

	Struktur	
TES Proj. No.: TES-WHV-VGN	Statische Berechnung Pfahlfundamente	Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 1 von 38

Statische Berechnung Pfahlfundamente

Ninth Issue	08	20.06.2023	J.Maas		N. Werner		Updated ZUR GENEHMIGUNG
Eighth Issue	07	16.05.2023	J.Maas		N. Werner A.Rosponi		Updated Load Definition ZUR GENEHMIGUNG
Seventh Issue	06	28.04.2023	J.Maas		D.Philippi A.Rosponi		Updated Load Definition ZUR INFORMATION
Sixth Issue	05	11.04.2023	J. Maas		D.Philippi A.Rosponi A.Krug		Updated Design, ZUR INFORMATION
Fifth Issue	04	31.03.2023	J. Maas		D.Philippi A. Rosponi A. Krug		Updated Design, ZUR INFORMATION
Forth Issue	03	20.02.2023	J. Maas		D. Philippi H. Koch A. Krug		Updated Design, ZUR INFORMATION
Third Issue	02	23.01.2023	J. Maas		D. Philippi H. Koch A. Krug	J. de Groot	Updated Design, FOR INFORMATION
Second Issue	01	16.12.2022	J. Maas		D. Philippi A. Rosponi	J. de Groot	Updated Mudline Definition; Added Annex A; incl. of multi-pile foundation verification
First Issue	00	09.12.2022	J. Maas		D. Philippi A. Rosponi	J. de Groot	-
Status	Issue	Date	Prepared by		Checked by	Approved by	Remark

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 2 von 38

Table of Content

1	Einleitung	4
1.1	Allgemeines	4
1.2	Arbeitsumfang.....	4
1.3	Revisionsbeschreibung	5
1.4	Abkürzungen	5
1.5	Referenzdokumente	6
2	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	7
2.1	Allgemeines	7
2.2	Ergebnisübersicht Dalben Fundamente – Wassertiefe 15,0 m.....	7
2.3	Ergebnisübersicht Dalben Fundamente – Wassertiefe 18,0 m	7
2.4	Schlussfolgerung.....	7
3	Normen und Regelwerke	8
4	Allgemeines.....	9
4.1	Einheiten.....	9
4.2	Software	9
4.3	Allgemeine Material Eigenschaften	10
5	Beschreibung der Dalben Plattform.....	11
6	Bodenprofil	12
6.1	Allgemein.....	12
7	Anker und Anlege-Dalben Fundamente – Statische Berechnung (P/1; P2) – 15,0 m Wassertiefe.....	14
7.1	Allgemein.....	14
7.2	Pfahl Geometrie	14
7.3	Allgemeine Lasten und Lastkategorien	14
7.3.1	Gewichte (G).....	14
7.3.2	Veränderliche Lasten (Q)	15
7.4	Nachweis Methode	16
7.4.1	Model Beschreibung	16
7.4.2	Randbedingungen.....	17
7.4.3	Korrosion	17

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 3 von 38

7.4.4	Statische Berechnung	17
7.4.5	Tragfähigkeitsnachweise	17
7.4.6	LRFD Methode	17
7.4.7	Lastfallkombinationen und Faktoren im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)	18
7.5	Ergebnisse	19
7.5.1	Member Ergebnisse	19
7.5.2	Pfahl Auslastung unter Baggerlinie	20
7.5.3	Axiale Auslastung des Bodens	23
8	Anker und Anlege-Dalben Fundamente – Installation (P/1; P/2).....	24
8.1	Lift Analyse	24
8.1.1	Lift Anordnung	24
8.1.2	Hebepunkt Details.....	24
8.1.3	Lastfaktoren	25
8.1.4	Ergebnisse	25
8.2	Eindringung unter Eigengewicht.....	26
8.3	Pile Driving Analyse	27
8.3.1	Pfahl Modell.....	27
8.3.2	Hammer	27
8.3.3	Berücksichtigte Szenarien	27
8.3.4	Quake and Damping.....	27
8.3.5	Pile Refusal Kriterien	27
8.3.6	Static Resistance to Driving (SRD)	28
8.3.7	Ergebnisse Scenario 1 – Best Estimate	29
8.3.8	Ergebnisse Scenario 2 – High Estimate	32
A.	CPT Data - MD2a-CPT	35

	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung Doc. Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 4 von 38

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Der KUNDE (ENGIE/TES) plant einen neuen Green Hub vor dem TES-Grundstück am Westufer der Jademündung im Hafengebiet von Wilhelmshaven. Die schrittweise Entwicklung des Green Hub umfasst eine erste Phase mit einer schwimmenden Speicher- und Regasifizierungseinheit (Floating Storage and Regasification Unit, FSRU) zum Import von LNG. Das Terminal wird an das deutsche Gasnetz angeschlossen und als Fast-Track-Projekt ausgeführt, mit dem Ziel, vor Ende 2023 mit dem Import von LNG zu beginnen.

Der KUNDE hat einen Vertrag mit IMDC geschlossen, um technische Unterstützung für die Meeresarbeiten sowie Modellierungsstudien zu leisten, die in den Genehmigungsantrag einfließen werden



Abbildung 1-1: Übersicht Projektierungsfläche (Google Earth)

1.2 Arbeitsumfang

Dieser Bericht stellt die vorläufigen Ergebnisse der Standsicherheitsberechnung der Anlege- und Ankerdalbenpfähle dar.

Dieser Bericht enthält eine Überprüfung von:

- Anlegedalben:
 - ULS Lastfall mit max. Anlegelast und extremen Umweltbedingungen
 - ULS Lastfall mit max. Ankerlast und extremen Umweltbedingungen

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 5 von 38

- Lift Analyse
- Pile Driving Analyse
- Ankerdalben
 - ULS Lastfall mit max. Ankerlast und extremen Umweltbedingungen
 - Lift Analyse
 - Pile Driving Analyse

1.3 Revisionsbeschreibung

Rev.01 – Update der Definition der Baggertiefe. Aufnahme der Multipile Dalben. Angabe von SACS Geometrie Dateien.

Rev.02 – Update der Pfahlgeometrie für Anker- und Anlegedalben. Aufnahme der Berechnung für Zwischenpfähle. Entfernung der Multipile Dalben. Update Bodenparameter. Aufnahme von Rammstudien.

Rev.03 – Update der Pfahlgeometrie für Anker- und Anlegedalben.

Rev. 04 – Hinzufügen von Lateralen Tragfähigkeitsnachweisen. Änderung des Hammers auf Typ IHC S3000. Erhöhung der Fenderlasten auf 6,000 kN. Hinzufügen der Ermüdungsbetrachtung. Entfernung der Zwischenpfähle.

Rev. 05 – Änderung des Hammers auf einen IHC-S2000. Hinzufügen von Pfahleindringen unter Eigenwicht.

Rev. 06 – Änderung der Dalbenlasten, Anpassung der Lastfaktoren. Einarbeitung IMDC-Kommentare auf rev. 04

Rev. 07 – Update der Korrosion und Aktualisierung der Pile Zeichnung, Pfahleindringung

Rev. 08

In dieser Revision wurden folgende Änderungen eingearbeitet:

- Aktualisierung der Formulierungen in der Einleitung unter Allgemeines
- Alle LAT Angaben geändert zu „LAT = SKN“ oder „SKN / LAT“
- Aktualisierung der Pfahlzeichnung
- Formelle Änderungen auf Hinweis von IMDC
- Aktualisierung der Fendergröße

Alle Änderungen in dieser Revision sind mit einem Strich an der rechten Seite gekennzeichnet.

1.4 Abkürzungen

Die folgenden Abkürzungen werden in diesem Dokument verwendet:

Abkürzung	Definition
API:	American Petroleum Institute
CA:	Classification Authority/ Klassifizierungsbehörde
COG:	Centre of Gravity/ Schwerpunkt
DFF:	Damage Fatigue Faktor (Ermüdungsfaktor)

	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Berechnung Pfahlfundamente	Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 6 von 38

DIN:	Deutsche Industrie Norm
DNV:	Det Norske Veritas
EC:	Euro Code
IMDC:	International Marine and Dredging Consultants
LAT / SKN:	Lowest Astronomical Tide / Niedrigster Gezeitenwasserstand/ Seekarten Null (Chart Datum)
LC:	Load Case/ Last Fall
LNG:	Liquid Natural Gas / Flüssig-Gas
OS:	Offshore Standard
OV:	Tractebel Overdick GmbH
RP:	Recommended Practice/ Empfohlene Praxis
SI:	System International / Internationales Einheitensystem
TES:	Tree Energy Solutions Belgium BV (Konsortiumspartner von ENGIE)
UC:	Unity Check/Auslastungsgrad
ULS:	Ultimate Limit State / Grenzzustand der Tragfähigkeit

1.5 Referenzdokumente

Dieser Bericht baut auf folgenden Referenzdokumenten auf:

- [1.] OV; TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC -2001.05; "Preliminary Explanatory Report"; 05/ 2023
- [2.] OV; TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2036.03; „Strukturzeichnung Pfähle“; 05/2023
- [3.] Alm/Hamre; Paper: "Soil model for pile driveability predictions based on CPT interpretations"; 2001
- [4.] Alm/Hamre; Paper: "Soil model for driveability predictions"; 1998

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 7 von 38

2 Zusammenfassung der Ergebnisse

2.1 Allgemeines

Die Dalben werden auf einzelnen Monopiles mit einem einheitlichen Durchmesser von jeweils 4,5 m gegründet (identische Pfahltypen).

Die hier betrachtete vorgeschlagene Baggertiefe liegt bei -15,0 m SKN / LAT, wie vom Kunden angegeben. Diese ergibt sich aus einer Design-Baggertiefe von -14,5m SKN / LAT und einer Toleranz von 0,5 m. Zusätzlich ist auch eine Baggerlinie auf -18.0 m betrachtet, bei gleichbleibenden Pfählen.

Die Dalben sind über Bootsanlegestellen vom Ufer aus erreichbar und durch Verbindungsbrücken miteinander gekoppelt.

Die Stabilitätsanalysen entsprechen den EuroCode-Standards. Abweichungen von der Norm werden an den entsprechenden Stellen ausdrücklich hervorgehoben.

2.2 Ergebnisübersicht Dalben Fundamente – Wassertiefe 15,0 m

Hier werden nur die Fundamente der Anlage Dalben dargestellt, da diese die höhere Auslastung zeigen.

Die Pfähle sehen die höchste Ausnutzung 10 m unter der vorgeschlagenen Baggertiefe (UC = 0,98). An der Pfahloberkante wird eine maximale Durchbiegung von 455 mm erwartet (In-Place).

Die axiale Tragfähigkeit des Bodens erreicht einen Sicherheitsfaktor von 17,5, während die seitliche Auslenkung unterhalb der vorgeschlagenen Baggertiefe keine Auslenkung über die Einbindetiefe von 35,0 m hinaus zeigt.

Die Laterale Kapazität des Pfahls errechnet sich zu 489.481,31 kN unter Verwendung der P-Y Methode. Im Vergleich zu den berechneten Widerständen sind die auftretenden Lasten vernachlässigbar.

Der Offshorelift ist nicht stark ausgelastet und hat einen Nutzungsgrad von 32% in der Mitte.

Während des Rammvorgangs tritt kein Refusal auf. Die Pfähle können in der vorgeschlagenen Tiefe von 44,5 m innerhalb von 150 (Best Estimate) bis 156 min (High Estimate) installiert werden.

Ein maximaler Ermüdungsschaden von etwa 10% (unter Berücksichtigung von DFF = 10 und SN Kurve D) ergibt sich durch die Installation. Weitere Ermüdungsschäden werden nicht erwartet.

2.3 Ergebnisübersicht Dalben Fundamente – Wassertiefe 18,0 m

Durch den erhöhten Hebelarm übersteigt die resultierende strukturelle Auslastung des Pfahls den zulässigen Widerstandswert für eine Wassertiefe von 18,0m.

Die entsprechenden Nachweise werden in diesem Bericht nicht weiter dargestellt.

2.4 Schlussfolgerung

Die in diesem Bericht verifizierten Pfähle sind ausreichend dimensioniert, um den dargestellten Belastungen sowie dem T&I standzuhalten (siehe Kapitel 8).

Aufgrund der Verlegung des kompletten FSRU-Terminals um 200 m weiter auf die Landseite müssen die kompletten geotechnischen Daten offshore überprüft werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Bodenbeschaffenheit homogen bleibt, dies muss jedoch durch Felddaten und Laboruntersuchungen verifiziert werden.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 8 von 38

3 Normen und Regelwerke

Die folgenden Normen und Regelwerke werden in diesem Dokument benutzt.

