

  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 1 of 31

Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten

Erste Ausgabe	00	20/02/2024	M. van den Bosch 	E. Meyer 	J. de Groot 	
Status	Ausgabe	Datum	Erstellt von	Geprüft von	Genehmigt von	Anmerkung

  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 2 of 31

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Literatur	5
3.	Abkürzungen	6
4.	Zeichen	7
5.	Beschreibung der relevanten Anlagen	8
5.1	Ponton-Anlage.....	8
5.2	PLEM und Pipeline.....	9
6.	Baugrunduntersuchung	10
7.	Auswirkungen des Monopile-Einbaus	12
7.1	Rammung der Monopiles	12
7.2	Bathymetrische Vermessungen	13
8.	Allgemeine Ausgangspunkte	16
8.1	Berechnungsmethode	16
8.2	Pfahleinbau Führungspfähle	16
8.3	Referenzbodenprofil.....	17
8.4	Referenzgeschwindigkeit und Dämpfung.....	19
8.5	Leitfaden Erschütterungen im Bauwesen, DIN 4150	19
9.	Beurteilung der Erschütterungen	22
9.1	Auswirkungen des Monopile-Einbaus	22
9.2	Ergebnis der Erschütterungsanalyse	23
10.	Schlussfolgerungen	25
Anhang A		26
Anhang B Erschütterungsrichtwerte für Pipelines		28

  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 3 of 31

Anhang C Verfügbare Bodenprofile gemäß CUR 166..... 29

  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 4 of 31

1. EINLEITUNG

In Wilhelmshaven soll ein LNG-Terminal gebaut werden. Am östlichen Ende des LNG-Terminals wird eine Ponton-Anlage errichtet. Siehe Abbildung 1 für einen Eindruck vom Standort. Die Monopiles der FSRU sind bereits eingebracht worden. Bei der Konstruktion der Ponton-Anlage kommen zwölf Führungspfähle zum Einsatz.



  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 5 of 31

2. LITERATUR

Für dieses Dokument wurden die nachstehend aufgeführten Referenzdokumente verwendet:

- [1] Ponton-Anlage Wilhelmshaven, Dok.-Nr. DMC-231121-R-00006-MVB, Stand 14.01.2024;
- [2] Zeichnung CEP.05716-DMC-1021 Version 0A2, LNG-Terminal Wilhelmshaven, Pfahlpositionsplan Ponton-Anlage, Schnitt & Typische Angaben, Stand 05.01.2024;
- [3] *Technical Note Driveability Assessment* [Technischer Hinweis Rammbarkeitsuntersuchung] Dok.-Nr. DMC-240126-M-000001-MBO, Stand 30.01.2024;
- [4] Baugrunduntersuchung Lankelma FSRU Wilhelmshaven, Sachbericht über die küstennahe Bodenuntersuchung, Projekt-Referenz P-108348-11, Berichtsausgaben-Nr. P-108348_02, Stand 11.01.2024;
- [5] Van Oord *Technical Note Wilhelmshaven FSRU Driveability Assessment* [Technischer Hinweis FSRU Wilhelmshaven Rammbarkeitsuntersuchung], Dok.-Nr. 25.3444-VOOW-TF-ENG-TN-1004, Version B, Stand 28.09.2023;
- [6] Van Oord, *Wilhelmshaven FSRU – Marine Works, Piling Records Monopiles* [FSRU Wilhelmshaven – Meeresarbeiten Rammprotokolle Monopiles], Stand November 2023;
- [7] Zeichnung TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DWG_2109.06, Energiepark Wilhelmshaven, Übersichtsplan, Stand 24.05.2023;
- [8] Zeichnung 253444-VOW-GEN-SUR-DWG-0002, *Wilhelmshaven FSRU – Marine Works, Pre Survey Scour* [FSRU Wilhelmshaven – Meeresarbeiten, Vorerhebung Kolk], Stand 19.09.2023;
- [9] Zeichnung 253444-VOW-GEN-SUR-DWG-BATHY-0034, *Wilhelmshaven FSRU – Marine Works, Overview Working Area Bathymetric Chart* [FSRU Wilhelmshaven – Meeresarbeiten, Übersicht Arbeitsbereich Bathymetrische Karte], Stand 12.01.2024;
- [10] *SBR Trillingsrichtlijn Deel A 2017 – Schade aan Bouwwerken* ¹⁾;
- [11] *CUR 166, 6e druk, deel 1 en deel 2* ²⁾;
- [12] *CUR 1995-2, Prognosemodel Trillingshinder* ³⁾;
- [13] DIN 4150-3:1999, Erschütterungen im Bauwesen.

¹⁾ SBR-Erschütterungsleitlinie Teil A 2017 – Schäden an Bauwerken;

²⁾ CUR 166, 6. Auflage, Teil 1 und Teil 2;

³⁾ CUR 1995-2, Prognosemodell Beeinträchtigung durch Erschütterungen.

  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 6 of 31

3. ABKÜRZUNGEN

Abkürzung	Definition
SKN*	Seekartennull
CPT	Drucksondierung (cone penetration test)
BC	Schlagzahl (blow count)
BE	Schätzwert (best estimate)
LB	Untere Schranke (lower bound)
UB	Obere Schranke (upper bound)
Da	Außendurchmesser
SI	Baugrunduntersuchung (Site investigation)
WD	Wanddicke
LNG	Flüssigerdgas
bsf	unter dem Meeresboden (below sea floor)
SRD	Statischer Rammwiderstand (static resistance to driving)

* In der offenen Nordsee orientiert sich das SKN am niedrigsten Gezeitenwasserstand (Lowest Astronomical Tide; LAT). In den tidebeeinflussten Flüssen wird das SKN gesondert festgesetzt.

  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 7 of 31

4. ZEICHEN

T	Tiefe [m]
B	Breite [m]
L	Länge [m]
D	Pfahldurchmesser [mm]
t	Spundwanddicke (pile wall thickness) [mm]
L	Pfahllänge [m]
a	Dämpfungskonstante [m ⁻¹]
v ₀	Referenz-Schwinggeschwindigkeit [mm/s]
v _{kar}	typische Grenzwerte [mm/s]

	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 8 of 31

5. BESCHREIBUNG DER RELEVANTEN ANLAGEN

5.1 Ponton-Anlage

Abbildung 2 zeigt eine Draufsicht [2] der Ponton-Anlage, die aus den folgenden Elementen besteht:

- Schwimm-Ponton mit den allgemeinen Abmessungen $L \times B \times T = 67,00 \text{ m} \times 18,00 \text{ m} \times 4,53 \text{ m}$ und mindestens 2,23 m Freibord [2];
- zwölf Führungspfähle, PP-01 bis PP-12, sollen eingebracht werden, Tabelle 1 [1,2];
- Die Monopiles der FSRU (darunter MD-4, MD-5 und MD-6) wurden alle bereits eingebracht [6].

