

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Achmus, Martin

Verschiebung horizontal belasteter, im Wasser stehender Pfähle

Deutsche Beiträge. Internationaler Schifffahrtkongress (PIANC)

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
PIANC Deutschland

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104851>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Achmus, Martin (2002): Verschiebung horizontal belasteter, im Wasser stehender Pfähle. In: PIANC Deutschland (Hg.): Deutsche Beiträge. 30. Internationaler Schifffahrtkongress; Sydney, Australien, 22. - 26. September 2002. Bonn: PIANC Deutschland. S. 1-9.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Hafenbau

Verschiebungen horizontal belasteter, im Wasser stehender Pfähle

Prof. Dr.-Ing. Martin Achmus

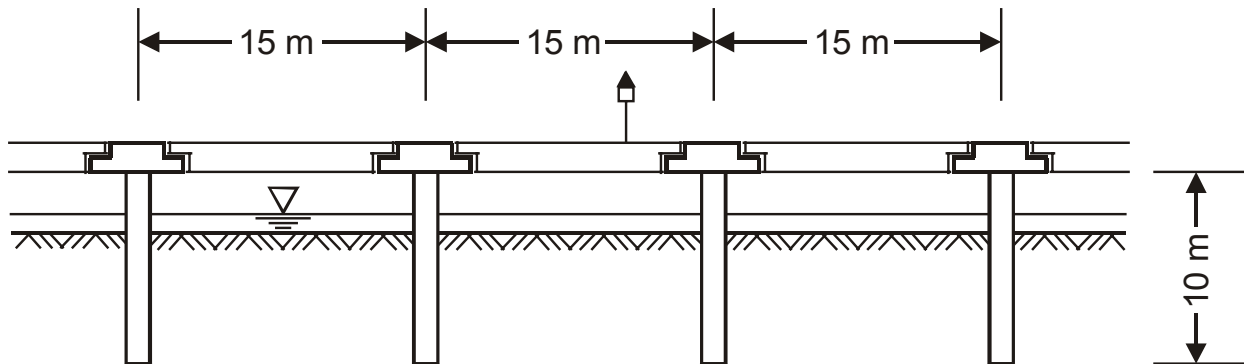
Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Universität Hannover

Zusammenfassung:

Vor dem Hintergrund der Fallstudie einer kleinen Seebrücke an der Ostseeküste, an der große Horizontalverschiebungen aufgetreten sind, wird die Anwendbarkeit des Bettungsmodulverfahrens für die Abschätzung horizontaler Pfahlkopfverschiebungen untersucht. Durch Vergleich von Berechnungsergebnissen mit Finite-Elemente-Lösungen sowie mit den Ergebnissen von horizontalen Pfahlprobekbelastungen wird nachgewiesen, dass eine grobe Abschätzung von Pfahlkopfverschiebungen hiermit möglich ist.

1 Einleitung

Im Wasser stehende Pfähle werden im Hafenbau vielfach eingesetzt, z. B. als Dalben oder als Gründungselemente von Brücken. Solche Pfähle werden durch Trossenzugkräfte, Wellen- oder Eislasten horizontal belastet.



relativ teuer und daher für kleine Bauwerke oft nicht zweckmäßig sind.

Daraus resultiert die Frage, ob es eine geeignete Berechnungsmethode gibt, durch die bei angemessenem Aufwand zumindest eine grobe Abschätzung der Horizontalverschiebungen möglich ist. Das Bettungsmodulverfahren bietet sich als relativ einfache und in der Praxis für die Biegebemessung von Pfählen häufig eingesetzte und somit verfügbare Methode an.

Nach deutscher Normung müssen, wenn es auf die Größe von horizontalen Verschiebungen ankommt, entweder Pfahlprobekbelastungen durchgeführt werden oder diesbezügliche Erfahrungen bei vergleichbaren Verhältnissen vorliegen. Nachfolgend wird auf der Grundlage der Fallstudie einer Seebrücke an der Ostseeküste, an der nach einem strengen Winter große horizontale Verschiebungen auftraten, untersucht, ob und inwieweit mit dem Bettungsmodulverfahren eine realistische Verschiebungsprognose möglich ist.

2 Fallstudie

In den Jahren 1991 und 1992 wurde an der deutschen Ostseeküste eine kleine Seebrücke errichtet. Die Länge dieser Brücke beträgt etwa 350 m und die Breite rd. 2,5 m.

Für schmale Brücken ist die Eislast oft die für die Bemessung maßgebende Horizontalbelastung der Gründungspfähle. Für solche Pfähle müssen – im Gegensatz zu Dalbenpfählen – die horizontalen Kopfverschiebungen begrenzt werden, um die Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks zu gewährleisten. Es ist daher notwendig, die Größe der Verschiebungen möglichst genau abzuschätzen. Eine genaue Vorhersage ist im Grundsatz nur mittels Probekbelastungen möglich, die aber

Bild 1 Seebrücke im Längsschnitt (Ausschnitt)

Die Brücke wurde auf Stahlrohrrammpfählen mit Außendurchmessern von rd. 71 bzw. rd. 76 cm gegründet, die in Längsrichtung in Abständen zwischen rd. 11 und rd. 15 m angeordnet wurden. Ein Längsschnitt der Brücke ist in Bild 1 dargestellt.

