

  	Konstruktiv	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 1 von 32

FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers

Zweite Ausgabe	01	30.08.2023	O.B.O M.Alemi	A. Bakhtiari	J. de Groot	
Erste Ausgabe	00	13.06.2023	M. Alemi	B. Decrop	J. de Groot	
Status	Ausgabe	Datum	Erstellt von	Geprüft von	Genehmigt von	Anmerkung

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 2 von 32

Zusammenfassung des Berichts

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. Die fest installierten Strukturen in der Mündung nahe der FSRU und des LNG-Tankers umfassen die Monopiles des Anlandeterminals und zwei Schlauchanschlussstationen (Pipeline End Manifolds, PLEMs).

In diesem Bericht wurde mittels einer CFD-Modellierung untersucht, wie die Anwesenheit der FSRU und eines LNG-Tankers die Sohlschubspannungen um diese Strukturen herum verstärken. Die Ergebnisse zur Verstärkung der Sohlschubspannung fließen in die Bemessung des Kolkschutzes um die Monopiles (Dalben) des Anlandeterminals ein.

Dazu erfolgten mehrere numerische 3-D-Simulationen mit Ansys Fluent. Für folgende Fälle wurden die Flut- und Ebbeströmungen berücksichtigt: (i) in Abwesenheit von Schiffen, (ii) in Anwesenheit der FSRU und (iii) in Anwesenheit von FSRU und eines LNG-Tankers.

Bei allen betrachteten Szenarien wurde die jeweilige Sohlschubspannung detailliert dokumentiert. Den Ergebnissen zufolge wirken die Schiffe sich am stärksten auf die nahe der FSRU befindlichen Anlegedalben aus. Insgesamt hatte die Anwesenheit zweier Schiffe (FSRU und LNG-Tanker) einen größeren Einfluss als die Anwesenheit lediglich eines Schiffes (FSRU). Dieser Trend wurde jedoch nicht an den stromaufwärts und stromabwärts gelegenen, weit von den Schiffen entfernten Vertäudalben beobachtet. Dort kam es zu einer (leichten) Abnahme der maximalen Sohlschubspannung.

Hinsichtlich der Verstärkungsfaktoren für die Sohlschubspannung zeigten sich für die Bemessung des Kolkschutzes an den Anlege- und Vertäudalben erforderliche Maximalwerte von 1,92 bzw. 1,61.

Hinweis: Seit Durchführung dieser Studie wurden einige Änderungen an den Strukturen des Anlandeterminals vorgenommen. Es wird erwartet, dass diese lediglich lokale Änderungen des Strömungsfeldes nach sich ziehen. Daher wirken die strukturellen Änderungen sich voraussichtlich nicht auf die Bemessungsbedingungen für den Kolkschutz aus.

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 3 von 32

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Der Auftrag	4
1.2	Gegenstand des Berichts	4
1.3	Lesehinweise	5
1.4	Definierte Begriffe und Abkürzungen	5
2	Szenarien	7
3	Modellaufbau	11
3.1	Verwendete Software.....	11
3.2	Berechnungsgebiet und Rasternetz	11
3.3	Grenzbedingungen	15
4	Annahmen	17
5	Verifizierung des Geschwindigkeitsprofils	18
6	Ergebnisse	21
7	Schlussfolgerungen	30
8	Referenzen	32

	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 4 von 32

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 Meeresarbeiten sowie für Modellierungsstudien vor, die in den Genehmigungsantrag einfließen werden.



Abbildung 1-1: Übersicht über das Projektgebiet (Quelle: Google Earth).

1.2 Gegenstand des Berichts

Für diesen Bericht wurden die Auswirkungen der FSRU und eines LNG-Tankers auf die Sohlschubspannung rund um die angrenzenden Strukturen untersucht (Monopiles des Anlandeterminals und die Schlauchanschlussstationen, Pipeline End Manifolds, PLEMs). Die

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 5 von 32

berechneten Verstärkungsfaktoren der Sohlschubspannung aufgrund der Anwesenheit der FSRU und eines LNG-Tankers fließen dann in die Bemessung des Kolkschutzes ein. Dieser Bericht beschreibt das CFD-Modell für die Bewertung des Sohlschubspannungsfelds. Zudem werden die Ergebnisse vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Bedingungen analysiert.

1.3 Lesehinweise

Kapitel 2 des Berichts beginnt mit einer Beschreibung der Untersuchungsszenarien und der entsprechenden Einflussbedingungen. In Kapitel 3 wird der Aufbau des CFD-Modells beschrieben. Kapitel 4 fasst die Annahmen zusammen. In Kapitel 5 wird ein Verfahren zur Verifizierung der Geschwindigkeit vorgestellt. In Kapitel 6 folgt eine Erörterung der Ergebnisse. Schließlich stellt Kapitel 7 die Schlussfolgerungen vor.

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
Auftragnehmer	Auftragnehmer ist ein erfolgreiches Unternehmen/eine erfolgreiche Partei, das/die den Vertrag über die Ausführung der Meeresarbeiten abschließt und rechtlich daran gebunden ist
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
CFD	Rechnergestützte Simulation von Fluiden (Computational Fluid Dynamics)
DMA	Dynamische Festmach-Analyse (Dynamic Mooring Analysis)
FSRU	Schwimmende Speicher- und Regasifizierungseinheit (Floating Storage and Regasification Unit). Die „Excelsior“, die Excelerate Energy gehört, wird für dieses Projekt bereitgestellt.

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 6 von 32

Begriff	Beschreibung
IPs	Zwischenpfähle (Intermediate Piles)
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
MD	Vertäudalbe
MSL/NHN	Mittlerer Meeresspiegel (Mean Sea Level) / Normalhöhennull
MW	Mittel Wasser
PLEMs	Schlauchanschlussstationen (Pipeline End Manifolds)
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
SKN	Seekartennull; die Tiefenangaben beziehen sich auf das Seekartennull (SKN) als Tiefenhorizont, hier das Niveau des niedrigsten Gezeitenwasserstandes (LAT)
SST	Shear-Stress Transport
(Der) Standort	Dies bezieht sich auf den Projektstandort, nämlich den Kundenstandort in Wilhelmshaven.
TES	Tree Energy Solutions (Kundenpartner)

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 7 von 32

2 Szenarien

Nahe der FSRU und des LNG-Tankers sind folgende Strukturen fest installiert: sechs Vertäudalben (Mooring Dolphins, MD), vier Anlegedalben (Breasting Dolphins, BD), zwei Zwischenpfähle (Intermediate Piles, IP) und zwei Schlauchanschlussstationen (Pipeline End Manifolds, PLEMs). Da das Untersuchungsgebiet gezeitenbedingt unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten und Wasserstände aufweist, wurden zur Ermittlung der Sohlschubspannung um diese Strukturen herum sowohl die Flut- als auch die Ebbeströmungen berücksichtigt (Tabelle 2-1). Insgesamt wurden sechs verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Strömungsbedingungen und -hindernissen definiert, siehe Zusammenfassung in Tabelle 2-2. Die Szenarien 1 und 2 sind die Referenzfälle. Denn sie berücksichtigen bei der Modellierung lediglich die fest installierten Strukturen. Die anderen vier Szenarien sind die Testfälle. Anhand von ihnen werden die Auswirkungen der Anwesenheit von sowohl nur der FSRU als auch der FSRU und eines LNG-Tankers auf die Sohlschubspannungen um die fest installierten Strukturen herum untersucht.

Die Zuflussströmungsbedingungen resultieren aus den Ergebnissen des großmaßstäblichen Modells der Jademündung, das mit dem Programm TELEMAC-3D simuliert wurde (TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DOC-2014 Bericht über die Umgebungsverhältnisse). Die Gitterpunkte der beiden Modelle stimmen nicht überein. Daher beruht das Geschwindigkeitsfeld an der Zuflussgrenze des CFD-Modells auf einer Interpolation. Die über die Tiefe gemittelten Zuflussgeschwindigkeiten und -bedingungen für die Flut- und Ebbefälle sind für die beiden Modelle unter Abbildung 2-1 bzw. Abbildung 2-2 angegeben. Die Zuflussbedingungen und Wasserstände sind während jeder Simulation konstant.

Tabelle 2-1: Zentrale Charakteristika der betrachteten Strömungsbedingungen.

Strömungsbedingungen	Wasserstand [m MW]	Über die Tiefe gemittelte Geschwindigkeit [m/s]
Flut	1,47	1,43
Ebbe	0,17	1,37

  	Projekträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 8 von 32

Tabelle 2-2: Verschiedene Simulationsszenarien bei unterschiedlichen Bedingungen.

Nummer	Szenario	Strömungsbedingungen	Strömungshindernisse
1	Flut, kein Schiff	Flut	Fest inst. Strukturen
2	Ebbe, kein Schiff	Ebbe	Fest inst. Strukturen
3	Flut, FSRU	Flut	Fest inst. Strukt. + FSRU
4	Flut, FSRU + LNG-Tanker	Flut	Fest inst. Strukt. + FSRU + LNG-Tanker
5	Ebbe, FSRU	Ebbe	Fest inst. Strukt. + FSRU
6	Ebbe, FSRU + LNG-Tanker	Ebbe	Fest inst. Strukt. + FSRU + LNG-Tanker