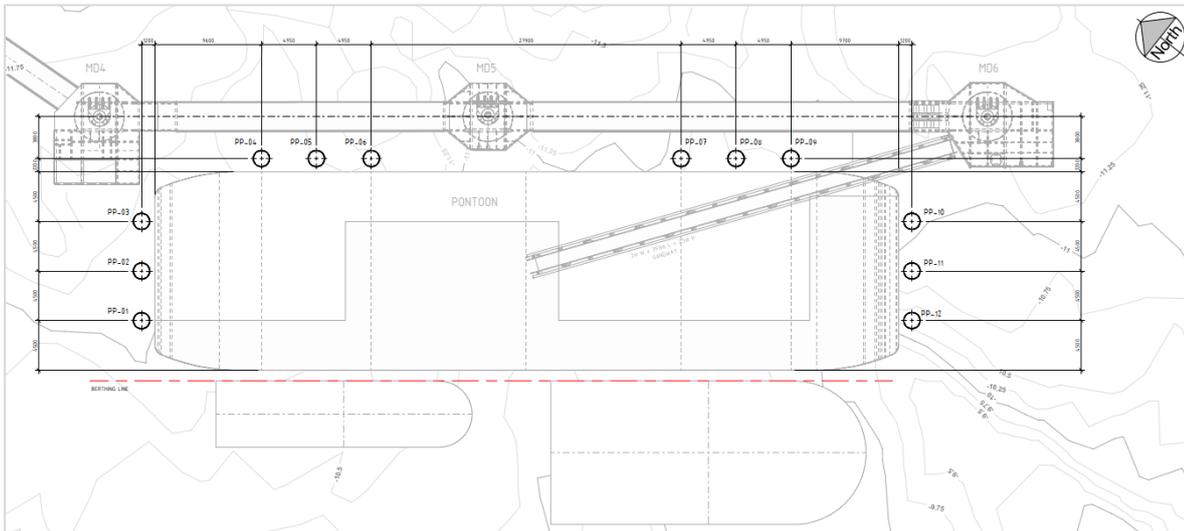


Abbildung 2 Draufsicht der Ponton-Anlage mit Monopiles und Führungspfählen [2]

Tabelle 1 zeigt die Pfahlabmessungen. Der Durchmesser, die Wandstärke und die Pfahlänge der Führungspfähle sind kleiner als bei den Monopiles. Dies bedeutet, dass die Pfahleindringtiefe der Führungspfähle erheblich geringer ausfällt als die der Monopiles.

Pfähle	Durchmesser [mm]	Wanddicke [mm]	Pfahlänge [m]	Pfahleindringtiefe [m bsf]
Führungspfähle	1.500	50	44	20,5
Monopiles	4.500	60	71	45,5

Tabelle 1: Spezifikationen der Monopiles und der Führungspfähle Ponton-Anlage [1,2,5]

  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 9 of 31

5.2 PLEM und Pipeline

Am Standort der FSRU wird eine Pipeline das Flüssigerdgas von der PLEM zur Küste transportieren. Abbildung 3 zeigt eine Übersicht der PLEM und der Pipeline. Für dieses Memo wurde nur der Standort der PLEM/Pipeline berücksichtigt.

Die Führungspfähle PP-01, PP-02 und PP-03 sind am nächsten zur PLEM und Pipeline gelegen. Die Erschütterungen aufgrund der Rammung dieser Pfähle werden daher für die Beurteilung der Erschütterungen maßgeblich sein. Der Abstand zwischen der PLEM und dem nächstgelegenen Führungspfahl beträgt ca. 135 m, und der zwischen der Pipeline und dem nächstgelegenen Führungspfahl ca. 145 m. Für die Beurteilung der Erschütterungen wird der kürzeste Abstand berücksichtigt werden.

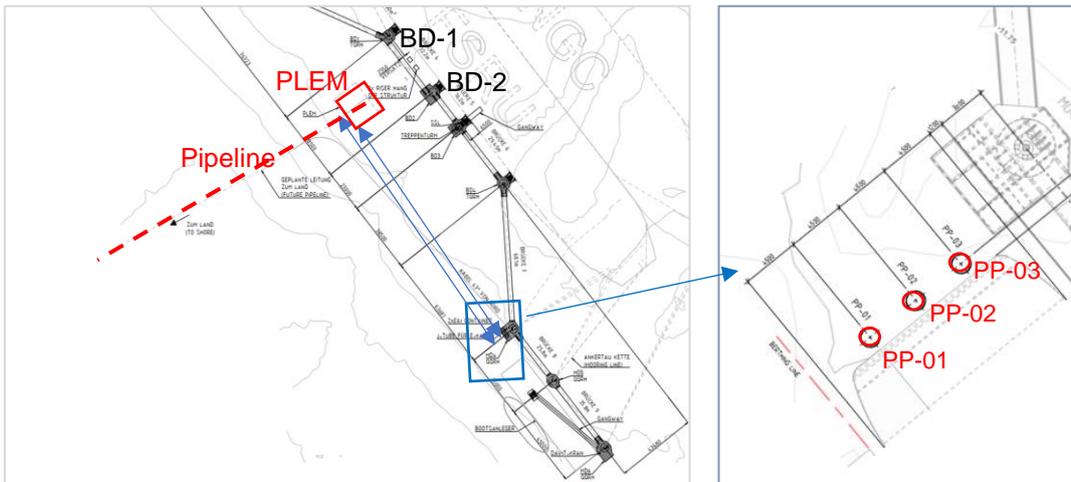


Abbildung 3: Lage der PLEM und der Pipeline in Bezug auf die Ponton-Anlage [7,2]

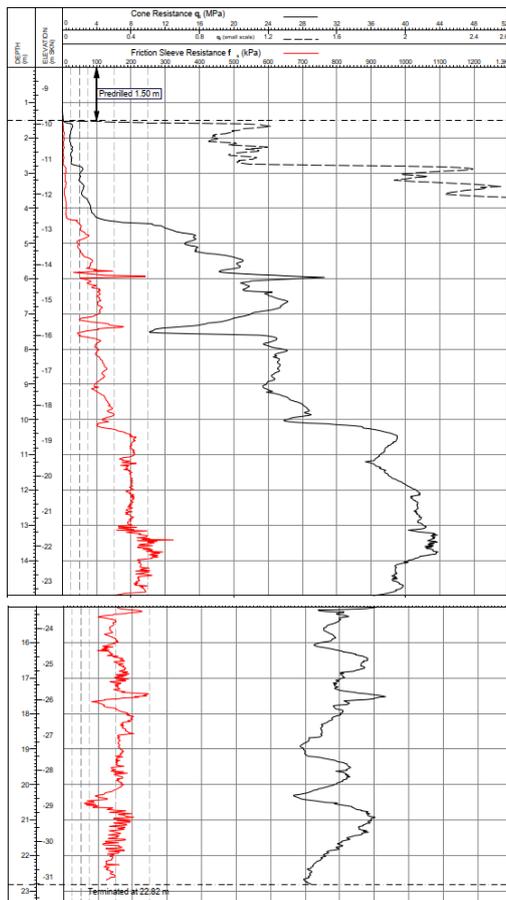
  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 10 of 31

6. BAUGRUNDUNTERSUCHUNG

Lankelma führte im Jahr 2023 eine Baugrunduntersuchung [2] an der FSRU durch, die tiefe Drucksondierungen umfasste. Die Drucksondierung PLEM-1 bis auf eine Tiefe von 22,8 [m bsf] am Ort der PLEM ist verfügbar, siehe

DEPTH (m)	TIEFE (m)
Cone Resistance q (MPa)	Spitzendruck q (MPa)
Friction Sleeve Resistance f (kPa)	Mantelreibung f (kPa)
Predrilled 1.50 m	Vorgebohrt auf 1,50 m
Terminated at 22.02 m	Festgelegt auf 22,02 m

Abbildung 4. Dies ist typisch für die Bodenbeschaffenheit am Ort der PLEM und der Pipeline, die den Führungspfählen der Ponton-Anlage am nächsten liegt. Der Meeresuntergrund besteht aus (schlickigem) Sand mit Spitzendruckwerten von bis zu 43 MPa.



DEPTH (m)	TIEFE (m)
-----------	-----------

  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 11 of 31

Cone Resistance q (MPa)	Spitzendruck q (MPa)
Friction Sleeve Resistance f (kPa)	Mantelreibung f (kPa)
Predrilled 1.50 m	Vorgebohrt auf 1,50 m
Terminated at 22.02 m	Festgelegt auf 22,02 m

Abbildung 4: Drucksondierung PLEM-1

  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 12 of 31

7. AUSWIRKUNGEN DES MONOPILE-EINBAUS

7.1 Rammung der Monopiles

Im November 2023 wurden die Monopiles ($D \times t = 4.500 \times 60 \text{ mm}$) für die FSRU eingebracht [6]. Die Länge dieser Pfähle beträgt 71 m, bei einer Pfahleindringtiefe von 45,5 m. Die Rammbarkeitsuntersuchung für die Pfähle [5] und die Pfahlrammprotokolle [6] werden als Referenz für die Auswirkungen der Erschütterungen durch den Einbau der Führungspfähle herangezogen. Die Monopiles, die sich am nächsten zur PLEM und zur Pipeline befinden, sind BD-1 und BD-2 (siehe auch Abbildung 3). Als die Monopiles eingebracht wurden, waren die PLEM und die Pipeline noch nicht gebaut; sie werden aber da sein, wenn die Führungspfähle eingebracht werden. Der Einbau dieser Monopiles wird die größten Auswirkungen auf die Stabilität der Unterwasserböschungen am Standort der zukünftigen PLEM und der Pipeline haben.

