

Elbehafen Brunsbüttel „Jetty Westbecken – FSRU-Liegeplatz“

Unterlagen zum Antrag auf Planfeststellung gemäß § 68 Absatz 1 WHG

M7.3.4

Untersuchung der empirischen Kolktiefe und mögliche Schutzmaßnahmen am geplanten LNG-Anleger Brunsbüttel

Version	Datum	Beschreibung der Änderungen	Erstellt durch	Geprüft durch
00	19.07.2023	Zulassung vorzeitiger Maßnahmenbeginn	■	■
01	07.06.2024	Finaler Planfeststellungsantrag	■	■

Untersuchung der empirischen Kolktiefe und mögliche Schutzmaßnahmen am geplanten LNG-Anleger Brunsbüttel



BPM Ingenieurgesellschaft mbH
Rostock

Bericht

Juni 2023

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

ISO 9001
Management System Certification

BUREAU VERITAS
Certification Denmark A/S



19.07.2023

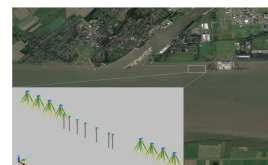
X

Signed by:

Untersuchung der empirischen Kolk­tiefe und mögliche Schutzmaßnahmen am geplanten LNG-Anleger Brunsbüttel

Strömungstechnische Untersuchung und konzeptioneller Kolkschutz am geplanten LNG Anleger und dessen Bauwerksstrukturen

Erstellt für: BPM Ingenieurgesellschaft mbH Rostock
 Vertreten durch: [REDACTED]
 Adresse: Erich-Schlesinger-Straße 25
 18059 Rostock, Germany



Projektmanager	[REDACTED]
Qualitätssicherung	[REDACTED]
Projektbearbeiter	[REDACTED]

Projektnummer	14807102
Datum Freigabe	18.07.2023
Revision	Version: 2.0.
Einstufung	Vertraulich: Dieses Dokument ist nur den Projektmitarbeitern zugänglich; für jede Weitergabe außerhalb des Projektteams ist zuvor die Zustimmung des Auftraggebers einzuholen.

INHALT

1	Veranlassung und Zielsetzung	1
2	Allgemeine Vorgehensweise und Anforderungen	2
3	Datengrundlage	3
3.1	Verwendete Unterlagen	3
3.2	Bauwerkstrukturen und Abmessungen am geplanten Anleger	3
3.3	Geotechnische Sohlbeschaffenheit	5
3.4	Hydrodynamik	7
4	Ableitung des Kolkpotentials	9
4.1	Kolkbildung in nicht-bindigen Sedimenten	9
4.2	Kolkbildung in bindigen Sedimenten	10
4.3	Ableitung der potenzielle Kolktiefe	12
4.4	Kolkbildung an Pfahlgruppen	13
5	Kolkschutzkonzept	16
5.1	Konzeptioneller Entwurf des Kolkschutzes	17
5.1.1	Stabilität der Decksteine	17
5.1.2	Deckschicht des Kolkschutzes.....	18
5.1.3	Kolkbildung im Grenzbereich des Kolkschutzes	19
5.1.4	Entwurf des Kolkschutzes	20
5.2	Installation und Wartung	22
5.2.1	Installation	22
5.2.2	Wartung.....	23
6	Zusammenfassung	24
7	Literatur	26

ABBILDUNGEN

Abbildung 1.1:	Lage des geplanten LNG-Anlegers Brunsbüttel (Hintergrundkarte: OpenStreetMap).....	1
Abbildung 2.1:	Layout des geplanten Anlegers im Westbecken. Die blau umrahmte Vertäudalbe und die rot umrahmten Anlegedalben wurden für die Bestimmung der Kolkbildung an Pfahlgruppen (Abschnitt 4.4) ausgewählt.	2
Abbildung 3.1:	Anlegedalben mit aufgesetzten Fendern am geplanten Anleger aus den 3D-Planzeichnungen.....	4
Abbildung 3.2:	Vertäudalben mit 7 Pfählen am geplanten Jetty aus den 3D Planzeichnungen	5
Abbildung 3.3:	Geotechnisches Untersuchungsgebiet (KB und CPT)	6
Abbildung 3.4:	Referenzprofile	6
Abbildung 3.5:	Verwendete Bathymetrie in der hydrodynamischen/CFD Simulation und verwendete Position der Datenextraktion	8
Abbildung 4.1:	Erosionsraten zu verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten für eine Auswahl an Sedimenten (/10/). Die Abgeleiteten Werte basieren auf 15 Jahren Datenerhebung mit verschiedenen Proben unter Verwendung des EFA	

	(<i>Erosion Function Apparatus</i>) mit SP/SM = Sand und Kies, ML = Klei und Feinsande, MH/CL= Klein und Ton-Kleigemische, CH = reine Tone.	11
Abbildung 4.2:	Anordnung für 2 Pfählen in Bezug auf die Strömungsrichtung; an den Punkten A, B und C wird die Kolkbildung beeinflusst	14
Abbildung 4.3:	Kolktiefe für hintereinanderstehende Pfähle /12/	14
Abbildung 4.4:	Pfahlanordnung innerhalb der Vertäudalben: blau = Bauwerksgruppe nebeneinander, orange = Bauwerkgruppe gestaffelt 2 Pfähle, pink = Bauwerkgruppe gestaffelt 3 Pfähle	15
Abbildung 5.1:	Schematische Abbildung des Kolkschutzes mit hervorgehobener Erosion des Feinmaterials innerhalb der Deckschicht.	16
Abbildung 5.2:	Schematisches Design des aufzubringenden Kolkschutzes mit D_p = Pfahldurchmesser, W_b = Breite (Berme) und t_{sp} = Schichtdicke des Kolkschutzes.	19
Abbildung 5.3:	Schematische Darstellung der Entstehung von Kolk im Grenzbereich a) parallel zur Hauptströmung b) quer zur Hauptströmung	20
Abbildung 5.4:	Designlayout des konzeptionellen Kolkschutzes (basierend auf den Werten aus Tabelle 5.2).....	22

TABELLEN

Tabelle 2.1	Verwendete Daten	3
Tabelle 3.1	Bodenkennwerte (/4/).....	7
Tabelle 3.2	Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeiten und Wassertiefen. Die in diesem Gutachten herangezogenen Positionen sind hervorgehoben.	8
Tabelle 4.1	Kolkiefen an einzelnen Pfählen am geplanten LNG-Anleger am Standort Brunsbüttel (inklusive Kontrollpunkten: 2-1 zusätzliche Anlegedalben, 2-3 unterhalb des Schiffskörpers, 3-1 Am Rand des geplanten Hafenbeckens).	13
Tabelle 5.1	Kolkiefen im Grenzbereich nach /16/ bezogen auf Abbildung 5.3	20
Tabelle 5.2	Abgeleitete Design Parameter für den anzubringenden Kolkschutz an den untersuchten Bauwerken am geplanten Standort Brunsbüttel	21
Tabelle 6.1	Maximale, empirisch abgeleitete, Kolkiefen (Wertebereich).....	24

1 Veranlassung und Zielsetzung

Im Rahmen der Arbeiten zum geplanten LNG-Anleger im Westbecken des Elbhafens Brunsbüttel wird eine strömungstechnische Analyse mit Ableitung der Kolkbildung und gegebenenfalls daraus resultierende Maßnahmen zum Schutz vor Kolkbildung vom Auftraggeber und vom Hafenerbetreiber benötigt. Der Standort befindet sich im Elbe-Ästuar am Nordufer in direkter Nähe zur Einfahrt in den Nord-Ostsee-Kanal (siehe Abbildung 1.1)

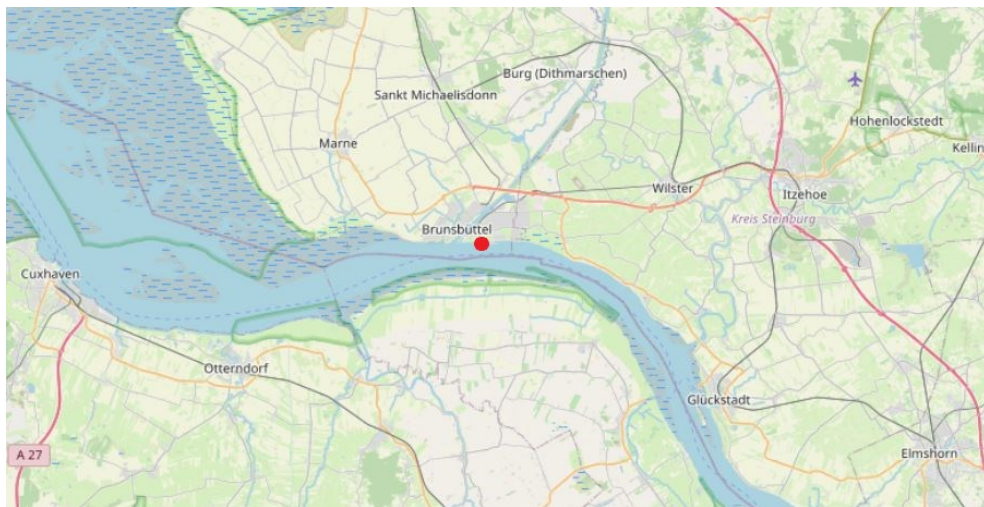


Abbildung 1.1: Lage des geplanten LNG-Anlegers Brunsbüttel (Hintergrundkarte: OpenStreetMap)

DHI WASY wurde beauftragt, eine empirische Abschätzung der Kolkbildung basierend auf den bereits durchgeführten Studien (/1/,/2/,/3/) und den Änderungen der lokalen Strömungen im geplanten Bereich des Anlegers durchzuführen. Basierend auf den berechneten Strömungen erfolgt die empirische Ableitung der Kolktiefe sowie die Ableitung von Maßnahmen zum Schutz vor Kolkbildung an den geplanten Bauwerken.

Die Berechnung des Kolkpotentials erfolgte unter der konservativen Annahme, dass der Schiffskörper der FSRU permanent am neuen Anleger präsent ist.

