

Prof. Dr.-Ing. habil. Dietrich Franke
Technische Universität Dresden

**DIN 4085 - TGL 11464/03,04 und neuere Erkenntnisse
der Erddruckforschung**

Obwohl schon seit langer Zeit Erddruckkräfte als Belastung oder Stützkräfte bei der Berechnung von Bauwerken angesetzt werden, wurden erst vor etwa 10 Jahren in den beiden deutschen Staaten Regeln zum Erddruckansatz eingeführt. Über ihre Notwendigkeit gab es unterschiedliche Ansichten. Inzwischen werden sie aber doch mehrheitlich als nützliches Hilfsmittel des planenden Ingenieurs verstanden.

1979/1980 erschienen die Blätter 03 und 04 der TGL 11464 in der DDR und 1982 die DIN 4085 in der Bundesrepublik Deutschland. Schon beim Erscheinen der Vorschriften waren den Bearbeitern bestimmte Unzulänglichkeiten für den Anwender deutlich, die zum großen Teil auf Lücken beim vorliegenden Kenntnisstand hинwiesen. Diese Tatsache führte zu gezielten wissenschaftlichen Untersuchungen an der TU Dresden, deren Ergebnisse Grundlagen zur notwendigen Verbesserung des Vorschriftenwerkes lieferten. Kurz vor der Vereinigung der deutschen Staaten war die Überarbeitung der beiden TGL-Blätter abgeschlossen worden.

Die Bemühungen, eine verbesserte Fassung der DIN 4085 vorzulegen, scheitern nun an der Festlegung, europäischen Vorschriften den Vorrang einzuräumen und nationalen Regeln nur noch den Rang von Empfehlungen zuzubilligen.

Der für alle deutschen Ingenieure etwas schmerzliche Abschied von den bewährten und vor allen Dingen auch gewohnten DIN-Vorschriften führt zwangsläufig zu einem Neuanfang, der die erfreuliche Chance in sich birgt, durch die Schaffung nunmehr gemeinsamer Empfehlungen, die Folgen der Teilung Deutschlands auf diesem Gebiet zu überwinden.

Der Arbeitskreis 1 (Berechnungsverfahren) der DGEG hat beschlossen, eine Empfehlung zum Ansatz des Erddrucks zu bearbeiten. Die bereits genannten neueren Untersuchungsergebnisse werden dabei sinnvolle Berücksichtigung finden.

