

Tiefgründung von Windenergieanlagen mittels Pfähle

Deep foundation of wind energy converters through piles

Typische Pfahlsysteme und Kriterien für die Systemwahl, Pfahlstatik, Qualitätssicherung und Praxisbeispiele

*Typical pile systems and criteria for system choice, pile design, quality management
and case studies*

5. Fachveranstaltung

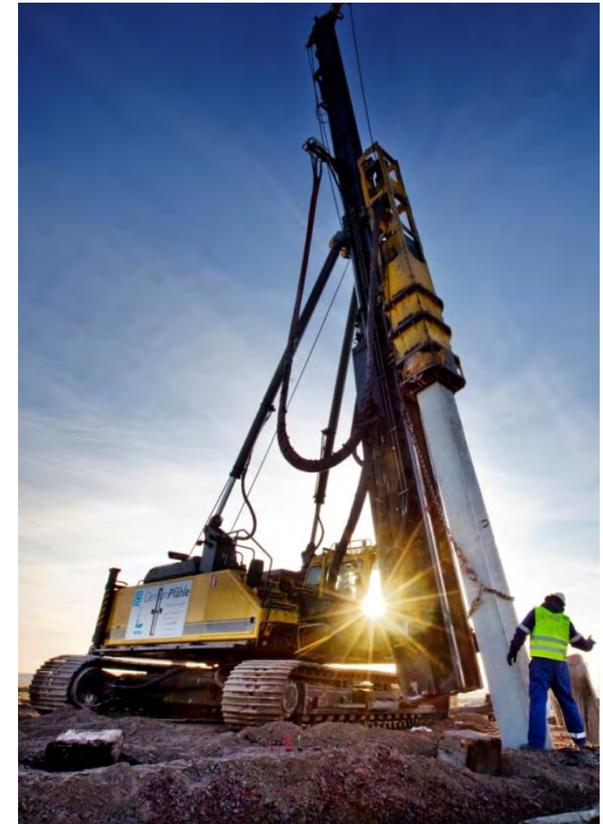
Baugrunderkundung, Baugrundverbesserung und Gründungen für Windenergieanlagen (Onshore)

5th Technical Conference

Subsoil Analysis, Ground improvement and wind turbine foundations

Haus der Technik, Essen 20.11.2014

Peter Wardinghus



Um Windkraftanlagen sicher zu gründen werden oft Pfähle verwendet. In der Regel handelt es sich um Rammpfähle, entweder Fertigteilpfähle oder Ortbetonrammpfähle. Nach einer kurzen Präsentation des Unternehmens, beschreibt dieser Vortrag die typische Pfahlsysteme. Ein besonderen Schwerpunkt ist die Vorstellung wichtiger Kriterien für die Systemwahl. Der Vortrag zielt darauf ab, alle Projektbeteiligten, nicht nur den Baugrundsachverständigen, auf diese Kriterien zu sensibilisieren, um für das konkrete Projekt die optimalste Lösung einzusetzen. Preis und Bauzeit werden von vielen Faktoren beeinflusst. Beispielsweise sind oft logistische Faktoren eher bestimmend als die Pfahlänge.

Weiter wird auf die Inhalte einer Pfahlstatik und die erforderliche Qualitätssicherung in der Ausführung eingegangen. Zum Schluss werden relevante Referenzprojekte kurz vorgestellt.

Piles are often used to give wind turbines a secure foundation. Normally, driven full displacement piles – pre cast or cast in situ - are installed. Proceeding a short company presentation, a description of typical pile systems is given. A special focus of this lecture is the discussion on important criteria for choosing the right pile system. It aims to sensibilise, not only the geotechnical adviser but all participants of a project, in order to implement the optimal solution for that specific project. Price and duration are determined through many factors. For instance, logistical factors are often more determining than the pile length.

Furthermore the content of the structural design and the necessary quality assurance measures on site are dealt with. This lecture ends with a presentation of some relevant project references



- Prolog – Unternehmen – der CENTRUM Pfahl
- Typische Pfahlsysteme
 - Der CENTRUM Pfahl
 - Der SIMPLEX und FRANKI Pfahl
- Kriterien für Systemwahl
- Pfahlstatik
- Qualitätssicherung
- Praxisbeispiele



Unternehmen



Per Aarsleff A/S

gegründet 1947

5000 Mitarbeiter

50 Rammgeräte

950 Mio. EURO Jahresumsatz

www.aarsleff.com



Centrum Pfähle GmbH

gegründet 1972 in Hamburg

55 Mitarbeiter

10 eigene Rammgeräte

5 Büros

25 Mio. EURO Jahresumsatz

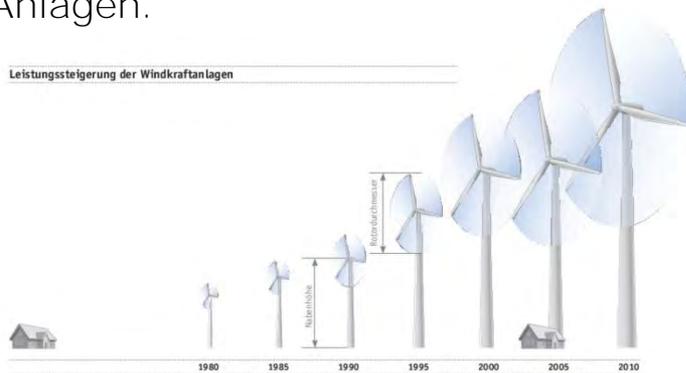
www.centrum.de



Unternehmen

Der Konzern Aarsleff hat sich von Anfang an auf dem Segment Windkraft fokussiert. Für Centrum Pfähle GmbH beträgt die Gründung von Windenergieanlage ca. ein Drittel vom der gesamte Jahresleistung.

Mehr als 6.100 onshore Windenergieanlage stehen Europaweit auf Stahlbetonfertigpfählen - Centrum Pfählen, in Deutschland mehr als 4.300 Anlagen.