2 Allgemeine Vorgehensweise und Anforderungen

Im Fokus der vorgelegten Kolkuntersuchung stehen die Analyse und die empirischen Berechnungen der möglichen Kolkiefen an den geplanten Strukturen des LNG-Anlegers im Westbecken des Elbhafens Brunsbüttel. Hierzu wurde eine Analyse des vorliegenden Entwurfs des geplanten Anlegers basierend auf der übermittelten Datenbasis vorgenommen. In Kombination mit der vorangegangenen detaillierten CFD-Strömungsanalyse /3/ erfolgte eine Auswahl repräsentativer Pfähle, welche die größte Gefährdung in den berechneten Strömungen gegenüber Kolk aufwiesen. Es wurden 2 Anlegedalben mit Fendern (*Monopile*) sowie eine Vertäudalbe ausgewählt (siehe Abbildung 2.1).



Abbildung 2.1: Layout des geplanten Anlegers im Westbecken. Die blau umrahmte Vertäudalbe und die rot umrahmten Anlegedalben wurden für die Bestimmung der Kolkbildung an Pfahlgruppen (Abschnitt 4.4) ausgewählt.

Das Konzept wurde im Rahmen der vorliegenden Daten als Desktop-Studie erstellt.

3 Datengrundlage

In diesem Kapitel ist die Datengrundlage, verwendete Unterlagen sowie die vorliegenden Pläne zu Bauwerksstrukturen, Geologie und Hydrodynamik für die Bestimmung der Kolkanfälligkeit und die empirische Abschätzung der Kolkentiefe vorgestellt.

3.1 Verwendete Unterlagen

Für den Modellaufbau sowie die Berechnung der geforderten Zustände wurden die in Tabelle 3.1 aufgeführten Datensätze und Unterlagen hinzugezogen und verwendet.

Tabelle 3.1 Verwendete Daten

Bereitgestellt durch	Datensatz	Stand
Ramboll Deutschland GmbH	Aktueller Stand des 3D Modell des geplanten Anlegers im ifc. Format	2023
Ramboll Deutschland GmbH	Geotechnischer Bericht	2022
DHI WASY GmbH	Strömungstechnisches Gutachten	2023

3.2 Bauwerkstrukturen und Abmessungen am geplanten Anleger

Die geplanten Bauwerkstrukturen in Form von Anlegedalben und Vertäudalben verfügen über unterschiedliche Spezifikationen.

Die geplanten Anlegedalben (*monopile*) verfügen über einen Außendurchmesser von 3m und eine Gesamtlänge von ca. 45 m. Ihre Abstände variieren, vom Mittelpunkt der Dalben aus, zwischen 9,85 m und 33,15 m. Die Anlegedalben werden bis zu ca. -35 m im Untergrund verankert (siehe Abbildung 3.1). Die beiden betrachteten Anlegedalben befinden sich am östlichen Ende der geplanten Bauwerksstruktur des Anlegers in einer Sohlage von -17 m NHN(vgl. Abbildung 2.1). Ausgehend von dem geringen Abstand zwischen den Dalben ist eine zusätzliche Auskolkung aufgrund des Gruppeneffekts der Dalben nicht auszuschließen.

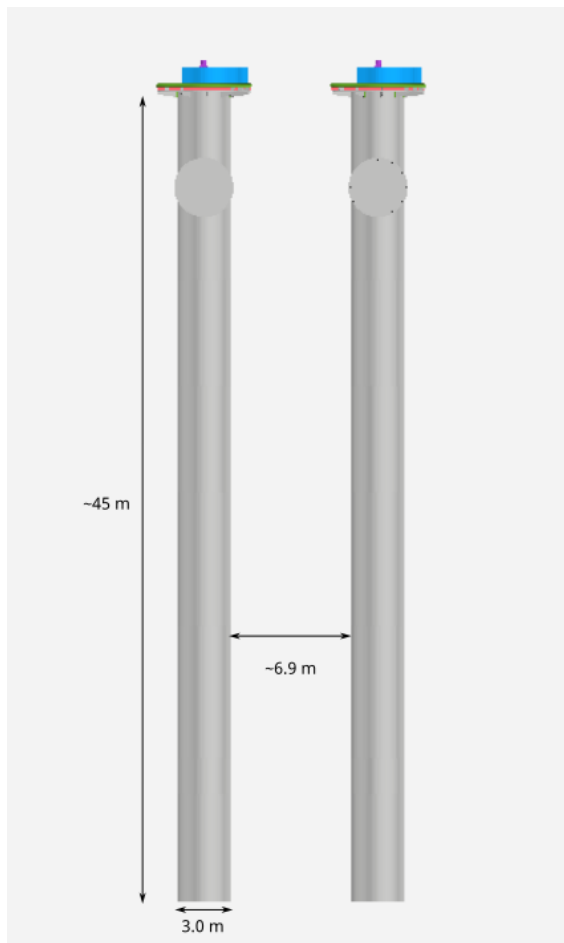


Abbildung 3.1: Anlegedalben mit aufgesetzten Fendern am geplanten Anleger aus den 3D-Planzeichnungen

Die geplanten Vertäudalben bestehen aus einer Pfahlgruppe mit 7 Einzelpfählen mit einem jeweiligen Außendurchmesser von 1,219 m. Jeder Pfahl hat eine Länge von ca. 35 m. Die Außenliegenden verlaufen in einem Winkel von 18,4° von der vertikalen Achse ausgehend (siehe Abbildung 3.2). Die für die Bestimmung des Kolkshutzes verwendete Vertäudalbe befindet sich am westlichen Ende des Anlegers (vgl. Abbildung 2.1).

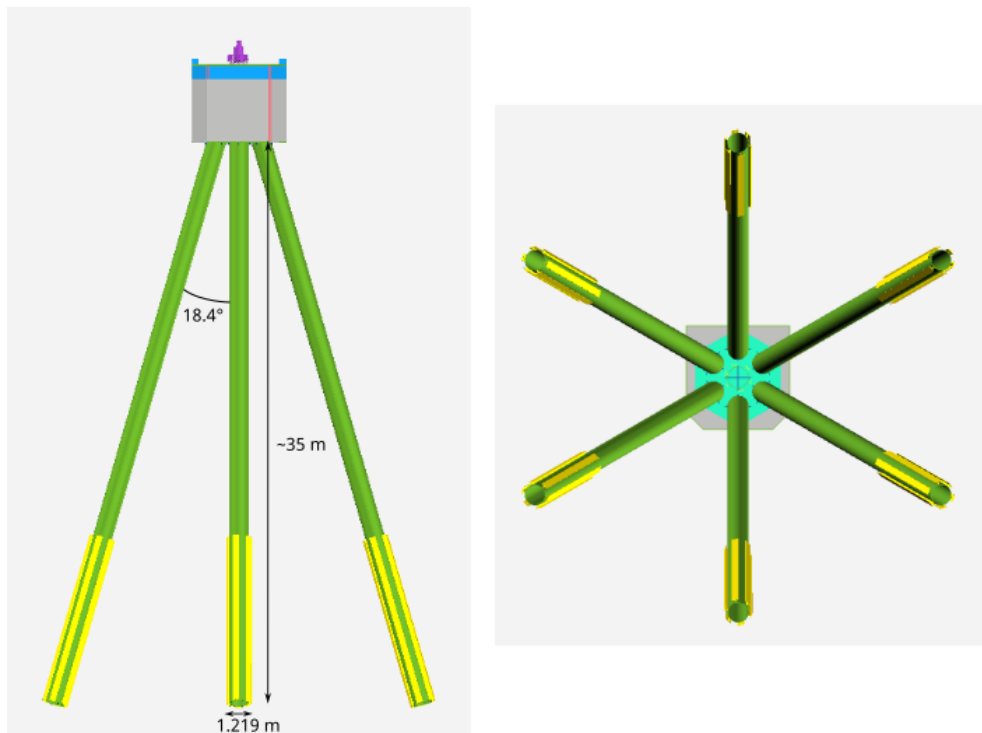


Abbildung 3.2: Vertäudalben mit 7 Pfählen am geplanten Jetty aus den 3D Planzeichnungen

3.3 Geotechnische Sohlbeschaffenheit

Daten über die Sohlbeschaffenheit wurden durch eine Untersuchung des Baugrundes mittels Kernbohrung (KB) und sogenannte *Cone Penetration Tests* (CPT) erhoben. Eine detaillierte Auflistung der Ergebnisse findet sich in den durch den Auftraggeber bereitgestellten Berichtsdokumenten /4/ und /5/. Abbildung 3.3 zeigt einen Überblick der geotechnischen Baugrundsondierung im Bereich des geplanten Anlegers im Westbecken, Abbildung 3.4 zeigt relevante Referenzprofile für entsprechende Bereich des Planungsgebietes. Hierbei ist zu beachten, dass die Profile aus Abbildung 3.4 sich auf folgenden Bereich von Abbildung 3.3 beziehen: Profil 1 repräsentiert die rote Fläche; Profil 2 die gelbe Fläche; Profil 3 die blaue Fläche.