- [I.] DIN EN 1990, Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung; 2021-10
- [II.] DIN EN 1993, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten; 2010-12
- [III.] Det Norske Veritas (DNV); DNV-RP-N102; "Marine operations during removal of offshore installations"; 2021-09
- [IV.] Det Norske Veritas (DNV); DNV-ST-N001; "Marine operations and marine warranty"; 2020-01
- [V.] Det Norske Veritas (DNV); DNV-RP-C203; "Fatigue design of offshore steel structures"; 2021-09
- [VI.] Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinssungen" Häfen und Wasserstraßen EAU, 2020
- [VII.] Empfehlungen des Arbeitskreises "Pfähle" EA-Pfähle, 2012
- [VIII.] DIN EN 10225; Schweißgeeignete Baustähle für feststehende Offshore-Konstruktionen; 2019-11
- [IX.] DIN EN 10025; Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen; 2019-10

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08 Seite 9 von 38

4 Allgemeines

4.1 Einheiten

In diesem Dokument werden die internationalen SI-Einheitensysteme verwendet. Die folgenden Einheiten werden in allen durchgeführten Analysen verwendet, sofern nicht anders angegeben:

Table 1: Einheiten

Parameter	Beschreibung	Eingabe Einheit
Länge	Meter	m
Masse	Metrische Tonne	t
Spannung	MegaPascal	MPa
Kraft	Kilo Newton	kN
Temperatur	Grad Celsius	°C
Energie	Joule	J
Dichte	Kilogramm je Kubik Meter	kg/m ³
Winkel	Grad	°

4.2 Software

Für die statischen Berechnungen wird folgende Software verwendet:

Table 2: Software

Position	Software	Version	Beschreibung
[a]	SACS	14.1	Globalanalysen von Offshore- Strukturen
[b]	GRL-WEAP	2010-6 Offshore Wave	Pfahl-Rammanlysen Software

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU	Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08	
		Seite 10 von 38

4.3 Allgemeine Material Eigenschaften

Die folgenden Tabellen fassen die in der Analyse verwendeten Materialeigenschaften gemäß Referenz [VIII.] zusammen.

Table 3: Material Eigenschaften - Stahl

Data	Wert		
Struktur Klasse	Special (API Class A)	Special, Secondary (API Classes A, B, C)	Primary, Tertiary (API Class C)
Spezifische Streck-Grenze [MPa]	420	355	275
Dichte [kg/m ³]	7,850		
Elastizitätsmodul [MPa]	210.000		
Poisson Zahl	0,30		

Die Nennspannungen und die entsprechenden Mindest-Streck-Grenzen infolge unterschiedlicher Materialstärken sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Die Reduzierung der Streckgrenze aufgrund der Materialdicke ist in Ref. [IX.] gegeben.

Table 4: Nominale & Mindest-Streck-Grenze

Nominale Streck Grenze, $f_{y,k}$ [MPa]	Mindest-Streck-Grenze R_{eH} [MPa] bei Raumtemperatur abhängig vom Bereich der Materialstärke [mm]									
	$t \leq 16$	$16 < t \leq 25$	$25 < t \leq 40$	$40 < t \leq 63$	$63 < t \leq 80$	$80 < t \leq 100$	$100 < t \leq 120$	$120 < t \leq 150$	$150 < t \leq 200$	$150 < t \leq 200$
355	355	345	335	325	315	295	295	285	275	

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
		Seite 11 von 38

5 Beschreibung der Dalben Plattform

Für eine detaillierte Plattformbeschreibung siehe ref.[1.]. Der folgende Auszug aus ref. [2.] gibt einen Überblick über die Positionsnummern der Pfähle.

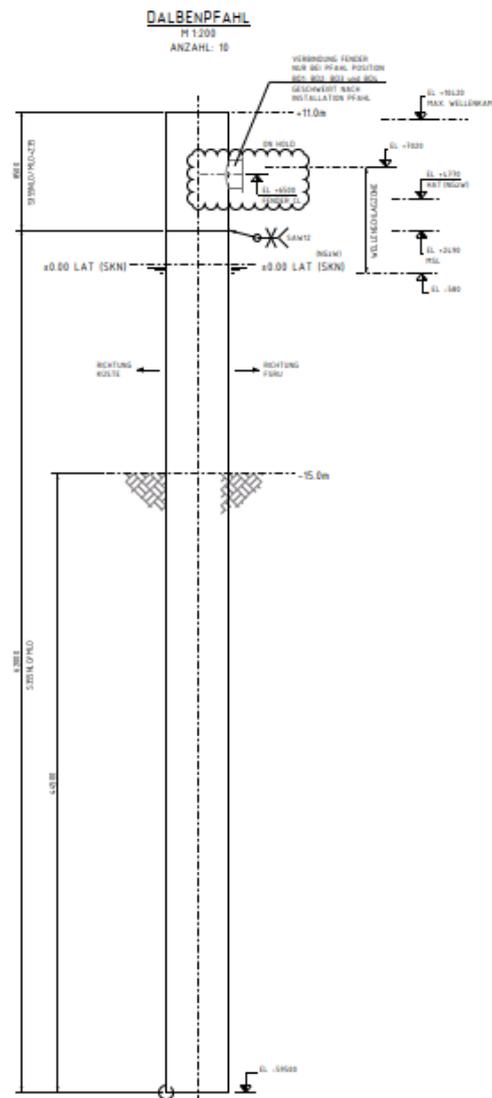


Figure 5-1: Übersicht der Fundamenttypen; ref. [2.]

Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht über die Positionsnummern und die Kapitel der dazugehörigen Berechnung.

Table 5: Übersicht Positionsnummern; ref. [2.]

Item	Positionsnummer	Berechnungskapitel
Breasting/Mooring Pile (Dalben Pfahl)	P/1; IP2	Kapitel 7 and 8

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU	Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08	
		Seite 12 von 38

6 Bodenprofil

6.1 Allgemein

Basierend auf den Offshore-Ergebnissen von Fugro wurde ein Design-Bodenprofil geschätzt. Da die Bohrungen ähnliche Bodeneigenschaften aufweisen, aber nicht die für die Bemessung erforderlichen Bodentiefen erreichen, kommt die Bohrung Bda4-BH zum Einsatz. Für die Driveability wird der CPT-Standort BD2a-CPT verwendet. Aufgrund der Gesamthomogenität des Ergebnisses wird dieser Ansatz für diese Phase des Projekts als praktikabel erachtet.

Die Erkenntnisse aus den Fugro-Daten werden mit Literatureingaben wie DIN- und EuroCode-Normen, sowie der EA-Pfähle (ref. [VII.]) korreliert und ergänzt.

Table 6: Übersicht Geotechnische Parameter

Oberkante der Schicht	Unterkante der Schicht	Beschreibung	Wichte unter Auftrieb	Reibungswinkel	E-Modul	Grenz-Reibung	Grenz-druck-spannung
			γ'	ϕ'	Es, q	qs	ql
[m]	[m]	[-]	[kN/m ³]	[°]	[MN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
0,0	2,1	Sand	7,0	26,0	20	67,0	3.000
2,1	3,2	Sand	9,5	34,0	30	81,0	5.000
3,2	31,5	Sand	9,0	30,0	30	81,0	5.000
31,5	32,2	Sand	9,5	34,0	40	81,0	5.000
32,2	38,0	Sand	9,0	32,0	35	81,0	5.000
38,0	42,0	Sand	9,0	32,0	35	81,0	5.000
42,0	46,5	Sand	10,0	34,0	40	81,0	5.000
46,5	47,5	Sand	9,0	30,0	30	81,0	5.000
47,5	49,9	Sand	10,0	34,0	45	81,0	5.000
49,9	51,0	Sand	9,0	30,0	40	81,0	5.000
51,0	52,2	Sand	10,0	34,0	45	81,0	5.000
52,2	55,5	Sand	9,0	30,0	40	81,0	5.000
55,5	56,6	Sand	9,0	30,0	40	81,0	5.000
56,6	57,0	Sand	9,0	30,0	40	81,0	5.000
57,0	60,0	Sand	10,0	34,0	50	81,0	5.000

Bodendaten auf ref. [1.] werden ersetzt mit den hier präsentierten Daten.

Aufgrund der Gesamtunsicherheit des Bodenprofils wird eine Abweichung von 10 % auf die Bodendaten angewendet, um eine obere und untere Grenze abzuschätzen. Dieser Ansatz wird für die Stabilitätsbewertungen in Kapitel 7 verwendet.

Für die Rammanalysen in Kapiteln 8 ist eine bestmögliche Schätzung gem. Table 6 geprüft und eine mit 1,25 faktorisierte hohe Schätzung ist ebenfalls überprüft.

Die Bodendaten müssen nachgeprüft und bestätigt werden, wenn die Laboruntersuchungen durchgeführt wurden. Bis zu einer solchen Bestätigung sind die Statik- und Rammanalysen als vorläufig zu betrachten.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 13 von 38

Aufgrund der Verlegung des kompletten FSRU-Terminals um 200 m weiter auf die Landseite müssen die kompletten geotechnischen Daten Offshore überprüft werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Bodenbeschaffenheit homogen bleibt, dies muss jedoch durch Felddaten und Laboruntersuchungen verifiziert werden.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU	Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08	
		Seite 14 von 38

7 Anker und Anlege-Dalben Fundamente – Statische Berechnung (P/1; P2) – 15,0 m Wassertiefe

7.1 Allgemein

Die folgenden Unterkapitel beschreiben die Geometrie und Gewichte die für die Dalben Berechnung verwendet werden. Beide Dalben Fundamente sind baugleich. Für Details, siehe Figure 7-1.

7.2 Pfahl Geometrie

Die Dalbengeometrie besteht aus einem 26,0-m-Pfahlabschnitt oberhalb der vorgeschlagenen Baggertiefe und einem 44,5-m-Abschnitt unterhalb der vorgeschlagenen Baggertiefe. Somit beträgt die Gesamtpfahlänge 70,5 m. Der Rohrpfahl wird in mehrere kleinere Abschnitte unterteilt, um die Gesamtbiegung besser widerzuspiegeln.

Obwohl die geplante Lebensdauer des Terminals aktuell nur 5 Jahre (in ref. [1.]) beträgt, wird die Pfahlwandstärke innerhalb der Splashzone mit einem um den Korrosionszuschlag konservativ entsprechend 50 Jahren entsprechend nachgewiesen (0,3 mm/Jahr über einen Zeitraum von 50 Jahren konservativ wird die Beschichtung im Modell nicht berücksichtigt. Für detaillierte Korrosionsannahmen siehe ref. [1.]. Die Splashzone erstreckt sich von +7,02 m SKN / LAT bis -0,58 m SKN / LAT.

Die folgende Tabelle gibt Auskunft über die modellierten Pfahlrohrquerschnitte mit den berücksichtigten Einzelstabaußendurchmessern und Wanddicken.

Table 7: Überblick Pfahl Model Geometrie

Oberkante über Baggertiefe	Unterkante unter Baggertiefe	Außendurchmesser	Wandstärke
[m ML]	[m ML]	[m]	[mm]
+26,0	0,00	4,5	60,0
0,00	-44,5	4,5	60,0

Eine effektive Länge von 50,0 m ist angenommen (von dem Nullverformungspunkt unter der angenommenen Baggertiefe ab). Ein globaler Beulfaktor von 2,0 ist angenommen.

Der Einzelpfahl wiegt 460 t (un-faktoriert und ohne Aufschläge).

7.3 Allgemeine Lasten und Lastkategorien

Lasten und Lasteffekte auf die Dalben entstehen infolge von:

- Eigengewicht (G)
- Veränderliche Lasten (Q)

7.3.1 Gewichte (G)

Als nicht tragende Masse der Plattform werden ca. 110,0 t Gewicht aufgebracht. Das Plattformgewicht wird mit einem Verschub von 0,5 m in beide horizontalen Richtungen aufgebracht.

Für die obere Plattform der Dalbe ist eine Dummy-Struktur modelliert. Die Dummy-Struktur wird mit Trägern und Platten modelliert, die kein Gewicht haben.

Als Gewicht der Verbindungsbrücke werden zusätzlich 50 t aufgebracht. Die Gewichte der Verbindungsbrücken werden auf einer Seite der Plattform (3,8 m von der Mittelachse des Pfahls) aufgebracht.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		
		Seite 15 von 38

Gewichte können von den Stücklisten abweichen. Die Pfahlausnutzung wird nur unwesentlich durch das Eigengewicht beeinflusst.

7.3.2 Veränderliche Lasten (Q)

Die hier berücksichtigten veränderlichen Lasten sind:

- Vertäukräfte (Mooringlasten ML) und Anlehnkräfte (Fenderlasten FL)
- Windlasten (Wi)
- Wellenlasten (We)
- Strömungslasten (St)

Um die Dalben zu verifizieren, werden mehrere Lasten aufgebracht. Da die Geometrie für Anker- und Anlegedalben gleich ist, werden die Lasten innerhalb desselben Modells aufgebracht. Die folgende Tabelle fasst die angewendeten Lasten zusammen. Weitere Informationen zu den Lasten finden Sie unter Ref.[1.].

Die dargestellten Umweltbelastungen sind die extremen Umweltbelastungen im Feld.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die finalen maximalen ULS Fenderlasten noch nicht bekannt sind. Detaillierte Berechnungen pro Pfahl sind werden angestrebt, sobald genauere Input Fenderlasten sowie genauere Bodendaten vorhanden sind.