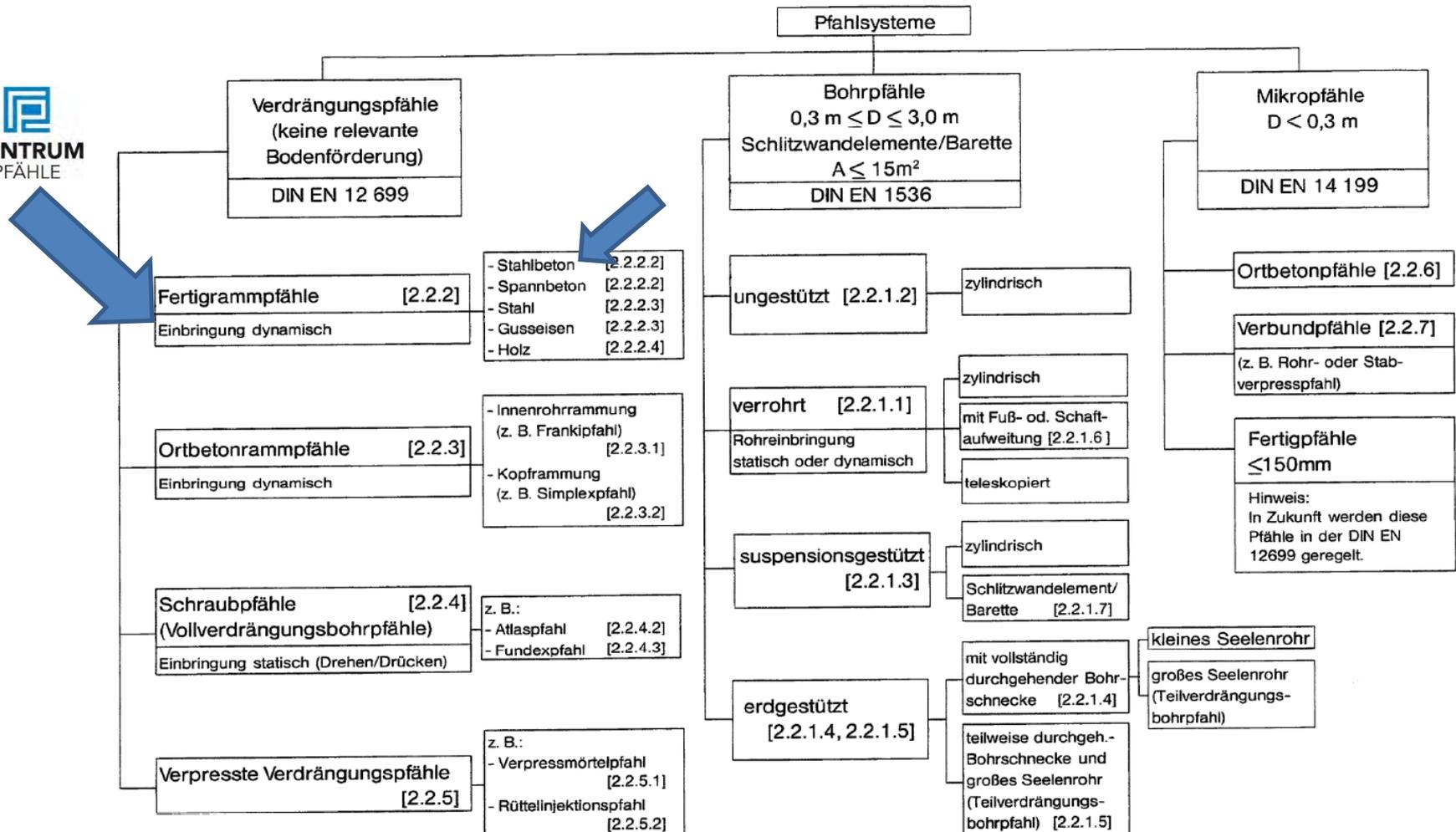


1901



heute

Typische Pfahlsysteme



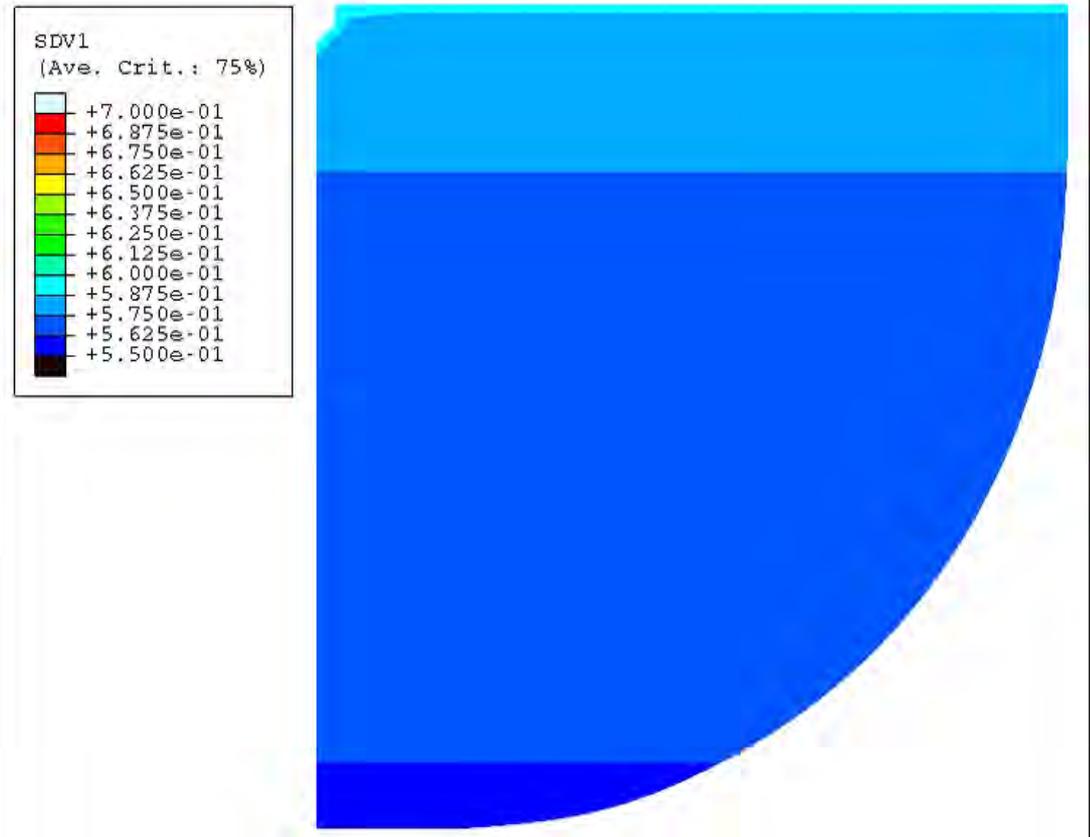
Typische Pfahlsysteme

Vollverdrängungspfahl – Einbau durch Rammen.

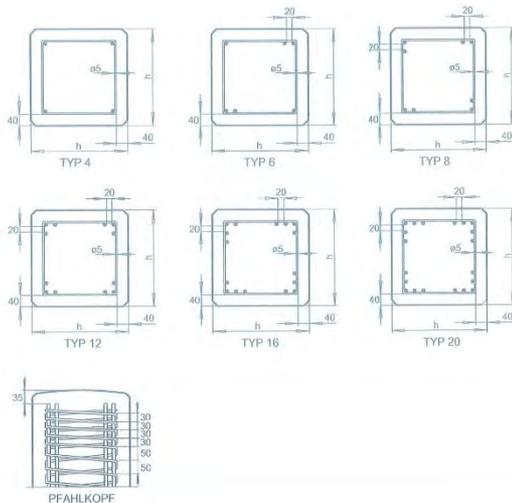
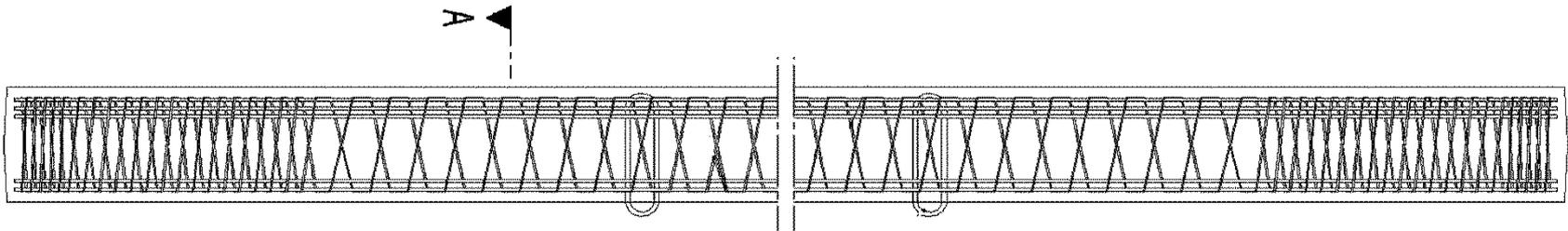
Der Pfahlquerschnitt wird durch Rammen eingebaut. In der Regel werden Hydraulikbären mit 6 bis 9 Tonnen Fallgewicht eingesetzt. (EAP: Einbringung dynamisch)

Der Boden wird vollkommen im Erdreich verdrängt.

Im nicht bindigen Böden wird die Porenanzahl reduziert (Siehe Animation). In diesen Verdichtungszone entsteht Mantelreibung und Spitzendruck = Pfahltragfähigkeit.



Der Centrum Pfahl



Teil

Technische Daten

Längsbewehrung:

B500B \varnothing 12 mm nach DIN 488
Die Längsbewehrung wird mit der Bügelbewehrung punktverschweißt.

Bügelbewehrung:

Spiralbewehrung (Wendel) B500A \varnothing 5 mm nach DIN 488
Biegerollendurchmesser $4 d_s = 2.0$ cm
Bügelabstand $a = 120$ mm, (im Pfahlkopfbereich $a = 30$ bzw. 50 mm)

Montagebügel:

Doppelschlaufige Transportanker S355 J2 G3 nach DIN EN 10025

Beton:

C 50/60 gemäß DIN EN 1992-1-1
Die Rissbreitenbeschränkung ist gewährleistet.
Festigkeitsentwicklung: bei Ausschalen und Transport im Werk entsprechend C 20/25,
bei Transport und Weiterverarbeitung auf Baustelle entsprechend C 50/60

Betonüberdeckung:

$c_v = 40$ mm für die Expositionsklassen (XC4) (Verlegemaß)

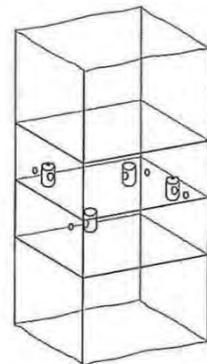
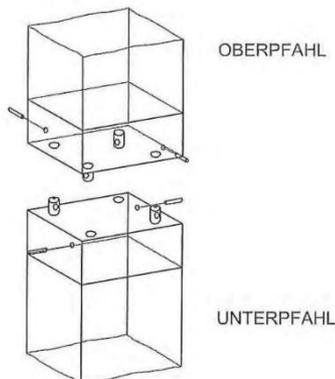


Der Centrum Pfahl

CPG-Kupplung

mit höchster Längenflexibilität für

- Realisierung extremer Gründungstiefen - mehr als 40 Meter !
- Hohe Wirtschaftlichkeit im Bereich Logistik
- Keine Beeinträchtigung der statischen Eigenschaften bei Zug, Druck und Momenteinwirkung
- Zulassung durch das Deutsche Institut für Bautechnik in Berlin



DIE BEIDEN
KUPPLUNGSHÄLFTEN
SIND ZUSAMMENGESTECKT



Deutsches Institut für Bautechnik **DIBt**

Zulassungsstelle für Bauprodukte und Bauarten
Bautechnisches Prüfamt
Eine vom Bund und den Ländern
gemeinsam getragene Anstalt des öffentlichen Rechts
Mitglied der EOTA und der UEATC

**Allgemeine
bauaufsichtliche
Zulassung**

Datum: 15.12.2010 Geschäftszzeichen: I 64-1.34.21-18/07

Zulassungsnummer: **Z-34.21-228** Geltungsdauer bis: **15. Dezember 2015**

Antragsteller:
Centrum Pæle A/S
Grønlandsvej 96
7100 Vejle
DÄNEMARK

Zulassungsgegenstand:
Pfahlkupplungen für Stahlbetonrammpfähle System "CPG"
mit Querschnitten von
25 cm x 25 cm, 30 cm x 30 cm, 35 cm x 35 cm, 40 cm x 40 cm und 45 cm x 45 cm

Der oben genannte Zulassungsgegenstand wird hiermit allgemein bauaufsichtlich zugelassen.
Diese allgemeine bauaufsichtliche Zulassung umfasst sieben Seiten und zehn Anlagen.

