

## Modellversuche mit Blähton zum Erddruck bei zyklischen Wandbewegungen

Dr.-Ing. Andreas Winkler und Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle  
Technische Universität Dresden, Institut für Geotechnik

### 1 Einleitung

#### 1.1 Veranlassung

Die Bundesanstalt für Wasserbau untersucht zur Zeit verschiedene Verfahren zur Sanierung von Schleusen.

Schleusenkammerwände werden infolge des Befüllens und Entleerens der Schleuse ständig vom bzw. zum Boden bewegt. Damit kommt es zu zyklischen Schwankungen des Erddrucks zwischen belastenden und stützenden Erddruck. Während im Leerzustand der Schleuse die Beanspruchung infolge Erddruck so gering wie möglich sein soll, ist bei Füllung der Schleuse ein hoher stützender Erddruck schon bei geringen Bewegungen wünschenswert, um die Wandbewegung so gering wie möglich zu halten. Folgende Baugrundeigenschaften sind deshalb vor allem anstrebenswert:

- a) hohe Scherfestigkeit
- b) geringer Einfluss der Anzahl der zyklischen Wandbewegungen auf die Mobilisierung des Erddrucks.

Als mögliche Sanierungsvariante wird die Hinterfüllung von Schleusenwänden mit Blähton untersucht. Da bisher keine Untersuchungen zum Mobilisierungsverhalten des Blähtons beim Erddruck vorlagen, wurden dazu im Rahmen eines Forschungsvorhabens Untersuchungen am Institut für Geotechnik der Technischen Universität Dresden durchgeführt.

#### 1.2 Blähton

##### 1.2.1 Allgemeines

Der Einsatz von Blähton hat im Bauwesen in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Die Einsatzgebiete sind sehr vielfältig, u. a. als Unterbau im Straßen- und Eisenbahnbau, beim Dammbau, zur Bauwerkshinterfüllung, zur Wärmedämmung in Gebäuden etc.



Bild 1: Blähton



Der Blähton besitzt zahlreiche interessante Eigenschaften für den Einsatz im Bauwesen, wobei besonders:

- das geringe Eigengewicht,
- die hohe Scherfestigkeit,
- die große Durchlässigkeit,
- die Frostbeständigkeit,
- keine Grundwassergefährdung,
- die gute Alterungsbeständigkeit

von Bedeutung sind.

Die Herstellung von Blähton erfolgt in Industrieanlagen von verschiedenen Herstellern im In- und Ausland. Blähtone werden überwiegend aus marinen Tertiärtonen oder Tonen aus dem Lias unter Brennen in Drehrohröfen bei Temperaturen von 1100 °C bis 1200 °C hergestellt. Im Inneren der Körner bilden sich zahlreiche, zum Teil geschlossene Luftporen. Die Kornoberfläche sintert und geht in einen keramischen Zustand über. Die Wasseraufnahmefähigkeit des Blähtons ist abhängig vom Verhältnis des offenen zum geschlossenen Porenraum sowie dem Wasserangebot. Die Wasseraufnahme durch Erdfeuchte oder Grundwasser ist zeitabhängig und kann im Grundwasser über Jahrzehnte zunehmen.

Bei der Herstellung gibt es zwei unterschiedliche Verfahren:

- das Trockenaufbereitungsverfahren
- das Nassaufbereitungsverfahren.

Beim Trockenaufbereitungsverfahren entstehen meist kugelförmige Körner mit eher glatter Oberfläche, während beim Nassaufbereitungsverfahren i. d. R. unregelmäßige, plattige Körner mit rauerer Oberfläche entstehen. Das Herstellungsverfahren hat u. a. Einfluss auf die Verdichtbarkeit und die Scherfestigkeit. Nach der Herstellung im Trockenaufbereitungsverfahren erfolgt durch Siebung die Bereitstellung von verschiedenen Kornfraktionen für die Auslieferung z.B. 4/8 oder 8/16 unter Aussiebung der Feinbestandteile.

### 1.2.2 Eigenschaften

Die physikalischen Eigenschaften des Blähtons weichen besonders bei der Wichte und dem Reibungswinkel stark von den üblichen Bodeneigenschaften ab.

Ausgewählte Eigenschaften des verwendeten Blähtons Geoton La 8/16 [1]:

#### a) Dichte

- Korndichte trockenes Granulat:  $\rho_s = 0,65 \text{ g/cm}^3$
- Trockendichte (nach Verdichtung):  $\rho_d = 0,38 \text{ g/cm}^3$

#### b) Scherfestigkeit

- kritischer Reibungswinkel aus Schüttkegelversuch bei  $\rho = 0,37 \text{ g/cm}^3$ :  
 $c = 37^\circ$
- Scherfestigkeit im Triaxialversuch bei einem mittleren Druck von  $p=85 \text{ kN/m}^2$  und einer senkrechten Spannung  $\sigma_1 = 170 \text{ kN/m}^2$ :  
 $= 46,0^\circ$  und  $c = 0$
- hohe Dilatanz

#### c) Steifemodul

- Kompressionsbeiwert:  $C_s \approx 0,0014$  (zyklisch: 0,0020)
- Steifemodul:  $E_s = 2,3 \sigma'(1+e)/C_s$

## 2 Versuchsstand

### 2.1 Prinzipieller Aufbau



Bild 2: Ansicht des Versuchsstandes mit Antriebstechnik

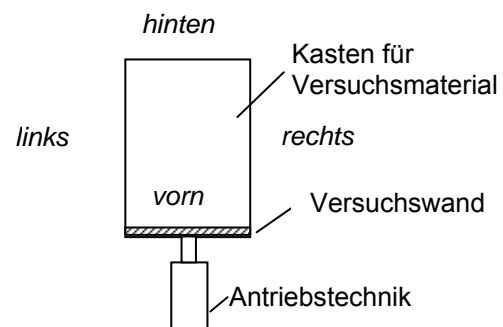


Bild 3: Grundriss Versuchsstand und Lagedefinition

Der Versuchsstand des Instituts für Geotechnik an der Technischen Universität Dresden besteht aus einem rechteckförmigen Kasten zur Aufnahme des Versuchsmaterials. Eine verschiebbare Wand kann folgende Bewegungsarten ausführen:

- horizontale parallele Verschiebung
- ausschließliche Verdrehung um Kopf- oder Fußpunkt
- kombinierte Bewegung aus Parallelverschiebung und Verdrehung.

Die Wand kann mit einer konstanten Geschwindigkeit verschoben und verdreht werden.

Die Ansteuerung erfolgt über zwei Stellmotoren, wobei ein Motor der Parallelverschiebung dient und der Andere der Drehbewegung. Die Wand kann gezielt in beide Richtungen bewegt werden. Der horizontale Verschiebungsweg kann bis zu 180 mm betragen.

Bisher erfolgten nur Untersuchungen mit monotoner Wandbewegung (einzelne Bewegung in eine Richtung). Die Steuerung der Wandbewegung erfolgte manuell über ein Eingabepaneel an der Maschine. Für das Forschungsvorhaben wurde ein separates Steuerprogramm für den Versuchsstand entwickelt, das beliebig große, sich wiederholende zyklische Wandbewegungen (Größe, Anzahl und Art der Wandbewegungen) erlaubt.

## 2.2 Geometrie

Die Länge des Versuchstandes variiert in Abhängigkeit der Ausgangslage der Messwand. Für die durchgeführten Versuche ergab sich die Länge zu  $l = 3023$  mm. Die Breite des Standes ist konstant mit  $b = 990$  mm. Die Höhe des Standes ist abhängig von der eingesetzten Messwand (siehe folgender Abschn.).

## 2.3 Messwand

Die Versuchswand besteht aus einer unverschieblichen Wand im unteren Teil und drei verschiebbaren Teilwänden im oberen Bereich.

