

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Franke, Eberhard; Bernhard, K.

Erddruckansatz bei trogförmigen Bauwerken und Wechselwirkung zwischen Erd- und Sohldruck am Beispiel des Schiffshebewerkes Lüneburg

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103036>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Franke, Eberhard; Bernhard, K. (1972): Erddruckansatz bei trogförmigen Bauwerken und Wechselwirkung zwischen Erd- und Sohldruck am Beispiel des Schiffshebewerkes Lüneburg. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 32. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 65-74.

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.



Dr.-Ing. E. Franke und Dipl.-Ing. K. Bernhard

**Erddruckansatz bei trogförmigen Bauwerken und Wechselwirkung
zwischen Erd- und Sohldruck am Beispiel des Schiffshebwerkes
Lüneburg**

**Computation of earth pressure at trough-type constructions and interaction
between earth pressure and bottom pressure described by the example of
the ship-lift of Lüneburg**

Zusammenfassung

Schleusen, Trockendocks und Schiffshebwerke haben U-Rahmenform. Während des Baufortschrittes, des Betriebes und des Wechsels der Temperatur, besonders zwischen Sommer und Winter, bewegen sich die Seitenwände des U-Rahmens gegen die Hinterfüllung und von ihr weg. Es bestand die Aufgabe, die Abhängigkeit zwischen Erddruck und Seitenwandbewegung abzuschätzen. Eine Lösung wird beschrieben für das Beispiel des Schiffshebwerkes Lüneburg des Elbe-Seiten-Kanals.

Summary

Locks, graving docks and ship-lift buildings have an U-frameform. During building progress, operating and change of temperature, especially between summer and winter, the sidewalls of the U-frame are moving against the backfill earth and away from it. It was the task to make an estimation for the interdependence between earth pressure and side wall movement. A solution is shown for the example of the ship-lift of Lüneburg in the Elbe-Seiten-Kanal.

INHALT

	Seite
1. Einleitung	67
2. Bauvorgang, Lastfälle und statisches System der Hebeportale	68
3. Bisherige Kenntnisse über den Einfluß von Wandbewegungen auf Größe und Verteilung von Erddrücken	69
4. Verfahren zur Berücksichtigung der Wandbewegungen bei der Ermittlung der Erddrücke auf die Seitenwände der Hebeportale	71
5. Kritische Betrachtung des angewandten Verfahrens	73
6. Bauwerksmessungen	74
7. Literatur-Verzeichnis	74

1. Einleitung

Mit einem Gefälle von 38 m zwischen Ober- und Unterwasser und einer Konstruktionshöhe von über 50 m sprengt das Abstiegsbauwerk Lüneburg des Elbe-Seitenkanals die gewohnten Größenordnungen. Einen Eindruck davon vermittelt die Photomontage des Bauwerkes auf Bild 1. Man erkennt, daß es sich um ein Doppelhebwerk handelt.

Wandbewegungen und damit Erddrücke stehen in Wechselwirkung mit den Verformungen der Bauwerksohle bzw. mit der Sohldruckverteilung. Da das Zusammenwirken von Erd- und Sohldrücken bei trogförmigen Bauwerken von allgemeinerem Interesse ist, wird nachfolgend am Beispiel der Hebeportale beschrieben, auf welche Weise die Erddruckermittlung ausgeführt wurde.

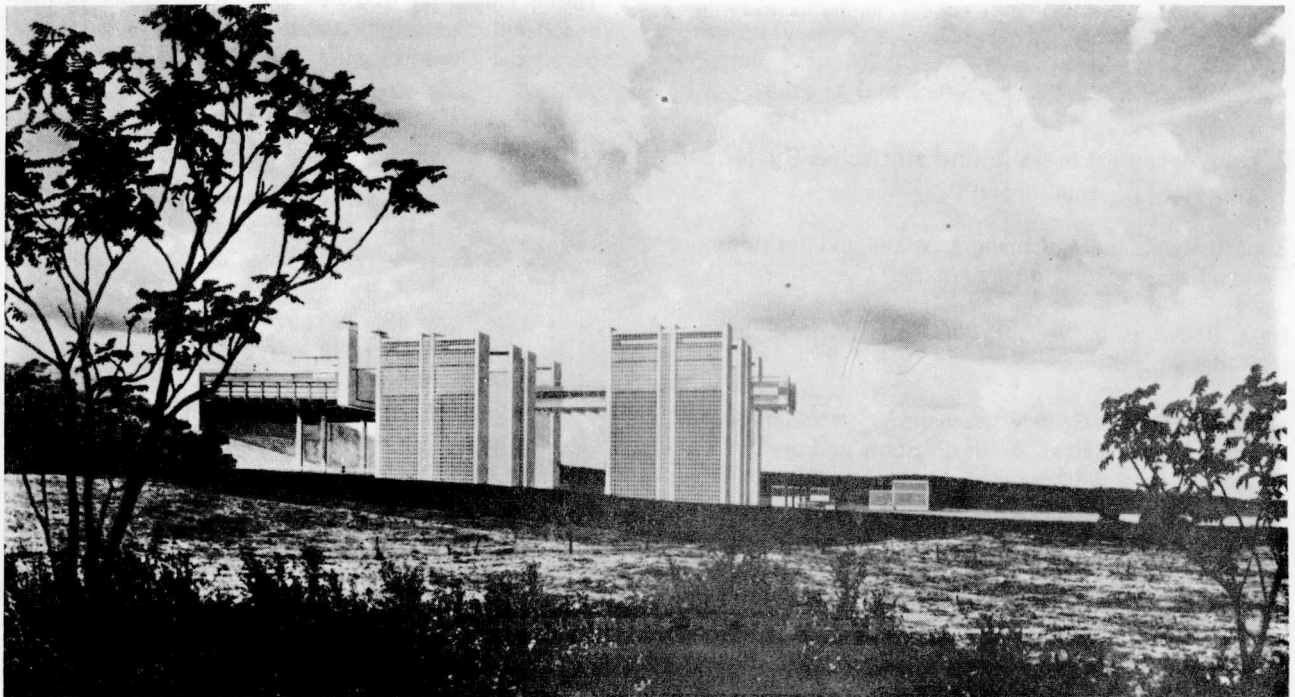


Abb. 1 Photomontage des Schiffshebewerkes Lüneburg

Die Stahltröge, in denen die Schiffe befördert werden, sind 110 m lang. Sie hängen zwischen je 2 Hebeportalen. Ihr Gewicht wird durch Gegengewichte ausgeglichen, die in den seitlichen Stielen der Hebeportale, im folgenden "Türme" genannt, auf und nieder gleiten. — Auf Bild 2 ist ein schematischer Querschnitt durch eines der Hebeportale gezeichnet.

