

Schwingungen von Fundamenten auf inhomogenem Baugrund

Dr. **G. Waas** VDI und Dr.-Ing. **H. Werkle**, Frankfurt a. M.

Zusammenfassung

Es werden die dynamischen Steifigkeiten eines starren Fundaments auf einem Boden, dessen Schubmodul von einem Anfangswert an der Oberfläche linear mit der Tiefe ansteigt, dargestellt in Abhängigkeit von der Frequenz. Der Anstieg des Schubmoduls wird variiert. Es wird gezeigt, daß die statischen Federsteifigkeiten und die frequenzabhängigen Feder- und Dämpferbeiwerte gut angenähert werden können durch diejenigen des homogenen elastischen Halbraums. Die dynamischen Steifigkeiten eines Rechteckfundaments und kreisförmiger Ersatzfundamente werden verglichen.

1. Einleitung

In Berechnungen von Fundamentalschwingungen wird der Baugrund unter dem Fundament meist durch Federn und Dämpfer ersetzt. Die Kennwerte der Federn und Dämpfer werden in vielen Fällen abgeleitet aus der dynamischen Steifigkeit eines starren Kreisfundaments auf einem homogenen elastischen Halbraum. Für diesen einfachen Fall sind die dynamischen Steifigkeiten bekannt aus zahlreichen Veröffentlichungen, z.B. /1, 8, 9/. Ihre Anwendung in der Praxis ist aber nicht problemlos. Erstens sind die dynamischen Bodenkennwerte, der Schubmodul G , die Poissonzahl ν und das hysteretische Dämpfungsmaß D , nur mit größerem Aufwand zu messen und werden deshalb meist abgeschätzt mit Hilfe empirischer Formeln, z.B. /2/. Zweitens ist der Baugrund nur selten homogen. Die Steifigkeit von rolligen und bindigen Böden nimmt in der Regel mit der vertikalen Auflast und somit mit der Tiefe zu.

In der Praxis behilft man sich in diesem Fall durch die Verwendung eines "repräsentativen" Schubmoduls, den man in die Formeln und Kurven für ein Fundament auf einem homogenen Halbraum einsetzt. Zu diesem Zweck wird der Schubmodul

des Bodens in einer "repräsentativen" Tiefe unter dem Fundament gewählt, z.B. in der Tiefe $R/2$. R sei der Radius eines Ersatzkreises für die Fundamentfläche. Es wird meist derselbe repräsentative Schubmodul für alle Freiheitsgrade des Fundaments angenommen.

Über die Güte dieser Näherung herrscht Unkenntnis. In der einschlägigen Literatur gibt es dazu kaum Anhaltspunkte. Neben den statischen und den dynamischen Steifigkeiten eines Fundaments auf einem homogenen Halbraum sind nur einige Ergebnisse für die Fälle eines Fundaments auf einer elastischen Bodenschicht über einer starren Unterlage, z.B. /1, 4, 5, 6/ und über einem homogenen Halbraum /7,8/ veröffentlicht. Holzlöhner /3/ hat vorgeschlagen, zur Bestimmung der statischen Federsteifigkeiten für die verschiedenen Freiheitsgrade eines Fundaments einen repräsentativen Schubmodul durch gewichtete Mittelung des Schubmoduls über die Tiefe zu errechnen. Als Wichtungsfaktor empfiehlt er den relativen Beitrag des jeweiligen Tiefenintervalls zur statischen Gesamtverschiebung des Fundaments. Den relativen Verschiebungsbeitrag schätzt er ab über die Differenz zwischen den Steifigkeiten für Fundamente auf unterschiedlich dicken Bodenschichten /6, 7/. Holzlöhner weist darauf hin, daß für die verschiedenen Freiheitsgrade unterschiedliche repräsentative Werte des Schubmoduls verwendet werden sollten und daß die Abstrahlungsdämpfung überschätzt wird, wenn man den repräsentativen Schubmodul zur Bestimmung der statischen Steifigkeit auch zur Berechnung der Dämpfung mit Hilfe der dynamischen Steifigkeitsfunktionen für den homogenen Halbraum verwendet.

In diesem Vortrag werden erstmals Ergebnisse für die statische und dynamische Steifigkeit eines starren Fundaments auf einer dicken inhomogenen Bodenschicht dargestellt, in der der Schubmodul von dem Wert G_0 an der Oberfläche linear mit der Tiefe zunimmt. Eine dicke Bodenschicht statt eines Halbraumes wurde aus berechnungstechnischen Gründen gewählt. Hinsichtlich der praktischen Ergebnisse ist die Auswirkung

der begrenzten Tiefe des Bodens unerheblich, wenn die Schicht ausreichend dick gewählt wird.

Zur Berechnung wurde eine Methode verwendet, die in einem früheren VDI-Vortrag /11/ vorgestellt wurde. Sie ermöglicht die numerische Berechnung der dynamischen Steifigkeiten von Fundamenten auf einem beliebig geschichteten visko-elastischen Medium. Mittels expliziter Lösungen für die Verschiebungen, die von Punkt-, Ring- und Kreisflächenlasten in dem Medium erzeugt werden, kann die dynamische Steifigkeit für beliebig geformte Fundamente berechnet werden. Das Medium wird zum Zweck der Berechnung in vertikaler Richtung diskretisiert durch Einführung dünner Schichten, sogenannter semifiniten Elemente mit linearen Verschiebungsansätzen. In horizontaler Richtung erfüllen die Verschiebungen in Form von Hankel- und Bessel-Funktionen jedoch die zuständigen Differentialgleichungen /11, 12/.

