

Lärmschutzwände auf Pfählen

Dipl.-Ing. H.-G. Kempfert, München

1 Einleitung

In dicht besiedelten Gebieten werden zunehmend an Eisenbahn- und Straßenverkehrswegen Lärmschutzwände aus flexiblen Wandelementen und Pfosten ausgeführt. Als Gründungselemente der Pfosten haben sich neben Einzelfundamenten besonders alle Arten von Pfählen bewährt.

Hinsichtlich der rechnerischen Dimensionierung dieser überwiegend horizontal beanspruchten Pfähle liegen gegenwärtig noch keine einheitlichen und allgemein anerkannten Berechnungsverfahren vor.

Der folgende Beitrag behandelt das horizontale Tragverhalten von Gründungspfählen für Lärmschutzwände und beschreibt die zur Vereinheitlichung der Dimensionierung im Bereich der Deutschen Bundesbahn zunächst empfohlene Vorgehensweise.

2 System und Belastung

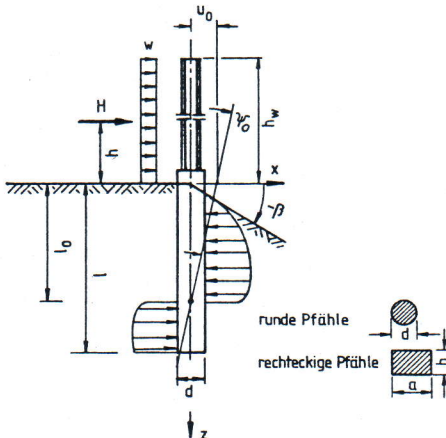
Das statische Grundsystem, die verwendeten Bezeichnungen und die zugehörige Belastung sind in Bild 1 dargestellt.

Für Lärmschutzanlagen an Eisenbahnstrecken ist nach [22] eine waagrecht wirkende, gleichmäßig über die Wandfläche verteilte Windlast (vorwiegend ruhend) von $w = 1,45 \text{ kN/m}^2$ anzusetzen. Die wirkliche Belastung setzt sich dagegen zusammen aus Wind (Grundlast und Bö) sowie eine Druck-/Sogwelle aus dem vorbeifahrenden Zug. Ein schematisches Belastungs-Zeitdiagramm zeigt Bild 2.

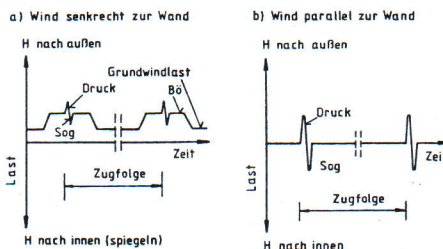
Dabei kann eine Erddruckbelastung auf den Pfahl aus Verkehrslast vernachlässigt werden, da im Fall Bild 2a bei Wind nach innen die Verkehrslast stützend wirkt und bei Wind nach außen (maßgeblicher Lastfall) die volle Windbelastung nur dann wirksam ist, wenn keine abschirmende Wirkung durch den Zug vorhanden ist. Im Fall 2b wird davon ausgegangen, daß durch die Relativgeschwindigkeit zwischen Wind und fahrendem Zug eine erhöhte Druck-Sog-Belastung eintritt. Da die nach außen gerichtete Druckwelle der Zugspitze vorausseilt und nicht über längere Wandabschnitte gleichzeitig

Als Grundlage für die Dimensionierung der Gründungselemente von Lärmschutzwänden auf kurzen, nahezu starren Pfählen bei ebener und geneigter Geländeoberfläche wird über Modellversuche berichtet.

Darauf aufbauend sind Vorschläge zur Berechnung unter Berücksichtigung einzuhalten der Pfahlverdrehungen im Gebrauchszustand angegeben. Bemessungsdiagramme für Regelfälle von Lärmschutzwänden neben Eisenbahnverkehrswegen ermöglichen eine schnelle Pfahldimensionierung.



1 System und Belastung



2 Belastungs-/Zeitdiagramm (schematisch)

wirkt, erscheint eine Vernachlässigung der Verkehrslast auch für diesen Fall gerechtfertigt.