Es wurde die maximale Energie bestimmt, die anhand der Rammbarkeitsuntersuchung für die Pfähle und der Pfahlrammprotokolle ermittelt wurde. In der Rammbarkeitsuntersuchung für die Pfähle [5] wurde ein Hammer des Typs S-2000 mit einem Gesamtwirkungsgrad von ca. 88 % berücksichtigt, was 1.760 kJ entspricht. Aus den Pfahlrammprotokollen [6] geht hervor, dass für BD-2 eine maximale Energie von 1.124 kJ aufgezeichnet wurde.

Folglich beträgt die maximale Energie, die für die Beurteilung der Auswirkungen der Rammung der Monopiles berücksichtigt wird, 1.124 kJ. Der kürzeste Abstand zwischen der PLEM und Monopile BD-2 beträgt ca. 30 m [7]. Der Abstand zwischen der PLEM/Pipeline und Monopile BD-2 ist wesentlich geringer und die Rammenergie wesentlich größer als der Abstand zwischen der PLEM und den nächstgelegenen Führungspfählen. Daher ist es sinnvoll, die Auswirkungen des Monopiles-Einbaus in der Nähe des (zukünftigen) Standorts der PLEM/Pipeline zu bewerten. Wenn die eingebauten Monopiles keine Auswirkungen haben (hinsichtlich einer Instabilität der Unterwasserböschung am zukünftigen Standort der PLEM / Pipeline), dann werden die Führungspfähle höchstwahrscheinlich ebenfalls keine Auswirkungen haben (nachgewiesene Stabilität der Unterwasserböschung).

  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 13 of 31

7.2 Bathymetrische Vermessungen

Die Erschütterungen durch die Rammung der Führungspfähle der Ponton-Anlage könnten zu einer Verflüssigung der Unterwasserböschungen und in deren Folge zu Schäden an der PLEM und der Pipeline führen. Um zu bestimmen, ob dies wahrscheinlich ist, wurden die Auswirkungen der Monopile-Rammung anhand der verfügbaren bathymetrischen Vermessungen berücksichtigt.

Vor und nach dem Einbringen der Monopiles wurde eine bathymetrische Vermessung durchgeführt [8, 9]. Die vor und nach dem Einbringen der Monopiles durchgeführten Vermessungen werden in Abbildung 5 gezeigt. Es gibt keine Anhaltspunkte für eine Instabilität der Böschungen aufgrund des Einbringens der Monopiles. Die Vertiefungen an der Ponton-Anlage stammen von den Spudcans eines zum Pfahleinbau eingesetzten Hubschiffs. Am Standort der Monopiles ist der Kolkschutz in Form erhöhter, kreisförmiger Höhenlinien zu sehen. Abbildung 6 zeigt ein Bildschirmfoto vom Standort der PLEM und der Pipeline. Es gibt keine Hinweise darauf, dass durch die Erschütterungen aufgrund der maximalen Hammerenergie von 1.124 kJ, die während der Pfahlrammung am Standort von Monopile BD-2 aufgezeichnet wurde, eine Instabilität der Böschungen eingetreten wäre.

  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 14 of 31

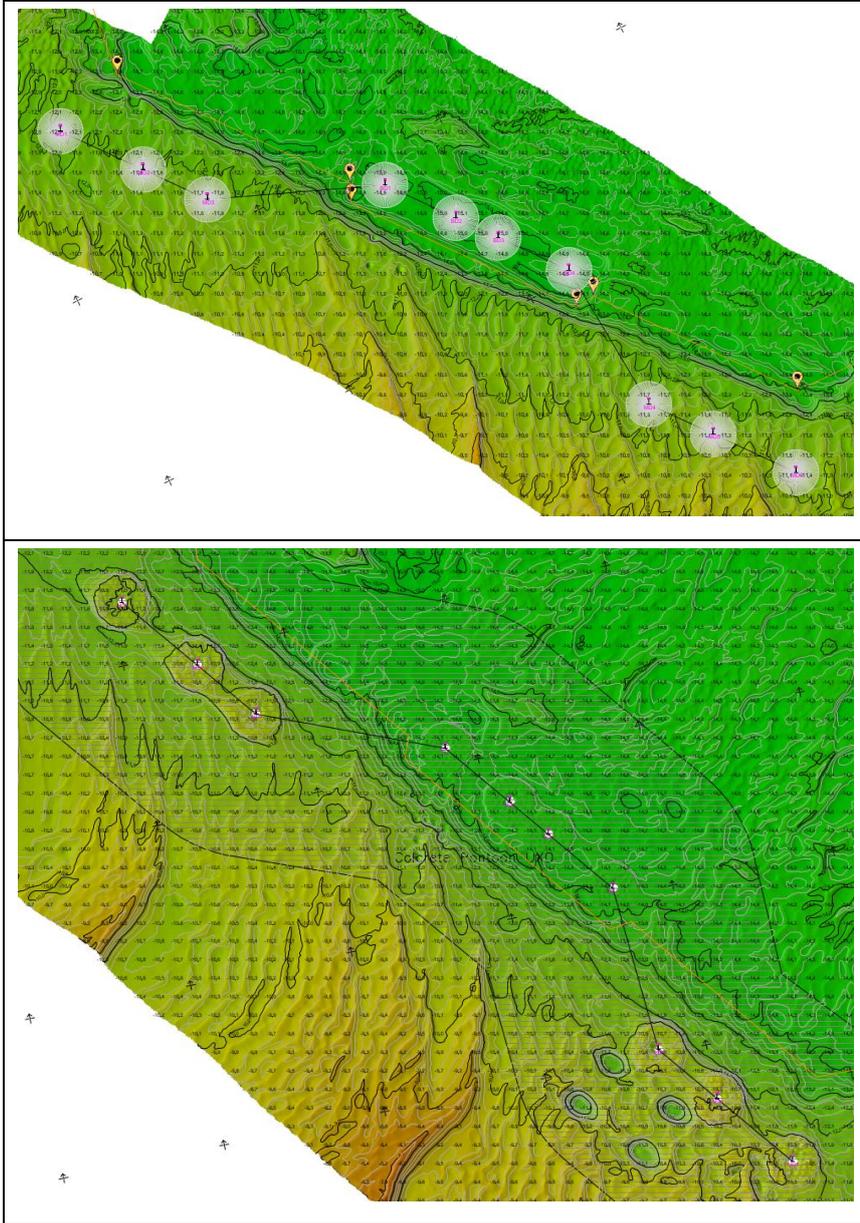


Abbildung 5: Bathymetrische Vermessung, durchgeführt vor (oben) und nach (unten) dem Einbringen der Monopiles [8, 9]