2. Darstellung der dynamischen Steifigkeit

Die Feder- und die Dämpferkraft, die ein starres Fundament als Reaktionskräfte entwickelt, wenn dem Fundament eine zeitlich sinusförmige Verschiebung bzw. Verdrehung mit der Amplitude 1 eingeprägt wird, werden zusammen als dynamische Steifigkeit oder Impedanz bezeichnet. Die Federkraft verläuft in Phase mit der Verschiebung bzw. Verdrehung des Fundaments, die Dämpferkraft in Phase mit der Geschwindigkeit. Im folgenden wird die dynamische Steifigkeit für jeden Freiheitsgrad als komplexe frequenzabhängige Größe dargestellt in der Form

$$\tilde{K} = K [k(1+2iD) + i a c] \quad (1)$$

mit \tilde{K} = dynamische Steifigkeit (komplexe Zahl)

K = statische Steifigkeit

k = frequenzabhängiger Beiwert der Federkraft

c = frequenzabhängiger Beiwert der Dämpferkraft

D = Maß der hysteretischen Materialdämpfung

bezogen auf die kritische viskose Dämpfung

$i = \sqrt{-1}$

$$a = \frac{\omega R}{V_S} \text{ bezogene Frequenz}$$

$$\omega = \text{Kreisfrequenz}$$

$$R = \text{Radius des Fundaments}$$

$$V_S = \sqrt{G/\rho} \text{ Scherwellengeschwindigkeit}$$

$$G = \text{Schubmodul des Bodens}$$

$$\rho = \text{Massendichte des Bodens}$$

Mit x als Verschiebung und \dot{x} als Geschwindigkeit ergeben sich aus Gl. (1) die

$$\text{Federkraft } F_f = K k x \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \text{Dämpferkraft } F_d &= i K (ac + 2Dk) x \\ &= K \left(\frac{R}{V_S} c + \frac{2D}{\omega} k \right) \dot{x} \end{aligned} \tag{3}$$

Die Addition der beiden Dämpfungsterme in Gl. 3 stellt eine praktische Näherung dar. Der erste Term enthält die Dämpferkraft, die durch Abstrahlung elastischer Wellen vom Fundament in das elastische Medium ohne Materialdämpfung entsteht. Die Erhöhung der Dämpfung durch Materialdämpfung im Medium wird durch den zweiten Term berücksichtigt. Somit läßt sich bei bekannter Abstrahlungsdämpfung für das rein elastische Medium die Dämpfung für ein Medium mit Materialdämpfung einfach ermitteln.

Da die Abstrahlungsdämpfung in einem elastischen Halbraum mit der Frequenz zunimmt und die Dämpfungskraft bei höheren Frequenzen groß gegenüber der Federkraft wird, ist der Materialdämpfungsanteil nur bei niedrigen Frequenzen von praktischer Bedeutung. Die Näherung nach Gl. 3 ist nur sinnvoll, solange der frequenzabhängige Federbeiwert k größer als Null ist.

Für ein Fundament mit der Masse m läßt sich die Bewegungsgleichung im Frequenzbereich

$$[-\omega^2 + i \frac{K}{m} k (a \frac{c}{k} + 2D) + \frac{K}{m} k] x = \frac{P(\omega)}{m} \tag{4}$$

schreiben. Vergleicht man Gl. 4 mit der Bewegungsgleichung eines linearen viskos gedämpften Einmassenschwingers im Frequenzbereich

$$[-\omega^2 + i 2 \omega \omega_e \xi + \omega_e^2] x = \frac{P(\omega)}{m} \quad (5)$$

und setzt $\omega_e^2 = \frac{K}{m} k$ (6)

so ergibt sich für $\omega = \omega_e$ das äquivalente modale Dämpfungsmaß zu $\xi = \frac{a}{2} \frac{C}{K} + D$ (7)

Mit Gl. 7 läßt sich also eine modale Dämpfung bestimmen, die im Bereich der Resonanzfrequenz des Schwingers gleich große Dämpfung bewirkt. Aus Gl. 6 folgt die passende Federsteifigkeit für einen viskos gedämpften Ersatzschwinger mit frequenzunabhängigen Beiwerten zu K_k .

