

Berechnung des Grundbruchwiderstands ausmittig belasteter Fundamente

Calculation of the Bearing Capacity of Eccentrically Loaded Foundations

von Eugen W. Perau*

Zusammenfassung

Zur Berechnung des Grundbruchwiderstands von Fundamenten wird ein neues Konzept vorgestellt, welches die Einbeziehung ausmittiger Lasten erlaubt. Präsentiert wird auch das zugehörige Versuchsprogramm mit einigen interessanten Ergebnissen. Überlegungen zum neuen Sicherheitskonzept und ein tabelliertes Berechnungsschema schließen die Ausführungen ab.

Einleitung

Um die Standsicherheit von Fundamenten zu gewährleisten, ist nach DIN 1054 die Tragfähigkeit des Untergrundes nachzuweisen. Dazu wird für Flachgründungen der Grundbruchwiderstand nach DIN 4017 berechnet.

Die Umarbeitung der DIN 4017 und die Einführung des EUROCODEs 7 boten den Anlaß, sich eingehend mit den bestehenden Berechnungsvorschriften, ihren Möglichkeiten und Grenzen zu beschäftigen.

Unter Leitung von Herrn o. Prof. em. Dr.-Ing. H. Nendza wurde - unterstützt durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) - ein umfangreiches Untersuchungsprogramm durchgeführt, das zur Klärung einiger bis dahin nicht untersuchter Zusammenhänge in der Berechnung der Grundbruchsicherheit von Fundamenten beitragen sollte. So lassen sich nach DIN 4017 ausmittig angreifende Horizontallasten nicht berücksichtigen, wenn die Vertikallast nicht im gleichen Punkt angreift.

Die Untersuchungen ergaben, daß sich ein Berechnungskonzept wie das der DIN 4017 aufgrund der jetzt bereits enormen Anzahl von Fallunterscheidungen und Interpolationen praktisch nicht auf Lastfälle mit ausmittiger Horizontallast ausdehnen

Summary

A new concept to calculate the bearing capacity of shallow foundations is shown that allows the inclusion of eccentric loads. Accompanying experimental investigations with some interesting results are presented. Considerations about the new concept of partial safety factors and a calculation scheme conclude the paper.

läßt. Deswegen wurde ein neues Konzept erarbeitet, das sich so weit wie möglich an das der DIN anlehnt, jedoch einige grundsätzliche Verbesserungen einführt. Mit einem umfangreichen Versuchsprogramm, in dem es vor allem um die Auswirkung verschiedener Lastkombinationen auf die Bruchlast ging, konnten einige Lücken im Wissensstand zur Grundbruchberechnung geschlossen werden (vgl. PERAU 1995).

Eingangsparameter

Zur Berechnung der Tragfähigkeit eines Fundamentes werden verschiedene Parameter benötigt. Zunächst sind hier die Scherparameter ϕ und c sowie die Wichte des Bodens unterhalb der Sohle γ_2 zu nennen. Wichtig sind auch die seitliche Auflast $d \cdot \gamma_1$ oberhalb der Sohle und natürlich die Seitenlängen des Fundamentes. Je nach Orientierung des Koordinatensystems werden diese Seitenlängen mit b_1 (in x_1 -Richtung) und b_2 (in x_2 -Richtung) bezeichnet (vgl. Bild 1).

Zur Bestimmung der Tragfähigkeit ist letztlich auch die Festlegung einer maßgeblichen Lasteinwirkung vonnöten, die durch die Kraft mit den Komponenten V , H_1 , H_2 sowie einem Moment mit

* Dr.-Ing. Eugen W. Perau ist Wiss. Mitarb. an der Universität-GH Essen, Fachbereich Bauwesen, Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik

den Komponenten M_1 , M_2 und M_T beschrieben werden kann.