Der Baugrund im Bereich des Bauwerks besteht aus einer im Mittel rd. 1 m dicken Schicht aus Sand mit Muscheln, die von Geschiebemergel in

steifer bis halbfester Konsistenz unterlagert wird. Die in einem geotechnischen Gutachten angegebenen Bodenkennwerte sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

sungseislast von 300 kN zu weich war oder ob die aufgetretenen Verschiebungen auf das Auftreten wesentlich höherer Eislasten zurückzuführen waren.

Bodenart	Schichtdicke in m	Wichte γ' in kN/m ³	Scherparameter		Steifemodul E_s in MN/m ²
			ϕ' in °	c' in kN/m ²	
Sand mit Muscheln	1,0	9,0	28,0	0	7,5
Geschiebemergel (1)	2,0	12,3	30,0	9,0	20,0
Geschiebemergel (2)	> 6,0	12,3	32,0	10,0	25,0

Tabelle 1 Rechenwerte der Bodenkennwerte

Die Einbindetiefe der Pfähle beträgt zwischen rd. 6 und rd. 7 m. Mit einer Horizontalbelastung der Pfähle war hauptsächlich aufgrund von Eisdruck zu rechnen. Gemäß den deutschen Empfehlungen des Arbeitsausschusses Uferbefestigungen (EAU 1996) wird die Eislast H_i auf Pfähle mit Kreisquerschnitt nach der folgenden Gleichung berechnet:

$$H_i = 0,33 \sigma_0 D^{0,5} h^{1,1} \quad (H_i \text{ in kN})$$

mit: σ_0 = Eisdruckfestigkeit in MN/m²,
 D = Pfahlaußendurchmesser in cm,
 h = Eisdicke in cm.

Die mittlere Druckfestigkeit von Ostseeeis kann gemäß EAU zu $\sigma_0 = 1,8 \text{ MN/m}^2$ angenommen werden. Gemäß ebenfalls in der EAU angegebener Erfahrungswerte wurde die maximale Eisdicke für den entsprechenden Bereich der Ostseeküste mit $h = 40 \text{ cm}$ angesetzt. Damit wurde eine Bemessungseislast von $H_i = 300 \text{ kN}$ rechnerisch ermittelt.

Aufgrund von Erfahrungen mit ähnlichen Bauwerken wurde bei der Bemessung davon ausgegangen, dass die Steifigkeit der Pfahlgründung ausreichend war, um die Einhaltung eines zulässigen Werts der Pfahlkopfverschiebung von 10 cm zu gewährleisten. Eine diesbezügliche detaillierte rechnerische Untersuchung oder eine Pfahlprobelastung wurde nicht vorgenommen.

Nach einem sehr harten Winter 1995/96 wurde festgestellt, dass die Brücke auf einer Länge von rd. 100 m große Horizontalverschiebungen aufwies. Die maximale Kopfverschiebung eines Pfahls betrug rd. 40 cm. Die Ursache dieser Verschiebung war offensichtlich Belastung durch Eisdruck, die Größe dieser Last und die zugehörige Eisdicke konnten aber nachträglich nicht festgestellt werden. Es war daher die Frage zu beantworten, ob die Pfahlgründung für die Bemessung

Der durchgeführten rechnerischen Analyse wurde das in Bild 2 dargestellte System des Pfahls mit der größten Kopfverschiebung von rd. 40 cm zugrunde gelegt.

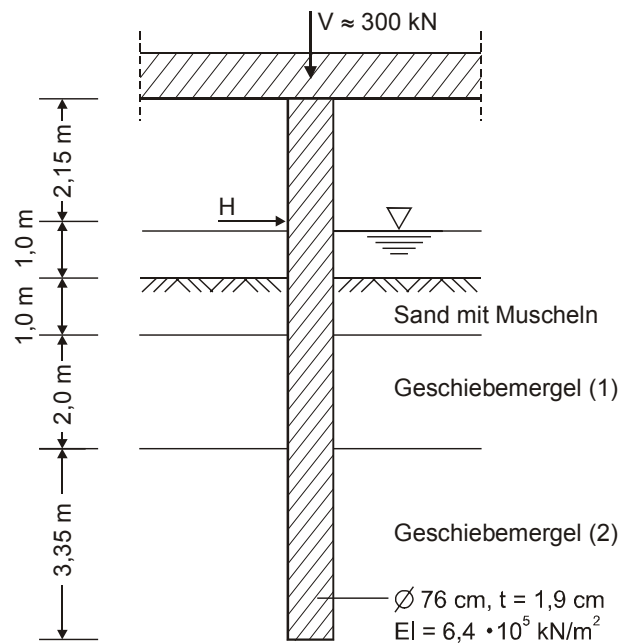


Bild 2 Querschnitt des Gründungspfahls mit der größten Kopfverschiebung

3 Berechnungsmethoden für horizontal belastete Pfähle

Während die Vorhersage horizontaler Pfahlverformungen nur auf Basis von Berechnungen nach deutschen Normen nicht zulässig ist, darf die Biegebemessung des Pfahls rein rechnerisch erfolgen. Zu unterscheiden sind folgende Methoden:

- Die "klassische" Methode mit vorgegebener Erdwiderstandsverteilung
- Methoden auf Basis der linearen Elastizitätstheorie
- "p-y"-Kurven-Methode
- Bettungsmodulverfahren
- Finite-Elemente-Methode

Die klassische Methode wird in Deutschland noch immer für die Bemessung von Dalbenpfählen benutzt. Es wird der auch bei der Berechnung eingespannter Spundwände eingesetzte Ansatz von BLUM verwendet. Bei einer theoretischen Einbindetiefe wird volle Einspannung des Pfahls angenommen. Der räumliche Erdwiderstand vor dem Pfahl wird wie die Horizontalkraft als äußere Belastung angesetzt. Die Einbindetiefe ergibt sich aus der Forderung des Momentengleichgewichts an diesem System (Bild 3).

mit einer Randelementemethode die Horizontalverschiebung eines Pfahls mit gegebener Geometrie und Steifigkeit berechnet werden (s. z. B. Poulos & Davis 1980). Nichtlineares Materialverhalten oder geschichteter Baugrund kann durch Näherungslösungen berücksichtigt werden, die Methode wird dann allerdings recht komplex.