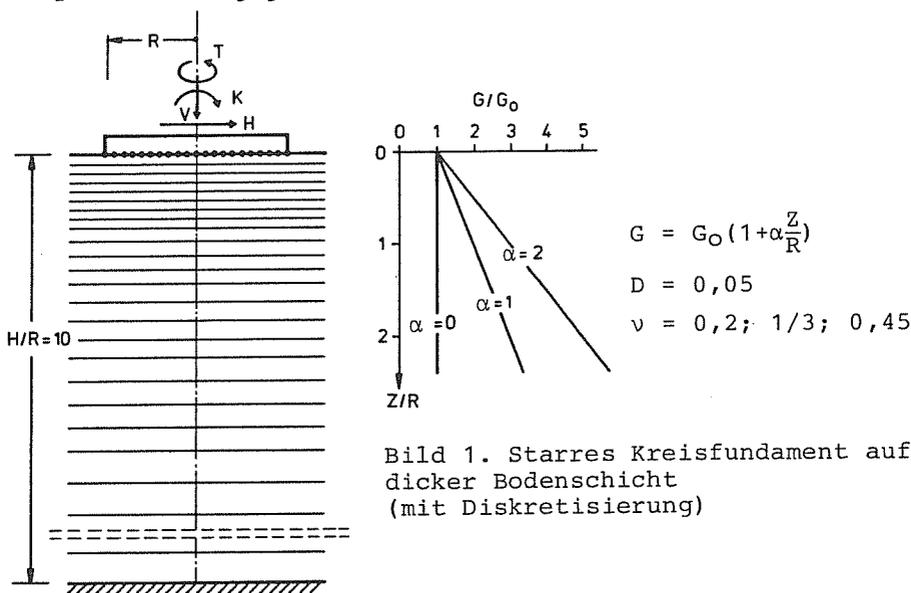


Bild 1. Starres Kreisfundament auf dicker Bodenschicht (mit Diskretisierung)

TABELLE 1: Statische Steifigkeit für ein Kreisfundament auf homogenem Halbraum und auf einer Schicht

	homogener Halbraum	Faktoren für homogene Schicht mit $H/R = 10$	
		hier	nach /5, 12/
Kippen	$\frac{8GR^3}{3(1-\nu)}$	1.04	1.02
Torsion	$\frac{16GR^3}{3}$	1.00	1.00
horizontal	$\frac{8GR}{2-\nu}$	1.05	1.05
vertikal	$\frac{4GR}{1-\nu}$	1.12	1.12

3. Kreisfundament auf dicker homogener Bodenschicht

Mit dem in Bild 1 dargestellten Modell wurden die dynamischen Steifigkeiten für Kippen, Torsion, horizontale und vertikale Translation eines starren Kreisfundaments auf einer dicken homogenen Bodenschicht über einer unverschieblichen starren Unterlage berechnet. Als Materialdämpfung wurde eine hysteretische Dämpfung von 5% angesetzt. Die frequenzabhängigen Beiwerte k und c gemäß der Formulierung in Gl. 1 sind in Bild 2 über der bezogenen Frequenz a aufgetragen und können dort mit den entsprechenden Beiwerten für ein Fundament auf einem homogenen elastischen Halbraum verglichen werden. Die zugehörigen statischen Steifigkeiten K sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Die Beiwerte für den Halbraum stammen von Veletsos und Wei /10/ für Kippen und horizontaler Translation, von Shah /9/ für vertikale Translation und von Bycroft /1/ für Torsion.

Die Beiwerte der dicken Bodenschicht mit $H/R = 10$ stimmen gut mit denjenigen des Halbraums überein, besonders für Kippen und Torsion. Für die Translationen zeigen allerdings die Beiwerte der Schicht einige Welligkeit bedingt durch die Reflexion von Wellen an der unteren Schichtgrenze.

Unterhalb der kritischen Frequenz

$$a_{\text{krit}} = \frac{\pi R}{2H} \quad (8)$$

tritt bei Horizontalschwingungen praktisch keine Abstrahlungsdämpfung auf. Für Vertikal- und Kippschwingungen ist die kritische Frequenz

$$a_{\text{krit}} = \frac{\pi R}{2H} \frac{V_p}{V_s} = \frac{\pi R}{2H} \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (9)$$

V_s und V_p sind die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten von Scher- und Kompressionswellen. Die kritischen Frequenzen entsprechen den ersten Scher- und Kompressionseigenschwingungen einer homogenen elastischen Schicht über starrer Unterlage. Die höheren Eigenschwingungen der Schicht haben die 3-, 5-, 7-fache etc. Frequenz von denen der Gl. 8 bzw. 9. Sie verursachen die Welligkeit der Beiwerte k und c für

die Translationsschwingungen des Fundaments auf der Schicht (Bild 2). Durch Materialdämpfung werden die Kurven der Beiwerte geglättet.

In Bild 2 sind zusätzlich Ergebnisse für ein Kreisfundament auf einem homogenen Halbraum mit 5% hysteretischer Materialdämpfung eingetragen (der Form von Gl. 1 entsprechend), die Luco /8/ berechnet hat. Die Übereinstimmung der k- und c-Werte mit denen des Halbraums ohne Materialdämpfung ist sehr gut. Sie liegt im Bereich der numerischen Genauigkeit der Ergebnisse. Das zeigt, daß die in Gl. 1 implizierte Addition der Materialdämpfung zu der Abstrahlungsdämpfung des rein elastischen Halbraums eine brauchbare Näherung ist.

4. Mit der Tiefe zunehmender Schubmodul

Mit dem in Bild 1 gezeigten Modell wurden Berechnungen durchgeführt für verschiedene schnelle Zunahme des Schubmoduls G mit der Tiefe z. Der Gradient α wird bezogen auf den Radius des Fundaments R:

$$G = G_0 \left(1 + \alpha \frac{z}{R} \right) \tag{10}$$

G_0 ist der Schubmodul an der Oberfläche der Bodenschicht.