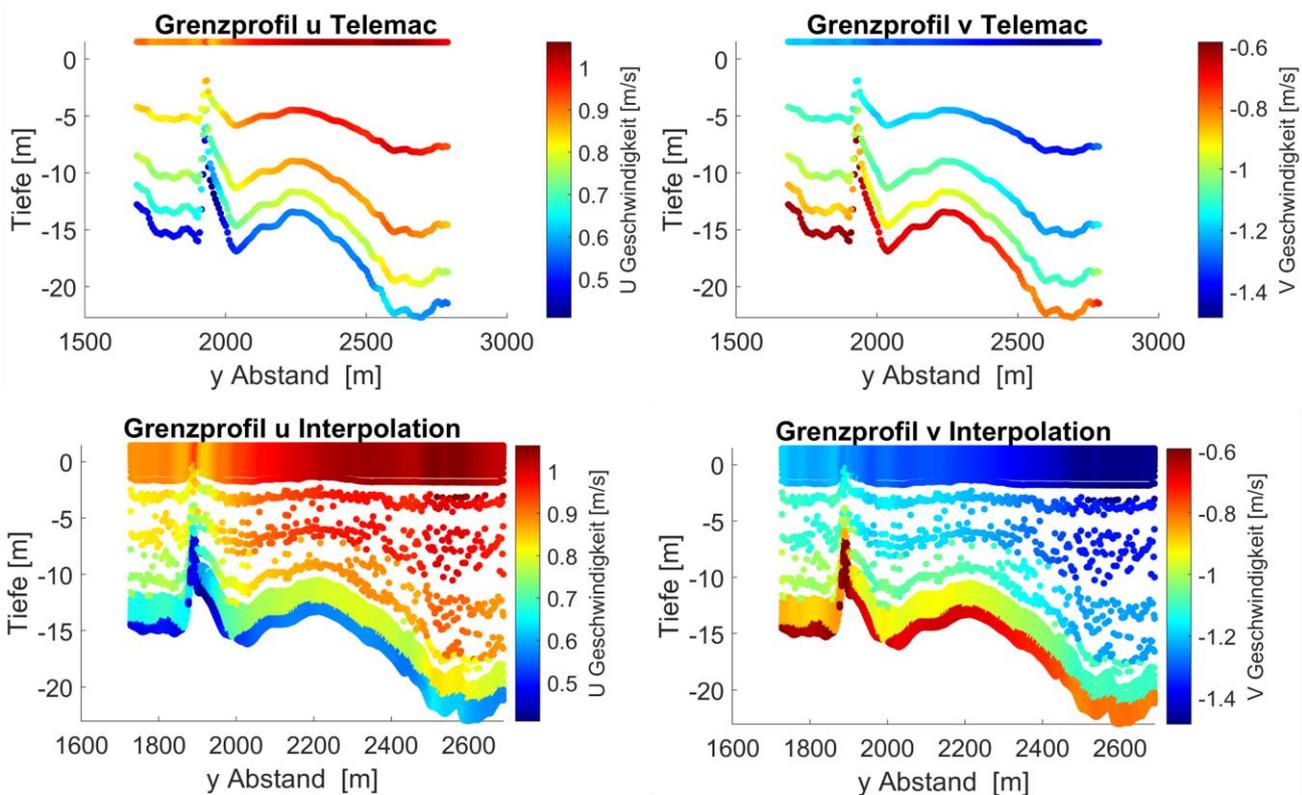


Abbildung 2-1: Geschwindigkeitskomponenten (u und v) aus TELEMAC-3D (oben) und entsprechende interpolierte Werte (unten) an der Zuflussgrenze des CFD-Modells für den Fall mit Flut.

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohl Schubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 9 von 32

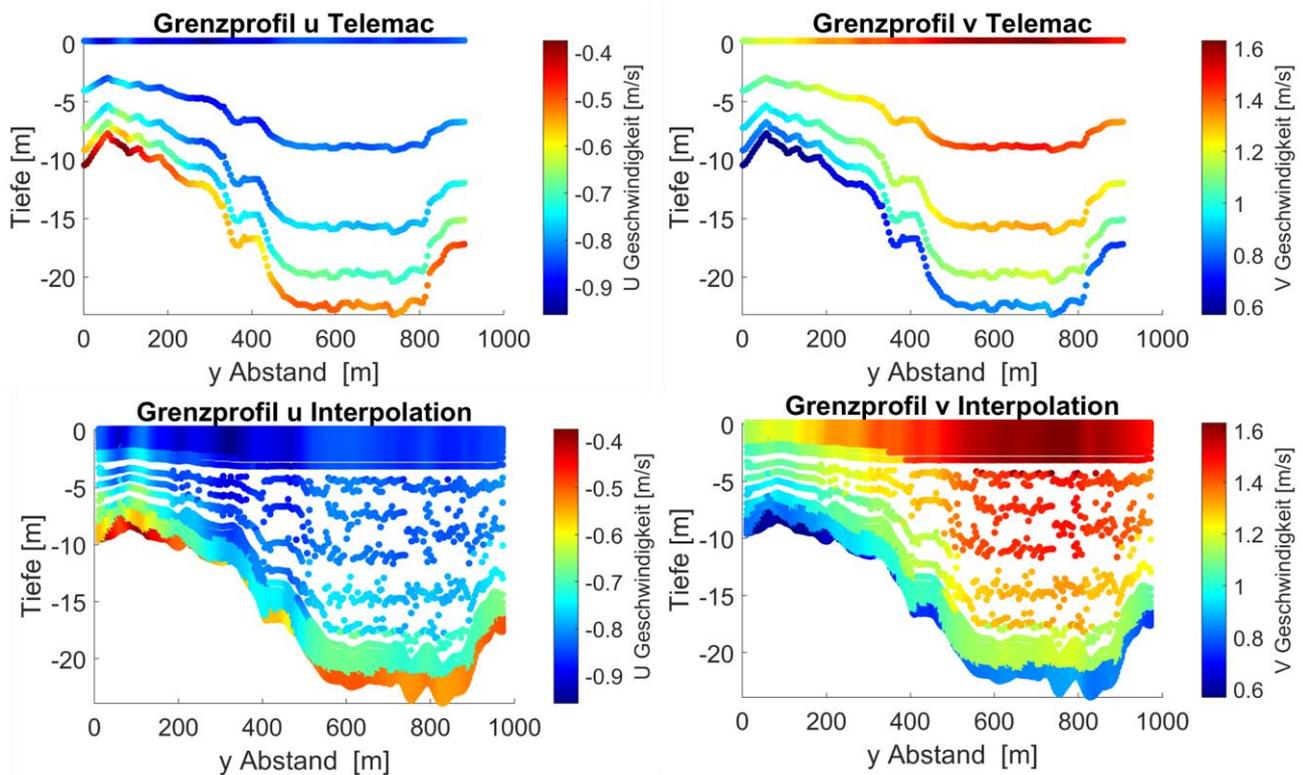


Abbildung 2-2: Geschwindigkeitskomponenten (u und v) aus TELEMAC-3D (oben) und entsprechende interpolierte Werte (unten) an der Zuflussgrenze des CFD-Modells für den Fall mit Ebbe.

Die Modellbathymetrie (Abbildung 2-3) wurde mit Daten aus vier verschiedenen Quellen erstellt, die Daten enthalten, die von 2012 bis 2022 erhoben wurden:

- 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“

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 10 von 32

- 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]
 - Datenquelle: „Kunde“

Alle Daten wurden umgerechnet auf den mittleren Meeresspiegel (MSL) = Mittel Wasser (MW) = Normalhöhennull (NHN). Am Projektstandort beträg MW (m) = SKN [m] + 2,49 [m]. Das Wendebecken (dargestellt in Abbildung 2-3) hat eine Tiefe von –16,99 m MW.

Mittels der Bathymetriedaten wurde eine Datei im Format „stl“ erstellt, aus der die Bodenoberflächen bei der CFD-Rasternetzberechnung hervorgehen. Die Auflösung ist ausreichend, um die Variationen in der Bathymetrie zu erfassen.

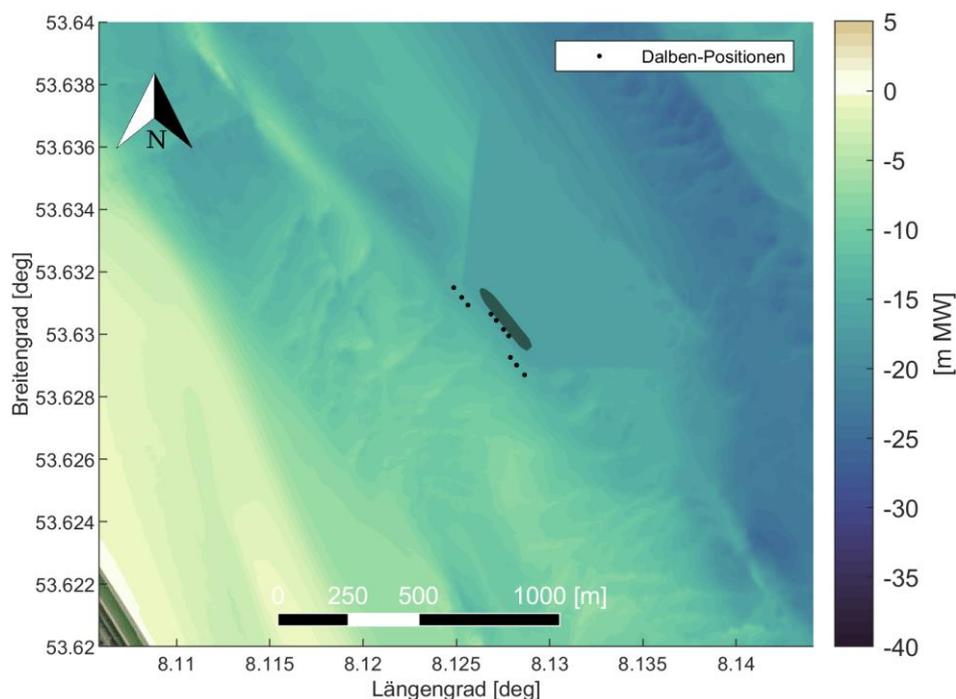


Abbildung 2-3 Bathymetrie nahe des Projektstandorts [m MW] einschließlich einiger der Projektstrukturen.

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 11 von 32

3 Modellaufbau

In diesem Abschnitt werden das verwendete CFD-Modell, das Berechnungsgebiet, die Rasternetzauflösung und die Grenzbedingungen vorgestellt.

3.1 Verwendete Software

Mittels der kommerziellen Software Ansys Fluent wird ein numerisches 3-D-Modell erstellt (Ansys, Inc., 2020). Die Bewertung der Sohlschubspannungen erfolgt unter Zuhilfenahme der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-3-D-Gleichungen (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS) für die Simulation eines stationären, inkompressiblen, turbulenten Strömungsfelds. Für die Turbulenzschließung wird das $k-\omega$ -SST-Turbulenzmodell (Shear-Stress Transport (SST), Sohlschubspannungstransport) gewählt. Zur Sensitivitätsanalyse der Turbulenzmodelle wurde für das Referenzszenario „Flut, kein Schiff“ eine Nebensimulation mit dem $k-\epsilon$ -Turbulenzmodell durchgeführt. Die jeweiligen Ergebnisse werden in Kapitel 5 erörtert.

3.2 Berechnungsgebiet und Rasternetz

Das 3-D-Berechnungsgebiet besteht aus dem Untersuchungsgebiet und seiner Umgebung. Im Untersuchungsgebiet befinden sich die Vertäudalben, die Anlegedalben, die Zwischenpfähle und die Schlauchanschlussstationen. Die Umgebung ist relevant für die Entwicklung der Strömung und die entsprechende Festlegung der Grenzbedingungen, sodass es keine Auswirkungen auf die Strömung innerhalb des Untersuchungsgebiets gibt. Abbildung 3-1 veranschaulicht die Geometrie des Gebiets für ein Szenario mit beiden Schiffen.