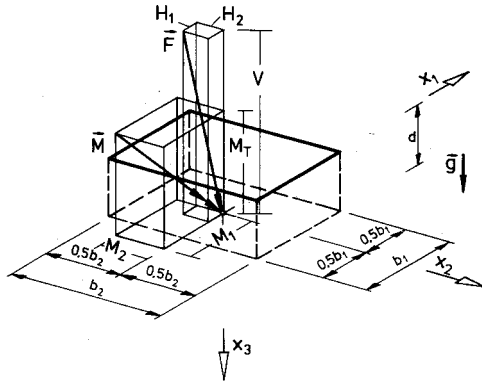


Bild 1 Fundamentgeometrie und Lasteinwirkung

Der Grenzzustand der Tragfähigkeit ist erreicht, wenn eine Funktion F_1 , die noch festzulegen ist, folgender Bedingung genügt:

$$F_1(\varphi, c, \gamma_2, d \cdot \gamma_1, b_1, b_2, H_1, H_2, V, M_1, M_2, M_T) = 0 \quad (1)$$

Unter Anwendung einiger Abkürzungen läßt sich das Problem aufbauend auf VOLLENWEIDERS (1984) Dimensionsanalyse vereinfachen. Es soll gelten:

$$\bar{c} = \frac{c}{\gamma_2 \cdot b_1}, \quad \bar{d} = \frac{d \cdot \gamma_1}{b_1 \cdot \gamma_2} \quad (2), (3)$$

$$V' = \frac{V}{\gamma_2 \cdot b_2 \cdot b_1^2} \quad (4)$$

$$\tan \delta_1 = \frac{H_1}{V} \quad \text{und} \quad \tan \delta_2 = \frac{H_2}{V} \quad (5a), (5b)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{M_2}{V \cdot b_1} \quad \text{und} \quad \varepsilon_2 = \frac{M_1}{V \cdot b_2} \quad (6a), (6b)$$

$$\text{sowie} \quad M_T' = \frac{M_T}{V \cdot b_1} \quad (7)$$

Eine exponentierte Stellung nimmt das Seitenverhältnis

$$s_{12} = \frac{b_1}{b_2} \quad (8)$$

ein. Es orientiert sich hier einzig und allein an der gewählten Lage des Koordinatensystems und nicht

wie in DIN 4017 an einem Vergleich der Seitenlängen; es ist für die weiteren Ausführungen deshalb auch irrelevant, welche der Seitenlängen b_1 oder b_2 die größere oder kleinere ist.

Mit Hilfe der Dimensionsanalyse läßt sich der Zusammenhang zwischen den dimensionsbehafteten Größen (1) in einen äquivalenten Zusammenhang zwischen dimensionslosen Parametern überführen:

$$F_2(\varphi, \bar{c}, \bar{d}, s_{12}, V', \varepsilon_1, \varepsilon_2, \tan \delta_1, \tan \delta_2, M_T') = 0 \quad (9)$$

Diese implizite Darstellung läßt sich in eine explizite Darstellung überführen (vgl. PERAU 1995).

$$V' = f(\varphi, \bar{c}, \bar{d}, s_{12}, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \tan \delta_1, \tan \delta_2, M_T') \quad (10)$$

Ansatz zur Berechnungsgleichung

Die gesuchte Funktion f nach (10), die von neun Eingangsparametern abhängt, ist nun zu bestimmen. Hier soll ein Ansatz gewählt werden, der sich aus Gründen der Vergleichbarkeit mit DIN 4017 an der dreigliedrigen Grundbruchgleichung von BUISMAN (1940) orientiert und auch als eine Erweiterung der Gleichung von VOLLENWEIDER (1984) gedeutet werden kann:

$$V' = \left\{ \begin{array}{l} N_{b0} \cdot v_b \cdot \mu_b \cdot \kappa_b \cdot \kappa_{Mb} \\ + \bar{d} \cdot N_{d0} \cdot v_d \cdot \mu_d \cdot \kappa_d \cdot \kappa_{Md} \\ + \bar{c} \cdot N_c \end{array} \right. \quad (11)$$

Die Bezeichnungen für die einzelnen Beiwerte entsprechen soweit wie möglich denen der DIN 4017. So ist N_{b0} der Tragfähigkeitsbeiwert für den Breiterterm und hängt nur von φ ab. Auch die Formbeiwerte v und die Lastneigungsbeiwerte κ sind von der DIN übernommen. Im Unterschied zur DIN werden hier jedoch Torsionsmomentenbeiwerte κ_M und Ausmittenbeiwerte μ hinzugefügt. Die Reduzierung der Seitenlängen aufgrund einer ausmittigen Vertikallast entfällt (vgl. PERAU 1995).

