



Bergische Universität Wuppertal
Fachbereich Bauingenieurwesen

Bodenmechanik und Grundbau

Bericht - Nr. 26

September 2003

Nicole Mörchen

**Zur Grenzlast eines Druckpfahls -
Untersuchungen für den Einzel- und den Gruppenpfahl**

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. B. Walz
und Prof. Dr.-Ing. M. Pulsfort

**Zur Grenzlast eines Druckpfahls –
Untersuchungen für den Einzel- und den Gruppenpfahl**

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen der
Bergischen Universität Wuppertal

angenommene Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades Doktor- Ingenieur
- Dr.- Ing.-

von
Dipl.-Ing. Nicole Mörchen
aus Wuppertal

Vorsitzender der Prüfungskommission: Univ.-Prof. Dr.-Ing. A. Schlenkhoff

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. B. Walz
Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Pulsfort
Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-G. Kempfert

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Juli 2003

INHALTSVERZEICHNIS

1	<u>EINLEITUNG</u>	1
2	<u>TRAGVERHALTEN VON PFÄHLEN</u>	3
2.1	MANTELREIBUNG	3
2.2	SPITZENDRUCK	4
2.3	DILATANZ	6
2.4	GEGENSEITIGE BEEINFLUSSUNG DER EINZELNEN PARAMETER	6
3	<u>METHODEN ZUR BESTIMMUNG DES PFAHLWIDERSTANDES</u>	9
3.1	RAMMFORMELN	9
3.2	ERDSTATISCHE VERFAHREN	10
3.2.1	MANTELREIBUNG	10
3.2.2	SPITZENDRUCK	11
3.3	PFAHLWIDERSTÄNDE AUS SONDIERUNGEN	13
3.4	NUMERISCHE VERFAHREN	13
3.5	BERECHNUNG MIT TABELLENWERTEN / ERFAHRUNGSWERTEN	15
3.6	PFAHLPROBEBELASTUNGEN	16
3.6.1	DYNAMISCHE PROBEBELASTUNGEN	16
3.6.2	STATISCHE PROBEBELASTUNG	16
3.7	TRAGFÄHIGKEIT EINER PFAHLGRUPPE	18
4	<u>EINZELPFAHL- UND PFAHLGRUPPENVERSUCHE</u>	20
4.1	EINZELPFAHLVERSUCHE	20
4.2	PFAHLGRUPPENVERSUCHE	23
4.3	VERSUCHE ZUR GEGENSEITIGEN BEEINFLUSSUNG VON ZUG- UND DRUCKPFÄHLEN	28
5	<u>MODELLVERSUCHE</u>	30
5.1	VORÜBERLEGUNGEN, VERSUCHSPROGRAMM UND ÜBERSICHT	30
5.2	VERSUCHSPFÄHLE	31
5.3	VERSUCHSBODEN	33
5.4	ANLAGE FÜR KLEINMAßSTÄBLICHE PFAHLMODELLVERSUCHE	34

5.4.1	VERSUCHSCONTAINER	34
5.4.2	BELASTUNGSEINRICHTUNG	36
5.4.3	MESSTECHNIK	38
5.4.4	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	39
5.5	ANLAGE FÜR GROßMABSTÄBLICHE PFAHLMODELLVERSUCHE	41
5.5.1	VERSUCHSCONTAINER	41
5.5.2	BODENVERDICHTUNG	42
5.5.3	BELASTUNGSEINRICHTUNG	43
5.5.4	MESSTECHNIK	44
5.5.5	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	45
5.6	VERSUCHSAUFBAU DER ZUG-DRUCKPFAHLVERSUCHE	47
5.6.1	VERSUCHSCONTAINER UND MODELLPFÄHLE	47
5.6.2	BELASTUNGSEINRICHTUNG	47
5.6.3	MESSTECHNIK	49
5.6.4	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	51
6	<u>VERSUCHSERGEBNISSE</u>	52
6.1	EINZELPFAHLVERSUCHE	52
6.2	PFAHLGRUPPENVERSUCHE	58
6.3	ZUG-DRUCKPFAHL-VERSUCHE	62
6.3.1	VORBEMERKUNG	62
6.3.2	ERGEBNISSE DER REIHE 1	62
6.3.3	ERGEBNIS DER REIHE 2	68
7	<u>ANSCHAUUNGSVERSUCH</u>	71
7.1	VORÜBERLEGUNGEN	71
7.2	PRINZIP DER SPANNUNGSOPTIK	71
7.3	VERSUCHSAUFBAU UND -ABLAUF	72
7.4	VERSUCHSERGEBNIS	74
7.4.1	EINFLUSS DER SPITZENFORM	74
7.4.2	SPANNUNGSVERTEILUNG IM MODELL	74
7.4.3	STEIGERUNG DER PFAHLBELASTUNG	75
7.4.4	PFAHLGRUPPEN	76

8	<u>BERECHNUNGSMODELL FÜR DIE ERMITTLUNG DER GRENZLAST EINES DRUCKPFAHLES</u>	77
8.1	MODELLVORSTELLUNG	77
8.2	GRUNDLAGEN DES RECHNERISCHEN ANSATZES	78
8.3	GEOMETRIE DER SCHALEN	83
8.3.1	GRUNDSÄTZLICHES ZUR SCHALEN-GEOMETRIE	83
8.3.2	GEOMETRISCHE BESCHREIBUNG DER IM VERTIKALSCHNITT PARABELFÖRMIGEN ROTATIONSSCHALE	85
8.4	SCHALENÖFFNUNGSWEITE A	88
8.5	KRAFTVERLAUF IN DEN SCHALEN	88
8.5.1	ALLGEMEINE BETRACHTUNG	88
8.5.2	MERIDIANKRAFT $n\alpha$ INFOLGE SCHALENEIGENGEWICHT FÜR EINE SCHALE I	89
8.5.3	MERIDIANKRAFT $n\alpha$ IN DER MANTELSCHALE INFOLGE DES ÜBERLAGERNDEN BODENS	93
8.5.4	MERIDIANKRAFT $n\alpha$ INFOLGE EINER RANDLAST FÜR EINE KERNSCHALE I	96
8.6	ERDDRUCK AUF DIE MANTELSCHALE	97
8.7	GLEICHGEWICHTSBEDINGUNG	97
8.8	BERECHNUNGSMODUS	98
9	<u>ANWENDUNG DES BERECHNUNGSANSATZES</u>	102
9.1	ANWENDUNG AUF DIE MODELLVERSUCHE	102
9.1.1	GRUNDLEGENDE BERECHNUNGSANNAHMEN	102
9.1.2	BERECHNUNGSBEISPIEL	104
9.2	ERGEBNISSE	107
9.3	VARIATION EINZELNER PARAMETER	108
9.3.1	PARAMETER	108
9.3.2	SCHALENANZAHL N	109
9.3.3	REIBUNGSWINKEL φ , NEIGUNGSWINKEL δ_{PFAHL}	109
9.3.4	ORDNUNG DER PARABELFUNKTION (EXPONENT M)	110
9.3.5	RECHNERISCHE PFAHLVERLÄNGERUNG (FAKTOR F) ZUR ÜBERTRAGUNG DES SPITZENDRUCKS	110
9.3.6	RECHNERISCHE ERMITTLUNG DER GRENZLAST FÜR DIE PFAHLMODELLE	111
9.4	PFAHLPROBEBELASTUNGEN	113
9.4.1	GRUNDLEGENDE BERECHNUNGSANNAHMEN	113
9.4.2	BERECHNUNGSERGEBNISSE	113
9.5	BEWERTUNG DES RECHNERISCHEN ANSATZES FÜR EINZELN STEHENDE DRUCKPFÄHLE	115

10	DRUCKPFAHLGRUPPEN	118
10.1	ALLGEMEINES	118
10.2	GEOMETRISCHE MODELLVORSTELLUNG	119
10.3	MODELLVORSTELLUNG ZUR GRENZLAST EINER PFAHLGRUPPE	120
10.4	RECHNERISCHE UMSETZUNG DES PFAHLGRUPPENMODELLS	124
11	PFAHLGRUPPE AUS ZUG- UND DRUCKPFÄHLEN	127
11.1	ABGRENZUNG, ALLGEMEINES	127
11.2	GEOMETRISCHE MODELLVORSTELLUNG	127
11.3	BETRACHTUNG DER PFAHLGRENZLASTEN IN DEN MODELLVERSUCHEN	131
11.3.1	VORBEMERKUNG	131
11.3.2	DRUCK- UND ZUGPFAHL HABEN DIE GLEICHE LÄNGE	131
11.3.3	UNTERSCHIEDLICH LANGE PFÄHLE	132
12	ZUSAMMENFASSUNG	134
	LITERATURVERZEICHNIS	136
	ANLAGE A	142

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Pfahlprobebelastung	1
Abbildung 1-2: Freigelegte Pfähle	1
Abbildung 2-1: Qualitativer Verlauf der Widerstands-Setzungs-Linien	3
Abbildung 2-2: Mantelreibungsverteilung nach Vesic (1975)	4
Abbildung 2-3: Mantelreibungsverteilung über die Pfahllänge	4
Abbildung 2-4: Spitzendruck in Abhängigkeit der Pfahllänge	4
Abbildung 2-5: Durchmesserabhängigkeit des Spitzendrucks	4
Abbildung 2-6: Spitzendruckverteilung unter dem Pfahlfuß	5
Abbildung 2-7: Kernausbildung unter dem Pfahl	6
Abbildung 2-8: Druckpfahltragmodell, Analogie von Spitzenwiderstand und Mantelreibung zum Falltür- und Gewölbemodell	7
Abbildung 2-9: Gewölbeausbildung bei unterschiedlichen Lagerungsdichten des Bodens unter dem Pfahlfuß	7
Abbildung 3-1: Übersicht der einzelnen Bruchvorstellungen und der daraus resultierenden Tragfähigkeitsbeiwerte N_q	12
Abbildung 3-2: Gemessene und berechnete Kraft-Setzungs-Linie eines Einzelpfahls	14
Abbildung 3-3: Gemessene und berechnete Kraft-Setzungs-Linie von Pfahlgruppen	14
Abbildung 3-4: FE-Berechnung einer Probebelastung	15
Abbildung 3-5: Pfahlabstände bei einer Pfahlprobebelastung	17
Abbildung 3-6: Aus einer Probebelastung erhaltene Pfahlwiderstands-Setzungs-Linie	17
Abbildung 3-7: Widerstands-Setzungs-Verhalten von Einzel- und Gruppenpfählen	19
Abbildung 4-1: Verschiedene Brucharten	20
Abbildung 4-2: Aus Versuchen ermittelte Mantelreibung	21
Abbildung 4-3: Aus Versuchen ermittelte Spitzendruckverteilung	21
Abbildung 4-4: Spitzendruck für verschiedene Einbindetiefen	22
Abbildung 4-5: Mantelreibung für verschiedene Einbindetiefen	22
Abbildung 4-6: Abhängigkeit der Pfahlgrenzkraft von der Pfahllänge	23
Abbildung 4-7: Kraft-Setzungs-Linien verschiedener Pfahlgruppen	24
Abbildung 4-8: Gruppeneffektivität	24
Abbildung 4-9: Gruppeneffektivität in Sand	24
Abbildung 4-10: Pfahlgrenzlasten für freistehende Pfahlgruppen	25
Abbildung 4-11: Pfahltragfähigkeiten in Abhängigkeit des Pfahlabstandes	26
Abbildung 4-12: Normalkraft- und Mantelreibungsverteilung bei Gruppenpfählen	26
Abbildung 4-13: Zusammenwirken von Pfahl und Boden	27
Abbildung 4-14: Gruppeneffektivität	28

Abbildung 4-15: Kraft-Setzungs-Linie der einzelnen Pfähle	29
Abbildung 4-16: Schnitt Versuchsaufbau	29
Abbildung 5-1: Modellpfähle	32
Abbildung 5-2: Sieblinie des Versuchssandes	33
Abbildung 5-3: Untersicht des Versuchcontainers	34
Abbildung 5-4: Innenansicht des Versuchcontainers	34
Abbildung 5-5: Grundriss und Schnitt durch den Versuchcontainer	35
Abbildung 5-6: Elektromotor zur Steuerung der Laststeigerung	36
Abbildung 5-7: Querschnitt der Versuchseinrichtung	37
Abbildung 5-8: Detail der Belastungseinrichtung	37
Abbildung 5-9: Einbau der Modellpfähle	40
Abbildung 5-10: Ansicht des Versuchsaufbaus	40
Abbildung 5-11: Grundriß des Versuchcontainers	41
Abbildung 5-12: Schnitt durch den Versuchcontainer	42
Abbildung 5-13: Verdichtungsraster	43
Abbildung 5-14: Skizze der Belastungseinrichtung	44
Abbildung 5-15: Pfahleinbau bis 60 cm Länge	46
Abbildung 5-16: Pfahleinbau ab 60 cm Länge	46
Abbildung 5-17: Versuchsaufbau der Druckpfahlbelastung	46
Abbildung 5-18: Prinzipskizze der Belastungsvorrichtung der Zugpfähle	48
Abbildung 5-19: Querschnitt des Versuchsaufbaus	48
Abbildung 5-20: Krafteinleitungs-konstruktion	49
Abbildung 5-21: Prinzip der Wegmessung	50
Abbildung 5-22: Versuchsaufbau der Zug-Druck-Kombination	51
Abbildung 6-1: Aufbereitung der Messwerte	52
Abbildung 6-2: Pfahlgrenzlast in Abhängigkeit der Pfahllänge – Typ T_{xx}	53
Abbildung 6-3: Pfahlgrenzlast in Abhängigkeit des Durchmessers – Typ T_{xx}	54
Abbildung 6-4: Pfahlgrenzlast in Abhängigkeit der Pfahllänge - Typ B_{xx}	54
Abbildung 6-5: Pfahlwiderstands-Setzungs-Linien der Einzelpfähle	56
Abbildung 6-6: Pfahlwiderstands-Setzungs-Linien für Pfähle verschiedener Durchmesser	57
Abbildung 6-7: Vergleich der Belastungsgeschwindigkeiten	57
Abbildung 6-8: Rasteranordnung der Gruppenpfähle	58
Abbildung 6-9: Pfahlgruppengrenzlast	59
Abbildung 6-10: Grenzlast eines einzelnen Gruppenpfahls	59
Abbildung 6-11: Pfahlwiderstands-Setzungs-Linien eines einzelnen Gruppenpfahls der 4er-Gruppe	60
Abbildung 6-12: Pfahlwiderstands-Setzungs-Linien eines einzelnen Gruppenpfahls der 5er-Gruppe	60
Abbildung 6-13: Vergleich der Pfahlwiderstands-Setzungs-Linien	61

Abbildung 6-14: Ergebnis der Zug-Druckversuche mit gleich langen Pfählen	63
Abbildung 6-15: Pfahleffektivitäten in Abhängigkeit vom Pfahlabstand in den einzelnen Versuchskonstellationen	66
Abbildung 6-16: Pfahlwiderstands-Hebungs-Linien der Reaktionspfähle	67
Abbildung 6-17: Pfahlwiderstands-Setzungs-Linien des Druckpfahls	67
Abbildung 6-18: Grenzlasten des Druckpfahls der Zug-Druck-Kombination der Reihe 2	69
Abbildung 6-19: Widerstands-Setzungs-Linie des Druckpfahls (a) und mittlere Widerstands-Hebungs-Linie der Zugpfähle (b)	70
Abbildung 7-1: Prinzip der Spannungsoptik	72
Abbildung 7-2: Modell mit Schalung	73
Abbildung 7-3: Isoklinennetz	73
Abbildung 7-4: Geometrische Ausbildung der Pfahlspitze	74
Abbildung 7-5: Spannungsverteilung Modellversuch	75
Abbildung 7-6: Spannungsverteilung FE-Berechnung	75
Abbildung 7-7: Verschiedene Pfahlbelastungen	75
Abbildung 7-8: 3er-Pfahlgruppe unter Druckbelastung	76
Abbildung 8-1: Entstehende Schalentragwerke bei einer Druckpfahlbelastung	77
Abbildung 8-2: Schnittführung durch den Schalenkörper	78
Abbildung 8-3: Horizontale Elementscheibe und einzelnes Schalenelement	79
Abbildung 8-4: Element einer Kernschale und auftretende Kräfte	79
Abbildung 8-5: Horizontaler Schnitt durch die ineinander geschachtelten Schalen	80
Abbildung 8-6: Kräfte an einer horizontalen Elementscheibe	82
Abbildung 8-7: Aufsicht auf die sektorförmige Elementscheibe an der Stelle (j-1)	83
Abbildung 8-8: Orientierung der Hauptspannungen bei Pfahlbelastung aus einer FE-Modellierung	84
Abbildung 8-9: Verlängerung des Pfahles zur rechnerischen Erfassung des Pfahlspitzendruckes	84
Abbildung 8-10: Geometrie der Parabelschale	86
Abbildung 8-11: Schalenkräfte infolge Pfahlbelastung	89
Abbildung 8-12: Element einer Kernschale direkt am Pfahl	90
Abbildung 8-13: Element j einer Schale I	92
Abbildung 8-14: Bodenüberschüttung erstes Element	93
Abbildung 8-15: Bodenüberschüttung für eine beliebige Stelle j	95
Abbildung 8-16: Schnittprinzip zur Herleitung der Kräfte infolge einer Randlast	97
Abbildung 9-1: Schalenmittellinien in dimensionsloser Darstellung	103
Abbildung 9-2: Erdwiderstandsanteile einzelner Pfahltypen	104
Abbildung 9-3: Kräfte in der Mantelschale	105
Abbildung 9-4: Kräfte in einer Kernschale ($i = 75$)	106

Abbildung 9-5: Ermittelte Randlast	107
Abbildung 9-6: Mobilisierungsfaktor κ aus den Modellversuchen	107
Abbildung 9-7: Variation der Schalenanzahl n	109
Abbildung 9-8: Mobilisierungsfaktor κ bei einem Pfahlverlängerungsfaktor $f = 4,5$	110
Abbildung 9-9: Mobilisierungsfaktor κ bei einem Pfahlverlängerungsfaktor $f = 5$	111
Abbildung 9-10: Mobilisierungsfaktor κ bei $k_R = k_{ah}$ und $k_r = k_{ph}$	113
Abbildung 9-11: Mobilisierungsfaktor κ bei $k_R = k_0$ und $k_r = k_0$	114
Abbildung 9-12: Mobilisierungsfaktor κ bei $k_R = k_{ah}$ und $k_r = k_0$	115
Abbildung 9-13: Horizontalkräfte im Ausgangszustand	116
Abbildung 10-1: Gruppeneffektivität in Abhängigkeit des Pfahlabstandes	118
Abbildung 10-2: Spannungsumlenkung im Boden bei verschiedenen Pfahlabständen	119
Abbildung 10-3: Pfahlgruppe bei einem Abstand von $a = 1d$	121
Abbildung 10-4: Modell des virtuellen Ersatzpfahls	121
Abbildung 10-5: Schalentragerwerke bei mittleren Pfahlabständen	122
Abbildung 10-6: Überlagerung der aus einzelnen Schalen bestehenden Rotationsparabeln	123
Abbildung 10-7: Grundriss einer sich nicht beeinflussenden Pfahlgruppe	123
Abbildung 10-8: Ansicht zweier sich nicht beeinflussender Pfähle	123
Abbildung 10-9: Vergleich der gemessenen und der berechneten Grenzlasten	124
Abbildung 10-10: Schlankheiten des Ersatzpfahls	125
Abbildung 11-1: Spannungsumlenkung im Boden bei unterschiedlichen Pfahlabständen	128
Abbildung 11-2: Rotationsparabeln für 300 mm lange Pfähle	131
Abbildung 11-3: Gegenseitige Beeinflussung von Zug- und Druckpfählen	132
Abbildung 11-4: Gegenseitige Beeinflussung von Zug- und Druckpfählen	133

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1: Abmessungen und Bezeichnung der Modellpfähle Typ Txx	32
Tabelle 5-2: Abmessungen und Bezeichnungen der Modellpfähle Typ Bxx	32
Tabelle 5-3: Bodenkenngrößen	33
Tabelle 5-4: Bodenmechanische Parameter des Versuchssandes	38
Tabelle 6-1: Versuchsergebnisse der Pfahlmodelle Txx	53
Tabelle 6-2: Versuchsergebnisse der Pfahlmodelle Bxx	53
Tabelle 6-3: Tragfähigkeiten der untersuchten Pfahlgruppen	58
Tabelle 6-4: Pfahlgruppen-Effektivität	61
Tabelle 6-5: Grenzlast der Zugpfähle und gleichzeitige Beanspruchung des Druckpfahles	62
Tabelle 6-6: Effektivität der einzelnen Pfahlarten im Versuch	64
Tabelle 6-7: Durchschnittliche Grenzlast des einzelnen Pfahles in der Zugpfahlgruppe und Grenztragfähigkeit eines einzeln stehenden Zugpfahls (Pfahltyp T22 und T23) nach Quarg-Vonscheidt (2000)	65
Tabelle 6-8: Pfahleffektivität eines einzelnen Pfahls in einer Zugpfahlgruppe (T22)	65
Tabelle 6-9: Grenzlasten bzw. Pfahlbeanspruchungen der Zug-Druck-Kombination in der Reihe 2	68
Tabelle 9-1: Vergleich der gemessenen und berechneten Pfahlgrenzlasten	112
Tabelle 11-1: Pfahlachsabstände für verschiedene Pfahlkombinationen	130

Verwendete Symbole

A	[m]	Öffnungsweite der Mantelschale
A	[-]	Vektor (Spannungsoptik)
A _b	[m ²]	Spitzendruckfläche
A _s	[m ²]	Mantelfläche
A _u	[-]	Ablesewert des Bemessungsdiagramms für Zugpfähle
a	[cm]	Pfahlabstand
α	[-]	Korrelationsfaktor für die Bodenart (bei Sondierungen)
α	[°]	Öffnungswinkel der Schale / Wandneigungswinkel
α	[°]	Neigungswinkel zur Vertikalen (Kempfer/Smoltczyk)
B	[m]	Einbindelänge des Pfahls (Valsangkar)
BÜ	[kN]	Gewicht der Bodenüberschüttung
b	[m]	Pfahldurchmesser (Kempfert/Smoltczyk)
b	[m]	Breite der Elementschale
β	[°]	Geländeneigungswinkel
D	[%]	Lagerungsdichte
D	[m]	Pfahldurchmesser (Kempfert/Smoltczyk, Valsangkar)
D	[-]	Bezogener Pfahlabstand (Böckmann)
D	[m]	Schalendurchmesser
D _r	[-]	Lagerungsdichte (Tejchmann)
d	[m]	Pfahldurchmesser
d	[cm]	Modelldicke (Spannungsoptik)
d _{Ersatz}	[cm]	Durchmesser des Ersatzpfahls
d ₁₀	[mm]	Korndurchmesser bei 10% Siebdurchgang
d ₅₀	[mm]	mittlerer Korndurchmesser
d ₆₀	[mm]	Korndurchmesser bei 60% Siebdurchgang
δ	[°]	Reibungswinkel zwischen Pfahl und Boden
δ _{Pfahl}	[°]	Winkel, unter dem die Schalen auf den Pfahl treffen
E	[kJm]	Rammenergie
EG	[kN]	Eigengewicht eines Schalenelementes
ER	[kN]	Erddruckkraft
er	[kN/m ²]	radiale Erddruckspannung
F	[kN]	Kraft (Spannungsoptik)
F ₁ , F ₂	[-]	Faktoren für die Pfahlart
f	[-]	Pfahlverlängerungsfaktor
f _c	[kN/m ²]	Mantelreibung an einer Sonde
φ	[°]	Reibungswinkel des Bodens
φ	[°]	Reibungswinkel (Touma/Reese, Meyerhof/Kishida)

γ	[kN/m ³]	Bodenwichte
γ_s	[kN/m ³]	spezifische Kornwichte
γ'	[kN/m ³]	Wichte unter Auftrieb
H	[kN]	Horizontalkräfte
H_1 / H_2	[-]	Horizontalkomponenten einer Kraft (Spannungsoptik)
h	[m]	Fallhöhe
h	[m]	rechnerische Pfahllänge
η	[-]	Effektivitätsfaktor (Tejchmann)
I	[-]	Nummer einer beliebigen Schale
i	[-]	Nummer der parabolischen Begrenzungslinie einer Schale
J	[-]	Nummer der letzten geschnittenen Schale
J_c	[-]	Dämpfungsfaktor
j	[-]	Betrachtete Stelle am Pfahl
k	[-]	Korrelationsfaktor für die Bodenart (bei Sondierungen)
k	[-]	Erddruckbeiwert
k_0	[-]	Erdruhedruckbeiwert
k_{ah}	[-]	horizontaler aktiver Erddruckbeiwert
k_{ph}	[-]	horizontaler passiver Erddruckbeiwert
k_R	[-]	Seitendruckfaktor für die Ringkraft
k_r	[-]	Seitendruckfaktor für die Radialkraft
κ	[-]	Mobilisierungsfaktor
L_o	[cm]	Pfahllänge (Böckmann)
L_u	[-]	Eingangswert des Bemessungsdiagramms für Zugpfähle
l	[m]	Pfahllänge
l_{Ersatz}	[m]	Länge des Ersatzpfahls
m	[-]	Ordnung der Parabelschale
μ	[-]	Reibungskoeffizient
N_q	[-]	Tragfähigkeitsbeiwert
N_{SPT}	[-]	Schlagzahl aus Sondierungen
n	[-]	Eichfaktor
n	[-]	Pfahlanzahl (Böckmann)
n	[-]	Anzahl der Elementschalen
n	[%]	Porenanteil
$n\alpha_{BÜ}$	[kN/m]	Meridiankraft infolge Bodenüberschüttung
$n\alpha_{EG}$	[kN/m]	Meridiankraft infolge Schaleneigengewicht
$n\alpha_{RL}$	[kN/m]	Meridiankraft infolge Randlast
n_{max}	[%]	maximaler Porenanteil
n_{min}	[%]	minimaler Porenanteil
n_{qt}	[kN/m]	Ringkraft
n_r	[kN/m]	Radialkraft

n_α	[kN/m]	Meridiankraft einer Elementschale
n_β	[kN/m]	Ringkraft einer Elementschale
P_0	[kN]	Spitzendruckkraft
p	[kN/m ²]	Überlagerungsspannung (Touma/Reese)
Q	[MN]	Pfahllast
Q_b	[MN]	Spitzendruckwiderstand
Q_g, Q_{grenz}	[kN]	Grenzlast eines Pfahls
$Q_{g,E}$	[kN]	Grenzlast eines Einzelpfahls (Böckmann)
Q_S	[MN]	Mantelreibungswiderstand
Q_T	[MN]	Spitzendruckwiderstand (Jessberger)
q_b	[kN/m ²]	Spitzendruckspannung
q_c	[MN/m ²]	Sondierwiderstandspannung
q_s	[MN/m ²]	Mantelreibungsspannung
R	[kN]	Bärgewicht
R	[kN/m ²]	Pfahlwiderstand (Kempfert/Smoltczyk)
R	[-]	Pfahlraster
R_b	[kN/m ²]	Spitzendruckwiderstand
R_{dyn}	[kN]	dynamischer Eindringwiderstand
RL	[kN]	Randlast
R_s	[kN/m ²]	Mantelreibungswiderstand
r	[m]	Radius der Erzeugenden
r_s	[m]	Krümmungsradius
s	[cm]	Pfahlsetzung
s	[cm]	Pfahleindringung (Linder)
s	[cm]	Strecke (Spannungsoptik)
S	[-]	Einwirkung (Kempfert/Smoltczyk)
s_E	[-]	Setzung eines Einzelpfahls (Kempfert/Smoltczyk)
s_G	[-]	Setzung eines Gruppenpfahls (Kempfert/Smoltczyk)
s_g	[cm]	Grenzsetzung
s_{sg}	[cm]	Setzung, ab der die Mantelreibung voll mobilisiert ist
σ_z	[kN/m ²]	vertikale Spannung im Boden in der Tiefe z
σ_1, σ_2	[kN/m ²]	Hauptspannungsrichtungen
t	[m]	Tiefe (Vesic)
t	[m]	Einbindelänge (Kempfert/Smoltczyk)
t_{kr}	[m]	Kritische Tiefe (Ripper)
τ	[kN/m ²]	Mantelreibungsspannung (Böckmann)
τ_m	[kN/m ²]	Mantelreibungsspannung im Bruchzustand (Vesic/Ripper)
U	[-]	Ungleichförmigkeitsgrad d_{60}/d_{10}
u_r	[mm]	mittlerer Korndurchmesser
V	[kN]	Vertikalkräfte

V_1, V_2	[-]	Vertikalkomponenten einer Kraft
v_b	[-]	Eindringgeschwindigkeit des Pfahlfußes
Z	[-]	Impedanz
z	[m]	Tiefe

Verwendete Abkürzungen

BU	=	Bergische Universität
CPT	=	Cone-Penetration-Test
DMS	=	Dehnungsmessstreifen
DP	=	Druckpfahl
FE	=	Finite-Elemente
FEM	=	Finite-Element-Methode
FH	=	Fachhochschule
GOK	=	Geländeoberkante
KM	=	Krümmungsmittelpunkt
KMD	=	Kraftmessdose
KSL	=	Kraft-Setzungs-Linie
PVC	=	Polyvinylchlorid
SPT	=	Standard-Penetration-Test
WSL	=	Widerstands-Setzungs-Linie
ZP	=	Zugpfahl

1 Einleitung

Pfähle werden in der Regel zur Gründung von Bauwerken eingesetzt, wenn die Bauwerkslasten in tiefergelegene tragfähige Schichten weitergeleitet werden müssen. Eine Pfahlgründung kann auch erforderlich werden, wenn ein Bauwerk aus Gründen der Gebrauchstauglichkeit nicht als Flachgründung ausgeführt werden kann. Zu diesen Bauwerken gehören z.B. Hochbauten, Türme und Masten. Weitere Einsatzgebiete von Pfahlgründungen finden sich beim Bau von Ufermauern zur Sicherung von Geländesprüngen am Wasser. Die Pfähle werden als Einzelpfähle oder als Pfahlgruppe angeordnet.

Soll eine Pfahlgründung entworfen werden, kann dies nur erfolgen, wenn die Grenztragfähigkeit der Pfähle bekannt ist. Die Grenztragfähigkeit kann durch eine Probelastung auf der betreffenden Baustelle (Abbildung 1-1) bestimmt werden. Sofern eine Probelastung nicht ausgeführt wird und keine Ergebnisse aus einer Probelastung bei gleichartigen Bodenverhältnissen vorliegen, kann die Grenztragfähigkeit nach DIN 1054 (01/03) auf der Basis von vorsichtig angesetzten Erfahrungswerten abgeschätzt werden. Eine Abschätzung der Grenztragfähigkeit von Pfählen mit Hilfe einer erdstatischen Berechnung ist in der DIN 1054 (01/03) nicht vorgesehen.

Dieser Tatbestand war in der Vergangenheit vielfach Anreiz sich mit erdstatischen Verfahren zu beschäftigen und diese zu verbessern, um eine wirklichkeitsnahe Abschätzung der Pfahltragfähigkeit zu ermöglichen.



Abbildung 1-1: Pfahlprobelastung



Abbildung 1-2: Freigelegte Pfähle

Für Zugpfähle gibt es einen schalenstatischen Ansatz, mit dem es auf einfache Weise möglich ist, die Grenzlast abzuschätzen (Quarg-Vonscheidt (2000)). Hier stellte sich die Frage, ob es möglich ist, einen solchen schalenstatischen Berechnungsansatz auch für Druckpfähle zu entwickeln. Eine Kombination beider schalenstatischer Ansätze könnte es dann ermöglichen, das Zusammenwirken von Zug- und Druckpfählen zu erfassen.

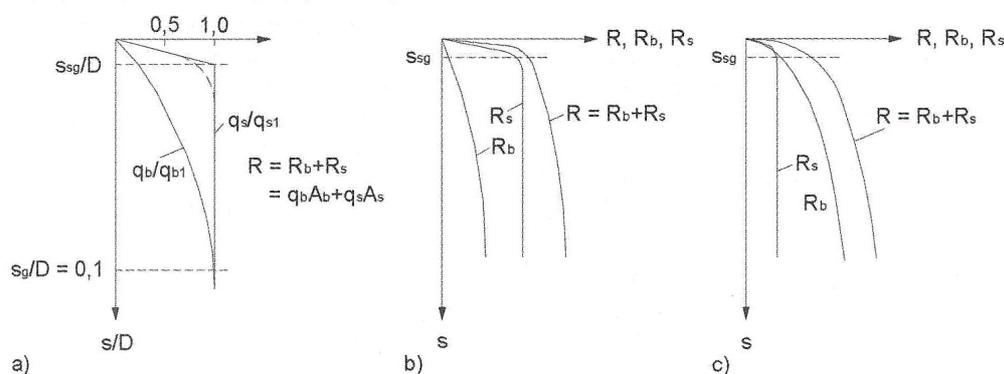
Zur Entwicklung eines auf der Schalenstatik für granulares Material beruhenden Berechnungsansatzes für einzelne Druckpfähle werden Pfahlprobelastungen sowohl im kleinmaßstäblichen bodenmechanischen Modellversuch als auch in situ herangezogen. Die Probelastungen im Maßstab 1:1 werden aus der einschlägigen Literatur oder aus Pfahldateien ausführender Baufirmen zusammengestellt. In den durchgeführten Modellversuchen wird die Grenzlast eines auf Druck beanspruchten Pfahles bei definierten Randbedingungen ermittelt. Die festgelegten Randbedingungen in den Modellversuchen ermöglichen es, eindeutige Eingangsparameter für den Berechnungsansatz zu bestimmen, wohingegen sich dies bei den Pfahlprobelastungen aus der Literatur oft als schwierig, insbesondere hinsichtlich der Bodenparameter, herausstellt.

Anhand von Modellversuchen an Pfahlgruppen wird versucht, den für einzelne Druckpfähle vorgeschlagenen Berechnungsansatz auf reine Druckpfahlgruppen zu übertragen.

Außerdem werden Modellversuche mit Belastung eines Druckpfahls durchgeführt, wobei die Reaktionskraft in benachbarte Zugpfähle übertragen wird (Pfahlgruppe aus Druckpfahl und Zugpfählen), um eine Datenbasis zu erhalten, die Rückschlüsse auf das Zusammenwirken der Pfähle in einer „gemischten“ Gruppe zulässt. Die in einer „gemischten“ Pfahlgruppe auftretenden Abhängigkeiten könnten gegebenenfalls durch eine Verbindung der beiden Berechnungsansätze für den Zug- und den Druckpfahl näher charakterisiert werden.

2 Tragverhalten von Pfählen

Der Pfahl trägt die auf ihn einwirkenden Lasten über den Fußwiderstand und den Mantelwiderstand, die beide von der Pfahlsetzung abhängig sind, in den Boden ab. Zur Mobilisierung der Mantelreibung sind i.d.R. nur geringe Verschiebungen notwendig, wogegen der Pfahlspitzenwiderstand erst bei Verschiebungen von mehreren Zentimetern voll mobilisiert wird (Abbildung 2-1). Ist die Pfahllänge in der tragfähigen Schicht groß, stellt sich das Gesamtpfahltragverhalten zunehmend nach den Gesetzen der Mantelreibung ein, da die Pfahllänge auf den Mantelwiderstand von erheblichem Einfluss ist.



a) Dimensionslose Darstellung, b) Mantelreibungspfahl, c) Spitzenwiderstandspfahl

Abbildung 2-1: Qualitativer Verlauf der Widerstands-Setzungs-Linien von Pfahlspitzenwiderstand und Mantelreibung (Kempfert / Smolczyk (2001))

Die Pfahltragfähigkeit ist gekennzeichnet durch die Grenzlast, unter der die ohne einen Sicherheitsbeiwert behaftete Kraft zu verstehen ist, bei der ein definierter Bruchzustand des Pfahls erreicht wird.

2.1 Mantelreibung

Die Mantelreibung wird als Scherspannung zwischen Pfahl und Boden aufgefasst, wobei gelegentlich von einer mit der Tiefe linear ansteigenden Verteilung der Mantelreibung über die Pfahllänge ausgegangen wird. Diese Annahme konnte in vielen Feld- und Modellversuchen jedoch nicht bestätigt werden. Die Versuche zeigen vielfach eine ab einer kritischen Tiefe (Anhaltswert: Einbindelänge zu Pfahldurchmesser $l/d \approx 15$) konstant bleibende Mantelreibung.

In der Abbildung 2-2 ist z.B. die von Vesic (1975) gemessene Mantelreibungsverteilung von Pfählen in Sand dargestellt. Es zeigt sich eine Zunahme der Mantelreibung mit der Tiefe bis auf einen maximalen Wert mit anschließender Abnahme zum Pfahlfuß hin. Das Maximum der

Mantelreibung wird nach Abbildung 2-3 in einer Höhe bis zum 5-fachen Pfahldurchmesser oberhalb des Pfahlfußes erreicht.

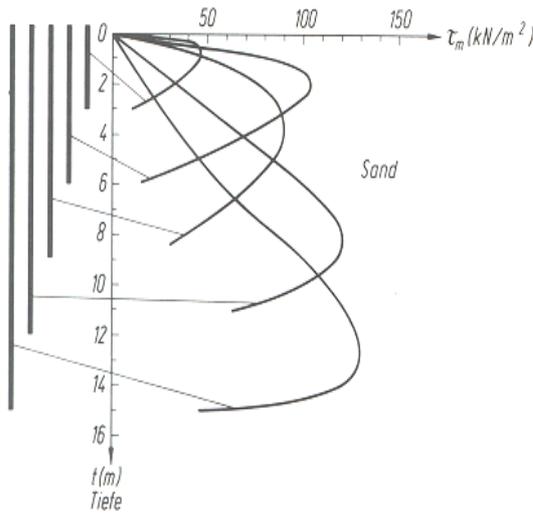


Abbildung 2-2: Mantelreibungsverteilung nach Vesic (1975)

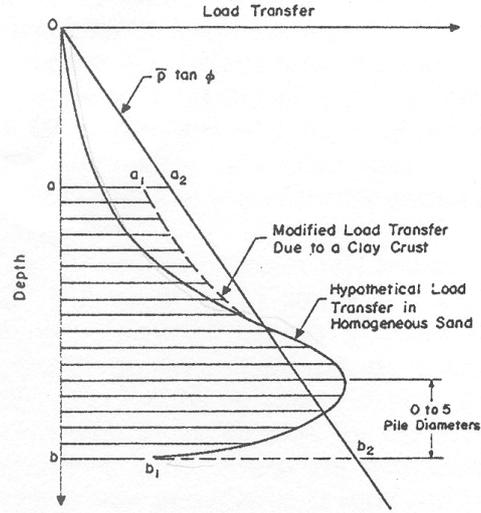


Abbildung 2-3: Mantelreibungsverteilung über die Pfahllänge (Touma / Reese (1974))

2.2 Spitzendruck

Wird der Spitzendruck basierend auf der Grundbruchtheorie angesetzt, nimmt er linear mit der Tiefe zu, was aber nicht zutreffend ist. Nach Abbildung 2-4, in der die Untersuchungen aus Feld- und Laborversuchen schematisch dargestellt sind, zeigt sich ab einem kritischen Wert von Einbindelänge l zu Pfahldurchmesser d ein konstanter Wert für den Spitzendruck. Die kritische Tiefe kann mit einem Wert von $l/d \approx 15$ angenommen werden.

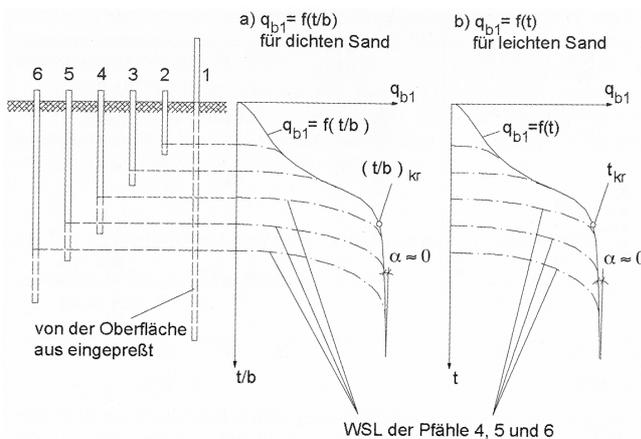


Abbildung 2-4: Spitzendruck in Abhängigkeit der Pfahllänge (Kempfert / Smolczyk (2001)) ($t = l$, $b = d$)

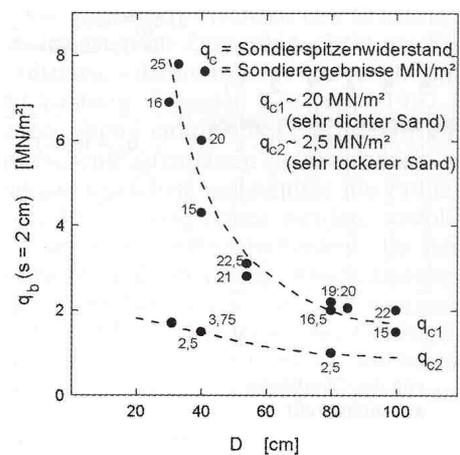


Abbildung 2-5: Durchmesserabhängigkeit des Spitzendruckes (Kempfert / Smolczyk (2001), $D = d$)

Für dichten Sand ist eine deutliche Durchmesserabhängigkeit des Spitzendrucks ersichtlich, die in locker gelagertem Sand fast nicht gegeben ist (Abbildung 2-5).

Die Spitzendruckverteilung über die Querschnittsfläche ist nach Linder (1977) und Stamm (1988) nicht gleichmäßig, stattdessen treten große Randpressungen unter dem Fuß und ein die Mittelfläche des Pfahlfußes abschirmendes Gewölbe auf (Abbildung 2-6).

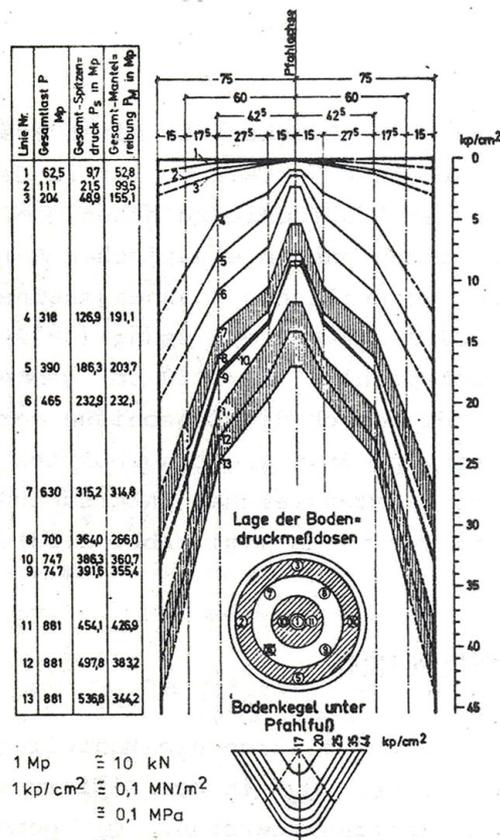


Abbildung 2-6: Spitzendruckverteilung unter dem Pfahlfuß (Linder (1977), Stamm (1988))

Als Erklärung wird von Linder (1977) die Ausbildung eines Kerns unter dem Fuß angegeben, dessen äußere Gewölbezonen einen inneren elastischen Bereich umschließen und diesen an einer wesentlichen Spannungsaufnahme hindert (Abbildung 2-7). Unter dem Kern bildet sich demnach ein Boden-Kompressionskegel aus, in dem es zunehmend zu einer Verdichtung des Bodens kommt, die in der Gewölbezone des Kerns ihren höchsten Grad erreicht. Mit zunehmender Lagerungsdichte vergrößert sich diese Kompressionszone und der Spitzendruck steigt an.

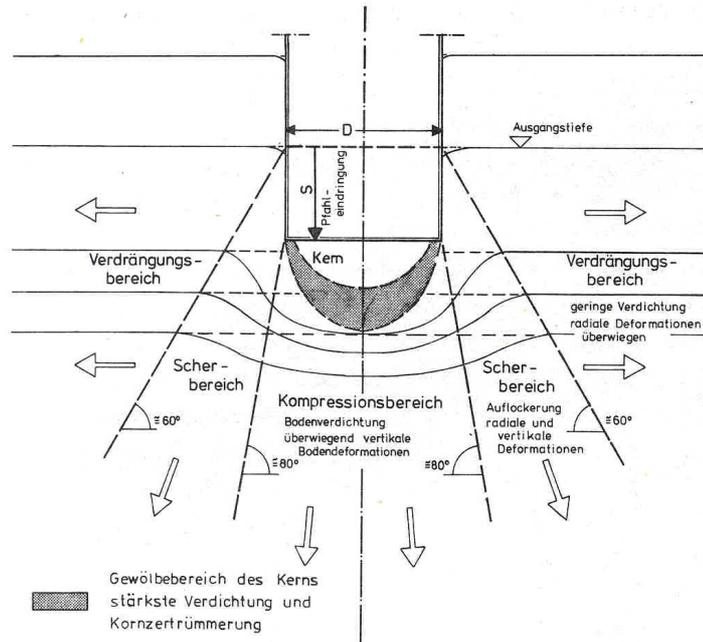


Abbildung 2-7: Kernausbildung unter dem Pfahl (Linder (1977))

2.3 Dilatanz

Das Pfahltragverhalten in dicht gelagerten Sandböden wird des weiteren von der Dilatanz, mit der die Volumenvergrößerung von nichtbindigem Boden bei Scherverformung bezeichnet wird, beeinflusst. Hiermit verbunden ist ein Anstieg der Radialspannungen in der Umgebung des Pfahlmantels bei behinderter seitlicher Ausdehnung, der zu einer Erhöhung der Mantelreibung führt. Hinweise zum Einfluss der Dilatanz auf die mobilisierbare Mantelreibung finden sich bei Wernick (1978) und Feda (1963). Durch die Dilatanz vergrößert sich die Wirkung des um den Pfahl entstehenden Druckgewölbes.

2.4 Gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Parameter

Mantelreibung, Spitzendruck und Dilatanz sind bislang getrennt voneinander betrachtet worden, eine zwischen ihnen auftretende mögliche Wechselwirkung wurde nicht berücksichtigt. Wird die Wechselwirkung miteinbezogen, bildet sie die Grundlage für eine von Terzaghi als Falltüreffekt bezeichnete Bodenzusammendrückung unter dem Pfahlfuß, durch die Gewölbewirkungen in der Pfahlumgebung entstehen (Abbildung 2-8). Je nach dem Verhältnis zwischen Mantelreibung und Spitzendruck führt dies zu einer Abnahme der mobilisierbaren Mantelreibung im Pfahlfußbereich.

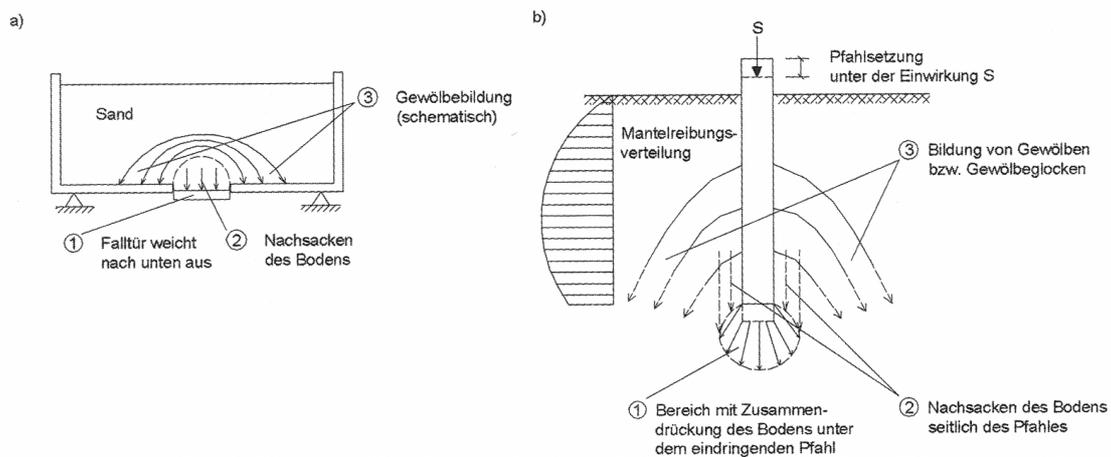


Abbildung 2-8: Druckpfahltragmodell, Analogie von Spitzenwiderstand und Mantelreibung zum Falltür- und Gewölbemodell (Kempfert / Smoltczyk (2001))

Die Gewölbebildung steht in einem unmittelbaren Zusammenhang mit der Mantelreibung. Mit zunehmender Lagerungsdichte vergrößert sich das Traggewölbe im umliegenden Boden (Abbildung 2-8b), folglich nimmt die Mantelreibung zu. Ist der unter dem Pfahlfuß vorhandene Boden dagegen sehr nachgiebig, schrumpft die Kompressionszone, das Gewölbe verlagert sich zur Spitze hin (Abbildung 2-9) und die Mantelreibung im Fußbereich nimmt zu. Das Gewölbe vergrößert sich nach Kerisel (1961) außerdem mit zunehmendem Pfahldurchmesser; auch mit zunehmender Pfahllänge verschiebt sich die Kämpferzone des Gewölbes zum Pfahlfuß hin.

Die Dilatanz des gescherten Bodenrings um den Pfahlschaft bewirkt den Aufbau einer radialen Verspannung im Boden um den Pfahl, die auch zu einer Vergrößerung der Gewölbewirkung führt, wobei sich der Dilatanzeinfluss mit zunehmendem Durchmesser abschwächt (Wernick (1978)).

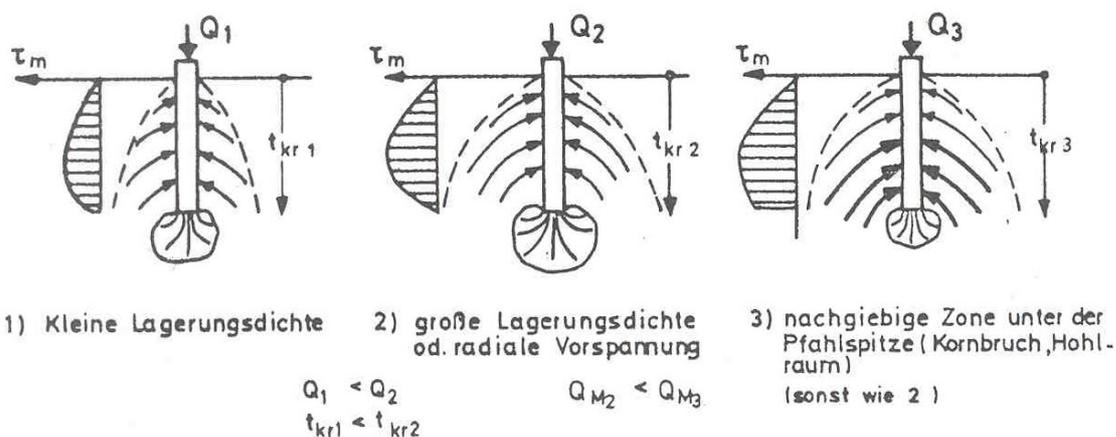


Abbildung 2-9: Gewölbeausbildung bei unterschiedlichen Lagerungsdichten des Bodens unter dem Pfahlfuß (Ripper (1984))

Die Wechselwirkung zwischen Spitzendruck und Mantelreibung ist so auf die Bodenverformungen bezogen. Durch das Kompressionsverhalten des Bodens unter dem Pfahlfuß wird die Größe und Verteilung der Mantelreibung beeinflusst, umgekehrt wird die Entwicklung des Spitzendrucks auch durch die Bodenverformungen beeinflusst, die infolge des auftretenden Druckgewölbes unterhalb der Pfahlfußebene entstehen.

3 Methoden zur Bestimmung des Pfahlwiderstandes

Zur Bestimmung der äußeren Tragfähigkeit von Pfählen, welche die Fähigkeit des anstehenden Bodens beschreibt, über den Pfahl eingeleitete Lasten sicher aufzunehmen, gibt es verschiedene Verfahren. Durch die Vielzahl der zu berücksichtigenden Einflussfaktoren (Bodenparameter, Herstellungstechnologie, Pfahlart, Art der Belastung usw.) bei der Bestimmung der Pfahltragfähigkeit ist es bis heute nicht möglich, das Tragverhalten von Pfählen mit einem einheitlichen Modell zu beschreiben. Die Tragfähigkeit von axial belasteten Pfählen kann nach den geltenden Vorschriften nur durch direkte Prüfverfahren wie Probelastungen nachgewiesen werden. Auf der Grundlage von Erfahrungswerten oder mit anderen Verfahren wird die Pfahltragfähigkeit näherungsweise abgeschätzt. Im folgenden werden verschiedene Verfahren zur Bemessung von Pfählen skizziert, ohne dass hierbei eine vollständige Literaturübersicht gegeben wird.

3.1 Rammformeln

Die Feststellung, dass die Grenzlast von Verdrängungspfählen mit dem Rammfortschritt korreliert, führte zur Aufstellung von Rammformeln. An statischen Probelastungen kalibrierte Rammformeln ermöglichen Aussagen zur Pfahlgrenzlast schon während des Rammvorgangs.

Grundsätzlich wird mit einer Rammformel der dynamische Eindringwiderstand R_{dyn} berechnet, den der Boden während der Rammung dem eindringenden Pfahl entgegensetzt. Grundlage der Rammformeln ist die Gleichsetzung des dynamischen Eindringwiderstandes mit der aufgewendeten Rammenergie E bezogen auf die bleibende Eindringung s des Pfahls infolge eines Rammschlages als Mittel aus den letzten 10 Schlägen. Die aufgewendete Rammenergie ist die kinetische Energie des Schlaggewichtes beim Auftreffen auf den Pfahl und somit das Produkt aus Bärgewicht R und Fallhöhe h .

$$R_{\text{dyn}} = \frac{E}{s} = \frac{R \cdot h}{s} \quad \text{kN} \quad (\text{GL. 3-1})$$

Zur Kalibrierung einer Rammformel wird der errechnete dynamische Eindringwiderstand R_{dyn} mit der aus einer statischen Probelastung ermittelten Grenzlast Q_g verglichen. Das Verhältnis aus beiden ist der Eichfaktor $n = \frac{Q_g}{R_{\text{dyn}}}$, der in die Tragfähigkeitsabschätzung eingeht.

Hiermit ist eine Tragfähigkeitsabschätzung möglich, wenn die statische Probelastung auf der betreffenden Baustelle durchgeführt wird.

In der Literatur werden zahlreiche verallgemeinerte, d.h. nicht auf ein konkretes Projekt bezogene Rammformeln erwähnt. Die hiermit ermittelten Grenzlaster differieren teilweise bis zu 600%; bedingt ist dies durch Vereinfachungen und empirische Beiwerte in den einzelnen Rammformeln.

3.2 Erdstatische Verfahren

Bei einem erdstatischen Verfahren wird die Pfahlgrenzlast Q_g aus der Addition von Mantelreibung Q_s und Spitzendruck Q_b bestimmt, wobei beide Anteile getrennt ermittelt werden. Die Grenzlast des Pfahls Q_G ergibt sich aus der Formel:

$$Q_g = Q_s + Q_b = q_s \cdot A_s + q_b \cdot A_b = k \cdot \tan \delta \cdot \gamma \cdot z \cdot A_s + N_q \cdot \gamma \cdot z \cdot A_b \quad (\text{GL. 3-2})$$

mit: Q_s = Mantelreibungswiderstand, Q_b = Spitzendruckwiderstand, q_s = Mantelreibungsspannung im Bruchzustand, A_s = Mantelfläche, q_b = Spitzendruckspannung im Bruchzustand, A_b = Spitzendruckfläche, k = Erddruckbeiwert, $\tan \delta$ = Tangens des Mantelreibungswinkels zwischen Pfahl und Boden, γ = Wichte des Bodens, N_q = Tragfähigkeitsbeiwert.

Nachfolgend sind die Verfahren zur Bestimmung der Mantelreibung und des Spitzendrucks, basierend auf der jeweiligen Bruchvorstellung, aufgeführt.

3.2.1 Mantelreibung

Für die Mantelreibung im Bruchzustand, die sich durch die Gleichung 3-3 vereinfacht beschreiben lässt, gilt:

$$q_s = k \cdot \sigma_z \cdot \tan \delta = \gamma \cdot z \cdot \tan \delta \cdot k = \gamma \cdot z \cdot \beta; \quad (\text{GL. 3-3})$$

$$\text{mit } \beta = \tan \delta \cdot k_0$$

mit q_s = Mantelreibungsspannung im Bruchzustand [kN/m²]

k_0 = Erdruhedruckbeiwert [-]

σ_z = vertikale Spannung im Boden in der Tiefe z [kN/m²]

$\tan \delta$ = Reibungsbeiwert zwischen Pfahl und Boden [-]

Der Faktor β kann über eine empirische Beziehung zwischen der Mantelreibung und einem lokalen Testparameter (SPT, CPT) festgelegt oder über das Coulomb'sche Schergesetz ermittelt werden (Lehane et. al. (1993)); es liegen keine pauschalen Werte für β in Abhängigkeit von der Bodenart vor. Der Erddruckbeiwert k kann auf Erfahrungsgrundlage abhängig vom Ruhedruckbeiwert k_0 , der Pfahlart und –größe sowie der Zusammendrückbarkeit des Bodens abgeschätzt werden, wobei vor allem die Abnahme der Mantelreibung in Pfahlfußnähe durch die Spannungsverteilung im Boden beeinflusst wird. Der Erddruckbeiwert k kann für Bohrpfähle kleiner sein als k_0 .

Die angeführte Gleichung 3-3 zeigt eine mit der Tiefe linear zunehmende Mantelreibung, dies kann in Versuchen oft nicht bestätigt werden; vielmehr wird davon ausgegangen, dass ab einer kritischen Tiefe die Mantelreibung konstant verläuft (siehe Kapitel 4.1).

3.2.2 Spitzendruck

Der Spitzendruck wird proportional zu dem Überlagerungsdruck angenommen, so dass gilt:

$$Q_b = \sigma_z \cdot N_q \quad (\text{GL. 3-4})$$

mit Q_b = Spitzendruckwiderstand und σ_z = Überlagerungsspannung in Höhe des Pfahlfußes. N_q ist ein Tragfähigkeitsbeiwert ähnlich zum Grundbruchnachweis, der die Form des Pfahlquerschnitts bereits enthält. Zur Bestimmung von N_q gibt es auf den nachfolgend kurz dargestellten Theorien und ihren zugehörigen Bruchvorstellungen basierende Werte.

a) Aufweitung begrenzter Hohlräume im Boden

Gibson et al. (1953) erarbeiteten auf dem von Bishop et. al (1945) entwickelten Verfahren zur Behandlung des Problems der Stanzfestigkeit metallischer Werkstoffe eine Theorie zur Bestimmung des Spitzenwiderstandes. Die Tragfähigkeit eines Gründungskörpers ist hier gleich dem Druck p , der erforderlich ist, einen Raum in entsprechender Tiefenlage des Pfahlfußes durch plastische Deformationen bis zur Größe des Pfahldurchmessers aufzuweiten und damit den Boden zur Aufnahme des eingedrungenen Pfahlvolumens zu befähigen.

Diese Theorie wurde von Vesic (1972), Yu und Houlsby (1991) an die jeweils vorliegenden Bodenverhältnisse angepasst und erweitert. Zum Teil finden sich tabellierte Werte für den Tragfähigkeitsbeiwert N_q in Abhängigkeit der Pfahlschlankheit, mit denen die Größe des Spitzendrucks ermittelt werden kann.

Auch Yasufku et. al. (2001) leiten eine auf der Theorie der Aufweitung eines Raumes basierende Gleichung zur Berechnung des Fußwiderstandes her.

b) „Tiefer Grundbruch“

In diesem Fall wird der Boden als starr-plastisches und inkompressibles Medium angesehen und von einem Grundbruch unter dem Pfahlfuß ausgegangen, bei dem die auftretenden Gleitfugen vom Rand der Pfahlfußfläche zum Pfahlschaft zurücklaufen. Der Tragfähigkeitsbeiwert N_q kann mit Kenntnis des Reibungswinkels und des Öffnungswinkels der Grundbruchfigur ermittelt werden.

Diese zunächst für ebene Randbedingungen entwickelte Vorstellung wurde von Meyerhof (1976) auf ein räumliches Problem erweitert und experimentell gefundene Formbeiwerte eingeführt, die unter anderem die Art der Pfahleinbringung berücksichtigen. Nach Franke (1976)

werden aber mit dieser Theorie die für das Tragverhalten von Pfählen ganz wesentlichen Einflüsse aus einer Gewölbewirkung in der Pfahlumgebung nicht berücksichtigt.

c) Verdrängungsbruch

Das Konzept des Verdrängungsbruchs („punching-shear“) wurde entwickelt, um die Vorgänge bei großen Pfahl-tiefen zu erklären. Während bei der Belastung von in geringerer Tiefe gegründeten Pfählen die Bruchfugen noch bis zur Geländeoberfläche durchlaufen, konzentrieren sich die Schervorgänge bei mittleren und großen Tiefen zunehmend auf die unmittelbare Umgebung des Pfahlfußes. Die so ermittelten Tragfähigkeitsbeiwerte N_q werden, da es sich um ein räumliches Problem handelt, ebenfalls mit experimentell ermittelten Formbeiwerten behaftet.

Einen Überblick über die auf Basis der vorgenannten Bruchvorstellungen ermittelten unterschiedlichen Tragfähigkeiten bietet die Abbildung 3-1.

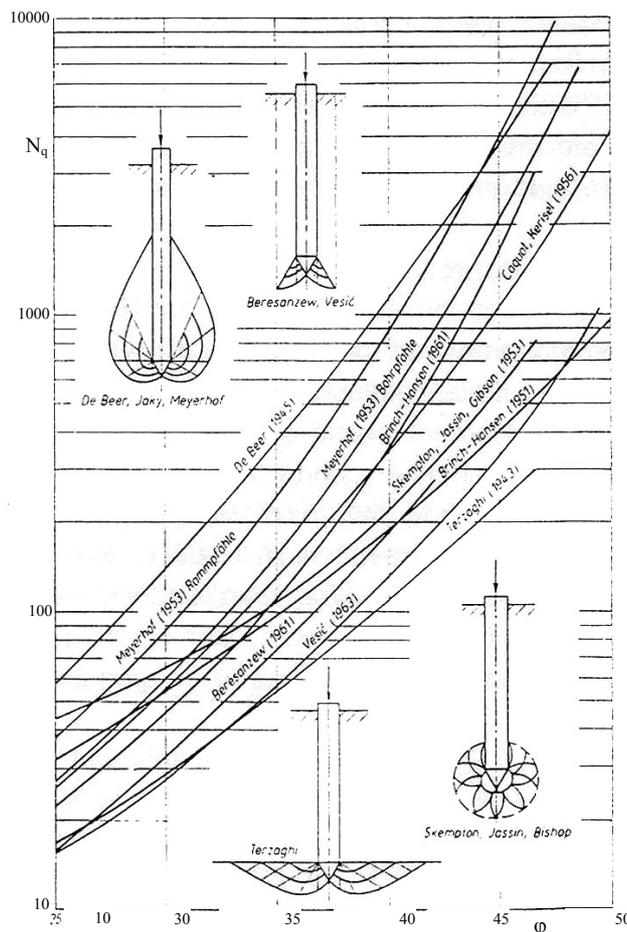


Abbildung 3-1: Übersicht der einzelnen Bruchvorstellungen und der daraus resultierenden Tragfähigkeitsbeiwerte N_q (Vesic (1976))

3.3 Pfahlwiderstände aus Sondierungen

Geht man von einem zum Pfahl modellähnlichen Bruchvorgang bei Sondierungen aus, kann der Pfahlspitzenwiderstand gleich dem Widerstand der Drucksonde gesetzt werden, wobei die unterschiedlichen Durchmesser von Sonde und Pfahl berücksichtigt werden müssen. Unter der Voraussetzung, dass die Bruchwiderstände von Pfahl und Sonde bei gleichen bezogenen Eindringtiefen erreicht werden, ergibt sich für eine kritische Tiefe von $l/d = 15$ (l = Pfahllänge und d = Pfahldurchmesser) folgende Gleichung zur Bestimmung der Pfahlspitzendruckspannung:

$$q_b = \frac{q_c \cdot l}{15 \cdot d} \leq q_c, \quad (\text{GL. 3-5})$$

mit q_c = Sondierwiderstand, q_b = Pfahlspitzenwiderstand.

