

# Aktiver Erddruck aus vertikalen und horizontalen Streifenlasten

## Zusammenfassung

Zur Berücksichtigung zusätzlicher Erddruckanteile auf Stützkonstruktionen infolge begrenzter vertikaler und horizontaler Flächenlasten (Streifenlasten) wurden Parameterstudien mit der Grenzgleichgewichtsmethode durchgeführt und daraus ein Näherungsansatz abgeleitet, der durch Vergleiche mit Berechnungen nach der FEM, Modellversuchen und anderen Berechnungsverfahren abgesichert ist. Das bisher häufig angewendete Verfahren, die Streifenlasten näherungsweise zu Linienlasten zusammenzufassen führt insbesondere bei größeren Streifenlastanteilen zu unwirtschaftlichen Stützkonstruktionen. Für vereinfachte Berechnungen kann darüber hinaus ein auf Ohde zurückgehendes Verfahren empfohlen werden.

## Summary

Active soil pressure from vertical and horizontal strip loads. Parameter studies using the limit equilibrium method were carried out in order to take additional soil pressure influences on supporting structures as a result of limited vertical and horizontal area loads (strip loads) into consideration. An approximation formulation was derived from this which is confirmed by comparisons with calculations according to the FEM, trials using models and other calculation methods. The popular method currently employed, i. e. combining the strip loads approximately to form linear loads, leads to uneconomical supporting structures, in particular in the case of large strip load influences. In addition, a method going back to Ohde can be recommended for simple calculations.

## 1 Einleitung

Neben einem Geländesprung sind häufig begrenzte Flächenlasten z. B. Lasten aus Verkehr oder Lagerstoffen vorhanden, die einen zusätzlichen Erddruckanteil auf eine Stützkonstruktion bewirken. Zur Berechnung dieses Erddruckanteils findet sich in DIN 4085 [3] nur der Hinweis auf halbgrafische Verfahren und Näherungslösungen. Angaben zur Berücksichtigung von waagerechten Lastanteilen sind in der Norm nicht vorhanden.

Sofern die begrenzten Flächenlasten, die nachfolgend als Streifenlasten bezeichnet werden, sich im Rahmen der üblichen Lasten aus Straßenverkehr bewegen, ist der Einfluß auf die Stützwandberechnung von nicht sehr großer Bedeutung. Bei großen Lasten aus Lagerstoffen oder Lasten aus Eisenbahnverkehr kann die wirklichkeitsnahe Erfassung dieses Erddruckanteils die Dimensionierung der Stützwand durchaus erheblich beeinflussen. So beträgt z. B. die Streifenlast aus Eisenbahnverkehr nach DS 804 [4]  $p' = 52 \text{ kN/m}^2$ , verteilt auf einen Laststreifen von 3 m Breite. Darüber hinaus können Fliehkräfte und Seitenstoß eine zusätzliche waagerechte Belastung auf die Stützkonstruktion bewirken, die eine Größe bis max. ca. 1/6 der vertikalen Verkehrslast ausmacht und zu einer bis ca.  $\epsilon = 10^\circ$  geneigten resultierenden schrägen Streifenlast führen kann.

Die bisherigen Regelungen in DS 804 zur rechnerischen Berücksichtigung der Streifenlast aus Eisenbahnverkehr haben häufig Einsprüche der Anwender hervorgerufen, weil damit oftmals die äußere Standsicherheit bestehender, intakter Stützwände rechnerisch nicht nachgewiesen werden kann. Dies und die fehlenden eindeutigen Regelungen in DIN 4085 veranlaßten das Bundesbahn-Zentralamt (BZA) München, die angeschnittenen Fragen näher zu untersuchen, um abgesicherte Regelungen in DS 804 aufzunehmen. Den nachfolgenden Darstellungen liegen die Bezeichnungen der DIN 4085 zugrunde. Weiterhin wird nur eine Drehung um den Fußpunkt behandelt, wie sie näherungsweise bei starren Stützwänden gegeben ist.

## 2 Vorhandene Berechnungsansätze

Zahlreiche vorhandene Berechnungsansätze gehen zunächst von einer zusätzlichen Linienlast  $\bar{p}$  an der Geländeoberfläche aus und fassen die Streifenlast  $p'$  mit der Breite des Laststreifens  $b$  zu

$$\bar{p} = b \cdot p' \quad (1)$$

zusammen. Für den Zusatzerddruck aus der Linienlast sind z. B. in [6], [15] die bekannten Verfahren zusammengestellt. Vergleichsberechnungen zeigen erhebliche Unterschiede in der Größe der Erddruckzusatzbelastung [6]. Unter Voraussetzung einer ebenen Gleitfläche für den Erddruckanteil aus Bodeneigenlast und Linienlast sowie Anwendung der Coulombschen Erddrucktheorie läßt sich ein Erddruckbeiwert