Berechnung des passiven Erddrucks

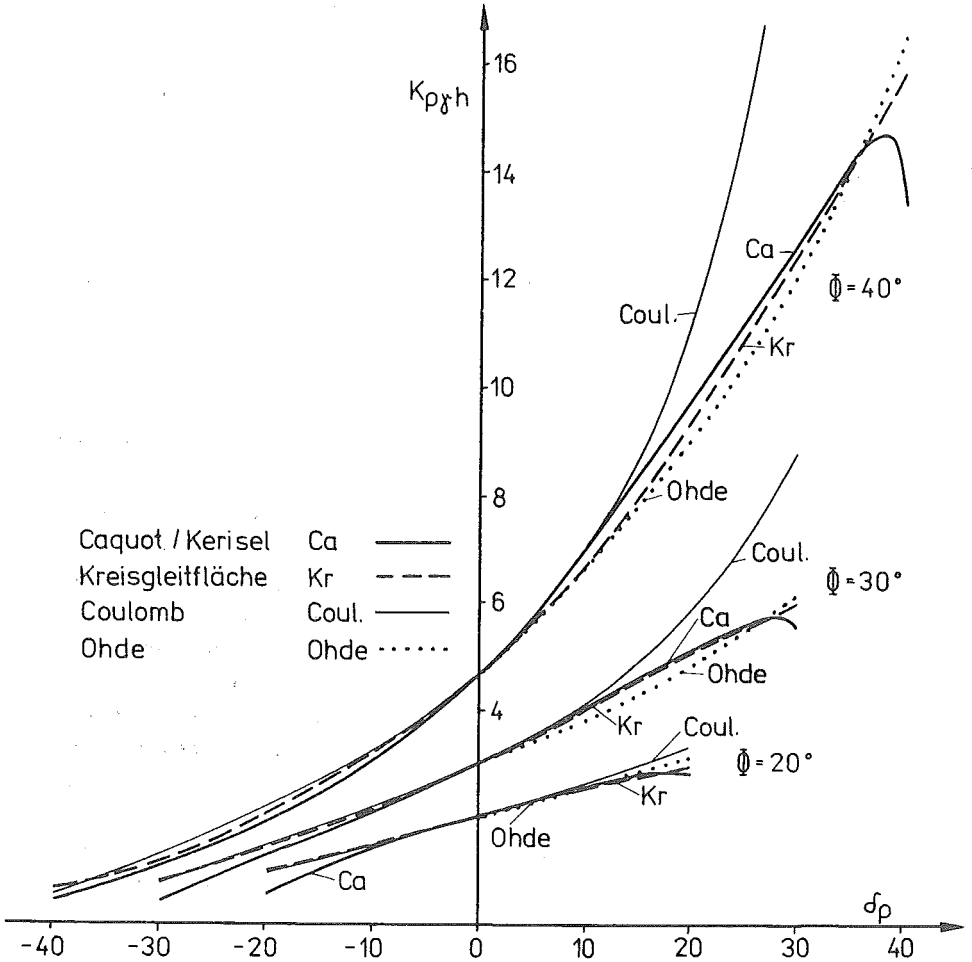


Bild 1. K_{pyh} -Werte nach verschiedenen Autoren

In Bild 1 sind die Kurven der Funktionen K_{pyh} für verschiedene Verfahren dargestellt. Dabei wird die Vorzeichendefinition von Ohde für δ_p verwendet, indem der üblicherweise auftretenden Richtung von E_p das positive Vorzeichen zugeordnet wird.

Das Bild zeigt, daß der passive Erddruck in der Regel nicht mit ebenen Gleitflächen berechnet werden kann, da bei $\delta_p > \phi/3$ deut-

lich größere Erddruckbeiwerte erhalten werden als mit Verfahren, die gekrümmte Gleitflächen verwenden und demzufolge genauere Lösungen des Variationsproblems ermöglichen.

Es zeigt auch, daß die Verfahren von Caquot/Kerisel, Ohde und ein Verfahren mit kreiszylindrischer Gleitfläche nahe beieinanderliegende Ergebnisse liefern und demzufolge für praktische Zwecke als gleichwertig anzusehen sind.

Die gute Übereinstimmung dieser drei Verfahren zumindest für $\delta_p < 0.9\phi$ - trotz verschiedener Vorgehensweisen - kann im bestimmten Umfang auch als Hinweis auf die Verlässlichkeit dieser Verfahren gedeutet werden.

Größere Abweichungen der $K_{p\gamma h}$ - Werte nach diesen Verfahren entstehen erst bei der Annäherung $\delta_p \rightarrow \phi$, siehe z. B. Caquot/Kerisel. Es wird deshalb empfohlen, die Anwendung der $K_{p\gamma h}$ - Werte grundsätzlich auf den Bereich $\delta_p < 0.9\phi$ zu begrenzen. Die dadurch entstehende Einschränkung für die praktische Anwendung ist unbedeutend.

Die Anwendung des Verfahrens von Ohde ist recht umständlich. Es ist deshalb für eine verbreitete Anwendung wenig geeignet.

