

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Schuppener, Bernd**

## **Der Erddruck einer rolligen Hinterfüllung auf eine unverschiebliche Stützwand infolge der Verdichtung**

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102997>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Schuppener, Bernd (1975): Der Erddruck einer rolligen Hinterfüllung auf eine unverschiebliche Stützwand infolge der Verdichtung. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 38. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 1-10.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Dipl.-Ing. B. S c h u p p e n e r

DER ERDDRUCK EINER ROLLIGEN HINTERFÜLLUNG  
AUF EINE UNVERSCHIEBLICHE STÜTZWAND  
INFOLGE DER VERDICHTUNG

Lateral earth pressures of cohesionless soils  
against rigid retaining structures due to compaction

Zusammenfassung

Durch die Verdichtung der Hinterfüllung von annähernd unverschieblichen Stützbauwerken mit sehr schweren und leistungsfähigen Geräten entstehen Erddrücke, die den üblicherweise in der Statik angesetzten Erddruck erheblich überschreiten. Es werden zwei Ansätze dargestellt und diskutiert, die die Erddruckerhöhung infolge der Verdichtung theoretisch und quantitativ zu erfassen versuchen. Die Ergebnisse dieser Ansätze werden dann mit den Erddruckmessungen während der Hinterfüllung von zwei unverschieblichen Stützwänden am Schiffshebewerk Lüneburg verglichen. Für den von Broms vorgeschlagenen recht einfachen und handlichen Ansatz ergibt sich recht gute Übereinstimmung mit den Meßergebnissen.

Summary

Compaction of the backfill of rigid unyielding earth-retaining structures by heavy equipment produces earth-pressure, which can greatly exceed the earth pressure at rest, which is normally taken as the design load. The methods of two authors to predict the earth pressure increase due to compaction are described and discussed. The results of both methods are then compared with earth pressure measurements at two unyielding retaining structures of the ship hoist in Lüneburg. The earth pressures calculated by the method proposed by Broms proved to be in good agreement with the earth pressure measurements.

I n h a l t

	Seite
1. Einführung	3
2. Verfahren zur Erd- und Verdichtungsdruck- berechnung	3
3. Vergleich von Rechenergebnissen mit eige- nen Erddruckmessungen	7
4. Schrifttum	9

## 1. Einführung

Hinter annähernd unverschieblichen, hinterfüllten Stützbauwerken wie den in die Sohle eingespannten Kammerwänden von Schleusen, d.h. bei Bauwerken mit trogförmigem Querschnitt, kann der tatsächliche Erddruck den in der statischen Berechnung üblicherweise angesetzten Erdruchdruck erheblich überschreiten. Der Grund dafür ist in der horizontalen Verspannung der Hinterfüllung infolge der Verdichtung zu suchen, die heute mit sehr schweren und leistungsfähigen Geräten durchgeführt wird. Dieser Tatsache ist auch bei der Bearbeitung der Neufassung der DIN 1055, Blatt 2 im Entwurf vom März 1975 [3] Rechnung getragen worden.

Als erster hat TERZAGHI [8] festgestellt, daß der Erddruck einer lockeren Schüttung wesentlich geringer ist als derjenige einer gut verdichteten Hinterfüllung. SOWERS et.al. [7] beschäftigten sich speziell mit der Frage der Erddrücke infolge von Verdichtungsarbeit. Ihre Messungen in einer Versuchsgrube ergaben, daß der Erddruck von verdichtetem Boden den einer lockeren Schüttung um ein Vielfaches überschreiten kann.

Versuche einer quantitativen Erfassung des Erddrucks bei lagenweiser Verdichtung der Hinterfüllung stammen von BROMS [2] und von AGGOUR u. BROWN [1]. Das Verfahren von BROMS wird im folgenden bevorzugt, weil sein Rechenansatz an Meßergebnisse angeglichen ist. Eine solche halbempirische Art des Vorgehens kann, sofern sie genauere Ergebnisse liefert, als ein theoretisch anspruchsvolleres Verfahren, überlegen sein, wie sich zeigen wird. Zudem ist das Verfahren von BROMS sehr einfach in der Handhabung.