Bei den Berechnungen für das Hebwerk erwies sich aus der Sicht des Bodenmechanikers der Erddruckansatz auf die Unterteile der Türme als das schwierigste Problem, weil sich die Türme je nach den verschiedenen Belastungszuständen auf die 14 m hohe Hinterfüllung zu oder von ihr fortbewegen und es auf der Grundlage des derzeitigen Kenntnisstandes praktisch unmöglich ist, den Erddruck in Abhängigkeit von den Bewegungen quantitativ darzustellen, wobei sogar noch die Bewegungsfolge berücksichtigt werden müßte.

Andererseits besteht jedoch die Notwendigkeit, die Erddrücke ihrer Größe und Verteilung nach möglichst zutreffend anzugeben, weil sie den Momentenverlauf in den Seitenwänden und der Sohle stark beeinflussen. Auf Bild 3 ist ein Beispiel aus der statischen Berechnung der Hebeportale aufgetragen, das den Einfluß des Erddruckes auf den Momentenverlauf in Sohle und Wänden verdeutlicht.

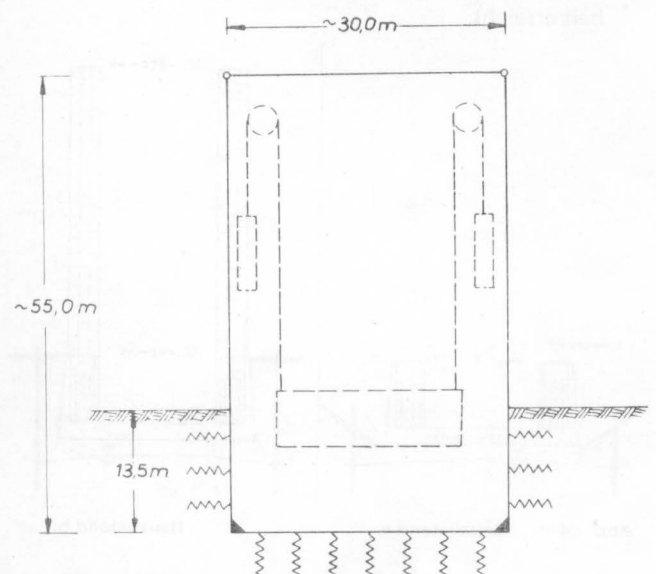


Abb. 2 Querschnitt eines Hebeportales (Systemskizze)

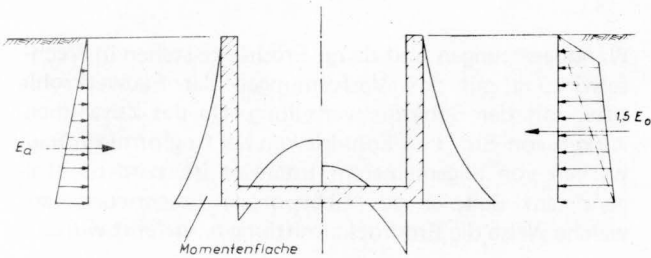


Abb. 3 Einfluß des Erddruckes auf die Momentenverteilung bei einem trogförmigen Bauwerk – Beispiel aus den statischen Berechnungen für das Hebewerk Lüneburg, links bei aktivem Erddruck (E_a), rechts bei 1,5-fachem Ruhedruck ($1,5 E_o$)

2. Bauvorgang, Lastfälle und statisches System der Hebeportale

Zunächst werden Bauvorgang, Lastfälle und das statische System der Hebeportale kurz erläutert.

Der Bauvorgang verläuft in folgenden Schritten (s. Bilder 4 bis 6):

- In der durch Grundwasserhaltung trockengelegten Baugrube werden zunächst die Sohle und unmittelbar anschließend die Türme bis zur Kote + 9,0 m NN betoniert. (Dieser Bauteil bildet eine Betonwanne, in welcher der stählerne Hebewerkstrog in der unteren Stellung aufgenommen wird; er wird im folgenden mit "Trogwanne" bezeichnet). Dann werden die Gegengewichte des Stahltroges in die Türme eingesetzt.
- Die Baugrube wird bis zur Kote + 9 m NN hinterfüllt, und die Türme werden in Gleitbauweise bis zur endgültigen Höhe auf Kote + 51,0 m NN hochgezogen. In diesem Zustand ist die erforderliche Auftriebssicherheit erreicht.

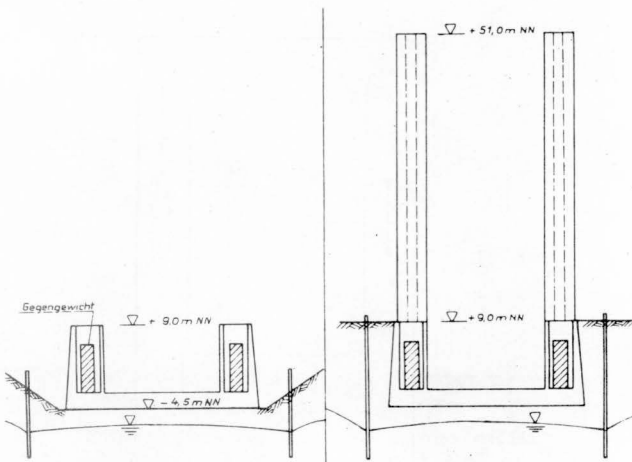


Abb. 4 Bauzustand a: 1. Betonieren der Sohle und der Türme bis Kote + 9,0 m NN 2. Einstellen der Gegengewichte des Stahltroges
Bauzustand b: 1. Hinterfüllen der Baugrube bis Kote + 9,0 m NN 2. Betonieren der Türme bis Kote + 51,0 m NN

- Die Grundwasserhaltung wird abgestellt. Der Wasserspiegel kann bis in Oberflächennähe ansteigen. Bei den Berechnungen wurden die beiden extremen Wasserspiegellagen + 3,5 m NN und + 9,0 m NN untersucht.

- Der Stahlstrog wird in der Trogwanne montiert, und die Türme werden anschließend am Kopf durch eine Brücke verbunden.

- Treppen, Podeste und Wabenfenster werden in die Türme eingesetzt und der Strog wird an die Türme angehängt und gefüllt; dabei wird der Kraftangriffspunkt der Gegengewichte und des Troges verändert.