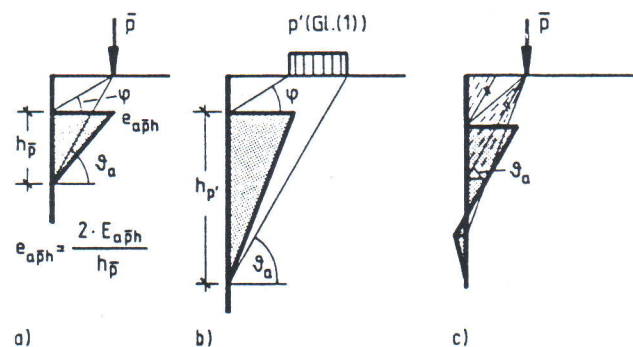
$$K_{a\bar{p}h} = \frac{\sin(\vartheta_a - \varphi) \cdot \cos \delta_a}{\cos(\vartheta_a - \varphi - \delta_a)} \quad \text{für } \delta_a \neq 0 \quad (2a)$$

$$K_{a\bar{p}h} = \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \quad \text{für } \delta_a = 0 \quad (2b)$$

ableiten [15]. Daraus ergibt sich der häufig verwendete Zusatzerddruck

$$E_{a\bar{p}h} = \bar{p} \cdot K_{a\bar{p}h} \quad (3)$$

Die Verteilung des Zusatzerddruckes wird in der Regel dreieckförmig nach Bild 1a vorgenommen. Bild 1b zeigt den üblichen unter Verwendung der Gln. (1) bis (3) ermittelten Ansatz für eine Streifenlast. Im Bild 1c ist ein Ansatz mit Gleitflächenscharen dargestellt [14], [8]. Weissenbach [15]



**Bild 1.** Erddruckermittlung  
a) Linienlasten (Coulomb)  
b) Streifenlasten aus a)  
c) Linienlasten aus Gleitflächenscharen

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert, FH Konstanz, vormals Bundesbahn-Zentralamt München, Postfach 77 29, 7750 Konstanz, Bundesbahndirektor Dipl.-Ing. Klaus Martinek, Bundesbahn-Zentralamt München, Arnulfstraße 19, 8000 München 2



empfiehlt bei Streifenlasten eine trapezförmige Verteilung des Zusatzerdrukkes aus den Gln. (1) bis (3), wobei zusätzlich auch der Fall mit Zwangsgleitflächen zu untersuchen ist. Andere trapezförmige Näherungsverteilungen enthält [1], die auf eine maximale Erddruckordinate aus der unbegrenzten Streifenlast von

$$e_{ap'h} = p' \cdot K_{ah} \quad (4)$$

bezogen sind.

Bei einem Vergleich der Ergebnisse der Erddruckermittlung nach Bild 1a und 1c wird in [14] ausgeführt, daß die Höhenlage der entsprechenden Erddruckordinaten hinter der Wand auch belastungsabhängig ist. Das gleiche gilt für die Streifenlastlösungen, wobei hier der oft verwendete Ansatz nach Bild 1b häufig zu Erddruckordinaten  $e_{ap'h} > e_{ap'h} = p' \cdot K_{ah}$  führt und damit unrealistisch ist.

In [13] ist eine Parameterstudie für nichtbindige Böden zur vorliegenden Fragestellung beschrieben, in der die Streifenlast durch abschnittsweise Lösung der klassischen Erd-drucktheorie nach *Coulomb* über die Wandhöhe und Variation der maßgebenden Gleitflächenneigung erfaßt wurde. Daraus wurde ein trapezförmiger Näherungsansatz für die Erddruckverteilung entwickelt und die Schlußfolgerung gezogen, daß der Einsatzpunkt und die Maximalordinate des Erddruckes aus der Streifenlast sowie der Neigungswinkel der Gleitfläche zur Bestimmung des Endpunktes der Zusatzbelastung abhängig sind von dem Verhältnis der Streifenlast zur Bodeneigenlast.

Unter einem Winkel  $\epsilon$  geneigte schräge Streifenlasten wurden bisher nach [11] und [4] bei der Erddruckermittlung derart berücksichtigt, daß die waagerechte Lastkomponente vollständig als Erddruck auf die Wand in Ansatz gebracht wird. Die Erddrucklast aus dem vertikalen Streifenlastanteil und die waagerechte Lastkomponente wurden dabei in der Regel addiert und entsprechend Bild 1b, wie für eine vertikale Streifenlast allein, dreieckförmig verteilt. In Bild 2a ist diese Vorgehensweise unter Ansatz einer Ersatzstreifenlast für den Eisenbahnverkehr nach [4] von  $p'_v = 52 \text{ kN/m}^2$  und  $p'_H \cong 1/6 \cdot p'_v$  mit einem Lastneigungswinkel  $\epsilon = 10^\circ$  in einem Beispiel dargestellt.