Für die p-y-Kurven-Methode wird der Pfahl in einzelne Elemente unterteilt. Für jedes Element wird ein Zusammenhang von Bettungsdruck und Verschiebung, die p-y-Kurve, vorgegeben. Mit diesem Verfahren werden die Pfahlverschiebungen belastungs- und steifigkeitsabhängig ermittelt. Im Grundsatz handelt es sich bei dieser Methode um ein spezielles Bettungsmodulverfahren mit vorgegebenen, verschiebungsabhängigen Federsteifigkeiten (Bild 4).

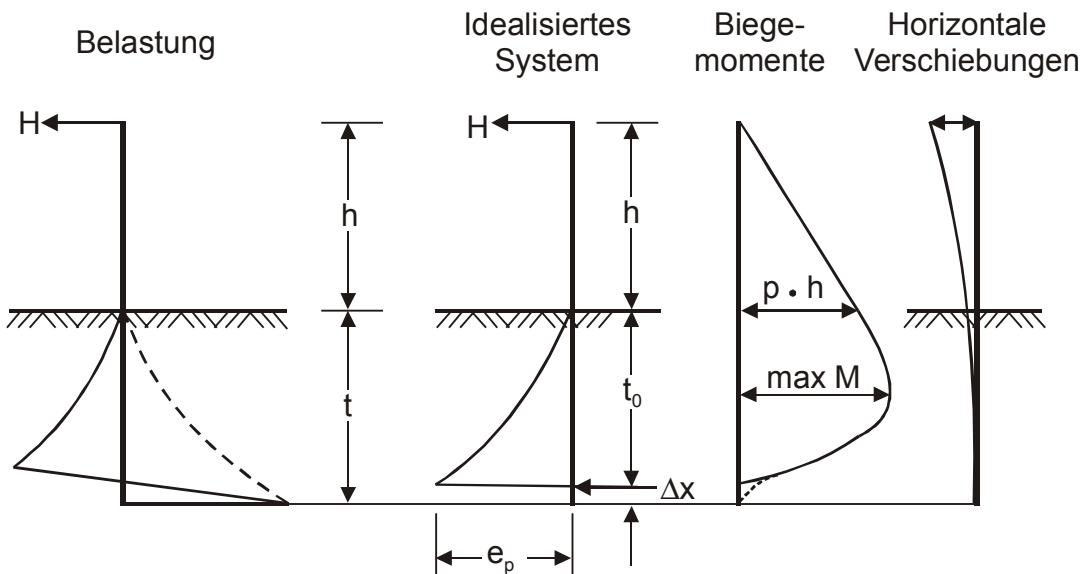


Bild 3 "Klassische" Berechnung von Dalbenpfählen

In einer Nachlaufberechnung können auch die horizontalen Verschiebungen ermittelt werden. Diese Methode hat sich als für die Berechnung von Dalben geeignet erwiesen. Wegen des last- und verschiebungsunabhängigen Ansatzes der Erdwiderstandsverteilung ist sie aber für Verschiebungsprognosen nicht geeignet.

Methoden auf Grundlage der Elastizitätstheorie nutzen im allgemeinen die Mindlin-Gleichung, die den Zusammenhang der Verschiebungen im elastischen Halbraum aufgrund einer Einzellast formelmäßig angibt. Hiermit kann in Verbindung

Hinweise für die Ableitung von p-y-Kurven für Sande und Tone sind in Det Norske Veritas (1977) und in API (1982) enthalten. Diese Kurven können aber natürlich nicht auf beliebige Boden- und Randbedingungen übertragen werden.

Beim Bettungsmodulverfahren wird die stützende Wirkung des Bodens durch horizontale Federn berücksichtigt. Das Problem dabei ist, dass das Verhalten benachbarter Federn voneinander unabhängig ist, d. h. die Kontinuität des Bodens wird nicht erfasst. Trotzdem darf die Methode nach deutschen Normen für die Pfahlbiegebemessung eingesetzt werden, wenn die Maximalverschiebung kleiner als 2 cm bzw. maximal 3% des

Pfahldurchmessers beträgt. Deshalb erscheint es logisch, die Eignung dieses Verfahrens für die Abschätzung von Pfahlverschiebungen zu untersuchen. Die Methode wird daher in Abschnitt 4 detailliert beschrieben.