Oberhalb der kritischen Tiefe nimmt q_b linear mit der Tiefe bis q_c zu, darunter bleibt q_b konstant.

Wird bei einer Drucksondierung auch die lokale Mantelreibung f_c an der Sonde gemessen, kann mit $f_c = q_s$ die Mantelreibung am Pfahl bestimmt werden.

Spitzendruck und Mantelreibung können nach von Impe (1984), Lopes (1988) und Fleming (1992) auch auf der Grundlage von in ausreichender Tiefe ausgeführten Rammsondierungen nach Gl. 3-6 ermittelt werden. Die Pfahlgrenzlast ergibt sich aus:

$$Q_g = A_b \cdot \frac{k \cdot N_{\text{SPT}}}{F_1} + \frac{\pi \cdot d}{F_2} \cdot \sum \alpha \cdot k \cdot N_{\text{SPT}} \cdot \Delta z \quad (\text{GL. 3-6})$$

mit F_1 und F_2 = Faktoren für die Pfahlart, N_{SPT} = Schlagzahl aus Sondierung, α und k = Korrelationsfaktoren für die Bodenart, Δz = Pfahlabschnitt.

Weitere Ansätze zur Berechnung des Pfahlspitzendrucks auf Basis von Sondierungen finden sich unter anderem bei Bandini (1998), Lancelotta et. al. (1993), O'Neill u. Reese (1988) und Robertson et. al. (1983).

3.4 Numerische Verfahren

Numerische Verfahren auf Basis der Finiten Elemente (FE) ermöglichen die Berechnung der Last-Setzungs-Linie eines Pfahls (Bolton u. Gui (1995)). Simonini (1996) untersucht mit numerischen Verfahren auch die Verhältnisse unter dem Pfahlfuß, insbesondere das Auftreten von Kornbruch und Dilatanz. Von de Nicola und Randolph (1993) wird auf der Basis von numerischen Verfahren die Mantelreibung von Zug- und Druckpfählen näher betrachtet, mit

dem Ergebnis einer für beide Pfahlarten unterschiedlichen Mantelreibung in Größe und Verteilung.

In komplexeren Berechnungen können weitere Parameter, die das Tragverhalten eines Pfahles bestimmen, wie z.B. ein geschichteter Bodenaufbau, berücksichtigt werden (Wei Dong Guo (2000)).

Die Leistungsfähigkeit numerischer Berechnungen ist durch die verwendeten Stoffgesetze und Lastübertragungsansätze determiniert. Eine Ergebnisverbesserung wird durch komplexere Stoffgesetze erreicht, bei denen die Stoffparameter aus standardisierten Laborversuchen ermittelt werden. Die Abbildung 3-2 ermöglicht einen Vergleich einer gemessenen mit einer berechneten Last-Setzungs-Linie eines Pfahles.

Von Chow (1986), Guo und Randolph (1999) werden numerische Verfahren mit guten Ergebnissen auch für Pfahlgruppen angewendet (Abbildung 3-3).

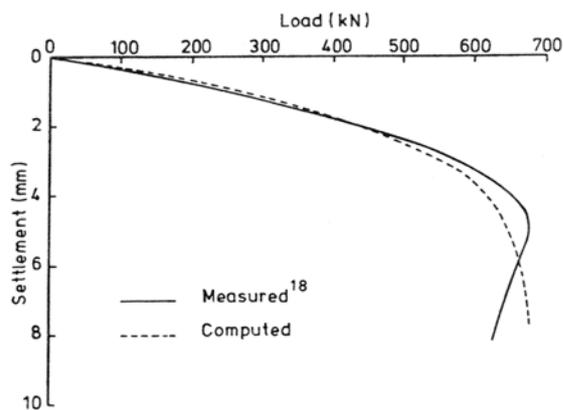


Abbildung 3-2: Gemessene und berechnete Kraft-Setzungs-Linie eines Einzelpfahls (Chow (1986))

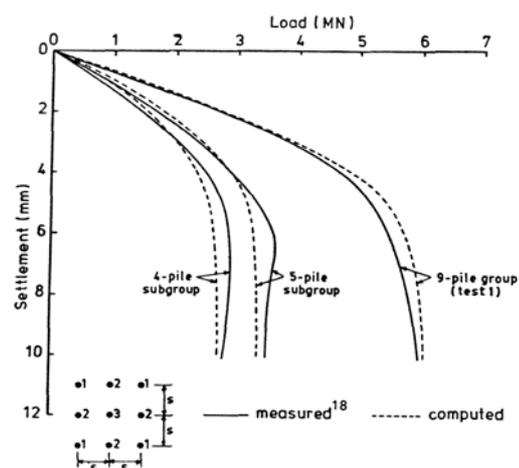


Abbildung 3-3: Gemessene und berechnete Kraft-Setzungs-Linie von Pfahlgruppen (Chow (1986))

Pilyagin und Shukenbaev (2001) betrachten mittels einer FE-Berechnung die bei der Probebelastung eines Druckpfahls in Wechselwirkung mit den Reaktionspfählen auftretenden Verformungen und Spannungen im Boden (Abbildung 3-4).

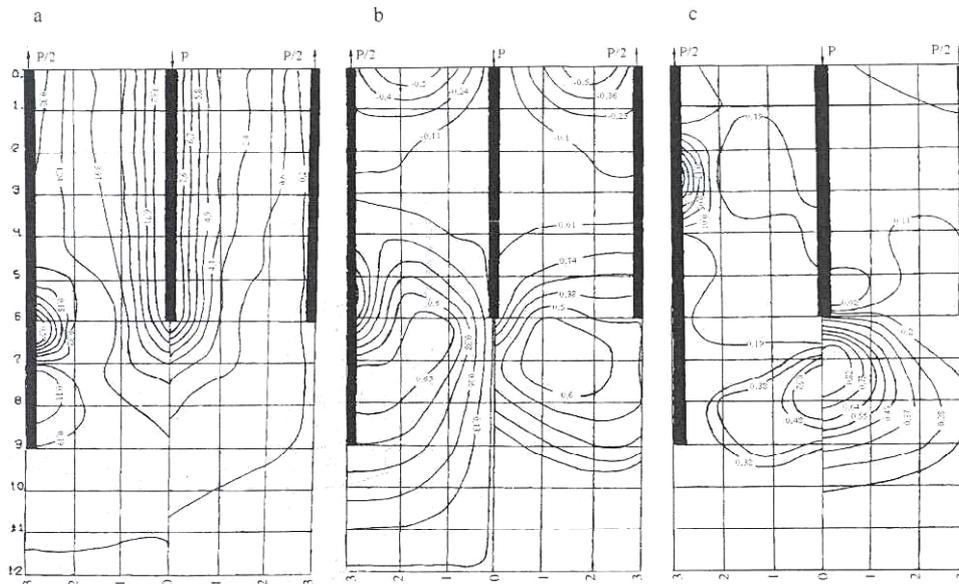


Abbildung 3-4: FE-Berechnung einer Probelastung (Darstellung der vertikalen (a) und horizontalen (b) Verschiebungen und der vertikalen Spannungen (c) als Isolinien (Pilyagin und Shukenbaev (2001)))

In den Berechnungen werden die Länge des Probepfahls, die Länge der ihn umgebenden Zugpfähle und der Pfahlabstand variiert. Nach der Abbildung 3-4c sind die größten vertikalen Spannungen im Bereich von $3 \cdot d - 4 \cdot d$ unter dem Fuß des Druckpfahls zu finden. Dieser Effekt wird bei Zugpfählen, die kürzer als der Probepfahl sind, deutlicher. Mit größer werdendem Abstand der Zugpfähle nehmen die Spannungen im Boden und die Setzung des Druckpfahls ab. Insgesamt sind FE-Berechnungen nach wie vor aufwendig bzw. unzutreffend.

3.5 Berechnung mit Tabellenwerten / Erfahrungswerten

Die Grenzlast eines Pfahles Q_g , die sich aus dem Spitzendruckwiderstand Q_b (Spitzendruckspannung im Grenzzustand q_b multipliziert mit der Pfahlfußfläche A_b) und dem Mantelreibungswiderstand Q_s (Mantelreibungsspannung im Grenzzustand q_s multipliziert mit der Mantelfläche A_s) zusammensetzt

$$Q_g = Q_b + Q_s = A_b \cdot q_b + A_s \cdot q_s, \quad (\text{GL. 3-7})$$

wird mit Erfahrungswerten für die Spitzendruck- und Mantelreibungsspannung (siehe z.B. Tabellen DIN 4014 (03/90) bzw. DIN 1054 (01/03)) bestimmt. Die Erfahrungswerte basieren auf einer großen Anzahl von Probelastungen. Daher müssen bei Anwendung der Erfahrungswerte die in der DIN 4014 (03/90) bzw. DIN 1054 (01/03) angegebenen Randbedingungen eingehalten werden.

3.6 Pfahlprobelbelastungen

Als zuverlässigste Methode zur Bestimmung der Pfahltragfähigkeit werden Pfahlprobelbelastungen angesehen, die sich in statische und dynamische Probelbelastungen unterteilen lassen.

3.6.1 Dynamische Probelbelastungen

Der dynamische Pfahltest ist eine Probelbelastung, bei der eine Stoßkraft statt einer statischen Prüflast verwendet wird. Am Pfahlkopf wird die Dehnung und die Beschleunigung als Funktion der Zeit gemessen. Die Bestimmung der Pfahltragfähigkeit kann entweder direkt nach dem CASE-Verfahren oder indirekt mit dem CAPWAP-Verfahren erfolgen, die auf der eindimensionalen Stoßwellentheorie beruhen. Zur Eichung der Verfahren wird eine statische Probelbelastung empfohlen.

Beim CASE-Verfahren wird der dynamische Widerstand R_{dyn} proportional zur Eindringgeschwindigkeit des Pfahlfußes v_b angenommen, $R_{\text{dyn}} = J_c \cdot Z \cdot v_b$. Der Dämpfungsfaktor J_c wird durch Vergleich mit einer statischen Probelbelastung ermittelt oder aus einer Tabelle als Erfahrungswert abgelesen. Mit Z wird die Impedanz – ein Proportionalitätsfaktor – bezeichnet, welcher ein Maß für die Pfahlbeschaffenheit und damit auch für den dynamischen Gesamtwiderstand des Pfahls ist. Aus dem dynamischen Widerstandswert R_{dyn} kann auf den statischen Wert der Grenztragfähigkeit rückgeschlossen werden. Bei dem TNO-Verfahren ist es zusätzlich möglich den Mantel- und Spitzenwiderstand getrennt zu berechnen.

Das CAPWAP-Verfahren berechnet das dynamische Verhalten des Pfahls auf der Grundlage geschätzter Bodenwiderstandswerte, wobei für den statischen Widerstand ein bilineares elasto-plastisches Modell und für den dynamischen Anteil ein linear-viskoser Ansatz verwendet werden. Es werden so lange Iterationsschritte zur Verbesserung der Bodenkennwerte durchgeführt, bis der gemessene und berechnete Kraftverlauf über die Pfahlänge gut übereinstimmen. Das Ergebnis der Iteration ist die Mantelreibung- und Spitzendruckverteilung.

Bei der rechnerischen Simulation des statischen Belastungsvorgangs werden die in der Iteration bestimmten statischen Bodenwiderstandswerte in Ansatz gebracht und so eine statische Widerstands-Setzungs-Linie bestimmt.

3.6.2 Statische Probelbelastung

Bei einer statischen Probelbelastung wird die Last in der Regel stufenweise über Pressen, die sich gegen ein Widerlager abstützen, auf den Pfahl aufgebracht. Als Widerlager für die Pressen dienen Traversen bzw. Totlasten. Der lichte Abstand des Probepfahls zu den vertikalen Zugpfählen, die zur Verankerung der Traverse benutzt werden, oder zu den Auflagern einer Totlast sollte mindestens $2,5 \cdot d$ bzw. 2,5 m betragen, damit eine gegenseitige Beeinflussung der Pfähle minimiert wird (Abbildung 3-5).

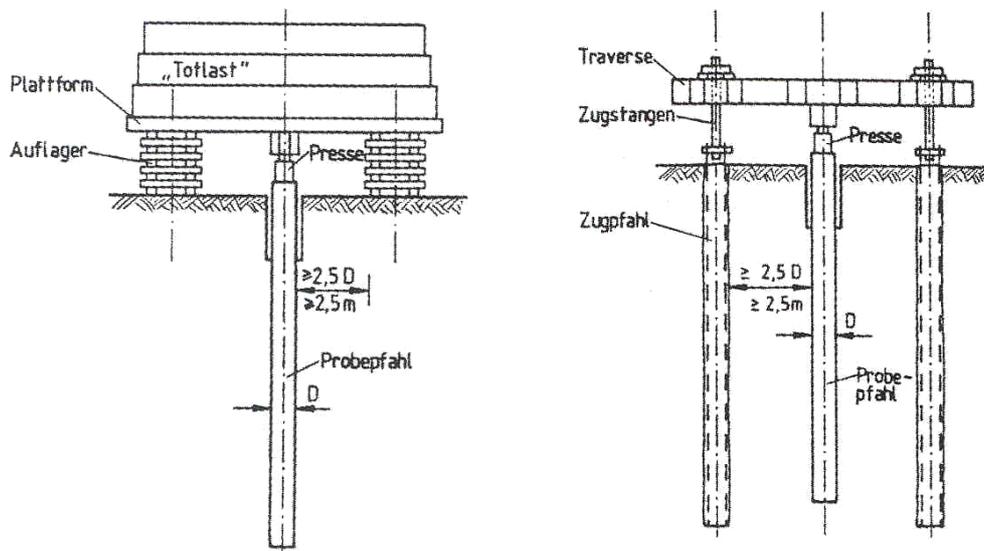


Abbildung 3-5: Pfahlabstände bei einer Pfahlprobelastung (Empfehlungen des AK 5 – Pfähle - der DGE (1993))

Aus einer Probelastung erhält man die Pfahlwiderstands-Setzungs-Linie, aus der die Grenzlast Q_g abgelesen werden kann, wobei für die Festlegung von Q_g verschiedene Kriterien angewendet werden.

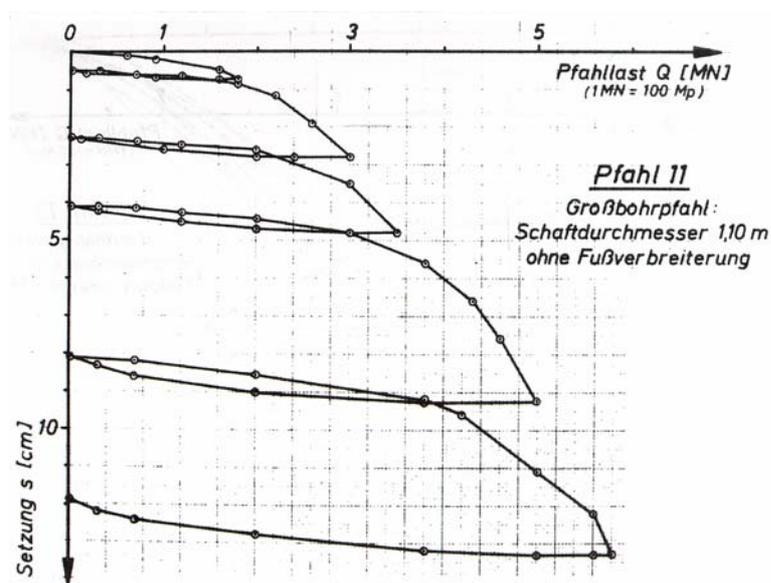


Abbildung 3-6: Aus einer Probelastung erhaltene Pfahlwiderstands-Setzungs-Linie (Franke / Garbrecht (1977))

Aus den gemessenen Dehnungen bzw. Stauchungen längs des Pfahlschaftes kann auf den Längskraftverlauf im Pfahl geschlossen werden, der dann Anschluss über die mobilisierten Mantelreibungskräfte und -spannungen gibt. Die Erfassung des Spitzenwiderstandes erfolgt mit am Pfahlfuß eingebauten Kraftmessdosen.

Nachfolgend werden exemplarisch einige Berichte über Pfahlprobelastungen erwähnt, die recht zahlreich in der einschlägigen Literatur zu finden sind.

Roscoe (1984) schildert Probelastungen von Schneckenpfählen in Sand. In diesem Fall stellt eine mit Zugpfählen rückverankerte Traverse das Widerlager für die lastaufbringende Presse dar. 4 Pfähle werden bis zum Versagen belastet, wobei die Versagenslast bei einer Setzung von 10 % des Pfahldurchmessers festgelegt wurde.

Price (1992) berichtet über Probelastungen an Bohrpfählen in dicht gelagertem Sand bei denen ebenfalls Zugpfähle zur Verankerung der Traverse eingesetzt wurden. Die Belastung wurde in einzelnen Intervallen aufgebracht. Zur Definition der Versagenslast werden 4 unterschiedliche Methoden herangezogen, die zum Teil bis zu 100 % voneinander abweichende Ergebnisse liefern (z.B. Davisson-Methode mit einer Grenzlast von 6,45 MN, Zwei-Tangenten-Methode mit 3,35 MN als Grenzlast und die Methode über eine Setzungsbegrenzung mit 11,0 MN als Grenzlast).

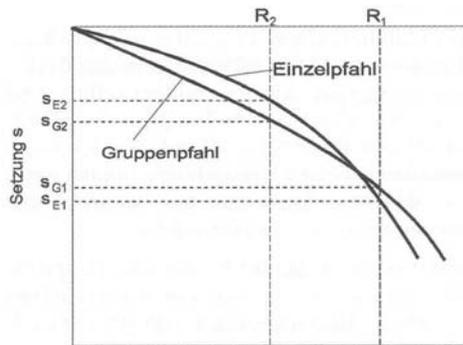
Kempfert (1982) beschreibt Probelastungen an Großbohrpfählen in nichtbindigem Untergrund. Die Pfahldurchmesser variieren zwischen 1,2 und 1,5 m, die Pfahllängen liegen zwischen 9,5 und 20 m. Durch die Verwendung von DMS und Drucktellern war es möglich, den Spitzendruck und die Mantelreibung getrennt zu erfassen. Die Ergebnisse werden den in den Normen niedergelegten Erfahrungswerten gegenüber gestellt, wobei sich deutliche Tragreserven der Pfähle gegenüber den Erfahrungswerten zeigen.

3.7 Tragfähigkeit einer Pfahlgruppe

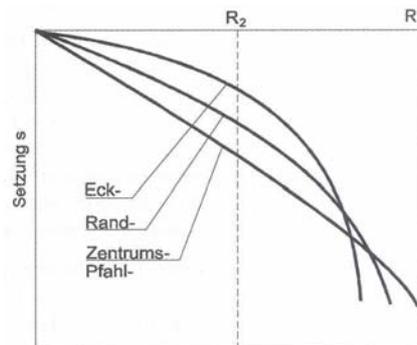
Die Tragfähigkeit eines einzelnen Gruppenpfahls stimmt nicht mit der des Einzelpfahls überein, da sich die einzelnen Pfähle einer Pfahlgruppe gegenseitig beeinflussen. Das Maß der Veränderung in der Widerstands-Setzungs-Linie ist abhängig von der Position des Pfahls in der Gruppe (vgl. Abbildung 3-7b). Für kleine Lasten weist der Pfahl in der Gruppe eine größere Setzung als der Einzelpfahl auf; für größere Pfahllasten zeigt der Gruppenpfahl jedoch eine günstigere Widerstands-Setzungs-Linie (Abbildung 3-7a). Es ist daher nicht möglich, die Widerstands-Setzungs-Linie (WSL) des Einzelpfahls einfach auf den Gruppenpfahl zu übertragen, allerdings kann die WSL für den jeweiligen Anwendungsfall mit Faktoren für die Mantelreibung und den Spitzendruck angepasst werden. Hierbei werden Herstellungseinflüsse summarisch erfasst, eine Unterteilung der Pfahlwiderstände in Mantelreibung und Spitzendruck erfolgt weiterhin.

Auf Grund der Herstellung ist es für Bohrpfähle im Vergleich zu Rammpfählen einfacher, Parameter für die Gruppenwirkung zu bestimmen. Bei Verdrängungspfählen erhöht sich der Widerstand des einzelnen Gruppenpfahls infolge einer zusätzlichen Verspannung des umgebenden Bodens im Vergleich zu der Tragfähigkeit eines Einzelpfahls. Dagegen ist nach Mey-

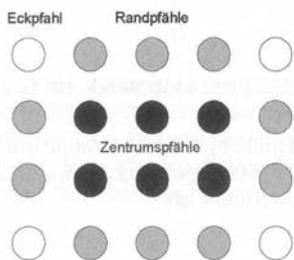
erhof (1976) bei Bohrpfählen im nichtbindigen Boden davon auszugehen, dass der Widerstand des Pfahls in der Gruppe geringer ist als der Widerstand eines Einzelpfahls. Je größer der Pfahlabstand wird, desto mehr stimmt die WSL mit der des unbeeinflussten Einzelpfahls überein.



a) Unterschied Einzel- und Gruppenpfahl



b) Setzungsverhalten in Abhängigkeit der Position in der Pfahlgruppe



c) Pfahlpositionen in der Gruppe

Abbildung 3-7: Widerstands-Setzungs-Verhalten von Einzel- und Gruppenpfählen (Kempfert / Smolczyk (2001), R = Pfahlwiderstand)

4 Einzelpfahl- und Pfahlgruppenversuche

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Einzel- und Gruppenpfahlversuche anderer Autoren wiedergegeben und wesentliche Ergebnisse von Pfahlversuchen dargestellt, wobei die Literaturübersicht nicht vollständig ist.

4.1 Einzelpfahlversuche

König (1970) führte Versuche mit Einzelpfählen von 5-18 cm Durchmesser und Pfahllängen bis zu 3,0 m durch. Die Pfähle wurden in einen Container gesetzt, der dann mit dem Sandregnenverfahren befüllt wurde. In Abhängigkeit von der Einbindetiefe der Pfähle konnten drei Brucharten - allgemeiner Scherbruch, örtlicher Scherbruch und Verdrängungsbruch - beobachtet werden. Ab einer Einbindetiefe von $l/d > 4$ trat nur der Verdrängungsbruch auf. Als Grenztiefe für einen konstanten Spitzendruck erhielt König einen Wert von $l/d > 15$. Nach den Versuchen von König erreicht die Mantelreibung ab einer gewissen Tiefe, die nicht näher angegeben ist, einen konstanten Wert. Erklärt werden diese Effekte über eine in der Pfahlumgebung entstehende Gewölbewirkung.

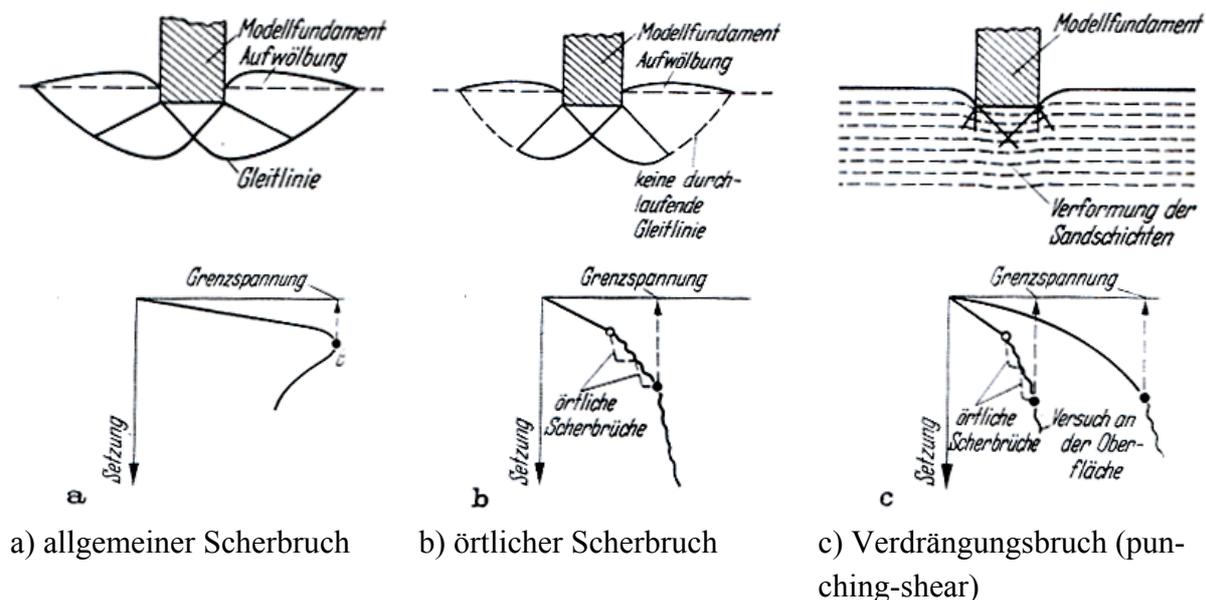


Abbildung 4-1: Verschiedene Brucharten (König (1970), Kulhawy (1984))

Von de Nicola und Randolph (1999) wird das Tragverhalten von Modellpfählen (mit DMS versehene Aluminiumrohre) in einem mit Sand befüllten Behälter in Zentrifugenversuchen betrachtet. Die Modelle entsprechen Prototyppfählen mit einer Länge von 5-18 m und mit einem Durchmesser von 1,6 m. Die Belastung der Pfähle erfolgt statisch bis zu einer Setzung von 20 % des Pfahldurchmessers, die Grenzlast wird bei einer Setzung von $0,1 \cdot d$ definiert. Als Ergebnis zeigt sich eine bei Druckpfählen - im Vergleich zu den Zugpfählen - wesentlich

höhere Mantelreibung (Faktor 1,5), die mit der Lagerungsdichte sowie der Tiefe ansteigt und das Maximum am Pfahlfuß aufweist. Die Spitzendrucktragfähigkeit wurde aus der Differenz zwischen der Gesamtlast und der Mantelreibung ermittelt. Aus dem Spitzendruck werden Tragfähigkeitsbeiwerte zurückgerechnet, die mit zunehmender Lagerungsdichte anwachsen. Der Spitzendruck selber nimmt mit zunehmender Einbindelänge der Pfähle ab, da ein größerer Lastanteil über Mantelreibung abgetragen wird.

Ähnliche Ergebnisse zur Mantelreibung von Zug- und Druckpfählen liefern die Versuche von Bergdahl / Wennerstrand (1976), Gregersen (1973), Tejchman (1973) und Vesic (1963), in denen bei Zugpfählen eine um den Faktor 0,3 bis 0,7 geringere Mantelreibung gemessen wurde als bei Druckpfählen.

Valsangkar und Meyerhof (1983) führten Versuche mit Pfahlmodellen aus einem Stahlrohr von 7,6 cm Durchmesser und Längen von 76,2 bis 144,8 cm in Sand durch. Aufgrund der gewählten Instrumentierung konnten Spitzendruck und Mantelreibung getrennt erfasst werden. Für den Spitzendruck (Abbildung 4-2) zeigt sich ein mit der Pfahllänge zunehmender Wert, welcher ab einer gewissen Tiefe konstant bleibt. Die Mantelreibung (Abbildung 4-3) steigt bis auf ihr Maximum in Fußnähe an und fällt anschließend wieder ab.

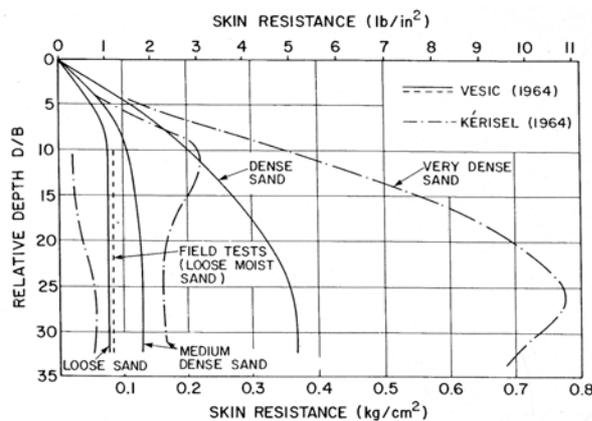


Abbildung 4-2: Aus Versuchen ermittelte Mantelreibung (Valsangkar (1983))

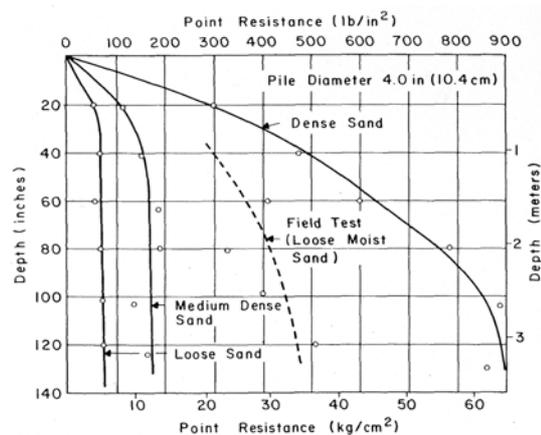


Abbildung 4-3: Aus Versuchen ermittelte Spitzendruckverteilung (Valsangkar (1983))

Von Vesic (1963) wurden zahlreiche Modellversuche mit runden ($d = 5,41; 10,16$ und $17,15$ cm) und prismatischen ($a = 6,20$ bis $31,60$ cm) Stahlpfählen mit Fußplatten und Längen zwischen $25,40$ und $287,02$ cm in Sand bei unterschiedlichen Lagerungsdichten durchgeführt. Bei diesen Pfahlmodellen war eine separate Belastung des Pfahlschaftes und der Fußplatte möglich. Zuerst wurde die Fußplatte bis zum Grenzzustand belastet, danach wird der Pfahlschaft belastet, bis die zugehörige Verschiebung ihn wieder in Kontakt mit der Fußplatte treten lässt. Stehen die beiden Pfahleinteile wieder miteinander in Kontakt, werden beide Komponenten zusammen erneut bis zum Bruch belastet. Vesic betrachtete die bereits erwähnten Bruchfor-

men (Abbildung 4-1) in Abhängigkeit der Pfahllänge. Die Versuche ergeben einen konstanten Spitzendruck sowie eine konstante Mantelreibung ab einer kritischen Tiefe.

Aus der Abbildung 4-4 und der Abbildung 4-5 ist in Abhängigkeit vom Pfahldurchmesser ein unterschiedlicher Verlauf für den Spitzendruck und die Mantelreibung ersichtlich.

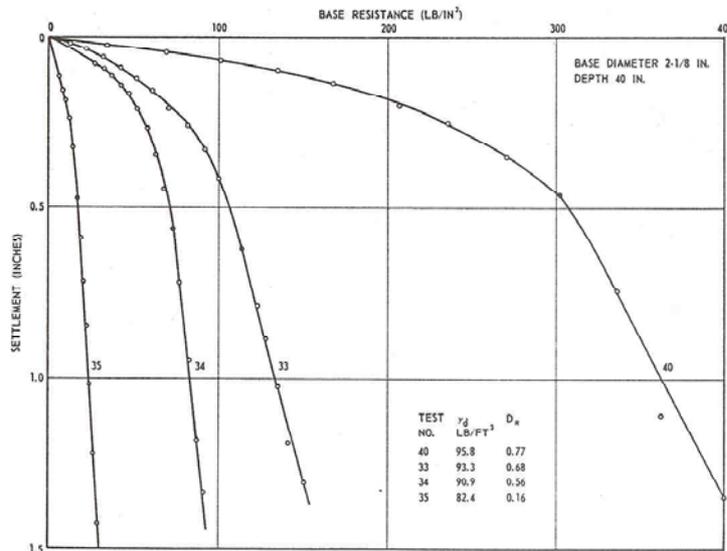


Abbildung 4-4: Spitzendruck für verschiedene Einbindetiefen (Vesic (1963), D_R = Lagerungsdichte)

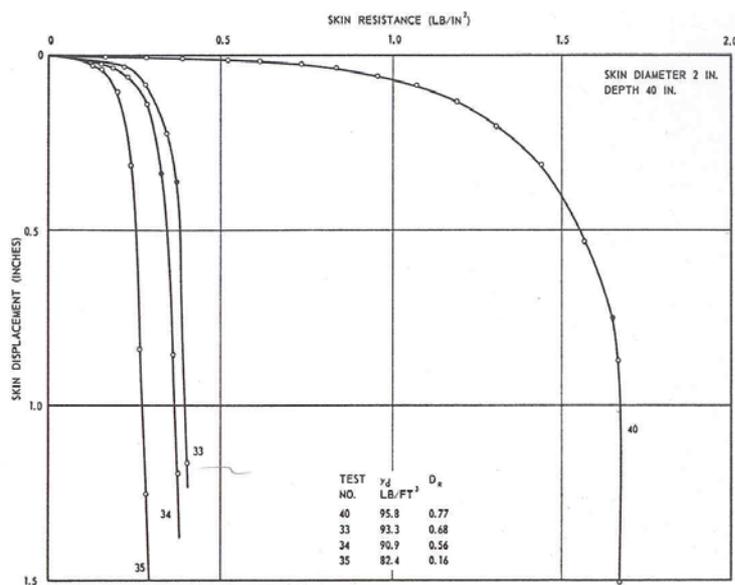


Abbildung 4-5: Mantelreibung für verschiedene Einbindetiefen (Vesic (1963), D_R = Lagerungsdichte)

Im Rahmen seiner Modellversuche zu Pfahlgruppen betrachtet Böckmann (1991) auch Einzelpfähle. Dies sind mit Sand beschichtete Stahlrohre von 10,12 cm Durchmesser und Längen von 120, 160 und 200 cm. Die Pfähle werden in den Versuchscontainer eingestellt und dieser mit der Sandregenmethode mit einem grobsandigen Mittelsand in dichter Lagerung gefüllt.

Die Versuche zeigen ein Anwachsen der Pfahlgrenzlast mit zunehmender Einbindelänge, bedingt durch die größere Mantelfläche, über die bei Bohrpfählen mit großer Schlankheit l/d ein

Großteil der Grenzlast abgetragen wird. Die Versuche von Böckmann zeigen eine lineare Abhängigkeit zwischen Pfahlgrenzkraft und Einbindelänge (Abbildung 4-6).

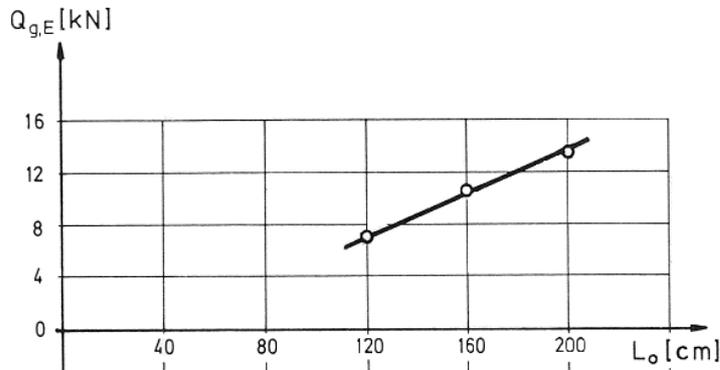


Abbildung 4-6: Abhängigkeit der Pfahlgrenzkraft von der Pfahllänge (Böckmann (1991))

4.2 Pfahlgruppenversuche

Die überwiegende Anzahl von Versuchen zur Gruppenwirkung von Druckpfählen in der Literatur sind Modellversuche, da es sehr schwierig ist, eine Probelastung für eine Pfahlgruppe zu realisieren. Untersuchungen zum Tragverhalten von freistehenden Pfahlgruppen, wobei freistehend bedeutet, dass eine die Pfähle verbindende Kopfplatte fehlt, wurden unter anderem von Stuart (1961), Garg (1979), Tejchman (1973), Hanna (1963), Kishida / Meyerhof (1965) und Vesic (1963) durchgeführt.

Stuart et. al. (1961) betrachten die Tragfähigkeit von Pfählen in Sand in Abhängigkeit vom geometrischen Abstand der Pfähle. Die Modellpfähle, bestehend aus Holz und Stahl, wurden in den Versuchscontainer eingestellt, der anschließend mit der Sandregenmethode gefüllt wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass die Pfahltragfähigkeit mit abnehmendem Pfahlabstand ansteigt, wobei eine auf den unbeeinflussten Einzelpfahl bezogene Zunahme in den Setzungen zu verzeichnen ist. Ist der Pfahlabstand klein genug, wird der zwischen den Pfählen liegende Boden mitgenommen, es tritt eine Blockwirkung ein, wodurch sowohl die Zunahme der Setzung als auch diejenige der Grenzlast erklärbar ist.

Garg (1979) führte großmaßstäbliche Einzel- und Gruppenpfahlversuche im Sand an Schneckenbohrpfählen durch. Die Achsabstände der Pfähle in den Gruppen betragen $1,5d$ bis $2,5d$ und lassen in diesem Bereich für die 2er- und 4er-Gruppe eine mit dem Abstand geringere Setzung für gleiche Last erkennen (Abbildung 4-7). Bei der in Abbildung 4-8 dargestellten 6er-Pfahlgruppe weist eine Gruppe mit einem Pfahlachsabstand von $1,5d$ eine größere Tragfähigkeit auf als bei einem Achsabstand von $2,5d$, dies kann durch die im Versuch gewählte Reihen-anordnung bedingt sein.

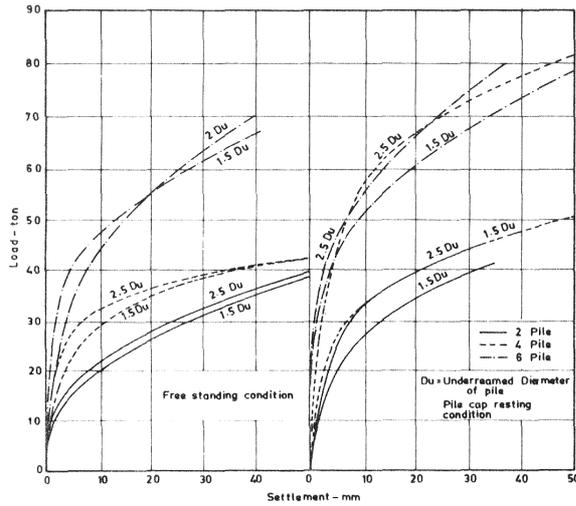


Abbildung 4-7: Kraft-Setzungs-Linien verschiedener Pfahlgruppen (Garg (1979))

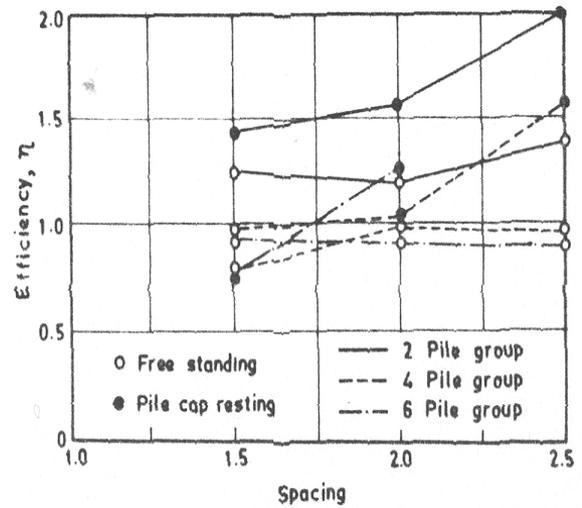


Abbildung 4-8: Gruppeneffektivität (Garg (1979))

Zu einem vergleichbaren Ergebnis bezüglich der Pfahltragfähigkeit in Abhängigkeit vom Pfahlachsabstand – Zunahme der Grenzlast bei abnehmendem Abstand - führen die Versuche von Tejchman (1973) (Abbildung 4-9).

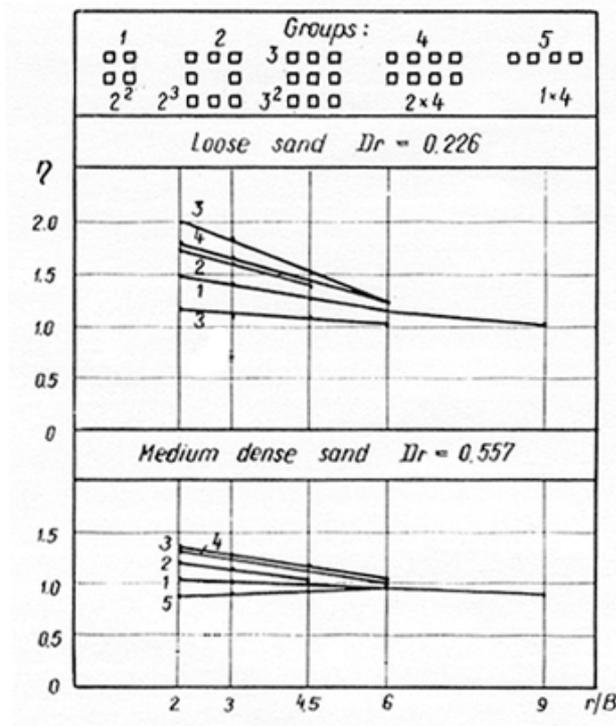


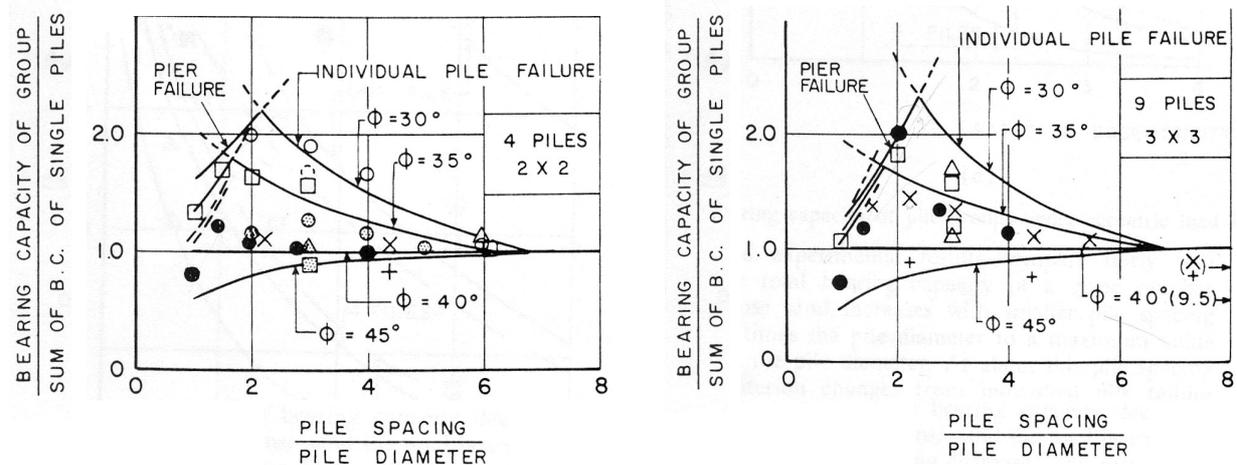
Abbildung 4-9: Gruppeneffektivität in Sand (Tejchmann (1973))

Die Versuche wurden in trockenem, locker bzw. mitteldicht gelagertem Sand mit vorgefertigten Stahlbetonpfählen - angeordnet als Gruppe aus 4, 6, 8 oder 9 Pfählen - durchgeführt, die in den sandgefüllten Versuchscontainer eingepresst wurden. Für rechteckig angeordnete Pfahlgruppen tritt im mitteldicht gelagerten Sand eine lineare Tragfähigkeitsabnahme mit

zunehmendem Abstand ein; handelt es sich dagegen um eine Pfahlreihe, kehrt sich der Effekt um, bei geringen Pfahlabständen wird die Tragfähigkeit reduziert. Der kleinste betrachtete Pfahlachsabstand, bei dem auch die größte Grenzlast auftritt, ist der 2-fache Pfahldurchmesser.

Hanna (1963) verwendete in seinen Versuchen Pfahlmodelle aus Holz, Messing und Glas zur Betrachtung verschiedener Oberflächenrauigkeiten. Die Pfähle wurden von der Sandoberfläche aus mit einer Eindringgeschwindigkeit von 2,54 cm/sec in den Sand gedrückt. Nach 12 Stunden Ruhezeit wurden die Pfähle bis zum Versagen belastet. In diesen Versuchen zeigte sich zuerst ein Anstieg der Pfahltragfähigkeit bis zu einem Abstand vom 2-fachen Pfahldurchmesser mit einer anschließenden Abnahme bis auf den Einzelpfahlwert bei weiterer Vergrößerung des Pfahlabstandes.

In der Abbildung 4-10 ist die Gruppeneffektivität von Pfahlgruppen aus verschiedenen Modellversuchen, bezogen auf den Achsabstand der Pfähle, dargestellt. Unter Gruppeneffektivität ist die auf die n-fache Einzelpfahltragfähigkeit bezogene gesamte Gruppentragfähigkeit zu verstehen, wobei n die Anzahl der Gruppenpfähle bedeutet. In einer kleineren Pfahlgruppe mit 4 Pfählen sind die Gruppeneffekte nicht so deutlich zu erkennen wie bei einer Pfahlgruppe mit 9 Pfählen.



EFFECTS	SYM BOL	SAND	PILE	AUTHOR	SYM BOL	SAND	PILE	AUTHOR
	○	LOOSE	STEEL	CAMBEFORT	△	$\phi = 35^\circ$	STEEL	PRESENT
X	$\phi = 35^\circ$	WOOD	HANNA	□	$\phi = 35^\circ$	SANDED	AUTHORS	
+	$\phi = 41^\circ$	WOOD	HANNA	△	$\phi = 43^\circ$	STEEL	AUTHORS	
○	LOOSE	CONCRETE	KÉZDI	□	$\phi = 43^\circ$	SANDED	AUTHORS	
●	DENSE	CONCRETE	KÉZDI	●	COMPACT	WOOD	STUART	
THEORY —————								

Abbildung 4-10: Pfahlgrenzlasten für freistehende Pfahlgruppen (Meyerhof / Kishida (1965), siehe auch Long (1992))

Bis zu einem Abstand vom 2- bis 3-fachen Pfahldurchmesser ist eine Zunahme in der Pfahltragfähigkeit mit anschließender Abnahme bei größer werdendem Abstand zu sehen (Abbildung 4-10). Nach Meyerhof / Kishida (1965) tritt in dem ansteigenden Kurvenast eine Blockwirkung auf, wobei die gesamte Gruppe inklusive des von den Pfählen eingeschlossenen Bodens versagt. Der abfallende Kurvenast stellt den Fall dar, bei dem der einzelne Pfahl versagt und ein Verhalten der Gruppe als kompakter Block nicht mehr gegeben ist.

In den Versuchen von Böckmann (1991) werden besandete Stahlrohre als Modellpfähle in einen Versuchscontainer eingestellt, welcher anschließend mit der Sandregenmethode gefüllt wird. In den Stahlrohren befinden sich mit Dehnungsmessstreifen bestückte Messkreuze zur getrennten Erfassung von Spitzendruck und Mantelreibung. Die Belastung wird mit einer hydraulischen Presse erzeugt und über eine die Pfähle verbindende Kopfplatte verteilt. Es werden Gruppen von 9 und 6 Pfählen mit Pfahlabständen von 2, 2,5 und 3-fachem Pfahldurchmesser untersucht. Für alle Gruppen zeigt sich in der Abbildung 4-11 eine mit dem Abstand abnehmende Tragfähigkeit und eine Verringerung der auftretenden Setzungen.

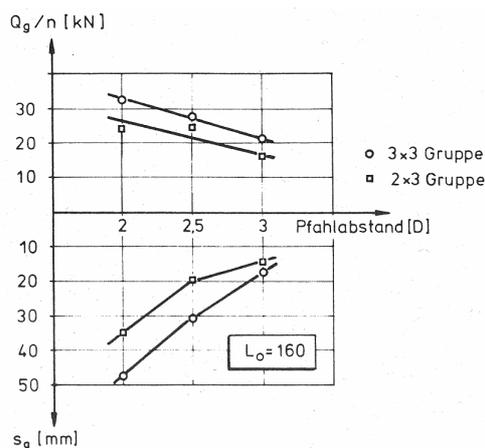


Abbildung 4-11: Pfahltragfähigkeiten in Abhängigkeit des Pfahlabstandes (Böckmann (1991))

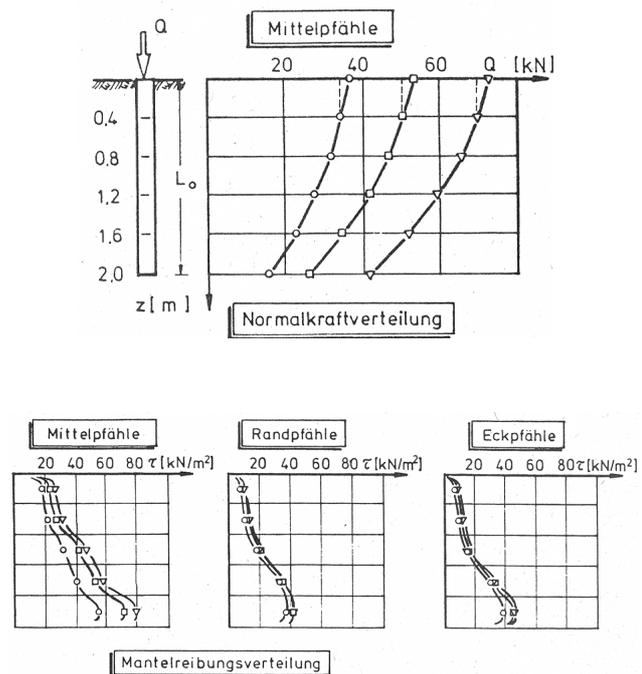


Abbildung 4-12: Normalkraft- und Mantelreibungsverteilung bei Gruppenpfählen (Böckmann (1991))

Mittels der Dehnungsmessstreifen konnte die in Abbildung 4-12 dargestellte Normalkraft- und Mantelreibungsverteilung ermittelt werden. Bei Pfählen mit großer Einbindelänge weist der Mittelpfahl der Gruppe einen andersartigen Mantelreibungsverlauf auf als bei kürzeren

Pfahlmodellen. Die Mantelreibungsverteilung für die Eck- und Randpfähle ist in allen Fällen identisch.

Für die Pfahlgruppe zeigt sich nach Böckmann eine größere Tragfähigkeit als die entsprechenden n-fachen Einzelpfahlwerte, aber auch eine größere Setzung.

Fadeev (1984) führte Modellversuche an runden Stahlpfählen von 10 mm Durchmesser und 200 mm Länge mit dem Ergebnis durch, dass sich mit einer Verringerung des Pfahlabstandes das Tragverhalten der Pfahlgruppe immer mehr einer Blockwirkung annähert. Bei einem Pfahlabstand vom 6-fachen Durchmesser versinken alle Pfähle unabhängig voneinander im Boden (Abbildung 4-13a); beträgt der Abstand nur den 3-fachen Pfahldurchmesser sinkt der zwischen den Pfählen befindliche Boden mit ab und die Gruppe verhält sich ähnlich wie ein einziger, die Gesamtgruppe umschließender Pfahl, d.h. es tritt eine Blockwirkung auf.

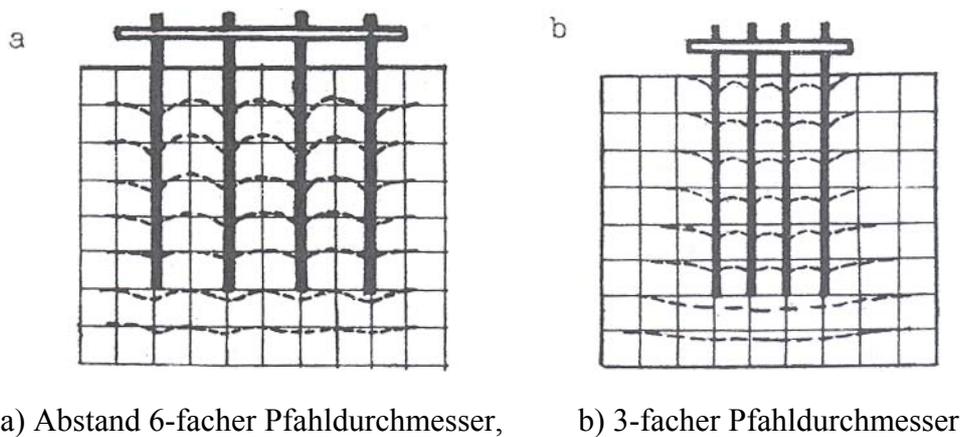


Abbildung 4-13: Zusammenwirken von Pfahl und Boden (Fadeev (1984))

Im Gegensatz zu einem Einzelpfahl wird die Grenztragfähigkeit eines einzelnen Gruppenpfahls nach Fadeev (1984) zuerst am Pfahlfuß erreicht und setzt sich dann über die Mantelfläche fort. Erklärt wird dies durch eine im Vergleich zum Einzelpfahl erhöhte mobilisierbare Mantelreibung. Schiebt sich der unter dem Pfahl zusammengedrückte Bodenbereich in den Zwischenraum der einzelnen Pfähle, entsteht eine nach oben gerichtete Bewegung, gleichzeitig setzt sich der Pfahl jedoch unter der aufgebrachtten Last. Somit ist die Relativverschiebung an der Kontaktfläche Pfahl - Boden, die zur Mobilisierung der Mantelreibung erforderlich ist, größer als bei einem vergleichbaren Einzelpfahl. Aus diesem Grund wird von einem einzelnen Gruppenpfahl mehr Mantelreibung mobilisiert als von einem Einzelpfahl.

Auch von Fleming et. al. (1992) sowie Vesic (1963) sind Untersuchungen zu Pfahlgruppen durchgeführt worden. Aus den Pfahlgruppenbetrachtungen resultiert das in Abbildung 4-14 dargestellte Diagramm. Mit einer Änderung des Pfahlabstandes zeigt sich wie bei anderen Autoren eine Änderung der Grenzlast. Für die freistehende Pfahlgruppe steigt die Tragfähigkeit bis zu einem Abstand vom ca. 3,5-fachen Pfahldurchmesser an und fällt anschließend

wieder ab, sie erreicht bei einem Abstand des 7-fachem Pfahldurchmessers allerdings noch nicht den Wert der Einzelpfahltragfähigkeit. Für Gruppen mit einer die Pfähle verbindenden Kopfplatte ist der genannte Effekt wesentlich ausgeprägter.

In Abbildung 4-14 sind auch die Grenzlastanteile aus Mantelreibung und Spitzendruck getrennt aufgetragen. Während der Spitzendruck mit steigendem Pfahlabstand annähernd unverändert bleibt, steigt die Mantelreibung mit dem Pfahlabstand an und dies noch über den Punkt hinaus, an dem die maximale Gruppentragfähigkeit erreicht wird. Somit ist die erhöhte Gruppentragfähigkeit nach Fleming im wesentlichen auf eine Erhöhung in der Mantelreibung zurückzuführen.

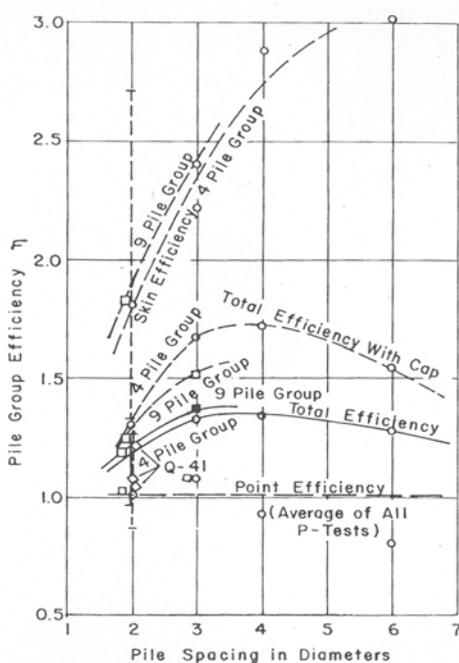


Abbildung 4-14: Gruppeneffektivität nach Fleming (1992) (für die Effektivität der Mantelreibung wurde ein anderer Maßstab verwendet als für die Pfahlgruppeneffektivität)

4.3 Versuche zur gegenseitigen Beeinflussung von Zug- und Druckpfählen

Von Jessberger (1997) wurden Zentrifugenversuche zur Simulation einer Druckpfahlprobebelastung mit dem Ziel durchgeführt, den Einfluss der den Druckpfahl umgebenden Reaktionspfähle näher zu betrachten.

Die verwendeten Pfähle haben untereinander einen Abstand vom 4-fachen Pfahldurchmesser und bestehen aus mit Sand beklebten Stahlrohren mit einem Durchmesser von 30 mm und einer Länge von 220 mm. Dies entspricht bei der gewählten Beschleunigung in der Zentrifuge einem Pfahlprototyp von 1,35 m Durchmesser und 9,9 m Länge.

Der Probepfahl ist von 4 Reaktionspfählen umgeben (Abbildung 4-16) und wird über einen Hydraulikzylinder auf Druck belastet. Die von einem zweiten Zylinder aufgebrachte Zugbelastung wird über eine Rollen-Seil-Konstruktion gleichmäßig auf die vier Reaktionspfähle verteilt.

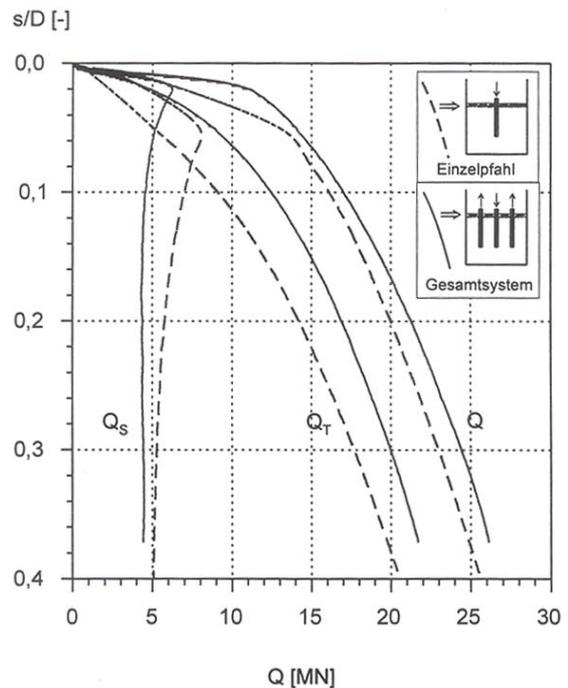
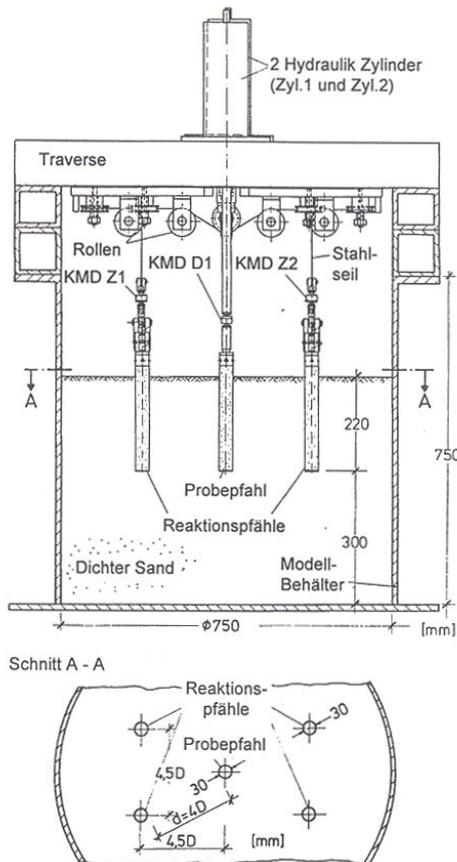


Abbildung 4-15: Kraft-Setzungs-Linie der einzelnen Pfähle (Jessberger (1997), $Q_s = R_s$; $Q_T = R_b$; $Q = R$)

Abbildung 4-16: Schnitt Versuchsaufbau (Jessberger (1997))

Die Versuchsergebnisse (Abbildung 4-15) zeigen für die gleiche Setzung eine größere Tragfähigkeit des Probepfahls im Vergleich zu dem unbeeinflussten Einzeldruckpfahl. Die Reaktionspfähle wirken sich stark auf den Spitzendruckanteil des Pfahls aus, dieser ist wesentlich größer als bei einem vergleichbaren Einzelpfahl. Der Maximalwert der Mantelreibung sinkt dagegen ab und wird schon bei einer kleineren Setzung erreicht als dies bei dem Einzelpfahl der Fall ist. Der Einfluss der Reaktionspfähle ist besonders ausgeprägt im Bereich von kleinen Setzungen ($s/d = 0,02$), der für die praxisnahe Bemessung relevant ist und daher zu einer Überschätzung der Tragfähigkeit aus dem Ergebnis einer Probebelastung führen kann. Für eine Setzung von $s/d = 0,06$, d.h. ab der Stelle an der sich der maximale Wert in der Mantelreibung des Einzelpfahls befindet, verringert sich der Einfluss der Reaktionspfähle auf den gesamten Pfahlwiderstand des Probepfahles und bleibt für den weiteren Verlauf annähernd konstant.

5 Modellversuche

5.1 Vorüberlegungen, Versuchsprogramm und Übersicht

Es sollen systematische Untersuchungen zum Tragverhalten von einzelnen Druckpfählen und Druckpfahlgruppen durchgeführt werden, ebenso soll die gegenseitige Beeinflussung von Zug- und Druckpfählen, wie z.B. bei der Durchführung von Pfahlprobelastungen, näher betrachtet werden.

Das umfangreiche Versuchsprogramm ist nur im Modellmaßstab realisierbar, eine Anbindung der Modellversuche an den Prototyp kann über die Daten von Probelastungen an großmaßstäblichen Versuchspfählen erfolgen. Das Prinzip der Großversuche wird nicht detailgetreu nachgebildet, sondern in möglichst einfache und gut handhabbare Laborabläufe überführt. Auch die Bodenverhältnisse sollen einerseits der Wirklichkeit entsprechen und andererseits gut reproduzierbar sein.

