

Perau, E. (1998):

Ein konsistentes Versagensmodell zur Standsicherheit flachgegründeter Fundamente. In: Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Heft 23, Hrsg.: Prof. Dr.-Ing W. Richwien, Essen, S. 95-109

Ein konsistentes Versagensmodell zum Standsicherheitsnachweis flachgegründeter Fundamente

Dr.-Ing. Eugen W. Perau

1 Anlaß

Die anhaltende Diskussion zur neuen Normung in der Geotechnik nach EUROCODE 7 und DIN 1054-100 bezüglich des probabilistischen Sicherheitskonzepts sowie die dazu veröffentlichten, teilweise kontroversen Beiträge (vgl. [6] [7] und die zugehörigen Leserbriefe) bieten Anlaß, einige gesicherte Kenntnisse herauszuarbeiten, sowie zu einigen ungeklärten Punkten Stellung zu beziehen.

Es wurde deutlich, daß - abgesehen von der Umsetzung des Sicherheitskonzepts - auch an den Versagensmodellen der Normung noch Forschungsbedarf besteht. Die Anwendung eines Sicherheitskonzepts auf ein defizitäres Versagensmodell hat aber naturgemäß Probleme zur Folge, deren Ursachen nicht unbedingt in einer Unzulänglichkeit des Sicherheitskonzepts liegen. Das Hauptaugenmerk ist deshalb zunächst auf die Entwicklung konsistenter Versagensmodelle zu richten.

Der vorliegende Aufsatz soll für die Standsicherheit von flachgegründeten Fundamenten einen Beitrag zur Entwicklung solcher konsistenter Versagensmodelle liefern, indem er zunächst eine grundlegende Formulierung des Problems vornimmt, auf die aufbauend, einige Hinweise und Ideen zu einer systematischeren Lösung folgen.

2 Einführung

Die einschlägige Normung, so z. B. der EUROCODE 7 fordert für flachgegründete Fundamente den Nachweis der ausreichenden Standsicherheit, d. h. ein Versagen der Gründung soll mit hinreichender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen sein. Es sind dabei sowohl Nachweise der inneren als auch der äußeren Standsicherheit zu führen. Die innere Standsicherheit betrifft die der Gründungskonstruktion selber (z.B. Betonquerschnitt, Bewehrung) und wird im folgenden nicht weiter behandelt. Die äußere Standsicherheitsuntersuchung betrifft den durch die Gründung beanspruchten Untergrund. Dabei sind nach EUROCODE 7 sowohl der Grenzzustand 1 (er entspricht dem Versagen des Untergrundes) als auch der Grenzzustand 2 (dieser entspricht der Sicherung der Gebrauchsfähigkeit des Bauwerks) zu untersuchen. Dieser Beitrag behandelt den Grenzzustand 1 (GZ 1).

Der Nachweis zum GZ 1 besteht aus verschiedenen Einzelnachweisen; so ist das Versagen des Untergrundes durch Grundbruch und Gleiten zu untersuchen. Ebenso spielen der Auftrieb sowie die zulässige Ausmitte eine Rolle, deren Relation zu den o. a. Versagensmechanismen noch zu klären ist.

Dieser Beitrag soll einen Einstieg in die Entwicklung eines konsistenten Versagensmodells liefern und dazu vor allem die Grundlagen festhalten und weiterentwickeln. Die Stärkung des Verständnisses vom Versagensmodell und die Relation von Belastung und Widerstand ist dabei ein wichtiges Anliegen. Einige qualitative, grundsätzliche Überlegungen zur Anwendung der Sicherheitstheorie schließen die Betrachtungen ab.

Mit Absicht wird auf das - an sich wertvolle - Berechnen von Beispielen verzichtet, da entsprechende Ergebnisse nur eingeschränkte Aussagekraft besitzen und Berechnungs-

verfahren in der Vergangenheit häufig nur danach beurteilt wurden, ob sie "genehme" Ergebnisse liefern.

Da es hier nur um ein Prinzip geht, erscheint eine Beschränkung der Überlegung auf Streifenfundamente, die auf homogenem Boden gegründet sind, sinnvoll, wobei die Erweiterbarkeit auf Einzelfundamente jedoch gesichert sein sollte. (vgl. hierzu [3],[5]).

3 System und Belastung

Wie allgemein bekannt ist, sind zur Beurteilung der Standsicherheit eines Streifenfundamentes folgende Parameter von entscheidender Bedeutung: Vom Boden gehen die Scherparameter ϕ' und c' sowie die Wichte γ ein; die Abmessung des Fundaments wird repräsentiert durch seine Breite b und die Einbindetiefe d . Die Rauigkeit der Fundamentsohle auf dem Boden wird durch den Sohlreibungswinkel δ beschrieben. Eine Belastung des Untergrundes durch das als starr angenommene Fundament wird durch ein Wertetripel $[V, H, M]$, also Vertikallast, Horizontallast und Moment dargestellt. Liegt das beschreibende Koordinatensystem in der Mitte des Fundamentes - wie es hier angenommen wird - so ergibt sich die Lastausmitte bekanntlich zu M/V .