## 2. Verfahren zur Erd- und Verdichtungsdruckberechnung

Nach BROMS [2] wird der Spannungszustand eines Bodenelements in der Hinterfüllung einer Stützwand durch den Punkt A in Bild 1 gekennzeichnet. Bei der Verdichtung der Hinterfüllung steigere sich die Vertikalspannung  $\sigma_v$  von A über E nach B. Dabei soll zwischen  $\sigma_v$  und der Horizontalspannung  $\sigma_h$  die Beziehung  $\sigma_h = K_o \cdot \sigma_v$  bestehen, wobei  $K_o$  der Ruhedruckbeiwert für Belastung ist. Wie ROWE [5] und andere gezeigt haben, ist bei einer Entlastung der Hinterfüllung und entsprechender Verminderung von  $\sigma_v$  der entsprechende Abfall der Horizontalspannungen  $\sigma_h$  sehr gering. Es wird daher angenommen, daß sich nach dem Übergang des Verdichtungsgerätes mit der Verminderung von  $\sigma_v$  von B nach C die Horizontalspannung  $\sigma_h$  nicht ändert. Erst bei weiterer Entlastung von C nach D mit entsprechender Verminderung von  $\sigma_v$  wird dann ein proportionaler Abfall der Horizontalspannungen in der Form  $\sigma_h = K'_o \cdot \sigma_v$  angenommen, wobei  $K'_o$  der Ruhedruckbeiwert für Entlastung größer als  $K_o$  für Belastung ist. Wird nun  $\sigma_v$  erneut gesteigert, so nimmt man an, daß die Änderung der Horizontalspannung bis zum Punkt E vernachlässigbar klein ist, und von dort an die Beziehung zwischen  $\sigma_v$  und  $\sigma_h$  wieder durch  $\sigma_h = K_o \cdot \sigma_v$  beschrieben werden kann. Die Hysteresisschleife der tatsächlichen Spannungsbeziehung für Ent- und Wiederbelastung, die in Bild 1 gestrichelt eingezeichnet wurde, wird also vereinfacht angenähert durch die vier Geraden EB, BD, DC und DE.

Bild 2 zeigt die Erddruckverteilung, die man bei Anwendung des Zusammenhanges von  $\sigma_v$  und  $\sigma_h$  nach Bild 1 beim Schütten und Verdichten einer Lage der Hinterfüllung einer starren Wand nach Be- und Entlastung durch ein Verdichtungsgerät erhält. Dabei wurde davon ausgegangen, daß ohne den Einfluß des Verdichtungsgerätes der Erddruck gleich dem Erdruchdruck wäre, auf Bild 2 dargestellt durch die gestrichelte Linie 0-4.

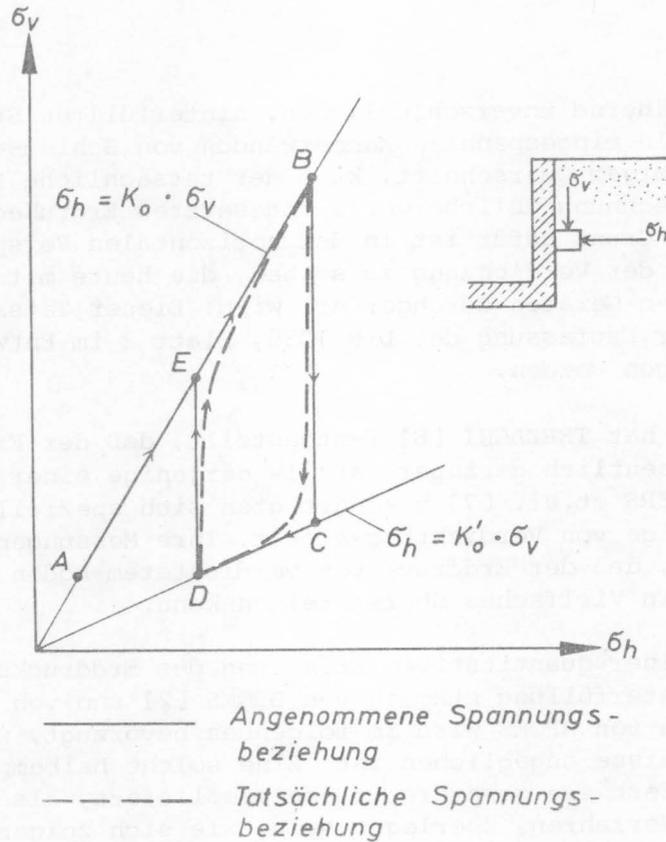


Bild 1 Spannungsbeziehung für ein Bodenelement hinter einer unverschieblichen Stützwand beim Übergang eines Verdichtungsgerätes