### 3 Grenzgleichgewichtsmethode

Neben den üblichen kinematischen Methoden der Erddruckermittlung lassen sich auch statische Methoden anwenden. Sie sind dadurch gekennzeichnet, daß sich der untersuchte Baugrundbereich vollständig in einem plastischen Grenzzustand (Zonenbruch) befindet. Diese

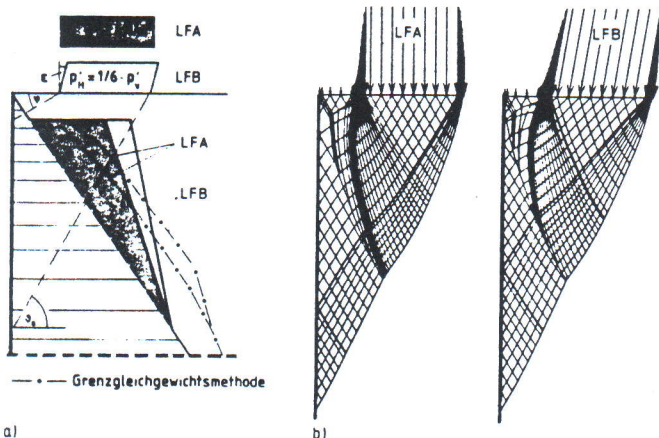


Bild 2. Berechnungsbeispiel  
a) Berechnung nach [4], [11]  
b) Grenzgleichgewichtsmethode

Annahme ist für viele Beanspruchungen des Baugrundes nicht gegeben, es bilden sich vielmehr Linienbrüche auf kinematisch möglichen Gleitfugen aus. Dadurch und wegen des notwendigen numerischen Aufwandes werden statische Methoden seltener angewendet.

Für den hier untersuchten Fall der Erddruckbelastung einer Wand bei Fußpunktdrehung kann als Grenzzustand von Zonenbrüchen und damit von der Anwendbarkeit von statischen Methoden der Erddruckermittlung ausgegangen werden. Bild 2b sowie Bild 3 zeigen Berechnungsbeispiele zur vorliegenden Fragestellung unter Anwendung der Grenzgleichgewichtsmethode (Charakteristikenverfahren). Die theoretischen Grundlagen der Verfahren können z. B. [12] und [10] entnommen werden. Der Vorteil dieser Berechnungsmethode liegt im Gegensatz zu den kinematischen Verfahren darin, daß die Berechnung auch die Erd-druckverteilung liefert.

Die Beispielrechnungen aus den Bildern 2 und 3 sowie alle Berechnungen nach Abschnitt 4 wurden mit einem im Auftrag des BZA München vom Büro Dr. Haller, Zürich, entwickelten Rechenprogramm durchgeführt.

### 4 Näherungsansätze

Die in Abschnitt 2 beschriebenen, teilweise unzulänglichen üblichen Berechnungsansätze zur Berücksichtigung von größeren vertikalen und schrägen Streifenlasten bei der Erddruckermittlung legen es nahe, für diesen Fall das in Abschnitt 3 angeführte Berechnungsverfahren nach der Grenzgleichgewichtsmethode anzuwenden. Da der numerische Aufwand bei dieser Methode erheblich ist und geeignete Rechenprogramme oft nicht zur Verfügung stehen, sind Näherungsansätze für die praktische Erddruckermittlung notwendig. Nachfolgend sind Näherungsansätze angegeben, die auf der Grundlage von umfangreichen Parameterstudien mit dem in Abschnitt 3 erwähnten Rechenprogramm abgeleitet wurden. Die Angaben beschränkten sich auf homogene Baugrundverhältnisse.

Ausgehend von der Systemskizze nach Bild 4a ergeben sich folgende Einflußparameter auf das Berechnungs-

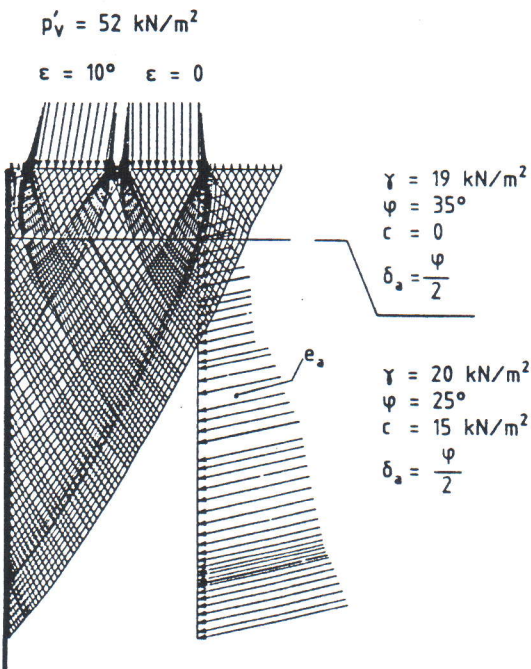
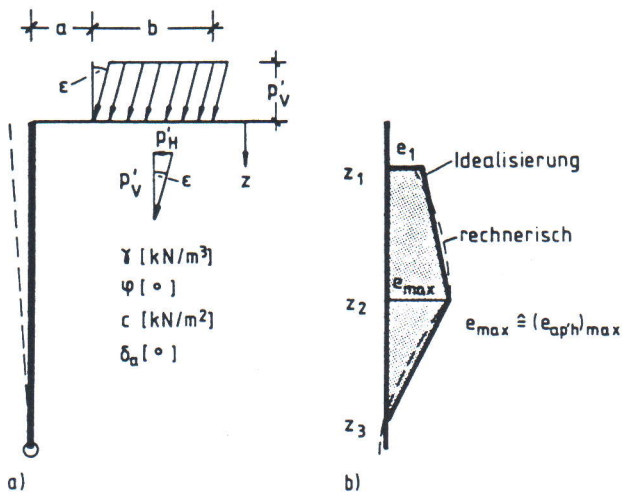


