklung anhand gesammelter Daten seit dem Baubeginn des Jade-Weser-Hafens im Jahr 2005 sowie einiger neuerer, lokaler Bathymetrie-Studien (2018–2020 und März/April 2022) bewertet. Der Vergleich der beiden kürzlich vorgestellten Gewässerbodenvermessungen veranschaulicht übereinstimmende morphologische Merkmale. Anhand neuerer Sondierungen lassen sich die lokalen Auswirkungen des bestehenden Unterbaus und des Anlandeterminals der Umschlaganlage Voslapper Groden (gebaut 1980) auf die lokale Topografie beurteilen.

Aufgrund des Baus des Anlandeterminals, des fest vertäuten FSRU-Schiffs und der Ausbaggerung des Anlande- und Wendbeckens ist eine Reihe von morphologischen Reaktionen zu erwarten:

- Wenn ein Anlandeterminal gebaut wird, werden die Pfähle die Strömung um diese Bauwerke beeinflussen. Die durch ein Anlandeterminal hervorgerufene erhöhte Reibung kann zu einer Umleitung der Strömung nach Osten und Westen führen. Dies führt zu einer veränderten Strömungsverteilung durch und entlang der Bauwerke, verursacht Kolk um die Dalben und zieht Sedimentation unterhalb des Anlandeterminals nach sich.





| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 48 von 51 |

- Weitere morphologische Anpassungen sind aufgrund der neuen Strömungsverhältnisse zu erwarten. So wird beispielsweise die Schaffung eines Wendebeckens dazu führen, dass die Strömung in Richtung des Anlandeterminals gezogen wird. Dies wird durch die Umleitung der Strömung noch verstärkt und kann zu einer zusätzlichen Vertiefung entlang des Anlandeterminals führen. Da der Meeresboden zwischen dem Anlandeterminal und dem Fahrwasser ausgebaggert wird, um die Anlandung an das Terminal zu realisieren, ist eine lokale Steigerung der Strömung zu erwarten. Allerdings können diese nach den morphologischen Anpassungen wegen der Strömungseinschränkung, die durch das vorhandene Anlandeterminal und die FSRU entstanden sind, wieder ausgeglichen werden.
- Ein Grund für künftige Unterhaltungsausbaggerungen könnte die Wanderung von Bodenformen in das Wendebecken und den Anlandebereich sein. Aus den verfügbaren Tiefensondierungen ist ersichtlich, dass große Bodenformen südöstlich des Projektgebiets vorhanden sind. Solche Bodenstrukturen deuten darauf hin, dass eine überflüssige Menge an Sediment (Sand) entlang des Meeresbodens wandert. Änderungen der Strömungsmuster und -geschwindigkeiten können die Wanderung dieser Strukturen beeinflussen und dadurch Sediment in den ausgebaggerten Bereich eintragen.

5.2 Schlussfolgerungen der numerische Modellierung

Anhand eines qualitativ validierten numerischen Modells wurden aussagekräftige morphologische Berechnungen durchgeführt, um die Reaktion des Meeresbodens auf die berechneten hydrodynamischen Auswirkungen, die durch die Projektanlagen herbeigeführt wurden, zu bewerten. Die morphologische Entwicklung nach einem Jahr der Simulation wird mit der Referenz-Simulation ohne die Projektanlagen verglichen.

