












| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Seite 1 of 83 |





Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage

| | | | | | | |
|---------------|----------------|--------------|---|---|--|------------------|
| Erste Ausgabe | 00 | 20/02/2024 | S. Berdenis van Berlekom  | E. Meyer  | J. de Groot  | |
| Status | Ausgabe | Datum | Erstellt von | Geprüft von | Genehmigt von | Anmerkung |





| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 2 of 83 |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1. | Einleitung | 4 |
| 2. | Literatur | 5 |
| 3. | Abkürzungen..... | 7 |
| 4. | Zeichen | 8 |
| 5. | Beschreibung des Bauwerks | 9 |
| 6. | Allgemeine Ausgangspunkte | 10 |
| 6.1 | Bemessungslebensdauer | 10 |
| 6.2 | Aufprallstärken | 10 |
| 6.3 | Normen | 10 |
| 6.4 | Schadensfolgeklasse | 10 |
| 6.5 | Bemessungskonzept | 11 |
| 6.6 | Stahl | 12 |
| 6.7 | Korrosion | 13 |
| 7. | Einwirkungen | 14 |
| 7.1 | Wellen, Wind und Strömung..... | 14 |
| 7.2 | Geotechnische Einwirkungen..... | 22 |
| 8. | Modellierung | 23 |
| 8.1 | Bestimmung der Pfahlreaktionskräfte | 23 |
| 8.2 | Bestimmung der Kräfte im Pfahlinneren | 27 |
| 8.3 | Pfahltiefe..... | 29 |
| 8.4 | Pfahlbemessungsnachweise..... | 31 |
| 8.4.1 | Abschnittsprüfung im Grenzzustand STR/GEO | 31 |
| 8.4.1 | SLS-Nachweis der Pfahleinspannung und ULS-Nachweis der Pfahlstabilität..... | 51 |
| 8.4.2 | Grenzzustand der Ermüdung | 57 |

| | | |
|--|---|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 3 of 83 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 8.4.3 | Eiseinwirkung | 64 |
| 9. | Ergebnisse | 66 |
| 9.1 | STR/GEO-Ergebnisse und Grenzzustand der Ermüdung | 66 |
| 9.2 | Zusätzliche Analysen | 67 |
| 9.2.1 | Innerer Reibungswinkel $\phi = 32,5^\circ$ (NieChar) für Schicht L5 | 68 |
| 9.2.2 | STR/GEO-Grenzzustandsprüfung bei Niedrigwasser | 68 |
| 9.2.3 | Nachweis des Grenzzustands der Ermüdung bei Niedrigwasser | 69 |
| 9.2.4 | Effekt zweiter Ordnung aufgrund der Axialkraft | 71 |
| 9.2.5 | Gruppenwirkung | 72 |
| | Anhang A Ausgabe DMC-BLUM-Tabellenblatt | 75 |
| | Anhang B Ponton-Bewegungen..... | 76 |
| | Anhang C Geotechnische Parameter | 78 |
| | Anhang C Beziehung Wiederkehrintervall, Wahrscheinlichkeit und Bemessungslebensdauer | 81 |

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 4 of 83 |

1. EINLEITUNG

Für die FSRU Wilhelmshaven wird eine Not-Anlegestelle für den Evakuierungsfall benötigt. Sie muss zur Evakuierung des Personals zur Verfügung stehen, wenn die FSRU sich an der Anlegestelle befindet. Dieses Bauwerk besteht aus einem Ponton, der von 12 Pfählen gestützt wird und über eine Gangway von MD6 zugänglich sein soll.

Der Zweck des Pontons besteht darin, den Zugang unter normalen/betriebsüblichen Bedingungen und bei Notfällen (Zugang sowohl z. B. für die Feuerwehr als auch zum Ablegen durch die FSRU-Crew) zu ermöglichen.

Ziel dieses Hinweises zur technischen Bemessung (Technical Design Note) ist die Konzeption der Führungspfähle der Ponton-Anlage.

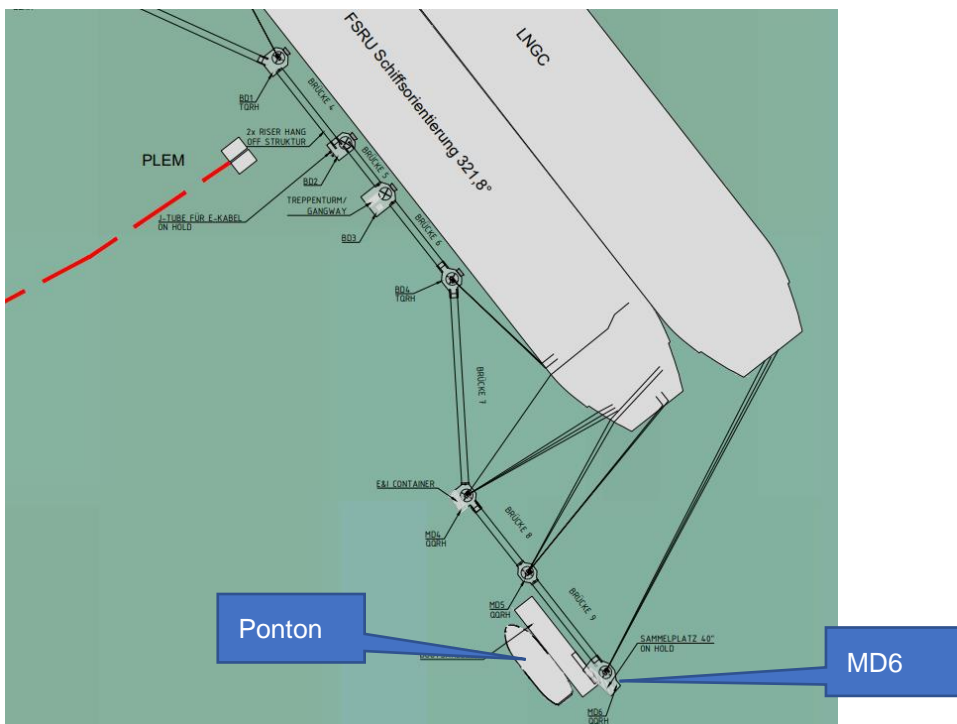










Abbildung 1 Südöstlicher Teil der FSRU-Vertäuungsanlage mit Ponton-Anlage zwischen MD4 und MD6





| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 5 of 83 |

2. LITERATUR

- [1] Bemessungsgrundlage Wilhelmshaven Schwimm-Ponton (BoD Wilhelmshaven Floating pontoon)
- [2] DMC-230704-M-00019-MP Ponton-Bewegungsanalyse
- [3] EN-1990 Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung. DS-EN 1990, Dezember 2011.
- [4] EN-1991 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke. DS-EN 1991, Dezember 2011.
- [5] EN-1993-1-1 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau DS-EN 1993, Dezember 2016.
- [6] EN-1993-5 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 5: Pfähle und Spundwände, Februar 2008
- [7] EN-1993-1-6 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-6: Allgemein – Festigkeit und Stabilität von Schalen
- [8] EN-1993-1-9 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung
- [9] EN-1997-1 Eurocode 7: Geotechnische Bemessung – Teil 1: Allgemeine Regeln
- [10] NEN 9997-1 Niederländische Norm: Geotechnische Bemessung von Bauten – Teil 1: Allgemeine Regeln
- [11] NEN-EN 10025-2 Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen – Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle
- [12] NEN-EN 10025-3 Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen – Teil 3: Technische Lieferbedingungen für normalgeglühte/normalisierend gewalzte Feinkornbaustähle
- [13] DNV-OS-C101, Design of offshore steel structures general (LRFD method) (Allgemeine Bemessung von Offshore-Bauwerken aus Stahl (LRFD-Verfahren)), Oktober 2008.
- [14] DNV-RP-C203 Fatigue design of offshore steel structures (Bemessung der Ermüdung von Offshore-Bauwerken aus Stahl), Geänderte Fassung September 2021.
- [15] DNV-OS-C401 Rules and standards for offshore units (Regeln und Normen für Offshore-Einheiten), Juli 2023.
- [16] Geotechnischer Bericht. Teilprojekt: Bootsanleger (Ponton) Nr. 23A012.00.00 Rev.0.0 12. Dezember 2023, Anlage 3 Rechnerische Bodenprofile für erdstatische Berechnungen.
- [17] Ergebnisse der in Aug/Sept 2023 ausgeführten CPT-Drucksondierungen und der Bohrung BH1 (Bohrprofil, Sondierdiagramme, CPT-ASCII-Daten), LANKELMA, bereitgestellt durch IMDC, 12.09.2023
- [18] DIN 4085:2017-8 Baugrund – Berechnung des Erddrucks
- [19] Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Hafen und Wasserstraßen (EAU 2022) 12.2.5.2 Ansatz nach Blum
- [20] Vergleichsberechnungen zur Dalbenbemessung nach Blum und mit der p-y-Methode, Christina Rudolph et al. Fachthemen DOI: 10.1002/gete.201100006

| | | |
|--|---|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 6 of 83 |





- [21] SBRCURnet Publication C206 Flexible Dolphins Committee (Ausschuss zu flexiblen Dalben) 1720
- [22] SBRCURnet Publication 211E Quay walls (Kajenwände) Zweite Ausgabe
- [23] Accelerated Low Water Corrosion – Report of Working Group 44 of the Maritime Navigation Commission (Beschleunigte Korrosion bei Niedrigwasser – Bericht von Arbeitsgruppe 44 der Seeschiffahrtskommission) PIANC
- [24] Shore Protection Manual (Handbuch zum Küstenschutz) DEPARTMENT OF THE ARMY Waterways Experiment Station, US Corps of Engineers.
- [25] Einspannungsverhältnisse bei Bohlwerken H. Blum Berlin 1931

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 7 of 83 |

3. ABKÜRZUNGEN



| Abkürzung | Definition |
|-----------|--|
| EEB | Not-Anlegestelle für den Evakuierungsfall (Emergency Evacuation Berth) |
| SKN* | Seekartennull |
| ALS | Außergewöhnlicher Grenzzustand (Accidental Limit State) |
| ULS | Grenzzustand der Tragfähigkeit (Ultimate Limit State) |
| SLS | Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (Serviceability Limit State) |
| FLS | Grenzzustand der Ermüdung (Fatigue Limit State) |
| DFF | Bemessungsspezifischer Ermüdungsgrad (Fatigue Damage Factor) |
| BD | Grundaufbau (Basic Design) |
| BoD | Bemessungsgrundlage (Basis of Design) |
| CC2 | Schadensfolgeklasse 2 (Consequence Class 2) |
| CC3 | Schadensfolgeklasse 3 (Consequence Class 3) |
| CPT | Drucksondierung (Cone Penetration Test) |
| DA | Bemessungskonzept (Design Approach) |
| DD | Ausführungsplanung (Detailed Design) |
| FEM | Finite-Elemente-Methode (Finite Element Method) |
| MBL | Mittlere Bruchlast (Mean Breaking Load) |
| SWL | Traglast (Safe Working Load) |
| UC | Einheitsnachweis (Unity Check) |
| SBL | Meeresbodenhöhe (Sea Bed Level) |
| COG | Schwerpunkt (Center of Gravity) |
| HW | Hochwasser |
| LW | Niedrigwasser (Low Water) |
| TDN | Hinweis zur technischen Bemessung (Technical Design Note) |

* 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: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 8 of 83 |

4. ZEICHEN

| | |
|----------------|---|
| γ_E | Beiwert für den Einfluss einer Einwirkung |
| γ_F | Beiwert für eine Einwirkung |
| γ_G | Beiwert für eine Dauereinwirkung |
| $\gamma_{R,e}$ | Beiwert für den Erdwiderstand |
| γ_Q | Beiwert für eine veränderliche Einwirkung |
| T | Tiefe [m] |
| B | Breite [m] |
| L | Länge [m] |
| D | Pfahldurchmesser [mm] |
| t | Wanddicke [mm] |

| | | |
|---|--|---|
|  | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 9 of 83 |

5. BESCHREIBUNG DES BAUWERKS

Abbildung 2 zeigt eine Draufsicht der Anlegestelle für den Zugang. Die Anlegestelle besteht aus folgenden Elementen:

- 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.
- 12 Führungspfähle $D \times t = 1.500 \times 50 \text{ mm}$ mit $L = 44 \text{ m}$
- Gangway von rund 40 m vom Vertäudalben MD6 auf den Ponton

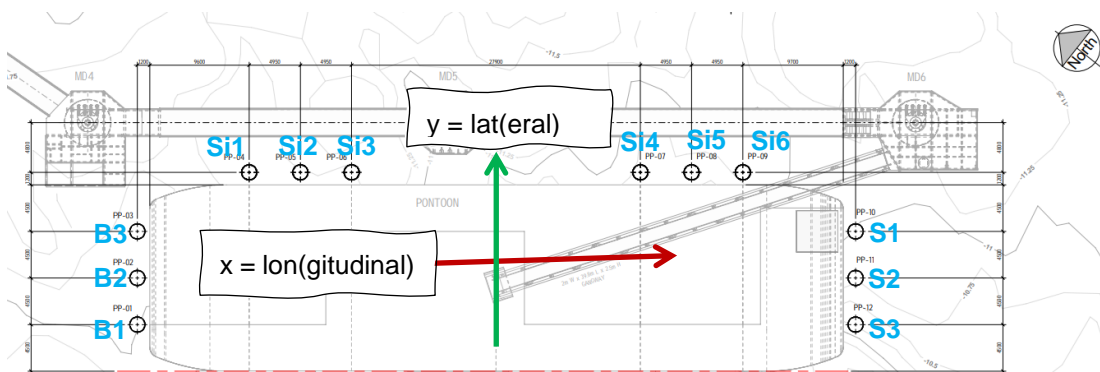


Abbildung 2 Schematische Draufsicht der Anlegestelle für den Zugang, B = Bug, S = Heck, Si = Seite

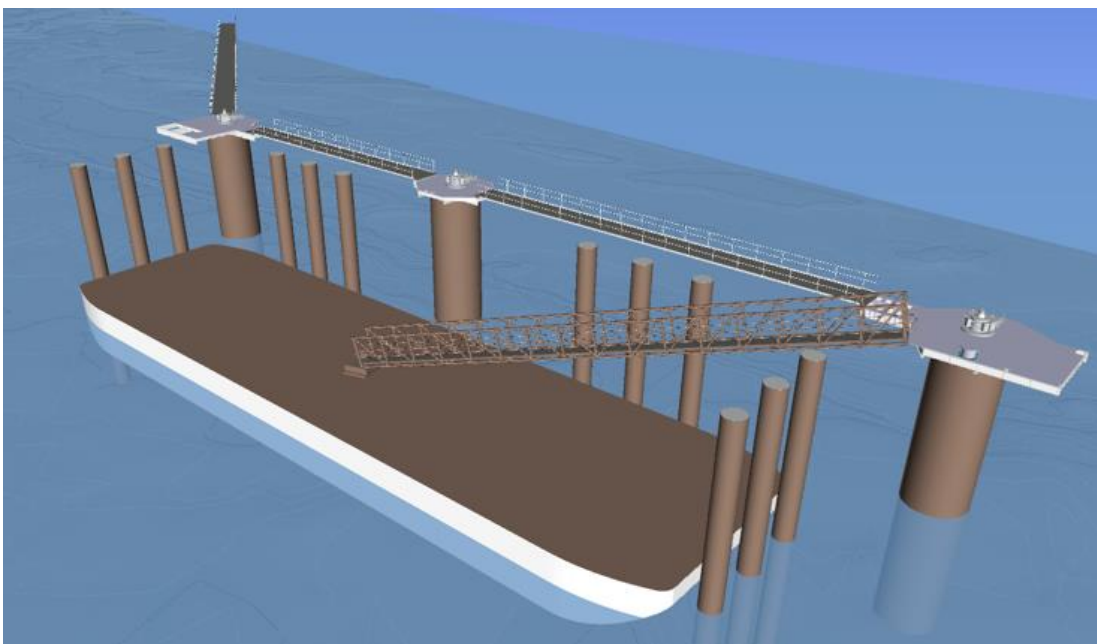






Abbildung 3 3D-Entwurf der Ponton-Anlage

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 10 of 83 |

6. ALLGEMEINE AUSGANGSPUNKTE

6.1 Bemessungslebensdauer

Nach [1] beträgt die Bemessungslebensdauer 10 Jahre.

6.2 Aufprallstärken

Der Ponton überträgt die Vertäukräfte ungefähr auf der Höhe des Decks. Folgende Aufprallstärken wurden berücksichtigt:

| 1/T | Starker Aufprall (maximale Umsetzungen) | Schwacher Aufprall (maximale Kraft) |
|-------|---|-------------------------------------|
| 1/10 | $6,40 + 2,20 = 8,60 \text{ m}$ | $-0,71 + 2,20 = 1,49 \text{ m}$ |
| 1/100 | $7,16 + 2,20 = 9,36 \text{ m}$ | $-1,03 + 2,20 = 1,17 \text{ m}$ |



Tabelle 1 Extremwasserstände bei Bedingungen mit einer Jährlichkeit von 1/10 und 1/100 (siehe auch [1])

6.3 Normen

Die Bemessung der Pfähle wird, nach den EAU [19] in Verbindung mit den Eurocodes, mit dem deutschen NA erfolgen. Siehe auch [1]. Gegebenenfalls wurden andere Normen herangezogen, etwa diejenigen der DNV.

6.4 Schadensfolgeklasse

Die EAU-Empfehlungen sprechen nicht ausdrücklich von Schadensfolgeklassen. Die in ihnen benannten Sicherheitsbeiwerte und Materialfaktoren, die für die Bemessung zu verwenden sind, stehen jedoch im Einklang mit Schadensfolgeklasse 2. Siehe auch [1].

| | | |
|---|--|---|
|  | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 11 of 83 |

6.5 Bemessungskonzept

2.4.7.3.4.3 Design Approach 2

(1)P It shall be verified that a limit state of rupture or excessive deformation will not occur with the following combination of sets of partial factors:

Combination: A1 "+" M1 "+" R2

NOTE 1 In this approach, partial factors are applied to actions or to the effects of actions and to ground resistances.





NOTE 2 If this approach is used for slope and overall stability analyses the resulting effect of the actions on the failure surface is multiplied by γ_E and the shear resistance along the failure surface is divided by $\gamma_{R,e}$.

| 2.4.7.3.4.3 Design Approach 2 | 2.4.7.3.4.3 Bemessungskonzept 2 |
|---|---|
| (1)P It shall be verified that a limit state of rupture or excessive deformation will not occur with the following combination of sets of partial factors: | (1)P Es ist Folgendes nachzuweisen: Bei der folgenden Kombination von Beiwerten tritt kein Grenzzustand des Bruchs oder der übermäßigen Verformung ein. |
| Combination: A1 "+" M1 "+" R2 | Kombination: A1 „+“ M1 „+“ R2 |
| NOTE 1 In this approach, partial factors are applied to actions or to the effects of actions and to ground resistances. | HINWEIS 1 Bei diesem Ansatz werden Beiwerte auf Einwirkungen bzw. deren Auswirkungen sowie auf Erdwiderstände angewendet. |
| NOTE 2 If this approach is used for slope and overall stability analyses the resulting effect of the actions on the failure surface is multiplied by and the shear resistance along the failure surface is divided by $\gamma_{R,e}$. | HINWEIS 2 Falls dieser Ansatz bei Böschungs- und Gesamtstabilitätsanalysen zum Einsatz kommt, wird die resultierende Auswirkung der Einwirkungen auf die Bruchfläche mit γ_E multipliziert; ebenso wird der Schubwiderstand entlang der Bruchfläche durch $\gamma_{R,e}$ dividiert. |

Tab. 12.1 Teilsicherheitsbeiwerte für den Nachweis der Grenztragfähigkeit von Dalben.

| | Einwirkungen | Widerstände Boden | Stahl |
|--|--------------|-------------------|------------|
| | γ_Q | $\gamma_{R,e}$ | γ_M |
| Lasten aus Anlegemanövern | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Vertäukräfte (Trossenzug) und Anlehnkräfte | 1,20 | 1,15 | 1,10 |
| Kräfte aus Wellen, Wind und Strömung | 1,20 | 1,15 | 1,10 |
| Eislasten (siehe auch Abschn. 4.12) | 1,00 | 1,10 | 1,10 |

Abbildung 4 Tabelle 12.1 aus Ref. [19]





| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 12 of 83 |

6.6 Stahl

| Designation | | Minimum yield strength R_{eH}^a | | | | | | | | |
|---------------------|--------------|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | MPa | | | | | | | | |
| | | Nominal thickness | | | | | | | | |
| | | mm | | | | | | | | |
| Steel name | Steel number | ≤ 16 | > 16 ≤ 40 | > 40 ≤ 63 | > 63 ≤ 80 | > 80 ≤ 100 | > 100 ≤ 150 | > 150 ≤ 200 | > 200 ≤ 250 | > 250 ≤ 400 |
| S235JR | 1.0038 | 235 | 225 | 215 | 215 | 215 | 195 | 185 | 175 | 165 |
| S235J0 | 1.0114 | | | | | | | | | |
| S235J2 | 1.0117 | | | | | | | | | |
| S275JR | 1.0044 | 275 | 265 | 255 | 245 | 235 | 225 | 215 | 205 | 195 |
| S275J0 | 1.0143 | | | | | | | | | |
| S275J2 | 1.0145 | | | | | | | | | |
| S355JR | 1.0045 | 355 | 345 | 335 | 325 | 315 | 295 | 285 | 275 | 265 |
| S355J0 | 1.0553 | | | | | | | | | |
| S355J2 | 1.0577 | | | | | | | | | |
| S355K2 | 1.0596 | | | | | | | | | |
| S460JR ^b | 1.0507 | 460 | 440 | 420 | 400 | 390 | 390 | - | - | - |
| S460J0 ^b | 1.0538 | | | | | | | | | |
| S460J2 ^b | 1.0552 | | | | | | | | | |
| S460K2 ^b | 1.0581 | | | | | | | | | |
| S500J0 ^b | 1.0502 | 500 | 480 | 460 | 450 | 450 | 450 | - | - | - |

| | |
|-----------------------------------|------------------------------|
| Designation | Bezeichnung |
| Steel name | Stahlbez. |
| Steel number | Stahl-Nr. |
| Minimum yield strength R_{eH}^a | Min. Streckgrenze R_{eH}^a |
| MPa | MPa |
| Nominal Thickness | Nennstärke |

Abbildung 5 Tabelle 6 Mechanische Eigenschaften aus Ref. [11]

| | | |
|---|--|---|
|  | Struktur |  |
|   | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | | Page 13 of 83 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | |





| Designation | | Minimum yield strength R_{eH}^a MPa Nominal thickness mm | | | | | | | |
|-------------|--------------|---|-------------|-------------|--------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| Steel name | Steel number | ≤ 16 | >16 ≤ 40 | >40 ≤ 63 | > 63 ≤ 80 | > 80 ≤ 100 | > 100 ≤ 150 | > 150 ≤ 200 | > 200 ≤ 250 |
| S275N | 1.0490 | 275 | 265 | 255 | 245 | 235 | 225 | 215 | 205 |
| S275NL | 1.0491 | | | | | | | | |
| S355N | 1.0545 | 355 | 345 | 335 | 325 | 315 | 295 | 285 | 275 |
| S355NL | 1.0546 | | | | | | | | |
| S420N | 1.8902 | 420 | 400 | 390 | 370 | 360 | 340 | 330 | 320 |
| S420NL | 1.8912 | | | | | | | | |
| S460N | 1.8901 | 460 | 440 | 430 | 410 | 400 | 380 | 370 | 370 |
| S460NL | 1.8903 | | | | | | | | |

| | |
|-----------------------------------|------------------------------|
| Designation | Bezeichnung |
| Steel name | Stahlbez. |
| Steel number | Stahl-Nr. |
| Minimum yield strength R_{eH}^a | Min. Streckgrenze R_{eH}^a |
| MPa | MPa |
| Nominal Thickness | Nenn Dicke |

Abbildung 6 Tabelle 4 Mechanische Eigenschaften aus Ref. [12]

6.7 Korrosion

Korrosionszuschlag gemäß [1].

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 14 of 83 |

7. EINWIRKUNGEN





7.1 Wellen, Wind und Strömung

Der Seegang wurde mit der Software Ansys AQWA bei verschiedenen Wiederkehrintervallen analysiert. Ansys AQWA bestimmt die Kräfte auf den Rumpf des in das Wasser eingetauchten Teils des Pontons nach der linearen Wellentheorie. Nähere Einzelheiten siehe Ref. [2].