  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 15 of 31

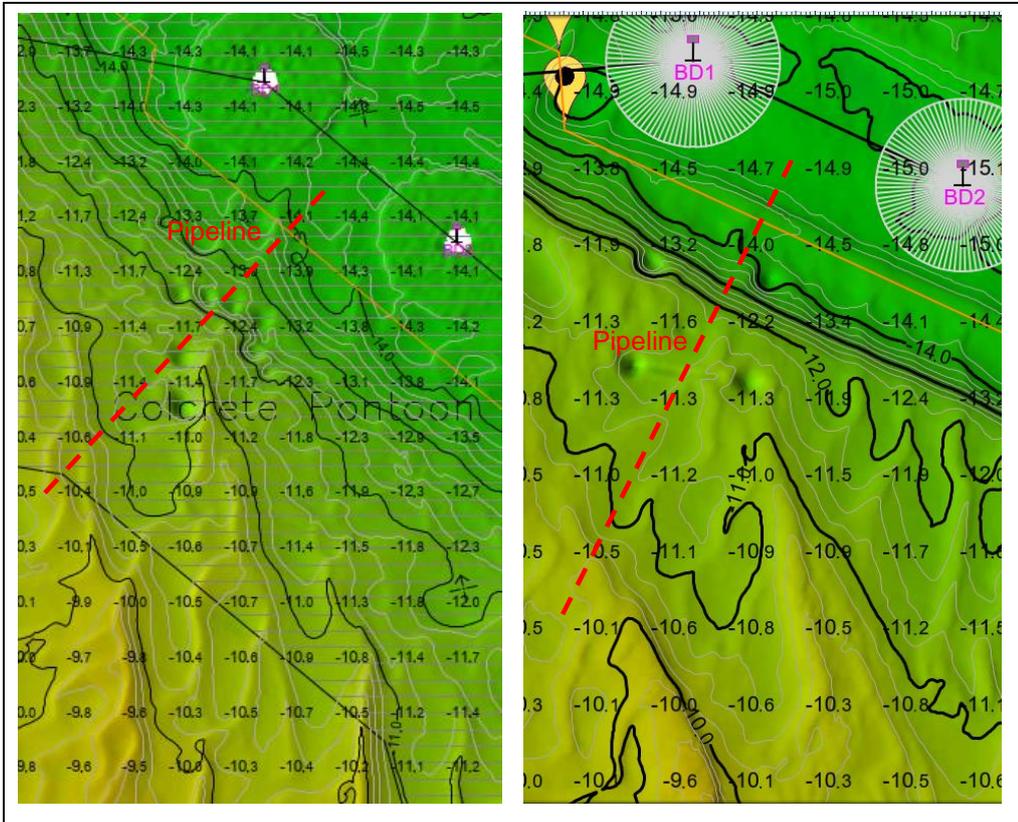


Abbildung 6: Bathymetrische Vermessung, durchgeführt vor (links) und nach (rechts) dem Einbringen der Monopiles am Standort der PLEM/Pipeline [8, 9]

  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 16 of 31

8. ALLGEMEINE AUSGANGSPUNKTE

8.1 Berechnungsmethode

Für die Beurteilung der Erschütterungen wurde eine interne Kalkulationstabelle verwendet, *Trillingspredictie heien* (Erschütterungsprognose Pfahlrammung). Grundlage dieser Kalkulationstabelle ist die niederländische CUR 166 [11]. Diese relativ einfache Methode wurde ausgewählt, da nur eine begrenzte Menge an Informationen über die PLEM und die Pipeline zur Berücksichtigung zur Verfügung steht.

8.2 Pfahleinbau Führungspfähle

Für die Rammbarkeitsuntersuchung der Führungspfähle für die Ponton-Anlage wurden die IQIP-Hydraulikhammer S-120 und S-150 berücksichtigt [3]. Die Spezifikationen dieser Hämmer sind in Tabelle 2 angegeben. Da der Hammer S-150 der schwerste Hammer ist, wird die Energie dieses Hammers für die Beurteilung der Erschütterungen berücksichtigt.

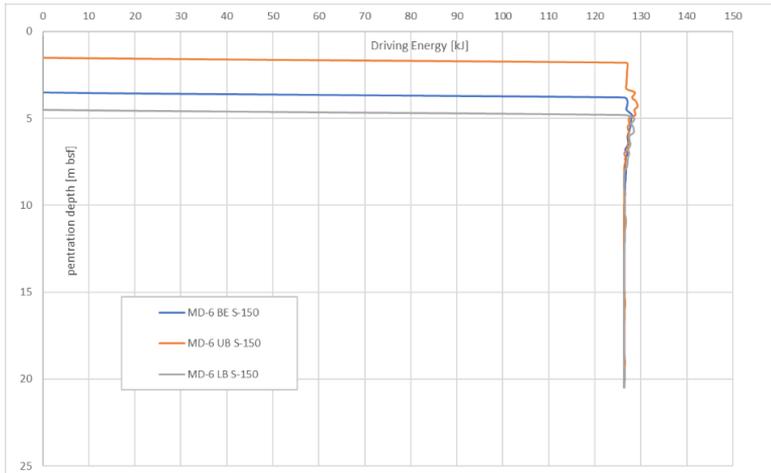
IQIP-Hydraulikhammer	Schlagenergie [kJ]	Schlaggewicht [kN]	max. äquivalenter Hub [m]	Wirkungsgrad [%]
S-120	120	59,962	2,02	0,95
S-150	150	73,840	2,02	0,95

Tabelle 2: Spezifikationen der IQIP-Hydraulikhämmer S-120 und S-150

Die Rammbarkeitsuntersuchung [3] für die Hammerauswahl basiert auf der maximalen Aufprallenergie und geht von einer kontinuierlich ausgeführten Pfahlrammung aus. Die Rammenergie des Hammers S-150 für das Einbringen der Führungspfähle mit dem maßgeblichen Bodenprofil (basierend auf CPT MD-6) ist in der nachstehenden Abbildung dargestellt. Die maximale Energie während der Pfahlrammung beträgt ca. 130 kJ.

  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 17 of 31

Der Gesamtwirkungsgrad beträgt folglich ca. 87 % ($\approx 130/150 \times 100 \%$); in der Kalkulationstabelle werden als konservativer Wert 90 % verwendet.



Driving Energy [kJ]	Rammenergie [kJ]
penetration depth [m bsf]	Eindringtiefe [m bsf]

Abbildung 7: S-150 Rammenergie BE, UB und LB (GRLWEAP-Ergebnisse)

8.3 Referenzbodenprofil

Als Eingabe für die Beurteilung der Erschütterungen muss ein Referenzbodenprofil ausgewählt werden. Die beste Übereinstimmung aus den möglichen Referenzbodenprofilen [11, Teil 1 Anhang C] bietet das Referenzbodenprofil der Maasvlakte, einer künstlich aufgeschütteten Insel in den Niederlanden. Siehe auch

DEPTH (m)	TIEFE (m)
Cone Resistance q (MPa)	Spitzendruck q (MPa)
Friction Sleeve Resistance f (kPa)	Mantelreibung f (kPa)
Predrilled 1.50 m	Vorgebohrt auf 1,50 m
Terminated at 22.02 m	Festgelegt auf 22,02 m

Abbildung 8 mit der CPT am Standort der PLEM auf der linken Seite und der CPT der Maasvlakte auf der rechten Seite. Der Boden besteht bei beiden CPTs vorwiegend aus Sand. Die anderen Referenzbodenprofile bestehen aus meist bindigen Böden und sind nicht mit den Untergrundbedingungen der Ponton-Anlage vergleichbar.