Die Modellversuche werden in einem dicht gelagerten Sandboden unter Auftrieb durchgeführt. Für die Verdichtung des wassergesättigten Bodens wird die Rütteltechnik eingesetzt, die sich bereits bei anderen Modellversuchen bewährt hat (Kaddis (1999), Quarg-Vonscheidt (2000)). Hierzu ist der gesamte Versuchscontainer auf ein Stahlpodest montiert, das durch zwei gegenläufig arbeitende Außenrüttler zu vertikalen Schwingungen angeregt werden kann. Mit dieser Technik ist es möglich nach jedem Versuch die Ausgangslagerungsdichte im Sandboden wieder herzustellen. Die erzielte Lagerungsdichte entspricht weitgehend dem Wert der dichtesten Lagerung des verwendeten Sandes, der unter ähnlichen Bedingungen im Normversuch (DIN 18 126 (09/89)) ermittelt wird.

Als Pfähle werden Bodenverbundpfähle (siehe Quarg-Vonscheidt (2000)) gewählt, da hier die Randbedingungen in der Kontaktfläche zwischen Pfahlschaft und Boden definiert sind. Um das Gefüge des Versuchsbodens beim Pfahleinbau möglichst wenig zu stören, werden die als Modell verwendeten Bohrschnecken während des Rüttelvorgangs in den Versuchsboden eingedreht.

Die Belastung der Pfähle erfolgt kraftgesteuert über Druckluftkolben, die sich genau über dem einzelnen Pfahl positionieren lassen und somit eine variable Anordnung der Pfähle ermöglichen. Zur definierten Laststeigerung der vom Kolben erzeugten Kraft auf den Pfahl wird ein motorgesteuerter Druckregler verwendet.

Die Versuche an einzelnen Druckpfählen werden an einer Modellfamilie aus mehreren Pfahltypen durchgeführt, die sich hinsichtlich Durchmesser und Länge unterscheiden. Im Gegensatz dazu wird für die Untersuchung der Druckpfahlgruppen ein ausgewählter Pfahltyp verwendet. Die Druckpfahlgruppe besteht aus vier bzw. fünf gleichzeitig belasteten Pfählen, die

in unterschiedlichen Abständen zueinander angeordnet werden. Zur Ermittlung der gegenseitigen Beeinflussung von Zug- und Druckpfählen, wie z.B. bei der Simulation einer Probebelastung, werden jeweils fünf Pfähle gleichen Durchmessers verwendet. Variiert wird in dieser Versuchsreihe der Abstand der einzelnen Pfähle untereinander und die Pfahllänge.

So ergibt sich ein Versuchsprogramm von 23 Einzelpfahlversuchen, 12 Gruppenversuchen sowie 24 Versuchen zur Bestimmung der gegenseitigen Beeinflussung von Zug- und Druckpfählen. Zu jedem Versuch wurden in der Regel zwei Wiederholungsversuche durchgeführt. Die Versuche werden bis auf einige Einzelpfahlversuche an der Bergischen Universität Wuppertal realisiert, in den anderen Fällen wird eine Versuchsanlage an der Fachhochschule Bochum genutzt.

5.2 Versuchspfähle

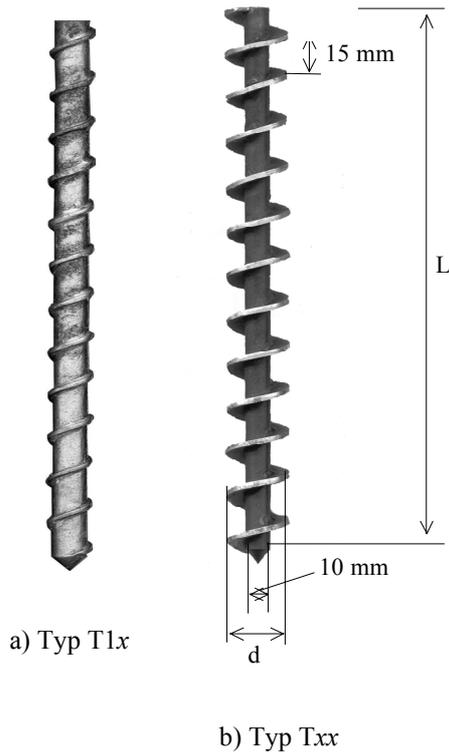
Als Modellpfähle werden Bohrschnecken verwendet, die in ihrem Durchmesser und ihrer Länge variieren. Bohrschnecken eignen sich als Modell für alle Arten von Bodenverbundpfählen, da sie ideal rauh sind und im Bruchzustand Verschiebungen im Korngefüge des Bodens herbeiführen.

Zur Einhaltung gleicher Versuchsbedingungen ist insbesondere der Einbauvorgang der Pfähle zu beachten, da er einen erheblichen Eingriff in das Bodengefüge darstellt. Durch die gewählte Einbautechnik - Eindrehen der Pfähle in den Boden während des Rüttelvorgangs - sind Störungen des Gefüges für jeden Versuch gleich und auf ein Minimum beschränkt.

Die Untersuchungen zum Tragverhalten von einzelnen Druckpfählen werden an einer Modellfamilie durchgeführt, die insgesamt 20 Pfahltypen umfasst (Abbildung 5-1a und b). Jeder Pfahl besteht aus einem Stahlzylinder von 10 mm Durchmesser, auf den Rondens zu verschiedenen breiten, durchgehenden Schneckengängen von jeweils 15 mm Ganghöhe aufgeschweißt sind. Eine Ausnahme bilden die Pfähle des Typs T1x. Hier wurde, um einen entsprechenden Außendurchmesser zu erhalten, um den Stahlzylinder ($d = 10 \text{ mm}$) eine 1,25 mm dicke Drahtwendel aufgeschweißt.

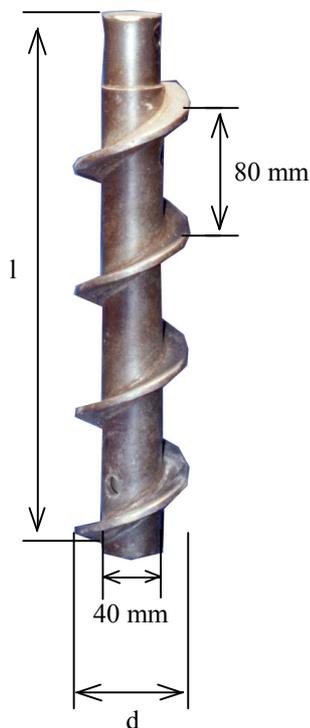
Alle Pfahlmodelle sind am unteren Ende angespitzt, wodurch ein leichter Einbau ermöglicht wird. Am Pfahlkopf besitzen die Stahlzylinder eine Gewindebohrung, die eine Verbindung zur Belastungseinrichtung ermöglicht.

Zusätzlich fanden Pfähle - Bohrschnecken mit 80 mm Ganghöhe und einer hohlen Welle von 44 mm Durchmesser - für Belastungsversuche an längeren Einzelpfählen Verwendung (Abbildung 5-1c). Das untere Ende der Welle ist hier offen, am oberen Ende befindet sich ein Sechskantanschluss zur Verbindung mit der Belastungseinrichtung.



l [mm]	100	200	300	400
12,5	8,0 Typ 11	16,0 Typ12	24,0 Typ 13	32,0 Typ 14
25,0	4,0 Typ21	8,0 Typ 22	12,0 Typ 23	16,0 Typ 24
30,0	3,3 Typ 31	6,7 Typ 32	10,0 Typ 33	13,3 Typ 34
37,5	2,7 Typ 41	5,3 Typ 42	8,0 Typ 43	10,7 Typ 44
50,0	2,0 Typ 51	4,0 Typ 52	6,0 Typ 53	8,0 Typ 54
d [mm]	l/d Typ			

Tabelle 5-1: Abmessungen und Bezeichnung der Modellpfähle Typ Txx



l [mm]	335	600	800
81	8,0 Typ 84	16,0 Typ86	32,0 Typ 88
d [mm]	l/d Typ		

Tabelle 5-2: Abmessungen und Bezeichnungen der Modellpfähle Typ Bxx

Abbildung 5-1: Modellpfähle

5.3 Versuchsboden

Als Versuchsboden dient ein enggestufter Quarzsand, dessen Sieblinie (Abbildung 5-2) weitgehend dem Standardversuchssand, der in der Literatur häufig als „Karlsruher Sand“ bezeichnet wird, entspricht. Die Siebanalyse des Versuchsbodens wurde an zufällig entnommenen Proben des angelieferten Sandes durchgeführt. Der Ungleichförmigkeitsgrad $U = d_{60}/d_{10}$, der mittlere Korndurchmesser d_{50} sowie für die nach DIN 18126 mit einer spezifischen Kornwichte von $\gamma_s = 26,5 \text{ kN/m}^3$ ermittelten maximalen und minimalen Porenanteile (n_{min} und n_{max}) werden in der Tabelle 5-3 angegeben. Mit Hilfe von triaxialen Kompressionsversuchen nach DIN 18 137, Teil 2 wurde der Reibungswinkel φ bei der im Versuchscontainer vorhandenen Lagerungsdichte ermittelt.

γ_s [kN/m ³]]	d_{50} [mm]	U [-]	n_{min} [%]	n_{max} [%]	φ [°]
26,5	0,4	1,5	39,2	47,45	40

Tabelle 5-3: Bodenkenngrößen

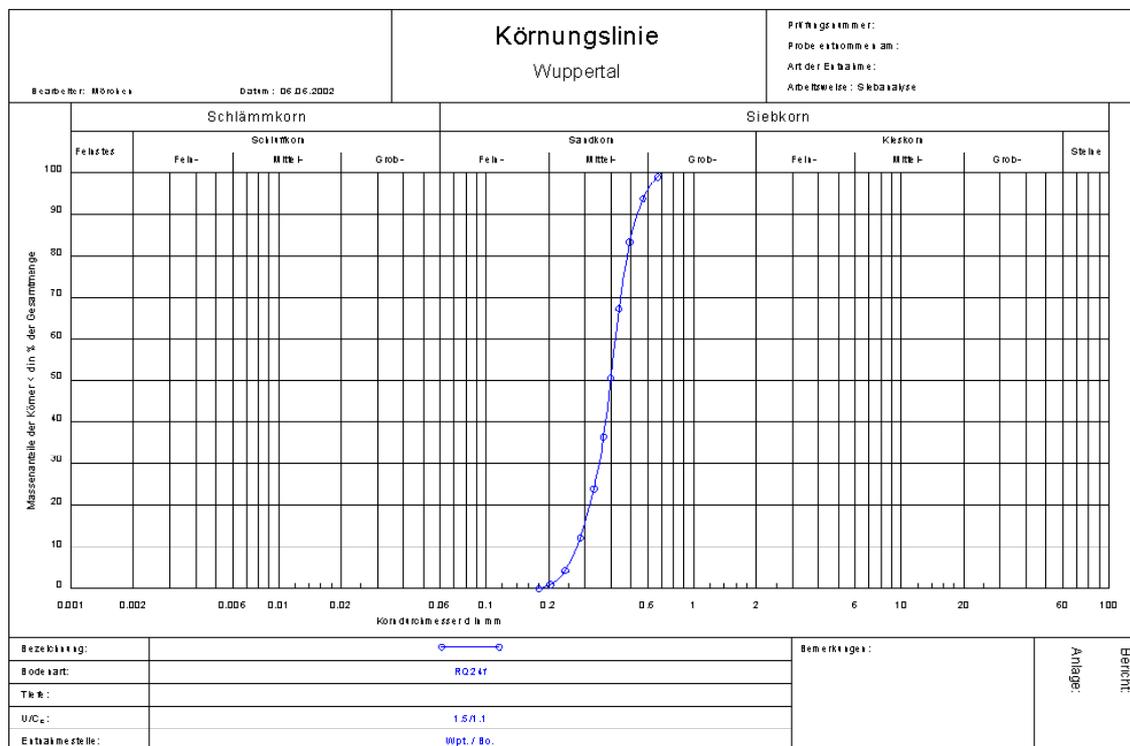


Abbildung 5-2: Sieblinie des Versuchssandes

5.4 Anlage für kleinmaßstäbliche Pfahlmodellversuche

5.4.1 Versuchscontainer

Als Versuchscontainer für die an der Bergischen Universität Wuppertal durchgeführten kleinmaßstäblichen Modellversuche wird ein mit Sand und Wasser gefüllter, im Grundriß kreisförmiger Behälter verwendet (Abbildung 5-5). Der Aufbau besteht aus einer Unterkonstruktion aus U260-Stahlprofilen mit aufgeschraubter Stahlplatte, an deren Unterseite zwei gegenläufig arbeitende Unwuchtmotoren die Konstruktion zu vertikalen Schwingungen anregen können. Auf der quadratischen Plattform von ca. 1600 mm Kantenlänge bilden zwei zu Halbschalen gewalzte und zusammengeschaubte Stahltafeln einen zylindrischen Behälter von 1500 mm Durchmesser und 1000 mm Höhe (siehe Quarg-Vonscheidt (2000)).

Die vier U260-Stahlprofile der Unterkonstruktion sind auf jeweils zwei Gummi-Polstern (so genannten Maschinenfüßen) gelagert. Quer zur Trägerlängsrichtung werden zwischen den beiden inneren Profilen Verstärkungsplatten aus Stahl angebracht und zwei Außenvibratoren des Typs Wacker AR 3/2 in einem Achsabstand von ca. 760 mm montiert. Nach Herstellerangaben arbeiten die Rüttler mit einer Frequenz von 50 Hz und erreichen eine maximale Zentrifugalkraft von 2,8 kN (Abbildung 5-3).

Die Verschraubung der den Container bildenden Halbschalen erfolgt mit Überlappungsstoß und eingelegter Dichtung. Die Abdichtung gegen die Fußplatte wird durch eine Gummifolie gewährleistet, die das Podest vollständig abdeckt. Wandung und Bodenplatte sind über angeschweißte Winkel miteinander verschraubt.

Die Innenseite des Containers ist mit PVC-Folie ausgekleidet, um einen Abrieb des Korrosionsschutzes an der Containerwand durch den Boden beim Rüttelvorgang zu verhindern.

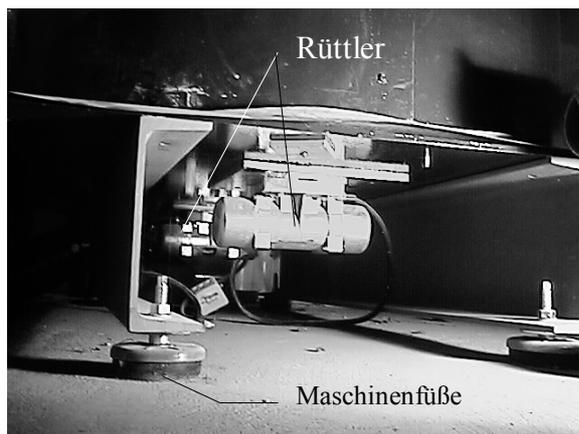


Abbildung 5-3: Untersicht des Versuchscontainers (Quarg-Vonscheidt (2000))

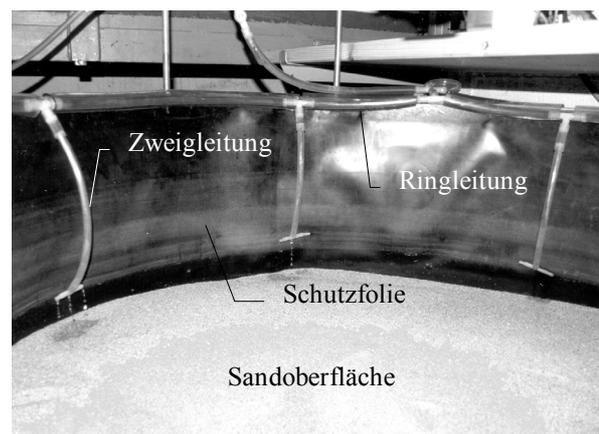


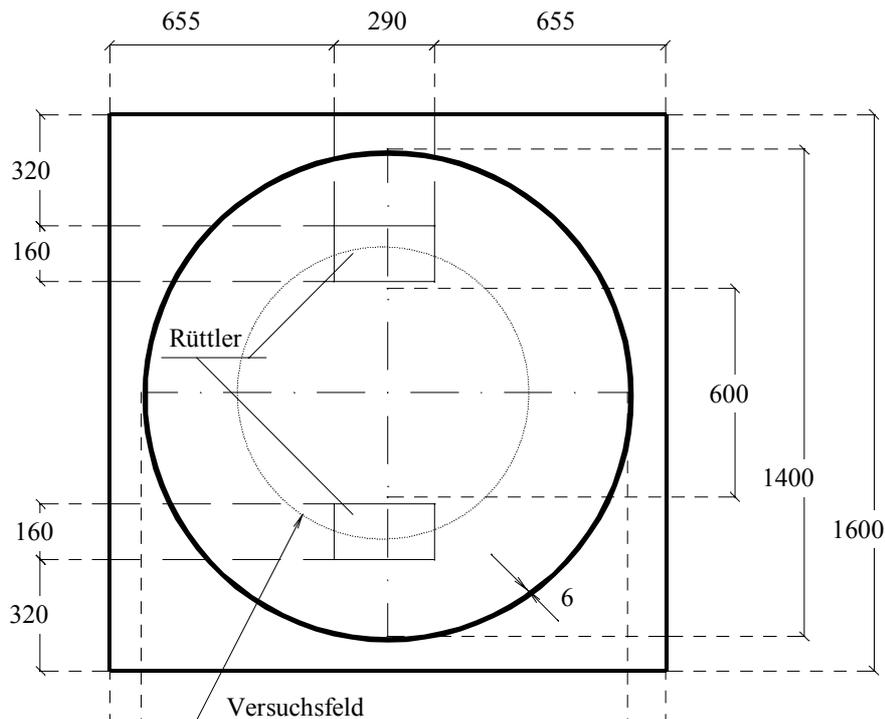
Abbildung 5-4: Innenansicht des Versuchscontainers (Quarg-Vonscheidt (2000))

Innerhalb der Sandschicht am Rand des Versuchscontainers befinden sich vier Filterrohre, die durch eine Ringleitung verbunden sind. Über ein Ventil in der Containerwandung ist der Wasserstand in den Filterrohren und damit in der Versuchseinrichtung regulierbar. Ein PVC-

Schlauch am oberen Beckenrand ermöglicht über Zweigleitungen ein gleichmäßiges Befüllen des Behälters mit Wasser, durch Verdunstung entstehende Wasserverluste können somit ausgeglichen werden (Abbildung 5-4).

Am oberen Rand des Containers befinden sich vier Auflagerpunkte für die Belastungseinrichtung, zwei der Auflagerpunkte sind fest vorgegeben, die anderen beiden können je nach Bedarf verschoben werden.

Grundriß



Schnitt

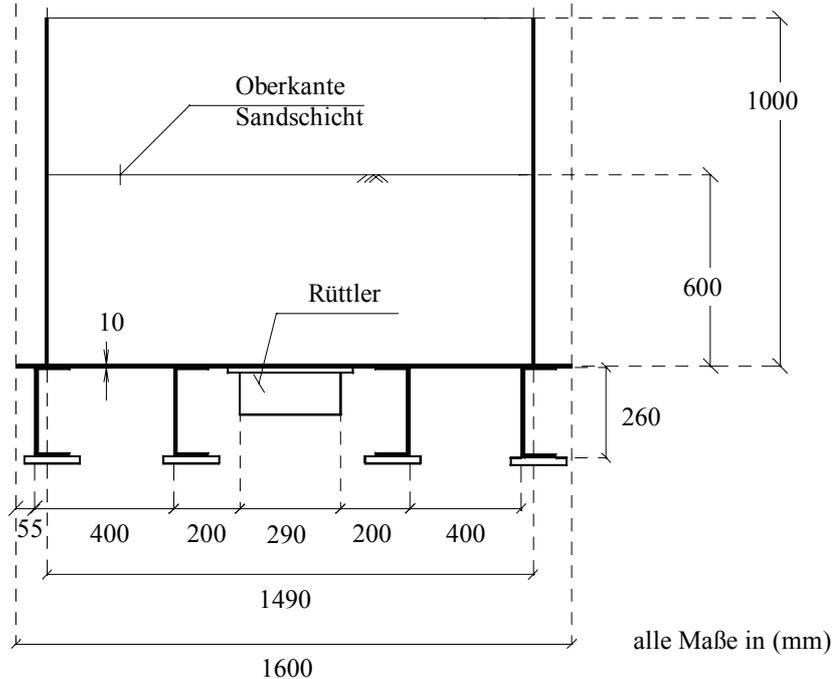


Abbildung 5-5: Grundriß und Schnitt durch den Versuchscontainer (Quarg-Vonscheidt (2000))

5.4.2 Belastungseinrichtung

Die Belastung jedes einzelnen Pfahls erfolgt über einen Druckluftkolben, der mittels einer Klemmkonstruktion an einem Stahlkreuz, das als Widerlager dient, befestigt ist. Das Stahlkreuz besteht aus zwei miteinander verschweißten U100-Profilen und ist über vier Auflagerepunkte fest mit dem Versuchscontainer verbunden.

Die verwendeten Druckluftkolben besitzen einen Innendurchmesser von 80 mm für die Einzelpfahlversuche bzw. von 63 mm für die Gruppenversuche und ermöglichen sowohl eine Druck- als auch eine Zugbelastung des Pfahls. Ein vorgeschaltetes Steuerventil regelt die Belastungsart. Alle verwendeten Kolben sind über eine Ringleitung miteinander verbunden, so dass jeder eingebaute Pfahl die gleiche Belastung erfährt.

Zur Erzielung einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit ist es erforderlich, den Luftdruck im Kolben stetig zu steigern. Hierzu befindet sich in der Luftzuleitung vor dem Steuerventil ein Luftdruckregler (Abbildung 5-6). Dieser wird über einen mit konstanter Geschwindigkeit laufenden Elektromotor langsam und stetig geöffnet. Die Belastungsgeschwindigkeit beträgt bei einem Kolbendurchmesser von 80 mm 2,0 N/sec und bei 63 mm Kolbendurchmesser 1,2 N/sec. Mit den einzelnen Kolben können bei einem maximal möglichen Druck von 10 bar Belastungen von 5.027 N bzw. 3.117 N erzeugt werden.

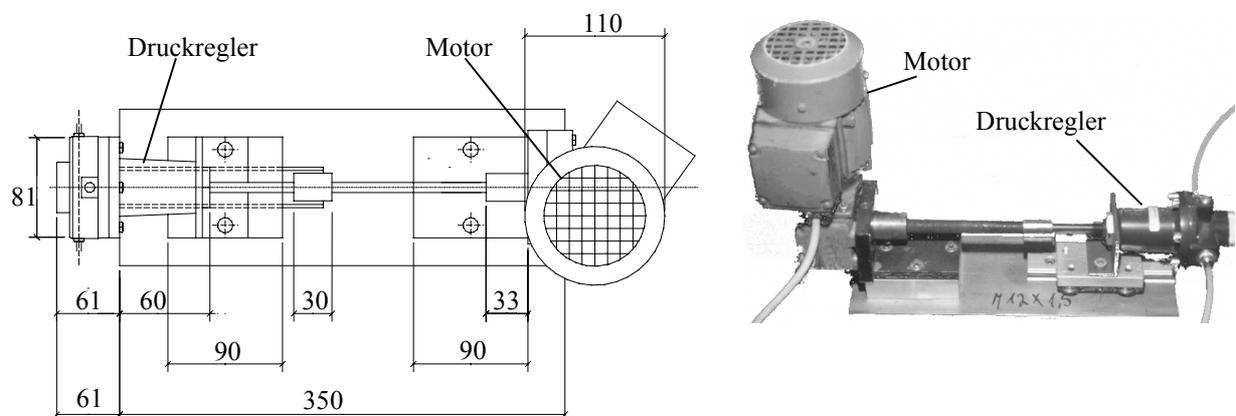


Abbildung 5-6: Elektromotor zur Steuerung der Laststeigerung

Die Kraftübertragung vom Druckluftkolben auf den Pfahl erfolgt über eine steife Verbindung, bestehend aus einem Rundstahl mit 10 mm Durchmesser, der auf einen in den Pfahlkopf eingedrehten Stahlstift - Gewindestück mit anschließendem glatten Schaft - aufgesetzt wird (Abbildung 5-8). Zwischen dem Druckluftkolben und dem Verbindungsstück befindet sich eine Kraftmessdose zur Erfassung der im Versuch auftretenden Belastung. An dem Verbindungsstück ist eine Aluminiumplatte befestigt, auf der der Wegaufnehmer zur Erfassung der Pfahlverformung abgesetzt wird.

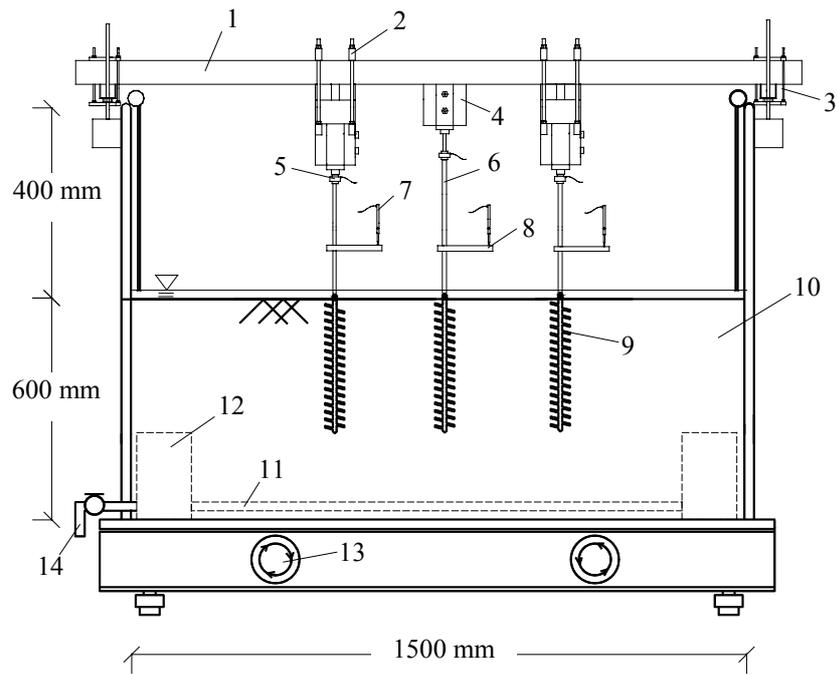


Abbildung 5-7: Querschnitt der Versuchseinrichtung

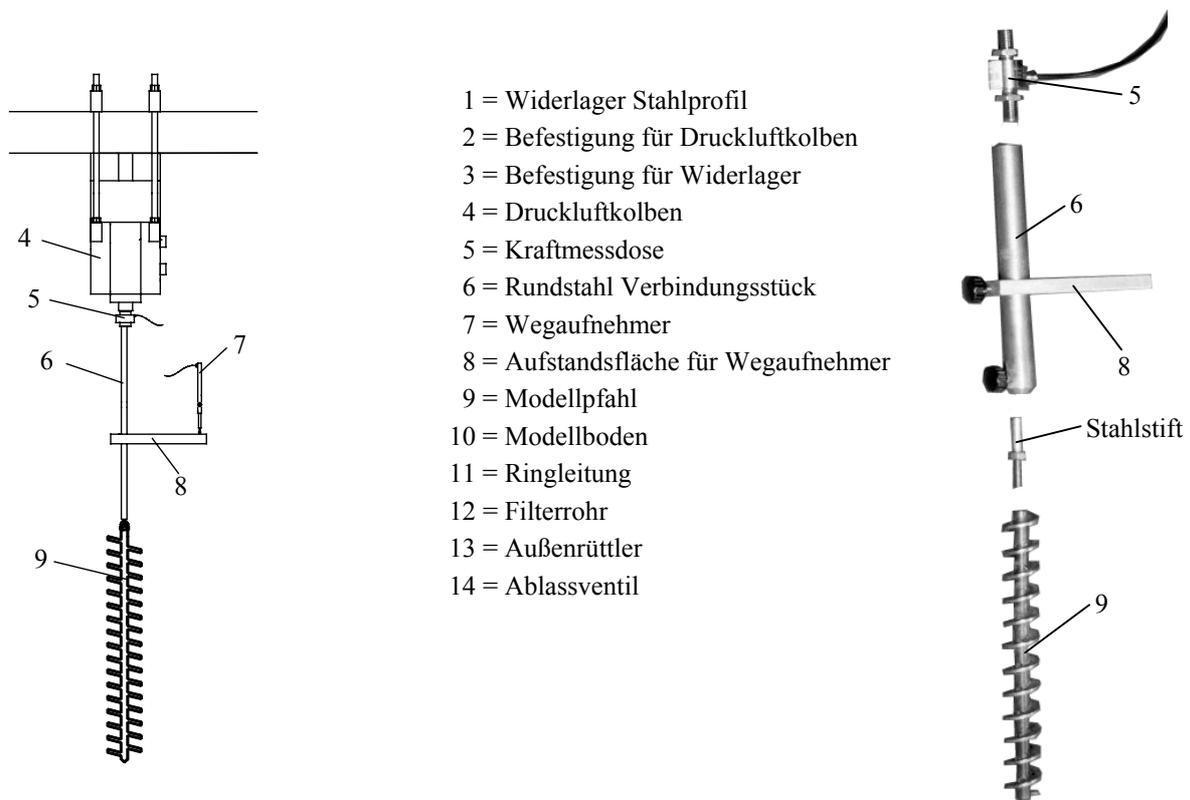


Abbildung 5-8: Detail der Belastungseinrichtung

5.4.3 Messtechnik

5.4.3.1 Bestimmung der Lagerungsdichte des Versuchssandes

Mit Hilfe eines Ausstechzylinders, in diesem Fall ein PVC-Rohr, werden „ungestörte“ Proben aus der verdichteten Sandschicht entnommen. Anschließend wird das Trockengewicht der Probe ermittelt und über den bekannten Rauminhalt des Zylinders das Porenvolumen bestimmt. Die Probenentnahme findet an verschiedenen Stellen und in unterschiedlichen Tiefen des Versuchsbodens statt.

Aufgetretene Schwankungen in den Messwerten können auf unvermeidliche Störungen der Sandschicht infolge der Untersuchungen selbst zurückgeführt werden. Vorversuche an Einzelpfählen zur Ermittlung der optimalen Rütteldauer ergaben annähernd gleiche Pfahltragfähigkeiten an jedem Punkt des Versuchsfeldes im Container, so dass von einer gleichmäßigen Lagerungsdichte auszugehen ist.

Der ermittelte Porenanteil n und die hieraus berechnete Lagerungsdichte D sowie die Auftriebswichte γ' des Versuchssandes sind in Tabelle 5-4 wiedergegeben.

n [%]	D [%]	γ' [kN/m ³]
39	97	10

Tabelle 5-4: Bodenmechanische Parameter des Versuchssandes

5.4.3.2 Kraftmessung

Die auf die Pfähle übertragenen Kräfte werden mit Kraftaufnehmern auf DMS-Basis (Typ U9B, Nennlast 2 kN bzw. 5 kN der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik) erfasst. Die Kraftmessdosen verfügen über zwei Anschlussbolzen mit Außengewinde, über den oberen Bolzen wird die Kraftmessdose direkt mit dem Druckluftkolben verschraubt und mit einer Mutter gekontert. An dem unteren Gewindebolzen wird ein Verbindungsstück aus Rundstahl aufgeschraubt und ebenfalls mit einer Kontermutter versehen. Das Verbindungsstück besitzt am unteren Ende eine Bohrung, die auf den Stahlstift am Pfahlkopf aufgeschoben wird (Abbildung 5-8). Das Verbindungsstück wird beim Einbau bis auf den Pfahlkopf heruntergezogen und mit einer Rändelschraube am Stahlstift fixiert, so dass eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Druckluftkolben und Pfahl gewährleistet ist. Es werden ausschließlich Normkräfte auf den Pfahl übertragen.

5.4.3.3 Wegmessung

Die Pfahlkopfsetzungen während der Belastungsphase werden mit Hilfe induktiver Wegaufnehmer des Typs WET A 1/10 der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH ermittelt. Zur Messung der Verformung eines Druckpfahls wird der Wegaufnehmer in eine Halterungskonstruktion gestellt, auf der Aluminiumplatte, die am Verbindungsstück befestigt ist, positi-

oniert und mit einer Rändelschraube fixiert. Da der Wegaufnehmer unabhängig von der jeweiligen Belastungseinrichtung befestigt ist, wird die Setzung des Pfahlkopfes unmittelbar gemessen.

Die Messsignale der Weg- und Kraftaufnehmer werden von einer Vielstellen-Messanlage (Typ Spider8 der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH) digitalisiert, von einem angeschlossenen Computer aufgezeichnet und anschließend ausgewertet.

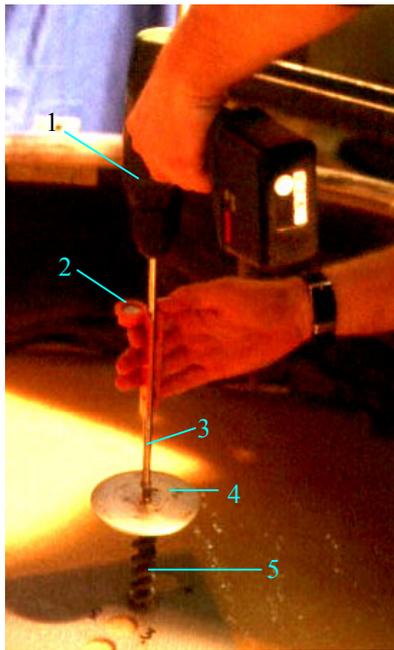
5.4.4 Versuchsdurchführung

Die Versuchsvorbereitungen beginnen mit dem Glätten der Sandoberfläche im Container und dem Einschalten der Unwuchtmotoren. Der Wasserspiegel steht ca. 2 cm über der Sandoberkante. Durch die gegenläufige Rotation der Exzenter-Massen beider Motoren gleichen sich die horizontalen Beschleunigungsanteile aus und das System wird zu vertikalen Schwingungen angeregt. Nach einer Verdichtungszeit von 12 Minuten werden die Modellpfähle unter weiterem Rütteln mit Hilfe eines Akku-Schraubers bei gleichmäßig geringer Drehzahl in den Sandboden eingedreht. Die Verbindung des Akku-Schraubers mit dem Pfahl erfolgt über eine Stahlwelle, an deren Ende sich ein Außengewinde entsprechend der Gewinde-Bohrung im Pfahlkopf befindet. Die Verwendung einer Flügelmutter als Kontermutter ermöglicht ein einfaches Lösen der Schraubverbindung. Zur Kontrolle der Vertikalität des Pfahls wird eine Dosenlibelle am Bohrgestänge mitgeführt. Eine Aluminiumscheibe am Pfahlkopf gewährleistet eine gleichmäßige Einbautiefe (Abbildung 5-9). Für die Installation von Pfahlgruppen wird eine auf der Sandoberfläche aufliegende Schablone verwendet.

Nach dem Einbringen der Pfähle werden die Rüttler ausgeschaltet, das Stahlkreuzwiderlager über den Pfählen positioniert und am Versuchscontainer befestigt. Die einzelnen Druckluftkolben werden über den Pfählen ausgerichtet und am Stahlkreuz fixiert. In den einzelnen Pfahl wird ein Stahlstift in die Gewinde-Bohrung eingedreht, hierauf das Verbindungsstück aufgesetzt und mit dem Druckluftkolben verbunden (Abbildung 5-10). Die Messbrücke für die einzelnen Wegaufnehmer wird am Versuchscontainer befestigt, die an den Rundstahlverbindungsstücken angebrachten Aluminiumplatten werden ausgerichtet und hierauf die einzelnen Wegaufnehmer positioniert.

Nun werden die Druckluftkolben mit den Druckluftleitungen verbunden und das Steuerventil geöffnet. Anschließend werden die Wegaufnehmer und die Kraftmessdosen mit der Vielstellen-Messanlage verbunden.

Nach Abschluss der Versuchsvorbereitungen wird das Programm zur Messwerterfassung auf dem angeschlossenen PC gestartet und der Elektromotor angeschaltet, so dass die Pfähle belastet werden. Ab diesem Zeitpunkt erfasst das Programm jede Sekunde die Messwerte der Kraftmessdosen und Wegaufnehmer bis zum Erreichen des Grenzzustandes des Pfahles.



- 1 = Akku-Schrauber
- 2 = Dosenlibelle
- 3 = Stahlwelle
- 4 = Metallplatte
- 5 = Modellpfahl

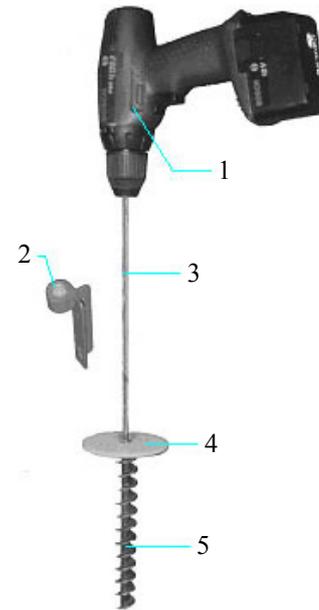


Abbildung 5-9: Einbau der Modellpfähle

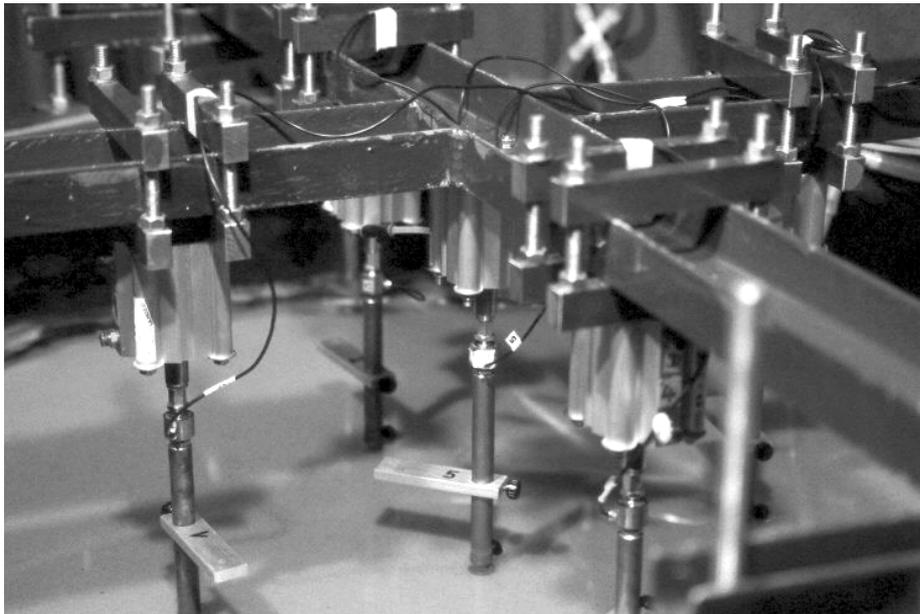


Abbildung 5-10: Ansicht des Versuchsaufbaus

5.5 Anlage für großmaßstäbliche Pfahlmodellversuche

5.5.1 Versuchscontainer

Einzelpfahlversuche werden auch in einer in den Boden eingelassenen Versuchsgrube an der Fachhochschule Bochum von 3,0 x 3,0 m Grundfläche und 3,0 m Tiefe durchgeführt (Abbildung 5-11 und Abbildung 5-12). Neben der Versuchsgrube befindet sich ein über zwei Grundablassleitungen mit der Versuchsgrube verbundener Wasserbehälter, über den der Wasserspiegel in der Grube reguliert werden kann.

Die Versuchsgrube wird von einer in Querrichtung verschieblichen Stahltraverse (HEB 300) überspannt, die über Gewindestangen in ihrer Lage fixiert werden kann. Befüllt ist die Versuchsgrube mit dem gleichen Modellboden, der auch für die anderen Modellversuche verwendet wird (siehe Kapitel 5.3).

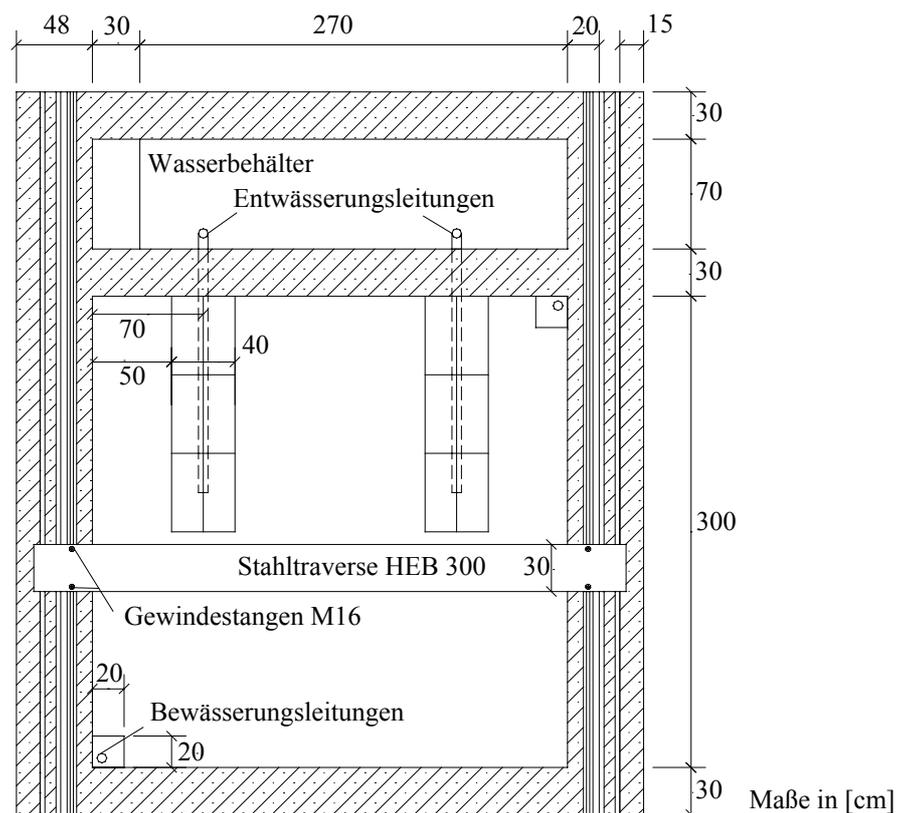


Abbildung 5-11: Grundriß des Versuchscontainers

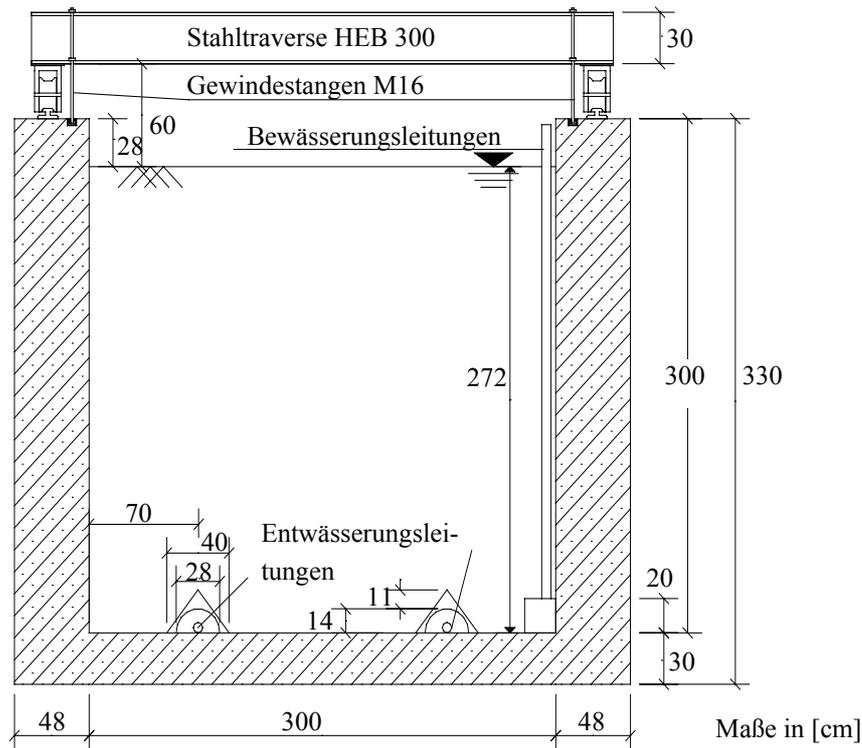
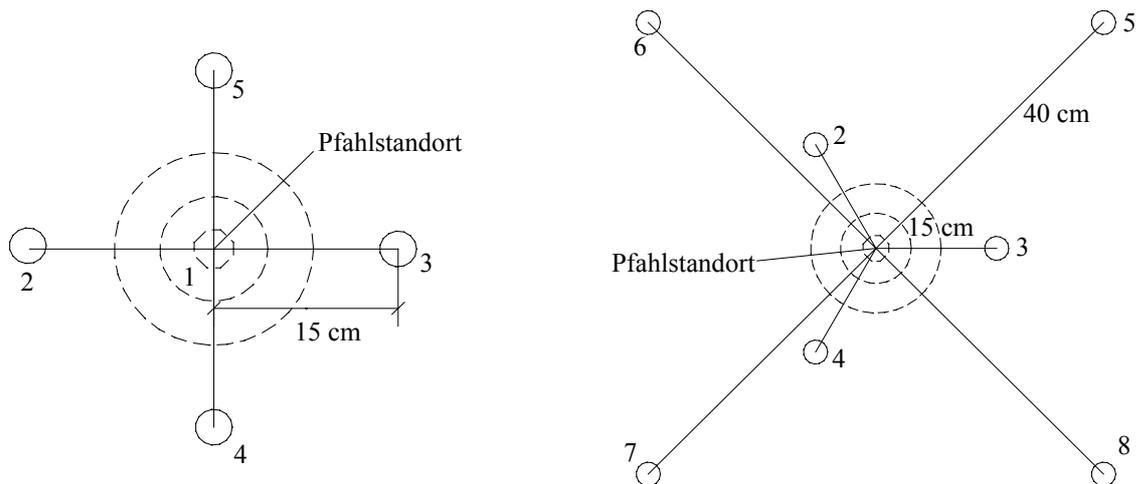


Abbildung 5-12: Schnitt durch den Versuchscontainer

5.5.2 Bodenverdichtung

Die Verdichtung des unter Auftrieb stehenden Sandbodens erfolgt vor dem Pfahleinbau mit einem Hochfrequenz-Innenvibrator (Typ IRFUN 45 der Firma Wacker) in einem fest vorgegebenen 5 Punkte- bzw. für Pfahllängen größer als 40 cm in einem 7 Punkte-Raster (Abbildung 5-13). Der Hochfrequenz-Innenvibrator hat einen Wirkungsradius von ca. 30 cm und ermöglicht es, den Boden bis in eine Tiefe von 60 cm ausreichend zu verdichten. Bei größeren Pfahllängen kann eine ausreichende Vorverdichtung durch hinreichend langes Rütteln im Punkt Nr. 1 nach dem Ausbau des vorhergehenden Pfahles erreicht werden. Die Rüttelpunkte 2 bis 4 befinden sich 15 cm, die Punkte 5 bis 8 jeweils 40 cm von dem Pfahlstandort entfernt. Die Rüttelzeit beträgt im Punkt 1 je nach Länge des Pfahls beim vorhergehenden Versuch zwei bis fünf Minuten, in den übrigen Rüttelpunkten jeweils eine Minute.



a) 5 Punkte-Raster

b) 7 Punkte-Raster

Abbildung 5-13: Verdichtungs raster

5.5.3 Belastungseinrichtung

Für die Belastung des Pfahls steht eine Hydraulik-Pressen, die durch eine Handpumpe (Firma LUKAS) gesteuert wird, zur Verfügung. Der Druckkolben kann eine maximale Kraft von 63 kN ausüben, was bei der vorhandenen Kolbenfläche einem Flüssigkeitsdruck von 500 bar entspricht.

Der Zylinderkolben wird unter der Stahltraverse (HEB 300) über dem Pfahlkopf positioniert. Die Verbindung zum Pfahl erfolgt über ein Stahlrundprofil von 40 mm Durchmesser und eine Hülse, die auf den Pfahlkopf aufgeschoben wird, wodurch die vom Kolben erzeugte Druckkraft zentrisch auf den Pfahl übertragen wird (Abbildung 5-14). Zwischen dem Hydraulikzylinder und dem Verbindungsstück befindet sich eine Kraftmessdose. An dem Rundprofil ist außerdem eine Aluminiumplatte befestigt, auf der der Wegaufnehmer zur Erfassung der Pfahlkopfverschiebung abgesetzt werden kann. Die konstante Belastungsgeschwindigkeit von 10 N/sec wird manuell über die Handpumpe näherungsweise eingestellt.

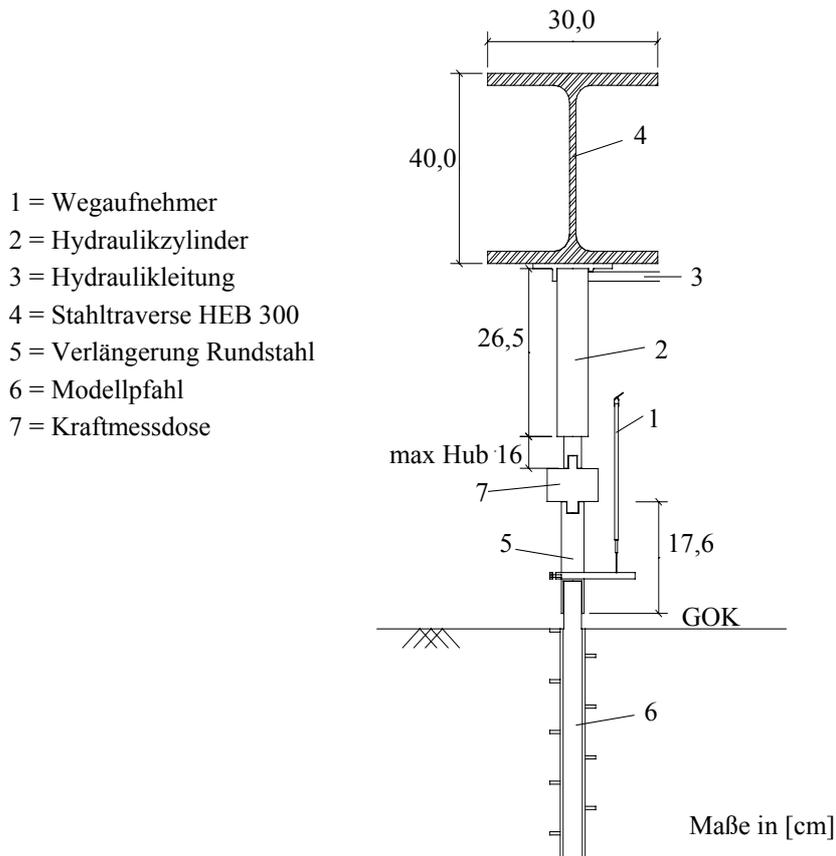


Abbildung 5-14: Skizze der Belastungseinrichtung

5.5.4 Messtechnik

5.5.4.1 Messung der Lagerungsdichte

Zur Bestimmung der Lagerungsdichte wurden an verschiedenen Stellen der Versuchsgrube Sondierungen mit der leichten Rammsonde durchgeführt. Mit der ermittelten Schlaganzahl und den Diagrammen zur Bestimmung der Lagerungsdichte bei enggestuften Sanden im Grundwasser ergibt sich nach DIN 4094 (12/90) eine Lagerungsdichte von $D \approx 90,3 \%$, die etwa derjenigen des Sandes im Versuchscontainer der BU Wuppertal entspricht.

Für gleiche Pfahlmodelle, die in beiden Versuchsanlagen untersucht wurden, war die Grenzlast nahezu identisch (Typ T44 mit 4515,8 N (Wuppertal) und 4557,9 N (Bochum)), so dass eine Beeinflussung der Versuchsergebnisse durch unterschiedliche Lagerungsdichten nicht anzunehmen ist.

5.5.4.2 Kraftmessung

Die in die Pfähle eingeleitete Kraft wird mit einer Kraftmessdose auf DMS-Basis (Typ C2, Nennlast 50 kN der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik) erfasst. Die Kraftmessdose verfügt über ein Anschlussgewinde und einen glatten Bolzen. Das Gewinde wird in den Hydraul-

likzylinder eingeschraubt und der untere Bolzen in eine passgenaue Bohrung in den Rundstahl eingesteckt, welcher auf den Pfahlkopf aufgeschoben wird (Abbildung 5-14).

5.5.4.3 Wegmessung

Die Pfahlkopfsetzung wird mit Hilfe eines induktiven Wegaufnehmers des Typs WAT 500 W der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH gemessen, der an einem Gelenkstativ befestigt und auf der Aluminiumplatte am Verbindungsstück abgesetzt ist. Da der Befestigungspunkt des Wegaufnehmers unabhängig von der Belastungseinrichtung ist, wird die Verformung des Pfahls unmittelbar gemessen.

Die Messsignale des Weg- und Kraftaufnehmers werden von einer Vielstellen-Messanlage (Typ Spider8 der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH) digitalisiert, von einem angeschlossenen Computer aufgezeichnet und anschließend ausgewertet.

5.5.5 Versuchsdurchführung

Nach der zuvor beschriebenen Vorverdichtung des Bodens wird der Pfahl unter Zuhilfenahme des Hochfrequenz-Innenvibrators von Hand bzw. wenn möglich mit einem Akku-Schrauber senkrecht eingebaut (Abbildung 5-15), wobei die Vertikalität mit einer Dosenlibelle kontrolliert wird. Ist die Pfahllänge größer als 60 cm, erfolgt der Einbau ab einer Tiefe von 60 cm mittels einer Rammsonde. Hierzu wird eine 10 cm lange Bohrschnecke mit einem am Kopf angeschweißten Hebelarm auf den Pfahlkopf aufgesetzt, fest mit dem Pfahl verbunden und die Rammsonde auf dem Pfahlkopf positioniert. Mit der Unterstützung durch Rammschläge wird der Pfahl über die Hebelkonstruktion weiter in den Boden eingedreht, bis der letzte Schneckengang bündig mit der Sandoberfläche abschließt (Abbildung 5-16).

Anschließend wird der Boden um den eingebauten Pfahl im vorgenannten 7-Punkte Raster nachverdichtet.

Die Stahltraverse wird über den Pfahl geschoben und mittels Gewindestangen fixiert. Das Stahlrundprofil wird auf den Pfahlkopf geschoben, die Kraftmessdose aufgesetzt und diese wiederum mit dem Hydraulik-Zylinder verbunden. Der Zylinder wird über die Handpumpe soweit ausgefahren, bis die Verbindung zum Pfahl kraftschlüssig ist. Nun wird das Gelenkstativ befestigt und der Wegaufnehmer auf der Aluminiumplatte abgesetzt.

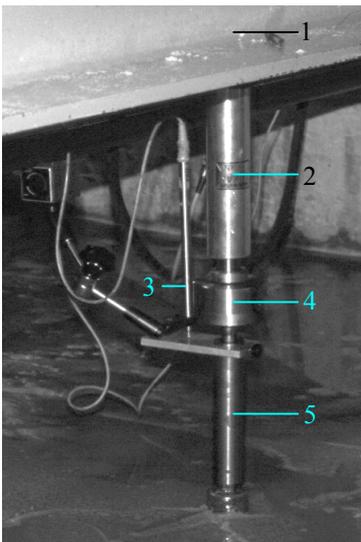
Die Kraftmessdose und der Wegaufnehmer werden mit der Vielstellen-Messanlage verbunden, das Programm zur Messwerterfassung gestartet und schließlich über die Handpumpe die Belastung mit weitgehend konstanter Geschwindigkeit auf den Pfahl aufgebracht. Jede Sekunde werden die Messwerte der Kraftmessdose und des Wegsensors erfasst.



Abbildung 5-15: Pfahleinbau bis 60 cm Länge



Abbildung 5-16: Pfahleinbau ab 60 cm Länge



- 1 = Stahltraverse
- 2 = Hydraulikzylinder
- 3 = Wegaufnehmer
- 4 = Kraftmessdose
- 5 = Rundstahl

Abbildung 5-17: Versuchsaufbau der Druckpfahlbelastung

5.6 Versuchsaufbau der Zug-Druckpfahlversuche

5.6.1 Versuchscontainer und Modellpfähle

In diesen Versuchen soll eine Pfahlprobelastung simuliert werden, um den Einfluß der den Druckpfahl umgebenden Zugpfähle, die zur Verankerung des Widerlagers dienen, auf das Last-Setzungs-Verhalten des Druckpfahls zu ermitteln. Aufgrund der Geometrie des Versuchsaufbaus war es jedoch in vielen Fällen nicht möglich den Druckpfahl bis zum Grenzzustand zu belasten; die Zugpfähle erreichten ihre Grenzbelastung schon zu einem früheren Zeitpunkt.

In dem in Kapitel 5.4.1 beschriebenen Versuchscontainer werden die Modellpfähle mit einem Durchmesser von 25 mm und einer Länge von 100, 200 und 300 mm (T21, T22 und T23) als 5er-Pfahlgruppe eingebaut.

5.6.2 Belastungseinrichtung

Das Versuchskonzept soll die Situation einer Druckpfahlprobelastung wiedergeben; der im geometrischen Schwerpunkt der 5er-Pfahlgruppe eingebaute Probepfahl wird auf Druck belastet, die vier Außenpfähle dienen als Zugpfähle zur Verankerung des Widerlagers (Stahlkreuz aus Profilen U50). Die Belastung des Druckpfahls erfolgt über einen Druckluftkolben (Innendurchmesser 63 mm), der sich gegen das Stahlkreuz abstützt. Wie in Kapitel 5.4.2 erläutert, wird die vom Druckluftkolben erzeugte Kraft über eine steife Verbindung auf den Pfahl übertragen (Abbildung 5-18 und Abbildung 5-19).

Das Stahlkreuz liegt auf einem ringförmigen Auftriebskörper auf, so dass sein Eigengewicht keine Belastung auf die Pfähle ausübt. Der Auftriebskörper aus Polycarbonat hat einen Innendurchmesser von 800 mm, einen Außendurchmesser von 1100 mm und eine Höhe von 350 mm (Abbildung 5-19).

Die Verbindungselemente von den Zugpfählen werden durch Bohrungen in den U-Profilen geführt und über eine Spiralfeder gegen das Stahlkreuz abgestützt. Vor Beginn des Versuchs wird die Kraftübertragungskonstruktion aus Drahtseil, Kraftmessdose, Gewindestange, Kopfplatte und Flügelmutter mit geringer Kraft über die Feder vorgespannt, um einerseits die Anfangsverformungen infolge Schlupf bis zur Kraftschlüssigkeit zu minimieren und andererseits ein Verdrehen des Auftriebskörpers mit dem aufliegenden Stahlkreuz zu verhindern.

Auf dem Stahlkreuz befinden sich Messbrücken zur Positionierung von induktiven Wegaufnehmern, welche die Stauchung der Feder in der Kraftübertragungskonstruktion erfassen. Drei Wegaufnehmer, die an einer quer über den Container verlaufenden Messbrücke befestigt sind, registrieren die absolute Vertikalbewegung des Stahlkreuzes. Aus der Differenz der beiden Messwerte ergibt sich die Kopfbewegung der Zugpfähle.

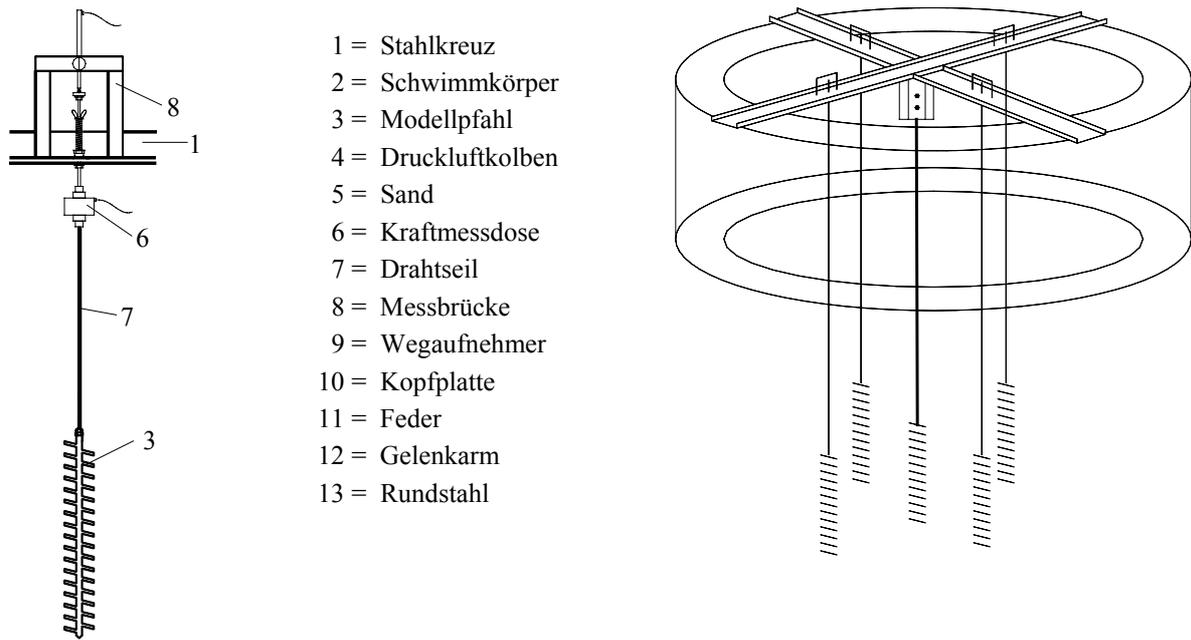


Abbildung 5-18: Prinzipskizze der Belastungsvorrichtung der Zugpfähle (Quarg-Vonscheidt (2000))

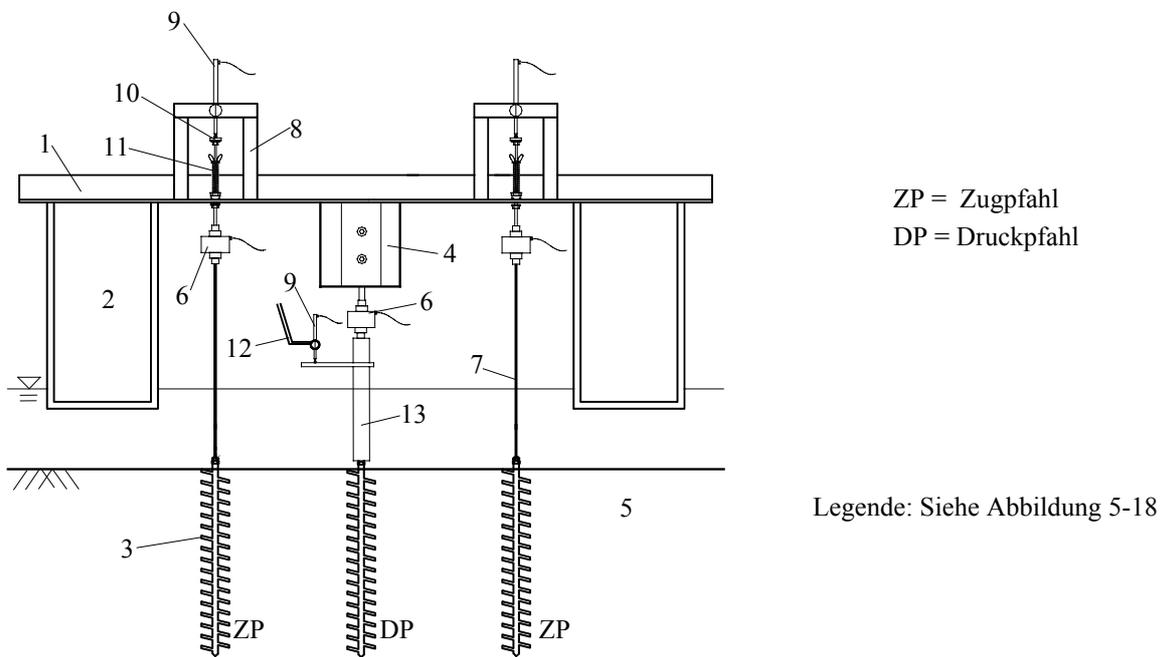


Abbildung 5-19: Querschnitt des Versuchsaufbaus

5.6.3 Messtechnik

5.6.3.1 Kraftmessung

Die Messung der Kraft im Druckpfahl erfolgt wie in Kapitel 5.4.3 beschrieben.