Die Größe des Gebiets wird wie folgt zusammengefasst:

- In Strömungsrichtung beträgt die Länge des Gebiets ca. 2,2 km;
- Die Breite beträgt ca. 1,6 km;
- Die Höhe des Gebiets unterscheidet sich je nach Szenario und hängt vom Wasserstand ab (siehe Tabelle 2-1);
- Der Boden ist bei allen Szenarien gleich. Die Bodenhöhe reicht von MW $-26,8$ bis $-7,8$ m.

Die Abmessungen und Standorte der Strömungshindernisse sind wie folgt:

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 12 von 32

- Die vertikal aufgestellten Dalben und Pfähle haben einen kreisförmigen Querschnitt mit einem Durchmesser von 4,5 m bzw. 2 m. Die zylindrisch geformten Hindernisse erstrecken sich zudem über die gesamte Strömungstiefe. Tabelle 3-1 zeigt den Mittelpunkt jedes Hindernisses.
- Bei den PLEMs handelt es sich Strukturen, die unter Wasser auf dem Boden stehen. Auch ihre Standorte im Gebiet sind in Tabelle 3-1 zu sehen. Zwischen den beiden PLEMs sind 2 m Abstand. Die beiden PLEMs weisen in der Modellierung dieselbe Geometrie auf. Jede PLEM besteht aus einem rechteckigen Prisma mit den Abmessungen 4,95 m × 4,25 m × 2,1 m, das auf einem weiteren Prisma mit den Abmessungen 6,81 m × 8,12 m × 0,71 m steht.
- Die FSRU hat eine Länge von 277 m, eine Breite von 43,4 m und einen Tiefgang von 12,32 m. Diese Abmessungen gelten für den beladenen Zustand. Die Abmessungen der LNG-Tanker betragen vor dem Hintergrund der Bemessungsgrundlage 294,9 m, 46,4 m und 12,5 m (L × B × T). Die beiden Schiffe liegen im Gebiet Seite an Seite, mit einem Abstand wie in Abbildung 3-2 angegeben (TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2021 Bewertung dynamischer Vertäuerung).

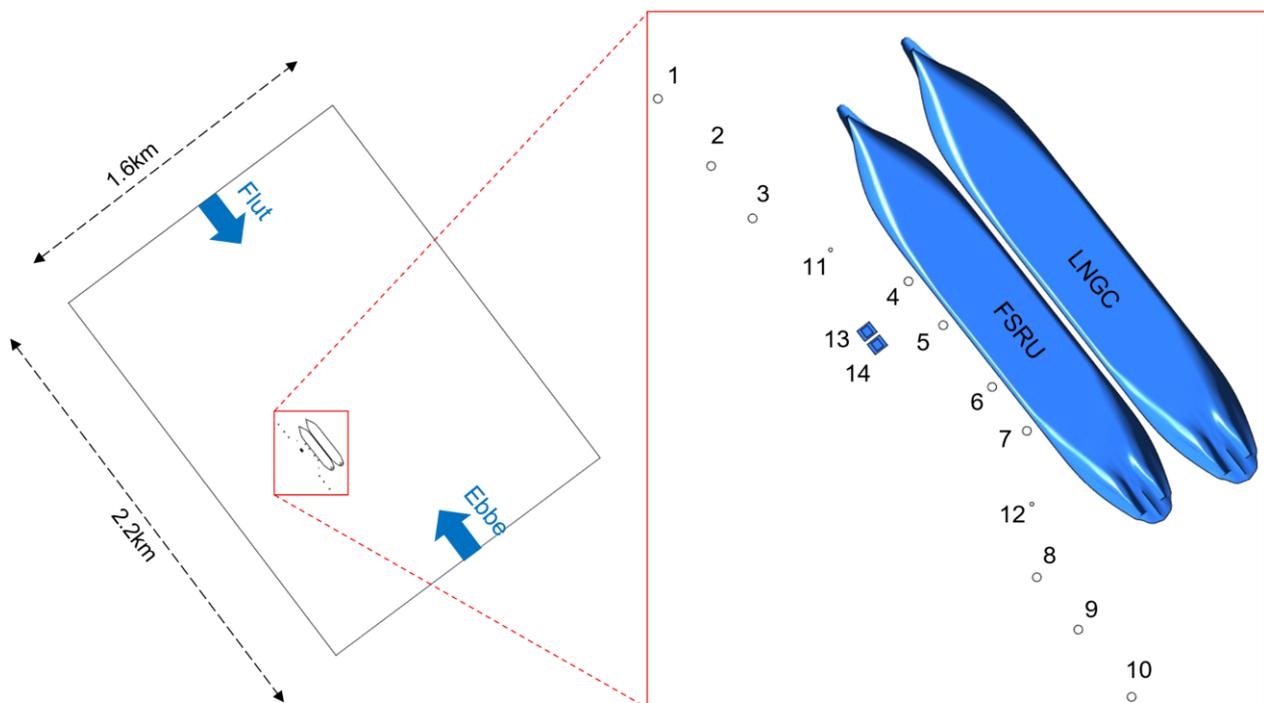


Abbildung 3-1 Berechnungsgebiet (links) und eine vergrößerte Ansicht des Untersuchungsgebiets.

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 13 von 32

Tabelle 3-1: Die Mittelpunkte der fest installierten Strömungshindernisse.

Struktur	Nr.	Bezeichnung	X (m)	Y (m)
Dalben	1	MD1	442130,3	5942878,8
	2	MD2	442158,1	5942843,4
	3	MD3	442179,7	5942816,0
	4	BD1	442261,1	5942782,8
	5	BD2	442279,3	5942759,8
	6	BD3	442304,8	5942727,3
	7	MD4	442323,0	5942704,2
	8	MD4	442328,1	5942627,3
	9	MD5	442349,8	5942599,8
	10	MD6	442377,6	5942564,4
Pfähle	11	IP1	442220,4	5942799,4
	12	IP2	442325,5	5942665,8
PLEMs	13	PLEM1	442240,5	5942756,4
	14	PLEM2	442245,9	5942749,4

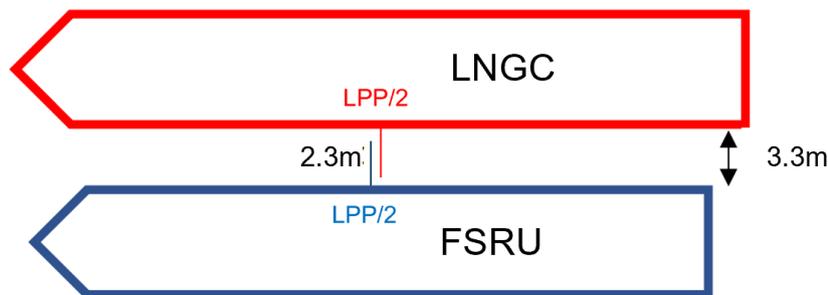


Abbildung 3-2 Abstand zwischen den beiden Schiffen, die in der Modellierung betrachtet wurden.

Abbildung 3-3 zeigt eine Rasternetzübersicht im Umfeld der Strömungshindernisse für das Szenario „Flut, FSRU + LNG-Tanker“ an der Bodenoberfläche sowie in der oberen horizontalen Ebene. Im Untersuchungsgebiet (um die Strömungshindernisse herum) ist das Rasternetz feiner und weiter außen gröber. Die Mindestzellengröße an der Oberfläche der Dalben, Pfähle und PLEMs beträgt 0,25 m. Die Zellengröße steigt mit einer Wachstumsrate von 1,1 mit zunehmender Entfernung von den Hindernissen. Die Werte betragen 0,4 bzw. 1,2 für die (Schiffs-)Rümpfe. Wie in Abbildung 3-3 zu sehen ist, wurden außerdem zwei Felder für die lokale Rasternetzverfeinerung um die Hindernisse herum definiert. Die Zielrasternetzgröße beträgt 0,75 m im inneren Feld bei einer Wachstumsrate von 1,1. Das äußere Feld hat eine Zielgröße von 2,5 m bei einer Wachstumsrate von 1,2.

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 14 von 32

Das erzeugte numerische Gitter besteht aus den polyedrischen Elementen. Abbildung 3-4 zeigt beispielhaft das Gitter in einer vertikalen Ebene zwischen der Bodenwand und der FSRU. Bei der wandnahen Behandlung (Meeresboden, Dalben, Pfähle, PLEMs und (Schiffs-)Rümpfe) werden Standard-Wandfunktionen benutzt.

Insgesamt umfasst das Gitternetz, je nach Szenario, zwischen 10,4 und 15,35 Millionen Zellen (siehe Tabelle 3-2). Es ist anzunehmen, dass bei Hinzufügen eines Schiffes in das Gebiet auch die Anzahl der Gitterzellen sich ändert. Zudem ändert die Anzahl der Zellen sich bei Wechsel der Strömungsrichtung (Flut ggü. Ebbe). Dies liegt an den unterschiedlichen Wasserständen, die für Flut und Ebbe berücksichtigt wurden.