  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 18 of 31

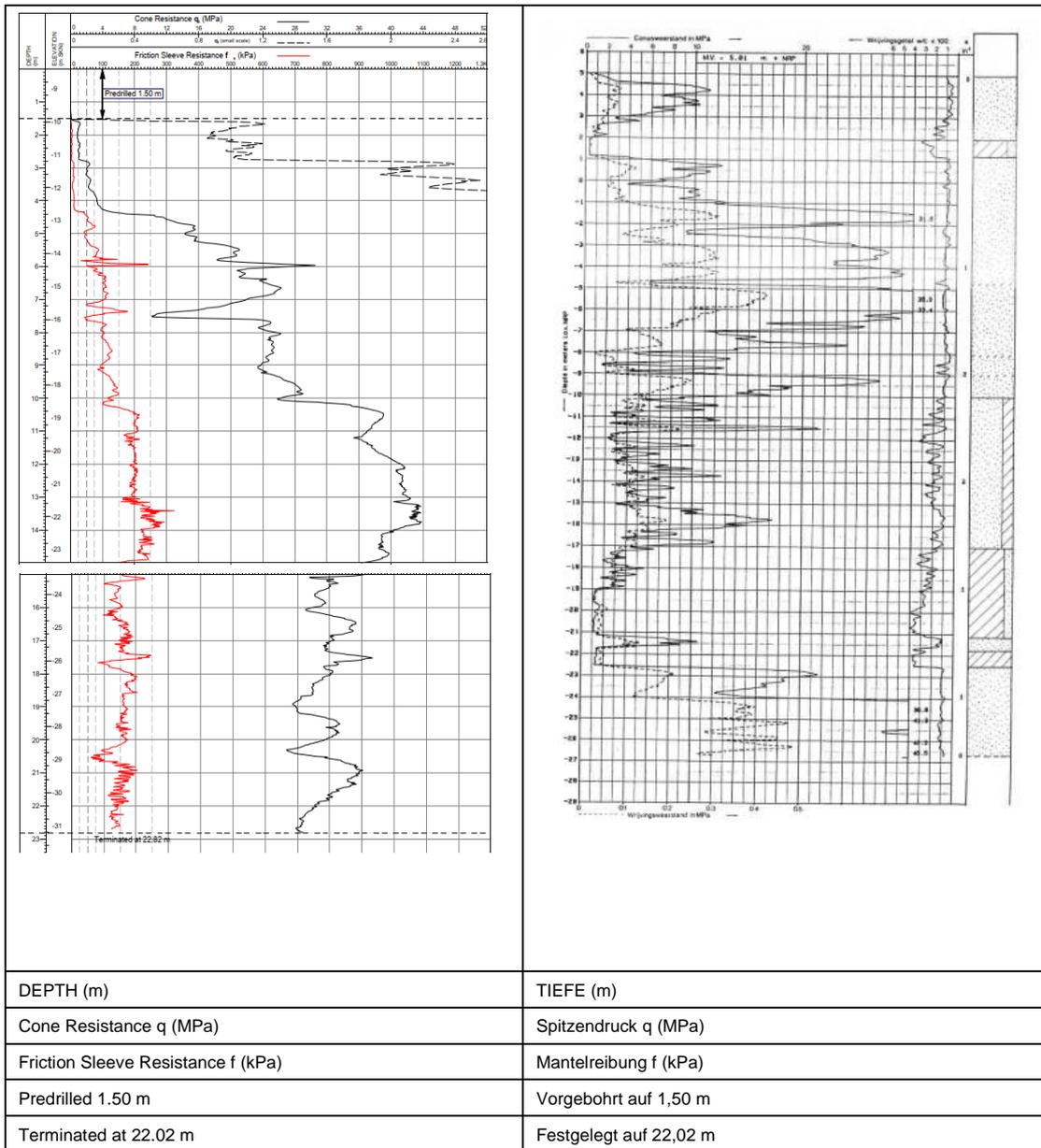


Abbildung 8 Vergleich der PLEM-CPT und des Referenzbodenprofils Maasvlakte [11]

  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 19 of 31

8.4 Referenzgeschwindigkeit und Dämpfung

In der CUR 166 [11] wurden ausgehend von den Referenzbodenprofilen die Dämpfungskonstante (a) und die Referenzschwinggeschwindigkeit (v_0) bestimmt. Die Werte für das Bodenprofil der Maasvlakte werden in Tabelle 3 angegeben. Unter den verschiedenen Referenzbodenprofilen weist das Maasvlakte-Profil die höchste Schwinggeschwindigkeit (v_0) auf, wobei dies konservativ ist.

Bodenprofil	v_0 (99 %) [mm/s]	v_0 (95 %) [mm/s]	a [m ⁻¹]
Maasvlakte	0,106	0,08	0,0

Tabelle 3: Für die Erschütterungsprognose heranzuziehende Parameter [11, Tabelle 5.20]

Zum Ermessen von Schäden an Bauwerken wird meist der in der 99%-Spalte angegebene Wert verwendet. Als Eingabe für die Kalkulationstabelle werden $v_0 = 0,106$ und $a = 0$ verwendet.

8.5 Leitfaden Erschütterungen im Bauwesen, DIN 4150

Als Leitfaden für die Beurteilung der berechneten Erschütterungen wurde die DIN 4150 [13] verwendet. Die zulässige Erschütterung in Bezug auf bautechnische Schäden an Bauwerken aus der DIN 4150 ist in

Type of structure	Gebäudeart
Vibration thresholds for structural damage, PPV (mm/s)	Schwinggeschwindigkeitsgrenzwerte vor konstruktiven Schäden, PPV (mm/s)
Short term	Kurzzeitige Erschütterungen
Long term	Dauererschütterungen
At foundation	Fundament
Uppermost floor	Oberstes Geschoss
Uppermost floor	Oberstes Geschoss
0 to 10 Hz	0 bis 10 Hz
10 to 50 Hz	10 bis 50 Hz
50 to 100 Hz	50 bis 100 Hz
All frequencies	Alle Frequenzen
All frequencies	Alle Frequenzen
Commercial/industrial	Gewerbe-/Industriebauten
20 to 40	20 bis 40
Residential	Wohngebäude
Sensitive/historic	Erschütterungsempfindlich / unter Denkmalschutz

Tabelle 4 angegeben.

	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 20 of 31

Type of structure	Vibration thresholds for structural damage, PPV (mm/s)				
	Short term			Long term	
	At foundation			Uppermost floor	Uppermost floor
	0 to 10 Hz	10 to 50 Hz	50 to 100 Hz	All frequencies	All frequencies
Commercial/industrial	20	20 to 40	40 to 50	40	10
Residential	5	5 to 15	15 to 20	15	5
Sensitive/historic	3	3 to 8	8 to 10	8	2.5

Type of structure	Gebäudeart
Vibration thresholds for structural damage, PPV (mm/s)	Schwinggeschwindigkeitsgrenzwerte vor konstruktiven Schäden, PPV (mm/s)
Short term	Kurzzeitige Erschütterungen
Long term	Dauererschütterungen
At foundation	Fundament
Uppermost floor	Oberstes Geschoss
Uppermost floor	Oberstes Geschoss
0 to 10 Hz	0 bis 10 Hz
10 to 50 Hz	10 bis 50 Hz
50 to 100 Hz	50 bis 100 Hz
All frequencies	Alle Frequenzen
All frequencies	Alle Frequenzen
Commercial/industrial	Gewerbe-/Industriebauten
20 to 40	20 bis 40
Residential	Wohngebäude
Sensitive/historic	Erschütterungsempfindlich / unter Denkmalschutz

Tabelle 4: Leitlinie bezüglich zulässiger Erschütterungen für Bauwerke [13].

Es ist zu beachten, dass es sich bei den angegebenen Werten um Schwellenwerte handelt, auf die möglicherweise zusätzliche Sicherheitsfaktoren anwendbar sind, wie sie auch in den SBR-Leitlinien verwendet werden [10]. Diese Erschütterungen wurden für Bauwerke ermittelt, und nicht für Unterwasserstrukturen. Da zwischen dem Boden und dem Bauwerk ein Verlust von Erschütterungsenergie auftritt, sind sie nicht eins zu eins vergleichbar.

Für die Definition der Leitlinien in der niederländischen *SBR Trillingsrichtlijn* [SBR-Erschütterungsleitlinie] [10] wurden Eingaben aus den DIN-Leitlinien verwendet. Die Leitlinien für zulässige Erschütterungen für Pipelines auf dem Meeresboden gemäß dieser Leitlinie sind in Anhang B dargelegt. Die typischen Grenzwerte für die Erschütterung von Pipelines sind ebenfalls in Tabelle 5 angeführt.