Die in die Zugpfähle eingeleiteten Kräfte werden mit Kraftaufnehmern auf DMS-Basis (Typ U9B 2 kN der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH) ermittelt (Abbildung 5-20). Die Kraftaufnehmer haben an beiden Enden Anschlussbolzen mit Außengewinde. An dem unteren Ende der Kraftmessdose wird mit einem Kupplungsstück eine Gewindestange mit angelötetem Drahtseil angeschlossen. Am anderen Ende des Drahtseils befindet sich eine aufgebohrte Hutmutter, durch die ein Messingstab geführt wird, der einerseits mit dem Drahtseil verbunden ist und andererseits mit seinem Kopf in der Hutmutter steckt. Die Hutmutter wird auf einen Gewindestab aufgeschraubt, der in den Pfahlkopf eingedreht wird. Am anderen Ende der Kraftmessdose ist über ein Passstück eine Gewindestange angeschlossen, die durch eine Bohrung im Stahlkreuz geführt wird. Anschließend wird eine aufgebohrte Hutmutter, eine Lochscheibe, eine Stahlfeder und eine weitere Lochscheibe über die Gewindestange geführt. Die zweite Lochscheibe kann durch eine Flügelmutter fixiert werden. Am oberen Ende der Gewindestange befindet sich eine Kopfplatte, die eine ausreichende Aufstandsfläche für den Wegaufnehmer bietet.

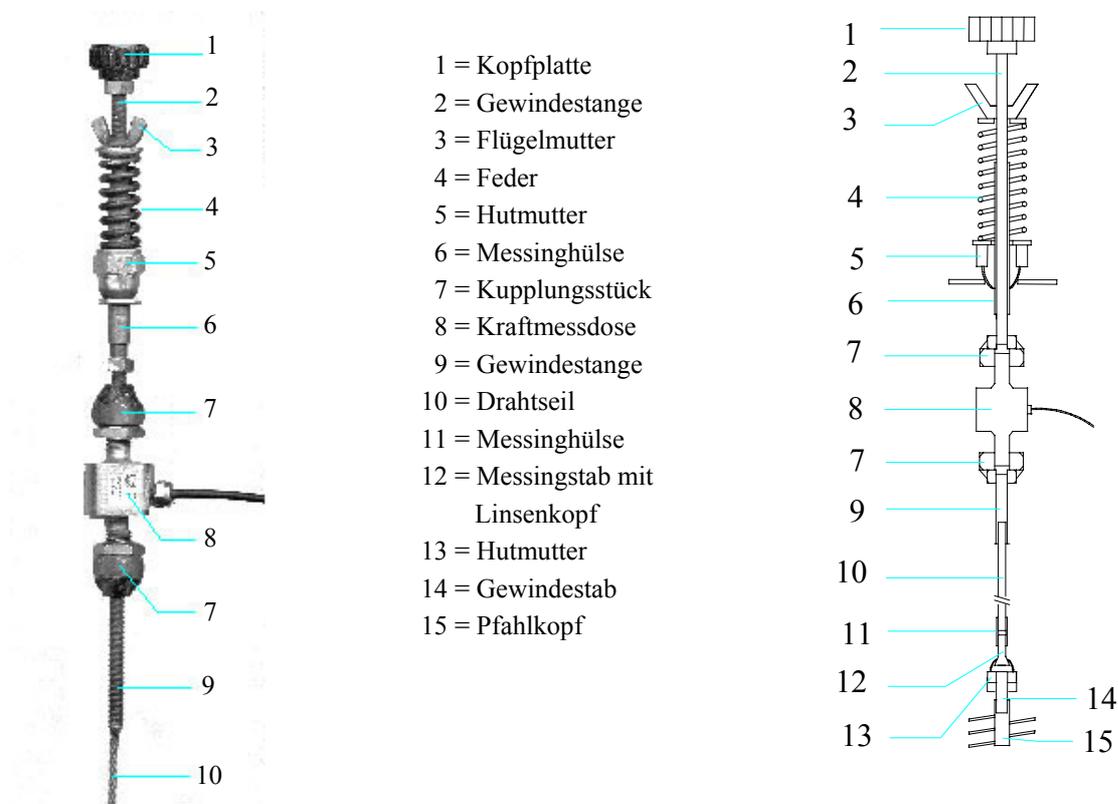


Abbildung 5-20: Krafteinleitungsstruktur (Quarg-Vonscheidt (2000))

Diese Konstruktion ermöglicht die Übertragung von Zugkräften über die Gewindestange, die Flügelmutter und Lochscheibe auf die Spiralfeder, welche sich wiederum gegen eine Hutmutter abstützt. Eine Messinghülse über der Zugstange dient zur Führung der Feder und unterbindet einen direkten Kontakt zwischen Spiralfeder und Gewinde.

Diese Kraftübertragungskonstruktion, die insgesamt eine Gelenkkette darstellt, gewährleistet, dass nur Normalkräfte auf den Zugpfahl übertragen werden.

5.6.3.2 Wegmessung

Die Pfahlkopfsetzungen bzw. -hebungen während der Belastungsphase werden mit Hilfe induktiver Wegaufnehmer des Typs WET A 1/10 der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH ermittelt.

Zur Messung der Kopfverschiebung des Druckpfahls wird der Wegaufnehmer an einer über den Container laufenden Messbrücke befestigt und auf der Aluminiumplatte, die am Verbindungsstück angebracht ist, abgesetzt. Da der Wegaufnehmer unabhängig von der Belastungseinrichtung befestigt ist, kann die Verformung des Pfahls direkt gemessen werden.

Die Verformung der Zugpfähle ergibt sich aus der Differenz zweier Messwerte. Hierzu wird in drei eingemessenen Punkten die absolute Vertikalbewegung des Stahlkreuzes und somit die Lage der Lastverteilungsebene im Raum erfasst. Wegaufnehmer, die an den Messbrücken auf dem Stahlkreuz befestigt sind, ermitteln die Relativbewegung zwischen der Kopfplatte, der Krafteinleitungskonstruktion und der Lastverteilungsebene. Aus der Differenz der Bewegung des Lasteintragungspunktes (als Punkt der Lastverteilungsebene) und der zugehörigen Federstauchung ergibt sich die Pfahlkopfhebung (Abbildung 5-21).

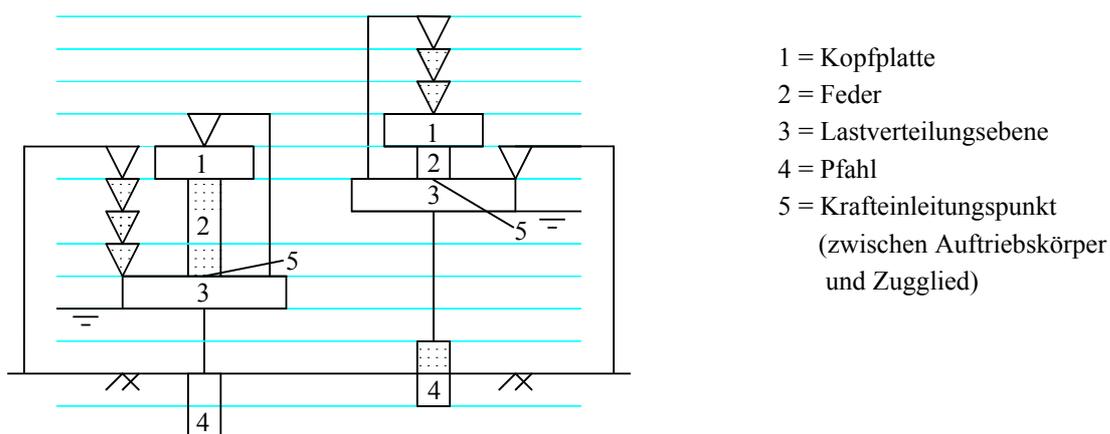


Abbildung 5-21: Prinzip der Wegmessung (Quarg-Vonscheidt (2000))

Die Messsignale der Weg- und Kraftaufnehmer werden von einer Vielstellen-Messanlage (Typ Spider8 der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH) digitalisiert, von einem angeschlossenen Computer aufgezeichnet und anschließend ausgewertet.

5.6.4 Versuchsdurchführung

Nachdem die Sandoberfläche geglättet und die Unwuchtmotoren eingeschaltet wurden, kann nach einer Verdichtungszeit von 12 Minuten mit dem Pfahleinbau begonnen werden. Der Pfahleinbau erfolgt wie bei den Druckpfahlversuchen (vgl. Kapitel 5.4.4), wobei mit einer auf der Sandoberfläche liegenden Schablone die Position der Pfähle eingehalten wird.

Nach dem Einbringen der Pfähle werden die Rüttler ausgeschaltet, der Auftriebskörper in den Versuchscontainer gesetzt und das Stahlkreuz auf ihm abgelegt. Der Druckluftkolben wird über ein Stahlrundprofil mit dem Druckpfahl (vgl. Druckpfahlversuche, Kapitel 5.4.2), und die Zugpfähle über die Drahtseile mit dem Stahlkreuz verbunden. Der Druckluftkolben wird an die Druckluftleitung angeschlossen und das Steuerventil geöffnet. Alle Zugpfähle werden auf eine Zugkraft von 5 N vorgespannt. Somit ist das Stahlkreuz in seiner Lage fixiert und die Wegaufnehmer können justiert werden (Abbildung 5-22).

Nach Abschluss der Versuchsvorbereitungen werden alle Messaufnehmer an die Vielstellen-Messanlage angeschlossen, das Programm zur Messwerterfassung gestartet und der Elektromotor angeschaltet. Der Druckpfahl erfährt eine direkte und die Zugpfähle eine indirekte Belastung. Ab diesem Zeitpunkt erfasst das Programm jede Sekunde die Messwerte der Kraftmessdosen und Wegaufnehmer bis zum Zeitpunkt des Pfahlversagens.



- 1 = Druckpfahl
- 2 = Auftriebskörper
- 3 = Zugpfahl
- 4 = Stahlkreuz
- 5 = Druckluftkolben
- 6 = Zugglied

Abbildung 5-22: Versuchsaufbau der Zug-Druck-Kombination

6 Versuchsergebnisse

6.1 Einzelpfahlversuche

In den Einzelpfahlversuchen werden die Pfahlkraft und die zugehörige Pfahlkopfsetzung gemessen. Aus diesen Messwerten kann für jeden Versuch ein Kraft-Setzungs-Diagramm erstellt werden. Die Kraft-Setzungs-Linien eines Pfahlmodells aus den maßgebenden Versuchen werden gemittelt, der berechnete Kurvenverlauf nach dem Prinzip des Gauß'schen Kerns geglättet und als repräsentative Kurve für den betrachteten Pfahltyp aufgetragen.

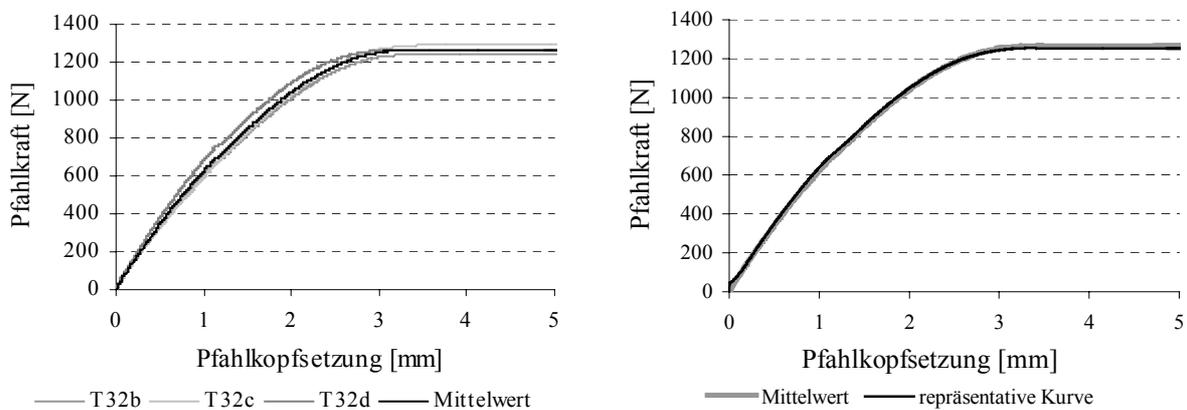


Abbildung 6-1: Aufbereitung der Messwerte

Die in den Versuchen gemessene maximale Pfahlkraft wird in tabellarischer Form (Tabelle 6-1 und Tabelle 6-2) und anschließend in Abhängigkeit von der Pfahlgeometrie grafisch dargestellt. Die ermittelte Grenzlast ist zum einen in der Abbildung 6-2 für jeden Pfahldurchmesser in Abhängigkeit von der verwendeten Pfahllänge und zum anderen in der Abbildung 6-3 für jede Pfahllänge in Abhängigkeit vom Durchmesser aufgetragen. Die Grenzlasten der Pfähle B84, B86 und B88 werden in einem gesonderten Diagramm dargestellt (Abbildung 6-4).

l [mm]	100	200	300	400
12,5	192,2	464,6	909,6	1866,9
25,0	466,4	926,6	1449,6	2506,7
30,0	638,1	1268,1	2028,0	3367,9
37,5	931,4	1635,4	2784,5	4515,8
50,0	1337,6	2167,2	4037,0	6999,0
d [mm]				

Grenzlast in [N]

Tabelle 6-1: Versuchsergebnisse der Pfahlmodelle T_{xx}

l [mm]	335	600	800
81	9314,3	28975,5	51791,2
d [mm]			

Grenzlast in [N]

Tabelle 6-2: Versuchsergebnisse der Pfahlmodelle B_{xx}

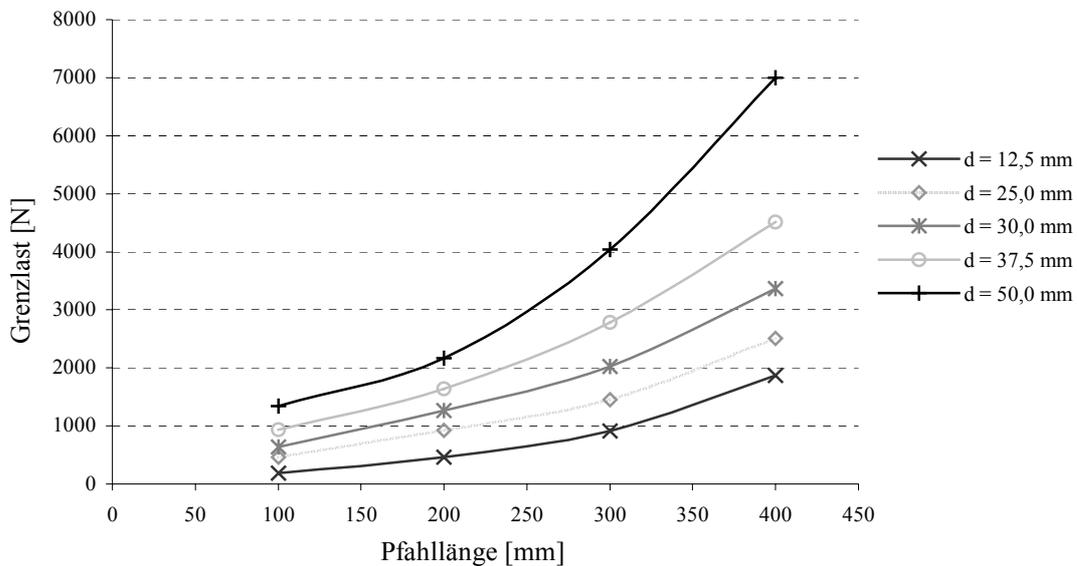


Abbildung 6-2: Pfahlgrenzlast in Abhängigkeit der Pfahllänge – Typ T_{xx}

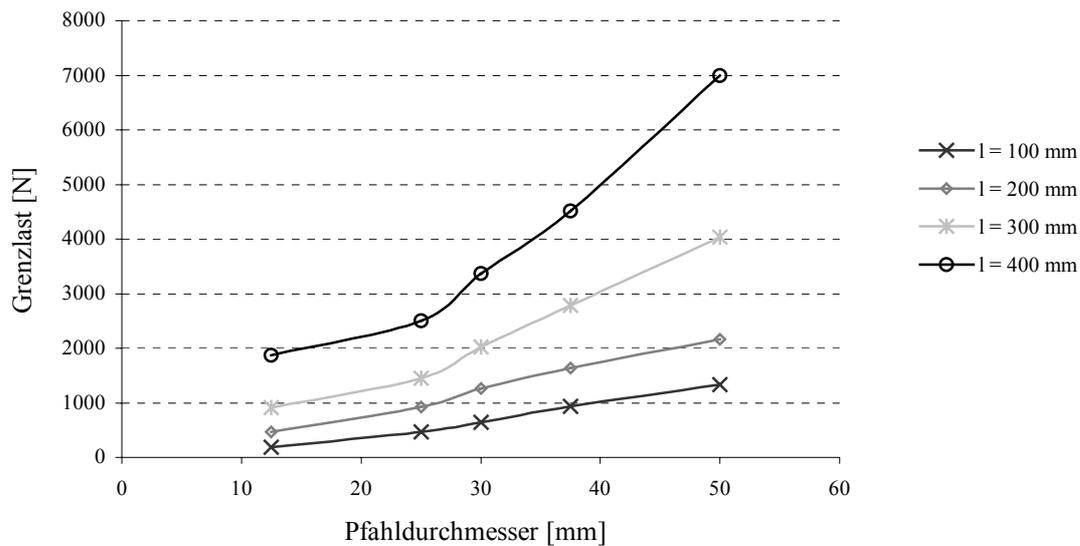


Abbildung 6-3: Pfahlgrenzlast in Abhängigkeit des Durchmessers – Typ Txx

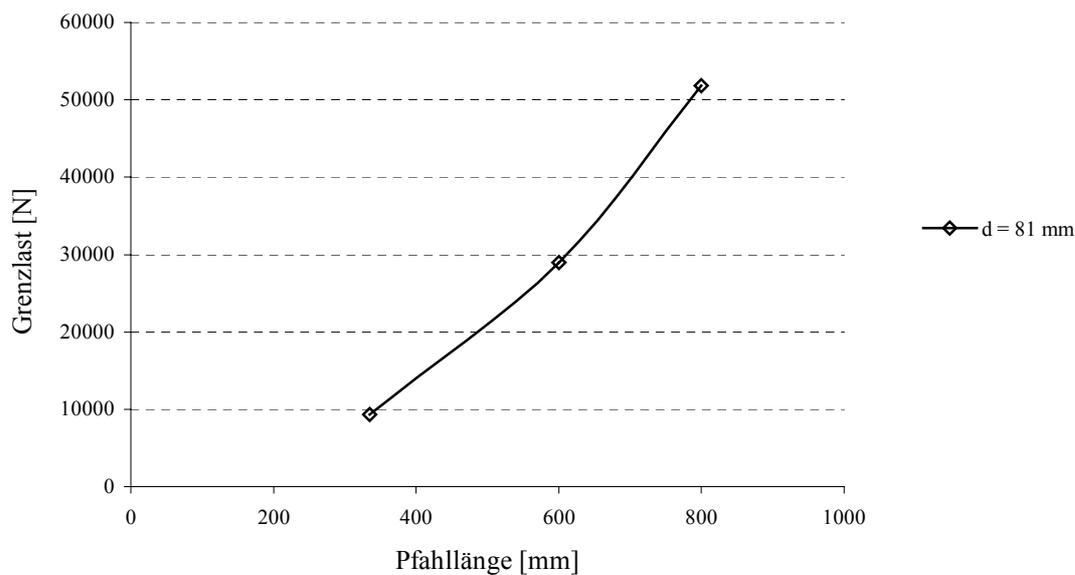


Abbildung 6-4: Pfahlgrenzlast in Abhängigkeit der Pfahllänge - Typ Bxx

Aus der Abbildung 6-2 und der Abbildung 6-4 ist eine überlineare Zunahme der Grenzlast mit zunehmender Pfahllänge zu erkennen. Dieser Effekt ist umso ausgeprägter, je größer der Pfahldurchmesser ist. Eine Vergrößerung des Pfahldurchmessers bei festgehaltener Pfahllänge bedingt, wie aus Abbildung 6-3 ersichtlich ist, eher eine lineare Zunahme in der Grenzlast. Bei der Diskussion der Abbildung 6-2 und der Abbildung 6-3 ist die andersartige konstruktive Ausbildung der Pfahlmodelle T1x ($d = 12,5 \text{ mm}$) zu beachten (siehe Kapitel 5.2). Hier könnte die Ursache für den offensichtlichen Knick insbesondere in der Abhängigkeit der Grenzlast vom Pfahldurchmesser (Abbildung 6-3) zu finden sein.

In der Abbildung 6-5 sind die Kraft-Setzungs-Linien der einzelnen Pfahltypen getrennt für die Pfahldurchmesser dargestellt, wobei deutliche Unterschiede im Pfahlwiderstands-Setzungsverhalten bei verschiedener Pfahllänge erkennbar werden. Bei einem Pfahldurchmesser von z.B. 25 mm (Abbildung 6-5b) tritt in der Widerstands-Setzungs-Linie für eine Pfahllänge von 100 mm (Pfahlmodell T21) ein ausgeprägter Peak-Wert auf, das Versagen dieses Pfahls ist eindeutig zu erkennen und die Grenzlast kann klar definiert werden. Bei dem 200 mm langen Pfahl (T22) ist der Peak-Wert zwar noch vorhanden, aber nicht mehr so deutlich zu erkennen, bei einer Pfahllänge von 300 mm (T23) nähert sich die Widerstands-Setzungs-Linie asymptotisch einer Grenzlast. Wird die Pfahllänge auf 400 mm vergrößert (T24), zeigt sich eine mit der Pfahllast zunehmende Setzung, so dass die Grenzlast nicht als Peak- oder Asymptotenwert aus der Pfahlwiderstands-Setzungs-Linie abgelesen werden kann. Die Grenzlast ist daher in Abhängigkeit von der Widerstands-Setzungs-Linie wie folgt definiert worden:

- ist in der Pfahlwiderstands-Setzungs-Linie ein Peak-Wert erkennbar, so gilt dieser als Grenzlast
- nähert sich die Widerstands-Setzungs-Linie asymptotisch einer Parallelen zur Setzungs-Ordinate, so ist der Abszissenabschnitt der Asymptote die Grenzlast.
- bei Pfählen, die kein eindeutiges Versagen erkennen lassen, wie z.B. der Pfahltyp T34 ($d = 30$ mm, $l = 400$ mm, Abbildung 6-5c), wird die Grenzlast bei einer Setzung von 10% des Pfahldurchmessers definiert (vergleiche z.B. DIN 4014 (03/90) – Bohrpfähle).

Der Pfahl B88 (Abbildung 6-5f) zeigt insofern ein von den übrigen Pfahlmodellen abweichendes Verhalten, da er trotz seiner großen Länge einen Peakwert in der Widerstands-Setzungs-Linie aufweist. Der Effekt kann vielleicht mit der nur bei diesem Pfahl eingesetzten Einbautechnik – Einbringen der letzten 20 cm des Pfahls mit Hilfe von Rammschlägen (Kapitel 5.5.5) – erklärt werden. Die Rammung kann den Boden in der Pfahlumgebung, besonders im Pfahlfußbereich stark verdichten und so die Tragfähigkeit des Pfahls steigern. Dieser Effekt unter dem Pfahlfuß ist mit der zur Nachverdichtung eingesetzten Rütteltechnik nicht zu beheben.

Unterschiede in den Pfahlwiderstands-Setzungs-Linien lassen sich auch in Abhängigkeit vom Pfahldurchmesser erkennen. Gemäß Abbildung 6-6 zeigen die Pfahlwiderstands-Setzungs-Linien bei einer Pfahllänge von 200 mm und bei geringen Pfahldurchmessern einen eindeutigen Peak-Wert, der bei größeren Pfahldurchmessern weitgehend abgeschwächt wird. Je größer der Pfahldurchmesser, desto geringer ist die Setzung des einzelnen Pfahles bei gleicher Last.

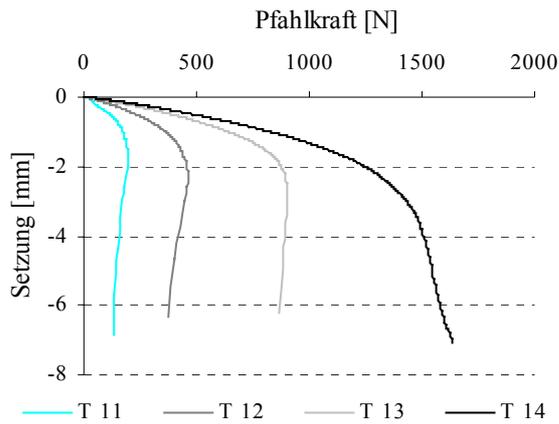
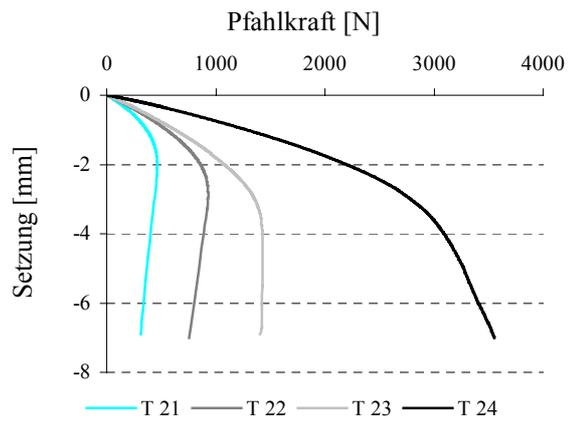
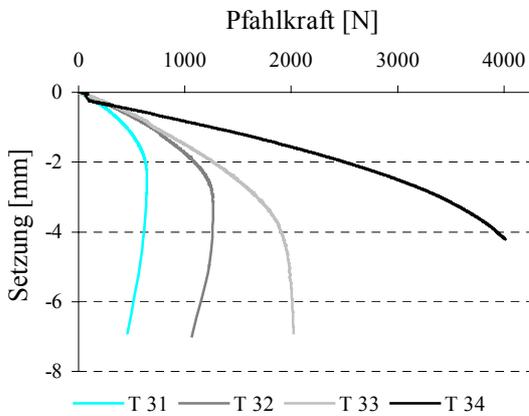
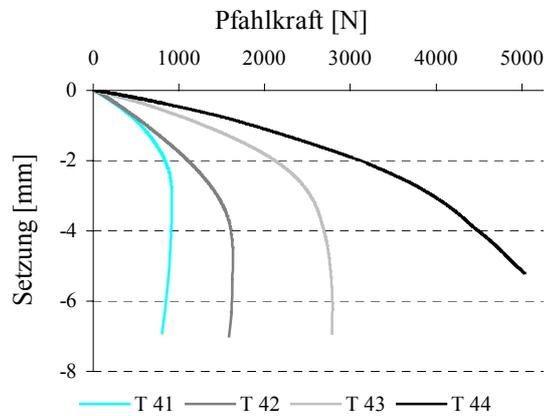
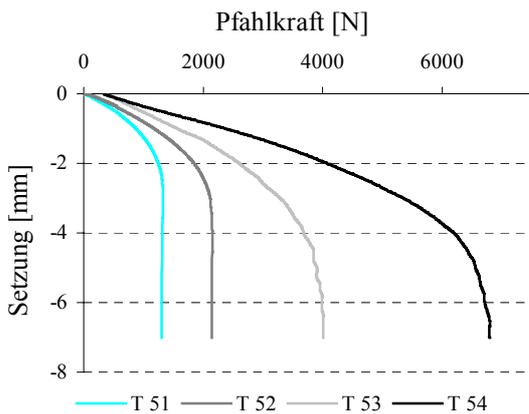
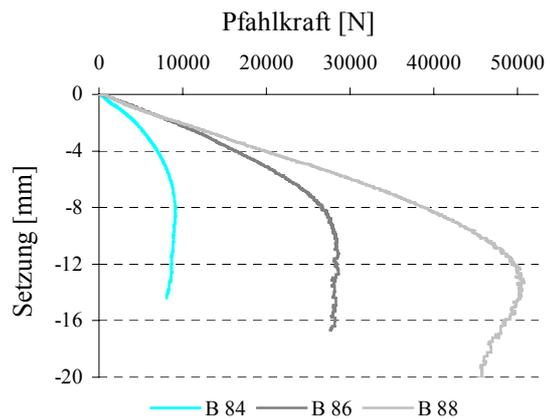
a) Pfahldurchmesser $d = 12,5$ mmb) Pfahldurchmesser $d = 25,0$ mmc) Pfahldurchmesser $d = 30$ mmd) Pfahldurchmesser $d = 37,5$ mme) Pfahldurchmesser $d = 50$ mmf) Pfahldurchmesser $d = 81$ mm

Abbildung 6-5: Pfahlwiderstands-Setzungs-Linien der Einzelpfähle

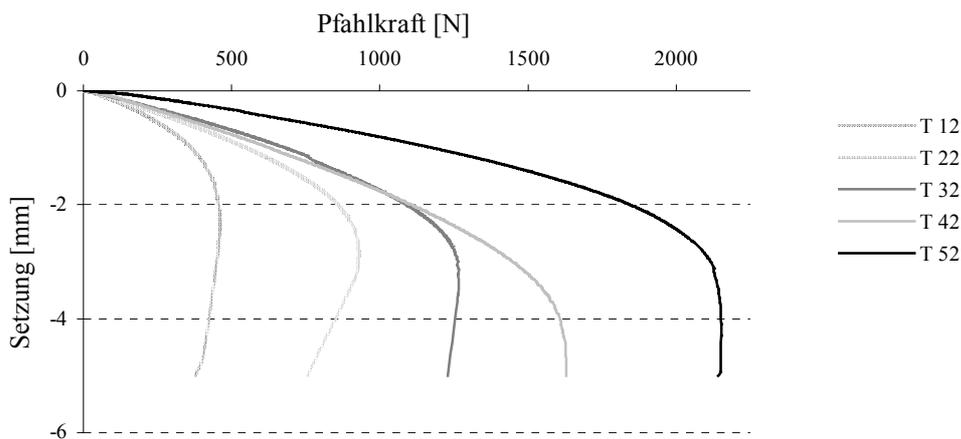


Abbildung 6-6: Pfahlwiderstands-Setzungs-Linien für Pfähle verschiedener Durchmesser

Die Form der Pfahlwiderstands-Setzungs-Linie ist auch von der Belastungsgeschwindigkeit abhängig. Für den Pfahltyp T44 ($d = 37,5 \text{ mm}$, $l = 400 \text{ mm}$), der im Labor in Wuppertal mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 2 N/sec und in Bochum mit 10 N/sec untersucht wurde, ergeben sich die Pfahlwiderstands-Setzungs-Linien der Abbildung 6-7. Die hieraus hergeleitete Grenzlast von $4515,8 \text{ N}$ bzw. $4557,9 \text{ N}$ ist aber fast identisch. Die in den Versuchen vorgegebene Belastungsgeschwindigkeit hat auf die Grenzlast im Gegensatz zur auftretenden Pfahlsetzung eine vernachlässigbare Auswirkung. Die Pfahlsetzung vergrößert sich mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit.

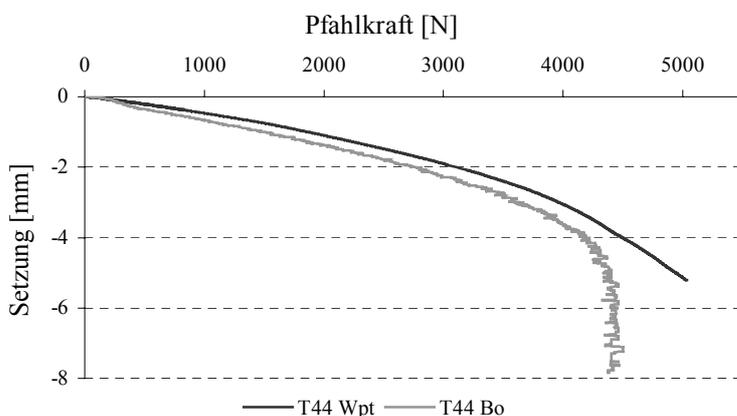


Abbildung 6-7: Vergleich der Belastungsgeschwindigkeiten

Die zuvor erläuterten Versuchsergebnisse zeigen, dass die Form der Widerstands-Setzungs-Linie von der Pfahllänge, dem Pfahldurchmesser sowie der Belastungsgeschwindigkeit bestimmt wird.

6.2 Pfahlgruppenversuche

Die Gruppenversuche werden an Pfählen des Typs T22 ($d = 25 \text{ mm}$, $l = 200 \text{ mm}$) durchgeführt, angeordnet sind die Pfähle als 4er- bzw. 5er-Gruppe im orthogonalen Raster (Abbildung 6-8). Die angegebenen Pfahlabstände beziehen sich jeweils auf die Entfernung der Achse der Außenpfähle zum geometrischen Mittelpunkt der Pfahlgruppe. Pfahlabstände von 16, 24 und 32 cm werden als Pfahlraster 20, 30 und 40 bezeichnet, Pfahlabstände von 12, 20 und 28 cm werden als Pfahlraster 15, 25 und 35 bezeichnet.

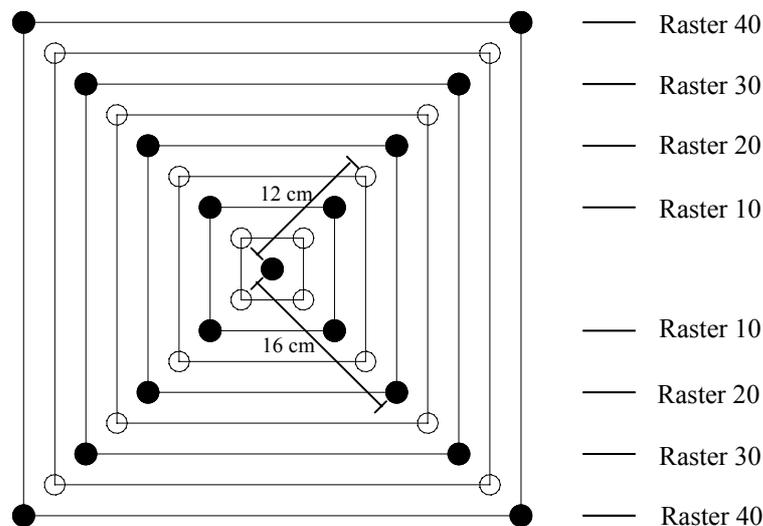


Abbildung 6-8: Rasteranordnung der Gruppenpfähle

Die Ergebnisse der Gruppenversuche sind in der Tabelle 6-3 als Grenzlast der gesamten Pfahlgruppe - gemittelt aus den Versuchen - abhängig von der Versuchsanordnung dargestellt. Die maximale Gruppengrenzlast ist erreicht, wenn der erste Pfahl der Gruppe versagt und ergibt sich aus der Addition der dann auf die einzelnen Gruppenpfähle einwirkenden Last.

Raster	<u>15</u>	<u>20</u>	<u>25</u>	<u>30</u>	<u>35</u>	<u>40</u>
Pfahlabstand [cm]	12	16	20	24	28	32
4er	4511,6	4249,6	3986,8	3747,6	3737,2	3674,8
5er	6687,0	6083,5	5420,5	5148,5	4832,0	4679,0

Grenzlast in [N]

Tabelle 6-3: Tragfähigkeiten der untersuchten Pfahlgruppen

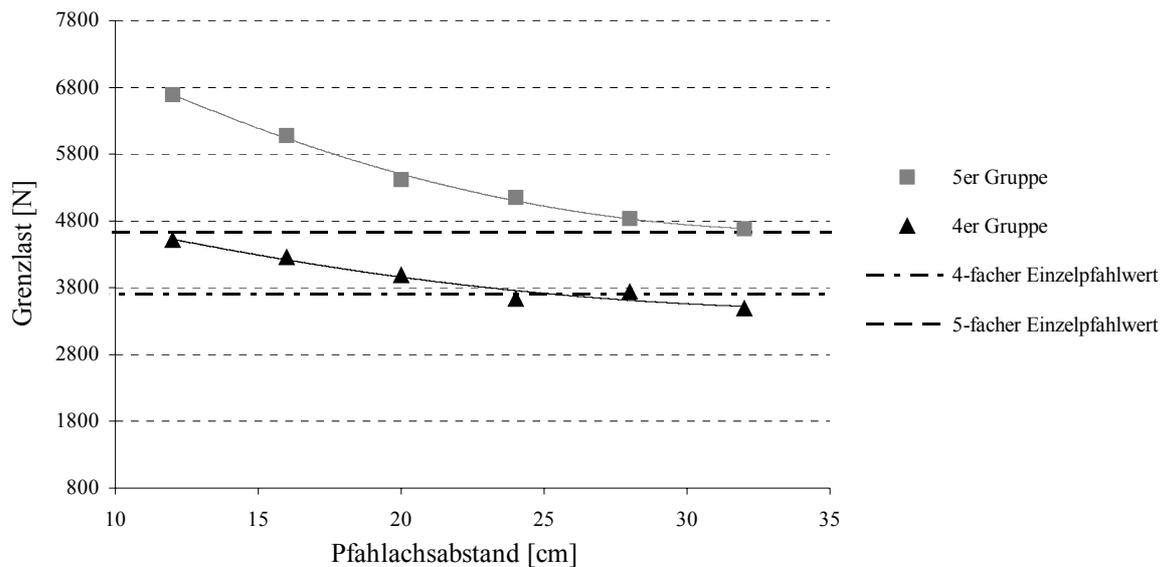


Abbildung 6-9: Pfahlgruppengrenzlast

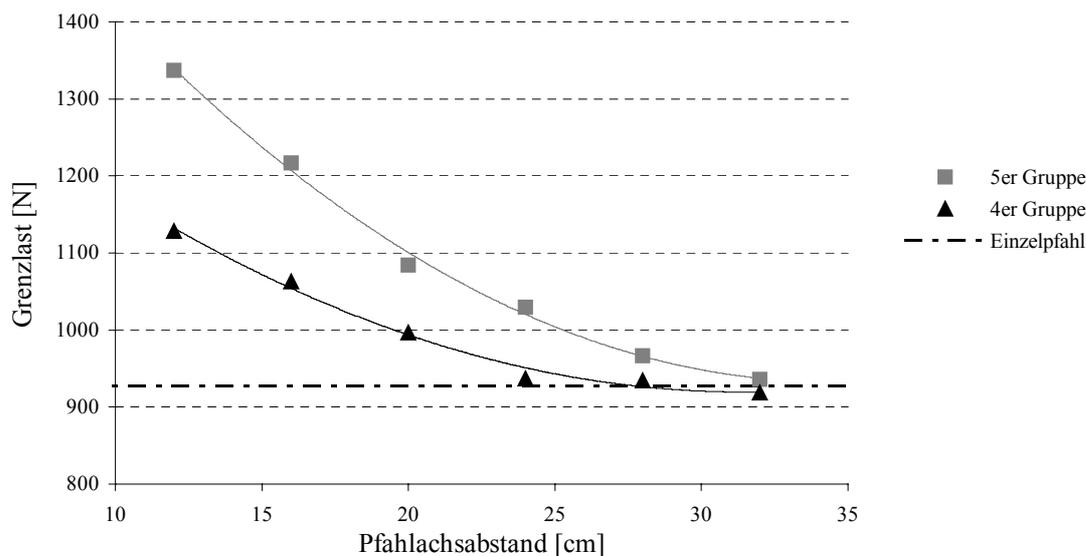


Abbildung 6-10: Grenzlast eines einzelnen Gruppenpfahls

In der Abbildung 6-9 ist für beide Gruppenanordnungen die Abnahme in der Pfahlgruppengrenzlast mit zunehmenden Pfahlachsabstand bis auf den entsprechenden 4- bzw. 5-fachen Kraftwert des Einzelpfahls zu erkennen. Deutlicher wird die Abnahme der Grenzlast bis auf den Wert des entsprechenden Einzelpfahls, wenn die mittlere Tragfähigkeit eines einzelnen Gruppenpfahls dargestellt wird (Abbildung 6-10). Die Grenzlast ist in der 5er- Gruppe bei einem betrachteten Pfahlachsabstand größer als die eines 4er- Gruppenpfahls, wobei die Abnahme der Grenzlast mit zunehmendem Pfahlachsabstand steiler als in der 4er- Gruppe erfolgt.

Anschließend wird die Pfahlkraft eines einzelnen repräsentativen Gruppenpfahls über die Pfahlkopfsetzung für die einzelnen Pfahlachsabstände aufgetragen (Abbildung 6-11 und

Abbildung 6-12). Zum Vergleich ist die Pfahlwiderstands-Setzungs-Linie des unbeeinflussten Einzelpfahls in diesen Diagrammen eingetragen.

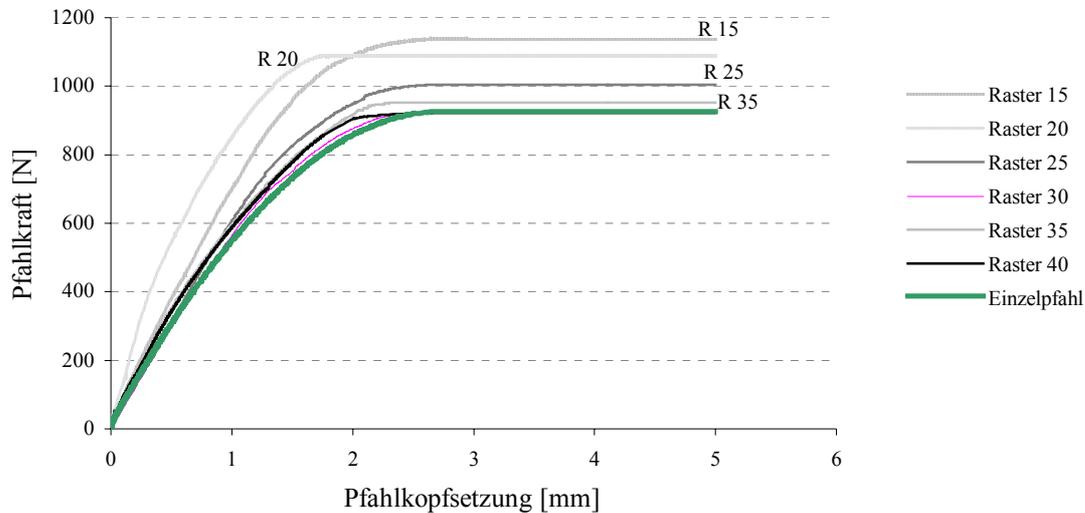


Abbildung 6-11: Pfahlwiderstands-Setzungs-Linien eines einzelnen Gruppenpfahls der 4er-Gruppe

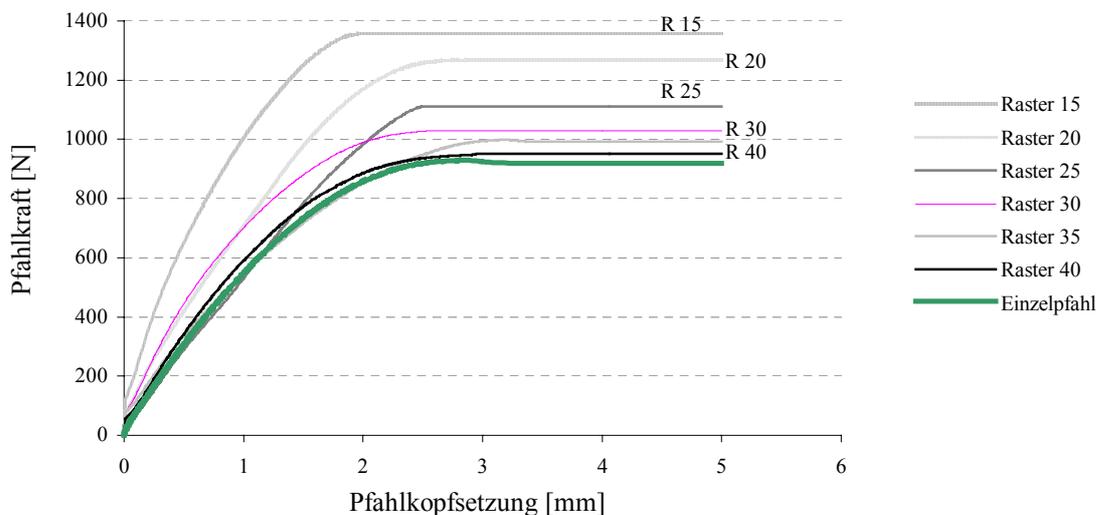
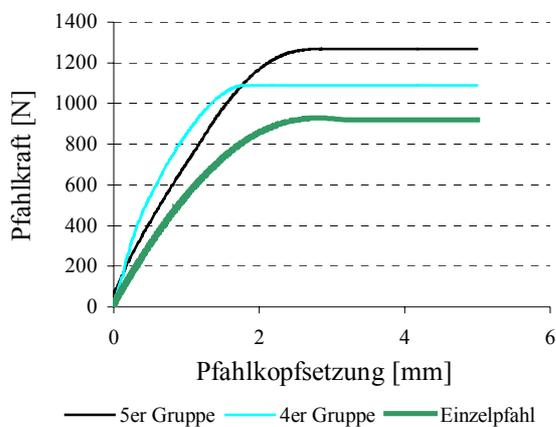


Abbildung 6-12: Pfahlwiderstands-Setzungs-Linien eines einzelnen Gruppenpfahls der 5er-Gruppe

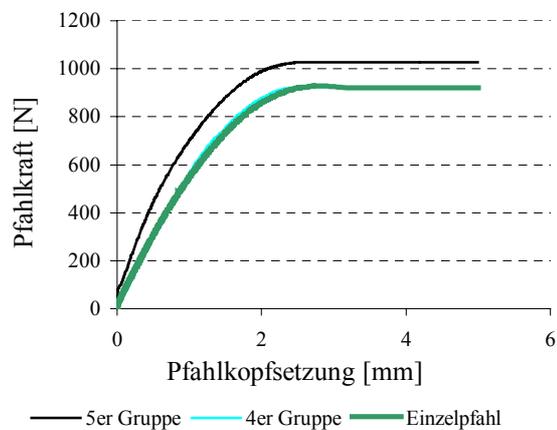
Die Pfahlwiderstands-Setzungs-Linie in dem Raster 15 weist bei der 4er- und 5er-Gruppe hohe Pfahlkräfte bei geringen Verformungen aus, d.h. der Gruppenpfahl verhält sich steifer als der einzeln stehende Pfahl. Mit zunehmendem Pfahlachsabstand nimmt bei gleicher Pfahllast die Pfahlkopfsenkung zu. Die Pfahlwiderstands-Setzungs-Linie des Gruppenpfahls nähert sich immer mehr derjenigen des unbeeinflussten Einzelpfahls an.

In der Abbildung 6-13 wird für ausgewählte Pfahlachsabstände die Pfahlwiderstands-Setzungs-Linie jeweils eines 4er- und eines 5er-Gruppenpfahls und diejenige des Einzelpfahls aufgetragen. Die Pfahlwiderstands-Setzungs-Linie des 4er-Gruppenpfahls nähert sich schon

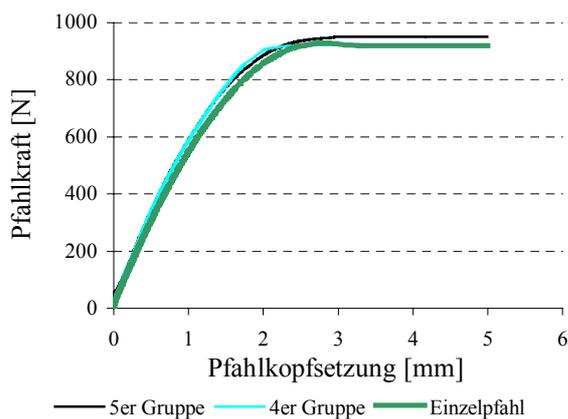
bei kleinerem Pfahlachsabstand mehr an die des Einzelpfahles an als bei einer 5er-Pfahlgruppe.



a) Raster 20



b) Raster 30



c) Raster 40

Abbildung 6-13: Vergleich der Pfahlwiderstands-Setzungs-Linien bei gleichem Pfahlabstand

Die Pfahlgruppen-Effektivität ist definiert als das Verhältnis der Grenzlast der Pfahlgruppe zur n-fachen Grenzlast des Einzelpfahles, wobei n die Anzahl der Pfähle in der Gruppe angibt. Die Tabelle 6-4 enthält die in den Modellversuchen ermittelte Gruppeneffektivität der entsprechenden 4er- und 5er-Pfahlgruppen.

Raster	<u>15</u>	<u>20</u>	<u>25</u>	<u>30</u>	<u>35</u>	<u>40</u>
Pfahlabstand [cm]	12	16	20	24	28	32
4er	121,7	114,7	107,6	101,1	100,8	99,2
5er	144,3	131,3	117,0	111,1	104,3	100,9

Gruppeneffektivität in [%]

Tabelle 6-4: Pfahlgruppen-Effektivität

6.3 Zug-Druckpfahl-Versuche

6.3.1 Vorbemerkung

Mit dieser Modell-Versuchsreihe soll die Beeinflussung des Tragverhaltens eines Druckpfahles durch nahestehende, als Reaktionspfähle angeordnete Zugpfähle, sowie umgekehrt auch die Auswirkung eines Druckpfahles auf die Widerstands-Hebungslinie benachbarter Zugpfähle untersucht werden. In den Modellversuchen kam es überwiegend zu einem Versagen der (vier) Zugpfähle vor dem Erreichen der Grenzlast des im Zentrum der Pfahlgruppe angeordneten Druckpfahles.

Für diese Versuche werden Pfähle mit dem Durchmesser $d = 25$ mm und unterschiedlicher Länge eingesetzt. In einer ersten Versuchsreihe (Reihe 1) haben alle Pfähle eine Länge von 200 mm bzw. 300 mm. Bei einer zweiten Versuchsreihe (Reihe 2) ist der mittig stehende Druckpfahl der Gruppe um 100 mm kürzer als die außen angeordneten Zugpfähle. Die Pfahlabstände entsprechen denjenigen der Gruppenversuche an Druckpfählen (siehe Kap. 6.2).

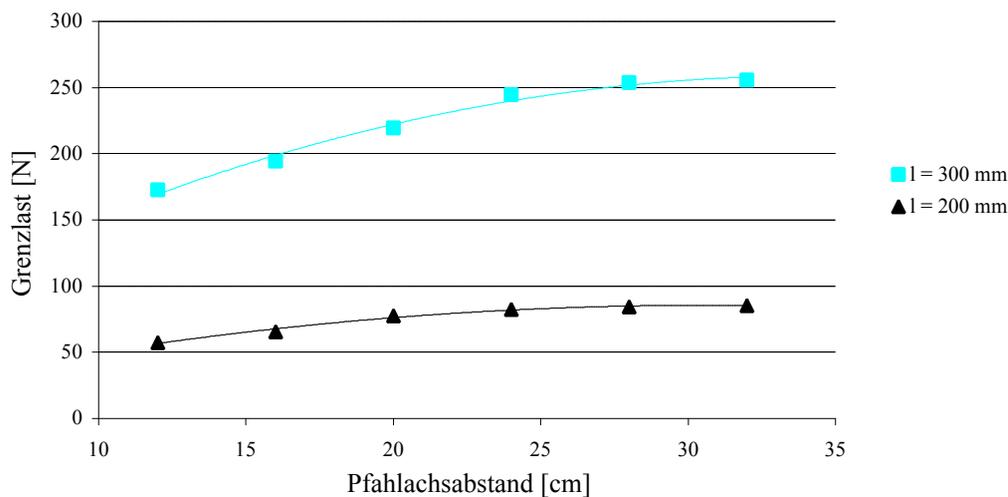
6.3.2 Ergebnisse der Reihe 1

Es werden innerhalb der Reihe 1 eine Versuchsserie mit fünf 200 mm langen Pfählen (ein Druckpfahl, vier Zugpfähle) und eine mit fünf 300 mm langen Pfählen durchgeführt. Bei allen Pfahlrastern kam es zu einem Versagen der Reaktionszugpfähle. In der Tabelle 6-5 ist die Grenzlast eines Zugpfahles als Mittelwert aus den Messergebnissen und der Mittelwert (aus mehreren Versuchen) der gleichzeitig, d. h. im Grenzzustand der Zugpfähle, auftretenden Beanspruchung des Druckpfahles in Abhängigkeit vom Pfahlabstand angegeben und in der Abbildung 6-14 grafisch dargestellt.

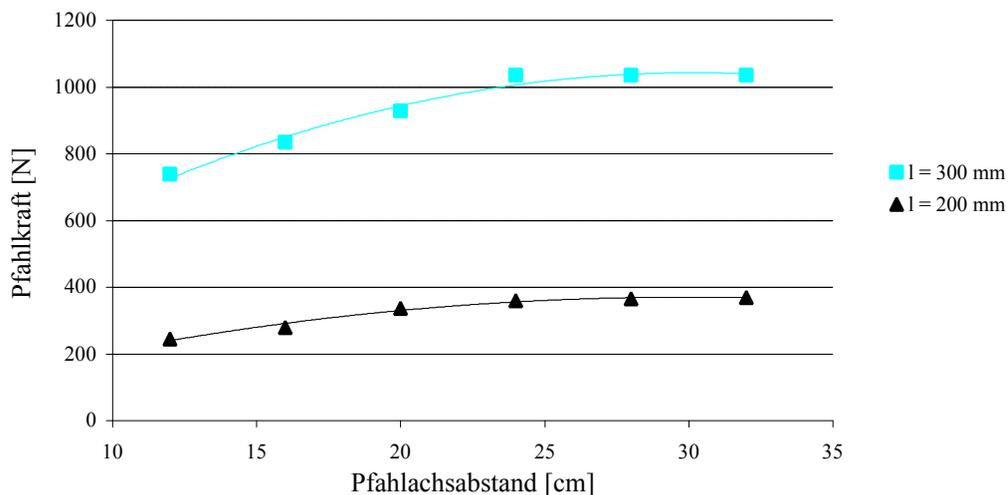
Raster Pfahlabstand [cm]	<u>15</u>	<u>20</u>	<u>25</u>	<u>30</u>	<u>35</u>	<u>40</u>
Pfahltyp T22 Zugpfahl	57,6	65,4	77,7	82,5	84,4	85,4
Druckpfahl	245,0	279,6	336,5	360,2	365,2	368,8
Grenzlast des einzeln stehenden Druckpfahls 926,62 N						
Pfahltyp T23 Zugpfahl	172,6	194,5	219,3	244,4	253,9	255,6
Druckpfahl	738,5	834,4	927,7	1036,0	1034,7	1035,0
Grenzlast des einzeln stehenden Druckpfahls 1449,6 N						

Tragfähigkeit in [N]

Tabelle 6-5: Grenzlast der Zugpfähle und gleichzeitige Beanspruchung des Druckpfahles



a) mittlere Grenzlast der Zugpfähle



b) Beanspruchung des Druckpfahles

Abbildung 6-14: Ergebnis der Zug-Druckversuche mit gleich langen Pfählen

Die Summe der Grenzlasten der vier Zugpfähle ist kleiner als die gleichzeitig wirkende Beanspruchung des Druckpfahles (Pfahltyp T 22 / Raster 30: $4 \cdot 82,5 = 330 \text{ N} < 360,2 \text{ N}$). Bei Versuchsbeginn liegt das Stahlkreuz, welches die Reaktionskraft aus der Druckbelastung des mittigen Pfahles auf die Zugpfähle überträgt, auf dem Auftriebskörper, so dass sein Eigengewicht an dem Kraftgleichgewicht zwischen Druckpfahl und den Zugpfählen nicht beteiligt ist. Mit steigender Belastung hebt sich das Stahlkreuz etwas an und damit auch der Auftriebskörper, wodurch ein Teil der Auftriebskraft entfällt. Die von den Zugpfählen aufzunehmende Reaktionskraft ist dann die um den wegfallenden Auftriebsanteil verminderte Belastung des mittigen Druckpfahles.

So hat sich kurz vor Erreichen des Grenzzustandes der Zugpfähle im Versuch Pfahltyp T22/Raster 30 das Stahlkreuz im Mittel um $s = 0,0042 \text{ m}$ gehoben. Bei einer Grundrissfläche

des Auftriebskörpers von $0,45 \text{ m}^2$ ergibt sich ein Auftriebsverlust von $\Delta A = 10000 \text{ N/m}^3 \cdot 0,45 \text{ m}^2 \cdot 0,0042 \text{ m} = 18,9 \text{ N}$; dies entspricht nicht ganz der Differenz $\Delta K = 360,2 - 4 \cdot 82,5 = 30,2 \text{ N}$, in allen Versuchen verbleibt eine Differenz von ca. 12 N, die in das Stahlkreuz hineingeleitet wird.

In der Tabelle 6-6 ist die Effektivität der einzelnen Pfähle, d.h. die auf die Grenzlast des einzeln stehenden Pfahls bezogene Pfahlkraft im Druck-Zugpfahl-Gruppen-Versuch aufgeführt. Eine Effektivität von 100% kennzeichnet den Fall, in dem die maximale Pfahlkraft im Gruppen-Versuch identisch mit der Grenzlast des einzeln stehenden Pfahls ist (zur Grenzlast eines Druckpfahls siehe Kapitel 6.1, zur Grenzlast eines Zugpfahls siehe Quarg-Vonscheidt (2000) und Tabelle 6-7).

Raster Pfahlabstand [cm]	<u>15</u>	<u>20</u>	<u>25</u>	<u>30</u>	<u>35</u>	<u>40</u>
Pfahltyp T22						
Zugpfahl	94,0	106,7	126,8	134,6	137,7	139,3
Druckpfahl	26,4	30,2	36,3	38,9	39,4	39,8
Pfahltyp T23						
Zugpfahl	88,3	99,5	112,2	125,0	129,9	130,7
Druckpfahl	50,9	57,6	64,0	71,5	71,4	71,4

Pfahleffektivität in [%]

Tabelle 6-6: Effektivität der einzelnen Pfahlarten im Versuch

Aus diesen Versuchen ist zunächst nicht abzulesen, ob die Grenzlast des mittig angeordneten Druckpfahles durch die benachbarten Reaktionszugpfähle beeinflusst wird, da die Grenzlast des Druckpfahles nicht erreicht wurde. In der Tabelle 6-5 ist zusätzlich die Grenzlast des einzeln stehenden Druckpfahles des entsprechenden Pfahltyps (siehe Kapitel 6.1) eingetragen; die erreichte Pfahldruckkraft liegt deutlich unterhalb dieser Grenzlast.

Zur Beurteilung der Wechselwirkung des Druckpfahles auf die Grenzlast der Reaktionszugpfähle werden die Ergebnisse von Quarg-Vonscheidt (2000) herangezogen. Quarg-Vonscheidt untersuchte in der in Kapitel 5.4 beschriebenen Modellversuchsanlage mit den gleichen Pfahltypen das Tragverhalten von einzeln stehenden Zugpfählen und Zugpfahlgruppen (nur bei dem Pfahltyp T22) im gleichen Modellboden (unter Wasser). Die von ihm angegebenen mittleren Grenzlasten eines Gruppenzugpfahles und des einzeln stehenden Zugpfahles sind in der Tabelle 6-7 zusammengestellt.

Raster Pfahlabstand [cm]	<u>05</u>	<u>10</u>	<u>15</u>	<u>20</u>	<u>25</u>	<u>30</u>	<u>35</u>	<u>40</u>
Pfahltyp T22								
4er-Gruppe	24,7	31,7	46,0	51,8	56,1	57,6	57,8	61,1
5er-Gruppe		27,0	-	43,7	-	53,0	-	57,4

Grenzlast in [N]

Grenzlast des Einzelpfahls Typ T22: 61,3 N

Grenzlast des Einzelpfahls Typ T23: 195,5 N

Tabelle 6-7: Durchschnittliche Grenzlast des einzelnen Pfahles in der Zugpfahlgruppe und Grenztragfähigkeit eines einzeln stehenden Zugpfahls (Pfahltyp T22 und T23) nach Quarg-Vonscheidt (2000)

Auch für diese Zugpfahlversuche werden die im Versuch erreichten Grenzlasten als Effektivität ausgedrückt.

Raster Pfahlabstand [cm]	<u>05</u>	<u>10</u>	<u>15</u>	<u>20</u>	<u>25</u>	<u>30</u>	<u>35</u>	<u>40</u>
Pfahltyp T22								
4er-Gruppe	40,3	51,4	75,1	84,5	91,5	94,0	94,3	99,7
5er-Gruppe		44,1	-	71,2	-	86,4	-	93,7

Pfahleffektivität in [%]

Tabelle 6-8: Pfahleffektivität eines einzelnen Pfahls in einer Zugpfahlgruppe (T22)

Für den Pfahltyp T22 lassen sich aus dem Vergleich der Tabelle 6-6 und Tabelle 6-8 folgende qualitativen Aussagen herleiten (siehe Abbildung 6-15):

- Bei einer Vierer-Zugpfahlgruppe (kein Pfahl im Zentrum) wächst mit zunehmendem Pfahlabstand die mittlere Grenzzugkraft an und erreicht bei dem größten Pfahlabstand im Experiment etwa die Grenzlast des einzeln stehenden Zugpfahles von 61,3 N.
- Steht ein auf Zug beanspruchter Pfahl im Zentrum, wird bei gleichem Pfahlraster die durchschnittliche Grenzlast des Zuggruppenpfahles kleiner, wobei im maximalen Pfahlabstand im Versuch aber noch nicht die Grenzlast des einzeln stehenden Zugpfahles erreicht ist.
- Steht ein auf Druck beanspruchter Pfahl im Zentrum der vier Zugpfähle, wird deren durchschnittliche Grenzlast erhöht. Schon bei dem Pfahlabstand von 16 cm (Raster 20) ist die

die durchschnittliche Zuggrenzlast größer als die eines einzeln stehenden Zugpfahles. Mit zunehmendem Pfahlabstand nimmt die durchschnittliche Grenzlast der Zugpfähle weiter zu und erreicht bei dem größten, experimentell realisierten Abstand wohl einen Maximalwert. Für größere Pfahlabstände muß die Zuggrenzlast wieder abfallen bis auf den Wert des einzeln stehenden Zugpfahles.