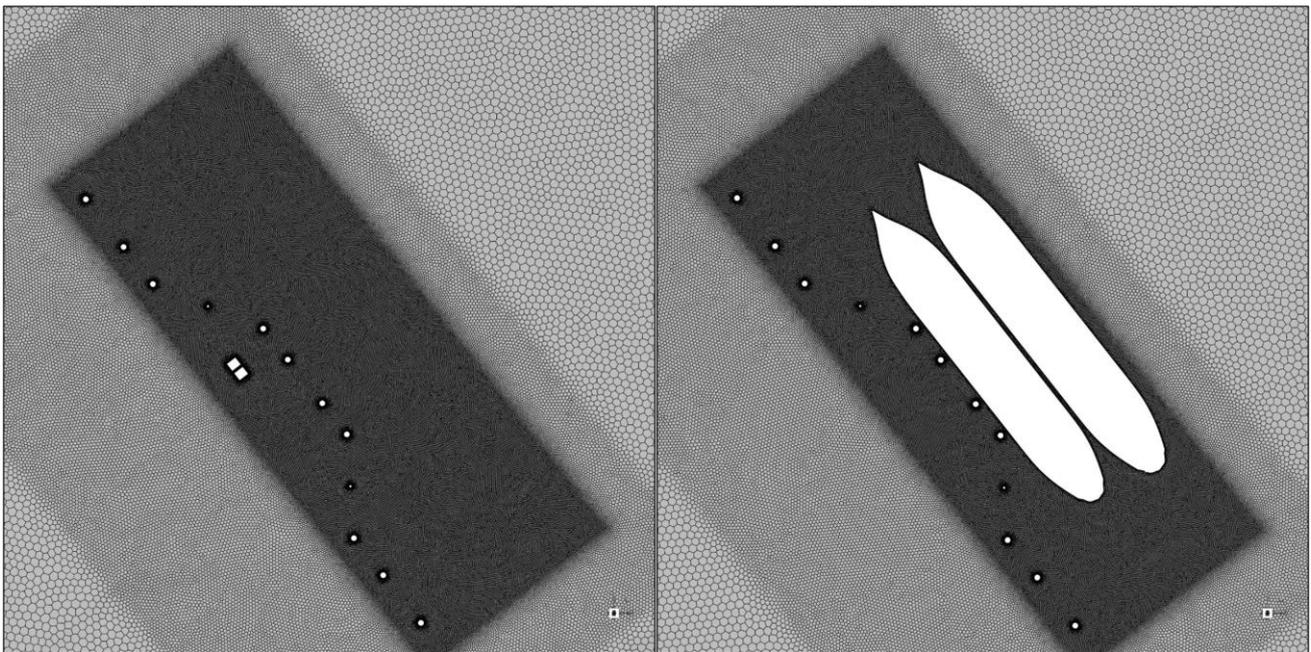


Abbildung 3-3 Rasternetzübersicht um die Strömungshindernisse herum an der Bodenoberfläche (links) und der oberen horizontalen Ebene (rechts) für den Fall mit Flut und beiden Schiffen.

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 15 von 32

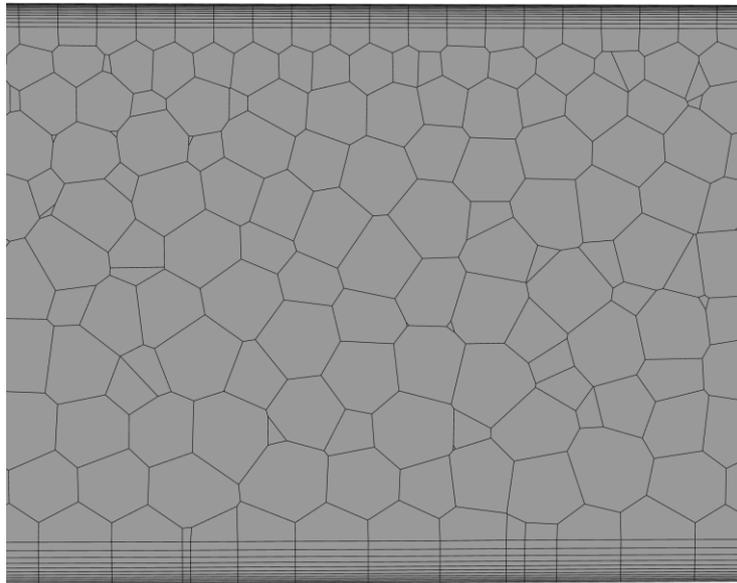


Abbildung 3-4 Eine vergrößerte Ansicht der vertikalen Zellenflächen zwischen der FSRU und der Bodenoberfläche.

Tabelle 3-2: Anzahl der Gitterelemente je Szenario.

Szenario	Anzahl Zellen [Mio.]
Flut, kein Schiff	10,71
Ebbe, kein Schiff	10,40
Flut, FSRU	11,94
Flut, FSRU + LNG-Tanker	15,35
Ebbe, FSRU	11,61
Ebbe, FSRU + LNG-Tanker	13,52

3.3 Grenzbedingungen

Bei den Fällen mit Flut fließt die Strömung von Nordwest aus in das Gebiet und strömt im Südosten wieder heraus. Bei den Fällen mit Ebbe ist es umgekehrt (siehe linke Tafel in Abbildung 3-1).

Für eine realistische Wiedergabe des Strömungsfelds berücksichtigt das numerische Modell die folgenden Grenzbedingungen:

- Geschwindigkeitsprofile für die Zuflussgrenze des Gebiets;

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 16 von 32

- Druckauslass für die Abflussgrenze des Gebiets, sodass das Wasser abfließen kann;
- Haftbedingung (no-slip) an allen Festkörpergrenzen (Boden, fest installierte Strukturen und Schiffsrümpfe) bei unterschiedlichen Rautiefen. Die Oberflächen der FSRU, des LNG-Tankers, der Dalben und der Pfähle werden als glatt angesehen. Die Rautiefe an der Oberfläche jeder PLEM beträgt 1 mm (glatter Beton). Für die untere Fläche (Meeresboden) wurde die Rautiefe unter Zuhilfenahme des Modells von TELEMAR-3D ermittelt (1,333 mm);
- Keine Haftbedingung an der oberen Fläche (Wasseroberfläche).

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 17 von 32

4 Annahmen

In diesem Abschnitt werden die zentralen Annahmen zusammengefasst:

- Der Wasserstand, der aus dem großmaßstäblichen Modell der Jademündung von IMDC entnommen wurde, wurde für jedes Szenario als konstant angenommen.
- Für die Eingabe des Geschwindigkeitsfelds wurde ein Profil mit variierender Tiefe aus dem großmaßstäblichen Modell extrahiert und in die Zuflussgrenze des CFD-Modells interpoliert. Der Wert ist allerdings während der Simulation konstant.
- Hinsichtlich der oben genannten Wasserstands- und Zuflussgeschwindigkeitsbedingungen wurde für jeden der Fälle eine einphasige stationäre Simulation durchgeführt.
- Die Schiffe sind in dem Gebiet vertäut.
- Die Bodenoberfläche wurde für die Simulationen als starr angenommen.
- Die Rautiefe des Meeresbodens beträgt 1,333 mm und entstammt dem großmaßstäblichen Modell.
- Der Boden des Wendebeckens hat eine konstante Höhe von $-16,99$ m MW.

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 18 von 32

5 Verifizierung des Geschwindigkeitsprofils

Bei dieser Art von Simulation ist es wichtig, die korrekte Entwicklung der Strömung stromaufwärts des Untersuchungsgebiets zu kontrollieren. Daher wurden an verschiedenen Stellen im Anfahrtsbereich (Abbildung 5-1) für das Referenzszenario „Flut, kein Schiff“ Geschwindigkeitsprofile aus dem Modell extrahiert. Die Extraktionspunkte werden von der Zuflussgrenze (hier: Nordwest) aus gemessen. Abbildung 5-2 zeigt die Profile unter Berücksichtigung des k - ω -SST-Turbulenzmodells in der Simulation. Zwischen den Profilen sind kleine Veränderungen zu sehen. Diese sind darauf zurückzuführen, dass die Strömung sich von der Zuflussgrenze weg entwickelt.

Die entsprechenden Ergebnisse des k - ε -Turbulenzmodells (nur bei 655 m) werden in Abbildung 5-3 dargestellt und mit einem analytischen logarithmischen Geschwindigkeitsprofil (auch: log law, logarithmisches Wandgesetz) verglichen. Zu Vergleichszwecken werden die Wandkoordinate Z^+ und eine dimensionslose Geschwindigkeit U^+ verwendet.

$$U^+ = \frac{U}{U^*} = \frac{1}{k} \ln(Z^+)$$

$$Z^+ = \frac{30Z}{k_s}, \quad U^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

Dabei sind U die Wassergeschwindigkeit, U^* die Reibungsgeschwindigkeit, τ_w die Wandschubspannung, Z der Normalabstand von der Wand, k die Kármán-Konstante = 0,41, ρ die Wasserdichte und k_s die Wandrauheit.

Den Ergebnissen zufolge können beide Turbulenzmodelle unmittelbar stromaufwärts des Untersuchungsgebiets (d. h. 655 m) nahezu dieselben Geschwindigkeitsprofile darstellen. Zudem haben die erstellten Profile relativ große Übereinstimmungen mit dem logarithmischen Geschwindigkeitsprofil. Eine Schlussfolgerung ist, dass die Strömung gut entwickelt ist, bevor sie das Untersuchungsgebiet erreicht. Darüber hinaus wirkt das im Anfahrtsbereich verwendete grobe Gitter sich nicht signifikant auf die Berechnung der anströmenden Fließgeschwindigkeit aus.

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 19 von 32

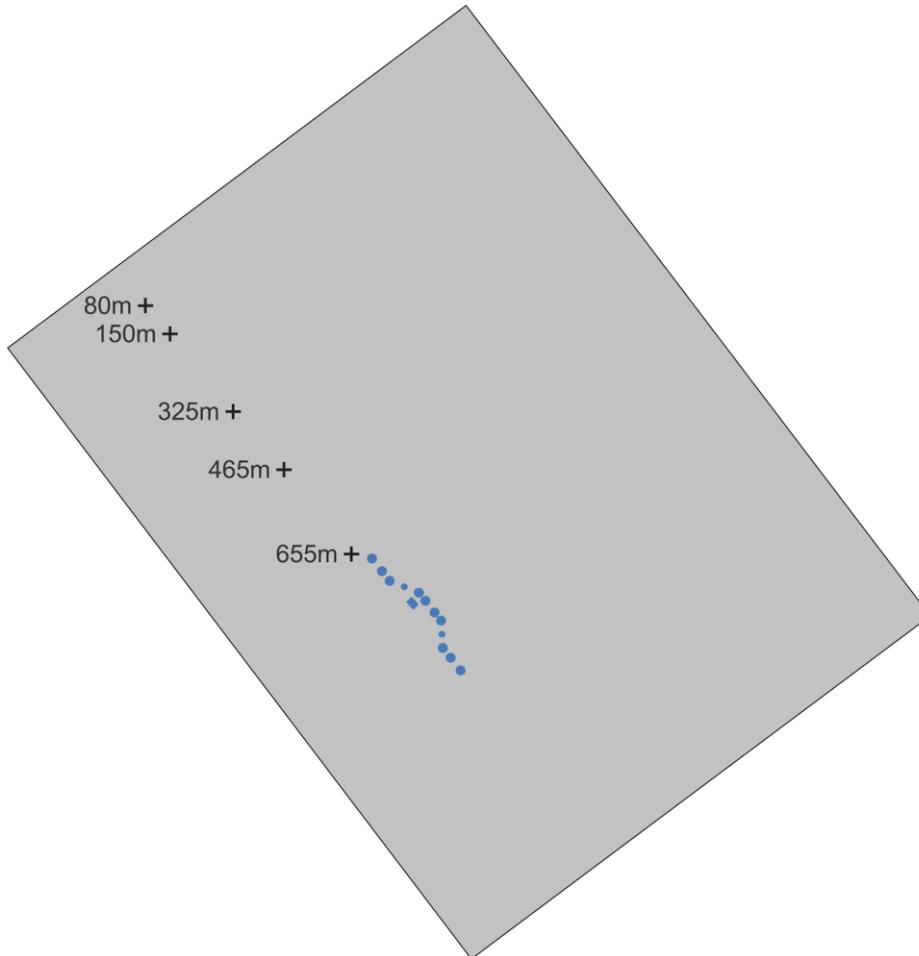


Abbildung 5-1 Standorte, an denen die Geschwindigkeitsprofile für die Vergleichsstudie extrahiert wurden.

