

# 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

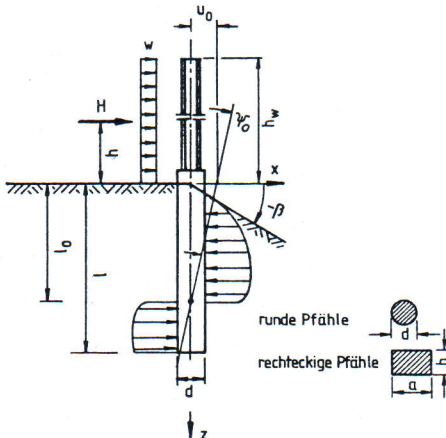
Das statische Grundsystem, die verwendeten Bezeichnungen und die zugehörige Belastung sind in Bild 1 dargestellt.

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.

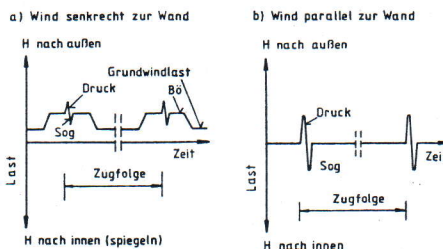
Dabei kann eine Erddruckbelastung auf den Pfahl aus Verkehrslast vernachlässigt werden, da im Fall Bild 2a bei Wind nach innen die Verkehrslast stützend wirkt und bei Wind nach außen (maßgeblicher Lastfall) die volle Windbelastung nur dann wirksam ist, wenn keine abschirmende Wirkung durch den Zug vorhanden 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]	$\gamma_0$ [kN/m <sup>3</sup> ]
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].

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

Versuch Nr.	$\gamma_0$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\beta$ [°]	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 ( $u_0$ ,  $\psi_0$ ) 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-

stellt. 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:

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

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

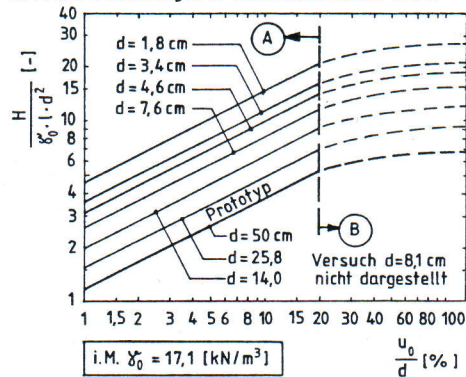
Dabei konnte für alle Versuche näherungsweise von einer konstanten Drehpunktlage in Höhe von  $l_0/l = 0,75$  ausgegangen werden. Ebenfalls in Bild 3 ist die rechnerische Extrapolation eines Prototyps von  $d = 50$  cm dargestellt.

Bild 4 zeigt die Versuchsergebnisse für unterschiedliche Böschungseigungen 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 Böschungseigung und die Lage-

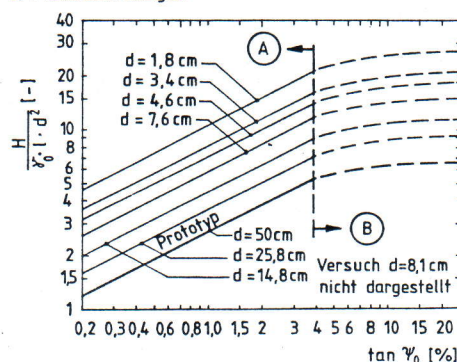
ungsdichte des Versuchsmaterials im Last-Verformungsverhalten des Pfahls durch einen Faktor in den Gl. 1 bis 3 beschrieben werden kann [10, 12, 13]. In Bild 5 ist der versuchsmäßige Faktor