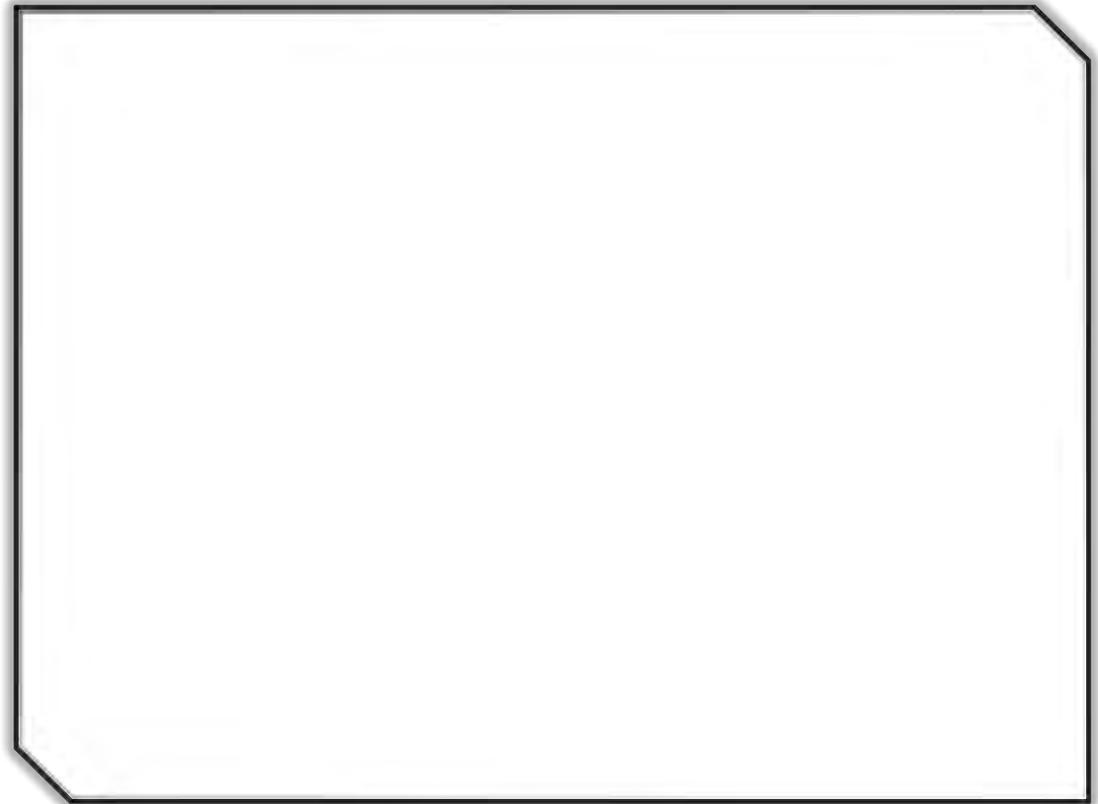


DIBt | Kolonnenstraße 30 B | D-10629 Berlin | Tel.: +49 30 78730-0 | Fax: +49 30 78730-320 | E-Mail: dibt@dibt.de | www.dibt.de

Der Centrum Pfahl

Der CENTRUM-Kupplungspfahl

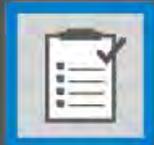
- Zeitaufwand für Kupplungsvorgang: 5 Minuten



Der Centrum Pfahl

CPS – DAS SYSTEM FÜR IHREN ERFOLG

Transparenz | Partnerschaft | Wirtschaftlichkeit | Masshaltigkeit | Nachhaltigkeit



01 PLANUNG



02 PRODUKTION



03 LOGISTIK



04 AUSFÜHRUNG



05 DOKUMENTATION



Der Centrum Pfahl



Hoher Automatisierungsgrad



Präzision



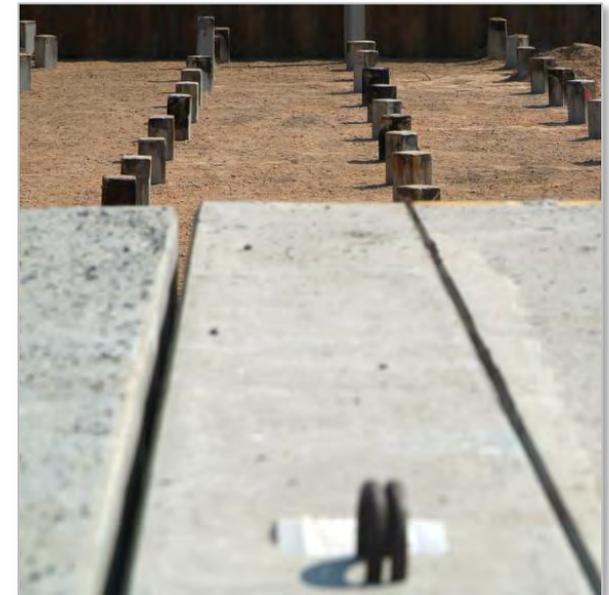
Eigene Produktionsstätten



Maßhaltigkeit

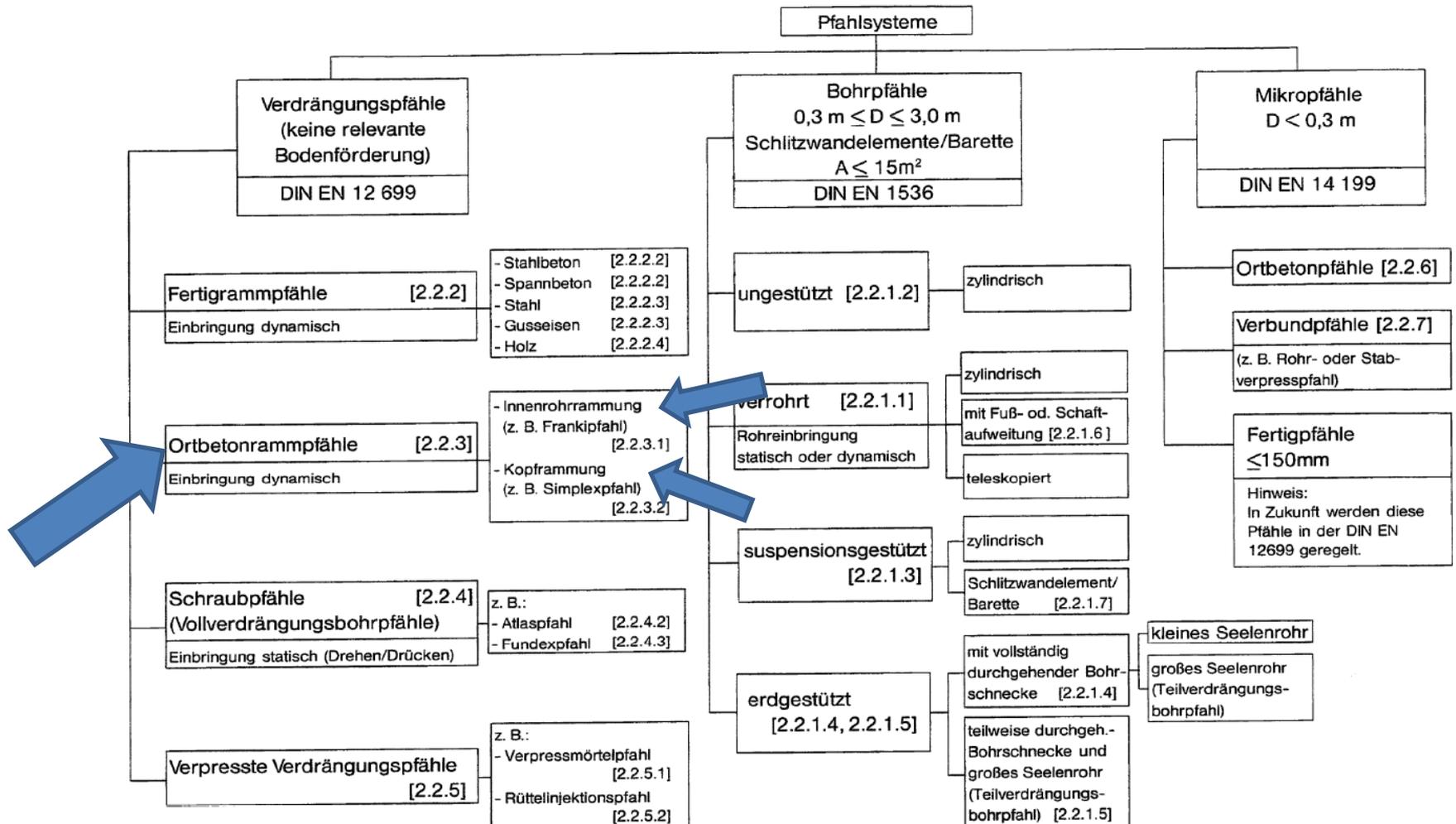


Transparenz



Ordentlich ... sauber ...
präzise ... exakt...