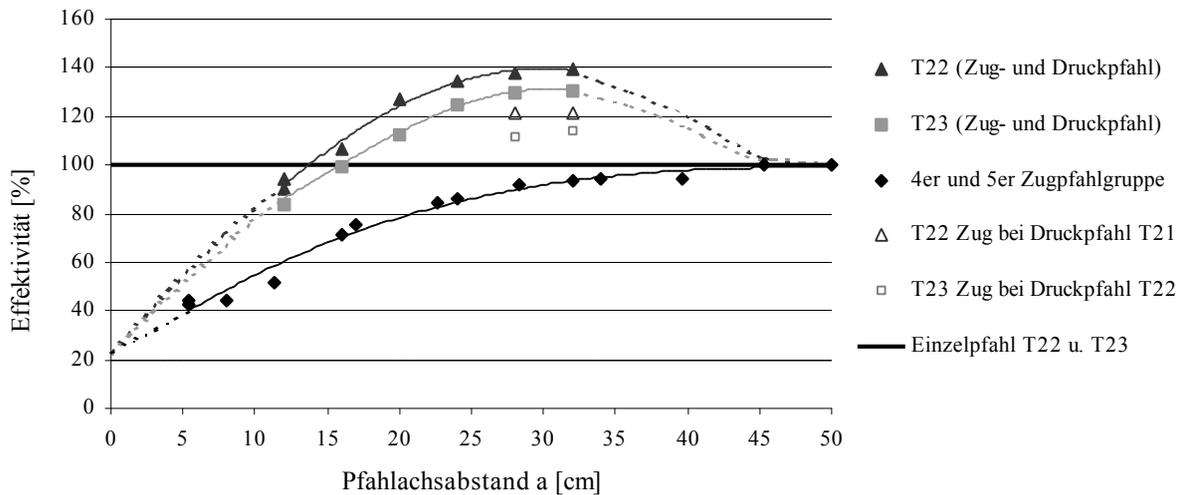


Abbildung 6-15: Pfahleffektivitäten in Abhängigkeit vom Pfahlabstand in den einzelnen Versuchskonstellationen

Bei dieser qualitativen Bewertung ist zu berücksichtigen, dass der gegenseitige Abstand der Zugpfähle ohne Mittelpfahl $\bar{a} = \sqrt{2} \cdot a$ (siehe Beschreibung der Pfahlrastrer in Kapitel 6.2), bei Anordnung eines Mittelpfahles (als Zug- oder Druckpfahl) der maßgebende Pfahlabstand aber nur a beträgt. Dieses ist bei der Auftragung der durchschnittlichen Grenzlast der Zugpfähle einer 4er-Zugpfahlgruppe in Abbildung 6-15 berücksichtigt.

In die Abbildung 6-15 ist auch die mittlere Grenzlast der vier Reaktionspfähle vom Typ T23 als Effektivitätswert aufgetragen; Quarg-Vonscheidt hat für diesen Typ nur die Grenzlast des einzeln stehenden Zugpfahles bestimmt (siehe Tabelle 6-7).

Beispielhaft sind für den Pfahltyp T23 die mittleren Zugwiderstands-Hebungs-Linien der Reaktionspfähle in der Abbildung 6-16 aufgetragen, ergänzt durch die eines einzeln stehenden Pfahles nach Quarg-Vonscheidt (2000). Der Pfahltyp T22 zeigt ein qualitativ gleiches Ergebnis. Mit zunehmender Grenzlast, d.h. in diesem Fall mit wachsendem Pfahlachsabstand, steigt für eine betrachtete Pfahlhebung die hierfür erforderliche Pfahlzugkraft an, der Pfahl wird also steifer. Ein gegenüber den Reaktionspfählen generell anderes Verhalten des einzeln stehenden Zugpfahles ist aus Abbildung 6-16 nicht ablesbar.

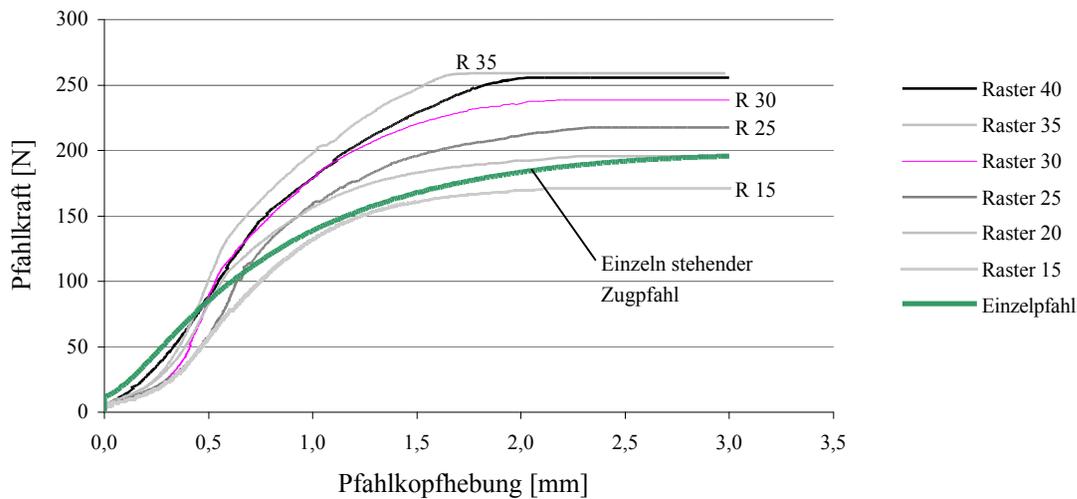


Abbildung 6-16: Pfahlwiderstands-Hebungs-Linien der Reaktionspfähle (Zugpfahl T23, ($d = 25 \text{ mm}$, $l = 300 \text{ mm}$))

Schließlich sind in der Abbildung 6-17 die Widerstands-Setzungslinien des mittig angeordneten Druckpfahles dargestellt, wobei vergleichsweise die des einzeln stehenden Druckpfahles mit eingetragen ist.

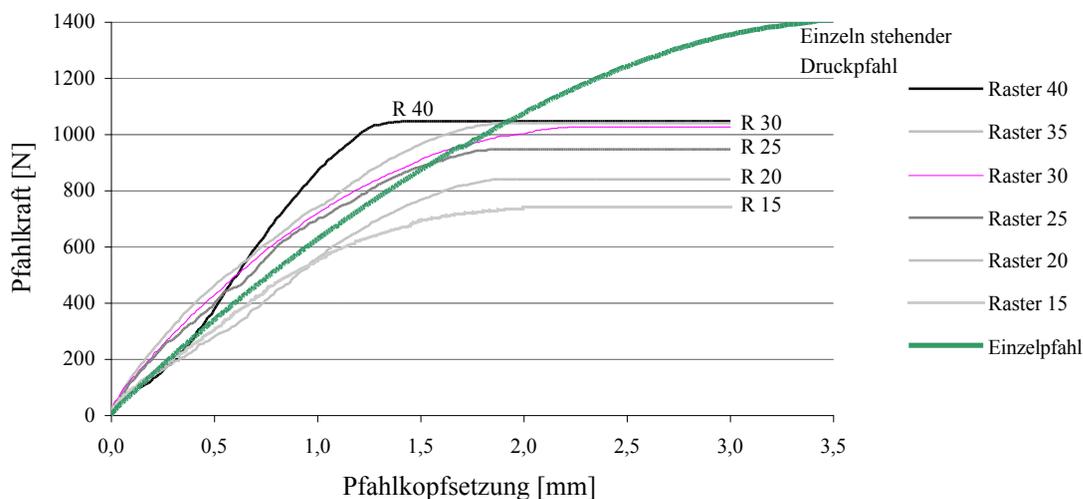


Abbildung 6-17: Pfahlwiderstands-Setzungs-Linien des Druckpfahls (Pfahltyp T23, ($d = 25 \text{ mm}$, $l = 300 \text{ mm}$))

Die in der Zugpfahlgruppe stehenden Druckpfähle weichen in ihrem Tragverhalten bis zu der im Versuch erreichten Pfahllast nicht signifikant von demjenigen des einzeln stehenden Druckpfahles ab.

6.3.3 Ergebnis der Reihe 2

In der Reihe 2 ist der Druckpfahl um 100 mm kürzer als die ihn umgebenden Zugpfähle. Es wurden für die Pfähle mit 25 mm Durchmesser folgende Versuchskonstellationen untersucht:

- Zugpfahllänge 200 mm (Typ T22); Druckpfahllänge 100 mm (Typ T21)
- Zugpfahllänge 300 mm (Typ T23); Druckpfahllänge 200 mm (Typ T22).

Bis zu einem Pfahlabstand von 24 cm wird die Grenzlast des Druckpfahles erreicht, bei größerem Abstand versagen die Zugpfähle. In der Tabelle 6-9 sind die erreichten Grenzlasten bzw. die zugehörige Pfahlbeanspruchung der Reaktionspfähle bzw. des Druckpfahles angegeben. Die Abbildung 6-18 zeigt die Grenzlast des Druckpfahls (Versuche bis inklusive 24 cm Pfahlabstand) über dem jeweiligen Pfahlachsabstand aufgetragen.

Raster Pfahlabstand [cm]	<u>15</u>	<u>20</u>	<u>25</u>	<u>30</u>	<u>35</u>	<u>40</u>
	12	16	20	24	28	32
Pfahltyp						
Zugpfahl (T22)	58,2	64,8	69,5	73,6	74,4	74,2
Druckpfahl (T21)	249,6	298,3	319,8	332,3	325,4	336,5
	Grenzzustand Druckpfahl				Grenzzustand Zugpfahl	
Pfahltyp						
Zugpfahl (T23)	153,4	165,6	184,4	204,0	218,2	223,1
Druckpfahl (T22)	645,4	695,3	771,3	862,0	923,1	952,0

Grenzlasten / Beanspruchungen in [N]

Tabelle 6-9: Grenzlasten bzw. Pfahlbeanspruchungen der Zug-Druck-Kombination in der Reihe 2

Die Grenzlast der Zugpfähle bei den Abständen 28 cm und 32 cm ist in die Abbildung 6-15 eingetragen. Die geringere Erhöhung der Grenzlast gegenüber der Reihe 1 ist durch den mittig angeordneten kürzeren Druckpfahl zu erklären.

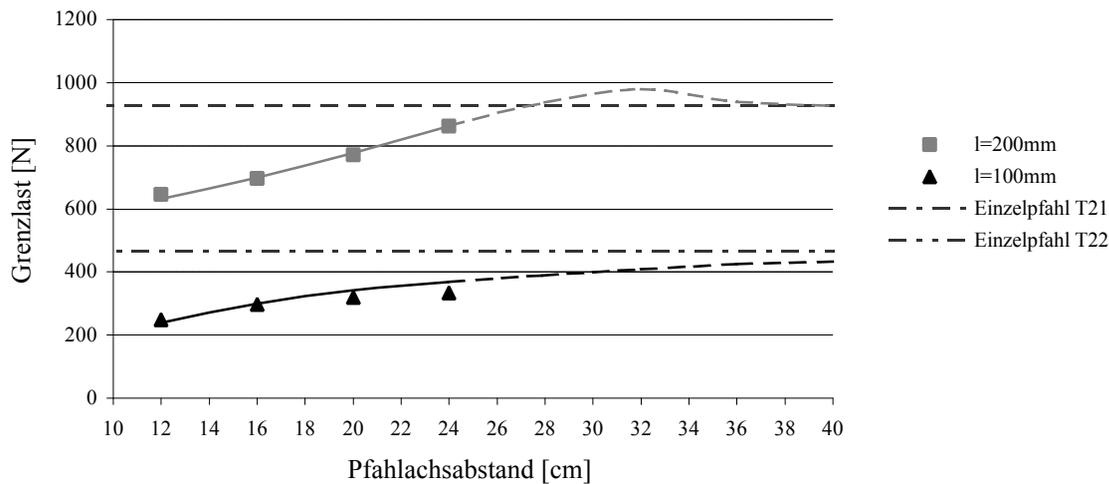
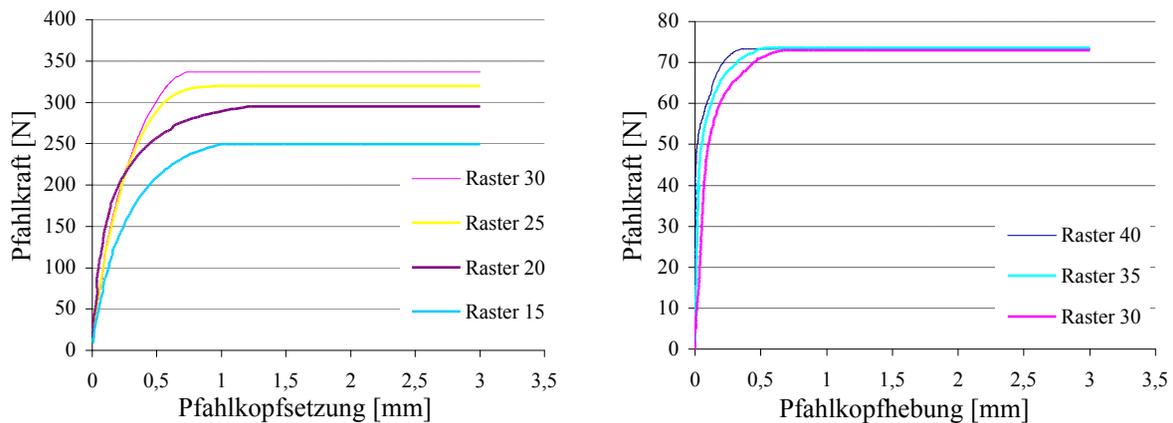


Abbildung 6-18: Grenzlasten des Druckpfahls der Zug-Druck-Kombination der Reihe 2

Die Grenzlast des Druckpfahles (Abbildung 6-18) ist geringer als die des einzeln stehenden Druckpfahles und nimmt mit größerem Pfahlabstand zu. Eine Extrapolation der in Abbildung 6-18 dargestellten Abhängigkeit der Grenzlast des Druckpfahles über den im Experiment maximal erreichbaren Pfahlachsabstand von 24 cm hinaus erscheint problematisch, da z. B. bei der Kombination T22 (Druckpfahl) / T23 (Zugpfähle) bei dem Pfahlabstand von 32 cm eine größere Pfahlbeanspruchung (nämlich 952,0 N) als die Grenzkraft des einzeln stehenden Druckpfahles (926,6 N) gemessen wurde. Die Grenzlast des Druckpfahles liegt noch über der beim Versagen der Zugpfähle erreichten Beanspruchung des Druckpfahles. Es ist also zu vermuten, dass in diesem Fall bei großen Pfahlabständen die in Abbildung 6-18 dargestellte, die Messwerte verbindende Kurve über die Grenzlast des einzeln stehenden Pfahles hinausgeht und sich nach Erreichen eines Maximalwertes dieser wieder annähert. Im Gegensatz hierzu scheint sich die entsprechende, die Messwerte der Pfahlkombination T21 (Druckpfahl) / T22 (Zugpfähle) verbindende Kurve nur langsam asymptotisch der Grenzkraft des unbeeinflussten Druckpfahles zu nähern.

In der Abbildung 6-19 sind die Zugwiderstands-Hebungslinien bzw. Druckwiderstands-Setzungslinien angegeben, wenn die Pfähle die Grenzlast erreicht haben. Würde die Widerstands-Hebungs- bzw. -Setzungs-Linie des einzelnen Zug- bzw. Druckpfahles in die Darstellungen eingetragen, könnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.



a) c) Druckpfahl T21 bei Druckpfahlversagen b) Zugpfahl T22 bei Zugpfahlversagen

Abbildung 6-19: Widerstands-Setzungs-Linie des Druckpfahls (a) und mittlere Widerstands-Hebungs-Linie der Zugpfähle (b)

Die Abbildung 6-15 und die Abbildung 6-18 zeigen ein komplexes Zusammenwirken von Druckpfahl und umgebenden Zugpfählen, das je nach Geometrie – Pfahllänge, Längenverhältnis Zugpfahl / Druckpfahl, Pfahldurchmesser, Pfahlachsabstand – zu Erhöhungen oder Verminderungen der Grenzlast sowohl des Druckpfahls als auch der Reaktionszugpfähle führen kann. Nachdrücklich wird darauf hingewiesen, dass hier experimentell nur der Pfahlachsabstandsbereich von $a/d \approx 5$ bis $a/d \approx 10$ untersucht wurde. Es ist denkbar, dass sich insbesondere für kleinere Pfahlabstände andere Abhängigkeiten als in den hier durchgeführten Modellversuchen ergeben könnten.

Betrachtet man noch einmal die von Jessberger et. al. (1997) durchgeführten Modellversuche bei kleineren Pfahlachsabständen (Kapitel 4.3), zeigt sich für den Druckpfahl im Bereich der Gebrauchslast (kleine Setzungen) eine um bis zu 65% höhere Tragfähigkeit im Vergleich zu der des unbeeinflussten Einzelpfahls. Bei größeren Setzungen hingegen, wenn die Pfahlkraft fast gleich der Grenzlast ist, ist die Tragfähigkeit des Probepfahls nur geringfügig (5%) größer als die eines unbeeinflussten Einzelpfahls. Abweichungen zu den zuvor geschilderten eigenen Versuchsergebnissen liegen vermutlich in der Versuchsgeometrie begründet. In den Versuchen von Jessberger et. al. (1997) trat bei gleich langen Pfählen immer ein Versagen des Druckpfahls ein. Es wurde nicht die Grenzlast der ihn umgebenden Zugpfähle, für die keine Last-Hebungs-Kurven vorhanden sind, erreicht. Für die 1g-Modellversuche konnte ein Versagen des Probepfahls hingegen nur bei unterschiedlich langen Pfählen beobachtet werden; war die Länge aller Pfähle gleich, trat immer ein Versagen der Zugpfähle ein.

7 Anschauungsversuch

7.1 Vorüberlegungen

Entsprechend dem mechanischen Modell für Zugpfähle im rolligen Boden nach Quarg-Vonscheidt (2000) wird auch bei dem Rechenansatz für die Druckpfähle davon ausgegangen, dass es im Bodenbereich um den belasteten Pfahl zu Verspannungen im Korngerüst kommt und somit in der Pfahlumgebung eine Gewölbewirkung auftritt. Die Verspannungen führen zu der hypothetischen Vorstellung von Schalentragwerken in der Pfahlumgebung, woraus ein mechanischer Ansatz zur Abtragung von Mantelreibungskräften in den unter der Pfahlspitzenfläche liegenden Baugrund über rotationssymmetrische Schalen aus granularem Material hergeleitet wird.

Mit Hilfe der Spannungsoptik können die im Boden auftretenden Spannungen sichtbar, und z.B. mit dem Verlauf der Hauptspannungstrajektorien die Hypothese der ineinanderliegenden Schalentragwerke anschaulich gemacht werden. Der Spannungszustand im Boden in der Umgebung eines belasteten Pfahles wird als rotationssymmetrisch vorausgesetzt, eine in der Spannungsoptik übliche ebene Darstellung ist daher ausreichend aussagekräftig.

In dem Anschauungsversuch ist die Übertragung der Bodeneigenschaften auf die verwendete spannungsoptisch aktive Substanz (Kunstharz) problematisch, da deren Tragverhalten wesentlich von dem des Bodens abweicht. Da aber mit diesen Versuchen nur qualitative Aussagen getroffen werden sollen, wird von einer hierfür ausreichenden Übereinstimmung der Stoffgesetze ausgegangen.

In den spannungsoptischen Versuchen werden Einzelpfahlmodelle mit verschiedener geometrischer Ausbildung der Pfahlspitze und eine aus 3 Pfählen bestehende Pfahlgruppe betrachtet.

7.2 Prinzip der Spannungsoptik

In der Spannungsoptik werden scheibenartige Modelle von weißem bzw. monochromatischem Licht durchleuchtet. Der verwendete spannungsoptisch aktive Werkstoff ist isotrop und das Licht wird durch ihn hindurch geleitet. Unter Belastung entsteht in dem Werkstoff eine künstliche Anisotropie und es treten Veränderungen der einzelnen Lichtvektoren auf. Durch die Anordnung spezieller Polarisationsfilter kann die Änderung des Lichtes sichtbar gemacht werden, woraus Rückschlüsse auf die im Modell auftretenden Spannungen möglich werden.

Im belasteten Modell erkennt man Isochromaten als Linien gleicher Farbe und Isoklinen als schwarze Linien. Isochromaten stellen Linien gleicher Hauptspannungsdifferenz dar, Isoklinen markieren die Punkte, an denen die Richtung einer Hauptspannung mit der Polarisations-

richtung des Lichtes übereinstimmt. Die Isochromate nullter Ordnung erscheint scharf und schwarz, je größer die Isochromatenordnung ist, desto verwaschener erscheinen die einzelnen Linien. Die Isoklinen erscheinen immer als dunkle Linien, da ihre Entstehung nicht durch die Brechung, sondern allein durch die Polarisation des Lichtes begründet ist.

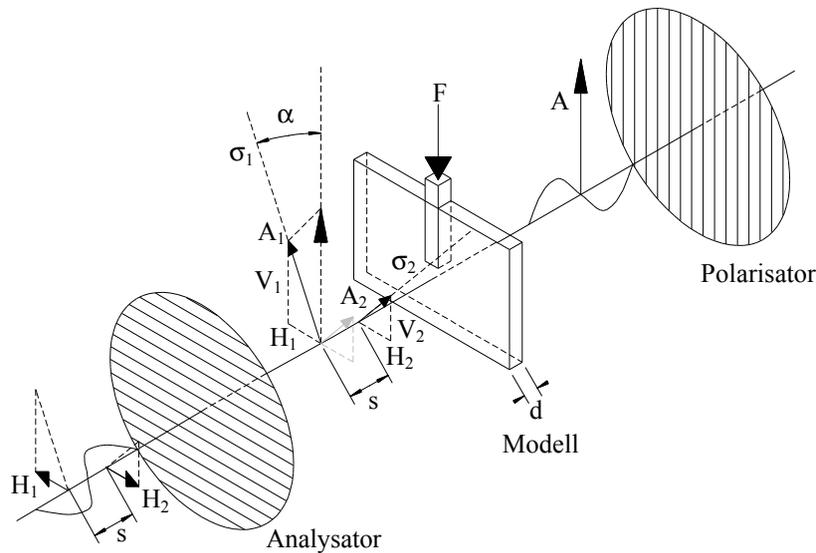


Abbildung 7-1: Prinzip der Spannungsoptik

Aus dem Isochromaten- und Isoklinenbild kann die Spannungsverteilung im Modell bestimmt werden.

7.3 Versuchsaufbau und -ablauf

Für den Versuch wird ein 12 cm langer Vierkantstab aus Aluminium (Querschnitt 10 mm x 10 mm) in eine Gießform eingebaut, so dass ein ebenes Modell entsteht (Abbildung 7-2). Die Gießform besteht aus je einer Plexiglasscheibe (23 cm x 20 cm) an der Vorder- und Rückseite, zwischen den beiden Scheiben werden unten und an den beiden Seiten Vierkantstäbe aus Aluminium von der Dicke des Modells eingelegt. Mit Kanthölzern und Schraubzwingen wird die Form mit dem Pfahlmodell fixiert, wobei mit den am Rand angeordneten Distanzstäben ein Auslaufen des Kunstharzes aus der Form vermieden wird. Die Form wird mit dem angerührten Kunstharz ausgegossen, bis das Pfahlmodell 10 cm tief einbindet.

Nach einer Erhärtungszeit von 24 Stunden wird das Modell ausgeschalt und in die Versuchsvorrichtung, in der das Modell an beiden Seiten durch eine Rahmenkonstruktion fixiert ist, eingesetzt. Zur Belastung werden auf eine Platte, die mit dem Pfahl verbunden ist, Gewichte einzeln aufgelegt.

Bei unterschiedlichen Belastungsstufen wird die Polarisationsrichtung des Lichtes in mehreren Schritten um jeweils 10° gedreht und die Lage der Isoklinen aufgezeichnet. Durch Kom-

bination der Isoklinen mit den Isochromaten ergibt sich das in Abbildung 7-3 dargestellte Isoklinennetz, das mit dem Schubspannungsdifferenzenverfahren ausgewertet werden kann.

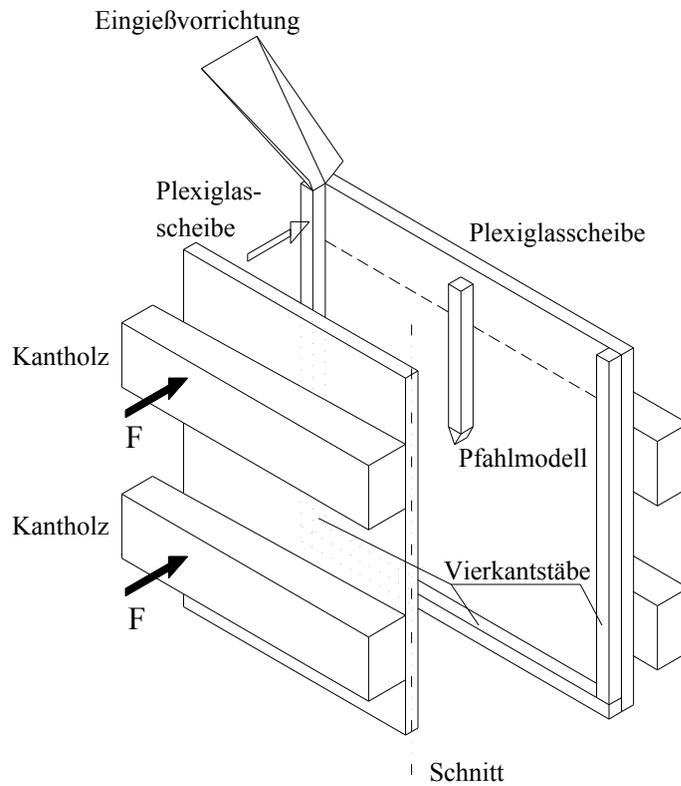


Abbildung 7-2: Modell mit Schalung

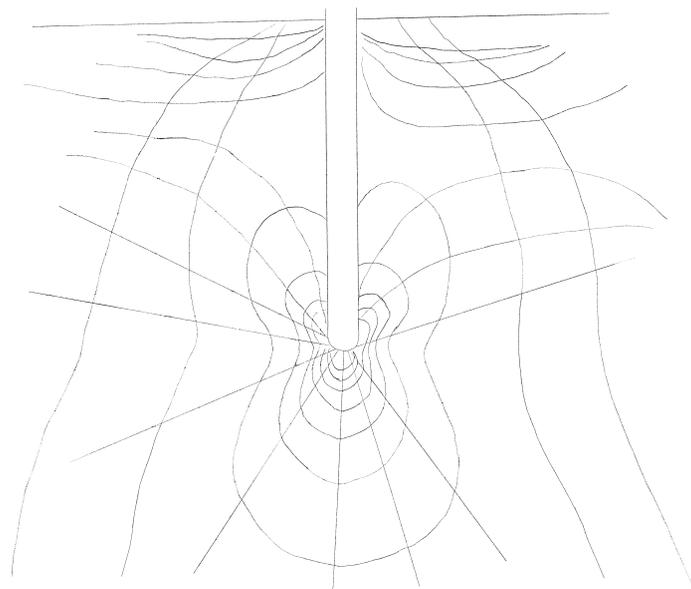
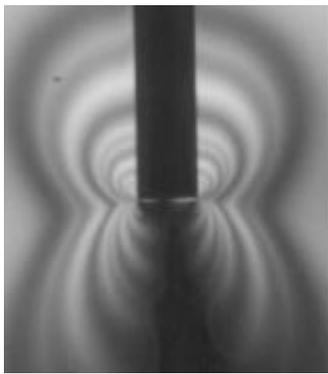


Abbildung 7-3: Isoklinennetz

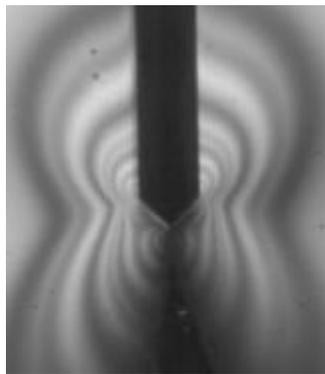
7.4 Versuchsergebnis

7.4.1 Einfluss der Spitzenform

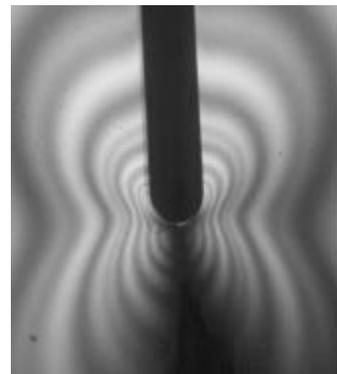
Eine Auswertung der spannungsoptischen Bilder der Pfahlmodelle mit verschiedenen Geometrien der Pfahlspitze (flach, dreieckig, rund) führt zu dem Schluss, dass die Pfahlspitze keinen wesentlichen Einfluss auf den Spannungsverlauf hat (Abbildung 7-4). Die Abbildung 7-4 zeigt für alle Pfahlspitzen die Ausbildung eines Kerns unter dem Pfahlfuß, wie ihn bereits LINDER (1977) (Kapitel 2.2) beschrieben hat.



a) flache Form



b) dreieckige Form



c) runde Form

Abbildung 7-4: Geometrische Ausbildung der Pfahlspitze

7.4.2 Spannungsverteilung im Modell

Mit Hilfe des Schubspannungsdifferenzenverfahrens wird der Spannungszustand in der Modell-Scheibe bestimmt. In die Isoklinen- und Isochromatenlinien wird ein Netz gelegt und an den Gitterpunkten die vorhandenen Spannungen bestimmt. Die Ermittlung der Spannungen muss von Randstellen mit bekannter Spannung ausgehen und erlaubt nur eine schrittweise Spannungsberechnung an den Netzknoten. So ergibt sich der als Hauptspannungen – dies sind ausschließlich Druckspannungen – in der Abbildung 7-5 aufgetragene Spannungsverlauf. Deutlich wird die Umlenkung der Spannungen in der Pfahlumgebung, wobei der Verlauf der größeren Hauptspannung die Form von nach unten geöffneten, ineinanderliegenden Schalen andeutet, die noch über den Pfahlfuß hinaus gehen.

Ein Vergleich dieser Spannungsverteilung mit der aus einer FE-Berechnung erhaltenen (Abbildung 7-6) zeigt eine qualitativ gute Übereinstimmung. Die gegenüber Boden unterschiedlichen Stoffeigenschaften des Kunstharzes wirken sich nicht nachteilig aus, insbesondere nicht die Zugfestigkeit des Materials, da - wie bereits erwähnt - nur Druckspannungen auftreten.

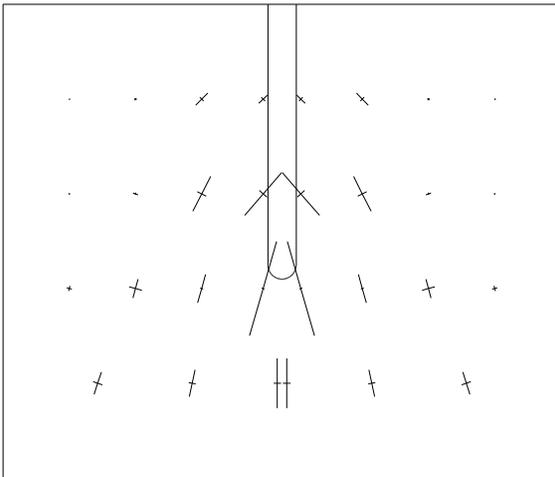


Abbildung 7-5: Spannungsverteilung Modellversuch

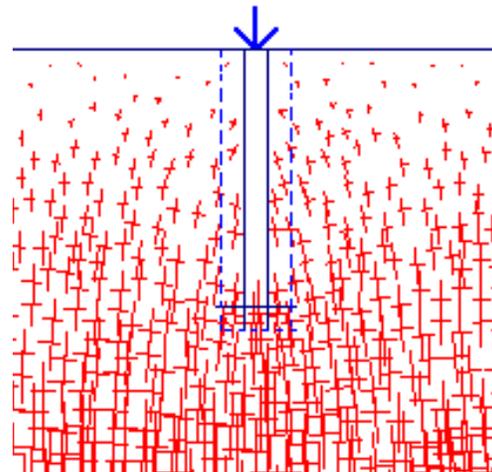
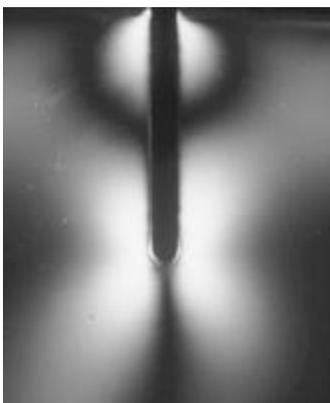


Abbildung 7-6: Spannungsverteilung FE-Berechnung

7.4.3 Steigerung der Pfahlbelastung

In der Abbildung 7-7 sind die spannungsoptischen Bilder bei unterschiedlicher Größe der Pfahlbelastung wiedergegeben. Offensichtlich wird im „Kunstharz-Halbraum“ die Pfahlbelastung zunächst im Bereich der Pfahlspitze übertragen, von dort ausgehend wird mit wachsender Pfahlbelastung der gesamte Pfahlmantel in Anspruch genommen. Die Bilder stützen die Annahme der gegenseitigen Beeinflussung von Mantelreibung und Spitzendruck.

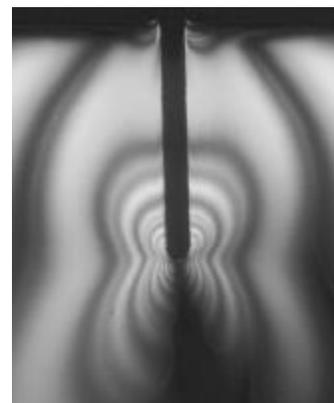
Es ist keine Aussage über die Grenzlast des Pfahls möglich, wobei angenommen werden kann, dass bei dem in der Abbildung 7-7c dargestellten Spannungszustand unter einer Belastung von $2 \cdot F$ noch nicht der Versagenszustand des Pfahls erreicht ist.



a) Belastung $0,1 \cdot F$



b) Belastung $1 \cdot F$



c) Belastung $2 \cdot F$

Abbildung 7-7: Verschiedene Pfahlbelastungen

7.4.4 Pfahlgruppen

Eine aus drei Pfählen (Achsabstand $4 \text{ cm} \cong 4 \cdot d$) bestehende Pfahlgruppe wird in das spannungsoptisch aktive Kunstharz eingebettet und einer Druckbelastung unterzogen.

Die Abbildung 7-8 lässt das als Schalentragwerk gedeutete Druckgewölbe, das sich um die gesamte Pfahlgruppe bildet, erkennen; eine Beanspruchung des Pfahlmantels zeigt sich nur jeweils am äußersten Rand der beiden Außenpfähle. Am Innenpfahl wird bei dieser Belastungsstufe offensichtlich keine Pfahlmantelreibung in Anspruch genommen. Unter dem Pfahlfuß sind die auftretenden Spannungen für die beiden äußeren Pfähle gleich, für den Innenpfahl geringer. Es zeigt sich eine gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Pfähle, wobei die um jeden Pfahl entstehenden Traggebilde zum Teil ineinander übergehen. Es ist keine Aussage möglich wie weit die zu Abbildung 7-8 gehörige Belastungsstufe vom Grenzzustand entfernt ist.

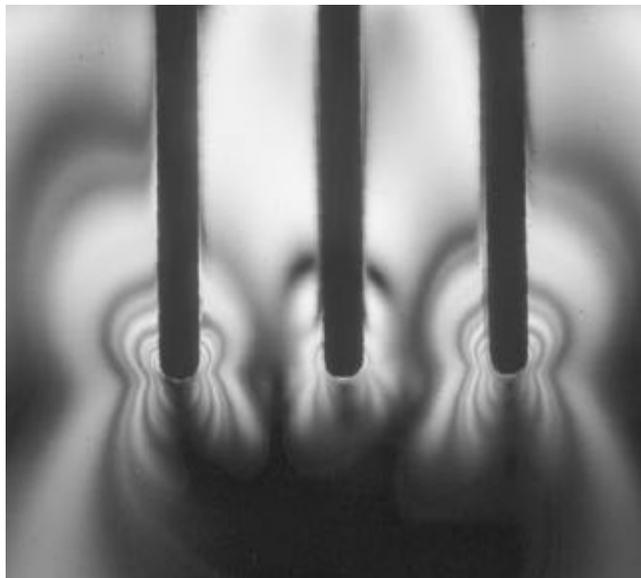


Abbildung 7-8: 3er-Pfahlgruppe unter Druckbelastung

8 Berechnungsmodell für die Ermittlung der Grenzlast eines Druckpfahles

8.1 Modellvorstellung

Ein Pfahl leitet die auf ihn einwirkende Last über Spitzendruck und Mantelreibung in den Baugrund weiter. Hierdurch werden die Größe und Richtung der im Boden auftretenden Spannungen in der Pfahlumgebung im Vergleich zum Ausgangszustand verändert. Als Folge der Wechselwirkung zwischen Spitzendruck und Mantelreibung treten gelegentlich als Gewölbewirkung beschriebene Spannungsumlagerungen in der Pfahlumgebung auf, die analog zum Falltüreffekt von der Zusammendrückung des Bodens unter dem Pfahlfuß ausgelöst werden (Kapitel 2.4, Abbildung 2-8).

Zusätzlich entstehen horizontale Bodenverspannungen durch behinderte Dilatanz, die die Gewölbewirkung begünstigen. Die Bodenkörner in Pfahlnähe werden von der nach unten gerichteten Bewegung des Pfahls erfasst, können dieser jedoch nicht einfach folgen, da sie sich an benachbarten Bodenkörnern vorbeischieben müssen. Das Verschiebungsbestreben wird durch die dichte Lagerung der Bodenkörner behindert, wodurch eine zusätzliche Verspannung im Boden auftritt.

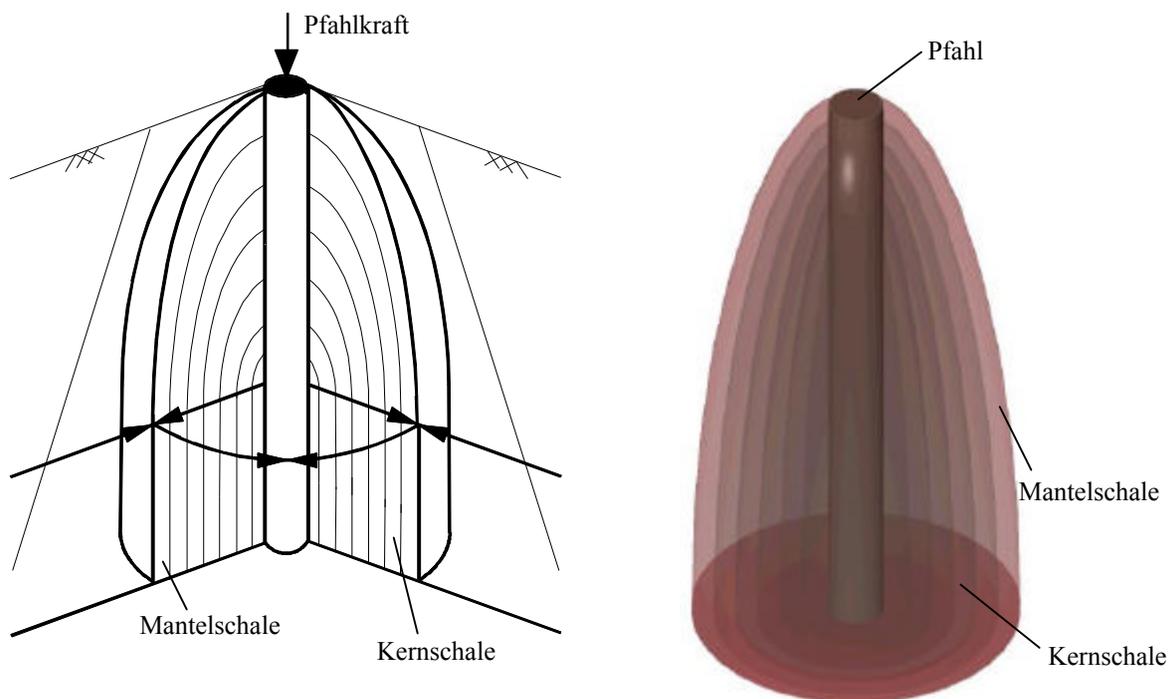


Abbildung 8-1: Entstehende Schalentragwerke bei einer Druckpfahlbelastung

Die erläuterte Gewölbebildung wird in den nachfolgenden Betrachtungen durch die Annahme von rotationssymmetrisch um den Pfahl angeordneten Schalenträgwerken erfasst (Abbildung 8-1). Diese ineinandergeschachtelten Schalenträgwerke bestehen aus nicht zugfestem, granularem Material. Die äußerste Schale wird als Mantelschale, alle innenliegenden Schalen als Kernschalen bezeichnet.

Ausgehend von dem Modell der ineinander geschachtelten Schalenträgwerke wird ein Berechnungsmodell zur Bestimmung der Grenzlast eines Pfahles entwickelt.

8.2 Grundlagen des rechnerischen Ansatzes

a) Geometrie und Bezeichnungen

Der Pfahl wird in n Abschnitte unterteilt, so dass sich einzelne horizontale Elementscheiben mit einer definierten Dicke $\Delta l = h/n$ - mit $h =$ angesetzte Pfahllänge - ergeben. Die auf den Pfahlmantelabschnitt Δl entfallende Mantelreibungskraft wird in die an dieser Stelle beginnende rotationssymmetrische Schale, die z.B. eine parabolische Form haben kann, eingeleitet.

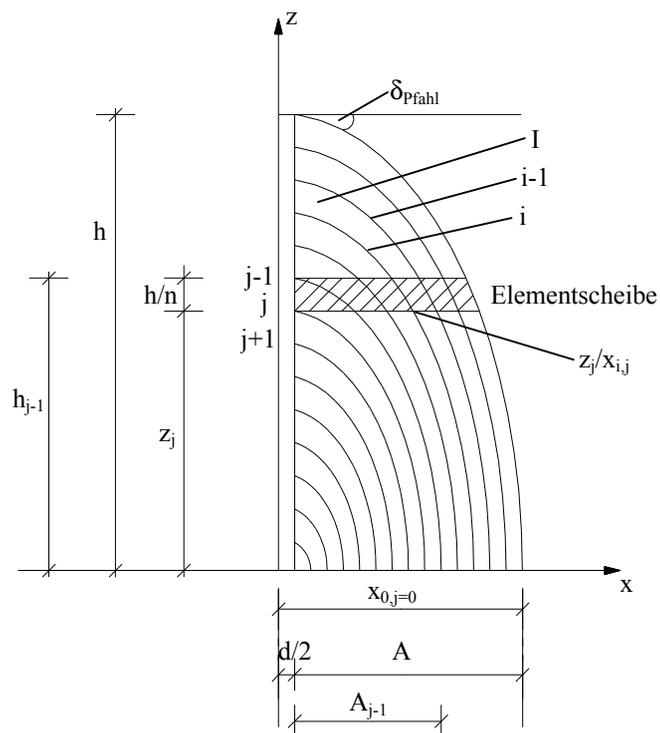


Abbildung 8-2: Schnittführung durch den Schalenkörper

Eine horizontale Elementscheibe der Dicke h/n wird begrenzt durch die Stellen j und $j-1$ (Abbildung 8-2). In dieser Elementscheibe sind j Schalen enthalten. Die einzelnen Schalen werden mit I von $I = 1$ (Mantelschale) bis $I = J$ bezeichnet. Begrenzt wird eine Schale I durch die Begrenzungslinien i und $i-1$ (siehe Abbildung 8-3). Mit A_i wird die Öffnungsweite und mit h_i die Höhe der unteren Begrenzungslinie der Schale I bezeichnet. Durch $z_j/x_{i,j}$ wird ein Punkt auf der unteren Begrenzungslinie i der Schale I in der Tiefe z_j angegeben.

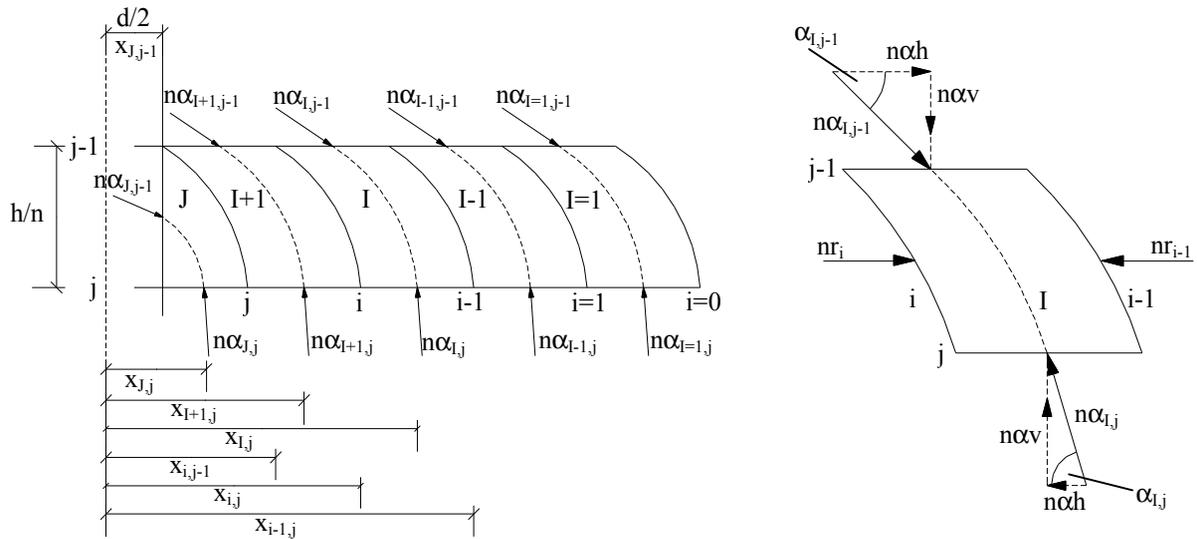
b) Meridiankraft $n\alpha$ in den Schalen

Abbildung 8-3: Horizontale Elementscheibe und einzelnes Schalenelement

In der Abbildung 8-3 ist eine herausgeschnittene horizontale Elementscheibe zwischen den Stellen j und $j-1$ dargestellt. An einem einzelnen Schalenelement I , begrenzt durch die Stellen j und $j-1$ sowie den Begrenzungslinien i und $i-1$, sind die Meridiankräfte $n\alpha_{I,j}$ und $n\alpha_{I,j-1}$ zu betrachten. Wie in Abbildung 8-3 dargestellt, kann die Meridiankraft $n\alpha_I$ in eine vertikale Komponente $n\alpha_v = n\alpha_I \cdot \sin \alpha_I$ und eine horizontale Komponente $n\alpha_h = n\alpha_I \cdot \cos \alpha_I$ zerlegt werden.

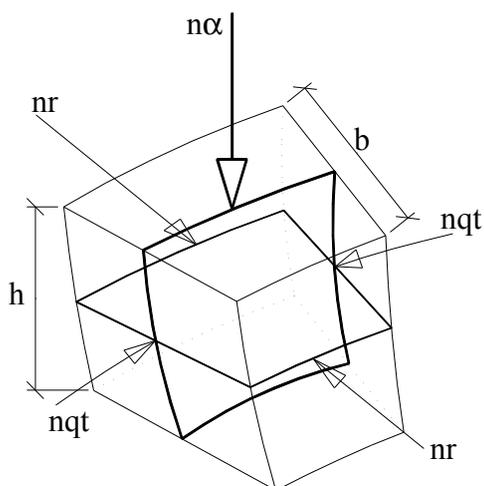
c) Ringkraft nqt und Radialkraft nr 

Abbildung 8-4: Element einer Kernschale und auftretende Kräfte

An dem zunächst im Vertikalschnitt (Abbildung 8-3) betrachteten Element der Schale I treten neben der Meridiankraft $n\alpha$ auch die Tangentialkraft nqt (Ringkraft) und die Radialkraft nr auf (Abbildung 8-4).

Da die Schale aus granularem Material besteht, sind $n\alpha$, nq_t und n_r Druckkräfte, wobei die Ringkraft nq_t und auch die Radialkraft n_r nach der üblichen bodenmechanischen Verfahrungsweise das k -fache der Meridiankraft betragen sollen:

$$nq_{tI} = k_R \cdot n\alpha_I \quad \text{und} \quad nr_I = k_r \cdot n\alpha_I.$$

Es wird vorausgesetzt, dass die Schalenelemente als Folge der als Meridiankraft $n\alpha$ eingeleiteten Pfahlmantelreibung – d.h. $n\alpha$ wächst mit Zunahme der Pfahlbeanspruchung an – in den plastischen Grenzzustand gelangen. Hierdurch soll zunächst das in Abbildung 8-4 betrachtete Einzelement einer Kernschale in radialer Richtung breiter werden. Beginnend vom starren Pfahlmantel (Abbildung 8-5) addieren sich die plastischen Verformungen der in einem horizontalen Schnitt liegenden Schalenelemente in radialer Richtung auf, d.h. die Elemente der inneren Kernschalen drängen die der äußeren Kernschalen weiter nach außen, so dass ein betrachtetes Element (z. B. Element I in Abbildung 8-5) in einen größeren Abstand zum Pfahlmantel gelangt (I'). Da die Schale, zu der das Element I gehört, somit einen größeren Umfang in dem betrachteten Horizontalschnitt erhält (Abbildung 8-5), muß sich das Element I in Ringrichtung plastisch ausdehnen, um den als Folge des größeren Umfangs zur Verfügung stehenden Raum zu füllen und sich so wieder am Nachbarelement abstützen zu können.

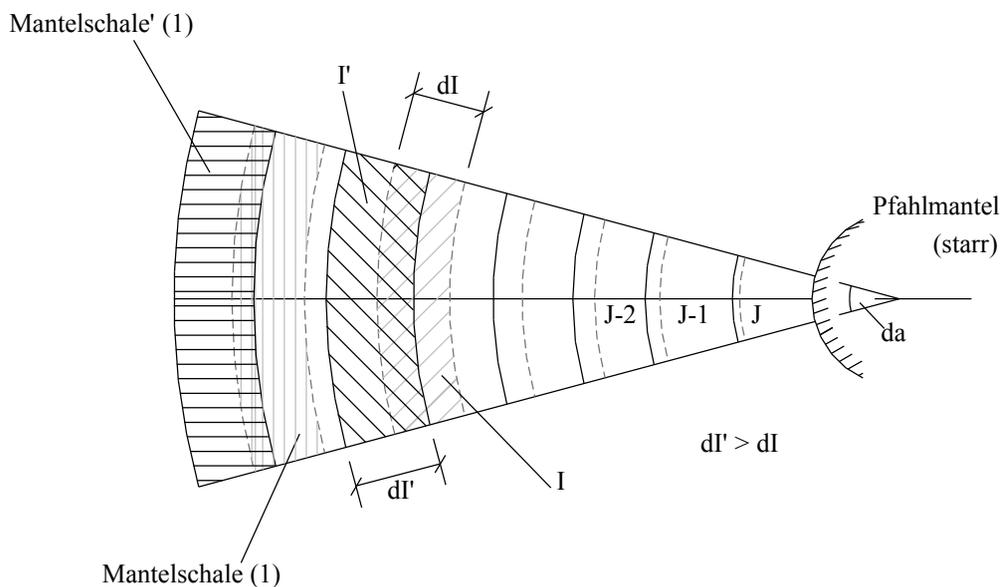


Abbildung 8-5: Horizontaler Schnitt durch die ineinander geschachtelten Schalen
 I = Element einer Kernschale im Ausgangszustand
 I' = Element einer Kernschale nach der plastischen Deformation

Ausgehend von dem Ruhedruckbeiwert k_0 ist also

- der Seitendruckfaktor für die Ringkraft $k_R = nq_t/n\alpha$ abfallend in Richtung auf den aktiven Erddruckbeiwert zu erwarten, wohingegen

- der Seitendruckbeiwert für die Radialkraft $k_r = nr/n\alpha$ ansteigend mit Tendenz zum Erdwiderstandsbeiwert zu erwarten, da eine Verdrängung der Bodenelemente in radialer Richtung erfolgt.

d) Gleichgewicht der Kräfte

Als Grundgedanke des rechnerischen Ansatzes zur Bestimmung der im Pfahlabschnitt j bis $j-1$, d.h. auf der Pfahlmantelfläche $\frac{h}{n} \cdot \pi \cdot d$, in den Boden eingeleiteten Mantelreibungskraft gilt die Erfüllung des Gleichgewichtes der Vertikal- und Horizontalkräfte an der horizontalen, sektorförmigen Elementscheibe mit dem Öffnungswinkel $d\alpha$ (Abbildung 8-7) und der Dicke h/n , die in der Tiefe z_j bis z_{j-1} liegt (Abbildung 8-2).

An dieser sektorförmigen Elementscheibe sind die Radialkräfte nr_i zwischen den Kernschalen innere Kräfte (siehe Abbildung 8-3 rechts) und werden nicht freigeschnitten. Am Pfahlmantel tritt die Horizontalkomponente der Meridiankraft $n\alpha_{i,j}$ als Ringkraft auf (siehe Abbildung 8-3). Am Außenrand ($i = 0$) der Mantelschale ($I = 1$) wird das Schalenpaket durch die Bodenreaktionsspannung (e_r) gestützt (siehe Abbildung 8-7).

e) Erfüllung von ΣV

Die Meridiankraft $n\alpha_{i,j}$ am unteren Rand des in der sektorförmigen Elementscheibe liegenden Elementes der Schale I (siehe Abbildung 8-3 rechts) ergibt sich mit $\Sigma V = 0$ aus der Meridiankraft $n\alpha_{i,j-1}$ am oberen Rand der sektorförmigen Elementscheibe unter Einbeziehung des Elementeigengewichtes. Die Meridiankraft $n\alpha_{i,j-1}$ ist aus dem vorangegangenen Rechenschritt an der darüberliegenden Elementscheibe bekannt. Das Gleichgewicht der Horizontalkräfte stellt sich aus der Abbildung 8-6 und der Abbildung 8-7 wie unter f) folgt dar.

f) Erfüllung von ΣH

Die nach außen gerichtete resultierende Kraft $dn\alpha_{i,j}$ des in der sektorförmigen Elementscheibe liegenden Elementes der Schale I kann aus den Meridiankräften $n\alpha_{i,j}$ und $n\alpha_{i,j-1}$ unter Berücksichtigung der Ringkraft $nq_{t_1} = k_R \cdot (n\alpha_{i,j-1} + n\alpha_{i,j}) \cdot \frac{1}{2}$ bestimmt werden (Abbildung 8-6 und Abbildung 8-7):

$$dn\alpha_{i,j} = n\alpha_{i,j-1} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} + x_{I,j-1} \cdot \cos \alpha_{I,j-1} \right) + n\alpha_{i,j} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} - x_{I,j} \cdot \cos \alpha_{I,j} \right)$$

Diese in den Elementen aller Schalen von $I = 1$ bis $I = J$, die von den Rändern j und $j-1$ der sektorförmigen Elementscheibe geschnitten werden, auftretenden Kräfte $dn\alpha$ werden aufaddiert.

Für die Schale J der horizontalen Elementscheibe, die direkt an den Pfahl angrenzt, ist am Pfahl die Auflagerkraft $n\alpha_{J,j-1}$ zu berücksichtigen (Abbildung 8-6) und vorab getrennt (siehe Kapitel 8.5) zu berechnen.

Für eine horizontale sektorförmige Elementscheibe mit dem Öffnungswinkel $d\alpha$ ergibt sich dann die nachfolgende Gleichung für das Gesamtgleichgewicht in horizontaler Richtung (Abbildung 8-6).

$$\left(er_{0,j-1} \cdot x_{0,j-1} + er_{0,j} \cdot x_{0,j} \right) \cdot 0,5 \cdot \frac{h}{n} = \sum_{i=1}^J \left[n\alpha_{i,j-1} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} + x_{i,j-1} \cdot \cos \alpha_{i,j-1} \right) + n\alpha_{i,j} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} - x_{i,j} \cdot \cos \alpha_{i,j} \right) \right] \quad (\text{GL. 8-1})$$

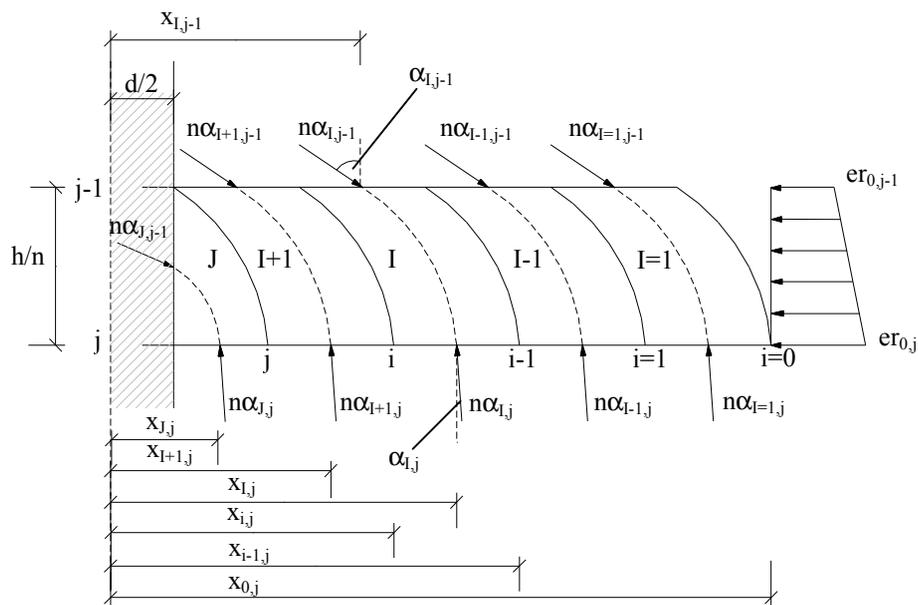


Abbildung 8-6: Kräfte an einer horizontalen Elementscheibe

g) Ermittlung der Mantelreibungskraft

Die Größe der Meridiankraft $n\alpha_{i,j-1}$ wird – wegen des geringen Einflusses aus dem Eigengewicht des Elementes der Schale J – vor allem durch die auf den Pfahlabschnitt j bis $j-1$ übertragbare Mantelreibungskraft bestimmt (siehe Kapitel 9). Durch Erfüllen des horizontalen Gleichgewichtes an der sektorförmigen Elementscheibe, d.h. durch Auswertung der Gleichung 8-1, wird mit einer Annahme über die Größe der stützenden Spannung er die Meridiankraft $n\alpha_{i,j-1}$ und hieraus schließlich die auf den anteiligen Pfahlabschnitt entfallende Mantelreibungskraft bestimmt. Die Aufsummation der Mantelreibungskraft über die n Elementscheiben liefert die Grenzlast des Druckpfahles.

tragung über die Pfahlfußfläche werden der Pfahlschaft fiktiv und damit auch die Schalen um ein noch festzulegendes Maß f über den Pfahlfuß hinaus verlängert. Begründet wird dies mit einer starken Verdichtung des Bodens unter dem Pfahlfuß als Folge der über die Pfahlfußfläche in den Boden abgetragenen Last. Der verdichtete Bereich wird als „imaginärer“ Pfahl zur eigentlichen Pfahllänge hinzuaddiert (Abbildung 8-8). Analog zur Lastabtragung über die Mantelfläche werden dann an der Pfahlverlängerung weitere Schalen angesetzt bzw. oberhalb beginnende Schalen werden verlängert, und die Fußfläche des realen Pfahles folglich als eine Art „verlängerte Mantelfläche“ im Rechenmodell erfasst. In der Fußfläche des verlängerten Pfahles treten dann annahmegemäß keine von der Belastung des Pfahles verursachten Spannungen auf.

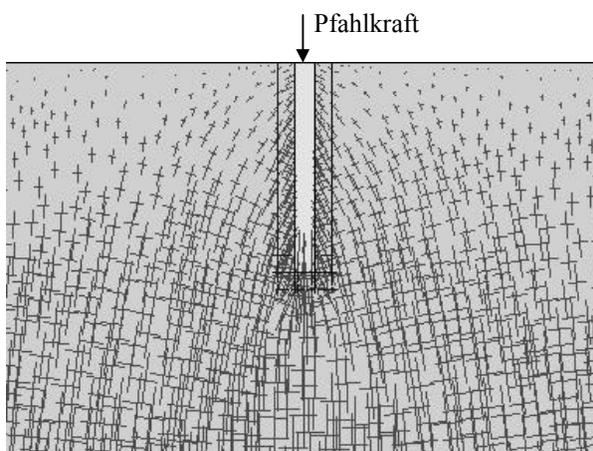
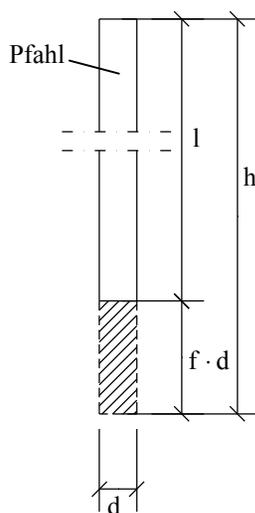


Abbildung 8-8: Orientierung der Hauptspannungen bei Pfahlbelastung aus einer FE-Modellierung

Das Maß f der für die Berücksichtigung der Lastabtragung über die reale Pfahlfußfläche angeetzten Pfahlverlängerung wird zunächst mit dem 5-fachen Pfahldurchmesser festgelegt (Abbildung 8-9). In der Literatur werden Werte vom 3 bis 5-fachen Pfahldurchmesser angegeben, in denen eine Verdichtung des Bodens unter dem belasteten Pfahl zu bemerken ist.



Rechnerische Pfahlhöhe h :

$$h = l + f \cdot d$$

l = Pfahllänge, d = Pfahldurchmesser

Abbildung 8-9: Verlängerung des Pfahles zur rechnerischen Erfassung des Pfahlspitzendrucks

In der Tiefe der rechnerischen Pfahllänge gehen die Schalen tangential von der Parabelform in die Zylinderschalen, die im unbelasteten Zustand den Pfahl rotationssymmetrisch umgeben, über. Die Vertikalauflager der Zylinderschalen, die die auf sie wirkende vertikale Meridiankraft $n\alpha$ nach unten weiterleiten, werden in großer Tiefe angenommen.

8.3.2 Geometrische Beschreibung der im Vertikalschnitt parabelförmigen Rotationsschale

Die Funktionsvorschrift einer parabelförmigen Rotationsschale von m-ter Ordnung lautet (Abbildung 8-10):

$$x(z) = \frac{-A}{h^m} \cdot z^m + A + \frac{d}{2} \quad \text{gültig für } 0 \leq z \leq h. \quad (\text{GL. 8-2})$$

Die Variable z zählt über die Pfahllänge vom fiktiven Pfahlfuß ausgehend positiv nach oben, wobei der fiktive Pfahlfuß in der Tiefe festgelegt ist, die sich aus der wirklichen Pfahllänge zzgl. der oben erläuterten Pfahlverlängerung ergibt (Abbildung 8-9).

Da die maßgebende Gleichgewichtsbedingung (Gleichung 8-1) für einzelne Stellen j ausgewertet wird, wird auch die Schalengeometrie in Abhängigkeit einer Stelle j notiert.

Für eine Stelle j gilt: $z_j = h \cdot \left(1 - \frac{j}{n}\right)$. Desweiteren sind für die einzelnen Schalenberandungen i die zugehörigen Parameter $A_i =$ Öffnungsweite und $h_i =$ Höhe der Schalenberandung einzusetzen.

