

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 1 von 84

FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke

Vierte Ausgabe	03	13.09.2023	E. Di Lauro	E. Schmidt	J. de Groot 	
Dritte Ausgabe	02	28.08.2023	E. Di Lauro	E. Schmidt	J. de Groot	
Zweite Ausgabe	01	09.06.2023	E. Di Lauro	E. Schmidt	J. de Groot	
Erste Ausgabe	00	17.11.2022	R. Somers	L. Baelus	J. de Groot	
Status	Ausgabe	Datum	Erstellt von	Geprüft von	Genehmigt von	Anmerkung

IMDC DOCINSPEC: I/RA/14330/23040

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolk schutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 2 von 84

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Der Auftrag	5
1.2	Gegenstand des Berichts.....	5
2	Gesetze, Normen und andere Regelwerke	6
3	Referenzsystem	6
4	Standortbedingungen.....	7
4.1	Bodenbedingungen.....	7
4.1.1	Sedimente	7
4.2	Metocean Bedingungen	8
4.2.1	Wellen und Wasserstand.....	8
4.2.2	Strömungsbedingungen.....	9
4.2.3	Zusammenfassung der Umgebungsverhältnisse	10
4.3	Material.....	11
5	Konfiguration des LNG-Terminals.....	11
5.1	Grundgeometrie.....	11
5.2	Bemessungsebene	12
5.3	Pfahlabmessungen	14
6	Maximale Kolk tiefe um Pfähle.....	14
6.1	Kolkverhalten.....	14
6.2	Kolk um Einzelpfahl	19
6.2.1	Kolk tiefe bei gleichbleibender Strömung.....	19
6.2.2	Kolk tiefe bei Kombination aus Wellen und Strömungen.....	21
6.2.3	Kolk tiefe aufgrund von Schiffspropellern.....	23
6.3	Kolk um Pfahlgruppe.....	24
6.4	Ergebnisse zur maximalen Kolk tiefe	25
7	Schutz vor wellen- und strömungsinduzierten Kolken um Pfähle	26
7.1	Deckschichtbemessung	26

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 3 von 84

7.1.1	Verstärkungsfaktor für die Sohlschubspannung.....	26
7.1.2	Erforderliche Steinmasse.....	29
7.1.3	Auswahl der Gewichtsklasse	29
7.2	Ergebnisse des Schutzes vor wellen- und strömungsinduzierten Kolken	30
7.2.1	Deckschicht.....	30
8	Schutz vor durch Schiffspropeller verursachte Kolke um Pfähle	32
8.1	Gesetze, Normen und andere Regelwerke	32
8.2	Umgebungsverhältnisse.....	32
8.2.1	Wasserstand.....	32
8.3	Geometrie der Anlegestelle.....	32
8.4	Bemessungsschiffe.....	33
8.4.1	Propellerposition.....	35
8.5	Bei An-/Ablegemanövern angelegte Maschinenleistung	39
8.6	Lastfälle	39
8.6.1	LNG-Tanker.....	39
8.6.2	Schlepper	41
8.7	Propellerbewegung.....	42
8.7.1	Ausströmgeschwindigkeit	42
8.7.2	Strömungsfeld des Propellerstrahls	43
8.7.3	Radiale Geschwindigkeitsverteilung	47
8.7.4	Einfluss des Ruders.....	48
8.7.5	Mehrstrahl	49
8.7.6	Einfluss des Pfahls	49
8.8	Ergebnisse der maximalen Geschwindigkeit am Boden.....	50
8.9	Steinschüttung.....	51
8.9.1	Erforderliche Steingröße.....	51
8.9.2	Erforderliche Steinmasse.....	54
8.9.3	Auswahl der Gewichtsklasse	54
8.10	Ergebnisse zur erforderlichen Steinschüttung.....	54
8.11	Sensitivitätsanalyse	58

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 4 von 84

8.11.1	Anteil an der Propellerleistung bei LNG-Tankern (Lastfall 3).....	58
8.11.2	Prozentualer Anteil an der Propellerleistung beim Schlepper <i>VB Emoe</i>	59
8.11.3	Schlepper nahe des Pfahls	60
9	Zusammenfassung des vorgeschlagenen Kolkschutzes um die Pfähle.....	62
9.1	Gewichtsklasse für die Deckschicht	62
9.2	Deckschichtdicke	62
9.3	Bemessung der Filterschicht	62
9.3.1	Geometrisch geschlossener Filter.....	63
9.3.2	Geometrisch offener Filter	64
9.3.3	Erforderliche Filterschicht	65
9.4	Horizontale Ausdehnung des Kolkschutzes	68
9.4.1	Randkolk	68
9.4.2	Fallschürze	71
9.4.3	Gesamtausdehnung des Kolkschutzes	76
9.5	Für den Kolkschutz um die Pfähle erforderliches Steinvolumen	77
10	Überwachungskriterien	78
11	Schlussfolgerungen	79
12	Referenzen	80
13	Anlage.....	82
13.1	Anlage A – Berechnung der erforderlichen Gesteinsgröße unter Berücksichtigung einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 1,88 m/s	82

	Strukturell	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolksschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 5 von 84

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 hat einen Vertrag mit IMDC geschlossen. Dieser sieht technische Unterstützung durch IMDC für die maritimen Arbeiten 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

Gegenstand dieses Berichts ist die Bereitstellung der Detailbemessung des Kolksschutzes, der um die Pfähle des LNG-Terminals herum errichtet werden soll.

Die für das Sicherung mit Steinschüttung erforderliche Steingröße sowie die Geometrie des Schutzes (Mindestdicke und -breite) werden unter Berücksichtigung der Wirkung sowohl der extremen Wellen und der

	Strukturell	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolk-schutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 6 von 84

extremen Strömung am Projektstandort als auch der Propeller der am LNG-Terminal eingesetzten Schiffe bestimmt.

2 Gesetze, Normen und andere Regelwerke

Die Bestimmung der maximalen Kolk-tiefe und die Berechnung des Kolk-schutzes um die Pfähle des LNG-Terminals erfolgt anhand folgender Hauptreferenzwerke:

- [1] BAW (2010). Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB).
- [2] CIRIA, CUR & CETMEF (2007). The Rock Manual: The use of rock in hydraulic engineering (2. Auflage). C683, CIRIA, London.
- [3] DNVGL-ST-0126 (2019), Support structures for offshore wind
- [4] Hoffmans & Verheij (2021), Scour Manual: Current-Related Erosion. CRC Press, London.
- [5] PIANC (2015). Guidelines for Protecting Berthing Structures from Scour Caused by Ships. Bericht Nr. 180.
- [6] Sumer & Fredsøe (2002), The mechanics of scour in the marine environment.
- [7] Soulsby (1997), Dynamics of marine sands.
- [8] DNV-RP-0618 (2022), Rock scour protection for monopiles
- [9] TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC -2001.07, Erläuterungsbericht.
- [10] TES - FSRU Import Terminal- Abschlußbericht 1, LNG FSRU Import Terminal Wilhelmshaven
Abschluss Bericht (V2.0) - Nautitec
- [11] TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DOC-2014, Bericht über die Umgebungsverhältnisse
- [12] TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DOC-2015, Morphologische Studie
- [13] TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2047, CFD-Modell für die Verstärkung der Sohl-schubspannung durch die Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers

3 Referenzsystem

Das Koordinatensystem wird wie folgt definiert [9]:

- Vertikale Bezugsfläche: SKN (Seekartennull)
- Koordinatensystem: ETRS89, UTM N32

Die Höhe wird in Meter auf SKN bezogen angegeben, und ihr Bezug zum mittleren Meeresspiegel lautet:

- $MSL [m] = SKN [m] + 2,49 [m]$.

	Strukturell	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 7 von 84

4 Standortbedingungen

4.1 Bodenbedingungen

4.1.1 Sedimente

Die charakteristischen Korngrößen des Bodens an den Standorten der in der Analyse berücksichtigten Dalben basieren auf der von Bioconsult GÜBAK (2023) durchgeführten geotechnischen Kampagne (2023) und sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst.

Tabelle 4-1 zeigt die Minimal-, Durchschnitts- und Maximalwerte von D_{10} , D_{15} , D_{50} , D_{60} und D_{85} anhand der Sieblinie der aus dem Meeresboden entnommenen Proben unter Berücksichtigung folgender Bohrlöcher: G-05, G-06, G-07, G-08 und G-09.

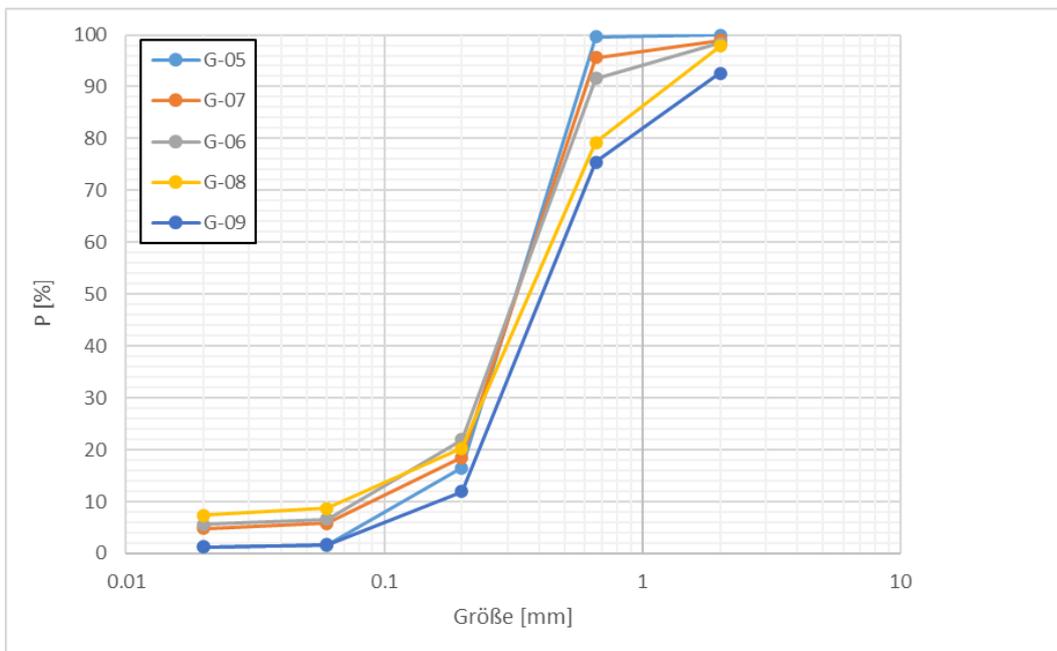


Abbildung 4-1: Partikelgrößenverteilung der Proben in der Nähe der Delphine.

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolksschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 8 von 84

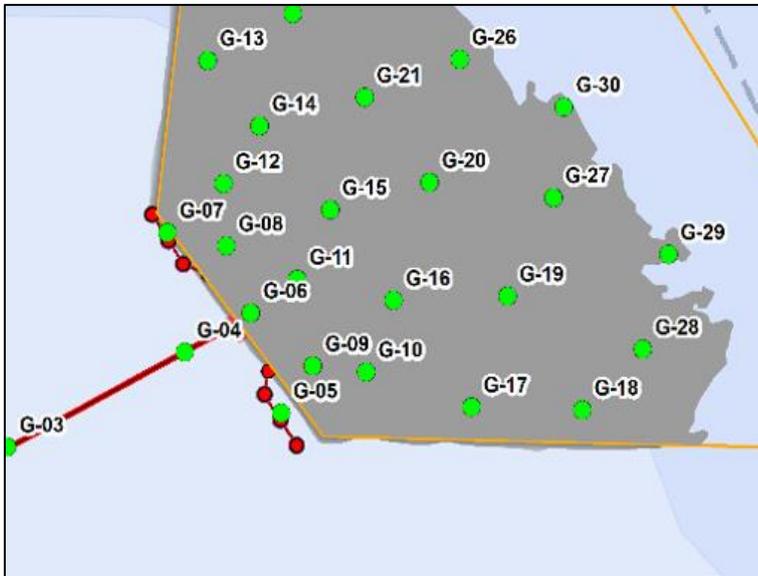


Abbildung 4-2: Standorte der in der Analyse berücksichtigten Proben G-05, G-06, G-07, G-08 und G-09.

Tabelle 4-1: In der Analyse berücksichtigte charakteristische Korngrößen des anstehenden Bodens

Parameter	Einheit	Minimalwert	Durchschnittswert	Maximalwert
D ₁₀	[mm]	0,07	0,10	0,16
D ₁₅	[mm]	0,11	0,16	0,21
D ₅₀	[mm]	0,31	0,34	0,40
D ₆₀	[mm]	0,38	0,42	0,50
D ₈₅	[mm]	0,55	0,76	1,20

4.2 Metocean Bedingungen

4.2.1 Wellen und Wasserstand

Die Wahrscheinlichkeit des gemeinsamen Auftretens der extremen Wellen- und Wasserstandsbedingungen am Projektstandort mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren wurde unter Berücksichtigung des Wasserstands sowohl bei Hoch- als auch bei Niedrigwasser bewertet. Die Einzelheiten zur Analyse werden im Bericht über die Umgebungsverhältnisse (IMDC, 2023a) ausführlich dargestellt.

Aus den Ergebnissen der Extremwertanalyse geht hervor, dass es zwischen den verschiedenen Dalben der LNG-Terminals nicht zu wesentlichen Schwankungen der Wellenhöhe kommt. Daher werden für die Bemessung des Kolksschutzes um die Pfähle diejenigen Wellenbedingungen herangezogen, die am Ort nahe der BD-2 entnommen wurden, der folgende Koordinaten hat: 53°37'50" N und 8°07'37" O (vgl. Abbildung 5-1).

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 9 von 84

Abbildung 4-3 zeigt die Wahrscheinlichkeit des gemeinsamen Auftretens der maßgeblichen Wellenhöhe H_{m0} und des entsprechenden Wasserstands bei einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren für Hochwasser (linke Darstellung) und Niedrigwasser (rechte Darstellung) am Ort nahe dem Anlegedalben BD2. Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass die größten Wellen durch Wind aus NNW entstehen (IMDC, 2023a).

Betreffend die Hochwasserbedingungen (linke Darstellung in Abbildung 4-3) wurde als maßgeblicher Fall für die Bewertung der maximalen Geschwindigkeit am Boden der Seegang ausgewählt, der durch die maximale maßgebliche Wellenhöhe H_{m0} gekennzeichnet ist, die bei niedrigstem Wasserstand auftritt:

- $H_{m0} = 2,1$ m
- $T_p = 5,20$ s
- Wasserstand = +3,33 m SKN
- Windrichtung = NNW

Betreffend die Niedrigwasserbedingungen (rechte Darstellung in Abbildung 4-3) erfolgten die Berechnungen unter Berücksichtigung der höchstmöglichen maßgeblichen Wellenhöhe H_{m0} für die einzelnen Wasserstände, die für alle betrachteten Richtungssektoren auftreten kann. Wie in Abbildung 4-3 gezeigt wird, sind die maßgeblichen Fälle für die Niedrigwasserbedingungen alle auf die Windrichtung aus NNW zurückzuführen.

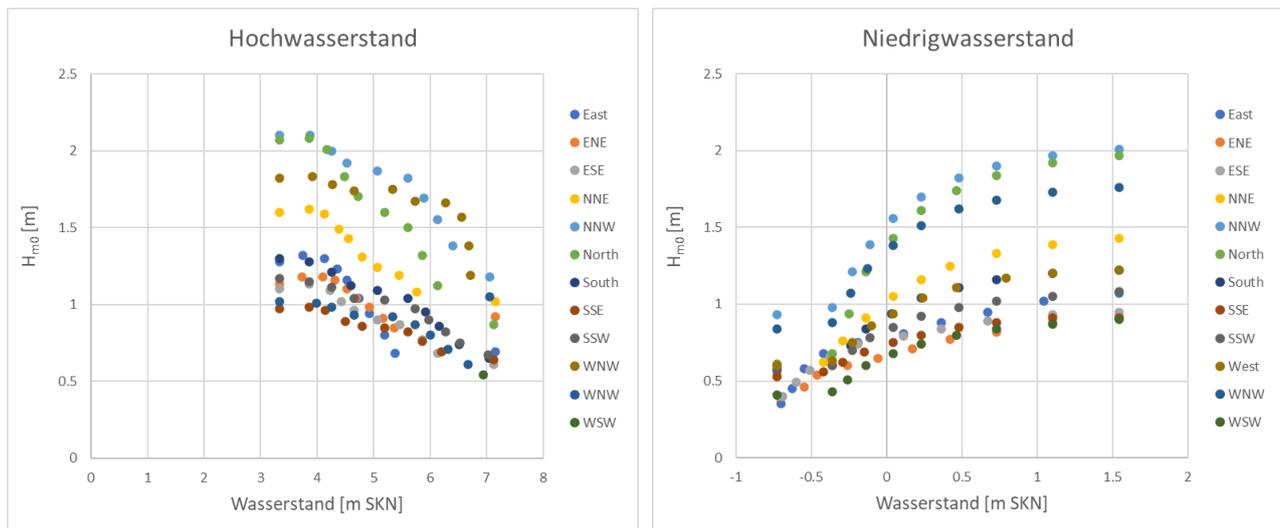


Abbildung 4-3: Wahrscheinlichkeit des gemeinsamen Auftretens der maßgeblichen Wellenhöhe H_{m0} und des Wasserstands bei einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren für Hochwasser (linke Darstellung) und Niedrigwasser (rechte Darstellung) am Ort nahe der BD2.

4.2.2 Strömungsbedingungen

Die extremen Strömungsbedingungen am Projektstandort wurden mittels einer hydrodynamischen Modellierungsstudie untersucht. Die Simulationen wurden über einen Zeitraum von drei Spring-Nipp-Zyklen

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolk schutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 10 von 84

von 15 Tagen durchgeführt, während eines Sturmereignisses, das durch die höchsten Flutwasserstände innerhalb der gemessenen Zeitreihe von 10 Jahren gekennzeichnet war.

Tabelle 4-2 enthält eine Zusammenfassung der maximalen über die Tiefe gemittelten Geschwindigkeit U_c für die Ebbe- und Flutbedingungen und den entsprechenden Wasserstand während des in der Analyse herangezogenen repräsentativen Sturmereignisses am Ort nahe der Dalben. Die Einzelheiten und Ergebnisse der Analyse sind dem Bericht über die Umgebungsverhältnisse (IMDC, 2023a) zu entnehmen.

Für die Kolkbewertung und die Bemessung des Kolk schutzes um die Pfähle werden geringfügig höhere Werte der über die Tiefe gemittelten Strömungsgeschwindigkeit U_c (m/s) herangezogen, unter Annahme eines Verstärkungsfaktors von ca. 1,25. Es ist davon auszugehen, dass diese Bemessungswerte für einen Extremsturm mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren als repräsentativ angesehen werden können.

Die Berechnungen werden daher unter Berücksichtigung einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von **1,7 m/s** bei einem Wasserstand gleich **+3,88 m SKN** für Flut und **1,6 m/s** bei einem Wasserstand gleich **+2,75 m SKN** für Ebbe vorgenommen, wie in Tabelle 4-2 angegeben.

Bei den Wasserständen in Tabelle 4-2 handelt es sich nicht um die höchsten oder niedrigsten, sondern um die Wasserstände, bei denen die Strömung bei Ebbe und Flut die höchste Durchschnittsgeschwindigkeit erreicht.

Tabelle 4-2: Max. tiefengemittelte Geschwindigkeit U_c (m/s) bei Ebbe und Flut während eines repräsentativen Sturmereignisses mit den höchsten Flutwasserständen innerhalb der gemessenen Zeitreihe von 10 Jahren, und für die Analyse des Kolk schutzes berücksichtigte Bemessungswerte

	Wasserstand [m SKN]	U_c (m/s) – Sturmereignis	U_c (m/s) – Bemessungswert
Ebbe	+ 2,75	1,24	1,6
Flut	+ 3,88	1,34	1,7

4.2.3 Zusammenfassung der Umgebungsverhältnisse

Für die Analyse der maximalen Geschwindigkeit am Boden des Anlandeterminals werden vier verschiedene Szenarien betrachtet, die in Tabelle 4-3 zusammengefasst sind.

Für die Szenarien 1 und 2 wird von einer über die Tiefe gemittelten Strömung gleich Null ausgegangen, da die Gezeitenströmung beim höchsten und niedrigsten Wasserstand (WL) Null beträgt.

Für die Szenarien 3 und 4 wird davon ausgegangen, dass die maximale über die Tiefe gemittelte Strömung bei einem Wasserstand gleich +2,66 m SKN (Ebbe) und +3,96 m SKN (Flut) eintritt. Dies wird kombiniert mit den höchsten Wellenbedingungen bei einem Wiederkehrintervall (RP) von 100 Jahren.

	Strukturell	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolksschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 11 von 84

Tabelle 4-3: Zusammenfassung der für die Analyse der maximalen strömungs- und welleninduzierten Geschwindigkeit am Boden betrachteten Szenarien.

	Wasserstand	Wellenbedingungen	Über die Tiefe gemittelte Strömung
Szenario 1	JP (HWL + H_{m0}) – 100 RP		–
Szenario 2	JP (LWL + H_{m0}) – 100 RP		–
Szenario 3	WL = +3,88 m SKN	$H_{m0} = 2,1$ m $T_p = 5,20$ s	$U_c = 1,7$ m/s (Flut)
Szenario 4	WL = +2,75 m SKN	$H_{m0} = 2,1$ m $T_p = 5,20$ s	$U_c = 1,6$ m/s (Ebbe)

4.3 Material

Für die Meerwasserdichte wird ein Wert von **1025 kg/m³** angesetzt, ausgehend von der Erläuterungsbericht [9].

Als Steindichte für den Kolksschutz werden **2650 kg/m³** angenommen.

5 Konfiguration des LNG-Terminals

5.1 Grundgeometrie

Das LNG-Terminal wird durch 10 Haupt-Monopiles gestützt. Wie in der Gesamtansicht unten (*TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DWG_2109.03*) dargestellt ist, besteht das Anlandeterminal im Einzelnen aus vier Anlegedalben (breasting dolphins, BD) und sechs Vertäudalben (mooring dolphins, MD). Die Dalben sind über neun Brücken miteinander verbunden. Abbildung 5-1 zeigt die Konfiguration der Pfähle sowie ihre Koordinaten.

  	Strukturell	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 12 von 84

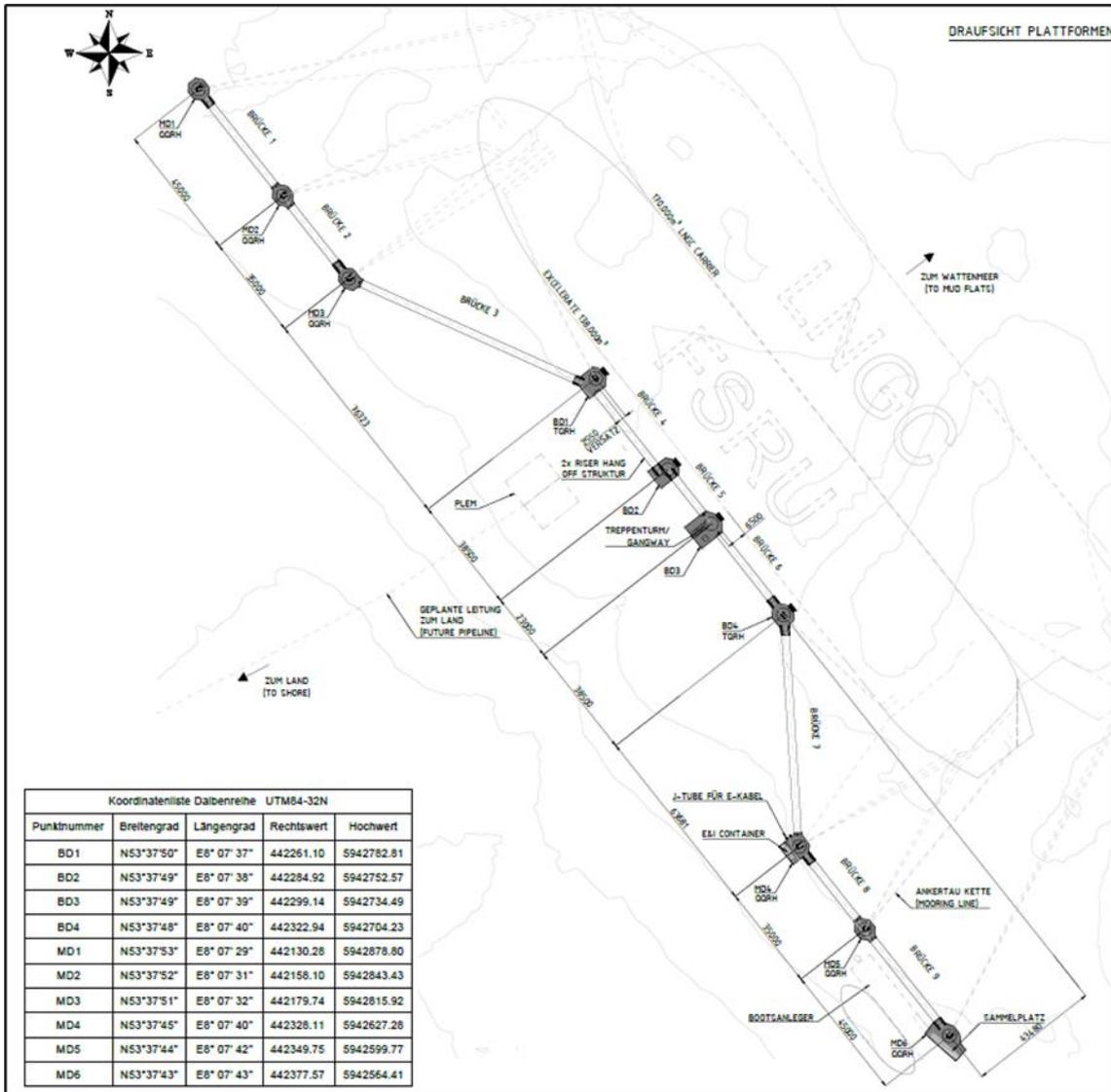


Abbildung 5-1: Gesamtansicht der Konfiguration des Anlandeterminals (TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DWG_2109.03)

5.2 Bemessungsebene

Die Ebene der Bemessungssohle besteht aus einem flachen Bereich (Baggergrube) mit einer minimalen Ausbringungsebene von $-14,0$ m SKN. Als maximal zulässige Ausbringungsebene ist $-14,5$ m SKN bestimmt, wie im roten Bereich in Abbildung 5-2 dargestellt. Da bei minimaler Ausbringungsebene aufgrund von Wellen, Strömung und Schiffspropellern eine höhere Geschwindigkeit herrscht, wird in dieser Analyse eine Bemessungstiefe von **$-14,0$ SKN** herangezogen. Von dieser Ebene aus wird die Ausbringungsebene dann mit der vorhandenen Sohlebene mit einem **natürlichen Gefälle von 1:n** verbunden. Das natürliche Gefälle wird in dieser Analyse mit 1:5 angesetzt. Nur im Bereich der PLEM ist die Baggersohle mit einer Neigung von **1:5** an die bestehende Sohle angeschlossen.

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 13 von 84

Die Bemessungstiefe der Anlegedalben liegt bei $-14,0$ m SKN. Die Meeresbodenebene der Vertäudalben ist weniger tief, da diese Pfähle in der vorhandenen Sohlebene eingespannt sind, in einem Bereich von $-11,0$ bis $-12,2$ m SKN, wie in der Skizze in Abbildung 5-3 dargestellt.