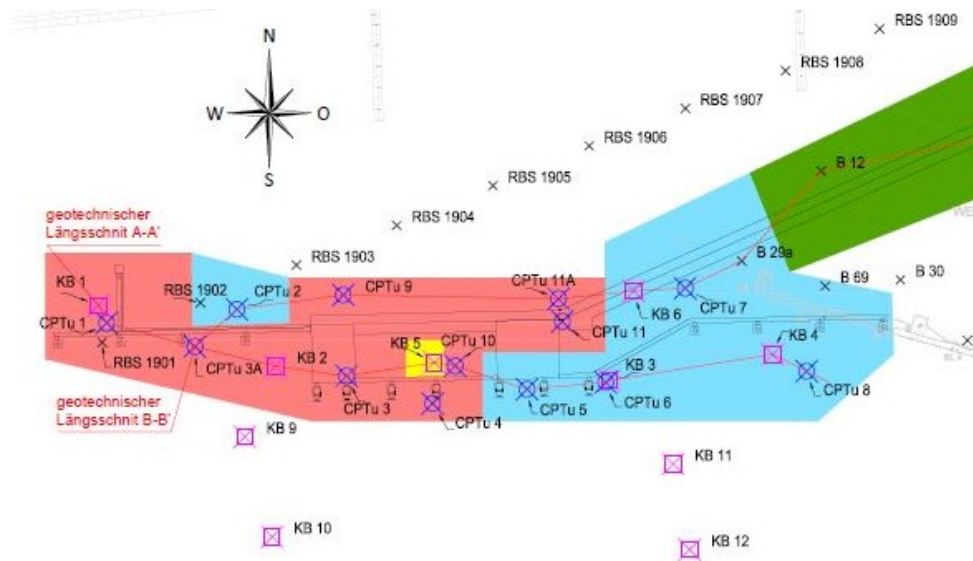


Abbildung 3.3: Geotechnisches Untersuchungsgebiet (KB und CPT)

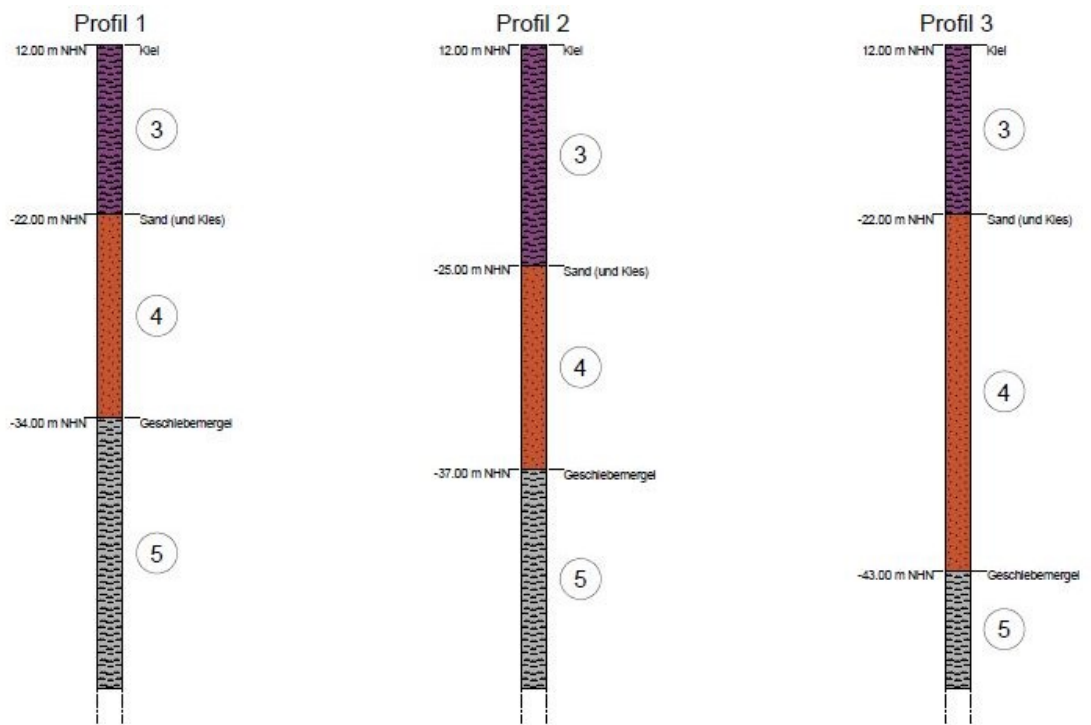


Abbildung 3.4: Referenzprofile

Basierend auf den Informationen aus /4/ besteht die obere Schicht der Gewässersohle aus Klei. Diese Schicht ist bis zu einer Tiefe von -22mNHN im Hauptbereich des geplanten Anlegers anzutreffen (vgl. Abbildung 3.4). Die darunterliegenden Schichten bestehen vorwiegend aus glazial abgelagerten Sand mit Kiesbestandteilen sowie tieferliegend Geschiebemergeln. Die entsprechenden Bemessungskennwerte der Bodeneigenschaften (/4/) sind in Tabelle 3.2detailliert aufgeführt.

Tabelle 3.2 Bodenkennwerte (/4/)

Schicht	Bodenart	Konsistenz / Lagerungsdichte	Wichte		Scherfestigkeit			Steifemodul
			γ [kN/m ³]	γ' [kN/m ³]	ϕ' [°]	c' [kN/m ²]	c_u [kN/m ²]	E_s [MN/m ²]
1	Auffüllung	locker bis mitteldicht	17,5 (17-18)	8 (7-9)	25 (22-28)	0 (0-5)	5 (0-10)	5 (2-20)
2	Sand-Klei-Wechsellaagerung	mitteldicht bis sehr dicht / flüssig bis weich	19 (18-20)	9 (8-10)	25 (15-35)	0 (0-5)	3 (0-10)	15 (3-50)
3	Klei	flüssig bis weich	17 (16-18)	7 (6-8)	18 (15-25)	5 (5-10)	30 (5-60)	1 (0-3)
4	Sand (und Kies)	dicht bis sehr dicht (mitteldicht bis dicht)	20 (19-21)	11 (10-12)	37 (32-40)	0	0	100 (80- >100)
5	Geschiebemergel	steif bis halbfest	20 (19-21)	10 (9-11)	32 (30-34)	10 (5-30)	150 (50-300)	15 (10-25)

Hinweis: (in Klammern) = Schwankungsbereich der Bodenkennwerte (z. B. für Grenzwertbetrachtungen sowie abhängig von Lagerung/Konsistenz, Erdstoffart und Tiefenlage)

Die Baugrundeigenschaften im Bereich der gewählten Anlege- und Veträudalben wurden daher von den Kernbohrungen KB3 und KB1 übernommen.

3.4 Hydrodynamik

Die Strömungsbedingungen im Elbe-Ästuar, in welchem der Anleger errichtet werden soll, sind durch den Einfluss der Gezeiten geprägt. Der Einfluss von Wellen auf die Kolkbildung wurde im Rahmen dieser Untersuchung als zu gering eingeschätzt und wurde daher vernachlässigt.

Innerhalb der bestehenden Voruntersuchungen (/1/,/2/) wurde ein Zeitraum von 3 Wochen (15. Februar 2021 bis 7. März 2021) hydrodynamisch simuliert. Der Zeitpunkt mit der höchsten Strömung innerhalb dieses Simulationszeitraums wurde extrahiert und als Randbedingung in ein stationäres Strömungsmodell (sog. *Computational Fluid Dynamics*, CFD-Modell) angesetzt, welches zusätzlich den permanent vertäuten Schiffskörper der FSRU beinhaltet. Die verwendete Bathymetrie (siehe Abbildung 3.5) berücksichtigte bereits die Liegewanne für die FSRU.

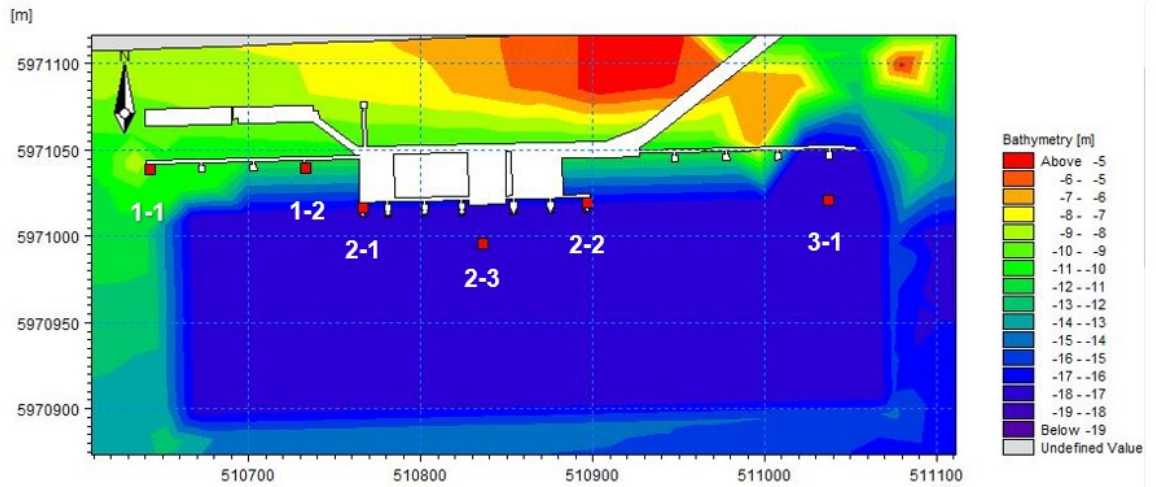


Abbildung 3.5: Verwendete Bathymetrie in der hydrodynamischen/CFD Simulation und verwendete Position der Datenextraktion

Die Strömungsbedingungen wurden an 6 Punkten entlang des geplanten Anlegers extrahiert (siehe Abbildung 3.5). Die meisten Anlege- und Vertäudalben liegen in einem Bereich einer zur Liegewanne geneigten Gewässersohle. Tabelle 3.3 zeigt die tiefengemittelte maximale Strömungsgeschwindigkeit an den 6 ausgewählten Positionen. Position 1-1 entspricht der gewählten Vertäudalbe, Position 2-2 der gewählten Anlegedalben. Die Positionen 1-2, 2-1, 2-3 sowie 3-1 entsprechen Kontrollpositionen.

Tabelle 3.3 Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeiten und Wassertiefen. Die in diesem Gutachten herangezogenen Positionen sind hervorgehoben.

Position	Maximale tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit [m/s]	Wassertiefe [m]
1-1	1.51	9.60
1-2	1.16	12.09
2-1	1.34	16.89
2-2	1.48	16.89
2-3	1.28*	5.51**
3-1	1.18	17.60

* Maximale Strömungsgeschwindigkeit unterhalb des Schiffskörpers der FSRU

** Wassertiefe unterhalb des Schiffskörpers der FSRU

4 Ableitung des Kolkpotentials

Die Errichtung und damit die permanente Präsenz von Pfählen im Wasser, führt zu einer Beeinflussung der lokalen Strömungen gegenüber dem Ausgangszustand. Die lokalen Änderungen der Strömungen wirken sich in der Regel durch eine Zunahme der Turbulenz und der Sohlschubspannung aus, welches tendenziell zur Ausbildung eines Kolks am Pfahl führt.