4.1 Statische Steifigkeit

Die statischen Steifigkeiten, die für verschiedene Werte von α und für verschiedene Poissonzahlen ν berechnet wurden, lassen sich durch die Formeln für den Halbraum (Tabelle 1) darstellen, wenn man nur den passenden Schubmodul einsetzt. Es zeigt sich, daß die zu dem passenden Schubmodul gehörende Tiefe \bar{z} näherungsweise invariant hinsichtlich des Gradienten α ist. Die für die statische Steifigkeit repräsentative bezogene Tiefe

$$\zeta = \bar{z}/R \tag{11}$$

ist in Tabelle 2 angegeben. Für die verschiedenen Freiheitsgrade ergeben sich deutlich unterschiedliche repräsentative Tiefen. Als grobe Näherung kann man sich merken:

$\zeta =$	1	für	vertikale Translation	
	0,5	für	horizontale Translation	
	0,4	für	Kippen	(12)
	0,2	für	Torsion	

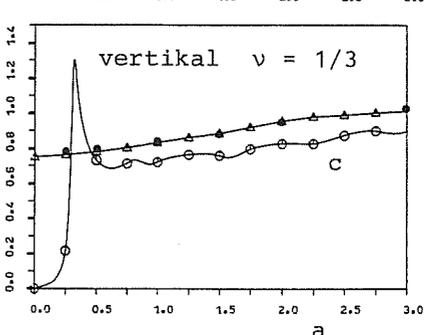
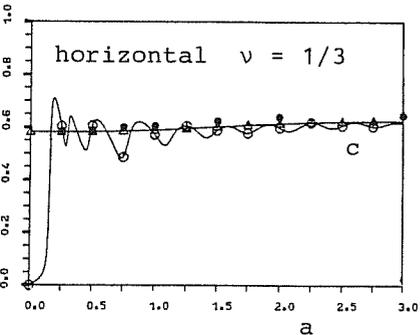
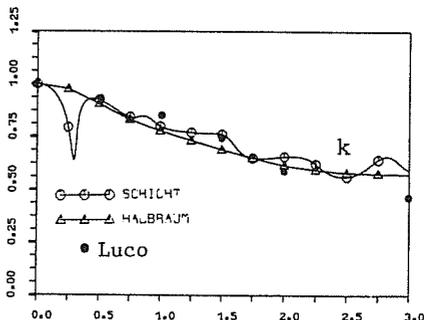
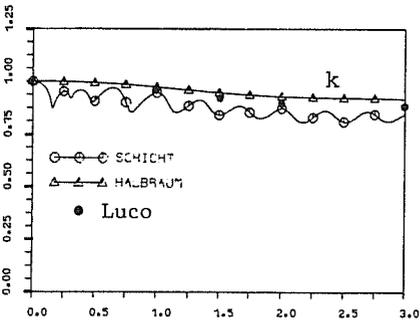
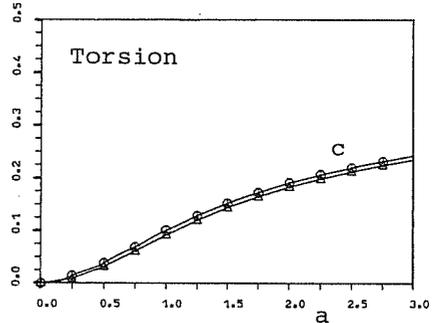
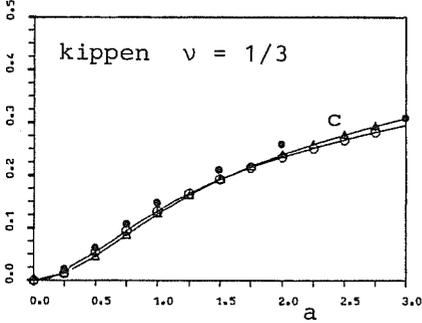
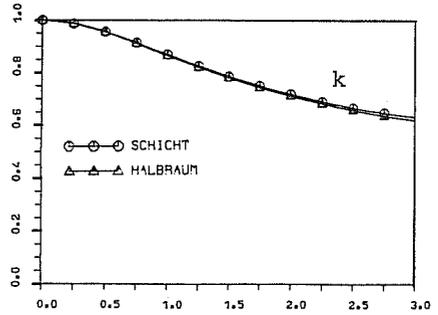
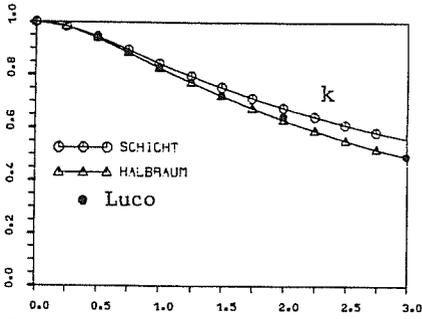


Bild 2: Steifigkeits- und Dämpfungsbeiwerte für ein Kreisfundament auf einem Halbraum und auf einer Schicht mit $H/R = 10$

Der zugehörige Schubmodul beträgt

$$\bar{G} = G_0 (1 + \alpha \zeta) \quad (13)$$

Mit dem Wertebereich $\alpha = 0$ bis $\alpha = 2$ wird ein weiterer Anwendungsbereich abgedeckt.