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

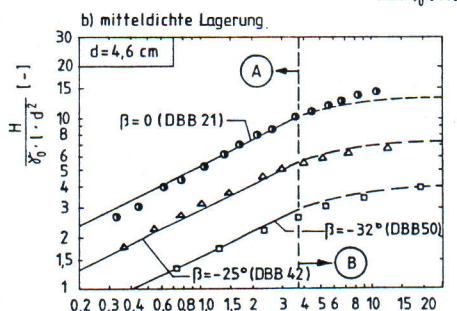
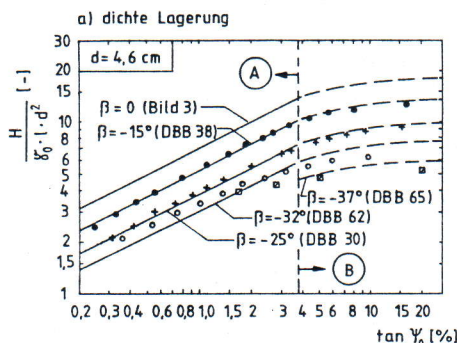
a) Pfahlverschiebungen in Geländeoberfläche (GOK)



b) Pfahlverdrehungen



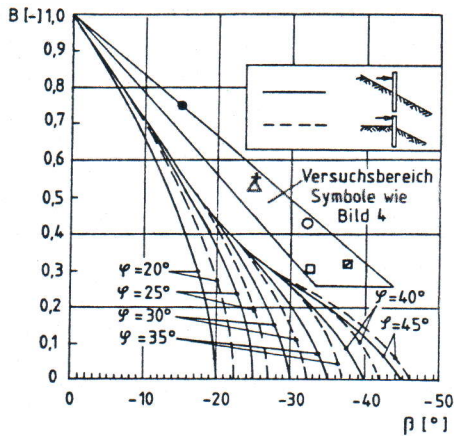
3 »Modellfamilie« (dichte Lagerung)



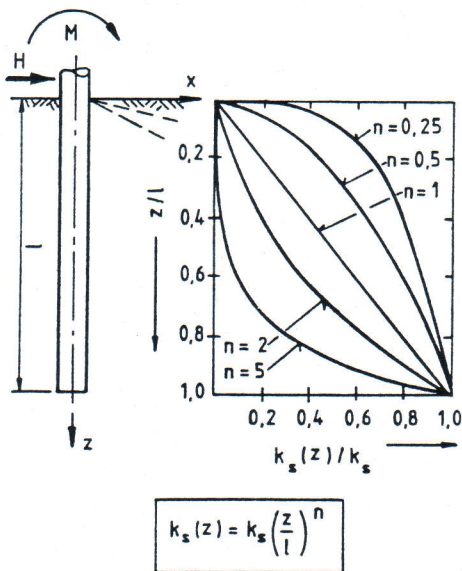
4 Vergleich der Pfahltragfähigkeiten bei ebener und geneigter Geländeoberfläche

# 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  $\varphi_{ers}$ ).
- 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 Eisenbahnverkehrswe- gen)

Für Regelfälle (Bild 7) von Lärmschutzwänden neben Eisenbahnver-

kehrswegen wurde unter Berücksichtigung der Ausführungen der vorstehenden Abschnitte Diagramme zur Ermittlung der erforderlichen Pfahl-länge (Tragverhalten) in Bild 8 und der Pfahlmomente (Bemessung) in Bild 9 in Abhängigkeit von der Lärm-schutzwandhöhe, dem Pfahldurch-messer und der Geländeneigung vor dem Pfahl entwickelt, die z. Z. probe-weise für die in Bild 7 genannten Vor-aussetzungen im Bereich der Deut-schen Bundesbahn angewendet wer-den. Für größere Bauvorhaben emp-fiehlt sich immer die Durchführung von horizontalen Pfahlprobekela-stungen.