  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 21 of 31

Rohrmaterial	V _{kar} [mm/s]
Stahl (geschweißt)	100
Beton (Stahlbeton, Spannbeton, Stahl)	80
Mauerwerk, Kunststoff	50

Tabelle 5: Typische Grenzwerte für die Erschütterungen an Pipelines [10]

  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 22 of 31

9. BEURTEILUNG DER ERSCHÜTTERUNGEN

9.1 Auswirkungen des Monopile-Einbaus

Aus den Rammprotokollen von Monopile BD-2 nahe den Standorten der PLEM und der Pipeline wurde eine maximale Rammenergie von 1.124 kJ abgeleitet. Der Abstand zwischen der PLEM und Monopile BD-2 beträgt ca. 30 m [7].

Vor und nach dem Einbringen der Monopiles wurden bathymetrische Vermessungen durchgeführt. Es gibt keine Anhaltspunkte für eine Instabilität der Böschungen aufgrund des Einbringens der Monopiles. Folglich kann der Schluss gezogen werden, dass die Erschütterungen aufgrund der Rammung von Monopile BD-2 nicht zur Instabilität der Unterwasserböschungen im Allgemeinen oder am Standort der PLEM und der Pipeline geführt haben.

Die Auswirkungen der Erschütterungen aufgrund der Rammung der Monopiles werden gegenüber denen der Führungspfähle überwiegen, und zwar aus folgenden Gründen:

- Der Hydraulikhammer S-2000, der zum Einbringen der Monopiles verwendet wurde, hatte eine höhere Energie (1.124 kJ) als der Hammer S-150, der bei der Prognose für den Einbau der Führungspfähle verwendet wurde (130 kJ);
- Die Abmessungen und die Pfahleindringtiefe der Monopiles sind größer und tiefer als die der Führungspfähle.

  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 23 of 31

9.2 Ergebnis der Erschütterungsanalyse

Das nachstehende Diagramm enthält eine Prognose der Erschütterungen. Für diese Prognose wird eine interne Kalkulationstabelle verwendet, siehe auch Absatz 8.1. Die Eingabe in die Kalkulationstabelle ist in Anhang A angegeben.

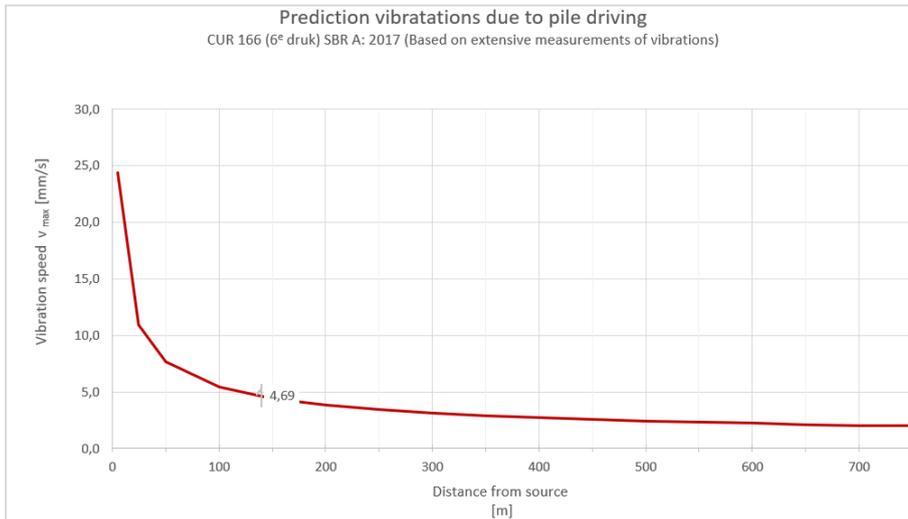
Diese Methode ist für niederländische Bodenverhältnisse und für Erschütterungen in Gebäuden anwendbar. Die Berechnung wurde für einen Stahlrohrpfahl mit einem Durchmesser von 1.500 mm durchgeführt. Die maximale Energie beträgt 150 kJ, bei einem Wirkungsgrad von 90 %. Das gewählte Referenzbodenprofil ist das der Maasvlakte (siehe Anhang C hinsichtlich der Referenzbodenprofile). Außerdem werden als Eingabe in die Kalkulationstabelle auch noch die Referenzschwingungsgeschwindigkeit $v_0 = 0,106$ und die Dämpfungskonstante $a = 0$ verwendet.

Die rote Linie in

Prediction vibrations due pile driving	Erschütterungsprognose für Pfahlrammarbeiten
CUR 166(6e druk) SBR A: 2017 (Based on extensive measurements of vibrations)	CUR 166 (6. Aufl.) SBR A: 2017 (auf Grundlage umfangreicher Erschütterungsmessungen)
Vibration speed V max [mm/s]	Schwinggeschwindigkeit Vmax [mm/s]
Distance from source [m]	Abstand zur Quelle [m]

Abbildung 9 zeigt die Prognose der Geschwindigkeit der Erschütterung als Funktion des Abstands von der Erschütterungsquelle. Die Zahl im Diagramm (5,42 mm/s) bezeichnet die Geschwindigkeit bei einem Abstand von 135 m von der Quelle – dem kleinsten Abstand zwischen der PLEM/Pipeline und den Führungspfählen.

  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 24 of 31



Prediction vibrations due pile driving	Erschütterungsprognose für Pfahlrammarbeiten
CUR 166(6 ^e druk) SBR A: 2017 (Based on extensive measurements of vibrations)	CUR 166 (6. Aufl.) SBR A: 2017 (auf Grundlage umfangreicher Erschütterungsmessungen)
Vibration speed V_{max} [mm/s]	Schwinggeschwindigkeit V_{max} [mm/s]
Distance from source [m]	Abstand zur Quelle [m]

Abbildung 9: Erschütterungen als Funktion des Abstands von der Quelle (v_{max} bei 135 m entspricht 4,69 mm/s)

Als Orientierungshilfe zur Interpretation dieser Erschütterungen wird auf DIN 4150-3:1999 verwiesen, siehe auch Absatz 8.5. Ausgehend von der Beurteilung lässt sich Folgendes feststellen:

- die Schwinggeschwindigkeit beträgt bei einem Abstand von 135 m einen Wert von 4,69 mm/s;
- der Schwinggeschwindigkeitswert ist niedriger als der Schwellenwert für Schäden an Industriebauwerken (20 mm/s) und an Kunststoff- (50 mm/s) oder Stahlrohrleitungen (100 mm/s).

Vorausgesetzt, dass die PLEM und die Pipeline ordnungsgemäß bemessen, gebaut und gewartet werden, ist nicht davon auszugehen, dass es aufgrund der Rammung der Führungspfähle an der Ponton-Anlage mit einem Hydraulikhammer S-150 zu Schäden kommen wird.

  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 25 of 31

10. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Ausgehend von der großen Differenz zwischen den zulässigen und den berechneten Erschütterungen kann der Schluss gezogen werden, dass die Energie des IQIP-Hydraulikhammers S-150, der zum Einbringen der Führungspfähle verwendet wird, die PLEM oder die Pipeline nicht beschädigen wird. Die Beurteilung der Erschütterungen wurde mit der Kalkulationstabelle *Trillingspredictie heien* (Erschütterungsprognose Pfahlrammung) durchgeführt, die auf die niederländische CUR 166 [11] gestützt ist. Die für diese Beurteilung verwendeten Eingaben wurden aus der Rammstudie für die Führungspfähle [3], der verfügbaren Baugrunduntersuchung [4], dem Abstand zwischen der PLEM/Pipeline und den Führungspfählen [7] und den Leitlinien [10, 11, 12, 13] abgeleitet.

Da die Monopiles bereits alle eingebracht wurden, liegen die vor und nach der Pfahlrammung durchgeführten bathymetrischen Vermessungen vor. Eine mögliche Instabilität der Unterwasserböschungen (aufgrund von Verflüssigung) wurde anhand eines Vergleichs der vor und nach der Einbringung der Monopiles durchgeführten Vermessungen beurteilt. Ausgehend von den Rammprotokollen [6] wurde für die Rammung der Monopiles, die der PLEM/Pipeline am nächsten liegen, eine maximale Rammenergie von 1.124 kJ ermittelt. Es gibt keine Hinweise darauf, dass durch die Erschütterungen aufgrund der maximalen Hammerenergie von 1.124 kJ, die während der Pfahlrammung zu BD-2 am Standort der PLEM und der Pipeline aufgezeichnet wurde, eine Instabilität der Böschungen eingetreten wäre.