TABELLE 2: Repräsentative Tiefe $\zeta = \bar{z}/R$ zur Bestimmung des repräsentativen Schubmoduls $\bar{G} = G_0 (1 + \alpha \zeta)$ für Berechnung der statischen Steifigkeit

	vertikal			horizontal			Kippen			Torsion
v	.20	.33	.45	.20	.33	.45	.20	.33	.45	beliebig
$\alpha = 1$.87	.95	1.08	.50	.50	.50	.36	.40	.46	.20
$\alpha = 2$.72	.79	.92	.42	.42	.42	.31	.35	.41	.18
mittel	.80	.87	1.00	.46			.33	.37	.44	.19

4.2 Dynamische Steifigkeit

In der linken Hälfte von Bild 3 sind die Beiwerte für Kipp-schwingungen eines Fundamentes auf inhomogenem Boden ($\alpha = 1$) und zum Vergleich auf homogenem Boden ($\alpha = 0$) über

$$\bar{a} = \frac{\omega R}{\sqrt{\bar{G}/\rho}} \quad (14)$$

aufgetragen. Die dimensionslose Frequenz \bar{a} ist auf den Schubmodul \bar{G} bezogen, der für die statische Steifigkeit repräsentativ ist. Der Vergleich zeigt, daß der Dämpfungsbeiwert c für den inhomogenen Boden ($\alpha = 1$) wesentlich niedriger ist als für den homogenen Boden bei gleichem \bar{a} . Das bedeutet, daß auch die äquivalente viskose Dämpfung (siehe Gl. 7) der Kippschwingung eines Fundamentes auf inhomogenem Boden kleiner ist als auf homogenem Boden. Entsprechendes gilt für die übrigen Freiheitsgrade des Fundaments.

Um die Beiwerte k und c des inhomogenen Bodens näherungsweise durch die Beiwerte des homogenen Bodens wiedergeben zu können, wird die Frequenzachse verzerrt. Es wird ein neuer Frequenzfaktor

$$\tilde{a} = \frac{\omega R}{\sqrt{G/\rho}} \quad (15)$$

eingeführt. Darin ist

$$\tilde{G} = G_0 (1 + \alpha \tilde{\zeta}) \quad (16)$$

ein für das dynamische Verhalten repräsentativer Schubmodul,

$$\tilde{\zeta} = \delta \lambda_0 / R < 10\delta \quad (17)$$

die entsprechende repräsentative Tiefe,

$$\lambda_0 = \frac{2\pi}{a_0} R \quad (18)$$

die Scherwellenlänge an der Oberfläche des Bodens mit

$$a_0 = \frac{\omega R}{\sqrt{G_0/\rho}} \quad (19)$$

und

$$\delta = \begin{array}{ll} 1.5 & \text{für vertikale Translation} \\ 0.75 & \text{für horizontale Translation} \\ 0.75 & \text{für Kippen} \\ 0.25 & \text{für Torsion} \end{array} \quad (20)$$

ein Beiwert zur Anpassung.

Rechts in Bild 3 erkennt man, daß durch die Einführung von $\tilde{\alpha}$ die Beiwerte k und c für die inhomogenen Böden recht gut in Deckung mit den Beiwerten für den homogenen Boden gebracht werden. Dabei wurde größerer Wert auf die Anpassung der c -Werte als auf die der k -Werte gelegt, da die äquivalente viskose Dämpfung (Gl. 7), $\xi = \tilde{\alpha}/2 \cdot c/k + D$ empfindlicher von c als von k abhängt. Das gilt besonders für niedrige Frequenzen, bei denen die Dämpfung noch gering ist.

Die Umrechnung von a_0 nach \bar{a} und \tilde{a} sei an einem kleinen Beispiel verdeutlicht.

Beispiel: Kippen, $\nu = 1/3$

- Homogener Boden $\tilde{a} = \bar{a} = a_0$
- Inhomogener Boden, $\alpha = 1$

Aus Gl. 14 und 19 mit Tabelle 2 folgt:

$$\bar{a} = a_0 / \sqrt{1 + \alpha \zeta} = a_0 / \sqrt{1 + 0.25} = 0.85 a_0$$

Aus Gl. 15 und 19 folgt:

$$\tilde{a} = a_0 / \sqrt{1 + \alpha \tilde{\zeta}} = a_0 / \sqrt{1 + \alpha \delta 2 \pi / a_0} \quad \text{für } a_0 > \frac{\pi}{5}$$

$$a_0 / \sqrt{1 + \alpha \delta \cdot 10} \quad \text{für } a_0 < \frac{\pi}{5}$$

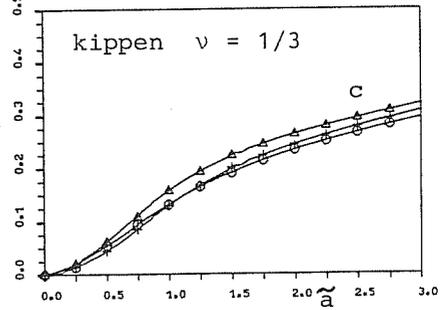
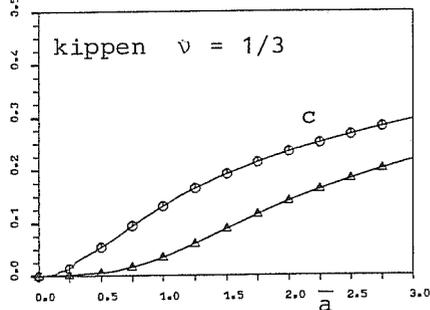
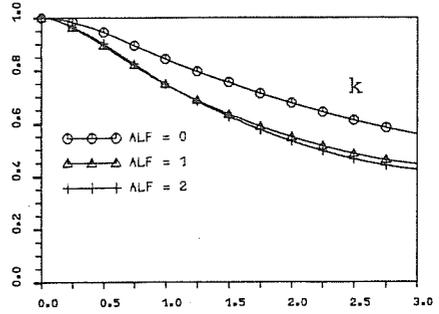
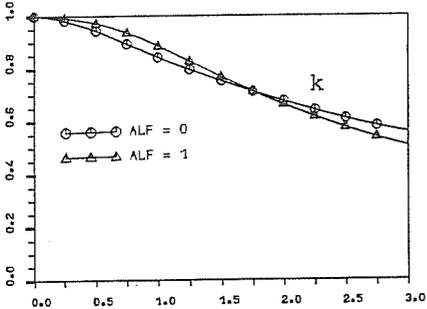