Folgende Festlegungen wurden dabei getroffen:

a) Tragverhalten (Bild 8):

□ Bodenarten und maximale Regel-böschungseigungen nach Voraus-gabe (DS 836) [21] in Abhängigkeit von den Bodengruppen nach DIN 18196. Die Bodenkenngrößen wurden in »realistischer Größenord-nung« (z. B. gemischtkörnige 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 (grobkörniger Boden:  $\psi_0 = 0,8^\circ$ ,  $l_0/l = 0,75$ ; ge-mischtkörniger 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 Bettungsmodul-verteilung und aus den Horizontal-spannungen vor dem Pfahl

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

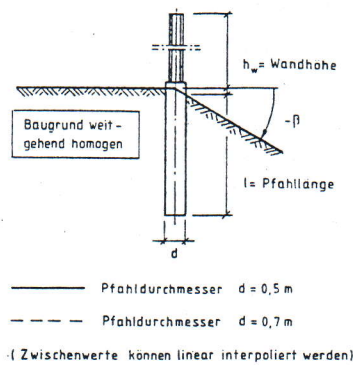
mit den üblichen Gleichgewichtsbe-dingungen der Momentenverlauf und das Maximalmoment berechnet wer-den.

Anwendungsgrenzen für die Diagramme			
Bodengruppen nach DIN 18196		Gruppensymbol	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	

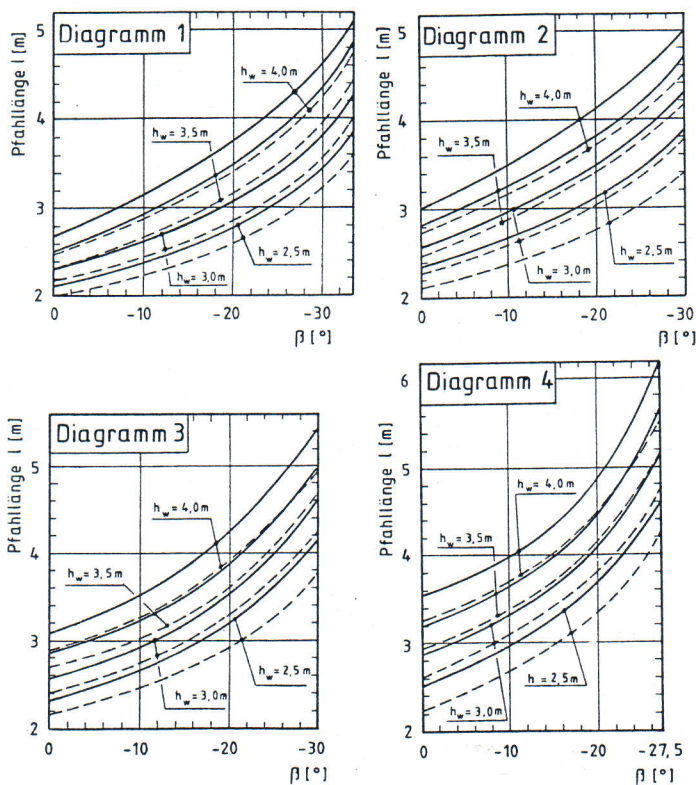
1) Lagerungsdichte: mindestens mitteldicht ( $D_{20,3}$  bei  $U \leq 3$  bzw  $D_{20,45}$  bei  $U > 3$ )  
2) Konsistenz: mindestens steif ( $I_c > 0,75$ )

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

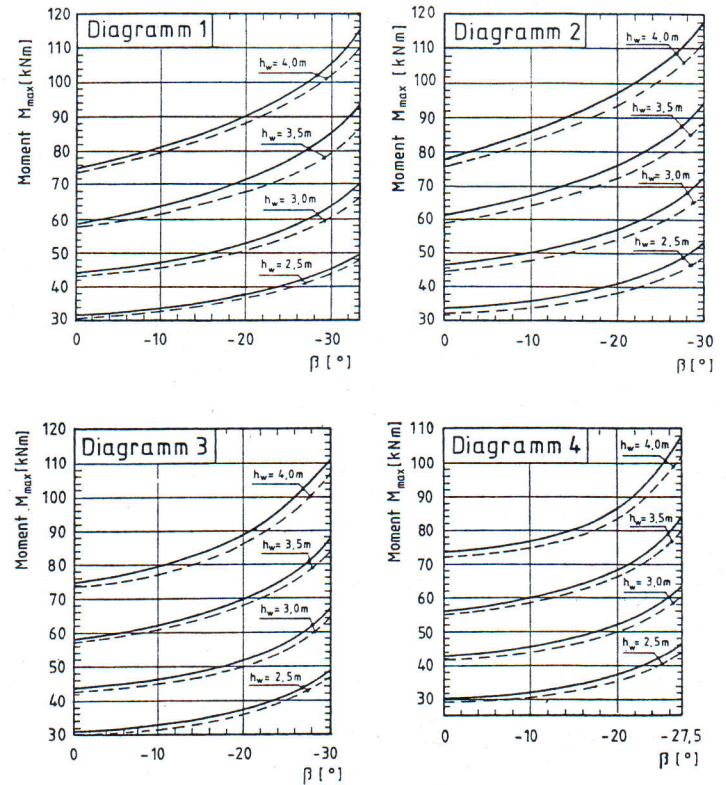
Die Momentendiagramme gelten nur in Verbindung mit den Diagrammen zur Ermittlung der erforderlichen Pfahl-länge