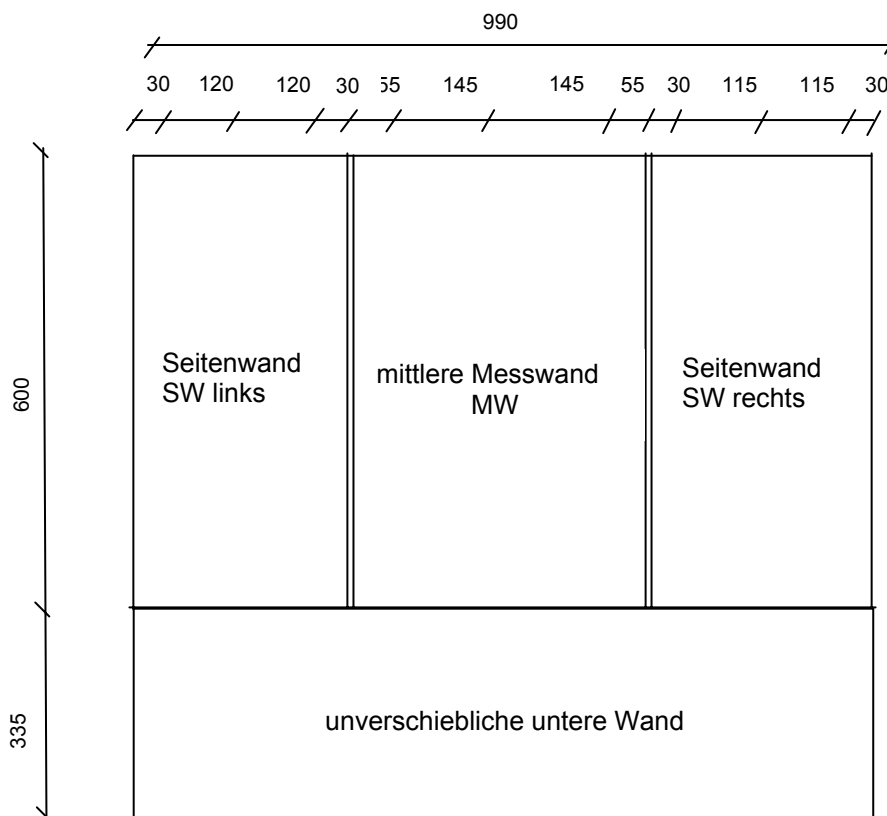


Bild 4: Ansicht der Versuchswand

Die oberen verschiebbaren drei Teilwände untergliedern sich in eine 40 cm breite Mittelwand und zwei etwa 30 cm breite Seitenwände. Diese Unterteilung wurde gewählt, damit die Messungen an der Mittelwand möglichst wenig durch die Reibung des Versuchsmaterials an den Seitenwänden des Versuchstandes beeinflusst werden. Die rechte Seitenwand besitzt die gleiche Anordnung der Messaufnehmer wie die Mittelwand. Die Messungen an der Seitenwand dienen zur Abschätzung des Einflusses der Seitenreibung und zur Überprüfung der Plausibilität von eventuell ungewöhnlichen Messergebnissen an der mittleren Messwand.

## 2.4 Messtechnik

Die in der Mitte liegende Messwand und die rechte Seitenwand sind jeweils mit drei normal zur Wand angeordneten Kraftaufnehmern (A, B, C) und (F, G, H) instrumentiert, die in speziellen Kalotten aufgelagert sind. In der linken Seitenwand befinden sich Distanzstifte anstelle der normal zur Wand liegenden Aufnehmer in den Kalotten.

Über jeweils zwei Kraftmessdosen (D, E) und (I, K) an der Oberkante der mittleren Messwand und rechten Seitenwand werden die tangentialen Kräfte gemessen.

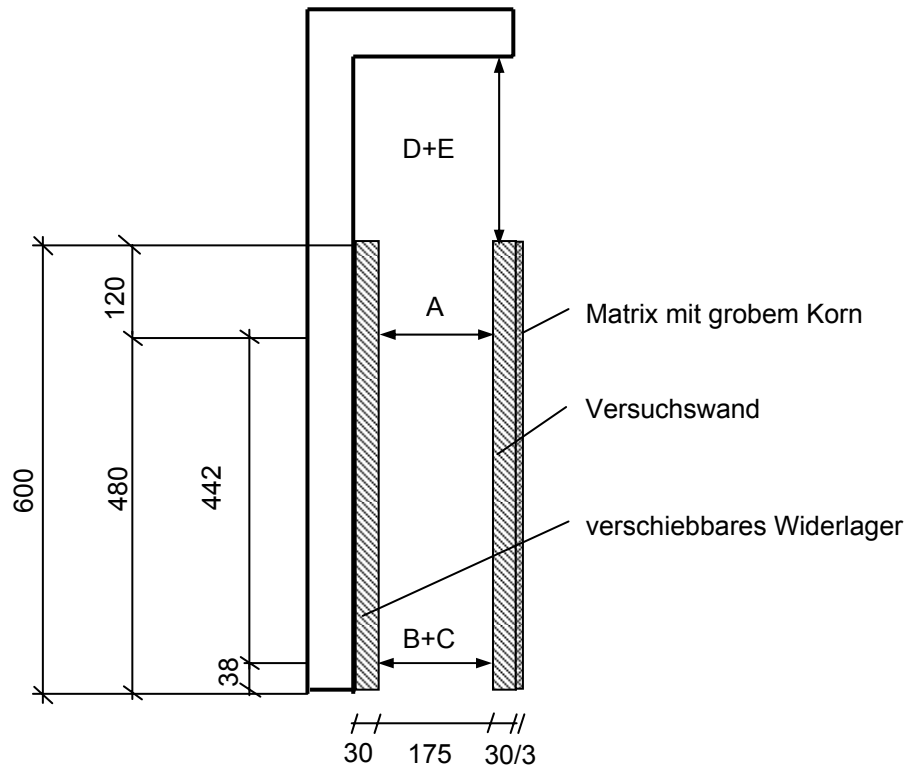


Bild 5: Seitenansicht der mittleren Messwand mit Aufnehmern

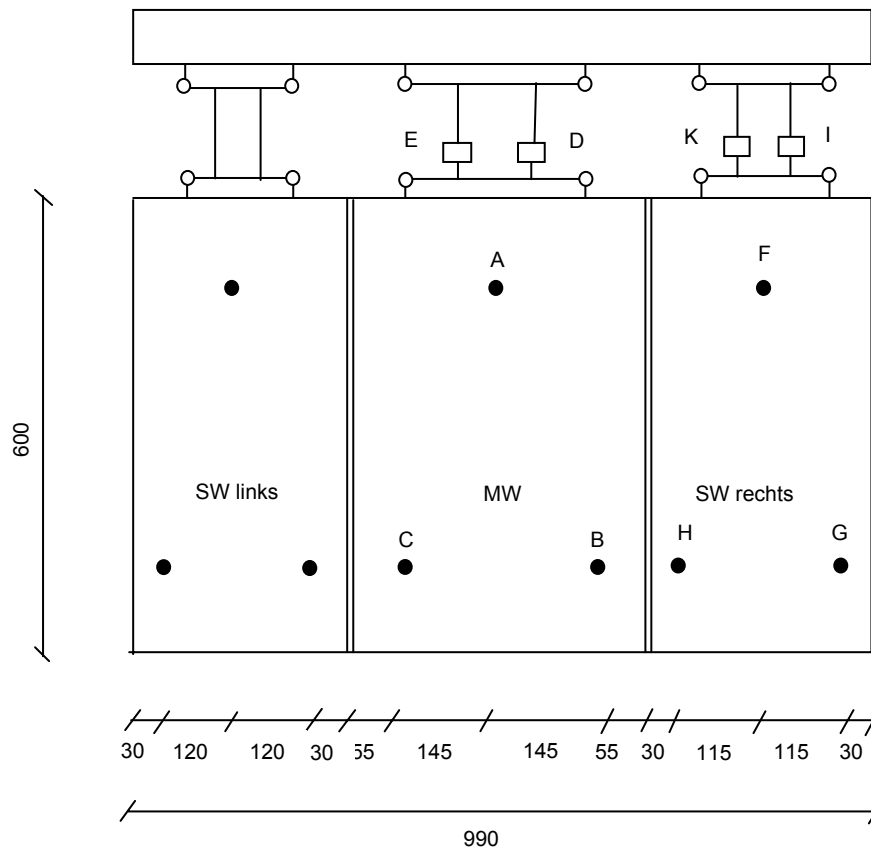


Bild 6: Seitenansicht der mittleren Messwand mit Aufnehmern

### 3 Versuche

#### 3.1 Ziele

##### 3.1.1 Versuche mit monotoner Wandbewegung

Da für den verwendeten Blähton keine Kenntnisse zum Erddruck vorlagen, wurde zuerst das Mobilisierungsverhalten des Erddrucks in Abhängigkeit der Wandbewegung bis zum Erreichen eines annähernd konstanten Niveaus der Erddruckkraft untersucht. Von besonderem Interesse sind das Mobilisierungsverhalten der Erddruckkraft, der Erddruckneigung und des Angriffspunktes in Abhängigkeit der Wandbewegung, sowie die erforderliche Grenzverschiebung zur Aktivierung des Bruchzustandes gewesen.

Bei den Versuchen wurde zuerst eine Wandbewegung von rund 90 mm gegen den Blähton durchgeführt und danach die Wand wieder in die Ausgangsstellung zurück gebracht. Der Richtungswechsel der Wandbewegung erforderte keine Unterbrechung des Versuches.

##### 3.1.2 Versuche mit zyklischer Wandbewegung

Die Versuche mit zyklischen Wandbewegungen wurden jeweils mit einer konstanten Größe der Wandverschiebung von 3 bzw. 21 mm durchgeführt, die jeweils kleiner als die erforderliche Grenzverschiebung zur Aktivierung des passiven Erddrucks gewesen ist.

Ziel dieser Untersuchungen war vor allem, den Einfluss der Zyklanzahl auf das Mobilisierungsverhalten des Erddrucks zu untersuchen.



## **3.2 Randbedingungen für die Versuche**

### **3.2.1 Wandbewegung**

Alle Versuche wurden als Parallelverschiebung der Wand ausgeführt. Die Versuchswand wurde mit einer konstanten Geschwindigkeit von 1 mm/min verschoben.

### **3.2.2 Wandoberfläche**

Die ersten Versuche wurden mit der vorhandenen polierten Wandoberfläche aus Aluminium durchgeführt. Für die restlichen Versuche wurde die Oberfläche der Wand mit einer Matrix aus grobem Korn belegt. Die Rauigkeit entsprach ungefähr der eines groben Betons.

### **3.2.3 Messwerterfassung**

Bei den Versuchen mit monotoner Wandbewegung erfolgte die Messwerterfassung i. d. R. aller 10 s. Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 1 mm/min ergab sich während des Versuches eine Messwertabfrage nach jeweils 0,15 mm Wandverschiebung.