Ein eventuell vorhandener Grundwasserstand wird durch die Verwendung der Wichte unter Auftrieb γ' für den Boden sowie durch eine ggf. zusätzlich wirkende negative Vertikallast berücksichtigt.

Zur Vereinfachung der Schreibweise soll eine Lasteinwirkung auf den Untergrund durch eine einspaltige Matrix L abgekürzt werden. Es soll also gelten:

$$L = \begin{bmatrix} V \\ H \\ M \end{bmatrix} \quad (1)$$

Die Beanspruchung des Untergrundes durch das Fundament besteht nicht nur in einer einzigen, unveränderlichen Lasteinwirkung L , sondern im allgemeinen zu verschiedenen Zeitpunkten aus jeweils anderen (hier als statisch angenommenen) Lasteinwirkungen. Die Gesamtheit dieser möglichen Belastungen $\{L\}$ besteht aus einem Satz an Lasteinwirkungen L_j mit $(j = 1, \dots, n)$, die jeweils aus einer gewichteten Summe von einzelnen Einflüssen L_i mit $(i = 1, \dots, m)$ (z.B. Eigengewicht, Verkehrslasten, Windlast, ...) bestehen.

Mit einer Verknüpfungs- oder Intensitätsmatrix Ψ , die in einer einfachen Version nur Werte „0“ und „1“ enthält, läßt sich das als Linearkombination formulieren [4]. Für alle Lasteinwirkungen L_j aus der Menge der möglichen Lastkombinationen $\{L\}$ gilt deshalb:

$$L_j = \sum_{i=1}^m (\Psi_{ji} \cdot L_i) \quad (2)$$

Die einzelnen Einflüsse sind in einer Lasteinwirkung auf den Untergrund entweder vertreten (dann ist $\Psi_{ji}=1$) oder nicht vertreten (dann ist $\Psi_{ji}=0$). Verkehrslasten z.B. können auch nur zu

einem gewissen Anteil wirken, dann gilt je nach Intensität für den zugehörigen Verknüpfungswert: $0 < \Psi_{ji} < 1$.

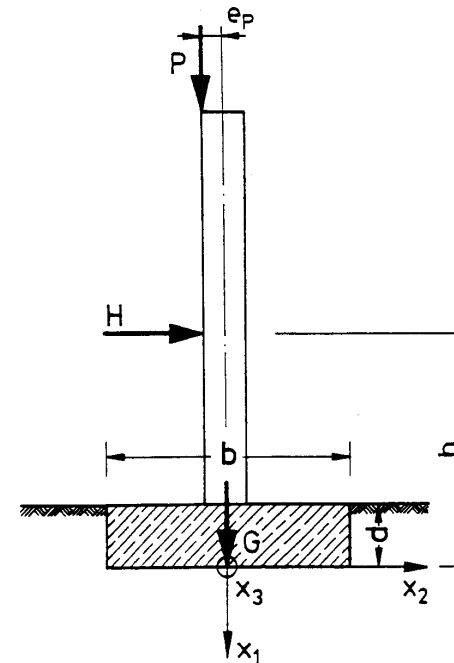


Abb. 1. Beispiel (System und Belastung)

Für das in Abb. 1 wiedergegebene Beispiel eines Fundamentes unter einer Wand, die außer durch Eigengewicht (G) noch durch eine exzentrische Verkehrslast (P) und eine ebenfalls nichtständige Horizontallast (H) belastet wird, bestehen die einzelnen Lasteinwirkungen in:

$$L_G = \begin{bmatrix} G \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad L_P = \begin{bmatrix} P \\ 0 \\ P \cdot e_p \end{bmatrix} \quad L_H = \begin{bmatrix} 0 \\ H \\ -H \cdot h \end{bmatrix} \quad (3a)-(3c)$$

Als Gesamtheit aller möglichen Lastfälle ergibt sich die in (4) wiedergegebene Linearkombination der Einwirkungen. Darin bedeutet $(0, \dots, 1)$, daß an der jeweiligen Stelle alle Werte von 0 bis 1 möglich sind.

$$\{L\} = 1 \cdot L_G + (0, \dots, 1) \cdot L_P + (0, \dots, 1) \cdot L_H \quad (4)$$

Strenggenommen bedeutet diese Gleichung, daß es unendlich viele mögliche Lastfälle gibt. Diese werden jedoch "eingerahmt" von Eckwerten, die aus den jeweiligen Eckwerten der Kombinationsfaktoren, den Werten 0 und 1 gebildet werden. Eine exponierte Stellung nehmen also die Lastkombinationen ein, die sich aus der Kombination mit den Randwerten 0 und 1 bilden. Analog zu (2) kann für dieses Beispiel also geschrieben werden:

$$\{L\} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L_G \\ L_P \\ L_H \end{bmatrix} \quad (5)$$

Damit ist die Verknüpfungsmatrix Y festgelegt. Sie besteht nur aus Werten 0 und 1.