Als primärer Effekte zur Ausbildung von Kolken an Dalben in strömendem Wasser sind 1.) erhöhte Verwirbelungen (*Hufeisenwirbel*), 2.) leeseitige Wirbel und Abschattungseffekte und 3) die Beeinflussung der Strömung durch Randeffecte des Pfahls.

Generell schreitet der Prozess der Auskolkung (die Entfernung von Material) unter der Annahme stabiler Strömungsbedingungen bis zum Erreichen einer Gleichgewichtskolkentiefe fort. Bei dieser Tiefe sind die Prozesse der Auskolkung nicht mehr stark genug, um weitere erosive Einwirkung auf die Gewässersohle hervorzurufen. Die Tiefe, in der dieser Gleichgewichtszustand erreicht wird, ist vom Material der Gewässersohle sowie den Strömungsbedingungen abhängig. Nachfolgend wird diese spezifische Tiefe als potentiell maximale Kolkentiefe bezeichnet.

Die Beschaffenheit der Gewässersohle am Standort des geplanten Anlegers besteht aus verschiedenen Schichten (siehe Abschnitt 3.3). Die obere Schicht der Gewässersohle besteht aus bindigen weichen Tonmineralien, gefolgt von mehreren nicht-bindigen Sandauflagen und ist unterlagert von bindigen glazialen Geschiebemergeln. Sollte eine Kolkbildung erfolgen, welche die oberste Schicht der Gewässersohle durchdringt, ist eine Kolkbildung in den unterliegenden Sandschichten nicht ausgeschlossen für den Fall, dass die anliegenden erosiven Kräfte groß genug sind.

Die Ableitung der Kolkentiefe und deren zeitliche Ausprägung in nicht-bindigen Sedimenten an Pfählen wie z.B. Dalben ist durch empirische Formeln hinreichend belegt. Für die Bildung von Kolk in bindige Sedimente ist das Verständnis in der Wissenschaft bisher noch begrenzt, da die komplexen Sedimenteigenschaften eine generische Prozessbeschreibung erschweren.

Dieses Kapitel beschreibt die angewandten Methoden zur empirischen Bestimmung des Kolkpotentials an Dalben in bindigen und nicht-bindigen Sedimenten. Anschließend erfolgt die empirische Bestimmung der Kolkentiefe an den gewählten Pfählen.

4.1 Kolkbildung in nicht-bindigen Sedimenten

Die Kolkbildung in nicht-bindigen Sedimenten an kreisförmigen den Untergrund durchdringenden Pfählen wird oft mit Hilfe der HEC-18-Gleichung berechnet /6/, welche sowohl für klares Wasser als auch für Wasser mit Suspensionsfracht verwendet werden kann. Die HEC-18-Gleichung für kreisförmige Pfähle lautet:

$$\frac{S}{D} = 2.0K \left(\frac{h}{D}\right)^{0.35} \left(\frac{V}{\sqrt{gh}}\right)^{0.43} \quad [1]$$

Mit:

V = tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit

D = Durchmesser des kreisförmigen Bauwerks

g = Erdbeschleunigung

h = Wassertiefe

K = Korrekturfaktor der lokale Sohlbedingungen

S = Kolkentiefe

Mit einem aus der Sohlbeschaffenheit abgeleitete Korrekturfaktor K von 1,1 ergibt sich aus der HEC-18-Gleichung eine schwache Abhängigkeit der Kolkentiefe von der Fließgeschwindigkeit und der Wassertiefe.

4.2 Kolkbildung in bindigen Sedimenten

Bindiges Sediment besteht aus feinkörnigem Material, welches eine Korngröße <0.075 mm aufweist, z.B. Schluff und Ton. Die enthaltenen Tonpartikel in bindigen Sedimenten weisen eine flache Form auf und sind an ihrer Oberfläche elektrisch negativ geladen. Sind diese Partikel von Wasser umgeben, unterliegen sie starken physikalisch-chemischen Anziehungskräften (bezogen auf ihre Größe), welches die Bindigkeit des Sediments respektive die Kohäsion erhöht. Kolkbildung in bindigen Sedimenten erfolgt an zusammenhängenden Sedimentpaketen, welche gleichzeitig erodiert werden (entgegen den einzelnen Partikeln in nicht bindigen Sedimenten wie beispielsweise Sand). Daher ist der Prozess der Kolkbildung sehr komplex und hängt von einer Vielzahl von Parametern, wie unter anderem dem Wassergehalt im Boden, dem pH-Wert des Porenwassers, dem Natrium-Absorptionsverhältnis, der Plastizität des Bodens und dem Anteil an organischem Material ab. Trotz der Komplexität der Kolkbildung in bindigen Sedimenten existieren diverse Gleichungen zur Beschreibung der Kolkbildung an zylindrischen Pfählen in bindigen Sedimenten. Diese werden nachfolgend erläutert.

Gudavalli (1997) /7/ leitete basierend auf Versuchsauswertungen von Kolkiefen an zylindrischen Pfählen folgende Gleichung [2] zur Bestimmung der maximalen Kolkentiefe (S_{max}) in bindigen Sedimenten ab:

$$S_{max} = 0.00018 \left(\frac{DV}{\nu} \right)^{0.635} \quad [2]$$

Mit:

V = tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit (ohne Pfahl)

ν = Wirbelviskosität bei 20°C Wassertemperatur

D = Pfahldurchmesser

Weiterführende Analysen von Briaud et al. (2004) /8/ im Rahmen von durchgeführten Tests mit bindigem Material (Tonpartikel) bestätigten die ermittelten Ergebnisse der maximalen Kolkentiefe durch [2] und erweiterten diese um Korrekturfaktoren zur Beschreibung der Kolkbildung an komplexen Pfahlanordnungen.

Ting et al. (2001) /9/ erarbeiteten die folgende Gleichung [3] zur Ableitung der Kolkentiefe and zylindrischen Pfählen:

$$S_{max} = 0.00012 \left(\frac{DV}{\nu} \right)^{0.682} \quad [3]$$

Mit:

V = tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit (ohne Pfahl)

ν = Wirbelviskosität bei 20°C Wassertemperatur

D = Pfahldurchmesser

Briaud et al.2011 /10/ stellten die untenstehenden Formeln [4] für kohäsives Material vor, welches die kritische Geschwindigkeit für Erosionsbeginn integriert. Vereinfacht lautet sie für zylindrische Pfähle:

$$S_{max} = 2.2D^{0.65} \left(\frac{2.6V - V_{cr}}{\sqrt{g}} \right)^{0.7} \quad (\text{Eq. 4})$$

Mit:

V = tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit (ohne Pfahl)

V_{cr} = Kritische Geschwindigkeit

D = Pfahldurchmesser

g = Erdbeschleunigung

Die Ableitung der kritischen Geschwindigkeit V_{cr} , bei welcher der Erosionsprozess einsetzt, kann hierbei durch Tests mit unterschiedlichen Materialproben und Strömungsgeschwindigkeiten erfolgen. Sollten keine Proben vorliegen, können die entsprechenden Werte für die kritische Geschwindigkeit aus Abbildung 4.1 entnommen werden.

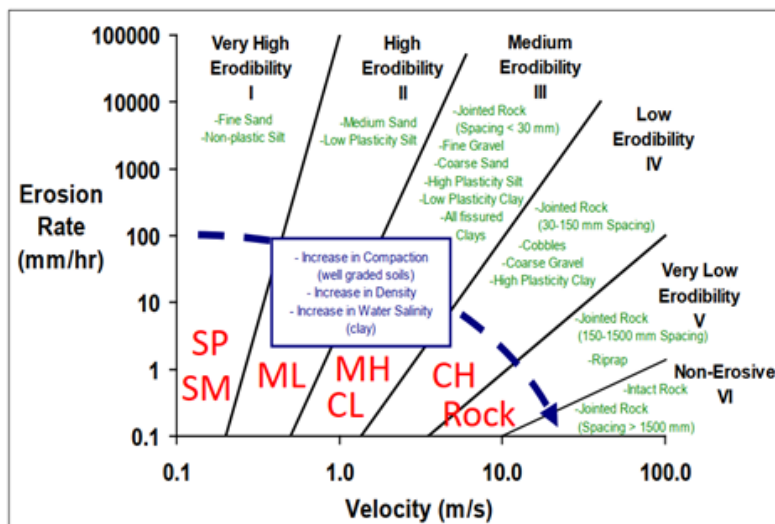


Abbildung 4.1: Erosionsraten zu verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten für eine Auswahl an Sedimenten (/10/). Die Abgeleiteten Werte basieren auf 15 Jahren Datenerhebung mit verschiedenen Proben unter Verwendung des EFA (*Erosion Function Apparatus*) mit SP/SM = Sand und Kies, ML = Klei und Feinsande, MH/CL= Klein und Ton-Kleigemische, CH = reine Tone.

Harris et al. (2015) /11/ stellten Daten (in-situ-Messungen und Labormessungen) zur Kolkbildung an Dalben und Brückenpfeilern zusammen und haben dabei die

entstehenden Kolkiefen im Zusammenhang mit der Scherfestigkeit (gesättigt) des Sediments verglichen. Hierbei ist eine Korrelation zwischen abnehmender Scherfestigkeit und zunehmender Kolkiefe zu beobachten. Bei einer Scherfestigkeit von unter 50 kN/m^2 bilden sich Kolkiefen vergleichbar mit Sand (nicht-bindig) aus. Im Bereich des geplanten Anlegers liegen die Werte für die Scherfestigkeit der oberen Schicht der Gewässersohle zwischen $5\text{-}60 \text{ kN/m}^2$ (siehe Tabelle 3.2). Diese Schicht ist im gesamten Bereich des geplanten Anlegers vorhanden. Daher wird unter konservativen Bedingungen eine Scherfestigkeit von $<50 \text{ kN/m}^2$ in der oberen Schicht angenommen.