Die direkten Wellen- und Strömungskräfte, die auf die Pfähle einwirken, sind in diesem Modell jedoch nicht enthalten. Zur Bestimmung der Wellen- und Strömungskräfte auf die Pfähle wurde eine Methode ausgewählt, die eine Vereinfachung der Morison-Gleichung darstellt. Siehe Abbildung 7 und

| | |
|---|---|
| F_{max} | F_{max} |
| M_{max} | M_{max} |
| where: | wobei Folgendes gilt: |
| C_I [-] = inertia coefficient $\approx 2,0$ | C_I [-] = Trägheitskoeffizient $\approx 2,0$ |
| C_D [-] = drag coefficient (for small flow velocities $C_D \approx 1,2$, see Section 20.3) | C_D [-] = Strömungswiderstandskoeffizient (bei geringen Fließgeschwindigkeiten $C_D \approx 1, 2$, siehe Abschnitt 20.3) |
| K_I [-] = correction for extent of inertia force | K_I [-] = Korrekturfaktor für Trägheitskraftmaß |
| K_D [-] = correction for extent of drag force | K_D [-] = Korrekturfaktor für Strömungswiderstandsmaß |
| S_I [-] = correction for position of resultant inertia force | S_I [-] = Korrekturfaktor für Position der resultierenden Trägheitskraft |
| S_D [-] = correction for position of resultant drag force | S_D [-] = Korrekturfaktor für Position der resultierenden Strömungswiderstandskraft |
| H [m] = wave height | H [m] = Wellenhöhe |
| D [m] = diameter pile | D [m] = Pfahldurchmesser |
| d [m] = depth | d [m] = Tiefe |

Abbildung 8.

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 15 of 83 |

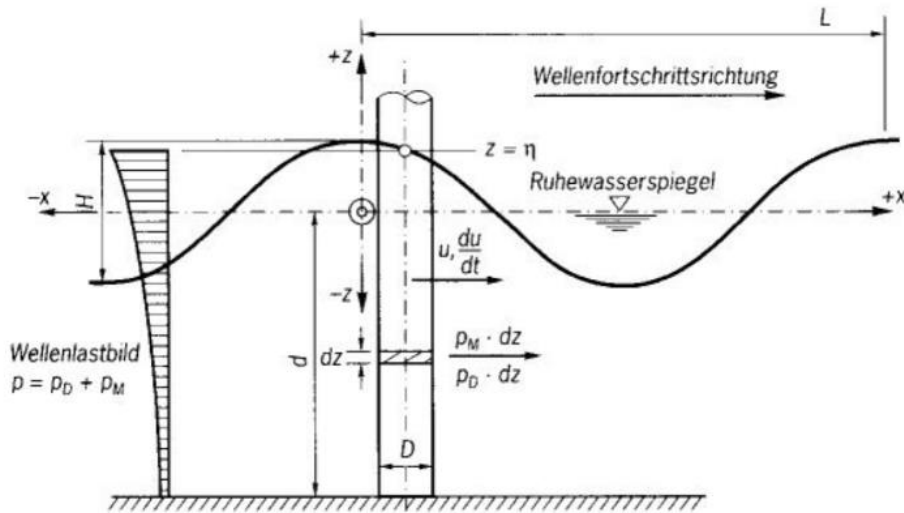




Abbildung 7 Welleneinwirkung auf ein schlankes Bauwerk

| | | |
|---|--|---|
|  | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 16 of 83 |

$$F_{\max} = F_I + F_D = C_I K_I H \rho g \frac{\pi D^2}{4} + C_D K_D H^2 \frac{1}{2} \rho g D$$

$$M_{\max} = F_I d S_I + F_D d S_D$$

where: C_I [-] = inertia coefficient $\approx 2,0$
 C_D [-] = drag coefficient (for small flow velocities $C_D \approx 1,2$, see Section 20.3)
 K_I [-] = correction for extent of inertia force
 K_D [-] = correction for extent of drag force
 S_I [-] = correction for position of resultant inertia force
 S_D [-] = correction for position of resultant drag force
 H [m] = wave height
 D [m] = diameter pile
 d [m] = depth





| | |
|---|---|
| F_{\max} | F_{\max} |
| M_{\max} | M_{\max} |
| where: | wobei Folgendes gilt: |
| C_I [-] = inertia coefficient $\approx 2,0$ | C_I [-] = Trägheitskoeffizient $\approx 2,0$ |
| C_D [-] = drag coefficient (for small flow velocities $C_D \approx 1,2$, see Section 20.3) | C_D [-] = Strömungswiderstandskoeffizient (bei geringen Fließgeschwindigkeiten $C_D \approx 1, 2$, siehe Abschnitt 20.3) |
| K_I [-] = correction for extent of inertia force | K_I [-] = Korrekturfaktor für Trägheitskraftmaß |
| K_D [-] = correction for extent of drag force | K_D [-] = Korrekturfaktor für Strömungswiderstandsmaß |
| S_I [-] = correction for position of resultant inertia force | S_I [-] = Korrekturfaktor für Position der resultierenden Trägheitskraft |
| S_D [-] = correction for position of resultant drag force | S_D [-] = Korrekturfaktor für Position der resultierenden Strömungswiderstandskraft |
| H [m] = wave height | H [m] = Wellenhöhe |
| D [m] = diameter pile | D [m] = Pfahldurchmesser |
| d [m] = depth | d [m] = Tiefe |

Abbildung 8 Lineare Wellentheorie

Das „Shore Protection Manual“ (CERC 1984) zeigt Diagramme mit den Höchstwerten der Koeffizienten C_D , K_I , K_D , S_I und S_D . Diese Diagramme sind auch in den nachstehenden Abschnitten enthalten. Die Werte der Koeffizienten richten sich nach der Wellenperiode, der Phase, der Wassertiefe sowie der zur Bestimmung der Geschwindigkeit der Wasserpartikel anwendbaren Wellentheorie.

Die Diagramme zeigen mehrere unterschiedliche Kurven. (Siehe Ref. [24].) Diese sind abhängig vom Verhältnis H/H_b , wobei H_b die Wellenhöhe im Brechpunkt ist. Bei einer konventionellen Schätzung der Wellenhöhe im Brechpunkt wird $1/7$ der Wellenlänge im Flachwasser angenommen. In diesem Bericht wurde als konservativer Wert $H/H_b = 1$ gewählt, was für K_I , K_D , S_I und S_D die höchsten Werte ergibt.





Folgende Komponenten wurden für die Berechnung herangezogen:

| | | |
|--|---|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 17 of 83 |

| | | | | |
|----------------------------|---|---------|----------|----------------------|
| <u>General input</u> | | | | |
| g | Gravitation | | 9.81 | [m/s ²] |
| T | Temperature | | 2.00 | [°C] |
| | Kinematic viscosity | | 1.67E-06 | [m ² /s] |
| γ _w | Density of sea water | | 1030 | [kg/m ³] |
| S | Safety factor for simplified calculation | | 1.10 | [-] |
| <u>Environmental input</u> | | | | |
| u _{max} | Current velocity | | 1.88 | [m/s] |
| T _p | Wave period | | 5.20 | [s] |
| H _s | Significant wave height (average height of the 1/3 highest waves) | | 3.78 | [m] |
| H _b | Wave height when breaking (individual waves) | 1/7*L = | 5.6 | [m] |
| L ₀ | Wave length | | 42.2 | [m] |
| d/L ₀ | Relative water depth [-] (intermediate water depth) | | 0.24 | [-] |
| L | Wave length according to linear wave theory, exact to 3 decimals | | 39.0 | [m] |
| <u>Geometric input</u> | | | | |
| d | Water depth | | 10.0 | [m] |
| D | Diameter of the pile | | 1.400 | [m] |
| HA | Height of area facing flow | | 8.0 | [m] |

| | |
|---|--|
| General input | Allgemeine Eingaben |
| General input | Allgemeine Eingaben |
| Gravitation | Erdbeschleunigung |
| Temperature | Temperatur |
| Kinematic viscosity | Kinematische Viskosität |
| Density of sea water | Meerwasserdichte |
| Safety factor for simplified calculation | Sicherheitsbeiwert für vereinfachte Berechnung |
| Environmental input | Eingaben zu Umgebungsdaten |
| Current velocity | Strömungsgeschwindigkeit |
| Wave period | Wellenperiode |
| Significant wave height (average height of the 1/3 highest waves) | Maßgebliche Wellenhöhe (Mittelwert aus 1/3 der höchsten Wellen) |
| Wave height when breaking (individual waves) | Wellenhöhe beim Brechen (Einzelwellen) |
| Wave length | Wellenlänge |
| Relative water depth [-] (intermediate water depth) | Relative Wassertiefe [-] (mitteltiefes Wasser) |
| Wave length according to linear wave theory, exact to 3 decimals | Wellenlänge gemäß linearer Wellentheorie, auf 3 Dezimalstellen genau |
| <u>Geometric input</u> | <u>Geometrische Eingaben</u> |
| Water depth | Wassertiefe |
| Diameter of the pile | Pfahldurchmesser |
| Height of area facing flow | Höhe des strömungszugewandten Bereichs |

Abbildung 9 Allgemeine Komponenten vereinfachte Morison-Gleichung

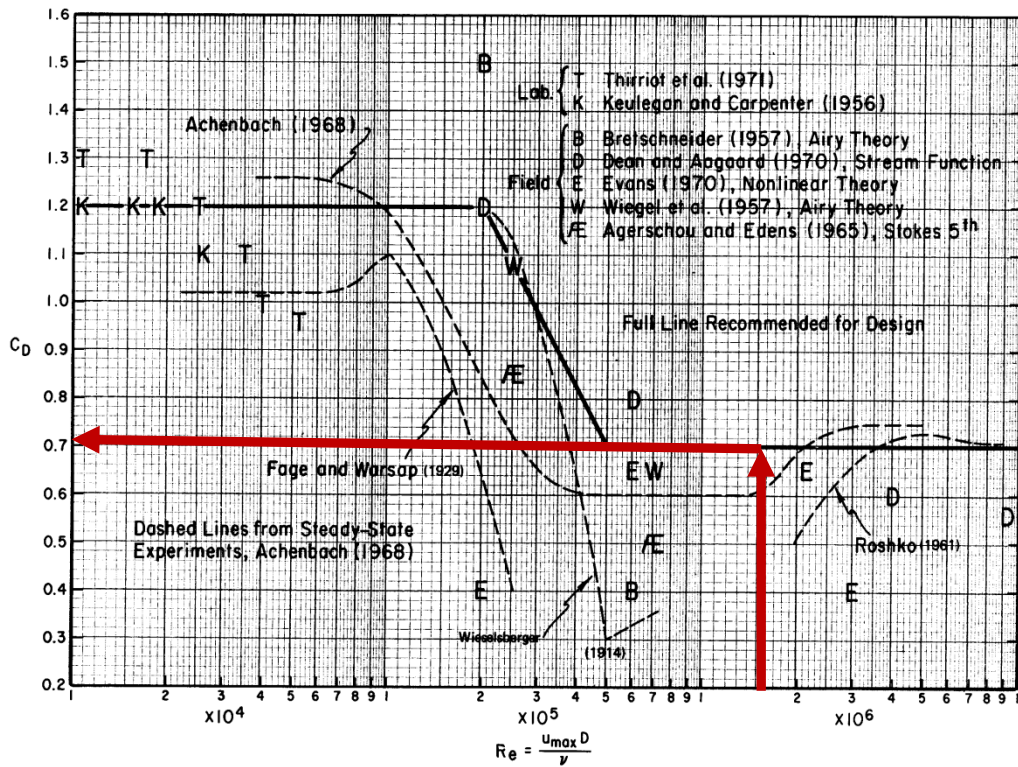
| | | |
|--|---|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 18 of 83 |

Folgende Faktoren wurden anhand der Tabellen aus dem Rock Manual bestimmt:

| Factors | | | |
|--------------------|---|----------|-----|
| CI | inertia coefficient | 2.00 | [-] |
| Re | Renolds number | 1.6E+06 | [-] |
| d/gT2 | Horizontal axis in graph Shore Protection Manual | 3.77E-02 | |
| H/Hb | Ratio of design wave/breaking wave | 7/10 | [-] |
| TABLES ROCK MANUAL | | | |
| CD | Drag coefficient | 0.70 | [-] |
| KI | Correction for extend of inertia force | 0.45 | [-] |
| KD | Correction for extent of drag force | 0.50 | [-] |
| SI | Correctionf for position of resultant inertia force | 0.82 | [-] |
| SD | Correctionf for position of resultant drag force | 1.10 | [-] |





| Factors | Faktoren |
|--|---|
| inertia coefficient | Trägheitskoeffizient |
| Renolds number | Reynolds-Zahl |
| Horizontal axis in graph Shore Protection Manual | Horizontale Achse im Diagramm in „Shore Protection Manual“ |
| Ratio of design wave/breaking wave | Verhältnis von Bemessungswelle/brechende Welle |
| TABLES ROCK MANUAL | TABELLEN ROCK MANUAL |
| Drag coefficient | Strömungswiderstandskoeffizient |
| Correction for extend of inertia force | Korrekturfaktor für Trägheitskraftmaß |
| Correction for extent of drag force | Korrekturfaktor für Strömungswiderstandsmaß |
| Correction for position of resultant inertia force | Korrekturfaktor für Position der resultierenden Trägheitskraft |
| Correction for position of resultant drag force | Korrekturfaktor für Position der resultierenden Strömungswiderstandskraft |

Abbildung 10 Faktoren Rock Manual



| | |
|--|--|
| Achenboch (1968) | Achenbach (1968) |
| Lab. | Labor |
| Thirriot ef al. (1971) | Thirriot et al. (1971) |
| Field | Feld |
| Keulegan and Carpenter (1956) | Keulegan und Carpenter (1956) |
| Bretshneider (1957), Airy Theory | Bretschneider (1957), Wellentheorie nach Airy |
| Dean and Aagaard (1970), Stream Function | Dean und Aagaard (1970), Stromfunktion |
| Evans (1970), Nonlinear Theory | Evans (1970), Nichtlineare Theorie |
| Wiegel et al. (1957), Airy Theory | Wiegel et al. (1957), Wellentheorie nach Airy |
| Agerschou and Edens (1965), Stokes 5th | Agerschou und Edens (1965), Stokes' 5. Ordnung |
| Full Line Recommended for Design | Durchgezogene Linie für Bemessung empfohlen |
| Fage and Warsap | Fage und Warsap |
| Dashed Lines from Steady-State Experiments, Achenbach (1968) | Gestrichelte Linien aus stationären Experimenten, Achenbach (1968) |
| Roshko (1961) | Roshko (1961) |
| Wiesselberger | Wieselsberger |

Abbildung 11 Bestimmung des Strömungswiderstandskoeffizienten

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 20 of 83 |

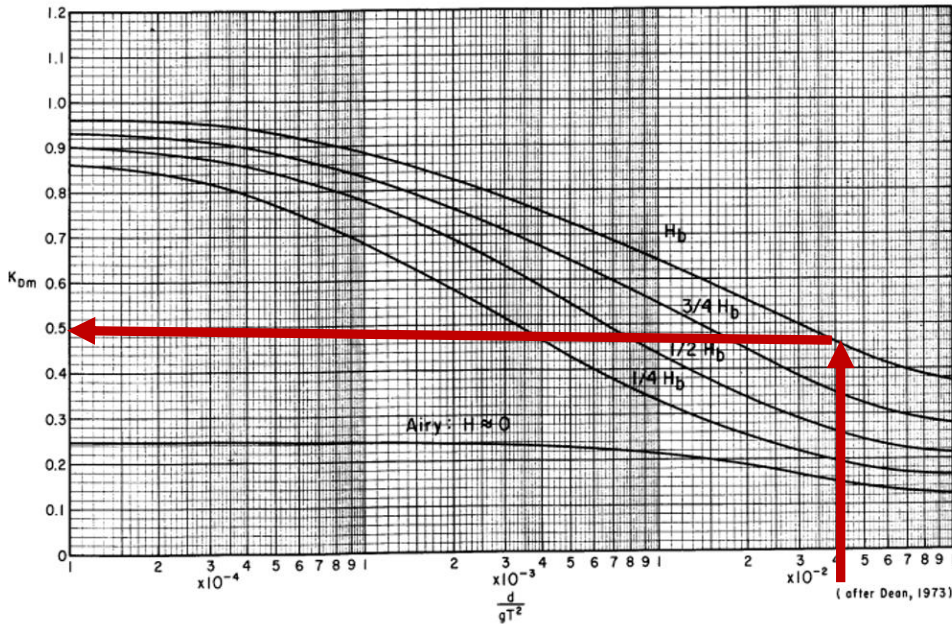


Abbildung 12 Bestimmung des K_D -Faktors (Berichtigung des Umfangs der Strömungswiderstandskraft)





Auf dieser Grundlage lassen sich die auf die Strömung und die Trägheit zurückzuführenden Widerstandskräfte bestimmen. Zur Berechnung des Maximalmoments wurde der vertikale Abstand zwischen dem Meeresboden und dem Einspannungspunkt zu den Hebeln dieser Kräfte hinzugezählt. Dieser Abstand wurde mit $0,22 \times t_0 = 0,22 \times 10,59 = 2,33 \text{ m}$ angenommen.

| | | | | |
|------|--------------------------------|--|------|-------|
| FI | Drag force due to inertia | | 52.9 | [kN] |
| FD | Drag force due to current | | 35.4 | [kN] |
| Mmax | Maximum moment @ -13.11 [mSKN] | | 2178 | [kNm] |

| | |
|--------------------------------|--|
| Drag force due to inertia | Strömungswiderstandskraft infolge Trägheit |
| Drag force due to current | Strömungswiderstandskraft infolge Strömung |
| Maximum moment @ -19.11 [mSKN] | Maximales Moment bei -19,11 [m SKN] |
| Mmax | Mmax |





Abbildung 13 Kräfte und Maximalmoment Pfahl unter Wellen- und Strömungseinwirkung

In der Pfahlberechnung wurde die Kraft bei einem schwachen Aufprall von 1.167 kN (siehe Abschnitt 8.4.1) erhöht, bis ein zusätzliches maximales Biegemoment von 2.178 kNm entsteht. Das maximale Biegemoment erhöht sich dadurch um 10 %. Für den Grenzzustand der Ermüdung wurde eine Erhöhung gleichen Umfangs angenommen.

| | | |
|--|---|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 21 of 83 |

Die Berechnung enthält wohlgermt konservative Betrachtungen. Diese sind beabsichtigt, um ein Unterschätzen der Belastung zu vermeiden.

- Schirmwirkungen des Pontons werden außer Acht gelassen.
- Es wurde ein (selbst erfundener) Gesamtfaktor von 1,10 auf das Maximalmoment verwendet.
- Es wird argumentiert, dass die Strömung die Richtung nicht schnell wechselt wie die unter den Wellen schwankenden Pfähle. Anzunehmen, dass sie dies tut, ist für den Grenzzustand der Ermüdung konservativ.

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 22 of 83 |

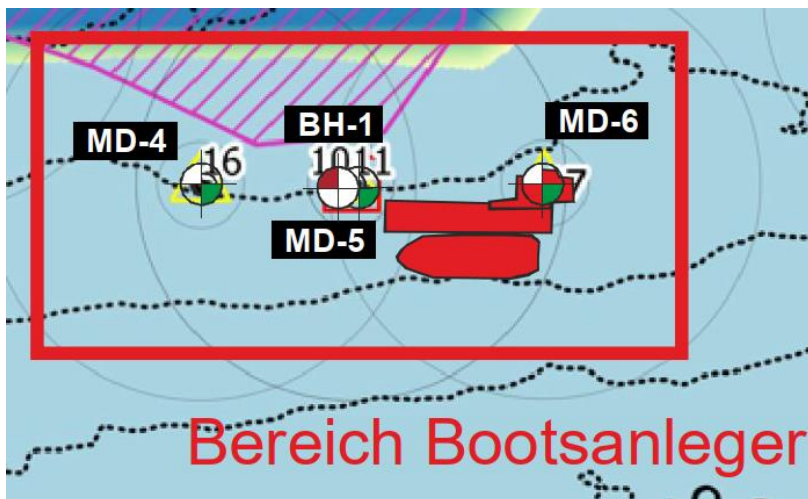
7.2 Geotechnische Einwirkungen

Das Bodenprofil und die Bodenparameter entstammen Anlage 3, „Rechnerische Bodenprofile für erdstatische Berechnungen“ aus Ref. [16].



In diesem Anhang werden zwei Profile angegeben.





1. FSRU – Ponton-Dalben ohne Kolkschutzschüttung (pontoon dolphins w/o armor layer), Rechnerische Wassertiefe (DSL): $-10,80$ [m SKN]. Es wird angenommen, dass dieses Profil von BH-1 stammt.
2. FSRU – Ponton-Dalben mit Kolkschutzschüttung (pontoon dolphins w/ armor layer), Rechnerische Wassertiefe (DSL): $-9,80$ [m SKN]. Es wird angenommen, dass dieses Profil von MD6 stammt.

Das erste Profil wird für maximale Flexibilität bei starkem Aufprall verwendet, unter Hinzuziehung eines Kolks von ca. $1 \times D$ m. Das zweite Profil wird für maximale Kraft bei schwachem Aufprall mit Kolkschutzschüttung verwendet.



Legende Erkundungen Sommer 2023

-  Bohrung (BH) gemäß DIN EN ISO 22475-1:2008
-  Drucksondierung (CPT) gemäß DIN EN 1997-2:2010

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 23 of 83 |

8. MODELLIERUNG

8.1 Bestimmung der Pfahlreaktionskräfte

Der Ponton wird durch 12 Pfähle gehalten. Im Ansys-AQWA-Modell wird jeder Pfahl durch 4 reine Druckstützen dargestellt. Zwei senkrecht zum Ponton in je entgegengesetzter Richtung und zwei parallel zum Ponton in je entgegengesetzter Richtung. Somit kann jeder Pfahl als Einzelnes Versetz- und Schnellbewegungen standhalten. Das Pfahlssystem als Ganzes kann Gieren standhalten. Tauchen, Stampfen und Rollen haben keinen wesentlichen Einfluss auf die Bemessung der Pfähle. (Siehe Anhang B hinsichtlich dieser Bewegungen.)

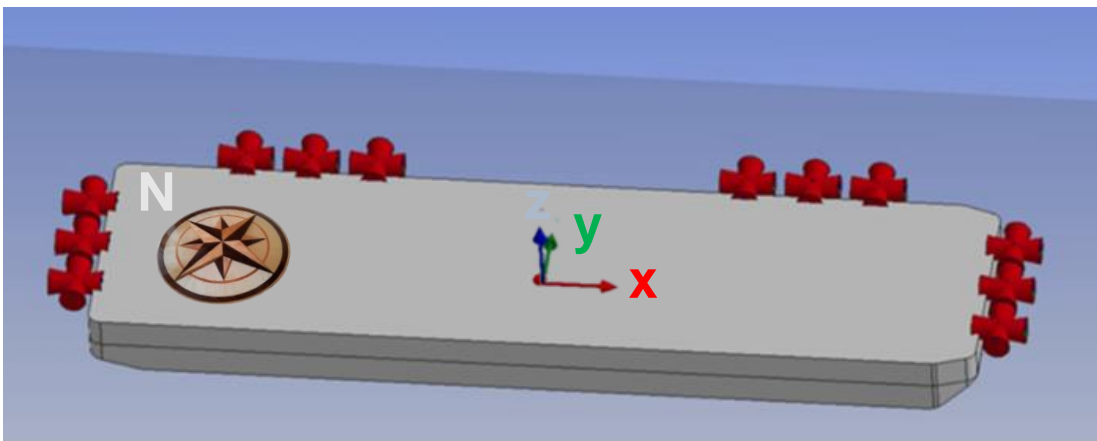






Abbildung 14 Pfahlmodellierung in Ansys AQWA als 12 x 4 reine Druckstützen

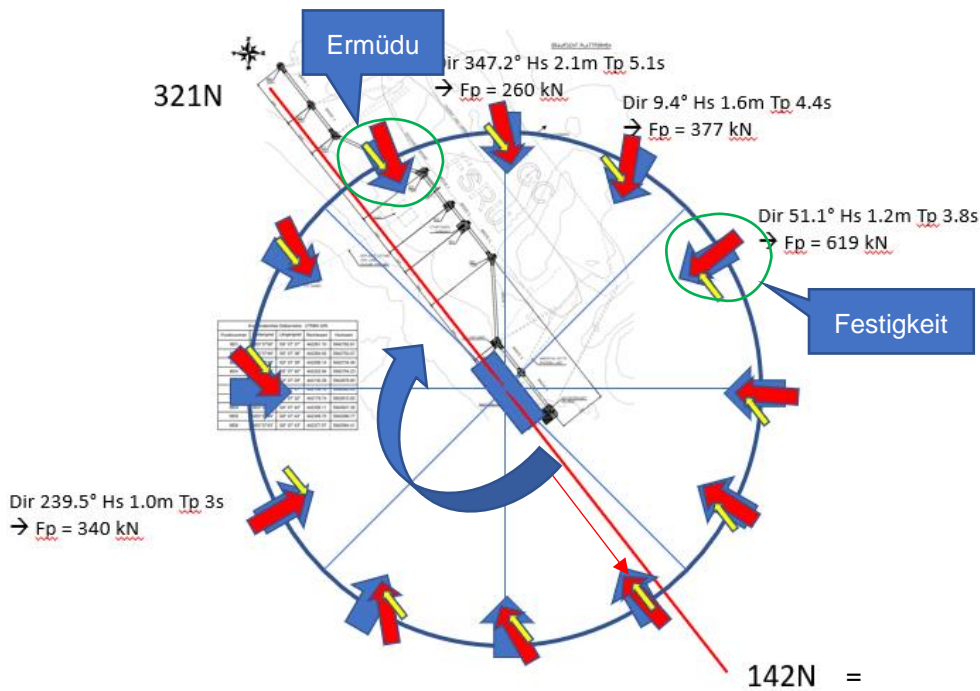
Die Wellenrichtungen, die die höchsten Reaktionskräfte erzeugen, wurden ermittelt, indem 12 Richtungen bei jeweiliger Pfahlsteifigkeit von 9.224 kN/m sowohl für extremes Niedrigwasser als auch für extremes Hochwasser geprüft wurden. In

| | |
|---|--|
| Pontoon orientation 100 year RP - Low water | Ponton-Ausrichtung T = 100 – Niedrigwasser |
|---|--|

Abbildung 15 wurden die Kräfte für 4 Richtungen und für schwache Aufprallstärke gezeigt, einschließlich der dominierenden Krafrichtung 51,1°N. Die Abbildung soll zur Veranschaulichung dienen. Zu beachten ist, dass die Richtungen relativ zum Norden angegeben sind, sowie auch, dass die Windrichtung und die Windwellenrichtung leicht voneinander abweichen können. Die positive Längsachse x des Pontons zeigt auf 141,75° Nord. Die positive Längsachse in Ansys AQWA ist definiert als 0°. Daraus folgt z. B. $51,1^\circ\text{N} = 360 - (180 - 141,75 + 51,1) = 321,75 - 51,1 = 270,65^\circ\text{AQWA}$.