Bild 3. Berechnungsbeispiel nach der Grenzgleichgewichtsmethode (Belastung aus zweigleisigem Eisenbahnverkehr)





**Bild 4.** Grundlagen der Parameterstudie und Einflußparameter  
a) System  
b) Erddruck aus Streifenlast

ergebnis, wobei ebenes Gelände und eine senkrechte Wandrückseite vorausgesetzt werden.

a) Geometrische und lastabhängige Größen

- a: Wandabstand der Streifenlast,
- b: Streifenlastbreite,
- ε: Lastneigung,
- p': Streifenlast.

b) Bodenartabhängige Größen

- γ: Wichte,
- φ: Reibungswinkel,
- c: Kohäsion,
- δ<sub>a</sub>: Wandreibungswinkel.

Werden nun die geometrischen Größen z<sub>1</sub>, z<sub>2</sub> und z<sub>3</sub> der idealisierten Erddruckverteilung infolge Streifenlast (Bild 4b auf die Größe a bezogen) und die Erddruckordinate normiert, so lassen sich folgende dimensionslose Beziehungen anschreiben

$$\frac{z_i}{a} = f_i \left( \varphi, \frac{c}{\gamma \cdot a}, \frac{\delta_a}{\varphi}, \frac{p'_V}{\gamma \cdot a}, \frac{b}{a}, \varepsilon \right) \quad (5)$$

$$\frac{e_{max}}{e_{aph}} = f_4 \left( \varphi, \dots, \dots, \varepsilon \right) \quad (6)$$

$$\frac{e_1}{e_{aph}} = f_5 \left( \varphi, \dots, \dots, \varepsilon \right) \quad (7)$$

mit

- i: 1, 2, 3,
- f<sub>1</sub> bis f<sub>5</sub>: zu bestimmende Funktionen,
- "1": Längeneinheit 1 m,
- e<sub>aph</sub>: Zusatzerdruddruck p · K<sub>ah</sub> infolge einer unendlichen Gleichlast p auf der Geländeoberfläche, K<sub>ah</sub> = Erddruckbeiwert nach *Coulomb*.

Die Funktionen f<sub>1</sub> bis f<sub>5</sub> wurden aus der obengenannten Parameterstudie angenähert.

Auf der Grundlage einer Variation der in den Gln. (4) bis (6) angegebenen Parameter lassen sich für die gesuchten Größen nach Bild 3b Näherungsansätze ableiten, Gln. (8) bis (12), die sich leicht mit einem programmierbaren Taschenrechner auswerten lassen.

$$\frac{z_1}{a} = \left[ \frac{p'_V}{\gamma \cdot a} (0,046 - 0,005 \cdot \varphi) + 0,055 \cdot \varphi - 0,506 \right] \cdot (1 - 0,003 \cdot \varepsilon) \quad (8)$$

$$\frac{z_2}{a} = \left( 0,028 \cdot \varphi \cdot \frac{b}{a} + 0,052 \cdot \varphi + 0,92 \cdot \frac{b}{a} - 0,33 \right) \cdot \left[ \frac{p'_V}{\gamma \cdot a} \left( 0,004 \cdot \frac{\delta_a}{\varphi} - 0,06 \right) - 0,064 \cdot \frac{\delta_a}{\varphi} + 1,06 \right] \cdot (1 - 0,01 \cdot \varepsilon) \quad (9)$$

$$\frac{z_3}{a} = (0,003 \cdot \varphi^2 - 0,15 \cdot \varphi + 6,62) \left( 1 - 0,09 \cdot \frac{\delta_a}{\varphi} \right) \cdot \left( 0,73 + 0,27 \cdot \frac{b}{a} \right) \cdot \left( 0,875 + 0,125 \cdot \frac{p'_V}{\gamma \cdot a} \right) \quad (10)$$

$$\frac{e_1}{e_{aph}} = \left[ 0,26 \cdot \varphi^{0,29} \cdot \left( 0,9 + 0,1 \cdot \frac{b}{a} \right) \right] \cdot (1 - 0,01 \cdot \varepsilon) \quad (11)$$

$$\frac{e_{max}}{e_{aph}} = 0,75 \cdot \left( \varphi \cdot \frac{b}{a} \right)^{0,07} \cdot (1 - 0,01 \cdot \varepsilon) \quad (12)$$

Tabelle 1 gibt einen Überblick zu den aus der Parameterstudie ermittelten Abhängigkeiten der gesuchten Größen. Die Näherungsgleichungen (8) bis (12) können nur angewendet werden für

- a) Reibungswinkel zwischen φ = 15° bis 40°,
- b) Positive Wandreibungswinkel δ<sub>a</sub>,
- c) Positive Neigung der Streifenlast bis ε ≈ 20°,
- d) Dimensionslose Kohäsion  $\frac{c}{\gamma \cdot a} \leq 1$ .