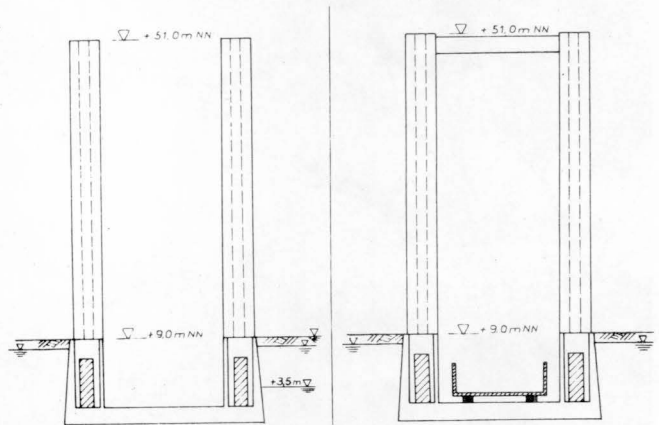


Abb. 5 Bauzustand c: Abstellen der Grundwasserhaltung
Bauzustand d: 1. Montage des Stahltroges 2. Montage der Verbindungsbrücke

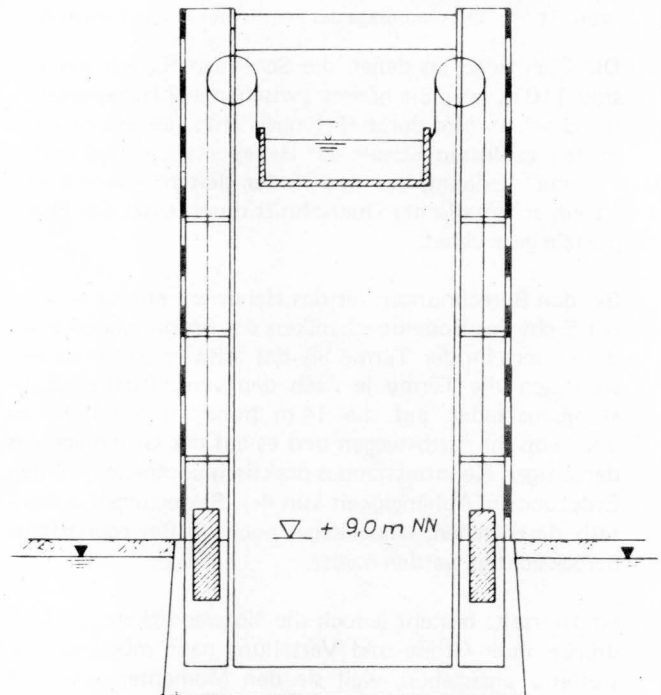


Abb. 6 Bauzustand e: 1. Einsetzen der Podeste, Treppen und Wabenfenster 2. Anhängen des Stahltroges an den Turm 3. Füllen des Troges

Zu den Lastfällen, die sich aus dem eben geschilderten Bauvorgang ergeben, kommen noch diejenigen aus Windbelastung, Temperaturdifferenzen, Schiffsstoß und Kriech- und Schwindvorgängen hinzu.

Mit dem Baufortschritt ändert sich das statische System, an dem die Schnittkräfte des Hebeportales zu berechnen sind (s. Bild 7):

Zunächst besteht das System aus einem Trog, dessen Sohle elastisch gebettet ist (System A).

Nach der Bauwerkshinterfüllung kommt eine seitliche Bettung durch den Erddruck der Hinterfüllung im unteren Bereich der Türme hinzu. Der Erddruck, der sich bei der Hinterfüllung eingestellt hat, bleibt nämlich nicht konstant. Er ändert sich, sobald sich die Türme bei bestimmten Lastfällen auf die Hinterfüllung zu oder von dieser fortbewegen. — Bewegungen gegen das Erdreich treten z.B. auf, wenn die Türme über die Kote + 9,0 m NN hochgezogen werden, wenn der Wasserspiegel nach Abstellen der Grundwasserhaltung ansteigt und wenn der Trog an die Türme angehängt wird. Bewegungen vom Erdreich fort kommen z.B. zustande, wenn der Stahlrog in der Trogwanne montiert wird, bei Windbelastung und bei Kontraktion der Trogwannensole infolge Temperaturabfall im Winter oder infolge Betonschwinden. — Auf Bild 7 ist die seitliche Bettung in Form des veränderlichen Erddruckes durch Federn charakterisiert, um ihre Verschiebungsabhängigkeit hervorzuheben (System B). Dabei ist zu beachten, daß die seitliche Bettung im Gegensatz zur Bettung der Bauwerksohle nicht elastisch ist.

Schließlich erfährt das statische System eine letzte Änderung, wenn die Verbindungsbrücke am Kopf der Türme eingebaut wird. Es entsteht dann ein geschlossener Rahmen. Da die Brücke im Verhältnis zu den Türmen biegeweich ist, kann ihr Anschluß an die Türme als gelenkig betrachtet werden (System C).

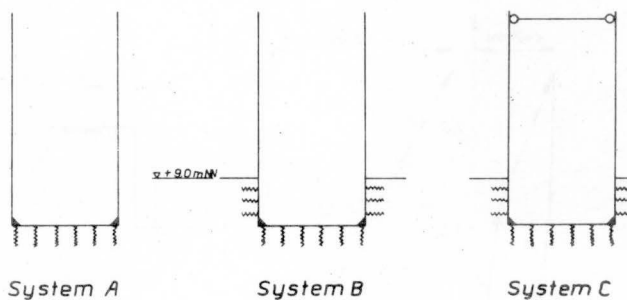


Abb. 7 Veränderung des statischen Systems der Hebeportale mit den Bauzuständen

Für die rechnerische Erfassung der elastischen Bettung in der Sohlfuge, d.h. für die Berechnung der Sohlruckverteilung, stehen mit dem Steifzahl- und dem verbesserten Bettungszifferverfahren gebräuchliche Verfahren zur Verfügung. Voraussetzung für ihre Anwendung ist die Kenntnis der Zusammendrückbarkeit des Baugrundes unterhalb der Bauwerksohle, die in dem vorliegenden Fall durch Labor- und Feldversuche mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden konnte.

Die Abschätzung der seitlichen Bodenreaktion ist dagegen viel problematischer, da hierzu der Zusammenhang zwischen Wandbewegung einerseits und Größe und Verteilung der Erddrücke andererseits bekannt sein müßte. Dabei besteht die besondere Schwierigkeit, daß der Erddruck den Wandbewegungen — anders als bei elastischen Bettungsberechnungen — nicht eindeutig zugeordnet werden kann. Vielmehr ist bei wechselnder Verschiebungsrichtung, wie sie hier vorkommt, der zustandekommende Erddruck jeweils vom letzten, vorher erreichten Erddruckzustand abhängig. Neben der Größe und der Art der Wandbewegungen ist also auch deren **Aufeinanderfolge** von Einfluß auf die Erddruckänderungen. Dabei wird unter Art der Wandbewegung die Drehpunkt-lage und der Drehsinn der Bewegung verstanden (s. Bild 8).