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 24 of 83 |

Ponton orientation 100 year RP – Low water



| | |
|--|--|
| Ponton orientation 100 year RP - Low water | Ponton-Ausrichtung T = 100 – Niedrigwasser |
|--|--|





Abbildung 15 Pfahlreaktionskräfte für 12 Windrichtungen bei extremem Niedrigwasser bei 9.224 kN/m.

Für den Grenzzustand der Ermüdung lautet die vorherrschende Wellenrichtung 340 N [GR]. Dies wurde in Ref. [1] Revision 2 erläutert.

Tabelle 2 zeigt die vorherrschenden Wind- und Wellenrichtungen für STR/GEO und den Grenzzustand (LS) der Ermüdung.

| 1/T | LS | DirN [GR] | DirAnsys [GR] |
|--------------|----------|---------------|---------------|
| | | Wind / Wellen | Wind / Wellen |
| 1/10 | Ermüdung | 330 / 340 | -8 / -18 |
| 1/100 | STR/GEO | 60 / 51 | 262 / 271 |

Tabelle 2 Vorherrschende Wind- und Wellenrichtungen

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 25 of 83 |

Zur Ermittlung der Reaktionskräfte im Grenzzustand STR/GEO ($T = 100$) sowie des Spannungsbereichs im Grenzzustand der Ermüdung ($T = 10$) wurden Kraftverschiebungskurven bezüglich der Steifigkeit der Pfähle bei Extremhochwasser und Extremniedrigwasser erstellt. Diese Kurven werden mithilfe einer internen Berechnungsdatei erstellt, die nachfolgend als „DMC-Blum-Tabellenblatt“ bezeichnet wird. Siehe





| | |
|--|-------------------------------------|
| High Impact | Starker Aufprall |
| Freeboard | Freibord |
| Return period | Wiederkehrintervall |
| Diameter | Durchmesser |
| Wand dikte | Wanddicke |
| Kolkschüttung | Kolkschutzschüttung |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| OHNE | OHNE |
| Low | Niedrig |
| LowChar | NieChar |
| Frep [kN] | F_{rep} [kN] |
| Force in [kN] | Kraft in [kN] |
| Displacement w at impact level in [mm] | Verschiebung w bei Aufprall in [mm] |

Abbildung 20,

| | |
|--|-------------------------------------|
| Low Impact | Starker Aufprall |
| Freeboard | Freibord |
| Return period | Wiederkehrintervall |
| Diameter | Durchmesser |
| Wand dikte | Wanddicke |
| Kolkschüttung | Kolkschutzschüttung |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| Frep [kN] | F_{rep} [kN] |
| Force in [kN] | Kraft in [kN] |
| Displacement w at impact level in [mm] | Verschiebung w bei Aufprall in [mm] |

Abbildung 21,

| | |
|---------------|---------------------|
| Freeboard | Freibord |
| Return period | Wiederkehrintervall |
| Diameter | Durchmesser |
| Wand dikte | Wanddicke |
| Kolkschüttung | Kolkschutzschüttung |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| MIT | MIT |

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 26 of 83 |

| | |
|--|-------------------------------------|
| High | Hoch |
| HiChar | HoChar |
| Frep [kN] | F _{rep} [kN] |
| Froce in [kN] | Kraft in [kN] |
| Displacement w at impact level in [mm] | Verschiebung w bei Aufprall in [mm] |

Abbildung 28 und

| | |
|--|-------------------------------------|
| Freeboard | Freibord |
| Return period | Wiederkehrintervall |
| Diameter | Durchmesser |
| Wand dikte | Wanddicke |
| Kolkschuttung | Kolkschutzschüttung |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| OHNE | OHNE |
| Low | Niedrig |
| LowChar | NieChar |
| Frep [kN] | F _{rep} [kN] |
| Froce in [kN] | Kraft in [kN] |
| Displacement w at impact level in [mm] | Verschiebung w bei Aufprall in [mm] |

Abbildung 29.





Tabelle 3 zeigt die Eingabeparameter für Ansys AQWA in den berücksichtigten Grenzzuständen. Die Zahlenwerte wurden aus Ref. [1] übernommen.

- H_s ist die maßgebliche Wellenhöhe (Mittelwert aus 1/3 der höchsten Wellen)
- T_p ist die Wellenkammperiode
- Gamma-Faktor für das Wellenspektrum

| 1/T | LS | H _s [m] | T _p [s] | Gamma [–] |
|--------------|----------|--------------------|--------------------|-----------|
| 1/10 | Ermüdung | 1,70 | 4,9 | 2,1 |
| 1/100 | STR/GEO | 1,20 | 3,8 | 3,3 |

Tabelle 3 Ansys-Eingabe für Bedingungen mit einer Jährlichkeit von 1/10 und 1/100 (siehe auch [2])

Es wurden Ansys-AQWA-Durchläufe mit der Eingabe aus Tabelle 3 und den Steifigkeitsbereichen von starkem bis schwachen Aufprall für beide Grenzzustände ausgeführt. Anschließend wurden Spitzenwerte der Systemantwort bei bestimmten Steifigkeiten untersucht. Das Ergebnis ist ein Schaubild mit der Pfahlsteifigkeit

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 27 of 83 |

in kN/m auf der horizontalen Achse und der Reaktionskraft (STR/GEO) in kN oder dem Reaktionskraftbereich (Ermüdung) in kN auf der vertikalen Achse. Siehe

| | |
|--|--|
| Results pile forces at varying stiffness, Hs = 1.1m, dir = "beam on" | Ergebnisse auf Pfähle einwirkende Kräfte bei versch. Steifigkeit, Hs = 1,1 m, Richtung = „dwars“ |
| Total maximum pile force in [kN] | Max. auf Pfahl einwirkende Kraft in [kN] |
| Pile stiffness in kN/m | Pfahlsteifigkeit in kN/m |





Abbildung 22 und

| | |
|------------------------------------|--|
| Pile forces in kN | Auf Pfähle einwirkende Kräfte in kN |
| Stiffness of pile supports in kN/m | Steifigkeit der Führungspfähle in kN/m |

Abbildung 32.

8.2 Bestimmung der Kräfte im Pfahlinneren

Die Pfähle wurden gemäß Ref. [19] und [20] mithilfe des Verfahrens nach Blum bemessen. In seiner einfachsten Form geht das Blum-Verfahren von einer vollständigen Mobilisierung des Erddrucks eines Bodentyps für eine Spundwand aus, wie in Abbildung 16f dargestellt. Das ursprüngliche Verfahren wurde für im oberen Bereich gestützte Spundwände entwickelt. Das horizontale Gleichgewicht wird durch eine theoretische horizontale Kraft am Spundwandfuß gewährleistet. Das Blum-Verfahren ist ein kräfteorientierter Ansatz. Aus dem statischen Gleichgewicht werden die Schnittgrößen Querkräfte und Biegemoment hergeleitet. In dem DMC-Blum-Tabellenblatt wurde dies numerisch durch Berücksichtigung des Gleichgewichts von Pfahlquerschnitten mit $\Delta h = 1 \text{ cm}$ von oben nach unten durchgeführt.

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 28 of 83 |

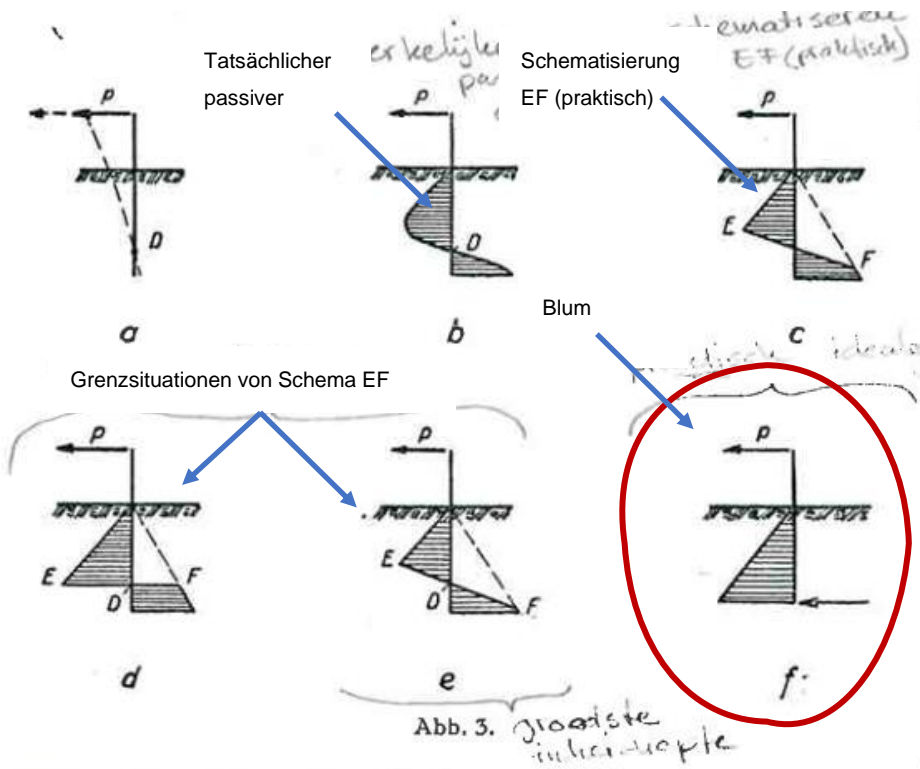


Abbildung 16 Blum-Schematisierung aus Ref. [25]

Das Blum-Verfahren wurde für flexible Dalben angepasst. Hierzu wurden zahlreiche Bodenschichten und Faktoren (Formbeiwerte) eingeführt, die die räumliche Wirkung vom Erddruck auf kreisförmige Querschnitte berücksichtigen. An der Stelle, an der das Biegemoment gegen Null geht ($M = 0$), wird eine Kraft angenommen, die das horizontale Gleichgewicht herstellt. Diese Kraft trägt das Symbol C und wird als „Ersatzkraft“ bezeichnet. Die Gesamtpfahltiefe beträgt $t_0 + \Delta t$. Dabei gibt t_0 den Abstand zwischen der Bodenoberkante und der Höhe $M = 0$ in Metern an und Δt steht für die geforderte Tiefe unter der Höhe $M = 0$. In Ref. [19] wird Δt wie in Abbildung 18 dargestellt berechnet. In Übereinstimmung mit [19] und [21] wurde der Reibungswinkel (bzw. die Reibung zwischen dem Pfahl und dem Boden) auf $2/3$ des internen Reibungswinkels des Bodens festgelegt.





| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 30 of 83 |

Abbildung 19 unten.

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) ist Δt so anzunehmen, dass die Resultante der mittelgrünen Erddruckfläche (Trapez) auf der linken Seite von

| | |
|---|--|
| ULS-GEO check | ULS/GEO-Nachweis |
| Passive earth pressure (spatial resistance at pile toe) | Passiver Erddruck (räumlicher Widerstand am Pfahlfuß) |
| ULS/SLS fixity check | ULS/SLS-Nachweis der Einspannung |
| Passive earth pressure (reduced spatial resistance at pile toe) | Passiver Erddruck (verminderter räumlicher Widerstand am Pfahlfuß) |





Abbildung 19 gleich der Hälfte der Ersatzkraft ist. Allerdings sollte Δt nie kleiner als $0,2 \times t_0$ werden.

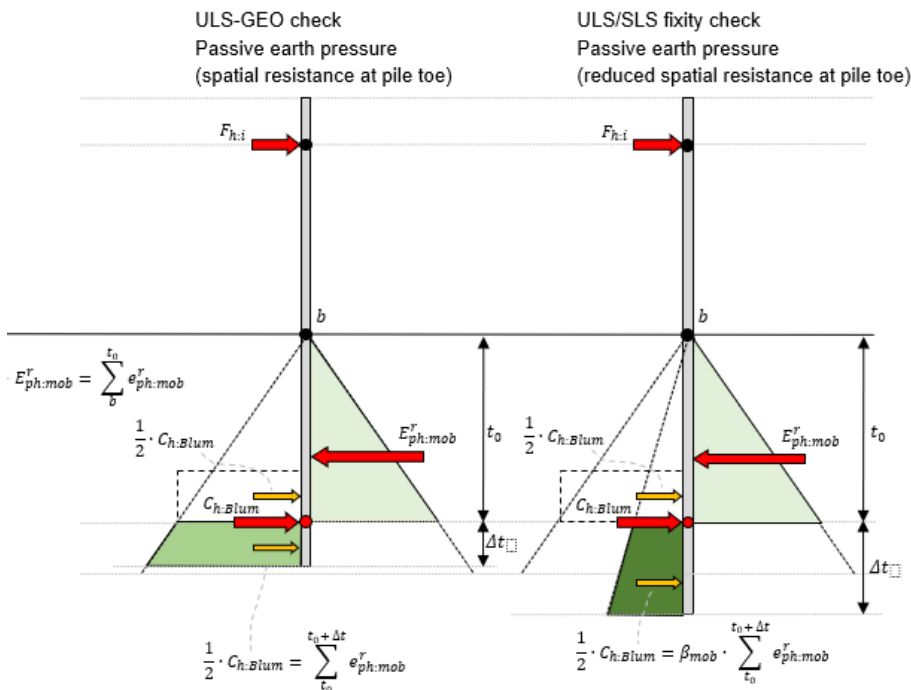
Durch das Flexible Dolphins Committee wurde ein weiterer Nachweis zum Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) hinzugefügt. Durch diesen Nachweis soll sichergestellt werden, dass sich der Boden am Fuß unter häufigen Einwirkungen nicht plastisch verformt. Denn dies hätte fortlaufende Pfahlverformungen zur Folge. Dieser Nachweis entspricht daher normalen Betriebsbedingungen.

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) ist Δt so anzunehmen, dass die Resultante der dunkelgrünen Erddruckfläche (Trapez) auf der rechten Seite von

| | |
|---|--|
| ULS-GEO check | ULS/GEO-Nachweis |
| Passive earth pressure (spatial resistance at pile toe) | Passiver Erddruck (räumlicher Widerstand am Pfahlfuß) |
| ULS/SLS fixity check | ULS/SLS-Nachweis der Einspannung |
| Passive earth pressure (reduced spatial resistance at pile toe) | Passiver Erddruck (verminderter räumlicher Widerstand am Pfahlfuß) |

Abbildung 19 multipliziert mit einem β -Faktor gleich der Hälfte der Ersatzkraft ist. Es wurde empirisch festgestellt, dass die Ergebnisse für $\beta = 0,33$ zufriedenstellend sind.

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 31 of 83 |



| | |
|---|--|
| ULS-GEO check | ULS/GEO-Nachweis |
| Passive earth pressure (spatial resistance at pile toe) | Passiver Erddruck (räumlicher Widerstand am Pfahlfuß) |
| ULS/SLS fixity check | ULS/SLS-Nachweis der Einspannung |
| Passive earth pressure (reduced spatial resistance at pile toe) | Passiver Erddruck (verminderter räumlicher Widerstand am Pfahlfuß) |

Abbildung 19 Pfahltiefe gemäß der Praxis des Flexible Dolphins Committee

8.4 Pfahlbemessungsnachweise





8.4.1 Abschnittsprüfung im Grenzzustand STR/GEO

Die Beanspruchbarkeit der Pfahlabschnitte der Klassen 1, 2 und 3 im ULS-Grenzzustand (STR/GEO) wurde mit Ref. [5] Abschnitt 6.2 bestimmt.

Die Beanspruchbarkeit von Pfahlabschnitten der Klasse 4 im ULS-Grenzzustand (STR/GEO) prüft DMC mit:

- Ref. [7] Eurocode 1993-1-6 Abschnitt 8.5.2, 8.5.3 und Anhang D (immer für Ton und Zone 1)
- Ref. [21] Abschnitt 3.8 Gresnigt-Methode (immer für Sand und Zone 2 und 3)

Im vorliegenden Fall sind jedoch Pfähle der Klasse 4 nicht Teil der Bemessung, sodass dieser Nachweis nicht erforderlich ist.

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 32 of 83 |





Die Pfähle wurden für folgenden STR/GEO-Grenzzustand (T = 100) geprüft:

- Bemessungskonzept 2 mit Sicherheitsbeiwerte aus Tabelle 12.1 der EAU (Ref. [19]). Siehe auch Abbildung 4.
- Bestimmung der Kräfte im Inneren anhand der Blum-Methode unter Annahme der vollständigen Mobilisierung des passiven Erddrucks.
- Räumlicher passiver Erdwiderstand bestimmt mit DIN 4085 (Ref. [18]).
- Erforderliche Fußtiefe bestimmt unter konservativer Berücksichtigung des horizontalen Gleichgewichts unterhalb der Höhe, in der das Biegemoment Null ist. Siehe auch Abschnitt Pfahltiefe.
- Einschließlich der Wellen- und Strömungskräfte auf die Pfähle selbst.
- Keine Korrosion berücksichtigt (höhere Steifigkeit bedeutet höhere Kräfte).
- Höchste Aufprallstärke bei $+7,16 + 2,20 = +9,36$ m SKN mit niedrigem Meeresboden bei $-12,30$ m SKN (einschließlich Kolk) für maximale Verformung.
- Niedrigste Aufprallstärke bei $-1,03 + 2,20 = +1,17$ m SKN mit hohem Meeresboden bei $-9,80$ m SKN (einschließlich Kolk) für maximale Kräfte im Pfahlinneren.
- Die vorherrschende Wellenrichtung für maximale auf die Pfähle einwirkende Kräfte ist 51° N.

| | |
|--|-------------------------------------|
| High Impact | Starker Aufprall |
| Freeboard | Freibord |
| Return period | Wiederkehrintervall |
| Diameter | Durchmesser |
| Wand dikte | Wanddicke |
| Kolkschüttung | Kolkschutzschüttung |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| OHNE | OHNE |
| Low | Niedrig |
| LowChar | NieChar |
| Frep [kN] | F_{rep} [kN] |
| Force in [kN] | Kraft in [kN] |
| Displacement w at impact level in [mm] | Verschiebung w bei Aufprall in [mm] |

Abbildung 20 zeigt die Bestimmung der Pfahlsteifigkeit bei niedriger Aufprallstärke mit dem DMC-Blum-Tabellenblatt.

| | |
|---------------|---------------------|
| Low Impact | Starker Aufprall |
| Freeboard | Freibord |
| Return period | Wiederkehrintervall |
| Diameter | Durchmesser |
| Wand dikte | Wanddicke |

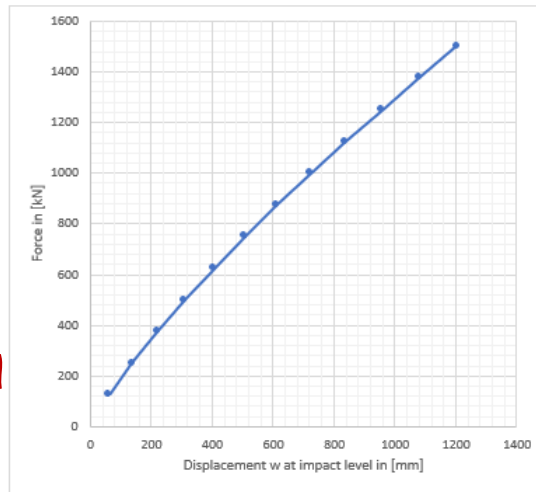
| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 33 of 83 |

| | |
|--|-------------------------------------|
| Kolkschüttung | Kolkschutzschüttung |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| Frep [kN] | F _{rep} [kN] |
| Force in [kN] | Kraft in [kN] |
| Displacement w at impact level in [mm] | Verschiebung w bei Aufprall in [mm] |

Abbildung 21 zeigt die Bestimmung der Pfahlsteifigkeit bei hoher Aufprallstärke mit dem DMC-Blum-Tabellenblatt.





| | | |
|---------------|---------|---------|
| High Impact | 9.36 | [mSKN] |
| Freeboard | 2.20 | [m] |
| Return period | 100 | [years] |
| Diameter | 1500 | [mm] |
| Wand dicke | 50 | [mm] |
| Kolkschüttung | OHNE | |
| Seabed | Low | |
| Soil | LowChar | |

| | Frep [kN] | w [mm] | w [m] | k [kN/m] |
|----|-----------|--------|-------|----------|
| 1 | 125 | 61 | 0.061 | 2042 |
| 2 | 250 | 137 | 0.137 | 1829 |
| 3 | 375 | 221 | 0.221 | 1701 |
| 4 | 500 | 311 | 0.311 | 1608 |
| 5 | 625 | 407 | 0.407 | 1535 |
| 6 | 750 | 508 | 0.508 | 1475 |
| 7 | 875 | 614 | 0.614 | 1424 |
| 8 | 1000 | 725 | 0.725 | 1380 |
| 9 | 1125 | 839 | 0.839 | 1341 |
| 10 | 1250 | 957 | 0.957 | 1306 |
| 11 | 1375 | 1079 | 1.079 | 1274 |
| 12 | 1500 | 1204 | 1.204 | 1246 |
| | | | | 1513 |



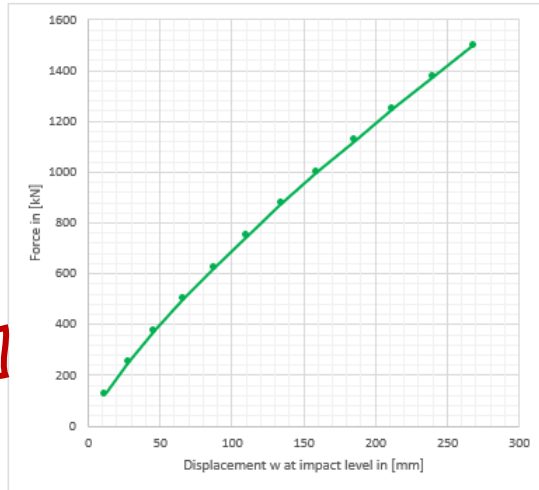
| | |
|--|-------------------------------------|
| High Impact | Starker Aufprall |
| Freeboard | Freibord |
| Return period | Wiederkehrintervall |
| Diameter | Durchmesser |
| Wand dicke | Wanddicke |
| Kolkschüttung | Kolkschutzschüttung |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| OHNE | OHNE |
| Low | Niedrig |
| LowChar | NieChar |
| Frep [kN] | F _{rep} [kN] |
| Force in [kN] | Kraft in [kN] |
| Displacement w at impact level in [mm] | Verschiebung w bei Aufprall in [mm] |