Bei einer Lastneigung ε ist als Bezugserddruck e<sub>aph</sub> für die Gln. (11) und (12) die Gl. (13) zu verwenden.

$$e_{aph} = p'_V \cdot K_{ah} + p'_H \quad (13)$$

mit

- p'<sub>V</sub> = vertikale Lastkomponente,
- p'<sub>H</sub> = horizontale Lastkomponente.

## 5 Überprüfung der Näherungsansätze

### 5.1 Grenzgleichgewichtsmethode

Anhand von unterschiedlichen und z. T. extremen Beispielen wurde in Bild 5 ein Vergleich zwischen dem abgeleiteten Näherungsansatz aus Abschnitt 4 und den exakten Berechnungen mit der Grenzgleichgewichtsmethode angestellt. Danach ist eine befriedigende Übereinstimmung zwischen dem Näherungsansatz und der Berechnung nach der Grenzgleichgewichtsmethode vorhanden.

**Tabelle 1.** Übersicht zur Parameterabhängigkeit der Größen nach Bild 4b

Größen nach Bild 4b	variierte Parameter			
	$\frac{\delta_a}{\varphi}$	$\frac{b}{a}$	$\frac{p'_V}{\gamma \cdot a}$	c
$\frac{z_1}{a}$	-	-	+	+
$\frac{z_2}{a}$	+	+	+	+
$\frac{z_3}{a}$	+	+	+	-
$\frac{e_{max}}{e_{aph}}$	-	+	-	+
$\frac{e_1}{e_{aph}}$	-	+	-	+

(+) parameterabhängig, (-) parameterunabhängig



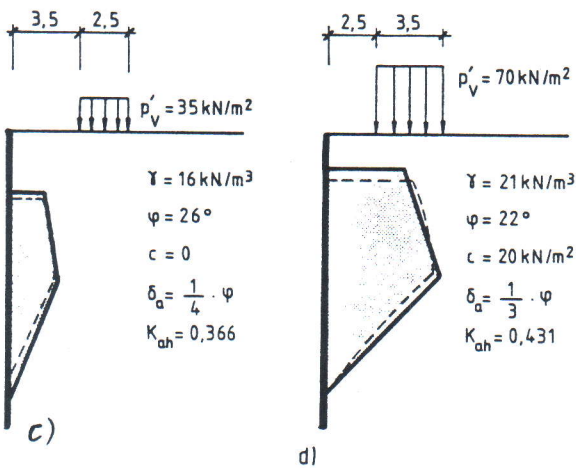
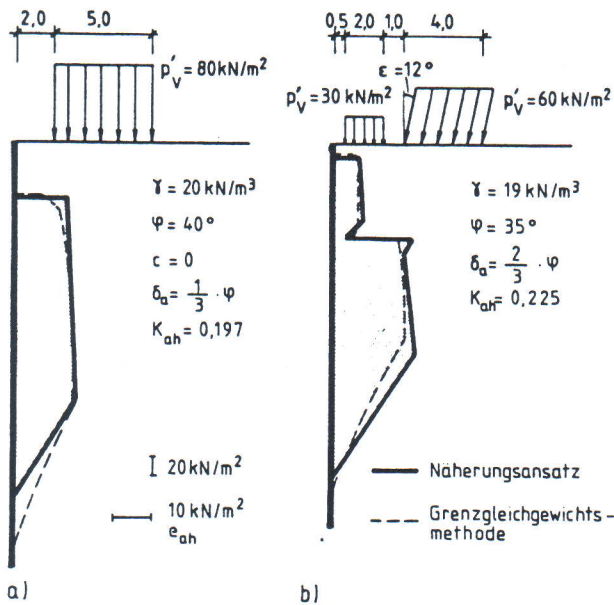


Bild 5. Vergleich zwischen Näherungsansatz und Grenzzgleichgewichtsmethode

### 5.2 Berechnungen mit der FEM

Für einen Vergleich mit dem in Abschnitt 3 und 4 vorgestellten Verfahren wurden von Czaplá [2] im Auftrage des BZA München Berechnungen mit der Methode der finiten Elemente (FEM) an einer 10 m hohen Stützwand mit dem Programmsystem SGG/901 (STATAN) durchgeführt. Der zugrunde gelegte erdfeuchte Sand wurde in der Berechnung mit dem nichtlinear elastischen Stoffgesetz von Duncan/Chang [5] beschrieben. In der Fuge zwischen der Wandrückseite und dem Sand wurden Übergangselemente (Jointelemente) angeordnet. Die Stoffkenngrößen des Baugrundes und der Übergangselemente wurden aus vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Ergebnissen von Dreiaxial- und Rahmenscherversuchen [7] abgeleitet. Entsprechend der angenommenen Drehung der Wand um den Fußpunkt, siehe Abschnitt 3, konnte der Belastungsvorgang durch eine schrittweise Wandverschiebung des Kopfpunktes rechnerisch simuliert werden. Dabei war entsprechend [15] der aktive Erddruckzustand bei einer horizontalen Wandkopfverschiebung zwischen 1‰ und 1% der Wandhöhe zu erwarten.