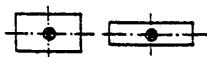
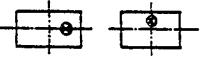
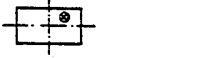
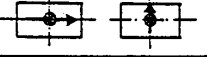
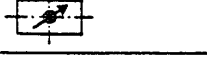
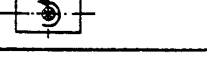
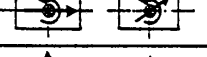
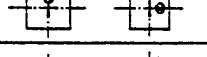

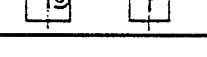
Versuchsprogramm

Die einzelnen Beiwerte nach (11) können nun mit Hilfe von Versuchen und plastizitätstheoretischen Berechnungen formuliert werden.

Die Tragfähigkeitsbeiwerte N_{b0} und N_{d0} nach DIN 4017, welche sich aus theoretischen Berechnungen (vgl. z.B. PREGL) ergeben, konnten durch die großmaßstäblichen Versuche der DEGEBO (vgl. WEISS 1978) verifiziert werden.

Obwohl allgemein bekannt ist, daß die absolute Größenordnung dimensionsloser Bruchlasten V' von groß- und kleinmaßstäblichen Versuchen nicht gleich ist, können kleinmaßstäbliche Versuche zur Erkundung des Einflusses verschiedener Lastwirkungen einen wertvollen Beitrag leisten. So haben Vergleiche zwischen den Ergebnissen von klein- und großmaßstäblichen Grundbruchversuchen gezeigt, daß aus Kleinversuchen gewonnene abmindernde Beiwerte denen von Großversuchen recht gut entsprechen (vgl. PERAU 1995).

Aus diesem Grunde wurden im Rahmen des anstehenden Forschungsvorhabens auch für die bis dato nicht untersuchten Lastfälle ausschließlich kleinmaßstäbliche Versuche durchgeführt. Zur Anbindung an die zahlreichen bereits veröffentlichten Versuchsergebnisse mit herkömmlichen Lastwirkungen wurden solche Untersuchungsbereiche ebenso einbezogen wie das Seitenverhältnis.

Serie	Lastwirkung	Ergebnis
A		v_b
B		μ_b
C		
D		κ_b
E		
F		κ_{Mb}
G		κ_b und κ_{Mb}
H		μ_b und κ_b
J		μ_b und κ_{Mb}
K		μ_b , κ_b und κ_{Mb}

Tab. 1 Versuchsprogramm und Ergebnis

Insgesamt wurden 153 Grundbruchversuche auf einem sehr dicht gelagerten Mittel- bis Grobsand durchgeführt. Die Modellfundamente mit Seitenlängen zwischen 4 cm und 20 cm waren dabei ausschließlich auf der Oberfläche des Versuchsbodens aufgebracht.

Ein gesuchter Beiwert ergab sich aus jedem Versuch als Ergebnis einer Division der Bruchlastkomponente V der jeweiligen Lastkombination und der Bruchlast aus einem auf der gleichen Schüttung durchgeführten und allein mittig vertikal belasteten Referenzversuch.

Das Versuchsprogramm wurde in die Serien (A-K) eingeteilt, die Tab. 1 zu entnehmen sind. Ergebnis einer Serie war so entweder ein bestimmter Beiwert oder die Information, ob eine einfache Multiplikation von Beiwerten nach (11) die Abminderung der Bruchlast durch eine kombinierte Lastwirkung zutreffend erfaßt.

Ergänzend wurde in Serie A der Einfluß der Lagerungsdichte auf den Formbeiwert untersucht und für eher untergeordnet befunden. Ein Vergleich zahlreicher aus der Literatur entnommener Versuche mit verschiedenen Sanden unterschiedlicher Lagerungsdichte (vgl. z.B. NOVA und MONTRASIO 1991) zeigte, daß die Lagerungsdichte auch die Beiwerte μ_b und κ_b nicht signifikant beeinflusst (PERAU 1995).