Abbildung 20 Pfahlsteifigkeit bei hoher Aufprallstärke

| | | |
|--|---|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 34 of 83 |

| | | |
|---------------|--------|---------|
| Low Impact | 1.17 | [mSKN] |
| Freeboard | 2.20 | [m] |
| Return period | 100 | [years] |
| Diameter | 1500 | [mm] |
| Wand dicke | 50 | [mm] |
| Kolkschüttung | OHNE | |
| Seabed | High | |
| Soil | HiChar | |

| | Frep | w | | k |
|----|------|------|---------|--------|
| | [kN] | [mm] | [m] | [kN/m] |
| 1 | 125 | 12 | 0.01201 | 10410 |
| 2 | 250 | 28 | 0.02786 | 8973 |
| 3 | 375 | 46 | 0.04617 | 8122 |
| 4 | 500 | 66 | 0.06632 | 7539 |
| 5 | 625 | 88 | 0.08792 | 7109 |
| 6 | 750 | 111 | 0.11076 | 6771 |
| 7 | 875 | 135 | 0.13471 | 6495 |
| 8 | 1000 | 160 | 0.15969 | 6262 |
| 9 | 1125 | 186 | 0.18561 | 6061 |
| 10 | 1250 | 212 | 0.21243 | 5884 |
| 11 | 1375 | 240 | 0.24010 | 5727 |
| 12 | 1500 | 269 | 0.26858 | 5585 |
| | | | | 7078 |



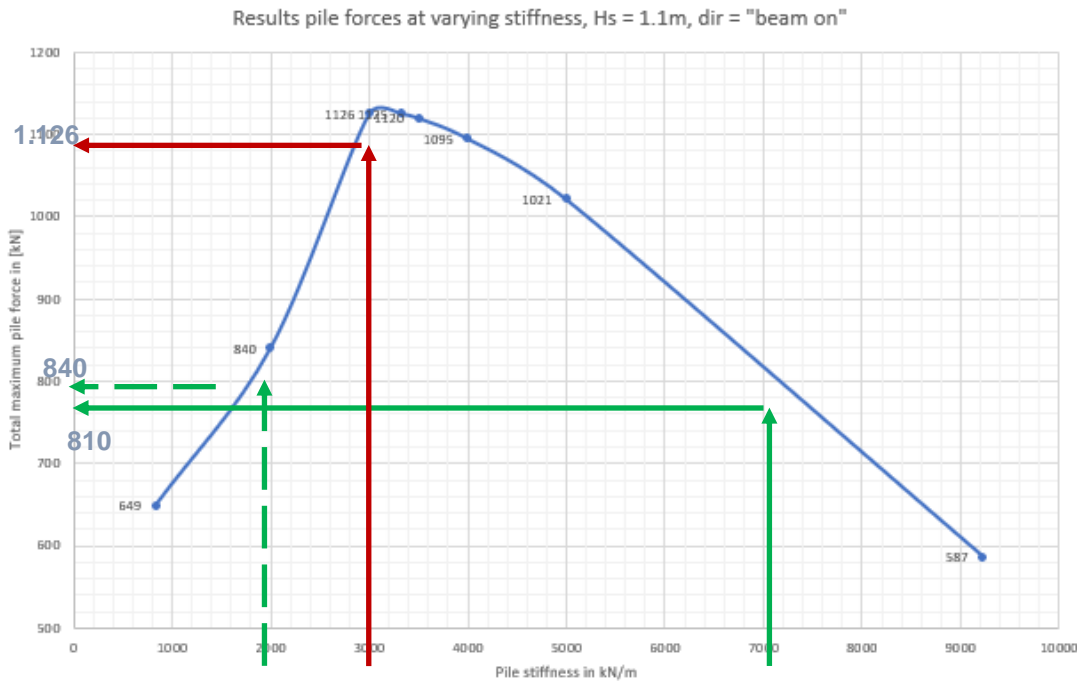
| | |
|--|-------------------------------------|
| Low Impact | Starker Aufprall |
| Freeboard | Freibord |
| Return period | Wiederkehrintervall |
| Diameter | Durchmesser |
| Wand dicke | Wanddicke |
| Kolkschüttung | Kolkschutzschüttung |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| Frep [kN] | F_{rep} [kN] |
| Force in [kN] | Kraft in [kN] |
| Displacement w at impact level in [mm] | Verschiebung w bei Aufprall in [mm] |

Abbildung 21 Pfahlsteifigkeit bei niedriger Aufprallstärke

Im Ansys-AQWA-Modell wird für alle Pfähle die gleiche Steifigkeit in alle Richtungen angenommen, zum Beispiel 3.000 kN/m. Anschließend wird ein Durchlauf ausgeführt, der die Reaktionskräfte der Pfähle ergibt. Dann wird die maximale Kraft aller Pfähle gewählt, die in diesem Fall 1.126 kN beträgt. Der Durchlauf ist in

| | |
|--|---|
| Results pile forces at varying stiffness, Hs = 1.1m, dir = "beam on" | Ergebnisse auf Pfähle einwirkende Kräfte bei versch. Steifigkeit, Hs = 1,1 m, Richtung = „dwards“ |
| Total maximum pile force in [kN] | Max. auf Pfahl einwirkende Kraft in [kN] |
| Pile stiffness in kN/m | Pfahlsteifigkeit in kN/m |

Abbildung 22 mit einem einzelnen Punkt dargestellt. Daraufhin werden weitere Durchläufe mit unterschiedlicher Steifigkeit ausgeführt, um die Form der Systemantwort zu ermitteln. Von Bedeutung sind dabei die Steifigkeiten, die an den Extremen (niedrige und hohe Aufprallstärke) liegen, sowie die Steifigkeiten, die die höchsten Reaktionskräfte ergeben.



| | |
|--|--|
| Results pile forces at varying stiffness, Hs = 1.1m, dir = "beam on" | Ergebnisse auf Pfähle einwirkende Kräfte bei versch. Steifigkeit, Hs = 1,1 m, Richtung = „dwars“ |
| Total maximum pile force in [kN] | Max. auf Pfahl einwirkende Kraft in [kN] |
| Pile stiffness in kN/m | Pfahlsteifigkeit in kN/m |





Abbildung 22 Pfahlreaktionskraft als Funktion der Pfahlsteifigkeit im STR/GEO-Grenzzustand

Die Pfahlsteifigkeit bei niedriger Aufprallstärke beträgt, wenn der Kolkschutz berücksichtigt wird, ca. 20.000 kN/m. Aus

| | |
|--|--|
| Results pile forces at varying stiffness, Hs = 1.1m, dir = "beam on" | Ergebnisse auf Pfähle einwirkende Kräfte bei versch. Steifigkeit, Hs = 1,1 m, Richtung = „dwars“ |
| Total maximum pile force in [kN] | Max. auf Pfahl einwirkende Kraft in [kN] |
| Pile stiffness in kN/m | Pfahlsteifigkeit in kN/m |

Abbildung 22 ist ersichtlich, dass für diese Steifigkeit kein Durchlauf ausgeführt wurde. Der Trend lässt jedoch erwarten, dass die Pfahlreaktionskraft bei 20.000 kN/m niedriger als ca. 800 ist, die Kraft bei niedriger Aufprallstärke ohne Kolkschutz. Bei einer höheren Steifigkeit (mit Kolkschutz) ist für eine niedrige Aufprallstärke bei 1,17 m SKN und für eine Kraft von 800 kN der Einspannungspunkt höher und folglich das Biegemoment niedriger. Folglich ergibt der Steifigkeitsbereich von 9.000 bis 20.000 kN/m keine maßgeblichen Biegemomente und wird aus der Analyse ausgeschlossen.

Anschließend wird das DMC-Blum-Tabellenblatt zur Ermittlung des maximalen Biegemoments in den Pfählen verwendet. Zunächst wird das Modell mit dem Blum-Tabellenblatt auf die Steifigkeitseingabe (

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 36 of 83 |





| | |
|--|-------------------------------------|
| High Impact | Starker Aufprall |
| Freeboard | Freibord |
| Return period | Wiederkehrintervall |
| Diameter | Durchmesser |
| Wand dikte | Wanddicke |
| Kolkschüttung | Kolkschutzschüttung |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| OHNE | OHNE |
| Low | Niedrig |
| LowChar | NieChar |
| Frep [kN] | F_{rep} [kN] |
| Force in [kN] | Kraft in [kN] |
| Displacement w at impact level in [mm] | Verschiebung w bei Aufprall in [mm] |

Abbildung 20 und

| | |
|--|-------------------------------------|
| Low Impact | Starker Aufprall |
| Freeboard | Freibord |
| Return period | Wiederkehrintervall |
| Diameter | Durchmesser |
| Wand dikte | Wanddicke |
| Kolkschüttung | Kolkschutzschüttung |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| Frep [kN] | F_{rep} [kN] |
| Force in [kN] | Kraft in [kN] |
| Displacement w at impact level in [mm] | Verschiebung w bei Aufprall in [mm] |

Abbildung 21) kalibriert. Mit Beiwerten gleich 1,0 wird eine Kraft von 840 kN bei 9,36 m SKN (hohe Aufprallstärke) eingegeben. Die Ergebnisse sind in





| Levels | Höhen |
|---------------------|----------------------|
| Pile top | Pfahlspitze |
| Impact high | Aufprall hoch |
| Impact low | Aufprall niedrig |
| Water line | Wasserlinie |
| Seabed high | Meeresboden hoch |
| Seabed nom | Meeresboden Nennhöhe |
| Seabed low | Meeresboden niedrig |
| Soil profile bottom | Bodenprofil unten |
| Seabed | Meeresboden |
| Impact | Aufprall |
| Level Mmax (V=0) | Level Mmax (V = 0) |

| | | |
|--|---|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 37 of 83 |

| | |
|----------------------------|-----------------------------------|
| Mmax | Mmax |
| Level Ersatzkraft (M=0) | Level Ersatzkraft (M = 0) |
| Ersatz kraft | Ersatzkraft |
| Loads | Lasten |
| Force | Kraft |
| UDL | UDL |
| Factors toe depth | Beiwerte Fußtiefe |
| Passive β_{mob} | Passives β_{mob} |
| Distribution C_h | Verteilung C_h |
| Calculation summary | Berechnungszusammenfassung |
| Toe depth | Fußtiefe |
| t_{fix} | t_{fix} |
| Toe depth | Fußtiefe |
| User choices | Benutzerauswahl |
| Corrosion | Korrosion |
| Impact | Aufprall |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| PSFs Soil | Sicherheitsbeiwerte Boden |
| Soil type (class 4) | Bodentyp (Klasse 4) |
| Kolkschutzschutting | Kolkschutzschüttung |
| Displacement@TOP | Verschiebung an Spitze |
| Displacement@IP | Verschiebung an Aufprallpunkt |
| Stiffness@IP | Steifigkeit an Aufprallpunkt |
| Energy absorption | Energieabsorption |
| Applied toe depth | Angewandte Fußtiefe |
| Total pile length | Pfahlgesamtlänge |
| Total pile weight | Pfahlgesamtwicht |
| No | Keine |
| Low | Niedrig |
| High | Hoch |
| HiChar | HoChar |
| Char | Char |
| Sand moderately/dense | Sand mitteldicht/dicht |
| Ohne | Ohne |

Abbildung 23 dargelegt. Das DMC-Blum-Tabellenblatt ergibt eine Steifigkeit von 1.437 kN/m, was





| | |
|---------------|---------------------|
| High Impact | Starker Aufprall |
| Freeboard | Freibord |
| Return period | Wiederkehrintervall |
| Diameter | Durchmesser |

| | | |
|--|---|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 38 of 83 |

| | |
|--|-------------------------------------|
| Wand dikte | Wanddicke |
| Kolkschüttung | Kolkschutzschüttung |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| OHNE | OHNE |
| Low | Niedrig |
| LowChar | NieChar |
| Frep [kN] | F _{rep} [kN] |
| Force in [kN] | Kraft in [kN] |
| Displacement w at impact level in [mm] | Verschiebung w bei Aufprall in [mm] |

Abbildung 20 entspricht. Für 1,17 [m SKN] (niedrige Aufprallstärke) wurde gleichermaßen vorgegangen. Siehe
Abbildung

| | |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| Levels | Höhen |
| Pile top | Pfahlspitze |
| Impact high | Aufprall hoch |
| Impact low | Aufprall niedrig |
| Water line | Wasserlinie |
| Seabed high | Meeresboden hoch |
| Seabed nom | Meeresboden Nennhöhe |
| Seabed low | Meeresboden niedrig |
| Soil profile bottom | Bodenprofil unten |
| Seabed | Meeresboden |
| Impact | Aufprall |
| Level Mmax (V=0) | Level Mmax (V = 0) |
| Mmax | Mmax |
| Level Ersatzkraft (M=0) | Level Ersatzkraft (M = 0) |
| Ersatz kraft | Ersatzkraft |
| Loads | Lasten |
| Force | Kraft |
| UDL | UDL |
| Factors toe depth | Beiwerte Fußtiefe |
| Passive β_{mob} | Passives β_{mob} |
| Distribution C _h | Verteilung C _h |
| Calculation summary | Berechnungszusammenfassung |
| Toe depth | Fußtiefe |
| t _{fix} | t _{fix} |
| Toe depth | Fußtiefe |
| User choices | Benutzerauswahl |
| Corrosion | Korrosion |
| Impact | Aufprall |





| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 39 of 83 |

| | |
|-----------------------|-------------------------------|
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| PSFs Soil | Sicherheitsbeiwerte Boden |
| Soil type (class 4) | Bodentyp (Klasse 4) |
| Kolkschutzschütting | Kolkschutzschüttung |
| Displacement@TOP | Verschiebung an Spitze |
| Displacement@IP | Verschiebung an Aufprallpunkt |
| Stiffness@IP | Steifigkeit an Aufprallpunkt |
| Energy absorption | Energieabsorption |
| Applied toe depth | Angewandte Fußtiefe |
| Total pile length | Pfahlgesamtlänge |
| Total pile weight | Pfahlgesamtwicht |
| No | Nr. |
| Low | Niedrig |
| High | Hoch |
| HiChar | HoChar |
| Char | Char |
| Sand moderately/dense | Sand mitteldicht/dicht |
| Ohne | Ohne |

Abbildung 24.





| Levels | | Loads | | User choices | |
|-------------------------|---------------|----------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------|
| Pile top | 12.00 [mSKN] | Force | 840 [kN] | Corrosion | No |
| Impact high | 9.36 [mSKN] | UDL | 0.0 [kN/m ²] | Impact | High |
| Impact low | 10.86 [mSKN] | E | 246 [kNm] | Seabed | Low |
| Water line | 7.16 [mSKN] | | | Soil | LoChar |
| Seabed high | -10.80 [mSKN] | Factors toe depth | | PSFs Soil | Char |
| Seabed nom | -10.80 [mSKN] | Passive β_{mob} | 1.00 STR/GEO | Soil type (class 4) | Sand moderately/dense |
| Seabed low | -12.30 [mSKN] | Distribution C_n | 0.50 [-] | Kolkschutzschütting | Ohne |
| Soil profile bottom | -70.00 [mSKN] | Calculation summary | | Displacement@TOP | 661.0 [mm] |
| Seabed | -12.30 [mSKN] | t_0 | 10.18 [m] | Displacement@IP | 585 [mm] |
| Impact | 9.36 [mSKN] | Δt | 1.76 [m] | Stiffness@IP | 1437 [N/m] |
| Level Mmax (V=0) | -16.69 [mSKN] | Toe depth | -24.24 [mSKN] | Energy absorption | 246 [kNm] |
| Mmax | 20873 [kNm] | $0.2 \cdot t_0$ | 2.04 [m] | Applied toe depth | -32.00 [mSKN] |
| Level Ersatzkraft (M=0) | -22.48 [mSKN] | t_{fix} | 2.04 [m] | Total pile length | 44.00 [m] |
| Ersatzkraft | 9044 [kN] | Toe depth | -24.52 [mSKN] | Total pile weight | 78.7 [t] |

| Levels | Höhen |
|-------------|----------------------|
| Pile top | Pfahlspitze |
| Impact high | Aufprall hoch |
| Impact low | Aufprall niedrig |
| Water line | Wasserlinie |
| Seabed high | Meeresboden hoch |
| Seabed nom | Meeresboden Nennhöhe |
| Seabed low | Meeresboden niedrig |

| | | |
|--|---|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 40 of 83 |





| | |
|----------------------------|-----------------------------------|
| Soil profile bottom | Bodenprofil unten |
| Seabed | Meeresboden |
| Impact | Aufprall |
| Level Mmax (V=0) | Level Mmax (V = 0) |
| Mmax | Mmax |
| Level Ersatzkraft (M=0) | Level Ersatzkraft (M = 0) |
| Ersatz kraft | Ersatzkraft |
| Loads | Lasten |
| Force | Kraft |
| UDL | UDL |
| Factors toe depth | Beiwerte Fußtiefe |
| Passive β_{mob} | Passives β_{mob} |
| Distribution C_h | Verteilung C_h |
| Calculation summary | Berechnungszusammenfassung |
| Toe depth | Fußtiefe |
| t_{fix} | t_{fix} |
| Toe depth | Fußtiefe |
| User choices | Benutzerauswahl |
| Corrosion | Korrosion |
| Impact | Aufprall |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| PSFs Soil | Sicherheitsbeiwerte Boden |
| Soil type (class 4) | Bodentyp (Klasse 4) |
| Kolkschutzschüttung | Kolkschutzschüttung |
| Displacement@TOP | Verschiebung an Spitze |
| Displacement@IP | Verschiebung an Aufprallpunkt |
| Stiffness@IP | Steifigkeit an Aufprallpunkt |
| Energy absorption | Energieabsorption |
| Applied toe depth | Angewandte Fußtiefe |
| Total pile length | Pfahlgesamtlänge |
| Total pile weight | Pfahlgesamtwicht |
| No | Keine |
| Low | Niedrig |
| High | Hoch |
| HiChar | HoChar |
| Char | Char |
| Sand moderately/dense | Sand mitteldicht/dicht |
| Ohne | Ohne |

Abbildung 23 Ausgabe DMC-Blum-Tabellenblatt bei hoher Aufprallstärke

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 41 of 83 |

| Levels | | Loads | | User choices | |
|-------------------------|---------------|----------------------------|---------------|---------------------|-----------------------|
| Pile top | 12.00 [mSKN] | Force | 810 [kN] | Corrosion | No |
| Impact high | 9.36 [mSKN] | UDL | 0.0 [kN/m2] | Impact | Low |
| Impact low | 1.17 [mSKN] | E | 128 [kNm] | Seabed | High |
| Water line | -1.03 [mSKN] | | | Soil | HiChar |
| Seabed high | -10.80 [mSKN] | Factors toe depth | | PSFs Soil | Char |
| Seabed nom | -10.80 [mSKN] | Passive β_{mob} | 1.00 STR/GEO | Soil type (class 4) | Sand moderately/dense |
| Seabed low | -12.30 [mSKN] | Distribution C_h | 0.50 [-] | Kolkschutzschutting | Ohne |
| Soil profile bottom | -70.00 [mSKN] | | | | |
| | | Calculation summary | | Displacement@TOP | 232.0 [mm] |
| Seabed | -10.80 [mSKN] | t_0 | 7.35 [m] | Displacement@IP | 122 [mm] |
| Impact | 1.17 [mSKN] | Δt | 0.98 [m] | Stiffness@IP | 6640 [kN/m] |
| Level Mmax (V=0) | -13.98 [mSKN] | Toe depth | -19.13 [mSKN] | Energy absorption | 49 [kNm] |
| Mmax | 11617 [kNm] | $0.2 \cdot t_0$ | 1.47 [m] | Applied toe depth | -32.00 [mSKN] |
| Level Ersatzkraft (M=0) | -18.15 [mSKN] | t_{fix} | 1.47 [m] | Total pile length | 44.00 [m] |
| Ersatzkraft | 8408 [kN] | Toe depth | -19.62 [mSKN] | Total pile weight | 78.7 [t] |

| Levels | Höhen |
|----------------------------|-----------------------------------|
| Pile top | Pfahlspitze |
| Impact high | Aufprall hoch |
| Impact low | Aufprall niedrig |
| Water line | Wasserlinie |
| Seabed high | Meeresboden hoch |
| Seabed nom | Meeresboden Nennhöhe |
| Seabed low | Meeresboden niedrig |
| Soil profile bottom | Bodenprofil unten |
| Seabed | Meeresboden |
| Impact | Aufprall |
| Level Mmax (V=0) | Level Mmax (V = 0) |
| Mmax | Mmax |
| Level Ersatzkraft (M=0) | Level Ersatzkraft (M = 0) |
| Ersatz kraft | Ersatzkraft |
| Loads | Lasten |
| Force | Kraft |
| UDL | UDL |
| Factors toe depth | Beiwerte Fußtiefe |
| Passive β_{mob} | Passives β_{mob} |
| Distribution C_h | Verteilung C_h |
| Calculation summary | Berechnungszusammenfassung |
| Toe depth | Fußtiefe |
| t_{fix} | t_{fix} |
| Toe depth | Fußtiefe |
| User choices | Benutzerauswahl |
| Corrosion | Korrosion |
| Impact | Aufprall |

| | | |
|--|---|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 42 of 83 |

| | |
|-----------------------|-------------------------------|
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| PSFs Soil | Sicherheitsbeiwerte Boden |
| Soil type (class 4) | Bodentyp (Klasse 4) |
| Kolkschutzschütting | Kolkschutzschüttung |
| Displacement@TOP | Verschiebung an Spitze |
| Displacement@IP | Verschiebung an Aufprallpunkt |
| Stiffness@IP | Steifigkeit an Aufprallpunkt |
| Energy absorption | Energieabsorption |
| Applied toe depth | Angewandte Fußtiefe |
| Total pile length | Pfahlgesamtlänge |
| Total pile weight | Pfahlgesamtgewicht |
| No | Nr. |
| Low | Niedrig |
| High | Hoch |
| HiChar | HoChar |
| Char | Char |
| Sand moderately/dense | Sand mitteldicht/dicht |
| Ohne | Ohne |





Abbildung 24 Ausgabe DMC-Blum-Tabellenblatt bei niedriger Aufprallstärke

Eine hohe Aufprallstärke ergibt die höchsten Biegemomente bei niedrigen charakteristischen Werten des Bodens und bei niedrigem Meeresboden. Eine niedrige Aufprallstärke ergibt die höchsten Biegemomente bei hohen charakteristischen Werten des Bodens und bei hohem Meeresboden. Allerdings können hohe Biegemomente auf dazwischen liegenden Höhen vorkommen, wie aus der Reaktionskurve in

| | |
|--|--|
| Results pile forces at varying stiffness, Hs = 1.1m, dir = "beam on" | Ergebnisse auf Pfähle einwirkende Kräfte bei versch. Steifigkeit, Hs = 1,1 m, Richtung = „dwars“ |
| Total maximum pile force in [kN] | Max. auf Pfahl einwirkende Kraft in [kN] |
| Pile stiffness in kN/m | Pfahlsteifigkeit in kN/m |





Abbildung 22 hervorzugehen scheint. Bei einer Steifigkeit von 3.000 kN/m beträgt die Reaktionskraft 1.126 kN. Das Blum-Tabellenblatt wurde zur Ermittlung der entsprechenden Aufprallstärke für Kombinationen aus hohem und niedrigem Meeresboden und hohen und niedrigen charakteristischen Bodenwerten verwendet.

| Levels | Höhen |
|---------------------|----------------------|
| Pile top | Pfahlspitze |
| Impact high | Aufprall hoch |
| Impact low | Aufprall niedrig |
| Water line | Wasserlinie |
| Seabed high | Meeresboden hoch |
| Seabed nom | Meeresboden Nennhöhe |
| Seabed low | Meeresboden niedrig |
| Soil profile bottom | Bodenprofil unten |
| Seabed | Meeresboden |
| Impact | Aufprall |

| | | |
|--|---|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 43 of 83 |





| | |
|----------------------------|-----------------------------------|
| Level Mmax (V=0) | Level Mmax (V = 0) |
| Mmax | Mmax |
| Level Ersatzkraft (M=0) | Level Ersatzkraft (M = 0) |
| Ersatz kraft | Ersatzkraft |
| Loads | Lasten |
| Force | Kraft |
| UDL | UDL |
| Factors toe depth | Beiwerte Fußtiefe |
| Passive β_{mob} | Passives β_{mob} |
| Distribution C_h | Verteilung C_h |
| Calculation summary | Berechnungszusammenfassung |
| Toe depth | Fußtiefe |
| t_{fix} | t_{fix} |
| Toe depth | Fußtiefe |
| User choices | Benutzerauswahl |
| Corrosion | Korrosion |
| Impact | Aufprall |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| PSFs Soil | Sicherheitsbeiwerte Boden |
| Soil type (class 4) | Bodentyp (Klasse 4) |
| Kolkschutzschütting | Kolkschutzschüttung |
| Displacement@TOP | Verschiebung an Spitze |
| Displacement@IP | Verschiebung an Aufprallpunkt |
| Stiffness@IP | Steifigkeit an Aufprallpunkt |
| Energy absorption | Energieabsorption |
| Applied toe depth | Angewandte Fußtiefe |
| Total pile length | Pfahlgesamtlänge |
| Total pile weight | Pfahlgesamtwicht |
| No | Nr. |
| Low | Niedrig |
| High | Hoch |
| HiChar | HoChar |
| Char | Char |
| Sand moderately/dense | Sand mitteldicht/dicht |
| Ohne | Ohne |

Abbildung 25 zeigt die Aufprallstärke bei niedrigem Meeresboden und niedrigen charakteristischen Bodenwerten für eine Pfahlsteifigkeit von 3.000 kN/m.