Die Messwertabfrage erfolgte bei den Versuchen mit zyklischer Wandbewegung i. d. R. aller 20 s. Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 1 mm/min wurde während des Versuches eine Messung nach jeweils 0,30 mm Wandverschiebung durchgeführt. Beim Versuch 11 lag das Messintervall bei 5 s. Eine Messung wurde somit nach jeweils 0,08 mm Wandverschiebung durchgeführt.

Beim Erreichen der maximalen Wandverschiebung wird deshalb die zugehörige Erddruckkraft in dem jeweiligen Zyklus nicht exakt erfasst.

## **3.3 Versuchsmaterial**

Entsprechend der Vorgabe des Auftraggebers wurde werkstrockener Blähton mit der Bezeichnung „Geoton 4/8; rund; Lamstedt“ von der Firma Fibo Exclay als Versuchsmaterial eingesetzt, das laut Aussage der Firma im Nassaufbereitungsverfahren hergestellt wurde. Das Material wurde in Kunststoffsäcken zu je 50 l angeliefert. Eigene Untersuchungen im Labor ergaben einen sehr geringen Wassergehalt von 0,24 %.

Der Blähton wurde ständig trocken in der beheizbaren Versuchshalle gelagert. Der Wassergehalt des Versuchsmaterials änderte sich während der Versuche nur geringfügig.

Besonders bei den zyklischen Versuchen kam es infolge der starken mechanischen Beanspruchung unmittelbar im Wandbereich in geringem Umfang zu Kornersatz. Dieser Zersatz wurde vor dem folgenden Versuch entfernt und nicht mehr eingesetzt.

## **3.4 Einbau des Versuchsmaterials**

Priorität für die Auswahl des Einbauverfahrens hatte die Reproduzierbarkeit und gleichmäßige Verteilung der Lagerungsdichte innerhalb des Versuchsstandes. Nach verschiedenen Testversuchen wurde folgendes Verfahren ausgewählt. Der Blähton wurde zunächst aus einem Container in mit dem Kran verfahrbare Trichter verfüllt. Nach dem Transport zum Einbauort wurde ein 2 m langes Fallrohr mit einer Nennweite von 70 mm und kurzem flexiblen Schlauchstück mit Bajonettverschluss am Trichter befestigt.

Nach Öffnen des Trichterverschlusses am Boden wurde der Blähton durch leicht kreisende Bewegungen des Fallrohres in den Versuchsstand eingerieselt. Der Abstand zwischen Fallrohraustritt und Blähtonoberfläche betrug während des Einbaus ungefähr 100 mm.



Bild 7: Einrieseln des Versuchsmaterials

Dieses Einbauverfahren zeigte nur geringfügige Abweichungen von der mittleren Wichte bei den jeweiligen Versuchen.

Tabelle 1: Mittelwert der Wichte

Versuch	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
Wichte in $\text{kN/m}^3$	4,04	4,10	4,12	4,11	4,10	4,05	4,06	4,06	4,11	4,11	4,12

Der Mittelwert der Wichte beträgt bei den Versuchen  $\gamma_M = 4,09 \text{ kN/m}^3$ . Die minimale Porenzahl ist  $e_{\min} = 0,710$  und die maximale Porenzahl  $e_{\max} = 0,980$ . Damit ergibt sich im Mittel eine bezogene Lagerungsdichte von  $I_D = 0,794$  bzw. ein Dichteindex von  $D = 0,819$ . Dies entspricht einer dichten Lagerung.

Es war zunächst vorgesehen, die Lagerungsdichte durch Einsatz einer Rüttelplatte in ausgewählten Versuchen zu erhöhen. Beim Test mit einer Rüttelplatte kam es zu einem unkontrollierten Einsinken des Verdichtungsgerätes. Weiterhin ist zu befürchten, dass dabei auch eine signifikante Materialveränderung infolge von Kornbruch erfolgt.

Der Einbau des Versuchsmaterials erfolgte bei den Versuchen mit monotoner Wandbewegung bis 30 mm unterhalb des Wandkopfes. Damit wurde verhindert, dass es bei den relativ großen Wandbewegungen gegen den Blähton und den damit verbundenen Hebungen zu einem Materialverlust infolge des Überschiebens von Blähton über die Wandoberkante kommt. Bei den Versuchen mit zyklischer Wandbewegung erfolgte die Verfüllung bis Wandoberkante, da die Wandverschiebung wesentlich kleiner war.

Bei zyklischer Wandbewegung kommt es mit zunehmender Zyklanzahl zu einer vergrößerten Absenkung der Geländeoberfläche unmittelbar hinter der Wand und zu Hebungen im wandfernen Bereich. Die Höhe der Absenkung und Hebung ist wesentlich von der Größe der horizontalen Wandverschiebung abhängig.



Hebungen im wandfernen Bereich treten durch Materialverschiebung während der Aktivierung des stützenden Erddrucks auf. Ursachen für die Absenkung unmittelbar hinter der Wand sind die Verdichtung des Blähtons gegenüber dem Ausgangszustand, die Materialverschiebung beim stützenden Erddruck sowie in geringem Umfang ein Verlust von Blähton im Versuchsstand infolge Materialtransport im Bereich zwischen Unterkante der Messwand und Oberkante der unverschieblichen Wand. Aufgrund der Korngröße des Blähtons ist der Materialtransport jedoch sehr gering.

Beim Versuch 10 erfolgte nach jedem Zyklus eine Zugabe oder Entnahme von Blähton, so dass wieder die Ausgangshöhe der horizontal verlaufenden Geländeoberfläche wie beim Einbau erreicht war. Beim Versuch 11 kam es infolge der geringen Wandverschiebung nur zu sehr kleinen Änderungen beim Verlauf der ursprünglichen Geländeoberfläche. In diesem Fall wurde auf eine Korrektur der Geländeoberfläche während des Versuchs verzichtet.

### 3.5 Übersicht zu den vorgestellten Versuchen

Es wurden insgesamt 12 Versuche durchgeführt. Im Rahmen dieses Beitrages werden nur ausgewählte Versuchsergebnisse vorgestellt.

Tabelle 2: Übersicht zu den Randbedingungen der Versuche

Versuch Nr.	WB	v [mm]	$\delta$	m
02	m	90	Alu	-
04	m	88	SP	-
10	z	21	SP	g
11	z	3,0	SP	-

Legende:

WB...Art der Wandbewegung

m...monoton

z...zyklisch

v... Größe der parallelen Wandverschiebung

$\delta$ ... Wandraugigkeit der Wand

ALU...Aluminiumoberfläche der Messwand

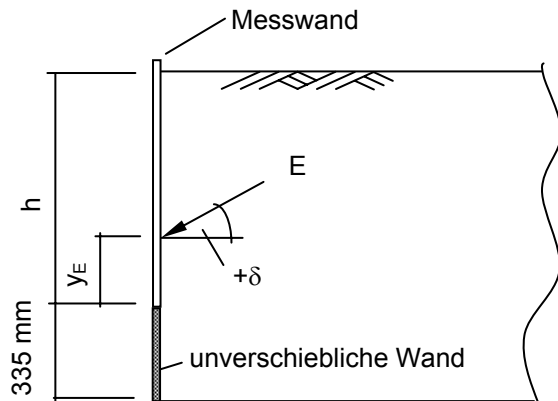
SP... modifizierte rauere Wandoberfläche

m... Nachfüllung bzw. Entnahme von Blähton während des Versuches

g... die gesamte Versuchsoberfläche hinter der Wand wurde durch Nachfüllen bzw. Entnehmen von Material nach jedem Zyklus horizontal abgeglichen

-... keine Veränderungen während des Versuches

### 3.6 Formelzeichen und Begriffe



- $h$ ... Höhe des Blähtons hinter der verschiebbaren Messwand  
 $y_E$ ... Angriffspunkt der Erddruckkraft an der Messwand  
 $E$ ... Erddruckkraft auf die Messwand  
 $\delta$ ... Erddruckneigungswinkel

Bild 8: Formelzeichen

Für die Versuche werden folgende Auswertungen vorgenommen:

- horizontale Erddruckkraft  $E_h$  in Abhängigkeit der parallelen Wandverschiebung  $v$  an der mittleren Messwand mit einer Wandbreite  $b = 400$  mm  
 $E_{ho}$ ...Messwert an dem oberen Normalkraftaufnehmer  
 $E_{hu}$ ...Summe der Messwerte an den beiden unteren Normalkraftaufnehmern  
 $E_h$ ...resultierende horizontale Erddruckkraft  $E_h = E_{hu} + E_{ho}$   
 Es erfolgt jeweils die Darstellung für die gesamte Mobilisierung der Erddruckkraft und als Ausschnitt mit angepasster Skalierung für die Mobilisierung des Erddrucks nach Erreichen des Maximums.
- Angriffspunkt  $y_E$  der Erddruckkraft  $E$  in Abhängigkeit der parallelen Wandverschiebung  $v$   
 Die Angabe des Angriffspunktes erfolgt bezüglich des Wandfußes der Messwand und wird relativ zur Höhe der Hinterfüllung hinter der Messwand angegeben. Die Lage des Angriffspunktes ergibt sich zu  $y_E/h = (480 - 442 \cdot E_{hu}/E_h)/h$ .  
 Für die Vor- und Rückwärtsbewegung erfolgt eine getrennte Darstellung mit Angabe der Bewegungsrichtung der Wand vom bzw. zum Versuchsmaterial.
- Mobilisierter Erddruckneigungswinkel  $\delta$  in Abhängigkeit der parallelen Wandverschiebung  $v$   $\tan \delta = E_v / E_h$   
 horizontale, vertikale und resultierende Erddruckkraft pro lfdm. in Abhängigkeit der parallelen Wandverschiebung  $v$  auf Grundlage der Messungen an der mittleren Wand  
 $E_h$ ...resultierende horizontale Erddruckkraft (siehe Unterpunkt a)  
 $E_v$ ...resultierende vertikale Erddruckkraft, die durch zwei tangentielle liegende Aufnehmer an der mittleren Messwand erfasst wurde  
 $E$ ...resultierende Erddruckkraft mit  $E^2 = E_h^2 + E_v^2$

## 4 Versuchsergebnisse bei monotoner Wandbewegung

### 4.1 Allgemeines

Bei der Auswertung erfolgt der Vergleich des Versuchs 02 und des Versuchs 04. Die beiden Versuche unterscheiden sich vor allem durch die Rauigkeit der Wandoberfläche, die beim Versuch 02 einer polierten Aluminiumoberfläche entsprach und beim Versuch 04 sehr grobkörnig war.