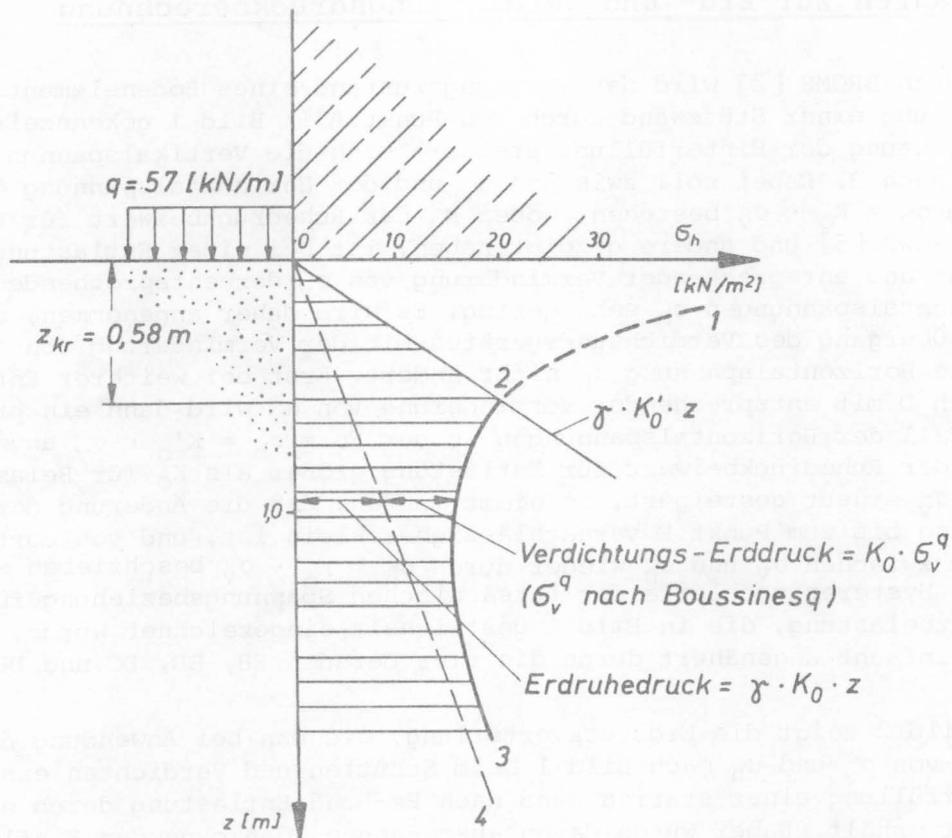


Bild 2 Erddruckverteilung hinter einer unverschieblichen Stützwand nach dem Schütten u. Verdichten einer Lage mit einer 10,2 t schweren Walze

Die Verteilung des Verdichtungserddruckes über die Tiefe ergibt sich über die Beziehung  $\sigma_h = K_0 \cdot \sigma_v$ , wobei die Vertikalspannungen  $\sigma_v$  entsprechend der Theorie von BOUSSINESQ für die Belastung durch das Verdichtungsgerät errechnet werden. Die Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen der Vertikalspannung und der Horizontalspannung für die Belastung durch das Verdichtungsgerät -  $\sigma_h = K_0 \cdot \sigma_v$  - steht an sich im Widerspruch zur BOUSSINESQ'schen Theorie. BROMS ist sich dieses Widerspruchs bewußt; er rechtfertigt diese Verfahrensweise, weil die mit ihr erhaltenen Rechenergebnisse mit experimentellen Ergebnissen aus Erddruckmessungen von WHIFFIN [9] übereinstimmen.

Bei der Berechnung von  $\sigma_v$  nach BOUSSINESQ wurde die Belastung durch das Verdichtungsgerät als Linienlast von einer Länge angenommen, die der Breite der Verdichtungswalze senkrecht zur Stützwand entsprach. Zur Berücksichtigung des dynamischen Lastanteiles von den heute zur Verdichtung fast ausschließlich verwendeten Vibrationsgeräten empfiehlt BROMS, das doppelte Eigengewicht des Gerätes anzusetzen. Für den Fall der Belastung mit einem 10,2 t schweren Verdichtungsgerät ergibt sich dann eine Erddruckverteilung entsprechend der Kurve 1-2-3 in Bild 2. Für den Bereich  $z < z_{kr}$  ist nach dem Übergang des Verdichtungsgerätes die Abnahme der Vertikalspannungen  $\sigma_v$  so groß, daß der Punkt C in Bild 1 unterschritten wird und ein Abfall der Horizontalspannungen  $\sigma_h$  auf den Wert  $\sigma_h = K'_0 \cdot \sigma_v$  eintritt (dargestellt durch Linie 0-2 auf Bild 2). Die kritische Tiefe  $z_{kr}$  ist also dadurch definiert, daß hier der Spannungsabfall gerade bis zum Punkt C in Bild 1 erfolgt. Dabei wurde der Ruhedruckbeiwert für die Entlastung  $K'_0$  zu 2 angenommen. Bei Tiefen  $z > z_{kr}$  bleibt der Abfall der Horizontalspannungen entsprechend Bereich B-C auf Bild 1 vernachlässigbar klein. Die Horizontalspannungen  $\sigma_h$  bleiben also nach dem Übergang des Verdichtungsgerätes voll erhalten und entsprechend mit  $\sigma_h = K_0 \cdot \sigma_v$  der BOUSSINESQ-Verteilung für  $\sigma_v$  (dargestellt durch Kurve 2-3, die in größerer Tiefe asymptotisch in Linie 0-4 für  $\gamma \cdot K_0 \cdot z$  übergeht).