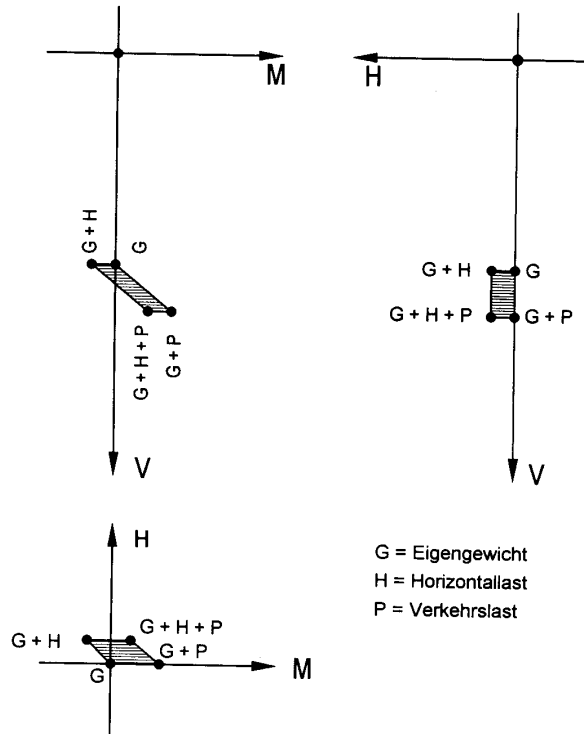


Abb. 2. Mögliche Lasteinwirkungen im L-Raum

Graphisch läßt sich die Gesamtheit aller möglichen Lasteinwirkungen im dreidimensionalen L-Raum darstellen. Für das Beispiel ergibt sich ein schräg im Raum liegendes Parallelogramm, das mittels einer Dreitafelprojektion in Abb. 2 dargestellt ist.

Die ausgezeichneten Eckpunkte ergeben sich direkt aus (5), der von ihnen eingeschlossene, schraffiert dargestellte Bereich stellt nach (4) die möglichen Lasteinwirkungen für das Fundament dar. Aus der Baukonstruktion mit ihrer Lastangabe folgt, daß die einwirkende Last auf den Untergrund nur innerhalb dieses schraffiert dargestellten Bereichs liegen kann.

Im allgemeinen können selbst bei Streifenfundamenten diese Bereiche komplizierter aussehen; so können sie zum Beispiel faltwerkartig oder auch im Gegensatz zum vorliegenden Beispiel volumenbehafet sein.

Zweifellos wäre eine derartige graphische Darstellung bei komplizierter belasteten Einzelfundamenten aufgrund ihrer sechs Dimensionen (3 Kräfte, 3 Momente) nicht mehr praktikabel, jedoch wird allein schon die Vorstellung von solchen Bereichen für die Nachweisführung als auch für die Bemessung des Fundamentes hilfreich sein.

4 Definition des Grenzzustands

Eine notwendige Bedingung für die Standsicherheit der gesamten, durch das Fundament gestützten Konstruktion ist, daß die Lastabtragung durch das Fundament in den Untergrund gewährleistet bleibt, d. h. der Untergrund nicht versagt.

Die Grundlage jeden Nachweises der Standsicherheit besteht im Vergleich der möglichen Belastungen $\{L\}$ mit den aufnehmbaren Belastungen.

Mit den zuvor bereits festgelegten Parametern läßt sich das Eintreten des Grenzzustandes bei einer Lasteinwirkung L durch eine implizite Funktion F dieser Parameter definieren.

$$F(\tan \varphi', c', \gamma, b, d, \delta, L) = 0 \quad (6)$$

Wenn nach (6) gilt: $F = 0$, versagt also der Untergrund. Gilt hingegen: $F > 0$, dann tritt ein Versagen *nicht* ein. Für alle möglichen Lasteinwirkungen $L_j \in \{L\}$ muß also gefordert werden, daß gilt:

$$F(\tan \varphi', c', \gamma, b, d, \delta, L_j) > 0 \quad (7)$$

Die einzige, jedoch nicht zu unterschätzende Schwierigkeit besteht darin, diese Funktion F , die von 9 Parametern abhängt und die analytische Beschreibung des Versagensmodells ist, zu finden.

Der in Rede stehende Vergleich zwischen Lasteinwirkung und Widerstand läßt sich also zunächst einmal *nicht* durch eine Gegenüberstellung zweier Zahlen, der Lasteinwirkung (S) und dem Widerstand (R) darstellen, wie vielfach praktiziert. Die Lasteinwirkung eines Fundaments besteht aus einem *Bereich* von möglichen Belastungen. Auch "der Widerstand"

existiert *nicht* als ein fester Wert R, sondern als ein Widerstandsbereich, denn jedes Fundament kann bekanntlich viele verschiedene Belastungen aufnehmen. Darüber hinaus besteht ein jeder Punkt sowohl des Belastungsbereichs als auch des Widerstandsbereichs in einem Belastungstrippel [V,H,M] und keineswegs in einer Zahl, wie das die Gegenüberstellung zweier einfacher Zahlen R und S suggeriert.