Die nachfolgenden Ausführungen gehen zunächst von einer statisch wirkenden Ersatzlast H in halber Wandhöhe (Bild 1) aus. Bei den in der Regel zur Ausführung kommen-

den Pfahlabmessungen mit einem Durchmesser von ca. 0,5-0,7 m (konstruktiv wegen der Köcherausbildung der Pfosten) bzw. Pfahllängen bis 5 m kann ein nahezu biegestarrer Pfahl angenommen werden [11], dessen Verschiebungsverhalten im Baugrund überwiegend aus Starrkörperbewegungen resultieren.

3 Modellversuche

3.1 Versuchsprogramm und Durchführung

Die Bearbeitung der vorstehend erläuterten Fragestellung wurde aus wirtschaftlichen Gründen auf der Grundlage von Modellversuchen durchgeführt. Ausgehend von den vorab geschätzten Abmessungen des Pfahlprototyps wurde vom Verfasser zunächst ein Versuchsprogramm im Modellmaßstab von ca. 1:5 aufgestellt. Das Bundesbahn-Zentralamt München beauftragte daraufhin die Versuchsanstalt für Bodenmechanik und Grundbau der TH Darmstadt mit der Durchführung der Modellversuche. Da die Frage nach der Übertragbarkeit von kleinmaßstäblichen Modellversuchen auf großmaßstäbliche Pfähle (Prototyp) nicht zweifelsfrei beantwortet werden konnte, wurde während der Vorversuchsphase das Versuchsprogramm dahingehend abgeändert, daß zunächst eine Modellfamilie bei ebener Geländeoberfläche ausgeführt wurde. Das eigentliche Versuchsprogramm zur Parametervariation konnte dann in einem kleineren Maßstab durchgeführt werden. Einen Überblick über den Versuchsumfang

Tabelle 1: Versuche »Modellfamilie« ($h/d = 3,6$; $l/d = 7,0$; $h/l = 0,52$)

Versuch Nr.	d [cm]	γ_0 [kN/m ³]
DB 01	4,60	17,07
DB 02	4,60	17,01
DB 03	4,60	17,17
DB 05	3,40	17,14
DB 06	3,40	17,17
DB 07	1,80	17,16
DB 08	1,80	17,03
DB 09	1,80	17,07
DB 10	1,80	17,10
DB 11	1,80	17,09
DB 12	7,65	17,05
DB 13	7,65	17,12
DB 14	8,10	17,15
DB 15	25,80	17,04
DB 16	14,00	17,11

gibt Tabelle 1 und 2. Als Versuchsmaterial wurde trockener, gleichförmiger Mittel- bis Grobsand verwendet.

Neben den geometrischen Pfahldaten wurde bei einigen Versuchen auch der Pfahlbaustoff variiert, um den Einfluß der Biegesteifigkeit der Pfähle auf das Tragverhalten zu untersuchen [11].

Weitere Modellversuche zu horizontal belasteten Pfählen können z. B. [12, 13, 17, 20] entnommen werden.

stellt. Die Approximation liefert aber im Bereich A für alle Versuche und im Bereich B für Durchmesser 3,4 cm, 4,6 cm, 7,6 cm und 14,0 cm befriedigende Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen. Die Abweichungen im Bereich B, für die Durchmesser 1,8 cm, 8,1 cm und 25,8 cm werden zunächst auf Versuchsstreuungen zurückgeführt. Bild 3 zeigt, daß bei dem hier verwendeten Versuchssand ein deutlicher Maßstabsfaktor vorhanden ist [11].

rungsdichte des Versuchsmaterials im Last-Verformungsverhalten des Pfahls durch einen Faktor in den Gl. 1 bis 3 beschrieben werden kann [10, 12, 13]. In Bild 5 ist der versuchsmäßige Faktor

$$B = H(\beta) / H(\beta = 0)$$

Tabelle 2: Versuche »Parametervariation« (d = 4,6 cm)