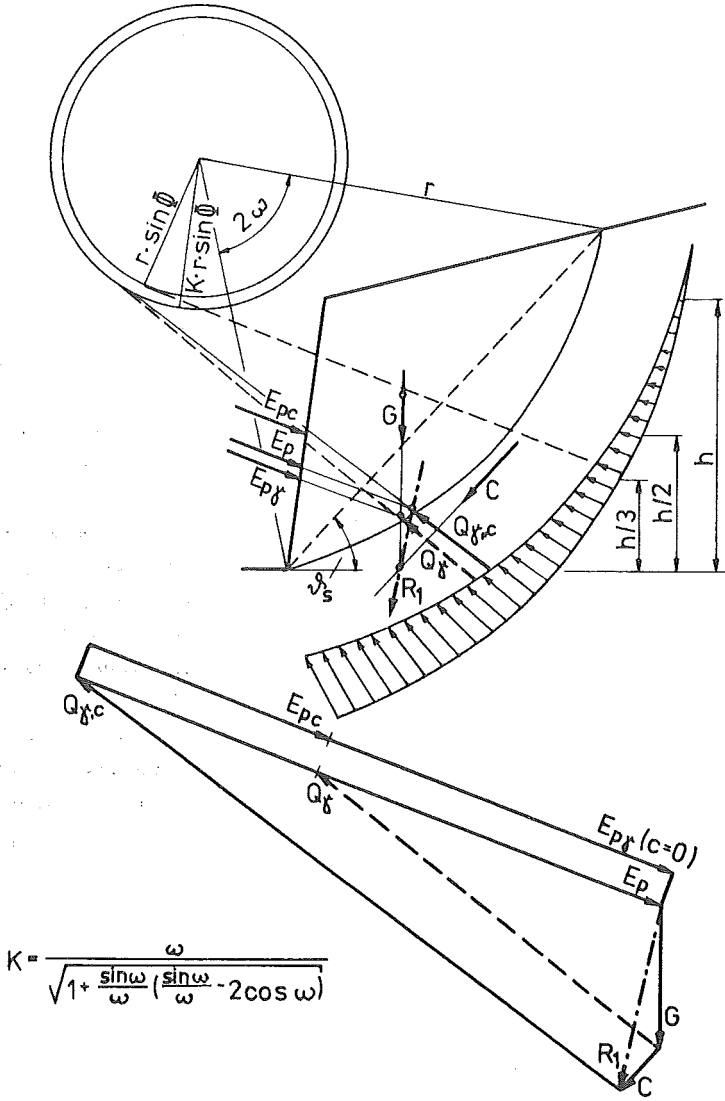
Das Verfahren von Caquot/Kerisel besitzt diesen Nachteil nicht, ist aber nur dann anwendbar, wenn der Erddruck mit Hilfe von Beiwerten berechnet werden kann. Die Berücksichtigung des Kohäsionseinflusses ist nur unbefriedigend möglich.

Das Verfahren mit kreiszylindrischen Gleitflächen ist dagegen zur Untersuchung konkreter Bruchkörpermodelle und auch zur Berechnung von Erddruckbeiwerten geeignet. Dabei können die Einflüsse aus Eigenlast und Kohäsion des Bodens gleichzeitig erfaßt werden.

Das hier zum Vergleich herangezogenen Verfahren mit kreiszylindrischer Gleitfläche wurde an der TU Dresden entwickelt und wird anschließend näher vorgestellt.

Berechnung des passiven Erddrucks mit kreiszylindrischen Gleitflächen

In allen Fällen, in denen die Coulombsche Theorie bei der Berechnung der Grenzwerte des Erddrucks versagt, muß der Ingenieur auf ein anderes Verfahren zurückgreifen können, das auch bei derartigen Aufgabenstellungen ein hinreichend zuverlässiges Ergebnis ermöglicht.



$$K = \frac{\omega}{\sqrt{1 + \frac{\sin \omega}{\omega} (\frac{\sin \omega}{\omega} - 2 \cos \omega)}}$$

Bild 2. Ermittlung der passiven Erddruckkräfte mit kreiszylindrischen Gleitflächen [1,5]

Dieses Verfahren sollte in allen praktisch vorkommenden Fällen, wie z.B. beim Auftreten von geschichtetem Boden, nichtebener Wand, nichtebener Geländeoberfläche, Kohäsion, Oberflächenlasten usw. anwendbar und trotzdem ähnlich anschaulich wie das Verfahren von Coulomb sein.

Bezüglich der geometrischen Eigenschaften liegt die Wahl der kreisszyllindrischen Gleitfläche nahe. Entsprechende Vergleichsuntersuchungen [1] zeigten, daß eine gute Übereinstimmung mit den als zuverlässig anzusehenden Verfahren erreicht wird (s.[9] und Bild 1), wenn die Spannungsverteilung in der Gleitfläche berücksichtigt wird.

Das Verfahren reagiert unempfindlich auf Veränderungen der Art der Spannungsverteilung. Es genügt deshalb, eine plausible Verteilung anzunehmen. Die Annahme, daß die Spannungen in einem Punkt konzentriert sind, liefert aber unbefriedigende Ergebnisse, wie z.B. überhängende Gleitflächen.