## 4.2 Übersicht ausgewählter Versuchsergebnisse

Tabelle 3: Maximale horizontale Erddruckkraft  $E_h$

Versuch	$E_{ho}$ in N	$E_{hu}$ in N	$E_h$ in N	$\delta$ in °	$y_E/h$ -	$K_{gh}$ -	$v$ mm
02	1247	3836	5083	-20,2	0,26	19,08	34,9
04	2389	5205	7594	-25,1	0,31	28,44	40,6

Tabelle 4: Erddruck bei maximaler Wandverschiebung aus der Ausgangslage

Versuch	$E_{ho}$ in N	$E_{hu}$ in N	$E_h$ in N	$\delta$ in °	$y_E/h$ -	$K_{gh}$ -	$v$ mm
02	936	1330	2266	-25,03	0,46	8,51	89,8
04	1383	3075	4458	-34,9	0,31	16,70	88,0

## 4.3 Mobilisierung der horizontalen Erddruckkraft $E_h$ in Abhängigkeit der parallelen Wandverschiebung $v$

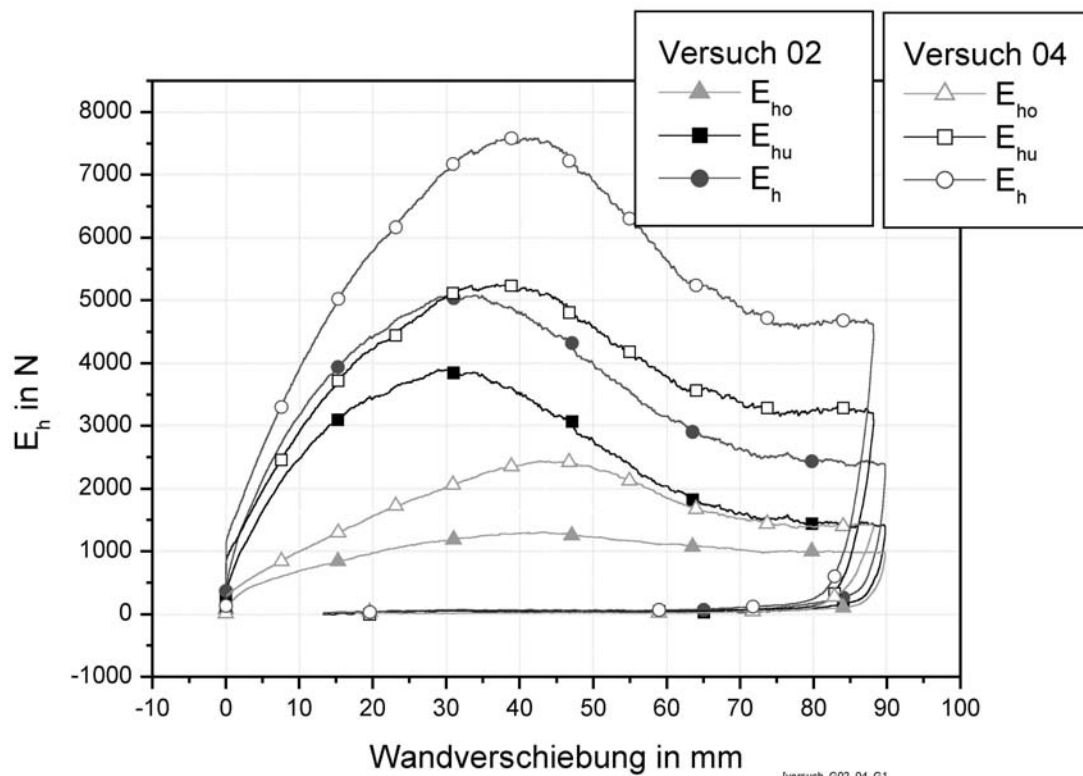


Bild 9: Horizontale Erddruckkraft  $E_h$  (vollständige Mobilisierung)

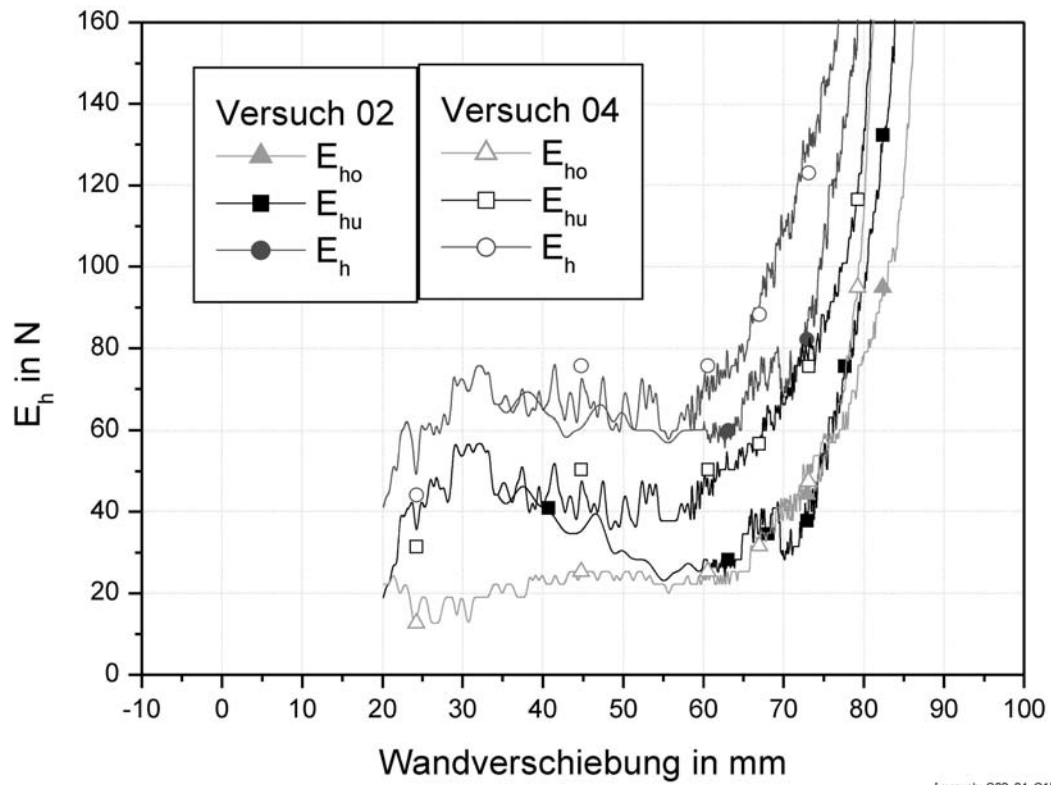


Bild 10: Horizontale Erddruckkraft  $E_h$  (Wandverschiebung zurück zur Ausgangslage)