Um die in dem vorliegenden Fall gewählte Verfahrensweise zur Abschätzung der Erddruckänderungen infolge Wandbewegungen zu begründen, werden nachstehend die wichtigsten bisherigen Kenntnisse über die Zusammenhänge zwischen Wandbewegung und Erddruck mitgeteilt.

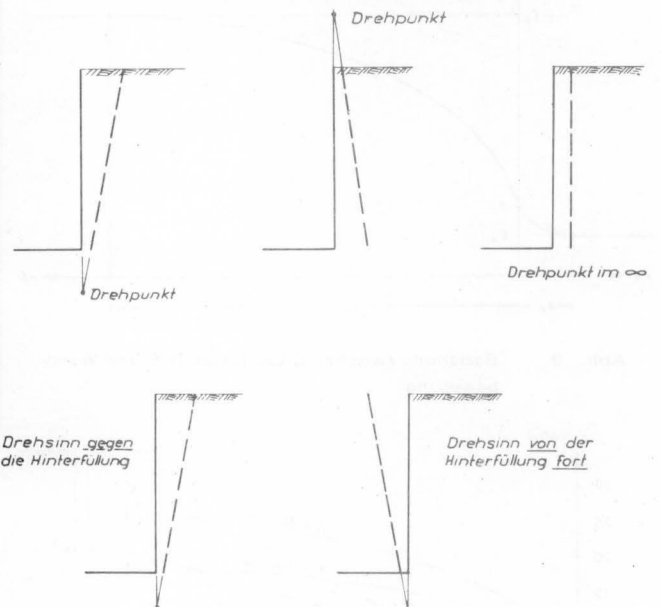


Abb. 8 Beispiele für Drehpunkt-lage und Drehsinn von Wandbewegungen

3. Bisherige Kenntnisse über den Einfluß von Wandbewegungen auf Größe und Verteilung von Erddrücken

Über den Einfluß der Größe und des Drehsinns der Wandbewegung auf den Erddruck ist folgendes bekannt (s. Bild 9):

Alle Wandbewegungen gegen das Erdreich führen zu einer Erhöhung des Erddruckes, bis der obere Grenzwert — der sog. passive Erddruck E_p — erreicht ist, und alle Bewegungen vom Erdreich fort bewirken einen Abbau des Erddruckes bis zum unteren Grenzwert, dem sog. aktiven Erddruck E_a . Der Erddruck auf eine unverschiebliche Wand liegt zwischen den Grenzwerten E_a und E_p und wird als Ruhedruck E_0 bezeichnet. Der Ver-

lauf der Erddruck-Verschiebungs-Beziehung ist in unmittelbarer Nachbarschaft von E_0 besonders steil. Dies gilt vornehmlich für dicht gelagerte Hinterfüllungen. — Die horizontale Wandbewegung s_a , die — vom Ruhedruckzustand ausgehend — den Abbau des Erddruckes auf den unteren Grenzwert E_a bewirkt, ist um etwa das 10-fache kleiner als die Wandbewegung s_p , mit der der Erddruck auf den oberen Grenzwert E_p anwächst. Es gibt eine Reihe von Versuchsergebnissen, die deutlich zeigen, daß die absolute Größe von s_a und s_p von der Lagerungsdichte der Hinterfüllung, der Hinterfüllhöhe und der Lage des Wanddrehpunktes abhängig ist. Auf Bild 10 ist z.B. der Einfluß der Hinterfüllung und der Lagerungsdichte auf s_p zu erkennen. Der Einfluß der

Lagerungsdichte auf s_p ist besonders stark. — Bezogen auf die Hinterfüllhöhe h liegen die bisher gefundenen Werte für s_a etwa zwischen $\frac{h}{500}$ und $\frac{h}{5000}$ und für s_p zwischen $\frac{h}{10}$ und $\frac{h}{100}$.

Die Verteilung des Erddruckes wird vorwiegend durch die Lage des Wand-Drehpunktes bestimmt. Bild 11 zeigt die Erddruckverteilungen für 3 Bewegungsfälle einer starren Wand im aktiven und passiven Grenz Zustand. Die dreieckförmige Verteilung für den 1. Bewegungsfall, der auch als "klassischer Erddruckfall" bezeichnet wird, hat sich in zahlreichen Modell- und Naturversuchen für gebräuchliche Wandhöhen bestätigt. Die Verteilungen für die beiden anderen Bewegungsfälle beruhen vorwiegend auf theoretischen Untersuchungen (s. [1] und [2]); sie können nur als qualitativ gesichert angesehen werden.

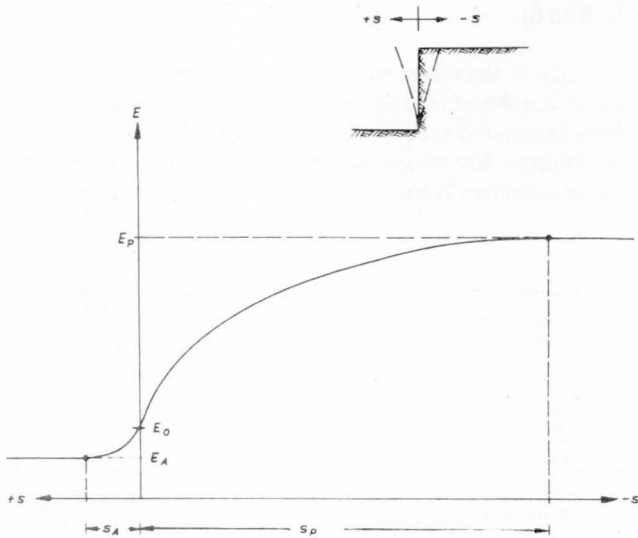
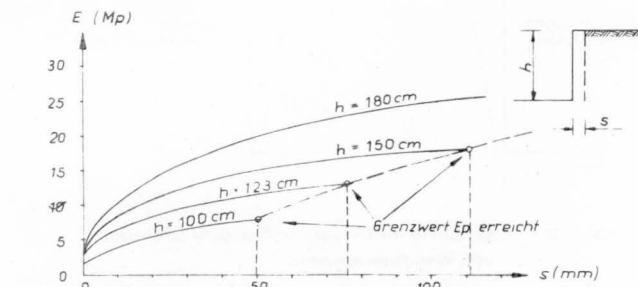


Abb. 9 Beziehung zwischen Erddruckgröße E und Wandbewegung

Art der Bewegung	Verteilung von E_{Ah}	Verteilung von E_{Ph}
Drehung um Wandfußpunkt		
Parallelverschiebung		
Drehung um Wandkopfpunkt		

Abb. 11 Einfluß der Wandbewegung auf die Erddruckverteilung im Grenz Zustand (nach [2])