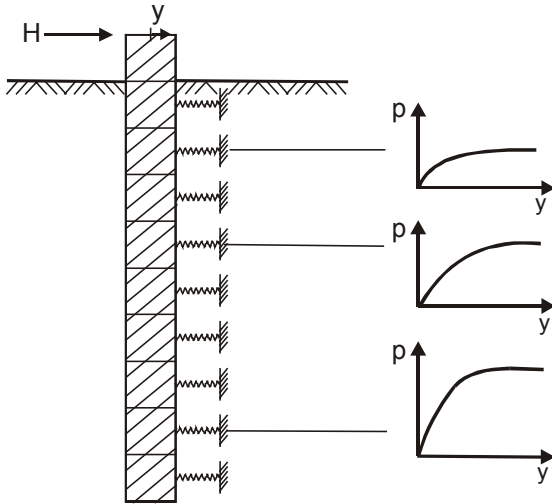


Bild 4 p-y-Kurven-Methode

Aus theoretischer Sicht ist die Finite-Elemente-Methode die genaueste Methode zur Modellierung des Interaktionsproblems Pfahl/Boden. Hier kann auch nichtlineares, elastoplastisches Materialverhalten des Bodens berücksichtigt werden. Die Methode ist allerdings sehr aufwendig, da ein dreidimensionales Modell generiert werden muss. Auch ist die Genauigkeit der Ergebnisse in der Praxis dadurch begrenzt, dass die zahlreichen Parameter eines komplexen Stoffgesetzes in aller Regel gar nicht ermittelt werden können.

Die Methode ist aber wertvoll für die Beurteilung der Ergebnisse des Bettungsmodulverfahrens, und hierfür wird sie nachfolgend eingesetzt. Es wird ein relativ einfaches Materialmodell angesetzt, das linear elastisches Verhalten bis zum Erfüllen des Bruchkriteriums nach MOHR-COULOMB und bei darüber hinaus gehender Beanspruchung ideal plastisches Verhalten simuliert.

4 Bettungsmodulverfahren zur Berechnung der horizontalen Pfahlverschiebungen

4.1 Allgemeines

Nach der deutschen Norm DIN 4014 darf das Bettungsmodulverfahren für die Biegebemessung

horizontal belasteter Pfähle verwendet werden. Der Bettungsmodul darf für einzelne Bodenschichten näherungsweise zu

$$k_s = \frac{E_s}{D}$$

angesetzt werden (mit $D = 1$ m für Pfähle mit Durchmesser größer als 1 m). Bedingung ist außerdem, dass die Bettungsspannungen in jeder Tiefe die Erdwiderstandsspannungen nicht überschreiten. Zudem ist die Anwendung gemäß DIN 4014 auf Pfähle mit Kopfverschiebungen kleiner 2 cm bzw. kleiner als 3% des Durchmessers beschränkt.

Hier wird untersucht, ob diese Methode zumindest für die grobe Abschätzung auch größerer Pfahlkopfverschiebungen eingesetzt werden kann.

4.2 Erdwiderstandsansatz

Für die Bestimmung der maximal möglichen Bettungsdrücke muss der räumliche Erdwiderstand vor dem Pfahl berechnet werden. In der deutschen Norm DIN 4085 wird ein im wesentlichen auf Experimenten beruhender Ansatz angegeben. Die Abweichung des räumlichen vom ebenen Erdwiderstand wird darin durch Formfaktoren μ erfasst, welche von der auf den Durchmesser bezogenen Tiefe z/D abhängen. Für die Erdwiderstandsspannungen $spa e_{ph}$ in der Tiefe z können daraus die folgenden Gleichungen abgeleitet werden:

$$spa e_{ph} = \sum \gamma_i \Delta z_i k_{pgh} \bar{\mu}_{pgh} + c' k_{pch} \bar{\mu}_{pch}$$

$$\text{mit: } \bar{\mu}_{pgh} = \begin{cases} 1 + 0,45z/D & \text{für } z/D < 3,33 \\ 1,3688\sqrt{z/D} & \text{für } z/D \geq 3,33 \end{cases}$$

$$\bar{\mu}_{pch} = \begin{cases} 1 + 1,80z/D & \text{für } z/D < 3,33 \\ 3,2865\sqrt{z/D} & \text{für } z/D \geq 3,33 \end{cases}$$

Hierin sind k_{pgh} und k_{pch} die Erdwiderstandsbeiwerte für Eigengewicht und Kohäsion im ebenen Fall. γ_i und Δz_i sind die Wichten und Mächtigkeiten der Bodenschichten oberhalb des betrachteten Punktes, d. h. $\sum \gamma_i \Delta z_i$ ist die effektive Vertikalspannung in diesem Punkt.

4.3 Berechnungsschema

Der Pfahl wird in finite Balkenelemente unterteilt. Die Berechnung nach dem Bettungsmodulverfahren erfolgt iterativ. Zunächst werden die Bettungsmoduln schichtweise konstant gemäß der

Gleichung $k_s = E_s / D$ festgelegt. Wenn sich aus der Berechnung Bereiche ergeben, in denen der (gemäß Abschnitt 4.2 berechnete) Erdwiderstand überschritten wird, dann wird der Bettungsmodulverlauf korrigiert und eine Neuberechnung vorgenommen. Die Iteration wird fortgesetzt, bis durch entsprechende Anpassungen des Bettungsmodulverlaufs in jeder Tiefe der Bettungsdruck kleiner als der oder gleich dem Erdwiderstand ist. Außerdem ist zu beachten, dass der Wandreibungswinkel so gewählt ist, dass das Gleichgewicht der Vertikalkräfte am Pfahl erfüllt ist. Dies erfordert ebenfalls eine iterative Anpassung.

Die Vorgehensweise verdeutlicht die Darstellung in Bild 5. Wird die Berechnung für verschiedene Lasten ausgeführt, so lässt sich eine (nichtlineare) Kraft-Verschiebungskurve ermitteln.