| | | |
|--|---|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 44 of 83 |

| Levels | | | Loads | | | User choices | | |
|-------------------------|--------|--------|----------------------------|--------|----------------------|---------------------|-----------------------|--------|
| Pile top | 12.00 | [mSKN] | Force | 1126 | [kN] | Corrosion | No | |
| Impact high | 2.75 | [mSKN] | UDL | 0.0 | [kN/m ²] | Impact | High | |
| Impact low | 1.17 | [mSKN] | E | 128 | [kNm] | Seabed | Low | |
| Water line | 7.16 | [mSKN] | | | | Soil | LoChar | |
| Seabed high | -10.80 | [mSKN] | Factors toe depth | | | PSFs Soil | Char | |
| Seabed nom | -10.80 | [mSKN] | Passive β_{mob} | 1.00 | STR/GEO | Soil type (class 4) | Sand moderately/dense | |
| Seabed low | -12.30 | [mSKN] | Distribution C_h | 0.50 | [-] | Kolkschutzschuttung | Ohne | |
| Soil profile bottom | -70.00 | [mSKN] | | | | | | |
| | | | Calculation summary | | | | | |
| Seabed | -12.30 | [mSKN] | t_0 | 10.36 | [m] | Displacement@TOP | 596.3 | [mm] |
| Impact | 2.75 | [mSKN] | Δt | 1.75 | [m] | Displacement@IP | 375 | [mm] |
| Level Mmax (V=0) | -17.06 | [mSKN] | Toe depth | -24.41 | [mSKN] | Stiffness@IP | 3000 | [kN/m] |
| Mmax | 20948 | [kNm] | $0.2 \cdot t_0$ | 2.07 | [m] | Energy absorption | 211 | [kNm] |
| Level Ersatzkraft (M=0) | -22.66 | [mSKN] | t_{fix} | 2.07 | [m] | Applied toe depth | -32.00 | [mSKN] |
| Ersatzkraft | 9238 | [kN] | Toe depth | -24.73 | [mSKN] | Total pile length | 44.00 | [m] |
| | | | | | | Total pile weight | 78.7 | [t] |

| Levels | Höhen |
|----------------------------|-----------------------------------|
| Pile top | Pfahlspitze |
| Impact high | Aufprall hoch |
| Impact low | Aufprall niedrig |
| Water line | Wasserlinie |
| Seabed high | Meeresboden hoch |
| Seabed nom | Meeresboden Nennhöhe |
| Seabed low | Meeresboden niedrig |
| Soil profile bottom | Bodenprofil unten |
| Seabed | Meeresboden |
| Impact | Aufprall |
| Level Mmax (V=0) | Level Mmax (V = 0) |
| Mmax | Mmax |
| Level Ersatzkraft (M=0) | Level Ersatzkraft (M = 0) |
| Ersatz kraft | Ersatzkraft |
| Loads | Lasten |
| Force | Kraft |
| UDL | UDL |
| Factors toe depth | Beiwerte Fußtiefe |
| Passive β_{mob} | Passives β_{mob} |
| Distribution C_h | Verteilung C_h |
| Calculation summary | Berechnungszusammenfassung |
| Toe depth | Fußtiefe |
| t_{fix} | t_{fix} |
| Toe depth | Fußtiefe |
| User choices | Benutzerauswahl |
| Corrosion | Korrosion |
| Impact | Aufprall |
| Seabed | Meeresboden |

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 45 of 83 |

| | |
|-----------------------|-------------------------------|
| Soil | Boden |
| PSFs Soil | Sicherheitsbewerte Boden |
| Soil type (class 4) | Bodentyp (Klasse 4) |
| Kolkschutzschutting | Kolkschutzschüttung |
| Displacement@TOP | Verschiebung an Spitze |
| Displacement@IP | Verschiebung an Aufprallpunkt |
| Stiffness@IP | Steifigkeit an Aufprallpunkt |
| Energy absorption | Energieabsorption |
| Applied toe depth | Angewandte Fußtiefe |
| Total pile length | Pfahlgesamtlänge |
| Total pile weight | Pfahlgesamtwicht |
| No | Nr. |
| Low | Niedrig |
| High | Hoch |
| HiChar | HoChar |
| Char | Char |
| Sand moderately/dense | Sand mitteldicht/dicht |
| Ohne | Ohne |





Abbildung 25 Ausgabe DMC-Blum-Tabellenblatt bei Steifigkeit von 3.000 kN/m, Meeresboden = Niedrig und Boden = NieChar

Das im STR/GEO-Grenzzustand nachzuweisende Biegemoment war für folgende Situationen zu prüfen:

1. Hohe Aufprallstärke (bei 9,36 m SKN), Niedriger Meeresboden und NieChar-Boden mit einer Kraft von $840 + 126 = 966$ kN.
2. Aufprallstärke entsprechend einer Steifigkeit von 3.000 kN/m für Kombinationen von Meeresboden und Boden mit einer Kraft von $1.126 + 169 = 1.295$ kN.
3. Niedrige Aufprallstärke (1,17 m SKN), Hoher Meeresboden und HoChar-Boden mit einer Kraft von $810 + 122 = 932$ kN.

Für die in Abbildung





| Levels | Höhen |
|---------------------|----------------------|
| Pile top | Pfahlspitze |
| Impact high | Aufprall hoch |
| Impact low | Aufprall niedrig |
| Water line | Wasserlinie |
| Seabed high | Meeresboden hoch |
| Seabed nom | Meeresboden Nennhöhe |
| Seabed low | Meeresboden niedrig |
| Soil profile bottom | Bodenprofil unten |
| Seabed | Meeresboden |
| Impact | Aufprall |
| Level Mmax (V=0) | Level Mmax (V = 0) |

| | | |
|--|---|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 46 of 83 |





| | |
|----------------------------|-----------------------------------|
| Mmax | Mmax |
| Level Ersatzkraft (M=0) | Level Ersatzkraft (M = 0) |
| Ersatz kraft | Ersatzkraft |
| Loads | Lasten |
| Force | Kraft |
| UDL | UDL |
| Factors toe depth | Beiwerte Fußtiefe |
| Passive β_{mob} | Passives β_{mob} |
| Distribution C_h | Verteilung C_h |
| Calculation summary | Berechnungszusammenfassung |
| Toe depth | Fußtiefe |
| t_{fix} | t_{fix} |
| Toe depth | Fußtiefe |
| User choices | Benutzerauswahl |
| Corrosion | Korrosion |
| Impact | Aufprall |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| PSFs Soil | Sicherheitsbeiwerte Boden |
| Soil type (class 4) | Bodentyp (Klasse 4) |
| Kolkschutzschutting | Kolkschutzschüttung |
| Displacement@TOP | Verschiebung an Spitze |
| Displacement@IP | Verschiebung an Aufprallpunkt |
| Stiffness@IP | Steifigkeit an Aufprallpunkt |
| Energy absorption | Energieabsorption |
| Applied toe depth | Angewandte Fußtiefe |
| Total pile length | Pfahlgesamtlänge |
| Total pile weight | Pfahlgesamtwicht |
| No | Keine |
| Low | Niedrig |
| High | Hoch |
| HiChar | HoChar |
| Char | Char |
| Sand moderately/dense | Sand mitteldicht/dicht |
| Ohne | Ohne |

Abbildung 23,

| | |
|---------------|------------------|
| Levels | Höhen |
| Pile top | Pfahlspitze |
| Impact high | Aufprall hoch |
| Impact low | Aufprall niedrig |

| | | |
|--|---|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 47 of 83 |





| | |
|----------------------------|-----------------------------------|
| Water line | Wasserlinie |
| Seabed high | Meeresboden hoch |
| Seabed nom | Meeresboden Nennhöhe |
| Seabed low | Meeresboden niedrig |
| Soil profile bottom | Bodenprofil unten |
| Seabed | Meeresboden |
| Impact | Aufprall |
| Level Mmax (V=0) | Level Mmax (V = 0) |
| Mmax | Mmax |
| Level Ersatzkraft (M=0) | Level Ersatzkraft (M = 0) |
| Ersatz kraft | Ersatzkraft |
| Loads | Lasten |
| Force | Kraft |
| UDL | UDL |
| Factors toe depth | Beiwerte Fußtiefe |
| Passive β_{mob} | Passives β_{mob} |
| Distribution C_h | Verteilung C_h |
| Calculation summary | Berechnungszusammenfassung |
| Toe depth | Fußtiefe |
| t_{fix} | t_{fix} |
| Toe depth | Fußtiefe |
| User choices | Benutzerauswahl |
| Corrosion | Korrosion |
| Impact | Aufprall |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| PSFs Soil | Sicherheitsbeiwerte Boden |
| Soil type (class 4) | Bodentyp (Klasse 4) |
| Kolkschutzschütting | Kolkschutzschüttung |
| Displacement@TOP | Verschiebung an Spitze |
| Displacement@IP | Verschiebung an Aufprallpunkt |
| Stiffness@IP | Steifigkeit an Aufprallpunkt |
| Energy absorption | Energieabsorption |
| Applied toe depth | Angewandte Fußtiefe |
| Total pile length | Pfahlgesamtlänge |
| Total pile weight | Pfahlgesamtwicht |
| No | Nr. |
| Low | Niedrig |
| High | Hoch |
| HiChar | HoChar |
| Char | Char |

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 48 of 83 |

| | |
|-----------------------|------------------------|
| Sand moderately/dense | Sand mitteldicht/dicht |
| Ohne | Ohne |

Abbildung 24 und

| | |
|----------------------------|-----------------------------------|
| Levels | Höhen |
| Pile top | Pfahlspitze |
| Impact high | Aufprall hoch |
| Impact low | Aufprall niedrig |
| Water line | Wasserlinie |
| Seabed high | Meeresboden hoch |
| Seabed nom | Meeresboden Nennhöhe |
| Seabed low | Meeresboden niedrig |
| Soil profile bottom | Bodenprofil unten |
| Seabed | Meeresboden |
| Impact | Aufprall |
| Level Mmax (V=0) | Level Mmax (V = 0) |
| Mmax | Mmax |
| Level Ersatzkraft (M=0) | Level Ersatzkraft (M = 0) |
| Ersatz kraft | Ersatzkraft |
| Loads | Lasten |
| Force | Kraft |
| UDL | UDL |
| Factors toe depth | Beiwerte Fußtiefe |
| Passive β_{mob} | Passives β_{mob} |
| Distribution C_h | Verteilung C_h |
| Calculation summary | Berechnungszusammenfassung |
| Toe depth | Fußtiefe |
| t_{fix} | t_{fix} |
| Toe depth | Fußtiefe |
| User choices | Benutzerauswahl |
| Corrosion | Korrosion |
| Impact | Aufprall |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| PSFs Soil | Sicherheitsbeiwerte Boden |
| Soil type (class 4) | Bodentyp (Klasse 4) |
| Kolkschutzschutting | Kolkschutzschüttung |
| Displacement@TOP | Verschiebung an Spitze |
| Displacement@IP | Verschiebung an Aufprallpunkt |
| Stiffness@IP | Steifigkeit an Aufprallpunkt |
| Energy absorption | Energieabsorption |
| Applied toe depth | Angewandte Fußtiefe |

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 49 of 83 |

| | |
|-----------------------|------------------------|
| Total pile length | Pfahlgesamtlänge |
| Total pile weight | Pfahlgesamtwicht |
| No | Nr. |
| Low | Niedrig |
| High | Hoch |
| HiChar | HoChar |
| Char | Char |
| Sand moderately/dense | Sand mitteldicht/dicht |
| Ohne | Ohne |

Abbildung 25 durchgeführten Kalibrierungen wurden keine Sicherheitsbeiwerte verwendet. Für den STR/GEO-Grenzzustand wird ein Beiwert von 1,20 für die veränderliche Einwirkung und ein Beiwert von 1,15 für den Erdwiderstand verwendet. Siehe auch Abbildung 4.

Ferner wurde das Biegemoment um 10 % erhöht, um den Wellen und der Strömung Rechnung zu tragen, die unmittelbar auf die Pfähle einwirken. Siehe auch Abschnitt 7.1.





| W _{pl} = | 1.05E+08 | [mm ³] | f _y = | 410 | [N/mm ²] | γ _{M0} = | 1.10 | UC |
|-------------------|-----------|--------------------|------------------|--------|----------------------|-------------------|--------|---------------|
| CMB | Stiffness | F | Impact | Seabed | Soil | Fw+c | Moment | Section check |
| [-] | [kN/m] | [kN] | [mSKN] | [-] | [-] | [kN] | [kNm] | (STR/GEO) |
| 1 | 1437 | 840 | 9.36 | Low | LoChar | 126 | 29476 | 0.75 |
| 2 | 3000 | 1126 | 2.75 | Low | LoChar | 169 | 29850 | 0.76 |
| 3 | 3000 | 1126 | 5.69 | High | HiChar | 169 | 30558 | 0.78 |
| 4 | 3000 | 1126 | 4.63 | Low | HiChar | 169 | 30880 | 0.79 |
| 5 | 3000 | 1126 | 3.94 | High | LoChar | 169 | 29792 | 0.76 |
| 6 | 6640 | 810 | 1.17 | High | HiChar | 122 | 16518 | 0.42 |

| | |
|-------------------------|------------------------------|
| CMB | CMB |
| Stiffness | Steifigkeit |
| Impact | Aufprall |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| Moment | Moment |
| Section check (STR/GEO) | Abschnittsnachweis (STR/GEO) |

Tabelle 4 STR/GEO-Nachweise bei niedriger und hoher Aufprallstärke sowie für die höchste Reaktionskraft bei Steifigkeit 3.000 kN/m.

Als Beispiel für das Verfahren, das zur Ermittlung der maximalen STR/GEO-Biegemomente verwendet wurde, die hier vorstehend in

| | |
|-----------|-------------|
| CMB | CMB |
| Stiffness | Steifigkeit |
| Impact | Aufprall |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |





| | | |
|--|---|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 50 of 83 |

| | |
|-------------------------|------------------------------|
| Moment | Moment |
| Section check (STR/GEO) | Abschnittsnachweis (STR/GEO) |

Tabelle 4 gezeigt sind, wird nun CMB2 herangezogen.

- Um zu ermitteln, auf welcher Höhe der Pfahl eine Steifigkeit von 3.000 kN/m hat, wurden eine Kraft von $F = 1.126$ kN und Beiwerte gleich Eins verwendet. Siehe

| Levels | Höhen |
|----------------------------|-----------------------------------|
| Pile top | Pfahlspitze |
| Impact high | Aufprall hoch |
| Impact low | Aufprall niedrig |
| Water line | Wasserlinie |
| Seabed high | Meeresboden hoch |
| Seabed nom | Meeresboden Nennhöhe |
| Seabed low | Meeresboden niedrig |
| Soil profile bottom | Bodenprofil unten |
| Seabed | Meeresboden |
| Impact | Aufprall |
| Level Mmax (V=0) | Level Mmax (V = 0) |
| Mmax | Mmax |
| Level Ersatzkraft (M=0) | Level Ersatzkraft (M = 0) |
| Ersatz kraft | Ersatzkraft |
| Loads | Lasten |
| Force | Kraft |
| UDL | UDL |
| Factors toe depth | Beiwerte Fußtiefe |
| Passive β_{mob} | Passives β_{mob} |
| Distribution Ch | Verteilung Ch |
| Calculation summary | Berechnungszusammenfassung |
| Toe depth | Fußtiefe |
| tfix | tfix |
| Toe depth | Fußtiefe |
| User choices | Benutzerauswahl |
| Corrosion | Korrosion |
| Impact | Aufprall |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| PSFs Soil | Sicherheitsbeiwerte Boden |
| Soil type (class 4) | Bodentyp (Klasse 4) |
| Kolkschutzschütting | Kolkschutzschüttung |
| Displacement@TOP | Verschiebung an Spitze |

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 51 of 83 |

| | |
|-----------------------|-------------------------------|
| Displacement@IP | Verschiebung an Aufprallpunkt |
| Stiffness@IP | Steifigkeit an Aufprallpunkt |
| Energy absorption | Energieabsorption |
| Applied toe depth | Angewandte Fußtiefe |
| Total pile length | Pfahlgesamtlänge |
| Total pile weight | Pfahlgesamtwicht |
| No | Nr. |
| Low | Niedrig |
| High | Hoch |
| HiChar | HoChar |
| Char | Char |
| Sand moderately/dense | Sand mitteldicht/dicht |
| Ohne | Ohne |





2. Abbildung 25.
3. Bei einer Stärke von 2,75 m SKN wurden eine Kraft von $F = 1.126 + 169 = 1.295$ kN und Beiwerte von 1,20 für die veränderliche Einwirkung und 1,15 für den Erddruck verwendet, und das daraus resultierende maximale Biegemoment wird dem DMC-Blum-Tabellenblatt entnommen.

8.4.1 SLS-Nachweis der Pfahleinspannung und ULS-Nachweis der Pfahlstabilität

Der ULS-Nachweis der Pfahlstabilität wird für die Wellenverhältnisse im 100-jährlichen Wiederkehrzeitraum (jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit von 1/100 und Wahrscheinlichkeit von 9,6 %) durchgeführt, mit Beiwerten von 1,20 für die veränderliche Einwirkung und von 1,15 für den Erddruck.





Die maßgebliche Kombination ist CMB1. Die erforderliche Fußtiefe beträgt -26,27 m SKN. Siehe Abbildung

| Levels | Höhen |
|-------------------------|---------------------------|
| Pile top | Pfahlspitze |
| Impact high | Aufprall hoch |
| Impact low | Aufprall niedrig |
| Water line | Wasserlinie |
| Seabed high | Meeresboden hoch |
| Seabed nom | Meeresboden Nennhöhe |
| Seabed low | Meeresboden niedrig |
| Soil profile bottom | Bodenprofil unten |
| Seabed | Meeresboden |
| Impact | Aufprall |
| Level Mmax (V=0) | Level Mmax (V = 0) |
| Mmax | Mmax |
| Level Ersatzkraft (M=0) | Level Ersatzkraft (M = 0) |
| Ersatz kraft | Ersatzkraft |
| Loads | Lasten |
| Force | Kraft |

| | | |
|--|---|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 52 of 83 |





| | |
|----------------------------|-----------------------------------|
| UDL | UDL |
| Factors toe depth | Beiwerte Fußtiefe |
| Passive β_{mob} | Passives β_{mob} |
| Distribution C_h | Verteilung C_h |
| Calculation summary | Berechnungszusammenfassung |
| Toe depth | Fußtiefe |
| t_{fix} | t_{fix} |
| Toe depth | Fußtiefe |
| User choices | Benutzerauswahl |
| Corrosion | Korrosion |
| Impact | Aufprall |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| PSFs Soil | Sicherheitsbeiwerte Boden |
| Soil type (class 4) | Bodentyp (Klasse 4) |
| Kolkschutzschuttung | Kolkschutzschüttung |
| Displacement@TOP | Verschiebung an Spitze |
| Displacement@IP | Verschiebung an Aufprallpunkt |
| Stiffness@IP | Steifigkeit an Aufprallpunkt |
| Energy absorption | Energieabsorption |
| Applied toe depth | Angewandte Fußtiefe |
| Total pile length | Pfahlgesamtlänge |
| Total pile weight | Pfahlgesamtwicht |
| No | Nr. |
| Low | Niedrig |
| High | Hoch |
| HiChar | HoChar |
| Char | Char |
| Sand moderately/dense | Sand mitteldicht/dicht |
| Ohne | Ohne |

Abbildung 26.

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 53 of 83 |

| Levels | | | Loads | | | User choices | | |
|-------------------------|--------|--------|----------------------------|--------|---------|---------------------|-----------------------|--------|
| Pile top | 12.00 | [mSKN] | Force | 966 | [kN] | Corrosion | No | |
| Impact high | 9.36 | [mSKN] | UDL | 0.0 | [kN/m2] | Impact | High | |
| Impact low | 1.17 | [mSKN] | E | 128 | [kNm] | Seabed | Low | |
| Water line | 7.16 | [mSKN] | | | | Soil | LoChar | |
| Seabed high | -10.80 | [mSKN] | Factors toe depth | | | PSFs Soil | Char | |
| Seabed nom | -10.80 | [mSKN] | Passive β_{mob} | 1.00 | STR/GEO | Soil type (class 4) | Sand moderately/dense | |
| Seabed low | -12.30 | [mSKN] | Distribution C_h | 0.50 | [-] | Kolkschutzschüttung | Ohne | |
| Soil profile bottom | -70.00 | [mSKN] | | | | | | |
| | | | Calculation summary | | | | | |
| Seabed | -12.30 | [mSKN] | t_0 | 11.64 | [m] | Displacement@TOP | 1016.7 | [mm] |
| Impact | 9.36 | [mSKN] | Δt | 1.76 | [m] | Displacement@IP | 903 | [mm] |
| Level Mmax (V=0) | -17.30 | [mSKN] | Toe depth | -25.70 | [mSKN] | Stiffness@IP | 1070 | [kN/m] |
| Mmax | 29476 | [kNm] | $0.2 \cdot t_0$ | 2.33 | [m] | Energy absorption | 436 | [kNm] |
| Level Ersatzkraft (M=0) | -23.94 | [mSKN] | t_{fix} | 2.33 | [m] | Applied toe depth | -32.00 | [mSKN] |
| Ersatzkraft | 11550 | [kN] | Toe depth | -26.27 | [mSKN] | Total pile length | 44.00 | [m] |
| | | | | | | Total pile weight | 78.7 | [t] |

| Levels | Höhen |
|-------------------------|----------------------------|
| Pile top | Pfahlspitze |
| Impact high | Aufprall hoch |
| Impact low | Aufprall niedrig |
| Water line | Wasserlinie |
| Seabed high | Meeresboden hoch |
| Seabed nom | Meeresboden Nennhöhe |
| Seabed low | Meeresboden niedrig |
| Soil profile bottom | Bodenprofil unten |
| Seabed | Meeresboden |
| Impact | Aufprall |
| Level Mmax (V=0) | Level Mmax (V = 0) |
| Mmax | Mmax |
| Level Ersatzkraft (M=0) | Level Ersatzkraft (M = 0) |
| Ersatz kraft | Ersatzkraft |
| Loads | Lasten |
| Force | Kraft |
| UDL | UDL |
| Factors toe depth | Beiwerte Fußtiefe |
| Passive β_{mob} | Passives β_{mob} |
| Distribution C_h | Verteilung C_h |
| Calculation summary | Berechnungszusammenfassung |
| Toe depth | Fußtiefe |
| t_{fix} | t_{fix} |
| Toe depth | Fußtiefe |
| User choices | Benutzerauswahl |
| Corrosion | Korrosion |
| Impact | Aufprall |
| Seabed | Meeresboden |

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 54 of 83 |

| | |
|-----------------------|-------------------------------|
| Soil | Boden |
| PSFs Soil | Sicherheitsbeiwerte Boden |
| Soil type (class 4) | Bodentyp (Klasse 4) |
| Kolkschutzschütting | Kolkschutzschüttung |
| Displacement@TOP | Verschiebung an Spitze |
| Displacement@IP | Verschiebung an Aufprallpunkt |
| Stiffness@IP | Steifigkeit an Aufprallpunkt |
| Energy absorption | Energieabsorption |
| Applied toe depth | Angewandte Fußtiefe |
| Total pile length | Pfahlgesamtlänge |
| Total pile weight | Pfahlgesamtgewicht |
| No | Nr. |
| Low | Niedrig |
| High | Hoch |
| HiChar | HoChar |
| Char | Char |
| Sand moderately/dense | Sand mitteldicht/dicht |
| Ohne | Ohne |

Abbildung 26 ULS-Nachweis der Pfahlstabilität





Der SLS-Nachweis der Pfahleinspannung wird für die Wellenverhältnisse im 10-jährlichen Wiederkehrzeitraum (jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit von 1/10 und somit Wahrscheinlichkeit von 65,1 %) durchgeführt, ohne Beiwerte. Grund dafür ist, dass der SLS-Nachweis der Pfahleinspannung mit normalen Bedingungen korreliert werden soll. Siehe auch Abschnitt 8.3.