4.3 Ableitung der potenzielle Kolkiefe

Die Kolkbildung durch die geplanten Dalben, die sog. lokale Kolkbildung, wurde durch die in den Abschnitten 4.1 und 4.2 gegebenen Gleichungen für bindige und nicht-bindige Sedimente berechnet. Die Berechnung der Kolkiefe für nicht-bindige Sedimente erfolgte aus dem Grund, dass bei einem Durchdringen der oberen bindigen Schicht der Gewässersohle die maximal zu erwartende Tiefe durch das nicht-bindige Sediment der darunterliegenden Schicht bestimmt wird.

Tabelle 4.1 fasst die Ergebnisse der maximalen potenziellen Kolkiefe an den ausgewählten Dalben im Bereich des geplanten Anlegers zusammen. Die verwendeten Geschwindigkeiten wurden der CFD-Modellierung /3/ entnommen. Die maximalen Kolkiefen für die in Abbildung 3.5 spezifizierten Positionen wurden mittels der Gleichung von Briaud et al. (2011) /10/ bestimmt. Hierzu ist die kritische Geschwindigkeit berücksichtigt worden, bei der der Erosionsprozess beginnt, Auf Grund fehlender Messdaten der Erosion für die obere Schicht der Gewässersohle wurden mehrere Annahmen getroffen: Die Erosionsrate wurde mit einem Wert von $0,1 \text{ mm/h}$ (ebd.) und die kritische Geschwindigkeit wurde sowohl für oberen Grenze (UVB) sowie die Untergrenze (LVB) des Wertebereichs für bindige Sedimente (Ton und Klei) (vgl. Abbildung 4.1 MH/CL) angenommen.

Die maximale berechnete Kolkiefe in der oberen Schicht bindiger Sedimente beträgt für die Anlegedalben an der Position 2-2 unter den beschriebenen konservativen Annahmen bis zu $4,71 \text{ m}$ ($3,00 \text{ m}$ bis $4,71 \text{ m}$ abhängig von der verwendeten Berechnungsgrundlage aus Abschnitt 4.2). Für den Vertäudalben an der Position 1-1 konnte eine maximal Kolkiefe von $2,67 \text{ m}$ ($1,71 \text{ m}$ bis $2,67 \text{ m}$ abhängig von der verwendeten Berechnungsgrundlage aus Abschnitt 4.2) berechnet werden. Die Spannweiten der errechneten maximalen Kolkiefen erweisen sich als groß im Vergleich zur Größenordnung der errechneten Tiefe selbst. Diese Schwankungsbreite verdeutlicht die Unsicherheiten, die durch die nicht bekannten Parameter (Erosionsraten, kritische Geschwindigkeit, etc.) für bindige Sedimente der oberen Schicht der Gewässersohle entstehen.

Vor dem Hintergrund, dass Harris et al. (2015) /11/ für bindige Sedimente eine Übertragung der Berechnungsmethodik analog zu nicht-bindigen Sedimenten bei einer Scherfestigkeit unter 50 kN/m^2 als plausibel ansehen, wurde diese Methodik für die obere Schicht der Gewässersohle (mit einer Scherfestigkeit von $5\text{-}60 \text{ kN/m}^2$) angewendet. Für den Fall, dass die berechnete maximale Kolkiefe die obere Schicht der Gewässersohle durchdringt, erfolgt die Bestimmung der maximalen Kolkiefe basierend auf den Bedingungen der unterliegenden Schicht

nicht-bindiger Sedimente (Sand). Die errechneten Kolkiefen in der unteren Schicht nicht-bindiger Sedimente fallen geringer aus als die in der oberen Schicht bindiger Sedimente (siehe Tabelle 4.1). Der Prozess der Auskolkung stoppt an diesem Punkt, da die Strömung nicht mehr in der Lage ist, weiteres Material vom Boden des gebildeten Kolks zu mobilisieren.

Tabelle 4.1 Kolkiefen an einzelnen Pfählen am geplanten LNG-Anleger am Standort Brunsbüttel (inklusive Kontrollpunkten: 2-1 zusätzliche Anlegedalben, 2-3 unterhalb des Schiffskörpers, 3-1 Am Rand des geplanten Hafenbeckens).

Sediment			Bindig	Bindig	Bindig	Bindig	Nicht-bindig
Gleichung			[2]	[3]	[4]	[4]	[1]
Sedimentklasse			-	-	LVB-MH/CL	UVB-MH/CL	Sand
V _{cr} [m/s]					0.5	1.5	
Pfahl	Durchmesser [in m]	Position	Kolkiefe [in m]				
Vertäudalben	1,219	1-1	1,71	2,25	2,67	2,10	1,49
Anlegedalben	3.0	2-2	3,00	4,10	4,71	3,67	2,86
Kontrollpositionen	(1,219)	1-2	1,45	1,88	2,15	1,51	2,86
	(3.0)	2-1	2,82	3,84	4,35	3,27	2,74
		2-3	2,74	3,72	4,19	3,10	2,31
		3-1	1,46	1,90	2,17	1,54	1,45

4.4 Kolkbildung an Pfahlgruppen

Durch das Einbringen mehrerer dicht aneinander stehender Pfähle in die Gewässersohle kommt es zu Einwirkungen dieser auf die Strömungsverhältnisse und damit auf die Kolkbildung an und zwischen den Pfählen. Dies ist abhängig vom Durchmesser und dem Abstand der Pfähle. Die Prozesse der Kolkbildung für Pfahlgruppen in nicht-bindigen Sedimenten ist durch die Methodik von Sumer & Fredsøe (2002) /12/ beschrieben. Hierbei können die verschiedene Pfahlanordnungen, wie in Abbildung 4.2 zu sehen, als nebeneinander, hintereinander oder schräg versetzt angenommen werden. Eine potenzielle Zu- oder Abnahme der Kolkbildung durch die Anordnung der Pfähle wie in Abbildung 4.2 zu sehen, basiert auf dem Verhältnis aus Durchmesser und lichtem Abstand (G/D). Für eine hintereinanderstehende Pfahlgruppe aus 2 Pfählen kann die Variabilität der Kolkiefe aus Abbildung 4.3 entnommen werden.

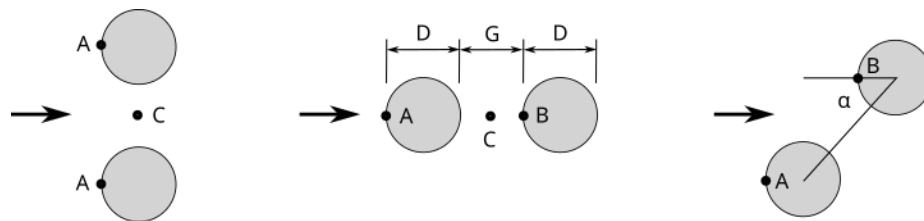


Abbildung 4.2: Anordnung für 2 Pfähle in Bezug auf die Strömungsrichtung; an den Punkten A, B und C wird die Kolkbildung beeinflusst

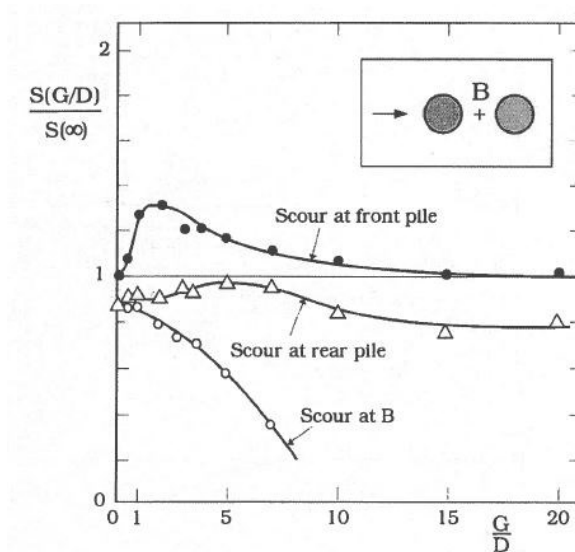


Abbildung 4.3: Kolktiefe für hintereinanderstehende Pfähle /12/

Die untersuchten Dalben (siehe Abschnitt 3.2) folgen der hintereinanderstehenden Anordnung in Bezug auf die Hauptströmungsrichtung mit einer $G/D = 2,3$. Abbildung 4.3 folgend sind folgende Korrektur-Faktoren für die maximale Kolktiefe S für die Positionen A, B und C anzuwenden:

- | | |
|---------------------|-------------------------------------|
| Vorderer Pfahl (A): | Kolktiefe Korrekturfaktor A = 1,3 S |
| Hinterer Pfahl (B): | Kolktiefe Korrekturfaktor B = 0,9 S |
| Zwischenraum (C): | Kolktiefe Korrekturfaktor C = 0,8 |

Am vorderen Pfahl der Gruppe ist ein Korrekturfaktor von 1,3 anzusetzen. Dies führt zu möglichen maximalen Kolktiefe von 3,9 m bis 6,12 m an der Position 2-2. Durch die Effekte der Pfahlgruppierung bildet sich zusätzlich ein Kolk zwischen den beiden Pfählen. Durch die Nähe der Pfähle ergibt sich ein Strömungsschatten am hinteren Pfahl, welcher zu einer Abschwächung der Kolkbildung führt.