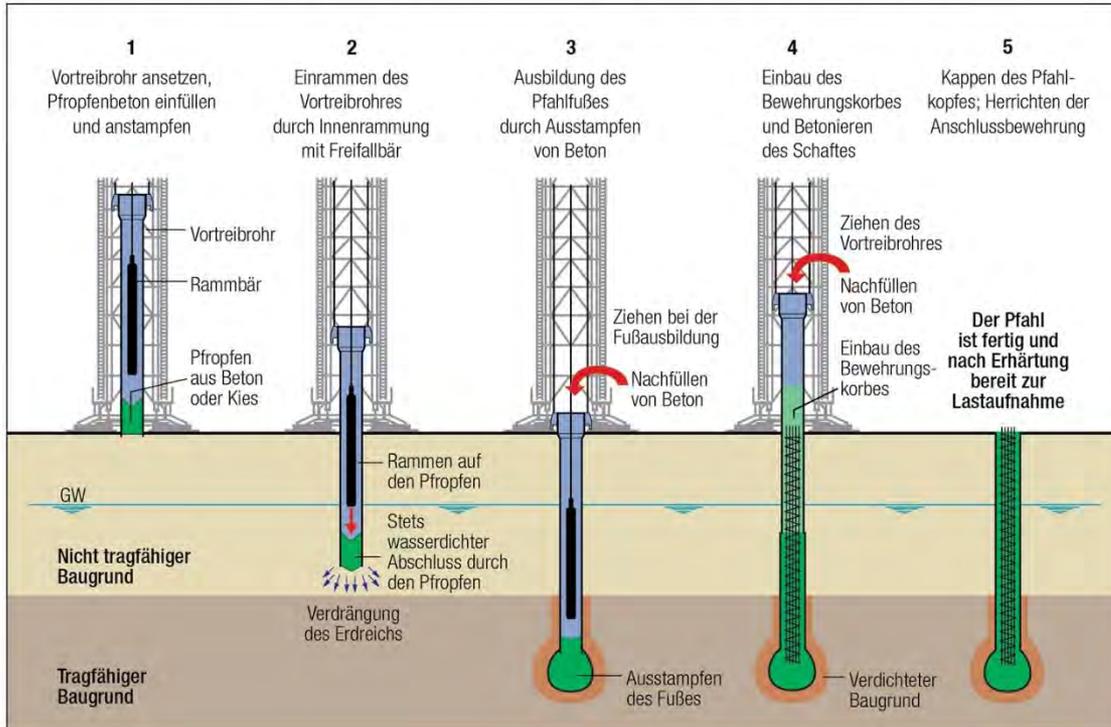
Typische Pfahlsysteme



Typische Pfahlsysteme

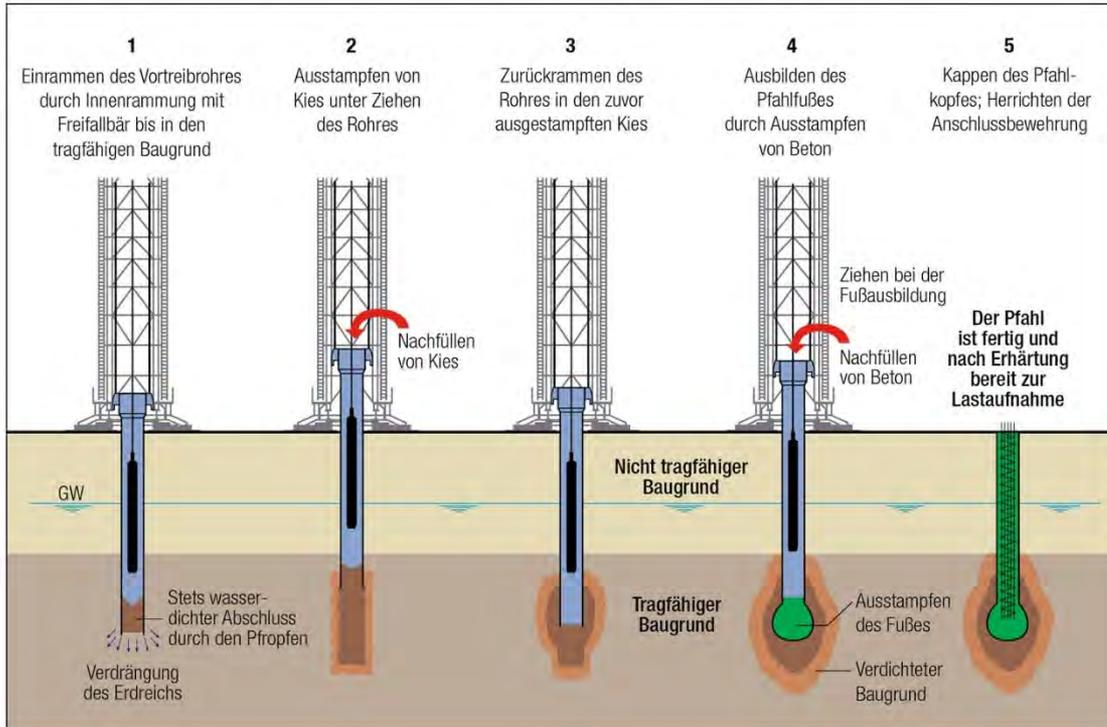
Ortbetonrammpfähle (Innenrohrrammung)

FRANKIPFAHL : Herstellungsverfahren ohne Kiesverdrichtung



Typische Pfahlsysteme

FRANKIPFAHL: Herstellungsverfahren mit Kiesvorverdichtung



Simplex-Pfahl: Kopframmung eines geschlossenes Rohr (Fußplatte), Einbau der Bewehrung, Betonieren, Rohr ziehen

Kriterien für Systemwahl

Um ein optimales Projektergebnis zu sichern, müssen vielen Faktoren Berücksichtigung finden. Damit sind die Perspektiven aller Projektbeteiligten wichtig; die des Logistikers kann zum Beispiel stark abweichen von der des Baugrundgutachters. Eine Betrachtung des Ganzen ist empfehlenswert:

Die Q-P-Z-Beziehung



QPZ Gewichtung ist projektspezifisch variabel

Die Anforderungen zur Qualität ergibt ein Preis bzw. ein Bauzeitbedarf. Umgekehrt ergeben Anforderungen zum Preis und zum zur Verfügung stehende Bauzeit eine spezifisches Qualität



Geotechnik/Baustoffe/Statik

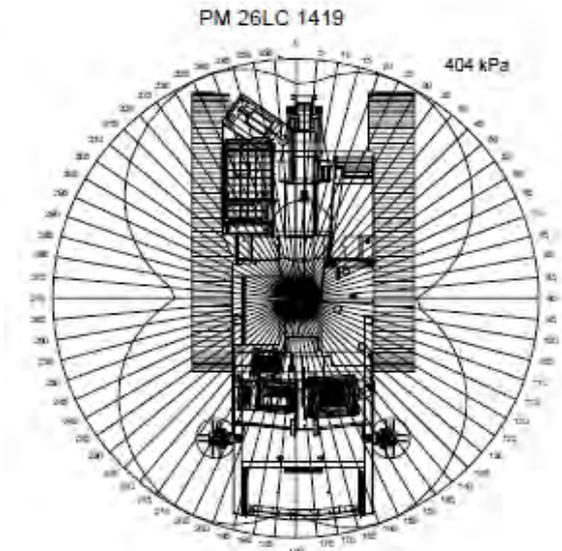
- Pfahlmaterial (Betongüte, Bewehrung usw.)
- Pfahldimension, Pfahlgeometrie
- Pfahlanordnung (Anzahl, Neigung, Geometrie)
- Pfahllänge (erforderliche Tragfähigkeit, Spitzendruck, Mantelreibung)
- Zusatzlasten (z. B. Neg. Mantelreibung, Fließdruck)
- Spezielle Anforderungen durch Weichschichten (z.B. Hülsen/Verrohrung bei $c_u \leq 15 \text{ kN/m}^2$, Betonmehrverbrauch)
- Spezielle Anforderungen wegen Grundwasser (Betonrezeptur, Rohreintritt, drückendes/gespanntes GW)
- Baustellen- und Baugrundverhältnissen angepasste Gerätewahl



Kriterien für Systemwahl

Logistik

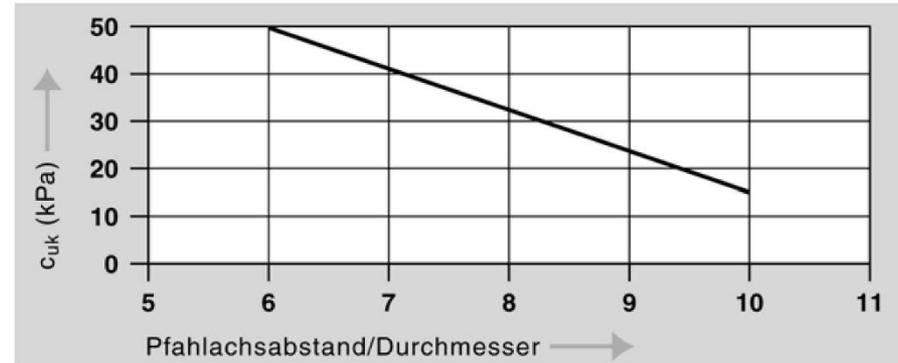
- Spezielle Anforderungen an die Zuwegung (Achslast, Straßenführung – Radien, Nutzungszeit und Frequenz)
- Transportgenehmigung und Termine
- Baustelleneinrichtung
- Aufbau/Mächtigkeit der Rammebene und Flächenbedarf (Gerät- und Pfahlsystemabhängig)
- Lagerfläche
- Materialanlieferung, Pfahl LKW, Betontransporte, Bewehrung)