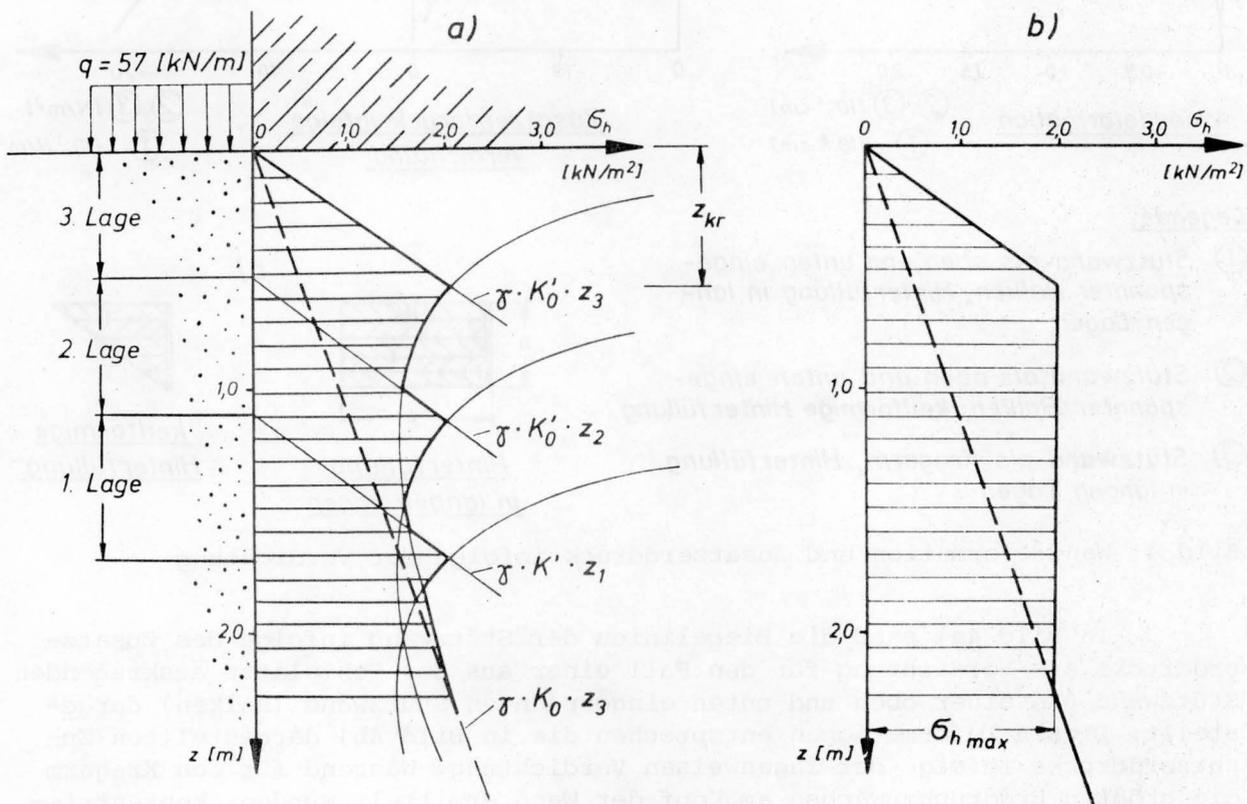
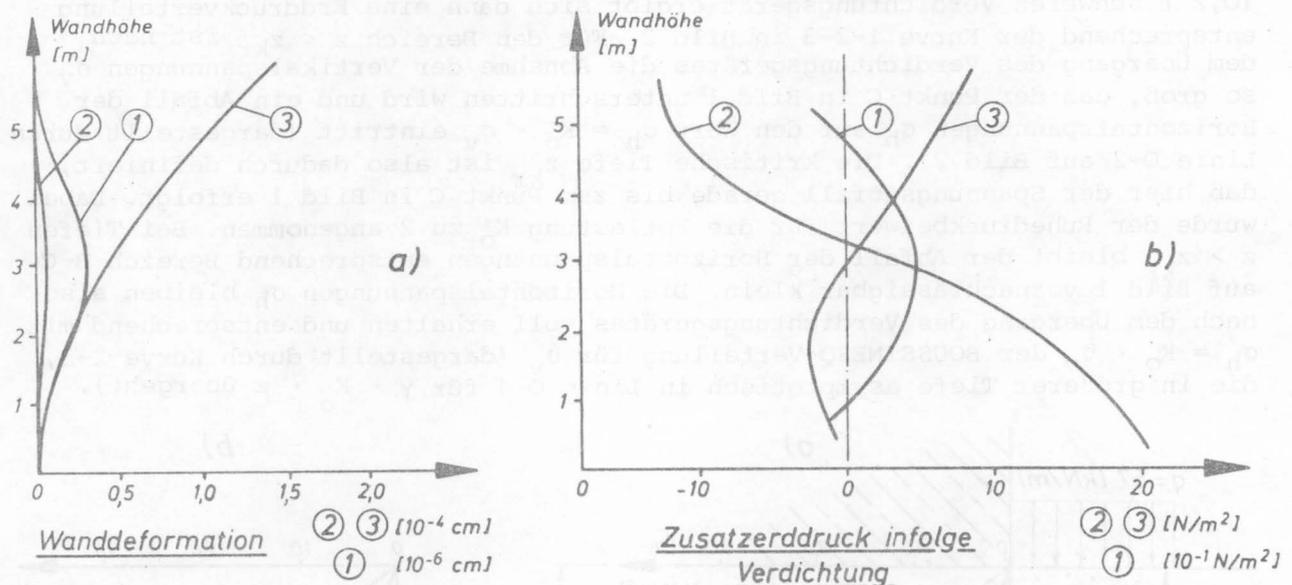


Bild 3 a) Erddruckverteilung hinter einer unverschieblichen Stützwand nach Schütten u. Verdichten von 3 Lagen mit einer 10,2 t schweren Walze  
b) Entspr. Erddruckverteilung für die Bemessung

Bild 3 zeigt links die Erddruckverteilung einer Hinterfüllung nach Schüttung und Verdichtung von 3 Lagen mit einer 10,2 t schweren Walze und rechts die entsprechende von BROMS vorgeschlagene vereinfachte Erddruckverteilung für die Bemessung.