Bei den in Bild 6 dargestellten Ergebnissen mit der FEM ist zunächst zu klären, welche Wandkopfverschiebung einem aktiven Grenzzustand im Boden zuzuordnen ist. Vergleicht man die Verminderung des Erdruhedruckbeiwertes  $K_0 = 0,43$  auf  $K_{ah} = 0,26$  (etwa 60% von  $K_0$ ) mit dem

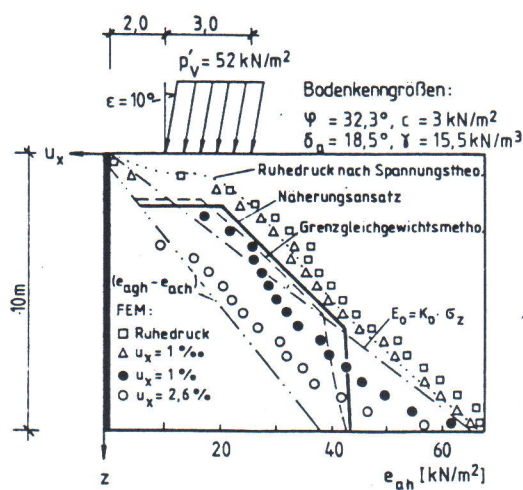


Bild 6. Vergleich zwischen den Ergebnissen mit der FEM und anderen Ansätzen

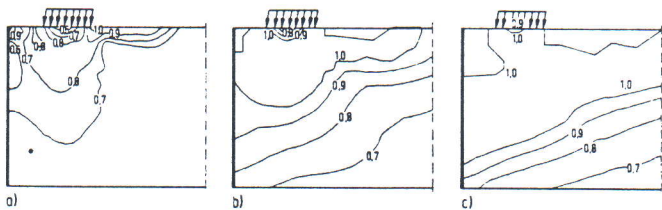


Bild 7. Detailergebnisse der FEM aus [2]

- a) Ausnutzungsgrade bei  $u_x = 1‰$
- b) Ausnutzungsgrade bei  $u_x = 1\%$
- c) Ausnutzungsgrade bei  $u_x = 2,6\%$

Spannungsabfall auf die Wand vom Ruhedruckzustand (Primärzustand) auf denjenigen infolge der Wandkopfverschiebung von 1‰, so liegt die Spannungsverminderung in einer ähnlichen Größenordnung. Daraus kann gefolgert werden, daß bei der Berechnung mit der FEM eine Wandkopfverschiebung in der Größenordnung von  $u_x = 1‰$  der Wandhöhe einen dem aktiven Erddruckfall ähnlichen Zustand im Baugrund beschreibt. Die in Bild 7a bis c dargestellten Ausnutzungsgrade der Scherfestigkeit bestätigen diese Aussage und lassen gleichzeitig erkennen, daß im unteren Wandfußbereich bei einer reinen Fußpunktdrehung bekanntlich (siehe auch [15]) die Verschiebung für den aktiven Erddruckzustand nicht ausreicht. Die Ergebnisse der Berechnungen von sehr großen Wandkopfverschiebungen bis  $u_x = 2,6\%$  zeigen die numerischen Grenzen des Berechnungsverfahrens und sind wenig realistisch.

Werden aufgrund der vorstehenden Ausführungen die FEM-Ergebnisse mit  $u_x = 1‰$  dem Vergleich mit dem Näherungsansatz nach Abschnitt 4 zugrunde gelegt, so ist bis in Tiefen von etwa 2/3 der Wandhöhe eine befriedigende Übereinstimmung festzustellen, wobei der aus der Grenzzgleichgewichtsmethode abgeleitete Näherungsansatz auf der sicheren Seite liegt. Die Berechnungsergebnisse im unteren Wanddr Drittel lassen sich dagegen nicht vergleichen, weil das Näherungsverfahren bzw. das Verfahren nach der Grenzzgleichgewichtsmethode von einem vollplastizierten Zustand (Zonenbruch) hinter der Wand ausgeht, nach der FEM (Bild 7b) der Grenzzustand aber noch nicht erreicht ist. Aus den Darstellungen im Bild 6 ist für das Beispiel weiterhin hervorzuheben, daß für den berechneten Ruhedruckzustand unter Berücksichtigung der Streifenlast zwischen der FEM und der Spannungstheorie im elastisch isotropen Halbraum gute Übereinstimmung besteht. Für eine Kopfverschiebung von  $u_x = 1‰$  der Wandhöhe ist in den Berechnungen mit der FEM nach Bild 6 kaum ein Abfall der Erdruhedruckspannung festzustellen, Bild 7 enthält einige Detail-



ergebnisse. Im Bild 6 ist zu erkennen, daß der zusätzliche Erddruckanteil aus der Streifenlast für den Ruhedruck (Spannungstheorie) kleiner ist als der für den aktiven Zustand. Dies wurde tendenziell auch mehrfach bei Messungen an Baugrubenwänden beobachtet.