Table 8: Übersicht der aufgebrachten Lasten

Typ	Fender Lasten (FL)	Mooring Lasten (ML)	Wind Geschwindigkeit (Wi)	Welle (100-y Hmax) (We)	Strömung (100-year) (St)
Anker Dablen	-	4 x 150 t = 600 t Auf 12,2 m SKN / LAT	33,2 m/s	4,75 m/ 5,0 s	2,0 m/s (const.)
Anlege Dalben	6,000.0 kN auf 6.5 m SKN / LAT	3 x 150 t = 450 t auf 12,2 m SKN / LAT	33,2 m/s	4,75 m/ 5,0 s	2,0 m/s (const.)

In einem konservativen Ansatz werden die Lasten aus Fender/Verankerungen in Verbindung mit extremen Umgebungslasten aufgebracht.

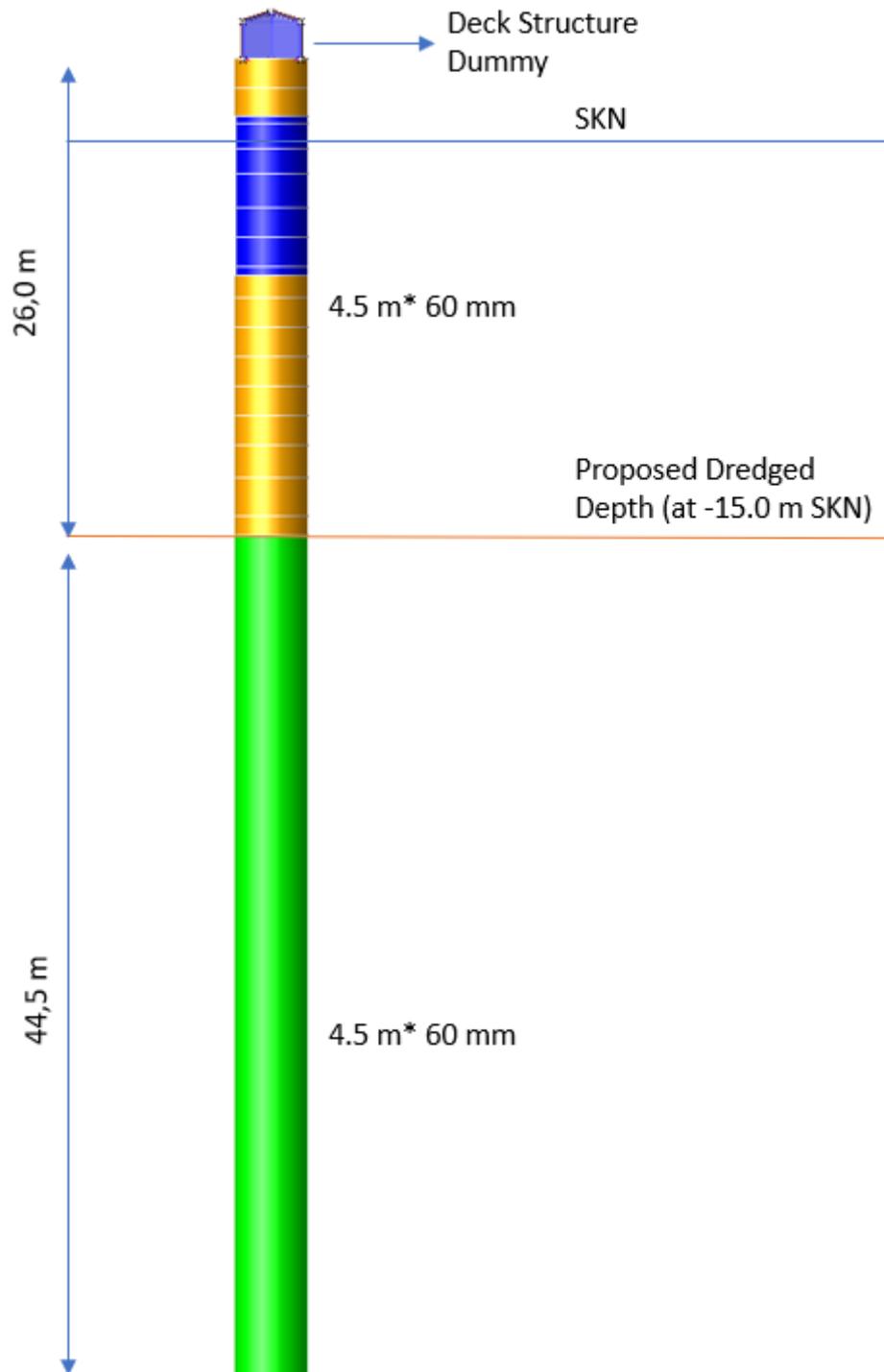
Ankerlasten wirken gleichgerichtet zu Umgebungslasten. Fenderlasten wirken um 90° versetzt zu Mooringlasten.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 16 von 38

7.4 Nachweis Methode

7.4.1 Model Beschreibung

Das folgende Bild zeigt die Hauptabmessung des Berechnungsmodells, einschließlich der Dummy-Struktur der oberen Plattform.



  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08 Seite 17 von 38

Figure 7-1: Übersicht des Modells/Positionsnummer: P/1; P/2 – Splashzone in Blau

7.4.2 Randbedingungen

Das Fundament ist 44,5 m im Boden eingebunden wie in Figure 7-1 gezeigt. Der Boden ist mit nicht-linearen Federn modelliert (P-Y; T-Z und Q-Z Kurven).

7.4.3 Korrosion

Korrionsaufschlag aufgebracht nach ref. [1.].

7.4.4 Statische Berechnung

Die statische Berechnung baut auch dem EuroCode Regime, EC3 ref. [1.] auf. Für weitere Information siehe ref. [1.].

Nur die Anlegedalben werden gezeigt, da diese die höhere Auslastung zeigen.

7.4.5 Tragfähigkeitsnachweise

Für den Nachweis der Tragfähigkeit werden die folgenden Nachweise erbracht:

- Grenzzustand der Tragfähigkeit / Ultimate Limit State (ULS)

7.4.6 LRFD Methode

7.4.6.1 Allgemeines

Das strukturelle Design basiert auf der LRFD Methode. Bei dieser Methode wird das erforderliche Sicherheitsniveau durch das aufbringen von Last- und Widerstandsfaktoren auf die charakteristischen Werte der Basis-Regelgrößen erzielt. In diesem Kontext sind die Basis-Regelgrößen definiert als:

- auf die Struktur einwirkenden Lasten
- Festigkeit der Struktur oder Festigkeit des Materials in der Struktur

Das Sicherheitsniveau eines Bauteils gilt als ausreichend, wenn die Bemessungslasteinwirkung (S_d) die Bemessungstragfähigkeit (R_d) nicht überschreitet.

$$S_d \leq R_d$$

7.4.6.2 Design Lasten

Eine Auslegungslast (F_d) ergibt sich aus der Multiplikation der charakteristischen Belastung ($F_{k,i}$) mit einem gegebenen Lastfaktor ($\gamma_{F,i}$).

$$F_d = \sum_i \gamma_{F,i} \cdot F_{k,i}$$

Nach EuroCode sind unterschiedliche Teilsicherheitsbeiwerte mit der entsprechenden Belastung zu kombinieren. Eventuell müssen zusätzliche Lastkombinationswerte berücksichtigt werden.

Lastkombinationen einschließlich der Lastfaktoren und Kombinationswerte sind für verschiedene Lasteinwirkungen in Abschnitt 7.4.7 dieses Dokuments angegeben.

7.4.6.3 Festigkeits-Design

Die Design-Festigkeit (R_d) wird wie folgt bestimmt:

$$R_d = \Phi R_k$$

Mit: R_k = charakteristischer Widerstand

Φ = Widerstandsfaktor

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 18 von 38

Der Widerstandsfaktor basiert auf dem Material-Sicherheitsfaktor γ_M wie folgt: $\Phi = 1 / \gamma_M$

7.4.7 Lastfallkombinationen und Faktoren im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)

Die folgenden Lastfaktoren gelten für ULS nach EC3 [I.] und den Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ [VI.].

- Eigengewicht + veränderl. Lasten: $\gamma_G * G + \gamma_Q * Q_1 + \gamma_Q * (\sum Q_i * \psi_{0,i})$

Die veränderlichen Lasten aus Mooring- und Fender-Kräften sind deutlich höher als die Umweltlasten (im Kombination aus Welle, Wind and Strömung). Daher wird der Lastfaktor γ_Q von 1.2 (gemäß [VI.]) auf die Fender- und Mooringlasten aufgebracht. Konservativ werden die Umweltlasten nicht um einen Kombinationsbeiwert verringert ($*\psi_{0,i} = 1,0$ statt 0,7) und mit Lastfaktor $\gamma_Q = 1.0$ aufgebracht.

Daraus ergeben sind folgende Lastfallkombinationen:

- Kombination 201: Ankerdalbe:

Eigengewicht + **Mooringlast**+ Wind + Welle + Strömung

$$\gamma_G * G + \gamma_Q * ML + \gamma_Q * \psi_0 * (Wi + We + St) =$$

$$1,35 * G + 1,20 * ML + 1,0 * 1,0 * (Wi + We + St)$$

$$1,35 * G + 1,20 * ML + 1,0 * Wi + 1,0 * We + 1,0 * St$$

- Kombination 301: Anlegedalbe:

Eigengewicht + **Mooringlast**+ **Fenderlast** + Wind + Welle + Strömung:

$$\gamma_G * G + \gamma_Q * ML + \gamma_Q * FL + \gamma_Q * \psi_0 * (Wi + We + St) =$$

$$1,35 * G + 1,20 * ML + 1,20 * FL + 1,0 * 1,0 * (Wi + We + St)$$

$$1,35 * G + 1,20 * ML + 1,20 * FL + 1,0 * Wi + 1,0 * We + 1,0 * St$$

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung Doc. Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 19 von 38

7.5 Ergebnisse

Das Ergebniskapitel zeigt nur die kritischsten Ergebnisse aus allen zuvor beschriebenen Szenarien. Am kritischsten sind die Ankerdalben für dem Lastfall LC 301.

7.5.1 Member Ergebnisse

Das folgende Bild zeigt die Auslastung (Kombinierter Nachweis) des Pfahls über der vorgeschlagenen Baggertiefe. Insgesamt liegt die maximale Pfahlausnutzung bei 0,85 auf Höhe der Baggertiefe.

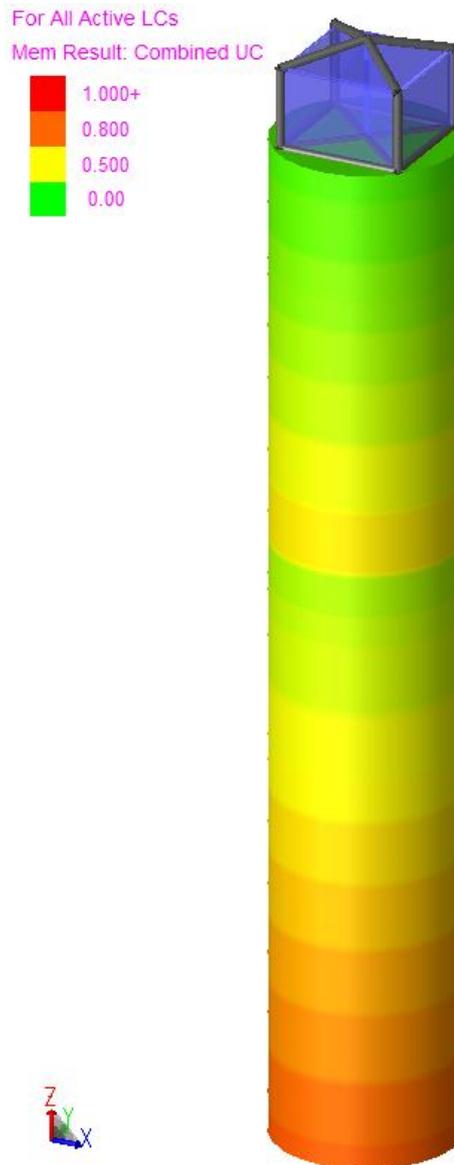


Figure 7-2: Übersicht über die Auslastung über der Baggerlinie

Eine maximale Verformung von 455 mm stellt sich an der Oberkante des Pfahls ein.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 20 von 38

7.5.2 Pfahl Auslastung unter Baggerlinie

Der maximale UC des Stahlpfahls liegt bei 0,98 in einer Tiefe von 10,0 m unter der vorgeschlagenen Baggertiefe. Die seitliche Verformung geht gegen Null ab einer Tiefe von 35 m. Der Pfahl wird als Un-Plugged betrachtet (konservative Annahme). Die folgenden Bilder zeigen die Pfahlauslastung und seitliche Verformung des Pfahls.