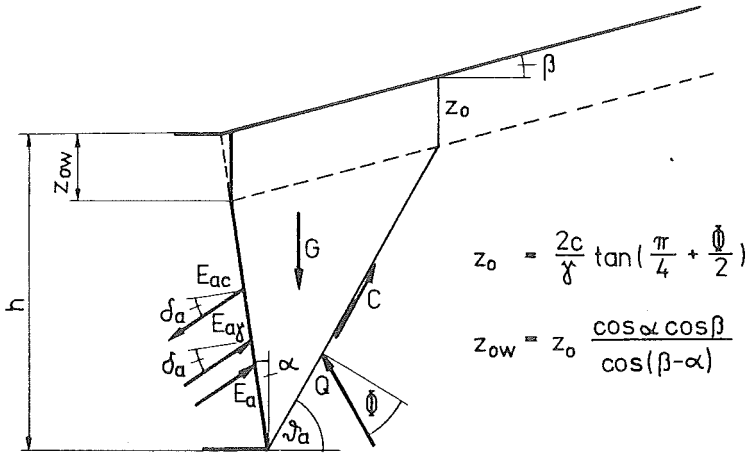
Bild 2 zeigt die Anwendung des Verfahrens bei der Ermittlung der Erddruckkraft im passiven Zustand. Es läßt sich sinngemäß auch für den aktiven Zustand einsetzen [5].

Berücksichtigung der Kohäsion bei der Berechnung der Grenzwerte der Erddruckkraft.

Der Einfluß der Kohäsion auf den Erddruck und damit auch auf Sicherheit und Wirtschaftlichkeit ist erheblich. Er sollte deshalb in angemessener Weise berücksichtigt werden.

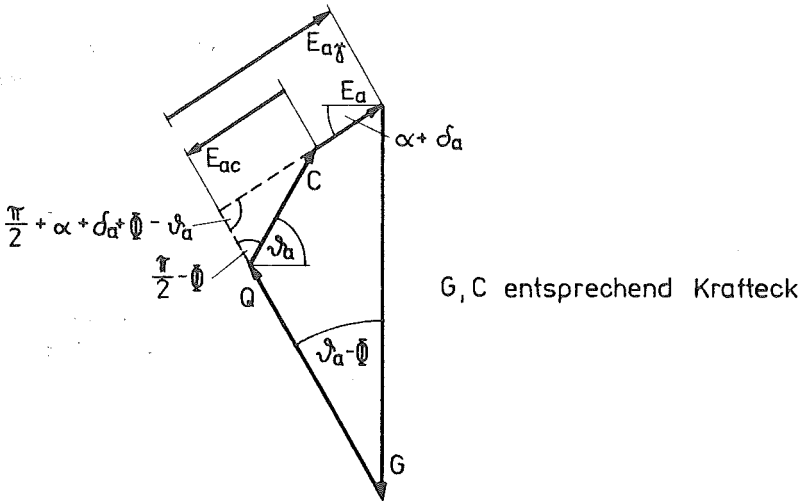
Bei den gegenwärtig üblichen Berechnungsverfahren werden die Anteile der Erddruckkraft infolge Eigenlast und Kohäsion des Bodens getrennt und unabhängig voneinander ermittelt. Der Eigenlastanteil wird wie bei einem kohäsionslosen Boden, der Kohäsionsanteil hingegen wie bei einem gewichtslosen Boden berechnet. Die Überlagerung beider Anteile ist nur im Rankineschen Sonderfall ($\alpha = \beta = \delta = 0$) korrekt. In allen anderen Fällen entstehen durch die Überlagerung Fehler, die sich nur vermeiden lassen, wenn beide Einflüsse bei der Gleichgewichtsbetrachtung in ein und demselben Lastfall zum Ansatz kommen [4,5].

Auf diese Weise ergeben sich für den aktiven Erddruck nach Bild 3 die nachfolgend angegebenen Beziehungen.



$$z_0 = \frac{2c}{\gamma} \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)$$

$$z_{ow} = z_0 \frac{\cos \alpha \cos \beta}{\cos(\beta - \alpha)}$$



G, C entsprechend Kräfteck

$$E_a = \frac{G \sin(\psi_a - \phi) - C \cos \phi}{\cos(\phi + \delta_a + \alpha - \psi_a)}$$

Bild 3. Berechnung der aktiven Erddruckkraft bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Einflüsse aus Eigenlast und Kohäsion am Beispiel der ebenen Gleitfläche