Experimentelle Ergebnisse über den Einfluß der Hinterfüllhöhe auf den Verschiebungsweg s_p (nach [7])

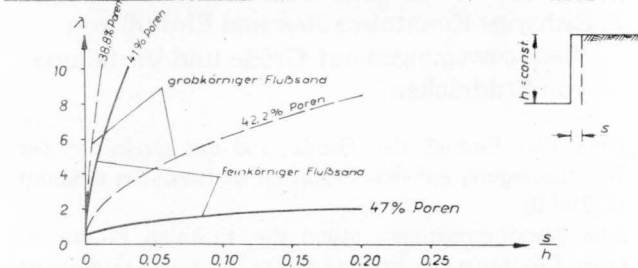


Abb. 10 Experimentelle Ergebnisse über den Einfluß der Hinterfüllhöhe auf den Verschiebungsweg (nach [7])
Experimentelle Ergebnisse über den Einfluß der Lagerungsdichte auf die Erddruck-Verschiebungskurve (nach [7])

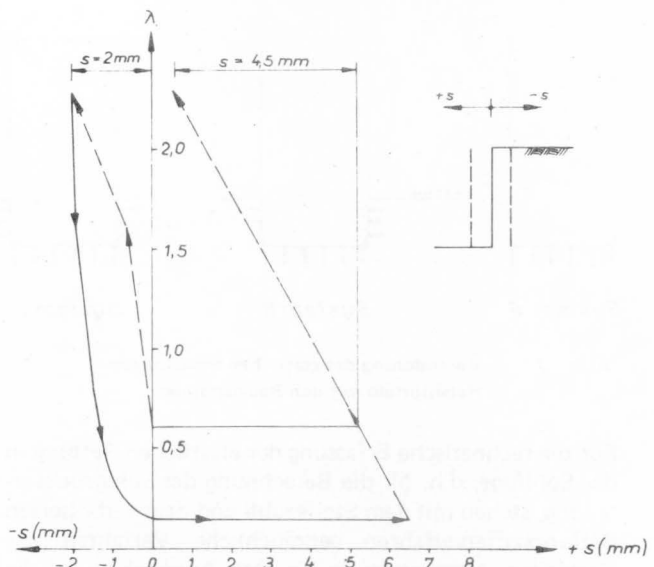


Abb. 12 Einfluß der Bewegungsfolge auf die Erddruck-Wandbewegungs-Kurve nach Versuchen von Terzaghi [3]

Die bisherigen Kenntnisse über den Einfluß der Bewegungsfolge der Wand auf Größe und Verteilung des Erddruckes sind sehr gering. Sichergestellt ist nur die schon vorstehend getroffene Aussage, daß Erddruckgröße und Wandbewegung nicht eindeutig einander zugeordnet werden können. Ein von Terzaghi ausgeführter Modellversuch [3] zeigt dies sehr deutlich (s. Bild 12): Für eine gleichgroße Erddrucksteigerung waren Wandbewegungen erforderlich, die um mehr als 100% voneinander abwichen.

Sehr beachtenswert sind in diesem Zusammenhang Erddruckmessungen an 3 Schleusen mit bis zu 26,5 m hohen Wänden in Rußland [4]. Die Wände werden bei jeder Schleusenfüllung gegen das Erdreich gedrückt. Außerdem bewirken Längenänderungen der Sohle infolge hoher Temperaturdifferenzen zwischen Sommer und Winter Wandbewegungen. Die Auswirkungen dieser Bewegungen auf die Größe des Erddruckes sind aus den Beispielen auf Bild 13 deutlich zu erkennen. Bild 13a zeigt, daß sich der Schwerpunkt der Erddruckfläche bei anwachsendem Erddruck nach oben verschiebt. Besonders interessant und wichtig ist jedoch die Auftragung des Erddruckes in Abhängigkeit von der Zeit (s. Bild 14): Der Erddruck nimmt zu vergleichbaren Jahreszeiten ständig zu, obwohl nicht anzunehmen ist, daß auch die Wandbewegungen im Laufe der Zeit größer geworden sind. (Bewegungsmessungen sind an den Schleusen leider nicht ausgeführt worden). — Der zeitliche Anstieg des Erddruckes deutet darauf hin, daß die Hinterfüllung mit zunehmender Lastwechselzahl ihre Eigenschaften ändert. Ohde [2] spricht in diesem Zusammenhang von einer "Härtung" des Bodens. Wiendiek [5] erklärt den gleichen Effekt auf der Grundlage von Modellversuchen in folgender Weise: Die Struktur von Sanden wandelt sich unter Belastung in der Weise, daß die Anzahl der Kontaktflächennormalen in der Belastungsrichtung ansteigt, auf Kosten derjenigen in den dazu orthogonalen Richtungen. Damit wächst der Verformungswiderstand in der Belastungsrichtung. — Es gibt bisher kein Verfahren, mit dem derartige Erddruck-erhöhungen infolge sich wiederholender Wandbewegungen berücksichtigt werden können. — Bei Bild 14 sei die Aufmerksamkeit noch auf ein weiteres wichtiges Meßergebnis gelenkt: Der Erddruck war bei allen 3 Schleusen unmittelbar nach Hinterfüllung größer als der mit $\lambda_0 = 0,45$ berechnete Ruhedruck.

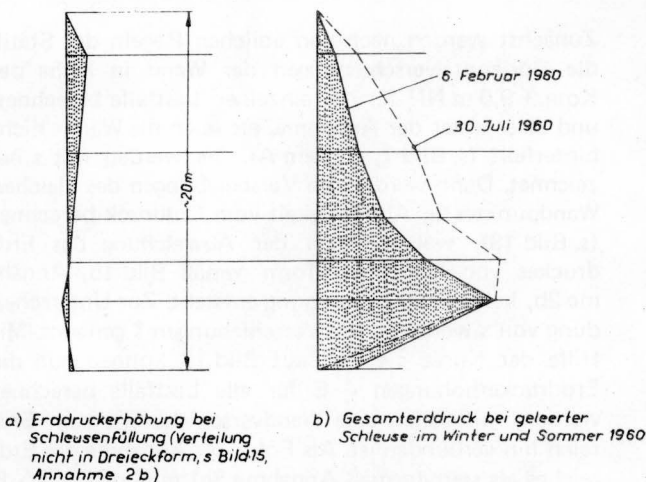


Abb. 13 Erddruckmessungen an der Wolgaschleuse "XII. Kongreß der KPSS" nach [4]