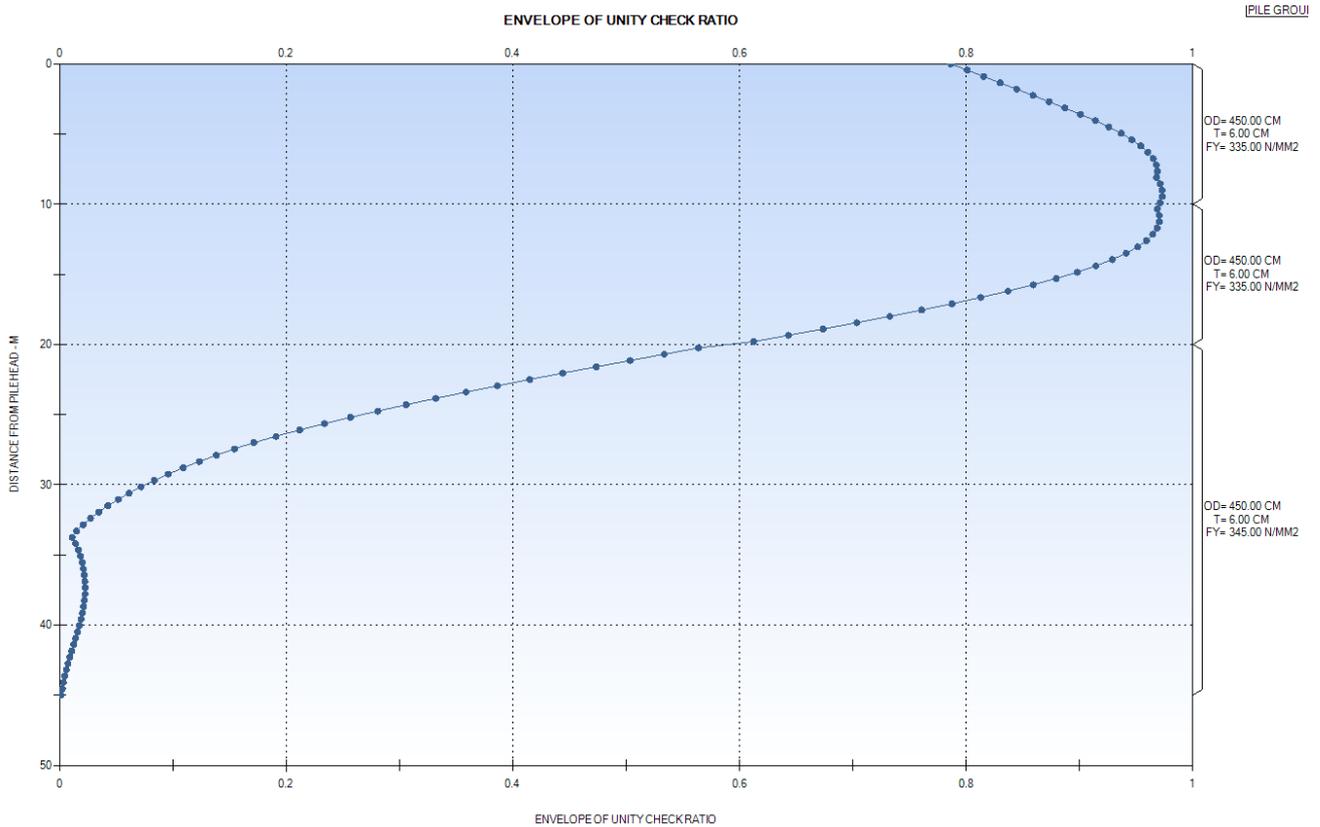


Figure 7-3: UC des Pfahls unter der Baggerlinie

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU	Seite 21 von 38	

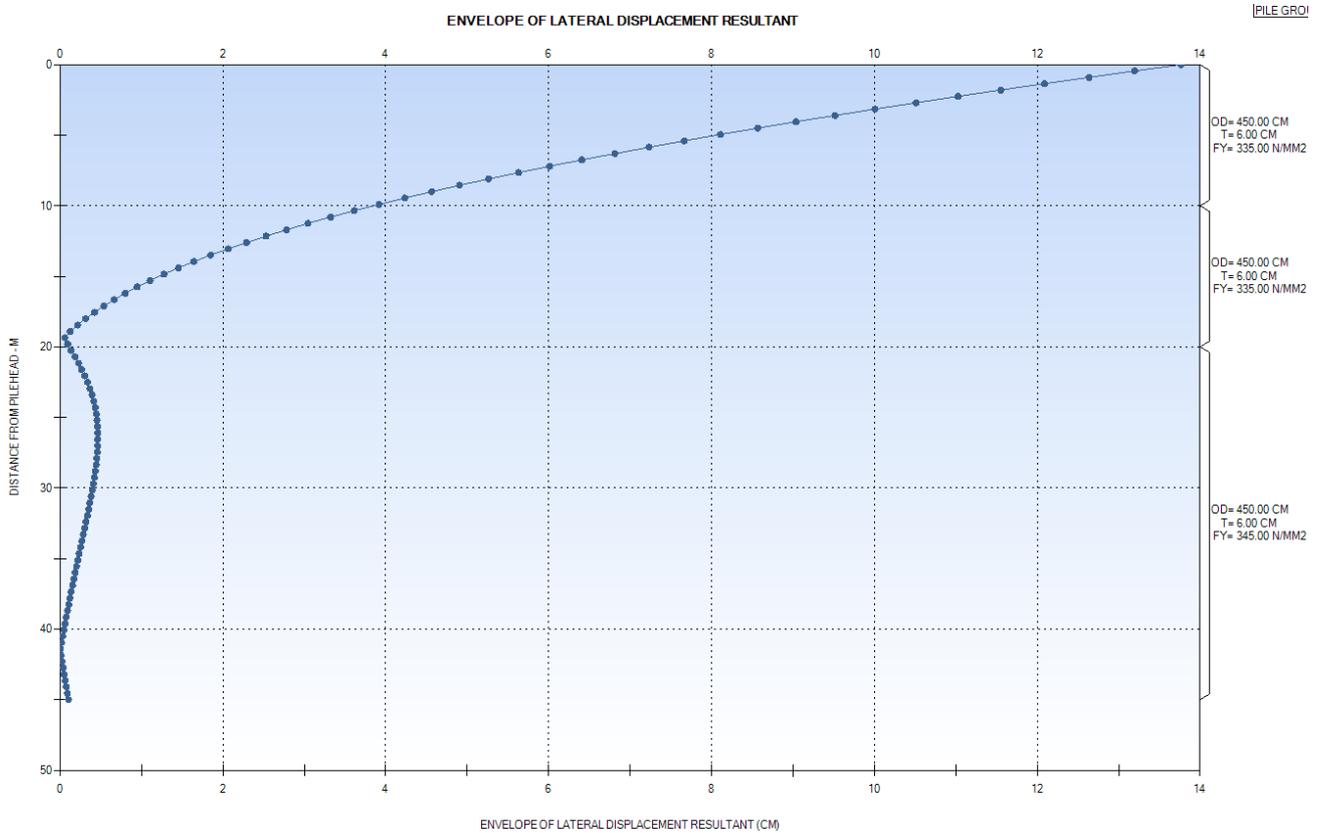


Figure 7-4: Seitliche Pfahlverformung unter der Baggerlinie

Die oben gezeigte Verformung basiert auf ULS-Lasten.

Des Weiteren wird die laterale Tragfähigkeit über die P-Y Methode berechnet, nach ref. [VI.]. Folgende Formeln werden verwendet:

$$Pd = A * p_u * \tanh \left[\frac{k * H}{A * p_u} * y \right]$$

Mit:

A = Cyclic Faktor (konservativ als 0.9 angesetzt)

p_u = Tragfähigkeit auf Tiefe unter Baggerlinie H

K = Bettungsmodul

Pd = Laterale Tragfähigkeit

	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
		Seite 22 von 38

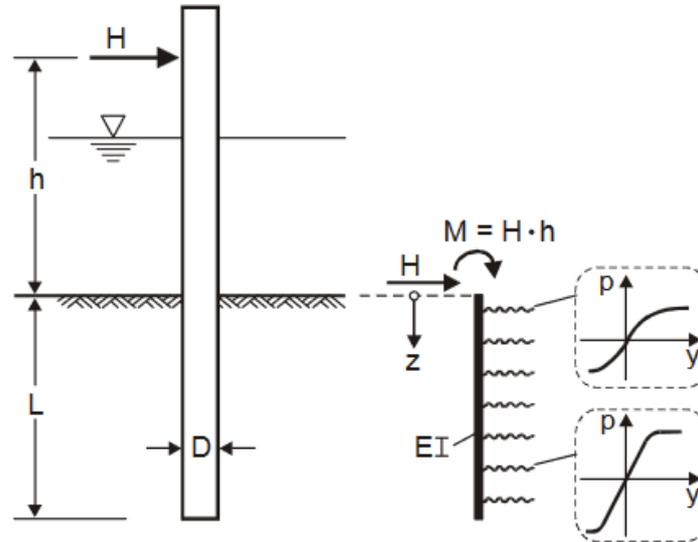


Figure 5: Statisches System für Laterale Tragfähigkeit

Die folgenden Lasten ergeben sich aus den Fender- und Mooring-Lasten. Umweltlasten werden als vernachlässigbar betrachtet. Fender und Mooring Lasten wirken 90° gedreht zueinander.

Table 9: Überblick der Lateralen Kräfte und Momente

Dalbe	Mooring Last (ML)	Fender Last (FL)	Gesamt Horizontal Last (Fh)	Mooring Moment (MM)	Fender Moment (FM)	Gesamt Moment (Mh)
[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
Anker Dalbe	$4 \cdot 150 \cdot 9,81 \cdot 1,2 = 7.063,2$	-	7.063,2	$7.063,2 \cdot 25 = 176.580,0$	-	176.580,0
Anlege Dalbe	$3 \cdot 150 \cdot 9,81 \cdot 1,2 = 5.297,4$	$6.000,0 \cdot 1,2 = 7.200,0$	8.938,8*	$5.297,4 \cdot 25 = 132.435,0$	$7.200,0 \cdot 21,6 = 155.520,0$	204.268,2**
*Fh = $(ML^2 + FL^2)^{0,5}$						
**Mh = $(MM^2 + FM^2)^{0,5}$						

Die Anlege Dalben sind maßgeblich für die Berechnung.

  	Struktur		
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung	Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU			Seite 23 von 38

Table 10: Überblick der Lateralen Tragfähigkeit

Tiefe Unter Baggerlinie	Schicht Höhe	Segment Länge*	Cyclische Faktoren***	Lateraler Widerstand	P-Faktor**	Laterale Tragfähigkeit Pro Segment
		Li	A	p_u	pf	$PD=p*Li*pf$
[m]	[m]	[m]	[-]	[kN/m]	[-]	[kN]
0,0	0,0-2,1	2,1	0,9	0	1,00	0.00
2,1			0,9	0	1,00	0.00
2,1	2,1 - 3,2	1,1	0,9	338,1	1,00	247,94
3,2			0,9	514,88	1,00	188,79
3,2	3,2 - 31,5	28,3	0,9	423,64	1,00	7.992,67
31,5			0,9	14.375,00	1,00	135.604,12
31,5	31,5 - 32,2	0,7	0,9	20.697,70	1,00	9.658,93
32,2			0,9	21.277,33	1,00	4.964,71
32,2	32,2 - 38,0	5,8	0,9	17.592,87	1,00	68.025,76
38,0			0,9	23.571,82	1,00	45.572,19
38,0	38,0 - 42,0	4,0	0,9	23.825,31	1,00	63.534,16
42,0			0,9	28.391,10	1,00	37.854,80
42,0	42,0 - 45,0	3,0	0,9	37.042,75	1,00	74.085,50
45,0			0,9	41.751,74	1,00	41.751,74
Summe PD						489.481,31
*Die Segmente sind unterteilt in 2/3 für den oberen Teil der P-Y Widerstände und 1/3 für den Unteren.						
**Keine Gruppen Effekte oder Kolk ist angesetzt						
*** Cyclische Effekte sind in einem Konservativen Ansatz mit angewandt						

Mit der Oben aufgeführten Tragfähigkeit ergeben sich folgende Widerstände:

$$PD = 489.481,31 \text{ kN}$$

$$MPD = PD * L/2 = 489.481,31 \text{ kN} * 22,5 \text{ m} = 11.013,329.3 \text{ kNm}$$

Im Vergleich zu den berechneten Widerständen sind die auftretenden Lasten Vernachlässigbar.

7.5.3 Axiale Auslastung des Bodens

Die maximale Axiallast auf den Boden liegt bei 3,830.9 kN (Ergebnis aus globaler Berechnung aus Kapitel 7), verglichen mit der Kapazität von 67,046.3 kN (Ergebnis aus globaler Berechnung aus Kapitel 7) resultiert ein Sicherheitsfaktor von 17.5.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU	Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08	
		Seite 24 von 38

8 Anker und Anlege-Dalben Fundamente – Installation (P/1; P/2)

8.1 Lift Analyse

Die Pfähle sind mit einem HLV aus ihrer horizontalen Position von der Barge in eine vertikale Position zu heben. Ein 1-Haken-Lift ist vorgesehen.