Eine rein theoretische Untersuchung dieses Problems wird in der Arbeit von AGGOUR und BROWN [1] vorgenommen. Mit Hilfe der Methode der finiten Elemente untersuchen sie die Verteilung des Zusatzerddruckes infolge lagenweiser Verdichtung und die dazugehörige Wandverschiebung in Abhängigkeit des für die Wand gewählten statischen Systems, der Wandsteifigkeit, der Geometrie der Hinterfüllung und der elastischen Eigenschaften des Hinterfüllmaterials. Da sie über den grundsätzlichen Unterschied der Verteilung der Zusatzerddrücke und -verformungen (s. Bild 4) infolge Verdichtung der Hinterfüllung von aus der Sohle auskragenden und oben und unten eingespannten Stützwänden Auskunft gibt, wird hier auch über sie berichtet. Dabei ist noch zwischen einer keilförmigen Hinterfüllung (in einer geböschten Baugrube) und einer Hinterfüllung in langen Lagen ( $l/H = 2$ ) unterschieden worden (s. Bild 4c).



Legende:

- ① Stützwand als oben und unten eingespannter Balken, Hinterfüllung in langen Lagen
- ② Stützwand als oben und unten eingespannter Balken, keilförmige Hinterfüllung
- ③ Stützwand als Kragarm, Hinterfüllung in langen Lagen

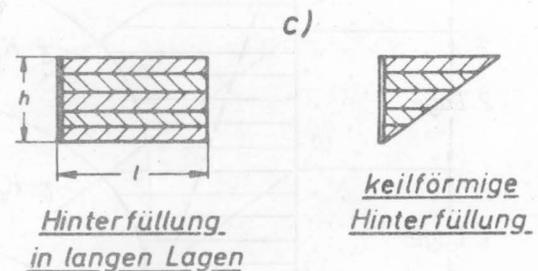


Bild 4 Wanddeformation und Zusatzerddruck infolge der Verdichtung

In Bild 4a) sind die Biegelinien der Stützwand infolge des Zusatzerddrucks aus Verdichtung für den Fall einer aus der Sohlplatte auskragenden Stützwand und einer oben und unten eingespannten Stützwand (Balken) dargestellt. Diesen Deformationen entsprechen die in Bild 4b) dargestellten Zusatzerddrücke infolge der lagenweisen Verdichtung. Während für den Kragarm die größten Erddruckzuwächse am Kopf der Wand ermittelt wurden, konzentrieren sich diese beim Balken und einer Hinterfüllung in langen Lagen in der Mitte der Wand und sind dort erheblich kleiner als die Maximalwerte beim

Kragarm. (Man beachte die unterschiedlichen Maßstäbe des Diagramms).

Ein Vergleich der Verfahren nach AGGOUR u. BROWN [1] und BROMS [2] ergibt, daß [1] lediglich für den Fall des Kragarms mit den von BROMS [2] angegebenen Erddrücken qualitativ übereinstimmt. (Möglicherweise hat BROMS sein Verfahren an Erddruckmessungen hinter Kragarmen über eine geeignete Wahl des Ruhedruckbeiwertes für die Entlastung  $K'_0$  angepaßt oder die Unterschiede, die sich theoretisch gemäß Bild 4 für die unterschiedlichen Lagerungs- und Hinterfüllungsfälle ergeben, sind in der Praxis nicht oder nicht so deutlich vorhanden.) Eine Klärung der Frage, welches der beiden vorgeschlagenen Modelle der Wirklichkeit am nächsten kommt, ist daher nur über Erddruckmessungen an Stützbauwerken möglich.

### 3. Vergleich von Rechenergebnissen mit eigenen Erddruckmessungen

Im Rahmen eines umfassenderen Meßprogramms zur Erforschung der Erddruckentwicklung an Stützbauwerken in Abhängigkeit von den jahreszeitlichen Temperaturbewegungen der Stützwand [6] wurden am Schiffshebewerk Lüneburg Erddruckmessungen auch schon während des Hinterfüllvorganges durchgeführt. Zur Erddruckmessung wurden 2 Stützwandquerschnitte mit unterschiedlicher Geometrie mit Meßgebern ausgerüstet. Auf einer Stützwand nach Bild 5 wurden 24 Geber installiert, die in 8 Reihen zu 4 bzw. 2 Gebern über der Höhe der Wand verteilt sind; auf einer Stützwand nach Bild 6 wurden 26 Geber über 6 Reihen verteilt eingebaut.