Die Funktionsvorschrift einer parabelförmigen Rotationsschale wird daher in folgender Form in Abhängigkeit der Stelle j für die Begrenzungslinie i einer Schale I als

$$x_{i,j} = \frac{-A_i}{h_i^m} \cdot z_j^m + A_i + \frac{d}{2}$$

geschrieben.

Die Ableitungen der Parabelgleichung ergeben sich zu :

$$x'_{i,j} = \frac{dx}{dz} = -m \cdot \frac{A_i}{h_i^m} \cdot z_j^{(m-1)} \quad (\text{GL. 8-3})$$

$$x''_{i,j} = \frac{d^2x}{dz^2} = -m \cdot (m-1) \cdot \frac{A_i}{h_i^m} \cdot z_j^{(m-2)} \quad (\text{GL. 8-4})$$

Weiterhin gilt (Abbildung 8-10):

$$ds = \sqrt{dx^2 + dz^2}$$

$$\sin \alpha_{i,j} = \frac{-dz}{ds}$$

$$\cos \alpha_{i,j} = \frac{dx}{ds}$$

$r(z)$ = Radius der Erzeugenden an der Stelle z_j

$rs(z)$ = Krümmungsradius an der Stelle z_j

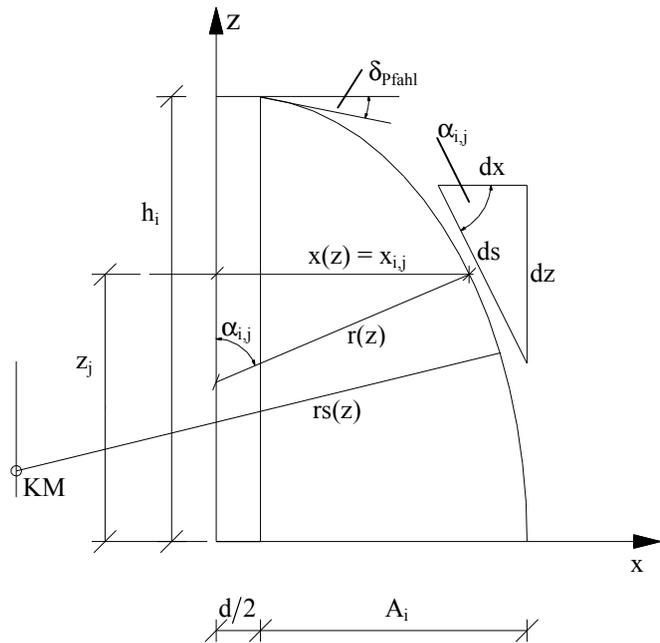


Abbildung 8-10: Geometrie der Parabelschale

Aus GL. 8-3 folgt:
$$\frac{dz}{dx} = \frac{-h_i^m}{m \cdot A_i \cdot z_j^{(m-1)}} = -\tan(\alpha)_{i,j} \quad (\text{GL. 8-5})$$

In Anlehnung an die Abbildung 8-10 und die Parabelgleichung (Gleichung 8-2) ergeben sich folgende Winkelbeziehungen:

$$\sin \alpha(z) = \frac{x(z)}{r(z)} = \frac{-dz}{ds} = \frac{-dz}{\sqrt{dx^2 + dz^2}} = \frac{\frac{-dz}{dx}}{\sqrt{\frac{dx^2}{dx^2} + \frac{dz^2}{dx^2}}} = \frac{\frac{-dz}{dx}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2}}$$

mit Gleichung 8-5 ergibt sich:

$$\sin \alpha_{i,j} = \frac{-\frac{h_i^m}{m \cdot A_i \cdot z_j^{(m-1)}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{-h_i^m}{m \cdot A_i \cdot z_j^{(m-1)}}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{m \cdot A_i \cdot z_j^{(m-1)}}{h_i^m}\right)^2 + 1}} = \frac{1}{\sqrt{1 + m^2 \cdot \left(\frac{A_i}{h_i^m}\right)^2 \cdot z_j^{(m-1) \cdot 2}}}$$

$$\sin \alpha_{i,j} = \frac{1}{\sqrt{1 + m^2 \cdot \left(\frac{A_i}{h_i}\right)^2 \cdot \left(\frac{z_j}{h_i}\right)^{(m-1) \cdot 2}} \quad (\text{GL. 8-6})$$

Bei $z_j = 0$ ist $\sin\alpha$ gemäß Gleichung 8-6: $\sin\alpha(0) = 1$, d.h. $\alpha = 90^\circ$.

Der Neigungswinkel der Schale nimmt also im Definitionsbereich der Schale $0 \leq z \leq h$ die Größe $\delta_{\text{pfahl}} \leq \alpha \leq 90^\circ$ an.

Mit der gleichen Betrachtung der geometrischen Zusammenhänge ergibt sich für den Cosinus des Winkels α :

$$\cos\alpha(z) = \frac{dx}{ds} = \frac{dx}{\sqrt{dx^2 + dz^2}} = \frac{\frac{dx}{dz}}{\sqrt{\frac{dx^2}{dz^2} + 1}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2}}$$

$$\cos\alpha_{i,j} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{-h_i^m}{m \cdot A_i \cdot z_j^{(m-1)}}\right)^2}} = \frac{m \cdot \frac{A_i}{h_i^m} \cdot z_j^{(m-1)}}{\sqrt{1 + m^2 \cdot \left(\frac{A_i}{h_i^m}\right)^2 \cdot z_j^{(m-1)2}}}$$

$$\cos\alpha_{i,j} = \frac{m \cdot \left(\frac{A_i}{h_i}\right) \cdot \left(\frac{z_j}{h_i}\right)^{(m-1)}}{\sqrt{1 + m^2 \cdot \left(\frac{A_i}{h_i}\right)^2 \cdot \left(\frac{z_j}{h_i}\right)^{(m-1)2}}} \quad (\text{GL. 8-7})$$

Der Tangens und Cotangens des Winkels α ergibt sich aus:

$$\tan\alpha_{i,j} = \frac{\sin\alpha_{i,j}}{\cos\alpha_{i,j}} = \frac{1 \cdot \sqrt{1 + m^2 \cdot \left(\frac{A_i}{h_i^m}\right)^2 \cdot z_j^{(m-1)2}}}{\sqrt{1 + m^2 \cdot \left(\frac{A_i}{h_i^m}\right)^2 \cdot z_j^{(m-1)2}} \cdot \left(\frac{A_i}{h_i^m} \cdot m \cdot z_j^{(m-1)}\right)} = \frac{h_i^m}{A_i \cdot m \cdot z_j^{(m-1)}} \quad (\text{GL. 8-8})$$

$$\cot\alpha_{i,j} = \frac{1}{\tan\alpha_{i,j}} = \frac{A_i \cdot m \cdot z_j^{(m-1)}}{h_i^m} = m \cdot \left(\frac{A_i}{h_i}\right) \cdot \left(\frac{z_j}{h_i}\right)^{m-1} \quad (\text{GL. 8-9})$$

8.4 Schalenöffnungsweite A

Die Schalenöffnungsweite A ist ein Parameter, der von der Pfahl- und Schalengeometrie abhängig ist. Wie bereits in Kapitel 8.3.1 angeführt, wird vorausgesetzt, dass die parabolischen Rotationsschalen unter dem Winkel δ_{Pfahl} an den Pfahlmantel anschließen. δ_{Pfahl} ist über die Höhe konstant, da andernfalls die Schalen geometrisch nicht ineinander passen. Die Öffnungsweite A des Gesamtschalenspaketes, d.h. der Bereich, in dem die Pfahllast in den Boden eingeleitet wird, wird von der Mantelschale bestimmt. Für diese gilt an der Stelle $z = h$ (siehe Abbildung 8-10):

$$\cot \delta_{\text{Pfahl}} = \frac{dx}{-dz} = -x'(z = h)$$

Nach Gleichung 8-3 ergibt sich hieraus

$$\cot \delta_{\text{Pfahl}} = m \cdot \frac{A}{h^m} \cdot h^{(m-1)}$$

Damit ist die Öffnungsweite A für die Mantelschale

$$A = \frac{h}{m \cdot \tan \delta_{\text{Pfahl}}} \quad (\text{GL. 8-10})$$

von der rechnerischen Pfahllänge h, dem Grad der Parabel m und von δ_{Pfahl} abhängig. Für eine beliebige Kernschale ergibt sich entsprechend:

$$A_i = \frac{h_i}{m \cdot \tan \delta_{\text{Pfahl}}} \quad (\text{GL. 8-11})$$

8.5 Kraftverlauf in den Schalen

8.5.1 Allgemeine Betrachtung

Die in einer Kernschale auftretende Meridiankraft entsteht auf Grund des Eigengewichts der Schale und infolge der vom Pfahl in die Schale eingeleiteten Mantelreibungskraft, die nachfolgend als Randlast bezeichnet wird (Abbildung 8-11). Die Meridiankraft wird zerlegt in eine vertikale Komponente und eine horizontale Komponente. Aus der Meridiankraft $n\alpha$ ergeben sich dann jeweils mit einem Seitendruckbeiwert k_r multipliziert eine Radialkraft n_r und mit dem Seitendruckbeiwert k_R multipliziert eine Ringkraft n_{qt} (siehe Kapitel 8.1). Die Berechnung von n_r und n_{qt} wie für feste Werkstoffe ist bei dem hier vorhandenen granularem Material nicht möglich. Die am Element angreifende Radialkraft wird jeweils von einer inneren

Kernschale an die nächste, weiter außen liegende weitergereicht bzw. findet dort ihre Gegenkraft.

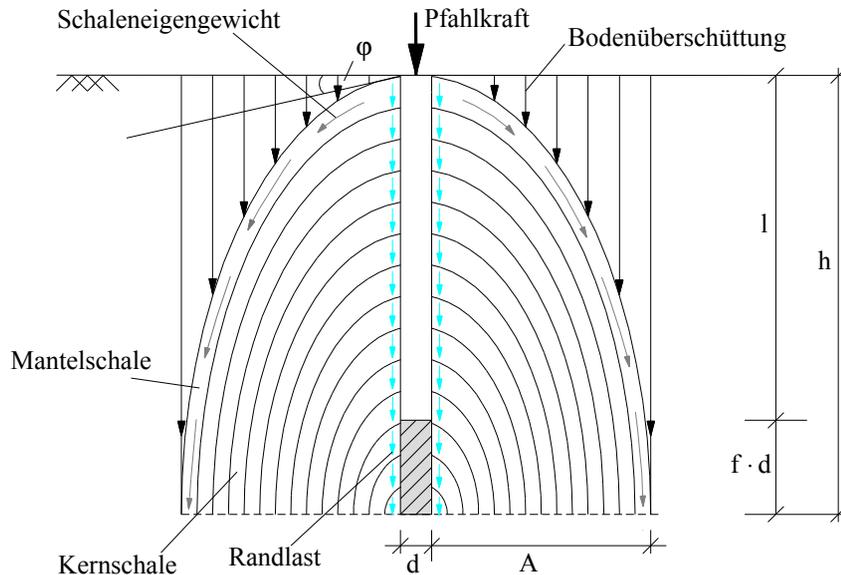


Abbildung 8-11: Schalenkräfte infolge Pfahlbelastung

Auf die Mantelschale wirken ihr Eigengewicht, die in sie eingeleitete Randlast, das Eigengewicht des überlagernden Bodens und die Radialkräfte der letzten Kernschale. Die Mantelschale wird durch die radiale Spannung er gestützt (Gleichung 8-1), die bis zum passiven Erddruck anwachsen kann.

8.5.2 Meridiankraft n_α infolge Schaleneigengewicht für eine Schale I

Da gemäß Kapitel 8.2 das Gleichgewicht einer sektorförmigen horizontalen Elementscheibe mit der Dicke h/n betrachtet wird, kann die Meridiankraft n_α infolge Eigengewicht nicht direkt für eine beliebige Stelle j bestimmt werden, sondern muß als Summe aller darüberliegenden horizontalen Elemente dieser Schale I ermittelt werden.

Zunächst wird dargelegt, wie die Meridiankraft n_α für das Element der Schale I welches direkt an den Pfahl angrenzt, berechnet wird. Hierauf aufbauend kann dann die Meridiankraft für die nachfolgenden Schalenelemente ermittelt werden.

Für das direkt an den Pfahl angrenzende Element hat die Schale I, als letzte von der Elementscheibe $j-1$ bis j erfasste Kernschale die Nummer J (Abbildung 8-12).

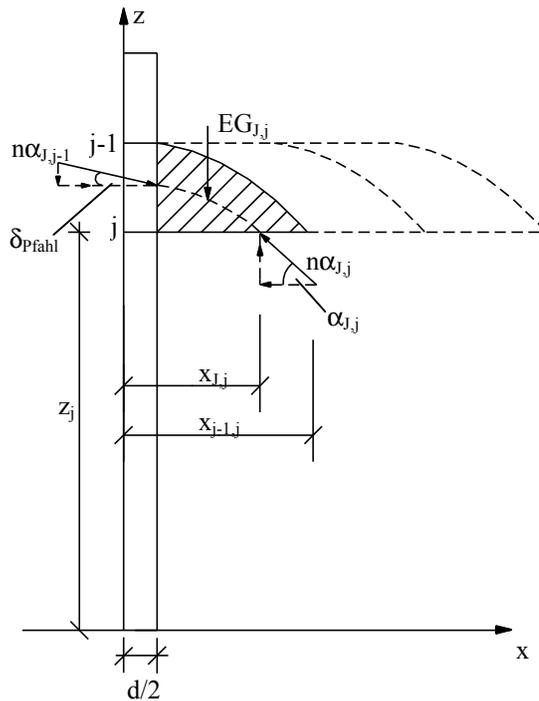


Abbildung 8-12: Element einer Kernschale direkt am Pfahl

Das Eigengewicht des Elementes der Scheibe J (schraffiert dargestellt in Abbildung 8-12) ergibt sich aus dem Volumen des parabolischen Rotationskörpers. In der nachfolgenden Gleichung sind h_{j-1} die Höhe über die sich die Parabel j-1 erstreckt und A_{j-1} die zugehörige Öffnungsweite der oberen parabelförmigen Begrenzungslinie.

$$EG_{J,j} = \gamma \cdot \int_{z=z_j}^{z=z_{j-1}} (\pi \cdot x_{j-1}^2(z) \cdot dz) - \gamma \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot (z_{j-1} - z_j)$$

die Auswertung dieses Integrals mit $x_{j-1}(z) = -\frac{A_{j-1}}{h_{j-1}^m} \cdot z^m + A + \frac{d}{2}$ liefert

$$EG_{J,j} = \pi \cdot \gamma \cdot \left\{ \begin{array}{l} \frac{h_{j-1} \cdot A_{j-1}^2}{2 \cdot m + 1} \cdot \left(1 - \left(\frac{z_j}{h_{j-1}} \right)^{2 \cdot m + 1} \right) - \frac{h_{j-1} \cdot A_{j-1} \cdot (2 \cdot A_{j-1} + d)}{m + 1} \cdot \left(1 - \left(\frac{z_j}{h_{j-1}} \right)^{m + 1} \right) \\ + h_{j-1} \cdot A_{j-1} \cdot (A_{j-1} + d) \cdot \left(1 - \left(\frac{z_j}{h_{j-1}} \right) \right) \end{array} \right\}$$

Aus der Summe der Horizontalkräfte, aufgestellt für die Mittelachse des betrachteten Elementes folgt:

$$\sum H = 0:$$

$$n\alpha EG_{J,j} \cdot \cos \alpha_{J,j} \cdot x_{J,j} \cdot d\alpha = n\alpha EG_{J,j-1} \cdot \cos \alpha_{J,j-1} \cdot x_{J,j-1} \cdot d\alpha$$

$$n\alpha EG_{J,j-1} = n\alpha EG_{J,j} \cdot \frac{\cos \alpha_{J,j} \cdot x_{J,j}}{\cos \alpha_{J,j-1} \cdot x_{J,j-1}}$$

Hier gilt : $\alpha_{J,j-1} = \delta_{\text{Pfahl}}$ und $x_{J,j-1} = \frac{d}{2}$. Daher folgt:

$$n\alpha EG_{J,j-1} = n\alpha EG_{J,j} \cdot \frac{\cos \alpha_{J,j} \cdot x_{J,j}}{\cos \delta_{\text{Pfahl}} \cdot \frac{d}{2}} \quad (\text{GL. 8-12})$$

Die Summe der Vertikalkräfte liefert:

$$\sum V = 0:$$

$$\frac{EG_{J,j}}{2 \cdot \pi} \cdot d\alpha + n\alpha EG_{J,j-1} \cdot \sin \alpha_{J,j-1} \cdot x_{J,j-1} \cdot d\alpha = n\alpha EG_{J,j} \cdot \sin \alpha_{J,j} \cdot x_{J,j} \cdot d\alpha$$

mit Gleichung 8-12 und unter Beachtung von $\alpha_{J,j-1} = \delta_{\text{Pfahl}}$ sowie $x_{J,j-1} = \frac{d}{2}$ ergibt sich:

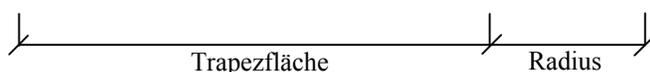
$$n\alpha EG_{J,j} \cdot \left(x_{J,j} \cdot \sin \alpha_{J,j} - \sin \alpha_{J,j-1} \cdot x_{J,j-1} \cdot \frac{\cos \alpha_{J,j} \cdot x_{J,j}}{\cos \alpha_{J,j-1} \cdot x_{J,j-1}} \right) = \frac{EG_{J,j}}{2 \cdot \pi}$$

$$n\alpha EG_{J,j} = \frac{EG_{J,j}}{2 \cdot \pi \cdot x_{J,j} \cdot (\sin \alpha_{J,j} - \tan \delta_{\text{Pfahl}} \cdot \cos \alpha_{J,j})} \quad (\text{GL. 8-13})$$

Wird nun die mit Gleichung 8-13 bekannte Meridiankraft $n\alpha EG_{J,j}$ in die Gleichung 8-12 eingesetzt, ist auch die zwischen Pfahl und Boden wirkende Meridiankraft $n\alpha EG_{J,j-1}$ berechnet. Für die darunterfolgende sektorförmige Elementscheibe (siehe Abbildung 8-13), d.h. die betrachtete Stelle j liegt jetzt um die Scheibendicke h/n tiefer, wird die eben berechnete Meridiankraft $n\alpha EG_{J,j}$ als Kraft $n\alpha EG_{I,j-1}$ an das folgende Element der Schale I weitergegeben.

Das Eigengewicht $EG_{I,j}$ des Elementes der Schale I zwischen den Stellen j und $j-1$ wird näherungsweise durch die Rotation der als Trapez aufgefassten Fläche zwischen den begrenzenden Parabeln i und $i-1$ bestimmt.

$$EG_{I,j} = \frac{h}{2 \cdot n} \cdot \gamma \cdot \left[(x_{i-1,j-1} - x_{i,j-1}) + (x_{i-1,j} - x_{i,j}) \right] \cdot \frac{x_{I,j-1} + x_{I,j}}{2} \cdot 2 \cdot \pi \quad (\text{GL. 8-14})$$



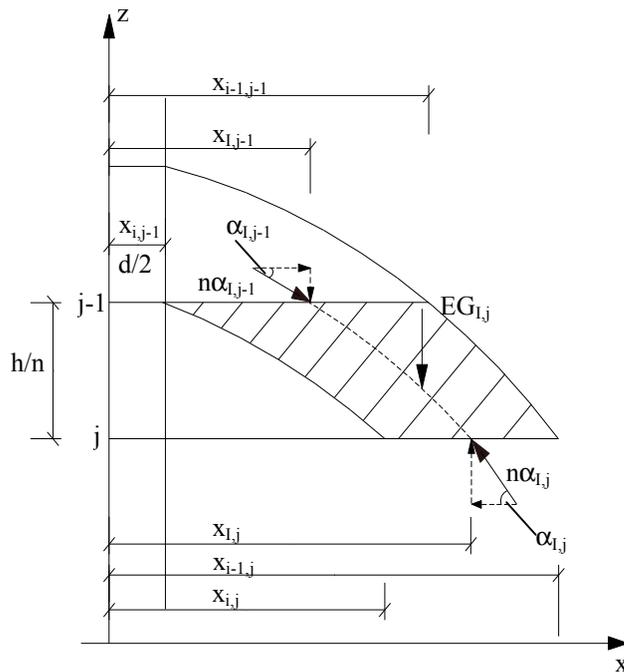


Abbildung 8-13: Element j einer Schale I

Aus $\sum V = 0$ folgt:

$$n\alpha EG_{I,j} \cdot x_{I,j} \cdot \sin \alpha_{I,j} \cdot d\alpha = \frac{EG_{I,j}}{2 \cdot \pi} \cdot d\alpha + n\alpha EG_{I,j-1} \cdot x_{I,j-1} \sin \alpha_{I,j-1} \cdot d\alpha$$

$$n\alpha EG_{I,j} = n\alpha EG_{I,j-1} \cdot \frac{x_{I,j-1} \cdot \sin \alpha_{I,j-1}}{x_{I,j} \cdot \sin \alpha_{I,j}} + \frac{EG_{I,j}}{2 \cdot \pi \cdot x_{I,j} \sin \alpha_{I,j}} \quad (\text{GL. 8-15})$$

$n\alpha EG_{I,j-1}$ ist – wie oben bereits erwähnt - aus der Betrachtung der vorangegangenen horizontalen, sektorförmigen Elementscheibe bekannt.

Im nächsten Schritt wandert die Stelle j wiederum um die Scheibendicke h/n nach unten. Die Meridiankraft $n\alpha EG_{I,j}$ wird hier wieder zu $n\alpha EG_{I,j-1}$. Mit den Gleichungen 8-14 und 8-15 wird die gesuchte Meridiankraft für die neue Stelle j ermittelt.

Die Meridiankraft infolge Schaleneigengewicht wird also von einem Element der Schale I zum nächsten unter Berücksichtigung des Eigengewichtes des neuen Elementes weiter gegeben. Zu beachten ist, dass die Meridiankraft für das „Startelement“ (Abbildung 8-12), welches direkt am Pfahl anliegt, mit der Gleichung 8-12 zu ermitteln ist.

Sind die Meridiankräfte infolge Schaleneigengewicht an den Stellen j und j-1 für das Element j der Schale I bestimmt, kann die von dieser Kernschale I in dem sektorförmigen Scheibenelement nach außen weiterzureichende Kraft ermittelt werden (siehe auch Kapitel 8.2 f):

$$dEG_{I,j} = n\alpha EG_{I,j-1} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} + x_{I,j-1} \cdot \cos \alpha_{I,j-1} \right) + n\alpha EG_{I,j} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} - x_{I,j} \cdot \cos \alpha_{I,j} \right) \quad (\text{GL. 8-16})$$

Für das Gesamtgleichgewicht an der Stelle j muss diese Kraft über alle an der Stelle j geschnittenen Schalen aufsummiert werden.

8.5.3 Meridiankraft $n\alpha$ in der Mantelschale infolge des überlagernden Bodens

Das Eigengewicht des überlagernden Bodens ist nur bei der äußeren Berandung der Mantelschale zu berücksichtigen.

Gemäß Abbildung 8-14 wird zunächst die oberste horizontale sektorförmige Elementscheibe betrachtet, d.h. $j-1 = 0$ und $j = 1$.

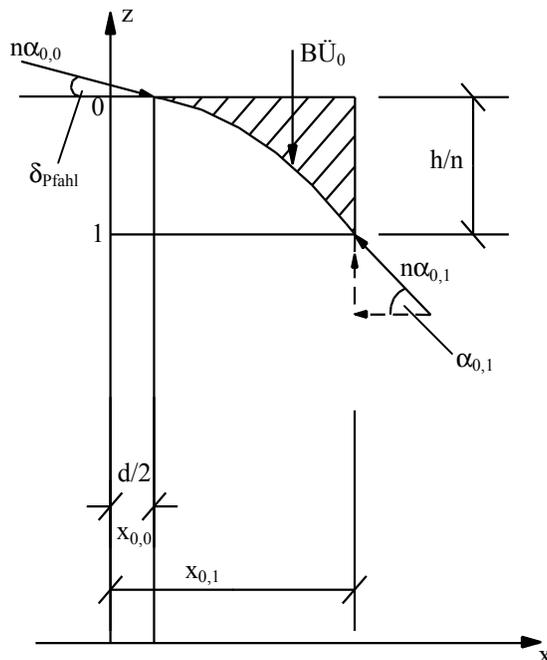


Abbildung 8-14: Bodenüberschüttung erstes Element

Das Gewicht des auf der äußeren Begrenzung der Mantelschale liegenden Bodens ergibt sich aus der Differenz der Volumina des zylindrischen und des parabolischen Rotationskörpers mit

$$z_1 = h_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{n} \right), \quad A_0 = \frac{h_0}{m \cdot \tan \delta_{Pfahl}}, \quad \text{und } h_0 = h$$

zu:

$$B\ddot{U}_0 = \pi \cdot \gamma \cdot \left\{ \begin{aligned} & \left[A_0^2 \cdot \left(\frac{z_1}{h_0} \right)^{2m} - A_0 \cdot (2 \cdot A_0 + d) \cdot \left(\frac{z_1}{h_0} \right)^m \right] \cdot h_0 \cdot \left(1 - \frac{z_1}{h_0} \right) - \frac{A_0^2 \cdot h_0}{2 \cdot m + 1} \cdot \left(1 - \left(\frac{z_1}{h_0} \right)^{2 \cdot m + 1} \right) \\ & + \frac{A_0 \cdot h_0 \cdot (2 \cdot A_0 + d)}{m + 1} \cdot \left(1 - \left(\frac{z_1}{h_0} \right)^{m + 1} \right) \end{aligned} \right\} \quad (\text{GL. 8-17})$$

Die Gleichgewichtsbedingungen ergeben:

$$\sum H = 0:$$

$$n\alpha B\ddot{U}_{0,0} \cdot \cos \alpha_{0,0} \cdot x_{0,0} \cdot d\alpha = n\alpha B\ddot{U}_{0,1} \cdot \cos \alpha_{0,1} \cdot x_{0,1} \cdot d\alpha$$

$$n\alpha B\ddot{U}_{0,1} = n\alpha B\ddot{U}_{0,0} \cdot \frac{\cos \alpha_{0,0} \cdot x_{0,0}}{\cos \alpha_{0,1} \cdot x_{0,1}}$$

$$\text{mit } \alpha_{0,0} = \delta_{\text{Pfahl}} \text{ und } x_{0,0} = \frac{d}{2}:$$

$$n\alpha B\ddot{U}_{0,1} = n\alpha B\ddot{U}_{0,0} \cdot \frac{\cos \delta_{\text{Pfahl}} \cdot \frac{d}{2}}{\cos \alpha_{0,1} \cdot x_{0,1}} \quad (\text{GL. 8-18})$$

$$\sum V = 0:$$

$$n\alpha B\ddot{U}_{0,0} \cdot \sin \alpha_{0,0} \cdot x_{0,0} \cdot d\alpha + \frac{B\ddot{U}_0}{2 \cdot \pi} \cdot d\alpha = n\alpha B\ddot{U}_{0,1} \cdot \sin \alpha_{0,1} \cdot x_{0,1} \cdot d\alpha$$

einsetzen von Gleichung 8-18 liefert

$$n\alpha B\ddot{U}_{0,0} \cdot \sin \alpha_{0,0} \cdot x_{0,0} + \frac{B\ddot{U}_0}{2 \cdot \pi} = n\alpha B\ddot{U}_{0,0} \cdot \frac{\cos \delta_{\text{Pfahl}} \cdot \frac{d}{2} \sin \alpha_{0,1} \cdot x_{0,1}}{\cos \alpha_{0,1} \cdot x_{0,1}}$$

$$n\alpha B\ddot{U}_{0,0} + \frac{B\ddot{U}_0}{2 \cdot \pi \cdot \frac{d}{2} \cdot \sin \delta_{\text{Pfahl}}} = n\alpha B\ddot{U}_{0,0} \cdot \frac{\tan \alpha_{0,1}}{\tan \delta_{\text{Pfahl}}}$$

$$n\alpha B\ddot{U}_{0,0} = \frac{B\ddot{U}_0}{\pi \cdot d \cdot \sin \delta_{\text{Pfahl}} \cdot (\tan \alpha_{0,1} / \tan \delta_{\text{Pfahl}} - 1)} = \frac{B\ddot{U}_0}{\pi \cdot d \cdot (\tan \alpha_{0,1} \cdot \cos \delta_{\text{Pfahl}} - \sin \delta_{\text{Pfahl}})}$$

An einer beliebigen Stelle j kann aus $\sum V = 0$ die Meridiankraft $n\alpha B\ddot{U}_{0,j}$ berechnet werden (siehe Abbildung 8-15):

$$n\alpha B\ddot{U}_{0,0} \cdot \sin \delta_{\text{Pfahl}} \cdot \frac{d}{2} \cdot d\alpha + \frac{B\ddot{U}_j}{2 \cdot \pi} \cdot d\alpha = n\alpha B\ddot{U}_{0,j} \cdot \sin \alpha_{0,j} \cdot x_{0,j} \cdot d\alpha$$

$$n\alpha B\ddot{U}_{0,j} = n\alpha B\ddot{U}_{0,0} \cdot \frac{\sin \delta_{\text{Pfahl}} \cdot \frac{d}{2}}{\sin \alpha_{0,j} \cdot x_{0,j}} + \frac{B\ddot{U}_j}{2 \cdot \pi \cdot x_{0,j} \cdot \sin \alpha_{0,j}} \quad (\text{GL. 8-19})$$

Hierin ist

$$B\ddot{U}_j = \pi \cdot \gamma \cdot \left\{ \left[A_0^2 \cdot \left(\frac{z_j}{h_0} \right)^{2m} - A_0 \cdot (2 \cdot A_0 + d) \cdot \left(\frac{z_j}{h_0} \right)^m \right] \cdot h_0 \cdot \left(1 - \frac{z_j}{h_0} \right) - \frac{A_0^2 \cdot h_0}{2 \cdot m + 1} \cdot \left(1 - \left(\frac{z_j}{h_0} \right)^{2m+1} \right) \right. \\ \left. + \frac{A_0 \cdot h_0 \cdot (2 \cdot A_0 + d)}{m + 1} \cdot \left(1 - \left(\frac{z_j}{h_0} \right)^{m+1} \right) \right\}$$

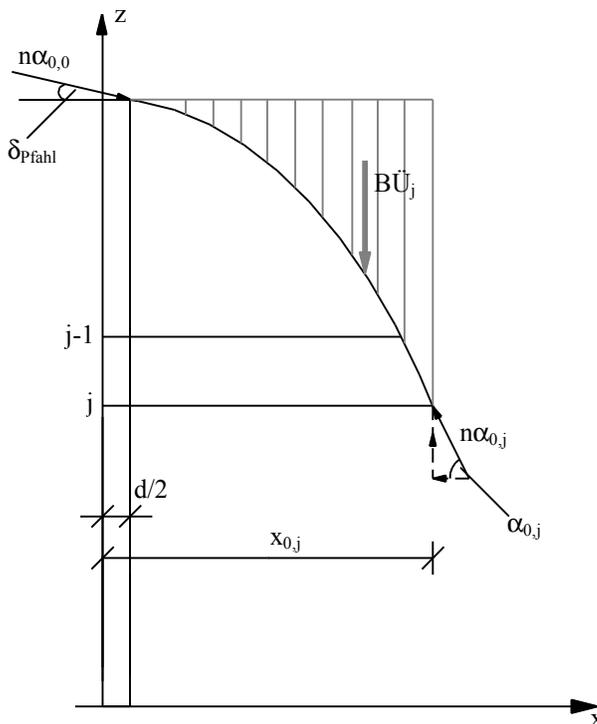


Abbildung 8-15: Bodenüberschüttung für eine beliebige Stelle j

Ist die Meridiankraft infolge Überlagerung für die Stellen j und $j-1$ bestimmt, wird die an der sektorförmigen Elementscheibe $j - (j-1)$ nach außen wirkende Kraft aus der Überlagerung wie folgt erhalten:

$$dB\ddot{U}_{0,j} = n\alpha B\ddot{U}_{0,j-1} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} + x_{0,j-1} \cdot \cos \alpha_{0,j-1} \right) + n\alpha B\ddot{U}_{0,j} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} - x_{0,j} \cdot \cos \alpha_{0,j} \right) \quad (\text{GL. 8-20})$$

8.5.4 Meridiankraft na infolge einer Randlast für eine Kernschale I

Die vom Pfahl in die Kernschale I eingeleitete Kraft RL_I wird als Randlast bezeichnet. Für eine Kernschale I wird die Meridiankraft infolge Randlast an dem in Abbildung 8-16 dargestellten Schnitt hergeleitet.

Direkt am Pfahl ergibt sich infolge der Randlast RL_I eine Meridiankraft von $n\alpha RL_{I,i-1} = \frac{RL_I}{\sin \delta_{\text{Pfahl}}}$.

Aus der Summe der Vertikalkräfte folgt:

$$n\alpha RL_{I,j} \cdot x_{I,j} \cdot \sin \alpha_{I,j} \cdot d\alpha = n\alpha RL_{I,i-1} \cdot x_{I,i-1} \cdot \sin \alpha_{I,i-1} \cdot d\alpha$$

$$n\alpha RL_{I,j} = n\alpha RL_{I,i-1} \cdot \frac{x_{I,i-1} \cdot \sin \alpha_{I,i-1}}{x_{I,j} \cdot \sin \alpha_{I,j}}$$

mit $x_{I,i-1} = \frac{d}{2}$ und $\alpha_{I,i-1} = \delta_{\text{Pfahl}}$ erhält man

$$n\alpha RL_{I,j} = \frac{RL_I}{\sin \delta_{\text{Pfahl}}} \cdot \frac{\frac{d}{2} \cdot \sin \delta_{\text{Pfahl}}}{x_{I,j} \cdot \sin \alpha_{I,j}} = \frac{RL_I \cdot d}{2 \cdot x_{I,j} \cdot \sin \alpha_{I,j}} \quad (\text{GL. 8-21})$$

Ist die Meridiankraft infolge der Randlast für die Stellen j und $j-1$ bestimmt, kann für dieses Schalenelement die nach außen weiterzugebende Kraft wie folgt berechnet werden:

$$dRL_{I,j} = n\alpha RL_{I,j-1} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} + x_{I,j-1} \cdot \cos \alpha_{I,j-1} \right) + n\alpha RL_{I,j} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} - x_{I,j} \cdot \cos \alpha_{I,j} \right) \quad (\text{GL. 8-22})$$

Auch diese Kraft muss über alle an der Stelle j geschnittenen Schalen aufsummiert werden, wenn das horizontale Gesamtgleichgewicht an der sektorförmigen Elementscheibe $j - (j-1)$ betrachtet wird.

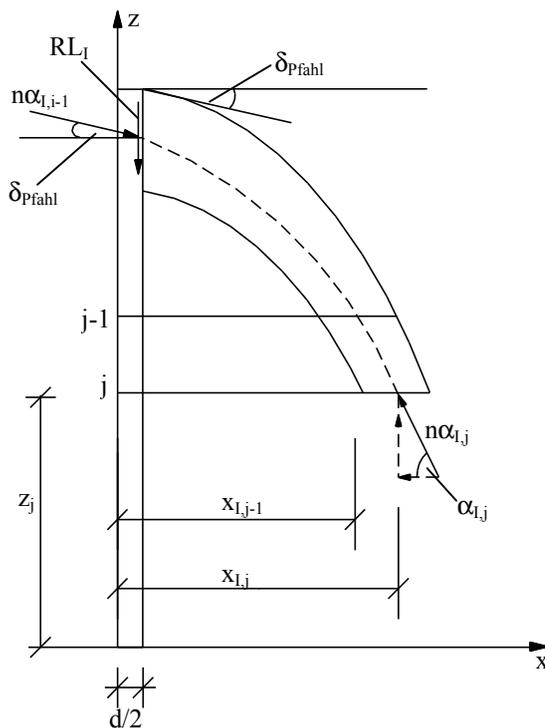


Abbildung 8-16: Schnittprinzip zur Herleitung der Kräfte infolge einer Randlast

8.6 Erddruck auf die Mantelschale

Wie zuvor dargelegt, entsteht an der Mantelschale an jeder Stelle j infolge der durch plastische Deformationen der Kernschalen hervorgerufenen, nach außen gerichteten Verschiebung des Schalenkörpers eine horizontale, über den Ruhedruck hinausgehende stützende Spannung $er_{0,j}$, die bis zum Erdwiderstand anwachsen kann. Die Größe der mobilisierten Erdwiderstandsspannungen in der Tiefe z_j beträgt

$$er_{0,j} = \gamma \cdot (h - z_j) \cdot \kappa \cdot k_{pgh},$$

wobei

$$k_{pgh} = \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \text{ bei } \alpha = \beta = \delta_p = 0 \text{ angesetzt wird} \quad (\text{GL. 8-23})$$

und κ ein Mobilisierungsfaktor ist.

8.7 Gleichgewichtsbedingung

Die zur rechnerischen Ermittlung der Grenzlast des Pfahles maßgebende Gleichgewichtsbedingung wird aus $\sum H = 0$ an einer horizontalen, aus dem Schalenkörper zwischen den Stellen j und $j-1$ herausgeschnittenen sektorförmigen Elementscheibe gewonnen. Wie schon in

Kapitel 8.2 dargelegt (siehe Abbildung 8-6 und Abbildung 8-7) gilt gemäß Gleichung 8-1:

$$\left(\text{er}_{0,j-1} \cdot x_{0,j-1} + \text{er}_{0,j} \cdot x_{0,j} \right) \cdot 0,5 \cdot \frac{h}{n} = \sum_{l=1}^J \left[n\alpha_{l,j-1} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} + x_{l,j-1} \cdot \cos \alpha_{l,j-1} \right) + n\alpha_{l,j} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} - x_{l,j} \cdot \cos \alpha_{l,j} \right) \right]$$

Werden die einzelnen Kraftanteile in diese Gleichung eingesetzt, ergibt sich mit

$$ER_{0,j} = \left(\text{er}_{0,j-1} \cdot x_{0,j-1} + \text{er}_{0,j} \cdot x_{0,j} \right) \cdot 0,5 \cdot \frac{h}{n} :$$

$$ER_{0,j} = \sum_{l=1}^J dEG_{l,j} + dB\ddot{U}_{0,j} + \sum_{l=1}^J dRL_{l,j} \quad (\text{GL. 8-24})$$

$$\begin{aligned} ER_{0,j} = & \sum_{l=1}^J n\alpha EG_{l,j-1} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} + x_{l,j-1} \cdot \cos \alpha_{l,j-1} \right) + n\alpha EG_{l,j} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} - x_{l,j} \cdot \cos \alpha_{l,j} \right) \\ & + \left[n\alpha B\ddot{U}_{0,j-1} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} + x_{0,j-1} \cdot \cos \alpha_{0,j-1} \right) + n\alpha B\ddot{U}_{0,j} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} - x_{0,j} \cdot \cos \alpha_{0,j} \right) \right] \\ & + \sum_{l=1}^J n\alpha RL_{l,j-1} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} + x_{l,j-1} \cdot \cos \alpha_{l,j-1} \right) + n\alpha RL_{l,j} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} - x_{l,j} \cdot \cos \alpha_{l,j} \right) \end{aligned} \quad (\text{GL. 8-25})$$

8.8 Berechnungsmodus

Die formulierte Gleichgewichtsbedingung muss für jede horizontale sektorförmige Elementscheibe, die aus dem Schalentragwerk geschnitten wird, eingehalten werden. Unter dieser Bedingung und bei bekannter Schalengeometrie sowie einer vorgegebenen Größe der die Mantelschale stützenden Erddruckspannungen (mobilisierter Erdwiderstand) kann die Größe der Randlast RL_J , die vom Pfahl auf der Dicke h/n der Elementscheibe in die Schale J eingeleitet wird, aus Gleichung 8-24 bestimmt werden. Die Summe der Randlasten ergibt die Grenzlast des Druckpfahles:

$$Q_{\text{grenz}} = \pi \cdot d \cdot \sum_{J=1}^n RL_J \quad (\text{GL. 8-26})$$

Zur Verdeutlichung dieses Berechnungsmodus wird die Gleichung 8-24 weiter aufgeschlüsselt:

- In der Summe der Meridiankräfte $n\alpha RL$ infolge Randlast ist auch die an der sektorförmigen Elementscheibe wirksame, hier gesuchte Randlast RL_J enthalten. Diese Summe wird aufgespalten in:

$$\begin{aligned} & \sum_{I=1}^J n\alpha RL_{I,j-1} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} + x_{I,j-1} \cdot \cos \alpha_{I,j-1} \right) + n\alpha RL_{I,j} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} - x_{I,j} \cdot \cos \alpha_{I,j} \right) \\ &= \sum_{I=1}^{J-1} n\alpha RL_{I,j-1} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} + x_{I,j-1} \cdot \cos \alpha_{I,j-1} \right) + n\alpha RL_{I,j} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} - x_{I,j} \cdot \cos \alpha_{I,j} \right) \\ & \quad + n\alpha RL_{J,j-1} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} + x_{J,j-1} \cdot \cos \alpha_{J,j-1} \right) + n\alpha RL_{J,j} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} - x_{J,j} \cdot \cos \alpha_{J,j} \right) \end{aligned}$$

mit $x_{J,j-1} = \frac{d}{2}$, $\alpha_{j,j-1} = \delta_{\text{Pfahl}}$ und $n\alpha RL_{J,j-1} = \frac{RL_J}{\sin \delta_{\text{Pfahl}}}$ und $n\alpha RL_{J,j} = \frac{RL_J \cdot d}{2 \cdot x_{J,j} \cdot \sin \alpha_{J,j}}$

folgt

$$\begin{aligned} & \sum_{I=1}^J n\alpha RL_{I,j-1} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} + x_{I,j-1} \cdot \cos \alpha_{I,j-1} \right) + n\alpha RL_{I,j} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} - x_{I,j} \cdot \cos \alpha_{I,j} \right) \\ &= \sum_{I=1}^{J-1} n\alpha RL_{I,j-1} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} + x_{I,j-1} \cdot \cos \alpha_{I,j-1} \right) + n\alpha RL_{I,j} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} - x_{I,j} \cdot \cos \alpha_{I,j} \right) \\ & \quad + \frac{RL_J}{\sin \delta_{\text{Pfahl}}} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} + \frac{d}{2} \cdot \cos \delta_{\text{Pfahl}} \right) + \frac{RL_J \cdot d}{2 \cdot x_{J,j} \cdot \sin \alpha_{J,j}} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} - x_{J,j} \cdot \cos \alpha_{J,j} \right) \\ &= \sum_{I=1}^{J-1} n\alpha RL_{I,j-1} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} + x_{I,j-1} \cdot \cos \alpha_{I,j-1} \right) + n\alpha RL_{I,j} \cdot \left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} - x_{I,j} \cdot \cos \alpha_{I,j} \right) \\ & \quad + RL_J \cdot \left[\frac{\left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} + \frac{d}{2} \cdot \cos \delta_{\text{Pfahl}} \right)}{\sin \delta_{\text{Pfahl}}} + \frac{\left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} - x_{J,j} \cdot \cos \alpha_{J,j} \right) \cdot d}{2 \cdot x_{J,j} \cdot \sin \alpha_{J,j}} \right] \end{aligned}$$

- Setzt man dies in die Gleichung 8-24 ein, ergibt sich:

$$\begin{aligned} ER_{0,j} &= \sum_{I=1}^J dEG_{I,j} + dB\ddot{U}_{0,j} + \sum_{I=1}^{J-1} dRL_{I,j} \\ & \quad + RL_J \cdot \left[\frac{\left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} + \frac{d}{2} \cdot \cos \delta_{\text{Pfahl}} \right)}{\sin \delta_{\text{Pfahl}}} + \frac{\left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} - x_{J,j} \cdot \cos \alpha_{J,j} \right) \cdot d}{2 \cdot x_{J,j} \cdot \sin \alpha_{J,j}} \right] \end{aligned}$$

Aufgelöst nach der gesuchten Randlast RL_J entsteht:

$$\begin{aligned}
 & ER_{0,j} - \sum_{l=1}^j dEG_{l,j} - dB\ddot{U}_{0,j} - \sum_{l=1}^{j-1} dRL_{l,j} \\
 RL_j = & \left[\frac{\left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} + \frac{d}{2} \cdot \cos \delta_{\text{Pfahl}} \right)}{\sin \delta_{\text{Pfahl}}} + \frac{\left(0,5 \cdot k_R \cdot \frac{h}{n} - x_{J,j} \cdot \cos \alpha_{J,j} \right)}{2 \cdot x_{J,j} \cdot \sin \alpha_{J,j}} \right] \cdot d
 \end{aligned} \tag{GL. 8-27}$$

Das Vorgehen zur Bestimmung der Grenzlast eines Druckpfahles ist wie folgt:

- Festlegung der geometrischen Größen: Pfahllänge l , Pfahldurchmesser d , Faktor f ; hieraus $h = l + f \cdot d$; Wahl des Parameters m der Parabelschalen und deren Anzahl n ; mit n wird auch die Anzahl der horizontalen, sektorförmigen Scheiben festgelegt; Wahl des Winkels δ_{Pfahl}
- Bestimmung von k_{pgh} (Gleichung 8-23) und k_{agh} ; Wahl des Mobilisierungsfaktors κ
- Berechnung der geometrischen Größen h_i und A_i für alle $n+1$ Schalenränder:
 $h_i = h \cdot \left(1 - \frac{i}{n} \right)$; A_i nach Gleichung 8-11, i läuft von 0 bis n .
- Auswertung der Gleichung 8-27 für die Tiefe $z_1 = h \cdot \left(1 - \frac{1}{n} \right)$. Der Index für z gibt den Rechenschritt und damit gleichzeitig die Anzahl der in der Tiefe z geschnittenen Schalen an. Die Auswertung der Gleichung 8-27 in Verbindung mit den Gleichungen 8-16 und 8-20 – weitere $n \times RL$ sind nicht zu berücksichtigen – für $j = 1$ liefert die Randlast RL_1 .
- Auswertung der Gleichung 8-27 für die Tiefe $z_2 = h \cdot \left(1 - \frac{2}{n} \right)$, d.h. für $j = 2$, in Verbindung mit den Gleichungen 8-16, 8-20 und 8-22 liefert die Randlast RL_2 .
- usw. für weitere Tiefen $z_j = h \cdot \left(1 - \frac{j}{n} \right)$, bis durch die Ansatzbreiten h/n aller n Schalen je eine horizontale Elementscheibe geführt wurde. Da in jedem Schnitt die Randlasten aller vom Schnitt erfassten Schalen eingehen, muss die Gleichung 8-27 schrittweise von oben nach unten ausgewertet werden. Der Rechenaufwand ist erheblich, da für jede Tiefe z_j die Gleichungen 8-16, 8-20 und 8-22 für alle im Schnitt enthaltenen Schalen (Anzahl j) neu ausgewertet werden müssen.

Ergibt sich in einer Tiefe z_j ein negativer Wert für die Randlast, kann offensichtlich an dieser Stelle keine Mantelreibungskraft vom Pfahl in den Boden eingeleitet werden. Daher wird die entsprechende Randlast zu Null gesetzt. Rechnerisch negative Randlasten treten gelegentlich am Pfahlkopf und/oder am Pfahlfuß auf:

- am Pfahlkopf kann die Schale offensichtlich nur die Kräfte aus Eigengewicht weiterleiten.

- eine negative Randlast im unteren Bereich des rechnerisch verlängerten Pfahles kann darauf hin deuten, dass die Pfahlverlängerung, mit z.B. $5d$, zu groß gewählt wurde.

9 Anwendung des Berechnungsansatzes

9.1 Anwendung auf die Modellversuche

9.1.1 Grundlegende Berechnungsannahmen

Der in Kapitel 8 erläuterte Berechnungsansatz wird auf die durchgeführten Modellversuche an Einzelpfählen angewendet, wobei von folgenden grundlegenden Annahmen ausgegangen wird:

- In den Einzelpfahlversuchen werden Pfahlmodelle mit Bodenverbund verwendet. Der Winkel δ_{Pfahl} , unter dem die rechnerisch angenommenen Schalentragwerke an den Pfahl anschließen, ist daher identisch mit dem Reibungswinkel φ des Bodens.
- Die Ringkraft n_{qt} wird aus der Meridiankraft $n\alpha$ mit dem Erddruckbeiwert $k_R = k_{\text{agh}} = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$ ermittelt.
- Die Ordnungszahl m der Parabelschalen wird für die erste Darstellung von Ergebnissen des Berechnungsansatzes zunächst mit $m = 3$ festgelegt.
- Die Größe der Pfahlverlängerung zur Berücksichtigung des Spitzendrucks wird hier mit $f = 5$ angenommen.
- Hieraus berechnet sich mit Gleichung 8-13 die Öffnungsweite der Mantelschale zu

$$\frac{A}{h} = \frac{1}{m \cdot \tan \delta_{\text{Pfahl}}} \quad \text{mit } h = l + 5 \cdot d. \quad \text{Bei } m = 3 \text{ und } \delta_{\text{Pfahl}} = \varphi = 40^\circ \text{ folgt } \frac{A}{h} = 0,397.$$

Die Abbildung 9-1 zeigt einen Schnitt durch die ineinander geschachtelten Schalen, wobei die Schalenmittellinien bei einer gewählten Schalenanzahl von $n = 10$ dimensionslos dargestellt sind. Für den Pfahltyp T22 mit $l = 200 \text{ mm}$, $d = 25 \text{ mm}$, d.h. $h = 200 + 5 \cdot 25 = 325 \text{ mm}$, ist $A = 129,11 \text{ mm}$.

- Generell wird gemäß Gleichung 8-1 der die Mantelschale stützende Erddruck als Erdwiderstandsspannung angesetzt. Da in den Modellversuchen die Pfahlgrenzlast gemessen wurde, kann nach Festlegung der o.g. Parameter ein Erdwiderstandsmobilisierungsfaktor κ : $e_r = (\kappa \cdot k_{\text{pgh}}) \cdot \gamma \cdot (h - z)$ mit $k_{\text{pgh}} = \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)$ berechnet werden, der zur Erzeugung des Gleichgewichts in den ineinandergeschachtelten Schalentragwerken unter Einwirkung der Pfahlgrenzlast erforderlich ist. Es muss vorausgesetzt werden, dass κ über die Höhe h konstant ist, wenn die Verteilung der Mantelreibung (Randlasten) über die Höhe h nicht vorgegeben wird, sondern sich aus der Gleichgewichtsbedingung (Gleichung 8-27) berechnet. Wäre z.B. aus Messungen die Verteilung der Mantelreibung bekannt, könnte auch der Beiwert $(\kappa \cdot k_{\text{pgh}})$ des „mobilisierten Erdwiderstandes“ in Abhängigkeit von der Tiefe des betrachteten Horizontalschnittes berechnet werden.

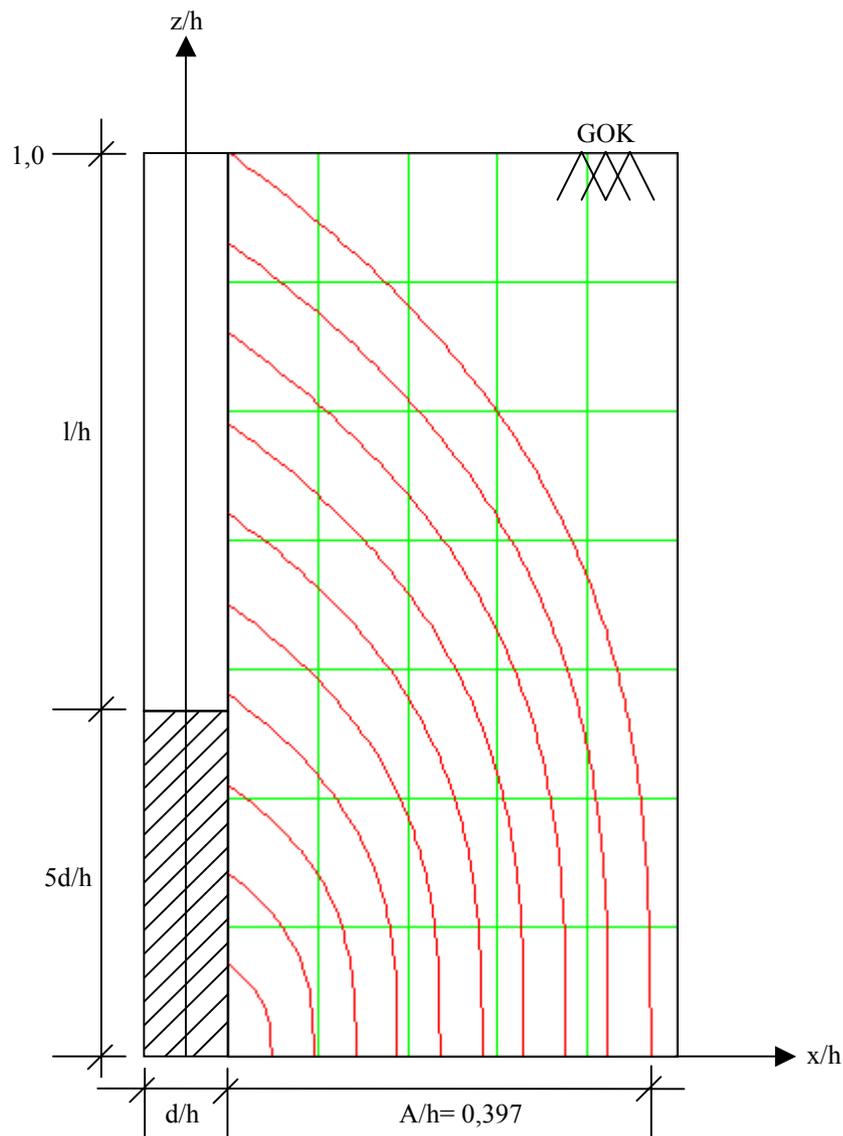
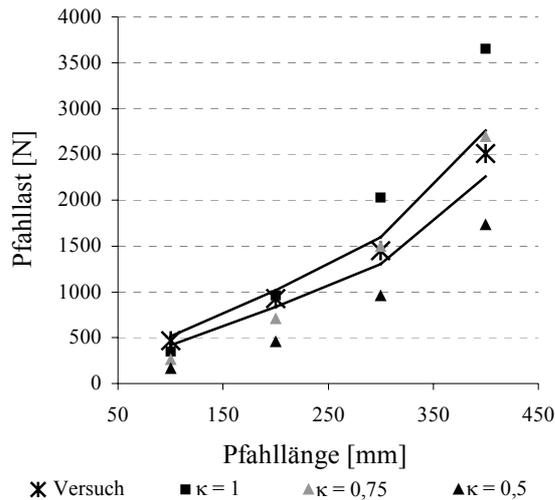
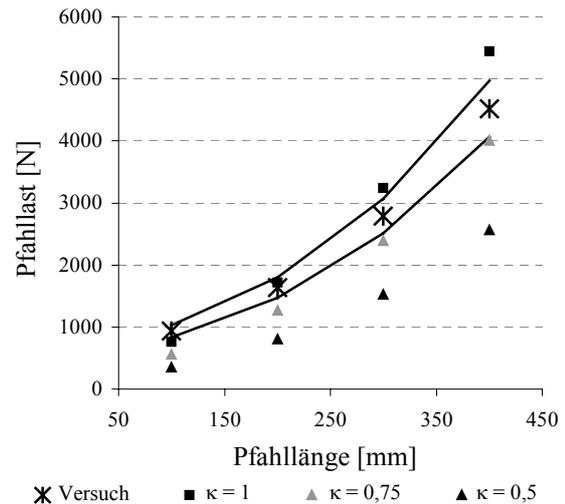


Abbildung 9-1: Schalenmittellinien in dimensionsloser Darstellung bei $m = 3$, $f = 5$ und $l/d = 4$

In der Abbildung 9-2 sind die in den Versuchen gemessenen Pfahlgrenzlasten und die mit unterschiedlichen Mobilisierungsfaktoren κ berechnete Grenzlast aufgetragen. Bei den einzelnen Pfahltypen sind gemäß Abbildung 9-2 unterschiedlich große Mobilisierungsfaktoren in einem Bereich von $0,75 \leq \kappa \leq 1,0$ anzusetzen, wenn eine Abweichung von 10 % (eingetragene Linien in den Diagrammen) zwischen den gemessenen und berechneten Grenzlasten akzeptiert wird.



a) Typ T2x (d = 25 mm)



b) Typ T4x (d = 37,5 mm)

Abbildung 9-2: Erdwiderstandsanteile einzelner Pfahltypen

Ziel der Berechnungen wird es daher sein, den Mobilisierungsfaktor κ in Abhängigkeit von der Pfahlgeometrie zu ermitteln.

9.1.2 Berechnungsbeispiel

a) Eingabedaten (Beispiel Pfahltyp T22):

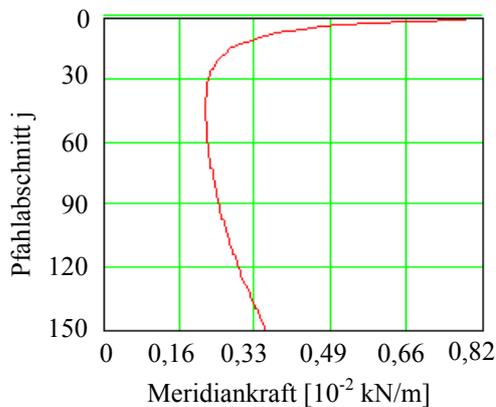
Pfahldurchmesser	$d = 0,025$	[m]
Pfahllänge	$l = 0,2$	[m]
Pfahlverlängerungsfaktor	$f = 5$	[-]
fiktive Pfahllänge	$h = l + f \cdot d$	[m]
Bodenwichte unter Auftrieb	$\gamma' = 10,0$	[kN/m ³]
Reibungswinkel des Bodens	$\varphi = 40$	[°]
Winkel, unter dem die Schalen auf den Pfahl treffen	$\delta_{\text{Pfahl}} = 40$	[°]
Erddruckbeiwerte ($\alpha = \beta = \delta = 0$)	$k_R = k_{\text{agh}} = 0,2174$	[-]
	$k_{\text{pgh}} = 4,599$	[-]
Schalenzahl (gewählt)	$n = 150$	[-]
Ordnung m der Parabelschale	$m = 3$	[-]
Mobilisierungsfaktor	$\kappa = 1,0$	[-]

In den nachfolgenden Diagrammen ist die Ordinate in Pfahlabschnitten angegeben. Die Höhe z ($z = 0$ liegt am fiktiven Pfahlfuß) ergibt sich mit $z = \text{Pfahlabschnitt} \cdot h/n$ (im Beispiel $n = 150$).

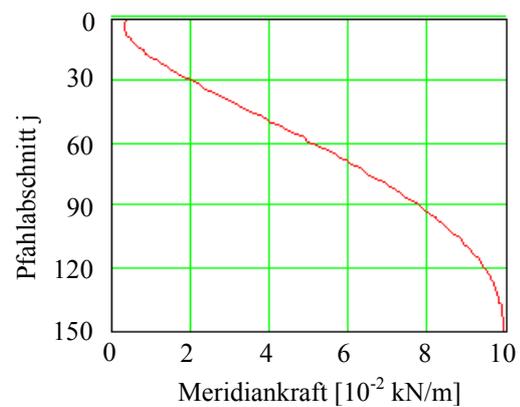
In der Abbildung 9-3a ist der Verlauf der Meridiankraft in der Mantelschale infolge ihres Eigengewichtes (Auswertung der Gleichung 8-15) und in Abbildung 9-3b infolge Bodenüberschüttung (Gleichung 8-19) angegeben. Für dieses Beispiel eines Modellpfahles ist

die Meridiankraft infolge Bodenüberschüttung wesentlich größer als diejenige infolge Eigengewicht.

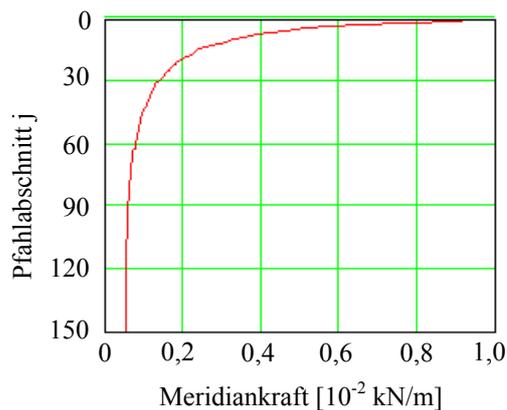
b) Meridiankraft $n\alpha$ in der Mantelschale (Schale 1) bei $\kappa = 1,0$



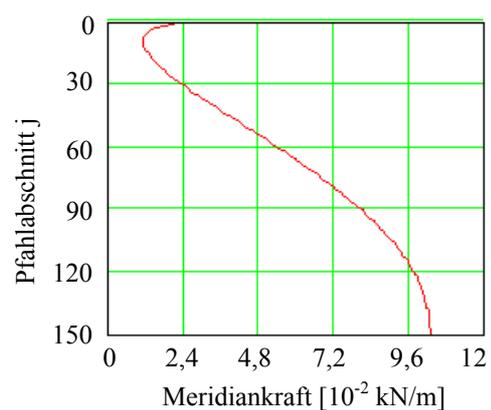
a) $n\alpha$ infolge Eigengewicht ($n\alpha EG$)



b) $n\alpha$ infolge Bodenüberschüttung ($n\alpha BÜ$)



c) $n\alpha$ infolge Randlast ($n\alpha RL$)



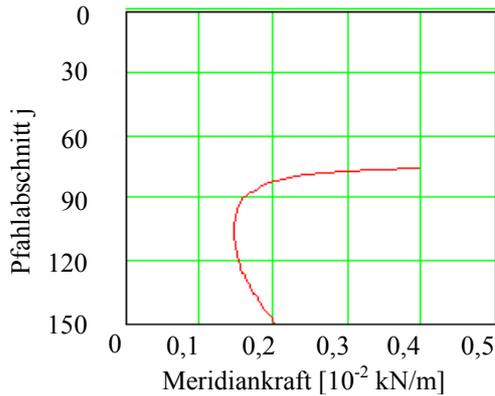
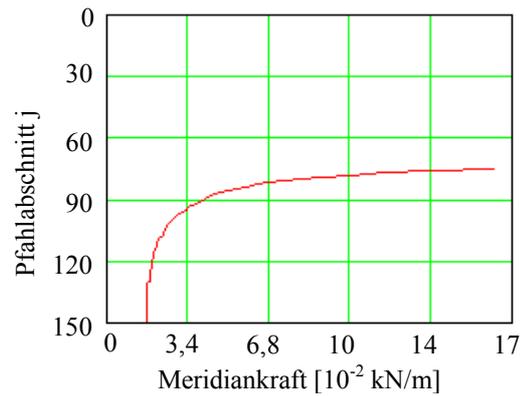
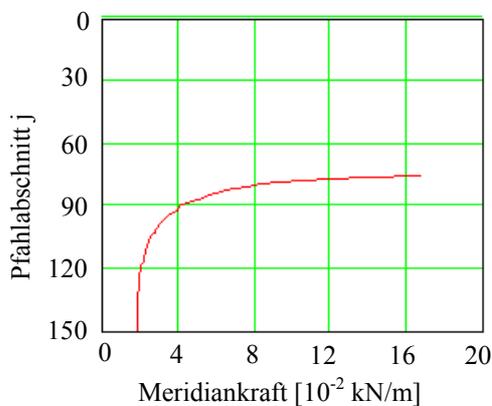
d) $n\alpha = n\alpha EG + n\alpha BÜ + n\alpha RL$

Abbildung 9-3: Kräfte in der Mantelschale

Der Verlauf der Meridiankraft in der Mantelschale infolge der Randlast (Gleichung 8-21) ist der Abbildung 9-3c zu entnehmen. Die in die Mantelschale am Pfahlkopf eingeleitete Mantelreibungskraft ist klein, da die Stützung durch Erdwiderstand direkt unter der Geländeoberfläche gering ist. Die Aufsummation dieser drei Kräfte ergibt die gesamte Meridiankraft in der Mantelschale (Abbildung 9-3d), deren Größe wesentlich von der Bodenüberschüttung der Schale gesteuert wird.

c) Meridiankraft $n\alpha$ in der Schale $i = 75$ bei $\kappa = 1,0$

Der Verlauf der Meridiankraft in einer mittleren Schale ($i = 75$) hängt vor allem von der Randlast ab; die Meridiankraft infolge Randlast beträgt am Ansatzpunkt der Schale ca. 0,16 kN/m (Pfahlumfang) (siehe Abbildung 9-4b), wohingegen die Meridiankraft infolge Eigengewicht wesentlich geringer ist (Abbildung 9-4a).

a) $n\alpha$ infolge Eigengewicht ($n\alpha EG$)b) $n\alpha$ infolge Randlast ($n\alpha RL$)c) $n\alpha = n\alpha EG + n\alpha RL$ Abbildung 9-4: Kräfte in einer Kernschale ($i = 75$)d) Verlauf der Randlasten bei $\kappa = 1,0$

Die Abbildung 9-5 zeigt den Verlauf der Randlast ($n\alpha RL \cdot \tan \delta_{\text{Pfahl}}$) über die Pfahlhöhe, d.h. die auf den Pfahlumfang bezogene Mantelreibungskraft pro Pfahlabschnitt h/n . Die Schalen ab Nummer $\bar{j} = n - n \cdot (f \cdot d) / (1 + f \cdot d) = 150 - 150 \cdot (5 \cdot 0,025) / (0,2 + 5 \cdot 0,025) \approx 92$ geben in der Summe ihrer Randlasten den rechnerisch über Spitzendruck übertragenen Anteil der Pfahllast an, während die über die restlichen Schalen erstreckte Summe die über Mantelreibung übertragene Pfahllast darstellt. Da die Schalendicke am Pfahlmantel konstant ist, kann aus der Abbildung 9-5 für den ausgewählten Modellpfahl auf eine fast linear mit der Tiefe zunehmende Mantelreibung bis zum Pfahlfuß geschlossen werden. Anschließend ist für die Schalen, die die Übertragung der Pfahllast über Spitzendruck angeben, ein Rückgang in der Größe der Randlast zu verzeichnen.