8.1.1 Lift Anordnung

In diesem Bericht wird die horizontale Phase des Hebens überprüft, da sie als die kritischste Position für den Pfahl angesehen wird.

Das folgende Bild zeigt die Auftriebsanordnung sowie die Randbedingungen.

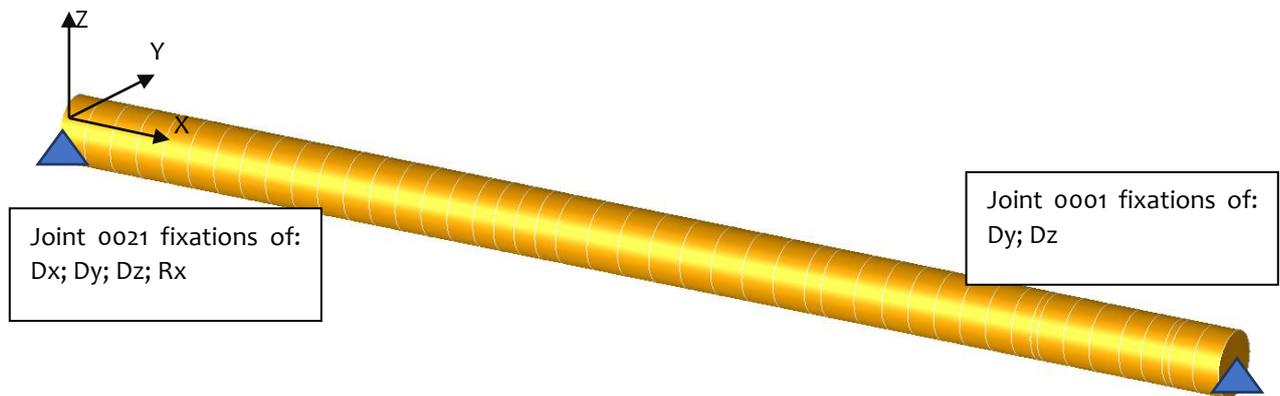


Figure 8-1: Übersicht Lift Modell

Die Rotations- und Seitlicherandbedingung (DY) dient nur der numerischen Stabilität.

Table 11: Übersicht Randbedingung

Joint Name	Beschreibung	Verschub	Rotation
0001	Hook Joint	Dy; Dz	-
0021	Joint on Barge	Dx; Dy; Dz	Rx

8.1.2 Hebepunkt Details

Details der Hebepunkte werden in zukünftigen Projektphasen entworfen und verifiziert.

	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		
		Seite 25 von 38

8.1.3 Lastfaktoren

Für den Nachweis des Lifts werden Faktoren gem. Regeln der DNV-RP-N102 (Referenz [III.]) und DNV-ST-N001 (Referenz [IV.]) berücksichtigt. Diese Faktoren werden in den folgenden Unterkapiteln erläutert.

Der Eurocode wird nicht befolgt, da der Offshore-Hebebetrieb nicht in der Norm abgedeckt ist.

Für geometrischen Übersicht siehe Kapitel 7.2.

8.1.3.1 Lastfall

Für den Lift wird ULS-Fall A gewählt, da nur Eigengewicht berücksichtigt wird. Es wird ein Lastfaktor von 1.3 berücksichtigt.

8.1.3.2 Liftfaktoren

Die folgende Tabelle fasst die Angewandten Lift Faktoren zusammen. DNV Normen [III.] und [IV.] werden berücksichtigt.

Table 12: Lift Faktoren

Beschreibung	Lastfaktor	Global	Lokal	Lift Punkt	Kommentar
Dynamic Amplification Factor	DAF	1,15	1,15	1,15	DAF in air for 300 t < SHL ≤ 1.000 t
Skew Load Factor	SKL	1,00	1,00	1,00	single crane, two hook lift – statically determined
Tilt Factor	TILT	1,05	1,05	1,05	
Yaw Factor	YAW	1,00	1,00	1,00	no yaw forces ref [1.]
Weight Contingency Factor	WCF	1,00	1,00	1,00	
COG Inaccuracy Factor	CIF	1,05	1,05	1,05	
Consequence Factor	CON	1,00	1,15	1,30	
Total Lift Factors		1,27	1,46	1,65	
Ultimate Limit State	ULS	1,30	1,30	1,30	
Gesamt		1,65	1,90	2,15	

In einem konservativen Ansatz wird der Gesamtpfahl, mit dem einem Faktor von 2.15 verifiziert.

8.1.4 Ergebnisse

Die folgenden Unterkapitel stellen die Memberauslastung sowie die Reaktionslasten dar.

8.1.4.1 Member Ergebnisse

Der Pfahl ist in der Mitte am höchsten ausgelastet. Maximaler UC liegt bei 0.32.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
		Seite 26 von 38

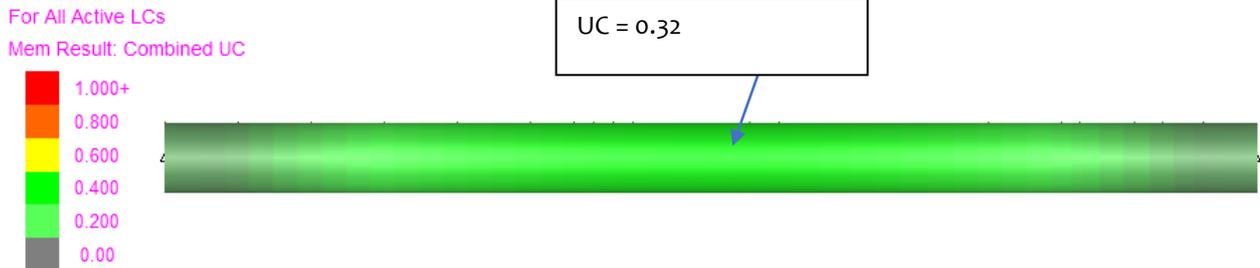


Figure 8-2: Übersicht Lift Modell

8.1.4.2 Reaktionslasten

Die folgenden reaktionslasten ergeben sich an den eingespannten Joints.

Table 13: Unfaktorisierte Reaktionslasten

Joint	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0001	0,0	0,0	2.490,5	0,0	0,0	0,0
0021	0,0	0,0	2.490,5	0,0	0,0	0,0

8.2 Eindringung unter Eigengewicht

Die folgende Tabelle zeigt die zu erwartenden Eindringtiefen des Pfahls in den Boden unter Berücksichtigung des Eigengewichtes des Pfahls und des Hammers. Grundsätzlich wird nicht davon ausgegangen, dass bei einem Pfahl von 4,5 m Durchmesser ein Plug entsteht.

Table 14: Eigengewicht Eindringung

Konfiguration	Pfahl Zustand	Low Estimate In-Place (-10% Soil Resistance)	Best Estimate	High Estimate In-Place (+10% Soil resistance)	High Estimate Driving (+25% Soil Resistance)
[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]
Reines Pfahl Gewicht: 460 t	Plugged	2,6	2,6	2,2	2,2
	Un-Plugged	11,8	10,6	10,0	8,2
Pfahl und Hammer: 460 t + 450 t	Plugged	7,0	4,6	2,6	2,2
	Un-Plugged	17,0	15,2	14,4	12,2

Eindringung ist über das Gleichgewicht zwischen Bodenwiderstand und Eigengewicht überschlagen.

Für die weitere Berechnungen und T&I Annahmen wird von einer Eigengewichtspenetration von 4,5 m (1 * Außendurchmesser) ausgegangen.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 27 von 38

8.3 Pile Driving Analyse

8.3.1 Pfahl Modell

Es wird davon ausgegangen, dass sich während der Rammarbeiten aufgrund des (gem. Alm/Hamre (Ref. [4.])) großen Pfahldurchmessers kein Bodenpfropfen bildet.

Daher wird für die Rammanalyse nur der Unplugged Zustand betrachtet (innere und äußere Mantelreibung angenommen mit T-Faktor = 2,0). Die Pfahlsole wird als offenes Ende angenommen, und daher wird die Reibung zwischen Pfahl und Boden an der Innen- und Außenfläche berücksichtigt.

Der Hammertyp wird basierend auf der Pfahlgeometrie ausgewählt. Der Hammertyp muss vom T&I-Vertragspartner bestätigt werden. Alternativen wie die MHU 2.400 und MHU 3.500 sind ebenfalls möglich.

8.3.2 Hammer

Der verwendete Hammertyp ist ein IHC S2.000 mit einem angewendeten Wirkungsgrad von 95 %, was einen typischen Wirkungsgrad darstellt, wie vom Hammerlieferanten bestätigt.

Für die Driveability werden die Hammereigenschaften nach Herstellerdatenblättern gewählt. Die Hammerkonfiguration wird ohne Cushion angenommen, was zu einem Stahl-auf-Stahl-Schlag führt. Im Folgenden werden die wichtigsten Eingabedaten für die ausgewählten Hämmer aus dem GRLWEAP-Programm demonstriert.

- Rammgewicht 990 kN
- Maximale Schlagenergie 1.900 kJ
- Schlagrate 30 blows/min
- Maximaler Stroke 2,02 m
- Maximale Hammereffizienz 60%

8.3.3 Berücksichtigte Szenarien

Die Driveability berücksichtigt zwei Szenarien. Das erste Szenario ist der Best Estimate des Bodens und wird auf der Grundlage einer maximalen Hammerenergie von 2.000 kJ berechnet. Das zweite Szenario verwendet den High Estimate des Bodens mit einer Hammerenergie von bis zu 2.000 kJ.

- Scenario 1: best estimate soil max. 1.900 kJ Hammer Energie
- Scenario 2: high estimate soil max. 1.900 kJ Hammer Energie

8.3.4 Quake and Damping

Nach Alm/Hamre (ref. [3.]) werden die folgenden Parameter verwendet:

Shaft quake: 2,5 mm

Toe quake: 2,5 mm (für offene Pfahlenden)

Shaft damping: 0,25 sec/m.

Toe damping: 0,5 sec/m.

8.3.5 Pile Refusal Kriterien

The folgenden Refusal Kriterien werden berücksichtigt. Grundlage sind vorangegangene Projekte mit ähnlichen Anforderungen:

- L1: 125 blows pro 250 mm über 1,5 m Eindringung
- L2: Kontinuierliches überschreiten von 125 blows/0,25 m über eine Eindringung von 1,0 m
- L3: 200 oder mehr blows über 250 mm Eindringung

Jedes einzelne dieser Szenarien führt zu Pile Refusal.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 28 von 38

8.3.6 Static Resistance to Driving (SRD)

Unter Verwendung des Alm/Hamre-Ansatzes werden Wellenwiderstandsprofile determiniert. Summiert man den Schaftwiderstand über die gesamte Eindringtiefe und addiert den Spitzenwiderstand, der ebenfalls gem. Alm/Hamre bestimmt ist, ergibt sich der statische Widerstand in unterschiedlichen Eindringtiefen.

Punkte auf der SRD-Kurve wurden in 1,0-m-Schritten bestimmt (Best Estimate). Figure 8-3 zeigt die SRD-Kurve für den zuvor beschriebenen Pfahl (im BE) als lila gestrichelte Linie sowie die untersuchten Punkte der Pfahlrammfähigkeitsanalyse für BE (rote Linie) und HE (blaue Linie). Zur Vorhersage des HE wird die BE-Kurve mit dem Faktor 1,25 multipliziert (ref. [3.]).