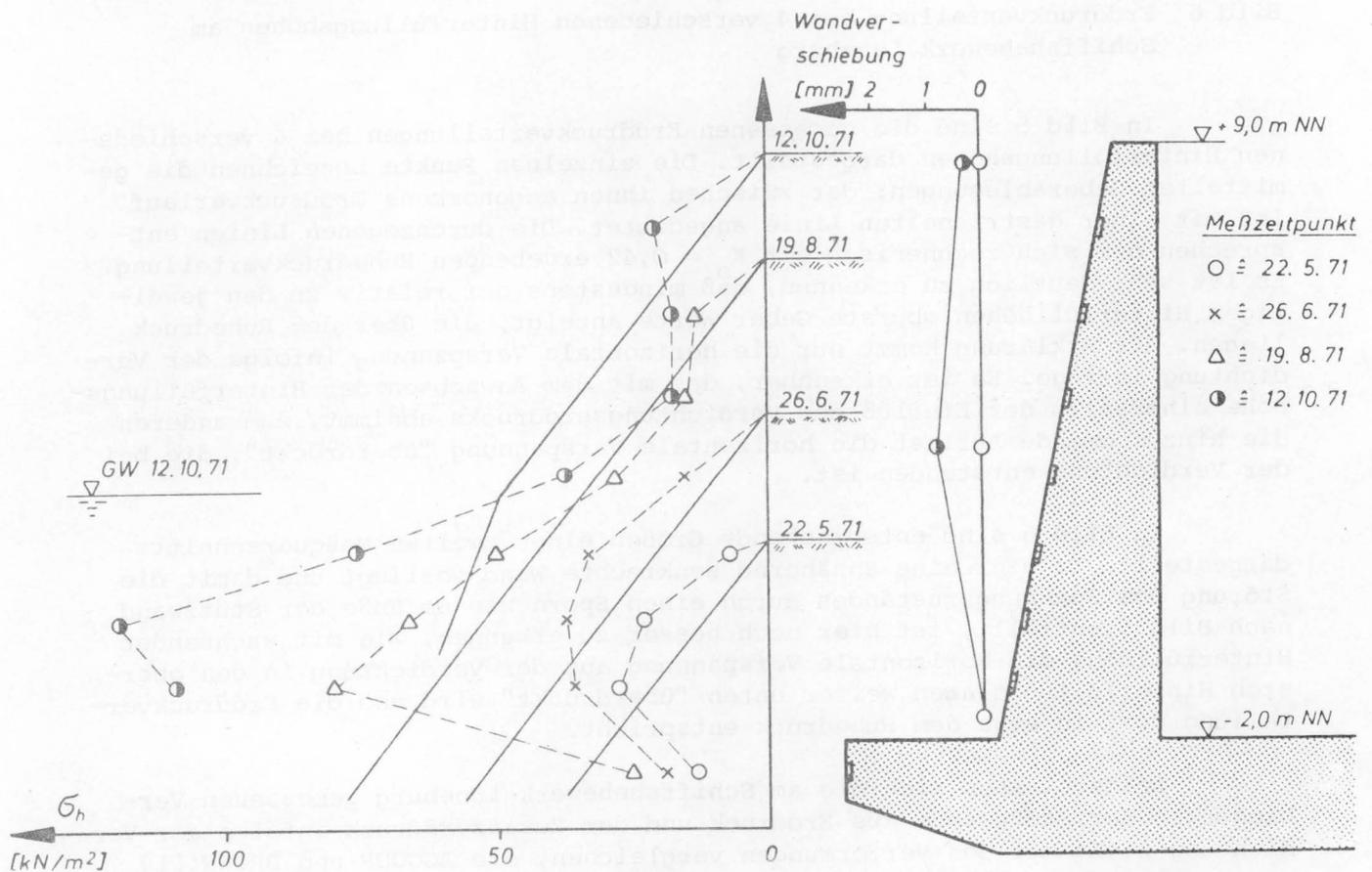


Bild 5 Erddruckverteilungen bei 4 verschiedenen Hinterfüllungshöhen am Schiffshebewerk Lüneburg