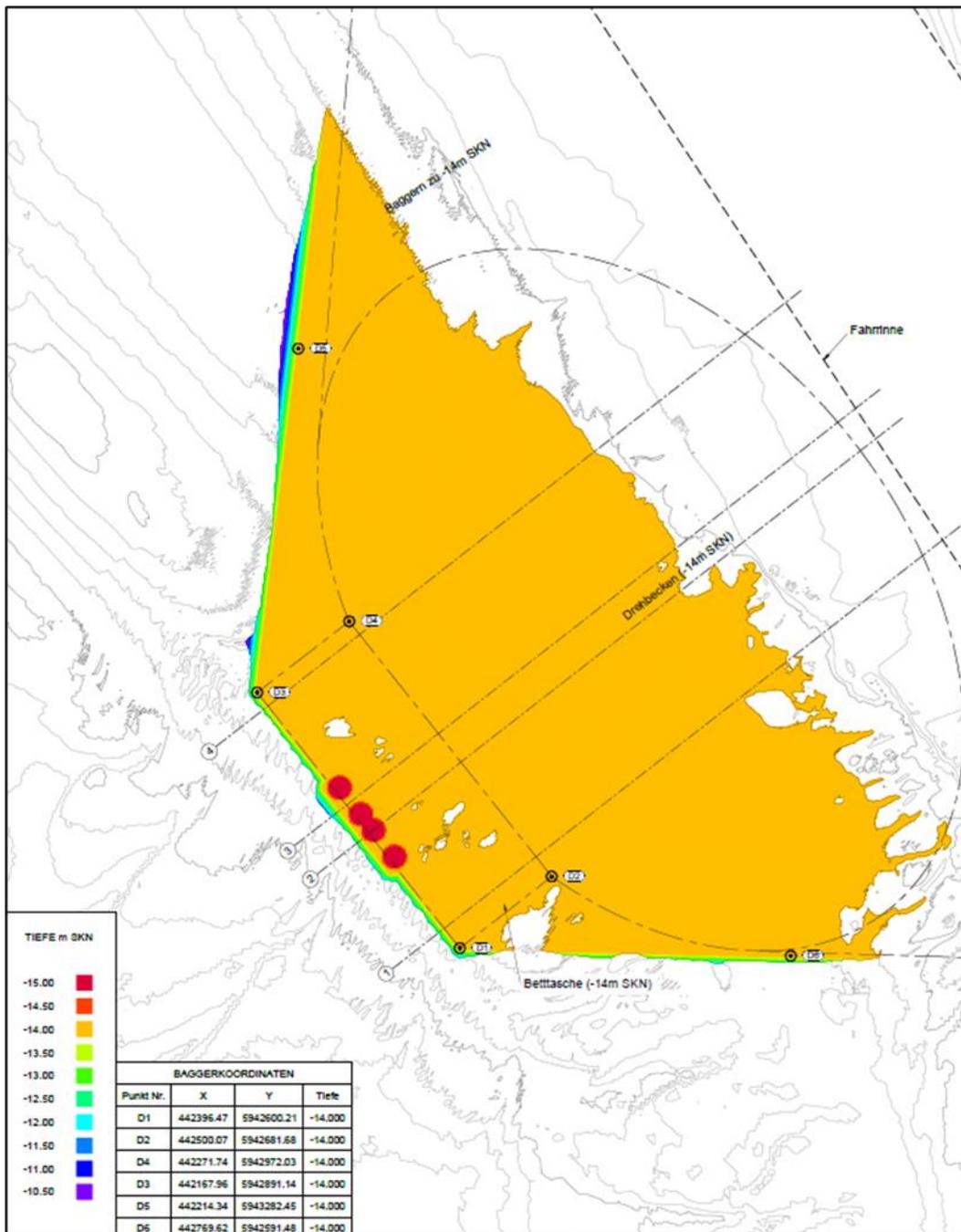


Abbildung 5-2: Draufsicht der Ausbringungsebene am Projektstandort (TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DWG-2011.13_Ausbaggerungsarbeiten für FSRU-Liegeplatz).

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkshutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 14 von 84

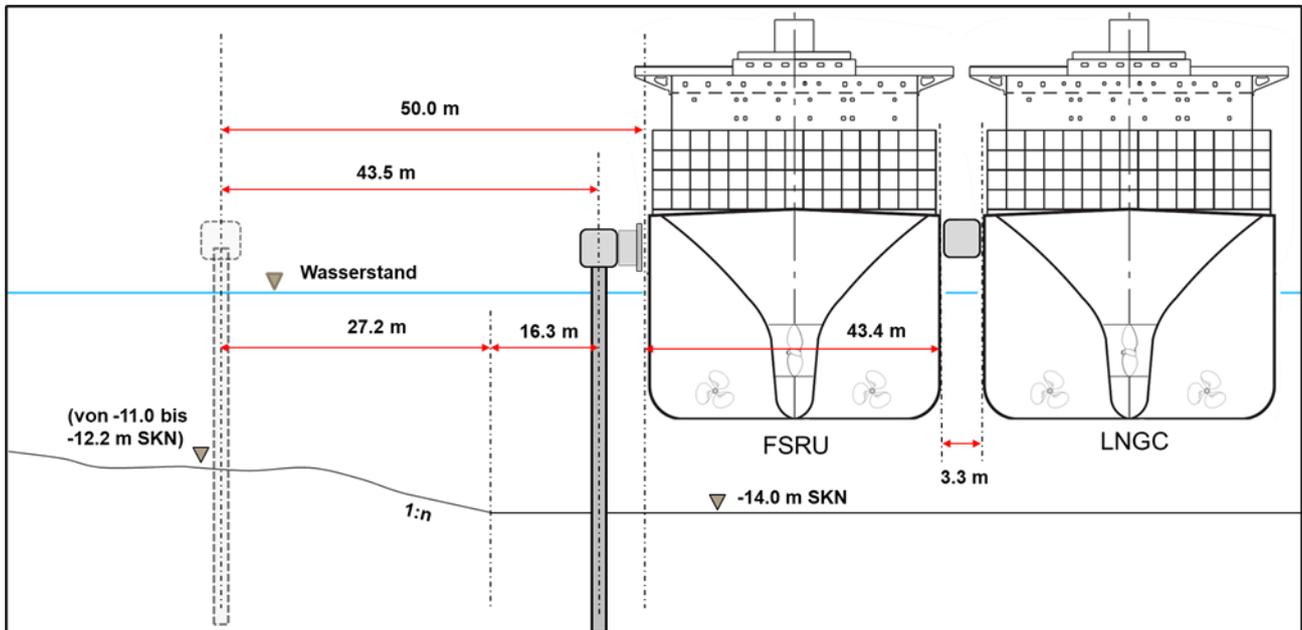


Abbildung 5-3: Skizze eines typischen Querschnitts mit der bemessungsgemäßen Ausbringungsebene der Anlegedalben von -14,0 m SKN und der Sohlebene der Vertäudalben in einem Bereich von -11,0 bis -12,2 m SKN.

5.3 Pfahlabmessungen

Die Haupt-Monopiles (Abweis- und Vertäudalben) des Anlandeterminals haben folgende (äußere) Durchmesser [9]:

- Durchmesser Monopiles: 4,5 m

6 Maximale Kolkentiefe um Pfähle

6.1 Kolkverhalten

Die maximale Kolkentiefe von wellen- und strömungsinduzierten Kolken um einen Pfahl ist abhängig vom Strömungsverhalten über der Sohle: Dabei wird zwischen Reinwasserkolken und Kolken bei mobiler Sohle unterschieden.

- Reinwasserbedingungen: Es erfolgt kein Sedimenttransport außerhalb des Einflussbereichs des Pfahls:

$$\theta_{wc} < \theta_{cr} \quad (6-1)$$

- Bedingungen bei mobiler Sohle: Es erfolgt Sedimenttransport entlang der ganzen Gewässersohle:

$$\theta_{wc} > \theta_{cr} \quad (6-2)$$

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 15 von 84

Wobei:

- θ_{wc} der Shields-Parameter ist, ausgewertet im Hinblick auf die kombinierten Bedingungen unregelmäßiger Wellen und Strömungen;
- θ_{cr} der kritische Shields-Parameter ist;

θ_{wc} wird anhand des in Soulsby (1997) vorgeschlagenen und in Roulund et al. (2016) beschriebenen Ansatzes unter Berücksichtigung der maximalen Sohlschubspannung berechnet τ_{max} , die sich durch Kombination der Sohlschubspannung durch die Strömung und Wellen herleitet τ_c , und τ_w :

$$\theta_{wc} = \frac{\tau_{max}}{g (\rho_s - \rho_w) D_{50}} \quad (6-3)$$

wobei:

- τ_{max} die maximale Sohlschubspannung ist;
- g die Erdbeschleunigung ist (9,81 m/s²);
- ρ_s die Dichte der Kornpartikel ist;
- ρ_w die Wasserdichte ist;
- D_{50} der mittlere Durchmesser der Sohlschicht ist;

Im Hinblick auf die maximale Sohlschubspannung aufgrund der Wirkung von Wellen und Strömungen berechnet sich τ_{max} wie folgt (DNV, 2022):

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\tau_m^2 + \tau_w^2 + 2\tau_w\tau_m \left| \cos\left(\frac{\alpha\pi}{180}\right) \right| \right)} \quad (6-4)$$

wobei α der Winkel zwischen der Strömung und den Wellen (in Grad) ist und τ_m die mittlere Sohlschubspannung, die gleich der Sohlschubspannung aufgrund von Strömung ist, verstärkt durch das Auftreten von Wellen:

$$\tau_m = \tau_c \left[1 + 1.2 \left(\frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3.2} \right] \quad (6-5)$$

Die strömungs- (τ_c) und welleninduzierten (τ_w) Sohlschubspannungen werden auf der Grundlage der Strömungsgeschwindigkeit bzw. der Wellenumlaufgeschwindigkeit an der Sohle berechnet, und zwar nach der von Soulsby (1997) vorgeschlagenen und in Roulund et al. (2016) beschriebenen Methode:

$$\tau_c = \rho_w U_f^2 \quad (6-6)$$

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 16 von 84

wobei:

$$U_f = \frac{U_c}{6.0 + 2.5 \ln(h/k_s)} \quad (6-7)$$

wobei:

U_f die Reibungsgeschwindigkeit ist;

U_c die über die Tiefe gemittelte Strömungsgeschwindigkeit über die gesamte Wassertiefe ist;

k_s die Kornrauigkeit ist ($2,5D_{50}$);

$$\tau_m = \frac{1}{2} \rho_w f_w U_m^2 \quad (6-8)$$

wobei:

$$U_m = \frac{H_s}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{g}{h}} \exp \left\{ - \left[\frac{3.65}{T_z} \sqrt{\frac{h}{g}} \right]^{2.1} \right\} \quad (6-9)$$

$$f_w = \begin{cases} 0.32 \left(\frac{A}{k_s} \right)^{-0.8} & 0.2 < \left(\frac{A}{k_s} \right) < 2.92 \\ 0.237 \left(\frac{A}{k_s} \right)^{-0.52} & 2.92 < \left(\frac{A}{k_s} \right) < 727 \\ 0.04 \left(\frac{A}{k_s} \right)^{-0.25} & \left(\frac{A}{k_s} \right) \geq 727 \end{cases} \quad (6-10)$$

$$A = \frac{U_m T_p}{2\pi} \quad (6-11)$$

wobei:

U_m die sohlnahe Wellenumlaufgeschwindigkeit für unregelmäßige Wellen ist;

T_z die Nulldurchgang-Wellenperiode ist;

f_w der Wellenreibungsfaktor ist;

A die sohlnahe Wellenpartikelamplitude ist;

Die zur Berechnung des kritischen Shields-Parameters θ_{cr} , einer Funktion des dimensionslosen Korndurchmessers D^* , herangezogene Gleichung ist die nach Soulsby (1997):

$$\theta_{cr} = \frac{0.30}{1 + 1.2 \cdot D^*} + 0.055[1 - \exp(-0.020 \cdot D^*)] \quad (6-12)$$

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolk schutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 17 von 84

Der dimensionslose Korndurchmesser D^* berechnet sich wie folgt:

$$D^* = \left[\frac{g(s-1)}{\nu^2} \right]^{1/3} D_{50} \quad (6-13)$$

wobei:

- ν die kinematische Viskosität des Wassers ist (1,36E-6 m²/s);
- s die relative Dichte der Kornpartikel ist ρ_s/ρ_w ;

Die Bedingungen der Strömungssohle werden anhand der oben beschriebenen Methode geprüft. Den Ergebnissen zufolge herrschen im Projektbereich Kolkbedingungen bei mobiler Sohle, da $\theta_{wc} > \theta_{cr}$. Die maßgeblichen Fälle, die zu einer höheren Geschwindigkeit am Boden führen, sind auf die Strömungen zurückzuführen (Szenarien 3 und 4). Die Einzelheiten zu den Berechnungen für die Szenarien 3 und 4 sind in Tabelle 6-1 dargelegt.

Die maximale Kolktiefe um den Pfahl wird daher unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Formeln für die Kolkbedingungen bei mobiler Sohle berechnet.

Tabelle 6-1: Auswertung des Kolkverhaltens für den maßgeblichen Fall (Szenarien 3 und 4) am Ort der Vertäu- und Anlegedalben

Lastfälle	Einheit	Szenario 3		Szenario 4	
		Wert	Wert	Wert	Wert
Eingabeparameter					
Dalbentyp	[-]	Anlegedalben	Vertäudalben	Anlegedalben	Vertäudalben
Kinematische Viskosität ν	[m ² /s]	1.36E-06	1.36E-06	1.36E-06	1.36E-06
Erdbeschleunigung g	[m/s ²]	9,81	9,81	9,81	9,81
Wasserdichte ρ_w	[kg/m ³]	1025	1025	1025	1025
Dichte der Kornpartikel ρ_s	[kg/m ³]	2650	2650	2650	2650
Wassertiefe h	[m]	17,88	14,88	16,75	13,75
Maßgebliche Wellenhöhe H_{m0}	[m]	2,10	2,10	2,10	2,10

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 18 von 84

Wellenkammerperiode T_p	[s]	5,16	5,16	5,16	5,16
Über die Tiefe gemittelte Strömungsgeschwindigkeit U_c	[m/s]	1,7	1,7	1,6	1,6
Sohlschubspannungen aufgrund von Strömungen					
Relative Dichte s	[-]	2,59	2,59	2,59	2,59
Reibungsgeschwindigkeit U_r	[m/s]	0,06	0,06	0,05	0,05
Sohlschubspannung aufgrund von Strömungen τ_c	[N/m ²]	3,1	3,2	2,8	2,9
Kornrauigkeit k_s	[m]	0,0009	0,0009	0,0009	0,0009
Wellenschubspannungen					
Wellenumlaufgeschwindigkeit U_w	[m/s]	0,13	0,20	0,15	0,23
Halborbitale Auslenkung A	[m]	0,11	0,16	0,12	0,19
Wellenreibungsfaktor f_w	[-]	0,02	0,02	0,02	0,01
Amplitude der Wellensohlschubspannung τ_w	[N/m ²]	0,16	0,31	0,20	0,38
Kombinierte Wellenschubspannungen					
Mittlere Sohlschubspannung innerhalb eines Wellenzyklus τ_m	[N/m ²]	3,11	3,20	2,78	2,88
Maximale Sohlschubspannung innerhalb eines Wellenzyklus τ_{max}	[N/m ²]	3,27	3,52	2,98	3,26
Shields-Parameter					
Shields-Parameter (Strömung + Wellen) θ_{wc}	[-]	0,60	0,65	0,55	0,60
Dimensionsloser Korndurchmesser D^*	[-]	7,12	7,12	7,12	7,12
Schwellenwert Shields-Parameter, θ_{cr}	[-]	0,039	0,039	0,039	0,039

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolk schutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 19 von 84

Kolkverhalten	[-]	Kolk bei mobiler Sohle			
---------------	-----	------------------------	------------------------	------------------------	------------------------

6.2 Kolk um Einzelpfahl

6.2.1 Kolk tiefe bei gleichbleibender Strömung

Der Prozess der Kolkbildung um Pfähle bei gleichbleibenden Strömungen wurde von mehreren Prüfern untersucht (Abbildung 6-1). In diesem Abschnitt werden diejenigen Formeln zur maximalen Kolk tiefe behandelt, die sich nach der Erfahrung von Hoffmans & Verheij (2021) und IMDC auf die Prädiktoren mit der höchsten Genauigkeit für Offshore-Bauwerke beziehen.

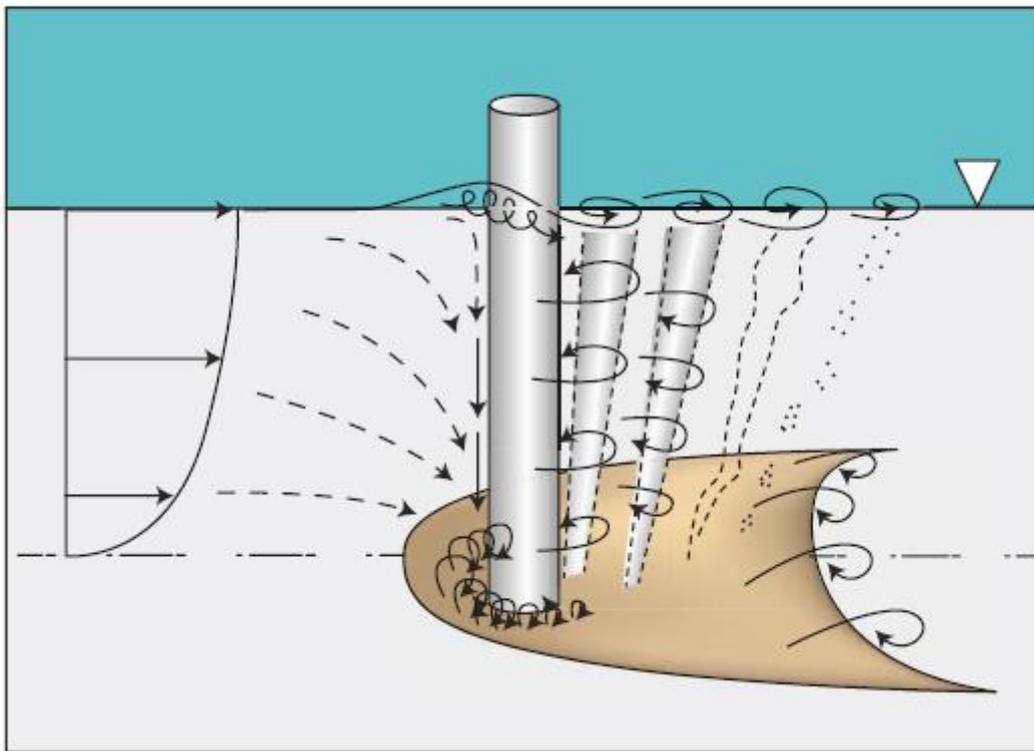


Abbildung 6-1: Wichtigste Strömungseigenschaften für die Bildung des Strömungsfelds um einen zylinderförmigen Rundpfahl (Hoffmans and Verheij, 2021)

Hoffmans & Verheij (2021) wiesen darauf hin, dass sich die durchschnittliche Kolk tiefe um Rundpfähle bei gleichbleibender Strömung durch folgendes Verhältnis beschreiben lässt:

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolk schutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 20 von 84

$$\frac{S_{eq}}{D_{pile}} = 1.5K_i \tanh\left(\frac{d}{D_{pile}}\right) \quad (6-14)$$

Hinsichtlich des Bemessungskonzepts schlugen Hoffmans & Verheij (2021) vor, den Faktor 2,0 anstelle von 1,5 heranzuziehen und damit einen Sicherheitsfaktor von 1,3 (2,0/1,5) anzunehmen:

$$\frac{S_{eq}}{D_{pile}} = 2.0K_i \tanh\left(\frac{d}{D_{pile}}\right) \quad (6-15)$$

wobei:

S_{eq} die maximale Kolk tiefe ist;

D_{Pfhahl} der Pfahldurchmesser ist;

d die Wassertiefe ist;

k_i der Korrekturfaktor (Hoffmans and Verheij, 2021) ist.

Der Korrekturfaktor k_i berechnet sich wie folgt:

$$K_i = K_g K_s K_\omega \quad (6-16)$$

wobei:

K_g der Faktor für den Einfluss der Körnung des Sohlmaterials ist. Für Kolken bei mobiler Sohle wird angenommen, dass der Faktor gleich 1,0 ist, entsprechend den Vorschlägen von Breusers und Raudkivi (1991);

K_s der Faktor der Form des Anlegers ist. Bei zylinderförmigen Pfählen beträgt der Faktor 1,0;

K_ω der Faktor für die Ausrichtung des Anlegers an der Strömung ist. Bei zylinderförmigen Pfählen beträgt der Faktor 1,0.

Sumer et al. (1992) haben für die Berechnung der maximalen Kolk tiefe folgendes Verhältnis vorgeschlagen:

$$\frac{S_{eq}}{D_{pile}} = 1.3 + n \sigma_s \quad (6-17)$$

wobei:

σ_s die Standardabweichung der Kolk tiefe ist (= 0,7);

n der Multiplikationsfaktor der Standardabweichung ist (= 1,0 für das Bemessungskonzept).

Die untere Grenze ($n = 0$) entspricht einer durchschnittlichen maximalen Kolk tiefe, während bei der oberen Grenze ($n = 1,0$) ein gewisser Auslegungsspielraum berücksichtigt wird. Neuere Messungen bei Offshore-Windkraftanlagen haben gezeigt, dass sich das Kolkloch der oberen Grenze nähern kann, sodass kein Auslegungsspielraum mehr bleibt. Zu Bemessungszwecken wird daher $n = 1$ angesetzt.

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolk schutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 21 von 84

Den Boon et al. (2004) haben für die Berechnung der maximalen Kolk tiefe um zylinderförmige Pfähle folgendes Verhältnis vorgeschlagen:

$$\frac{S_{eq}}{D_{pile}} = 1.75 \quad (6-18)$$

6.2.2 Kolk tiefe bei Kombination aus Wellen und Strömungen

Die Kolk tiefe bei einer Kombination aus Wellen und Strömungen ist sowohl von der Keulegan-Carpenter-Zahl KC als auch von dem dimensionslosen Parameter U_{cw} abhängig (Sumer and Fredsøe, 2002):

$$U_{cw} = \frac{U_c}{U_c + U_m} \quad (6-19)$$

wobei:

U_c die Strömungsgeschwindigkeit ist;

U_m die Amplitude der bodennahen Wellenumlaufgeschwindigkeit bei unregelmäßigen Wellen ist, wie in Abschnitt 6.1 angegeben).

Nach Sumer und Fredsøe (2002) tendiert die Kolk tiefe bei geringeren U_{cw} -Werten zum Nur-Wellen-Fall, während sie bei höheren U_{cw} -Werten zum Nur-Strömung-Fall tendiert (vgl. Schaubild von Sumer und Fredsøe (2002) in Abbildung 6-2).

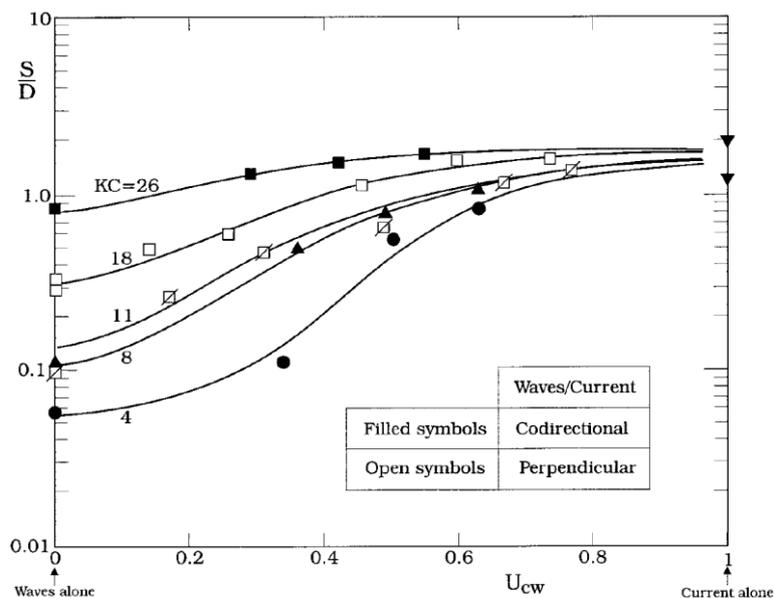


Abbildung 6-2: Maximale Kolk tiefe bei Kombination aus Wellen und Strömungen (Sumer and Fredsøe, 2002)

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolk schutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 22 von 84

Sumer und Fredsøe (2002) haben zur Bewertung der Kolk tiefe bei einer Kombination aus Wellen und Strömungen die folgende Formel vorgeschlagen:

$$\frac{S_{eq}}{D_{pile}} = 1.3 [1 - \exp(-B(KC - C))] \quad \text{for } KC > 4 \quad (6-20)$$

wobei:

$$B = 0.03 + \frac{3}{4} U_{cw}^{2.6} \quad (6-21)$$

$$C = 6 \exp(-4.7 U_{cw}) \quad (6-22)$$

Zur Keulegan-Carpenter-Zahl KC – diese berechnet sich wie folgt:

$$KC = \frac{U_m T_p}{D_{pile}} \quad (6-23)$$

wobei:

T_p die Wellenkammperiode ist;

U_m die Amplitude der bodennahen Wellenumlaufgeschwindigkeit bei unregelmäßigen Wellen ist (wie in Abschnitt 6.1 angegeben)

D_{Pfund} der Pfahldurchmesser ist

Im Hinblick auf KC -Werte, die kleiner als ca. 4 sind, kommen Sumer und Fredsøe (2002) zum Schluss, dass die welleninduzierte Kolk tiefe praktisch Null beträgt. Da die berechnete KC für alle Szenarien zwischen 0,08 und 0,26 liegt (vgl. Tabelle 6-2), wird die maximale Kolk tiefe um den Pfahl unter Berücksichtigung der Gleichungen berechnet, die für gleichbleibende Strömung vorgeschlagen wurden, wie in Abschnitt 6.2.1 beschrieben.

		Strukturell		
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN		FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolk schutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03	
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU			Seite 23 von 84	

Tabelle 6-2: Berechnungsergebnisse von Sumer und Fredsøe (2002) und Bewertung des Wellenbeitrags zur Kolk tiefe.

Parameter	Einheit	Wert	Wert	Wert	Wert
Szenario	[-]	3	3	4	4
Dalbentyp	[-]	Anlegedalben	Vertäudalben	Anlegedalben	Vertäudalben
B	[-]	0,65	0,59	0,63	0,56
C	[-]	0,08	0,09	0,08	0,10
D _{Pfahl}	[m]	4,50	4,50	4,50	4,50
U _c	[m/s]	1,7	1,7	1,6	1,6
U _m	[m/s]	0,13	0,20	0,15	0,23
U _{cw}	[m/s]	0,93	0,89	0,92	0,87
T _p	[s]	5,20	5,20	5,20	5,20
KC	[-]	0,15	0,23	0,17	0,26
Wellenbeitrag	[Ja/Nein]	nein	nein	nein	nein

6.2.3 Kolk tiefe aufgrund von Schiffspropellern

Die maximale Kolk tiefe um die Pfähle wird auch unter Berücksichtigung der Wirkung der Schiffspropeller bewertet.

In den von der PIANC herausgegebenen „Guidelines for protecting berthing structures from scour by ships“ [Leitlinien für den Schutz von Anlegestellen vor Kolk durch Schiffe], die von der PIANC-Arbeitsgruppe 180 (2015) entwickelt und durch das „Corrigendum of the Guidelines“ (2017) [Berichtigung der Leitlinien] berichtigt wurden, wird darauf hingewiesen, dass die endgültige Kolk tiefe in dem Fall, dass der Pfahldurchmesser wesentlich geringer ist als die Wassertiefe, anhand folgender konservativen Formel geschätzt werden kann (Bemessungskonzept):

$$\frac{S_{eq}}{D_{pile}} = 2.0 \quad (6-24)$$

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 24 von 84

6.3 Kolk um Pfahlgruppe

Die Wirkung der Pfahlgruppe wird unter Berücksichtigung des Faktors bewertet, der von Hoffmans & Verheij (2021) für Rundpfähle vorgeschlagen wurde, wie in Tabelle 6-3 angegeben. Angesichts der Tatsache, dass sowohl die Anlege- als auch die Vertäudalben an der Fließrichtung der Strömung ausgerichtet sind, beträgt der Mindestabstand zwischen den Pfahlmitten (Abbildung 6-3):

- 23 m bei den Anlegedalben.
- 35 m bei den Vertäudalben.

Ausgehend von einem Durchmesser der Abweis- und Vertäudalben von 4,5 m entspricht das Verhältnis von Zwischenraum und Pfahldurchmesser 5,1 bei Anlegedalben und 7,7 bei Vertäudalben. Da die Strömungsgeschwindigkeit hauptsächlich auf die Gezeitenströmung zurückzuführen ist, wird als Verstärkungsfaktor für die Berechnung der maximalen Kolkentiefe aufgrund der Pfahlgruppe der Verstärkungsfaktor herangezogen, der in Tabelle 6-3 für den vorderen Anleger vorgeschlagen wird.