Kriterien für Systemwahl

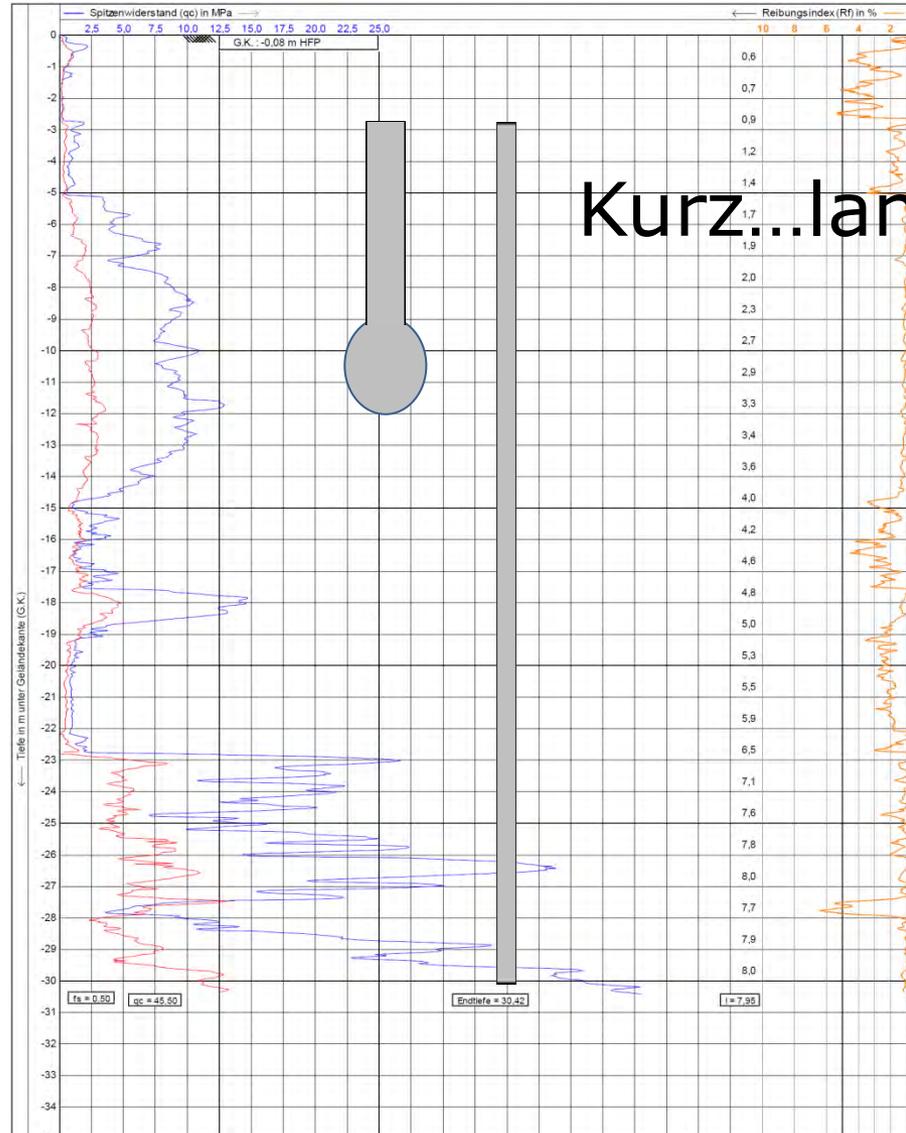
Ausführung

- Dokumentation (Einbauprotokolle, Aufmaße usw.)
- Berücksichtigung Temperatur und anderen Witterungseinflüsse
- Annahmeprüfung (Pfahllieferung, Frischbeton, Wartezeit < 90min)
- Anforderung zur Umsetzungsvorgänge (Tiefladereinsatz, Behinderungen usw.)
- Einmessung und Sicherung der Pfahlansatzpunkte
- Einbauabfolge (Pilgerschritte $e \geq 6xD$ in Abhängigkeit von c_{uk} – siehe Diagramm)
- Zeitliche Planung von Probelastungen und Integritätsprüfungen (Aushärtung bei Ortbetonpfählen, Standzeit nach DGGT und in Abhängigkeit von den Bodenarten usw.)
- Aufmaß der eingebauten Pfähle



Mindestabstand von frisch hergestellten Ortbetonpfählen ohne bleibende Verrohrung in weichen Böden (nach DIN EN 12699)

Kriterien für Systemwahl



Kurz...lang...Zeit ist Geld

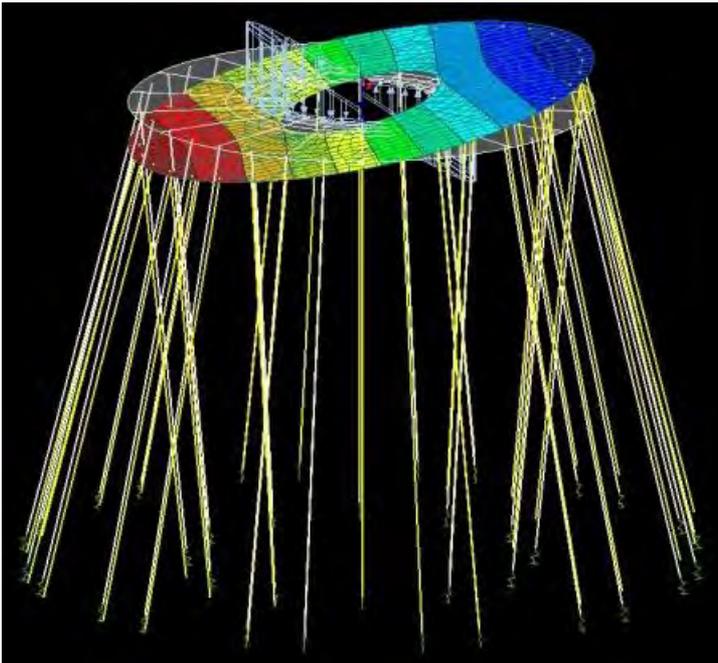
Kürzere Pfähle evtl. mit größeren Durchmesser sind nicht zwangsweise günstiger oder schneller herzustellen.

Siehe Fallbeispiel WP Wohnste

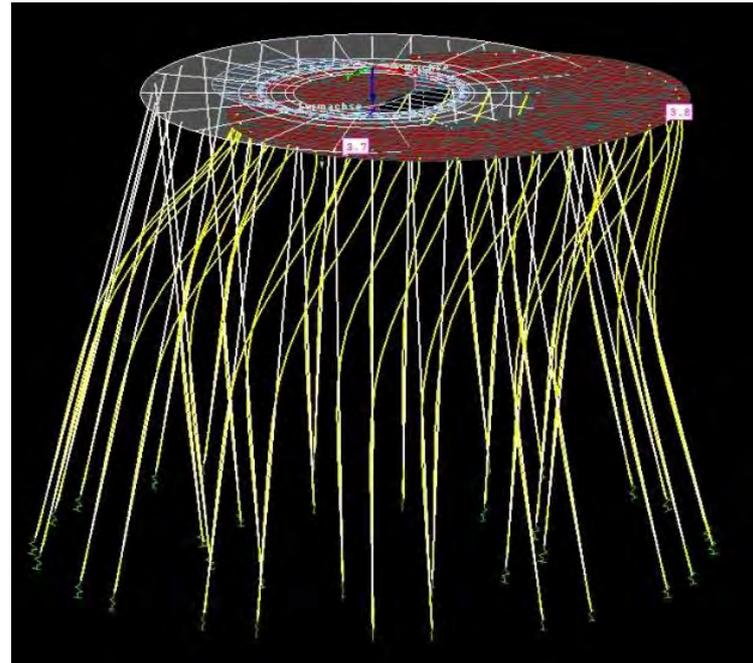
Die Q-P-Z-Beziehung



Fundamentverdrehung



Drehfedersteifigkeit



EA-Pfähle, Abschnitt 11 – Qualitätssicherung bei der Bauausführung

11.3 Verdrängungspfähle

11.3.1 Fertigpfähle

- Qualitätssicherung im Pfahlwerk
- Maßgebliche Beanspruchungen von Betonfertigpfählen ergeben sich in der Regel bei Transport, Lagerung und Einbringung auf der Baustelle
- Die Lagerung auf der Baustelle sollte auf Kanthölzern oder auf ebener Unterlage erfolgen
- Beim Einbau sind das Rammgerät und die Rammenergie auf das Rammgut und die örtlichen Bodenverhältnisse abzustimmen