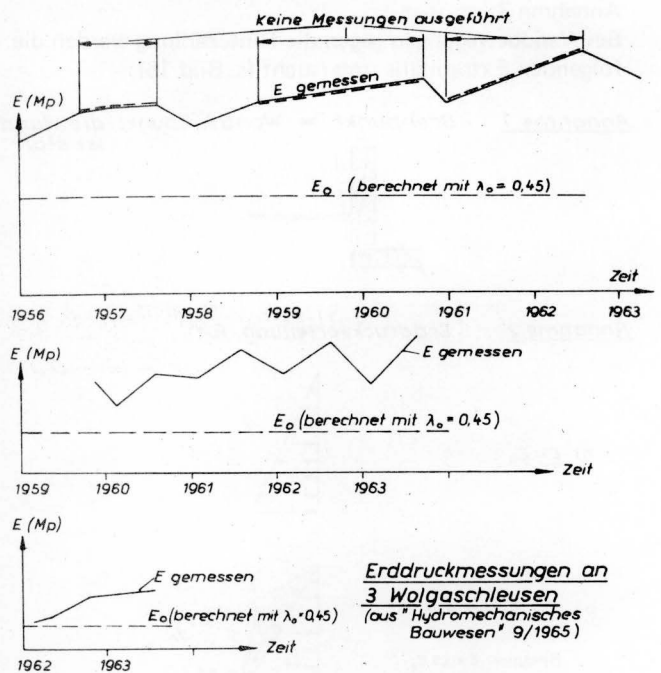


Abb. 14 Erddruckmessungen an 3 Wolgaschleusen (aus "Hydromechanisches Bauwesen" 9/1965)

4. Verfahren zur Berücksichtigung der Wandbewegungen bei der Ermittlung der Erddrücke auf die Seitenwände der Hebeportale

Die Ausführungen des vorstehenden Abschnittes 3 machen deutlich, daß die bisherigen Kenntnisse über die Zusammenhänge zwischen Wandbewegung und Erddruck mehr qualitativer als quantitativer Art und darüber hinaus noch lückenhaft sind. Es liegt daher auf der Hand, daß die Berücksichtigung der Wandbewegungen bei der Bestimmung der Erddrücke ihrer Größe und Verteilung nach nur in Form einer Abschätzung bzw. Grenzbetrachtung möglich ist. Die Grundlage hierfür liefern folgende Annahmen (s. Bilder 15 und 16):

Annahme 1:

Die Seitenwände sind starr und drehen sich um ihren Fußpunkt. Somit liegt der klassische Erddruckfall vor. Diese Annahme dürfte weitgehend der Wirklichkeit entsprechen. Nur bei Längenänderungen der Sohle wird die Wandverschiebung eher einer Parallelverschiebung entsprechen als einer Drehung um den Fußpunkt.

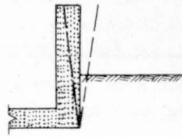
Annahme 2:

Alle Erddrücke $E \leq E_0$, sind dreieckförmig verteilt. Die Verteilung für Erddrücke $E > E_0$ erfolgt dagegen nach dem auf Bild 15 dargestellten Schema. — Für diese Annahme sind Meßergebnisse von Muhs [6] und die schon erwähnten russischen Messungen an Schleusen verwertet worden. Bei den Muhs'schen Messungen an einer 24 m hohen starren und unverschieblichen Wand hatte sich für den Ruhedruck eine dreieckförmige Erddruckverteilung ergeben. Die russischen Meßergebnisse lassen, wie auf Bild 13 gezeigt wurde, bei Erddrucksteigerungen über den Ruhedruck hinaus eine Verschiebung des Schwerpunktes der Erddruckfläche zum Wandkopf hin erkennen.

Annahme 3:

Bei Wandbewegungen gegen die Hinterfüllung werden die folgenden Extremfälle untersucht (s. Bild 16):

Annahme 1: Drehpunkt = Wandfußpunkt, die Wand ist starr



Annahme 2: Erddruckverteilung für

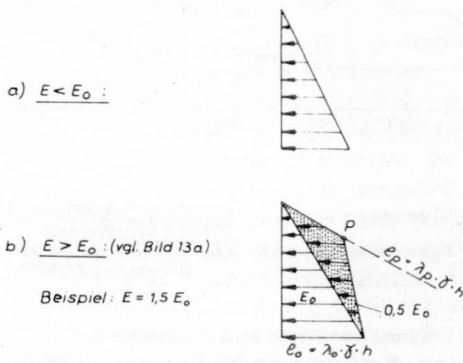


Abb. 15 Erddruckverteilung

Annahme 3: Erddruck-Wandbewegungs-Beziehung bei

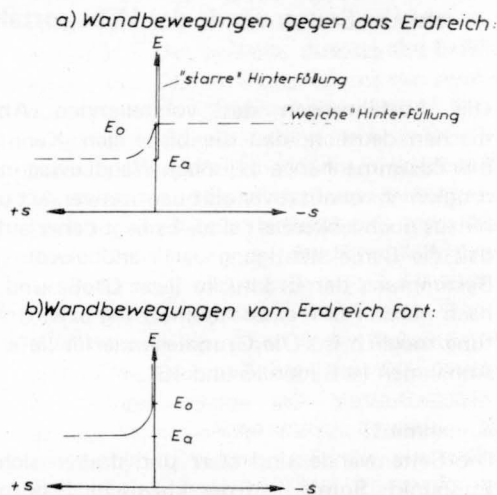


Abb. 16 Erddruck-Wandbewegungs-Beziehung

α) Die Hinterfüllung ist völlig starr und verhindert jegliche Bewegung ("Selbstsperrung" des Korngerüstes nach Ohde [2]). Die Wand wird daher sozusagen gegen die Hinterfüllung vorgespannt.

β) Sobald der Ruhedruck erreicht ist, setzt die Hinterfüllung der Bewegung keinen Widerstand mehr entgegen. Zwischen E_a und E_0 erfolgt die Erddruckzunahme entsprechend einer Funktion $E = f(\alpha)$, wobei α den Wandverdrehwinkel darstellt.

Bei Wandbewegungen von der Hinterfüllung fort wird angenommen, daß eine tatsächliche Bewegung erst eintritt, nachdem die Verspannung der Wand gegen das starre Erdreich abgebaut, d.h. wenn der Erddruck von $E > E_0$ auf $E = E_0$ gefallen ist. Unterhalb E_0 gilt wieder die Funktion $E = f(\alpha)$.

Die verwendete Funktion $E = f(\alpha)$ (s. Bild 17) entstammt einem Gutachten des Instituts für Erd- und Grundbau der TH München für die Rhein-Main-Donau AG und war dort für die Berechnung von Erddrücken auf Schleusenwände bestimmt. Der Verlauf dieser Funktion beschreibt näherungsweise die bekannten Versuchsergebnisse.