Hilfswerte:

$$A = \sin(\beta + \delta_a) \quad (1)$$

$$B = \sin(\phi + \alpha) \sin(\phi + \delta_a + \alpha - \beta) + F \cos(\phi + \delta_a + \alpha + \beta) \quad (2)$$

$$D = \cos(\phi + \alpha) \sin(\phi + \delta_a + \alpha - \beta) + F \cos(\phi + \delta_a + \alpha + \beta) \quad (3)$$

$$F = \sin(\phi - \alpha) + \frac{2}{\frac{\gamma h}{2c \cos \alpha \cos \phi} + \frac{\cos \beta}{(1 - \sin \phi) \cos(\beta - \alpha)}} \quad (4)$$

$$H = \frac{4 \cos \phi \cos(\alpha + \delta_a)}{\frac{\gamma h K_{ayh}}{c}} \left[\frac{\cos(\beta - \alpha)}{\cos \alpha} - \frac{2c \cos \beta \cos \phi}{\gamma h (1 - \sin \phi)} \right] \quad (5)$$

$$I = 2 \sin(\theta_a - \beta) \cos(\phi + \delta_a + \alpha - \theta_a) \quad (6)$$

Den Gleitflächenwinkel erhält man aus der Gleichung

$$\tan \theta_a = \frac{B}{A + D} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{D^2 - A^2}{B^2}} \right] \quad (7)$$

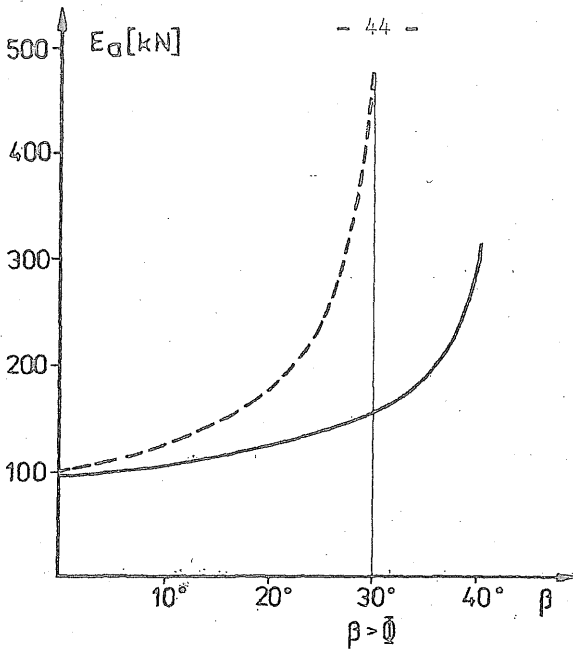
und die Erddruckbeiwerte zu

$$K_{ayh} = \left[\left[\cos \frac{(\beta - \alpha)}{\cos \alpha} \right]^2 - \left[\frac{2c \cos \beta \cos \phi}{\gamma h (1 - \sin \phi)} \right]^2 \right] \frac{\cot(\theta_a - \beta) - \tan(\beta - \alpha)}{\cot(\theta_a - \phi) + \tan(\alpha + \delta_a)} \quad (8)$$

$$K_{ach} = \frac{\gamma h}{c} K_{ayh} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{H}{I}} \right] \quad (9)$$

In Bild 4 wird der durch die übliche Superposition der Erddruckanteile entstehende Fehler in Abhängigkeit von der Geländeneigung für zwei willkürlich gewählte Beispiele veranschaulicht. Durch die gleichzeitige Berücksichtigung der Einflüsse aus Eigenlast und Kohäsion des Bodens ist der aktive Erddruck auch bei Geländeneigungen $\beta > \phi$ bis zu einem Größtwert von β ($\max \beta$) berechenbar.

Bild 5 zeigt den Grenzgleichgewichtszustand bei $\beta = \max \beta$ am Mohrschen Kreis. Die größtmögliche Geländeneigung ist jeweils an eine bestimmte Wandhöhe gebunden.



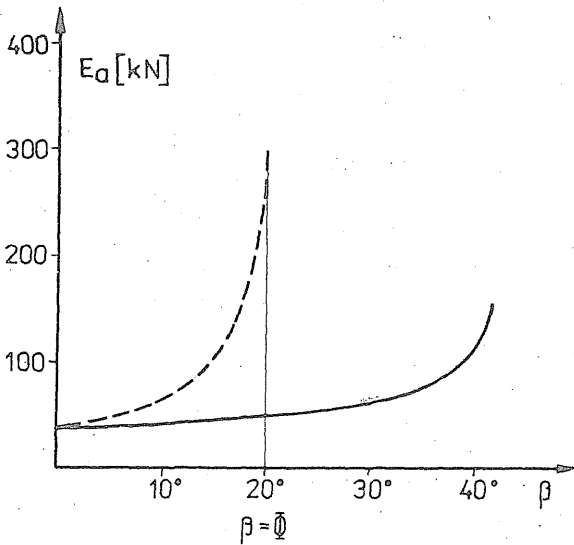
Beispiel 1:

$$\varnothing = 30^\circ \quad c = 20 \text{ kN/m}^2$$

$$\varphi_a = 20^\circ$$

$$\gamma = \rho \cdot g = 18 \text{ kN/m}^3$$

$$\frac{\gamma h}{c} = 9$$



Beispiel 2:

$$\varnothing = 20^\circ \quad c = 50 \text{ kN/m}^2$$

$$\varphi_a = 10^\circ$$

$$\gamma = \rho \cdot g = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$\frac{\gamma h}{c} = 4$$

Bild 4. Vergleich auf verschiedener Weise ermittelter Erddruckkräfte $E_a(\gamma, c)$

----- mittelbare Berechnung von $E_a(\gamma, c)$ durch Superposition von E_{ay} und E_{ac} (DIN 4085, TGL 11464/03)

_____ unmittelbare Berechnung von $E_a(\gamma, c)$

Mit zunehmender Wandhöhe wird $\max\beta$ kleiner. Bei h gegen Unendlich geht $\max\beta$ gegen ϕ . Umgekehrt läßt sich bei gegebener Geländeneigung $\phi < \beta < \max\beta$ eine größtmögliche Wandhöhe $h = \max\beta$ angeben. Bei $\beta < \phi$ ist h nicht begrenzt.

Berechnung des aktiven Erddrucks bei quergeneigtem Gelände

Schon vor Jahren wurde von Rendulic [13] nachgewiesen, daß der aktive Erddruck bei quergeneigtem Gelände, wie z.B. bei Querflügelmauern, unter Beachtung des dreiachsigen Spannungszustands berechnet werden muß. In Anlehnung an das grafische Verfahren von Rendulic wird in [2] ein analytisches Verfahren angegeben. Danach wird der aktive Erddruck wie im ebenen Fall berechnet und mit einem Faktor erhöht, der von der Böschungsneigung und den physikalischen Eigenschaften des Bodens abhängt.

Der Vergrößerungsfaktor ist der Quotient aus der kleinen Hauptspannung im aktiven Grenzgleichgewichtszustand bei geneigtem Gelände ($\beta > 0$) und der kleinen Hauptspannung im aktiven Grenzgleichgewichtszustand bei horizontalem Gelände ($\beta = 0$).

Der Sachverhalt ist in Bild 6 am Mohrschen Kreis dargestellt. Im Sonderfall $c = 0$ läßt sich zur Berechnung des Vergrößerungsfaktors eine geschlossene Beziehung angeben.

$$v = \frac{\cos^2\beta}{1 - \sin\phi} [1 - \sqrt{1 - \cos^2\phi(1 + \tan^2\beta)}] \quad (10)$$

Bei $c > 0$ ist ein iteratives Vorgehen bei der Berechnung dieser Faktoren notwendig.

Erdruhedruck

Bei der Berechnung des Erdruhedrucks in geneigtem Gelände muß unterschieden werden, ob es sich um eine vertikale Schnittfläche durch den Halbraum oder um eine unnachgiebige Bauwerkswand handelt.

Unter Halbraumbedingungen können Schubverformungen ungehindert eintreten, während in der Umgebung unnachgiebiger Wände Schubverformungen behindert werden können.