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



8 Diagramme zur Ermittlung der erforderlichen Pfahl-länge



9 Diagramme zur Ermittlung der Pfahlmomente

Da manchem Leser das unter b) beschriebene Verfahren zunächst recht willkürlich erscheinen mag, sind in Bild 10 einige sich daraus ergebende Bettungsmodulverteilungen und -größen angegeben, um einen Vergleich mit anderen Erfahrungen zu ermöglichen. Dabei ist zu beachten, daß die Ordinate in Bild 10 dimensionslose Größen enthält und die Pfahlänge bei Variation von  $\beta$  nach Bild 8 unterschiedlich ist.

5 Ausblick

Vom Verfasser werden z. Z. weitere Versuche auch in bindigen Böden durchgeführt und mit numerischen Verfahren untersucht. Nach entsprechenden Erfahrungen mit den in Abschn. 4.3 vorgestellten Diagrammen werden unter Berücksichtigung der weiteren Untersuchungsergebnisse möglichst noch wirtschaftlichere Lösungen angestrebt.

Anhang A <sup>⊗</sup> und bindige

Berechnungsverfahren *Brinch Hansen* [3, 9] (zu Abschn. 4.1):

Das Verfahren gilt für nichtbindige Böden ( $\varphi, c, c_u$ ) und wurde mit einem Rechenprogramm bei systematischer Parametervariation ausgewertet (Bild 11, Gl. (7)). Dabei ist die dimensionslose horizontale Bruchlast des Pfahls bei ebener Geländeoberfläche eine Funktion von den in Gl. (6) angegebenen Parametern:

$$\frac{H}{\gamma l b^2} = f\left(\frac{\gamma l}{c}, \varphi, \frac{l}{b}, \frac{h}{l}, \frac{a}{b}\right) \quad (6)$$

Unter Anwendung von Bild 11 kann die Bruchlast *näherungsweise* mit Gl. (7) ermittelt werden.

$$\frac{H}{\gamma l b^2} = H^* [0,076 e^{-0,024 \varphi} \left(\frac{l}{b}\right)^{1,125} e^{0,008 \varphi}] (2,15 e^{-0,75 \frac{h}{l}}) \quad (7)$$

Für runde Pfähle kann eine Ersatzbreite  $b$  bzw. -länge  $a$  (konstante Querschnittsfläche) eingesetzt werden. Geltungsbereich von Gl. (7) ca.  $0,8 \leq \frac{a}{b} \leq 1,2$ .

Anhang B

Berechnungsverfahren *Coyle et al.* [7] (zu Abschn. 4.1):

Die Anwendung ist auf bindige Böden ( $\varphi_u = 0, c_u$ ) beschränkt und wird in folgenden Berechnungsschritten durchgeführt.

1) Bestimmung von  $\kappa$  (empirisch) in Geländeoberfläche (GOK) nach Bild 12.