4.4 Angriffspunkt  $y_E$  der Erddruckkraft  $E$  in Abhängigkeit der parallelen Wandverschiebung  $v$

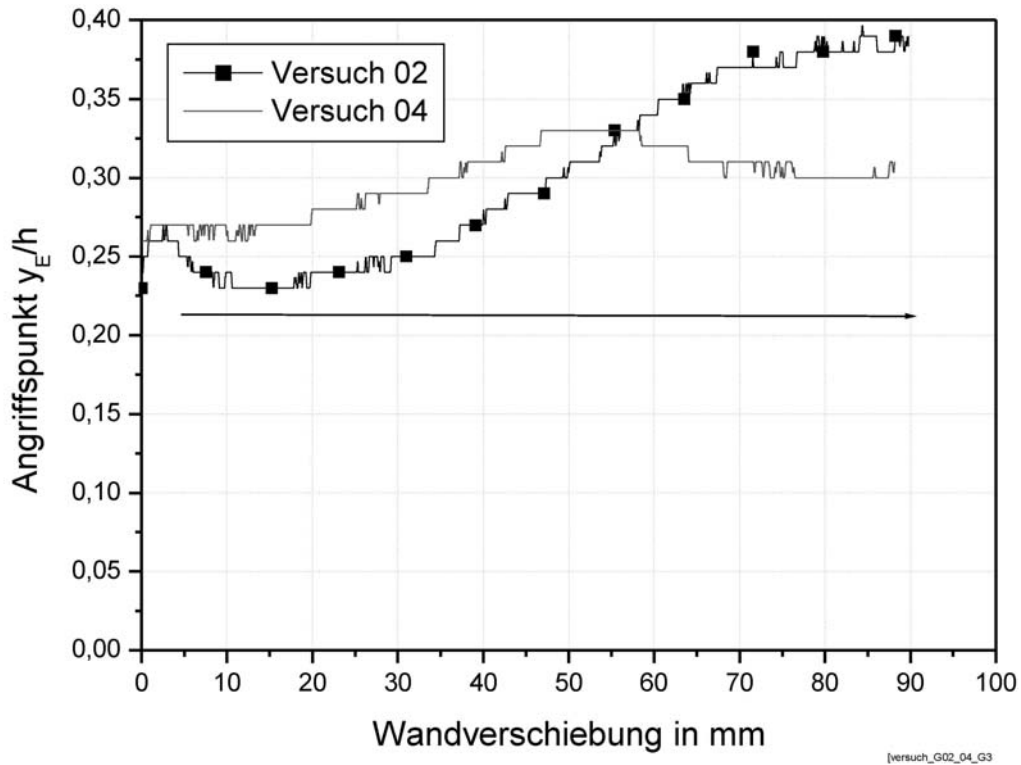


Bild 11: Angriffspunkt  $y_E$  der Erddruckkraft  $E$  (bei Wandverschiebung aus der Ausgangslage)

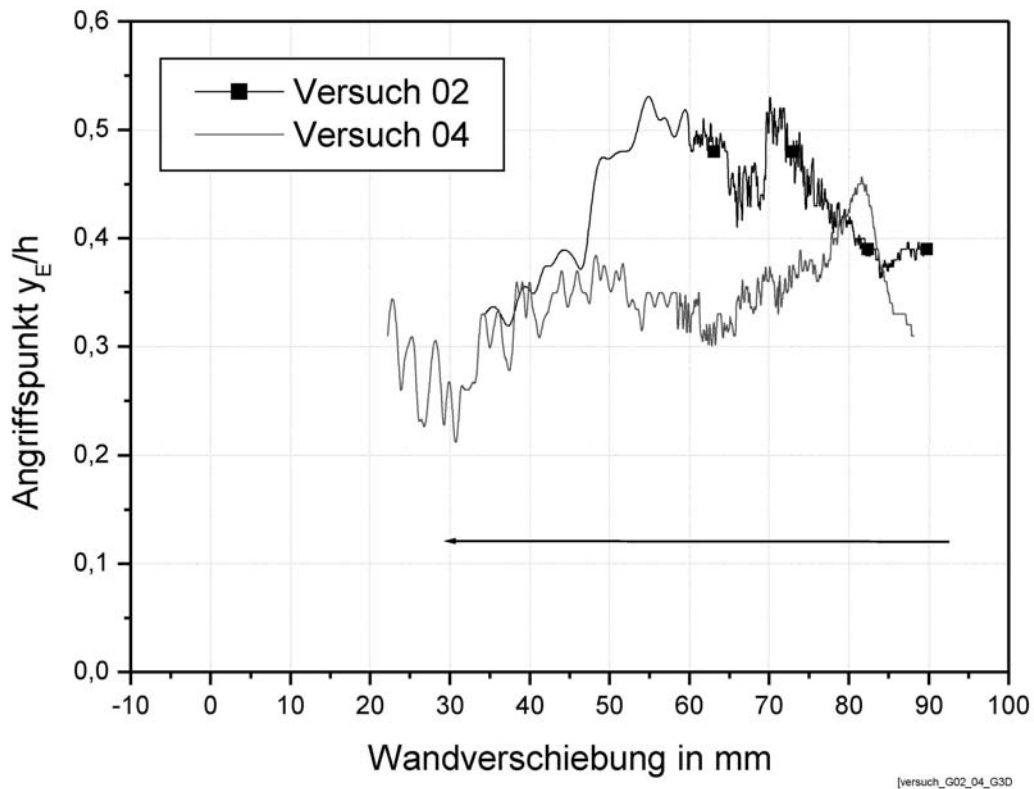


Bild 12: Angriffspunkt  $y_E$  der Erddruckkraft  $E$  (bei Wandverschiebung zurück zur Ausgangslage)

4.5 Mobilisierter Erddruckneigungswinkel  $\delta$  in Abhängigkeit der parallelen Wandverschiebung  $v$

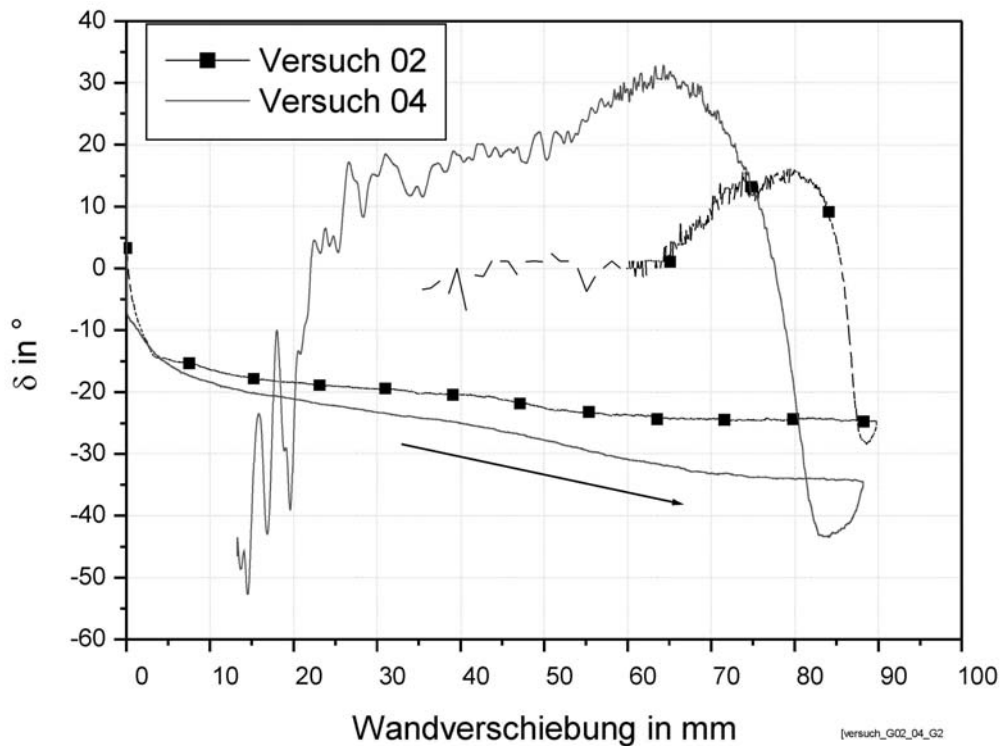


Bild 13: Mobilisierter Erddruckneigungswinkel  $\delta$



## 4.6 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse mit monotoner Wandbewegung

### 4.6.1 Mobilisierung des stützenden Erddrucks

#### Allgemeines

Bei der folgenden Auswertung werden immer zwei Werte durch Semikolon getrennt angegeben, wobei der 1. Wert dem Versuch 02 und der 2. Wert dem Versuch 04 entspricht.

#### Erddruckkraft

Die notwendige Verschiebung zur Mobilisierung des Peakwertes der stützenden horizontalen Erddruckkraft beträgt rund  $v_{\text{grenz}} = 35 \text{ mm}; 40 \text{ mm}$  bzw.  $v_{\text{grenz}}/h = 0,06; 0,07$ . Nach Erreichen des Maximums der horizontalen Erddruckkraft kommt es zu einem ausgeprägten Abfall der Kraft bei zunehmender Wandbewegung. Nach ungefähr  $v = 75 \text{ mm}; 75 \text{ mm}$  bzw.  $v_{\text{grenz}}/h = 0,12; 0,12$  wird ein konstantes Niveau der Erddruckkraft erreicht.

Bei Annahme einer dreieckförmigen Erddruckverteilung ergibt sich für das Erddruckmaximum ein horizontaler Erddruckbeiwert von  $K_{\text{gh}} = 19,1; 28,4$ .

#### Erddruckneigungswinkel und Angriffspunkt

Mit zunehmender Wandbewegung kommt es zu einer Abnahme des Erddruckneigungswinkels in den negativen Bereich, die besonders am Anfang der Verschiebung bis  $v \approx 10 \text{ mm}$  stark überproportional erfolgt. Bei der Verschiebung  $v_{\text{grenz}}$  wird ungefähr  $\delta = -20^\circ; -25^\circ$  und nach der größten Wandverschiebung im Versuch  $\delta = -25^\circ; -35^\circ$  mobilisiert, d. h. der Erddruckneigungswinkel nimmt auch nach Erreichen der maximalen horizontalen Erddruckkraft kontinuierlich ab.

Der Angriffspunkt  $y_E$  der resultierenden Erddruckkraft verlagert sich im Versuch 02 mit zunehmender Bewegung immer weiter nach oben bis zu  $y_E = 0,4 h$ , während beim Versuch 04 der Angriffspunkt kurz nach Erreichen der Grenzverschiebung sich in der Nähe des unteren Wanddrittels einstellt.