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 20 von 32

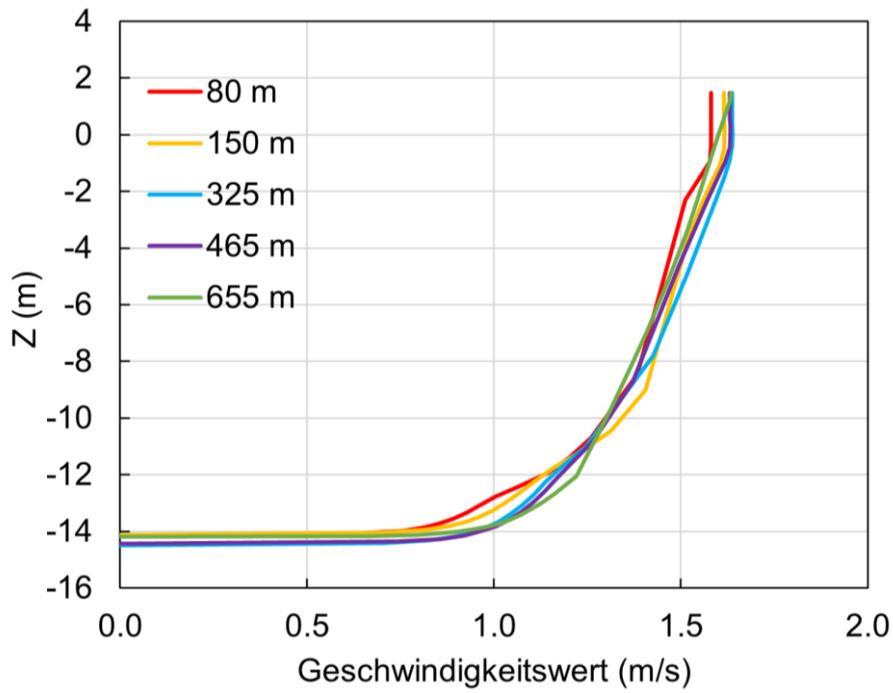


Abbildung 5-2 Geschwindigkeitsprofile, die mit dem $k-\omega$ -SST-Turbulenzmodell an verschiedenen Stellen im Anfahrtsbereich ermittelt wurden (Szenario „Flut, kein Schiff“).

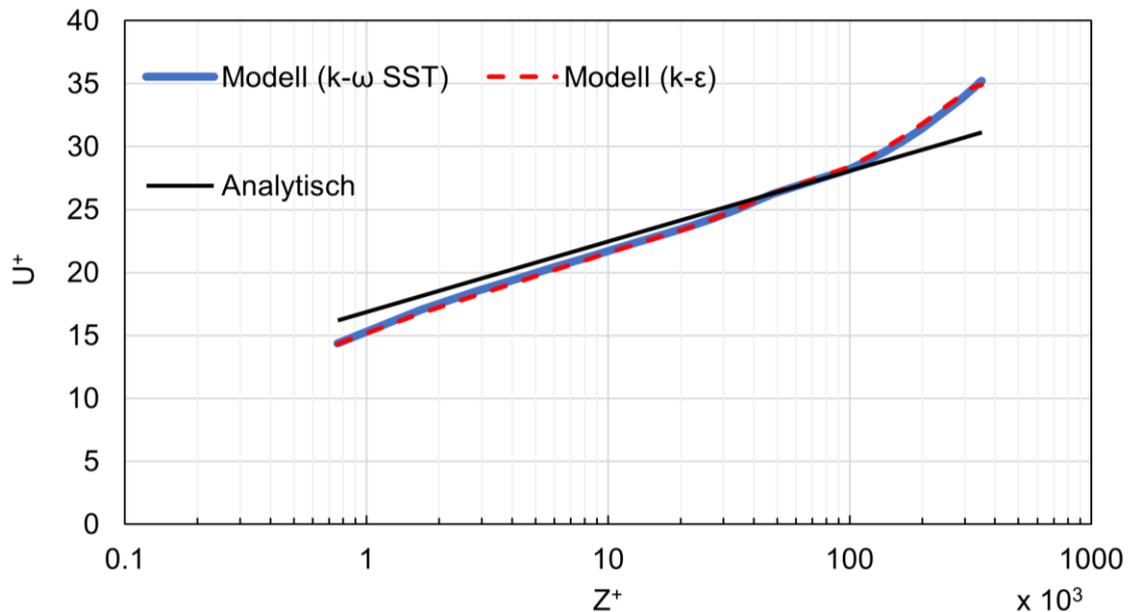


Abbildung 5-3 Vergleich der Geschwindigkeitsprofile, die mit dem $k-\omega$ -SST- und dem $k-\epsilon$ -Turbulenzmodell sowie der analytischen Lösung (log law) für das Szenario „Flut, kein Schiff“ ermittelt wurden (Standort: 655 m).

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 21 von 32

6 Ergebnisse

Die vier aufgereihten Anlegedalben von BD1 (Nr. 4) bis BD4 (Nr. 7) befinden sich nahe der FSRU. Auf diese Dalben werden die Schiffe sich voraussichtlich am stärksten auswirken. Abbildung 6-1 veranschaulicht die 3-D-Strömungsstruktur um diese Dalben herum für den Fall der Abwesenheit von Schiffen bei Flut („Flut, kein Schiff“).

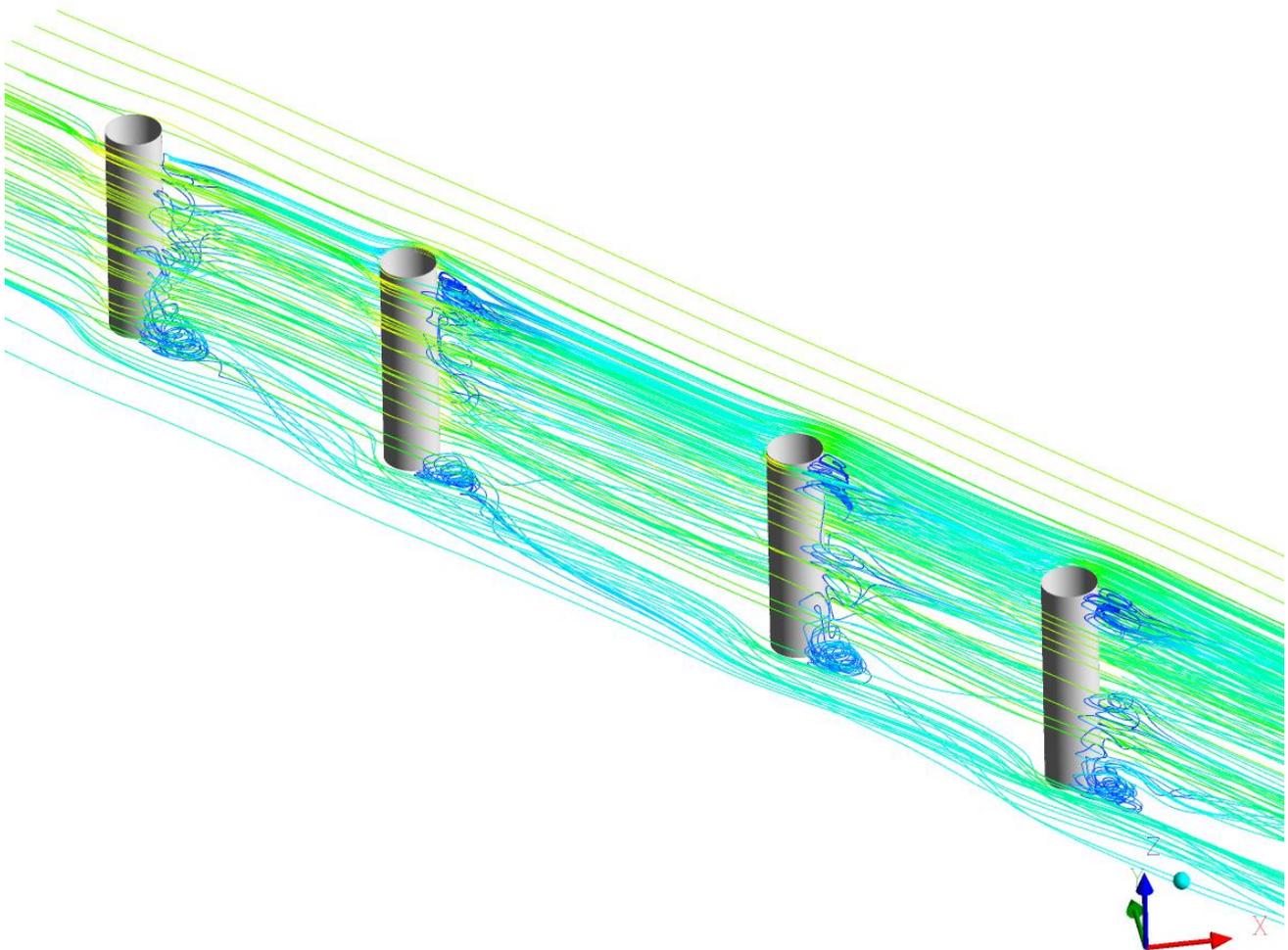


Abbildung 6-1 3-D-Strömungslinien um BD1 bis BD4 (Nr. 4–7) herum bei Flut ohne Schiffe („Flut, kein Schiff“)