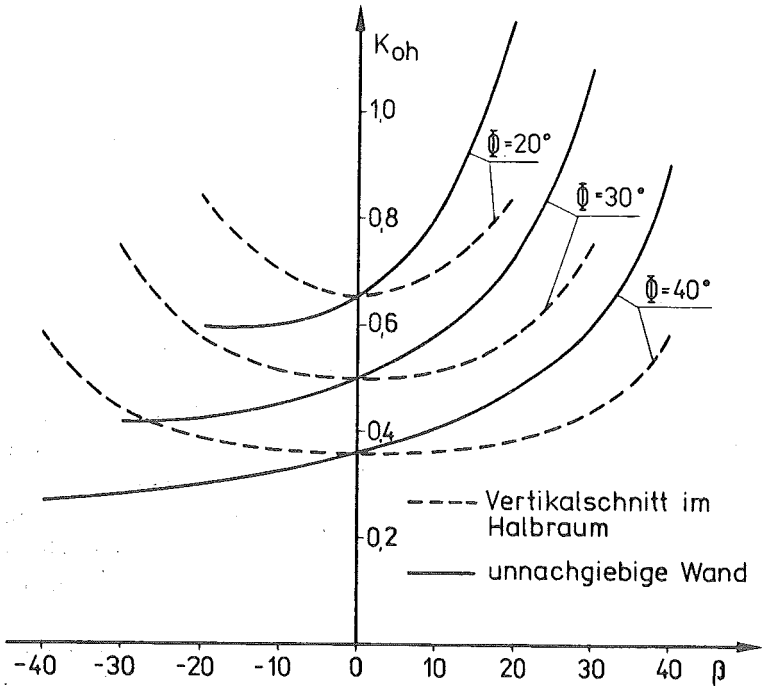


Bild 7. Beiwerte K_{oh} zur Berechnung des Erdruhedrucks in Abhängigkeit vom Geländeneigungswinkel β

Für eine vertikale Schnittfläche im Halbraum mit der Oberflächenneigung β ergibt sich entsprechend der Annahme der konstanten kleinen Hauptspannung [3,6,8,11,12] der Erdruhedruckbeiwert

$$K_{oh}^{(H)} = \frac{K_{oo} \cos^2 \beta}{1 - \frac{\sin^2 \beta}{\sin \phi}} \quad (11)$$

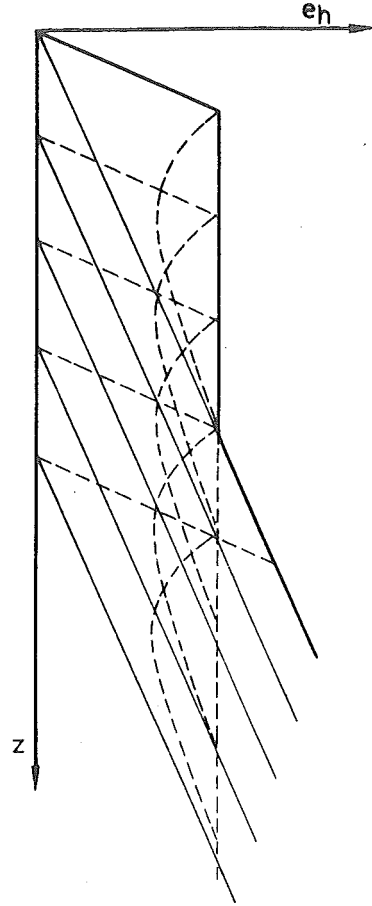
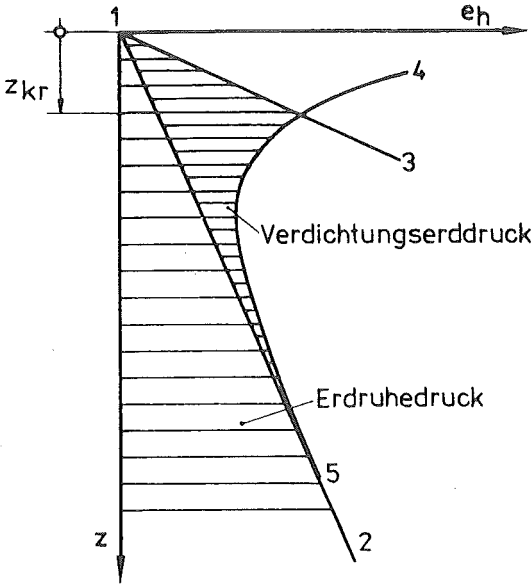
mit

$$K_{oo} = 1 - \sin \phi. \quad (12)$$

Dagegen ergibt sich nach [8] für eine unnachgiebige senkrechte Wand der Erdruhedruckbeiwert für $\delta_0 = 0$ näherungsweise nach Gleichung (13).

$$K_{\text{oyh}}^{(M)} = K_{\text{oyh}}^{(H)} \left[1 + \sin\beta \sqrt{\frac{K_{\text{oo}}}{1 + \sin^2\beta \left(K_{\text{oo}} - \frac{1}{\sin\phi} \right)}} \right]. \quad (13)$$

Der Verlauf der Kurven K_{oyh} ist in Bild 7 dargestellt.