Bild 3. Beiwerte für die dynamische Kippsteifigkeit über a und \tilde{a}

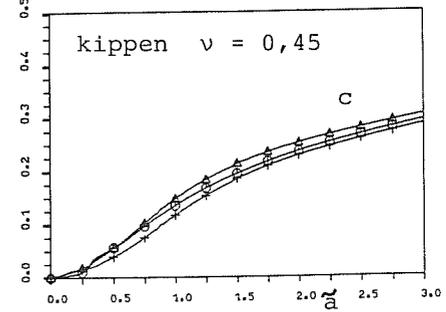
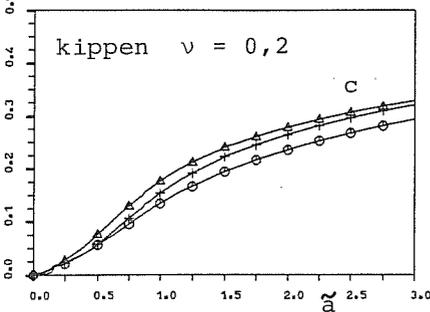
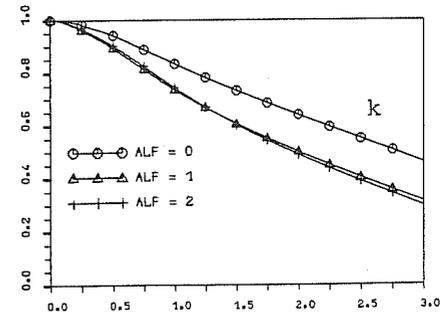
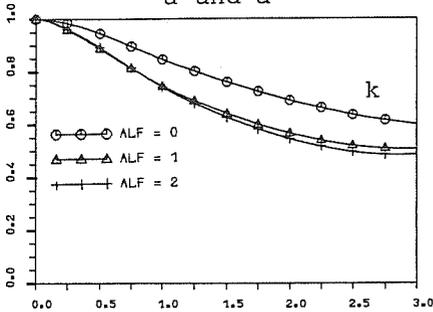


Bild 4. Beiwerte für die dynamische Kippsteifigkeit, $\nu = 0,2$ und $0,45$

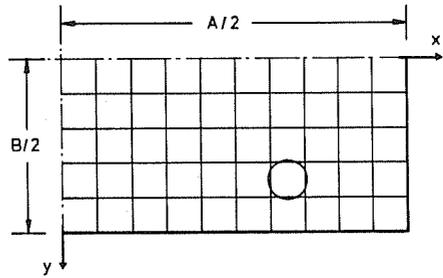
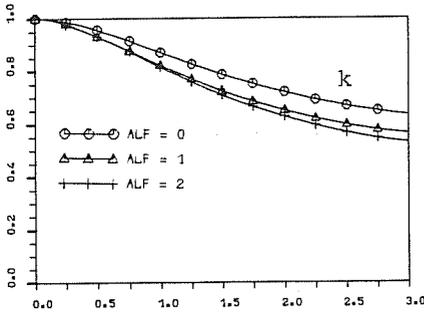


Bild 8. Diskretisierung des Rechteckfundaments

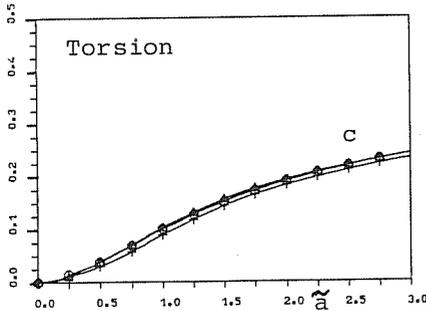


Bild 7. Beiwerte für die dynamische Torsionssteifigkeit

6. Rechteckfundament

Zum Zweck der Berechnung ersetzt man ein Rechteckfundament meist durch Kreisfundamente, die zur Berechnung der Translationssteifigkeit die gleiche Fläche und zur Berechnung der Kipp- und Torsionssteifigkeit die gleichen Trägheitsmomente wie das Rechteckfundament besitzen. Die entsprechenden Formeln für die äquivalenten Kreisradien stehen in Tabelle 3.