Die Modellergebnisse belegen, dass das Wendebecken dazu neigt, abwärts in Richtung Ästuar zu wandern, und dass lokale Auswirkungen auf die Strömungsgeschwindigkeit entlang der Ränder des Wendebeckens zu Neigungsanpassungen führen. Im Bereich um das Heck und den Bug der FSRU ist erheblicher Kolk sichtbar, wobei die Sedimentation direkt daran angrenzend zu einer lokalen Vertiefung führt. Wie erwähnt, wird die FSRU als massives Bauwerk dargestellt (das sich bis zum Meeresboden erstreckt), was zu einer Überbewertung der Strömungsbeschleunigung um die FSRU und damit zur Kolkbildung an dieser Stelle und zur Ablagerung von abgetragenem Material in der angrenzenden Umgebung führt. Um das Risiko zu mindern, dass der Dalbenbodenschutz dem Kolk der FSRU ausgesetzt ist, wird eine Überwachungsmaßnahme (Bathymetrie-Studie, Gewässerbodenvermessung) empfohlen, um das Ausmaß des Kolklochs zu beurteilen und entsprechend zu handeln (z. B. Hinterfüllung). Unmittelbar nach dem Bau wird ein Zeitabstand von zwei Wochen bis zu einem Monat zwischen den nachfolgenden Sondierungen vorgeschlagen. Sollte sich herausstellen, dass der lokale Kolk und die Sedimentation relativ beständig sind, kann dieser Zeitabstand entsprechend vergrößert werden.





| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 49 von 51 |

Betrachtet man das weiter vom Projektstandort entfernte Gebiet, so verdeutlichen die Ergebnisse, dass die Auswirkungen der Dalben, der FSRU und des Wendbeckens nach einem Jahr sehr lokal auftreten und sich nicht bis zu den Anlandeterminalen von Uniper und HES oder die nahe gelegenen Muschelfischerbetriebe erstrecken. Lediglich in der Nähe des HES-Anlandeterminals kommt es zu einer sich ändernden Dünenwanderung. Diese liegt jedoch im Rahmen der beobachteten natürlichen Schwankungen der Meeresbodenhöhe und dürfte daher die natürliche Entwicklung nicht wesentlich beeinflussen.





Innerhalb des Wendbeckens scheinen zwei Sandwellen, die sich direkt im Kielwasser des Hecks befanden und sich auf natürliche Weise in Ebbe-Richtung ausbreiteten, nun in Flut-Richtung zu wandern. Dies kann Auswirkungen auf die längerfristige Sedimentation innerhalb des Wendbeckens haben und wird daher im folgenden Absatz über die Sedimentationsvolumina angesprochen.

Für diesen einjährigen morphologischen Simulationszeitraum ist eine Sedimentation von etwa 27.000 m³ (in situ) innerhalb des gesamten Wendbeckens angesetzt. Der Ansatz berücksichtigt nur die Sedimentation von Sand, die vor allem in der Umgebung der Kolklöcher um Bug und Heck der FSRU und in Hangnähe des Wendbeckens aufgrund der Hanganpassung auftritt und daher bei weitem nicht einheitlich über das Wendbecken verteilt ist. Schlammablagerungen wurden im Modell nicht in Betracht gezogen, aber es wird erwartet, dass sie innerhalb des Wendbeckens basierend auf Sohlschubspannungskarten nicht auftreten. Nach anfänglichen Hanganpassungen wird nicht erwartet, dass die jährliche Sedimentation in einem Zeitraum von fünf Jahren wesentlich zunehmen wird. Indem davon ausgegangen wird, dass die Sandwelle, die stromaufwärts an das Wendbecken angrenzt, mit 20 m/Jahr in Richtung des Wendbeckens wandert, wurde eine Einschätzung des Sedimentationsvolumens für eine längere Zeitachse (d. h. zwei und fünf Jahre) vorgenommen. Hier wurde ein zusätzlicher Sedimenteintrag von 1.100 m³ und 19.300 m³ (in situ) für einen zwei- bzw. fünfjährigen Zeitraum angesetzt. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei allen angegebenen Sedimentationswerten um bestmögliche Einschätzungen handelt, die auf den begrenzten verfügbaren Daten (d. h. keine historischen Ausbaggerungsdaten), den Modellannahmen und den inhärenten Unsicherheiten morphologischer Modelle beruhen (siehe z. B. Kamphuis, 2013 und Van Rijn, 1984), und daher entsprechend interpretiert werden sollten. Bathymetrische Vermessungen nach der ersten Ausbaggerungsaktivität können zur Optimierung der Einschätzungen herangezogen werden.