- 1-2 Erdruehdruck
- 1-3 passiver Erddruck $\sigma_p < 0$
- 4-5 Horizontalspannung infolge einer statischen Ersatzlast zusätzlich zum Erdruehdruck

a) reine Oberflächenverdichtung

b) lagenweise Verdichtung

Bild 8. Erdruehdruck und Verdichtungserddruck

Verdichtungserddruck

Wird das Erdreich hinter einer Stützwand verdichtet, tritt eine Erhöhung des Erddrucks ein. Dieser Erddruckzuwachs kann nach [10,14] wie der Erdruehdruk aus einer statischen Oberflächenbelastung berechnet werden, wenn man eine statische Ersatzlast für die Wirkung des Verdichtungsgerätes einführt.

Die für das jeweilige Verdichtungsgerät zutreffende Ersatzlast läßt sich gegenwärtig nur durch Messungen ermitteln .

Bild 8 beschreibt den Lastansatz für reine Oberflächenverdichtung und für schichtweisen Einbau mit Verdichtung.

Über welchen Zeitraum diese Erddruckerhöhung wirksam bleibt ist nicht bekannt. Frostwirkungen und bestimmte Erschütterungen führen zum Abbau des durch "Verspannung" gespeicherten Zusatz-erddrucks.

Notwendige weiterführende Untersuchungen zum Erddruck

Schwerpunkt bei der Weiterentwicklung der Lastansätze aus Erddruckwirkungen ist die Berücksichtigung konkreter Verformungszustände, die im allgemeinen nicht zur Ausbildung von Grenzzuständen führen. Entsprechende Grundlagen hierfür lassen sich nur durch systematische experimentelle Untersuchungen gewinnen, die möglichst bald in Angriff genommen werden sollten.

Literatur

- [1] Böhme, K.(1986)
Numerische Berechnung der Erddruckgrenzwerte mit kreiszylindrischen Gleitflächen. Diss.(A), TU Dresden, 1986
- [2] Franke, D.(1981)
Erddruck auf Querflügelmauern, Bauplanung - Bautechnik
35(1981) S.85-88
- [3] Franke, D.(1983)
Über die Berechnung des Erdruehdrukkes, Geotechnik 6(1983)
S.158-163

- [4] Franke, D.(1983)
Beiträge zur praktischen Erddruckermittlung, Diss.(B), TU
Dresden, 1983
- [5] Franke, D.(1984)
Verbesserte Berechnung der Erddruckgrenzwerte bei bindigem
Lockergestein. Bauplanung - Bautechnik, 38(1984) S.27-31
- [6] Franke, D.(1988)
Erddruck auf unnachgiebige Wände - Auswertung von Modell-
versuchen. Geotechnik 11(1988) S.20-26
- [7] Franke, D.(1989)
Berechnung von Stützwänden nach verschiedenen mechanischen
Modellen. Ohde - Kolloquium 1989, TU Dresden
- [8] Günther, H.(1973)
Seitendruckziffer und Ruhedruck. Straße-Brücke-Tunnel
25(1973) S.95-97
- [9] Mayer - Vorfelder, H. J.(1970)
Ein Beitrag zur Berechnung des Erdwiderstandes unter Ansatz
der logarithmischen Spirale als Gleitflächenfunktion,
Diss., Uni.Stuttgart, 1979
- [10] Meckelburg, L.(1978)
Berechnung des Erddrucks auf Kellerwände der WBS 70,
Diss.(A), TU Dresden, 1978
- [11] Nissen, P.(1963)
Earth Pressure at Rest in Non-Cohäsive Soil, Effect of
Sloping Ground Surface. Bygningsstatiska Meddelser Vol.34,
No.3, 1963, S.57-78
- [12] Nissen, P.(1969)
Zuschrift zu Franke: Ruhedruck in kohäsionslosen Böden im
ebenen Fall (Die Bautechnik 44(1967) S. 42, Die Bautechnik
46(1969) S.323-324
- [13] Rendulic, L.(1938)
Der Erddruck im Straßenbau und Brückenbau. Volk und Reich
Verlag, Berlin 1938
- [14] Spotka, H.(1977)
Einfluß, der Bodenverdichtung mittels Oberflächen - Rüttel-
geräten auf den Erddruck einer Stützwand bei Sand. Mitt.9
des Instituts für Geotechnik Stuttgart