Versuch Nr.	γ_0 [kN/m ³]	β [°]	h/d [-]	l/d [-]	h/l [-]
DBB 10	17,17	0,0	3,60	7,0	0,52
DBB 38	17,19	15,0	3,60	7,0	0,52
DBB 30	17,29	25,0	3,60	7,0	0,52
DBB 62	17,17	32,0	3,60	7,0	0,52
DBB 65	17,23	37,5	3,60	7,0	0,52
DBB 21	16,77	0,0	3,60	7,0	0,52
DBB 42	16,67	25,0	3,60	7,0	0,52
DBB 50	16,31	32,0	3,60	7,0	0,52
DBB 15	17,20	0,0	0,11	7,0	0,02
DBB 35	17,19	25,0	0,11	7,0	0,02
DBB 70	17,20	25,0	5,70	7,0	0,81
DBB 80	17,16	25,0	7,00	7,0	1,00
DBB 90*)	16,46	25,0	3,60	7,0	0,52
DBB 91*)	17,22	25,0	3,60	7,0	0,52

*) Lastrichtung gegen den Damm

3.2 Modellgesetze und Auswertung

Über Modellgesetze und der besonderen Problematik bei deren Anwendung in der Geotechnik finden sich in der Literatur ausführliche Darstellungen, z. B. in [1, 12, 15, 19]. Die im Zusammenhang mit dem in Abschn. 3.1 beschriebenen Versuchsprogramm »Modellfamilie« vorhandenen speziellen Anforderungen an die Modellgesetze und die Ergebnisinterpretation zum Maßstabseffekt sowie Einfluß der Biegesteifigkeit sind in [11] ausführlich behandelt. Im vorliegenden Beitrag wurden die Versuche entsprechend der in Abschn. 1 und 2 genannten Fragestellung ausgewertet, um daraus praktische Schlußfolgerungen für die Bemessung von Lärmschutzwandgründungen abzuleiten.

Die in [11] für die »Modellfamilie« vorgenommene Approximation der Pfahlkopfverschiebungen (am Lastangriffspunkt H) im Bereich kleiner Verschiebungsgrößen wurde nachfolgend einheitlich auf die in Geländeoberfläche wirkenden Pfahlverschiebungen- und -verdrehungen (u_0 , ψ_0) erweitert und darüber hinaus eine Approximation im Bereich größerer Verschiebungen/Verdrehungen mit dem Hyperbelverfahren versucht (Bild 3). Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die einzelnen Versuchspunkte im Bild 3 nicht darge-

Die Approximation nach Bild 3 kann analytisch wie folgt beschrieben werden:

a) Bereich A: $1,0 \leq \frac{u_0}{d} [\%] \leq 20,0$

bzw. $0,2 \leq \tan \psi_0 [\%] \leq 4,0$:

$$\frac{u_0}{d} = \left(\frac{H}{\gamma_0 l d^2} \right)^{1,97} d_{cm}^{0,8} 10^{-3,5} \quad (1)$$

$$\tan \psi_0 = \left(\frac{H}{\gamma_0 l d^2} \right)^{1,97} d_{cm}^{0,8} 10^{-4,22} \quad (2)$$

b) Bereich B: $\frac{u_0}{d} [\%] > 20,0$ bzw.

$\tan \psi_0 [\%] > 4,0$:

$$H = \frac{u_0 \text{ (bzw. } \tan \psi_0)}{a + b u_0 \text{ (bzw. } \tan \psi_0)} \quad (3)$$

für u_0 [m] und H [kN] gilt:

$$a = 0,11 d_{cm}^{-1,4}$$

$$b = 232 d_{cm}^{-2,6}$$

für $\tan \psi_0$ [-] und H [kN] gilt:

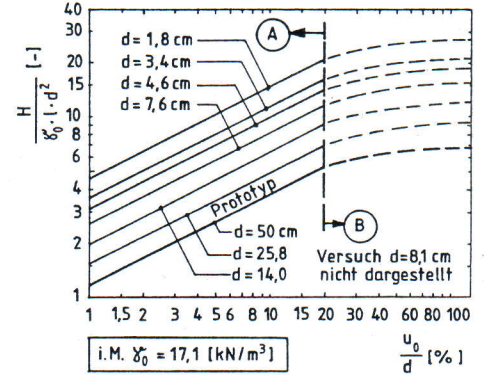
$$a = 2,09 d_{cm}^{-2,4}$$

$$b = 232 d_{cm}^{-2,6}$$

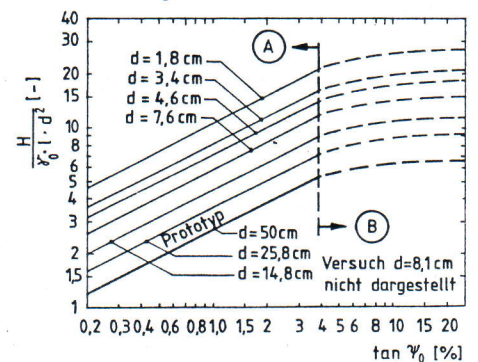
Dabei konnte für alle Versuche näherungsweise von einer konstanten Drehpunktlage in Höhe von $l_0/l = 0,75$ ausgegangen werden. Ebenfalls in Bild 3 ist die rechnerische Extrapolation eines Prototyps von $d = 50$ cm dargestellt.

Bild 4 zeigt die Versuchsergebnisse für unterschiedliche Böschungsneigungen vor dem Pfahl. Die Approximation der Versuchsergebnisse wurde entsprechend Bild 3 und in Anlehnung an Gl. 2 und 3 vorgenommen (Versuchsstreuungen bei DBB 62 und 65). Dabei wird vorausgesetzt, daß die Böschungsneigung und die Lage-

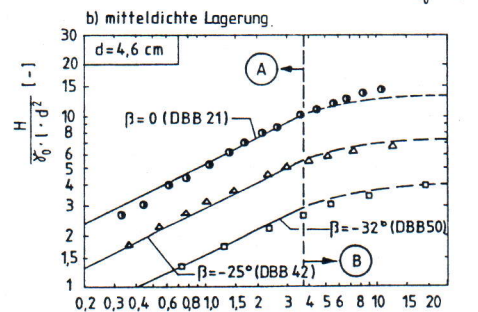
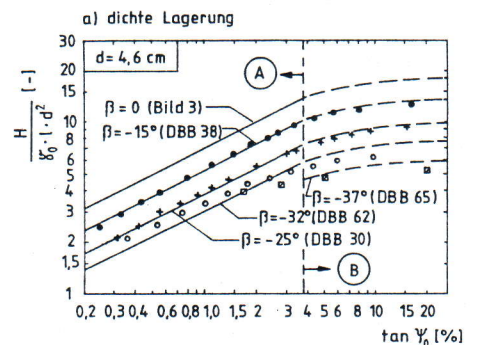
a) Pfahlverschiebungen in Geländeoberfläche (GOK)



b) Pfahlverdrehungen



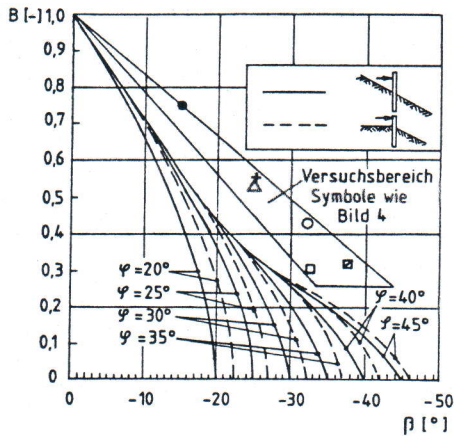
3 »Modellfamilie« (dichte Lagerung)