Die maximale Reaktionskraft auf die Pfähle für die Wellenverhältnisse mit einem 10-jährlichen Wiederkehrintervall beträgt 241 kN. Siehe auch

| | |
|--|--|
| Results pile forces at varying stiffness, Hs = 1.7m, dir = "head on" | Ergebnisse auf Pfähle einwirkende Kräfte bei versch. Steifigkeit, Hs = 1,7 m, Richtung = „vorlich“ |
| Total maximum pile force in [kN] | Max. auf Pfahl einwirkende Kraft in [kN] |
| Pile stiffness in kN/m | Pfahlsteifigkeit in kN/m |





Abbildung 30. Diese Kräfte wurden allerdings für eine vorliche Wellenrichtung bestimmt. Folglich wird nun in einem konservativen Ansatz die maximale Reaktionskraft als gleich dem beliebigen Wert von 500 kN angenommen. Nun wird die minimale erforderliche Pfahltiefe zu -27,95 m SKN. Siehe

| | |
|---------------|----------------------|
| Levels | Höhen |
| Pile top | Pfahlspitze |
| Impact high | Aufprall hoch |
| Impact low | Aufprall niedrig |
| Water line | Wasserlinie |
| Seabed high | Meeresboden hoch |
| Seabed nom | Meeresboden Nennhöhe |

| | | |
|--|---|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 55 of 83 |

| | |
|----------------------------|-----------------------------------|
| Seabed low | Meeresboden niedrig |
| Soil profile bottom | Bodenprofil unten |
| Seabed | Meeresboden |
| Impact | Aufprall |
| Level Mmax (V=0) | Level Mmax (V = 0) |
| Ersatz kraft | Ersatzkraft |
| Loads | Lasten |
| Force | Kraft |
| UDL | UDL |
| Factors toe depth | Beiwerte Fußtiefe |
| Passive β_{mob} | Passives β_{mob} |
| Distribution C_h | Verteilung C_h |
| Calculation summary | Berechnungszusammenfassung |
| Toe depth | Fußtiefe |
| t_{fix} | t_{fix} |
| Toe depth | Fußtiefe |
| User choices | Benutzerauswahl |
| Corrosion | Korrosion |
| Impact | Aufprall |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| PSFs Soil | Sicherheitsbeiwerte Boden |
| Soil type (class 4) | Bodentyp (Klasse 4) |
| Kolkschutzschutting | Kolkschutzschüttung |
| Displacement@TOP | Verschiebung an Spitze |
| Displacement@IP | Verschiebung an Aufprallpunkt |
| Stiffness@IP | Steifigkeit an Aufprallpunkt |
| Energy absorption | Energieabsorption |
| Applied toe depth | Angewandte Fußtiefe |
| Total pile length | Pfahlgesamtlänge |
| Total pile weight | Pfahlgesamtgewicht |
| No | Nr. |
| Low | Niedrig |
| High | Hoch |
| HiChar | HoChar |
| Char | Char |
| Sand moderately/dense | Sand mitteldicht/dicht |
| Ohne | Ohne |





Abbildung 27.

| | | |
|--|---|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 56 of 83 |

Die angewandte Fußtiefe beträgt -32 m SKN, sodass ein bequemer Einheitsnachweis von $(+12,00 - (-27,95)) / (+12,00 - (-32,00)) = 0,90$ verbleibt.

| Levels | | | Loads | | | User choices | | |
|-------------------------|--------|--------|----------------------------|--------|----------------------|---------------------|-----------------------|--------|
| Pile top | 12.00 | [mSKN] | Force | 500 | [kN] | Corrosion | No | |
| Impact high | 9.36 | [mSKN] | UDL | 0.0 | [kN/m ²] | Impact | High | |
| Impact low | 1.17 | [mSKN] | E | 128 | [kNm] | Seabed | Low | |
| Water line | 7.16 | [mSKN] | Factors toe depth | | | Soil | LoChar | |
| Seabed high | -10.80 | [mSKN] | | | | PSFs Soil | Char | |
| Seabed nom | -10.80 | [mSKN] | Passive β_{mob} | 0.33 | SLS | Soil type (class 4) | Sand moderately/dense | |
| Seabed low | -12.30 | [mSKN] | Distribution C_h | 0.50 | [-] | Kolkschutzschuttung | Ohne | |
| Soil profile bottom | -70.00 | [mSKN] | Calculation summary | | | Displacement@TOP | 353.4 | [mm] |
| Seabed | -12.30 | [mSKN] | t_0 | 8.77 | [m] | Displacement@IP | 311 | [mm] |
| Impact | 9.36 | [mSKN] | Δt | 1.51 | [m] | Stiffness@IP | 1607 | [kN/m] |
| Level Mmax (V=0) | -15.93 | [mSKN] | Toe depth | -22.58 | [mSKN] | Energy absorption | 78 | [kNm] |
| Mmax | 12107 | [kNm] | $0.2 \cdot t_0$ | 1.75 | [m] | Applied toe depth | -32.00 | [mSKN] |
| Level Ersatzkraft (M=0) | -21.07 | [mSKN] | t_{fix} | 6.88 | [m] | Total pile length | 44.00 | [m] |
| Ersatzkraft | 6154 | [kN] | Toe depth | -27.95 | [mSKN] | Total pile weight | 78.7 | [t] |

| Levels | Höhen |
|-----------------------|----------------------------|
| Pile top | Pfahlspitze |
| Impact high | Aufprall hoch |
| Impact low | Aufprall niedrig |
| Water line | Wasserlinie |
| Seabed high | Meeresboden hoch |
| Seabed nom | Meeresboden Nennhöhe |
| Seabed low | Meeresboden niedrig |
| Soil profile bottom | Bodenprofil unten |
| Seabed | Meeresboden |
| Impact | Aufprall |
| Level Mmax (V=0) | Level Mmax (V = 0) |
| Ersatz kraft | Ersatzkraft |
| Loads | Lasten |
| Force | Kraft |
| UDL | UDL |
| Factors toe depth | Beiwerte Fußtiefe |
| Passive β_{mob} | Passives β_{mob} |
| Distribution C_h | Verteilung C_h |
| Calculation summary | Berechnungszusammenfassung |
| Toe depth | Fußtiefe |
| t_{fix} | t_{fix} |
| Toe depth | Fußtiefe |
| User choices | Benutzerauswahl |
| Corrosion | Korrosion |
| Impact | Aufprall |
| Seabed | Meeresboden |

| | | |
|--|---|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 57 of 83 |



| | |
|-----------------------|-------------------------------|
| Soil | Boden |
| PSFs Soil | Sicherheitsbeiwerte Boden |
| Soil type (class 4) | Bodentyp (Klasse 4) |
| Kolkschutzschuttung | Kolkschutzschüttung |
| Displacement@TOP | Verschiebung an Spitze |
| Displacement@IP | Verschiebung an Aufprallpunkt |
| Stiffness@IP | Steifigkeit an Aufprallpunkt |
| Energy absorption | Energieabsorption |
| Applied toe depth | Angewandte Fußtiefe |
| Total pile length | Pfahlgesamtlänge |
| Total pile weight | Pfahlgesamtwicht |
| No | Nr. |
| Low | Niedrig |
| High | Hoch |
| HiChar | HoChar |
| Char | Char |
| Sand moderately/dense | Sand mitteldicht/dicht |
| Ohne | Ohne |

Abbildung 27 SLS-Nachweis der Pfahleinspannung

8.4.2 Grenzzustand der Ermüdung

Zur Ermittlung der maßgeblichen Kräfte im Grenzzustand der Ermüdung wurde der gleiche Ansatz verfolgt wie für den STR/GEO-Grenzzustand. Die Systemantwort des Ansys-AQWA-Modells (Pfahlreaktionskraft in kN als Funktion der Pfahlsteifigkeit in kN/m) wurde anhand von Modelldurchläufen mit definierenden Steifigkeiten erarbeitet. Diese definierenden Steifigkeiten sind diejenigen Steifigkeiten bei niedriger und hoher Aufprallstärke sowie diejenige Steifigkeit von 5.000 kN/m, die die höchste Reaktionskraft bei 241 kN ergeben.

| | |
|---------------|-----------------------|
| Freeboard | Freibord |
| Return period | Wiederkehrintervall |
| Diameter | Durchmesser |
| Wand dikte | Wanddicke |
| Kolkschuttung | Kolkschutzschüttung |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| MIT | MIT |
| High | Hoch |
| HiChar | HoChar |
| Frep [kN] | F _{rep} [kN] |

| | | |
|---|--|---|
|  | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 58 of 83 |

| | |
|--|-------------------------------------|
| Force in [kN] | Kraft in [kN] |
| Displacement w at impact level in [mm] | Verschiebung w bei Aufprall in [mm] |

Abbildung 28 zeigt das Kraftverschiebungsdiagramm, das mit dem DMC-Blum-Tabellenblatt erstellt wurde und aus dem die Pfahlsteifigkeit bei hoher Aufprallstärke (im Ansys-AQWA-Modell verwendet) abgeleitet wurde.

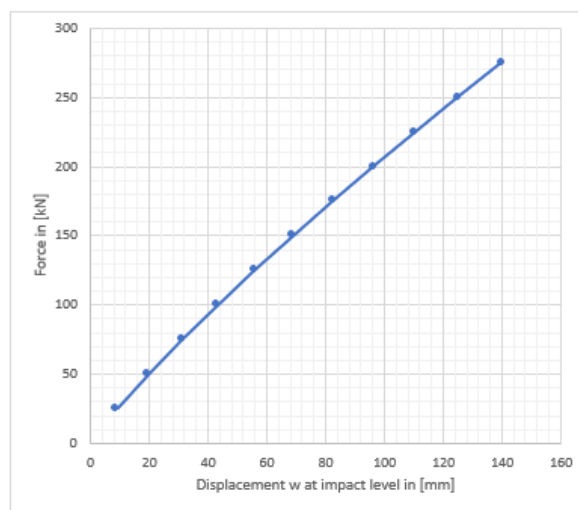
| | |
|--|-------------------------------------|
| Freeboard | Freibord |
| Return period | Wiederkehrintervall |
| Diameter | Durchmesser |
| Wand dicke | Wanddicke |
| Kolkschüttung | Kolkschutzschüttung |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| OHNE | OHNE |
| Low | Niedrig |
| LowChar | NieChar |
| Frep [kN] | F _{rep} [kN] |
| Force in [kN] | Kraft in [kN] |
| Displacement w at impact level in [mm] | Verschiebung w bei Aufprall in [mm] |

Abbildung 29 zeigt das Kraftverschiebungsdiagramm, das mit dem DMC-Blum-Tabellenblatt erstellt wurde und aus dem die Pfahlsteifigkeit bei niedriger Aufprallstärke (im Ansys-AQWA-Modell verwendet) abgeleitet wurde.





| | | |
|---------------|---------|---------|
| HW | 6.40 | [mSKN] |
| Freeboard | 2.20 | [m] |
| Return period | 10 | [years] |
| Diameter | 1500 | [mm] |
| Wand dicke | 50 | [mm] |
| Kolkschüttung | OHNE | |
| Seabed | Low | |
| Soil | LowChar | |

| | Frep [kN] | w [mm] | w [m] | k [kN/m] |
|----|-----------|--------|---------|----------|
| 1 | 25 | 9 | 0.00895 | 2793 |
| 2 | 50 | 20 | 0.01956 | 2556 |
| 3 | 75 | 31 | 0.03106 | 2415 |
| 4 | 100 | 43 | 0.04319 | 2315 |
| 5 | 125 | 56 | 0.05583 | 2239 |
| 6 | 150 | 69 | 0.06893 | 2176 |
| 7 | 175 | 82 | 0.08244 | 2123 |
| 8 | 200 | 96 | 0.09631 | 2077 |
| 9 | 225 | 111 | 0.11053 | 2036 |
| 10 | 250 | 125 | 0.12508 | 1999 |
| 11 | 275 | 140 | 0.13993 | 1965 |

2245



| | |
|-----------|----------|
| Freeboard | Freibord |
|-----------|----------|

| | | |
|--|---|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 59 of 83 |

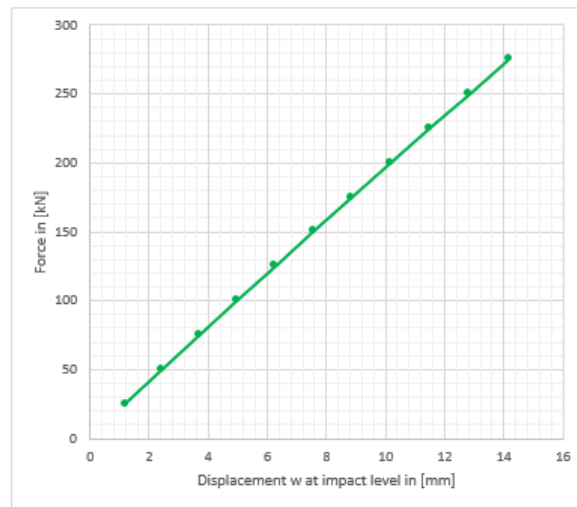
| | |
|--|-------------------------------------|
| Return period | Wiederkehrintervall |
| Diameter | Durchmesser |
| Wand dicke | Wanddicke |
| Kolkschuttung | Kolkschutzschüttung |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| MIT | MIT |
| High | Hoch |
| HiChar | HoChar |
| Frep [kN] | F _{rep} [kN] |
| Froce in [kN] | Kraft in [kN] |
| Displacement w at impact level in [mm] | Verschiebung w bei Aufprall in [mm] |

Abbildung 28 Pfahlsteifigkeit bei hoher Aufprallstärke



| | | |
|---------------|--------|---------|
| LW | -0.71 | [mSKN] |
| Freeboard | 2.20 | [m] |
| Return period | 10 | [years] |
| Diameter | 1500 | [mm] |
| Wand dicke | 50 | [mm] |
| Kolkschuttung | MIT | |
| Seabed | High | |
| Soil | HiChar | |

| | Frep [kN] | w [mm] | w [m] | k [kN/m] |
|----|--------------|-----------|----------|-------------|
| 1 | 25 | 1 | 0.00120 | 20833 |
| 2 | 50 | 2 | 0.00244 | 20492 |
| 3 | 75 | 4 | 0.00370 | 20270 |
| 4 | 100 | 5 | 0.00497 | 20121 |
| 5 | 125 | 6 | 0.00626 | 19968 |
| 6 | 150 | 8 | 0.00756 | 19841 |
| 7 | 175 | 9 | 0.00887 | 19729 |
| 8 | 200 | 10 | 0.01018 | 19646 |
| 9 | 225 | 12 | 0.01151 | 19548 |
| 10 | 250 | 13 | 0.01284 | 19470 |
| 11 | 275 | 14 | 0.01418 | 19394 |

19938

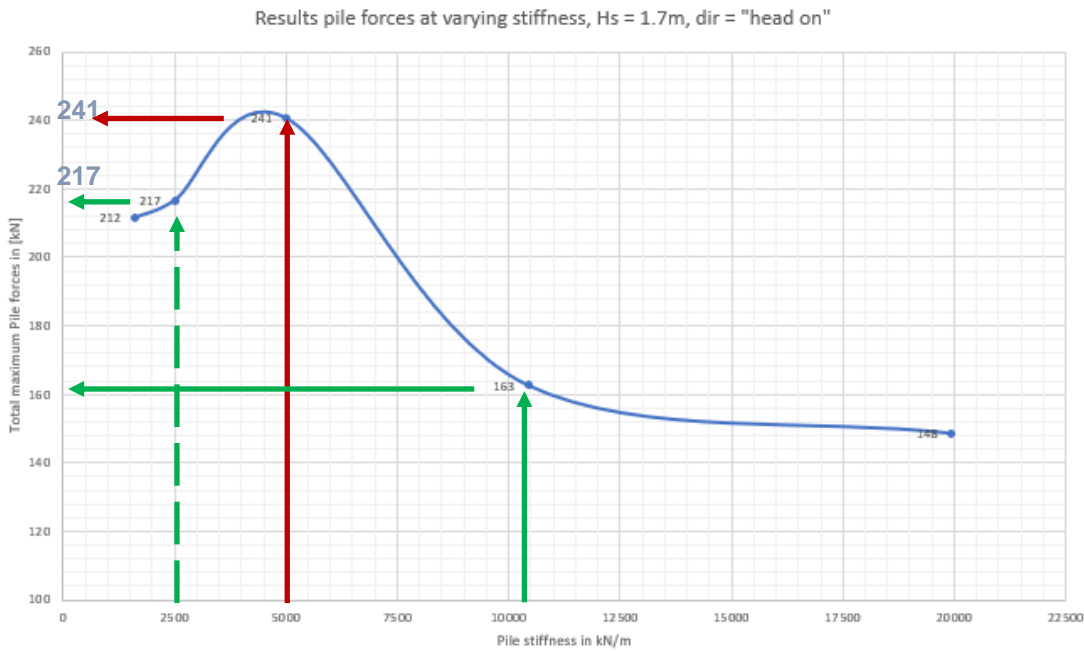


| | |
|---------------|-----------------------|
| Freeboard | Freibord |
| Return period | Wiederkehrintervall |
| Diameter | Durchmesser |
| Wand dicke | Wanddicke |
| Kolkschuttung | Kolkschutzschüttung |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| OHNE | OHNE |
| Low | Niedrig |
| LowChar | NieChar |
| Frep [kN] | F _{rep} [kN] |

| | | |
|---|--|---|
|  | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 60 of 83 |

| | |
|--|-------------------------------------|
| Froce in [kN] | Kraft in [kN] |
| Displacement w at impact level in [mm] | Verschiebung w bei Aufprall in [mm] |

Abbildung 29 Pfahlsteifigkeit bei niedriger Aufprallstärke



| | |
|--|--|
| Results pile forces at varying stiffness, Hs = 1.7m, dir = "head on" | Ergebnisse auf Pfähle einwirkende Kräfte bei versch. Steifigkeit, Hs = 1,7 m, Richtung = „vorlich“ |
| Total maximum pile force in [kN] | Max. auf Pfahl einwirkende Kraft in [kN] |
| Pile stiffness in kN/m | Pfahlsteifigkeit in kN/m |

Abbildung 30 Pfahlreaktionskraft als Funktion der Pfahlsteifigkeit im Grenzzustand der Ermüdung

Die Pfähle schwanken hin und her, wobei die Spannung von maximal positiv zu maximal negativ wechselt (oder umgekehrt). Im Grenzzustand der Ermüdung wird der Reaktionskraftbereich berücksichtigt (statt der maximalen Reaktionskraft), wodurch sich ein Spannungsbereich ergibt. Dieser ist im Hinblick auf den in Ref. [1] bestimmten maximal zulässigen Spannungsbereich nachzuweisen.

Das Ergebnis der Durchgänge des Ansys-AQWA-Modells ist pro Pfahl, Reaktionskräfte in Längsrichtung (x-Achse des Pontons) und Querrichtung (y-Achse des Pontons) zu verstehen. In beiden Richtungen werden der maximale positive Wert und der maximale negative Wert angegeben. Der Bereich der maximalen Reaktionskraft wird anhand der Formeln ermittelt, die in Abbildung 31 aufgeführt sind.

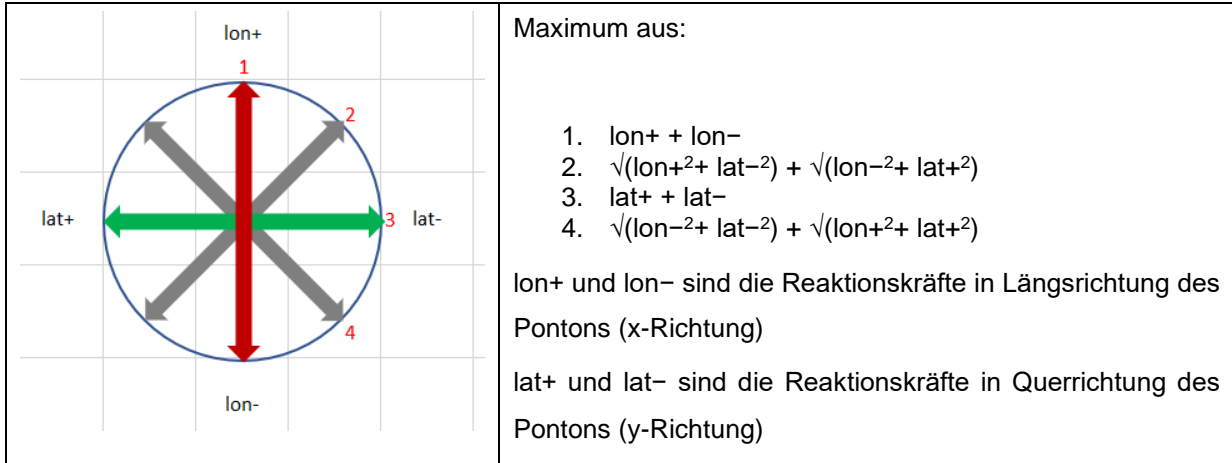






Abbildung 31 Bestimmung des Bereichs der maximalen Reaktionskraft für Ermüdung

| Kräfte in | LN | 19938 | 10434 | 5000 | 2500 | 1599 |
|-----------|-----|-------|-------|------|------|------|
| | | Side | Si1 | 168 | 215 | 342 |
| | Si2 | 160 | 206 | 325 | 297 | 292 |
| | Si3 | 154 | 197 | 311 | 284 | 278 |
| | Si4 | 156 | 189 | 307 | 284 | 277 |
| | Si5 | 161 | 194 | 319 | 298 | 294 |
| | Si6 | 167 | 202 | 335 | 315 | 313 |
| Stern | S1 | 194 | 247 | 408 | 363 | 356 |
| | S2 | 198 | 253 | 424 | 370 | 360 |
| | S3 | 202 | 260 | 440 | 378 | 365 |
| Bow | B1 | 191 | 231 | 400 | 368 | 371 |
| | B2 | 198 | 239 | 416 | 376 | 375 |
| | B3 | 209 | 247 | 433 | 384 | 380 |
| | MAX | 209 | 260 | 440 | 384 | 380 |

| | |
|------------------------------------|--|
| Side | Seite |
| Stern | Heck |
| Bow | Bug |
| MAX | MAX |
| Pile forces in kN | Auf Pfähle einwirkende Kräfte in kN |
| Stiffness of pile supports in kN/m | Steifigkeit der Führungspfähle in kN/m |
| Series1 | Serie 1 |
| Series 2 | Serie 2 |

Tabelle 5 Maximale Reaktionskraftbereiche pro Pfahl in kN für mehrere Steifigkeitsdurchgänge

| | |
|-------|-------|
| Side | Seite |
| Stern | Heck |

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 62 of 83 |

| | |
|------------------------------------|--|
| Bow | Bug |
| MAX | MAX |
| Pile forces in kN | Auf Pfähle einwirkende Kräfte in kN |
| Stiffness of pile supports in kN/m | Steifigkeit der Führungspfähle in kN/m |
| Series1 | Serie 1 |
| Series 2 | Serie 2 |

Tabelle 5 zeigt die Reaktionskräfte in kN für die 12 Pfähle (siehe Abbildung 2 bezüglich der Nummerierung der Pfähle) für die Pfahlsteifigkeiten 19.938, 10.434, 5.000, 2.500 und 1.599 kN/m. Der maximale Kraftbereich tritt in Pfahl S3 für eine Pfahlsteifigkeit von 5.000 kN/m auf.

| | |
|------------------------------------|--|
| Pile forces in kN | Auf Pfähle einwirkende Kräfte in kN |
| Stiffness of pile supports in kN/m | Steifigkeit der Führungspfähle in kN/m |

Abbildung 32 zeigt Diagramme sowohl für die maximalen Reaktionskräfte (

| | |
|--|--|
| Results pile forces at varying stiffness, Hs = 1.7m, dir = "head on" | Ergebnisse auf Pfähle einwirkende Kräfte bei versch. Steifigkeit, Hs = 1,7 m, Richtung = „vorlich“ |
| Total maximum pile force in [kN] | Max. auf Pfahl einwirkende Kraft in [kN] |
| Pile stiffness in kN/m | Pfahlsteifigkeit in kN/m |

Abbildung 30) als auch für die maximalen Reaktionskraftbereiche (

| | |
|------------------------------------|--|
| Side | Seite |
| Stern | Heck |
| Bow | Bug |
| MAX | MAX |
| Pile forces in kN | Auf Pfähle einwirkende Kräfte in kN |
| Stiffness of pile supports in kN/m | Steifigkeit der Führungspfähle in kN/m |
| Series1 | Serie 1 |
| Series 2 | Serie 2 |





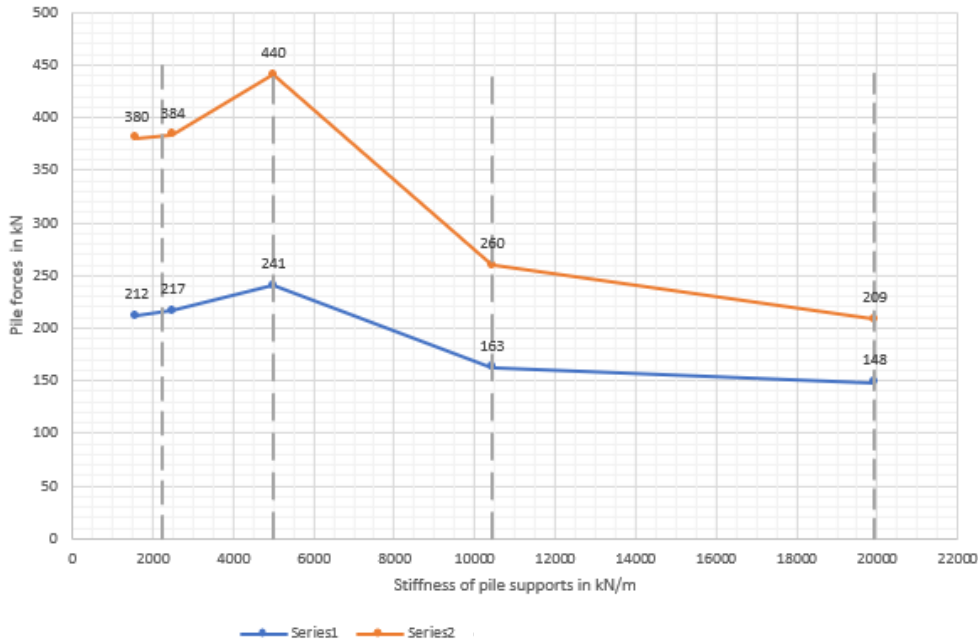
| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 63 of 83 |

Tabelle 5). Es wurde festgestellt, dass die in Abbildung 31 gezeigte verwendete Methode einen niedrigeren Reaktionskraftbereich als das Zweifache der maximalen Reaktionskraft ergibt.







| | |
|------------------------------------|--|
| Pile forces in kN | Auf Pfähle einwirkende Kräfte in kN |
| Stiffness of pile supports in kN/m | Steifigkeit der Führungspfähle in kN/m |

Abbildung 32 Auf die Pfähle einwirkende Kräfte als Funktion der Pfahlsteifigkeit

Für die Extremstärken und Spitzenbereiche wird das BLUM-Tabellenblatt zur Ermittlung der maximalen Momente im Pfahl verwendet. Dabei werden auch Kombinationen von Bodenparametern (niedrig, mittel und hoch) und das Meeresbodenniveau (hoch und niedrig) berücksichtigt. Diese Kombinationen und die daraus resultierenden Spannungsbereiche werden in

| | |
|-----------|-------------|
| Stiffness | Steifigkeit |
| Impact | Aufprall |
| Seabed | Meeresboden |
| Low | Niedrig |
| High | Hoch |
| LoChar | NieChar |
| HiChar | HoChar |

Tabelle 6 gezeigt.