Die Annahme einer starren Hinterfüllung bzw. der vertikale Verlauf der Erddruck-Verschiebungslinie (s. Bild 16) zur Ermittlung der maximal auftretenden Erddrücke liegt aus 2 Gründen nahe:

Erstens sind die am Schiffshebewerk auftretenden Wandbewegungen verhältnismäßig klein, so daß sich die auftretenden Erddrücke in dem steilsten Teil der Erddruck-Verschiebungskurve um E_0 bewegen (s. Bild 9). Zweitens wird auf diese Weise die beobachtete "Härtung" der Hinterfüllung bei wachsender Lastspielzahl auf der sicheren Seite abgeschätzt.

Auf der Grundlage dieser 3 Annahmen läßt sich die Bestimmung der Erddrücke nach Größe und Verteilung für jeden Lastfall in folgender Weise durchführen:

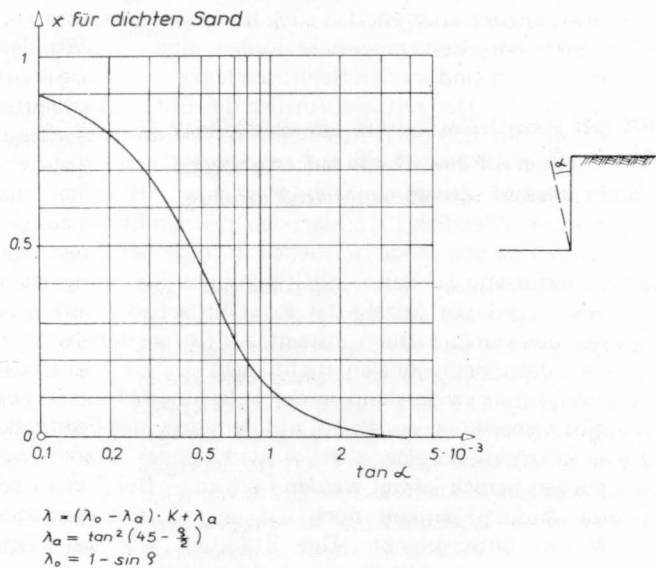


Abb. 17 Erf. Drehwinkel α einer Stützwand zur Entspannung der Hinterfüllung nach Jelinek

Zunächst werden nach den üblichen Regeln der Statik die Horizontalverschiebungen der Wand in Höhe der Kote + 9,0 m NN für die einzelnen Lastfälle berechnet, und zwar unter der Annahme, als seien die Wände nicht hinterfüllt (s. Bild 7, System A). Sie werden mit s bezeichnet. Dann werden die Verschiebungen des gleichen Wandpunktes in Abhängigkeit vom Erddruck berechnet (s. Bild 18), wobei wegen der Abweichung des Erddruckes von der Dreieckform gemäß Bild 15, Annahme 2b, keine lineare Beziehung entsteht. Zur Unterscheidung von s werden diese Verschiebungen \bar{s} genannt. Mit Hilfe der Kurve $\bar{s} = f(E)$ auf Bild 17 können nun die Erddruckerhöhungen ΔE für alle Lastfälle berechnet werden, mit denen eine Wandverschiebung s zum Erdreich hin verbunden ist. Als Folge der Annahme des Erdreiches als starr (gemäß Annahme 3α) muß nämlich ΔE so groß sein, daß die durch ΔE verursachte Wandverschiebung \bar{s} gerade der Verschiebung s entspricht

(s. Bild 19), welche die Wand ausführen würde, wenn sie nicht durch die als starr eingeführte Hinterfüllung arretiert wäre. Wie erwähnt verläuft die Kurve $\bar{s} = f(E)$ wegen der "Rucksackform" der Zusatzerdrücke nicht linear. Daher muß s von dem vorher vorhandenen Erddruckzustand aus abgetragen werden (s. Beispiel auf Bild 20). — In gleicher Weise wird verfahren, wenn Erddruckverminderungen ΔE infolge Verschiebungen s vom Erdreich fort zu bestimmen sind. Entsprechend der Annahme 3 besitzt die Kurve $\bar{s} = f(E)$ in abnehmender Richtung jedoch nur Gültigkeit, bis der Erddruck auf $E = E_0$ abgebaut ist. Zur Bestimmung der weiteren Abnahme von E wird die Funktion $E = f(\alpha)$ benutzt.

Im Prinzip entspricht diese Verfahrensweise der aus der Berechnung statisch unbestimmter Systeme bekannten Kraftgrößenmethode. Die hier zusätzlich auftretenden Schwierigkeiten liegen lediglich in der Formulierung sicherer Abschätzungen für die Erddrücke, wobei Grenzwerte für die Erddruck-Verschiebungs-Abhängigkeiten und ein zutreffender Ansatz für die Erddruckkontur zu finden waren.

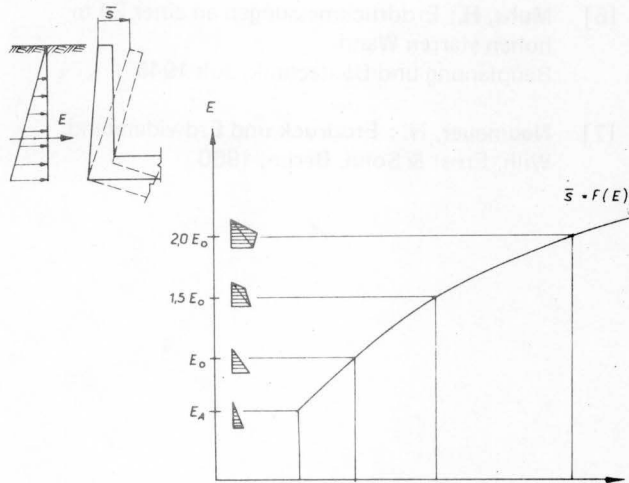


Abb. 18 Beziehung zwischen Erddruckgröße und Wand-Kopfbewegung

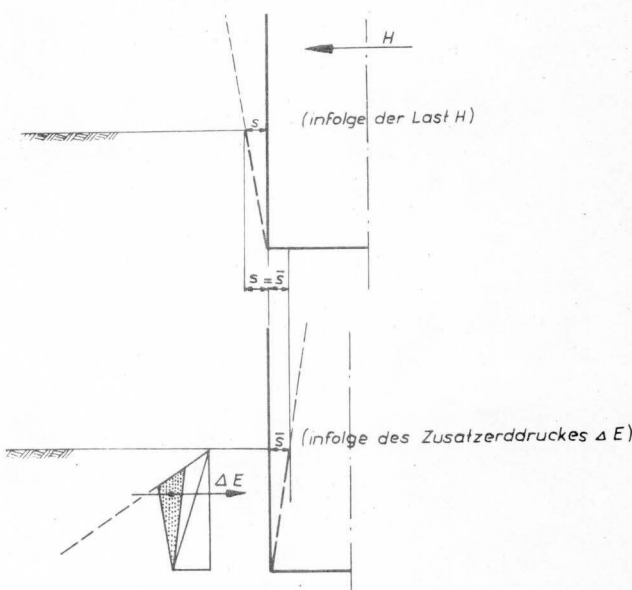


Abb. 19 Ermittlung der Erddruckerhöhung ΔE infolge der Wandbewegung s gegen das Erdreich