Die zufließende Strömung wird seitlich durch die Anlegedalben abgelenkt und beschleunigt. Dadurch entstehen hinter allen Dalben Rückströmungsbereiche (Nachlaufströmungszonen), die in der Größe variieren. Über die Höhe der Dalben hinweg fällt die Nachlaufströmungszone unterschiedlich aus – so, wie auch die Position der Grenzschichttrennungspunkte von der Dalbenoberfläche über ihre Höhe

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 22 von 32

hinweg unterschiedlich ist. Dies liegt daran, dass die Strömungseigenschaften über die Strömungstiefe hinweg uneinheitlich sind. Abbildung 6-2 zeigt die Geschwindigkeitsvektoren um die Anlegedalben herum entlang einer Ebene parallel zum Meeresboden (+10 cm). Den Ergebnissen zufolge ist die Nachlaufströmungszone hinter dem Anlegedalben BD2 (Nr. 5) kleiner als die hinter BD1 (Nr. 4). Dieser Unterschied ist auf den geringen Abstand zwischen den beiden Dalben zurückzuführen. Er führt dazu, dass der stromaufwärts befindliche Dalben sich auf die Strömung beim stromabwärts stehenden Dalben auswirkt. Die Anlegedalben BD2 (Nr. 5) und BD3 (Nr. 6) sind weiter voneinander entfernt positioniert als die beiden anderen Dalben. Daher kommt es zwischen diesen Dalben zu einer Strömungsbeschleunigung, siehe Abbildung 6-2. Diese wiederum führt dazu, dass die Nachlaufströmungszone hinter dem Anlegedalben BD3 (Nr. 6) etwas länger ist als die hinter dem stromaufwärts gelegenen Dalben BD2 (Nr. 5). Insgesamt ist davon auszugehen, dass die maximale Sohlschubspannung von einem Dalben zum nächsten mit der stromabwärts fließenden Strömung variiert.

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 23 von 32

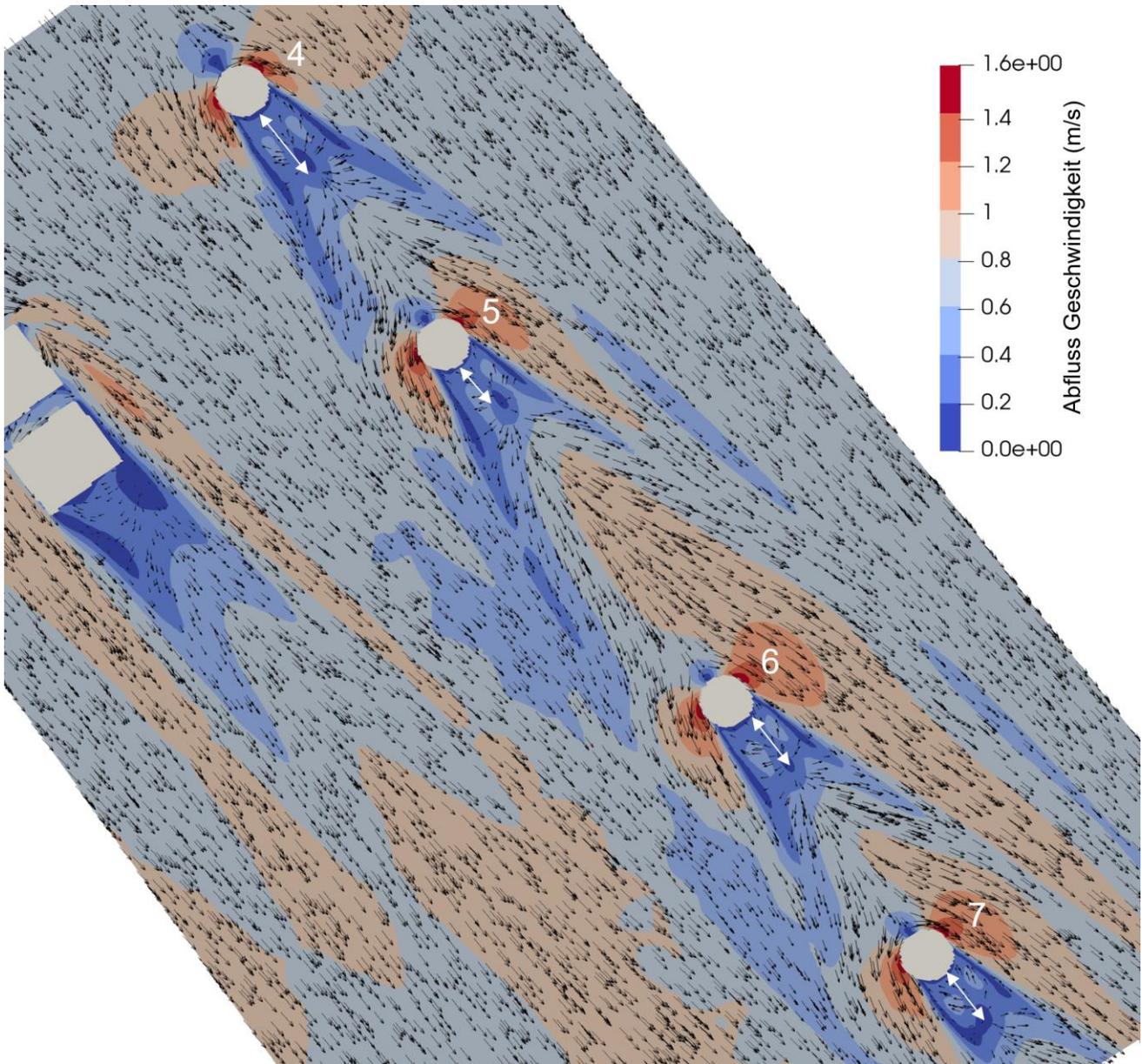


Abbildung 6-2 Geschwindigkeitsvektoren und Strömungsgeschwindigkeitskarte (m/s) in einer Ebene in Meeresbodennähe (+10 cm) für den Referenzfall „Flut, kein Schiff“.

Abbildung 6-3 zeigt die Verteilung der Geschwindigkeit in Meeresbodennähe bei Flut mit und ohne FSRU. Den Ergebnissen zufolge steigt die Geschwindigkeit um die Anlegedalben BD1 (Nr. 4) bis BD4 (Nr. 7) herum und sogar in der Nähe der PLEMs, wenn die FSRU in das Gebiet eingesetzt wird. Dieser Unterschied ist auf die Strömungsverengung und damit -beschleunigung zurückzuführen, zu

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 24 von 32

der es aufgrund der FSRU kommt. Insgesamt ist zu erwarten, dass es aufgrund der FSRU um diese Strukturen herum zu einer Zunahme der Sohlschubspannung kommt.

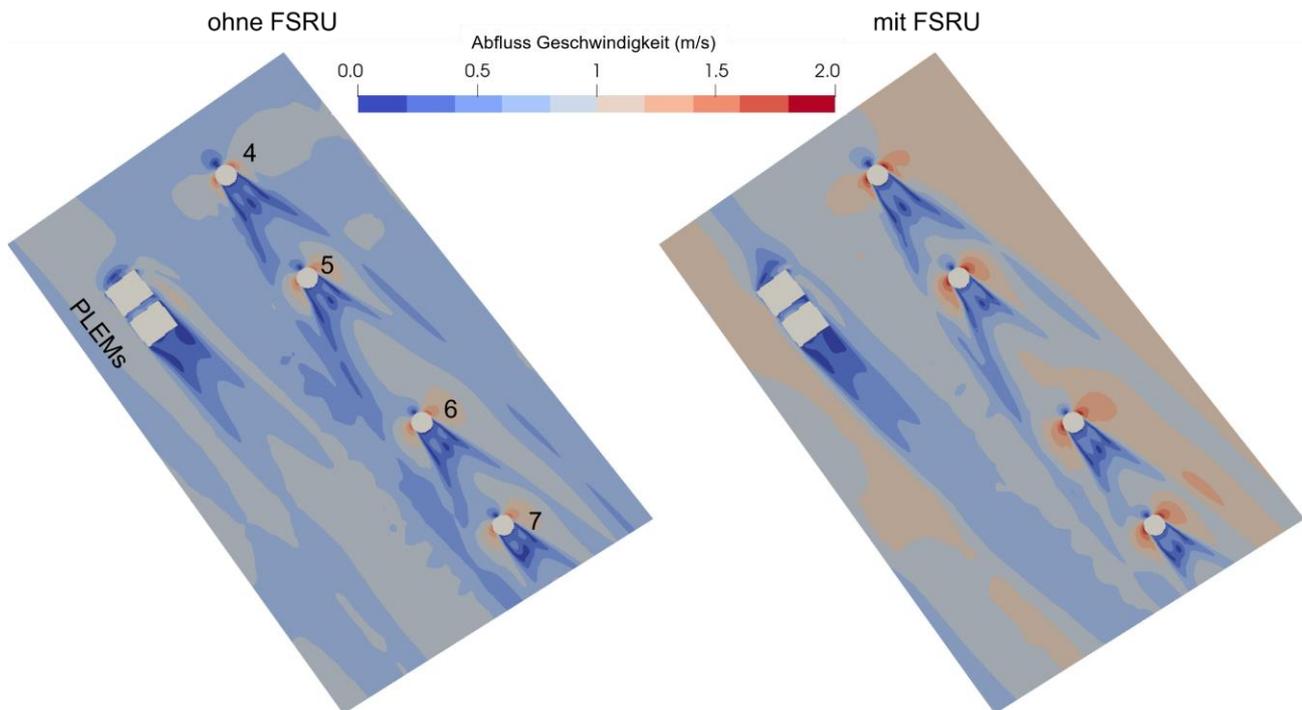


Abbildung 6-3 Karten über die Strömungsgeschwindigkeit (m/s) in einer Ebene in Meeresbodennähe (+10 cm) bei Flut mit und ohne FSRU.