Da dennoch in den einschlägigen Normenwerken einfache Größenvergleiche von R und S vorkommen, ist anzunehmen, daß diese durchaus dienlich sein können. So besteht zum Beispiel beim Nachweis gegen Grundbruch die Gegenüberstellung von R und S nach EC 7 und DIN 4017-100 in einem Größenvergleich zweier Vertikalkräfte V. Beim Nachweis gegen Gleiten werden nach EC 7 und DIN 1054-100 jedoch zwei Horizontalkräfte H miteinander verglichen. Beide Vorgehensweisen sind historisch bedingt, und - jeweils für sich gesehen - vernünftig. Es darf jedoch nicht erwartet werden, daß sich zwei solche Nachweise ohne weiteres zu einem konsistenten Nachweis zusammenfassen lassen.

Die Entwicklung eines konsistenten Standsicherheitsnachweises bedingt - zumindest in einem ersten Schritt - eine Definition des Grenzzustands nach (6) und eine Nachweisführung nach (7). Graphisch läßt sich das als die Forderung interpretieren, daß der Bereich der möglichen Lasteinwirkungen innerhalb des zulässigen Bereichs, also des Bereichs der möglichen Widerstände des Untergrundes, liegt.

5 Versagensmodell

Neben den Versagensmechanismen Grundbruch und Gleiten sollte auch der Auftrieb, besser noch das Abheben eines Fundamentes im allgemeinen, sowie eine Beschränkung der Lastausmitte in einem konsistenten Versagensmodell beinhaltet sein. Die bereits bei der Lasteinwirkung verwendete graphische Darstellungsweise im 3-dimensionalen L-Raum wird dabei behilflich sein.

Das Versagensmodell sollte dabei Schritt für Schritt entwickelt werden, d.h. vom einfachen zum komplizierten Fall, letzterer den ersten wiederum beinhaltend. Anhand des Aufbaus der dreigliedrigen Grundbruchgleichung (vgl. DIN 4017) kann das Versagensmodell entwickelt werden.

5.1 Fundamente ohne Einbindetiefe auf kohäsionslosem Boden

Zwar wird das Streifenfundament ohne Einbindetiefe auf kohäsionslosem Boden in der Praxis - außer in Bauzuständen - kaum vorkommen, dennoch stellt es einen wichtigen Grundfall bei der Festlegung vom Versagensmodell dar.

Bei der Untersuchung der äußeren Standsicherheit des Fundaments sind das Nichteintreten von Grundbruch, Gleiten und Abheben nachzuweisen.

Ein bekanntes Versagensmodell zum Grundbruch, dem Versagen des Untergrundes also, das mit dem Einsinken des Fundaments in den Boden verbunden ist, wird z. B. in der DIN 4017 verwendet. Es basiert auf der klassischen dreigliedrigen Grundbruchgleichung von Terzaghi

und Buis man. Auch andere auf der gleichen Basis entwickelte Berechnungsverfahren, in denen einige Umständlichkeiten der DIN 4017 umgangen werden, können herangezogen werden (vgl. z.B. [3]). Als grundsätzliche Alternative, die dem Verständnis vom Versagensmodell dienlicher ist, bieten sich die sogenannten Interaktionsdiagramme an, wie sie z.B. von [2] oder [5] entwickelt wurden. Sie erlauben in direkter Weise eine Darstellung der Versagensbedingung im L-Raum, so daß der Widerstandsbereich des Fundaments mit dem Bereich der möglichen Lasteinwirkungen direkt verglichen werden kann.

Übereinstimmend ergibt sich aus den zuvor zitierten Versagensmodellen für den Widerstandsbereich im L-Raum ein football- bis zigarrenförmiges Gebilde, dessen Hauptachse - wie in Abb. 3 dargestellt - in Richtung der V-Achse gerichtet ist. Für die Lasteinwirkungen ist das Gebiet außerhalb des "Footballs" tabu - das eingeschlossene Gebiet wird zunächst für die Lasteinwirkungen zugelassen. Es wird jedoch weiter eingeschränkt durch die Gleituntersuchung.

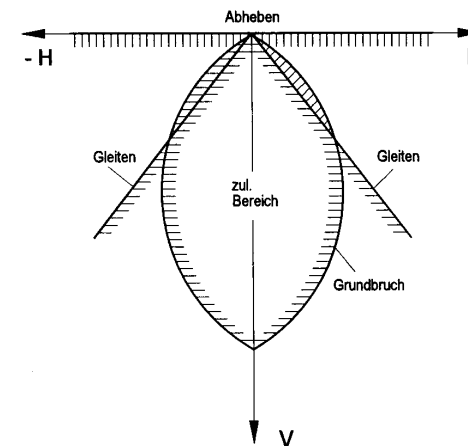


Abb. 3. Widerstandsbereich - Projektion in der V-H-Ebene

Versagen infolge Gleiten tritt bekanntlich auf, wenn die Lastneigung den Sohlschreibungswinkel übersteigt, das heißt, es dürfen nur Lasteinwirkungen zugelassen werden, für die gilt:

$$V \cdot \tan \delta - |H| > 0 \quad (8)$$

Die Betragstriche für H in (8) sind notwendig, da Gleiten zu beiden Seiten auftreten kann. Im Abb. 3 zeigt sich diese Restriktion durch zwei Grenzgeraden.