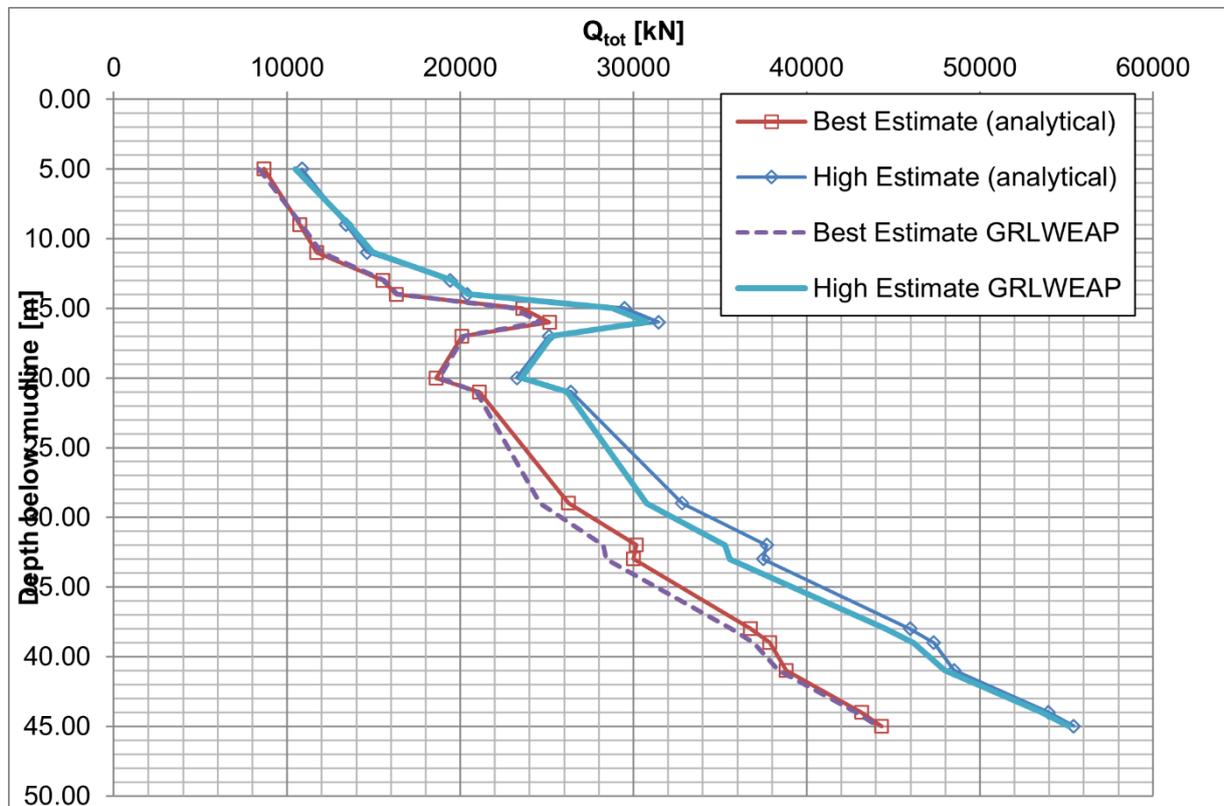


Figure 8-3: Static Resistance to Driving Kurven

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		
		Seite 29 von 38

8.3.7 Ergebnisse Scenario 1 – Best Estimate

8.3.7.1 Driveability

Nachfolgend wird eine Übersicht der Schlagzahlen während der Driveability für die Best Estimate Bodenwiderstände angegeben. Die Hammerenergie wird so eingestellt, dass etwa 120 Schläge pro 0,25 m aufrechterhalten werden, bis eine maximale Energie von etwa 2.000 kJ erreicht wird. Refusal wird ab 500 Schlägen/m (125 Schläge/0,25 m) mit maximaler Energie berücksichtigt.

Die Gesamtzahl der Schläge beträgt 4.593 (für eine Eindringtiefe von 44,5 m) und es wird eine maximale Energie von 582,6 kJ für den Best Estimate Bodenwiderstand erreicht. Geht man von einer Schlagzahl von 30 Schlägen pro Minute aus, führt dies zu einer Rammzeit von ca. 150min. Wie in der folgenden Tabelle gezeigt, tritt kein Refusal auf.

Table 15: Schlagzahlen – Best Estimate (BE)

Depth [m]	Ultimate Capacity [kN]	Friction [kN]	End Bearing [kN]	Blow Count [blows/m]	Comp. Stress [MPa]	Tension Stress [MPa]	Stroke [m]	ENTHRU [kJ]
5,0	8.378,6	2.262,5	6.116,1	73,6	48,3	-29,4	2,02	135,4
9,0	10.869,3	5.471,4	5.397,9	87,5	54,7	-31,0	2,02	174,1
11,0	11.966,3	6.789,2	5.177,1	95,8	55,2	-29,9	2,02	174,1
13,0	15.599,3	8.536,0	7063,4	102,9	63,4	-29,8	2,02	232,3
14,0	16.363,5	9407,2	6.956,4	100,9	65,8	-30,8	2,02	251,8
15,0	23.022,2	10.740,7	12.281,5	128,7	74,8	-24,0	2,02	329,5
16,0	24.605,1	12.485,2	12.119,9	130,3	76,9	-23,4	2,02	349,0
17,0	20.219,7	13.534,9	6.684,7	106,2	72,4	-30,7	2,02	310,0
20,0	18.809,3	14.230,7	4.578,6	105,9	67,7	-32,3	2,02	271,3
21,0	20.931,6	14.529,2	6.402,4	116,5	69,9	-30,0	2,02	290,5
29,0	24.607,4	18.611,5	5.995,9	124,5	74,0	-30,3	2,02	329,5
32,0	28.243,1	21.475,7	6.767,5	130,7	78,1	-28,0	2,02	368,5
33,0	28.442,5	22.603,4	5.839,0	130,3	78,0	-28,6	2,02	368,5
38,0	35.672,3	28.254,7	7.417,6	125,4	89,4	-28,0	2,02	485,1
39,0	36.942,0	29.563,1	7.378,8	124,7	91,1	-28,5	2,02	504,6
41,0	38.355,5	31.918,3	6.437,2	123,5	92,8	-29,6	2,02	524,1
44,0	42.820,2	35.626,0	7.194,2	128,8	96,1	-29,3	2,02	563,1
45,0	44.096,8	36.938,5	7.158,3	128,4	97,7	-30,4	2,02	582,6

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 30 von 38

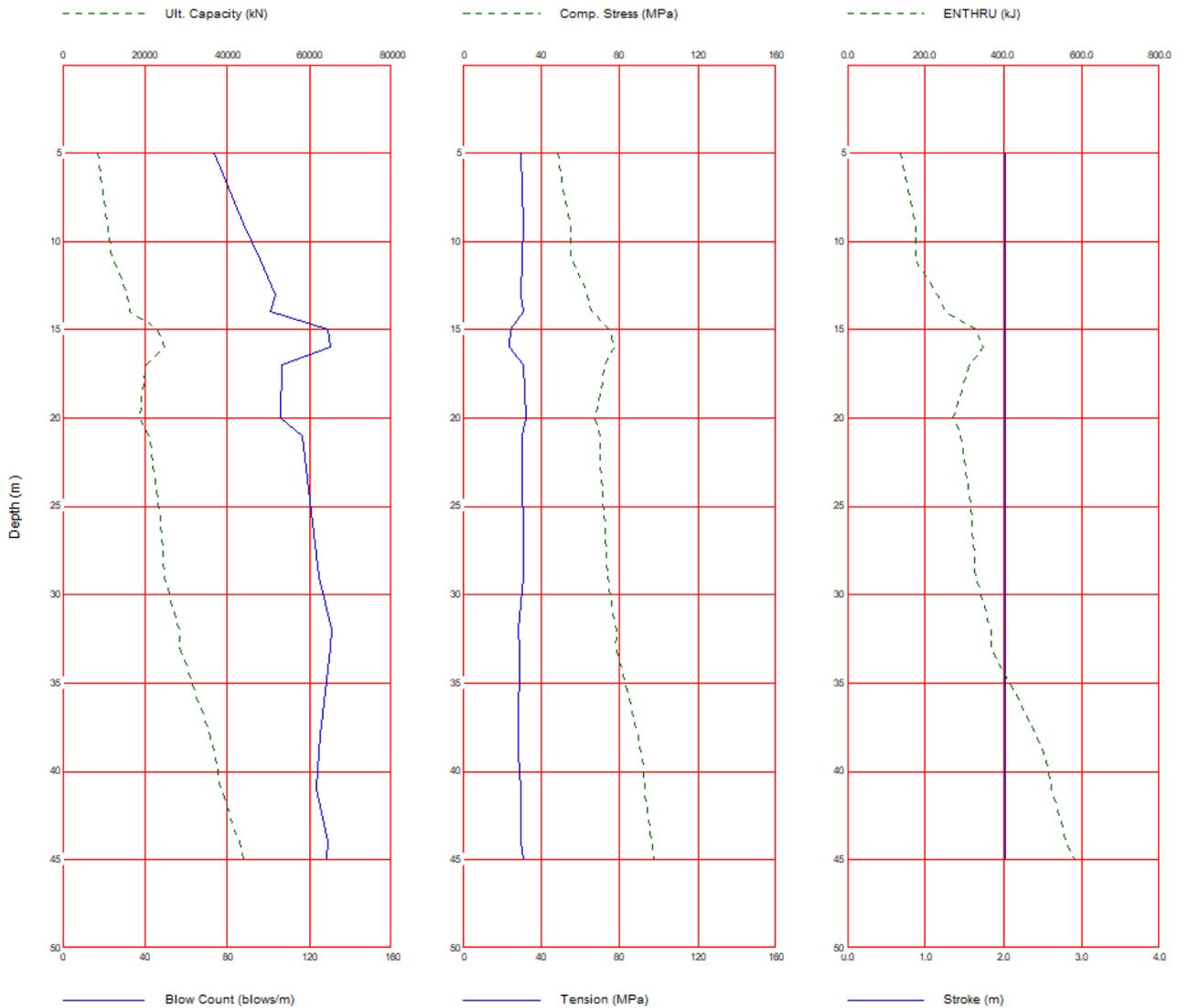


Figure 8-4: Best Estimate

8.3.7.2 Ermüdungsbetrachtung

Piledriving Ermüdung wird nach DNV ref. [V.] geprüft. Ein Ermüdungsfaktor von $DFF = 10$ ist angesetzt. S-N Kurve D ist außerdem verwendet für die Betrachtung.

Der maximale Ermüdungsschaden liegt bei etwa 21%. Vom Boden aus gespiegelte Wellen sind Bestandteil der Betrachtung.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU	Seite 31 von 38	

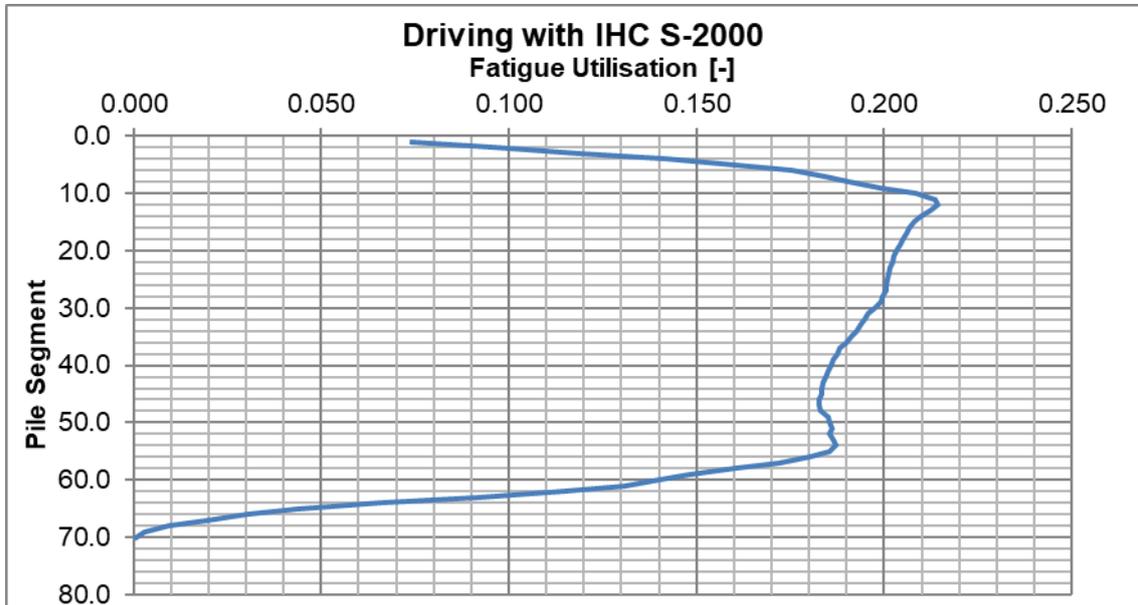


Figure 5: Ermüdungsschaden Überblick – Best Estimate

Es wird davon ausgegangen, dass hauptsächlich der Tidehub/Senk zu Lastwechseln im Fundament führt. Folgende Berechnung wird zur Grundlage genommen:

- Tide Änderung alle 6 Stunden (4 mal pro Tag)
- Lastwechsel pro Jahr: $4 \cdot 365 = 1.465,0$

Dies führt zu wenigen Lastwechseln über die Gesamtlebensdauer der Fundamente. Basierend auf Erfahrungswerten ist die Lastwechselzahl sehr gering und führt zu keiner nennenswerten zusätzlichen Ermüdungsbeanspruchung.

Durch die oben aufgeführten Vorschädigungen durch die Installation wird von keinem Ermüdungsproblem ausgegangen.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		
		Seite 32 von 38

8.3.8 Ergebnisse Scenario 2 – High Estimate

8.3.8.1 Driveability

Nachfolgend wird eine Übersicht der Schlagzahlen während der Driveability für die High Estimate Bodenwiderstände angegeben. Die Hammerenergie wird so eingestellt, dass etwa 120 Schläge pro 0,25 m aufrechterhalten werden, bis eine maximale Energie von etwa 2.000 kJ erreicht wird. Refusal wird ab 500 Schlägen/m (125 Schläge/0,25 m) mit maximaler Energie berücksichtigt.

Die Gesamtzahl der Schläge beträgt 4,736 (für eine Eindringtiefe von 44,5 m) und es wird eine maximale Energie von 777,8 kJ für den High Estimate Bodenwiderstand erreicht. Geht man von einer Schlagzahl von 30 Schlägen pro Minute aus, führt dies zu einer Rammzeit von ca. 156min. Wie in der folgenden Tabelle gezeigt, tritt kein Refusal auf.