#### Einfluss der Oberflächenrauigkeit der Wand

Die Variation der Oberflächenrauigkeit der Wand von einer glatten polierten Aluminiumoberfläche im Versuch 02 zu einer grobkörnigen Oberfläche im Versuch 04 hat wesentlichen Einfluss auf die Größe der Erddruckkraft, die im Versuch 04 bei der Verschiebung  $v_{\text{grenz}}$  rund 50 % und nach langem Verschiebungsweg rund 100 % größer ist. Beim Erddruckneigungswinkels  $\delta$  beträgt die Abweichung maximal 36 %. Das Mobilisierungsverhalten des Erddrucks ist in beiden Versuchen ähnlich.

### 4.6.2 Mobilisierung des belastenden Erddrucks

Die gemessenen Kräfte bei der Mobilisierung des belastenden Erddrucks sind sehr klein. Die Genauigkeit der für einen großen Messbereich ausgelegten Kraftaufnehmer ist im unteren Messbereich weniger genau.

Es ist zu beachten, dass zunächst die Bewegung der Wand gegen den Boden erfolgt. Erst danach erfolgt durch Umkehr der Bewegungsrichtung der Wand die Mobilisierung des belastenden Erddrucks. Das heißt die Scherfestigkeit im Ausgangszustand vor der Mobilisierung des stützenden Erddrucks ist anders, als zu Beginn der Aktivierung des belastenden Erddrucks.

#### Erddruckkraft

Wie erwartet, kommt es nach der Umkehr der Bewegungsrichtung zu einem starken Abfall der Erddruckkraft, die nach ungefähr 30 mm ihr Minimum erreicht. Die Auswertung der Messwerte bei größerer Wandverschiebung ist aufgrund von Messungenauigkeiten und anderen Einflüssen nicht sinnvoll.



## Erddruckneigungswinkel und Angriffspunkt

Der Erddruckneigungswinkel beträgt bei Erreichen des Minimums der horizontalen Erddruckkraft beim Versuch 02:  $\delta = 0^\circ$  und beim Versuch 04:  $\delta = 20^\circ$ . Der Angriffspunkt befindet sich bei dieser Größe der Wandbewegung beim Versuch 02 ungefähr in Wandmitte und beim Versuch 04 im unteren Drittelpunkt der Wand.

## Einfluss der Oberflächenrauigkeit der Wand

Die Oberflächenrauigkeit der Wand beeinflusst wesentlich Angriffspunkt und Neigung der Erddruckkraft. Anders als beim stützenden Erddruck ist der Einfluss auf die Größe der Erddruckkraft gering.

## 5 Versuchsergebnisse bei zyklischer Wandbewegung

### 5.1 Allgemeines

Bei der Auswertung erfolgt der Vergleich des Versuchs 10 und des Versuchs 11. Die beiden Versuche unterscheiden sich vor allem durch die Größe der Wandbewegung je Bewegungszyklus, die beim Versuch 10:  $v = 21$  mm und beim Versuch 04:  $v = 3$  mm entsprach. Eine Variation der Rauigkeit der Wandoberfläche erfolgte nicht.

### 5.2 Übersicht ausgewählter Versuchsergebnisse

Tabelle 5: Minimale horizontale Erddruckkraft  $E_h$  für 2. und letzten Zyklus des Versuches

Versuch	Zyklus	$E_{ho}$ in N	$E_{hu}$ in N	$E_h$ in N	$\delta$ in $^\circ$	$y_E/h$ -	$K_h$ -	$v$ mm
10	2	18,99	66,14	85,13	14,02	0,23	0,29	9,25
11	2	6,33	31,54	37,87	43,75	0,19	0,13	0,18

Versuch	Zyklus	$E_{ho}$ in N	$E_{hu}$ in N	$E_h$ in N	$\delta$ in $^\circ$	$y_E/h$ -	$K_h$ -	$v$ mm
10	100	28,49	72,47	100,95	11,89	0,27	0,34	3,17
11	175	12,66	34,69	47,35	27,84	0,26	0,16	0,22

Tabelle 6: Maximale horizontale Erddruckkraft  $E_h$  für 2. und letzten Zyklus des Versuches

Versuch	Zyklus	$E_{ho}$ in N	$E_{hu}$ in N	$E_h$ in N	$\delta$ in $^\circ$	$y_E/h$ -	$K_h$ -	$v$ mm
10	2	1294,49	4411,85	5706,34	-19,36	0,23	19,28	21,37
11	2	557,04	1286,49	1843,53	-10,22	0,29	6,23	3,01

Versuch	Zyklus	$E_{ho}$ in N	$E_{hu}$ in N	$E_h$ in N	$\delta$ in $^\circ$	$y_E/h$ -	$K_h$ -	$v$ mm
10	100	1253,34	3970,11	5223,45	-22,54	0,24	17,65	21,26
11	175	614,01	1677,35	2291,36	-14,53	0,26	7,74	2,98