11.3.2 Ortbetonpfähle – Umfangreicher, siehe daher EAP direkt.

+ 11.2.4 Einbau der Bewehrung

+ 11.2.5 Betonieren

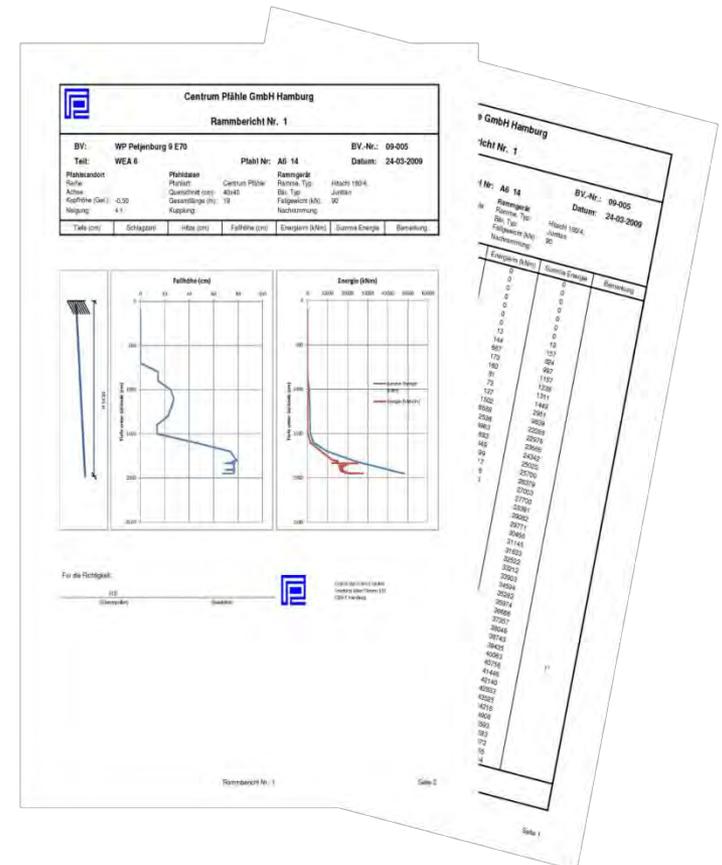


Qualitätssicherung

Tabelle 2

Angaben	Vorgefertigte Verdrängungspfähle	Ortbeton-Verdrängungspfähle
Pfahlnummer (Lage)	X	X
Pfahlart	X	X
Nennabmessungen	X	X
Länge des Fertigpfahls	X	(X)
Datum und Dauer des Einbringens und des Nachrammens	X	X
Datum des Betonierens (Herstellung)	(X)	X
Pfahllänge bezogen auf die Geländehöhe	X	X
Pfahlfußebene	X	X
Ausgeführte Pfahlkopfebene	X	X
Kappebene des Pfahls	X	X
Art, Gewicht, Fallhöhe und technische Daten des Rammjärs und entsprechende Angaben für weitere Ausrüstungsteile	X	X
Anzahl und Art der verwendeten Futter sowie Art und Zustand der verwendeten Rammjungfer während des Einbringens	X	X
Länge und Einzelheiten der Bewehrung	(X)	X
Endeindringung des Pfahls oder Vortreibrohres in mm je 10 Schläge oder Schlaganzahl je Meter Eindringtiefe oder eines Teils davon	X	(X)
Betonzusammensetzung	X	X
Eingebrachtes Betonvolumen	—	X
Sämtliche Angaben über Hindernisse/Verzögerungen und weitere Unterbrechungen des Arbeitsablaufes	X	X
Anzahl und Lage von Kupplungen	(X)	(X)
Länge der verbleibenden Verrohrung oder Hülle	—	(X)
X erforderliche Angaben		
(X) Angaben, wenn zutreffend		

Einbauprotokolle gemäß DIN EN 12699



Aus DIN 12699:2001 (pdf.Datei auf Seite 113)

Weitere Angaben in der Tabelle 3

Keine Änderung in Berichtigung von November 2010 ab Seite 129ff.

Bestimmung/Einschätzung der Pfahltragfähigkeit und Integrität

- Nachweise der äußeren Tragfähigkeit (Vergl. Probelastungsergebnisse/Erfahrung bzw. EAP)
- Einbauprotokolle (Vergleich zur Baugrunderkundung)
- Dynamische Probelastungen
- Statische Probelastungen
- Integritätsprüfung (high- and low strain)



Fallbeispiel WP Wohnste

20 WEAs Enercon E82

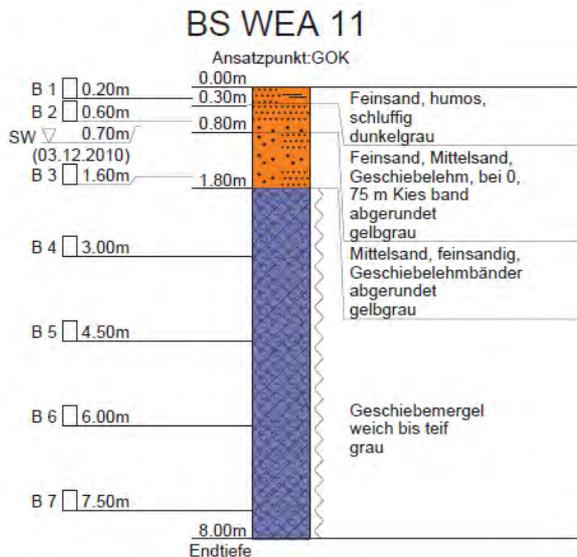
720 Centrum Pfähle

L= bis zu 29 m

45 x 45 cm



Fallbeispiel WP Wohnste



Bodenart nach DIN 18196	Reibungswinkel ϕ in Grad	Kohäsion c' in KN/m^2	Querdehnzahl	statische Steifigkeit in $E_{s,sta}$ in MN/m^2	dyn. Steifigkeit $E_{s,dyn}$ in MN/m^2	Schub G in MN/m^2	Wichte γ/γ' in KN/m^3
Sande locker gelagert	30,0 (32,5)	-	0,35	20	80	45	18/10
Sande mitteldicht gelagert	32,5	-	0,35	40	120	70	18/10
Sande dicht gelagert	35,0	-	0,30	70	210	90	19/11
Sande sehr dicht gelagert	37,5	-	0,30	100	300	120	19/11
Geschiebelehm weich/steif	26,5	7,5	0,40	15	100	30	21/11
Geschiebelehm halbfest/fest	30,0	10,0	0,40	25	150	90	21/11

Ergebnisse der Pfahlvorbemessungen, Franki-Pfahl

WEA	Länge unter O.K.G. (m)	Mantelreibung (MN)	Spitzendruck (MN)	Fußvolumen (m^3)	Zugkraft (MN) zul.
1	13,0	1,180	2,510	0,416	0,501
3	16,0	1,025	2,664	1,350	0,388
6	18,0	0,948	2,742	1,396	0,341
8	17,0	1,346	2,344	0,602	0,527
11	14,0	1,112	2,577	0,455	0,457
12	13,0	1,137	2,533	0,592	0,458
13	13,0	1,167	2,522	0,525	0,485
15	13,0	1,133	2,556	0,449	0,477
16	18,0	1,262	2,427	1,333	0,466
17	14,0	1,075	2,614	1,331	0,423
19	13,0	1,099	2,591	1,319	0,442
20	16,0	1,095	2,595	1,073	0,413

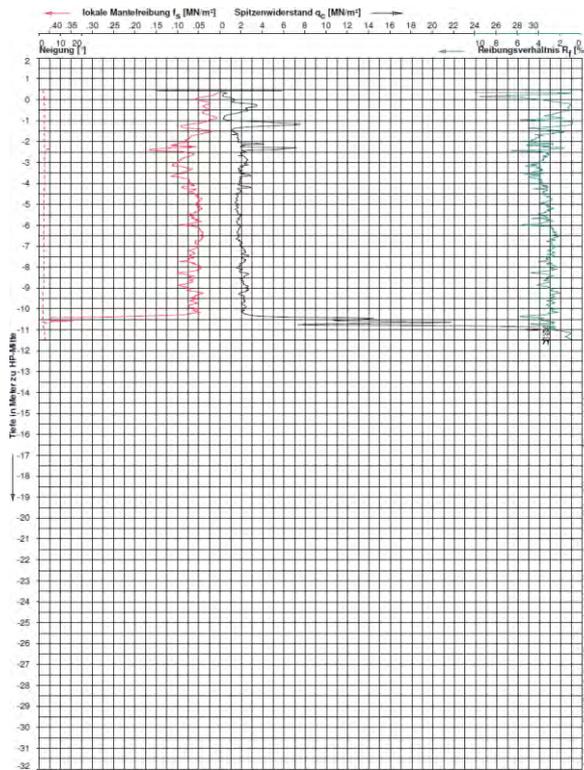
Ergebnisse der Pfahlvorbemessungen, Fertigrampfpfahl

WEA	Länge unter O.K.G. (m)	Zulässige Vertikalkraft (MN)	Zugkraft (MN) zul.
2	15,0	1,742	0,827
4	19,0	1,720	0,789
5	13,0	1,720	0,674
7	15,0	1,831	0,819
9	19,0	1,717	0,842
10	15,0	1,656*	0,543
14	30,0	1,671	0,739
18	15,0	1,687	0,755