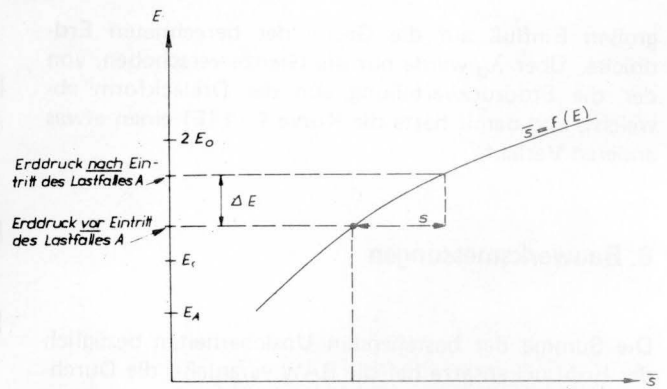


Abb. 20 Beispiel zur Ermittlung der Erddruckänderung ΔE
Annahme: Lastfall A verursacht eine Wandbewegung s gegen das Erdreich

Unter Anwendung des gerade beschriebenen Verfahrens haben sich für alle denkbaren Belastungsfolgen als kleinste Erddruckwerte ergeben, die etwa in der Mitte zwischen E_0 und E_a liegen. Da sich für den Bemessungsfall bei Ansatz von E_0 und E_a die Größe des Feldmomentes in Sohlmitte nur um etwa 10% ändert, wurde in Anbetracht der überhaupt erreichbaren Genauigkeit als minimaler Erddruck $E = E_0$ festgelegt. Zusammen mit der Grenzbetrachtung, daß sich bei Wandbewegungen gegen das Erdreich letzteres oberhalb von E_0 völlig schlaff verhält, ergibt sich somit die Forderung, daß alle Lastfallkombinationen mit dem Erddruck $E_{min} = E_0$ zu untersuchen sind. Aus der anderen Grenzbetrachtung, daß nämlich das Erdreich jegliche Wandverschiebung verhindert, hat sich für die ungünstigste Lastfallkombination ein $E_{max} = 2,5 E_0$ ergeben.

5. Kritische Betrachtung des angewandten Verfahrens

Bei einer kritischen Betrachtung des angewandten Verfahrens zur Bestimmung der Erddruckänderungen infolge Wandbewegungen muß man sich vergegenwärtigen, daß die berechneten Wandverschiebungen s und \bar{s} , die die Grundlage für die Berechnung der ΔE -Werte darstellen, keine exakten Werte sind: Sie sind stark von der Sohlendruckverteilung abhängig, deren Berechnung nur näherungsweise möglich ist. Trotz der extremen Annahme einer starren Hinterfüllung kann man daher nicht mit Sicherheit behaupten, die in Wirklichkeit auftretenden maximalen Erddrücke erfaßt zu haben. — Weitere Unsicherheiten liegen in der Beurteilung des Spannungszustandes im Erdreich unmittelbar nach Fertigstellung der Hinterfüllung. Mit der gewählten Verfahrensweise hat sich für diesen Zustand ein Erddruck ergeben, der etwas geringer als E_0 ist. Die russischen Messungen haben jedoch gezeigt, daß — wahrscheinlich infolge Verspannungen des Erdreiches beim Hinterfüllvorgang — schon unmittelbar nach Fertigstellung der Hinterfüllung Erddrücke $E > E_0$ auftreten können. — Auch Kornumlagerungen infolge Erschütterungen oder einsickernden Regenwassers können mit der Zeit die Größe und Verteilung des Erddruckes beeinflussen.

Eine Fehleinschätzung des Reibungswinkels der Hinterfüllung hat bei der gewählten Verfahrensweise keinen

großen Einfluß auf die Größe der berechneten Erddrücke. Über λ_0 würde nur die Grenze verschoben, von der die Erddruckverteilung von der Dreieckform abweicht, und damit hätte die Kurve $\bar{\epsilon} = f(E)$ einen etwas anderen Verlauf.

6. Bauwerksmessungen

Die Summe der bestehenden Unsicherheiten bezüglich der Erddruckansätze hat die BAW veranlaßt, die Durchführung von Erddruck- und Verschiebungsmessungen am Hebewerk Lüneburg vorzusehen. Sie sollen helfen, kritische Erddruckerhöhungen rechtzeitig zu erkennen und sollen außerdem die Grundlage für eventuelle Abhilfemaßnahmen liefern, falls Erddruckerhöhungen über die rechnerischen Ansätze hinaus festgestellt werden. Darüber hinaus hoffen wir, mit den Messungen etwas mehr Licht in die besonders bei hohen Mauern ungenügend bekannten Zusammenhänge zwischen Erddruck und Wandverschiebung bringen zu können, was besonders auch in Zusammenhang mit Schleusenbauten interessant ist. Hier sei daran erinnert, daß fehlerhafte Erddruckansätze bei der Schleuse Sülfeld zu erheblichen Unterhaltungsaufwendungen geführt haben. Über die Messungen wird später berichtet.

7. Literatur-Verzeichnis

- [1] **Terzaghi, K.:** Distribution of the lateral pressure of sand on the timbering of cuts. Proceedings of the international Conf. on soil mechanics and foundation engineering, Vol. I
- [2] **Ohde, J.:** Zur Erddruck-Lehre
Die Bautechnik, 1948
- [3] **Terzaghi, K.:** Large Retaining-Wall Tests, I-Pressure of Dry Sand
Engineering News Record 1934, Vol. 112
- [4] **Feldmann, A.J.:** Druck sandiger Schüttungen auf Dockkonstruktionskammerwände schiffbarer Schleusen.
Hydromechanisches Bauwesen 9/1965 (Rußland)
- [5] **Wiendiek, K.:** Zur Struktur körniger Medien.
Die Bautechnik 6/1967
- [6] **Muhs, H.:** Erddruckmessungen an einer 24 m hohen starren Wand.
Bauplanung und Bautechnik, Juli 1946
- [7] **Neumeuer, H. :** Erddruck und Erdwiderstand.
Wilh. Ernst & Sohn, Berlin, 1960