Bestimmung einzelner Beiwerte

Einige Ergebnisse des Versuchsprogramms sowie die Hauptgedanken zur Auswertung sollen nun vorgestellt werden.

Als Spezialfall für mittig vertikal belastete Fundamente ohne Einbindetiefe auf kohäsionslosem Boden ergibt sich aus (11):

$$V' = f(\varphi, s_{12}) = N_{b0}(\varphi) \cdot v_b(s_{12}, \varphi) \quad (12)$$

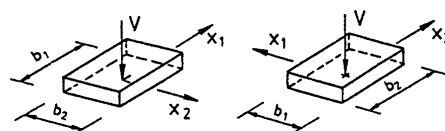


Bild 2 Zwei mögliche Lagen des Koordinatensystems und zugehörige Seitenbezeichnungen

Die Festlegung des Seitenverhältnisses nach (8) bedingt dabei eine ausdrückliche Beachtung der notwendigen Invarianz der Bruchlast V gegenüber der Orientierung des Koordinatensystems; d.h. die Bruchlast darf nicht von der frei wählbaren Lage des Koordinatensystems abhängen (vgl. Bild 2).

Für die Festlegung des Formbeiwertes v_b bedeutet dies, daß die beiden Gleichungen (13) und (14) ein und dieselbe Bruchlast liefern müssen:

$$V = b_2 \cdot b_1^2 \cdot \gamma_2 \cdot N_{b0}(\varphi) \cdot v_b \left(\frac{b_1}{b_2}, \varphi \right) \quad (13)$$

$$V = b_1 \cdot b_2^2 \cdot \gamma_2 \cdot N_{b0}(\varphi) \cdot v_b \left(\frac{b_2}{b_1}, \varphi \right) \quad (14)$$

Aus elementaren mathematischen Umformungen folgt daraus eine Bestimmungsgleichung (15), der ein Formbeiwert v_b in jedem Falle genügen muß:

$$s_{12} \cdot v_b(s_{12}, \varphi) = v_b \left(\frac{1}{s_{12}}, \varphi \right) \quad (15)$$

Aus der Einbeziehung von Streifenfundamenten in die Berechnungsgleichung folgt weiter:

$$v_b(s_{12}, \varphi) = \text{für } s_{12} = 0 \quad (16)$$

Die Versuchsserie A ergab eine mögliche Formulierung des Formbeiwerts nach (17), wie sie z. B. die französische Norm zum Grundbruch enthält (vgl. MALCHAREK und SMOLTCZYK 1981).

$$v_b = \frac{1}{1 + s_{12}} \quad (17)$$

Diese Berechnungsformel erfüllt die zwei zuvor aufgestellten Bedingungen (15) und (16).

Nach DIN 4017 wird bei der Berechnung der Lastneigungsbeiwerte κ_b , κ_d und κ_c nach der Wirkungsrichtung der Horizontallast unterschieden. In Abhängigkeit vom Seitenverhältnis der infolge Ausmitte reduzierten fiktiven Fundamentfläche lassen sich dann Lastneigungsbeiwerte berechnen.

Bei Seitenverhältnissen a/b' zwischen 1 und 2 sowie bei nicht seitenparallel angreifenden Horizontallasten sind Interpolationen notwendig.

Um die Gültigkeit solcher durchaus einsichtiger Interpolationen zu überprüfen, wurden in der Versuchsserie D bei seitenparalleler Horizontallast H_1 (bei $H_2=0$) Lastneigung und Seitenverhältnis variiert.

Im Bild 3 entsprechen Versuche mit $s_{12} > 1$ dem DIN-Lastfall H II a bzw. $s_{12} < 1$ dem DIN-Lastfall H II b.