Die maximale Energie, die in der Rammbarkeitsuntersuchung für die Führungspfähle ermittelt wurde, beträgt 130 kJ [3]. Dies ist deutlich geringer als die maximale Energie von 1.124 kJ, sodass eine Instabilität der Unterwasserböschungen durch das Einbringen der Führungspfähle unwahrscheinlich ist. Die prognostizierte Schwinggeschwindigkeit an der Quelle beträgt 4,69 mm/s bei der kürzesten Entfernung (135 m) zwischen der PLEM/Pipeline und den Führungspfählen. Dies liegt deutlich unter den Schwellenwerten der Schwinggeschwindigkeit für Schäden an Industriebauwerken (20 mm/s) und Kunststoffrohrleitungen (50 mm/s) [10,13].

Vorausgesetzt, dass die PLEM und die Pipeline ordnungsgemäß bemessen, gebaut und gewartet werden, ist nicht davon auszugehen, dass es aufgrund der Rammung der Führungspfähle an der Ponton-Anlage mit einem Hydraulikhammer S-150 zu Schäden kommen wird. Es ist zu beachten, dass die Informationen über die PLEM/Pipeline sich auf den Standort in der Draufsicht [7] beschränken. Hinsichtlich der Abmessungen, der baulichen Aspekte und des Fundaments der PLEM/Pipeline wurden keine Informationen zur Verfügung gestellt. Die strukturelle Integrität der PLEM/Pipeline wurde nicht berücksichtigt.

  	Structuur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Willemshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 26 of 31

Anhang A

Eingabe Kalkulationstabelle Erschütterungsprognose

 BAM Infraconsult bv		Trillingspredictie heien <u>Toegepaste normen, richtlijnen en literatuur:</u> - SBR Trillingsrichtlijn Deel A 2017 - Schade aan Bouwwerken - SBR Trillingen Deel B 2002 - Hinder voor personen in gebouwen - CUR-publicatie 166, 6e druk, deel 1 Auteur BVP - CUR-publicatie 166, 6e druk, deel 2 Revisie 2.03 - CUR 1995-2 Prognosemodel Trillingshinder Datum jun-21	
Project	Willemshaven	Datum	7-2-2024
Projectnr.			
Onderdeel	Vibrations due to pile driving D=1500mm open steel piles with S-150 hammer		
Adviseur	MBO		
GEGEVENS PAAL			
Schachtvorm	buis open	[]	
Diameter	Ø 1,5	[m]	
GEGEVENS HEIWERK			
Trillingstype	herhaald kortdurend		(SBR Deel A 2017, tabel 10.4)
Dominante frequentie	15	[Hz]	
Veiligheidsfactor	γ_t 1,5		(SBR Deel A 2017, tabel 10,6)
Maximale energie Heiblok	E_{pot} 150	[kJm]	
Reductie op potentiële energie	90	[%]	
Uitgeoefende energie	135	[kJm]	
TRILLINGSSNELHEID VOLGENS CUR 166 PAR. 5.8			
Bepaling referentie trillingsnelheid volgens	Maasvlakte		(CUR166 tabel 5.20 pag 567)
Ref. trillingsnelheid op 5 m afstand (verwachtingswaarde)	$V_{0, gem}$ 0,040	[mm/s]	
Overschrijdingskans Trillingsnelheid	1	[%]	
Veiligheidsfactor (spreiding)	2,65		(CUR166 3e druk)
Ref. trillingsnelheid op 5 m afstand (bovengrens)	V_0 0,11	[mm/s]	(CUR166 tabel 5.20 pag 567)
Trillingsintensiteit	V_{cor} 34,83	[mm/s]	(CUR166 art. 5.8.3)
Dempingsconstante	α 0,00	[m ⁻¹]	(CUR166 tabel 5.20 pag 567) (Mg CUR)

Trillingspredictie heien	Erschütterungsprognose Pfahlrammung
Toegepaste normen, richtlijnen en literatuur.	Angewandte Normen, Richtlinien und Literatur.
-SBR Trillingsrichtlijn Deel A 2017 - Schade aan Bouwwerken	- SBR Trillingsrichtlijn Deel A 2017 – Schade aan Bouwwerken [SBR-Erschütterungsleitlinie Teil A 2017 – Schäden an Bauwerken]
-SBR Trillingen Deel B 2002-H indervoor personen in gebouwen	- SBR Trillingen Deel B 2002-H – Hinder voor personen in gebouwen [SBR-Erschütterungsleitlinie Teil B 2002-H – Beeinträchtigung von Personen in Gebäuden]
-CU R-publicatie 166, 6e druk.deel 1 Auteur BVP	- CUR-Publikation 166, 6. Auflage, Teil 1 Verfasst von BVP
-CU R-publicatie 166, 6e druk.deel 2 Revisie 2.03	- CUR-Publikation 166, 6. Auflage, Teil 2 Revisionsnr. 2.03
-CU R 1995-2 Prognosemodel Trillingshinder Datum jun-21	- CUR 1995-2, Prognosemodel Trillingshinder [Prognosemodell Beeinträchtigung durch Rammarbeiten] Datum 21. Juni
Project Willemshaven	Projekt Willemshaven
Projectnr. Datum 1-2-2024	Projekt-Nr. Datum 01.02.2024
Onderdeel Vibrations due to pile driving D=1500mm open steel piles with S-150 hammer	Abschnitt Erschütterungen aufgrund von Rammarbeiten D = 1.500 mm Stahlrohrpfähle mit Hammer S-150
Adviseur MBO	Berater MBO
GEGEVENS PAAL	PFAHLDATEN
Schachtvorm	Schafform
Diameter	Durchmesser
buis open	Rohrpfahl

  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 27 of 31

GEGEVENS HEIWERK	RAMMDATEN
Trillingstype	Rammtyp
Dominante tequentie	Maßgebende Frequenz
Veiligheidsfactor	Sicherheitsbeiwert
Maxmale energie Heiblok	Max. Energie Rammblock
Redudie op potentiele energie	Reduzierung der potenziellen Energie
Uitgeoefende energie	Aufgewandte Energie
herhaald kortdurend	wiederholt kurzzeitig
(SBR Deel A2017,tabel 10.4)	(SBR Teil A 2017, Tabelle 10.4)
(SBR Deel A2017,tabel 10,6)	(SBR Teil A 2017, Tabelle 10.6)
TRILUNGSSNELHEID VOLGENS CUR 166 PAR. 5.8.	SCHWINGGESCHWINDIGKEIT GEMÄSS CUR 166 ABSCHNITT 5.8
Bepaling referentie trillingssnelheid volgens	Referenzwert der Schwinggeschwindigkeit von
Ref.trillingssnelheid op 5 m afctand (verwachtingsvaarde)	(erwartbare) Ref.-Schwinggeschwindigkeit in 5 m Abstand
Overschrijdingskans Trillingssnelheid	Überschreitungswahrscheinlichkeit Schwinggeschwindigkeit
Veiligheidsfactor(spreiding)	Sicherheitsbeiwert (Verteilung)
Ref.trillingssnelheid op 5 m afctand (bovengrens)	Ref.-Schwinggeschwindigkeit in 5 m Abstand (oberer Grenzwert)
Trillingsintensiteit	Erschütterungsintensität
Dempingsconstante	Dämpfungskonstante
(CU R166 tabel 5.20 pag 567)	(CUR 166, Tabelle 5.20, S. 567)
(CUR166 e druk)	(CUR 166, 3. Aufl.)
(CU R166 tabel 5.20 pag 567)	(CUR 166, Tabelle 5.20, S. 567)
(CUR166 art. 5.8.3)	(CUR 166, Artikel 5.8.3)
(CUR166 tabel 5.20 pag 567) (VLg CUR)	(CUR 166, Tabelle 5.20, S. 567) (gemäß CUR)

	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 28 of 31

Anhang B Erschütterungsrichtwerte für Pipelines

Die typischen Grenzwerte V_{kar} für Pipelines sind in Tabelle B4.1 enthalten [10]. Zur Bestimmung des Bemessungswerts des Grenzwerts V_r ist der Sicherheitsfaktor g_t für die jeweilige Erschütterungsart anzuwenden.