Gegen Abheben ist ein Fundament gesichert, wenn die Vertikallast positiv ist, d.h.:

$$V > 0 \quad (9)$$

Diese Forderung stellt keine weitere Einschränkung des für die Lasteinwirkung zulässigen Bereichs dar und erscheint uns eher trivial. Insgesamt verbleibt als zulässiger Bereich der, welcher aus der Grundbruchuntersuchung entstanden ist, vermindert um zwei schmale Segmente, die bei kleinen Sohlreibungswinkeln durch den möglichen Gleitmechanismus verboten sind. Ein konsistentes Versagensmodell besteht demzufolge in einem Grundbruchmodell, daß den Sohlreibungswinkel berücksichtigt (vgl. z.B.: [2]). Da z. B. die Grundbruchuntersuchung nach DIN 4017 den Sohlreibungswinkel als Parameter nicht in geeigneter Weise enthält, kann nicht erwartet werden, daß daraus ein konsistentes Versagensmodell entsteht.

Bisher spielte in diesen Überlegungen das Moment M keine Rolle. Aus den Grundbruchmodellen, welche größtenteils mit der Ausmitte der Vertikallast arbeiten, läßt sich eine Interaktionsbeziehung V - M herausarbeiten, die der zuvor behandelten V - H -Beziehung sehr ähnlich ist. Eine dem Gleiten verwandte Beziehung ist die der zulässigen Ausmitte. Die Beschränkung der Ausmitte für ein Streifenfundament mit der Seitenlänge b lautet analog zu (8):

$$V \cdot e_{zul} - |M| > 0 \quad (10)$$

Wie Abb. 4 zeigt, kann bei geeigneter Formulierung des konsistenten Versagensmodells eine solche Restriktion ebenso wie die Gleituntersuchung fallengelassen werden.

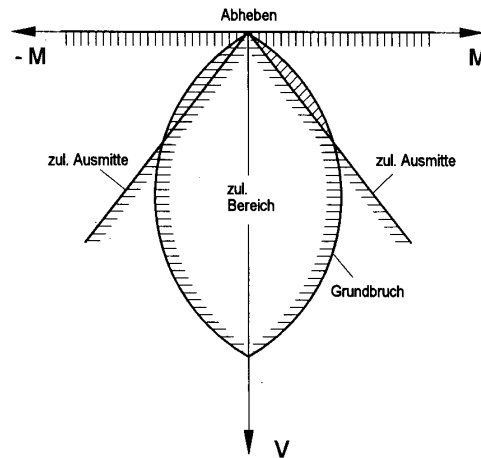


Abb. 4. Widerstandsbereich - Projektion in der V - M -Ebene

Die Formulierung eines konsistenten Versagensmodells für Fundamente ohne Einbindetiefe auf kohäsionslosem Boden sollte also kein großes Problem darstellen (vgl. z.B. [2]).

5.2 Fundamente mit Einbindetiefe auf kohäsionslosem Boden

Vergleichsweise anspruchsvoll ist die Entwicklung eines konsistenten Modells für Fundamente mit Einbindetiefe. Die klassische Grundbruchgleichung, wie sie z. B. der DIN 4017 zugrunde liegt, vernachlässigt bei der Berechnung des Grundbruchwiderstands den Scherwiderstand des Bodens seitlich des Fundamentes. Bei überwiegend vertikaler Belastung erscheint dieses Vorgehen durchaus gerechtfertigt, wenn auch Möglichkeiten zur Berücksichtigung dieses Scherwiderstands bestehen (vgl. [1], [3]). Bei stärker geneigter Belastung ergibt die Vernachlässigung des Scherwiderstands deutlich geringere Widerstände als tatsächlich vorhanden. In der DIN 4017 wurde versucht, diesen Mangel durch den Ansatz einer zusätzlichen Horizontallast in der Größe des Erdwiderstands zu kompensieren. Grundsätzlich stellt dieses Vorgehen eine Vermischung von Widerstand und Belastung dar und bietet naturgemäß nicht die Basis für ein konsistentes Versagensmodell.

Anhand einer Darstellung im L -Raum soll nun das prinzipielle Aussehen eines Versagensmodells untersucht werden.

Für Einbindetiefen d , die im Vergleich zur Fundamentbreite b gering sind, muß sich als Grenzfall ein Versagensmodell ergeben, das dem in den Abb. 3 und 4 dargestellten ähnelt. Bei steigender Einbindetiefe weitet sich der durch (7) definierte, zulässige Bereich jedoch in alle Richtungen auf. Die Größenordnung dieser Aufweitung soll nun anhand elementarer Überlegungen qualitativ beschrieben werden:

Für rein vertikal belastete Fundamente erfaßt bereits die klassische Grundbruchgleichung eine Aufweitung. Der Scherwiderstand oberhalb der Sohle kann z. B. durch eine Formel nach [1] ergänzend berücksichtigt werden. Damit wäre die Aufweitung auf der positiven V -Achse beschrieben. In negativer Richtung der V -Achse stellt der Widerstand gegen Abheben eine Grenzbedingung dar. Vernachlässigen wir die Seitenreibung beim Herausziehen des Fundamentes, so muß die resultierende Vertikallast - wie auch in (9) gefordert - positiv sein. Nach wie vor wird also die Versagensfunktion F den Ursprung des Koordinatensystems enthalten.