2) Ab Tiefe  $z_r$ , wird  $\kappa = 9$  konstant angenommen.

$$z_r = \frac{(9 - \kappa) c_u d}{\gamma d + 0,5 c_u} \quad (8)$$

3) Für  $l < z_r$ , folgt  $\alpha = (9 - \kappa) \frac{c_u d}{z_r} \quad (9)$

und  $l \geq z_r$ , folgt  $\alpha = (9 - \kappa) \frac{c_u d}{l}$

4) Aufnehmbarer Seitendruck in GOK:

$$P_{fo} = \kappa \cdot c_u \cdot d \quad (10)$$

5) Aus

$$\beta^* = \alpha \frac{1}{P_{fo}} \quad (11)$$

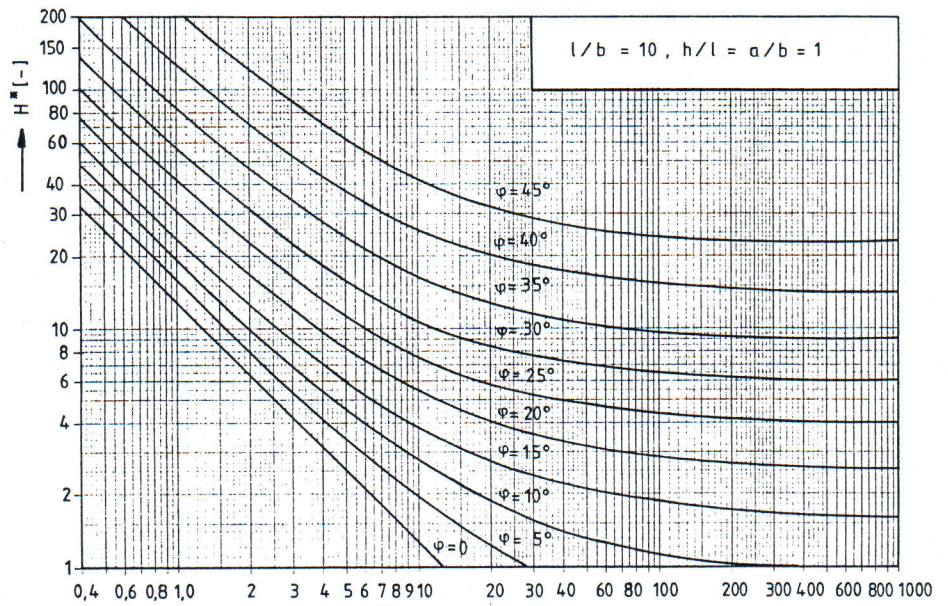
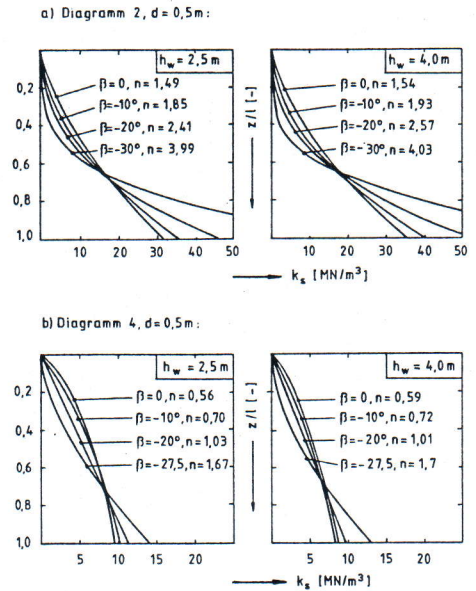
kann mit Bild 13 die aufnehmbare Pfahlgrenzlast  $H_g$  (bei  $\psi_o = 2^\circ$ ) bestimmt werden.