Durch Interpolation der von Hoffmans & Verheij (2021) vorgeschlagenen Werte, die in Tabelle 6-3 angegeben werden, wird in dieser Analyse zur Bewertung der maximalen Kolkentiefe um die Pfähle des LNG-Terminals für die Kolkentiefe ein Verstärkungsfaktor von **1,12** bei Abweispfählen und von **1,11** bei Dalbenpfählen berücksichtigt.

Tabelle 6-3: Verstärkung für Kolkentiefe für Pfahlgruppe nach Hoffmans & Verheij (2021)

Flow direction	Pier position	Pier spacing	Front pier	Rear pier
		1b	1.0	0.9
		2-3b	1.15	0.9
		>15b	1.0	0.8
		1b	1.9	1.9
		5b	1.15	1.2
		>8b	1.0	1.0
		1b	1.9	1.9
		2-3b	1.2	1.2
		>8b	1.0	1.0

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 25 von 84

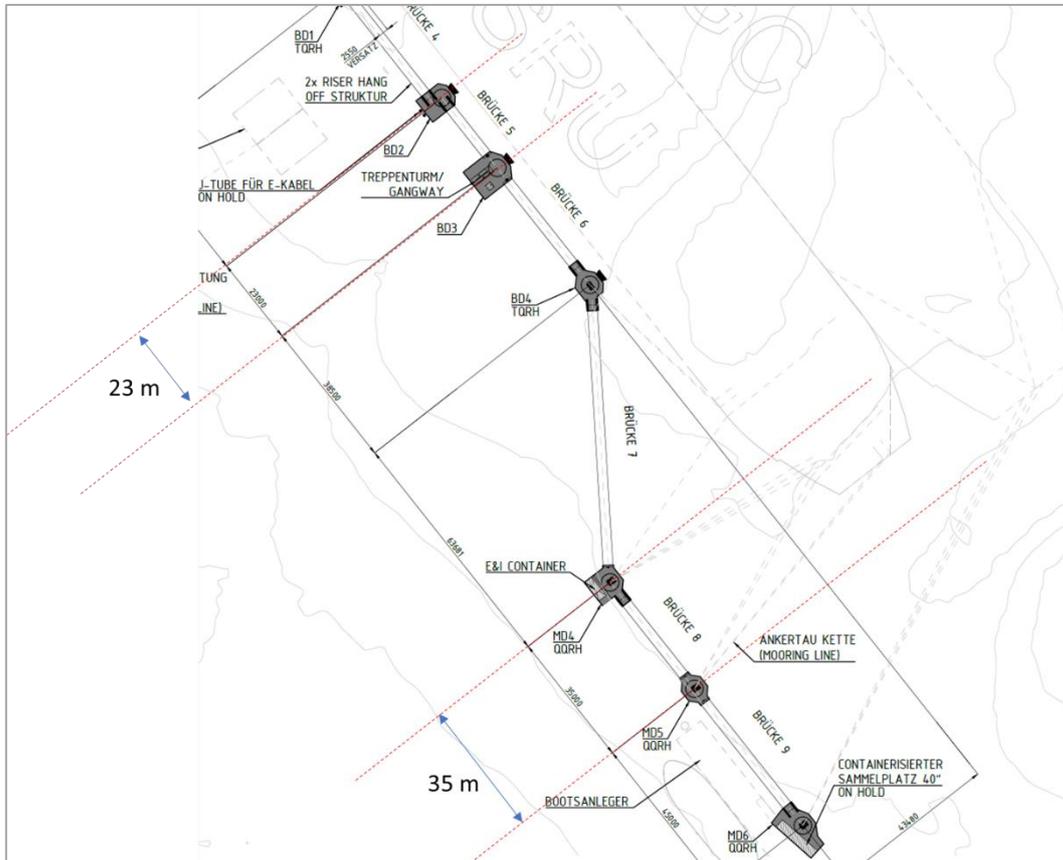


Abbildung 6-3: Mindestabstand zwischen den am Strömungsfluss ausgerichteten Vertäu- und den Anlegedalben.

6.4 Ergebnisse zur maximalen Kolkentiefe

Die Berechnungen der maximalen Kolkentiefe werden zunächst unter Berücksichtigung der kombinierten Wirkung von Wellen und Strömungen anhand der Methode nach Sumer und Fredsøe (2002) geprüft. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Kolkentiefe vorwiegend von der Strömungskomponente des kombinierten Flusses bestimmt wird. Folglich wird zur Bewertung der maximalen Kolkentiefe um die Pfähle die Formel für den Fall nur gleichbleibender Strömung herangezogen, wie in Abschnitt 6.2.1 beschrieben.

Tabelle 6-4 zeigt die Ergebnisse zur maximalen Kolkentiefe um die Einzelpfähle, einschließlich der Wirkung der Pfahlgruppe. Die maximale Kolkentiefe bei den Abweis- und Vertäudalben wird auf 6,5 m bis 10,1 m (Obergrenze) geschätzt.

Da zu erwarten ist, dass sich um die Pfähle des LNG-Terminals umfangreicher Kolk bildet, wenn die Pfähle ungeschützt bleiben, wird für die Bemessung ein flexibles Kolkschutzsystem aus Steinmaterial vorgeschlagen. Das System wird im nächsten Kapitel beschrieben.

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 26 von 84

Tabelle 6-4: Maximale Kolkentiefe um die Einzelpfähle, einschließlich der Wirkung der Pfahlgruppe.

	Max. Kolkentiefe [m]	
	Anlegedalben	Vertäudalben
Sumer et al., 1992 – (Durchschnitt)	6,6	6,5
Sumer et al., 1992 – (Bemessungskonzept)	10,1	10,0
Hoffmans & Verheij, 2021 – (Durchschnitt)	7,6	7,5
Hoffmans & Verheij, 2021 – (Bemessungskonzept)	10,1	10,0
Den Boon et al., 2004	8,8	8,7
PIANC (2015) – (Bemessungskonzept)	10,1	10,0

7 Schutz vor wellen- und strömungsinduzierten Kolken um Pfähle

7.1 Deckschichtbemessung

Die für den Kolkschutz um die Pfähle erforderliche Steingröße berechnet sich nach der in Soulsby (1997) erläuterten und in Roulund et al. (2016) beschriebenen Methode. Der wichtigste Parameter für die Berechnung der Steingröße ist der Shields-Parameter θ_{wc} , der für die kombinierten Bedingungen von unregelmäßigen Wellen und Strömungen ausgewertet wird, wie in Abschnitt 6.1 beschrieben.

Der Übergang von einem stabilen Zustand in den instabilen Zustand von Kornmaterial („*Bewegungsschwelle*“) wird unter Berücksichtigung des kritischen Shields-Parameters θ_{cr} ausgewertet. Die zur Berechnung des kritischen Shields-Parameters θ_{cr} , einer Funktion des dimensionslosen Korndurchmessers D^* , herangezogene Gleichung ist die nach Soulsby (1997), wie in Abschnitt 6.1 dargelegt. Da diese Berechnungen nun für Stein statt für Sand angestellt werden, wird die mittlere Siebgröße d_{50} von Sand durch die mittlere Siebgröße D_{50} von Stein ersetzt.

Es wird angenommen, dass Steinmaterial mit einer mittleren Siebgröße D_{50} stabil ist, wenn folgende Gleichung eingehalten wird:

$$\theta_{wc} \leq \theta_{cr} \quad (7-1)$$

7.1.1 Verstärkungsfaktor für die Sohlschubspannung

7.1.1.1 Einzelpfahl

In der Nähe des Monopiles werden die Sohlschubspannungen aufgrund der kombinierten Wirkung von Wellen und Strömungen verstärkt (Sumer et al., 1992; Whitehouse, 1998; Hoffmans and Verheij, 2021). Die

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 27 von 84

Verstärkung der Sohlschubspannungen nahe des Monopiles ist auf eine Verengung des Flusses und auf eine Erhöhung der strömungsnahen und strömungsabwärtigen Verwirbelung zurückzuführen.

Bei einem einzelnen Monopile verkörpert das Verhältnis der maximalen Schubspannung zur kritischen Schubspannung das Stabilitätskriterium:

$$Mob = \frac{\theta_{wc}}{\theta_{cr}} \quad (7-2)$$

Aus den Ergebnissen der Modellversuche von den Boon et al. (2004) ging hervor, dass für $Mob \leq 0,415$ keine Bewegung des Gesteins auftrat.

Die Auswahl von **Mob = 0,415** zieht nach sich, dass aufgrund des Vorhandenseins des Pfahls zur Berechnung der erforderlichen Größe der die Pfähle umgebenden Steine ein Sohlschubverstärkungsfaktor von **2,4** (=1/0,415) herangezogen wird (Den Boon et al., 2004).

Dieser Ansatz entspricht den Vorschlägen, die auch in der neuen Norm „DNV-RP-0618 – Rock scour protection for monopiles“ [Steinkolkschutz für Monopiles] dargelegt werden (2022).

7.1.1.2 Einfluss der Schiffe

Der Verstärkungsfaktor von 2,4 für die maximale Spannung nach Shields, wie in Abschnitt 7.1.1.1 berechnet, berücksichtigt nur das Vorhandensein der Pfähle, aber nicht die Wirkung des am Anlandeterminale vertäuten Schiffs. Aufgrund der Präsenz der am Anlandeterminale vertäuten FSRU und LNG-Tanker steigt die Sohlgeschwindigkeit unter den Schiffen und um die Dalben, wodurch wiederum die Sohlschubspannung steigt.

Die Verstärkungsfaktoren für die Sohlschubspannung aufgrund der Präsenz der FSRU und LNG-Tanker wurden unter Heranziehung eines komplexen CFD-Modells berechnet, das die Pfähle und Schiffe berücksichtigt und das 3D-Strömungsfeld am Projektstandort modellieren kann (IMDC, 2023b). Die Ergebnisse haben erwartungsgemäß gezeigt, dass in der Nähe der FSRU und damit um die Abweispfähle herum ein größerer Verstärkungsfaktor auftritt, wohingegen in dem weit von den Schiffen entfernten Bereich und um die Vertäupfähle herum niedrigere Verstärkungsfaktoren errechnet wurden.

Nachstehend die Verstärkungsfaktoren für die Sohlschubspannung aufgrund der Anwesenheit von Schiffen, die zur Bemessung der für den Kolkschutz um die Pfähle erforderlichen Steingröße berücksichtigt wurden (IMDC, 2023b):

- **1,9** für die Anlegedalben
- **1,6** für die Vertäudalben.

7.1.1.3 Wirkung der Pfahlgruppe

Sumer und Fredsøe (2002) haben gezeigt, dass die Verstärkungsfaktoren für die Sohlschubspannung aufgrund der „Pfahlgruppenwirkung“ unter den Wellen eine Funktion des G/D-Verhältnisses sind, wobei G der Abstand zwischen den Pfählen und D der Pfahldurchmesser ist (Abbildung 7-1).

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 28 von 84

Wie von Sumer und Fredsøe vorgeschlagen (2002) und in Abbildung 7-1 dargestellt, ist die Erhöhung der Sohlschubspannung aufgrund der Pfahlgruppe bei einem G/D-Verhältnis größer als 3 unerheblich. Der Mindestabstand zwischen den Pfählen beträgt 18,5 m (Abstand zwischen den Anlegedalben BD2 und BD3). Da der Pfahldurchmesser 4,5 m beträgt, ist der Mindestwert für das G/D-Verhältnis gleich 4,1.

Dem Vorschlag von Sumer und Fredsøe (2002) entsprechend wird in der Analyse aufgrund der „Pfahlgruppenwirkung“ keine Erhöhung der Sohlschubspannung berücksichtigt.

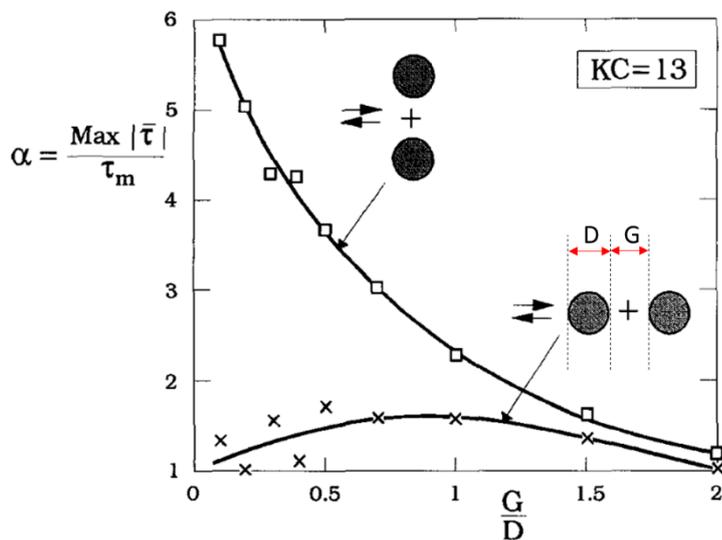


Abbildung 7-1: Verstärkungsfaktor für die Sohlschubspannung bei zwei Pfählen (Sumer and Fredsøe, 2002)

7.1.1.4 Gesamtverstärkungsfaktor für die Sohlschubspannung

Die Gesamtverstärkungsfaktoren, die für die maximale Sohlschubspannung um die Pfähle berechnet wurden, einschließlich der Wirkung der am LNG-Anlandeterminale vertäuten FSRU und LNG-Tanker (Abschnitt 7.1.1.2), werden in Tabelle 7-1 zusammengefasst.

Die für die Kolkschutzbemessung herangezogenen Gesamtverstärkungsfaktoren für die Sohlschubspannung lauten:

- **4,6** für die Anlegedalben
- **3,8** für die Vertäudalben

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 29 von 84

Tabelle 7-1: Verstärkungsfaktoren für die maximale Sohlschubspannung um die Pfähle

Pfahltyp	Verstärkungsfaktor bei den Einzelfählen	Verstärkungsfaktor bei der Pfahlgruppe	Verstärkungsfaktor aufgrund von Schiffen	Gesamtverstärkungsfaktor
Abweisdalben	2,4	1,0	1,9	4,6
Vertäudalben	2,4	1,0	1,6	3,8

7.1.2 Erforderliche Steinmasse

Die minimal erforderliche Steinmasse $M_{50,min}$ berechnet sich wie folgt:

$$M_{50,min} = \rho_s \cdot D_{n50}^3 \quad (7-3)$$

wobei:

ρ_s die Steindichte ist [kg/m³];

D_{n50} der Nominaldurchmesser des Steins ist [m].

Die mittlere Siebgröße D_{50} und die nominale Steingröße $D_{n,50}$ sind für jede vorgegebene Form von Wasserbaustein proportional. Nach dem im Rock Manual (CIRIA *et al.*, 2007) vorgeschlagenen Ansatz lässt die nominale Steingröße sich folgendermaßen berechnen:

$$D_{n,50} = 0.84 \cdot D_{50} \quad (7-4)$$

7.1.3 Auswahl der Gewichtsklasse

Es werden Standard-Gewichtsklassen zugeordnet, die den Erfordernissen in Bezug auf die Klassen entsprechen, die in der europäischen Norm für Wasserbausteine EN 13383-1 (2013) und im Rock Manual (2007) festgelegt sind.

Die Gewichtsklasse wird so ausgewählt, dass sichergestellt ist, dass die durchschnittliche Masse der ausgewählten Gewichtsklasse M_{50} größer ist als die minimal erforderliche Steinmasse $M_{50,min}$. Dabei ist M_{50} die Masse desjenigen Partikels, in Bezug auf den 50 % des Kornmaterials leichter sind.

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolksschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 30 von 84

7.2 Ergebnisse des Schutzes vor wellen- und strömungsinduzierten Kolken

7.2.1 Deckschicht

Zur Berechnung der minimal erforderlichen nominalen Steingröße (D_{n50}) der obersten Schicht des Kolksschutzes wird die in Abschnitt 7.1 beschriebene Methode herangezogen. Die Oberkante des Kolksschutzes (einschließlich Einbautoleranzen) liegt bei -14,0 m SKN für Anlegedalben und wird bei -10,0 m SKN für Verankerungsdalben angenommen.

Die maßgeblichen Fälle, die zu einer höheren erforderlichen Steingröße führen, sind die Szenarien 3 und 4, bei denen die Gezeitenströmungen für Ebbe und Flut Höchstwerte erreichen, wie in Tabelle 4-3 dargestellt.

Tabelle 7-2 zeigt die wichtigsten Parameter, die für die Berechnungen übernommen wurden, sowie die Ergebnisse für die maßgeblichen Fälle (Szenarien 3 und 4) für die Vertäu- und die Anlegedalben. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Steingröße D_{50} , die für Standfestigkeit gegenüber Wellen und Strömungen minimal erforderlich ist, bei den Anlegedalben 74 mm und bei den Vertäudalben 104 mm beträgt.

Tabelle 7-2: Wichtigste Parameter und Ergebnisse zur erforderlichen Steingröße für den Schutz vor wellen- und strömungsinduzierten Kolken um die Abweis- und Vertäudalben für die Szenarien 3 und 4.

Lastfälle	Einheit	Szenario 3		Szenario 4	
		Wert	Wert	Wert	Wert
Eingabeparameter					
Dalbentyp	[-]	Anlegedalben	Vertäudalben	Anlegedalben	Vertäudalben
Kinematische Viskosität ν	[m ² /s]	1,36E-06	1,36E-06	1,36E-06	1,36E-06
Erdbeschleunigung g	[m/s ²]	9,81	9,81	9,81	9,81
Wasserdichte ρ_w	[kg/m ³]	1025	1025	1025	1025
Steindichte ρ_r	[kg/m ³]	2650	2650	2650	2650
Wasserstand an der Oberkante (OK) der Sohlensicherung (einschließlich Einbautoleranzen)	[m SWN]	-14,0	-10,0	-14,0	-10,0
Wassertiefe an der OK Kolksschutz, h	[m]	17,88	13,88	16,75	12,75
Maßgebliche Wellenhöhe H_{m0}	[m]	2,10	2,10	2,10	2,10
Wellenkammperiode T_p	[s]	5,20	5,20	5,20	5,20

		Strukturell			
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03			
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 31 von 84			

Über die Tiefe gemittelte Strömungsgeschwindigkeit U_c	[m/s]	1,7	1,7	1,6	1,6
Gesamtverstärkungsfaktor für die Schubspannung	[-]	4,6	3,8	4,6	3,8
Sohlschubspannungen aufgrund von Strömungen					
Relative Dichte s	[-]	2,59	2,59	2,59	2,59
Reibungsgeschwindigkeit U_f	[m/s]	0,098	0,105	0,093	0,102
Sohlschubspannung aufgrund von Strömungen τ_c	[N/m ²]	9,8	11,2	8,8	10,6
Kornrauigkeit k_s	[m]	0,19	0,23	0,18	0,26
Wellenschubspannungen					
Wellenumlaufgeschwindigkeit U_w	[m/s]	0,13	0,20	0,15	0,23
Halborbitale Auslenkung A	[m]	0,11	0,17	0,12	0,19
Wellenreibungsfaktor f_w	[-]	0,50	0,41	0,45	0,41
Amplitude der Wellensohlschubspannung τ_w	[N/m ²]	4,2	8,9	4,9	11,4
Kombinierte Wellenschubspannungen					
Mittlere Sohlschubspannung innerhalb eines Wellenzyklus τ_m	[N/m ²]	10,0	12,2	9,2	12,1
Maximale Sohlschubspannung innerhalb eines Wellenzyklus τ_{max}	[N/m ²]	14,3	21,1	14,1	23,6
Shields-Parameter					
Shields-Parameter (Strömung + Wellen) θ_{wc}	[-]	0,012	0,014	0,012	0,014
Verstärkter Shields-Parameter $\theta_{wc,verstärkt}$	[-]	0,055	0,055	0,055	0,055
Dimensionsloser Korndurchmesser D^*	[-]	1509,7	1881,2	1489,8	2105,5

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolk-schutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 32 von 84

Schwellenwert Shields-Parameter, θ_{cr}	[-]	0,055	0,055	0,055	0,055
Erforderliche Steingröße					
Minimal erforderliche Steingröße D_{50}	[mm]	74	93	73	104

8 Schutz vor durch Schiffspropeller verursachte Kolke um Pfähle

8.1 Gesetze, Normen und andere Regelwerke

Die Bestimmung der schiffsinduzierten Fließgeschwindigkeiten und des Kolk-schutzsystems erfolgt hauptsächlich nach der Methode, die in den PIANC-Leitlinien „*Guidelines for protecting berthing structures from scour by ships*“ [Leitlinien zum Schutz von Anlegestellen vor Kolkbildung durch Schiffe], die von der PIANC-Arbeitsgruppe 180 (2015) entwickelt und durch das „*Corrigendum of the Guidelines*“ (2017) [Berichtigung der Leitlinien] berichtigt wurden, und nach weiteren Informationen der BAW, „*Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen*“ (2010), sowie nach aktuellen einschlägigen Veröffentlichungen zu diesem Thema.

8.2 Umgebungsverhältnisse

8.2.1 Wasserstand

Der Wasserstand, der in der Analyse herangezogen wird, um die maximale Geschwindigkeit am Boden aufgrund der Propellerbewegung des Schiffes zu berechnen, beträgt **-0.88 m SKN** (entspricht NGzW).

8.3 Geometrie der Anlegestelle

Die maximalen Geschwindigkeiten am Boden durch die Schiffspropeller werden unter schematischer Darstellung der Anlegestelle berechnet und sind in der Querschnittsskizze in Abbildung 5-3 angegeben. Der Boden unter der FSRU und dem LNG-Tanker wird mit $-14,0$ m angesetzt.

Der Querabstand von der Anlegelinie des FSRU zur Mitte (Achse) der Verankerungsdalben beträgt 50 m. Der Querabstand vom Beginn der Böschung zu den Verankerungsdalben beträgt 27,2 m (Abbildung 5-3).

Der Querabstand zwischen der Mitte der Vertäudalben und der Anlegedalben beträgt 43,48 m, wie in Abbildung 8-1 dargestellt. Der Abstand zwischen den beiden Schiffen beim Anlegen beträgt 3,3 m.

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 33 von 84

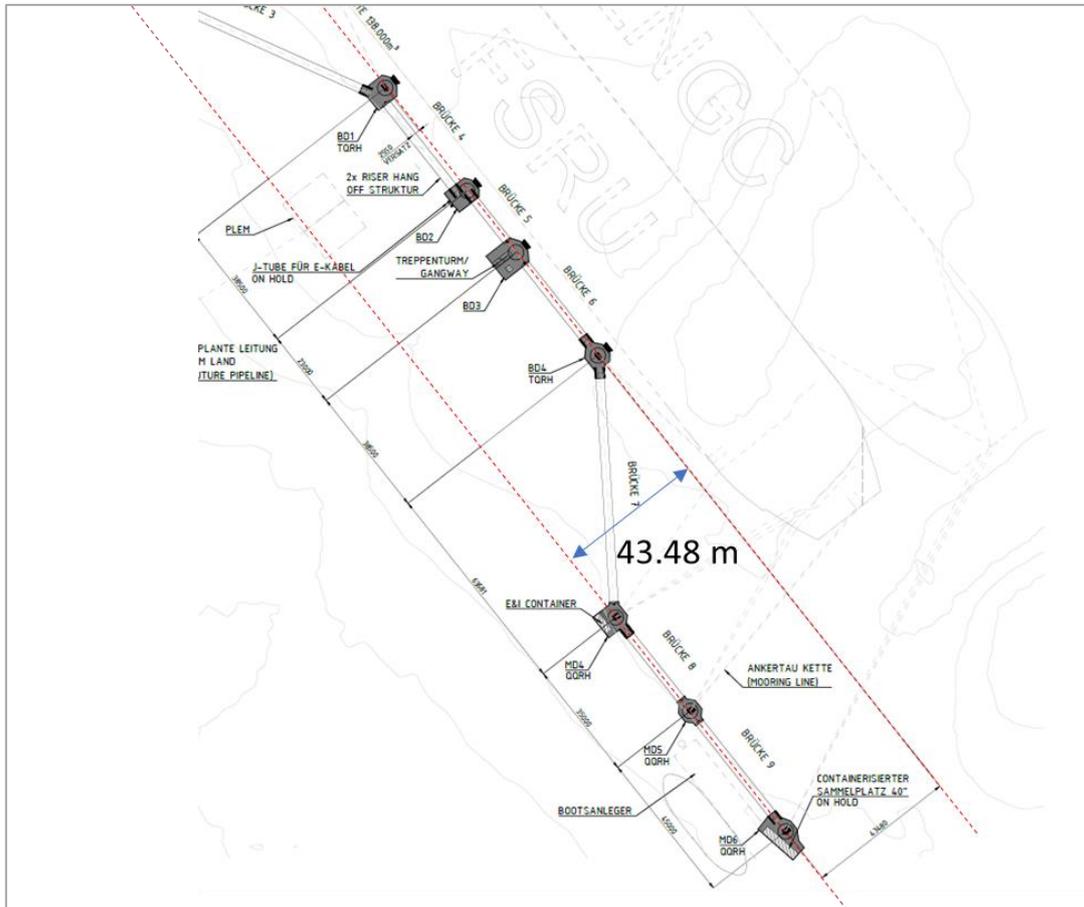


Abbildung 8-1: Draufsicht des LNG-Terminals, die den Querabstand zwischen den Vertäu- und den Anlegedalben zeigt

8.4 Bemessungsschiffe

Die Eigenschaften der Bemessungsschiffe, die zur Berechnung der maximalen Geschwindigkeit am Boden berücksichtigt wurden, entstammen der Erläuterungsbericht [9].

Sollten die zur Berechnung der vom Schiffspropeller erzeugten Geschwindigkeit benötigten spezifischen Informationen über die Schiffsmerkmale nicht verfügbar sein, so werden typische Werte ähnlicher Schiffe oder halbempirische Beziehungen übernommen, die von PIANC (2015) oder in einschlägiger Literatur vorgeschlagen werden.

Die für die Analyse der durch die Propellerbewegung verursachte Geschwindigkeit am Boden herangezogenen Merkmale der Bemessungsschiffe sind in der Erläuterungsbericht [9] beschrieben. Sie werden in Tabelle 8-1 und Tabelle 8-2 zusammengefasst.

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 34 von 84

Tabelle 8-1: Bemessungsschiffe – LNG-Tanker

Schiffsname	[-]	Bahrain Spirit	Sakura
Typ	[-]	LNG-Tanker mit Membrantank	LNG-Tanker mit Kugeltank (Moss)
Länge über alles (Lüa)	[m]	295	300
Breite	[m]	46,4	48,9
Maximaltiefgang	[m]	12,5	11,5
Hauptpropellertyp	[m]	Nicht ummantelt mit Ruder	Nicht ummantelt mit Ruder
Ruder	[ja/nein]	ja	ja
Propellerleistung P_D (pro Propeller)	[kW]	21550	21960
Propellerdurchmesser D_p	[m]	7,9	8,3
Propelleranzahl n_p	[-]	1	1
Typ des Bugstrahlruders	[-]	–	Ummantelt
Strahlruderleistung P_D (pro Strahlruder)	[kW]	–	2200
Strahlruderdurchmesser D_p	[m]	–	2,8
Strahlruderanzahl n_p	[-]	–	1

  		Strukturell	 	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN		FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03	
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU			Seite 35 von 84	

Tabelle 8-2: Bemessungsschiffe – Schlepper

Schiffsname	[-]	Bugsier 3	Bugsier 8	Corvin	Fairplay 31	Stella	VB Emoe	VB Bremen	RT Pioneer
Typ	[-]	ATD-Schlepper	ATD-Schlepper	ASD-Schlepper	ASD-Schlepper	Voith-Schneider-Schlepper	Rotortug-Schlepper	Voith-Schneider-Schlepper	Rotortug-Schlepper
Länge über alles (Lüa)	[m]	32,8	31,5	32,5	38,7	30,6	28,3	32,5	31,6
Breite	[m]	11,8	11,3	12,0	13,0	11,0	12,0	11,0	12,0
Maximaltiefgang	[m]	6,7	6,2	5,4	6,3	5,1	6,1	5,5	5,9
Hauptpropellertyp	[-]	Ummanteltes azimutales Strahlruder	Ummanteltes azimutales Strahlruder	Ummanteltes azimutales Strahlruder	Ummanteltes azimutales Strahlruder	Voith-Schneider-	Ummanteltes azimutales Strahlruder	Voith-Schneider-	Ummanteltes azimutales Strahlruder
Ruder	[ja/nein]	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein
Propellerleistung P _D (pro Propeller)	[kW]	2050	2249	2030	2652	1845	1776	1870	1566
Propellerdurchmesser D _p	[m]	2,7	2,8	2,7	3,0	3,5	2,6	3,5	2,5
Propelleranzahl n _p	[-]	2	2	2	2	2	3	2	3
Typ des Bugstrahlruders	[-]	-	-	-	Ummantelt	-	-	-	-
Strahlruderleistung P _D (pro Strahlruder)	[kW]	-	-	-	200	-	-	-	-
Strahlruderdurchmesser D _p	[m]	-	-	-	1,1	-	-	-	-
Strahlruderanzahl n _p	[-]	-	-	-	1	-	-	-	-

8.4.1 Propellerposition

8.4.1.1 Hauptpropeller und Querstrahlruder

Abbildung 8-2 zeigt eine Skizze des Schiffsquerschnitts mit den geometrischen Merkmalen des Hauptpropellers und der Querstrahlruder. Der Abstand von der Propellerachse bis zum Boden darunter berechnet sich wie folgt:

$$h_{p,main} = D_{p,main}/2 + T_{iptoKeel} + UKC \quad (8-1)$$

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 36 von 84

$$h_{thruster} = D_{thruster} / 2 + TiptoKeel + UKC \quad (8-2)$$

wobei:

UKC die Kielfreiheit [Under-Keel Clearance] (d. h. der Abstand vom Kiel des Schiffes bis zur Sohlebene) ist.