4.4 Vergleich mit einer Finite-Elemente-Lösung

Für die Beurteilung des oben beschriebenen Bettungsmodulverfahrens (BMV) wurde ein Pfahl in homogenem Sandboden einmal mit diesem Verfahren und einmal mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) berechnet. Für die FEM war ein dreidimensionales Modell zu generieren. Das Bodenverhalten wurde mit einem linear elastisch – ideal plastischen Stoffgesetz mit Bruchkriterium nach MOHR-COULOMB und assoziierter Fließregel modelliert. Für dieses relativ einfache Stoffgesetz werden vier Parameter benötigt, nämlich der Elastizitätsmodul E und die Querdehnzahl ν und die Scherparameter φ' (Winkel der inneren Reibung) und c' (Kohäsion).

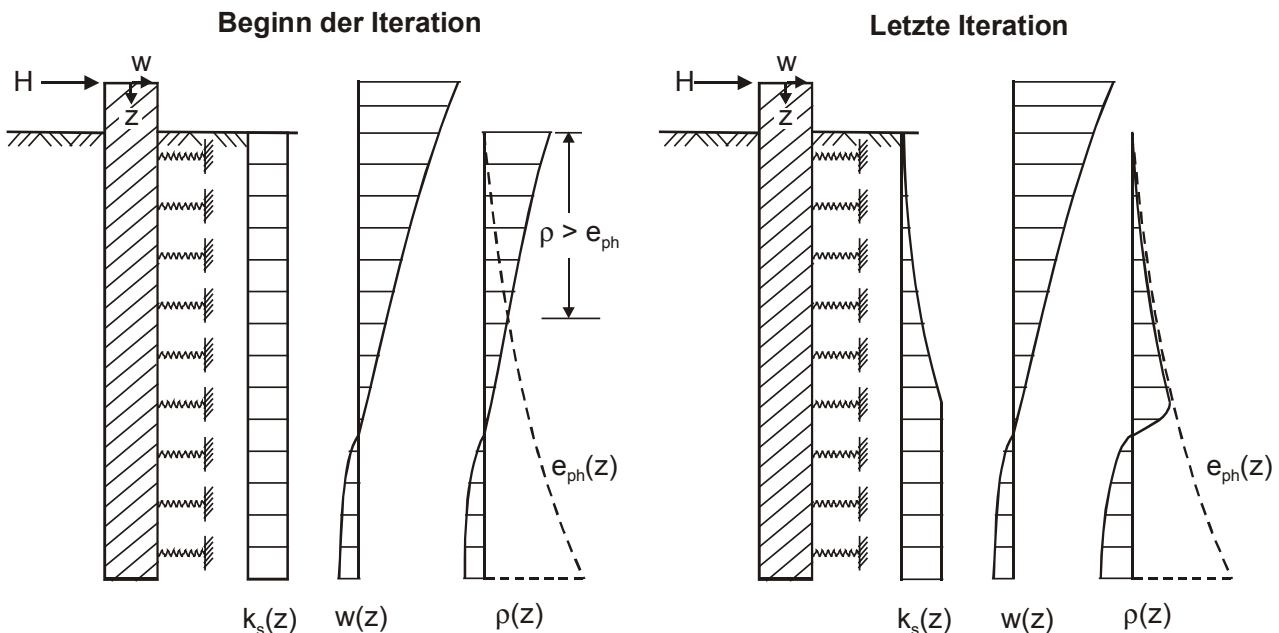


Bild 5 Berechnung mit dem Bettungsmodulverfahren

Für die Pfahlbemessung, d. h. die Bestimmung der erforderlichen Einbindetiefe und der Biegemomente, wird der Erdwiderstand üblicherweise durch einen Sicherheitsfaktor abgemindert. Für die Berechnung von Verschiebungen ist dies aber nicht sinnvoll, da hier die tatsächlich im Boden wirkenden Spannungen zu betrachten sind.

Für den Sand wurden die Parameter zu $\nu = 0.3$, $E_s = 80 \text{ MN/m}^2$ ($E = E_s (1 - \nu - 2\nu^2) / (1 - \nu)$), $\varphi' = 35^\circ$ und $c' = 0$ angenommen.

Es wurden Berechnungen für einen 5 m und einen 10 m langen Pfahl, jeweils mit einem Durchmesser von 1 m, ausgeführt. Das System und die berechneten Last-Verschiebungskurven sind in Bild 6 dargestellt.