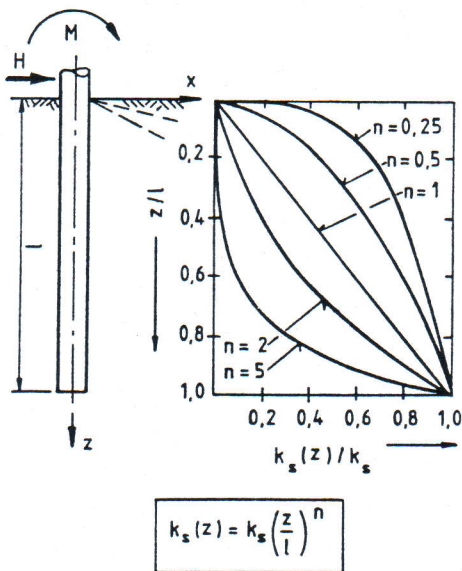
4 Vergleich der Pfahltragfähigkeiten bei ebener und geneigter Geländeoberfläche

Gründung

Lärmschutzwände



5 Faktor B zur Berücksichtigung der Böschungseigung



6 Parabolische Bettungsmodulverteilung

für die Berücksichtigung der Böschungseigung vor dem Pfahl in ein von Kärcher [13] vorgeschlagenes Diagramm eingetragen.

Beim Vergleich mit dem Vorschlag Kärcher liegen die Versuchsergebnisse auf der sicheren Seite. Die von Kärcher [13] entwickelten Diagramme gelten für Pfähle, die in der Böschung angeordnet sind. In Bild 5 wurde dieser Vorschlag auf Pfähle in der Böschungsschulter (gestrichelte Linien) erweitert. Eine systematische Parametervariation wurde in den hier beschriebenen Versuchen nicht durchgeführt.

Neben der Frage nach dem Lastverformungs- und Tragverhalten des Pfahles interessiert die Bemessung des Pfahlbaustoffs, die z. B. nach dem Bettungsmodulverfahren vorgenommen werden kann. Bei der Auswertung der Modellversuche wurde in Anlehnung an [18] und [16] für eine Horizontal- und Momentbelastung am Pfahlkopf (Bild 6) und Annahme einer allgemeinen parabolischen Bettungsmodulverteilung die Gl. (4) und (5) für starre Pfähle abgeleitet.

$$n = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (4)$$

$$k_s = \frac{H}{d u_0 l} [(n+1)(n+2)^2 + \frac{h}{l}(n+1)(n+2)(n+3)] \quad (5)$$

mit $a = (1 + \frac{h}{l})(1 - \xi)$

$$b = 3 + 4 \frac{h}{l} - (4 + 5 \frac{h}{l}) \xi$$

$$c = 2 + 3 \frac{h}{l} - (3 + 6 \frac{h}{l}) \xi$$

$$\xi = \frac{u_0 / \tan \psi_0}{l}$$

Bei der Rückrechnung der Versuche Bild 3 und 4 mit den Gl. (4), (5) und Bild 6 ergaben sich in den einzelnen Laststufen und bei unterschiedlichen Pfahldurchmessern größere Streuungen, insgesamt aber folgende Tendenz:

□ Der Exponent n liegt bei ebener Geländeoberfläche zwischen 1 und 2 und steigt mit zunehmender Geländeneigung vor dem Pfahl, wegen der abnehmenden Stützung an (z. B. für $\beta = 25^\circ$ ca. $n = 3,3$). Die Größe von n war bei den Versuchen von der Laststufe weitgehend unabhängig.

□ Der Bettungsmodul k_s , bei $z = l$ streute bei der Versuchsauswertung stärker und wurde mit zunehmender Belastung erwartungsgemäß kleiner (nichtlineares Baugrundverhalten).

4 Berechnungsverfahren

4.1 Tragverhalten

Ein Vergleich der Versuchsergebnisse (Abschn. 3) für ebene Geländeoberfläche mit den bekannten Berechnungsverfahren für horizontal belastete Pfähle (Bruchzustand) zeigt befriedigende Übereinstimmung mit dem Verfahren Brinch Hansen [3]. Dies wurde z. B. auch in [13, 20] festgestellt. Voraussetzung für den Bruchzustand bei dem Ansatz von Brinch Hansen sind Starrkörperverdrehungen des Pfahls in der Größenordnung von ca. $\tan \psi_0 = 0,2$. Diese von verschiedenen Verfassern [5, 13, 20] getroffene Feststellung hat sich ebenfalls bei den in Bild 3 dargestellten Versuchen für mittlere Pfahldurchmesser ergeben.