Spitze bis Kiel der Abstand vom Schiffskiel bis zum tiefsten Punkt des Propellers/Strahlruders ist.

$D_{p,haupt}$ der Durchmesser des Hauptpropellers ist.

$D_{Strahlruder}$ der Durchmesser des Querstrahlruders ist.

Spitze bis Kiel hat je nach Typ und Abmessungen des Propellers unterschiedliche Werte. Sind keine Informationen über die Propellerposition verfügbar, so berechnet sich „*Spitze bis Kiel*“ wie folgt:

$$Tip\ to\ Keel = \begin{cases} 0.03 D_{p,main} & (main\ propeller) \\ D_{thruster} & (transverse\ thruster) \end{cases} \quad (8-3)$$

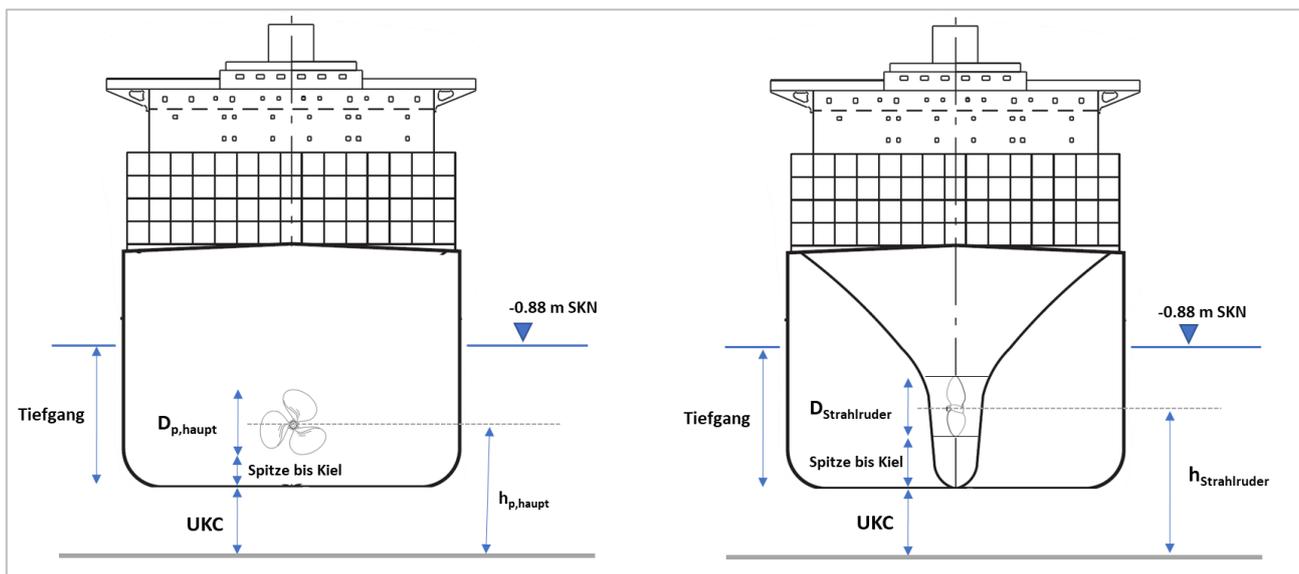


Abbildung 8-2: Skizze des Schiffsquerschnitts mit den geometrischen Merkmalen des Hauptpropellers und der Querstrahlruder

Bei Schiffen, die mit zwei Hauptpropellern ausgestattet sind, wird davon ausgegangen, dass der Abstand zwischen diesen Propellern gleich $B/2$ ist, wobei B die Schiffsbreite ist (linke Darstellung in Abbildung 8-3).

Die rechte Darstellung in Abbildung 8-3 zeigt den Abstand vom Wasserfluss aus dem Bugstrahlruder bis zum Schiffsrand. Für diesen wird $0,375 B$ angenommen, wenn im Datenblatt der Schiffe keine entsprechenden Informationen enthalten sind.

	Strukturell	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 37 von 84

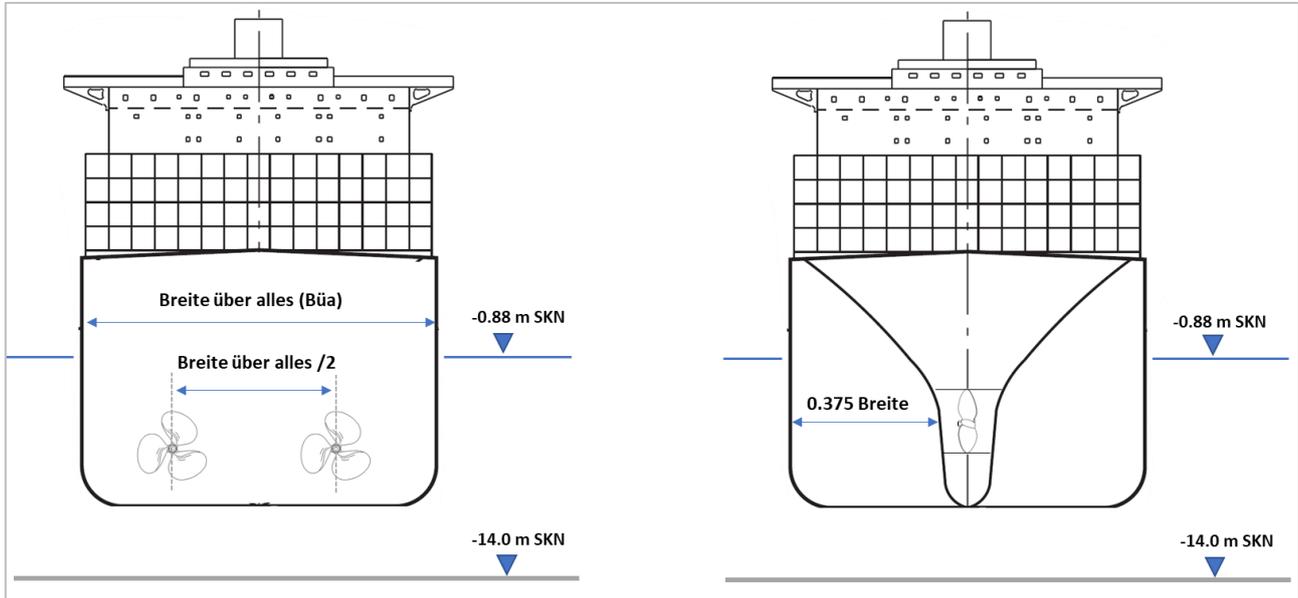


Abbildung 8-3: Skizze des Schiffsquerschnitts mit zwei Hauptpropellern (linke Darstellung) und Querstrahlrudern.

8.4.1.2 Voith-Schneider-Propeller

Bei Schiffen, die mit einem Voith-Schneider-Propeller ausgestattet sind, berechnet sich der Abstand von der Propellerachse bis zum Boden darunter wie folgt:

$$h_{p,Voith-Schneider} = h_{Voith-Schneider} / 2 + UKC \quad (8-4)$$

wobei:

$h_{Voith-Schneider}$ die Höhe des Voith-Schneider-Propellers ist, die mit $0,6 D_p$ veranschlagt wird (PIANC, 2015).

8.4.1.3 Zusammenfassung der Propellerposition

Tabelle 8-3 und Tabelle 8-4 fassen die Propellerpositionen und die wichtigsten Parameter der Bemessungsschiffe zusammen, die für die Berechnungen der Propellerstrahlgeschwindigkeit berücksichtigt wurden.

Sollten die spezifischen Informationen über die Schiffsmerkmale nicht verfügbar sein, so werden typische Werte ähnlicher Schiffe oder halbempirische Beziehungen übernommen, die von PIANC (2015) oder in einschlägiger Literatur vorgeschlagen werden.

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 38 von 84

Tabelle 8-3: Propellerpositionen für die LNG-Tanker

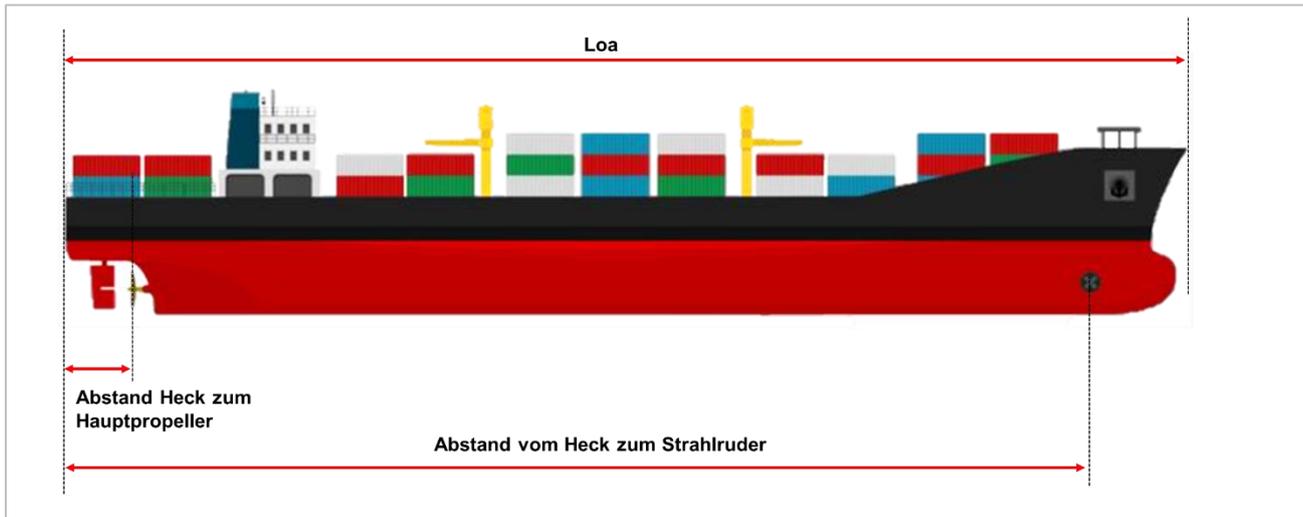
Schiff	Bahrain Spirit	Sakura
Spitze bis Kiel (m)	0,6 (Hauptpropeller)	0,6 (Hauptpropeller) 2,8 (Strahlruder)
h _p (m)	5,16 (Hauptpropeller)	6,35 (Hauptpropeller) 5,83 (Strahlruder)
UCK (m)	0,6	1,59
Abstand zwischen 2 Propellern (m)	–	–
Abstand vom Heck zum Propeller (m)	12,0 (Hauptpropeller)	12,0 (Hauptpropeller) 270,0 (Strahlruder)

Tabelle 8-4: Propellerpositionen für die Schlepper

Schiff	Bugsier 3	Bugsier 8	Corvin	Fairplay 31	Stella	VB Emoe	VB Bremen	RT Pioneer
Spitze bis Kiel (m)	0	0	0	0	0	0	0	0
h _p (m)	7,8	8,3	9,1	8,3	9,0	8,3	8,7	8,5
UCK (m)	6,4	6,9	7,7	6,8	8,0	7,0	7,6	7,2
Spitze bis Kiel (m)	0	0	0	0	0	0	0	0
Abstand zwischen 2 Propellern (m)	5,9	5,7	6,0	6,5	5,5	3,0	5,5	3,0
Abstand vom Heck zum Propeller (m)	24,5	23,5	4,2	5,0	20,0	20,3	21,3	23,6

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 39 von 84

Tabelle 8-5: Skizze des Abstands vom Heck zum Propeller beim Hauptpropeller und bei den Bugstrahlrudern.



8.5 Bei An-/Ablegemanövern angelegte Maschinenleistung

Ausgehend von [10] und der Empfehlung gemäß PIANC (PIANC, 2015) werden für die verschiedenen Lastfälle die nachstehenden Leistungsanteile verwendet:

- Hauptpropeller des LNG-Tankers: 20 %
- Bugstrahlruder des LNG-Tankers: 100 %
- Hauptpropeller des Schleppers: 80 %

Die oben angegebenen Werte stellen den Referenzfall dar. Andere Werte werden auch auf ihre Sensitivität überprüft (Abschnitt 8.11).

8.6 Lastfälle

8.6.1 LNG-Tanker

Für die Analyse werden verschiedene Lastfälle für die LNG-Tanker aus der detaillierten Untersuchung der möglichen Manöver der LNG-Tanker berücksichtigt, die in [10] beschrieben sind.

1. LNG-Tanker in Anlegeposition bei Betrieb eines Bugstrahlruders (linke Darstellung in Abbildung 8-4)
2. LNG-Tanker in Anlegeposition bei Betrieb des Hauptpropellers und Ruderlage von 35° in Richtung Anlandeterminal (linke Darstellung in Abbildung 8-4)
3. LNG-Tanker um 30° von Anlegeleine und Heck gedreht auf 1,5 B_{reite} von Anlegeleine und Ruderlage von 35° in Richtung Anlandeterminal (rechte Darstellung in Abbildung 8-4)
4. LNG-Tanker um 40° von Anlegeleine und Heck gedreht auf 2,0 B_{reite} von Anlegeleine und Ruderlage von 35° in Richtung Anlandeterminal (rechte Darstellung in Abbildung 8-4).

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 40 von 84

Abbildung 8-5 zeigt die Position des Hecks des LNGC in Bezug auf den Mittelpunkt des MD6.

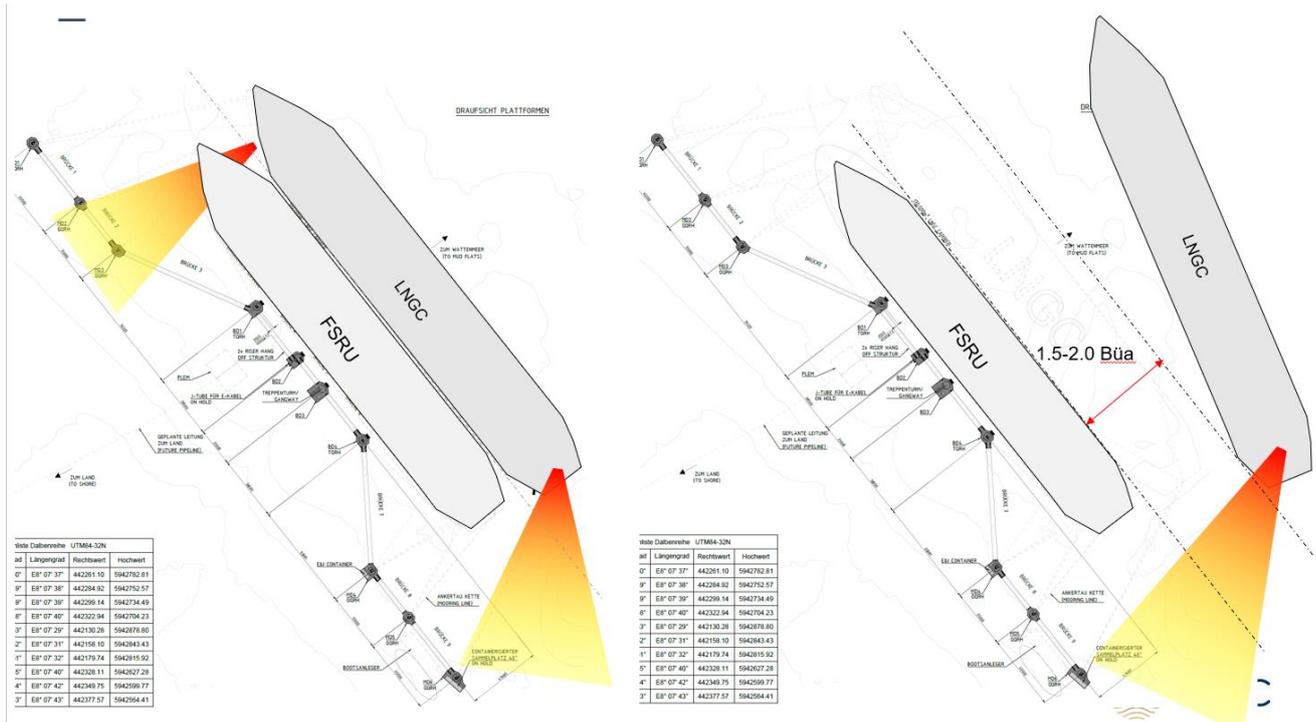
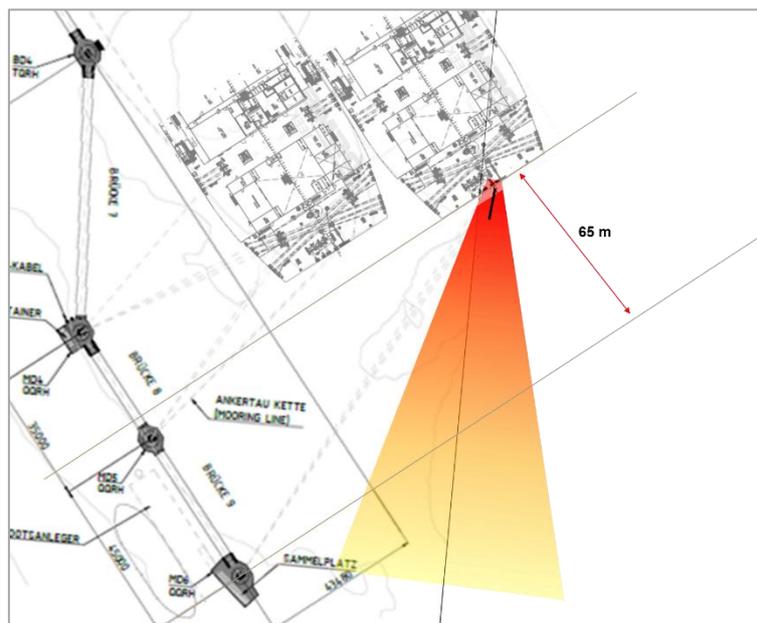


Abbildung 8-4: Schema der für die LNG-Tanker berücksichtigten Lastfälle.



	Strukturell	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 41 von 84

Abbildung 8-5: Einzelheiten über die Position des Hecks der LNGC in Bezug auf die MD6

8.6.2 Schlepper

Da die LNG-Tanker beim An- und Ablegemanöver von Schleppern unterstützt werden, berücksichtigt die Analyse zusätzliche Lastfälle in Anlehnung an die möglichen Manöver, die in [10] angeführt werden:

- Schlepper mit Bug in 50 m Entfernung von der Achse des LNG-Tankers und Strahl auf die Pfahlstruktur gerichtet (Abbildung 8-6 und Abbildung 8-7).

Der Abstand zwischen dem Bug des Schleppers und der Mitte der Verankerungspfähle wird daher auf 169,9 m festgelegt (Abbildung 8-6 und Abbildung 8-7). Dieser Wert wurde unter Berücksichtigung des Schleppers, der den LNGC "Baharain Spirit" unterstützt, berechnet, da es sich um den LNGC mit der kleinsten Breite handelt und der Schlepper somit am nächsten an den Pfählen liegt.

Als konservativer Ansatz werden die Berechnungen der Geschwindigkeit um die Verankerungsdalben für Schlepper unter der Annahme durchgeführt, dass die Achse des Schleppers auf die Mitte des Pfahls ausgerichtet ist.

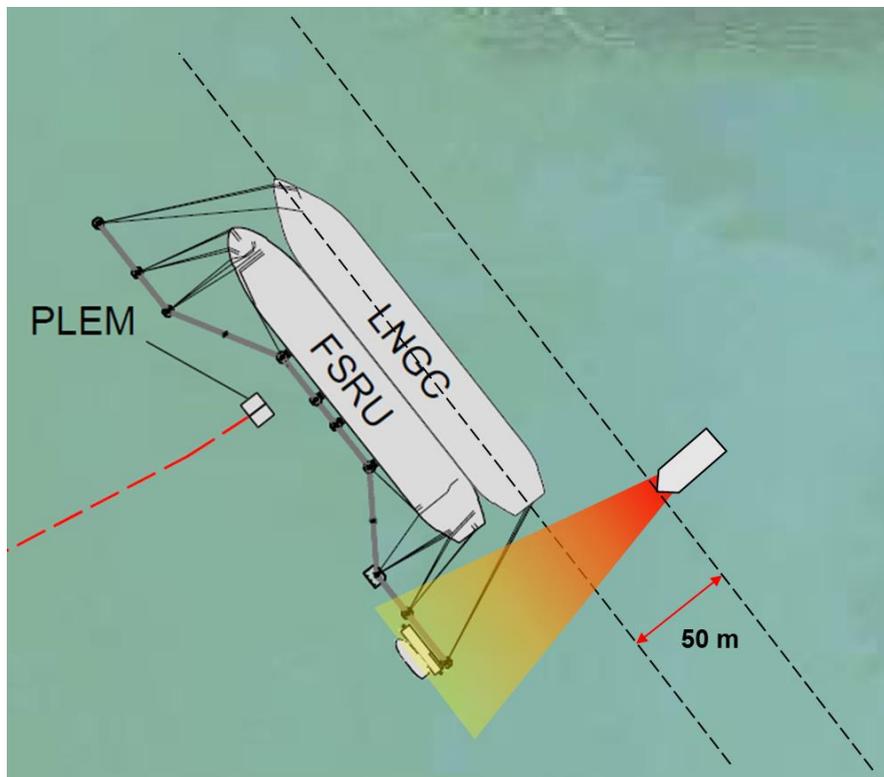


Abbildung 8-6: Für den Schlepper berücksichtigte Lastfälle bei Ablegen des LNG-Tankers.

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolk schutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 42 von 84

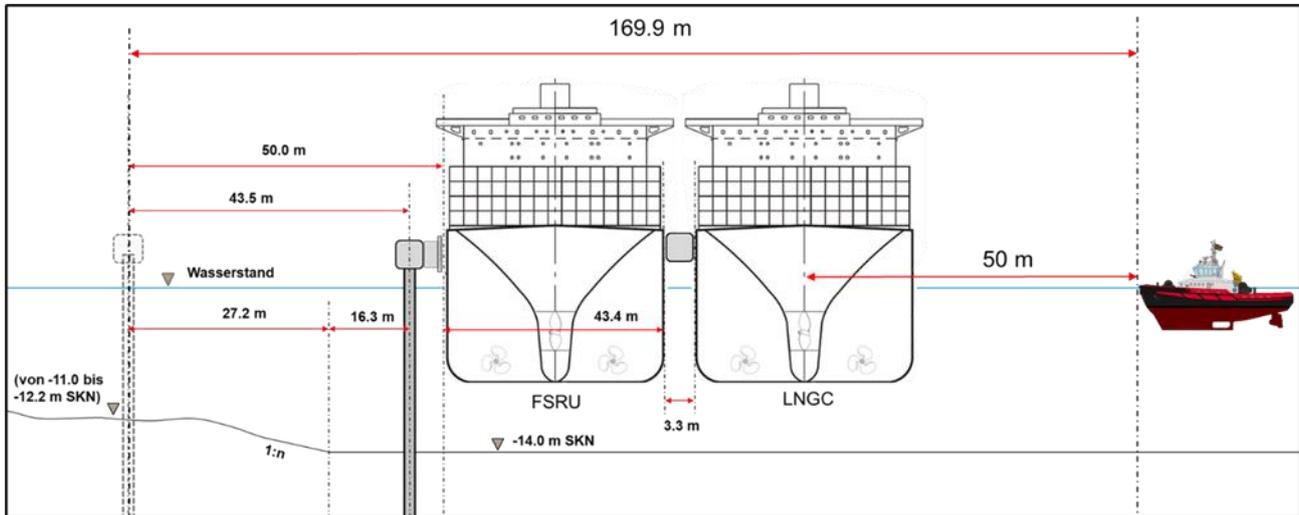


Abbildung 8-7: Für den Schlepper berücksichtigte Lastfälle bei Ablegen des LNG-Tankers, Querschnitt.

8.7 Propellerbewegung

Im Einklang mit den PIANC-Leitlinien werden zur Berechnung des Bodenschutzes für Standfestigkeit gegenüber der Wirkung des Strahls, der durch die Hauptpropeller und die Triebwerke verursacht wird, die niederländischen und deutschen Methoden zur Bestimmung der Strahlgeschwindigkeiten verwendet.

Das Geschwindigkeitsfeld wird für Hauptpropeller, Querstrahlruder und Voith-Schneider-Propeller beschrieben.

8.7.1 Ausströmgeschwindigkeit

8.7.1.1 Hauptpropeller und Querstrahlruder

Die Ausströmgeschwindigkeiten für die Hauptpropeller und Querstrahlruder werden ausgehend von der angelegten Maschinenleistung des Propellers berechnet:

$$V_0 = C_3 \cdot \left(\frac{f_p \cdot P_D}{\rho_w \cdot D_p^2} \right)^{1/3} \quad (8-5)$$

wobei:

- V_0 Ausströmgeschwindigkeit [m/s]
- P_D maximale installierte Maschinenleistung [W]
- f_p angelegter Anteil an der installierten Maschinenleistung [–]
- D_p Propellerdurchmesser bei Hauptpropeller und Durchmesser Strahlrudertunnel bei Querstrahlruder [m]
- ρ_w Wasserdichte [kg/m³]

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 43 von 84

$C_3 = 1,48$ bei nicht ummantelten Propellern [–]

$C_3 = 1,17$ bei ummantelten Propellern und Querstrahlrudern [–].

Für die deutsche und niederländische Methode wird die zur Berechnung der Ausströmgeschwindigkeit herangezogene Formel angewandt.

8.7.1.2 Voith-Schneider-Propeller

Für Schiffe, die mit einem Voith-Schneider-Antriebssystem ausgestattet sind, wird die Ausströmgeschwindigkeit nach den in PIANC (2015) vorgeschlagenen Formeln berechnet:

$$V_0 = 0.75 \cdot \left(\frac{f_p \cdot P_D}{\rho_w \cdot D_p \cdot h_D} \right)^{1/3} \quad (8-6)$$

wobei h_D die Höhe des Voith-Schneider-Propellers (B in der linken Darstellung in Abbildung 8-8) und D_p der Gesamtdurchmesser (J in der rechten Darstellung in Abbildung 8-8) ist.