### 5.3 Modellversuche

Ein weiterer Vergleich der Berechnungsansätze wurde mit vom BZA München durchgeführten Modellversuchen vorgenommen. Die Versuche wurden in einer 1,1 m breiten und 1,2 m tiefen Grube ausgeführt, wobei die Grube durch eine 1 m hohe Modellwand mit Fußpunktdrehung abgeschlossen war. Der ebene Erddruckzustand wurde näherungsweise durch an den Seitenflächen der Grube angeordnete zweilagige Folien erzeugt. Der Erddruck wurde mit runden pneumatischen Erddruckgebern EF45 der Fa. Glötzl, Rheinstetten, gemessen. Die Abmessungen der Geber betragen 45 mm  $\phi$   $\times$  4 mm.

Insgesamt waren die gemessenen Erddrücke aller Versuche wegen der großen Streuungen in den Ergebnissen für einen Vergleich zwischen Versuch und Berechnung nur wenig geeignet. Eine tendenzielle Ähnlichkeit konnte festgestellt werden.

### 6 Näherungsverfahren nach Ohde

Für einen weiteren Vergleich wurde ein mit Vereinfachungen [14] auf Ohde [9] zurückgehendes Verfahren zur Erfassung von vertikalen Streifenlasten benutzt, siehe Bild 8, und den Ergebnissen des Näherungsverfahrens nach Abschnitt 4 gegenübergestellt. Dabei wurde für den horizontalen Lastanteil die gleiche Erddruckverteilung wie für den vertikalen Anteil angenommen. In Bild 9 sind die Ergebnisse dargestellt. Daraus kann gefolgert werden, daß in der Regel zur Berechnung des Erddrucks aus vertikalen und horizontalen Streifenlasten das in Bild 8 dargestellte vereinfachte Verfahren nach Ohde ausreichend ist. Etwas genauere Ergebnisse lassen sich mit den Näherungsansätzen nach Abschnitt 4 erreichen.

### 7 Schlußfolgerungen und Empfehlungen

Die vorgestellte Grenzgleichgewichtsmethode, siehe Abschnitt 3, kann den Erddruck aus vertikalen und horizontalen Streifenlasten zutreffend erfassen. Das Verfahren ist aber mit großem rechnerischem Aufwand verbunden und nur anwendbar, wenn entsprechende EDV-Programme zur Verfügung stehen. Die aus den Parameterstudien mit der Grenzgleichgewichtsmethode abgeleiteten Näherungsansätze, siehe Abschnitt 4, können anstelle des genaueren Verfahrens verwendet werden. Die Gln. (8) bis (12) sind allerdings wenig anschaulich und verlassen die bisher bei Erddruckberechnungen gewohnte Vorgehensweise.

Brauchbare Ergebnisse liefert auch ein auf Ohde zurückgehendes Näherungsverfahren, siehe Abschnitt 6. Dabei wird allerdings die in Abschnitt 4 festgestellte Abhängigkeit der Tiefenlage der Erddruckverteilung von der Lastintensität der Streifenlast vernachlässigt. Mit den empfohlenen Verfahren lassen sich die Erddruckanteile aus Streifenlasten zutreffender berechnen als mit dem bisher häufig angewendeten Verfahren nach Bild 1b, das für Linienlasten abgeleitet wurde. Aus den in den Abschnitten 3 und 4 durchgeführten Berechnungen mit der Grenzgleichgewichtsmethode konnte festgestellt werden, daß sich ab Laststreifenbreiten von etwa  $b \geq 1,0$  m die empfohlenen Erddruckanteile aus Streifenlasten immer einstellen.

Die häufig verwendeten Erddruckansätze für Linienlasten nach Bild 1a, auch für Streifenlasten nach Bild 1b,