Um zu untersuchen, wie die LNG-Tanker sich auf die Ergebnisse auswirken, wird die Sohlschubspannung selbst betrachtet. Dazu wird die Verteilung der Sohlschubspannung um die Anlegedalben BD1 (Nr. 4) bis BD4 (Nr. 7) herum für folgende Fälle bewertet: ohne Schiff im Gebiet, nur mit der FSRU, und schließlich mit der FSRU und einem LNG-Tanker; alle Fälle werden sowohl bei Flut als auch bei Ebbe betrachtet (Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5). Für die Situation einzelner Pfähle oder Dalben ist bekannt, dass die Anströmung vor dem Pfahl vertikal umgelenkt wird. Die jeweilige Abwärtsströmung wird nun an der Pfahlgründung abgelenkt und rollt sich zu einem Hufeisenwirbelsystem zusammen. Dieses besteht aus mehreren kettenförmigen Strukturen, die sich um die Pfahlgründung wickeln. Sie verlaufen stromabwärts des Pfahls und lösen sich schließlich auf. Aufgrund des Hufeisenwirbelsystems nimmt die Sohlschubspannung um die Pfahlgründung herum deutlich zu. Diese Zunahme der Sohlschubspannung aufgrund der einzelnen Dalben ist links in

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 25 von 32

Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5 zu sehen. Zudem steigt den Ergebnissen zufolge aufgrund von Schiffen die maximale Sohlschubspannung um alle Anlegedalben (BD1 bis BD4) herum. Der Anstieg fällt am stärksten aus, wenn sowohl die FSRU als auch ein LNG-Tanker in der Modellierung vorkommen.

Abbildung 6-6 und Tabelle 6-1 zeigen die Maximalwerte der Sohlschubspannung um alle Dalben (Nr. 1–10), die Zwischenpfähle (Nr. 11+12) und die Schlauchanschlussstationen (Nr. 13+14) herum sowohl bei Flut als auch bei Ebbe. Den Ergebnissen zufolge fällt die maximale Sohlschubspannung um jedes Hindernis am größten aus, wenn zwei Schiffe (FSRU und LNG-Tanker) vorhanden sind. Dies gilt allerdings nicht für die stromaufwärts und stromabwärts weit entfernt gelegenen Vertäudalben. Zudem wird bei Anwesenheit beider Schiffe die maximale Sohlschubspannung um die Anlegedalben BD1 (Nr. 4) bis BD4 (Nr. 7) und die Zwischenpfähle IP1 oder IP2 (Nr. 11 oder Nr. 12, je nach Strömungsrichtung) herum stärker erhöht als um die anderen Strömungshindernisse. In Tabelle 6-2 sind die entsprechenden Verstärkungsfaktoren angegeben. Diese berechnen sich aus dem Verhältnis der in Tabelle 6-1 genannten maximalen Sohlschubspannungen im Szenario mit Schiff(-en) und ohne Schiff. Die höchsten berechneten Werte kommen dabei bei den Anlege- und Vertäudalben vor und betragen 1,92 bzw. 1,61.

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlenschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU	Seite 26 von 32	

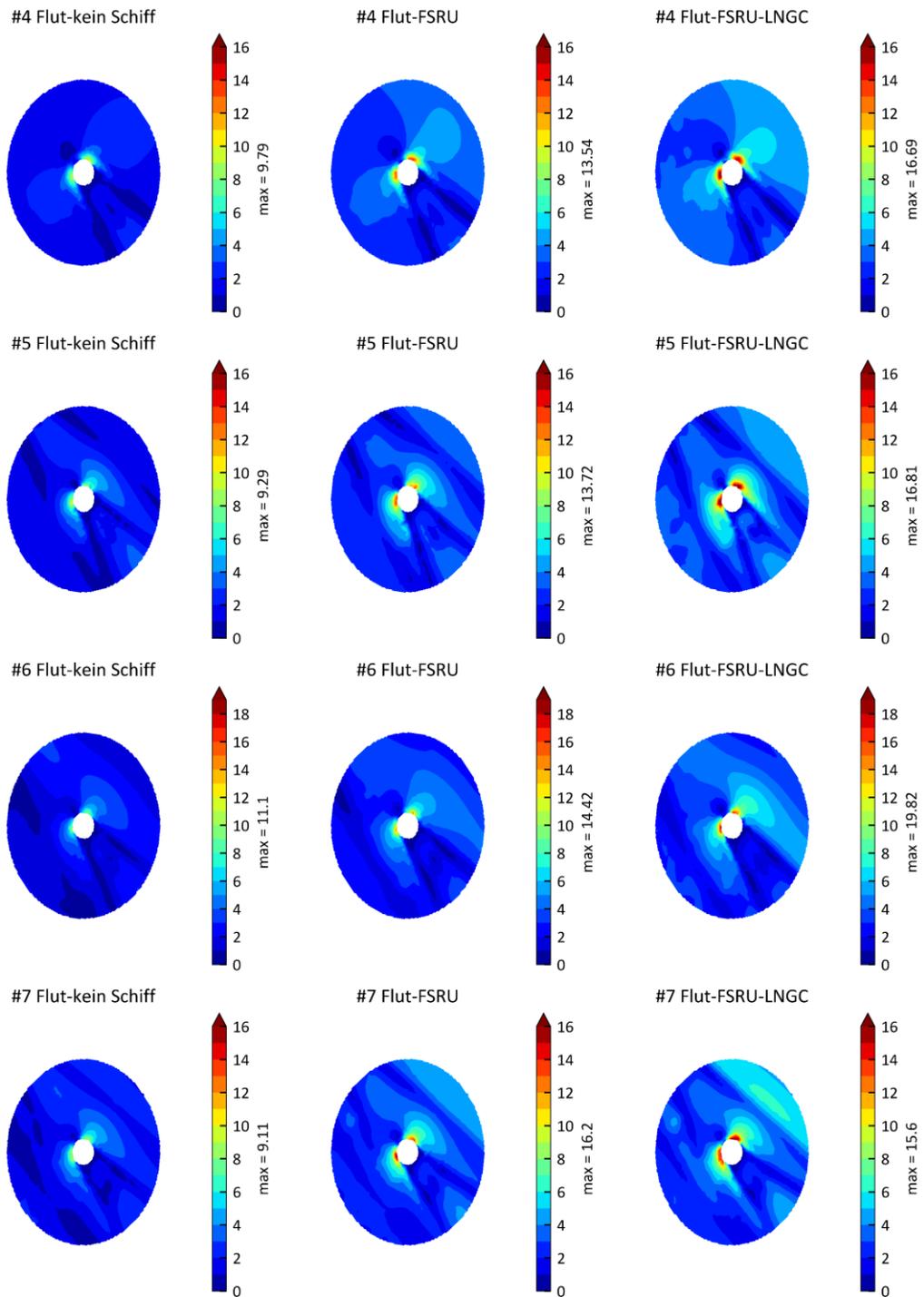


Abbildung 6-4 Verteilung der Sohlenschubspannung (Pa) um die Anlegedallen Nr. 4 bis Nr. 7 (BD1 bis BD4) herum für die Fälle: bei Flut ohne Schiffe (links), nur mit der FSRU (Mitte) und mit der FSRU und einem LNG-Tanker (rechts).

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohl Schubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 27 von 32

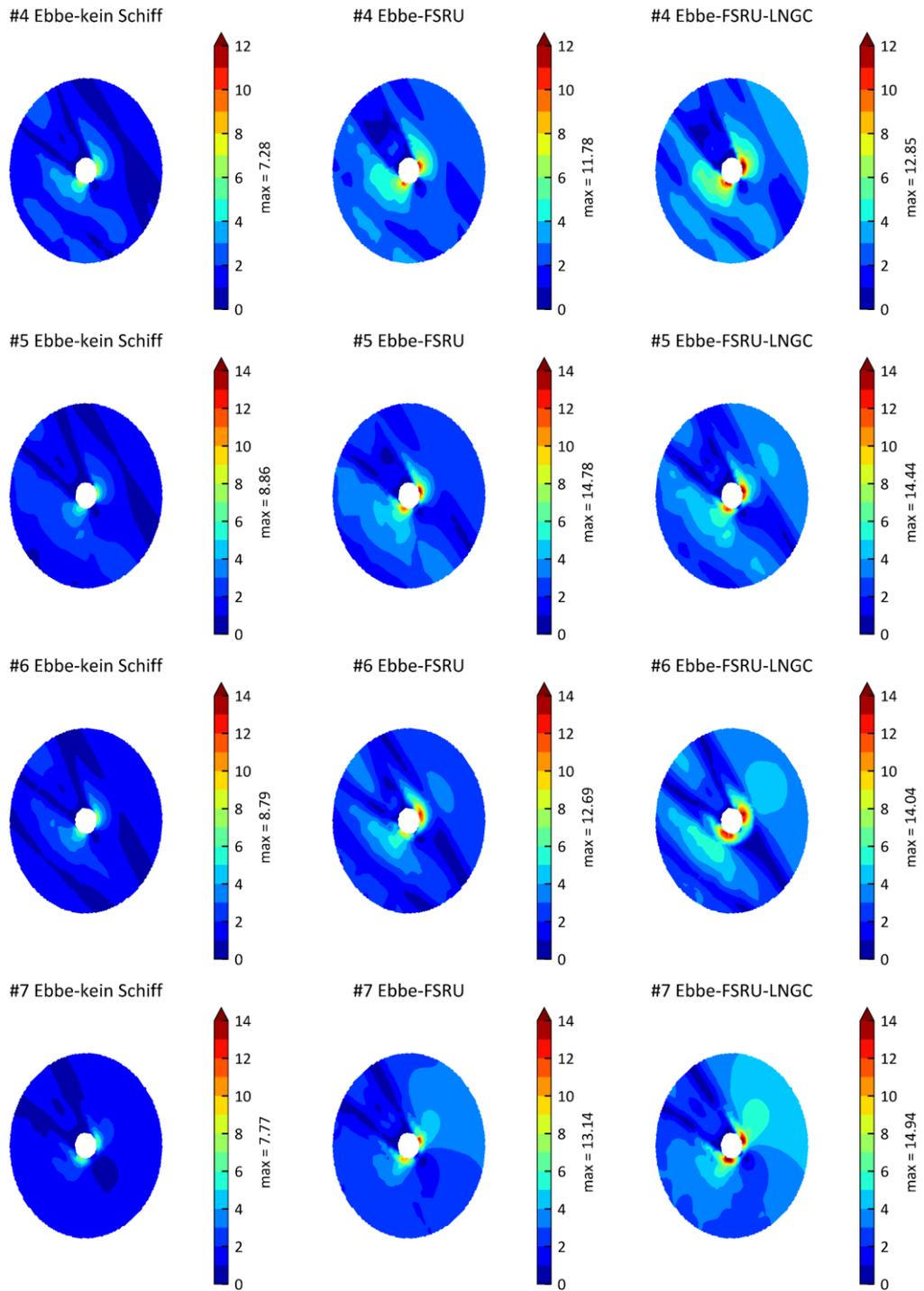


Abbildung 6-5 Verteilung der Sohl Schubspannung (Pa) um die Anlegedallen Nr. 4 bis Nr. 7 (BD1 bis BD4) herum für die Fälle: bei Ebbe ohne Schiffe (links), nur mit der FSRU (Mitte) und mit der FSRU und einem LNG-Tanker (rechts).