Sollten keine Detailangaben zur Verfügung stehen, so kann folgendes Verhältnis zwischen h_D und D_p herangezogen werden:

$$h_D = 0.6 \cdot D_p \quad (8-7)$$

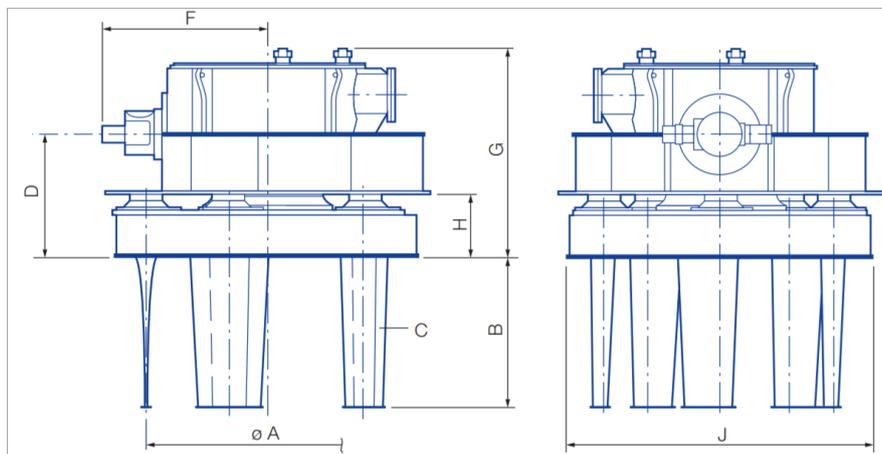


Abbildung 8-8: Hauptabmessungen des Voith-Schneider-Antriebssystems

8.7.2 Strömungsfeld des Propellerstrahls

8.7.2.1 Hauptpropeller und Querstrahlruder

Nach den PIANC-Leitlinien kann die Geschwindigkeit am Boden als Teil eines 3D-Geschwindigkeitsfelds berechnet werden, das aus Folgendem besteht:

	Strukturell	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 44 von 84

- einer maximalen (axialen) Geschwindigkeit V_{Achse} entlang der Propellerstrahlachse (ausgehend von der Propellerebene) und
- einer (radialen) Verteilung $V_{x,r}$, die senkrecht zu dieser axialen Geschwindigkeit ist und deren Magnitude von dieser abhängt.

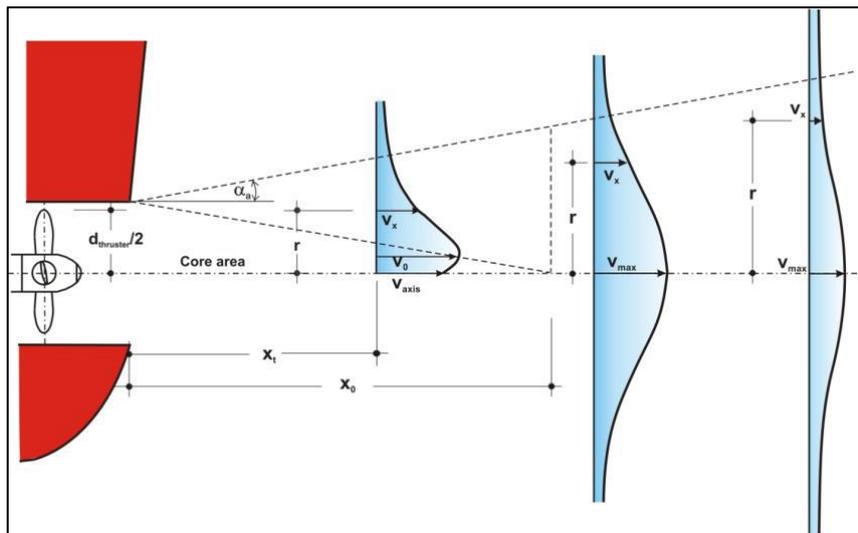


Abbildung 8-9: Geschwindigkeitsfeld (PIANC, 2015)

Die maximale axiale Geschwindigkeit lässt sich in drei Bereiche einteilen:

- den Bereich der Strömungsbildung, in dem der Strahl, der durch den Propeller erzeugt wird, einen konstanten Wert hat, der der Ausströmgeschwindigkeit V_0 entspricht;
- den Bereich der etablierten Strömung, in dem die axiale Geschwindigkeit mit zunehmender Entfernung vom Propeller abnimmt; die Strömung ist ungehindert (Abbildung 8-9);
- den Bereich der eingeschränkten Strömung, in dem die Abnahme der axialen Geschwindigkeit begrenzt ist (gegenüber dem Bereich der etablierten Strömung), unter Berücksichtigung des Einflusses der Wasseroberfläche und des Meeresbodens.

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 45 von 84

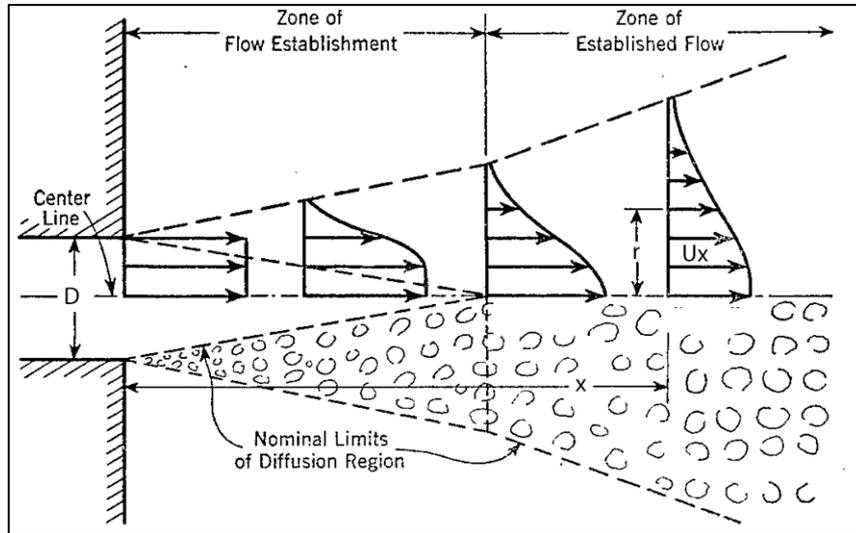


Abbildung 8-10: Geschwindigkeitsverteilung im Bereich der Strömungsbildung und der etablierten Strömung (PIANC, 2015)

8.7.2.1.1 Deutsche Methode

Nach der deutschen Methodik (BAW, 2010) ist die Fließgeschwindigkeit entlang der Achse, V_{Achse} , bei Hauptpropellern wie folgt definiert:

- der Bereich der Strömungsbildung ($x/D_p \leq 2,6$):

$$V_{\text{axis}} = V_0 \quad (8-8)$$

- der Bereich der etablierten Strömung ($x/D_p > 2,6$):

$$V_{\text{axis}} = 2.6 V_0 \cdot \left(\frac{x}{D_p}\right)^{-1} \quad (8-9)$$

- der Bereich der eingeschränkten Ausbreitung des Strahls:

$$V_{\text{axis}} = A \cdot V_0 \cdot \left(\frac{x}{D_p}\right)^{-a} \quad (8-10)$$

wobei Folgendes gilt:

- $A = 1.88 \cdot e^{-0.092 \cdot (h/D)}$ für Propeller ohne Mittelruder und für ummantelte Propeller
- $A = 1.88 \cdot e^{-0.161 \cdot (h_p/D)}$ für Propeller mit Mittelruder;
- Der Wert des Exponenten a ist abhängig von der seitlichen Begrenzung des Strahlauffächerungsfelds, der Form des Schiffshecks und der Konfiguration des Propellers/Ruders, wie in BAW (2010) beschrieben.

In diesen Formeln steht h für die Wassertiefe und h_p für die Höhenlage der Propellerachse über der Sohle.

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 46 von 84

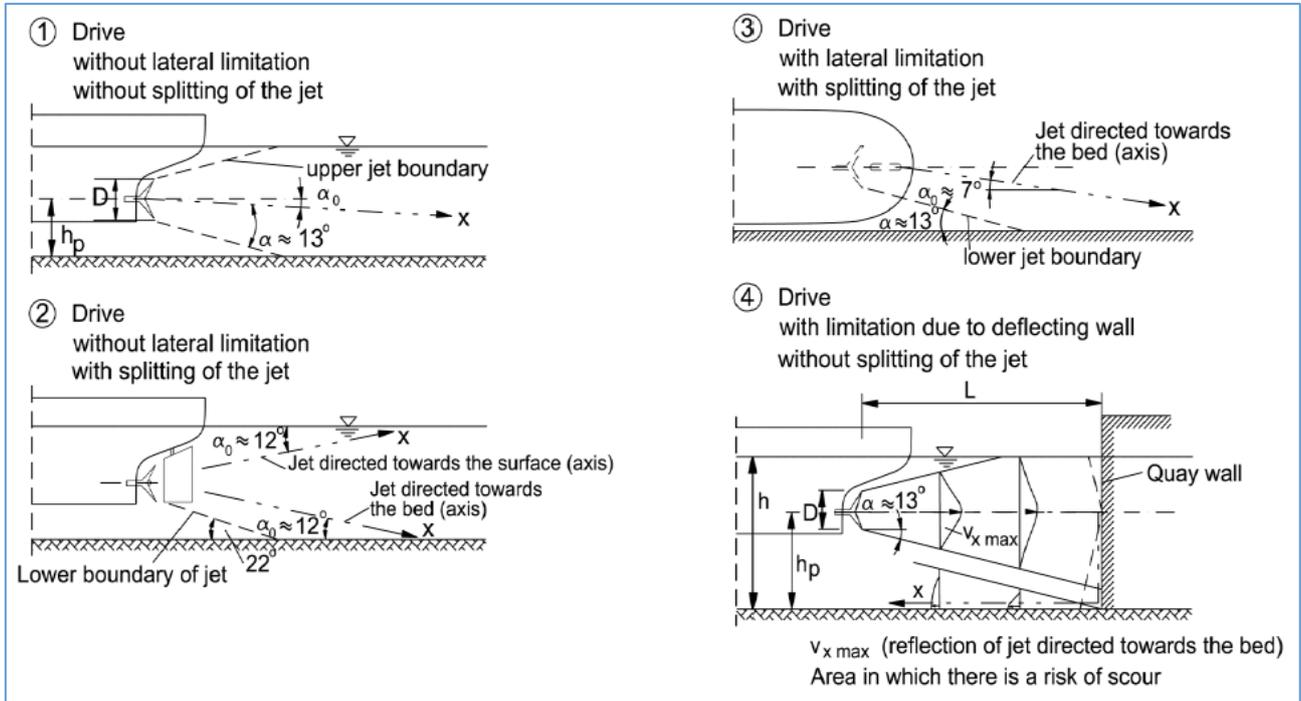


Abbildung 8-11: Standardsituationen der Strahlauffächerung (BAW, 2010)

Bei Querstrahlrudern ist die Fließgeschwindigkeit entlang der Achse, V_{Achse} , wie folgt definiert:

- der Bereich der Strömungsbildung ($x/D_p \leq 1,9$):

$$V_{axis} = V_0$$

(8-11)

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 47 von 84

- der Bereich der etablierten Strömung ($x/D_p > 1,9$):

$$V_{axis} = 1,9 \cdot V_0 \cdot \left(\frac{x}{D_p}\right)^{-1} \quad (8-12)$$

8.7.2.1.2 Niederländische Methode

Nach der niederländischen Methodik (PIANC, 2015, 2017) ist die Fließgeschwindigkeit entlang der Achse, V_{Achse} , wie folgt definiert:

$$V_{axis} = A \cdot V_0 \cdot \left(\frac{x}{D_p}\right)^{-1} \quad (8-13)$$

wobei Folgendes gilt:

- $A = 1,98$ bei nicht ummantelten Propellern;
- $A = 2,8$ bei ummantelten Propellern und Querstrahlrudern.

In den PIANC-Leitlinien trennt die niederländische Methode die Formel für die V_{Achse} in den vorstehend definierten Bereichen nicht in Abhängigkeit vom Verhältnis D_p/x . Dies bedeutet, dass bei $x/D_p \leq A$ der Wert für V_{Achse} höher würde als V_0 . Daher wird in Gleichung (8-13) eine Obergrenze von V_{Achse} festgesetzt, die gleich V_0 ist.

8.7.2.2 Voith-Schneider-Propeller

Die Strömungsverteilung im Strahl eines Voith-Schneider-Propellers wird mit der gleichen Formel berechnet, die auch für die Hauptpropeller (kein Ruder) herangezogen wird, wie in Abschnitt 8.7.2.1 beschrieben.

8.7.3 Radiale Geschwindigkeitsverteilung

8.7.3.1 Hauptpropeller und Querstrahlruder

8.7.3.1.1 Deutsche Methode

Nach der deutschen Methodik (BAW, 2010) wird die Radialgeschwindigkeitsverteilung $V_{x,r}$ im Bereich der etablierten Strömung wie folgt berechnet:

$$V_{x,r} = V_{axis} \cdot \exp[-22 \cdot r^2/x^2] \quad (8-14)$$

wobei:

- x der Abstand entlang der Strahlachse ist;
- r der radiale Abstand zur Strahlachse ist.

	Strukturell	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 48 von 84

8.7.3.1.2 Niederländische Methode

Nach der niederländischen Methodik (PIANC, 2015, 2017) wird die Radialgeschwindigkeitsverteilung $V_{x,r}$ im Bereich der etablierten Strömung wie folgt berechnet:

$$V_{x,r} = V_{axis} \cdot \exp[-15.4 \cdot r^2/x^2] \quad (8-15)$$

8.7.3.2 Voith-Schneider-Propeller

Die Radialgeschwindigkeitsverteilung im Strahl eines Voith-Schneider-Propellers wird mit der gleichen Formel berechnet, die auch für den Hauptpropeller (kein Ruder) herangezogen wird, wie in Abschnitt 8.7.3.1 beschrieben.

8.7.4 Einfluss des Ruders

Der Einfluss des abgelenkten Strahls bei Anwendung der Ruderwirkung wird unter Heranziehung der in BAW (2010) vorgestellten Konzepte berücksichtigt.

Handelt es sich um einen Strahl, der von einem nicht ummantelten Hauptpropeller und einem Ruder an der Propellerrückseite erzeugt wird, so wird dieser Strahl meist in einem Winkel von ca. 12° nach unten abgelenkt. Wenn auf einen nicht ummantelten Hauptpropeller ein Mittelruder folgt, spaltet sich der Strahl aufgrund des Drehimpulses am Ruder in einen auf die Gewässersohle gerichteten Strahl und einen auf die Wasseroberfläche gerichteten Strahl (Abbildung 8-12).

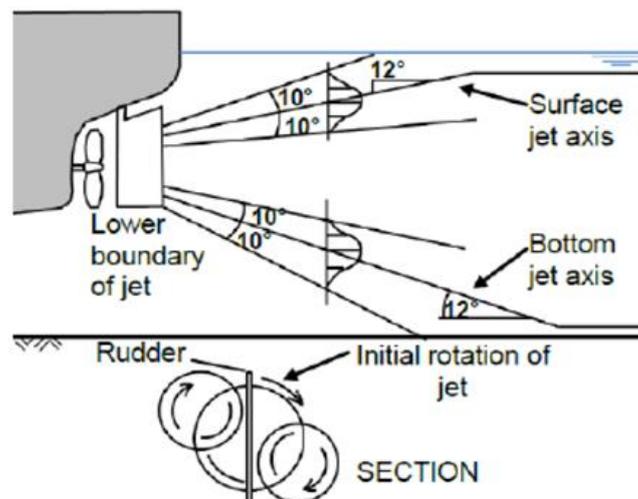


Abbildung 8-12: Wirkung des Ruders auf den Propellerstrahl (PIANC, 2015)

Die Auswirkung des Rudereffekts auf das Koordinatensystem (PIANC, 2015) wird in Abbildung 8-13 gezeigt. Für die Umwandlung des Koordinatensystems in das gedrehte Koordinatensystem wird folgende Rotationsmatrix angewandt:

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 49 von 84

$$\begin{bmatrix} X \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix}$$

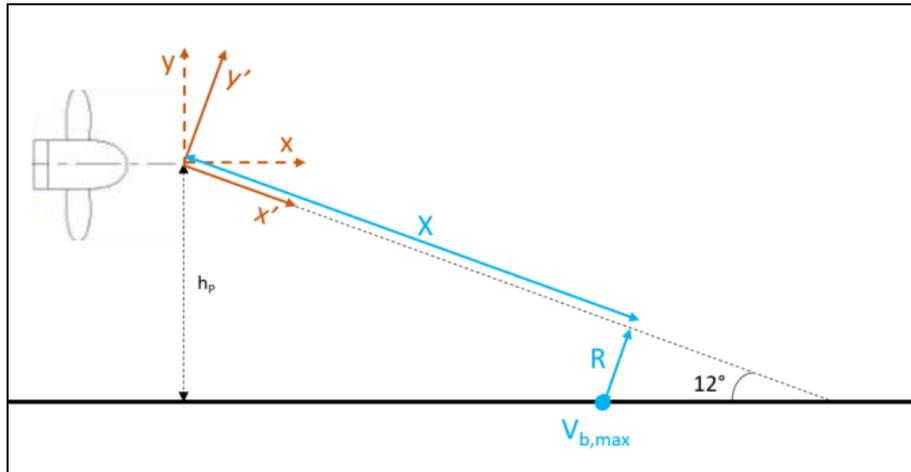


Abbildung 8-13: Anpassung der Koordinaten für $V_{x,r,max}$ aufgrund des Rudereffekts mit Strahlaufspaltung

Wenn in der Analyse keine Ruderwirkung berücksichtigt wird, wird der Strahl nicht nach unten abgelenkt und kommt es nicht zu einer Aufspaltung des Strahls. Dies entspricht der Standardsituation 1 in BAW (2010). Wird die Ruderwirkung dagegen bei der Analyse berücksichtigt, so wird bei der Berechnung von der Standardsituation 2 in BAW (2010) ausgegangen, wie in Abbildung 8-11 dargestellt.

8.7.5 Mehrstrahl

Bei mehreren Strahlen wird der in PIANC (2015) beschriebene Ansatz verfolgt. Die Wirkung mehrerer parallel angeordneter Hauptpropeller wird durch quadratische Überlagerung der Strahlen berücksichtigt (Blokland, 1997; PIANC, 2015):

$$V_{bottom,mehrere} = \sqrt{V_{boden,einzeln,i}^2 + \dots + V_{boden,einzeln,n}^2} \quad (8-16)$$

wobei:

- $V_{Boden,einzeln,i}$ gibt die Geschwindigkeit am Boden [m/s] an, die durch den Einsatz jedes einzelnen Propellers entsteht.
- n [-] gibt die Anzahl der Propeller an.

8.7.6 Einfluss des Pfahls

Aufgrund des Vorhandenseins der Pfähle kommt es um sie herum zu einer Verstärkung der Geschwindigkeit.

  		Strukturell	 	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN		FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03	
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU			Seite 50 von 84	

Die maximalen Geschwindigkeiten am Boden um die Pfähle, V_{Boden} , die anhand der Formeln in PIANC (PIANC, 2015) berechnet wurden, wie in den vorstehenden Abschnitten erläutert wurde, werden dann um einen Faktor gleich **1,2** verstärkt, wie aus den Ergebnissen der von Roelse (2014) durchgeführten Labortests hervorgeht.

8.8 Ergebnisse der maximalen Geschwindigkeit am Boden

Die Ergebnisse der Berechnungen zur maximalen Geschwindigkeit am Boden (Tabelle 8-6) zeigen, dass der maßgebliche Fall der **Lastfall Nummer 13** ist, bei dem der Schlepper **VB Emoe** 50 m von der Achse des LNG-Tankers entfernt ist und 80 % der Propellerleistung verbraucht, und **Lastfall Nummer 3**, bei dem der LNG-Tanker *Bahrain Spirit* einen Ruderwinkel von 35° hat, das Schiff um 40° gedreht ist und einen Abstand von 2,0 B von der Anlegeleine hat.

Tabelle 8-6: Zusammenfassung der Ergebnisse der maximalen Geschwindigkeit am Boden um die Pfähle aufgrund der Schiffspropeller

Fall	Schiffsname	Lastfall	Propeller	P_D [kW]	f_p [%]	D_p [m]	h_p [m]	Ausströmgeschwindigkeit [m/s]	Max. Geschwindigkeit am Boden [m/s] (niederländisch)	Max. Geschwindigkeit am Boden [m/s] (deutsch)
1	Bahrain Spirit	Ruder 35° Schiff an Anlegeleine	Hauptpropeller	21550	20	7,9	5,2	6,0	0,04	0,05
2	Bahrain Spirit	Ruder 35° Schiff um 30° gedreht 1,5 B von der Anlegeleine	Hauptpropeller	21550	20	7,9	5,2	6,0	0,26	1,35
3	Bahrain Spirit	Ruder 35° Schiff um 40° gedreht 2,0 B von der Anlegeleine	Hauptpropeller	21550	20	7,9	5,2	6,0	0,26	1,42
4	Sakura	Ruder 35° Schiff an Anlegeleine	Hauptpropeller	21960	20	8,3	6,4	5,9	0,04	0,05
5	Sakura	Ruder 35° Schiff um 30° gedreht 1,5 B von der Anlegeleine	Hauptpropeller	21960	20	8,3	6,4	5,9	0,26	1,27
6	Sakura	Ruder 35° Schiff um 40° gedreht	Hauptpropeller	21960	20	8,3	6,4	5,9	0,25	1,37

		Strukturell			
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN		FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolk-schutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03		
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU			Seite 51 von 84		

		2,0 B von der Anlegeleine								
7	Sakura	Schiff an Anlegeleine	Bugstrahl- uder	2200	100	2,8	5.8	7,6	0,65	1,22
8	Bugsier 3	50 m ab Achse LNG-Tanker	Propeller	2050	80	2,7	7.8	7,0	0,52	1,17
9	Bugsier 8	50 m ab Achse LNG-Tanker	Propeller	2249	80	2,8	8.3	7,0	0,54	1,22
10	Corvin	50 m ab Achse LNG-Tanker	Propeller	2030	80	2,7	9.1	7,0	0,46	1,08
11	Fairplay 31	50 m ab Achse LNG-Tanker	Propeller	2652	80	3,0	8.3	7,1	0,51	1,22
12	Stella	50 m ab Achse LNG-Tanker	Voith-Schneider-	1845	80	3,5	9.0	4,4	0,29	0,91
13	VB Emoe	50 m ab Achse LNG-Tanker	Propeller	1776	80	2,6	8.3	6,9	0,59	1,34
14	VB Bremen	50 m ab Achse LNG-Tanker	Voith-Schneider-	1870	80	3,5	8.7	4,4	0,29	0,92
15	RT Pioneer	50 m ab Achse LNG-Tanker	Propeller	1566	80	2,5	8.5	6,9	0,56	1,25

8.9 Steinschüttung

8.9.1 Erforderliche Steingröße

In den PIANC-Leitlinien wird empfohlen, nach der Auswahl einer Methode zur Berechnung der Fließgeschwindigkeiten dieselbe Methode auch zur Berechnung der Größe der Steinschüttung anzuwenden. In den folgenden Abschnitten werden daher die deutsche und die niederländische Methode beschrieben.

8.9.1.1 Deutsche Methode

Bei der deutschen Methode wird die in BAW (2010) vorgeschlagene Methode zur Ermittlung des erforderlichen Durchmessers der Steinschüttung herangezogen.

Die mittlere Steingröße D_{50} der Steinschüttungsschicht, die erforderlich ist, um der maximalen Geschwindigkeit am Boden $V_{x,r}$ standzuhalten, berechnet sich wie folgt:

$$D_{50} \geq B_S \cdot \frac{V_{x,r}^2}{g} \cdot \frac{1}{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}} \quad (8-17)$$

wobei B_S der Koeffizient für die Einwirkung eines Propellerstrahls auf eine ebene Sohle ist, mit einem Wert von:

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 52 von 84

- 1,23 bei Schiffen ohne Mittelruder und Binnenschiffen mit Tunnelheck und Bugstrahlruder (Standardsituationen 1 und 4 in Abbildung 8-11)
- 0,64 bei Schiffen mit Mittelruder (Standardsituationen 2 und 3 in Abbildung 8-11).

Wenn der Propellerstrahl auf ein Gefälle trifft anstatt auf eine ebene Sohle, wird der oben angegebene Wert B_S durch $B_{S,B\ddot{o}}$ ersetzt, abhängig vom Winkel des Längsgefälles und vom Winkel des Quergefälles in Richtung des Strahls (BAW, 2010), wie in Abbildung 8-14 angegeben.

Die Korrektur des Koeffizienten B_S zu $B_{S,B\ddot{o}}$ bestimmt sich wie folgt:

$$B_{S,B\ddot{o}} = B_S / K \quad (8-18)$$

$$K = K_l K_q \quad (8-19)$$

$$K_l = \frac{\sin(\alpha_l + \varphi'_{D,hydr})}{\sin(\varphi'_{D,hydr})} \quad (8-20)$$

$$K_q = \cos \alpha_q \sqrt{1 - \frac{(\tan \alpha_q)^2}{(\tan \varphi'_{D,hydr})^2}} \quad (8-21)$$

$$\tan \alpha_l = \tan \beta \cos \beta_{St} \quad (8-22)$$

$$\tan \alpha_q = \tan \beta \sin \beta_{St} \quad (8-23)$$

wobei:

K der Neigungskoeffizient [–] ist

K_l der Koeffizient des Längsgefälles ist (Strömung gefälleaufwärts) [–]

K_q der Koeffizient des Quergefälles [–] ist

α_l der Winkel des Längsgefälles [°] ist

α_q der Winkel des Quergefälles [°] ist

β der Gefällewinkel [°] ist

β_{St} der Auftreffwinkel zwischen der Strahlachse und einer Senkrechten zur Gefällelinie [°] ist. Ein Auftreffwinkel von 0° zeigt an, dass der Strahl senkrecht zum Gefälle verläuft und die Strömung gefälleaufwärts fließt. Ein Winkel von 90° zeigt an, dass die Strömung seitlich über das Gefälle gerichtet ist. Ein Winkel von 180° hingegen zeigt an, dass der Strahl senkrecht zum Gefälle verläuft und die Strömung gefälleabwärts gerichtet ist.

$\varphi'_{D,hydr}$ Böschungswinkel des Steinmaterials, für Stein mit 45° angenommen (BAW, 2010).

Zu beachten ist, dass der Neigungskoeffizient K je nach Strömungsrichtung einen Wert größer oder kleiner 1 annehmen kann. So ist die Strömung beispielsweise bei einem Einwirkungswinkel β_{St} von 0° gefälleaufwärts gerichtet. In diesem Fall ist der Neigungskoeffizient K größer 1. Dementsprechend wäre die erforderliche

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 53 von 84

Steingröße D_{50} kleiner als diejenige, die bei gleicher Geschwindigkeit auf der Horizontalsohle berechnet wurde.

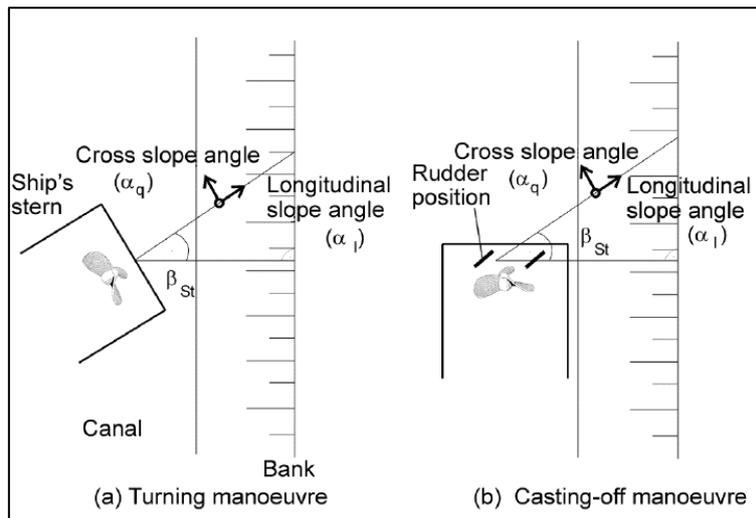


Abbildung 8-14: Schaubild zur Illustration der Einwirkung des Propellerstrahls auf die Böschung während (a) eines Wendemanövers oder (b) der Strahlableitung bei einem Ablegemanöver (BAW, 2010)

8.9.1.2 Niederländische Methode

Bei der niederländischen Methode wird die Pilarczyk-Gleichung verwendet, unter Annahme der in den PIANC-Leitlinien (PIANC, 2015) vorgeschlagenen Parameter:

$$\Delta D_{n50} = \varphi_{sc} \frac{0.035}{\psi_{cr}} k_h k_{sl}^{-1} k_t^2 \frac{U_{bottom}^2}{2g} \quad (8-24)$$

wobei:

- ρ_s die Dichte des Steinmaterials ist;
- ρ_w die Wasserdichte ist;
- Δ die relative Dichte ist, berechnet als ρ_s/ρ_w-1 ;
- D_{n50} der Nominaldurchmesser des Steins ist;
- φ_{sc} der Stabilitätsfaktor ist (= 0,75, wie in PIANC (2015) vorgeschlagen)
- k_t^2 der Turbulenzfaktor ist (= 3,0, wie in PIANC (2015) vorgeschlagen)
- ψ_{cr} der kritische Shields-Parameter ist (= 0,035, wie in PIANC (2015) vorgeschlagen)
- k_h der Tiefenparameter/Geschwindigkeitsprofilfaktor ist (= 1,0, wie in PIANC (2015) vorgeschlagen)
- k_{sl} der Gefälleparameter ist

	Strukturell	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 54 von 84

U_{Boden} die sohlnahe Fließgeschwindigkeit ist.