Type buisleiding	V_{kar} (mm/s)
Staal (gelast)	100
Beton, gewapend beton, voorgespannen beton, staal	80
Metselwerk, kunststof	50

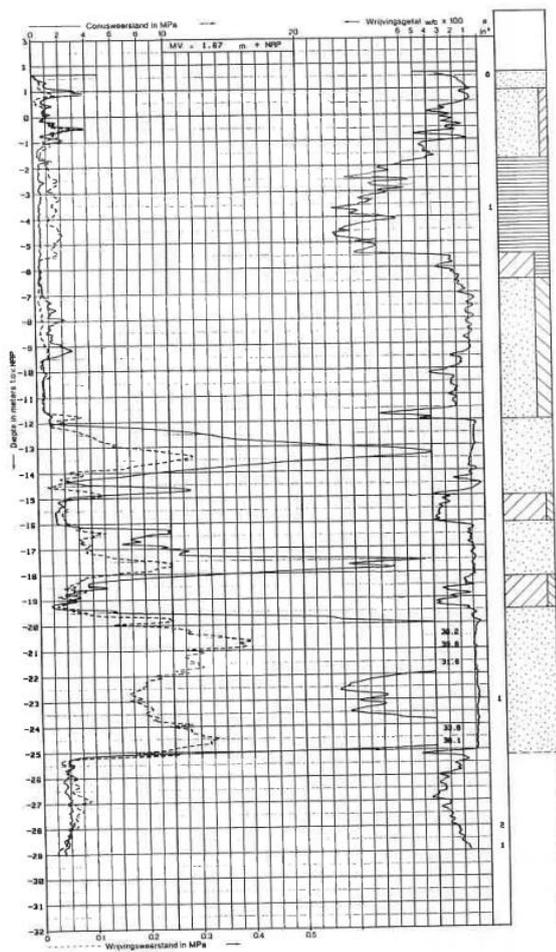
Type buisleiding	Rohrmaterial
Staal (gelast)	Stahl (geschweißt)
Beton, gewapend beton, voorgespannen beton, staal	Beton (Stahlbeton, Spannbeton, Stahl)
Metselwerk, kunststof	Mauerwerk, Kunststoff
V_{kar} (mm/s)	V_{kar} (mm/s)

Tabelle B4.1 Typische Grenzwerte für die Erschütterung von Pipelines [10]

  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 29 of 31

Anhang C Verfügbare Bodenprofile gemäß CUR 166

Typische Drucksondierung: Amsterdam

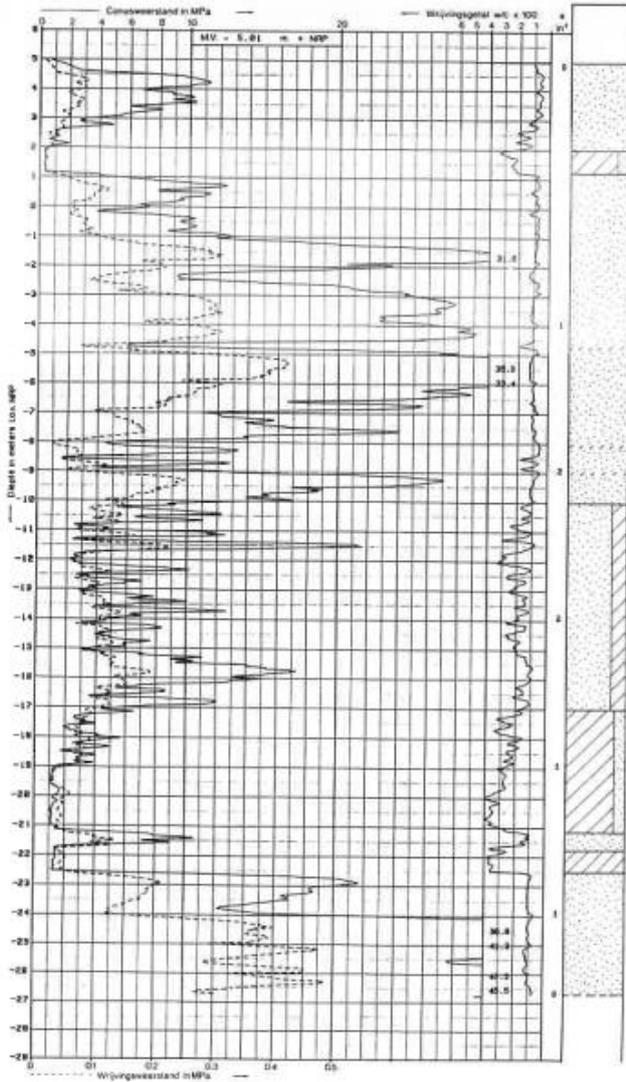


Sondering Amsterdam.

Sondering Amsterdam.	Drucksondierung Amsterdam.
----------------------	----------------------------

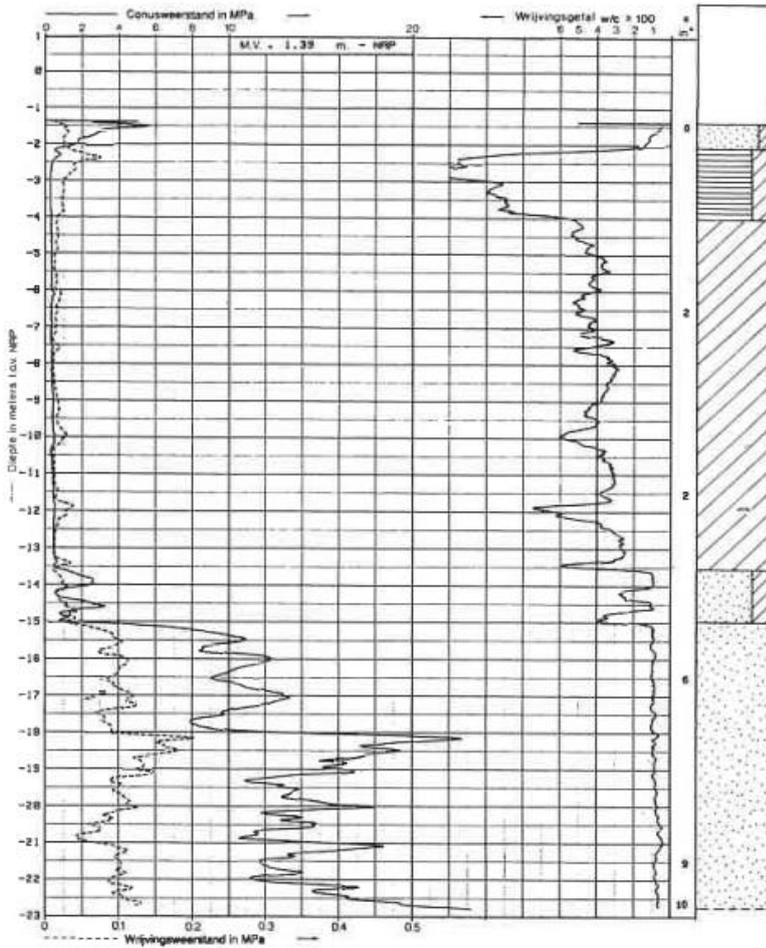
  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 30 of 31

Typische Drucksondierung: Maasvlakte



  	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FRSU: Ponton-Anlage – Beurteilung der Erschütterungen durch die Pfahlrammarbeiten	Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2204_00
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Page 31 of 31

Typische Drucksondierung: Rotterdam



Sondering Rotterdam.

Sondering Amsterdam.	Drucksondierung Amsterdam.
----------------------	----------------------------