Über die Aufweitung von F in der $V=0$ -Ebene läßt sich ebenfalls ohne große Mühe etwas erfahren. $V=0$ bedeutet, daß auch das Eigengewicht G des Fundamentes durch eine aufwärts gerichtete Vertikalkraft kompensiert würde und die Fundamentsohle nicht mehr an der Lastabtragung beteiligt wäre. In diesem - theoretisch denkbaren - Grenzfall besteht ein möglicher Widerstand des Untergrundes in einer Kombination aus einer Horizontalkraft H und einem Moment M , die sich aus der Erdwiderstands- und Erddruckwirkung auf die Seitenflächen des Fundamentes ergeben. Ein Punkt der Versagensfläche besteht demzufolge in:

$$L_0 = \begin{bmatrix} V_0 \\ H_0 \\ M_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,500 \cdot \gamma \cdot d^2 \cdot (k_p - k_a) \\ 0,167 \cdot \gamma \cdot d^3 \cdot (k_p - k_a) \end{bmatrix} \quad (11)$$

Da es sich um einen Grenzzustand 1 handelt, wurde der Erdwiderstand hier nicht abgemindert.

Als Aussage über die Aufweitung von F bei Fundamenten mit Einbindetiefe läßt sich hieraus bereits schließen, daß sich in der $V=0$ Ebene ein Plateau befindet. Der Betrag dieser Aufweitung hängt in erster Linie vom Verhältnis der Einbindetiefe zur Fundamentbreite ab.

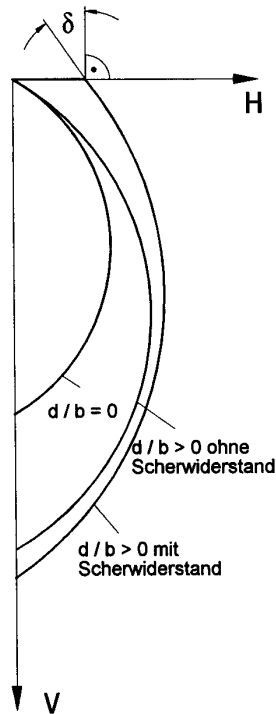


Abb. 5. Versagensfunktionen für $d/b=0$ und $d/b>0$

Die so berechnete Aufweitung der Funktion F in der $V=0$ -Ebene kann jedoch weder additiv noch multiplikativ auf andere Bereiche hochgerechnet werden - allenfalls lassen sich derzeit Bereiche angeben, in denen sich die Funktion F aufhalten wird.

Analog zu (8) erhält man aus dem Modell für das Gleitversagen mittels des Sohlreibungswinkels δ eine Information über die Neigung von F im Punkt L_0 nach (11).

In Abb. 5 werden die Verläufe der Versagensfunktion F in der V - H -Ebene qualitativ verglichen. Es gibt F für $d/b=0$ sowie für $d/b>0$ mit und ohne Berücksichtigung des

Scherwiderstands in der Einbindetiefezone wieder. Deutlich bemerkbar macht sich die Vernachlässigung des Scherwiderstands oberhalb der Sohle bei geringer Vertikallast.

5.3 Fundamente auf kohäsivem Boden

Ähnlich kompliziert wie die Einbindetiefe wirkt sich die Kohäsion des Bodens auf die Versagensfunktion F aus. Bei der Herleitung dieser Funktion F bedient man sich des Theorems der korrespondierenden Spannungszustände von Caquot, mit dessen Hilfe ein statisches Randwertproblem an einem kohäsiven Boden in ein äquivalentes Problem an einem kohäsionslosen Boden überführt wird (vgl. z. B. [3]). Die Anwendung dieses Theorems auf die statischen Randbedingungen hat zur Folge, daß sowohl neben als auch unter dem Fundament eine zusätzliche, gedachte Normalspannung der Größe $c'/\tan\phi'$ aufgebracht werden muß [3]. Zunächst bedeutet das, daß die Versagensfunktion in den negativen Bereich von V ausgeweitet würde und die Gründungskonstruktion sogar vertikalen Zug aufnehmen könnte. Da jedoch die Fundamentsohle keine Zugspannung aufnehmen kann und damit eine Schwachstelle im Untergrund darstellt, ist - um ein Abheben des Fundamentes auszuschließen - die Versagensfunktion F auf den positiven Bereich von V zu beschränken. Dabei entsteht ein Kurvenverlauf, der dem für $d/b>0$ mit Ansatz des Scherwiderstands aus Abb. 5 recht ähnlich ist.