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 64 of 83 |

| W_el= | 7.99E+07 | [mm ³] | | | | | | | | | |
|-------|-----------|--------------------|--------|--------|--------|-----------|------|------|--------|----------------------|--|
| CMB | Stiffness | ΔF | Impact | Seabed | Soil | chutzschu | F | Fw+c | Moment | Stress | |
| [-] | [kN/m] | [kN] | [mSKN] | [-] | [-] | [-] | [kN] | [kN] | [kNm] | [N/mm ²] | |
| 1 | 2055 | 384 | 8.60 | Low | LoChar | Ohne | 192 | 23 | 4832 | 121 | |
| 2 | 5001 | 440 | 2.02 | Low | LoChar | Ohne | 220 | 26 | 3990 | 100 | |
| 3 | 4999 | 440 | 2.18 | Low | LoChar | Mit | 220 | 26 | 3911 | 98 | |
| 4 | 5002 | 440 | 4.44 | High | HiChar | Ohne | 220 | 26 | 4107 | 103 | |
| 5 | 5000 | 440 | 8.24 | High | HiChar | Mit | 220 | 26 | 4696 | 118 | |
| 6 | 10250 | 260 | 4.19 | High | HiChar | Mit | 130 | 16 | 2194 | 55 | |
| 7 | 18511 | 209 | 1.49 | High | HiChar | Mit | 105 | 13 | 1454 | 36 | |





| | |
|-----------|-------------|
| Stiffness | Steifigkeit |
| Impact | Aufprall |
| Seabed | Meeresboden |
| Low | Niedrig |
| High | Hoch |
| LoChar | NieChar |
| HiChar | HoChar |

Tabelle 6 Resultierende Spannungen bei Steifigkeiten mit maximaler, hoher und niedriger Aufprallstärke für den Grenzzustand der Ermüdung (T = 10 Jahre)

8.4.3 Eiseinwirkung



Die Eiseinwirkung wurde in Übereinstimmung mit Abschnitt 4.11.2 und 4.11.3.1 von Ref. [19] berücksichtigt. Hinsichtlich einer Betrachtung der zur Berechnung der Eiskraft relevanten Parameter wird auf Ref. [1] verwiesen. Da der Pfahl auch im Hinblick auf höhere Kräfte und Aufprallstärken bewertet wurde, wird gefolgert, dass die Eiseinwirkung nicht maßgeblich ist.

| | | |
|---|-------|----------------------|
| Porosität | 292 | [‰] |
| Salzgehalt (Tab. 4.13) | 12 | [‰] |
| Temperatur an der Unterseite der Eisschicht | -2,0 | [°C] |
| Temperatur an der Oberseite der Eisschicht | 1,0 | [°C] |
| Durchschnittliche Eistemperatur | 1,5 | [°C] |
| | | |
| Eisdruckfestigkeit | 0,926 | [MN/m ²] |
| Spezifische Dehnungsgeschwindigkeit | 0,001 | [s ⁻¹] |


| | | |
|--|---|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 65 of 83 |

| | | |
|---------------------------------------|-------|--------|
| | | |
| Durchschnittliche Leinenlast | 0,122 | [MN/m] |
| Kontaktkoeffizient | 0,33 | [-] |
| Eisdicke (Tab. 4.14) | 0,40 | [m] |
| | | |
| Ponton-Länge | 67 | [m] |
| Anzahl der eisdruckbeständigen Pfähle | 12 | [m] |
| Kraft per Dalben | 683 | [kN] |

Tabelle 7 Numerische Werte der Parameter zur Berechnung der Eiseinwirkung

| | | |
|---|--|---|
|  | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 66 of 83 |

9. ERGEBNISSE

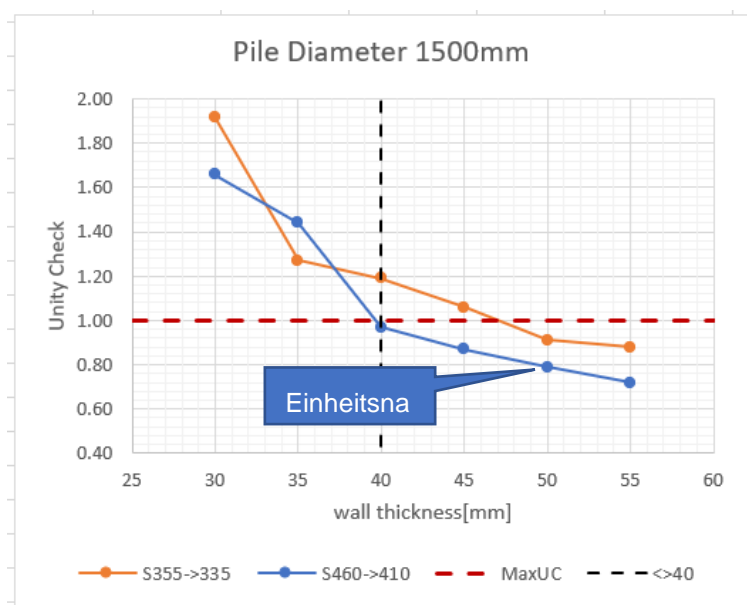
| | |
|--|---|
| Wichtige Hinweise |  |
| <ul style="list-style-type: none"> • Es gelten strenge Vorgaben für die Herstellung und Installation. • Nichtvertikalität der Pfähle und andere Unregelmäßigkeiten führen zu zusätzlichen Kräften auf die Pfähle, da sie eine ungleiche Lastverteilung mit sich bringen. | |



9.1 STR/GEO-Ergebnisse und Grenzzustand der Ermüdung

Es wurde gefolgert, dass für den Abschnittsnachweis im STR/GEO-Grenzzustand die Kombination 4 maßgeblich ist.

| | |
|----------------------|--------------------------------|
| Pile Diameter 1500mm | Pfahldurchmesser 1.500 mm |
| Unity Check | Einheitsnachweis (Unity Check) |
| wall thickness [mm] | Wanddicke [mm] |
| MaxUC | MaxUC |

Abbildung 33 zeigt die Einheitsnachweise für die Wanddicken von 30 bis 60 mm für 1.500 mm Durchmesser und für 2 Stahlgüten, S355 und S460, in Kombination 4. Ab und über $t = 40$ mm haben diese Qualitäten eine reduzierte Streckgrenze. Zu beachten ist, dass sowohl die Wanddicke als auch die Stahlqualität die Klasse des Abschnitts und somit den Einheitsnachweis beeinflussen.



| | | |
|---|--|---|
|  | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 67 of 83 |

| | |
|----------------------|--------------------------------|
| Pile Diameter 1500mm | Pfahldurchmesser 1.500 mm |
| Unity Check | Einheitsnachweis (Unity Check) |
| wall thickness [mm] | Wanddicke [mm] |
| MaxUC | MaxUC |

Abbildung 33 Einheitsnachweise für $D = 1.500$ und Güte S355/460

Der zulässige Bereich der Ermüdungsspannung wurde in Ref. [1] bestimmt. Er beträgt 130 N/mm^2 . In

| | |
|-----------|-------------|
| Stiffness | Steifigkeit |
| Impact | Aufprall |
| Seabed | Meeresboden |
| Low | Niedrig |
| High | Hoch |
| LoChar | NieChar |
| HiChar | HoChar |

Tabelle 6 kann beobachtet werden, dass der maximale eintretende Spannungsbereich 121 N/mm^2 beträgt. Der Ermüdungsnachweis ist folglich zufriedenstellend.

In Abschnitt 8.4.1 wurde festgestellt, dass die Pfahleinspannung im SLS und die Pfahlstabilität im ULS zufriedenstellend sind. Oder, einfach ausgedrückt: Die Nachweise zeigen, dass die Pfähle tief genug sind.





In dieser Phase, in der die Widerstandsfähigkeit der maßgebliche Bemessungsfaktor ist, erachtet DMC die nachstehende Option für durchführbar, wenn der STR/GEO-Grenzzustand (ULS), der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) und die Ermüdung berücksichtigt werden.

| Teil | Länge [m] | D-t [mm] | Stahlqualität |
|-------|-----------|----------|---------------|
| Oben | 16 | D1500-50 | S355 |
| Mitte | 22 | D1500-50 | S460 |
| Unten | 6 | D1500-50 | S355 |

9.2 Zusätzliche Analysen

Es wurden folgende zusätzlichen Analysen durchgeführt:

1. Einfluss des unteren niedrigen charakteristischen Werts des inneren Reibungswinkels von Schicht L5
2. Abschnittsnachweis im STR/GEO bei Niedrigwasser Güte S355 mit Lochfraßkorrosion
3. Nachweis Grenzzustand der Ermüdung bei Niedrigwasser durch Vergleich maximales Biegemoment im Boden mit Biegemoment bei Niedrigwasser
4. Einfluss der Axialkraft aufgrund des Pfahlgewichts und der abwärts gerichteten Reibung zwischen dem Pfahl und dem Ponton
5. Gruppenwirkung

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 68 of 83 |

9.2.1 Innerer Reibungswinkel $\phi = 32,5^\circ$ (NieChar) für Schicht L5

Der Reibungswinkel geht in den unteren Werten über 35 , weswegen das DMC-Blum-Tabellenblatt durch die Eingabe eines inneren Reibungswinkels von $32,5^\circ$ für Schicht L5 geändert wurde. Zu beachten ist, dass die Pfahltiefe bei $-32,0$ m SKN liegt, sodass die Schichten L6 und L7 für die Pfahlbemessung nicht relevant sind. Die Auswirkungen der Verwendung eines Werts von 32° für Schicht L5 anstelle von $37,40$ sind unerheblich.





| Soil profile | | | Level | | LoChar | Expected | HiChar |
|--------------|------|---------------------|--------|--------|----------------------|----------|--------|
| ID | Name | Layer-thickness [m] | Top | Bottom | Friction angel [DEG] | | |
| | | | [mSKN] | [mSKN] | | | |
| 1 | L1 | 2.63 | -12.30 | -13.43 | 25.00 | 25.00 | 30.00 |
| 2 | L2 | 3.07 | -13.43 | -16.50 | 25.00 | 27.50 | 30.00 |
| 3 | L3 | 6.78 | -16.50 | -23.28 | 31.00 | 35.40 | 37.00 |
| 4 | L4 | 6.52 | -23.28 | -29.80 | 32.50 | 34.60 | 37.00 |
| 5 | L5 | 7.98 | -29.80 | -37.78 | 37.40 | 38.00 | 42.00 |
| 6 | L6 | 2.80 | -37.78 | -40.58 | 34.20 | 35.00 | 37.10 |
| 7 | L7 | 10.60 | -40.58 | -51.18 | 37.60 | 38.40 | 39.90 |

| | |
|----------------------|-----------------------|
| Soil profile | Bodenprofil |
| ID | ID |
| Name | Bezeichnung |
| Layer-thickness [m] | Schichtdicke [m] |
| Level | Wasserstand |
| Top | Oben |
| Bottom | Unten |
| LoChar | NieChar |
| Expected | Erwartet |
| HiChar | HoChar |
| Friction angel [DEG] | Reibungswinkel [Grad] |

Tabelle 8 Bodenprofil (niedriger Meeresboden) mit charakteristischen Werten für den inneren Reibungswinkel

9.2.2 STR/GEO-Grenzzustandsprüfung bei Niedrigwasser

Der Schwerpunkt der STR/GEO-Grenzzustandsprüfung war das maximale Biegemoment. Dieses maximale Biegemoment tritt im Boden auf, wo die Korrosionsraten niedrig sind. Rund um die Niedrigwassermarke ist die Korrosion wesentlich gravierender. Aus Ref. [23] geht hervor, dass Korrosionsraten von über 1 mm pro Jahr verzeichnet wurden.

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 69 of 83 |

2.2.4 Low Water Zone (0.5 m Below MLWS to LAT)

Corrosion in this zone is relatively severe due to differential aeration at the uppermost point of continuous steel immersion, where electrolyte is permanent and oxygen levels peak. Corrosion rates of 0.08 to 0.17 mm/side/year are typical, but they can become very severe (concentrated) due to MIC by SRB and/or metal-reducing bacteria (MRB). With ALWC, typical corrosion rates of 0.5 mm/side/year can be expected, and rates in excess of 1 mm/side/year have been reported.





| 2.2.4 Low Water Zone (0.5 m Below MLWS to LAT) | 2.2.4 Niedrigwasserzone (0,5 m unter MSpNW bis LAT) |
|--|---|
| Corrosion in this zone is relatively severe due to differential aeration at the uppermost point of continuous steel immersion, where electrolyte is permanent and oxygen levels peak. Corrosion rates of 0.08 to 0.17 mm/side/year are typical, but they can become very severe (concentrated) due to MIC by SRB and/or metal-reducing bacteria (MRB). With ALWC, typical corrosion rates of 0.5 mm/side/year can be expected, and rates in excess of 1 mm/side/year have been reported. | In dieser Zone kommt es zu vergleichsweise starker Korrosion. Dies liegt an der wechselhaften Belüftung am obersten dauerhaften Stahleintauchpunkt. Damit ist der Stahl permanent dem Meerwasser als Elektrolyt ausgesetzt. Zudem erreicht der Sauerstoffgehalt dort Spitzenwerte. Typische Abrostungsraten betragen 0,08 bis 0,17 mm/Seite/Jahr. Infolge schwefel- (SRB) und/oder metallreduzierender Bakterien (MRB) kann es jedoch zu sehr starker (konzentrierter) mikrobiell beeinflusster Korrosion (MIC) kommen. Bei beschleunigter Korrosion in der Niedrigwasserzone (ALWC) sind typische Abrostungsraten von 0,50 mm/Seite/Jahr zu erwarten. Es werden auch Raten von über 1,00mm/Seite/Jahr berichtet. |

Tabelle 9 Auszug aus Ref. [23]

Zudem hat der Pfahl bei Niedrigwasser die Güte S355. Es wurde ein Nachweis mit dem DMC-Blum-Tabellenblatt bei einer Niedrigwasserkorrosion von $10 \times 1,0 = 10$ mm Korrosion und einer Streckgrenze von 335 N/mm^2 und in der maßgeblichen Kombination 4 durchgeführt. Der Einheitsnachweis für den oberen Abschnitt von 16 Meter Länge mit Güte S355 ergibt 0,53 und ist somit zufriedenstellend.

9.2.3 Nachweis des Grenzzustands der Ermüdung bei Niedrigwasser

Die S-N-Kurve, die in den Ermüdungsanalysen verwendet wurde, ist Kurve F aus Ref. [14] mit einem Spannungskonzentrationsfaktor von 1,27. Siehe Ref. [1]. Diese Tabelle ist für Stahlelemente mit kathodischem Korrosionsschutz in Meerwasser geeignet. Gravierende Korrosion tritt meist im Niedrigwasserbereich auf, der zwischen nass und trocken wechselt. Für diesen Bereich gilt eine höhere Spannungskonzentration.

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 70 of 83 |

2.4.5 S-N curves in seawater with cathodic protection

S-N curves for seawater environment with cathodic protection are given in Table 2-2 and Figure 2-8. The T curve is shown in Figure 2-9. For shape of S-N curves see also comment in 2.4.4.

| S-N curve | $N \leq 10^6$ cycles | | $N > 10^6$ cycles $\log \bar{a}_2$ $m_2 = 5.0$ | Fatigue limit at 10^7 cycles*) | Thickness exponent k | Stress concentration in the S-N detail as derived by the hot spot method |
|-----------|----------------------|------------------|--|-------------------------------------|---|--|
| | m_1 | $\log \bar{a}_1$ | | | | |
| B1 | 4.0 | 14.917 | 17.146 | 106.97 | 0 | |
| B2 | 4.0 | 14.685 | 16.856 | 93.59 | 0 | |
| C | 3.0 | 12.192 | 16.320 | 73.10 | 0.15 | |
| C1 | 3.0 | 12.049 | 16.081 | 65.50 | 0.15 | |
| C2 | 3.0 | 11.901 | 15.835 | 58.48 | 0.15 | |
| D | 3.0 | 11.764 | 15.606 | 52.63 | 0.20 | 1.00 |
| E | 3.0 | 11.610 | 15.350 | 46.78 | 0.20 | 1.13 |
| F | 3.0 | 11.455 | 15.091 | 41.52 | 0.25 | 1.27 |
| F1 | 3.0 | 11.299 | 14.832 | 36.84 | 0.25 | 1.43 |
| F3 | 3.0 | 11.146 | 14.576 | 32.75 | 0.25 | 1.61 |
| G | 3.0 | 10.998 | 14.330 | 29.24 | 0.25 | 1.80 |
| W1 | 3.0 | 10.861 | 14.101 | 26.32 | 0.25 | 2.00 |
| W2 | 3.0 | 10.707 | 13.845 | 23.39 | 0.25 | 2.25 |
| W3 | 3.0 | 10.570 | 13.617 | 21.05 | 0.25 | 2.50 |
| T | 3.0 | 11.764 | 15.606 | 52.63 | 0.25 for SCF \leq 10.0 0.30 for SCF $>$ 10.0 | 1.00 |





*) see also 2.11

| 2.4.5 S-N curves in seawater with cathodic protection | 2.4.5 S-N-Kurven in Meerwasser mit kathodischem Korrosionsschutz |
|--|--|
| S-N curves for seawater environment with cathodic protection are given in Table 2-2 and Figure 2-8. The T curve is shown in Figure 2-9. For shape of S-N curves see also comment in 2.4.4. | Tabelle 2-2 und Abbildung 2-8 geben S-N-Kurven in Meerwasserumgebungen mit kathodischem Korrosionsschutz an. Die T-Kurve ist in Abbildung 2-9 dargestellt. Zur S-N-Kurvenform siehe auch den Kommentar in 2.4.4. |
| Table 2-2 S-N curves in seawater with cathodic protection | Tabelle 2-2 S-N-Kurven in Meerwasser mit kathodischem Korrosionsschutz |
| S-V curve | S-N-Kurve |
| $N < 10^6$ cycles | $N \leq 10^6$ Zyklen |
| $N > 10^6$ cycles | $N > 10^6$ Zyklen |
| Fatigue limit at 10^7 cycles*) | Ermüdungsgrenze bei 10^7 Zyklen *) |
| Thickness exponent k | Dicken-Exponent k |
| Stress concentration in the S-N detail as derived by the hot spot method | Spannungskonzentration im S-N-Detail wie aus Hot-Spot-Methode hergeleitet |
| 0.25 for SCF \leq 10.0 | 0,25 bei SCF \leq 10,0 |
| 0.30 for SCF $>$ 10.0 | 0,30 bei SCF $>$ 10,0 |
| *) see also 2.11 | *) siehe auch 2.11 |

Abbildung 34 Tabelle 2.4.5 aus Ref. [14]

S-N-Kurven für den Wechsel von Luft und Seewasser ohne kathodischen Schutz sind in Ref. [14] nicht angegeben. Daher wurde folgender Ansatz gewählt. Der maßgebliche Bereich der Spannung am Ort des maximalen Biegemoments liegt bei 121 N/mm². Siehe auch Abschnitt 8.4.1 und

| | |
|-----------|-------------|
| Stiffness | Steifigkeit |
|-----------|-------------|

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 71 of 83 |

| | |
|--------|-------------|
| Impact | Aufprall |
| Seabed | Meeresboden |
| Low | Niedrig |
| High | Hoch |
| LoChar | NieChar |
| HiChar | HoChar |

Tabelle 6. Wenn die auftretende Spannung bei Niedrigwasser kleiner ist als $121 / 2,0 \approx 60 \text{ N/mm}^2$, dann ist die Ermüdung bei Niedrigwasser nicht maßgeblich. Dies ist die ingenieurmäßige Bewertung.

Das maximale Biegemoment in der maßgeblichen Kombination des Grenzzustands der Ermüdung 1 ist gleich 4.832 kNm. Das Biegemoment bei Niedrigwasser, $-0.71 \text{ m SKN (T = 10)}$, ist gleich 2.000 kNm. Die Spannung bei niedrigem Wasserstand beträgt ca. $2.000 / 4.832 \times 121 \approx 50 \text{ N/mm}^2$.

9.2.4 Effekt zweiter Ordnung aufgrund der Axialkraft

Der Pfahl wiegt 78,7 [t]. Die Axialkraft auf den Abschnitt des maximalen Biegemoments ist gleich: $(12 - (-16,46)) / (12 - (-32)) \times 78,7 \times 9,81 \times 1,35 = 674 \text{ kN}$.

Die maximale Reaktionskraft auf den Pfahl beträgt 1.295 kN (einschließlich der unmittelbar auf den Pfahl wirkenden Strömung und Wellen). Angesichts einer Reibung von 0,40 beträgt die nach unten gerichtete Reibungskraft auf den Pfahl, die noch zu den Druckkräften hinzukommt, 518 kN.



Der Axialdruck im maßgeblichen Abschnitt aufgrund des Gewichts und der Reibung beträgt $(500 + 518) \times 10^3 / 227.294 = 5,3 \text{ N/mm}^2$. Das Biegemoment beträgt in der maßgeblichen Kombination des STR/GEO-Grenzzustands 30.883 kNm. Der Pfahl gibt nur geringfügig nach. (Der Einheitsnachweis für Klasse 3 liegt bei 1,04.) Folglich können die zusätzlichen Druckkräfte von $5,3 \text{ N/mm}^2$ außer Acht gelassen werden.