Table 16: Schlagzahlen – High Estimate (HE)

Depth [m]	Ultimate Capacity [kN]	Friction [kN]	End Bearing [kN]	Blow Count [blows/m]	Comp. Stress [MPa]	Tension Stress [MPa]	Stroke [m]	ENTHRU [kJ]
5,0	10.473,1	2.828,0	7.645,1	87,6	54,4	-30,1	2,02	174,1
9,0	13.586,6	6.839,2	6.747,4	95,0	60,3	-30,1	2,02	212,8
11,0	14.957,9	8.486,5	6.471,3	126,5	55,3	-24,9	2,02	174,1
13,0	19.499,1	10.669,9	8.829,2	119,9	68,5	-26,7	2,02	271,3
14,0	20.454,4	11.758,9	8.695,5	118,8	70,7	-27,2	2,02	290,5
15,0	28.777,6	13.425,8	15.351,8	126,6	85,2	-20,5	2,02	427,0
16,0	30.756,3	15.606,4	15.149,9	123,7	88,8	-20,2	2,02	466,1
17,0	25.274,5	16.918,6	8.355,9	115,3	81,1	-28,3	2,02	388,0
20,0	23.511,7	17.788,4	5.723,3	76,1	93,8	-43,2	2,02	524,2
21,0	26.164,5	18.161,5	8003,0	124,5	78,8	-28,3	2,02	368,5
29,0	30.759,1	23.264,2	7.494,9	128,9	82,5	-27,7	2,02	407,5
32,0	35.303,8	26.844,4	8.459,3	125,5	89,9	-27,4	2,02	485,1
33,0	35.552,9	28.254,1	7.298,8	121,0	91,6	-28,3	2,02	504,6
38,0	44.590,3	35.318,3	9.272,0	128,7	100,0	-29,5	2,02	602,2
39,0	46.177,4	36.953,9	9.223,5	125,9	103,1	-30,7	2,02	641,2
41,0	47.944,3	39.897,8	8.046,5	125,7	104,6	-32,4	2,02	660,7
44,0	53.525,2	44.532,5	8.992,8	128,3	110,6	-35,0	2,02	738,7
45,0	55.120,9	46.173,0	8.947,9	126,3	113,5	-35,6	2,02	777,8

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
		Seite 33 von 38

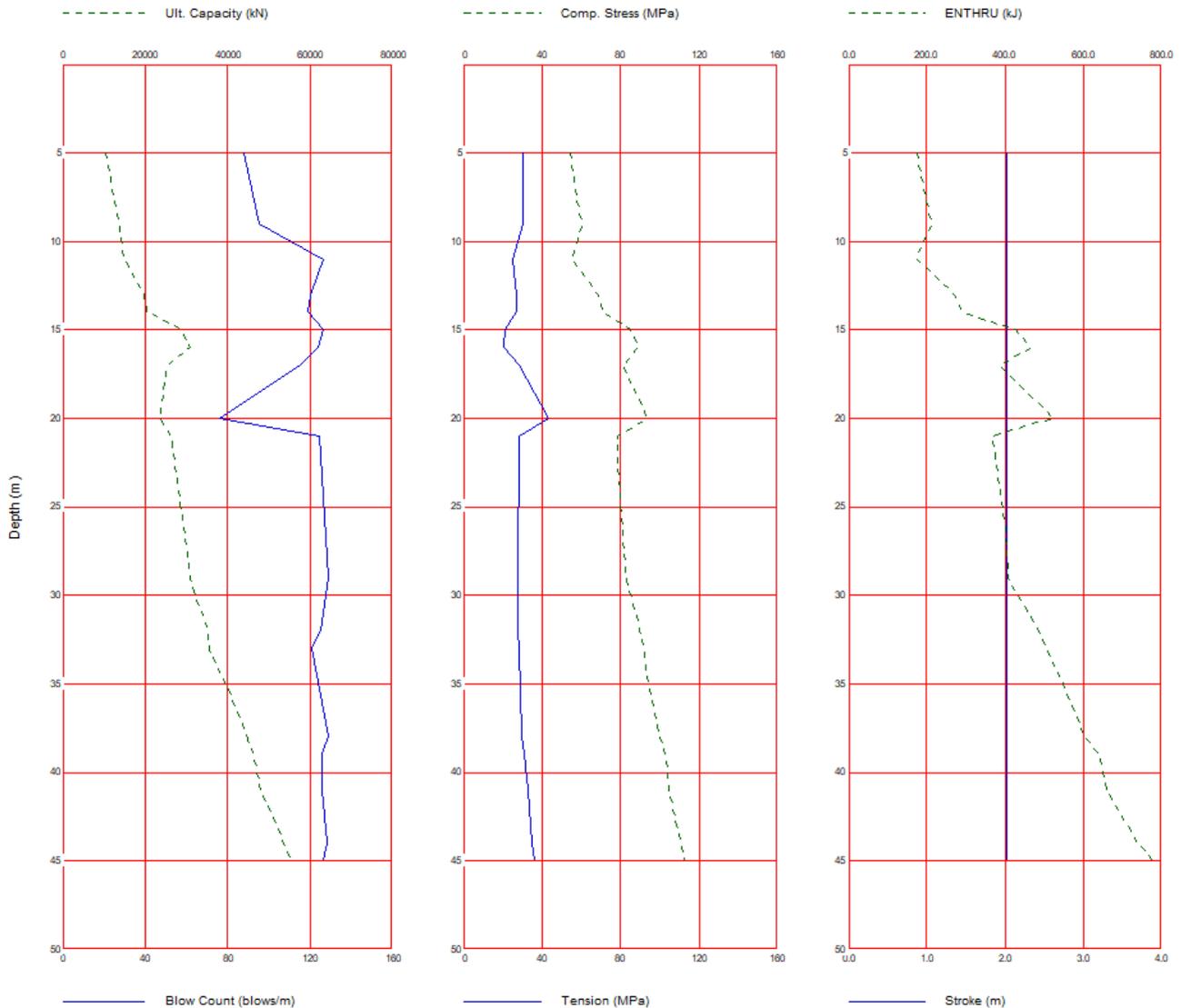


Figure 8-6: High Estimate

8.3.8.2 Ermüdungsschaden

Der High Estimate wird nicht durchgehend während der Rammphase erwartet. Daher ist dieser nicht Bestandteil der Betrachtung.

8.3.8.3 Pfahl Biegeknicken nach EC3 beim Rammvorgang

Bei dem Nachweis gegen Knicken werden zwei Fälle untersucht:

- Erster Rammschlag bei 5 m Eindringung und Minimaler Last
- Letzter Rammschlag bei 45 m Eindringung mit Maximaler Last

Die Lasten werden aus Tabelle Table 16 (high estimate) entnommen. Konservativ wird immer ein Knickfaktor von 2.1 gewählt. Ein Imperfektionsbeiwert α von 0.49 für kaltgewalzte Hohlprofile wird verwendet.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		
		Seite 34 von 38

Folgende Knicklängen und Lasten werden angenommen und ergeben folgende Auslastungen:

Table 17: Knicknachweis nach EC3

Fall	Knicklänge	Knicklast	Auslastungsgrad
[-]	[m]	[kN]	[-]
Erster Rammschlag	$70,5 * 2,1 = 148,05$	11.000,0	0,05
Letzter Rammschlag	$25,5 * 2,1 = 53,6$	55.000,0	0,21

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 35 von 38

A. CPT Data - MD2a-CPT

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 36 von 38

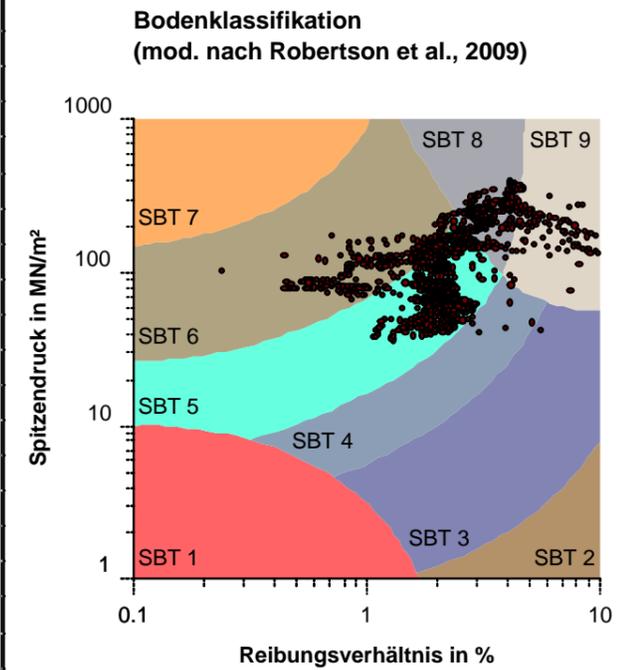
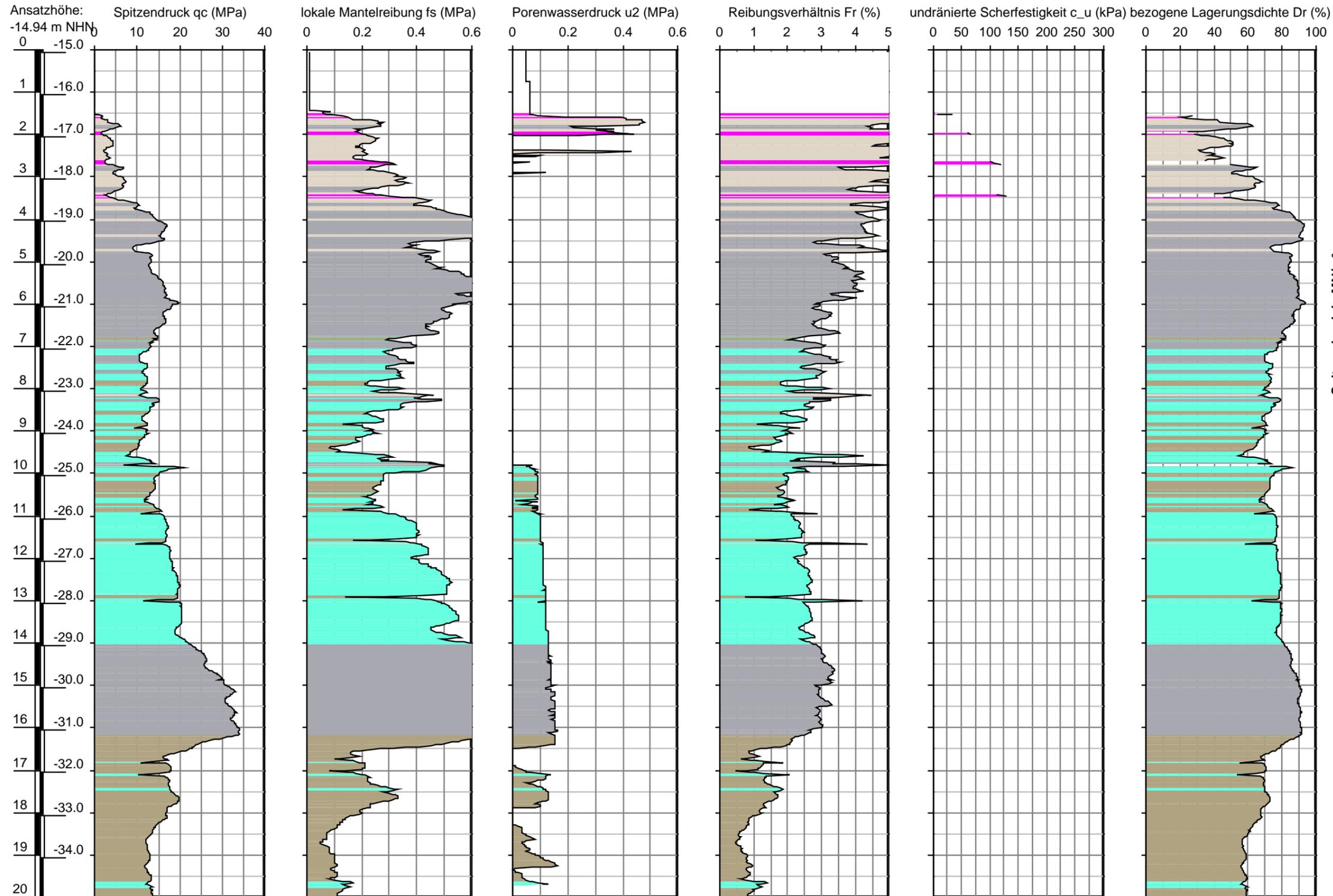
  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08 Seite 37 von 38

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Statische Pfahlfundamente	Berechnung Doc. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC - 2003.08
TES Code: TES-WHV-VGN-FSRU		Seite 38 von 38

Aufschluss: MD2a-CPT

Projekt: TES Energiepark Wilhelmshaven

Auftraggeber: Tree Energy Solutions GmbH Ansatzhöhe: -14.94 m NHN
Bohrdatum: 08.12.2022 Endteufe: 43.11 m
Bearbeiter: J.ENGHARDT Rechtswert: 442344
Hochwert: 5942973
Höhenmaßstab: 1:100 Koordinatensystem: UTM 32N