Die Vertäudalben (siehe Abschnitt 3.2) bestehen aus einer Gruppe von 7 einzelnen Pfählen. Basierend auf Planzeichnungen wurde ein G/D von 4.1

bestimmt. Die Überlagerungsprozesse der Kolkbildung und deren maximale Auswirkungen innerhalb einer großen Pfahlgruppe kann durch die Analyse einzelner kleinerer Pfahlgruppen durchgeführt werden. Abbildung 4.4 zeigt die untersuchten einzelnen Gruppen. Hierbei wurde eine Pfahlgruppe bestehend aus 2 Pfählen in nebeneinander ($G/D = 4,1$), Gruppe aus 2 Pfählen schräg versetzt (mit $\alpha = 60^\circ$) ($G/D = 4,1$) sowie eine Bauwerksgruppe aus 3 Pfählen schräg versetzt (mit $\alpha = 60^\circ$) ausgewählt ($G/D = 5$). Letztere Anordnung erwies sich als besonders anfällig gegenüber Kolkbildung in den Position A und B (vgl. Abbildung 4.2). Die Ableitung der maximalen Kolkstiefen an C erfolgte unter der Annahme der in Abbildung 4.4 gezeigten nebeneinanderliegenden Bauwerksgruppe (blau hervorgehoben). Die nachfolgenden Korrekturfaktoren für die Bestimmung der maximalen Kolkstiefe S wurden ermittelt:

Vorderes Bauwerk (A):	Kolkstiefe Korrekturfaktor A = 1,17 S
Hinteres Bauwerk (B):	Kolkstiefe Korrekturfaktor B = 1,22 S
Zwischenraum (C):	Kolkstiefe Korrekturfaktor C = 0,8

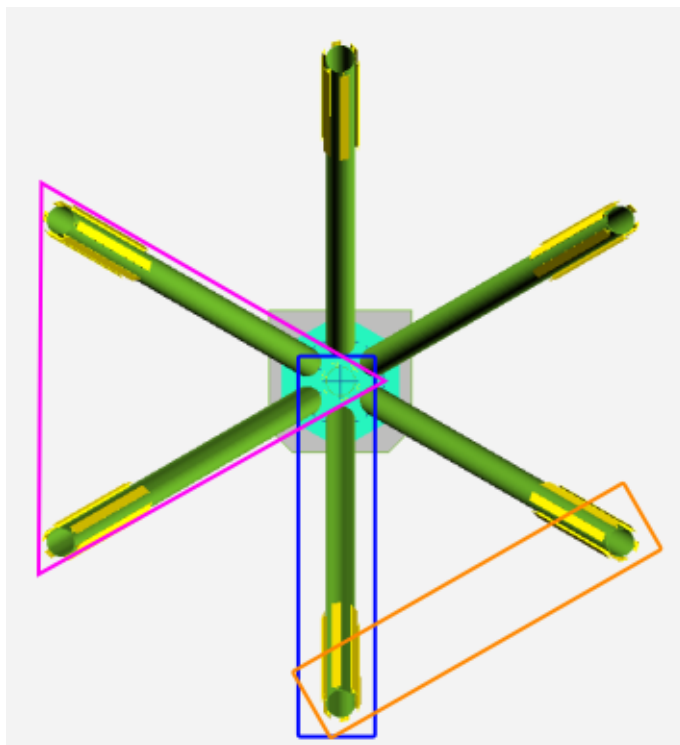


Abbildung 4.4: Pfahlanordnung innerhalb der Vertäudalben: **blau** = Bauwerksgruppe nebeneinander, **orange** = Bauwerksgruppe gestaffelt 2 Pfähle, **pink** = Bauwerksgruppe gestaffelt 3 Pfähle

Eine Korrektur der abgeleiteten maximalen Kolkstiefen mit dem Faktor 1,22 am rückwärtigen Pfahl der Gruppe für die Position 1-1 ergibt (basierend auf der verwendeten Berechnungsgrundlage) eine maximale Kolkstiefe von 2,09 m bis 3,26 m.

5 Kolkenschutzkonzept

Die im vorherigen Kapitel 4 empirisch ermittelten Kolkiefen an den geplanten Pfähle können potenziell die Standsicherheit dieser beeinträchtigen. Dies sollte durch engmaschige Kontrollen (siehe Abschnitt 5.2.2) überprüft werden. Sollte sich im Rahmen dieser Kontrollen ergeben, dass es zu einer Kolkbildung gekommen ist, kann eine entsprechender Kolkchutz aufgebracht werden. Nachfolgend wird beschrieben, wie dieses Kolkchutzkonzept umzusetzen ist. Dieses Konzept basiert auf den bereits getroffenen Annahmen und den extrahierten Strömungsbedingungen aus der bereits durchgeführten CFD-Studie /3/.

Der anzubringende Kolkchutz besteht aus einer Deckschicht aus Steinen mit einer darunterliegenden Filterschicht, deren Eigenschaften nachfolgend detailliert beschrieben werden.

Die kritische Materialgröße (Steingröße) D_{cr} wird definiert als die Größe, welche stabil gegen Erosionsprozesse und Kolkbildung ist. Feinmaterial der Deckschicht wird diesen Größenparameter unterschreiten und unterliegt somit Erosionserscheinungen. Diese Erosionserscheinungen werden nicht auf die gesamte Schichtdicke der Deckschicht einwirken, sondern bleiben auf die Oberfläche beschränkt, so dass gröberes Material verbleibt und somit einen zusätzlichen Schutz für das darunterliegende Material bildet.

Abbildung 5.1 zeigt schematisch den Prozess der vertikalen Erosion an einem aufgetragenen Kolkchutz. Dieser Prozess bewirkt, dass jenes, unterhalb liegende, Material in seiner Zusammensetzung (inklusive Feinmaterial) erhalten bleibt und somit als Filterschicht fungiert.

Dieses Kapitel beschreibt den konzeptionellen Kolkchutz der geplanten Pfähle unter Einbeziehung der berechneten maximalen Kolkiefen. Hierzu werden Empfehlungen zum Aufbringen der Kolkchutzmaßnahmen sowie deren Instandhaltung gegeben

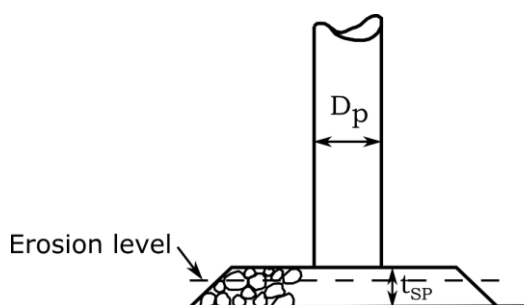


Abbildung 5.1: Schematische Abbildung des Kolkschutzes mit hervorgehobener Erosion des Feinmaterials innerhalb der Deckschicht.

5.1 Konzeptioneller Entwurf des Kolksschutzes

5.1.1 Stabilität der Decksteine

Es wird empfohlen den Kolksschutz auf Grundlage von Decksteinen herzustellen. Die Stabilität der Decksteine wird mittels des Shields-Ansatzes bestimmt /13/, wobei die Shields-Zahl (siehe Gleichung [4]) unter der kritischen Shields-Zahl (siehe Gleichung [5]) liegen muss.

Die Shields-Zahl ergibt sich aus:

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{g(\rho_s - \rho_w)D_c} = \frac{U_{f,cr}^2}{g(s-1)D_c} \quad [4]$$

Wobei τ_{cr} der kritischen Sohlschubspannung, bei der Materialbewegungen beginnen, $s = 2.65$ der Lagerungsdichte der Decksteine und $g = 9,81\text{m/s}^2$ der Erdbeschleunigung entspricht. D_c bezeichnet den Durchmesser der Decksteine und $\theta_{cr} = 0.055$ entspricht der kritische Shields-Zahl. $U_{f,cr}$ entspricht der kritischen Reibungsgeschwindigkeit, welche folgendermaßen berechnet wird:

$$U_{f,cr} = \frac{V}{2.5 \left(\ln \left(\frac{30h}{k_s} \right) - 1 \right)} \quad [5]$$

Mit V = tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit, der Wassertiefe h und der Oberflächenrauigkeit k_s mit $2.5 D_c$.

Das Vorhandensein des Pfahls verstärkt den Prozess der Kolkbildung in seinem Nahbereich. Diese Verstärkung der kritischen Sohlschubspannung kann durch den Faktor α beschrieben werden:

$$\alpha = \frac{\tau}{\tau_{\infty}} \quad [6]$$

Mit τ der kritischen Sohlschubspannung im Nahbereich des Pfahls und τ_{∞} der kritischen Sohlschubspannung für Bereiche im weiteren Umfeld des Pfahls ohne bauliche Eingriffe. Der Verstärkungsfaktor α kann nach Hjorth (1975) /14/ bis zu 11 betragen. Da α jedoch nur selten den Wert von 7 überschreitet und dieser dann auch nur unter bestimmten Bedingungen und lokal sehr begrenzt auftritt, wurde /14/ folgend ein Verstärkungsfaktor von 7 angesetzt.

Den Bauplänen folgend werden einige Pfahlstrukturen auf einer Böschung liegen, welche eine Neigung aufweist. Das Aufbringen von Decksteinen auf einer Neigung hat zur Folge, dass die entsprechenden Pfähle eine niedrigere Shields-Zahl haben und somit Material leichter verlagert werden kann /15/. Daher muss die Shields-Zahl um den Faktor der Neigung erweitert werden und berechnet sich wie folgt bei einer quer zur Strömung geneigten Sohle:

$$\theta_{cr,c} = \theta_{cr} \cos(\beta) \sqrt{1 - \frac{\tan^2(\beta)}{\tan^2(\phi_s)}} \quad [7]$$

Mit ϕ_s der ursprünglichen Shields-Zahl auf ebenem Untergrund (mit angenommenen 37° Haftreibungswinkel) und β den Neigungswinkel bei einer Neigung von 1:6.

Daher ergibt sich eine korrigierte Shields-Zahl von $\theta_{cr,c} = 0,053$ welche durch Iteration zur Ableitung stabiler Decksteinparameter durch die Formeln [7] und [5] ermittelt wurde. Die kritische Decksteingröße für die Position 2-2 (Anlegedalben) und die Position 1-1 (Vertäudalben) wurde basierend auf den lokalen Strömungsbedingungen und Wassertiefen ermittelt. Eine stabiler Kolksschutz benötigt einen kritischen Decksteindurchmesser D_{50}

- für die Position 2-2 von 68 mm,
- an der Position 1-1 von 55 mm.

Eine Abstufung des verwendeten Materials für die Decksteine ermöglicht eine stabile Deckschicht. Hier muss folgendes Verhältnis eingehalten werden.

$$\frac{D_{85}}{D_{15}} = 1.5 - 2.5 \quad \text{oder} \quad M_{85}/M_{15} > 2.7$$

Wobei D den minimalen Medianwert des Durchmessers und M das mittlere Gewicht der der Decksteine beschreibt.

Es wird empfohlen eine Materialgröße von **$D_{50} = 90\text{mm}$** für Wasserbausteine nach EN13383 Standard der Größenklasse CP63/180 zu verwenden.