6 Sicherheitstheorie

Unglücklicherweise sind einige der bereits eingangs zitierten, problembeschreibenden Parameter nicht vollkommen sicher bestimmbar; sie streuen in unterschiedlich weiten Bereichen. Für die stärker streuenden Parameter ϕ' , c' sowie die Lastkomponenten L wurden typische Verteilungskurven ermittelt, um die Auswirkung dieser Streuung auf die Versagenswahrscheinlichkeit rechnerisch zu erfassen. Für die Diagramme, wie sie in den Abb. 2 bis 5 wiedergegeben sind, hat das eine Umwandlung in wahrscheinliche Lagen von Belastungsbereich und Widerstandsbereich zur Folge. So entstehen unscharfe, wolkenartige Gebilde, die im einzelnen auszuwerten wären.

Da entsprechende Berechnungen für die alltäglichen Problemstellungen des Ingenieurs einen außerordentlichen und unangemessen hohen Aufwand darstellen, wurden die sogenannten "Teilsicherheitsbeiwerte" eingeführt, mit denen die charakteristischen Werte der stärker streuenden Parameter in ungünstiger Richtung zu modifizieren sind, so daß die sogenannten "Bemessungswerte" entstehen.

7 Anwendung der Teilsicherheitsbeiwerte

Da sich die Scherparameter des Bodens ϕ' und c' und der Sohlreibungswinkel δ stets günstig auf den Widerstand des Untergrundes auswirken und auf den Bereich der möglichen Lasten keinen Einfluß nehmen, ist es klar, daß ihre charakteristischen Werte abzumindern sind. Für den Widerstandsbereich des Untergrundes, wie er in den Abb. 3 bis 5 dargestellt wurde, hat das eine Einengung zur Folge.

Bei verschiedenen Lasteinwirkungen ist es nicht direkt ersichtlich, ob diese günstig oder ungünstig wirken. Deshalb sind derartige charakteristische Lasteinwirkungen im allgemeinen mit Teilsicherheitsbeiwerten γ_{inf} (<1) bzw. γ_{sup} (>1) zu multiplizieren. Für das oben angeführte Beispiel bedeutet das eine Modifikation der zugehörigen Gleichung (4) derart, daß die geringstmögliche Intensität einer Lasteinwirkung mit γ_{inf} und die größtmögliche Intensität mit γ_{sup} zu multiplizieren ist. Die Unschärfe der Lastangabe wird also durch eine Ausdehnung des möglichen Lastbereichs ersetzt. Aus (4) ergibt sich damit für den Bereich der Bemessungslasteinwirkungen:

$$\{L\} = (1 \cdot \gamma_{inf,G}, \dots, 1 \cdot \gamma_{sup,G}) \cdot L_G + (0 \cdot \gamma_{inf,P}, \dots, 1 \cdot \gamma_{sup,P}) \cdot L_P + (0 \cdot \gamma_{inf,H}, \dots, 1 \cdot \gamma_{sup,H}) \cdot L_H \quad (12)$$

Mit einer einfachen Erweiterung des Verständnisses von Teilsicherheitsbeiwerte und der Definition daß alle γ_{inf} für nicht ständige Lasteinwirkungen (wie z. B. Verkehrslasten) stets gleich 0 sind, läßt sich schreiben:

$$\{L\} = (\gamma_{inf,G}, \dots, \gamma_{sup,G}) \cdot L_G + (\gamma_{inf,P}, \dots, \gamma_{sup,P}) \cdot L_P + (\gamma_{inf,H}, \dots, \gamma_{sup,H}) \cdot L_H \quad (13)$$

Analog zu (2) und (5) wird eine Matrix \mathbf{G} definiert, die nur die Eckwerte von (13), also Teilsicherheitsbeiwerte als Kombinationsfaktoren enthält. Die Gesamtheit der Lasteinwirkungen für die Bemessung $\{L^d\}$ ist durch die einzelnen bemessungsrelevanten Lasteinwirkungen L_j^d gegeben. Diese sind wie folgt definiert (vgl. [4]):

$$L_j^d = \sum_{i=1}^m (\Gamma_{ji} \cdot L_i) \quad (14)$$

Die Matrizen \mathbf{Y} und \mathbf{G} sind sich in ihrer Art sehr ähnlich. Die Anzahl der Spalten ist gleich, im allgemeinen hat \mathbf{G} doppelt so viele Zeilen wie \mathbf{Y} ; dort wo \mathbf{Y} den Wert 0 besitzt, besitzt ihn \mathbf{G} auch; dort wo in \mathbf{Y} der Wert 1 steht, stehen in \mathbf{G} die bereits bekannten Teilsicherheitsbeiwerte γ_{inf} bzw. γ_{sup} , deren Werte nicht weit von 1 entfernt sind. Genau wie die charakteristische Lasteinwirkung $\{L\}$ in (4) besteht die Bemessungslasteinwirkung $\{L^d\}$ in (13) aus einem Polyeder im L -Raum. Der Nachweis der Standsicherheit bedeutet nun, zu beweisen, daß dieser Polyeder innerhalb des Bereichs für den Bemessungswiderstand liegt.