5.3 Mobilisierung der horizontalen Erddruckkraft  $E_h$  in Abhängigkeit der Zyklenanzahl

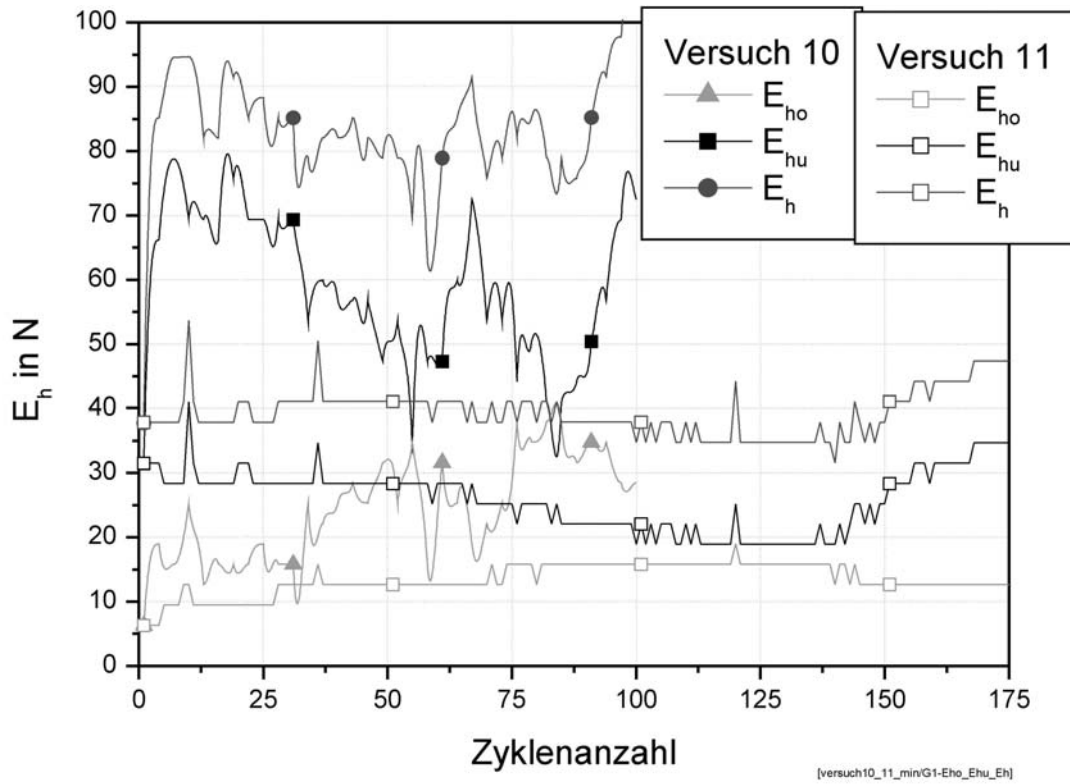


Bild 14: Horizontale Erddruckkraft  $E_h$  für das Erddruckminimum

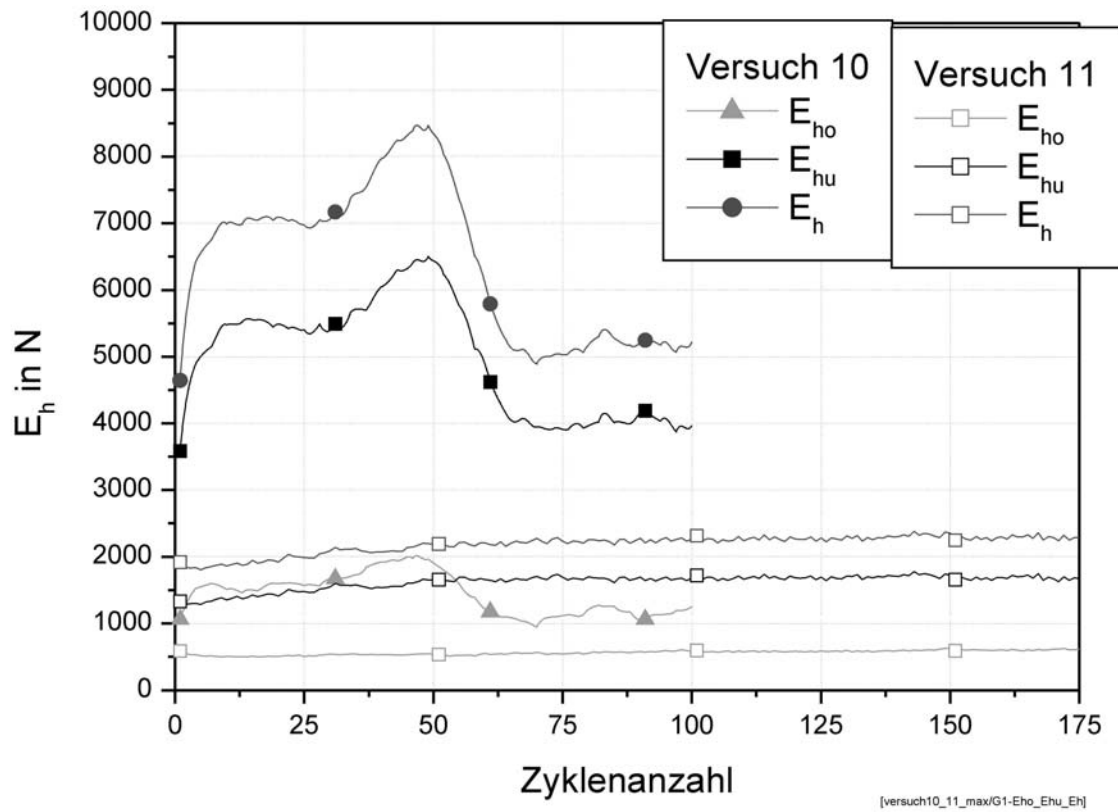
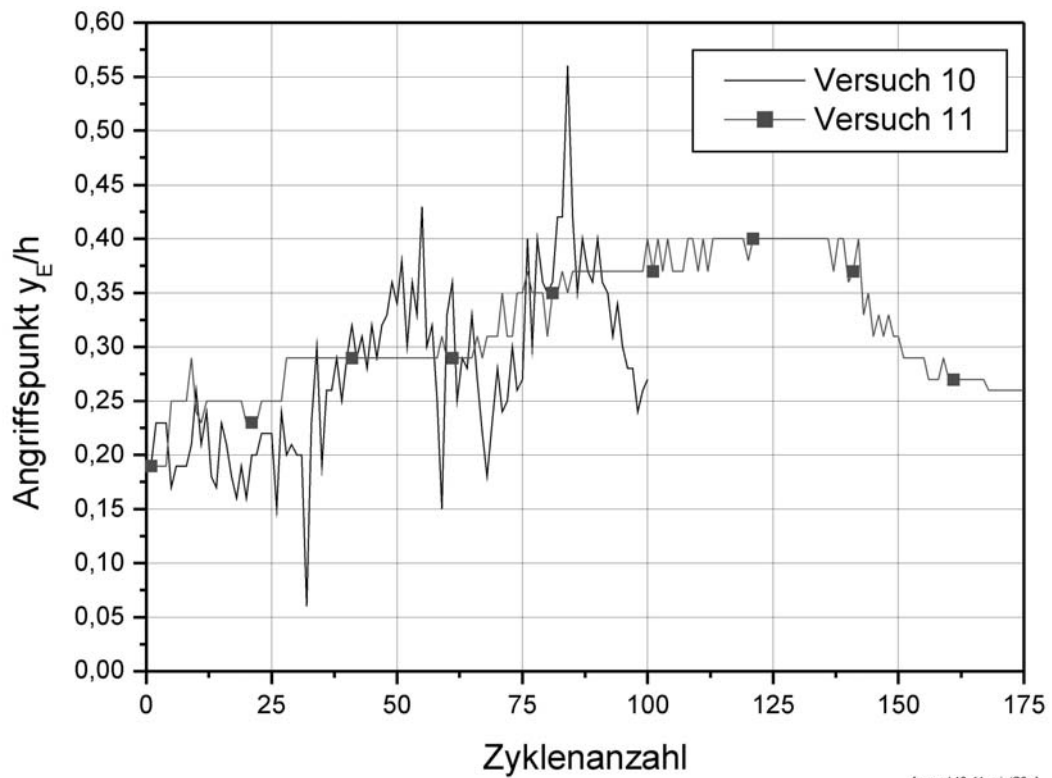


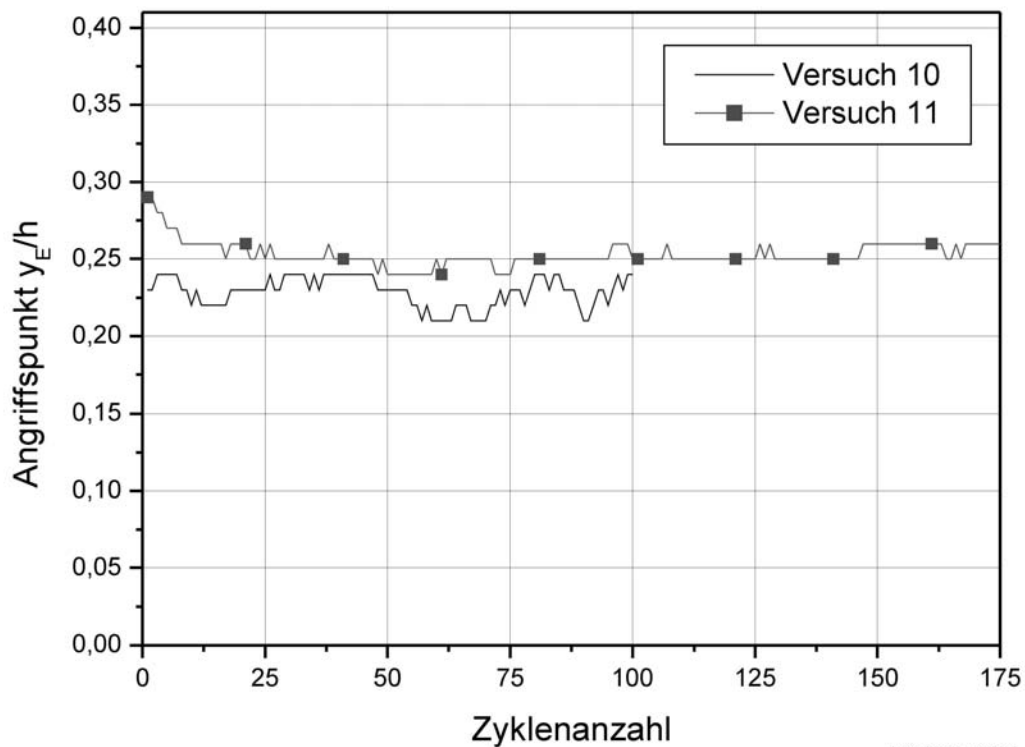
Bild 15: Horizontale Erddruckkraft  $E_h$  für das Erddruckmaximum

#### 5.4 Angriffspunkt $y_E$ der Erddruckkraft $E$ in Abhängigkeit der Zyklenanzahl



[versuch10\_11\_min/G3-y]

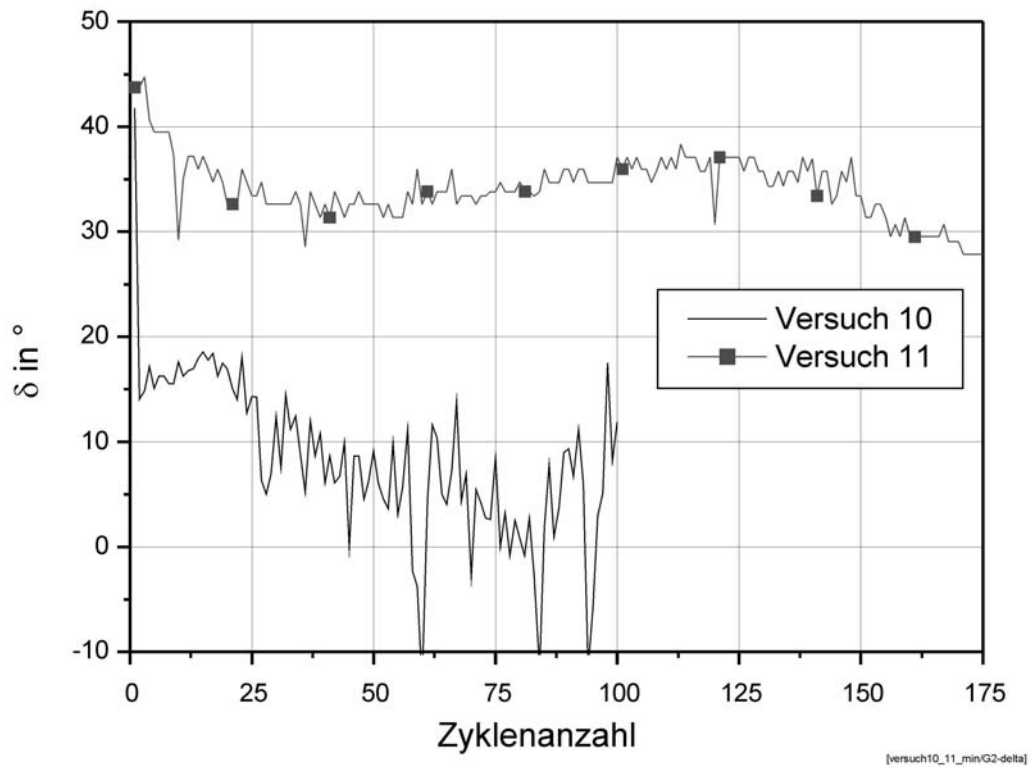
Bild 16: Angriffspunkt  $y_E$  der Erddruckkraft  $E$  für das Erddruckminimum



[versuch10\_11\_max/G3-y]