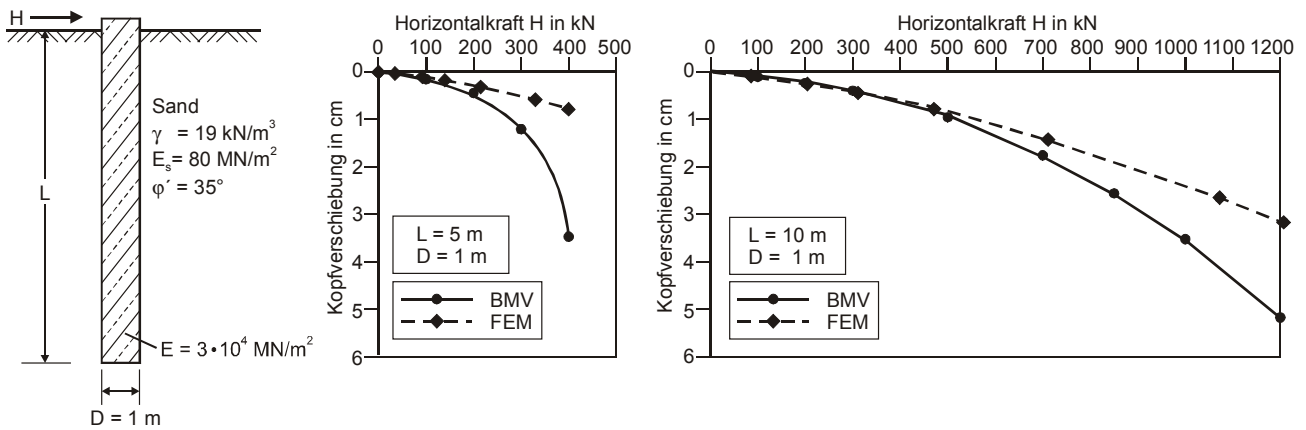


Bild 6 System und Last-Verschiebungskurven für Pfähle $D=1$ m, $L=5$ m und $L=10$ m

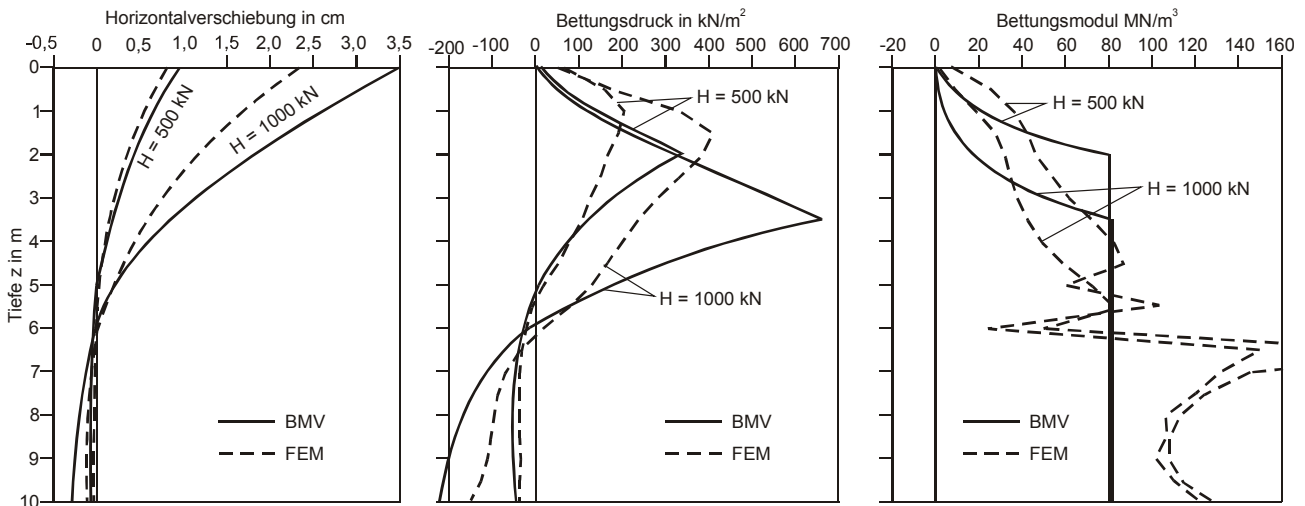


Bild 7 Ergebnisse für einen Pfahl $D=1$ m, $L=10$ m für $H=500$ kN und $H=1000$ kN

Unterstellt man, dass die Finite-Elemente-Lösung exakt ist, so ergibt sich, dass die Verschiebungen beim Bettungsmodulverfahren überschätzt werden. Dies gilt in besonderem Maße für den kurzen Pfahl ($L=5$ m, $L/D=5$).

Für den langen Pfahl ($L=10$ m) sind die Verschiebungs-, Bettungsdruck- und Bettungsmodulverläufe für zwei Laststufen in Bild 7 wiedergegeben. Die Kurven verdeutlichen, dass die Bettungsdrücke im oberen Pfahlbereich vom BMV etwas unterschätzt und im mittleren Pfahlbereich überschätzt werden.

Die Rückrechnung der Bettungsmoduln aus den FEM-Ergebnissen zeigt, dass die Moduln bis zum Drehpunkt des Pfahls nahezu linear zunehmen und dass sie unterhalb dieses Punktes deutlich höher sind als für das BMV angesetzt.

Dennoch kann – auch wenn die Ergebnisse natürlich nicht verallgemeinert werden können – festgehalten werden, dass zumindest für den längeren Pfahl mit $L/D=10$ eine grobe Abschätzung der Pfahlkopfverschiebung mit dem beschriebenen Bettungsmodulverfahren möglich erscheint. Für das dargestellte Beispiel ergeben sich zu gro-

ße Verschiebungen, d. h. die Methode führt hier zu „auf der sicheren Seite liegenden“ Ergebnissen.

4.5 Vergleich mit dem Ergebnis einer Pfahlprobepbelastung

Zur ergänzenden Bewertung des verwendeten Bettungsmodulverfahrens wurde eine von Wittke et al. (1974) dokumentierte Pfahlprobepbelastung nachgerechnet. Es handelte sich dabei um einen Großbohrpfahl $D = 1,2\text{ m}$ mit einer Länge von 8 m in geschichtetem Boden (Kiessand über Gründsandmergel).