Analytisch heißt das, daß für alle möglichen Lasteinwirkungen $L_j^d \in \{L^d\}$ gefordert werden muß:

$$F\left(\frac{\tan\phi^l}{\gamma_\phi}, \frac{c^l}{\gamma_c}, \gamma, b, d, \frac{\delta}{\gamma_\phi}, L_j^d\right) > 0 \quad (15)$$

Da das gleichzeitige Auftreten verschiedener Verkehrslasten mit einer gewissen Unwahrscheinlichkeit verbunden ist, sind nach EC 1, Tabelle 9.3 die einzelnen Lasteinflüsse abzumindern. Dieses kann als eine Modifikation der Teilsicherheitsbeiwerte verstanden werden. Keinesfalls darf eine solche Abminderung innerhalb einer statischen Betrachtungsweise nach (2) vorgenommen werden.

Damit ist das Verfahren "Stand sicherheitsnachweis (GZ 1)" mit Teilsicherheitsbeiwerten für flachgegründete Fundamente allgemein beschrieben und rational erklärt.

8 Schlußfolgerungen

Aus den vorgebrachten Überlegungen lassen sich einige Schlüsse ziehen, deren Bedeutung für eine systematische Nachweisführung mit dem neuen Sicherheitskonzept nicht unterschätzt werden sollten:

- Die Aufstellung eines konsistenten Versagensmodells für flachgegründete Fundamente ist grundsätzlich möglich, im Detail ist jedoch einiges an Arbeit zu erwarten.
- Die Anwendung dieses konsistenten Versagensmodells wird voraussichtlich weniger aufwendig sein als die Arbeit mit den gängigen einzelnen Versagensmodellen.
- Für das Verständnis vom Versagensmodell des Untergrundes und vom Nachweisverfahren sind die aufgezeigten Diagramme im L -Raum sehr hilfreich - für die tatsächliche Nachweisführung sind diese jedoch aufgrund ihrer Mehrdimensionalität praktisch nicht nutzbar. Unterstützen können die Diagramme ebenfalls bei der Bemessung von Fundamenten; so läßt sich aus ihnen z. B. die Wirkungsweise des Eigengewichts - günstig oder ungünstig - relativ leicht beurteilen. Vor allem bei Erweiterung der Aufgabe einer vorhandenen Gründung, wo es eventuell darauf ankommt, die Gründungskonstruktionen zu optimieren, stellen Diagramme eine wesentliche Bemessungshilfe dar.
- Da die Versagensfunktion F in jedem Falle konvex sein wird, genügt es für den Stand sicherheitsnachweis, nur die Eckwerte, das heißt die extremen Lastintensitäten zu betrachten. Liegen die Eckpunkte der möglichen Lasteinwirkungen innerhalb des Widerstandsbereichs, so liegen nämlich auch alle Zwischenpunkte der möglichen Lasteinwirkungen innerhalb des Widerstandsbereichs. Ob das für alle genormten Standsicherheitsprobleme in der Geotechnik gilt, müßte noch untersucht werden!
- Das Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte ist - anders als das alte Sicherheitskonzept - prinzipiell in der Lage, das Bedürfnis nach Sicherheit zu erfüllen. Der höhere Aufwand erscheint vertretbar.
- Die Unterscheidung verschiedener Lastfälle, wie sie DIN 1054-100 im Gegensatz zum EUROCODE 7 vorsieht, ist tatsächlich problematisch (vgl. auch [6]), suggerieren die verschiedenen Teilsicherheitsbeiwerte für die Scherparameter doch unterschiedliche Widerstände des Untergrundes, obwohl die Unterschiede in den Unsicherheiten eindeutig aus der Belastung resultieren.

9 Literatur

- [1] Brinch Hansen, J.: A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity. Akademiet for de Tekniske Videnskaber. Geoteknisk Institut, Bulletin No. 28, Copenhagen, S. 5-11
- [2] Nova, R. & Montrasio, L.: Settlement of shallow foundations on sand, Géotechnique 41 (1991), S. 243-256
- [3] Perau, E. W.: Ein systematischer Ansatz zur Berechnung des Grundbruchwiderstands von Fundamenten. Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik Nr. 19, Hrsg. Prof. Dr.-Ing. W. Richwien, Universität-Gesamthochschule Essen, 1995
- [4] Perau, E. W.: Interaktionsdiagramme zum Nachweis der Grundbruchsicherheit. 24. Baugrundtagung, Spezialsitzung "Forum für junge Geotechniker", Berlin, 1996
- [5] Perau, E. W.: Proceedings of the XIV. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, 1997, Vol. 2, p. 1193-1196; Rotterdam, 1997
- [6] Smolczyk, U.: Hat die europäische Normung in der deutschen Geotechnik eine Chance? Bautechnik Heft 3 (1996), S. 134-146
- [7] v. Wolffersdorf, P. A.: Nachweise für eine Winkelstützmauer nach dem neuen Sicherheitskonzept. Bautechnik Heft 3 (1996), S. 147-161