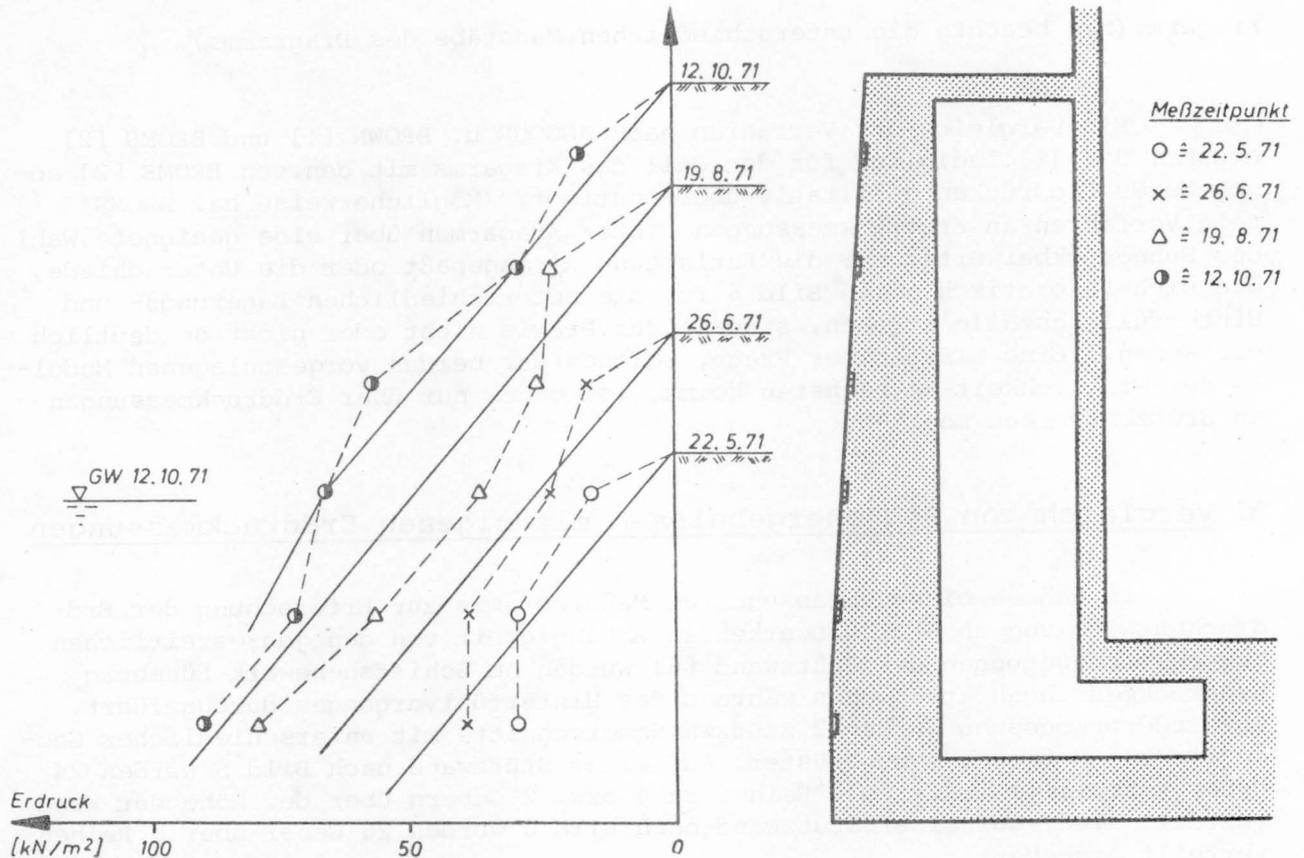


Bild 6 Erddruckverteilung bei 4 verschiedenen Hinterfüllungshöhen am Schiffshebewerk Lüneburg

In Bild 5 sind die gemessenen Erddruckverteilungen bei 4 verschiedenen Hinterfüllungshöhen dargestellt. Die einzelnen Punkte bezeichnen die gemittelten Geberablesungen; der zwischen ihnen angenommene Erddruckverlauf ist mit einer gestrichelten Linie angedeutet. Die durchgezogenen Linien entsprechen der sich rechnerisch mit  $K_0 = 0,42$  ergebenden Ruhedruckverteilung. Es ist sehr deutlich zu erkennen, daß mindestens der relativ zu den jeweiligen Hinterfüllhöhen oberste Geber Werte anzeigt, die über dem Ruhedruck liegen. Als Erklärung kommt nur die horizontale Verspannung infolge der Verdichtung infrage. Es ist erkennbar, daß mit dem Anwachsen der Hinterfüllungshöhe einerseits der Einfluß des Verdichtungserddrucks abnimmt, zum anderen die hinzukommende Auflast die horizontale Verspannung "überdrückt", die bei der Verdichtung entstanden ist.

In Bild 6 sind entsprechende Größen eines zweiten Meßquerschnitts dargestellt. Da hier eine annähernd senkrechte Wand vorliegt und damit die Störung des Spannungszustandes durch einen Sporn wie am Fuße der Stützwand nach Bild 5 entfällt, ist hier noch besser zu erkennen, wie mit wachsender Hinterfüllhöhe die horizontale Verspannung aus der Verdichtung in den obersten Hinterfüllungslagen weiter unten "überdrückt" wird und die Erddruckverteilung dort in etwa dem Ruhedruck entspricht.

Leider lassen sich die am Schiffshebewerk Lüneburg gemessenen Verdichtungen der Stützwände aus Erddruck und dem Zusatzerddruck infolge der Verdichtung nicht mit den Verformungen vergleichen, die AGGOUR und BROWN [1] für den Fall des Kragarmes ermittelt haben, weil sie in Bild 4 a) lediglich den Verformungsanteil infolge der Verdichtung angeben. Auch ein Vergleich der am Schiffshebewerk gemessenen Erddruckverteilungen mit den Rechenergeb-

nissen von AGGOUR und BROWN ist nur qualitativ möglich. Es stimmen die in Bild 4 b) dargestellten Zusatzerdrücke für den Kragarm recht gut mit denen an den beiden obersten Gebern der jeweiligen Schütthöhe gemessenen Überschreitungen des Ruhedrucks (siehe Bilder 5 und 6) überein. Die von AGGOUR und BROWN für den Balken ermittelten Zusatzerdrücke lassen jedoch an der Wirklichkeitsnähe dieses Ansatzes erhebliche Zweifel aufkommen, da negative Zusatzerdrücke am Kopf der Wand - d.h. ein Abfall des Erddrucks unter den Ruhedruck ausgerechnet neben einem unverschieblichen Lager - sicherlich nicht den wirklichen Verhältnissen entsprechen.