6) Pfahllasten  $H < H_g$  können näherungsweise nach der empirischen Beziehung

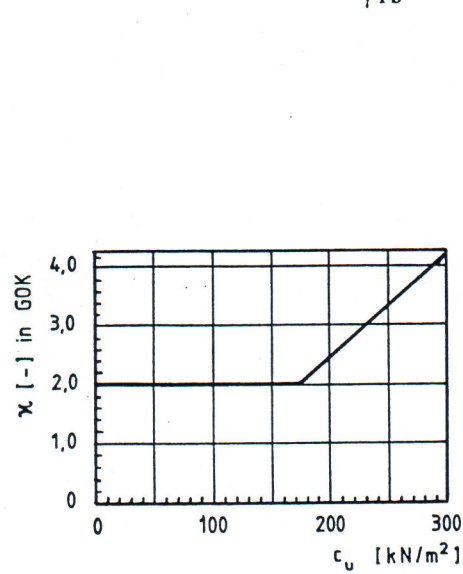
$$H = \frac{\psi_o}{0,538 + 0,731 \psi_o} H_g \quad (12)$$

abgeschätzt werden.

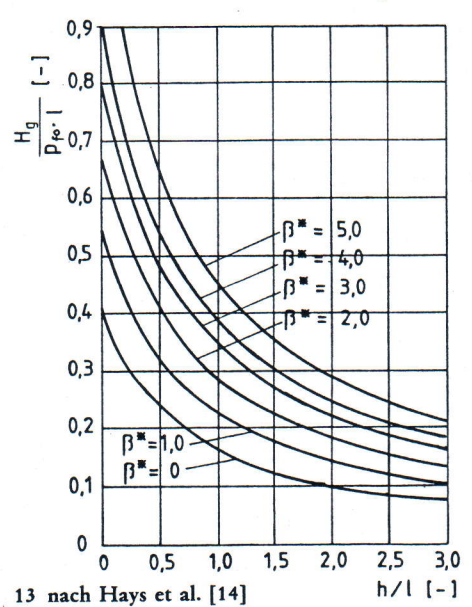
10 Beispiele der angesetzten Bettungsmodulverteilungen und -größen für Bild 9



11 Dimensionslose Bruchlast  $H^* = \frac{H}{\gamma l b^2}$  für  $l/b = 10, h/l = a/b = 1$



12 Tragfähigkeitsbeiwert  $\kappa$  für Gl. (8)



13 nach Hays et al. [14]

## Beispiele (zu Abschn. 4.1)

### Beispiel 1:

$$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3, \varphi' = 32,5^\circ, c' = 2 \text{ kN/m}^2$$

$$h = 1,5 \text{ m}, l = 3,2 \text{ m}, d = 0,6 \text{ m}$$

$$b_{\text{ers}} = a_{\text{ers}} = 0,532 \text{ m}$$

$$\text{aus Bild 11 } H^* = 9,5, \text{ aus Gl. (7)}$$

$$H = 112 \text{ kN}$$

$$\text{zul. } H = \frac{H}{\eta_2 \cdot \eta} = \frac{112}{2,0 \cdot 1,5} = 37,3 \text{ kN}$$

### Beispiel 2:

$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ , Pfahlabmessungen wie Beispiel 1

#### a) Anhang A:

$$\varphi' = 20^\circ, c' = 5 \text{ kN/m}^2, H^* = 5,$$

$$\text{zul. } H = 26,1 \text{ kN}$$

$$\varphi_u = 0, c_u = 25 \text{ kN/m}^2, H^* = 5, \text{ zul.}$$

$$H = 26,1 \text{ kN}$$

#### b) Anhang B:

$$\varphi_u = 0, c_u = 25 \text{ kN/m}^2$$

$$\kappa = 2, z_r = \frac{(9 - 2) \cdot 25 \cdot 0,6}{20 \cdot 0,6 + 0,5 \cdot 25} = 4,29 > 1$$

$$\alpha = (9 - 2) \frac{25 \cdot 0,6}{4,29} = 24,5, p_{fo} =$$

$$2 \cdot 25 \cdot 0,6 = 30 \text{ kN/m}$$

$$\beta^* = 24,5 \frac{3,2}{30} = 2,6, \frac{H_g}{p_{fo} \cdot l} = 0,46$$

$$H_g = 44,2 \text{ kN}, \text{ zul. } H = H_g / \eta = 44,2 / 1,5 = 29,5 \text{ kN}$$

Berücksichtigung einer Böschungseigung  $\beta \neq 0$  nach Bild 5.