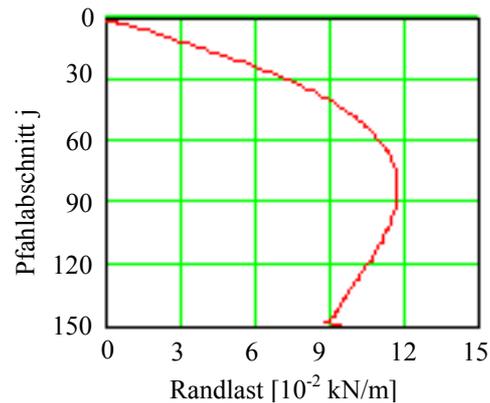


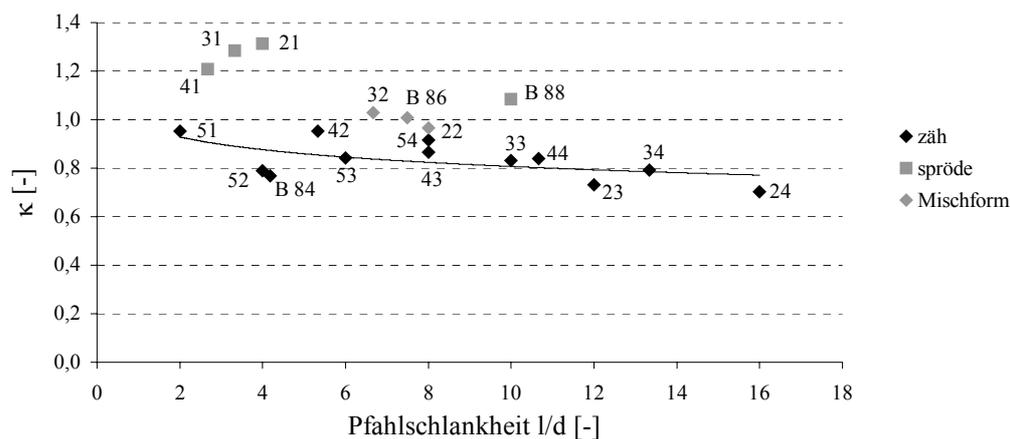
Abbildung 9-5: Ermittelte Randlast

e) Mobilisierungsfaktor κ , um die gemessene Grenzlast zu erhalten

Bei $\kappa = 1$ überschreitet die rechnerische Grenzlast diejenige, die im Modellversuch gemessen wurde. Durch iterative Abminderung des Mobilisierungsfaktors wurde bei $\kappa = 0,876$ für dieses Beispiel eine rechnerische Pfahlkraft erreicht, die dem Messwert des Modellversuchs entspricht.

9.2 Ergebnisse

In der Abbildung 9-6 ist der aus der Berechnung ermittelte Mobilisierungsfaktor κ , mit dem die im Versuch gemessene Pfahlgrenzlast erreicht wird, bezogen auf die Pfahlschlankheit ($s = l/d$), aufgetragen. Neben jedem Datenpunkt ist der zugehörige Pfahltyp vermerkt.

Abbildung 9-6: Mobilisierungsfaktor κ aus den Modellversuchen

Wird die Gesamtheit aller Datenpunkte betrachtet, lässt sich keine eindeutige Abhängigkeit zwischen der Pfahlschlankheit und dem Mobilisierungsfaktor κ erkennen. Das Bild differenziert sich, wenn die Kraft-Setzungs-Linie (KSL) und die Pfahlgeometrie mit in die Betrachtung einbezogen werden.

Die Pfahltypen, die in Abbildung 9-6 als hellgraue Quadrate dargestellt sind, weisen in der Kraft-Setzungs-Linie einen eindeutigen Peak-Wert auf, der für die Grenzlast maßgebend ist (vgl. Kapitel 6). Dieser Peak-Wert ist in den Kraft-Setzungs-Linien der als schwarze Rauten eingezeichneten Pfahltypen nicht vorhanden, vielmehr nähert sie sich bei diesen Pfahltypen asymptotisch einem Maximalwert, der dann die Grenzlast angibt, oder es ist eine weitere Lastzunahme bei großen Setzungen zu verzeichnen. Das Verhalten von Pfahltypen mit einem ausgeprägten Peak-Wert in der Kraft-Setzungs-Linie wird im weiteren als „spröde“ bezeichnet, das der übrigen Pfähle als „zäh“.

Die Widerstands-Setzungs-Linie der Pfahltypen T22, T32 und B86, lässt sich nicht eindeutig dem Verhalten zäh oder spröde zuordnen. Es scheint sich hier um „Mischformen“ zu handeln. Im Vergleich zum Pfahl T21 ist in der Widerstands-Setzungs-Linie der Typen T22 und T32 nur ein schwacher Peak-Wert ausgebildet. Die Kraft-Setzungs-Linie des Pfahltyps B86 weist zwar einen asymptotischen Verlauf auf, die Zuordnung zu der Mischform wird mit Einbaueinflüssen beim Versuch begründet.

Der Pfahltyp B88 wurde gemäß Abbildung 9-6 zwar dem „spröden“ Verhalten zugeordnet, das „spröde“ Verhalten ist aber wohl durch die Methode des Pfahleinbaus mit Rammhilfe, die eine extreme Verdichtung unter dem Pfahlfuß zur Folge hat, bedingt.

Die Abbildung 9-6 läßt für die Pfahlmodelle mit „zähem“ Lastsetzungsverhalten tendenziell eine Abnahme des mobilisierten Erdwiderstandes ($\kappa \cdot k_{pgh}$) mit zunehmender Schlankheit (l/d) erkennen. Bei gleichem Pfahldurchmesser mobilisiert der kurze Pfahl den Erdwiderstand (auf der kurzen Pfahllänge) in größerem Umfang als der längere Pfahl. Eine lange Wand mobilisiert bei gleichen Verschiebungen relativ weniger Erdwiderstand als eine kurze Wand – ein Vergleich, der sicherlich nur eingeschränkt gültig ist.

Die Grenzlast der Pfahltypen, die in Abbildung 9-6 als „spröde“ bezeichnet werden oder denen eine „Mischform“ zuerkannt wird, erfordern rechnerisch eine horizontale Stützung der Parabelschalen, die über den Erdwiderstand hinausgeht, was physikalisch nicht sinnvoll ist. Auffallend ist, dass es sich hinsichtlich der Pfahlgeometrie um relativ kurze Pfähle mit einem im Verhältnis hierzu großen Pfahldurchmesser handelt.

Aufgrund dieses noch wenig befriedigenden Resultates wird nachfolgend der Einfluß der einzelnen Parameter auf das Ergebnis des Berechnungsansatzes untersucht.

9.3 Variation einzelner Parameter

9.3.1 Parameter

Das Berechnungsmodell enthält neben den Pfahlabmessungen (l , d) folgende bei der Eingabe festzulegende Parameter:

- Schalenanzahl n (steuert den Rechenaufwand)
- Ordnungszahl der Parabel (Exponent m)
- Rechnerische Pfahlverlängerung (Faktor f) zur Übertragung des Spitzendrucks

- Reibungswinkel φ des Bodens
- Neigungswinkel δ_{Pfahl} der Schalen am Pfahlmantel
- Mobilisierungsfaktor κ für den Erdwiderstand

Nachfolgend wird – ausgehend von den im Modellversuch gemessenen Grenzlaster – der Einfluß einiger der o.g. Parameter auf den Mobilisierungsfaktor κ beleuchtet, um einerseits die Bedeutung der untersuchten Parameter für das Berechnungsmodell in seiner Anwendung auf die Modellversuche zu erkennen und um andererseits die Größe der Parameter, die in einer Ermittlung der Pfahlgrenzlast mit diesem Rechenmodell Anwendung finden können, abzuschätzen.

9.3.2 Schalenanzahl n

Für die Pfahltypen T24 und T54 der Modellversuche wurde der Mobilisierungsfaktor κ für verschiedene Schalenanzahlen n ermittelt und in Abbildung 9-7 aufgetragen.

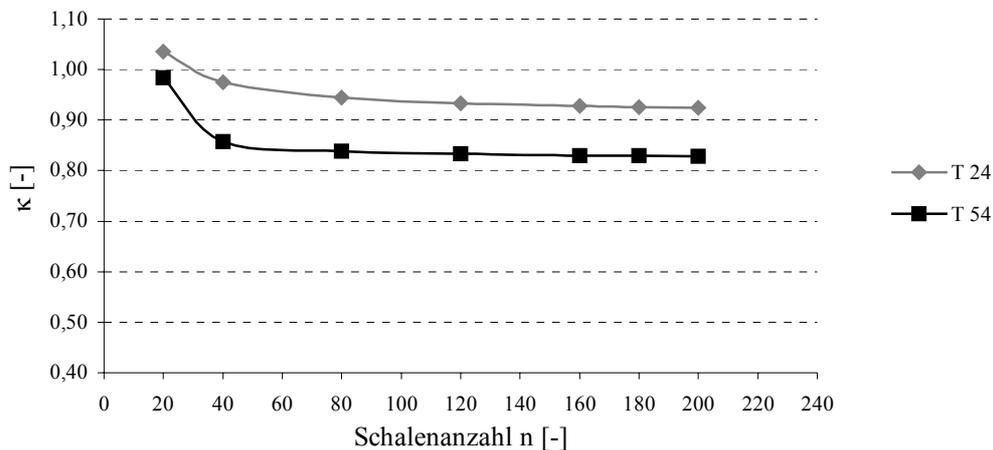


Abbildung 9-7: Variation der Schalenanzahl n

Im Bereich $20 < n < 80$ ist ein deutlicher Einfluß der Schalenanzahl n auf den Mobilisierungsfaktor κ zu erkennen. Für $n > 120$ bleibt κ in etwa konstant. Zur Begrenzung des Rechenaufwandes sollte die Anzahl der Schalen möglichst gering gewählt werden. Auf der Grundlage der Abbildung 9-7 wird für die weitere rechnerische Auswertung der Modellversuche $n = 150$ festgelegt.

9.3.3 Reibungswinkel φ , Neigungswinkel δ_{Pfahl}

In den Modellversuchen wurde eine mitteldichte bis dichte Lagerung des Versuchssandes erzeugt. Bei dem insgesamt niedrigen Spannungsniveau in den Modellversuchen ist – wie auch aus vorangegangenen Modellversuchen mit dem gleichen Sand bekannt – von einem Reibungswinkel von $\varphi \approx 40^\circ$ auszugehen. Die Modellpfähle weisen als Schneckenbohrpfähle eine ideale Rauigkeit auf, so dass $\delta_{\text{Pfahl}} = \varphi = 40^\circ$ angenommen wurde.

9.3.4 Ordnung der Parabelfunktion (Exponent m)

Vergleichende Berechnungen zeigen einerseits, dass der Exponent m der Parabel insbesondere bei kleinen Pfahlschlankheiten l/d einen erheblichen Einfluß auf den Mobilisierungsfaktor κ hat. Bei m von etwa $m = 3$ bis $m = 5$ liegt der Mobilisierungsfaktor κ bei der kleinen Pfahlschlankheit $l/d = 4$ weit über $\kappa = 1$, wenn die gemessene Pfahlgrenzlast des Modellversuchs rechnerisch erreicht werden soll. Dieses ist physikalisch nicht sinnvoll. Andererseits ist vorstellbar, dass bei einem kurzen Pfahl (geringe Pfahlschlankheit) ein weit ausladender parabelförmiger „Tragkörper“ im Boden entsteht (m klein) und bei großer Pfahlschlankheit eine schlanke Mantelschale (m groß) den die Pfahllast tragenden Bodenkörper begrenzt. Mit der aus Vergleichsrechnungen gefundenen Funktion

$$m = 1 + 0,2 \cdot \frac{l}{d} \quad (\text{GL. 9-1})$$

wurde die weitere Auswertung der Modellversuche durchgeführt. Bei $l/d = 0$, d.h. für ein Flachfundament ohne Gründungstiefe mit dem Durchmesser d ergeben sich gemäß Gleichung 9-1 mit $m = 1$ ineinandergeschachtelte Kegelschalen, d.h. es kann von einer Lastausbreitung unter dem Winkel $(90^\circ - \delta_{\text{Pfahl}})$, zur Vertikalen gemessen, - bei $\delta_{\text{Pfahl}} = 40^\circ$ also unter dem Winkel von 50° - gesprochen werden. Bei den maximalen Pfahlschlankheiten $l/d = 16$ der Modellversuche ergibt sich $m = 4,2$. Die Mantelschale hat dann eine Öffnungsweite von $A = 0,284 \cdot h$

9.3.5 Rechnerische Pfahlverlängerung (Faktor f) zur Übertragung des Spitzendrucks

Mit den gemäß Abschnitten 9.3.2 bis 9.3.4 festgelegten Parametern wurde der Mobilisierungsfaktor κ , der zur rechnerischen Modellierung der in den Modellversuchen gemessenen Grenzlasten erforderlich ist, berechnet, wobei die Pfahlverlängerung zur Übertragung des Spitzendrucks mit $f = 4,5$ (Abbildung 9-8) und $f = 5$ (Abbildung 9-9), unabhängig von der Schlankheit des Pfahles angenommen wurde.

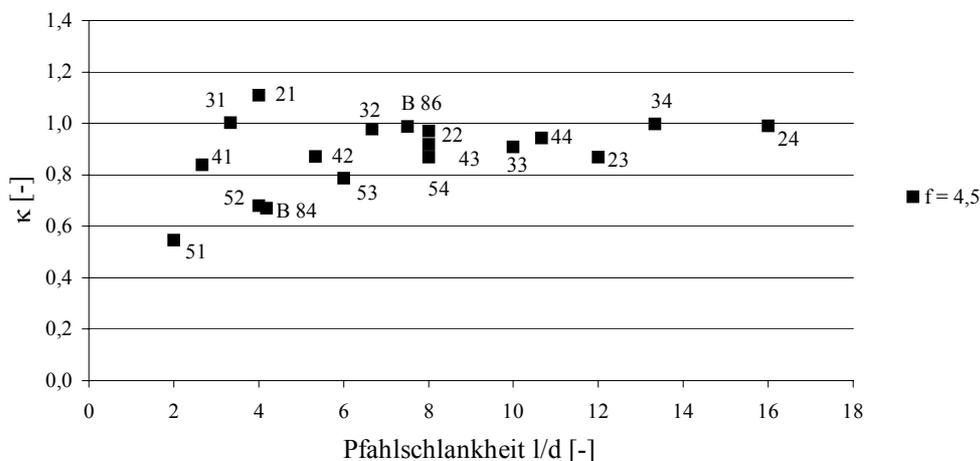


Abbildung 9-8: Mobilisierungsfaktor κ bei einem Pfahlverlängerungsfaktor $f = 4,5$

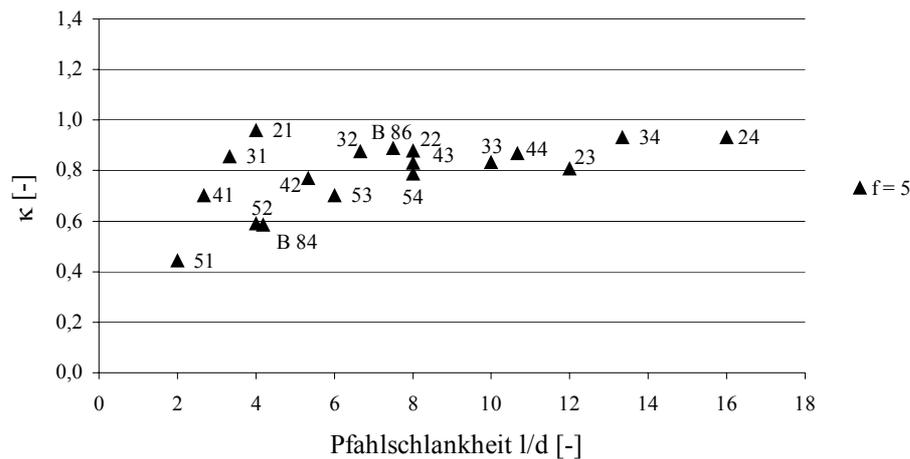


Abbildung 9-9: Mobilisierungsfaktor κ bei einem Pfahlverlängerungsfaktor $f = 5$

Der Mobilisierungsfaktor κ stellt sich hierbei - abgesehen von einigen Ausreißern - als weitgehend unabhängig von der Schlankheit, streuend in einem Bereich von $0,7 \leq \kappa \leq 1,0$ bei $f = 4,5$ und $0,6 \leq \kappa \leq 0,9$ bei $f = 5$ heraus. Es ist durchaus vorstellbar, dass in den Modellversuchen – bedingt auch durch die von der Dilatanz des Bodens ausgelösten Verspannungen – der Erdwiderstand (für $\alpha = \beta = \delta_p = 0$) an der Mantelschale zu 60% bis 90% mobilisiert wird. Ferner steht die Aussage $4 \leq f \leq 5$ nicht im Widerspruch zu Angaben in Veröffentlichungen.

Auffallend ist die größere Streuung des Mobilisierungsfaktors κ im Bereich kleinerer Pfahlschlankheiten. Es ist zu vermuten – und auch anhand eines Vergleichs der Abbildung 9-8 und der Abbildung 9-9 grob festzustellen -, dass der Einfluß der Pfahlverlängerung zur Darstellung des Spitzendrucks bei den Pfählen mit relativ zur Länge großem Durchmesser (kleine Pfahlschlankheit) größer ist als bei schlanken Pfählen. Die Streuung der Versuchswerte im Bereich kleiner Pfahlschlankheiten lässt es aber nicht zu, eine Funktion $f\left(\frac{l}{d}\right)$ zu definieren, die zu einem konstanten Niveau der κ -Werte geführt hätte.

Bei schlanken Pfählen ($l/d >$) ist der Abtrag der Pfahllast über Mantelreibung vorherrschend. Die Abbildung 9-8 und die Abbildung 9-9 legen die Vermutung nahe, dass das in Kapitel 8 entwickelte Rechenmodell vor allem den Lastabtrag durch Mantelreibung wiederzugeben vermag. Dieser Vermutung entspricht, dass für spröde Pfahltypen (T21, T31 und T41) sowie für Pfähle mit einer kleinen Schlankheit (T51, T52 und B84) bei der Berechnung im Pfahlfußbereich erheblich größere negative Randlasten auftreten.

9.3.6 Rechnerische Ermittlung der Grenzlast für die Pfahlmodelle

Abschließend werden die Grenzlasten der Modellpfähle mit dem im Abschnitt 8 erläuterten Berechnungsmodell bei Vorgabe folgender Parameter bestimmt:

- Schalenanzahl $n = 150$
- Ordnungszahl der Parabel: $m = 1 + 0,2 \cdot \frac{l}{d}$

- Rechnerische Pfahlverlängerung $f = 5$
- Reibungswinkel des Bodens $\varphi = 40^\circ$
- Neigungswinkel der Schalen am Pfahlmantel $\delta_{\text{Pfahl}} = 40^\circ$
- Mobilisierungsfaktor $\kappa = 0,8$

Die rechnerische Grenzlast ist in Tabelle 9-1 den gemessenen Werten gegenübergestellt. Die größten prozentualen Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Pfahlgrenzlasten treten für die Pfahltypen T51 ($d = 50 \text{ mm}$, $l = 100 \text{ mm}$) und T52 ($d = 50 \text{ mm}$, $l = 200 \text{ mm}$) auf. In diesen Fällen sind die mit dem Berechnungsmodell ermittelten Pfahllasten wesentlich größer als der gemessene Wert. Ein Grund hierfür könnte der zu groß angesetzte Pfahlverlängerungsfaktor von $f = 5$ sein, bei einem Durchmesser von $50,0 \text{ mm}$ ergibt sich eine Länge von $250,0 \text{ mm}$, was wesentlich mehr ist als die wirkliche Pfahllänge und daher physikalisch als nicht sinnvoll angesehen wird. Zusätzlich ergibt sich aufgrund der geringen Schlankheit ein kleiner Exponent m , der einen sehr weit ausladenden Schalenkörper bedingt.

Die besten Übereinstimmungen lassen sich bei Pfählen mit einer Schlankheit von $l/d = 8$ bis 12 (z.B. Typ T23 ($d = 25 \text{ mm}$, $l = 300 \text{ mm}$), T33 ($d = 30 \text{ mm}$, $l = 300 \text{ mm}$), T43 ($d = 37,5 \text{ mm}$, $l = 300 \text{ mm}$) und T54 ($d = 50 \text{ mm}$, $l = 400 \text{ mm}$)) feststellen, die Abweichungen liegen unter $5,0 \%$. Insgesamt betrachtet können alle Pfahllasten, mit Ausnahme der zwei sehr gedungenen Pfahltypen T51 und T52, mit dieser Parameterkombination mit einer Abweichung von maximal $18,1 \%$ bestimmt werden.

l		$d = 25,0$ [mm]	$d = 30,0$ [mm]	$d = 37,5$ [mm]	$d = 50,0$ [mm]
100 [mm]	gem. [N]	466,4	638,1	931,4	1337,6
	ber. [N]	382,0	594,0	1070,0	2409,0
	[%]	<i>18,10</i>	<i>6,91</i>	<i>14,88</i>	<i>80,10</i>
200 [mm]	gem. [N]	926,6	1268,1	1635,4	2167,2
	ber. [N]	840,0	1151,0	1708,0	3059
	[%]	<i>9,35</i>	<i>9,23</i>	<i>4,44</i>	<i>41,15</i>
300 [mm]	gem. [N]	1449,6	2028,0	2784,5	4037,0
	ber. [N]	1441,0	1947,0	2837	4675
	[%]	<i>0,59</i>	<i>3,99</i>	<i>1,89</i>	<i>15,80</i>
400 [mm]	gem. [N]	2506,7	3367,9	4515,8	6999,0
	ber. [N]	2141,0	2875,0	4146,0	6724
	[%]	<i>14,59</i>	<i>14,64</i>	<i>8,19</i>	<i>3,93</i>

Tabelle 9-1: Vergleich der gemessenen und berechneten Pfahlgrenzlasten

9.4 Pfahlprobelastungen

9.4.1 Grundlegende Berechnungsannahmen

Aus der Literatur werden Pfahlprobelastungen, durchgeführt an Bohr- oder Schneckenpfählen in sandigem Boden, zusammengetragen (Anlage A). Auf diese Probelastungen wird der Berechnungsansatz angewendet, wobei hier - wie in den Modellversuchen - die Pfahlgrenzlast bekannt ist.

Es werden folgende Annahmen getroffen:

- der Winkel δ_{Pfahl} , unter dem die Schalentragwerke an den Pfahl anschließen, wird individuell für jeden Pfahl in Abhängigkeit von der Herstellungsart und dem Pfahlbaustoff festgelegt;
- die Ordnungszahl m der Parabelschalen wird mit $m = 1 + 0,2 \cdot \frac{1}{d}$ gewählt;
- für die Pfahlverlängerung wird ein Faktor von $f = 3$ angesetzt;
- für die Faktoren k_R und k_r werden verschiedene Erddruckbeiwerte angesetzt;
- alle weiteren Berechnungsannahmen sind mit denen der Modellversuche identisch.

Analog zu den Modellversuchen wird zu einer bekannten Pfahlgrenzlast der Mobilisierungsfaktor κ ermittelt.

9.4.2 Berechnungsergebnisse

a) Seitendruckbeiwerte $k_R = k_{ah}$ und $k_r = k_{ph}$

In der Abbildung 9-10 sind die für die vorgenannten Pfähle ermittelten Mobilisierungsfaktoren κ bei Ansatz von $k_R = k_{ah}$ und $k_r = k_{ph}$ in Abhängigkeit von der Pfahllänge aufgetragen. Mit zunehmender Pfahllänge ist eine Abnahme des Mobilisierungsfaktors κ zu erkennen. Für Pfahllängen größer als 15 m bleibt der Wert des Mobilisierungsfaktors κ annähernd konstant. In diesem Bereich scheint die Pfahllänge auf den Faktor κ keinen Einfluss mehr zu haben.

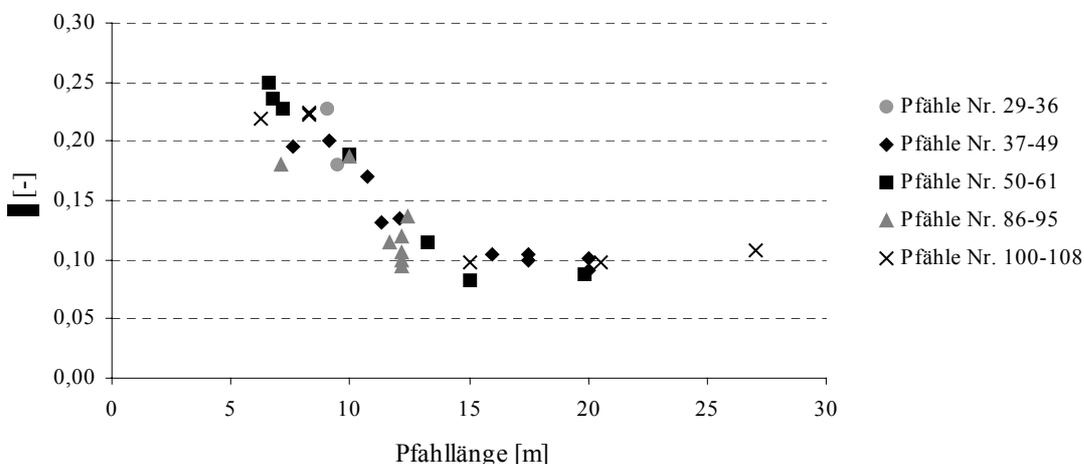


Abbildung 9-10: Mobilisierungsfaktor κ bei $k_R = k_{ah}$ und $k_r = k_{ph}$

Eine Variation der Pfahlverlängerung f zeigt für den Mobilisierungsfaktor κ jeweils die gleiche Kurvencharakteristik, wie in Abbildung 9-10 dargestellt. Je kürzer die Pfahlverlängerung gewählt wird, desto höher liegen die einzelnen κ -Werte.

Eine nähere Betrachtung der in Abbildung 9-10 dargestellten Mobilisierungsfaktoren κ lässt erkennen, dass für Pfahllängen größer 10 m der mit κ multiplizierte Erddruckbeiwert k_{ph} nur geringfügig oberhalb des Erdrhedruckbeiwertes k_0 liegt. So ist es naheliegend, für beide Seitendruckbeiwerte k_r und k_R den Ruhedruckbeiwert $k_0 = 1 - \sin \varphi$ anzusetzen.

b) Seitendruckbeiwerte $k_R = k_0$ und $k_r = k_0$

Die aus dieser Berechnung erhaltenen Ergebnisse sind in der Abbildung 9-11 bezogen auf die Pfahllänge dargestellt. Auch hier ist eine mit der Pfahllänge einhergehende Abnahme des auf den Ruhedruckbeiwert k_0 bezogenen Mobilisierungsfaktors κ ($k_r = \kappa \cdot k_0$) zu erkennen. Der Wert κ liegt für alle untersuchten Pfähle über 1,0. Das bedeutet, dass die Umlenkung des Ruhedruckzustandes mit einem vertikal stehenden Hauptspannungskreuz in den „Parabelspannungszustand“, in dem die größere Hauptspannung den Erzeugenden der Parabelschalen folgt, allein nicht für Pfähle mit $l < 15$ m zur Aufnahme der Pfahllast genügt. Innerhalb der Parabelschalen wird sich der Spannungszustand verändern, indem z.B. die Ringspannungen in Richtung auf den aktiven Zustand abfallen (siehe c) und die Radialspannungen über den Ruhedruck ansteigen.

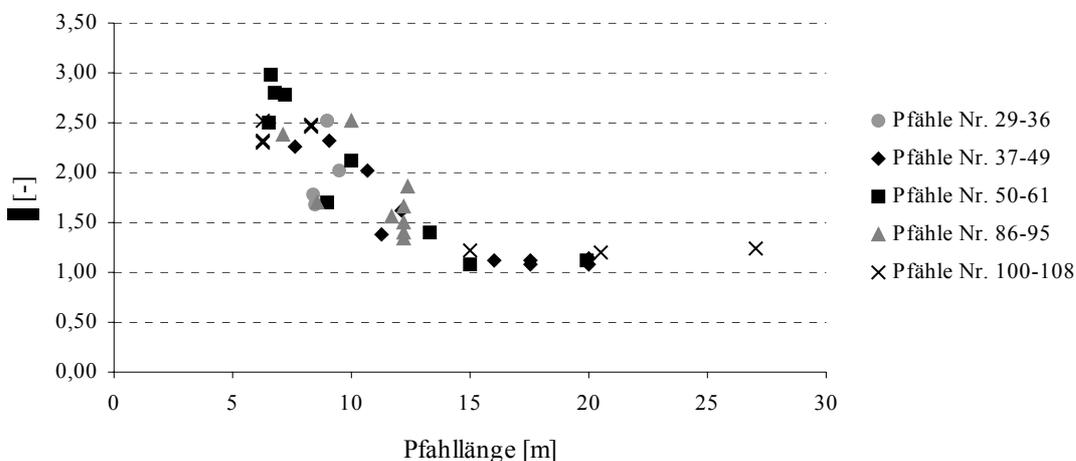


Abbildung 9-11: Mobilisierungsfaktor κ bei $k_R = k_0$ und $k_r = k_0$

c) Seitendruckbeiwerte $k_R = k_{ah}$ und $k_r = k_0$

Zum weiteren Vergleich werden die Pfahllasten noch mit dem Ansatz $k_R = k_{ah}$ und $k_r = k_0$ berechnet. In der Abbildung 9-12 ist die gleiche Kurvencharakteristik zu erkennen wie in den vorangegangenen Abbildungen. Im Vergleich zur Abbildung 9-11 ist der Wert des Mobilisierungsfaktors κ jetzt – wie zu erwarten – kleiner, für sehr lange Pfähle fällt er sogar unter den Wert 1. Hieraus folgt, dass für diese Pfähle die Ringspannungen nicht bis auf den vollen aktiven Zustand abfallen werden.

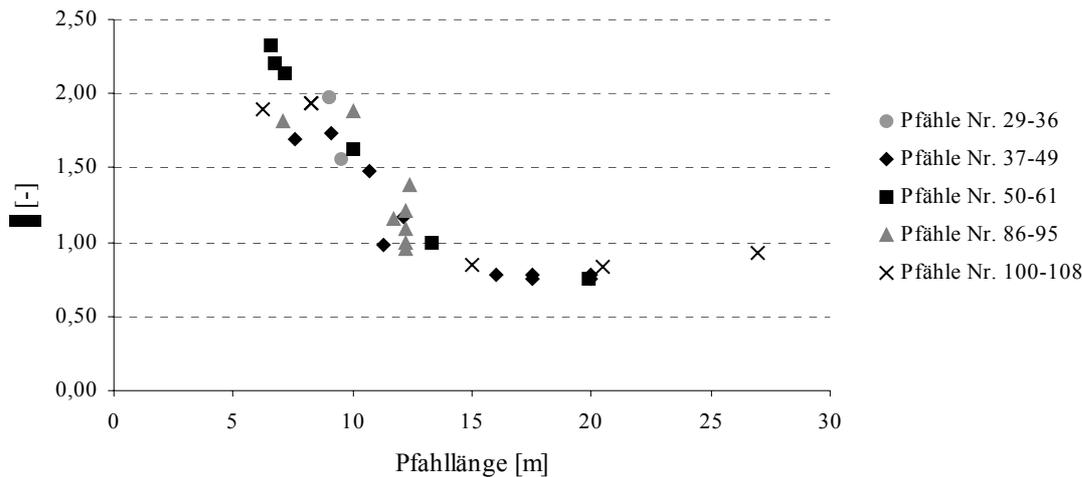


Abbildung 9-12: Mobilisierungsfaktor κ bei $k_R = k_{ah}$ und $k_r = k_0$

d) Folgerungen

Basierend auf diesen Berechnungen wird vorgeschlagen für kurze Pfähle ($l < 10$ m) die Ringspannung mit dem Wert $k_R = k_{ah}$ anzusetzen und den Mobilisierungsfaktor κ in Abhängigkeit vom passiven Erddruckbeiwert k_{ph} zu ermitteln.

Ist die Länge des Pfahles größer als 10 m, sollte $k_R = k_0$ gesetzt werden und der Mobilisierungsfaktor κ in Abhängigkeit vom Ruhedruckbeiwert k_0 angegeben werden.

9.5 Bewertung des rechnerischen Ansatzes für einzeln stehende Druckpfähle

Das Modell der ineinander geschachtelten „dünnen“ Schalen, in denen ein Hauptspannungszustand (n_α , n_{qt} , n_r) herrscht, ist ein (geometrisches) Hilfsmittel, um den Spannungszustand in der Umgebung eines auf Druck beanspruchten Pfahles – eben durch den Verlauf der Hauptspannungen – zu beschreiben.

In der Abbildung 9-13 sind die für jede sektorförmige Elementscheibe berechneten nach außen gerichteten Horizontalkräfte aufgetragen, wobei folgende Rechenannahmen getroffen wurden:

Pfahldurchmesser	$d = 0,6$	[m]
Pfahllänge	$l = 17,5$	[m]
Pfahlverlängerungsfaktor	$f = 3$	[-]
fiktive Pfahllänge	$h = l + f \cdot d$	[m]
Bodenwichte unter Auftrieb	$\gamma' = 13$	[kN/m ³]
Reibungswinkel des Bodens	$\varphi = 33$	[°]
Winkel, unter dem die Schalen auf den Pfahl treffen	$\delta_{Pfahl} = 33$	[°]
Erddruckbeiwerte ($\alpha = \beta = \delta = 0$)	$k_R = k_r = k_0 = 1 - \sin(\varphi) = 0,455$	[-]

Schalenzahl (gewählt)	$n = 150$	[-]
Ordnung m der Parabelschale	$m = 1,0 + 0,2 \cdot l/d$	[-]
Randlast RL	$RL = \gamma \cdot (h - z) \cdot k_0 \cdot \frac{h}{n} \cdot \tan(\delta_{\text{Pfahl}})$	[kN/m]

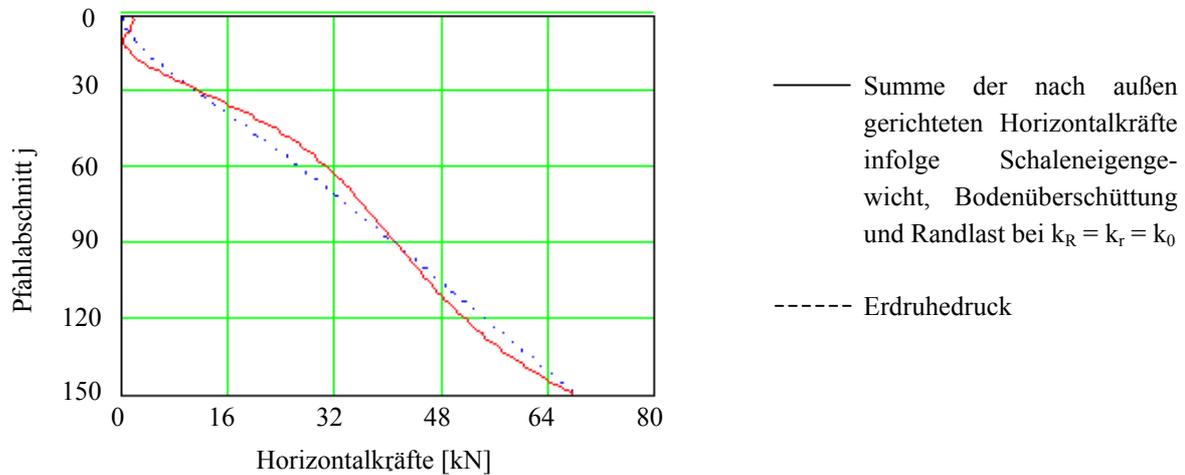


Abbildung 9-13: Horizontalkräfte im Ausgangszustand

Mit dem o.g. Ansatz der Randlast wurde also vorausgesetzt, dass auf den in den Boden eingebrachten Pfahl horizontal die Ruhedruckspannung wirkt. Durch die Wandrauigkeit bedingt ($\tan(\delta_{\text{Pfahl}})$) wird die dann eingeprägte Pfahlbelastung über Mantelreibung aufgenommen, wobei die den horizontalen Ruhedruckspannungen entsprechende Mantelreibung als mobilisiert angenommen wird (siehe angesetzte Randlast). Die für diesen Zustand berechneten nach außen wirkenden Horizontalkräfte stehen im Gleichgewicht mit den an der äußeren Berandung des Schalenpakets angreifenden Ruhedruckspannungen. Dies zeigt eindrucksvoll, dass die Beschreibung des Spannungszustandes mit dem Schalenmodell wirklichkeitsnah gelingt, da es sich im untersuchten Fall um eine „Umlenkung“ der Ruhedruckspannungen durch Hinzufügen von Vertikallasten am Pfahlmantel ohne plastische Verformungen handelt.

Der Pfahl ist aber durchaus im Stande, größere Horizontalspannungen am Pfahlmantel und damit größere Randlasten zu erzeugen und zwar insbesondere an der rechnerisch angefügten zusätzlichen Pfahlänge zur Wiedergabe des Spitzendrucks. Die schmale Scherfuge am Pfahlmantel erzeugt Dilatanz, so dass eine Verschiebung des Bodens vom Pfahl weg erfolgt. Unterhalb des Pfahlfußes wird der Boden zur Seite verdrängt, wie verschiedene Autoren berichten. Dies hat zur Folge, - wie in Kapitel 8.1 bereits dargestellt, - dass die Schalen in Ringrichtung aufgeweitet werden, so dass die Ringkraft nq_t bis auf die Größe des aus der Meridiankraft entstehenden aktiven Erddrucks abfallen kann. Hierdurch werden die nach außen gerichteten Kräfte in einer sektorförmigen Elementscheibe kleiner. Wenn auch weiterhin Ruhedruck auf die Mantelschale wirkt, entsteht eine größere Horizontalspannung am Pfahlmantel und dadurch können größere Randlasten eingeleitet werden.

Zudem erhöht die Verschiebung des Bodens nach außen die horizontalen Spannungen an der Berandung des Schalenpaketes, d.h. an der Mantelschale, was im Rechenmodell mit dem mobilisierten Erdwiderstand ($\kappa \cdot k_{pgh}$) erfasst wird. Die Auswirkung ist ebenfalls eine Erhöhung der Horizontalspannungen am Pfahlmantel (inklusive der rechnerischen Verlängerung) und damit mögliche größere Randlasten und so eine Steigerung der Grenzlast.

Wie dargestellt, ist das Rechenmodell in der Lage, die geschilderten bodenmechanischen Vorgänge (wirklichkeitsnah) zu erfassen. Eine wirklichkeitsnahe rechnerische Prognose der Pfahlgrenzlast mit Hilfe dieses Rechenmodells ist aber aus folgenden Gründen nicht möglich:

- Die Größe der Veränderungen der Ringspannung ist nicht prognostizierbar ($k_0 \rightarrow k_{agh}$). In der unmittelbaren Pfahlumgebung wird zudem die Dehnung in Ringrichtung ($\varepsilon = \Delta D/D$, D = Durchmesser der betrachteten Schale) größer sein als weiter außen im Schalenpaket (ΔD ist gleich, D wächst an), so dass k_R in radialer Richtung veränderlich sein wird.
- Der mobilisierte Erdwiderstand $\kappa \cdot k_{pgh}$ ist noch weniger als k_R prognostizierbar. Hier ist vor allem ein Maßstabeffekt in Rechnung zu stellen. Dieses wird durch den Vergleich der Ergebnisse von Kapitel 9.3 und 9.4 deutlich.
- Die rechnerische Verlängerung des Pfahlfußes zur Wiedergabe der Pfahlspitzentragsfähigkeit bedarf noch zusätzlicher Erkenntnisse.
- Es hat sich gezeigt, dass der Exponent m der Parabel sicher von der Pfahlschlankheit abhängig ist. Der Ansatz $m = 1 + 0,2 \cdot 1/d$ hat sich für diese Untersuchung bewährt, müsste aber theoretisch besser belegt werden.

Das Modell der aus granularem Material bestehenden parabolischen Schalen zur Aufnahme und Weiterleitung der durch einen Pfahl in den Boden eingebrachten Last, kann als wirklichkeitsnahe Beschreibung des Spannungszustandes in der Pfahlumgebung gelten. Die zutreffende rechnerische Prognose der Grenztragsfähigkeit eines Pfahles ist aber vor allem wegen der unsicheren Abschätzung der Ringdruckspannung und der stützenden äußeren Erddruckspannung mit diesem Modell derzeit kaum möglich.

10 Druckpfahlgruppen

10.1 Allgemeines

Es werden die in Kapitel 6.2 geschilderten Modellversuche an gleichlangen Pfählen ($d = 25$ mm, $l = 200$ mm), angeordnet als 4er- oder 5er-Gruppe, betrachtet.

In den Gruppenversuchen ist mit zunehmendem Pfahlachsabstand eine Abnahme in der Pfahltragfähigkeit des einzelnen Gruppenpfahls bis auf den Wert der Einzelpfahltragfähigkeit zu verzeichnen. Für kleine Pfahlachsabstände liegen keine Versuchswerte vor, allerdings ist es unwahrscheinlich eine immer weiter zunehmende Pfahltragfähigkeit mit sich verringerndem Abstand zu erwarten.

Die von anderen Autoren durchgeführten Modellversuche (Kishida (1965) und Long (1992)), zeigen mit steigendem Achsabstand a/d zuerst eine Zu- und danach eine Abnahme der Pfahlgrenzlast. Für einen Pfahlachsabstand a von $0 \cdot d$ ($d =$ Pfahldurchmesser) – es liegen dann n Pfähle „ineinander“, d.h. die Grenzlast ist diejenige eines einzelnen Druckpfahles - beträgt der Wert der Gruppentragfähigkeit das $1/n$ -fache des unbeeinflussten Einzelpfahls, wobei n die Anzahl der Gruppenpfähle ist. Bis zu einem Abstand von $a = 2d$ bis $3d$ steigt nach Literaturangaben die Grenzlast annähernd linear an und fällt nach einem Peak-Wert wieder ab, wobei letzten Endes wieder die n -fache Grenzlast des einzeln stehenden Pfahles erreicht wird.

Ein hierzu entsprechender Kurvenverlauf wird auch für die durchgeführten Modellversuche vermutet (Abbildung 10-1).

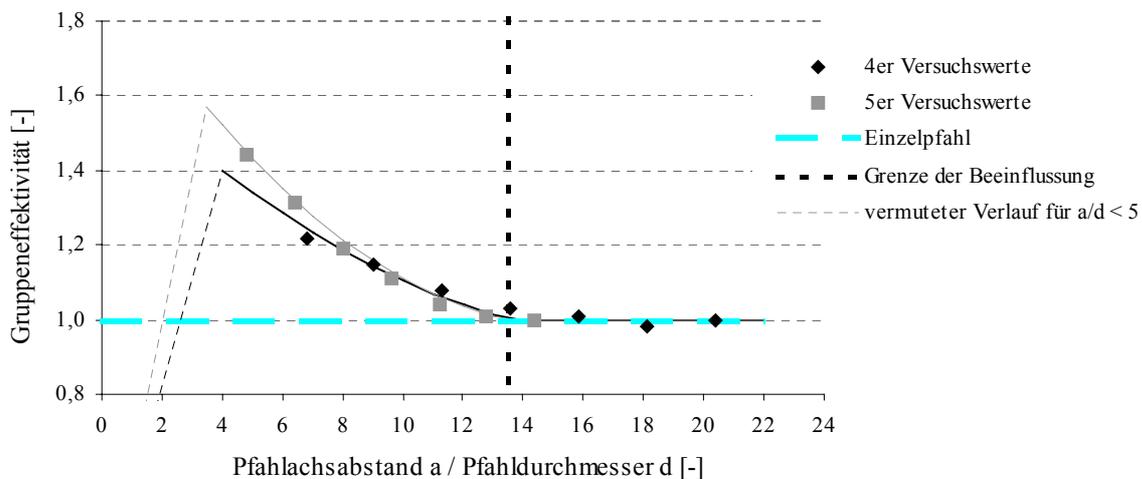


Abbildung 10-1: Gruppeneffektivität in Abhängigkeit des Pfahlabstandes – Ergebnis der Modellversuche ($d = 25$ mm, $l = 200$ mm)

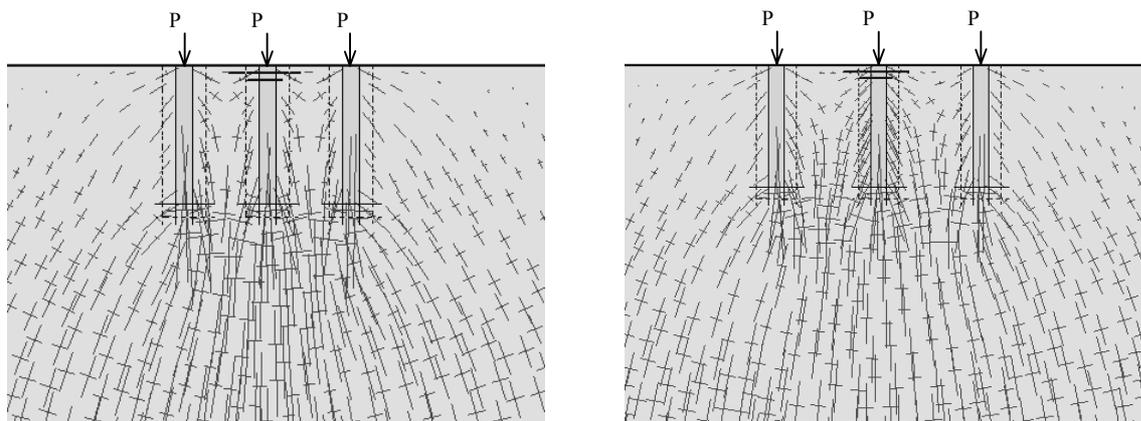
Ausgehend von dem $1/n$ -fachen Einzelpfahlwert (Gruppeneffektivität $\eta = 0,25$ (4er-Gruppe) bzw. $\eta = 0,2$ (5er-Gruppe)) steigt die Gruppeneffektivität in der Abbildung 10-1 für die 4er- und 5er-Gruppe annähernd linear bis auf einen im Bereich von $a = 3d$ bis $a = 4d$ liegenden Maximalwert an und fällt danach entsprechend den Versuchswerten wieder ab, wobei etwa bei $13 \leq a/d \leq 14$ die gegenseitige Beeinflussung der Gruppenpfähle endet.

10.2 Geometrische Modellvorstellung

Jeder einzelne Gruppenpfahl beansprucht zur Lastabtragung einen gewissen Bodenbereich. Für einen Einzelpfahl kann die Geometrie dieses Bodenbereichs auf Basis des in Kapitel 8 vorgeschlagenen Berechnungsansatzes ermittelt werden.

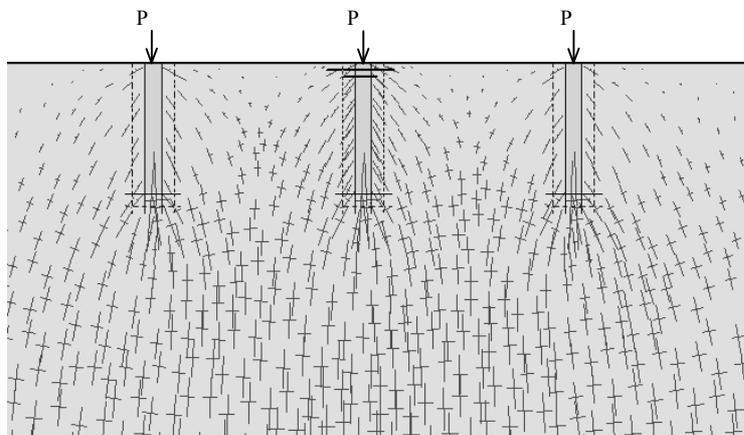
Wird davon ausgegangen, dass um jeden Pfahl in einer Gruppe ein solches rotationssymmetrisches Schalentragswerk entsteht, werden sich die von den einzelnen Pfählen in Anspruch genommenen Bodenbereiche bei kleineren Pfahlachsabständen untereinander überschneiden; daher wird eine gegenseitige Beeinflussung der Pfähle auftreten.

In der Abbildung 10-2 ist für verschiedene Pfahlachsabstände die Spannungsumlenkung im Boden auf der Grundlage von FE-Modellierungen dargestellt.



a) kleiner Pfahlabstand

b) mittlerer Pfahlabstand



c) großer Pfahlabstand

Abbildung 10-2: Spannungsumlenkung im Boden bei verschiedenen Pfahlabständen

Bei kleinem Pfahlachsabstand (Abbildung 10-2a) ist die Überschneidung der einzelnen Bodenbereiche und somit die gegenseitige Beeinflussung groß. Wird der Pfahlachsabstand vergrößert (Abbildung 10-2b), beeinflussen sich die zur Lastabtragung in den Boden beanspruchten Bodenbereiche immer weniger. Die in Abbildung 10-2c dargestellte Gruppenanordnung ermöglicht es jedem einzelnen Gruppenpfahl, ein eigenständiges Schalentragswerk auszubilden.

Wenn die Geometrie des von einem Einzelpfahl beanspruchten Bodenbereichs mit dem Ansatz von Rotationsparabeln (Kapitel 8 und 9) bestimmt werden kann, ist es möglich, den Pfahlachsabstand zu bestimmen, ab dem keine Beeinflussung der Pfähle mehr vorliegt.

Aus der geometrischen Anschauung ergibt sich der maßgebende Abstand aus der Addition der entsprechenden Schalenöffnungsweiten zzgl. des Pfahldurchmessers. Für einen Pfahl mit den Abmessungen $d = 25 \text{ mm}$ und $l = 200 \text{ mm}$ ergibt sich unter den Randbedingungen $h = l + f \cdot d = l + 5 \cdot d = 200 + 5 \cdot 25 = 325 \text{ mm}$, $m = 1 + 0,2 \cdot \frac{l}{d} = 1 + 0,2 \cdot \frac{200}{25} = 2,6$ und $\varphi = 40^\circ$ eine Schalenöffnungsweite von $A = \frac{h}{m \cdot \tan \varphi} = \frac{325}{2,6 \cdot \tan 40^\circ} = 149 \text{ mm}$.

Hieraus resultiert ein Pfahlachsabstand von $a = 2 \cdot A + d = 2 \cdot 149 + 25 = 323 \text{ mm}$, bei dessen Überschreitung keine gegenseitige Beeinflussung der Pfähle zu erwarten ist. Bezogen auf den Pfahldurchmesser ist $\zeta = \frac{a}{d} = 12,92$. Die Abbildung 10-1 zeigt bei einem bezogenen Pfahlachsabstand von $\zeta = 13$ das Ende der gegenseitigen Beeinflussung in den durchgeführten 4er- und 5er Gruppenversuchen.

So kann über eine rein geometrische Betrachtungsweise (Addition der Schalenöffnungsweiten) der Grenzachsabstand von in einer Gruppe stehenden Druckpfählen bestimmt werden, der eine gegenseitige Beeinflussung weitestgehend ausschließt.

10.3 Modellvorstellung zur Grenzlast einer Pfahlgruppe

Bei dem Pfahlachsabstand $a = 0d$ ist die gesamte Pfahlgruppe auf einen Einzelpfahl mit den Abmessungen des einzelnen Gruppenpfahls zusammengeschoben. Wird der Pfahlachsabstand auf $a = 1d$ vergrößert, berühren sich die einzelnen Gruppenpfähle gerade gegenseitig, sie haben untereinander keinen lichten Abstand.

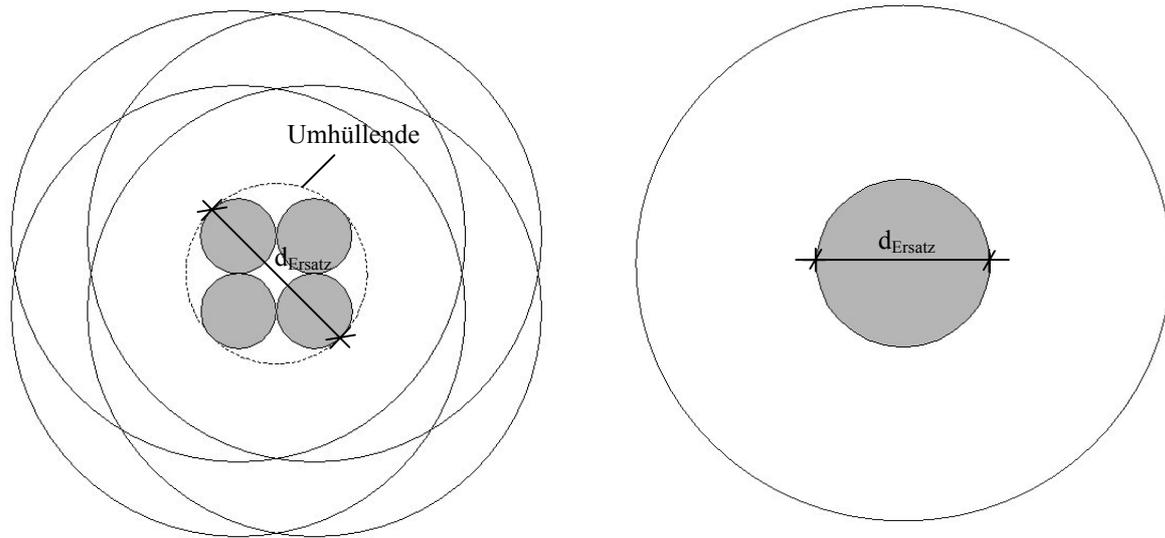


Abbildung 10-3: Pfahlgruppe bei einem Abstand von $a = 1d$

In der Abbildung 10-3 ist dieser Fall für die 4er-Pfahlgruppe dargestellt. Um jeden Pfahl ist der von ihm gemäß der Modellvorstellung des Kapitels 8 in Anspruch genommene Bodenbereich entsprechend des für den unbeeinflussten Einzelpfahl geltenden Schalentragwerks eingezeichnet.

Da sich die einzelnen Rotationsparabeln weitgehend überschneiden, kann in diesem Fall für die gesamte Gruppe ein homogener Einzelpfahl als „Ersatzpfahl“ gewählt werden, dessen Mantel die vier Einzelpfähle einhüllt. Die Öffnungsweite des um den Ersatzpfahl entstehenden Schalentragwerks ergibt sich wie die Geometrie des Rotationskörpers eines einzelnen Pfahles mit d_{Ersatz} , d.h. näherungsweise als Umhüllende der vier einzelnen Schalentragwerke (Abbildung 10-4).



Abbildung 10-4: Modell des virtuellen Ersatzpfahls

Wird der Abstand zwischen den einzelnen Gruppenpfählen nun weiter vergrößert (Abbildung 10-5), wird die Überschneidung der von jedem einzelnen Pfahl in Anspruch genommenen Bodenbereiche geringer. Der bei einem Pfahlachsabstand von $a = 1d$ angesetzte Ersatzpfahl zerfällt zunehmend in einzelne Pfähle. Wegen der Parabelform des beanspruchten Bodenkörpers, basierend auf dem eines unbeeinflussten Einzelpfahls, beginnt je nach Pfahlabstand die Überschneidung der Rotationsparabeln erst in einer gewissen Tiefe t .

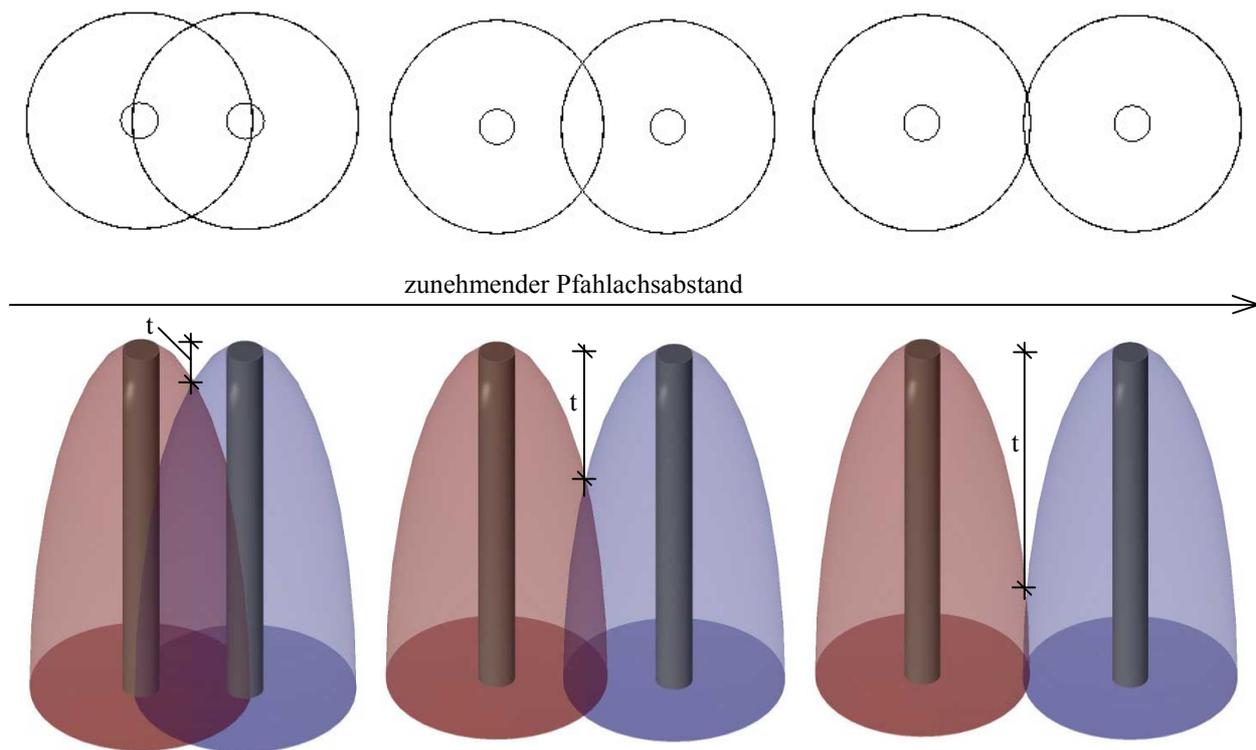


Abbildung 10-5: Schalenträgerwerke bei mittleren Pfahlabständen

Oberhalb des Schnittpunktes der Rotationsparabeln sind die einzelnen Gruppenpfähle schon als unbeeinflusste Einzelpfähle anzusehen. Unterhalb des Schnittpunktes könnte weiterhin von einem Ersatzpfahl ausgegangen werden. Der Durchmesser des Ersatzpfahles ist durch den Abstand der einzelnen Pfähle untereinander definiert.

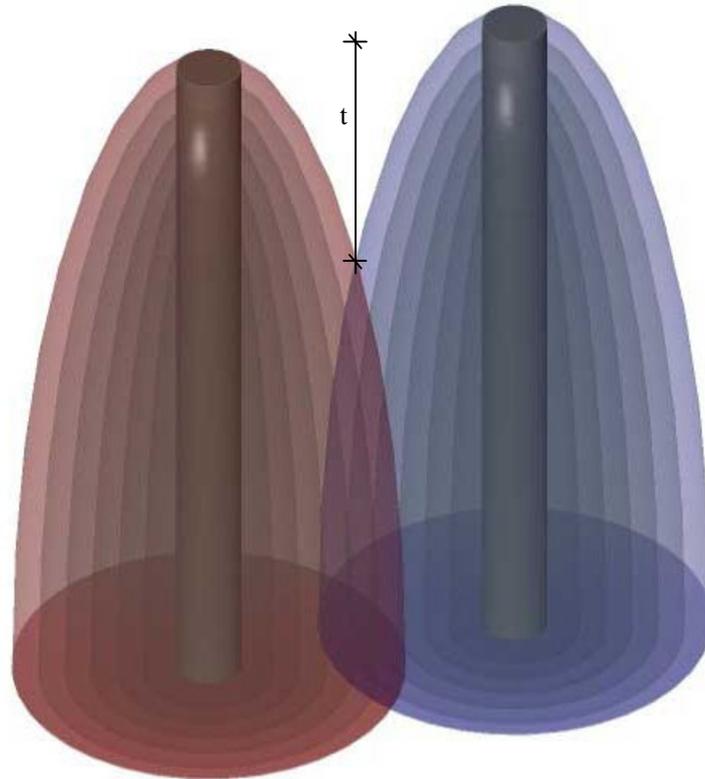


Abbildung 10-6: Überlagerung der aus einzelnen Schalen bestehenden Rotationsparabeln

Überschneiden sich bei größerem Pfahlachsabstand die einzelnen Rotationsparabeln nicht mehr (Abbildung 10-7 und Abbildung 10-8), ist eine gegenseitige Beeinflussung ausgeschlossen und jeder Pfahl in der Gruppe erreicht die Grenzlast eines unbeeinflussten Einzelpfahls. Der am Beginn der Betrachtung für $a = 1d$ angesetzte Ersatzpfahl ist jetzt vollständig in n Einzelpfähle zerfallen.