Pfahlverdrehungen von ca. $\tan \psi_0 = 0,2$ im Bruchzustand führen zu unzulässigen Pfahlkopfverschiebungen

im Gebrauchszustand, auch wenn wie in [13], ein Sicherheitsbeiwert von $\eta = 1,5$ angesetzt wird. Aus diesen Gründen wird empfohlen, den Vorschlag von Coyle et al. [7] bezüglich der Unterscheidung zwischen dem Bruchzustand und einem fiktiven Grenzzustand (ähnlich wie bei vertikal belasteten Pfählen) aufzugreifen. Coyle schlägt für den fiktiven Grenzzustand eine Pfahlverdrehung von $\psi_0 = 2^\circ$ ($\tan \psi_0 = 0,035$) vor. Um das Verfahren Brinch Hansen auf den Grenzzustand (H_g) anzuwenden wird vorgeschlagen, die Berechnungsergebnisse zunächst mit einem zusätzlichen Sicherheitsbeiwert $\eta_{2^\circ} = 2,0$ zu belegen. Hiermit läßt sich dann auch befriedigende Übereinstimmung mit den Verfahren nach Coyle et al. [7] (nur für c_v -Böden) erreichen.

Für die praktische Bemessung von horizontal belasteten, nahezu starren Pfählen (Ermittlung von d und l), z. B. für die Gründung von Lärmschutzwänden, wird folgende Vorgehensweise empfohlen:

- a) Berechnung von H_g nach dem Verfahren Brinch Hansen [3, 9] ($\eta_{2^\circ} = 2,0$ oder Coyle et al. [7] ($\eta_{2^\circ} = 1$)).
- b) Berücksichtigung einer geneigten Geländeoberfläche durch einen Faktor B nach Bild 5 (bei kohäsiven Böden ggf. durch Einführung eines Ersatzreibungswinkels φ_{ers}).
- c) Die zulässige Horizontallast ergibt sich dann zu

$$\text{zul. } H = \frac{H_g}{\eta} \cdot B$$

Mit $\eta = 1,5$ sind im Gebrauchszustand Starrkörperverdrehungen des Pfahls in der Größenordnung von $\psi_0 = 0,7^\circ$ bis $0,9^\circ$ zu erwarten, die i. d. R. zugelassen werden können.

Da das Verfahren Brinch Hansen einen größeren Rechenaufwand (Iterationen) erfordert, wurden im Anhang A für homogenen Baugrund Berechnungsdiagramme in dimensionsloser Form entwickelt. Aus Gründen der Vollständigkeit dieses Beitrags ist im Anhang B das Berechnungsverfahren von Coyle et al. [7] mit den hier gewählten Bezeichnungen wiedergegeben.

4.2 Gebrauchszustand

Die Verträglichkeit der Pfahlverschiebungen und -verdrehungen für den Gebrauchszustand ist unter Verwendung der in Abschn. 4.1 vorgeschlagenen Sicherheitsbeiwerte auf den Bruch (H_t) bzw. Grenzzustand (H_g bei $\psi_0 = 2^\circ$) gewährleistet. Für die Bemessung des Pfahlbaustoffs kann dann das Bettungsmodulverfahren unter Annahme einer sinnvollen

Lärmschutzwände

Bettungsmodulverteilung und -größe vorgenommen werden. In Abschn. 4.3 ist ein Verfahren angegeben, welches auf die Empfehlungen in Abschn. 4.1 abgestimmte Ergebnisse liefert.

4.3 Bemessungsdiagramme für Regelfälle (Lärmschutzwände neben Eisenbahnverkehrswegen)

Für Regelfälle (Bild 7) von Lärmschutzwänden neben Eisenbahnver-

kehrswegen wurde unter Berücksichtigung der Ausführungen der vorstehenden Abschnitte Diagramme zur Ermittlung der erforderlichen Pfahlänge (Tragverhalten) in Bild 8 und der Pfahlmomente (Bemessung) in Bild 9 in Abhängigkeit von der Lärmschutzwandhöhe, dem Pfahldurchmesser und der Geländeneigung vor dem Pfahl entwickelt, die z. Z. probe- weise für die in Bild 7 genannten Voraussetzungen im Bereich der Deutschen Bundesbahn angewendet werden. Für größere Bauvorhaben empfiehlt sich immer die Durchführung von horizontalen Pfahlprobabelastungen.