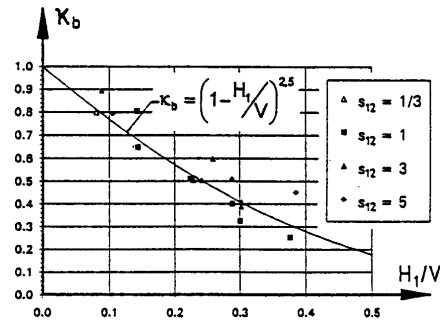


Bild 3 Ergebnisse der Versuchsserie D (Vertikallast mit seitenparalleler Horizontallast)

Die Versuche haben ergeben, daß sich der Lastbeiwert - einfacher als in DIN 4017 - mit

$$\kappa_b = \left(1 - \left| \frac{H_1}{V} \right| \right)^{2,5} \quad (18)$$

erfassen läßt. Das Seitenverhältnis (bzw. die Belastungsrichtung) hat offenbar einen weit geringeren Einfluß als bisher angenommen und kann bei der Formulierung von κ_b unberücksichtigt bleiben.

Die innerhalb der Serie E durchgeführten Versuche haben weiterhin ergeben, daß bei im Grundriß schräg (also nicht seitenparallel) angreifender Horizontallast der Beiwert κ_b analog dazu formuliert werden kann. Es gilt demnach stets:

$$\kappa_b = \left(1 - \frac{\sqrt{H_1^2 + H_2^2}}{V} \right)^{2,5} \quad (19)$$

Die Serie F beschäftigte sich mit Fundamenten, die durch eine mittige Vertikallast und ein torsionsartig angreifendes Moment M_T belastet wurden. Diese Lasteinwirkung wird in der Praxis wohl kaum auftreten, wird jedoch als Grenzfall für Last-

einwirkungen mit ausmittiger Horizontallast benötigt.

Da eine solche Lastkombination nach Kenntnis des Verfassers erstmalig experimentell untersucht wurde, sollen die Versuchsergebnisse und das Prinzip der Auswertung kurz dargestellt werden.

Der Einfluß des Torsionsmoments wird mit dem Beiwert κ_{Mb} erfaßt. Ebenso kann dort das Seitenverhältnis einen zusätzlichen Einfluß ausüben. Analog zum Formbeiwert folgt aus der Invarianzbedingung die Bestimmungsgleichung:

$$\kappa_{Mb}(M_T', s_{12}) = \kappa_{Mb}\left(M_T' \cdot s_{12}, \frac{1}{s_{12}}\right) \quad (20)$$

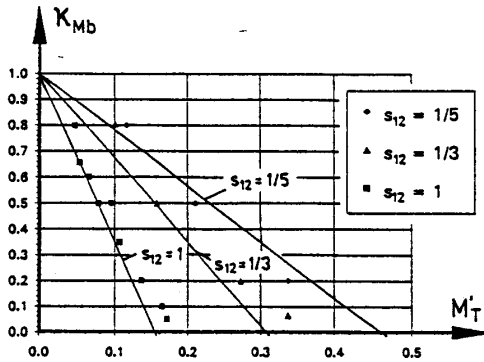


Bild 4 Versuche zur Bestimmung des Torsionsmomentenbeiwertes κ_{Mb} im Vergleich mit dem Ansatz nach (21)

Der Torsionsmomentenbeiwert nach (21) erfüllt die Bestimmungsgleichung (20) und paßt sich den Versuchsergebnissen vor allem im Bereich geringer, praktisch eher relevanter Torsionsmomente sehr gut an.

$$\kappa_{Mb} = 1 - \frac{13 \cdot s_{12}}{1 + s_{12}} \cdot \left| M_T' \right| \quad (21)$$

Kombination der Beiwerte

Lasteinwirkungen treten in der Regel als Kombinationen der Grundfälle Ausmitte, Lastneigung und Torsion auf. Ein kritischer Punkt bei der Festlegung von Berechnungsgleichungen besteht in der Frage, ob es statthaft ist, die Beiwerte, wie in (11) vorgegeben, multiplikativ zu verknüpfen.

Die experimentellen Untersuchungen aus den Serien G, H, J und K haben ergeben, daß die Berech-

nungsgleichung Ergebnisse liefert, die in der Regel zutreffend, eher auf der sicheren Seite liegend, in Extremsituationen jedoch auch unwirtschaftlich sein können (PERAU 1995).