Derzeit sind im Wendbecken 0,5 m Sedimentation zulässig, bevor der Freiraum unter dem Kiel verletzt wird. Angesichts der ziemlich uneinheitlichen simulierten Sedimentation innerhalb des Wendbeckens, die vor allem in der Umgebung der Hänge auftritt und durch die Wanderung von Sandwellen beeinträchtigt werden könnte, wird eine Überwachungsmaßnahme (Bathymetrie-Studie) empfohlen, um die Sedimentationsraten zu bewerten und lokale Bereiche aufzuspüren, in denen eine potenzielle Gefahr der Unterschreitung des Freiraumes unter dem Kiel in naher Zukunft festgestellt werden kann. In Anbetracht des relativ langsamen Wanderungsprozesses wird eine erste Untersuchungsstudie nach Abschluss des Projekts, gefolgt von einer jährlichen Untersuchungsmaßnahme, als ausreichend angesehen, um dieses Phänomen zu überwachen. Sollte sich

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 50 von 51 |

herausstellen, dass die Sedimentation relativ beständig sind, kann dieser Zeitabstand entsprechend geändert werden.

| | | |
|--|--|---|
|    | Umgebung |  |
| TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FSRU: Morphologische Studie | Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU- ENV-DOC.2015_07 |
| TES-Code: TES-WHV-VGN- | | Seite 51 von 51 |

6 Referenzen

Axel Götschenberg A.K. (2008). The Jade. *Die Küste*, 74 ICCE, 263–274.

BAW (2016). Median-Korndurchmesser d50 Isolinien, Deutsche Bucht.

G. Lang (2003). Ein Beitrag zur Tidedynamik der Innejade und des Jadebusens.

Geo Ingenieurservice Nord-West GmbH&Co. Kg (2021). Sediment mapping using sidescan sonar in Innenjade, Island Jetty, Wilhelmshaven.

IMDC (2023a). Metocean-Kampagne 2023 FSRU Wilhelmshaven. I/RA/14330/23.108/ASP/.

IMDC (2023b). Bericht über die Umgebungsverhältnisse. TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DOC-2014.06.

IMP (2022a). LNG Terminal WHV, Fachbeiträge, Morphodynamik, Kolkentwicklung, Baggerarbeiten sowie hydromorphologische Wirkraumabschätzung und Beweissicherung. IMP Ingenieure GmbH & Co. KG, IMP-Bericht Nr. 429.

IMP (2022b). Erläuterungsbericht zum wasserrechtlichen Erlaubisantrag für die Einbringung von Baggergut in die Jade aus der Initial- und Unterhaltungsbaggerung zum geplanten LNG Terminal WHV. IMP-Bericht Nr. 430.

IMS (2009). Kohlekraftwerk Wilhelmshaven - Neubau der Kühlwasserentnahme Ausschreibungsunterlage Anhang 4 zur Baubeschreibung: Witterungsverhältnisse und Revierbedingungen.

Kamphuis J.W. (2013). Uncertainty, research, science and engineering in coastal dynamics. In Proceedings of Coastal Dynamics.

Kubicki A., Kösters F. & Bartholomä A. (2016). Dune convergence/divergence controlled by residual current vortices in the Jade tidal channel, south-eastern North Sea. *Geo-Mar Letters*, doi: 10.1007/s00367-016-0470-6.

Scheiber L., Lojek O., Götschenberg A., Visscher J. & Schlurmann T. (2020). Robust methods for the decomposition and interpretation of compound dunes applied to a complex hydromorphological setting. EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS(46), 478–489, doi: 10.1002/esp.5040.

Van Rijn L.C. (1984). Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness. *Journal of hydraulic engineering*, 110(12), 1733-1754.