Folgende Festlegungen wurden dabei getroffen:

a) Tragverhalten (Bild 8):

□ Bodenarten und maximale Regelschöpfungseigungen nach Vorgabe (DS 836) [21] in Abhängigkeit von den Boden- gruppen nach DIN 18196. Die Boden- kenngrößen wurden in »realistischer Größenord- nung« (z. B. gemischt- körnige Böden $\varphi' = 30^\circ$, $c' = 5 \text{ kN/m}^2$; SE, SW, $\varphi' = 35^\circ$, $c'_{\text{kap}} = 2 \text{ kN/m}^2$) gewählt.

□ Bestimmung von H_g nach dem Verfahren Brinch Hansen mit $\eta_{2^\circ} = 2,0$, zul. $H = H_g/1,5$.

□ Berücksichtigung der Böschungs- neigung nach Bild 5.

b) Pfahlbemessung (Bild 9):

□ Unter Vorgabe der erwarteten Pfahlverdrehung (Abschn. 4.1) im Gebrauchszustand (grob- körniger Boden: $\psi_0 = 0,8^\circ$, $l_0/l = 0,75$; gemischt- körniger Boden: $\psi_0 = 0,85^\circ$, $l_0/l = 0,71$; feinkörniger Boden: $\psi_0 = 0,9^\circ$, $l_0/l = 0,67$) mit einer Ver- schiebung der Drehpunkt- lage in Richtung Pfahlfuß um $\Delta l_0/l = 0,1$ bei maximal möglicher Böschungs- neigung kann u_0 und $u_x(z)$ errechnet werden.

□ Mit den geometrischen Pfahldaten (starrer Pfahl) aus Bild 8 und zul. H kann dann aus Gl. (4) und (5) n und k_s der jeweiligen Bettungs- modulverteilung und aus den Horizontal- spannungen vor dem Pfahl

$$\sigma_x(z) = k_s(z) \cdot u_x(z)$$

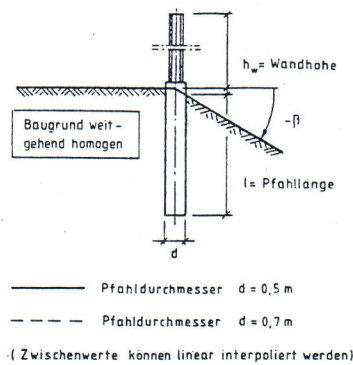
mit den üblichen Gleichgewichts- bedingungen der Momentenverlauf und das Maximalmoment berechnet werden.

Anwendungsgrenzen für die Diagramme			
Boden- gruppen nach DIN 18196		Gruppen- symbol	Diagramm- Nr.
a	b	c	
Grobkörnige Böden	Kiese und Sande, weitgestuft und intermittierend gestuft.	GW, G1	1
	Kiese, enggestuft	GE, SW, S1	
	Sande enggestuft	SE	2
Gemischt- körnige Böden	Gemische aus Kies - Schluff	GU, GÜ	3
	Kies - Ton	GT, G \bar{T}	
	Sand - Schluff	SU, SÜ	
	Sand - Ton	ST, S \bar{T}	
Feinkörnige Böden	Schluff, leicht plastisch	UL	4
	Schluff, mittelplastisch	UM	
	Ton, leicht plastisch	TL	