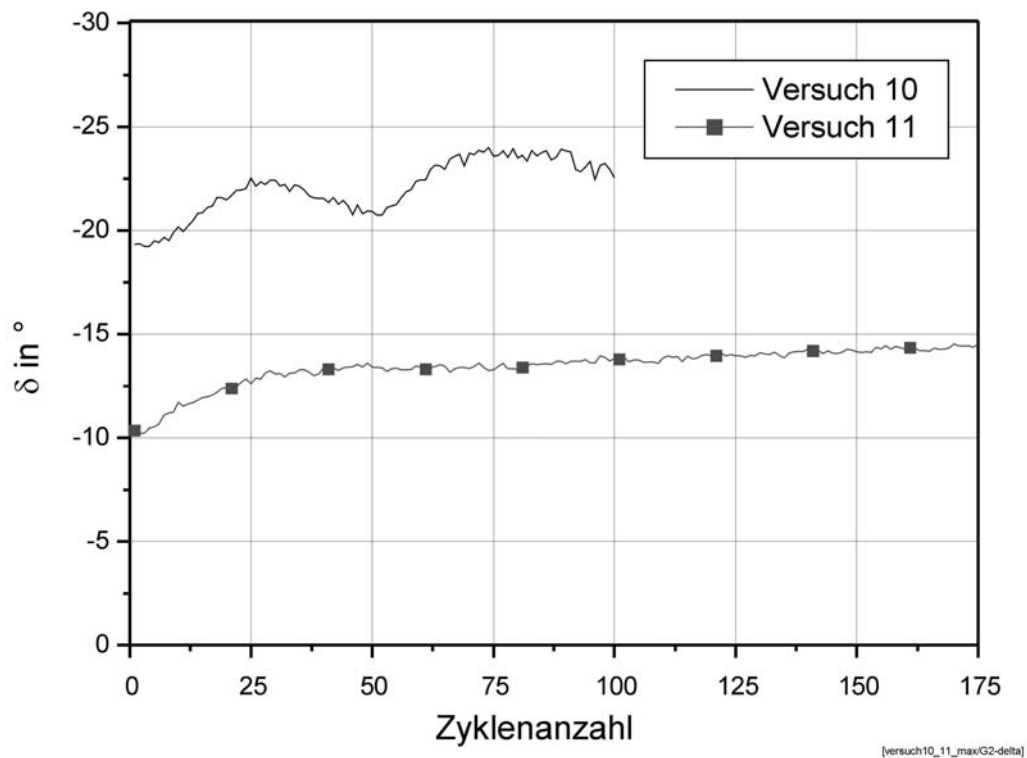
Bild 17: Angriffspunkt  $y_E$  der Erddruckkraft  $E$  für das Erddruckmaximum

### 5.5 Mobilisierter Erddruckneigungswinkel $\delta$ in Abhängigkeit der Zyklenanzahl



[versuch10\_11\_min(G2-delta)]

Bild 18: Mobilisierter Erddruckneigungswinkel  $\delta$  für das Erddruckminimum



[versuch10\_11\_max(G2-delta)]

Bild 19: Mobilisierter Erddruckneigungswinkel  $\delta$  für das Erddruckmaximum



## 5.6 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse mit zyklischer Wandbewegung

### 5.6.1 Mobilisierung des stützenden Erddrucks

#### Erddruckkraft

Beim Versuch 10 erfolgt bei den ersten 10 Zyklen eine starke Zunahme der horizontalen Erddruckkraft. Nach kurzem Verharren auf konstanten Niveau kommt es nochmals zu einer Zunahme. Bei ungefähr 50 Zyklen ist das Maximum der Erddruckkraft aktiviert. Nachfolgend erfolgt ein starker Abfall der Kraft, der nach ungefähr 75 Zyklen beendet ist.

Beim Versuch 11 zeigt sich nur ein geringer Einfluss der Zyklenanzahl auf die Erddruckkraft. Nach 50 Zyklen bleibt die Erddruckkraft nahezu konstant. Beim Versuch 11 mit einem Verhältnis der Wandbewegungsamplitude zur Wandhöhe von 1/200 ergibt sich bei Annahme einer dreieckförmigen Verteilung ein stützender Erddruckbeiwert von  $K_{pgH}$  zwischen 6,2 und 7,4. Ein passiver Erddruckbeiwert von  $K_{pgH} = 6,4$  würde bei Annahme gekrümmter Gleitflächen (Verfahren nach Pregl) bei einem Reibungswinkel von  $\varphi = 35^\circ$ ;  $\delta_p = -\varphi/2$  sowie  $D = 0,8$  erst bei Erreichen der Grenzverschiebung von  $0,056 \cdot h$  erreicht.

#### Erddruckneigungswinkel und Angriffspunkt

Beim Versuch 10 liegt der Neigungswinkel zwischen  $\delta = 20^\circ$  und  $\delta = 24^\circ$ . Ein Zusammenhang zwischen Neigungswinkel und Zyklenanzahl ist nicht erkennbar.

Im Versuch 11 nimmt der Erddruckneigungswinkel mit zunehmender Zyklenanzahl von  $\delta = 10^\circ$  auf etwa  $\delta = 14^\circ$  ab, wobei ab dem 50. Zyklus nur eine geringfügige Abnahme zu verzeichnen ist.

Der Angriffspunkt der Erddruckkraft liegt unabhängig von der Zyklenanzahl näherungsweise im unteren Viertelpunkt der Wand.

#### Einfluss der Amplitude der Wandbewegung

Mit zunehmender Amplitude der zyklischen Wandbewegung kommt es zu einer Vergrößerung der Erddruckkraft verbunden mit der Aktivierung eines kleineren Erddruckneigungswinkels. Der Einfluss auf den Angriffspunkt der Erddruckkraft ist gering.

Während das Mobilisierungsverhalten der Erddruckkraft in Abhängigkeit der Zyklenanzahl beim Versuch 10 mit der größeren Amplitude der Wandbewegung von  $v = 21$  mm sehr der Mobilisierung bei der monotonen Wandbewegung bis zur Grenzverschiebung ähnelt, ist beim Versuch 11 mit  $v = 3$  mm nur eine geringe Abhängigkeit der Erddruckkraft von der Zyklenanzahl vorhanden.

### 5.6.2 Mobilisierung des belastenden Erddrucks

Die gemessenen Kräfte bei der Mobilisierung des belastenden Erddrucks sind sehr klein. Die Genauigkeit der für einen großen Messbereich ausgelegten Kraftaufnehmer ist im unteren Messbereich weniger genau.

#### Erddruckkraft

Die minimale Erddruckkraft ist im Versuch 10 ungefähr doppelt so groß wie im Versuch 11. Eine Abhängigkeit von der Zyklenanzahl ist nicht erkennbar.

Beim Versuch 11 mit einem Verhältnis der Wandbewegungsamplitude zur Wandhöhe von 1/200 ergibt sich bei Annahme einer dreieckförmigen Verteilung beim belastenden Erddruck ein Beiwert von  $K_{agh}$  zwischen 0,13 und 0,16. Ein aktiver Erddruckbeiwert von  $K_{agh} = 0,14$  würde bei Annahme ebener Gleitflächen bei einem Reibungswinkel von  $\varphi = 45^\circ$  und  $\delta_a = 2 \cdot \varphi/3$  bei Erreichen der Grenzverschiebung aktiviert.



### **Erddruckneigungswinkel und Angriffspunkt**

Der Mittelwert des Erddruckneigungswinkels beträgt bei Erreichen des Minimums der horizontalen Erddruckkraft beim Versuch 10:  $\delta = 5^\circ$  und beim Versuch 11:  $\delta = 35^\circ$ . Der Angriffspunkt befindet sich bei beiden Versuchen ungefähr im unteren Drittel der Wand.

### **Einfluss der Größe der Wandbewegung je Zyklus**

Mit zunehmender Amplitude der Wandbewegung kommt es zu einer Vergrößerung der Erddruckkraft verbunden mit der Abnahme des Erddruckneigungswinkels. Der Einfluss auf den Angriffspunkt der Erddruckkraft ist gering.

## **6 Zusammenfassung**

Die durchgeführten zyklischen Versuche mit unterschiedlicher Amplitude der Wandbewegung zeigen, dass mit abnehmender Amplitude die Abhängigkeit zwischen der mobilisierten Erddruckkraft und der Zyklusanzahl weniger ausgeprägt ist. Bei kleiner Amplitude der Wandbewegung ist bei der untersuchten Zyklusanzahl der Einfluss auf den mobilisierten Extremwert der belastenden und stützenden Erddruckkraft gering.

Unter Beachtung des im Detail zwar noch unbekanntes Maßstabeffektes zwischen Wandhöhe und Amplitude der zyklischen Wandbewegung, kann jedoch mit großer Wahrscheinlichkeit vermutet werden, dass bei der üblichen Größe der Wandbewegung von Schleusenkammerwänden die mobilisierte Erddruckkraft nur gering von der Anzahl der Wandbewegungen abhängig ist.

### **Literatur**

- [1] Grundsatzversuche Blähton GEOTON La der Körnung 8-16 mm, Universität Karlsruhe, Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau, 2001
- [2] Merkblatt über die Verwendung von Blähton als Leichtbaustoff im Straßenunterbau und Untergrund, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag GmbH, 2004
- [3] Prospekt Blähton für die Geotechnik, Firma Fibro Exclay