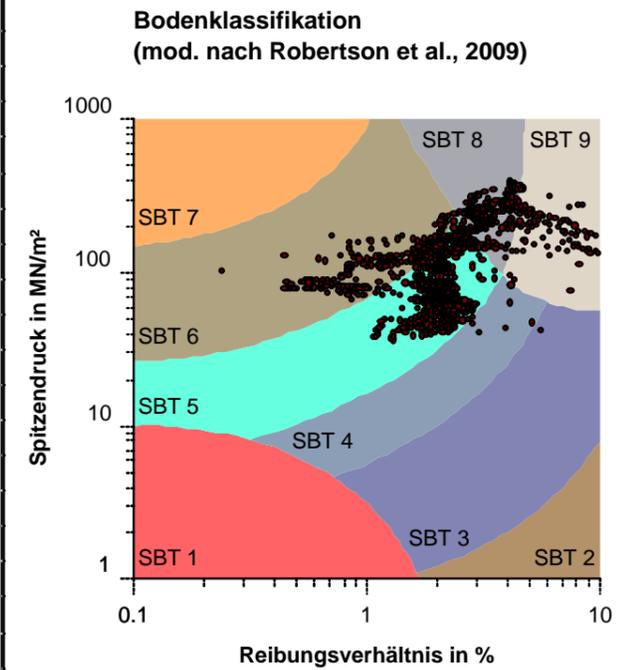
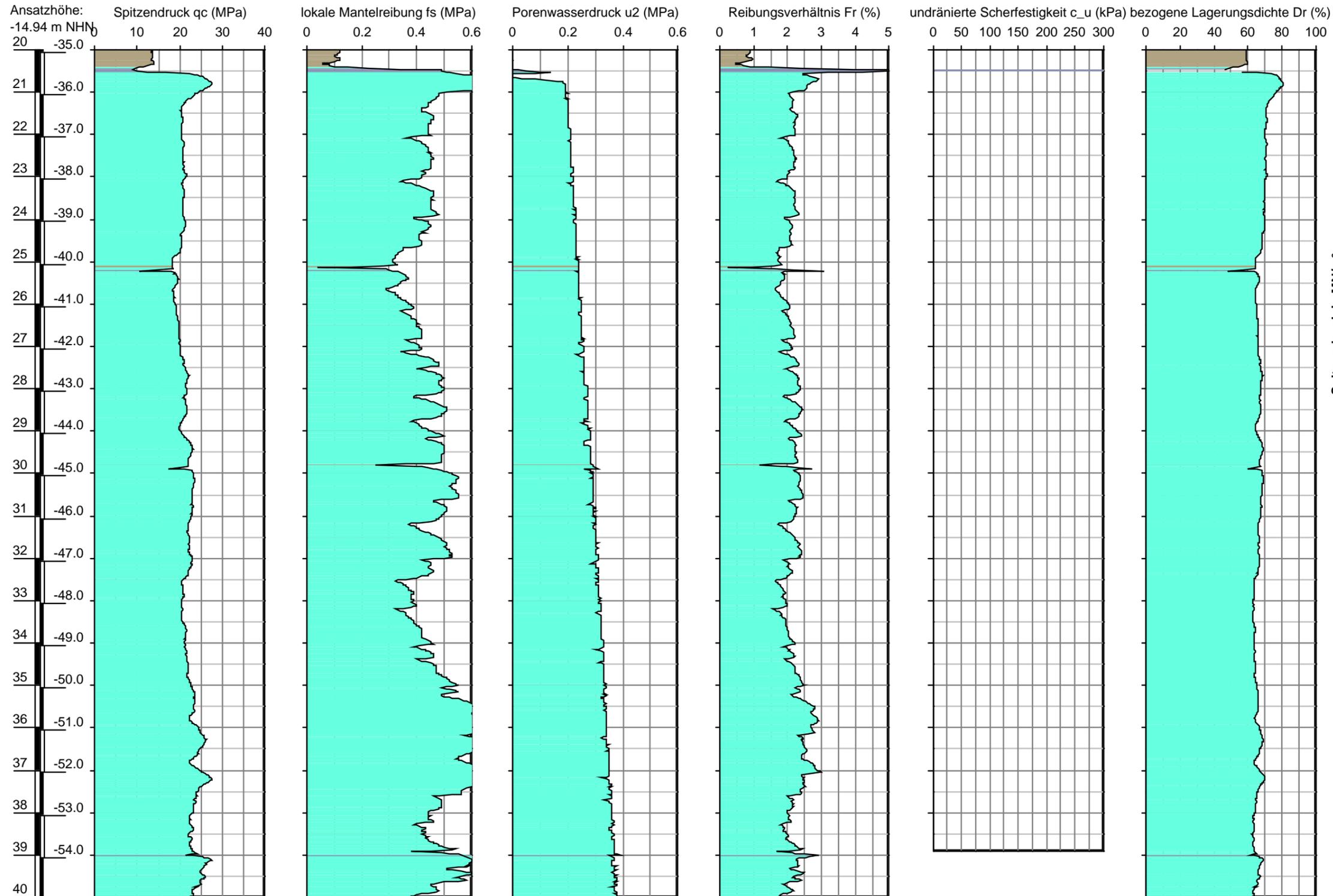


- Farblegende Spitzendruck-Profil:**
- 1 empfindlicher, feinkörniger Boden
 - 2 organischer Boden: Torf
 - 3 Ton; Ton bis schluffiger Ton
 - 4 Schluffgemische; toniger Schluff bis schluffiger Ton
 - 5 Sandgemische; schluffiger Sand bis sandiger Schluff
 - 6 Sand; reiner Sand bis schluffiger Sand
 - 7 Sand; dichter Sand bis kiesiger Sand
 - 8 sehr steifer, toniger Sand
 - 9 sehr steifer, feinkörniger Boden

Aufschluss: MD2a-CPT

Projekt: TES Energiepark Wilhelmshaven

Auftraggeber: Tree Energy Solutions GmbH Ansatzhöhe: -14.94 m NHN
Bohrdatum: 08.12.2022 Endteufe: 43.11 m
Bearbeiter: J.ENGHARDT Rechtswert: 442344
Höhenmaßstab: 1:100 Hochwert: 5942973
Koordinatensystem: UTM 32N

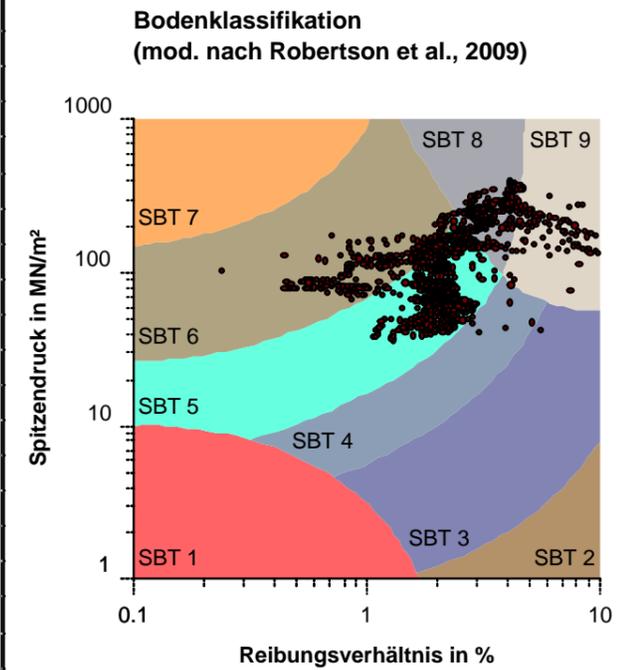
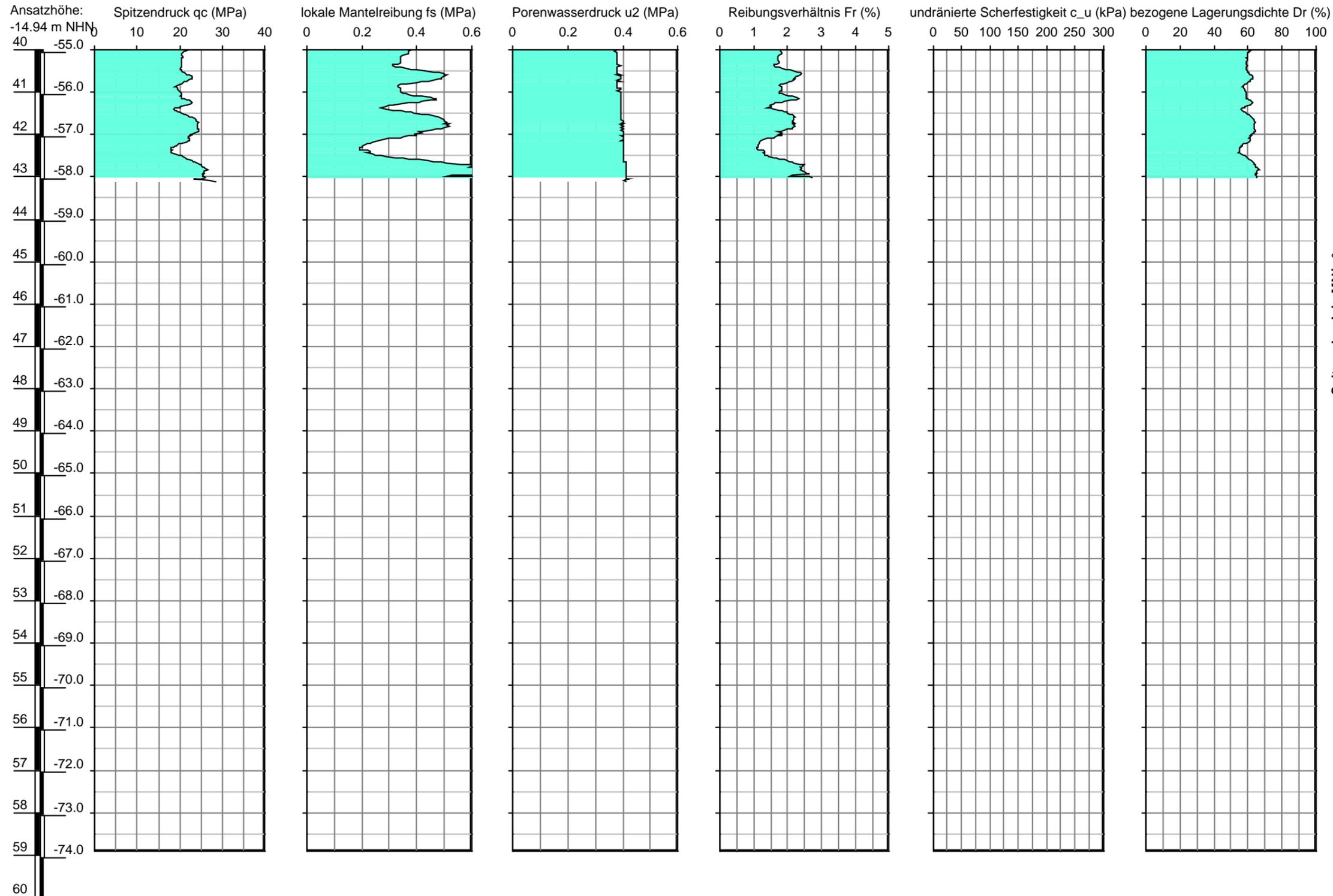


- Farblegende Spitzendruck-Profil:**
- 1 empfindlicher, feinkörniger Boden
 - 2 organischer Boden: Torf
 - 3 Ton; Ton bis schluffiger Ton
 - 4 Schluffgemische; toniger Schluff bis schluffiger Ton
 - 5 Sandgemische; schluffiger Sand bis sandiger Schluff
 - 6 Sand; reiner Sand bis schluffiger Sand
 - 7 Sand; dichter Sand bis kiesiger Sand
 - 8 sehr steifer, toniger Sand
 - 9 sehr steifer, feinkörniger Boden

Aufschluss: MD2a-CPT

Projekt: TES Energiepark Wilhelmshaven

Auftraggeber: Tree Energy Solutions GmbH Ansatzhöhe: -14.94 m NHN
Bohrdatum: 08.12.2022 Endteufe: 43.11 m
Bearbeiter: J.ENGHARDT Rechtswert: 442344
Hochwert: 5942973
Höhenmaßstab: 1:100 Koordinatensystem: UTM 32N



- Farblegende Spitzendruck-Profil:**
- 1 empfindlicher, feinkörniger Boden
 - 2 organischer Boden: Torf
 - 3 Ton; Ton bis schluffiger Ton
 - 4 Schluffgemische; toniger Schluff bis schluffiger Ton
 - 5 Sandgemische; schluffiger Sand bis sandiger Schluff
 - 6 Sand; reiner Sand bis schluffiger Sand
 - 7 Sand; dichter Sand bis kiesiger Sand
 - 8 sehr steifer, toniger Sand
 - 9 sehr steifer, feinkörniger Boden