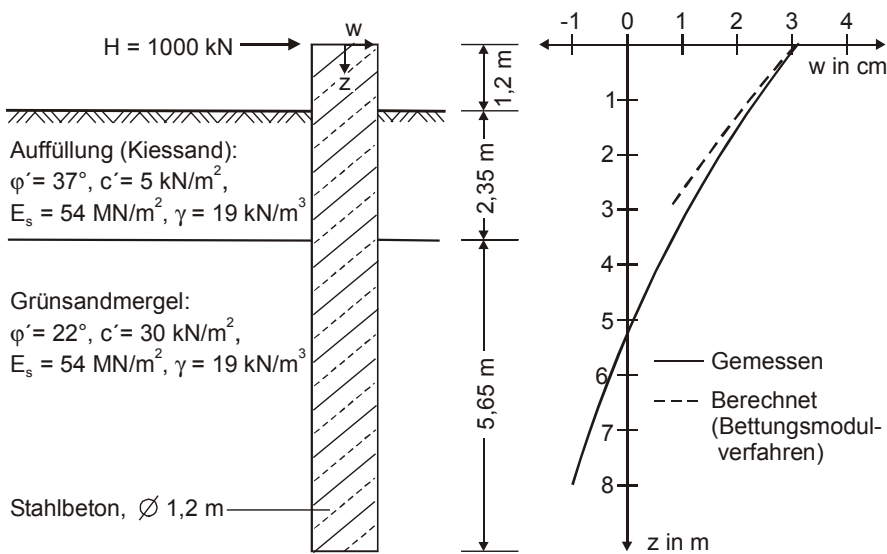


Bild 8 Vergleich von gemessenen und berechneten Verschiebungen für eine von Wittke et al. (1974) dokumentierte Pfahlprobepbelastung

Wittke et al. geben die Horizontalverschiebungen des Pfahls im oberen Bereich unter einer Horizontallast von 1000 kN an. Die Verschiebungen wurden mit dem Bettungsmodulverfahren unter Verwendung der von Wittke et al. angegebenen Bodenkennwerte berechnet.

Das System sowie die gemessenen und die berechneten Verschiebungen sind in Bild 8 dargestellt. Für die Pfahlkopfverschiebung ergibt sich eine gute Übereinstimmung von Messung und Berechnung.

5 Ergebnisse für die Seebrücke

Für den Gründungspfahl der Seebrücke an der Ostseeküste (Bild 2) wurde die Last-Verschiebungskurve für eine Belastung in Höhe des Wasserspiegels (z. B. Eisdruck) mit dem in Abschnitt 4 beschriebenen Bettungsmodulverfahren berechnet.

Um eine Abweichung der Bodenkennwerte von den in Tabelle 1 angegebenen Werten zu erfassen, wurden zusätzliche Berechnungen mit um 10% erhöhten bzw. reduzierten Scherparametern und Steifemoduln ausgeführt. Die für den Pfahlkopf ermittelten Last-Verschiebungskurven sind in Bild 9 dargestellt. Zum Vergleich sind außerdem die Ergebnisse einer Finite-Elemente-Berechnung (für die Bodenkennwerte gemäß Tabelle 1) angegeben.

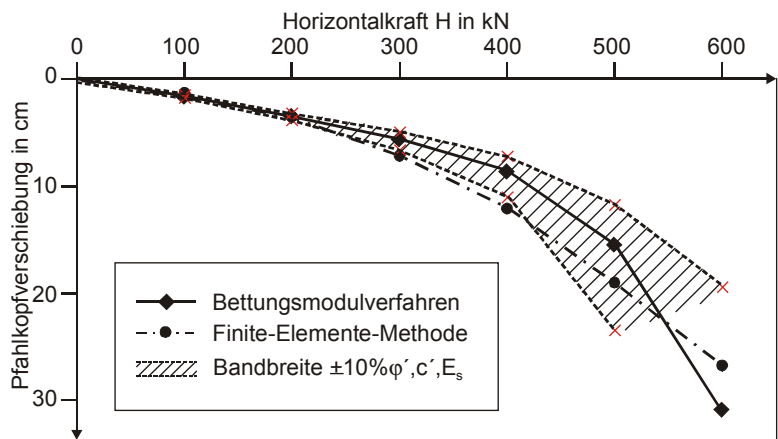


Bild 9 Berechnungsergebnisse für den Gründungspfahl gemäß Bild 2

Die Finite-Elemente-Berechnung ergibt hier etwas größere Verschiebungen als das Bettungsmodulverfahren. Aus beiden Methoden ergibt sich aber, dass für die Bemessungseislast von rd. 300 kN eine Pfahlkopfverschiebung zwischen rd. 6 und 8 cm zu erwarten gewesen wäre, d. h. in jedem Fall weniger als der zulässige Wert von 10 cm. Daraus kann gefolgert werden, dass die gemessene Maximalverschiebung von rd. 40 cm durch eine deutlich höhere Eislast verursacht worden sein muss. Nach den Berechnungsergebnissen dürfte eine Kraft größer als 500 kN gewirkt haben. Im Herbst 2000 wurde die Seebrücke saniert. Im Rahmen des Geraderichtens der Pfähle wurde an einem Pfahl ein Belastungstest ausgeführt. Die Systemgeometrie dieses Pfahls und die Ergebnisse des Belastungstests sind in Bild 10 wiedergegeben.

Die über ein Zugseil aufgebrachte Horizontalkraft wirkte etwa 1,8 m über dem Wasserspiegel. Zum Geraderichten war eine Zugkraft von rd. 480 kN erforderlich.

Eine Rückrechnung dieses Belastungstests mit dem Bettungsmodulverfahren ergibt eine gute Übereinstimmung mit der Messung (Bild 10). Hierdurch wird die Anwendbarkeit dieses Verfahrens für die Abschätzung von Pfahlkopfverschiebungen nochmals bestätigt.