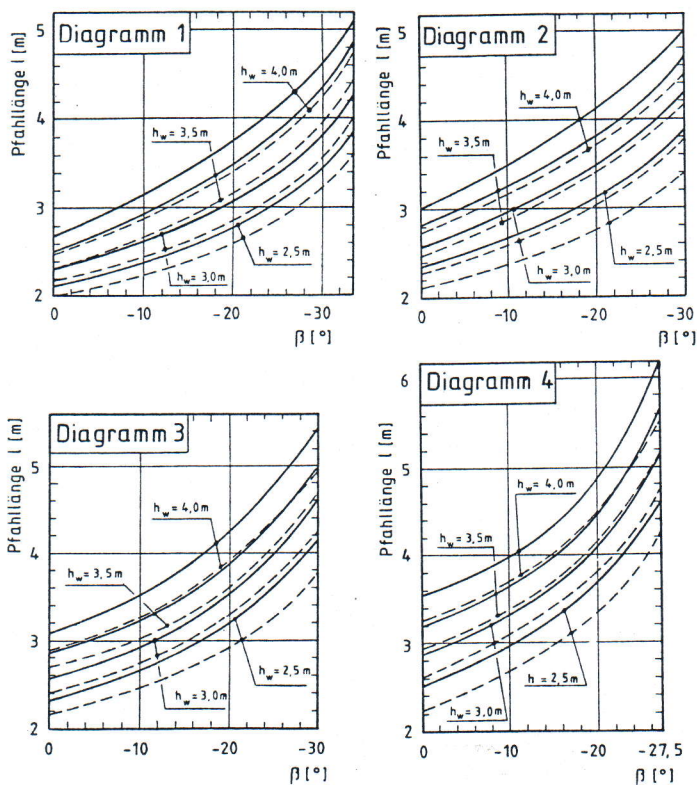
1) Lagerungsdichte: mindestens mitteldicht ($D_{20,3}$ bei $U \leq 3$ bzw. $D_{20,45}$ bei $U > 3$)
 2) Konsistenz: mindestens steif ($I_c > 0,75$)

Windlast $1,45 \text{ kN/m}^2$. Pfostenabstand 5 m
 Grundwasser unterhalb Pfahlfuß

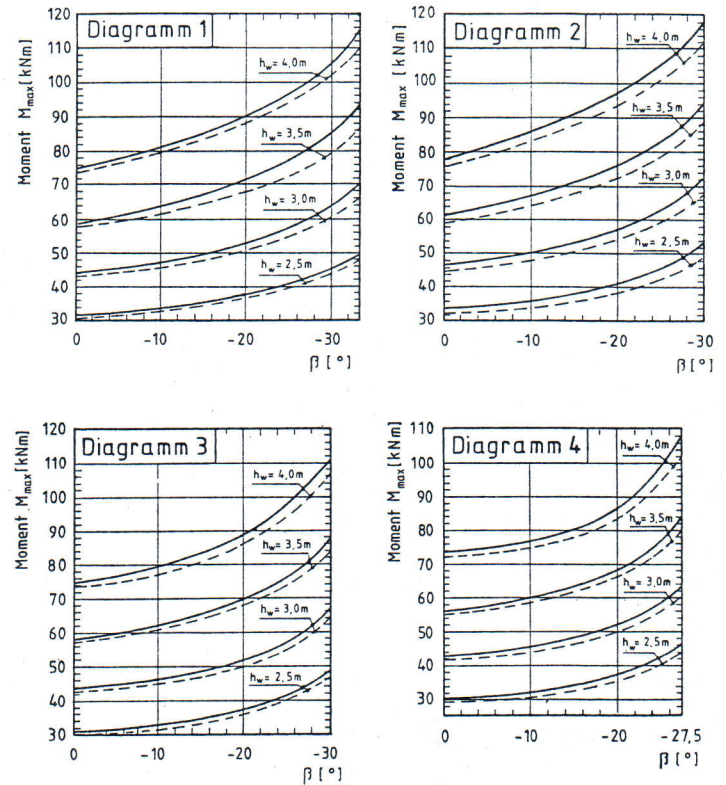
Die Momentendiagramme gelten nur in Verbindung mit den Diagrammen zur Ermittlung der erforderlichen Pfahlänge



7 Anwendungsgrenzen und Bezeichnungen für die Diagramme nach Bild 8 und 9



8 Diagramme zur Ermittlung der erforderlichen Pfahlänge



9 Diagramme zur Ermittlung der Pfahlmomente