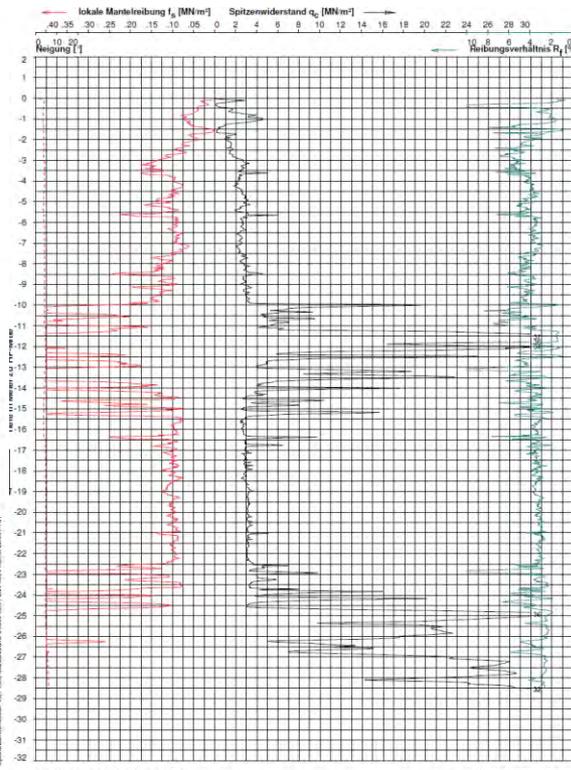
* Sicherheit 2,0

Fallbeispiel WP Wohnste

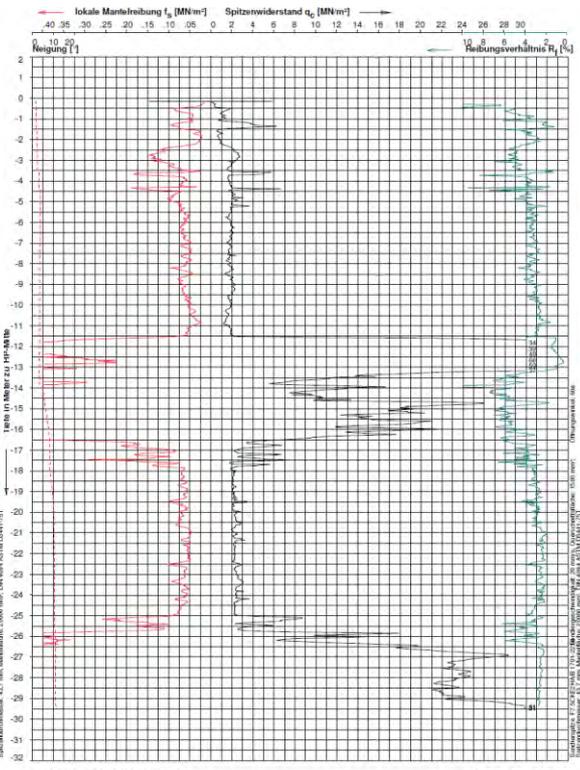
Drucksondierungen am Standort WEA 11



ELEKTRISCHE DRUCKSONDIERUNG
 Datum: 10. Dez. 2010
 Standort: +3.42 m u.a. HP Mitte
 Gelände: -11.58 m u.a. HP Mitte
 Endtiefe: -32.00 m u.a. HP Mitte
 Grundbaubüro Jacobsen
 BV Windpark Wohnste, Anlage 2
 Projekt: 10/6313-2
 Sondierung: WEA11-1



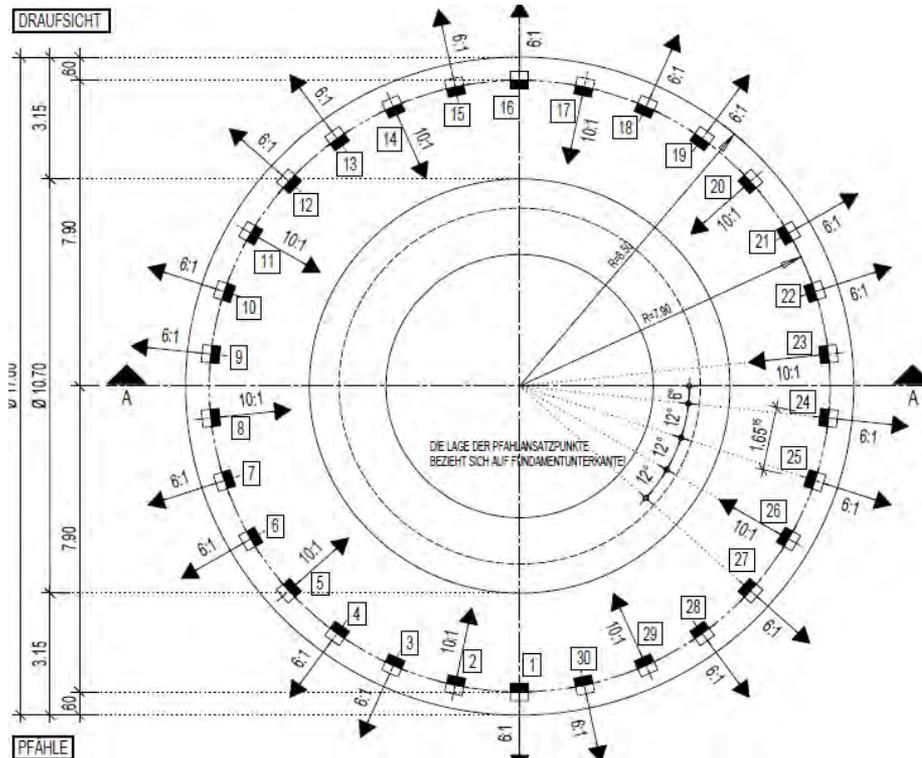
ELEKTRISCHE DRUCKSONDIERUNG
 Datum: 10. Dez. 2010
 Standort: 0.00 m u.a. HP Mitte
 Gelände: -38.97 m u.a. HP Mitte
 Endtiefe: -32.00 m u.a. HP Mitte
 Grundbaubüro Jacobsen
 BV Windpark Wohnste, Anlage 2
 Projekt: 10/6313-2
 Sondierung: WEA11-2



ELEKTRISCHE DRUCKSONDIERUNG
 Datum: 10. Dez. 2010
 Standort: -8.18 m u.a. HP Mitte
 Gelände: -38.48 m u.a. HP Mitte
 Endtiefe: -32.00 m u.a. HP Mitte
 Grundbaubüro Jacobsen
 BV Windpark Wohnste, Anlage 2
 Projekt: 10/6313-2
 Sondierung: WEA11-3

Fallbeispiel WP Wohnste

Design



BAUGRUND

SCHICHTENFOLGE:

FOLGende SCHICHTENFOLGE UND STEIFEMODULE WURDEN FÜR DIE STATISCHEN BERECHNUNGEN ANGESETZT:

von [m OKG]	bis [m OKG]	Schicht [-]	$E_s, \text{stat.}$ [MN/m ²]	$E_s, \text{dyn.}$ [MN/m ²]
0,00	-4,00	keine Bettung	0,00	0,00
-4,00	-8,00	Geschlebmergel - weich / steif	15,00	100,00
-8,00	Pfahlfuß	Geschlebmergel - halbfest / fest	25,00	150,00

GRUNDWASSER:

MAXIMALER GRUNDWASSERSTAND IST AN GELÄNDEBERKANTE.
EXPOSITIONSKLASSE: XCA

PFÄHLGRUNDUNG

STANDORT	ANZAHL PFÄHLE [-]	PFÄHL QUERSCHNITT [cm x cm]	BEWEHRUNG (BETONKL. UNTERPFÄHL)	PFÄHLFUßTIEFE LOTRECHT [m OKG]	UKF [m OKG]	KAPP-LÄNGE [m]	OK-PFÄHL [m OKG]	PFÄHL-NEIGUNG	ERF. LÄNGE [m]		GEW. LÄNGE [m]
									6:1	10:1	
WEA 19 (PSP 022)	20	45 x 45	TYP 20 (16)	-28,0	-3,00	1,00	-2,00	6:1	25,36		27
	10								25,13		26