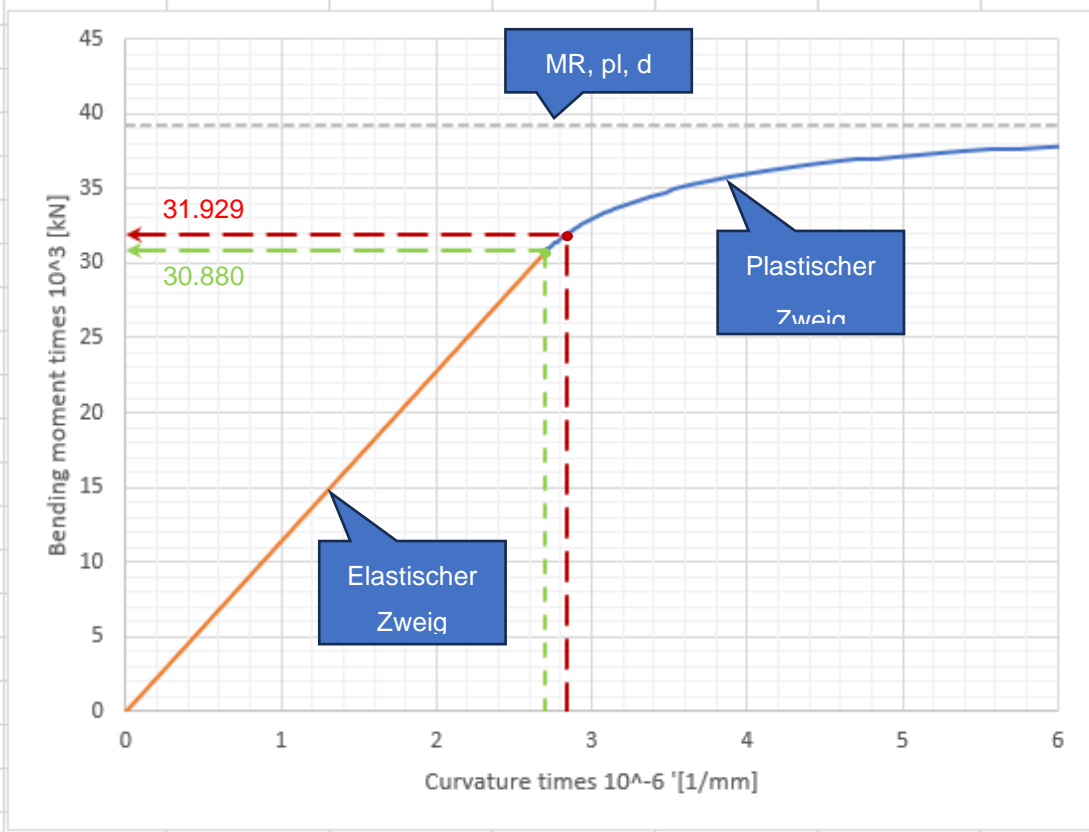
Der Effekt zweiter Ordnung des Pfahls errechnet sich aus der Axialkraft multipliziert mit der Pfahllänge multipliziert mit der Neigung (die konservativ mit 1/50 angenommen wird) und beträgt somit $\Delta M = 1.192 \times 44/50 = 1.049 \text{ kNm}$. Aus dem DMC-Blum-Tabellenblatt geht hervor, dass eine zusätzliche Kraft von $1.336 - 1.295 = 41 \text{ kN}$ auf den Pfahl angewandt werden muss, um dieses ΔM zu erreichen.

Im Ergebnis steigt das Biegemoment in der maßgeblichen Kombination 4 aufgrund des Effekts zweiter Ordnung von 30.880 kNm auf 31.929 kNm.

| | |
|----------------------------------|----------------------------------|
| Bending moment times 10^3 [kN] | Biegemoment $\times 10^3$ [kN] |
| Curvature times 10^6 [1/mm] | Krümmung $\times 10^{-6}$ [1/mm] |

Abbildung 35 zeigt, dass das gestiegene Biegemoment noch am Anfang des plastischen Zweigs liegt und der Abschnitt ihm somit standhalten kann. Dies lässt den Schluss zu, dass der Effekt zweiter Ordnung nur einen geringen Einfluss hat.

| | | |
|---|--|---|
|  | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| | | Page 72 of 83 |



| | |
|---|------------------------------------|
| Bending moment times 10 ³ [kN] | Biegemoment x 10 ³ [kN] |
| Curvature times 10 ⁻⁶ [1/mm] | Krümmung x 10 ⁻⁶ [1/mm] |



Abbildung 35 Steigerung des Biegemoments aufgrund des Effektes zweiter Ordnung der Axialkraft

9.2.5 Gruppenwirkung

Eine direkt auf die Gruppenwirkung bezogene Bewertung wurde in diesem Dokument nicht vorgenommen. Es wurde vielmehr die Sensitivität der Minderung des Erddrucks auf den Pfahl untersucht.

Blum geht von der vollständigen Mobilisierung des passiven Erddrucks aus. Wenn sich jedoch infolge einer auf den Pfahl wirkenden Reaktionskraft ein dreidimensionaler Bodenkeil (siehe

| | |
|----------|------------|
| YAW | GIEREN |
| Pitch | Stampfen |
| Sway | Versetzen |
| Surge | Schnellen |
| Top View | Draufsicht |
| Profile | Profil |
| Top View | Draufsicht |
| Profile | Profil |
| Rotation | Rotation |
| ROLL | ROLLEN |

| | | |
|---|--|---|
|  | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 73 of 83 |

| | |
|--------------|---------------|
| Front View | Vorderansicht |
| Translations | Translationen |
| HEAVE | TAUCHEN |
| Front View | Vorderansicht |

Abbildung 38) ausbildet, können sich die Bodenkeile anderer, benachbarter Pfähle überlagern. Dadurch sinkt die Fähigkeit, der Kraft zu widerstehen.

Das DMC-Blum-Tabellenblatt bietet die Möglichkeit, den vollständig mobilisierten Erddruck auf den Pfahl mit dem Faktor $\gamma_{R,e}$ zu mindern (siehe

| | |
|-------------------------|------------------------------|
| CMB | CMB |
| Stiffness | Steifigkeit |
| Impact | Aufprall |
| Seabed | Meeresboden |
| Soil | Boden |
| Moment | Moment |
| Section check (STR/GEO) | Abschnittsnachweis (STR/GEO) |

Tabelle 4). Im STR/GEO-Grenzzustand beispielsweise entspricht der Faktor 1,15. Es wurde untersucht, wie stark dieser Faktor erhöht werden kann, bevor der Abschnittsnachweis oder der Einspannungsnachweis versagen.





Tabelle 10 zeigt die Eingabe für die Sensitivitätsanalysen.

| Grenzzustand | STR/GEO | SLS |
|-----------------------------|-----------|------------------|
| Nachweis | Abschnitt | Pfahleinspannung |
| Wiederkehrintervall [Jahre] | 100 | 10 |
| Kraft [kN] | 1.200 | 500 |
| Aufprallstärke EHW [m SKN] | 9,36 | 8,60 |
| Meeresboden | Niedrig | Niedrig |
| Bodenparameter | NieChar | NieChar |
| Kolk | JA | JA |

Tabelle 10 Eingabe für die Erddruckminderung (Sensitivitätsanalysen)

Für die STR/GEO-Abschnittsprüfung (ULS) gilt danach, dass der Einheitsnachweis = 1,00 ist, wenn bei $\gamma_{R,e} = 3,0$ (Steigerung um 161 %) die Pfahlstabilität hinreichend ist.

Für den SLS-Nachweis der Pfahleinspannung gilt danach, dass der Pfahl dann gerade tief genug ist, wenn $\gamma_{R,e} = 3,1$ (Steigerung um 210 %).

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 74 of 83 |

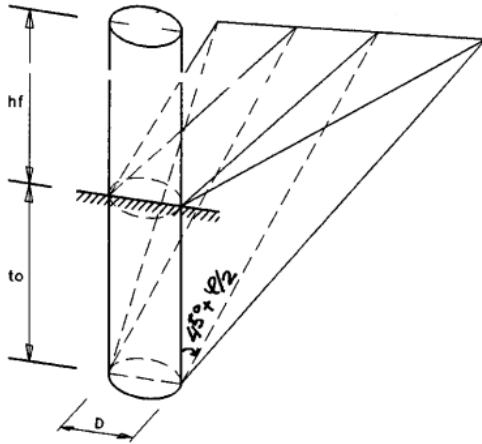




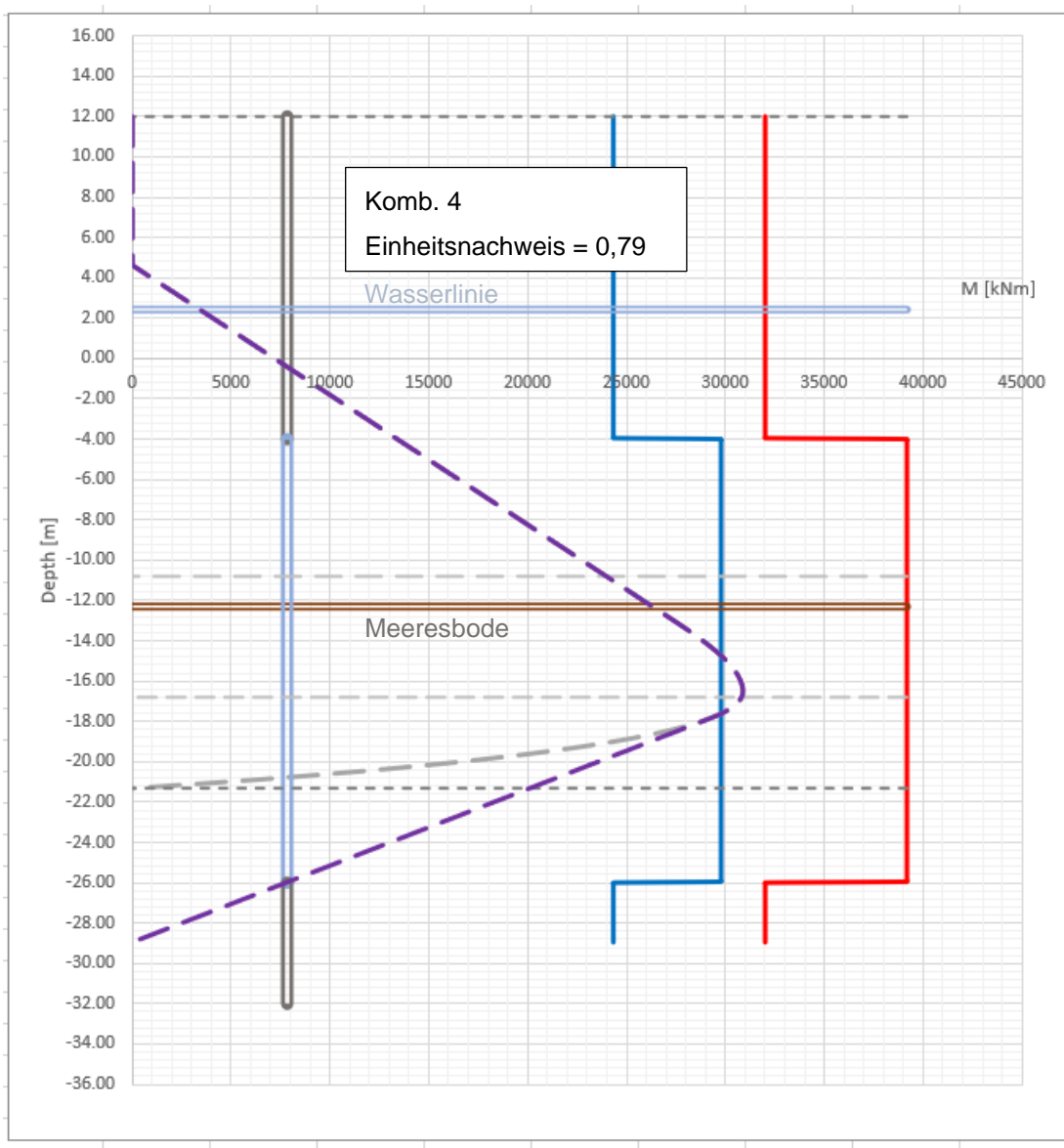


Abbildung 36 3D-Darstellung eines mobilisierten Bodenkeils





| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 75 of 83 |

Anhang A Ausgabe DMC-BLUM-Tabellenblatt

STR/GEO-Biegemomentlinie (mit lila Punkten) samt Kapazitätlinien. Blau ist die Streckgrenze und rot die plastische Beanspruchbarkeit.



| | |
|-----------|-----------|
| Depth [m] | Tiefe [m] |
|-----------|-----------|

| | | |
|--|---|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 76 of 83 |

Anhang B Ponton-Bewegungen

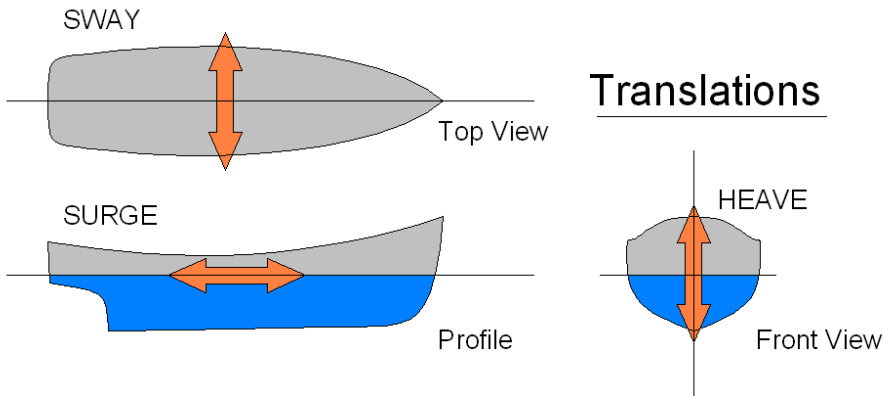
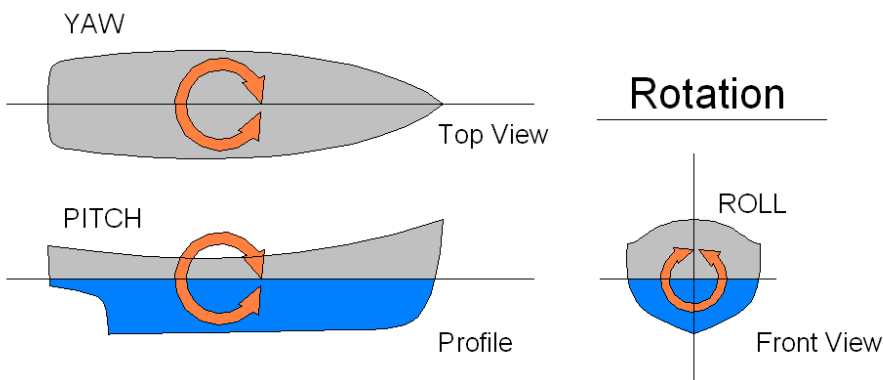


Abbildung 37 Translationen Versetzen, Schnellen und Tauchen



| | |
|--------------|---------------|
| YAW | GIEREN |
| Pitch | Stampfen |
| Sway | Versetzen |
| Surge | Schnellen |
| Top View | Draufsicht |
| Profile | Profil |
| Top View | Draufsicht |
| Profile | Profil |
| Rotation | Rotation |
| ROLL | ROLLEN |
| Front View | Vorderansicht |
| Translations | Translationen |
| HEAVE | TAUCHEN |
| Front View | Vorderansicht |





| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 77 of 83 |

Abbildung 38 Rotationen: Gieren, Stampfen und Rollen

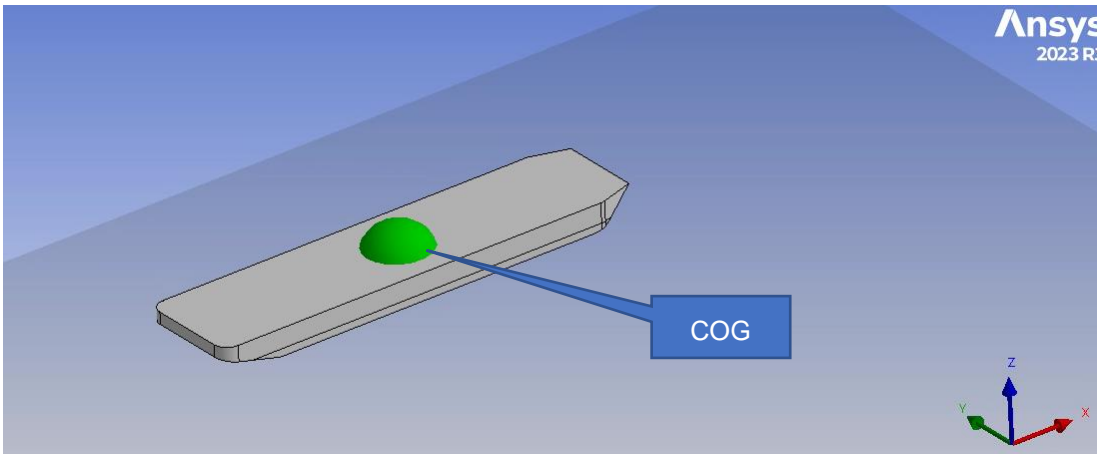






Abbildung 39 Richtungen gemäß Ansys-AQWA-Modell, Translationen des COG sind Modell-Ausgaben

Abbildung 11 Schiffsbewegungen in Bezug auf das in Ansys AQWA verwendete Achsensystem

| Bewegung | Begriff | Einheit |
|-------------------------|-----------|---------|
| x-Richtung | Schnellen | [mm] |
| y-Richtung | Versetzen | [mm] |
| z-Richtung | Tauchen | [mm] |
| Rotation um die x-Achse | Rollen | [Grad] |
| Rotation um die y-Achse | Stampfen | [Grad] |
| Rotation um die z-Achse | Gieren | [Grad] |

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 78 of 83 |

Anhang C Geotechnische Parameter

Geotechnischer Bericht

Teilprojekt: **Bootsanleger (Pontoon)**

Nr. 23A012.00.00 Rev.0.0

Datum 12. Dezember 2023

Bauvorhaben
LNG Terminal Wilhelmshaven (FSRU)
Teilprojekt: Ponton/Bootsanleger (Pontoon)

Auftraggeber
ENGIE Deutschland AG / Tree Energy Solutions mit
IMDC

erstellt durch:


Dipl.-Ing. Michael Müller
ACP Geotechnik GmbH


Dr.-Ing. Malek Hasan
ACP Geotechnik GmbH



Beratung | Planung | Gutachten
Objekt- und Tragwerksplanung für
Baugrubensicherungen
Baugrund- und Gründungsgutachten
Offshore-Geotechnik
Spezialtiefbau
Böschungen und Stützmauern
Deiche und Dämme
Altlastengutachten
Grundbaudynamik
Grundwasserströmung
Numerische Untersuchungen von
Boden-Bauwerks-Wechselwirkungen

Vereidigte Sachverständige
Gerichtsgutachten
Privatgutachten

ACP Geotechnik GmbH





Büro Berlin
Darwinstraße 15
10589 Berlin
Tel.: +49 (0)30 349906-70
Fax: +49 (0)30 349906-99
E-Mail: berlin@acp-geotechnik.de
web: www.acp-geotechnik.de

Büro Hannover
Georgstr. 38
30159 Hannover
Tel.: +49 (0)511 70034930
Fax: +49 (0)511 70034937
E-Mail: hannover@acp-geotechnik.de
web: www.acp-geotechnik.de





Geschäftsführer
Prof. Dr.-Ing. Martin Achmus
Dipl.-Ing. Michael Müller
Dr.-Ing. Thomas Schrepfer

Registergericht
AG Charlottenburg HRB 101773 B





Bankverbindung
LBB LandesBank Berlin
IBAN: DE44 1005 0000 0190 0536 90
SWIFT-BIC: BELADEXXXX

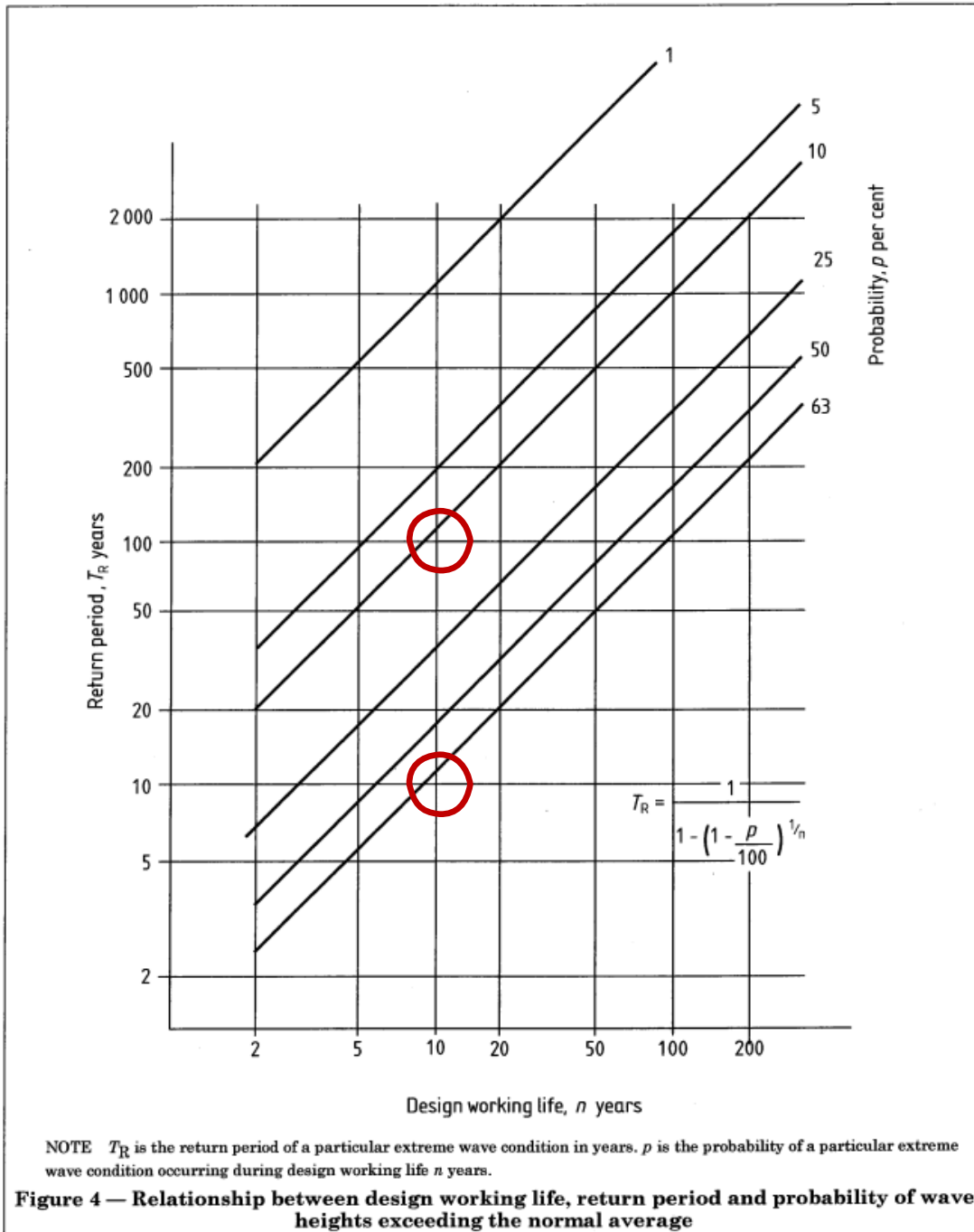
| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 80 of 83 |

| | |
|---------------------------|---------------------------|
| Ohne Kolkschutzschüttung | Ohne Kolkschutzschüttung |
| L1: Sand/Schluff (locker) | L1: Sand/Schluff (locker) |
| L2: Sand/Schluff (locker) | L2: Sand/Schluff (locker) |
| L3: Sand (mitteldicht) | L3: Sand (mitteldicht) |
| L4: Sand (mitteldicht) | L4: Sand (mitteldicht) |
| L5: Sand (dicht) | L5: Sand (dicht) |
| L6: Sand (mitteldicht) | L6: Sand (mitteldicht) |
| L7: Sand (dicht) | L7: Sand (dicht) |
| Bottom soil profile: | Bodenprofil unten: |
| Depth under SBL | Tiefe unter SBL |
| TOP | Oben |
| BOT | Unten |
| Saturated density | Sättigungsdichte |
| Friction angel | Reibungswinkel |
| Delta | Delta |
| Effective cohesior | Effektive Kohäsion |
| LoChar | NieChar |
| Expected | Erwartet |
| HiChar | HoChar |
| Bottom soil profile: | Bodenprofil unten: |
| Depth under SBL | Tiefe unter SBL |
| TOP | TOP |
| BOT | Unten |
| Saturated density | Sättigungsdichte |
| Friction angel | Reibungswinkel |
| Delta | Delta |
| Effective cohesior | Effektive Kohäsion |
| LoChar | NieChar |
| Expected | Erwartet |
| HiChar | HoChar |





| | | |
|--|---|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 81 of 83 |

Anhang C Beziehung Wiederkehrintervall, Wahrscheinlichkeit und Bemessungslebensdauer

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | Page 82 of 83 | |



| | |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| Return period, T_R years | Wiederkehrintervall T_R in Jahren |
| Probability, P per cent | Wahrscheinlichkeit p in Prozent |
| Design working life, n years | Bemessungslebensdauer n in Jahren |

| | | |
|--|--|---|
|    | Struktur |  |
| TES Proj. No.: TES-WHV-VGN | Wilhelmshaven FRSU: Bemessung der Pfähle der Ponton-Anlage | Doc. No: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC.2202_00 |
| TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU | | Page 83 of 83 |

| | |
|--|---|
| <p>NOTE T_R is the return period of a particular extreme wave condition in years, p is the probability of a particular extreme wave condition occurring during design working life n years.</p> | <p>HINWEIS: T_R gibt das Wiederkehrintervall einer bestimmten extremen Wellenbedingung in Jahren an. p ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte extreme Wellenbedingung während der Bemessungslebensdauer n auftritt.</p> |
| <p>Figure 4 - Relationship between design working life, return period and probability of wave heights exceeding the normal average</p> | <p>Abbildung 4 – Verhältnis zwischen Bemessungslebensdauer, Wiederkehrintervall und Wahrscheinlichkeit von Wellenhöhen über normalem Durchschnitt</p> |