Der Gefälleinfluss, der in Gleichung (8-24) durch den Koeffizienten K_{Gef} dargestellt wird, berechnet sich nach dem gleichen Ansatz, der auch für die Berechnung des Neigungskoeffizienten K bei der deutschen Methode in Abschnitt 8.9.1.1 verwendet wird.

8.9.2 Erforderliche Steinmasse

Die minimal erforderliche Steinmasse $M_{50,\text{min}}$ berechnet sich entsprechend der Beschreibung in Abschnitt 7.1.2.

8.9.3 Auswahl der Gewichtsklasse

Die erforderliche Gewichtsklasse wird nach dem in Abschnitt 7.1.3 beschriebenen Ansatz ausgewählt.

8.10 Ergebnisse zur erforderlichen Steinschüttung

Tabelle 8-7 enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse zur aufgrund der Wirkung der Schiffspropeller erforderlichen minimalen nominalen Steingröße D_{n50} und Steinmasse M_{50} für die Deckschicht des Kolkschutzes um die Pfähle des LNG-Terminals. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass der maßgebliche Fall der **Lastfall 13** ist, bei dem sich der Schlepper **VB Emoe** in einer Entfernung von 50 m von der Achse des LNG-Tankers befindet und 80 % der Propellerleistung verbraucht.

Tabelle 8-8 zeigt die wichtigsten Parameter, die bei der Berechnung der erforderlichen Steingröße für den maßgeblichen Fall (**Lastfall 13**) berücksichtigt wurden.

		Strukturell			
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN		FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03		
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU			Seite 55 von 84		

Tabelle 8-7: Zusammenfassung der Ergebnisse zur aufgrund der Schiffspropeller erforderlichen minimalen Steingröße D_{n50} und Masse M_{50} des Kolkschutzes um den Pfahl.

Fall	Max. Geschwindigkeit am Boden [m/s] (niederländisch)	Max. Geschwindigkeit am Boden [m/s] (deutsch)	D_{n50} [m] – (niederländisch)	D_{n50} [m] – (deutsch)	M_{50} [kg] – (niederländisch)	M_{50} [kg] – (deutsch)
1	0,04	0,05	0,00	0,00	0,0	0,0
2	0,26	1,35	0,00	0,06	0,0	0,6
3	0,26	1,42	0,00	0,07	0,0	0,8
4	0,04	0,05	0,00	0,00	0,0	0,0
5	0,26	1,27	0,00	0,05	0,0	0,4
6	0,25	1,37	0,00	0,06	0,0	0,7
7	0,65	1,22	0,03	0,10	0,1	2,4
8	0,52	1,17	0,02	0,09	0,0	1,8
9	0,54	1,22	0,02	0,10	0,0	2,3
10	0,46	1,08	0,01	0,08	0,0	1,1
11	0,51	1,22	0,02	0,10	0,0	2,3
12	0,29	0,91	0,01	0,05	0,0	0,4
13	0,59	1,34	0,02	0,11	0,0	4,0
14	0,29	0,92	0,01	0,05	0,0	0,4
15	0,56	1,25	0,02	0,10	0,0	2,7

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolk-schutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 56 von 84

Tabelle 8-8: Wichtigste Parameter, die bei der Berechnung der erforderlichen Steingröße für den maßgeblichen Fall berücksichtigt wurden

Fallnummer:			13
Schiffsname	[-]	Schiffsname	VB Emoe
Typ	[-]	Schiffstyp	Schlepper
ρ_w	[kg/m ³]	Wasserdichte	1025
G	[m/s ²]	Erdbeschleunigung	9,81
Standardsituation	[-]	Standardsituation (BAW, 2010)	1
Propellertyp	[-]	Ummantelt / Nicht ummantelt	Ummantelt
Strahlwinkel	[Gr]	Strahlwinkel (negativ falls nach unten)	0
Tiefgang	[m]	Maximaltiefgang	6,1
C ₃	[-]	Propellertyp-Faktor für Ausströmgeschwindigkeit	1,17
UKC	[m]	Kielfreiheit (Under Keel Clearance)	7,02
P _D	[kW]	Maschinenleistung je Propeller/Strahlruder	1776
D _P	[m]	Propellerdurchmesser	2,59
n _P	[-]	Propelleranzahl	3
h _p	[m]	Achshöhe des Propellers	8,32
V ₀	[m/s]	Ausströmgeschwindigkeit	6,9
Bug_zu_Pfahl	[m]	Abstand vom Bug des Schiffes zur Pfahlmitte	169,9
V _{max,niederl}	[m/s]	Max. Geschwindigkeit am Boden (m/s) (niederländische Methode)	0,6
V _{max,deutsch}	[m/s]	Max. Geschwindigkeit am Boden (m/s) (deutsche Methode)	1,3
ρ_s	[kg/m ³]	Steindichte	2650
Δ	[-]	Relative Steindichte	1,59
Φ	[-]	Stabilitätsparameter	0,75

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 57 von 84

ψ_{cr}	[-]	Kritischer Shields-Parameter	0,035
k_h	[-]	Geschwindigkeitsprofilfaktor	1,0
k_{sl}	[-]	Gefälleparameter	1,03
k_t^2	[-]	Turbulenzfaktor	3,0
Θ	[°]	Innerer Reibungswinkel	40
α	[°]	Quergefälle der Felsschutz	1,5
B_s	[-]	Kritischer Stabilitätskoeffizient – ebene Sohle	1,23
$B_{s,B0}$	[-]	Kritischer Stabilitätskoeffizient – Gefälle	1,19
$D_{n50,niederl}$	[m]	Nominaldurchmesser des Steins (niederländische Methode)	0,02
$D_{n50,deutsch}$	[m]	Nominaldurchmesser des Steins (deutsche Methode)	0,11
Standard-Gewichtsklasse, niederländisch	[-]	Standard-Gewichtsklasse – (niederländische Methode)	CP 32/90
Standard-Gewichtsklasse, deutsch	[-]	Standard-Gewichtsklasse – (deutsche Methode)	CP 90/250

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 58 von 84

8.11 Sensitivitätsanalyse

8.11.1 Anteil an der Propellerleistung bei LNG-Tankern (Lastfall 3)

Es wird eine Sensitivitätsanalyse zum Anteil an der Propellerleistung durchgeführt, der vom LNG-Tanker Bahrain Spirit verbraucht wird (Lastfall 3, wie in Tabelle 8-6 angegeben), da die Werte der maximalen Geschwindigkeiten am Boden für den Lastfall 3 denjenigen ähnlich sind, die für Lastfall 13 (VB Emoe) berechnet wurden.

Tabelle 8-9 zeigt die Ergebnisse dieser Sensitivitätsanalyse, bei der der Leistungsanteil um bis zu 30 % anstieg. Wie zu erwarten war, führt die Erhöhung des Leistungsanteils, der vom Hauptpropeller des LNG-Tankers bei Lastfall 3 verbraucht wird, zu einer Erhöhung der Maximalgeschwindigkeit am Boden auf bis zu 1,6 m/s (deutsche Methode).

Da der Hauptpropeller des LNG-Tankers Bahrain Spirit ein nicht ummantelter Propeller mit Mittelruder ist, ist die Standardsituation für die deutsche Methode der Standardfall 2 (BAW, 2010). Die Berechnung wird daher unter Heranziehung eines kritischen Stabilitätskoeffizienten B_s von 0,64 durchgeführt, wie in Abschnitt 8.9.1.1 erläutert. Der erforderliche Nominaldurchmesser des Steins D_{n50} beträgt folglich 0,09 m – selbst bei einer Erhöhung des Leistungsanteils des LNG-Tankers um 30 % – und ist damit niedriger als der für den Lastfall 13 berechnete Wert in Tabelle 8-8.

Tabelle 8-9: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zum prozentualen Anteil an der Propellerleistung, der vom LNG-Schlepper Bahrain Spirit verbraucht wird (Lastfall 3)

Parameter	Einheit		Wert	Wert	Wert
f_P	[%]	Prozentualer Anteil an der Propellerleistung	20	25	30
Niederländische Methode					
$V_{\max, \text{deutsch}}$ [m/s]	[m/s]	Max. Geschwindigkeit am Boden (m/s) (niederländische Methode)	0.26	0.27	0.29
ρ_s	[kg/m ³]	Steindichte	2650	2650	2650
Δ	[-]	Relative Steindichte	1.59	1.59	1.59
ϕ	[-]	Stabilitätsparameter	0.75	0.75	0.75
ψ_{cr}	[-]	Kritischer Shields-Parameter	0.035	0.035	0.035
k_h	[-]	Geschwindigkeitsprofilfaktor	1.0	1.0	1.0
k_{sl}	[-]	Gefälleparameter	1.03	1.03	1.03

		Strukturell			
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN		FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03		
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU			Seite 59 von 84		

k^2	[-]	Turbulenzfaktor	3.0	3.0	3.0
Θ	[°]	Innerer Reibungswinkel	40	40	40
α	[°]	Quergefälle der Böschung	1.5	1.5	1.5
$D_{n50,niederl}$ [m]	[m]	Nominaldurchmesser des Steins (niederländische Methode)	< 0.01	0.01	0.01
Standard-Gewichtsklasse	[-]	Standard-Gewichtsklasse – (niederländische Methode)	CP 32/90	CP 32/90	CP 32/90
Deutsche Methode					
$V_{max,niederl}$ [m/s]	[m/s]	Max. Geschwindigkeit am Boden (m/s) (deutsche Methode)	1.4	1.5	1.6
Standardsituation	[-]	Standardsituation (BAW, 2010)	2	2	2
B_s	[-]	Kritischer Stabilitätskoeffizient – ebene Sohle	0.64	0.64	0.64
$B_{s,B0}$	[-]	Kritischer Stabilitätskoeffizient – Gefälle	0.62	0.62	0.62
$D_{n50,niederl}$ [m]	[m]	Nominaldurchmesser des Steins (deutsche Methode)	0.07	0.08	0.09
Standard-Gewichtsklasse	[-]	Standard-Gewichtsklasse – (deutsche Methode)	CP 45/125	CP 63/180	CP 63/180

8.11.2 Prozentualer Anteil an der Propellerleistung beim Schlepper VB Emoe

Sensitivitätsanalyse zum prozentualen Anteil an der Propellerleistung, die vom Schlepper VB Emoe beim Ablegemanöver des LNG-Tankers verbraucht wird (Lastfall 13, wie in Tabelle 8-7 angegeben).

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Gewichtsklasse CP 90/250 selbst dann stabil ist, wenn man berücksichtigt, dass der Schlepper 100 % des prozentualen Leistungsanteils verbraucht, was höher ist als die in [10] angegebenen Werte.

Die Eingabeparameter, die für die Berechnung dieser Sensitivitätsanalyse berücksichtigt wurden, sind – abgesehen von einer Änderung hinsichtlich des prozentualen Leistungsanteils – die gleichen wie die in Tabelle 8-8 genannten Eingabeparameter.

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 60 von 84

Tabelle 8-10: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zum prozentualen Anteil an der Propellerleistung, die vom Schlepper VB Emoe beim Ablegemanöver des LNG-Tankers verbraucht wird (Lastfall 13)

Parameter	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert
Prozentualer Anteil an der Propellerleistung [%]	80	85	90	95	100
$V_{\max, \text{niederl}}$ [m/s]	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
$V_{\max, \text{deutsch}}$ [m/s]	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4
$D_{n50, \text{niederl}}$ [m]	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
$D_{n50, \text{deutsch}}$ [m]	0.11	0.12	0.12	0.13	0.13
Standard-Gewichtsklasse, niederländisch	CP 32/90				
Standard-Gewichtsklasse, deutsch	CP 90/250				

8.11.3 Schlepper nahe des Pfahls

Die Navigationsstudie bietet keine Detailangaben zur Frage, welchen prozentualen Leistungsanteil der Schlepper verbraucht, wenn er nicht gerade den LNG-Tanker während des An- oder Ablegemanövers zieht bzw. schiebt. Der Schlepper fährt jedoch möglicherweise sehr nah an den Dalben vorbei, selbst wenn er dabei weniger Propellerleistung verbraucht.

Daher wird eine weitere Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Bei dieser Analyse wird der Schlepper *VB Emoe* berücksichtigt, der sich in einer Entfernung von 10 bis 40 m von den Pfählen befindet, aber einen niedrigeren prozentualen Anteil an der Propellerleistung verbraucht als der Anteil, der berücksichtigt wird, wenn Schlepper den LNG-Tanker unterstützen. Grund für die Berücksichtigung des Schleppers *VB Emoe* in dieser Analyse ist, dass dieser Schlepper nach der in Abschnitt 8.10 beschriebenen Analyse zu einer größeren Geschwindigkeit am Boden führt.

In den PIANC-Leitlinien wird angegeben, dass der prozentuale Anteil an der Leistung, der beim Manövrieren für die Hauptpropeller verbraucht wird, im Durchschnitt 5 bis 15 % beträgt, mit 15 % bei exponierteren Bedingungen (wie z. B. in der Strömung). Der Leistungsanteil der Schlepper wird nach einem konservativen Ansatz mit 30 % angenommen, wenn sie sich sehr nahe an den Pfählen befinden.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse in Tabelle 8-11 zeigen, dass angesichts der Tatsache, dass sich der Schlepper *VB Emoe* in der Nähe des Pfahls befindet und der Strahl auf die Pfähle gerichtet ist, die Gewichtsklasse **LMA 5/40** erforderlich ist.

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 61 von 84

Die Eingabeparameter, die für die Berechnung dieser Sensitivitätsanalyse herangezogen wurden, gleichen den in Tabelle 8-8 genannten Eingabeparametern mit der Ausnahme, dass eine andere Schlepperposition und ein anderer prozentualer Anteil an der Propellerleistung herangezogen wurden.

Tabelle 8-11: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse, im Rahmen derer der Schlepper VB Emoe berücksichtigt wurde, in einer Entfernung von 10 bis 40 m von den Pfählen, bei einer angelegten Leistung von 30 % und einem auf die Pfähle gerichteten Strahl

Parameter	Wert	Wert	Wert	Wert
Schlepper	VB Emoe	VB Emoe	VB Emoe	VB Emoe
Prozentualer Anteil an der Propellerleistung [%]	30	30	30	30
Anstand vom Schlepperheck zum Pfahl [m]	10	20	30	40
$V_{\max, \text{niederl}}$ [m/s]	1.7	1.5	1.3	1.2
$V_{\max, \text{deutsch}}$ [m/s]	1.6	1.7	1.7	1.6
$D_{n50, \text{niederl}}$ [m]	0.19	0.16	0.13	0.10
$D_{n50, \text{deutsch}}$ [m]	0.16	0.18	0.18	0.17
Standard-Gewichtsklasse, niederländisch	LMA 5/40	LMA 5/40	CP 90/250	CP 63/180
Standard-Gewichtsklasse, deutsch	LMA 5/40	LMA 5/40	LMA 5/40	LMA 5/40

	Strukturell	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 62 von 84

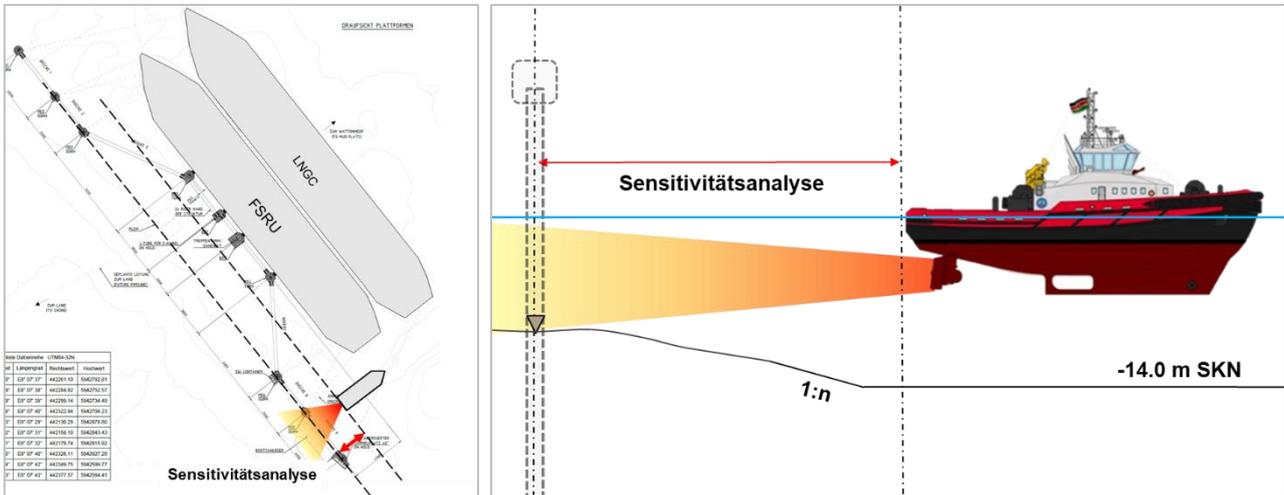


Abbildung 8-15: Sensitivitätsanalyse bei in der Nähe der Dalben befindlichem Schlepper und auf die Dalben gerichtetem Strahl

9 Zusammenfassung des vorgeschlagenen Kolkschutzes um die Pfähle

9.1 Gewichtsklasse für die Deckschicht

Ausgehend von der Analyse der maximalen Geschwindigkeit am Boden und der aufgrund von Wellen und Strömung erforderlichen Steingröße um die Pfähle herum (Kapitel 7) sowie aufgrund der Wirkung von Schiffspropellern (Kapitel 8) wird eine minimale Gewichtsklasse von **LMA 5/40** für die Bemessung der Deckschicht des Kolkschutzes ausgewählt, die einen Nominaldurchmesser des Steins D_{n50} von 0,20 m und eine mittlere Masse M_{50} von 20 kg aufweist.

9.2 Deckschichtdicke

Für die erforderliche Mindestdicke der Deckschicht des Kolkschutzes wird auf BAW (2008) verwiesen, die für die Gesteinskörnung LMA 5/40 eine Mindestdicke von 0,60 m empfiehlt.

9.3 Bemessung der Filterschicht

Um ein Migrieren von Meeresbodenmaterial durch die Steinschichten zu verhindern, ist zwischen der Deckschicht des Kolkschutzes und dem Meeresboden eine Kornfilterschicht vorgesehen. Die Filterleistung wird anhand der Filterkriterien analysiert.

Kornfilter schützen den Untergrund, d. h. die Tragschicht, vor Erosion aufgrund von strömungsinduzierten Belastungen (statische und schwankende Verwirbelungskomponenten). Die Anströmgeschwindigkeit oder Wasserstands Differenz erzeugt die statische Last über Wasserbauwerken, während die schwankende Last die Verwirbelungen aufgrund der Bauwerksgeometrie oder der Oberflächenrauheit widerspiegelt.

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolksschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 63 von 84

Die Erosionsbeständigkeit (bzw. -festigkeit) von Kornfiltern bestimmt sich hauptsächlich nach den geometrischen Eigenschaften der verwendeten Materialien. In Bezug auf das Retentionskriterium lassen sich ausgehend von den beiden Kriterien, die Erosion ermöglichen, folgende Filtertypen unterscheiden: (1) das Basismaterial kann die Poren im Filtermaterial passieren, und (2) die hydraulische Belastung ist größer als der Schwellenwert:

- Geometrisch geschlossene (sanddichte) Filter: Es ist kein Transport von Basismaterial möglich.
- Stabile, geometrisch offene (sanddichte) Filter, auch bezeichnet als hydrodynamisch sanddichte Filter: die hydraulische Belastung liegt unter dem Schwellenwert für den Einsatz der Bewegung.

Die Filterschicht wird zunächst als geometrisch geschlossene Filter ausgelegt. In Fällen, in denen dies nicht durchführbar ist, kommt ein geometrisch offener Filter in Betracht.

9.3.1 Geometrisch geschlossener Filter

Zur Vorbeugung einer Erosion des Meeresbodenmaterials durch die Steinschichten (Auswaschen) ist zwischen der Deckschicht des Kolksschutzes und dem Meeresboden eine Filterschicht vorgesehen. Die Filterleistung wird anhand von Filterkriterien für die Schnittstellen der verschiedenen Schichten (Meeresboden, Filter und Deckschicht) analysiert.

Die Grenzfläche zwischen der Deck- und der Filterschicht wird als geometrisch geschlossener Filter ausgelegt. Es werden die bekannten Kriterien für die Grenzflächenstabilität und die Durchlässigkeit herangezogen, wie im Rock Manual (CIRIA et al., 2007) und in BAW (BAW, 2012) angegeben:

- Grenzflächenstabilität:

$$D_{15,max,f} / D_{85,min,b} < 5 \quad (9-1)$$

- Durchlässigkeit :

$$D_{15,min,f} / D_{15,max,b} > 1 \quad (9-2)$$

wobei D_{15} und D_{85} der 15%- und der 85%-Wert der Siebkurve sind. Das feinere der beiden Materialien wird als Basismaterial (b) bezeichnet, das gröbere als Filtermaterial (f). Min, Max und Mittel geben den Minimal-, Maximal- und Mittelwert der Siebkurve für eine Standard-Gewichtsklasse an (CIRIA et al., 2007).

Darüber hinaus muss die Filterklasse den Kriterien für interne Stabilität entsprechen (CIRIA et al., 2007):

- Interne Stabilität:

$$D_{60,avg,f} / D_{10,avg,f} < 10 \quad (9-3)$$

Die von Myogahara entwickelte Methode wird auch zum Nachweis der Sicherheit gegen Kontakterosion zwischen den Kornfiltern und der Deckschicht eingesetzt (BAW, 2012). Nach Myogahara erfordert die Sicherheit gegen Kontakterosion, dass:

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 64 von 84

$$D_{15,avg,f} / D_{30,avg,b} \leq 40 \quad (9-4)$$

9.3.2 Geometrisch offener Filter

Die Grenzfläche zwischen Filter und Meeresboden wird als stabiler, geometrisch offener Filter (oder hydrodynamisch sanddichter Filter) ausgelegt. Durch den Einsatz des stabilen, geometrisch offenen Filters können sich einige Bettpartikel innerhalb der Filterschicht bewegen, aber nicht darüber. Die Dicke des Filtermaterials wird so dimensioniert, dass die Belastung der Filterschicht verringert und eine Bildung von Kolken im darunter liegenden Sohlmaterial verhindert wird. Die jüngsten Entwicklungen im Bereich der Anwendung von offenen Filtern konzentrieren sich auf gleichmäßige Strömungsbelastungen.

Die zur Verhinderung der Erosion des Meeresbodenmaterials minimal erforderliche Dicke der Filterschicht wird auf der Grundlage der nachstehenden Formeln von Hoffmans (2012) für turbulente Strömungsverhältnisse bestimmt und durch Van de Sande et al. (2014) für weitgestuftes Filtermaterial optimiert.

- **Hoffmans (2012):**

$$\frac{d_F}{D_{50,avg,f}} = 1.2 \ln \left(\frac{D_{50,avg,f}}{D_{50,avg,b}} \right) \quad (9-5)$$

wobei:

- d_F die Filterdicke ist
- $D_{50,avg,f}$ der mittlere Durchmesser des Filtermaterials ist
- $D_{50,avg,b}$ der mittlere Durchmesser des Basismaterials ist

- **Van de Sande et al. (2014):**

$$\frac{d_F}{D_{50,avg,f}} = \alpha_d \ln \left(\frac{D_{50,avg,f} \Delta_f \theta_{cr,f} (1 - \gamma V_f)}{D_{50,avg,b} \Delta_b \theta_{cr,b} (1 - \gamma V_b)} \right) \quad (9-6)$$

wobei:

- α_d der Koeffizient gleich 0,82 ist (oberer Grenzwert nach dem deterministischen Ansatz);
- Δ_f die relative Materialdichte des Filtermaterials unter Wasser ist;
- Δ_b die relative Materialdichte des Basismaterials unter Wasser ist;
- $\theta_{cr,f}$ der kritische Stabilitätsparameter (Shields-Parameter) für das Filtermaterial ist;
- $\theta_{cr,b}$ der kritische Stabilitätsparameter (Shields-Parameter) für das Basismaterial ist;

	Strukturell	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 65 von 84

γ der Transportparameter ist ($\gamma = 0,625$);

V_f der Variationskoeffizient ist, der die Ungleichmäßigkeit des Filtermaterials widerspiegelt:

$$V_f = 1 - D_{15,avg,f}/D_{50,avg,f} \quad (9-7)$$

V_b der Variationskoeffizient ist, der die Ungleichmäßigkeit des Basismaterials widerspiegelt:

$$V_b = 1 - D_{15,avg,b}/D_{50,avg,b} \quad (9-8)$$

Bei Sand als Basismaterial und Kies als Filtermaterial wird nach Van de Sande et al. (2014) ein Verhältnis von $\frac{\theta_{cr,f}}{\theta_{cr,b}} = 1,5$ angenommen.

9.3.3 Erforderliche Filterschicht

Für eine Kornfilterschicht, die als geometrisch geschlossener Filter ausgelegt ist, werden im Hinblick auf die Stabilität und Durchlässigkeit der Grenzfläche diejenigen Kriterien herangezogen, die im Rock Manual (2007) und in BAW (BAW, 2012) für weitgestuftes Filtermaterial angegeben sind.

Nach den Regeln für geometrisch geschlossene Filter haben die als Filterschicht ausgewählten Steine die Gewichtsklasse **32/90 mm**. Tabelle 9-1 fasst die charakteristischen Großverteilungen für die Deckschicht LMA 5/40, die Filterschicht 32/90 mm und die Bodenunterlage zusammen. Die Berechnungen und Ergebnisse der Regeln für geometrisch geschlossene Filter für die Deckschicht-Filter-schicht sind in Tabelle 9-2 angegeben. Den Berechnungen zufolge werden die Regeln für geometrisch geschlossene Filter im Hinblick auf die Grenzfläche zwischen der Deckschicht LMA 5/40 und der Filterschicht 32/90 mm eingehalten.

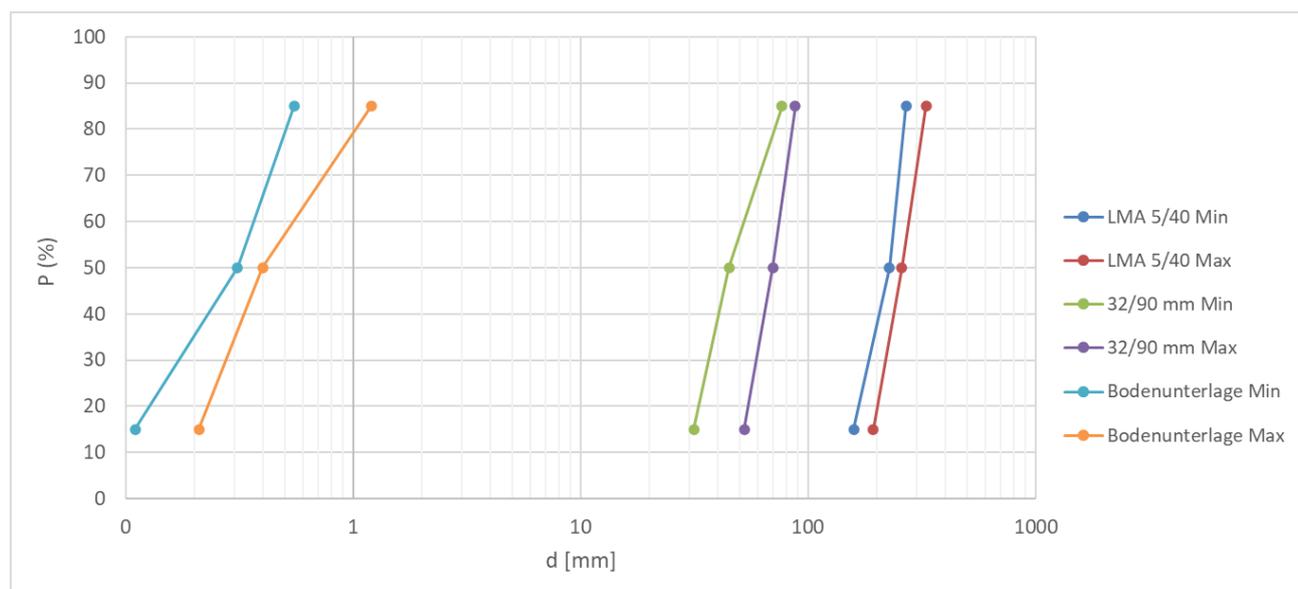


Abbildung 9-1: Steingrößenverteilung für Deckschicht LMA 5/40 und Filterschicht 32/90 mm und Großverteilung des Bodenunterlagenmaterials.