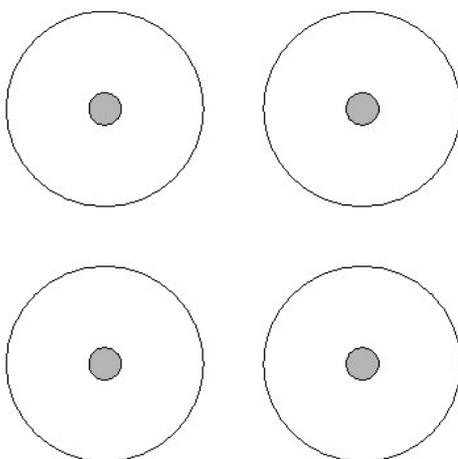


Abbildung 10-7: Grundriss einer sich nicht beeinflussenden Pfahlgruppe

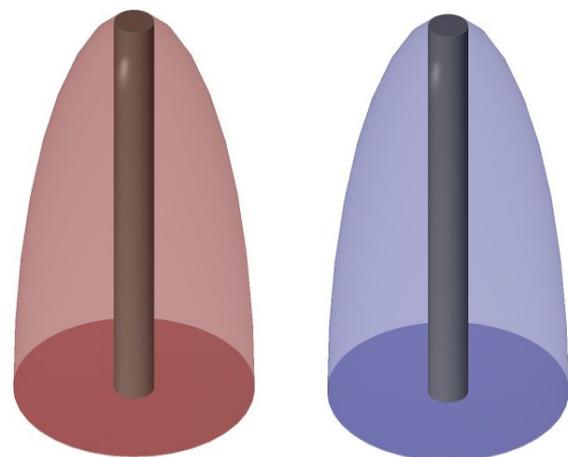


Abbildung 10-8: Ansicht zweier sich nicht beeinflussender Pfähle

10.4 Rechnerische Umsetzung des Pfahlgruppenmodells

Unabhängig vom Pfahlachsabstand wird das um einen einzelnen Gruppenpfahl entstehende Schalentragwerk auf der Basis des unbeeinflussten Einzelpfahls bestimmt. Daher werden eine Pfahlverlängerung $5 \cdot d = 5 \cdot 25 = 125 \text{ mm}$ und ein Mobilisierungsfaktor $\kappa = 0,876$, der sich bei der Rückrechnung aus der Grenzlast des Einzelpfahls Typ T22 ergab, angesetzt. Ist $a/d > 1$, zerfällt die Gesamtpfahllänge von 325 mm ($1 + f \cdot d = 200 + 5 \cdot 25$) in einen oberen Teil, in dem sich die vier bzw. fünf Rotationsparabeln nicht überschneiden und in einen unteren Teil, in dem ein Ersatz-Einzelpfahl mit großem Durchmesser ($d_{\text{Ersatz}} = d + a \cdot \sqrt{2}$ für die 4er-Gruppe und $d_{\text{Ersatz}} = 2 \cdot a + d$ für die 5er-Gruppe) angenommen wird.

Mit den Eingangswerten

$$l = 200 \text{ mm}$$

$$h = 1 + 5 \cdot d = 200 + 5 \cdot 25 = 325 \text{ mm}$$

$$m = 1 + 0,2 \cdot \frac{l}{d} = 1 + 0,2 \cdot \frac{200}{25} = 2,6$$

$$A = \frac{h}{m \cdot \tan \varphi} = \frac{325}{2,6 \cdot \tan 40^\circ} = 149 \text{ mm}$$

$$\kappa = 0,876$$

wird die Pfahlgruppentragfähigkeit für eine 4er-Gruppe bei verschiedenen Pfahlachsabständen über anteilige Einzel- und Ersatzpfähle gemäß der Modellvorstellung des Kapitels 10.3 berechnet.

In der Abbildung 10-9 ist die Grenzlast der Pfahlgruppe – ermittelt je nach Pfahlachsabstand aus anteiligen Einzelpfählen und Ersatzpfahl - in Abhängigkeit des jeweiligen Pfahlachsabstandes aufgetragen. Ebenso ist die in den Modellversuchen gemessene Grenzlast der Pfahlgruppe in das Diagramm eingetragen.

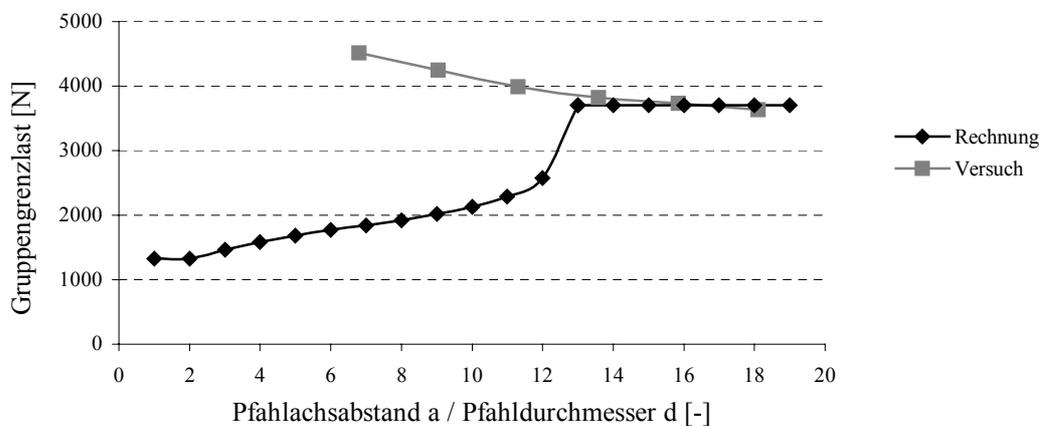


Abbildung 10-9: Vergleich der gemessenen und der berechneten Grenzlasten

Die berechnete Grenzlast ist zunächst wesentlich kleiner als die gemessene. Bei einem Achsabstand größer 11d zerfällt die Pfahlgruppe deutlich in vier Einzelpfähle, was sich in einem steilen Anstieg der Grenzlast der Pfahlgruppe auf die vierfache Grenzlast des Einzelpfahls niederschlägt.

Nach Abbildung 10-9 kann mit der in Kapitel 10.3 entwickelten Modellvorstellung die Grenzlast der Pfahlgruppe quantitativ nicht aus dem Ergebnis der Einzelpfahlversuche im Zusammenhang mit dem Berechnungsansatz des Kapitels 8 ermittelt werden.

Zur näheren Begründung wird das Verhältnis von Länge (l_{Ersatz}) zu Durchmesser (d_{Ersatz}), d.h. die Pfahlschlankheit des jeweils im unteren Teil der Pfahlgruppe entstehenden Ersatzpfahles, betrachtet (Abbildung 10-10).

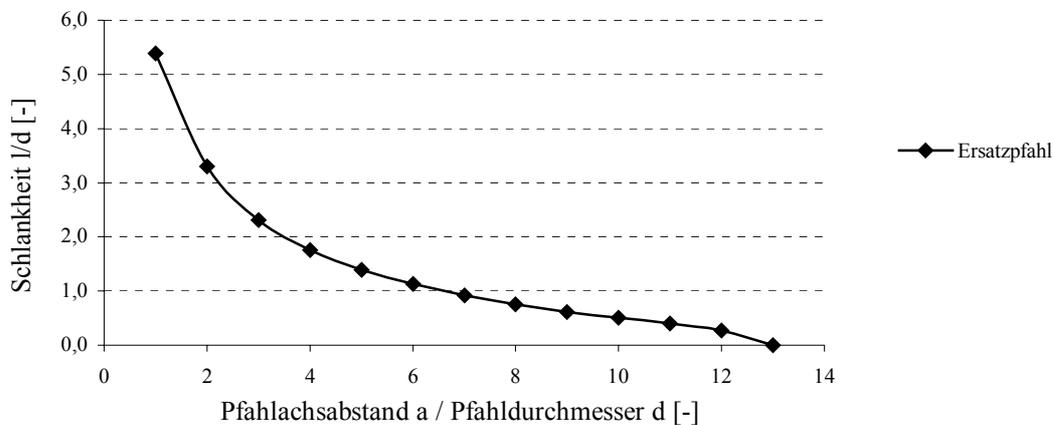


Abbildung 10-10: Schlankheiten des Ersatzpfahls

Die Schlankheit verringert sich – ausgehend von $l/d_{\text{Ersatz}} = 325 / (25 \cdot (1 + \sqrt{2})) = 5,4$ bei $a/d = 1$ - mit zunehmendem Pfahlabstand a . Bei der hier vorliegenden Pfahlschlankheit (großer d_{Ersatz} , kleines l_{Ersatz}) kann sicherlich nicht mehr uneingeschränkt von einem Pfahl gesprochen werden, sondern eher von einer tiefliegenden Flachgründung.

Der in Kapitel 8 entwickelte Berechnungsansatz hat sich vorrangig für schlanke Pfähle – große Länge, kleiner Durchmesser -, bei denen die Mantelreibung einen großen Anteil zu der Grenzlast beiträgt, als brauchbar erwiesen (siehe auch Kapitel 9). Pfähle mit geringer Schlankheit, die den Großteil der auf sie einwirkenden Last über Spitzendruck abtragen, können mit diesem Ansatz nur schlecht erfasst werden (vgl. Abbildung 9-9 und Tabelle 9-1). In der betrachteten Pfahlgruppe wird die einwirkende Gesamtlast wohl vorrangig über die von den Pfählen umschlossene Grundfläche übertragen. Gestützt wird diese Aussage auch dadurch, dass bei einem Pfahlabstand von $6,8d$ ein Pfahlverlängerungsfaktor $f = 13d$, d.h. eine absolute Pfahlverlängerung von $32,5 \text{ cm}$, ($m = 2,6$; $\kappa = 0,876$) erforderlich wäre, um die gemessene Grenzlast mit dem Gruppenmodell wiederzugeben, was physikalisch nicht begründet ist.

Folglich muss die Anwendung des in Kapitel 8 entwickelten Berechnungsmodells auf Einzelfähle, die überwiegend Mantelreibung aktivieren, eingeschränkt werden. Ist infolge einer kleinen Pfahlschlankheit (in der tragfähigen Schicht) die Spitzendrucktragfähigkeit groß oder tritt bei einer Pfahlgruppe eine relativ große „Ersatz-Spitzendruckfläche“ auf, sind mit diesem Berechnungsansatz keine wirklichkeitsnahen Grenzlaster zu erwarten.

11 Pfahlgruppe aus Zug- und Druckpfählen

11.1 Abgrenzung, Allgemeines

In Kapitel 6.3 sind die Ergebnisse aus Modellversuchen wiedergegeben, bei denen ein Druckpfahl belastet wurde und umgebende Zugpfähle zur Abtragung der Reaktionskraft herangezogen wurden. Über die Ermittlung der Grenzlast eines einzeln stehenden Zugpfahls und die in einer Zugpfahlgruppe auftretende gegenseitige Beeinflussung der Pfähle hat Quarg-Vonscheidt (2000) veröffentlicht. Die Grenzlast eines einzeln stehenden Zugpfahles wird von Quarg-Vonscheidt auch mit Hilfe von parabelförmigen Rotationsschalen aus granularem Material bestimmt.

Nachfolgend wird aus einer rein geometrischen Betrachtung der Abstand zwischen dem Druckpfahl und den Zugpfählen in einer „gemischten“ Gruppe hergeleitet, der einzuhalten ist, damit sich die Grenzlasten der Pfähle unbeeinflusst von Nachbarpfählen entwickeln. Ein Berechnungsansatz, der die Abschätzung der Grenzlast des Druck- bzw. der Zugpfähle bei geringem Abstand ermöglicht, wird nicht hergeleitet.

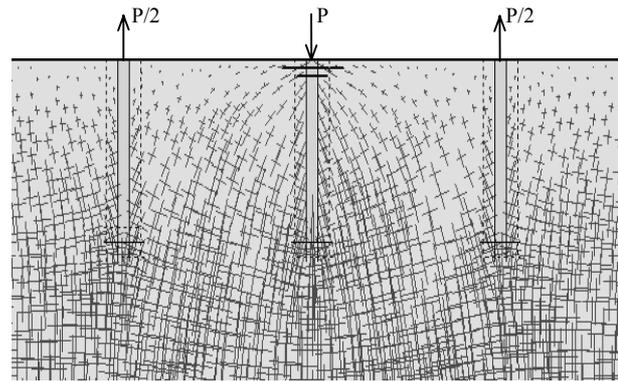
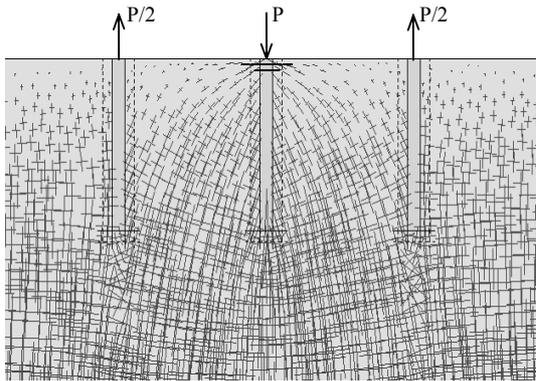
Die geometrischen Betrachtungen werden mit den Aussagen der Modellversuche verglichen. Bei diesen Experimenten werden Pfahlmodelltypen T23 ($d = 25 \text{ mm}$; $l = 300 \text{ mm}$) bei der Reihe 1 als Zug- und Druckpfahl, entsprechend auch Pfahlmodelle vom Typ T22 ($d = 25 \text{ mm}$; $l = 200 \text{ mm}$) und bei der Reihe 2 der Typ T23 bzw. T22 als Zugpfahl und der Typ T22 bzw. T21 ($d = 25 \text{ mm}$; $l = 100 \text{ mm}$) als Druckpfahl verwendet.

11.2 Geometrische Modellvorstellung

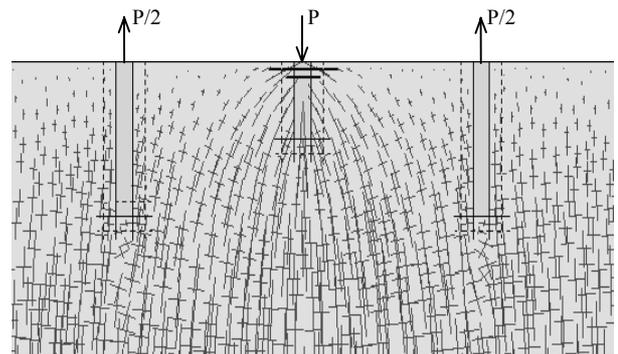
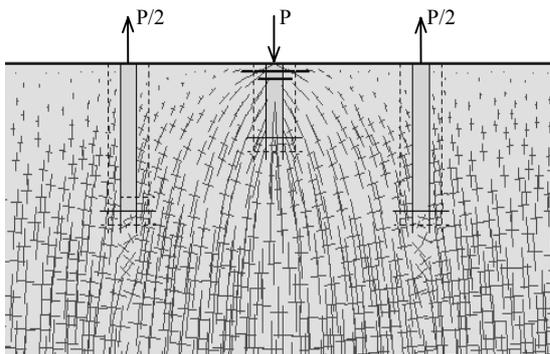
Zur Lastabtragung in den Boden beansprucht jeder Pfahl einen gewissen Bodenbereich, der durch einen parabelförmigen Rotationskörper definiert ist. Die Bestimmung der Größe dieses Bodenbereichs für einen unbeeinflussten auf Zug oder Druck beanspruchten Einzelpfahl kann auf der Basis des jeweiligen Berechnungsansatzes erfolgen. Ist der Abstand zwischen den einzelnen Pfählen so groß, dass sich diese Bodenbereiche nicht mehr berühren, ist keine gegenseitige Beeinflussung der Pfähle zu erwarten, jeder Pfahl erreicht theoretisch die Grenzlast eines unbeeinflussten Einzelpfahls. Dabei wird vorausgesetzt, dass der Spannungszustand in dem Bodenbereich, der durch die Schengeometrie beschrieben wird, nicht durch einen benachbarten Pfahl beeinträchtigt wird.

Eine Beeinflussung der Spannungszustände in dem vom jeweiligen Pfahl beanspruchten Bodenbereich lässt sich am Ergebnis einer FE-Berechnung für gleichlange und unterschiedlich

lange Pfähle erkennen (Abbildung 11-1). Sind die Pfahlabstände gering (Abbildung 11-1a, links), verläuft die Spannungstrajektorie der größeren Hauptspannung vom Druckpfahl direkt zum Zugpfahl. Bei größerem Pfahlabstand (Abbildung 11-1a, rechts) kann für den Zugpfahl vielleicht schon die Ausbildung einer eigenständigen, nach oben offenen Parabelschale interpretiert werden. Besonders deutlich zeigt sich dies bei einer Pfahlanordnung, in der der Druckpfahl kürzer ist als die ihn umgebenden Zugpfähle (Abbildung 11-1b).



a) gleich lange Pfähle



b) unterschiedlich lange Pfähle

Abbildung 11-1: Spannungsumlenkung im Boden bei unterschiedlichen Pfahlabständen

Nachfolgend wird der Abstand zwischen Druckpfahl und Zugpfahl bestimmt, bei dem sich die um den Druckpfahl entstehende Rotationsparabel nach Kapitel 8 gerade in einem Punkt mit der Zugpfahlrotationsparabel nach Quarg-Vonscheidt berührt.

Die Geometrie der Rotationsparabeln wird wie folgt beschrieben:

- Druckpfahl (Kapitel 8)

$$x_D = -\frac{A_D}{h_D^{m_D}} \cdot z^{m_D} + A_D + \frac{d_D}{2} \quad (\text{GL. 11-1})$$

Der Koordinatenursprung liegt am rechnerischen Pfahlfuß (z)

- Zugpfahl (Quarg-Vonscheidt)

$$x_Z = -\frac{A_Z}{h_Z^{m_Z}} \cdot \bar{z}^{m_Z} + A_Z + \frac{d_Z}{2} \quad (\text{GL. 11-2})$$

Der Koordinatenursprung liegt am Pfahlkopf (\bar{z})

Wenn sich die Rotationsparabeln in einem Punkt berühren, gilt mit a = Achsabstand zwischen Druck- und Zugpfahl (siehe Abbildung 11-2):

$$a = x_Z + x_D \quad x_Z \text{ und } x_D \text{ in der gleichen Tiefe } \bar{z}$$

Für den Druckpfahl gilt: $z = h_D - \bar{z}$

$$a = -\frac{A_D}{h_D^{m_D}} \cdot (h_D - \bar{z})^{m_D} + A_D + \frac{d_D}{2} - \frac{A_Z}{h_Z^{m_Z}} \cdot \bar{z}^{m_Z} + A_Z + \frac{d_Z}{2}$$

Gesucht ist das Maximum von a :

$$\begin{aligned} (x_Z + x_D)' = 0 &= \frac{A_D \cdot m_D}{h_D^{m_D}} \cdot (h_D - \bar{z}_B)^{m_D-1} - \frac{A_Z \cdot m_Z}{h_Z^{m_Z}} \cdot \bar{z}_B^{m_Z-1} \\ \rightarrow \left(\frac{A_D \cdot m_D}{h_D^{m_D}} \right) \cdot \left(\frac{h_Z^{m_Z}}{A_Z \cdot m_Z} \right) &= \frac{\bar{z}_B^{m_Z-1}}{(h_D - \bar{z}_B)^{m_D-1}} \end{aligned} \quad (\text{GL. 11-3})$$

$$\boxed{(\quad) \cdot (\quad)}$$

→ \bar{z}_B = Tiefenlage des Berührungspunktes.

Die Parameter bestimmen sich wie folgt:

- Druckpfahl: $h_D = l_D + f \cdot d_D = l_D + 5 \cdot d_D$ für die Modellpfähle

$$m_D = 1 + 0,2 \cdot \frac{l_D}{d_D}$$

$$A_D = \frac{h_D}{m_D \cdot \tan \delta_{\text{Pfahl}}}$$

- Zugpfahl: $h_Z = l_Z$
 $m_Z = 4$ nach Quarg-Vonscheidt

A_Z ist abhängig von l_Z und der mittleren Korngröße des Versuchssandes (d_{50}) und wird aus einem von Quarg-Vonscheidt veröffentlichten Nogramm bestimmt. Für den 300 mm langen Zugpfahl ergibt sich mit

$d_{50} = 0,4$ mm des Versuchssandes eine Schalenöffnungsweite von $A = 165$ mm und für den 200 mm langen Zugpfahl ist $A = 116$ mm.

In der Tabelle 11-1 ist für alle in den Modellversuchen untersuchten Zug- Druckpfahlkombinationen der jeweilige bezogene Pfahlachsabstand $\zeta = a/d$ aufgelistet, ab dem keine gegenseitige Beeinflussung der Pfähle mehr vorliegt.

	l	d	h	m	A	()·()	\bar{z}_B	x	a	$\zeta = a/d$
	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[mm]		[mm]	[mm]	[mm]	[-]
Zugpfahl T23	300	25	300	4	165	7,196	165	162,4	295,9	11,84
Druckpfahl T23	300	25	425	3,4	149			133,5		
Zugpfahl T23	300	25	300	4	165	1400	167	161,7	300,3	12,01
Druckpfahl T22	200	25	325	2,6	149			138,6		
Zugpfahl T22	200	25	200	4	116	393,43	124	111,4	230,2	9,21
Druckpfahl T22	200	25	325	2,6	149			118,8		
Zugpfahl T22	200	25	200	4	116	53,967	128	109,0	237,7	9,51
Druckpfahl T21	100	25	225	1,8	149			128,7		

Tabelle 11-1: Pfahlachsabstände für verschiedene Pfahlkombinationen

Wie insbesondere die Abbildung 11-2 zeigt, öffnen sich die Rotationsparabeln mit zunehmender Koordinate z bzw. \bar{z} rasch, so dass der Berührungspunkt – wie auch die voranstehende tabellarische Rechnung nachweist - näherungsweise bei voller Schalenöffnungsweite zu finden ist. Der Pfahlachsabstand, der nach dieser hypothetischen Modellvorstellung eine gegenseitige Beeinflussung von Druck- und Zugpfahl ausschließt, beträgt also näherungsweise $a = A_z + A_D + d$, d.h. für die Modellversuche mit T23/T23 $a = (165 + 149 + 25) \approx 340$ mm = $13,6 \cdot d$.

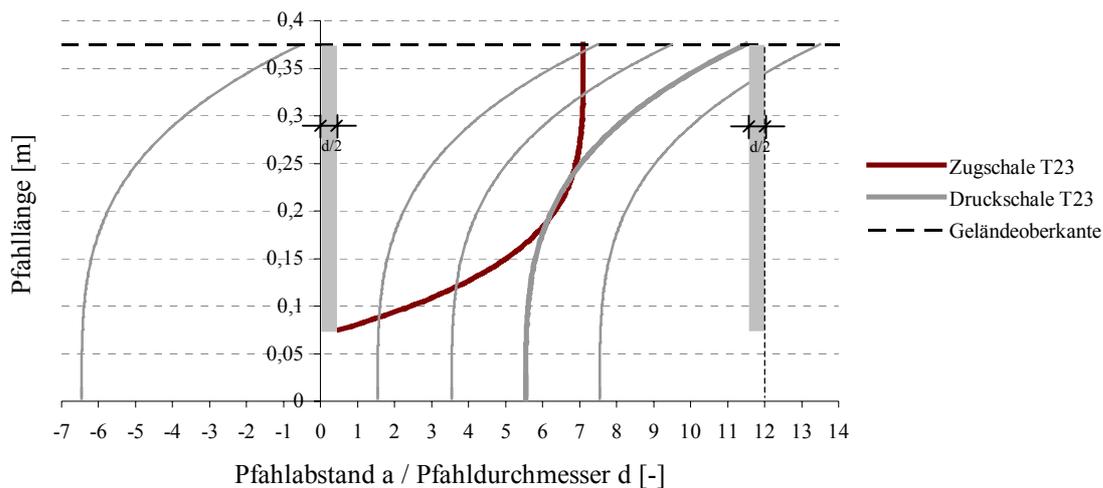


Abbildung 11-2: Rotationsparabeln für 300 mm lange Pfähle

11.3 Betrachtung der Pfahlgrenzlasten in den Modellversuchen

11.3.1 Vorbemerkung

Vorrangig werden die Versuche betrachtet, die bei Versagen der Zugpfähle zu einer großen Auslastung des Druckpfahls führen. Zu beachten ist, dass die in den Versuchen ermittelte Grenzzugkraft geringfügig höher liegen kann als diese sich über den Schalenansatz ergeben würde. Bedingt ist dies durch die höhere Belastungsgeschwindigkeit in den Zug-Druck-Versuchen verglichen mit den Zugversuchen von Quarg-Vonscheidt. Es wird angenommen, dass dies auf die Schalengeometrie nur vernachlässigbare Auswirkungen hat.

11.3.2 Druck- und Zugpfahl haben die gleiche Länge

Dargestellt ist in der Abbildung 11-3 die Pfahl-Effektivität als das Verhältnis der Grenzlast in der aus Druckpfahl und Zugpfählen bestehenden Gruppe zu der Grenzlast des einzeln stehenden Druck- bzw. Zugpfahls (vgl. Kapitel 6). In den betrachteten Versuchen kam es immer zu einem Zugpfahlversagen, so dass der Druckpfahl nicht die Pfahleffektivität von 1,0 erreicht.

Eingetragen ist in der Abbildung 11-3 bei $11,84d$ die in Abschnitt 11.2 ermittelte Grenze der gegenseitigen Beeinflussung. Weiterhin ist die Grenze der gegenseitigen Beeinflussung in einer reinen Zug- und Druckpfahlgruppe aus der Addition der jeweiligen Öffnungsweiten (inklusive Pfahldurchmesser) markiert.

Die theoretische Grenzlinie für eine Zug-Druck-Kombination aus den Pfählen fällt gemäß Abbildung 11-3 annähernd mit dem Pfahlachsabstand zusammen, bei dem für die Zugpfähle die Pfahleffektivität 1,0 erreicht wird.

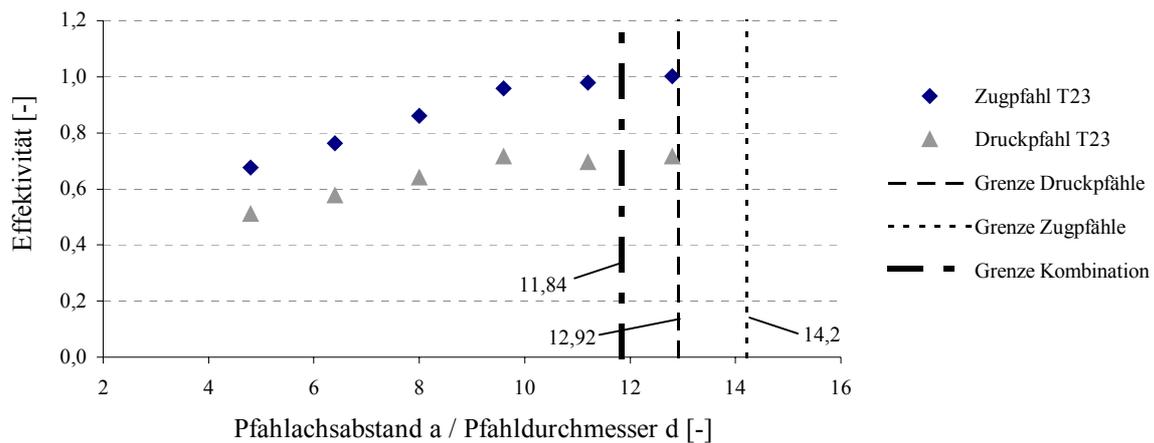


Abbildung 11-3: Gegenseitige Beeinflussung von Zug- und Druckpfählen

Die Versuchsreihe mit 200 mm langen Pfahlmodellen liefert qualitativ gleiche Ergebnisse. Rechnerisch endet die gegenseitige Beeinflussung der Pfähle gemäß Abschnitt 11.2 bei einem Abstand von $9,21d$. Der Wert ist identisch mit dem Pfahlabstand, ab dem die Zugpfähle im Modellversuch die Pfahleffektivität 1,0 erreichen (Kapitel 6). Die Grenzen für eine reine Zug- bzw. Druckbeanspruchung liegen bei $10,28d$ bzw. bei $12,92d$.

In der Versuchsreihe mit gleichlangen Pfählen zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit dem zur Ermittlung des Grenzabstandes bei gegenseitiger Beeinflussung vorgeschlagenen geometrischen Ansatz.

11.3.3 Unterschiedlich lange Pfähle

Eine Beurteilung der Versuche mit unterschiedlich langen Pfählen hinsichtlich eines Grenzwertes für den Pfahlachsabstand der gegenseitigen Beeinflussung der einzelnen Pfahlarten ist schwieriger, da in den entscheidenden Pfahlabständen ein Wechsel im Versagensmechanismus auftritt (Kapitel 6.3).

Für die Versuchskonstellation mit einem 200 mm langen Druckpfahl und 300 mm langen Zugpfählen liegt die rechnerische Grenze der gegenseitigen Beeinflussung bei $12,01d$ (Kapitel 11.2), der Wechsel im Versagensmechanismus tritt zwischen den Pfahlabständen von $11,2d$ bis $13d$ auf. Beim letztgenannten Abstand haben die Zugpfähle ihre Grenztragfähigkeit erreicht.

Der Wechsel im Versagensmechanismus zeigt sich in den Versuchen (Abbildung 11-4) etwa an der Stelle, an der die rechnerisch bestimmte Grenze der gegenseitigen Beeinflussung liegt, wenn jede Pfahlart die volle Rotationsparabel ausgebildet hat, d.h. bei $\zeta = (165 + 149 + 25)/25 = 13,56 \cdot d$. So gesehen sind der Wechsel im Versagensmechanismus und die nachfolgend nicht weiter zunehmenden Zugpfahlkräfte Indizien dafür, dass die gegenseitige Beeinflussung der Pfähle ab diesem Pfahlabstand nicht mehr vorhanden ist.

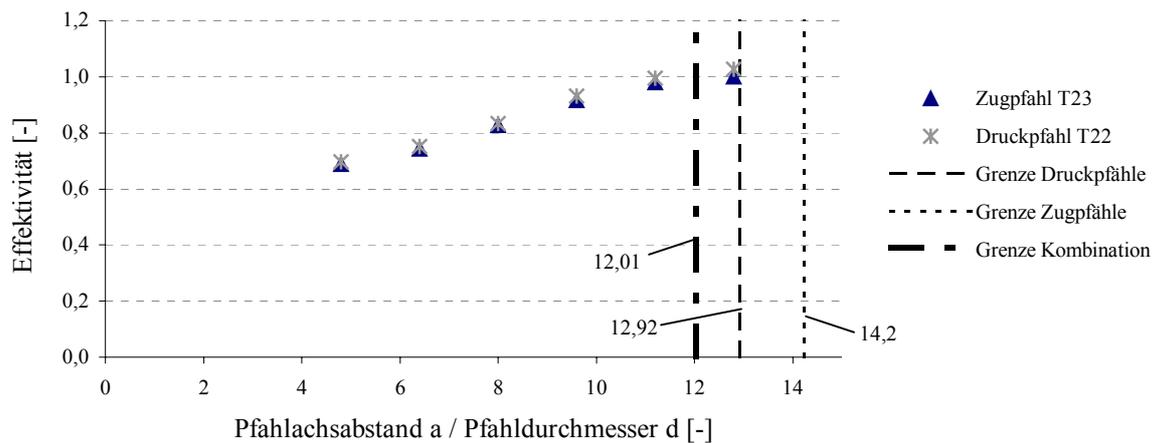


Abbildung 11-4: Gegenseitige Beeinflussung von Zug- und Druckpfählen

Die Versuchskonstellation aus 200 mm langen Zugpfählen und einem 100 mm langen Druckpfahl ergibt einen rechnerischen Grenzabstand von $9,51d$. In diesem Fall tritt der Wechsel im Versagensmechanismus vom Druck- zum Zugpfahlversagen zwischen einem Pfahlabstand von $8d$ und $9,6d$ (Kapitel 6) ein. Danach nehmen die Zugpfahlkräfte nicht mehr weiter zu.

Auch für unterschiedlich lange Pfähle ist es möglich die Grenze der gegenseitigen Beeinflussung von unterschiedlich beanspruchten Pfählen mit dem Schalenmodell zu erfassen. Dies gelingt – wie oben angeführt - durch die Ermittlung des Berührungspunktes der unterschiedlichen Schalen.

12 Zusammenfassung

In Modellversuchen wird die Grenzlast von Druckpfählen und Druckpfahlgruppen untersucht. Für die einzeln stehenden Druckpfähle werden 23 Pfahltypen mit unterschiedlichen Längen und Durchmessern verwendet. Die Gruppenversuche werden nur mit einem Pfahltyp mit $d = 25 \text{ mm}$ und $l = 200 \text{ mm}$, angeordnet als 4er- oder 5er-Gruppe, durchgeführt.

Weiterhin wird in Modellversuchen an „gemischten“ Pfahlgruppen aus Zug- und Druckpfählen mit gleicher und unterschiedlicher Länge die jeweilige Pfahlgrenzlast in Abhängigkeit des vorhandenen Pfahlachsabstandes betrachtet.

In Anlehnung an die Modellversuche mit Einzelpfählen wird ein schalenstatischer Berechnungsansatz zur Ermittlung der Pfahlgrenzlast entwickelt. Es wird davon ausgegangen, dass um den Pfahl bei Belastung rotationssymmetrische Schalentragwerke entstehen. An einer aus dem Schalentragwerk herausgeschnittenen horizontalen, sektorförmigen Elementscheibe mit definierter Dicke werden die Gleichgewichtsbedingungen der Vertikal- und Horizontalkräfte aufgestellt. Am oberen und unteren Rand der Elementscheibe treten Meridiankräfte infolge Schaleneigengewicht, Bodenüberschüttung und Randlast auf, die eine nach außen gerichtete horizontale Kraft für jede Schale zur Folge haben. Dieser Kraft steht an der Mantelschale der bis zu einem gewissen Grad mobilisierte radiale Erddruck entgegen. Durch Erfüllen der Gleichgewichtsbedingung für Horizontalkräfte kann für den einzelnen Pfahl die in jede Schale eingeleitete Randlast und durch ihre Summation über die Pfahllänge die Grenzlast bestimmt werden.

Aus der im Modellversuch gemessenen Grenzlast wird durch Anwendung des schalenstatischen Berechnungsansatzes der mobilisierte Erdwiderstand berechnet. Für schlanke Pfähle mit gegenüber der Mantelreibung geringem Spitzenwiderstand erweist sich diese Berechnung als stabil. Weniger gut gelingt dies für gedrungene Pfähle, woraus zu schließen ist, dass sich das Berechnungsmodell vor allem für Mantelreibungspfähle eignet.

Bei großmaßstäblichen Pfahlprobelastungen muss eine Modifikation des entwickelten Berechnungsmodells hinsichtlich der Größe des mobilisierten Erdwiderstandes erfolgen, um die bekannte Pfahlgrenzlast zu erhalten. Es gelingt nicht, die Eingabeparameter des Berechnungsmodells so allgemein zu definieren, dass eine zutreffende Angabe der Grenzlast im Vorfeld der Pfahlherstellung sicher möglich sein wird.

Anschließend wird der Berechnungsansatz auf Pfahlgruppen übertragen. Eine rein geometrische Betrachtung zeigt, dass es möglich ist, den Pfahlachsabstand, ab dem keine gegenseitige Beeinflussung der Pfähle mehr vorliegt, zu bestimmen. Allerdings gelingt es nicht, bei kleineren Pfahlachsabständen die Gruppengrenzlast quantitativ – ausgehend von einem dicken Er-

satzpfahl – mit dem bei zunehmendem Achsabstand der Pfähle in Einzelpfähle zerfallenden Ersatzpfahlmodell zu erfassen.

Kombiniert man den für Druckpfähle entwickelten Berechnungsansatz mit dem schalenstatischen Ansatz für Zugpfähle, kann auf geometrischem Wege der Achsabstand bestimmt werden, ab dem in einer „gemischten“ Pfahlgruppe keine Beeinflussung der Pfähle mehr auftritt. Bei diesem kritischen Pfahlachsabstand erreicht jeder Pfahl die gleiche Grenzlast wie ein unbeeinflusster Einzelpfahl.

Der dargestellte Berechnungsansatz bietet für Pfahlgruppen die Möglichkeit einen kritischen Pfahlachsabstand, bei dem sich die Pfähle nicht mehr gegenseitig beeinflussen festzulegen. Allerdings können für kleinere Achsabstände keine quantitativen Aussagen zur Gruppentragfähigkeit getroffen werden. Für Einzelpfähle kann bei bekannter Grenzlast der im Boden auftretende Spannungszustand in der Pfahlumgebung wirklichkeitsnah beschrieben werden.

Mit dem vorgeschlagenen Berechnungsansatz ist keine Berücksichtigung von Verformungen möglich. Dies zeigt sich deutlich in der Festlegung des Mobilisierungsfaktors κ für den Erdwiderstand. Da die im Einzelfall benötigte Größe des Erdwiderstandes von den eingetretenen Verformungen abhängig ist, diese aber keinen Eingang in das Berechnungsmodell finden, kann für κ kein durch eine Funktion beschreibbarer Zusammenhang mit der Pfahlgeometrie gefunden werden.

Literaturverzeichnis

- BEREDUGO, Y. O. (1966) An experimental study of the load distribution in pile groups in sand
Canadian Geotechnical Journal, Vol. III, No.3
- BERGDAHL, U.
WENNERSTRAND, J. (1976) Die Tragfähigkeit von Rammpfählen in lockerem Sand
Sechste Europäische Konferenz für Bodenmechanik und Grundbau, Wien,
Vol.1.1, S.355-360
- BÖCKMANN, F.-J. (1991) Modellversuche zur Grenzlastermittlung von Pfahlgruppen
GH Kassel-Universität, Grundbau, Boden- und Felsmechanik, Heft 2
- BOLTON, M. D. (1986) The strength and dilatancy of sands
Geotechnique 36, No. 1, S. 65-78
- BRIAUD, J.-L.
BALLOUZ, M.
NASR, G. (2000) Static Capacity Prediction by Dynamic Methods for Three Bored Piles
Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.126, No.7,
S.640-649
- BRIAUD, J.-L.
TUCKER, L. M.
NG, E. (1999) Axial loaded 5 pile group and single pile in sand
Offshore Site Investigation and Foundation Behavior, Volume 28, S.661-677
- BRIAUD, J.-L.
TUCKER, L. M. (1988) Measured and Predicted Axial Response of 98 Piles
Journal of Geotechnical Engineering, Vol.114, No.9, S.984-1001
- BRINCK, J. (2001) Bodenmechanische 1g-Modellversuche zum Tragverhalten von Druckpfäh-
len; Diplomarbeit am Lehrstuhl für Unterirdisches Bauen, Grundbau und Boden-
mechanik, Berg. Universität Wuppertal, unveröffentlicht
- BROMS, B. B. (1966) Methods of Calculating the Ultimate Bearing Capacity of Piles
Sols Soils, No.18-19, S.1-11
- BRUNO, D.
RANDOLPH, M. F. (1999) Dynamic and Static Load Testing of Model Piles Driven into Dense Sand
Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.125, No.11,
S.988-998
- CHOW, Y. K. (1986) Analysis of vertically loaded pile groups
International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,
Vol.10, Heft 1, S.59-72
- COYLE, H. M.
CASTELLO, R. R. (1981) New Design Correlations for Piles in Sand
Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.107, No.GT7,
S.965-986
- COYLE, H. M.
SULAIMAN, I. H. (1970) Bearing Capacity of Foundation Piles: State of the Art
Highway Research Record, Nr.333, S.87ff
- DÄTIG, M. (2001) Tragfähigkeit von Zug- und Druckpfählen im bodenmechanischen 1g-
Modellversuch; Diplomarbeit am Lehrstuhl für Unterirdisches Bauen, Grundbau
und Bodenmechanik, Berg. Universität Wuppertal, unveröffentlicht
- DIN 1054 (2003) Baugrund; Sicherheitsnachweise im Erd – und Grundbau
Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag, Berlin (01/03)

- DIN 4014 (1990) Bohrpfähle: Herstellung, Bemessung, Tragverhalten
Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth-Verlag, Berlin (03/90)
- DIN 4026 (1975) Rammpfähle: Herstellung, Bemessung und zulässige Belastung
Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth-Verlag, Berlin (08/75)
- DIN 4094 (1990) Erkundungen durch Sondierungen
Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth-Verlag, Berlin (12/90)
- DIN 4128 (1983) Verpresspfähle (Ortbeton- und Verbundpfähle) mit kleinem Durchmesser:
Herstellung, Bemessung und zulässige Belastung
Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth-Verlag, Berlin (04/83)
- DIN 18126 (1989) Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester
Lagerung
Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth-Verlag, Berlin (09/89)
- DIN 18137 T 2 (1990) Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Bestimmung der Scherfestigkeit;
Triaxialversuch
Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag, Berlin (12/90)
- DOHRENBUSCH, J. (2000) Bodenmechanische 1g-Modellversuche zum Tragverhalten von Druckpfäh-
len; Studienarbeit am Lehrstuhl für Unterirdisches Bauen, Grundbau und Boden-
mechanik, Berg. Universität Wuppertal, unveröffentlicht
- FADEEV, A. B.
VASILIEV, V. Z.
NOSKOV, I. V.
DEVALTOVSKY, E. E. (1984) The behaviour of single piles and pile-groups under vertical load
Proc. 6th Conference on soil mech. And found. Eng. Budapest, S. 351-358
- FEDA, J. (1963) Skin Friction of Piles Due to Dilatancy,
International conference on soil mechanics and foundation engineering, Hungar-
ian Academy of Sciences, Budapest
- FILTER, M. (2000) Bodenmechanische 1g-Modellversuche zum Tragverhalten von Druckpfäh-
len; Diplomarbeit am Lehrstuhl für Unterirdisches Bauen, Grundbau und Boden-
mechanik, Berg. Universität Wuppertal, unveröffentlicht
- FLEMING, W. G. K.
WELTMAN, A. J.
RANDOLPH, M. F.
ELSON, W. K. (1992) Piling Engineering, 2nd edition
Blackie and Son Ltd, London, Glasgow, ISBN 0-470-21825-8
- FORST, SIEMER (1982) Pfahlgründung und Versuche an Großbohrpfählen im Zuge des Umbaues
Düsseldorf Hbf.
Die Bautechnik 59, Heft 3, S.73-86
- FRANKE, E. (1973) Probelastung an Großbohrpfählen
Die Bautechnik 50, Heft 1, S.7-20
- FRANKE, E. (1976) Die Tragfähigkeit von Pfählen, ihre Abhängigkeit vom Pfahldurchmesser
und ihre Ermittlung mit Sonden in nichtbindigen Böden
Deutsche Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik, TU Berlin, Selbstverlag
S.45-51
- FRANKE, E. (1981) Neue Erkenntnisse über den Spitzendruck von Pfählen in Sand und einige
praktische Konsequenzen
Die Bautechnik 58, Heft 3, S.80-86

- FRANKE, E. (1992) Abschnitt „Pfähle“ im Grundbautaschenbuch
4. Auflage, Teil 3, S.173ff, Ernst & Sohn, Berlin-München
- FRANKE, E.
GARBRECHT, D. (1977) Drei Serien von Probelastungen an Großbohrpfählen in Sand
Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr.41
- FRANKE, E.
GARBRECHT, D. (1980) Spitzendruck und Mantelreibung von Großbohrpfählen im norddeutschen
Geschiebemergel
Geotechnik Jg.3, Nr.1, S.32-35
- GARG, K. G. (1979) Bored pile groups under vertical load in sand
Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.105, No.GT8,
S.939-956
- GARNIER, J.
KÖNIG, D. (1998) Scale effects in piles and nails loading tests in sand
Centrifuge 98, Tolego, Japan, Band 1, S.205-216
- GLASER, D. (2001) Tragfähigkeit von Zug- und Druckpfählen im bodenmechanischen 1g-
Modellversuch; Diplomarbeit am Lehrstuhl für Unterirdisches Bauen, Grundbau
und Bodenmechanik, Berg. Universität Wuppertal, unveröffentlicht
- GREGERSEN, O. S.
AAS, G.
DIBIAGIO, E. (1973) Load Tests on Friction Piles in Loose Sand
8th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., Moskau, Vol.2, S.109-117
- GUO, W. D. (2000) Vertically Loaded Single Piles in Gibson Soil
Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.126, Nr.2,
S.189-193
- GUO, W. D.
RANDOLPH, M. F. (1999) An efficient approach for settlement prediction of pile groups
Geotechnique, Vol.49, No.2, S.161-179
- HANNA, A. M.
NGUYEN, T. Q. (2002) An axisymmetric model for ultimate capacity of a single pile in sand
Soils and foundations, Vol. 42, No.2, 47-58, Japanese Geotechnical Society
- HANNA, T. H.
TAN, R. H. S. (1973) The Behavior of long piles under compressive loads in sand
Canadian Geotechnical Journal, Vol.10, Nr.3, S.311-340
- HANNA, T.H. (1963) Model studies of foundation groups in sand
Geotechnique, Vol.13, No.4, S.334-351
- HETTLER, A. (1986) Setzungen von vertikalen, axial belasteten Pfahlgruppen in Sand
Bauingenieur, Bd.61, Heft 9, S.417-421
- HIRANY, A.
KULHAWY, F. H. (1997) Interpretation of Load Tests on Drilled Shafts, Part 1: Axial Compression
Congr. on Found. Engrs., H.Kulhawy, ed., Vol.2, ASCE, S.1132-1149
- HIRSCHBERG, M (2001) Tragverhalten von Zug- und Druckpfählen im bodenmechanischen 1g
Modellversuch; Diplomarbeit am Lehrstuhl für Unterirdisches Bauen, Grundbau
und Bodenmechanik, Berg. Universität Wuppertal, unveröffentlicht
- ISSMFE (1983) Axiale Pfahl-Probelastung - Teil I: Statische Belastung, Empfehlungen
für die Durchführung (4.Vorschlag) – 1983
ISSMFE - Komitee "Feld- und Laborversuche" (1979-1983)
- JAMIOLKOWSKI, M.
LANCELOTTA, R. (1988) Relevance of in-situ test results for evaluation of allowable base resistance
of bored piles in sands
Deep Foundations on Bored and Auger piles, Balkema, Rotterdam

- JARDINE, R. J.
LEHANE, B. M.
EVERTON, S. J. (1993) Friction coefficients for piles in sands and silts
Offshore Site Investigation and Foundation Behaviour, Vol.28, S.661-677
- KASTRUP, J. (2001) Tragfähigkeit von Zug- und Druckpfählen im bodenmechanischen 1g-Modellversuch; Studienarbeit am Lehrstuhl für Unterirdisches Bauen, Grundbau und Bodenmechanik, Berg. Universität Wuppertal, unveröffentlicht
- KEMPFERT, H. G. (1982) Vergleichende Auswertung von Probelastungen der DB an Großbohrpfählen in nichtbindigem Untergrund
Geotechnik Jg.5, Nr.1, S.23-32
- KEMPFERT, H.-G.
LAUFFER, J. (1991) Pfahlprobelastungen in weniger tragfähigen Böden unter statischer und wechselnder Belastung
Geotechnik Jg.14, Nr.3, S. 105-112
- KEMPFERT, H. G.
SMOLTCZYK, U. (2001) Abschnitt „Pfähle“ im Grundbautaschenbuch
6. Auflage, Teil 3, S.87ff, Ernst & Sohn, Berlin-München
- KERISEL, J.
BASSETT, R. H.
ANDERSEN, K. H. (1980) The use of physical models in design
Design parameters in geot. Eng., Vol. 4, S. 315-358
- KISHIDA, H.
MEYERHOFF, G. G. (1965) Bearing Capacity of Pile Groups under Eccentric Loads in Sand
6th ICSMFE, Montreal, Bd.2, S.270-274
- KOLL, S. (2001) Schalenstatischer Ansatz zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Druckpfählen; Studienarbeit am Lehrstuhl für Grundbau, Boden- und Felsmechanik, Berg. Universität Wuppertal, unveröffentlicht
- KOLL, S. (2001) Tragfähigkeit von Zug- und Druckpfählen im bodenmechanischen 1g-Modellversuch; Diplomarbeit am Lehrstuhl für Unterirdisches Bauen, Grundbau und Bodenmechanik, Berg. Universität Wuppertal, unveröffentlicht
- KÖNIG, G. (1979) Die Tragfähigkeit von Pfählen
Der Bauingenieur Jg.45, 1979, Heft 1, S.23-29
- KULHAWY, F. H. (1984) Limiting Tip and Side Resistance: Fact or Fallacy?
Analysis and Design of Pile Foundations, ASCE, S.80-98
- LANCELOTTA, R.
GHIONNA, V. N.I
JAMIOLKOWSKI, M.
PEDRONI, S. (1993) Base capacity of bored piles in sands from in situ tests
Deep foundations on bored and auger piles, ISBN 9054103132, S. 67-74
- LEHANE, B. M.
JARDINE, R. J.
BOND, A. J.
FRANK, R. (1993) Mechanisms of shaft friction in sand from instrumented pile tests
Journal of geotechnical engineering, Vol. 119, No. 1, S. 19-35
- LINDER, W. R. (1977) Zum Eindring- und Tragverhalten von Pfählen in Sand
Technische Universität Berlin, Grundbau und Bodenmechanik
- LINDER, W. R.
ELLNER, A.
KORECK, H.-W.
MEIBNER, H.
SCHMIDT, H. G. (1993) Empfehlungen des Arbeitskreises 5 der DGEG: Statische axiale Probelastungen von Pfählen
Geotechnik, Jg.16, Heft 3, S. 124-136

- LONG, P. D. (1992) Tests on Piled Footings and Pile Groups in Non-Cohesive Soils
Swedish Geotechnical Institute, SGI Varia
- LOPES, F.R.
LAPROVITERA, H. . (1988) On the prediction of the bearing capacity of bored piles from dynamic penetration tests
Deep foundations on bored and auger piles, ISBN 9061918146, S. 537-540
- MEYERHOFF, G. G. (1951) The ultimate bearing capacity of foundations
Geotechnique, Vol.2, No.4, S.301-332
- MEYERHOFF, G. G. (1976) Bearing capacity and settlement of pile foundations
Journal of Geotechnicalengineering GT3, S.195-228
- NICOLA, A. DE
RANDOLPH, M. F. (1999) Centrifuge modelling of pipe piles in sand under axial loads
Geotechnique 49, No.3, S.295-318
- NICOLA, A. DE
RANDOLPH, M. F. (1993) Tensile and compressive shaft capacity of piles in sand
Journal of geotechnical engineering, Vol. 119, No. 12, S. 1952-1973
- O'NEILL, M. W.
HAWKINS, R. A.
MAHAR, L. J. (1982) Load Transfer Mechanismus in Piles and Pile Groups
Journal of the Geotechnical Engineering Division; Proceedings of the American Society of Civil Engineers; Vol.108, No.GT12, S.1605-1623
- PILYAGIN, A. V.
SHUKENBAEV, A. B. (2001) Stress-strain state of pile beds tested under a static loading
Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 38, No.3
- PRICE, R.
ROLLINS, K. M.
KEANE, E. (1992) Comparison of measured and computed drilled shaft capacities based on Utah load tests
Transportation Research Record, No.1336, Washington D.C., p.57-64
- QUARG-VONSCHEIDT, J. (2000) Berechnungsmodell für die Tragfähigkeit und das Gruppenverhalten von Zugpfählen
Bergische Universität Wuppertal, Grundbau, Bodenmechanik und Unterirdisches Bauen, Bericht Nr. 23
- REESE, L.C.
TOUMA, F. T.
O NEIL, M. W. (1988) Behaviour of drilled piers under axial load
Journal of the geotechnical engineering division, GT 5, S. 493-511
- RIPPER, P. (1984) Studie zum Tragverhalten eines Pfahles im radial vorgespannten Boden
TH Darmstadt, Heft 25, Selbstverlag
- ROBERTSON, P. K.
CAMPANELLA, R. G.
WIGHTMAN, A. (1983) SPT – CPT correlations
Journal of geotechnical engineering, Vol. 109, No. 11, S. 315-358
- ROBINSKY, E. I.
MORRISON, C. F. (1964) Sand Displacement and Compaction around Model Friction Piles
Canadian Geotechnical Journal, Vol.1, No.2, S.81-93
- ROSCOE, G. H. (1984) The behaviour of flight auger bored piles in sand
Piling and ground treatment, Thomas Telford Ltd., London, S.241-250
- SIMONINI, P. (1996) Analysis of Behaviour of Sand Surrounding Pile Tips
Journal of Geotechnical Engineering, Vol.122, No.11, S.897-905
- SONNTAG, G
SPANG, J (1974) Vergleich der Tragfähigkeit von Großbohrpfählen aus Großversuchen mit den Ergebnissen aus Laborversuchen an ebenen Modellen
Die Bautechnik, Nr. 11, S. 365-371

- STAMM, J. (1980) Das Tragverhalten vertikal belasteter Großbohrpfähle
Bauingenieur 55, S.333-344, Springer Verlag
- STAMM, J. (1988) Die Tragfähigkeit von Pfählen
Bautechnik 65, Heft 11, S.372-375
- STOLZ, A. (2002) Numerische Berechnungen zur Bestimmung der Pfahltragfähigkeit; Dip-
lomararbeit am Lehrstuhl für Unterirdisches Bauen, Grundbau und Bodenmechanik,
Berg. Universität Wuppertal, unveröffentlicht
- STOLZ, A. (2001) Numerische Berechnungen zur Bestimmung der Pfahltragfähigkeit; Stu-
dienarbeit am Lehrstuhl für Unterirdisches Bauen, Grundbau und Bodenmechanik,
Berg. Universität Wuppertal, unveröffentlicht
- STUART, J. G.
HANNA, T. H. (1961) Groups of deep foundations: A theoretical and experimental investigation
Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation
Engineering, S.149-153
- STUART, J. G.
HANNA, T. H.
NAYLOR, A.H. (1960) Notes on the behaviour of model pile groups in sand
Symposium on the design of pile foundations, Stockholm, S.97-103
- TEJCHMAN, A. F. (1973) Model Investigations of Pile Groups in Sand
Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.99, S.199-
217
- TEJCHMANN, A.
GWIZDALA, K. (1988) Comparative analysis of bearing capacity of large diameter bored piles
Deep foundations on bored and auger piles, ISBN 9061918146, S. 553-558
- VALSANGKAR, A. J.
MEYERHOF, G. G. (1983) Model Studies of the Collapse Behaviour of Piles and Pile Groups
Developments in Soil Mechanics and Foundation Engineering-1, London, S.65-
109
- VAN IMPE, W.F. (1984) Loading test results on an atlas auger pile
Proc. 6th conference on soil mech. And found. Eng. S.419-426
- VESIC, A. S. (1963) Bearing Capacity of Deep Foundations in Sand
Highway Research Record, Nr.39, Washington D.C., S.112-153
- VESIC, A. S. (1964) Investigation of Bearing Capacity of Piles in Sand
Proc. North American Conf. On Deep Foundations, Mexico City, Vol.1, S.197-
224
- VESIC, A. S. (1970) Load Transfer in Pile-Soil Systems
Design and Installation of pile foundations and cellular structures, Duke Univer-
sity, Soil Mechanics Series No.23
- VESIC, A. S. (1972) Expansion of Cavities in infinite Soil Mass
Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.98, No.SH3,
S.265-291
- WEIß, K.
HANACK, S. (1983) Der Einfluß der Lagerungsdichte des Bodens und der Herstellungsart von
Großbohrpfählen auf deren Tragfähigkeit
Deutsche Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik, TU Berlin, Heft 35
- WERNICK, E. (1978) Tragfähigkeit zylindrischer Anker in Sand unter besonderer Berücksichti-
gung des Dilatanzverhaltens
Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe, Heft 75

- WIENHOLZ, B. (1998) Tragfähigkeit von Verdrängungspfählen in Sand in Abhängigkeit von der Einbringung
Institut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft 57
- YASUFUKU, N.
OCHIAI, H.
SHIRO, O. (2001) Pile endbearing capacity of sand related to soil compressibility
Soils and foundations, Vol. 41, No. 4, S. 59-71
- YU, H. S.
HOULSBY, G. T. (1991) Finite cavity expansion in dilatant soils: Loading analysis
Geotechnique 41, No.2, 173-183

Anlage A: Berücksichtigte Probelastungen

Aufgeführt sind Pfahlprobelastungen aus der Literatur, eine eindeutige Zuordnung zu den in den Abbildungen 9-10 bis 9-12 eingetragenen Symbolen ist nicht möglich.

Pfahl Nr.	Durchmesser	Länge	Schlankheit	Reibungswinkel	Bodenwichte	Grenzlast	Quelle
[-]	[m]	[m]	[-]	[°]	[kN/m ³]	[MN]	
29	1,10	9,00	8,18	35	11,0	7,00	Franke,E., Garbrecht,D. (1977)
30	1,10	9,50	8,64	35	11,0	4,98	Franke,E., Garbrecht,D. (1977)
31	1,10	9,00	8,18	35	11,0	7,00	Franke,E., Garbrecht,D. (1977)
32	1,20	8,40	7,00	35	19,0	5,23	Weiß, K., Hanack, S. (1983)
33	1,20	8,50	7,08	35	19,0	4,82	Weiß, K., Hanack, S. (1983)
34	1,30	8,50	6,54	35	19,0	4,58	Weiß, K., Hanack, S. (1983)
35	1,20	8,50	7,08	35	19,0	3,50	Weiß, K., Hanack, S. (1983)
36	1,25	8,50	6,80	35	19,0	4,10	Weiß, K., Hanack, S. (1983)
37	0,60	17,50	29,17	33	13,0	2,10	Roscoe, G. H. (1984)
38	0,60	17,50	29,17	33	13,0	2,40	Roscoe, G. H. (1984)
39	0,60	16,00	26,67	33	13,5	2,10	Roscoe, G. H. (1984)
40	0,60	20,00	33,33	33	13,0	2,70	Roscoe, G. H. (1984)
42	0,30	11,30	38,31	33	14,5	0,90	Roscoe, G. H. (1984)
45	0,41	10,70	26,10	35	14,0	2,49	Roscoe, G. H. (1984)
46	0,41	12,10	29,51	35	14,0	2,03	Roscoe, G. H. (1984)
47	0,41	9,10	22,20	35	14,5	2,49	Roscoe, G. H. (1984)

Pfahl Nr.	Durchmesser	Länge	Schlankheit	Reibungswinkel	Bodenwichte	Grenzlast	Quelle
[-]	[m]	[m]	[-]	[°]	[kN/m ³]	[MN]	
48	0,41	7,60	18,54	35	15,2	1,85	Roscoe, G. H. (1984)
49	0,60	20,00	33,33	35	12,6	2,86	Roscoe, G. H. (1984)
50	0,50	13,30	26,60	35	13,4	2,10	Roscoe, G. H. (1984)
51	0,55	19,90	36,18	35	12,6	2,30	Roscoe, G. H. (1984)
52	1,50	9,00	6,00	35	19,0	8,10	Kempfert, H.-G. (1982)
53	1,50	15,00	10,00	32	19,0	8,10	Kempfert, H.-G. (1982)
55	1,20	20,00	16,67	35	11,0	10,90	Kempfert, H.-G. (1982)
56	1,50	18,00	12,00	35	11,0	15,40	Kempfert, H.-G. (1982)
57	1,30	10,00	7,69	35	11,0	7,00	Kempfert, H.-G. (1982)
58	0,70	6,60	9,43	36	15,0	4,16	Sonntag, G., Spang, J. (1974)
59	1,20	7,20	6,00	36	15,0	7,40	Sonntag, G., Spang, J. (1974)
60	1,50	6,50	4,33	36	15,0	8,81	Sonntag, G., Spang, J. (1974)
61	0,90	6,75	7,50	36	15,0	5,18	Sonntag, G., Spang, J. (1974)
86	0,61	7,10	11,64	37	18,0	3,25	Price, R., Rollins, K. M., Keane, E. (1996)
87	0,61	6,30	10,33	37	18,0	2,20	Price, R., Rollins, K. M., Keane, E. (1996)
88	0,91	12,40	13,63	37	18,0	9,05	Price, R., Rollins, K. M., Keane, E. (1996)
89	0,61	12,20	20,00	37	18,0	9,95	Price, R., Rollins, K. M., Keane, E. (1996)
90	0,61	12,20	20,00	37	18,0	11,00	Price, R., Rollins, K. M., Keane, E. (1996)
91	0,76	12,20	16,05	37	18,0	3,65	Price, R., Rollins, K. M., Keane, E. (1996)

Pfahl Nr.	Durchmesser	Länge	Schlankheit	Reibungswinkel	Bodenwichte	Grenzlast	Quelle
[-]	[m]	[m]	[-]	[°]	[kN/m ³]	[MN]	
92	0,76	12,20	16,05	37	18,0	4,45	Price, R., Rollins, K. M., Keane, E. (1996)
93	0,76	12,20	16,05	37	18,0	3,25	Price, R., Rollins, K. M., Keane, E. (1996)
94	0,76	12,20	16,05	37	18,0	5,65	Price, R., Rollins, K. M., Keane, E. (1996)
95	0,61	10,00	16,39	37	18,0	11,00	Price, R., Rollins, K. M., Keane, E. (1996)
96	0,61	10,00	16,39	37	18,0	6,45	Price, R., Rollins, K. M., Keane, E. (1996)
97	0,61	4,30	7,05	37	18,0	6,00	Price, R., Rollins, K. M., Keane, E. (1996)
98	0,91	11,70	12,86	37	18,0	5,50	Price, R., Rollins, K. M., Keane, E. (1996)
99	0,91	8,53	9,37	37	18,0	3,38	Price, R., Rollins, K. M., Keane, E. (1996)
100	1,20	8,30	6,92	35	19,0	10,40	Weiß, K., Hanack, S. (1983)
101	1,20	8,30	6,92	35	19,0	10,60	Weiß, K., Hanack, S. (1983)
102	0,40	6,25	15,63	35	10,0	0,87	Weiß, K., Hanack, S. (1983)
103	0,40	6,25	15,63	35	10,0	0,81	Weiß, K., Hanack, S. (1983)
104	0,32	6,25	19,53	35	10,0	0,66	Weiß, K., Hanack, S. (1983)
105	0,32	6,25	19,53	35	10,0	0,75	Weiß, K., Hanack, S. (1983)
106	1,00	15,00	15,00	35	11,0	3,24	Fa. Bauer, Schrobenhausen
107	0,88	20,50	23,30	35	11,0	4,89	Fa. Bauer, Schrobenhausen
108	1,20	27,00	22,50	35	11,0	15,19	Fa. Bauer, Schrobenhausen