Einbindetiefe und Kohäsion

Analog zum bisher behandelten Breitenterm der Gl. (11) können die Beiwerte für den zweiten Teil der Grundbruchgleichung bestimmt werden. Dies geschah im Rahmen des nunmehr abgeschlossenen Forschungsprogramms vornehmlich mittels der Versuche der DEGEBO (vgl. WEISS 1978) und von DE BEER (1970). Grundbruchversuche mit Torsionsmomenten bzw. ausmittigen Horizontallasten wurden bisher nicht durchgeführt. Eine Formulierung des Beiwertes κ_{Md} steht deshalb noch aus.

Der Kohäsionsterm der Grundbruchgleichung läßt sich durch Anwendung des Theorems der korrespondierenden Spannungszustände von CAQUOT formulieren. Dieses Theorem ermöglicht die Überführung eines statischen Randwertproblems an einem kohäsiven Boden in ein äquivalentes Problem an einem kohäsionslosen Boden. An dem so entstandenen Ersatzsystem wirken als Randbedingung zusätzliche Normalspannungen der Größe $c \cdot \cot \varphi$, die bei der Grundbruchberechnung als eine seitliche Auflast gedeutet werden können. Mit der Grundbruchgleichung läßt sich daraus der Tragfähigkeitsbeiwert N_c berechnen (vgl. z.B. PERAU 1995).

$$N_c = \frac{1}{\tan \varphi} (N_d - 1) \quad (22)$$

Bezeichnet man mit N_d das Produkt vom Tragfähigkeitsbeiwert N_{d0} und seinen Beiwerten, erübrigt sich eine gesonderte Festlegung von Beiwerten für den Kohäsionsterm. Der Ausdruck N_c nach (22) beinhaltet diese bereits. Die umständlichen Berechnungen von κ_c und v_c entfallen (vgl. PERAU 1995).

Da die zuvor erwähnte zusätzliche Normalspannung $c \cdot \cot \varphi$ auch in der Fundamentsohle anzusetzen ist, folgt aus der Anwendung des CAQUOTschen Theorems weiterhin, daß die Beiwerte, in die die Vertikallast V eingeht, zu modifizieren sind. Die Addition des Terms " $A' \cdot c \cdot \cot \varphi$ " ist bereits aus der DIN 4017 bekannt. Als vorteilhafter erweist sich jedoch eine Formulierung, die auf einen Faktor f_c nach (23) zurückgreift:

$$f_c = \left(1 + \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot c}{V \cdot \tan \varphi} \right)^{-1} \quad (23)$$

Durch diesen Faktor sind alle Beiwerte, welche die Größe V enthalten, nach der Art von (24) zu erweitern. Die Abweichung des Zwischenwerts f_c vom Wert 1 läßt seine Bedeutung für die Berechnung im Einzelfall relativ schnell erkennen.

$$\kappa_b = \left(1 - \frac{\sqrt{H_1^2 + H_2^2}}{V} \cdot f_c \right)^{2,5} \quad (24)$$

Tragfähigkeitsbeiwerte und zugehörige Beiwerte für Anfangszustände mit den Scherparametern $\varphi_u = 0$ und c_u konnten durch eine $\varphi \rightarrow 0$ -Analyse hergeleitet werden (vgl. PERAU 1995).

Sicherheitskonzept

Aus dem Bedürfnis, Gründungen so zu konstruieren, daß ihr Versagen mit einer hinreichenden Wahrscheinlichkeit auszuschließen ist, erwächst die Notwendigkeit, die zufälligen Abweichungen der Eingangsparameter von ihren charakteristischen Werten zu berücksichtigen. Durch ein Konzept mit Teilsicherheitsbeiwerten, wie es z.B. der EUROCODE vorsieht, kann das Sicherheitsbedürfnis angemessen erfüllt werden.

Starken Streuungen sind die Scherparameter φ und c sowie im allgemeinen die Lasteinwirkungen (H_1 , H_2 , V , M_1 , M_2 und M_T) ausgesetzt. Die Streuungen der Fundamentgeometrie (b_1 , b_2 und d) sowie der Wichten sind im Vergleich dazu vernachlässigbar (vgl. GENSKÉ, WALZ 1987).