5.1.2 Deckschicht des Kolksschutzes

Die aufzubringende Schichtdicke des Kolksschutzes muss die Deckschicht sowie eine Filterschicht beinhalten. Die Gesamt-Schichtdicke ergibt sich hierbei aus den Abmessungen der Einzelschichten. Zusammen ergeben sie einen stabilen Schutz gegenüber strömungsinduzierter Erosion im Material (auswaschen feinerer Partikel), was ein Absinken des aufgebracht Kolksschutzes verhindert. Der erosive Wirkraum kann mit der etwa 3-fachen Dicke von D_{50} beziffert werden, was

- einer Dicke für die Deckschicht von 0,27 m entspricht.

Die darunterliegende Filterschicht verhindert den Transport von Sohlmaterial durch die Poren des Kolksschutzes, welches ein Absinken des aufgebracht Kolksschutzes zur Folge hätte. Die Schichtdicke der Filterschicht oberhalb bindiger Sedimente sollte 2 bis 3 mal D_{50} entsprechen, um die Kräfte der Strömung auf die Gewässersohle zu minimieren. Da die Erosion und die Kolkbildung in bindigen Sedimenten nicht in einzelnen Feinpartikeln stattfindet, sondern eine paketweise Erosion größerer Materialmengen erfolgt, ist eine 2-fache Schichtdicke von D_{50} als ausreichend anzusehen, was

- einer Dicke für die Filterschicht von 0,18 m entspricht.

In Gänze wird die

- erforderliche Gesamt-Schichtdicke für den Kolkchutz mit 0,45 m berechnet.

5.1.3 Kolkbildung im Grenzbereich des Kolkshutzes

Der Entwurf des Kolkshutzes um die geplanten Dalben muss so gestaltet werden, dass keine sekundären Kolkbildungsprozesse durch das Aufbringen des Kolkshutzes selbst entstehen. Hierzu wird die in Abbildung 5.2 dargestellte Anordnung vorgeschlagen, welches eine Berme beinhaltet. Die Verstärkungseffekte auf die kritische Sohlschubspannung bewegen sich in der Regel in einem Umkreis des Durchmessers des Pfahls (Dalbe). Daher sollte der aufgebrauchte Kolkchutz und dessen Berme mindestens einem 3-fachen Pfahldurchmesser entsprechen. Die Untersuchungen von Petersen et al. /16/ zeigen, dass die Verstärkungswirkung auf die kritische Sohlschubspannung ab einem Verhältnis von Kolkshutzbreite zu Pfahldurchmesser von 1:3 und größer konstant bleibt.

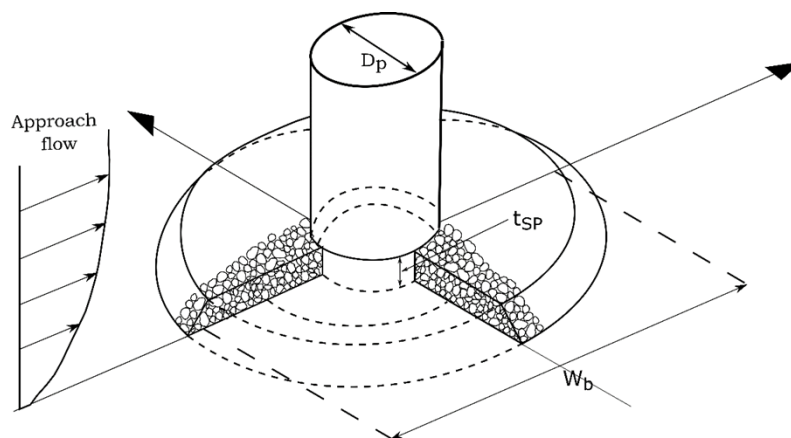


Abbildung 5.2: Schematisches Design des aufzubringenden Kolkshutzes mit D_p = Pfahldurchmesser, W_b = Breite (Berme) und t_{sp} = Schichtdicke des Kolkshutzes.

Durch die permanente Exposition der Pfähle gegenüber den Gezeitenströmungen erfolgt die Entstehung von Kolken im Grenzbereich des aufgebrauchten Kolkshutzes, dem in Abbildung 5.3 dargestellten Schema folgend /16/.

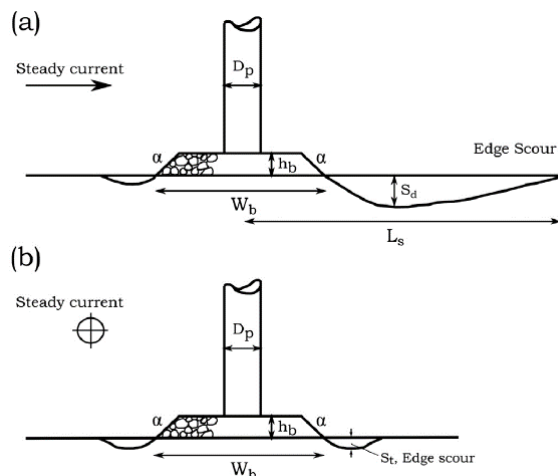


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung der Entstehung von Kolk im Grenzbereich a) parallel zur Hauptströmung b) quer zur Hauptströmung

Unter der Annahme eines Korngrößendurchmessers im bindigen Sediment von $D_{50} = 0.15 \text{ mm}$ /4/ wurden die Kolk-tiefen für die Bildung im Grenzbereich folgendermaßen bestimmt (siehe Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1 Kolk-tiefen im Grenzbereich nach /16/ bezogen auf Abbildung 5.3

Kolk-tiefe im Grenzbereich	Anlegedalben	Vertäudalben
Strömung parallel S_d (a)	0,90m	0,67m
Strömung quer S_{ts} (b)	0,29m	0,32m
Wirkraum L_s a)	28.0m	16.4m

Der sich ausbildende Kolk entsteht abseits des aufgebrachtten Kolkschutzes und muss daher nicht zwangsläufig eine Gefahr für die Pfahlstabilität hervorrufen. Sollte dies doch der Fall sein, dann ist die Breite des aufgebrachtten Kolkschutzes zusätzlich, um den Faktor 0,4 bis 1 des Pfahldurchmessers zu erweitern. Dieser zusätzliche Bereich würde im Fall einer Kolkbildung als Schutz in die entstehende Vertiefung des Kolks fallen und damit die Sohle vor Erosion schützen.

5.1.4 Entwurf des Kolkschutzes

Basierend auf den vorangegangenen Berechnungen und Auswertungen wird folgender konzeptioneller Kolkschutz (Tabelle 5.2) für die Anlegedalben und Vertäudalben im Bereich des geplanten LNG-Anlegers in Brunsbüttel empfohlen.

Tabelle 5.2 Abgeleitete Design Parameter für den anzubringenden Kolkschutz an den untersuchten Bauwerken am geplanten Standort Brunsbüttel

	Anlegedalben	Veträudalben
Durchmesser D_p	3.0m	1.219m
Minimum D_{50}	90mm	90mm
Standardabstufung (DIN EN13383)	63/180mm	63/180mm
Minimale Lagerungsdichte	2650 kg/m ³	2650 kg/m ³
Minimale Schichtdicke des Kolkschutzes t_{sp}	0.45m	0.45m
Minimale Breite des Kolkschutzes, W_b	9.0m	3.66m
Neigung	1:2	1:2
Minimale Breite des Kolkschutzes (inklusive Neigung)	10.8m	5.46m

Die in der obigen Tabelle aufgeführten Entwurfs-Parameter für den Kolkschutz sollten in dieser Form an jede der zu errichtenden Dalben angebracht werden (siehe Abbildung 5.4). Bei einem Abstand von unter 4,2 m an der Gewässersohle würde es zu einer Überdeckung des aufzubringenden Kolkschutzes an den Anlegedalben kommen. Daher kann (auch wenn die Gegebenheit des vorherigen Satzes nicht zutrifft) empfohlen werden, den aufzubringenden Kolkschutz über den gesamten Bereich der Sohle aufzubringen in welchem die Anlegedalben geplant sind. Bei einer solchen Vorgehensweise ist mit keinerlei Beeinträchtigung des Kolkschutzes zu rechnen.

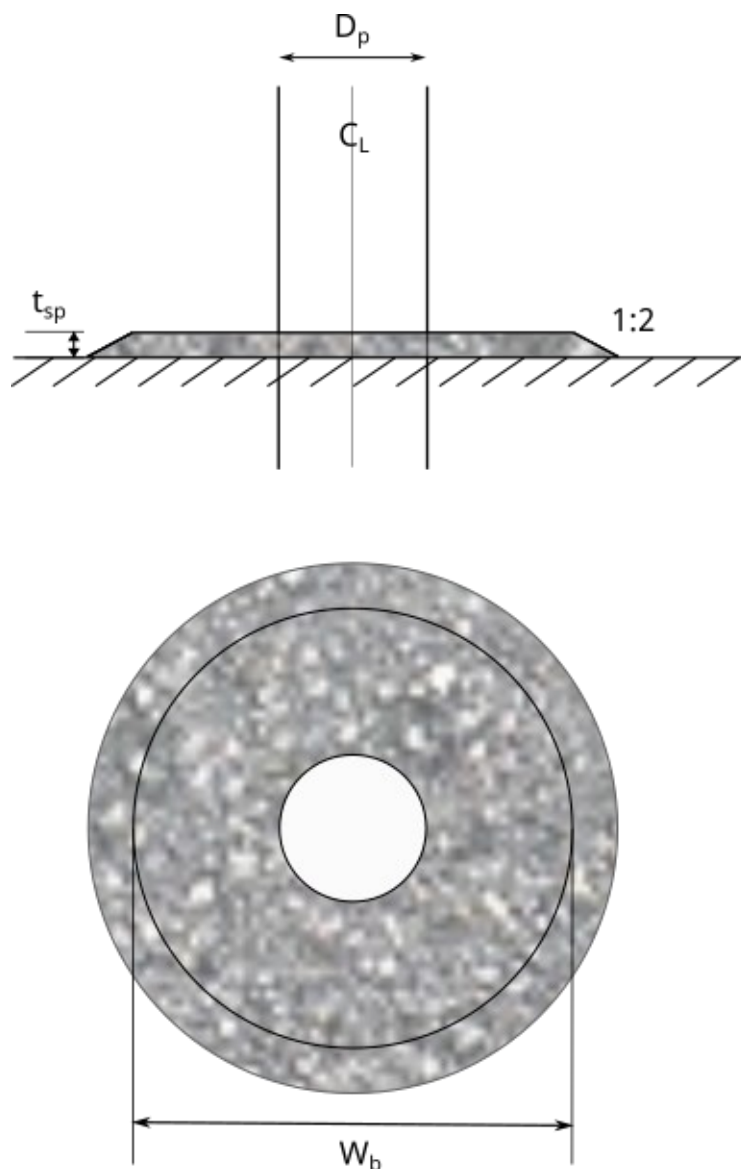


Abbildung 5.4: Designlayout des konzeptionellen Kolk­schutzes (basierend auf den Werten aus Tabelle 5.2)

5.2 Installation und Wartung

5.2.1 Installation

Es wird empfohlen den Kolk­schutz mittels Tief­löf­fel­bagger oder Fallrohr aufzubringen. Dies gewährleis­tet eine hohe Präzision und Genauigkeit der Installation und mini­miert gleich­zei­tig das Risiko einer Segregation des auf­ge­brach­ten Materials auf dem Weg durch die Wassersäule. Eine Segregation des aufzubringenden Materials ist unter allen Um­stän­den zu vermeiden.