		Strukturell		
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN		FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03	
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU			Seite 66 von 84	

Tabelle 9-1: Steingrößenverteilung für Deckschicht LMA 5/40 und Filterschicht 32/90 mm und Großverteilung des Bodenunterlagenmaterials.

Parameter	Einheit	LMA 5/40	32/90 mm	Bodenunterlage
D _{15,min}	[mm]	159	32	0,110
D _{50,min}	[mm]	228	45	0,310
D _{85,min}	[mm]	270	77	0,550
D _{15,mittel}	[mm]	177	42	0,158
D _{50,mittel}	[mm]	244	58	0,344
D _{85,mittel}	[mm]	302	82	0,764
D _{15,max}	[mm]	193	53	0,210
D _{50,max}	[mm]	258	70	0,400
D _{85,max}	[mm]	329	88	1,200

Tabelle 9-2: Ergebnisse der Regeln für geometrisch geschlossene Filter für die Deckschicht-Filterschicht nach Rock Manual (2007) und BAW (2012).

	Quelle	Regeln für geschlossene Filter	Grenzfläche Deck- (f) und Filterschicht (b)
$D_{15,max,f} / D_{85,min,b}$	Rock Manual (2007)	< 5,0	193 / 77 = 2,5
$D_{15,min,f} / D_{15,max,b}$	Rock Manual (2007)	> 1,0	159 / 53 = 3,0
$D_{15,avg,f} / D_{30,avg,b}$	BAW (2012)	≤ 40	177 / 49 = 3,6

Da die Regeln für geometrisch geschlossene Filter nicht erfüllt sind, wird die Grenzfläche zwischen Filter und Meeresboden als stabiler offener Filter (oder hydraulisch geschlossener Filter) ausgelegt. Die Dicke des Filtermaterials wird so dimensioniert, dass die Belastung der Filterschicht verringert und ein Migrieren des darunter liegenden Sohlmaterials verhindert wird.

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolksschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 67 von 84

Die Mindestschichtdicke wird unter Berücksichtigung der erforderlichen Filterdicke für eine stabile Leistung des offenen Filters definiert. Die Ergebnisse aus den Berechnungen der Mindestdicke der Filterschicht werden in Tabelle 9-3 dargestellt.

Tabelle 9-3: Ergebnisse aus der Berechnung der Mindestdicke der Filterschicht

1. Hoffmans (2012)	
$D_{50,mittel,f} / D_{50,mittel,b} [-]$	167
Mindestdicke der Filterschicht [m]	0,35
2. Van de Sande et al. (2014)	
$\alpha_d [-]$	0,82
$D_{50,mittel,f} / D_{50,mittel,b} [-]$	167
$\Delta_f / \Delta_b [-]$	1,0
$\theta_{cr,f} / \theta_{cr,b} [-]$	1,5
$\gamma [-]$	0,625
$V_f = 1 - D_{15,f} / D_{50,f} [-]$	0,27
$V_b = 1 - D_{15,b} / D_{50,b} [-]$	0,54
Mindestdicke der Filterschicht [m]	0,27

Im Rahmen eines konservativen Ansatzes wird eine erforderliche Mindestdicke der Filterschicht von **0,40 m** für die Bemessung der Filterschicht in Betracht gezogen und für den Einbau als durchführbar angenommen (CIRIA *et al.*, 2007) (BAW, 2012).

Abbildung 9-2 zeigt die Mindestdicke der Deckschicht und der Filterschicht des Kolksschutzes um den Pfahl für den Fall eines bündig mit dem Meeresboden eingebauten Kolksschutzes.

	Strukturell	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolksschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 68 von 84

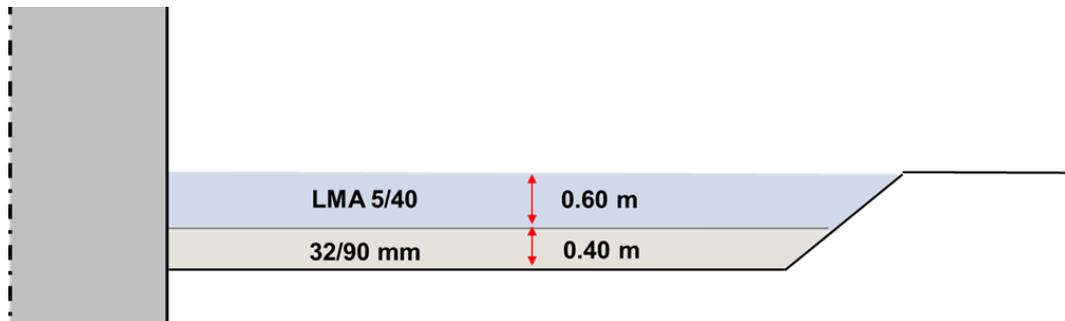


Abbildung 9-2: Mindestdicke der Deckschicht und der Filterschicht des Kolksschutzes um den Pfahl (Fall eines bündig mit dem Meeresboden eingebauten Kolksschutzes)

9.4 Horizontale Ausdehnung des Kolksschutzes

Hinsichtlich der erforderlichen Ausdehnung von Kolksschutz um einen vertikalen Pfahl bietet die Literatur mehrere Vorschläge. Von De Vos (2008) beschriebene Modellversuche, bei denen Wellen und Strömungen berücksichtigt wurden, zeigen, dass der Pfahl in einer Entfernung von $2 D_{\text{Pfahl}}$ vom Pfahl keinen Einfluss auf die Fließgeschwindigkeit hat, wobei der Verstärkungsfaktor für die Sohlschubspannung fast gleich 1 ist.

Nach den Erfahrungen von IMDC mit Offshore-Bauwerken lässt sich die erforderliche Mindestausdehnung des Kolksschutzes auf ca. 1 bis $1,5 D_{\text{Pfahl}}$ reduzieren. Diese Ausdehnung entspricht einer typischen Angabe für den Kolksschutzdurchmesser bei Monopiles von 3 bis 4 mal D_{Pfahl} (Sumer and Fredsøe, 2002), allerdings ausschließlich der erforderlichen zusätzlichen Breite zur Aufnahme des zusätzlichen Steinvolumens für die Bildung einer Fallschürze („*falling apron*“) (DNV, 2022).

Es wird eine erforderliche Mindestausdehnung des Kolksschutzes gleich $1,3 D_{\text{Pfahl}}$ angenommen, ausschließlich der Fallschürze („*falling apron*“).

Zur Definition der horizontalen Gesamtausdehnung des Kolksschutzes können der Kolk, der am Rand des Schutzes auftreten könnte (Abschnitt 9.4.1), und die Bemessung der Fallschürze („*falling apron*“) (Abschnitt 9.4.2) berücksichtigt werden.

9.4.1 Randkolk

Wenn der Kolksschutz auf dem Meeresboden errichtet wird, kann der Meeresboden rund um den Kolksschutz aufgrund von Strömungsstörungen (Wirbel, Turbulenzen, Strömungsblockaden usw.), die durch den Kolksschutz selbst erzeugt werden, abgetragen werden. Dies wird als Randkolk bezeichnet. Die größte Randkolkentiefe entwickelt sich meist stromabwärts des Kolksschutzes zur Strömungsrichtung. Denn die Strömung transportiert das Sediment auf der Leeseite vom Kolksschutz weg, ohne neues Sediment zu liefern.

Randkolk wird von der Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst. Bei symmetrischen Gezeiten kommt es entlang der Gezeitenachse beidseitig zur Bildung von Randkolk. Bei asymmetrischen Gezeiten ist der Randkolk stromabwärts zur dominanten Tide am tiefsten. Von **Petersen et al. (2015)** wurde der Randkolk im Hinblick auf Monopile-Fundamente auf der Grundlage von experimentellen Untersuchungen und Feldstudien analysiert.

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolk schutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 69 von 84

Bei einer gleichmäßigen Strömung, hinsichtlich derer angenommen wird, dass sie für die Kolkbildung maßgeblich ist, wird die zu erwartende maximale Kolk tiefe an den Querseiten, S_t , in Abhängigkeit von der Höhe des Kolk schutzes ausgewählt (linke Darstellung in Abbildung 9-4):

- bei bündig mit dem Meeresboden ausgeführten Bermen (linke Darstellung in Abbildung 9-3) ist S_t vergleichbar mit der Größe des Steins der Deckschicht D_{50} .
- bei auf dem Meeresboden ausgeführten Bermen (rechte Darstellung in Abbildung 9-3) beträgt S_t rund 0,85 der Dicke des Schutzes h_b . Bei einer Kolk schutzdicke $h_b = 1,00$ m ist S_t gleich 0,85 m.

Die Kolk tiefe stromabwärts des Bauwerks, S_d , wird durch Wirbelschleppen im Lee des Pfahls und des Kolk schutzes verursacht. Sie wird in Abhängigkeit von der Höhe des Kolk schutzes ausgewählt (rechte Darstellung in Abbildung 9-4):

- bei bündig mit dem Meeresboden ausgeführten Bermen (linke Darstellung in Abbildung 9-3) ist S_d gleich $0,25 D_{\text{Pfa hl}}$. Dies entspricht dem Vorschlag von Hoffmans & Verheij (1997).
- bei auf dem Meeresboden ausgeführten Bermen (rechte Darstellung in Abbildung 9-3) ist S_d abhängig von der Höhe des Kolk schutzes und entspricht $0,5 D_{\text{Pfa hl}}$.

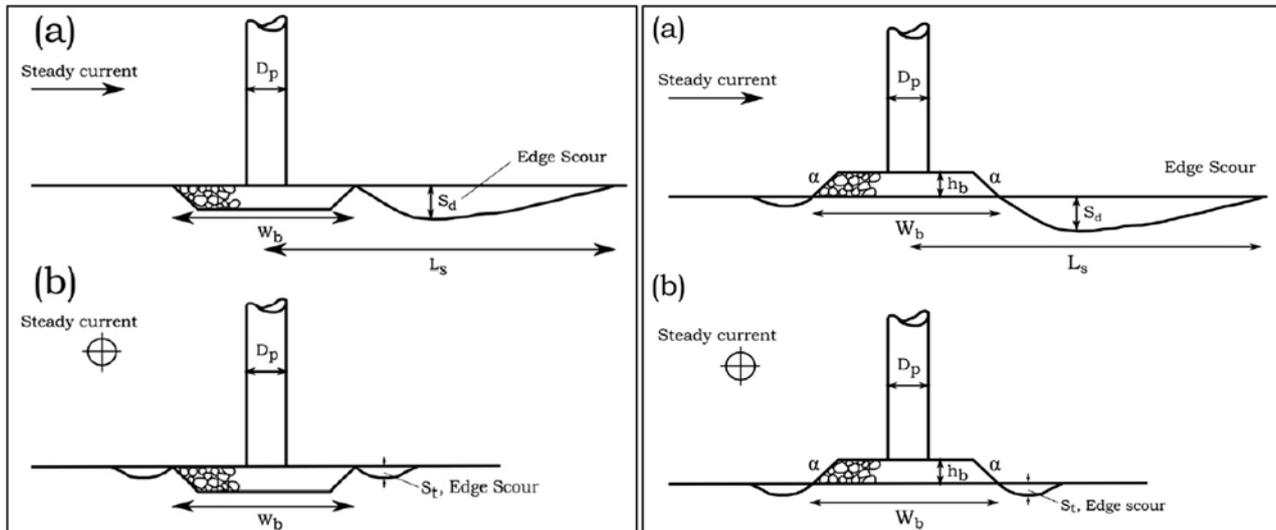


Abbildung 9-3: Definitionsskizze für die Anordnungen, bei denen der Kolk schutz bündig mit dem Meeresboden ausgeführt wurde (linke Darstellung) bzw. auf dem Meeresboden ausgeführt wurde (rechte Darstellung). (a) durch Strömung stromabwärts des Kolk schutzes erzeugtes Kolk kloch; (b) durch Strömung am Querschnitt des Kolk schutzes erzeugter Kolk (Petersen et al., 2015)

  	Strukturell	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 70 von 84

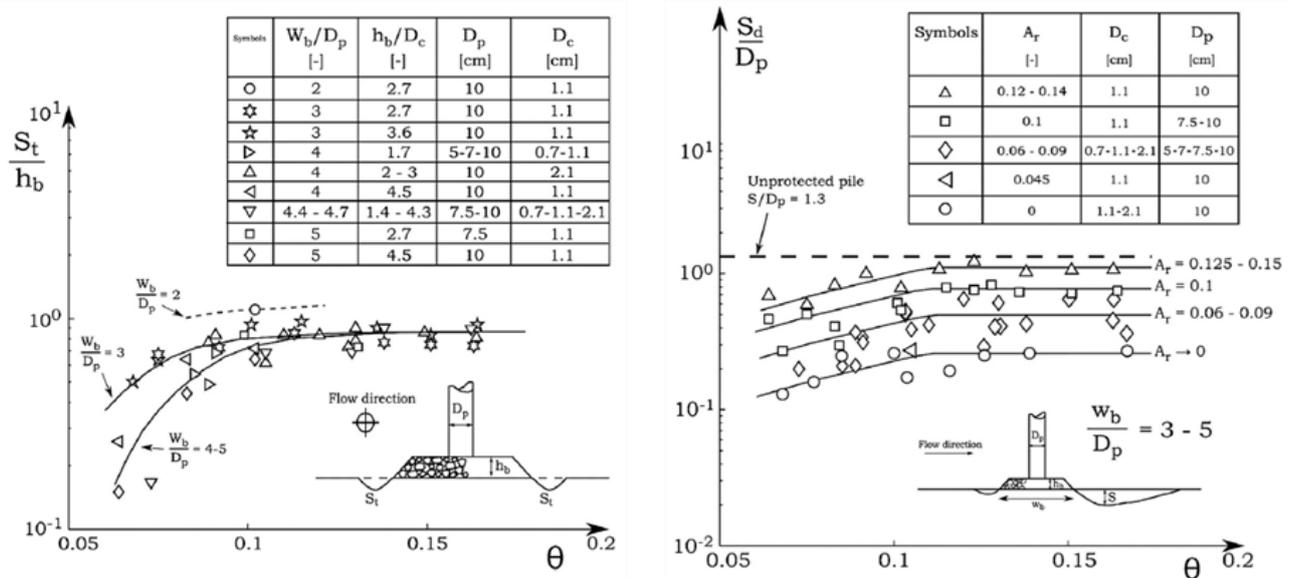


Abbildung 9-4: Normalisierte maximale Kolkentiefe im Nahbereich an der Querseite (linke Darstellung) und stromabwärts (rechte Darstellung) des Kolkschutzes bei gleichmäßiger Strömung. A_r entspricht h_b/w_b . Bei bündig mit dem Meeresboden ausgeführten Bermen gilt $A_r = 0$ (Petersen et al., 2015).

Nach Vorschlägen von May et al. (2002) liegt das stromaufwärts gerichtete Gefälle $\tan(\beta_1)$ zwischen 1/2 und 1/3 und ist ca. doppelt so steil wie das stromabwärts gerichtete Gefälle $\tan(\beta_2)$, das folglich zwischen 1/4 und 1/6 schwankt.

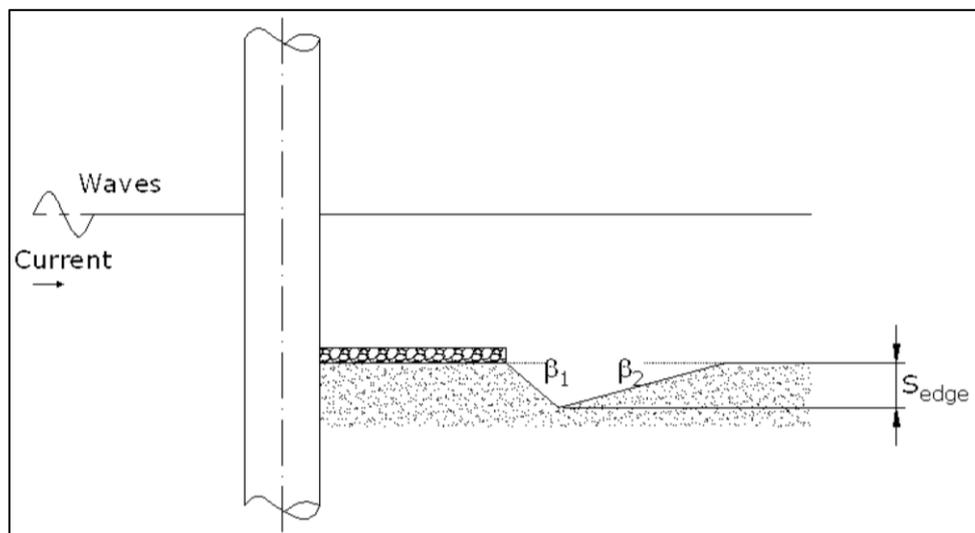


Abbildung 9-5 : Randkolk – Definitionsskizze (De Vos, 2008)

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolksschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 71 von 84

Wie weiter oben dargelegt, ist der Randkolk um den Kolksschutz abhängig von der Konfiguration des Kolksschutzes. Dabei ist die Randkolkbildung bei direkt auf dem Meeresboden ausgeführtem Kolksschutz stärker als die Randkolkbildung, die bei Kolksschutz berechnet wurde, der mit dem Meeresboden bündig ist. In Tabelle 9-4 werden die Ergebnisse zur maximalen Tiefe und Ausdehnung des Randkolks bei Abweis- und Vertäudalben zusammengefasst.

Für die Anlegedalben wird der Kolksschutz angesichts der Tatsache, dass die erforderliche Ausbringungsebene der Baggergrube bei $-14,0$ m SKN liegen muss, auf der gleichen Ebene wie die Ausbringungsebene ausgelegt und somit in einen Graben ausgeführt, dessen Breite der Dicke des Kolksschutzes entspricht (= 1,00 m).

Die Berechnungen für die Vertäudalben erfolgen hingegen unter Berücksichtigung der Tatsache, dass der Kolksschutz direkt auf dem Meeresboden ausgeführt wird, ohne dass ein Baggergraben erforderlich wäre.

Tabelle 9-4: Maximale Tiefe und Ausdehnung des Randkolks bei Abweis- und Vertäudalben

Parameter	Einheit	Anlegedalben	Vertäudalben
S_t	[m]	0,23	0,85
S_d	[m]	1,13	2,25
Stromaufwärts gerichtetes Gefälle β_1 (1:x)	[-]	2,50	2,50
Stromabwärts gerichtetes Gefälle β_2 (1:x)	[-]	5,00	5,00
Ausmaß des stromaufwärts gerichteten Gefälles	[m]	2,8	5,6
Ausmaß des stromabwärts gerichteten Gefälles	[m]	5,6	11,3
Gesamtausdehnung des Randkolks	[m]	8,4	16,9

9.4.2 Fallschürze

Die Fallschürze („*falling apron*“) ist ein Fußschutz, der sich an Kolke anpassen und dem Randkolk und den bathymetrischen Veränderungen nach unten folgen kann. Ziel ist, am Fuß des Kolksschutzes zusätzliche Steine einzubauen.

Der Randkolk (siehe Abschnitt 9.4.1) und die Absenkung des Meeresbodens aufgrund der Mobilität des Meeresbodens führen dazu, dass das Gestein nach unten rollt: Es muss genügend zusätzliches Material

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolksschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 72 von 84

eingebaut werden, um das Gefälle mit einer Dicke abzudecken, die hinreichend groß ist, um das darunter liegende Meeresbodenmaterial zu schützen und dadurch zu verhindern, dass der eigentliche Kolksschutz untergraben wird (May et al., 2002).

Für die gesamte erwartete Sohldegradation, h_{bd} , am Rand des Kolksschutzes wird Folgendes berücksichtigt:

- Randkolk aufgrund des Vorhandenseins des Kolksschutzes, wie in Abschnitt 9.4.1 berechnet;
- Absenkung des Meeresbodens aufgrund der Mobilität des Meeresbodens. Es wurde eine morphologische Studie mit numerischen Modellen (IMDC, 2023c) durchgeführt, um die maximale Erosion zu untersuchen, die am Projektstandort auftreten kann, einschließlich der Wirkung der am LNG-Terminal anlegenden Schiffe. Die Studie hat ergeben, dass am Ort der Vertäudalben keine wesentlichen Sohländerungen zu erwarten sind. Dahingegen kann es an den Orten in Heck- und Bugnähe der FSRU und des LNG-Tankers aufgrund der Verstärkung der Geschwindigkeit am Boden durch die anlegenden Schiffe zu Erosion kommen. Für die vorliegende Analyse wird für Orte in der Nähe der Anlegedalben eine Absenkung des Meeresbodens aufgrund der Mobilität des Meeresbodens von 1,9 m angenommen. Für die Vertäudalben hingegen wird keine Absenkung des Meeresbodens angenommen.

Dabei ist zu beachten, dass der Kolksschutz der Anlegedalben so ausgelegt ist, dass seine oberste Ebene an der Sohlebene ausgerichtet ist. Der Fallschürzen-Mechanismus wird aktiviert, wenn die Sohlebene am Rand des Kolksschutzes tiefer ist als die untere Ebene des Kolksschutzes. Aufgrund der Unsicherheiten bezüglich der Quantifizierung der maximalen Erosion, die unterhalb der FSRU und des LNG-Tankers auftreten kann, berechnet sich die gesamte erwartete Sohldegradation h_{bd} als Summe des Randkolks und der Meeresbodenabsenkung aufgrund der Mobilität des Meeresbodens (konservativer Ansatz), gemessen vom Boden des Kolksschutzes (siehe Skizze der Anlegedalben in Abbildung 9-6).

Die für die Bemessung der Fallschürze berücksichtigten h_{bd} -Werte betragen:

- 2,0 m bei den Anlegedalben. Da die oberste Ebene der Steinschüttung um die Anlegedalben bei –14,0 m SKN (einschließlich Einbautoleranzen) liegt und die Dicke des Schutzes 1,00 m beträgt, ist die endgültige Ebene nach der Erosion am Rand der Anlegedalben gleich –17,0 m SKN. Die Gesamterosion, die am Rand des Kolksschutzes der Anlegedalben auftreten könnte, wird daher auf 3,0 m geschätzt (Abbildung 9-6).
- 2,3 m bei den Vertäudalben. Der Kolksschutz bei Vertäudalben kann direkt auf der vorhandenen Sohlebene verlegt werden, die sich zwischen –11,0 und –12,2 m SKN bewegt. Die endgültige Ebene nach der Erosion am Rand der Vertäudalben wird daher voraussichtlich zwischen –13,3 und –14,5 m SKN liegen.

Die Ausdehnung der Fallschürze und die Menge der Steine sollten ausreichen, um die Seitengefälle des Randkolks abzudecken (CIRIA *et al.*, 2007). Für die Bemessung der Fallschürze werden die im Rock Manual (CIRIA *et al.*, 2007) angegebenen Methodiken und die Formeln von de Sonnevillie et al. (2012) herangezogen.

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 73 von 84

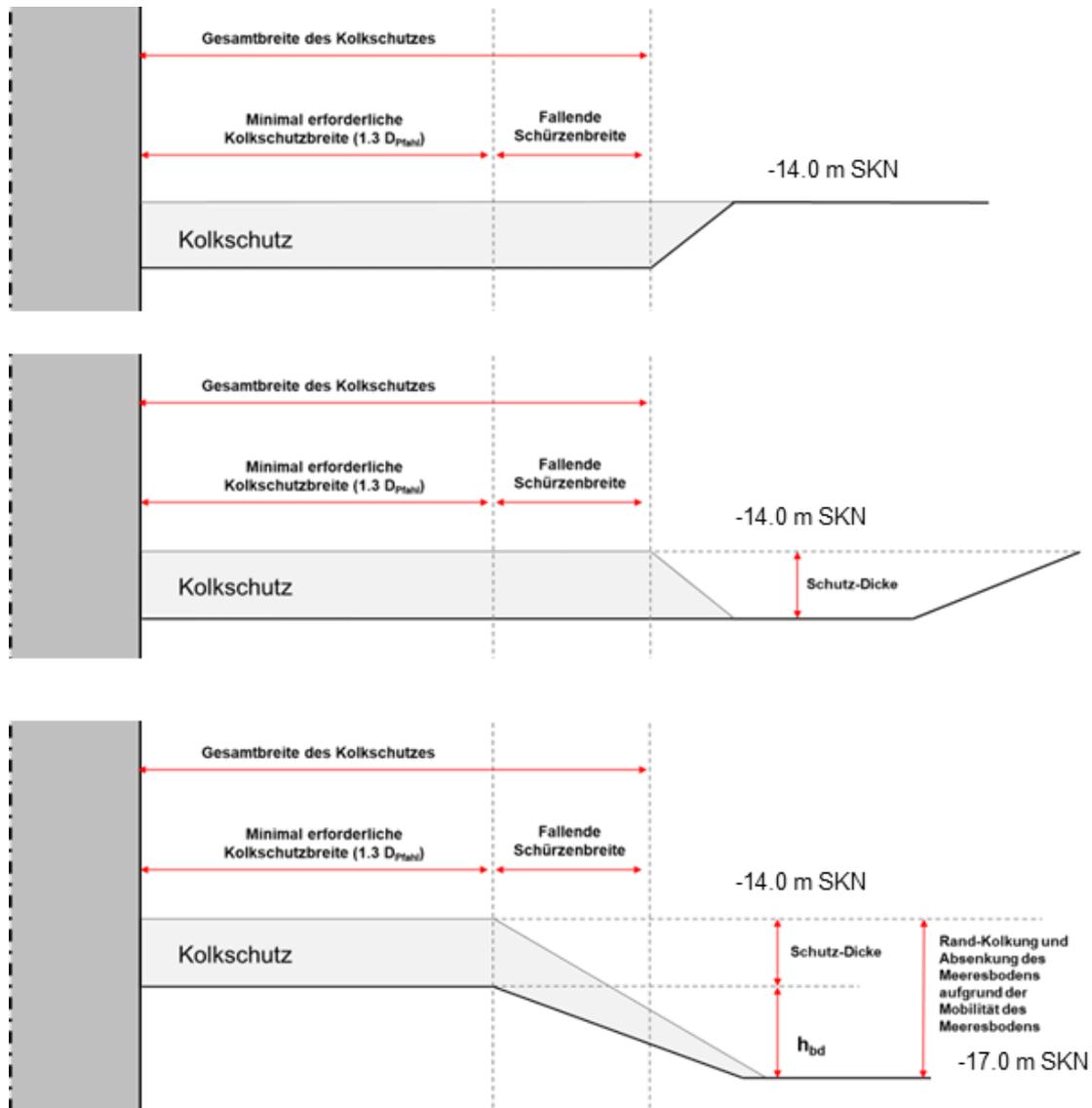


Abbildung 9-6: Breite des Kolkgeschützes der Anlegedalben beim Einbau (obere Darstellung); Breite des Kolkgeschützes nach Eintritt einer Kolkentiefe gleich der Kolkgeschützdicke (mittlere Darstellung); Breite des Kolkgeschützes mit Fallschürzenmechanismus nach Eintritt der erwarteten Sohldegradation, h_{bd} , vom Boden des Kolkgeschützes (untere Darstellung).

- **Rock Manual**

Das Rock Manual (CIRIA *et al.*, 2007) schlägt vor, von einem Gefälle der Fallschürze von 1:2 auszugehen. Die Dicke der nach dem Nachrutschen gebildeten Schicht wird mit $\sim 1 \cdot D_{50}$ angenommen, je nachdem, welche Gewichtsklasse bei den Steinen oder welches Anfangsvolumen bei der Fallschürze verwendet wurde (CIRIA *et al.*, 2007).