Bei der Beaufschlagung der charakteristischen Eingangsparameter mit Teilsicherheitsbeiwerten ist zu beachten, daß die Scherparameter φ und c die Größe der Tragfähigkeit begünstigen; sie sind also stets abzumindern. Von den Lasteinwirkungen beeinflussen die Horizontallasten H_1 und H_2 sowie die Momente M_1 , M_2 und M_T die Konstruktion in ungünstiger Weise. Die entsprechenden Bemessungswerte entstehen deshalb durch eine Vergrößerung der charakteristischen Lasteinwirkung.

Problematischer ist die Wirkungsweise der Vertikallast V . Sie kann sich günstig oder ungünstig auf die Tragfähigkeit eines Fundamentes auswirken. Leicht variierend für verschiedene Lastkombinationen liegt der Umkehrpunkt bei etwa 50% ($\pm 10\%$) der Vertikallast, die allein wirkend zum Grundbruchversagen führt (vgl. PERAU 1995).

Diese Ergebnisse bestätigen die Untersuchungen von NOVA und MONTRASIO (1991) hinsichtlich ausmittiger und geneigter Lasten.

Vertikallasten, die größer als jene 40-60% sind, wirken ungünstig und müssen durch Teilsicherheitsbeiwerte erhöht werden. Umgekehrt wirken sich Vertikallasten, die kleiner als jene 40-60% sind, günstig aus und sind deshalb gegebenenfalls abzumindern. Diese Zusammenhänge können mit Hilfe von Interaktionsdiagrammen graphisch dargestellt werden, wie sie im Zusammenhang mit Grundbruchuntersuchungen z. B. von NOVA und MONTRASIO (1991) oder PERAU (1995) verwendet wurden.

Grundbruchberechnung

Die Grundbruchberechnung ist nun für alle vorhandenen Lastkombinationen wie folgt vorzunehmen:

Je nach Zusammenwirken einzelner Lasten sind nach Maßgabe des Sicherheitskonzepts die zugehörigen Bemessungslasten (H_1 , H_2 , V , M_1 , M_2 und M_T) mit entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten zu berechnen. Analog dazu sind die Bemessungswerte der Scherparameter (φ und c) festzulegen. Das sind entweder die effektiven Scherparameter φ' und c' oder $\varphi_u = 0$ und die Kohäsion des undrännierten Bodens c_u .

Nach Festlegung der Seitenlängen (b_1 und b_2) und der Einbindetiefe (d) sind vorab zu bestimmen:

Das Seitenverhältnis s_{12} nach (8), das bei Streifenfundamenten gleich Null ist. Die dimensionslosen Momente ε_1 , ε_2 nach (6a), (6b) und M_T' nach (7) sowie die resultierende Lastneigung H/V nach:

$$\frac{H}{V} = \sqrt{\left(\frac{H_1}{V} \right)^2 + \left(\frac{H_2}{V} \right)^2} \quad (25)$$

Die Eingangsgrößen unterliegen dabei gewissen Einschränkungen, die sich bekanntlich z.B. aus dem Gleitsicherheitsnachweis ergeben. Danach jedoch kann streng nach Tab. 2 vorgegangen werden.

Da bei $c \neq 0$ der Faktor f_c nicht 1 ist, wird unter Umständen eine Iteration erforderlich. Als Startwert sollte $f_c=1$ gewählt werden. Dieser Iterationsschritt bringt ein sehr konservatives Ergebnis. In Gl. (23) ist nun für V der nach Tab. 2 berechnete Grundbruchwiderstand R einzusetzen. Die erneute Berechnung von R nach Tab. 2 liefert einen Wert, der geringfügig auf der unsicheren Seite liegt, so

daß ein dritter Schritt erforderlich wird, dessen Ergebnis als eine sehr gute Näherung zu betrachten ist, die im allgemeinen leicht auf der sicheren Seite liegt.