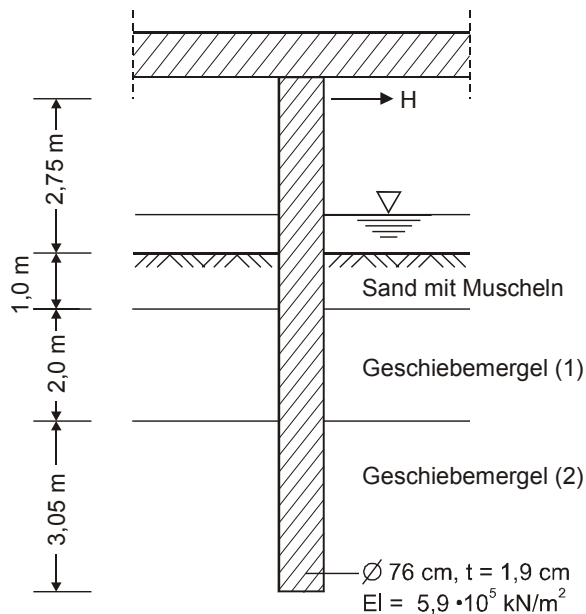
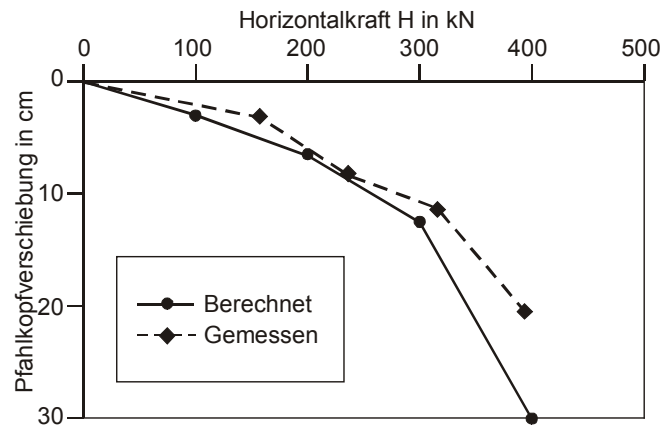


Bild 10 System und Ergebnisse der Pfahlprobebelastung

6 Zusammenfassungen und Schlußfolgerungen

An einer kleinen, auf Stahlrohrpfählen gegründeten Seebrücke an der Ostseeküste wurden nach einem strengen Winter horizontale Pfahlkopfverschiebungen von bis zu 40 cm festgestellt. Es war die Frage zu beantworten, ob dies durch unerwartet hohe Eisdrucklasten oder aber durch nicht ausreichende Steifigkeit der Gründung für die nach Erfahrungswerten angesetzte horizontale Bemessungslast verursacht wurde.

Vor diesem Hintergrund wurde untersucht, ob das relativ einfach anzuwendende Bettungsmodulverfahren geeignet ist, um zumindest eine grobe Abschätzung der Pfahlkopfverformungen zu liefern. Ein spezielles Verfahren wird vorgestellt, bei dem durch ein Iterationsverfahren sichergestellt wird, dass die Bettungsspannungen an keiner Stelle die Erdwiderstandsspannungen überschreiten. Durch Vergleich mit Ergebnissen der Finite-Elemente-Methode sowie durch Nachrechnung einer Pfahlprobebelastung wird gezeigt, dass eine solche grobe Abschätzung mit dem beschriebenen Verfahren möglich ist.



Die Berechnung des Gründungspfahls der Seebrücke mit der Methode sowie zusätzlich mit der Finite-Elemente-Methode belegt, dass die festgestellten Verschiebungen durch wesentlich höhere Eislasten als erwartet verursacht worden sein müssen. Schließlich wird auch gute Übereinstimmung von Messung und Berechnung mit dem Bettungsmodulverfahren für einen im Rahmen der Sanierung der Brücke ausgeführten Belastungstest festgestellt.

Obwohl eine Verallgemeinerung dieser Ergebnisse für beliebige Rand- und Baugrundbedingungen natürlich nicht zulässig ist, kann festgestellt werden, dass das hier beschriebene Bettungsmodulverfahren ein gutes Werkzeug für die Abschätzung von Pfahlkopfverschiebungen horizontal belasteter Pfähle zu sein scheint.

7 Literatur

API 1982. Recommended practice for Planning, Designing and Constructing fixed offshore platforms. American Petroleum Institute, Washington D.C.

Det Norske Veritas 1977. Rules for the Design, Construction and Inspection of offshore Structures, Appendix F: Foundations. Det Norske Veritas, Oslo.

EAU 1996. Empfehlungen des Arbeitsausschusses Ufereinfassungen, Häfen und Wasserstraßen. Ernst & Sohn, Berlin.

Poulos., H.G., Davis, E.H. 1980. Pile Foundation Analysis and Design. Wiley and Sons, New York.

Wittke, W., Spang, J., Rodatz, W., Semprich, S. 1974. Bemessung von horizontal belasteten Großbohrpfählen nach der Methode Finiter Elemente. Bauingenieur 49, p. 219-226.

Schlagworte:

Horizontal belastete Pfähle
Bettungsmodulverfahren
Seebrücke

Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. Martin Achmus,
Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Universität Hannover
Appelstr. 9A, 30167 Hannover
Tel.: 0511 762-4155
e-mail: achmus@igbe.uni-hannover.de