Als Beispiel wurden für ein starres Rechteckfundament mit dem Seitenverhältnis $A/B = 2$ die dynamischen Steifigkeiten über kreisförmige Ersatzfundamente und direkt berechnet. Für die direkte Berechnung wurde der Grundriß des Rechtecks diskretisiert, wie in Bild 8 an einem Viertel des Rechtecks gezeigt. Die quadratischen Teilflächen sind dabei aus rechen-technischen Gründen /11/ durch kleine kreisförmige Lastflächen ersetzt (in Bild 8 angedeutet für eine Teilfläche). Die vertikale Diskretisierung des Bodens zeigt Bild 1. Der Schubmodul des Bodens nimmt mit dem Gradienten

TABELLE 3: Statische Steifigkeit für Rechteckfundament
($A/B = 2$) und für äquivalentes Kreisfundament

	Ersatzradius R	$\frac{R}{\sqrt{AB/\pi}}$	$\frac{K}{K}$
			Kreis Rechteck
Vertikal z	$\sqrt{AB/\pi}$	1.00	0.94
Horizontal x	$\sqrt{AB/\pi}$	1.00	1.01
Horizontal y	$\sqrt{AB/\pi}$	1.00	0.94
Kippen xx	$\sqrt[4]{AB^3/(3\pi)}$	0.85	1.00
Kippen yy	$\sqrt[4]{A^3B/(3\pi)}$	1.20	0.94
Torsion zz	$\sqrt[4]{AB(A^2+B^2)/(6\pi)}$	1.08	0.95

$\alpha = 1$, bezogen auf $R = \sqrt{AB/\pi}$, nach unten hin zu. Die Poissonzahl ist $\nu = 1/3$; das hysteretische Dämpfungsmaß des Bodens beträgt 5%. Die Gesamtdicke der Bodenschicht beträgt wieder $10 R$.

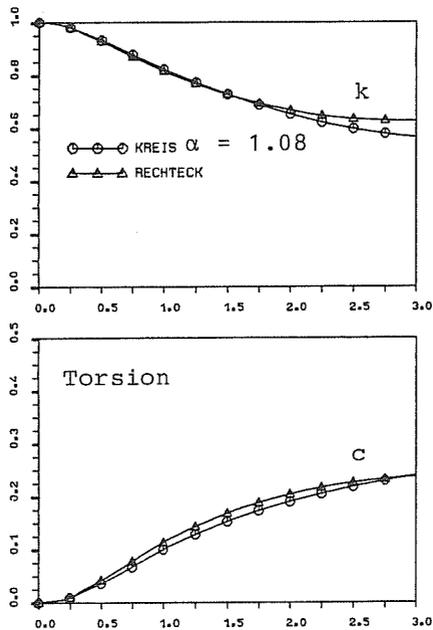


Bild 9. Vergleich von Rechteck- und Kreisfundament

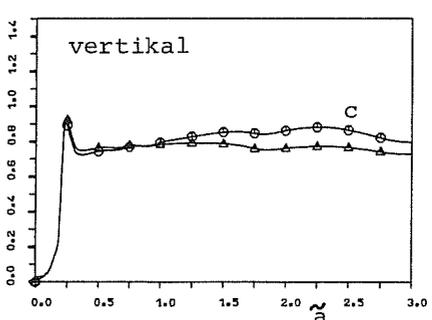
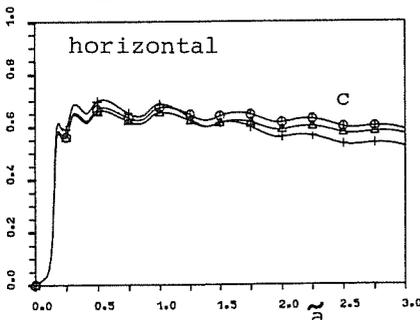
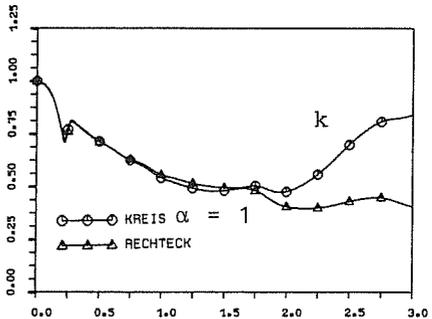
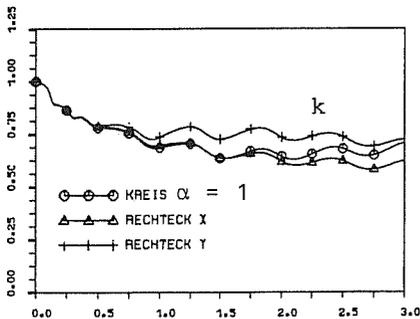
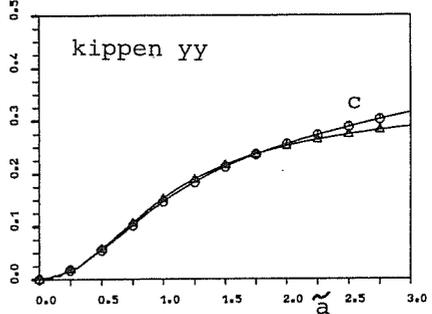
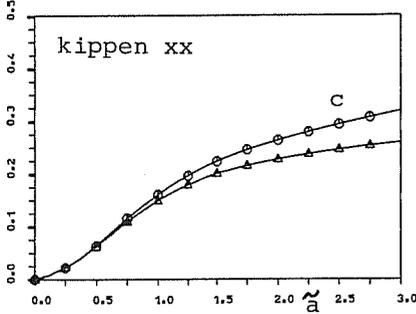
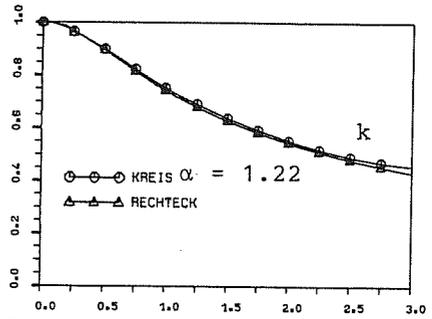
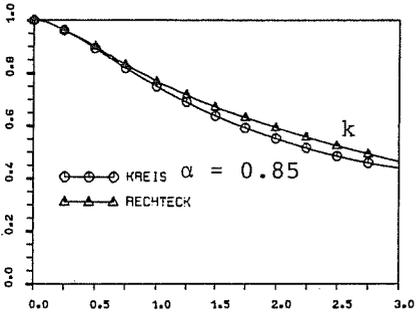