#### Literatur:

- [1] *Bätcke, W.*: Tragfähigkeit gedrungener Körper im geneigten Halbraum. Mitt. d. Lehrstuhls für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft 7, 1982
- [2] *Blum, H.*: Wirtschaftliche Dalbenform und deren Berechnung. Bautechnik 10, 1932
- [3] *Brinch Hansen, J.*: The Ultimate Resistance of Rigid Piles against Transversal Forces. Geoteknisk Institut Kopenhagen 1961, Bull. No. 12
- [4] *Broms, B. B.*: Design of laterally loaded Piles. Proc. ASCE, Vol. 91, Nr. SM 3
- [5] *Christensen, N. H.*: Model Tests with Transversally Loaded Rigid Piles in Sand. Geoteknisk Institut Kopenhagen 1961, Bull. Nr. 12
- [6] *Colling, G.*: Beitrag zur Berechnung freistehender im Boden eingespannter Dalben. Die Bautechnik 12/1962
- [7] *Coyle, H. M. / Bierschwale, A.*: Design of Rigid Shafts in Clay for Lateral Load. Journ. of Geot. Eng., Vol. 109, No. 9, Sept. 1983, ASCE
- [9] *Dietrich, T.*: Zur Berechnung der Tragfähigkeit starrer Dalben in homogenen Böden nach Brinch Hansen. Mitt. der BAW, Heft 21, 1964
- [10] *Dietrich, T.*: Seitlich belastete Pfähle im psamischen Halbraum, analysiert... Vorträge Baugrundtagung 1982, Braunschweig
- [11] *Franke, E. / Muth, G.*: Scale Effect in 1 g-Model Tests on Horizontally Loaded Piles. XI. ICSMFE San Francisco 1985 (in Vorbereitung)
- [12] *Hettler, A.*: Verschiebungen starrer und elastischer Gründungskörper in Sand bei monotoner und zyklischer Belastung. Veröffentl. des Inst. f. Bodenmechanik und Felsmechanik Uni Karlsruhe, Heft 90, 1981
- [13] *Kärcher, K.*: Modellversuche über die Tragfähigkeit horizontal beanspruchter Pfähle in Böschungen. Die Bautechnik 10/1980
- [14] *Hays, C. O. / Davidson, J. L. / Hagan, E. M. / Risitano, R. R.*: Drilled Shaft Foundation for Highway Sign Structures. Research Rep. D647F, University of Florida, Gainesville, Dec. 1974

[15] *Oversen, N.*: The Use of Physical Models in Design, Proc. VII ECSMFE 1979, Vol. 4. Brighton

[16] *Schmidt, H. G.*: Beitrag zur Ermittlung der horizontalen Bettungszahl für die Berechnung von Großbohrpfählen unter waagerechter Belastung. Der Bauingenieur, Heft 7, 1971

[17] *Schmidt, H.-G.*: Beitrag zur Berechnung von biegesteifen Pfählen für Brückenwiderlager. Die Bautechnik 8/1980

[18] *Titze, E.*: Über den seitlichen Bodenwiderstand bei Pfahlgründungen. Bauingenieur Praxis, Heft 77, Verlag v. W. Ernst & Sohn, 1970

[19] *Walz, B.*: Bodenmechanische Modelltechnik als Mittel zur Bemessung von Grundbauwerken. Forschungs- und Arbeitsberichte a. d. Bereichen Grundbau, Bodenmechanik und Unterirdisches Bauen, Bericht Nr. 1, 1982, GH Wuppertal

[20] *Zweck, H. / Dietrich, T.*: Modellversuche mit steifen Dalben in bindigen Böden bei plötzlicher Belastung. Mitt. der BAW, Heft 19, 1963

[21] Voraussgabe (DS 836): Vorschrift für Erdbauwerke, DB, 1982

[22] Voraussgabe (DS 800/1/III): Richtlinien für bauliche Lärmschutzanlagen an Eisenbahnstrecken, DB, 1984