	Strukturell	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 74 von 84

Unter Berücksichtigung der berechneten Werte der gesamten erwarteten Sohldegradation, h_{bd} , sowie entsprechend dem Vorschlag im Rock Manual (CIRIA *et al.*, 2007) muss die Ausdehnung des Kolkschutzes um 1,7 m vom Pfahl in Bezug auf die Anlegedalben sowie um 1,3 m für Vertäudalben erweitert werden.

- **De Sonneville et al. (2012) – Detailformel**

De Sonneville et al. (2012) haben eine Formel für die Fallschürzenbewertung vorgeschlagen, die in Abbildung 9-7 schematisch dargestellt wird.

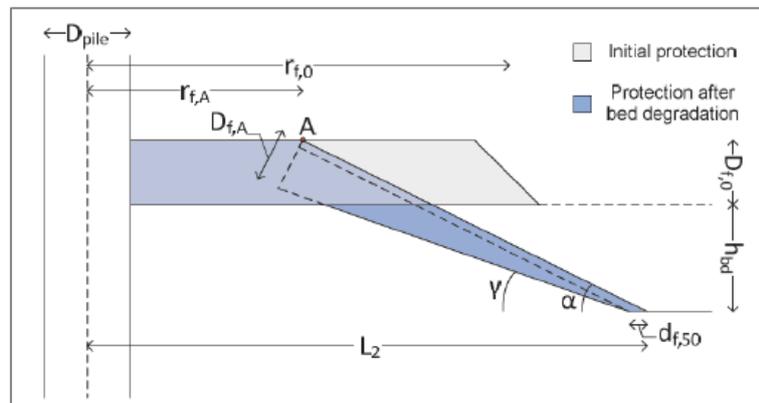


Abbildung 9-7: Schematisierung der Volumenbilanz mit Definition der Parameter für die Fallschürze (De Sonneville et al., 2012)

Das anfängliche Ausmaß $r_{f,0}$ beruht auf de Sonneville et al. (2012) und Abbildung 9-7. Es berechnet sich wie folgt:

$$r_{f,0} = \sqrt{\frac{\frac{\pi}{6} (L_2^3 - r_{f,A}^3) - \frac{\pi}{3} \tan \gamma \left((L_2 - d_{f,50})^3 - \left(L_2 - d_{f,50} - \frac{h_{bd}}{\tan \gamma} \right)^3 \right)}{\pi D_{f,0}}} \quad (9-9)$$

wobei:

- L_2 die Entfernung der Absenkung des Meeresbodens ist
- $r_{f,A}$ die minimale horizontale Ausdehnung des Kolkschutzes ist
- $d_{f,50}$ der mittlere Durchmesser des Steinmaterials ist
- h_{bd} die gesamte erwartete Sohldegradation ist
- $D_{f,0}$ die Kolkschutzdicke ist
- α der Winkel des äußeren Gefälles ist

	Strukturell	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolksschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 75 von 84

γ der Winkel des inneren Gefälles ist.

Im Einklang mit den Empfehlungen von de Sonnevile et al. (2012) wird das Gefälle α als 1:2 definiert und das innere Gefälle γ in Abhängigkeit von der Absenkung des Meeresbodens und einer Mindestschichtdicke $D_{f,A}$ (siehe Abbildung 9-7). Bei der berücksichtigten Absenkung resultiert dies in einem Gefälle γ in einem Bereich von 1:2 bis 1:3, was den Empfehlungen von May et al. (2002) entspricht.

Die minimal erforderliche Ausdehnung des Kolksschutzes wird mit $1,3 D_{\text{Pfahl}}$ vom Rand des Pfahls angenommen (gestützt auf die Empfehlung in Abschnitt 9.4). Zu beachten ist, dass $r_{f,A}$ ab der Pfahlmitte berechnet wird, wie in Abbildung 9-7 dargestellt, und gleich 8,1 m ist.

Den Empfehlungen von de Sonnevile et al. (2012) folgend, muss die Ausdehnung des Kolksschutzes ab dem Pfahl bei den Anlegedalben um 2,6 m und bei den Vertäudalben um 2,9 m erhöht werden.

- **De Sonnevile et al. (2012) – Vereinfachte Formel**

De Sonnevile et al. (2012) haben darüber hinaus eine vereinfachte Formel für die Fallschürzenbewertung vorgeschlagen. Diese beruht auf dem linearen Verhältnis zwischen dem Rückzug und der Sohldegradation:

$$r_{f,0} - r_{f,0} = 1.4 h_{bd} \quad (9-10)$$

Die Ergebnisse der vereinfachten Formeln weisen darauf hin, dass die Ausdehnung des Kolksschutzes ab dem Pfahl bei den Anlegedalben um 2,8 m und bei den Vertäudalben um 2,9 m erhöht werden muss.

Tabelle 9-5 enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse zur Mindestausdehnung der Fallschürze unter Berücksichtigung der Vorschläge aus dem Rock Manual (CIRIA et al., 2007) und der zwei von de Sonnevile et al. vorgeschlagenen Methodiken (2012).

Tabelle 9-5: Mindestausdehnung der Fallschürze unter Berücksichtigung der Vorschläge aus dem Rock Manual (CIRIA et al., 2007) und der von de Sonnevile et al. vorgeschlagenen Methodik (Detailformel und vereinfachte Formel) (2012)

	Breite der Fallschürze [m]	
	Anlegedalben	Vertäudalben
Rock Manual (CIRIA et al., 2007)	1,7	1,3
De Sonnevile et al. (2012) – Detailformel	2,6	2,9
De Sonnevile et al. (2012) – Vereinfachte Formel	2,8	3,2

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolksschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 76 von 84

9.4.3 Gesamtausdehnung des Kolksschutzes

Die Bemessung der Gesamtausdehnung des Kolksschutzes erfolgt unter Berücksichtigung der erforderlichen Mindestausdehnung des Schutzes (Abschnitt 9.4), der potenziellen am Randkolk auftretenden Kolkentiefe (gemäß Berechnung in Abschnitt 9.4.1) sowie der zusätzlichen Breite des Kolksschutzes, die als Fallschürze („*falling apron*“) bemessen wird (gemäß Berechnung in Abschnitt 9.4.2).

Tabelle 9-6 gibt die Gesamtausdehnung des Kolksschutzes vom Pfahlrand gemäß der Berechnung mit den verschiedenen Formeln an.

Tabelle 9-6: Mindestausdehnung des Kolksschutzes vom Pfahl L_{Aus}

	Mindestausdehnung des Kolksschutzes vom Pfahl (einschließlich Fallschürze), L_{Aus} [-]	
	Anlegedalben	Vertäudalben
Rock Manual (CIRIA <i>et al.</i> , 2007)	7,6	7,2
De Sonneville <i>et al.</i> (2012) – Detailformel	8,5	8,7
De Sonneville <i>et al.</i> (2012) – Vereinfachte Formel	8,6	9,0

Gestützt auf die in *Tabelle 9-6* dargestellten Ergebnisse wird die erforderliche Mindestausdehnung des Schutzes vom Pfahlrand mit **9,0 m** bemessen. Diese Abmessung entspricht einer Mindestausdehnung des Kolksschutzes von $2 D_{P\text{fahl}}$, wie in *Abbildung 9-8* dargestellt.

Der Gesamtdurchmesser des kreisförmigen Kolksschutzes um die Pfähle des LNG-Terminals beträgt daher $5D_{\text{pile}}$, was 22,5 m entspricht.

	Strukturell	
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolksschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 77 von 84

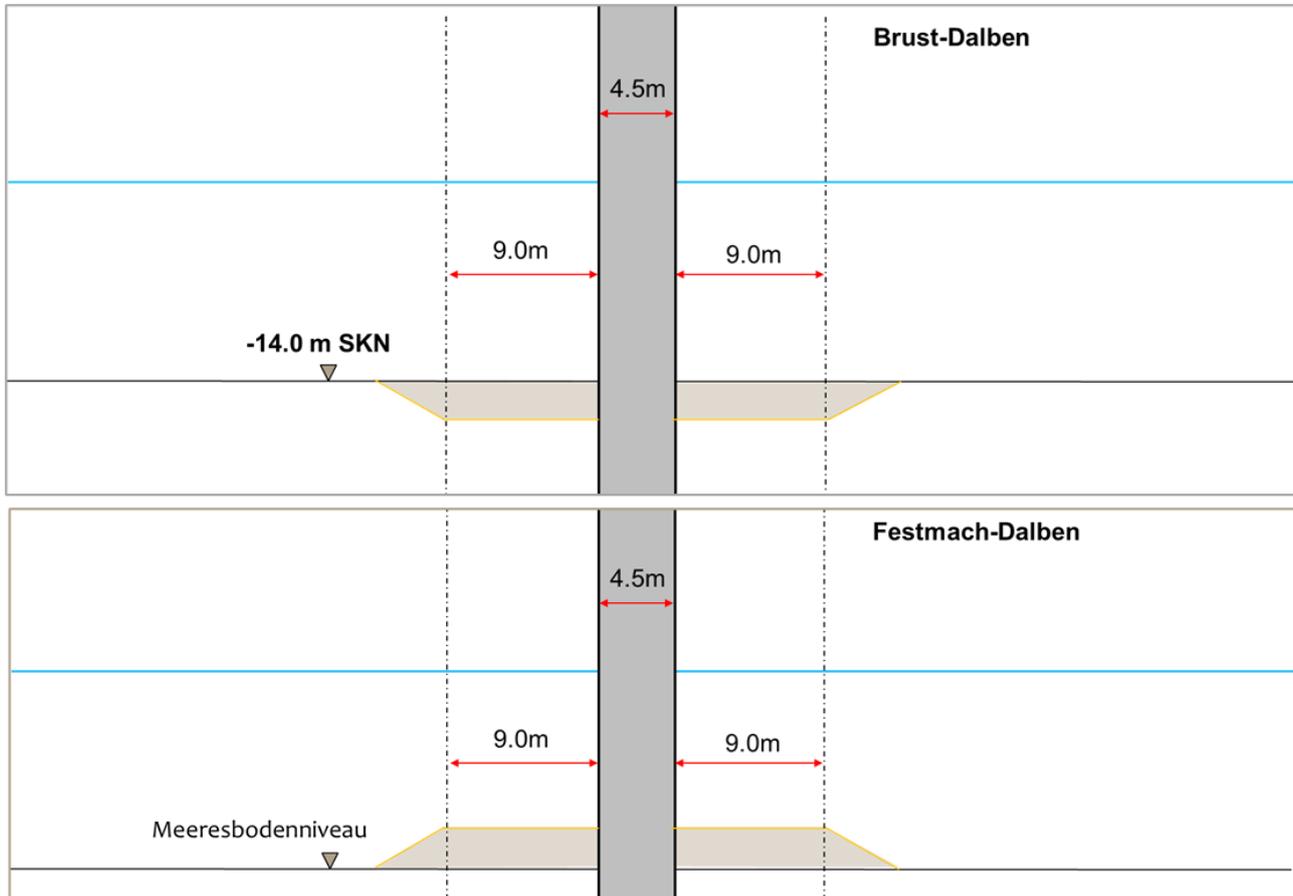


Abbildung 9-8: Skizze des Querschnitts mit der Mindestausdehnung des Kolksschutzes für Anlegedalben (obere Darstellung) und Vertäudalben (untere Darstellung)

9.5 Für den Kolksschutz um die Pfähle erforderliches Steinvolumen

Tabelle 9-7 enthält eine Zusammenfassung der wichtigsten Geometrie und des minimal erforderlichen Steinvolumens des Kolksschutzes der Abweis- und Vertäudalben unter Berücksichtigung der Deckschicht (LMA 5/40) und der Filterschicht (32/90 mm).

Das minimal erforderliche Steinvolumen der Steinschüttung je Pfahl, das in Tabelle 9-7 angegeben ist, wird unter der Annahme des Einbaus der Steine vor dem Rammen der Pfähle berechnet.

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 78 von 84

Tabelle 9-7: Minimal erforderliches Steinvolumen des Kolkschutzes je Pfahl.

		Anlegedalben	Vertäudalben
Pfahldurchmesser D_{Pfahl}	[m]	4,5	4,5
Minstdicke des Kolkschutzes	[m]	1,00	1,00
Minstdicke der Deckschicht (LMA 5/40)	[m]	0,60	0,60
Minstdicke der Filterschicht (32/90 mm)	[m]	0,40	0,40
Mindestausdehnung des Kolkschutzes L_{Aus}^*	[m]	9,0	9,0
Mindevolumen der Deckschicht (LMA 5/40) je Pfahl	[m ³]	410	265
Mindevolumen der Filterschicht (32/90 mm) je Pfahl	[m ³]	189	176

*) Vom Pfahlrand

10 Überwachungskriterien

Der Kolkschutz um die Pfähle des LNG-Terminals sollte häufig kontrolliert und bei Bedarf gewartet werden. Ziel ist dabei, eine etwaige Degeneration, Erosion und Verformung des Kolkschutzes rechtzeitig zu erkennen und geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um sicherzustellen, dass das Bauwerk weiterhin auf einem akzeptablen Niveau funktioniert. Das Betriebs- und Wartungskonzept (O&M-Konzept) für den Kolkschutz sollte folgende wesentliche Bestandteile umfassen:

- regelmäßige Überwachung des Kolkschutzes und Auswertung von Überwachungsdaten.
- Bestimmung einer geeigneten Abhilfemaßnahme auf der Grundlage der Bewertungsergebnisse.

Die Überwachung des Kolkschutzes ist insbesondere am Anfang nach Tätigkeiten wie beispielsweise dem Rammen der Pfähle zu empfehlen. Es wird jedoch eine Überwachung in mindestens jährlichen Abständen oder nach Großereignissen vorgeschlagen. Auf Grundlage des Überwachungsergebnisses ist die weitere Überwachung dann neu zu bewerten. Im ersten Jahr wird empfohlen, den Kolkschutz mindestens 2 Mal zu kontrollieren.

Zwar würde die Entwicklung eines Betriebs- und Wartungsprogramms den Rahmen des vorliegenden Dokuments sprengen. Dennoch werden nachstehend Kriterien zur Auswertung der Überwachungsdaten vorgeschlagen.

Die Auswertung der Überwachungsdaten umfasst zwei verschiedene Auswertungsprozesse:

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolksschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 79 von 84

- Auswertung der Integrität des Kolksschutzes.
- Auswertung der Entwicklung der Absenkung des Meeresbodens neben dem Kolksschutz.

Die Auswertung der Integrität des Kolksschutzes beinhaltet die Bestimmung von Bereichen, in denen unerwartete Entwicklungen wie Steinverschiebungen aufgetreten sind, die Bewertung der Auswirkungen sowie die Festlegung der weiteren Maßnahmen. Es werden folgende Überwachungskriterien vorgeschlagen:

- Schweregrad 1: Aus der obersten Schicht wurden Steine über einen Bereich verschoben, der die Stabilität des Schutzes nicht gefährdet. Die darunter liegende Schicht ist jedoch nicht freigelegt, oder der Kolksschutz ist im Vergleich zum Bestandsniveau des Kolksschutzes aufgrund der Aufwärtsmigration des darunter liegenden Sediments durch die Wasserbausteine abgesenkt. Bis zur Stabilisierung des Kolksschutzes wird eine wiederholte und intensivierete Überwachung empfohlen.
- Schweregrad 2: Aus der obersten Schicht wurden Steine über einen Bereich verschoben, der im Hinblick auf die Stabilität des Kolksschutzes nicht akzeptabel ist (die Filterschicht ist über einen Bereich freigelegt, der größer ist als die Grundfläche von vier Wasserbausteinflächen, $4 D_{n50}^2$). Es wird empfohlen, neue Steine zu platzieren. Sollte die oberste Steinschicht fehlen und die darunter liegende Schicht freiliegen, ist eine Reparatur dringend notwendig.

Die Auswertung der Absenkung des Meeresbodens neben dem Kolksschutz beinhaltet die Bestimmung des entstandenen Profils, die Bewertung der Auswirkungen und die Festlegung weiterer Maßnahmen. Es werden folgende Überwachungskriterien vorgeschlagen:

- Schweregrad 1: Die Absenkung des Meeresbodens untergräbt den Kolksschutz entlang der Fallschürze und es besteht das Risiko, dass bereits vor der nächsten regelmäßigen Erhebung der Schweregrad 2 erreicht wird. Bis zur Stabilisierung des Profils wird eine wiederholte und intensivierete Überwachung empfohlen.
- Schweregrad 2: Die Absenkung des Meeresbodens untergräbt den Kolksschutz innerhalb der erforderlichen Mindestausdehnung des Kolksschutzes ($1,3 D_{Pfalz}$). Es sind Reparaturen notwendig.

11 Schlussfolgerungen

Der Bericht bewertet die potenzielle Kolkbildung an den einzelnen Pfählen des LNG-Terminals für den Fall, dass diese ungeschützt bleiben. Die Ergebnisse zeigen, dass die maximale Kolkentiefe, die um den ungeschützten Pfahl auftreten könnte, 6,5 m bis 10,1 m (obere Grenze) betragen kann.

Aufgrund der potenziellen Bildung umfangreicher Kolke um die Pfähle herum wird für die Bemessung ein flexibles Kolksschutzsystem aus Steinmaterial zur Ausführung um die Pfähle vorgeschlagen. Die Bewertung der Steingröße und -menge des Kolksschutzes erfolgte unter Berücksichtigung der Wirkung von Wellen und Strömung sowie der Wirkung des Propellerstrahls der Schiffe beim Manövrieren am LNG-Terminal und beim Annähern der Schlepper an die Dalben. Die Berechnungen der Sohlschubspannung um die Pfähle aufgrund von Wellen und Strömungen berücksichtigen auch die Verstärkung der Geschwindigkeit aufgrund der Anwesenheit von FRSU und LNG-Tankern, da die Strömungen unter den Schiffen beschleunigen.

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolksschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 80 von 84

Die minimal erforderliche Gewichtsklasse für die Deckschicht des Kolksschutzes ist **LMA 5/40**, mit einer dicke von **0,60 m**. Zwischen der Deckschicht und dem Meeresboden muss eine Filterschicht mit einer dicke von **0,40 m** und der Gewichtsklasse **32/90 mm** ausgeführt werden. Die Gesamtdicke des Kolksschutzes um den Pfahl beträgt daher 1,00 m.

Der Kolksschutz wird in einem Kreis mit einem Durchmesser von $5 D_{\text{Pfahl}}$ ausgeführt. Die erforderliche Mindestausdehnung des Schutzes vom Pfahl beträgt **9,0 m**. Die Bemessung der Gesamtausdehnung des Kolksschutzes erfolgt unter Berücksichtigung der erforderlichen Mindestausdehnung des Schutzes, der potenziellen am Randkolk auftretenden Kolkentiefe sowie der zusätzlichen Breite des Kolksschutzes, die als Fallschürze („*falling apron*“) bemessen wird.

12 Referenzen

BAW (2008). Use of Standard Construction Methods for Bank and Bottom Protection on Inland Waterways (MAR).

BAW (2010). Principles for the Design of Bank and Bottom Protection for Inland Waterways (GBB).

BAW (2012). Use of Granular Filters on German Inland Waterways (MAK).

Bioconsult GÜBAK (2023). GÜBAK 17219-17248-dig.

Blokland T. (1997). Bodembeschermingen belast door schroefstalen, huidige ontwerpmethod. 61.00-R96.089.

Breusers H.N.C. & Raudkivi A.J. (1991). Scouring. Balkema.

CIRIA, CUR & CETMEF (2007). The Rock Manual: The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition). C683, CIRIA, London.

De Sonnevile B., Van Velzen G., Verheij H.J. & Dorst K. (2012). Falling aprons at circular piers under currents. *ICSE 6: Proceedings of the 6th International Conference on Scour and Erosion, Paris, France, 27-31 August 2012*.

De Vos L. (2008). Optimisation of scour protection design for monopiles and quantification of wave run-up. Engineering the influence of an offshore wind turbine on local flow conditions. Universiteit Gent.

Den Boon J.H., Sutherland J., Whitehouse R.J.S., Soulsby R., Stam C.J.M., Verhoeven K., Hogedal M. & Hald T. (2004). Scour behaviour and scour protection for monopile foundations of offshore windfarms. Proceedings of the European Wind Energy Conference & Exhibition, London, UK.

DNV (2022). DNV-RP-0618 - Rock scour protection for monopiles.

DNV-GL (2019). DNVGL-ST-0126 - Support structures for wind turbines.

EN13383-1 (2013). Armourstone - Part 1: Specification. CEN - European Committee for Standardization.

Hoffmans G.J.C.M. (2012). The influence of turbulence on soil erosion. Eburon Academic publishers, Delft.

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 81 von 84

Hoffmans G.J.C.M. & Verheij H.J. (1997). Scour Manual. Balkema Publications, Rotterdam, the Netherlands.

Hoffmans G.J.C.M. & Verheij H.J. (2021). Scour Manual: Current-Related Erosion. CRC Press, London.

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

IMDC (2023b). CFD-Modell für die Verstärkung der Sohlschubspannung durch die Anwesenheit der FSRU bzw. eines LNG-Tankers. TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2047.00.

IMDC (2023c). Morphologische Studie. TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DOC-2015.06.

May R., Ackers J.C. & Kirby A. (2002). Manual on Scour at Bridges and Other Hydraulic Structures. Construction Industry Research & Information Association, London.

Petersen T.U., Sumer B.M., Fredsøe J., Raaijmakers T.C. & Schouten (2015). Edge scour at scour protections around piles in the marine environment - Laboratory and field investigation. *Coastal Engineering*, 106, 42–72, doi: 10.1016/j.coastaleng.2015.08.007.

PIANC (2015). Guidelines for Protecting Berthing Structures from Scour Caused by Ships. Report nr 180.

PIANC (2017). Guidelines for protecting berthing structures from scour caused by ships - Corrigenda Sheet. PIANC Report No. WG180.

Roelse F.P. (2014). Stability of slope material affected by bow thrusters at open quay structures.

Roulund A., Sutherland J., Todd D. & Sterner J. (2016). Parametric equations for Shields parameter and wave orbital velocity in combined current and irregular waves. Scour and Erosion: Proceedings of the 8th International Conference on Scour and Erosion (Oxford, UK, 12-15 September 2016).

Soulsby R. (1997). Dynamics of marine sands.

Sumer B.M. & Fredsøe J. (2002). The mechanics of scour in the marine environment.

Sumer B.M., Fredsøe J. & Christiansen N. (1992). Scour around vertical pile in waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 127(5), 403–411.

Van de Sande S.A.H., Uijttewaal W.S.J. & Verheij H.J. (2014). Validation and optimization of a design formula for stable geometrically open filter structures. 34th International Conference on Coastal Engineering ICCE2014, Seoul, Korea.

Whitehouse R. (1998). Scour at Marine Structures: A Manual for Practical Applications. Thomas Telford.

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 82 von 84

13 Anlage

13.1 Anlage A – Berechnung der erforderlichen Gesteinsgröße unter Berücksichtigung einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 1,88 m/s

Die Berechnungen werden auch unter Berücksichtigung der extremen Strömungsgeschwindigkeit von 1,88 m/s durchgeführt. Diese Geschwindigkeit entspricht der extremen Strömungsgeschwindigkeit, die in dem Wendebecken in der Nähe der Fahrrinne berechnet wurde. Daher werden zwei neue Szenarien (Szenario 3_bis und Szenario 4_bis) für die Berechnungen der erforderlichen Mindeststeingröße berücksichtigt.

Tabelle 13-1: Zusätzliches Szenario unter Berücksichtigung der extremen Strömungsgeschwindigkeit von 1,88 m/s

	Wasserstand	Wellenbedingungen	Über die Tiefe gemittelte Strömung
Szenario 3_bis	WL = +3.88 m SKN	$H_{m0} = 2.1 \text{ m}$ $T_p = 5.20 \text{ s}$	$U_c = 1.88 \text{ m/s}$ (Flood)
Szenario 4_bis	WL = +2.75 m SKN	$H_{m0} = 2.1 \text{ m}$ $T_p = 5.20 \text{ s}$	$U_c = 1.88 \text{ m/s}$ (Ebb)

Tabelle 13-2 zeigt die wichtigsten Parameter, die für die Berechnungen verwendet wurden, sowie die Ergebnisse für die maßgeblichen Fälle (Szenario 3 und 4) für Verankerungsdalben und Dalben zum Festmachen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Mindeststeingröße D50, die erforderlich ist, um Wellen und Strömungen zu widerstehen, 95 mm für Dalben zum Anlegen und 146 mm für Dalben zum Festmachen beträgt.

Diese Werte sind niedriger als die Mindestgröße der Steine um die Pfähle herum. Die Gesteinskörnung LMA 5/40 ist daher selbst bei den extremen Strömungsgeschwindigkeiten, die im Wendebecken in der Nähe der Fahrrinne berechnet wurden, stabil.

		Strukturell			
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN		FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03		
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU			Seite 83 von 84		

Tabelle 13-2: Hauptparameter und Ergebnisse der erforderlichen Steingröße für den Kolkschutz um die Brust- und Verankerungsdalben für Szenario 3_bis und 4_bis aufgrund von Wellen und Strömungen.

Lastfälle	Einheit	Szenario 3		Szenario 4	
		Wert	Wert	Wert	Wert
Eingabeparameter					
Dalbentyp	[-]	Anlegedalben	Vertäudalben	Anlegedalben	Vertäudalben
Kinematische Viskosität ν	[m ² /s]	1,36E-06	1,36E-06	1,36E-06	1,36E-06
Erdbeschleunigung g	[m/s ²]	9,81	9,81	9,81	9,81
Wasserdichte ρ_w	[kg/m ³]	1025	1025	1025	1025
Steindichte ρ_r	[kg/m ³]	2650	2650	2650	2650
Wasserstand an der Oberkante des Felsschutzes	[m SWN]	-14,0	-10,0	-14,0	-10,0
Wassertiefe am Kolkschutz, h	[m]	17,88	13,88	16,75	12,75
Maßgebliche Wellenhöhe, H_{m0}	[m]	2,10	2,10	2,10	2,10
Wellenkammerperiode, T_p	[s]	5,20	5,20	5,20	5,20
Über die Tiefe gemittelte Strömungsgeschwindigkeit, U_c	[m/s]	1,88	1,88	1,88	1,88
Gesamtverstärkungsfaktor für die Schubspannung	[-]	4,6	3,8	4,6	3,8
Sohlschubspannungen aufgrund von Strömungen					
Relative Dichte, s	[-]	2,59	2,59	2,59	2,59
Reibungsgeschwindigkeit, U_f	[m/s]	0.112	0.120	0.115	0.126
Sohlschubspannung aufgrund von Strömungen, τ_c	[N/m ²]	12,8	14,8	13,6	16,4
Kornrauigkeit, k_s	[m]	0,24	0,29	0,27	0,37

  	Strukturell	 
TES-Proj.- Nr.: TES-WHV-VGN	FSRU Wilhelmshaven: Bewertung des Kolkschutzes – Maritime Bauwerke	Dok.- Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2038_03
TES-Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 84 von 84

Wellenschubspannungen					
Wellenumlaufgeschwindigkeit, U_w	[m/s]	0,13	0,20	0,15	0,23
Halborbitale Auslenkung, A	[m]	0,11	0,17	0,12	0,19
Wellenreibungsfaktor, f_w	[-]	0,62	0,50	0,61	0,53
Amplitude der Wellensohlschubspannung τ_w	[N/m ²]	5,2	10,6	6,7	15,1
Kombinierte Wellenschubspannungen					
Mittlere Sohlschubspannung innerhalb eines Wellenzyklus τ_m	[N/m ²]	13,1	15,9	14,1	18,2
Maximale Sohlschubspannung innerhalb eines Wellenzyklus τ_{max}	[N/m ²]	18,3	26,5	20,8	33,3
Shields-Parameter					
Shields-Parameter (Strömung + Wellen) θ_{wc}	[-]	0,012	0,014	0,012	0,014
Verstärkter Shields-Parameter $\theta_{wc,verstärkt}$	[-]	0,055	0,055	0,055	0,055
Dimensionsloser Korndurchmesser D^*	[-]	1940,8	2367,7	2202,4	2977,8
Schwellenwert Shields-Parameter, θ_{cr}	[-]	0,055	0,055	0,055	0,055
Erforderliche Steingröße					
Minimal erforderliche Steingröße D_{50}	[mm]	95	116	108	146