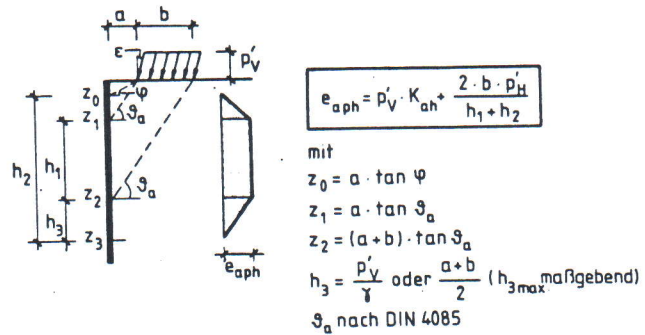


Bild 8. Vereinfachtes Verfahren nach Ohde

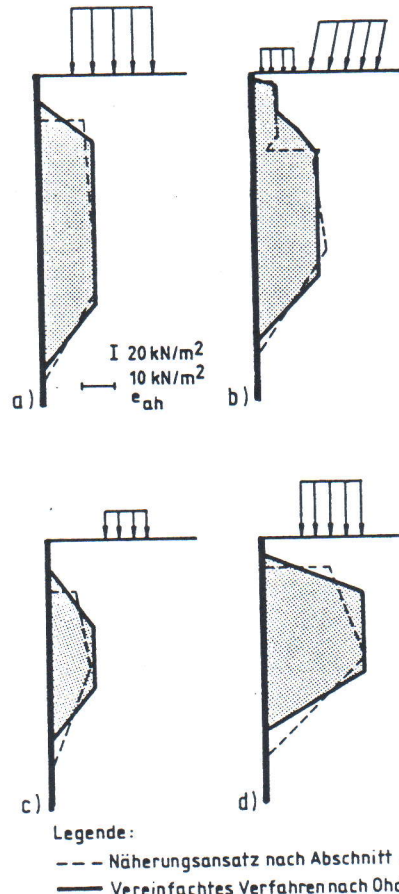


Bild 9. Vergleich zwischen dem Näherungsansatz nach Abschnitt 4 und dem vereinfachten Verfahren nach Ohde (Beispiele wie Bild 5)

führen zu einer Verschiebung der resultierenden Erddrucklast in Richtung Geländeoberfläche mit entsprechend unwirtschaftlichen Auswirkungen für die Nachweise der äußeren und inneren Standsicherheit einer Stützwand. Bei nebeneinanderliegenden Streifenlasten führt die Lösung nach Bild 1b oft zu Erddruckanteilen aus Streifenlasten, die höher liegen als diejenigen für eine durchgehende Flächenlast auf der Geländeoberfläche, was nicht zutreffend sein kann. Auch für diesen Fall liefern die empfohlenen Verfahren mit einer maximalen Erddruckordinate aus der Streifenlast entsprechend Gl. (4) wirklichkeitsnahe Ergebnisse.

### Literatur:

- [1] Bobe/Göbel: Grundbaustatik. Köln: Verlagsgesellsch. R. Müller 1973.
- [2] Czapl, H.: Bericht über FE-Berechnungen Erddruck aus Verkehrslast. Software-Gruppe-Geotechnik 1985 (unveröffentlicht).
- [3] DIN 4085: Berechnung des Erddrucks; Berechnungsgrundlage Ausgabe Februar 1987.

- [4] DS 804: Vorschrift für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke (VEI). Deutsche Bundesbahn. Ausgabe 1985.
- [5] *Duncan, J. M., und Chang, C. Y.*: Nonlinear analysis of stress and strain in soils. Journ. of the Soil Mech. a. Found. Div. ASCE, (1970), No. SM 5.
- [6] *Hilmer, K., und Helas, E.*: Zusammenstellung verschiedener Berechnungsverfahren zur Ermittlung des Zusatzerddruckes infolge Linienlasten. Veröffentl. d. Grundbauinstitutes der LGA-Bayern. Heft 35, 1979.
- [7] *Kempfert, H.-G.*: Zum Trag- und Verformungsverhalten von im Baugrund eingespannten, nahezu starren Gründungskörpern bei ebener oder geneigter Geländeoberfläche. Schriftenreihe d. FG Baugrund-Grundbau d. Univ. Dortmund, H. 1, 1987.
- [8] *Minnich, H., und Stöhr, G.*: Mathematische Grundlagen der  $G_0$ -Methode für den allgemeinen Fall der Erddruckermittlung. Die Bautechnik 61 (1984), H. 10, S. 358-361.
- [9] *Ohde, J.*: Grundbaumechanik, in Hütte III, Bautechnik, 28. Aufl. 1956.
- [10] *Salden, D.*: Der Einfluß der Sohlform auf die Traglast von Fundamenten. Baugrundinstitut Universität Stuttgart, Mitteilung 12, 1980.
- [11] *Schroeter, A.*: Über Erddruck aus waagerechten Seitenkräften. Die Bautechnik 18 (1940), H. 22/23, S. 264-265.
- [12] *Sokolovski, V. V.*: Static of Soil Media. London: Butterworths Sci. Publ. 1960.
- [13] *Sondermann, W.*: Erddruckermittlungen für beidseitig begrenzte Belastungen auf einer ebenen Geländeoberfläche. Mitt. des Instituts f. Grundbau und Bodenmechanik. TU Braunschweig, H. 13, 1984.
- [14] *Sturm, K.*: Die begrenzte Brauchbarkeit der gängigen Näherungsformeln zur Ermittlung aktiver Erddrücke aus Linien- und Streifenlasten. Techn. Akad. Wuppertal. Bericht 16. Essen: Vulkan Verlag 1980.
- [15] *Weißbach, A.*: Baugruben Teil II, Berechnungsgrundlagen. Berlin: Verlag W. Ernst & Sohn 1975.