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 28 von 32

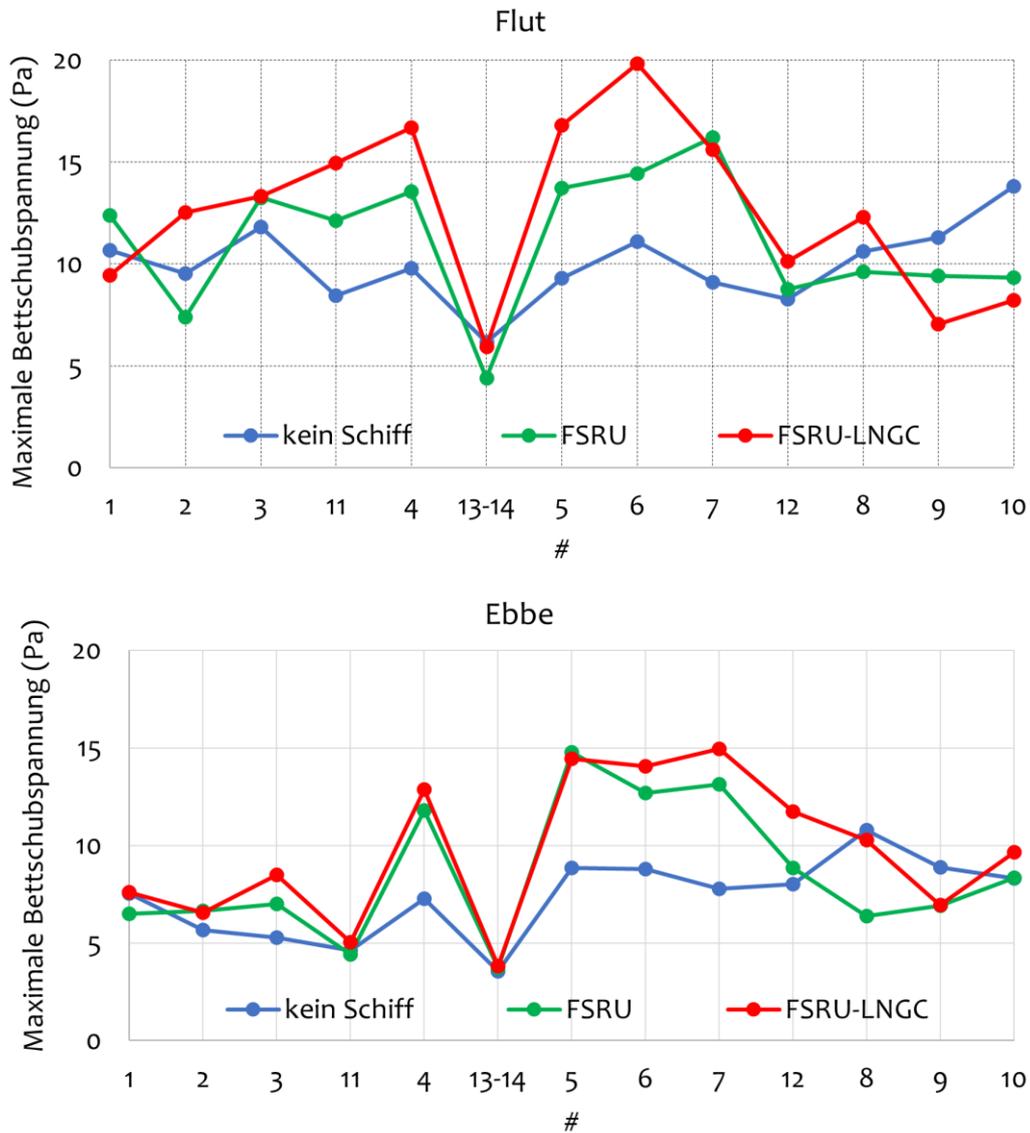


Abbildung 6-6 Maximalwerte der Sohlschubspannung (Pa) um die Dalben (Nr. 1–10), die Zwischenpfähle (Nr. 11+12) und die Schlauchanschlussstationen (Nr. 13+14) herum für die Fälle: bei Flut (oben) und bei Ebbe (unten).

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 29 von 32

Tabelle 6-1: Maximalwerte der Sohlschubspannung (Pa) um die Dalben (Nr. 1–10), die Zwischenpfähle (Nr. 11+12) und die Schlauchanschlussstationen (Nr. 13+14) herum sowohl bei Flut als auch bei Ebbe.

Nr.	Bezeichnung	Fall mit Flut			Fall mit Ebbe		
		k. Schiff	FSRU	FSRU + LNG-Tanker	k. Schiff	FSRU	FSRU + LNG-Tanker
1	MD1	10,68	12,38	9,44	7,55	6,49	7,6
2	MD2	9,54	7,4	12,51	5,67	6,64	6,56
3	MD3	11,81	13,25	13,33	5,28	6,99	8,49
11	IP1	8,44	12,13	14,96	4,61	4,42	5,04
4	BD1	9,79	13,54	16,69	7,28	11,78	12,85
13-14	PLEMs	6,17	4,4	5,92	3,56	3,72	3,83
5	BD2	9,29	13,72	16,81	8,86	14,78	14,44
6	BD3	11,1	14,42	19,82	8,79	12,69	14,04
7	BD4	9,11	16,2	15,6	7,77	13,14	14,94
12	IP2	8,27	8,75	10,12	8,02	8,84	11,73
8	MD4	10,62	9,62	12,29	10,79	6,39	10,27
9	MD5	11,3	9,4	7,04	8,88	6,9	6,93
10	MD6	13,8	9,32	8,21	8,3	8,34	9,66

Tabelle 6-2: Verstärkungsfaktoren der Sohlschubspannung auf Grundlage der Maximalwerte der Sohlschubspannung (Pa) um die Dalben (Nr. 1–10), die Zwischenpfähle (Nr. 11+12) und die Schlauchanschlussstationen (Nr. 13+14) herum sowohl bei Flut als auch bei Ebbe gemäß Tabelle 6-1.

Nr.	Bezeichnung	Fall mit Flut		Fall mit Ebbe	
		FSRU	FSRU + LNG-Tanker	FSRU	FSRU + LNG-Tanker
1	MD1	1,16	0,88	0,86	1,01
2	MD2	0,78	1,31	1,17	1,16
3	MD3	1,12	1,13	1,32	1,61
11	IP1	1,44	1,77	0,96	1,09
4	BD1	1,38	1,70	1,62	1,77
13-14	PLEMs	0,71	0,96	1,04	1,08
5	BD2	1,48	1,81	1,67	1,63
6	BD3	1,30	1,79	1,44	1,60
7	BD4	1,78	1,71	1,69	1,92
12	IP2	1,06	1,22	1,10	1,46
8	MD4	0,91	1,16	0,59	0,95
9	MD5	0,83	0,62	0,78	0,78
10	MD6	0,68	0,59	1,00	1,16

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 30 von 32

7 Schlussfolgerungen

Ziel dieser Studie war es, die Auswirkungen von Schiffen (FSRU und LNG-Tanker) auf die Sohlschubspannung im Bereich der nahe gelegenen Strukturen (Anlandeterminal-Monopiles und PLEMs) zu untersuchen. Die Studienergebnisse fließen in die Bemessung des Kolkschutzes um diese Strukturen herum ein. Es erfolgten mehrere numerische 3-D-Simulationen mit Ansys Fluent. Für folgende Fälle wurden die Flut- und Ebbeströmungen berücksichtigt: (i) in Abwesenheit von Schiffen, (ii) in Anwesenheit der FSRU und (iii) in Anwesenheit beider Schiffe.

Bei allen betrachteten Szenarien wurde die jeweilige Sohlschubspannung detailliert dokumentiert. Kurz gesagt, wirken die Schiffe sich am stärksten auf die nahe der FSRU befindlichen Anlegedalben BD1 (Nr. 4) bis BD4 (Nr. 7) aus. Insgesamt hat die Anwesenheit zweier Schiffe (FSRU und LNG-Tanker) einen größeren Einfluss als die Anwesenheit lediglich eines Schiffes (FSRU). Dieser Trend wird jedoch nicht an den stromaufwärts und stromabwärts gelegenen, weit von den Schiffen entfernten Vertäudalben beobachtet. Dort kommt es zu einer (leichten) Abnahme der maximalen Sohlschubspannung.

Hinsichtlich der Verstärkungsfaktoren für die Sohlschubspannung betragen die höchsten berechneten Werte 1,92 bzw. 1,61. Diese wurden auch für die Bemessung des Kolkschutzes an den Anlege- und Vertäudalben verwendet.

Hinweis: Seit Durchführung dieser Studie kam es zu den folgenden Änderungen:

- Die Zwischenpfähle wurden entfernt.
- Der Abstand zwischen den beiden inneren Anlegedalben BD2 und BD3 verringerte sich um etwa 18 m.

Es ist zu erwarten, dass aufgrund dieser Änderungen lokale Unterschiede im Strömungsfeld auftreten. Aus folgenden Gründen wird jedoch auch nach diesen Änderungen davon ausgegangen, dass die Bemessungsbedingungen für den Kolkschutz weiterhin gelten:

Bezogen auf die Anlegedalben

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 31 von 32

- Der Verstärkungsfaktor der Sohlschubspannung des äußeren Anlegedalben BD4 bei Ebbe ist maßgeblich für die Bemessungsbedingungen des Kolkschutzes.
- Es wird davon ausgegangen, dass die genannten Änderungen sich nur in begrenztem Maß auf die Strömungsverhältnisse bei BD4 auswirken.
- Es wurden für alle Dalben jeweils die konservativsten Verstärkungsfaktoren für die Sohlschubspannung herangezogen.

Bezogen auf die Vertäudalben

- Der Verstärkungsfaktor der Sohlschubspannung des Vertäudalben MD3 ist maßgeblich für die Bemessungsbedingungen des Kolkschutzes.
- Es wird davon ausgegangen, dass die genannten Änderungen sich nur in begrenztem Maß auf die Strömungsverhältnisse bei MD3 auswirken.
- Es wurden für alle Dalben jeweils die konservativsten Verstärkungsfaktoren für die Sohlschubspannung herangezogen.

  	Projektträger	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2047_01
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 32 von 32

8 Referenzen

Ansys, Inc., 2020. ANSYS FLUENT User's Guide. Release 20.0.