Bild 10. Vergleich der Ergebnisse für ein Rechteckfundament mit den Ergebnissen für äquivalente Kreisfundamente

Die Näherungsrechnungen über kreisförmige Ersatzfundamente wurden mit den in Tabelle 2 angegebenen Radien und demselben Bodenprofil durchgeführt.

Die statischen Steifigkeiten für die Kreisfundamente sind mit denen des Rechteckfundaments in Tabelle 3 verglichen. Sie stimmen gut überein. Die dynamischen Beiwerte für das Rechteck- und die äquivalenten Kreisfundamente sind in den Bildern 9 und 10 gegenübergestellt. Auch sie zeigen recht gute Übereinstimmung.

Zu beachten ist, daß sich bei einem vorgegebenem Bodenprofil mit dem äquivalenten Radius des Fundaments der Wert α ändert, da α/R konstant ist. Es ändert sich weder der repräsentative Schubmodul \bar{G} zur Berechnung der statischen Steifigkeit noch \bar{G} zur Ermittlung von $\tilde{\alpha}$. Der Wert von $\tilde{\alpha} = \omega R\sqrt{\bar{G}/\rho}$ ist jedoch proportional zum Radius.

7. Schluß

Es wurden die dynamischen Steifigkeiten von starren Fundamenten auf Böden, deren Schubmodul mit der Tiefe zunimmt, berechnet. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, daß die statischen und die dynamischen Steifigkeiten bei Böden, deren Schubmodul mit der Tiefe ansteigt, aus praktischer Sicht recht gut durch die bekannten Steifigkeits- und Dämpfungswerte eines Fundaments auf dem homogenen elastischen Halbraum angenähert werden können.

In der Praxis ist es üblich (aus Mangel an anderen Berechnungsmöglichkeiten), mit einem homogenen Ersatzhalbraum zu arbeiten. Über die Bestimmung eines zutreffenden "repräsentativen" Moduls und über die Zuverlässigkeit des Verfahrens ist aber bisher wenig bekannt gewesen. Die im Vortrag dargestellten Berechnungsergebnisse und der aufgezeigte Weg zu einem geeigneten Schubmodul für den homogenen Ersatzhalbraum können sicher in manchen Fällen als Anhaltspunkt bei der Berechnung von Maschinenfundamenten dienen.

Schrifttum

- / 1/ Bycroft, G.N.: Forced vibrations of a rigid circular plate on a semi-infinite elastic space and on an elastic stratum. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A 248(1956), 327-368
- / 2/ Hardin, B.O., and Drnevich, V.P.: Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 98, No. SM7, Proc. Paper 9006, July, 1972b, 667 - 692
- / 3/ Holzlöhner, U.: The use of an equivalent homogeneous half-space in soil-structure interaction analyses. SMiRT 5, M 10/3, Berlin, 1979
- / 4/ Kausel, E. and J.M. Roesset: Dynamic stiffness of circular foundations. ASCE, Journal of the Engineering Mechanics Division 101(1975), 771 - 785
- / 5/ Kausel, E., R.V. Whitman, J.F. Morray and F. Elsaabee: The spring method for embedded foundations. Nuclear Engineering and Design 48 (1978), 377 - 392
- / 6/ Kobori, T., R. Minai and T. Suzuki: Dynamical ground compliance of rectangular foundation on an elastic stratum. Proc. of the 2nd Japan Earthquake Engineering Symposium 1966, 261 - 266
- / 7/ Luco, J.E.: Impedance functions for a rigid foundation on a layered medium. Nuclear Engineering and Design 31 (1974) 204-217
- / 8/ Luco, J.E.: Vibrations of a rigid disc on a layered viscoelastic medium. Nuclear Engineering and Design 36 (1976) 325 - 340
- / 9/ Shah, P.M.: On the dynamic response of foundation systems. Ph. D. Thesis, Rice University Houston, Texas, 1968
- /10/ Veletsos, A.S. and Y.T. Wei: Lateral and rocking vibrations of footings. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97, No. SM9, Proc. Paper 8388, 1971
- /11/ Waas, G.: Dynamisch belastete Fundamente auf dem Baugrund, VDI-Berichte 381, 185 - 189, 1980
- /12/ Waas, G., Riggs, H.R., Werkle, H.: Displacement solutions for dynamic loads in transversely-isotropic stratified media. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. In Vorbereitung.