Die gemessenen Bewegungen der Wand aus Erddruck und Verdichtungsdruck waren mit etwa 0,1 % der Wandhöhe (siehe Bild 5) sehr klein, so daß es offensichtlich zulässig ist, die Wand als unverschieblich anzunehmen (siehe [4]). Ermittelt man entsprechend dem Vorschlag von BROMS den Erddruck gegen eine unverschiebliche Wand für die kritische Tiefe  $z_{kr}$  für die bei der Hinterfüllung in Lüneburg eingesetzte 8 t schwere Vibrationswalze, so erhält man  $25 \text{ KN/m}^2$ ; die Meßwerte der Bilder 5 und 6 stimmen mit diesem Wert im Rahmen der überhaupt erreichbaren Genauigkeit gut überein. (Bei der Bewertung der gemessenen Erddrücke für diesen Vergleich ist zu beachten, daß die lineare Verbindung der Meßpunkte nur angenommen ist und der tatsächliche Erddruck z.B. für die niedrigsten Hinterfüllhöhen zwischen den beiden relativ zu ihr obersten Geberwerte auch größer sein kann).

Als Schlußfolgerung wird empfohlen, bei Berechnungen des Verdichtungsdruckes das Verfahren von BROMS [2] zu verwenden, sofern für den speziellen Fall keine Erfahrungswerte aus Messungen - wie sie die deutschen U-Bahn-Baubehörden besitzen [9] - vorliegen.

#### 4. Schrifttum

- [1] AGGOUR u. BROWN : The prediction of earth pressure on retaining walls due to compaction. Geotechnique 24/1974, Nr. 4, S.489
- [2] BROMS : Lateral earth pressures due to compaction of cohesionless soils. Proc. 4th Conf. on Soil Mech., 1971, Budapest
- [3] DIN 1055, Blatt 2 : Erläuterungen, Seite 17  
(Entwurf)
- [4] NEUMEUER : Erddruck u. Erdwiderstand. Hamburg, 1960, S.20
- [5] ROWE : A stress-strain Theory for cohesionless soil with applications to earth pressure at rest and moving walls. Geotechnique 4/5 (1954/55), S.70
- [6] SCHUPPENER : Erddruckmessungen am Schiffshebewerk Lüneburg. Mitt.Bl. der BAW, Nr. 37/1975
- [7] SOWERS u. a. : The residual lateral pressures produced by compacting soils. Proc. 4th JCSMFE, 1957, S.243
- [8] TERZAGHI : Large retaining-wall tests. I. Pressure of dry sand. Engg. News-Record 112/1934, S.136

[9] WEISSENBACH : Empfehlungen des Arbeitskreises "Baugruben" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. Die Bautechnik 6 u.7/1972, S.192

[10] WHIFFIN : The pressures generated in soil by compaction equipment. Symp.on Dynamic Testing of Soils. Amer.Soc. Test.Mat.Spec. Techn.Publ. No.156, S.186.

Die gesondert berechneten Werte für den Erddruck und den Erddruckwinkel sind in den Abbildungen 1 bis 4 dargestellt. Die Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen für einen Erddruckwinkel von  $\alpha = 0^\circ$ . Die Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse für einen Erddruckwinkel von  $\alpha = 10^\circ$ . Die Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse für einen Erddruckwinkel von  $\alpha = 20^\circ$ . Die Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse für einen Erddruckwinkel von  $\alpha = 30^\circ$ . Die Abbildungen 1 bis 4 zeigen die Ergebnisse der Berechnungen für einen Erddruckwinkel von  $\alpha = 0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  und  $30^\circ$ . Die Abbildungen 1 bis 4 zeigen die Ergebnisse der Berechnungen für einen Erddruckwinkel von  $\alpha = 0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  und  $30^\circ$ .

Als Berechnungsergebnis sind in den Abbildungen 1 bis 4 die Werte für den Erddruck und den Erddruckwinkel dargestellt. Die Abbildungen 1 bis 4 zeigen die Ergebnisse der Berechnungen für einen Erddruckwinkel von  $\alpha = 0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  und  $30^\circ$ . Die Abbildungen 1 bis 4 zeigen die Ergebnisse der Berechnungen für einen Erddruckwinkel von  $\alpha = 0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  und  $30^\circ$ .

#### 4. Bibliographie

[1] AGGAR, S. BROWN : The prediction of earth pressure on retaining walls due to compaction. Geotechnique 24/1974, Nr. 4, S.187

[2] BROWN : Lateral earth pressures due to compaction of cohesionless soils. Proc. 4th Conf. on Soil Mech., 1971, Budapest

[3] DIN 1055, Blatt 3 : Erdanforderungen, Seite 17 (Bauwerk)

[4] HUNTER : Erddruck u. Erddruckwinkel. Hamburg, 1980, S.10

[5] ROWE : A stress-strain theory for cohesionless soils with applications to earth pressure at rest and moving walls. Geotechnique 4/5 (1954/55), S.10

[6] SCHUPPENER : Erddruckmessungen an Schüttelbehältern. Mitt. Bl. der BAW Nr. 37/1975

[7] BOWERS, L. A. : The resulting lateral pressures produced by compacting soils. Proc. 4th ISMFE, 1957, S.124

[8] ERDMANN : Large retaining walls. L. Pressures of dry sand. Engg. News-Record 112/1914, S.134