5.2.2 **Wartung**

Während und nach der Installation des aufzubringenden Materials ist eine genügende Anzahl an Kontrolluntersuchungen durchzuführen. Sie werden zu den folgenden Zeitpunkten empfohlen:

- Vor der Installation der Dalben
- Nach der Installation der Dalben

Bei Bedarf des Aufbringens eines Kolkschutzes

- Vor der Installation des Kolkschutzes
- Nach der Installation des Kolkschutzes

Während des Betriebs des Anlegers wird empfohlen, jährliche Kontrollen durchzuführen in den ersten 5 Jahren des Betriebs. Ab dem 6. Betriebsjahr wird ein Kontrollintervall von 5 Jahren oder seltener empfohlen, je nach Zustand des Kolkschutzes.

Außerhalb der oben aufgeführten Kontrollintervalle wird empfohlen, zusätzliche Kontrollen nach jedem Extremereignis mit einem Wiederkehrintervall von > 10 Jahren durchzuführen. Zusätzlich wird empfohlen, die Kontrollintervalle entsprechend den Ergebnissen der Kontrollen nach Ereignissen mit extrem starken Strömungen dynamisch anzupassen.

6 Zusammenfassung

Das vorliegende Kolkuntersuchung dient der Berechnung der maximal möglichen Kolkentiefe, sowie dem konzeptionellen Aufbau des Kolkschutzes am geplanten LNG-Anleger am Standort Brunsbüttel nahe der Elbmündung. Die Untersuchungen erfolgten unter konservativen Bedingungen an jenen Dalben/ Pfahlgruppen, welche den höchsten Strömungsgeschwindigkeiten ausgesetzt sind. Die Durchführung erfolgte konzeptionell im Rahmen einer Desktop-Studie.

Die Anlegedalben mit der höchsten Exposition gegenüber der Strömung befinden sich im östlichen Bereich des geplanten Anlegers (siehe Abbildung 2.1). Der Durchmesser beträgt 3 m bei einer Sohllage von -17 m NHN. Die Gewässersohle besteht an der Oberfläche aus bindigem Ton gefolgt von verschiedenen Sandschichten, unterlagert von glazialen Geschiebemergel. Die Mächtigkeit der oberen Gewässersohle beträgt 5 m am Standort des Anlegedalbens.

Die Vertäudalben mit der höchsten Exposition gegenüber der Strömung befinden sich im westlichen Bereich des geplanten Anlegers (siehe Abbildung 2.1). Der Vertäudalben besteht aus einer Pfahlgruppe mit einem senkrechten Pfahl und 6 umliegenden Pfählen im Winkel von $18,4^\circ$ (bezogen auf die Senkrechte). Der Durchmesser eines Pfahls beträgt 1,219 m. Die Gewässersohle besteht ebenfalls an der Oberfläche aus bindigem Ton gefolgt von verschiedenen Sandschichten, unterlagert von glazialen Geschiebemergel. Die Mächtigkeit der oberen Gewässersohle beträgt 5 m am Standort des Anlegedalbens.

Durch die vorliegenden Baugrundsondierung in Verbindung mit einem detaillierten Strömungsgutachten (CFD-Studie) konnte die maximal zu erwartende empirische Kolkentiefe an den untersuchten Dalben als Wertebereich ermittelt werden. Die Grundlage des Wertebereichs ist die Anwendung verschiedener Berechnungsformeln zur empirischen Bestimmung der Kolkentiefe (Siehe 4). Die maximalen Kolkiefen an den untersuchten Dalben zeigt die nachfolgende Tabelle

Tabelle 6.1 Maximale, empirisch abgeleitete, Kolkentiefe (Wertebereich)

	Anlegedalben	Vertäudalben
Maximale Kolkentiefe (einzelner Pfahl)	3,00 m – 4.71 m	1,71 m – 2,76 m
Maximale Kolkentiefe (Pfahlgruppe)	3,90 m – 6.12 m	2,09 m – 3.26 m

Die berechneten empirischen Kolkiefen führen bei entsprechend tiefer Gründung nicht zur Beeinträchtigung der Standsicherheit der Dalben. Es wird daher empfohlen engmaschige Kontrollen durchzuführen, um die Ausbildung von Kolken zu überwachen. Sollte es zu einer Bildung von entsprechenden Kolken an den Dalben kommen, welche die Standsicherheit gefährden, ist ein Kolkschutz rechtzeitig aufzubringen, dessen Parameter nachfolgend beschrieben werden.

Basierend auf den Berechnungsergebnissen wurden die Parameter für den aufzubringenden Kolkschutz abgeleitet (Tabelle 5.2). Das empfohlene aufzubringende Material der Größenklasse CP63/180 ist leicht zu installieren und

bietet gleichzeitig den benötigten Schutz gegenüber der Kolkbildung an den Dalben. Die mittlere Materialgröße des aufzubringenden Kolkschutzes wurde mit einem kritischen Durchmesser von $D_{50} = 0,055 - 0,068$ m berechnet, wobei 0,055 m einem stabilen Kolkschutz an den Anlegedalben und 0,068 m einem stabilen Kolkschutz an den Vertäudalben entspricht. Daher wird empfohlen, bei Aufbringung eines Kolkschutzes, eine Materialgröße von $D_{50} = 0,090$ m zu verwenden, um oberhalb des ermittelten kritischen Durchmessers zu verbleiben.

7 Literatur

- /1/ *DHI WASY 2022: Hydrodynamische Studie zu den Auswirkungen des Betriebs der FSRU auf die Gewässerqualität und die Gewässersohle – thermische Einleitung (Projektnummer 14806725)*
- /2/ *DHI WASY 2022: Untersuchung der bauzeitlichen Sedimentverdriftung zur Herstellung der Liegewanne am geplanten Jetty (Projektnummer 14806725)*
- /3/ *DHI WASY 2022: Studie zum Strömungsbild am geplanten FSRU-Anleger Brunsbüttel – Lokale Strömungen am Anleger (Projektnummer 14806725)*
- /4/ *Rambøll Deutschland GmbH 2022, Elbehafen Brunsbüttel, Jetty Westbecken - FSRU-Liegeplatz, Geotechnischer Bericht.*
- /5/ *Steinfeld und Partner 2022: Geotechnische Baugrunduntersuchung ;Konrgrößenverteilung.*
- /6/ *E. V. Richardson & S. R. Davies(2012) Evaluating scour at bridges, Fifth Edition, Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC-18), Washington D.C.: Federal Highway Administration (FHWA-HIF-12-003).*
- /7/ *Gudavalli, S. R.(1997): "Prediction model for scour rate around bridge piers in cohesive soils on the basis of flume tests," Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, College Station, TX.*
- /8/ *J. L. Briaud, H. C. Chen, Y. Li, P. Nurtjahyo & J. Wang (2004) "Pier and Contraction Scour in Cohesive Scour," Transportation Research Board, Washington D.C*
- /9/ *F. C. K. Ting, J. L. Briaud, H. C. Chen, R. Gudavalli, S. Perugu and G. Wei (2001): "Flume Tests For Scour in Clay at Circular Piers," Journal of Hydraulic Engineering, vol. 127, no. 11, pp. 969-678.*
- /10/ *J. L. Briaud, H. C. Chen, K. A. Chang, S. J. Oh, S. Chen, J. Wang, Y. Li, K. Kwak, P. Nartjaho, R. Gudaralli, W. Wei, S. Pergu, Y. W. Cao and F. Ting (2011): "The Sricos - EFA Method, Summary Report," Texas A&M University, College Station, TX, 2011.*
- /11/ *J. M. Harris & R. S. Whitehouse (2014), "Scour predictions in non-uniform soils: undrained shear strength and erodibility," in Scour and Erosion Proc. 7th Int. Conf. on Scour and Erosion, Perth, Australia*
- /12/ *B. M. Sumer & J. Fredsøe(2002): The mechanics of scour in the marine environment, World Scientific.*
- /13/ *B. M. Sumer and J. Fredsøe 2002: The mechanics of scour in the marine environment, World Scientific.*
- /14/ *P. Hjorth (1975): "Studies on the nature of local scour," Bullitin Series A. No. 46, Dept. of Water Resources Engineering, Lund Inst. of Technology, Univ. of Lund, Sweden.*

- /15/ J. Fredsøe and R. Deigaard (1992): Mechanics of coastal sediment transport, Advanced Series on Ocean Engineering - Volume 3, World Scientific.
- /16/ T. U. Petersen, B. M. Sumer, J. Fredsøe, T. C. Raaijmakers and J. J. Schouten (2015): "Edge scour at scour protections around piles in the marine environment. Laboratory and field investigation.," *Coastal Engineering*, vol. 106, no. 2015, pp. 42-72.

The expert in **WATER ENVIRONMENTS**