PFÄHLLASTEN IM EXTREMLASTFALL

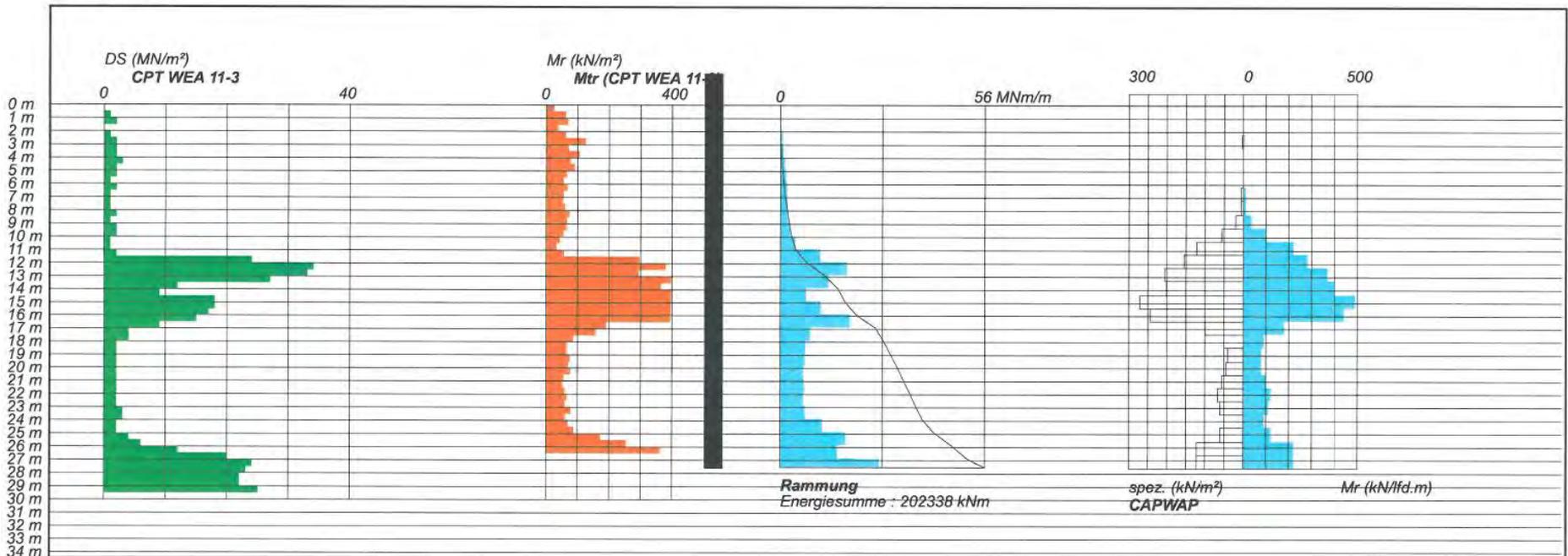
	CHARAKTERISTISCH ($\gamma = 1,0$ -FACH)		BEWERTUNGSWERT (γ -FACH)	
	DRUCK	ZUG	DRUCK	ZUG
	1584	132	2027	359
				kN
				kN

Fallbeispiel WP Wohnste

BV Windpark Wohnste 20 E82, Wohnste

Pfahlart : Stahlbetonkupplungspfahl 45x45
 Pfahlfläche : 2025 cm²
 Pfahllänge : 30 m
 Neigung : lotrecht
 Umfang : 180 cm

Pfahl : P 1



MESSUNG

Datum	Fallhöhe	Bär	W (theor.)	Setz./Schlag	Standzeit	W (eingel.)	Case (0,3)	Case (0,4)	CAP (gesamt)	CAP (Mantel)	CAP (Fuß)
25.08.2011	0,95 m	9 t	86 kNm	<< 1 mm	9 T.	35 kNm	4950 kN	4750 kN	4750 kN	3770 kN	980 kN

Fallbeispiel WP Wohnste



Fallbeispiel WP Holtriem

21 WEAs Enercon E70 und E82

629 Centrum Pfähle

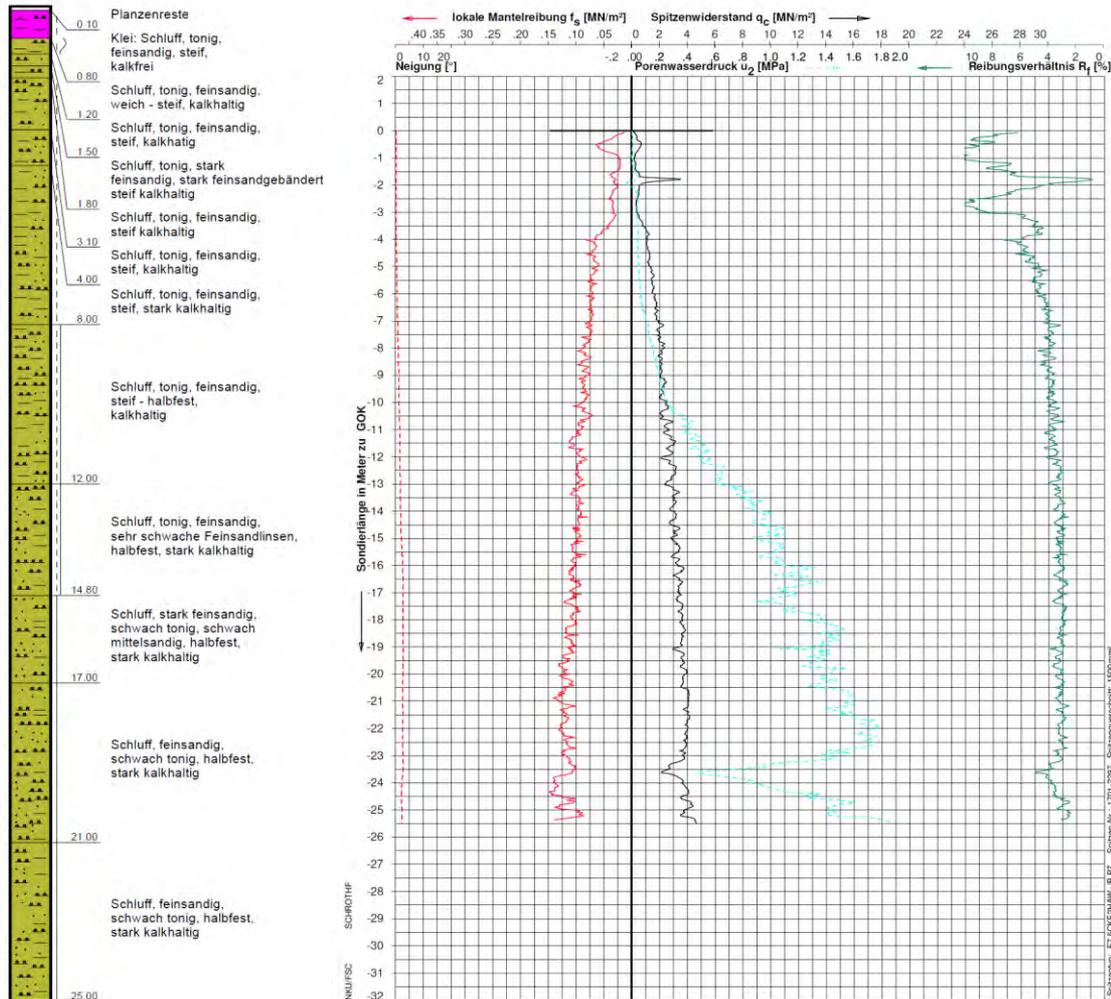
L bis 33 m

45x45 cm

Das Baugrundgutachten sah 45'er Pfähle bis maximal 900 kN (<< ca 1500 kN) charakteristische Drucklast vor und eine Erhöhung der Pfahlanzahl wurde empfohlen. Diese sehr konservativ Annahme wegen Bedenken zum Setzungsverhalten im bindigen Boden hätte zu erheblichen Mehrkosten geführt. Eine Optimierung der Pfahllänge und der Pfahlanzahl wurde durch ein Testprogramm ermöglicht.



Fallbeispiel WP Holtriem



Nach den Aufschlussresultaten liegt im Erkundungsbereich unterhalb einer Kleischicht bis zur Endteufe eine relativ homogene Schichtung aus **Schluff** vor.

Laboruntersuchungen

- Bestimmung des Wassergehaltes (=> rd. 18 % bis 30%)
- Bestimmung der Korngrößenverteilung (=> sandiger oder toniger Schluff)
- Bestimmung der Zustandsgrenzen nach DIN 18122 (leichtplastische Tone)
- Bestimmung der Scherparameter (Laborflügelversuche und Triaxialversuche)



Relativ homogene Baugrundsichtung aus **steif bis halbfesten Schluffen** mit undränierten Scherfestigkeit zwischen $150 \text{ kN/m}^2 \leq c_u \leq 300 \text{ kN/m}^2$.



Probelastungen

An 2 Testpfählen wurden dynamische Probelastungen unter Berücksichtigung einer Standzeit von etwa einer Stunde, 8 Tagen und 21 Tagen durchgeführt und nach den Untersuchungen:

- der bekannte Anwachseffekt belegt
- und ein Zuwachs der Mantelreibung von $\Delta R_{s,m} > 200\%$ festgestellt.

Nach einer Standzeit von etwa 3 Wochen wurde am Testpfahl eine statische Probelastung mit vorheriger Schwellbelastung durchgeführt und

- die Betriebslasten realitätsnah angesetzt
- sehr geringe Verformungen gemessen (kleiner als elastische Stauchung)
- hoher Pfahlwiderstand im Grenzzustand ($R_{ult} = 3.530 \text{ kN}$) bei geringen Setzungen (6-7 mm) ermittelt.



Fallbeispiel WP Holtriem



Statische Probelastung

- Testpfahl 45x45'er
- 8 Reaktionspfähle 40x40'er
- 4 Pressen je 1000 kN





Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



CentrumPfähle GmbH
Hauptsitz Hamburg
Friedrich-Ebert-Damm 111
22047 Hamburg
Telefon 040.69 67 20
Telefax 040.69 67 22 22

info@centrum.de

www.centrum.de

Niederlassungen in Leipzig,
Mannheim, München und
Oberhausen