Reibungswinkel $\varphi \neq 0$	$\varphi = 0$
Tragfähigkeitsbeiwerte $N_{d0} = e^{\pi \cdot \tan \varphi} \cdot \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$ $N_{b0} = (N_{d0} - 1) \cdot \tan \varphi$	$N_{c0} = 2 + \pi$
Formbeiwerte $v_b = \frac{1}{1 + s_{12}}$ $v_d = 1 + 1,6 \cdot \tan \varphi \cdot \frac{s_{12}}{1 + s_{12}^2}$	$v_c = 1 + 0,3 \cdot \frac{s_{12}}{1 + s_{12}^2}$
Ausmittenbeiwerte $\mu_b = (1 - 2,5 \cdot \varepsilon_1 \cdot f_c) \cdot (1 - 2,5 \cdot \varepsilon_2 \cdot f_c)$ $\mu_d = \left(1 - 3,6 \cdot \tan \varphi \cdot \varepsilon_1^2\right) \cdot \left(1 - 3,6 \cdot \tan \varphi \cdot \varepsilon_2^2\right)$	$\mu_c = 1 - \frac{0,7}{v_c} \cdot (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)$
Neigungsbeiwerte $\kappa_b = \left(1 - \frac{H}{V} \cdot f_c\right)^{2,5}$ $\kappa_d = \left(1 - 0,7 \cdot \frac{H}{V} \cdot f_c\right)^3$	
Torsionsmomentenbeiwerte $\kappa_{Mb} = 1 - \frac{13 \cdot s_{12}}{1 + s_{12}} \cdot \left M_T' \right \cdot f_c$ $\kappa_{Md} = ?$	
Tragfähigkeitsfaktoren $N_b = N_{b0} \cdot v_b \cdot \mu_b \cdot \kappa_b \cdot \kappa_{Mb}$ $N_d = N_{d0} \cdot v_d \cdot \mu_d \cdot \kappa_d \cdot \kappa_{Md}$ $N_c = (N_d - 1) / \tan \varphi$	$N_b = 0$ $N_d = 1$ $N_c = N_{c0} \cdot v_c \cdot \mu_c$
Grundbruchgleichung $R = b_1 \cdot b_2 \cdot (b_1 \cdot \gamma_2 \cdot N_b + d \cdot \gamma_1 \cdot N_d + c \cdot N_c)$	

Tab. 2 Berechnungsschema (PERAU 1995)

In dem vorgestellten Berechnungsschema fehlt zur Zeit nur noch eine Formulierung des Beiwerts κ_{Md} . Bis zum Abschluß einer experimentellen Untersuchung sollte hier die Gleichung für den Beiwert κ_{Mb} als Näherung herangezogen werden.

Literatur

- DE BEER, E. E. (1970): Experimental Determination of the Shape Factors and the Bearing Capacity Factors of Sand, *Géotechnique* 20, No. 4, S. 387 - 411, Correction: *Géotechnique* 21, S. 196, 1971
- BUISMAN, A. S. KEVERLING (1940): Grondmechanica, aus "KLOPPER, J.: Toegepaste Mechanica, Deel IV", Delft
- GENSKE, D. u. WALZ, B. (1987): Anwendung der probabilistischen Sicherheitstheorie auf Grundbruchberechnungen nach DIN 4017, *Geotechnik* 10, S. 53 - 66
- MALCHAREK, K. u. SMOLTZYK, U. (1981): Vergleich nationaler Richtlinien für die Berechnung von Fundamenten, *Mitteilungen des Baugrundinstituts Stuttgart*, Heft 16
- NOVA, R. u. MONTRASIO, L. (1991): Settlement of shallow foundations on sand, *Géotechnique* 41, No. 2., S. 243 - 256
- PERAU, E. W. (1995): Ein systematischer Ansatz zur Berechnung des Grundbruchwiderstands von Fundamenten, *Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Universität-GH Essen*, Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. W. RICHWIEN, Heft 19, Essen
- PREGL, O.: *Kontinuumsmechanik / Statische Aufgaben, Handbuch der Geotechnik, Universität für Bodenkultur Wien*, Band 5, (noch nicht veröffentlichtes Manuskript)
- VOLLENWEIDER, U. (1984): Zur Traglastberechnung von Flachgründungen, *Geotechnik* 7, Heft 4, S. 203 - 213
- WEISS, K. (1978): 50 Jahre Deutsche Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik (Degebo) 1928 - 1978, *Mitteilung der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik (Degebo) an der Technischen Universität Berlin*, Heft 33