

des Erwerbslebens auftretenden Gesamtverluste während der verbleibenden Arbeits- und Lebenszeit: bis zu einer halben Million DM je Betrieb. Hieraus leiten sich Überlegungen für weiterführende Untersuchungen und Maßnahmen ab.

### Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [ 1 ] ● Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland 1981. Stuttgart und Mainz: Kohlhammer 1981.
- [ 2 ] Bundesverband der landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften. Bericht über die Durchführung der Unfallverhütung und die Maßnahmen für die Erste Hilfe in der landwirtschaftlichen Unfallversicherung im Jahre 1967, Kassel 1968.

- [ 3 ] Basse, U.: Kosten des Arbeitsunfalls für den Betrieb. Vortrag Salzburg 1974.
- [ 4 ] Ritter, H.: Einzel- und Gemeinkosten eines Arbeitsunfalls. Methodik der Untersuchung. Sozialversicherungsanstalt der Bauern, Wien/Österreich.
- [ 5 ] Spiess, J.: Einzel- und Gemeinkosten eines Arbeitsunfalls. Untersuchungsergebnis. Sozialversicherungsanstalt der Bauern, Wien/Österreich.
- [ 6 ] ● Boll, W.: Die zeitgerechte berufliche Rehabilitation. In: Rehabilitation als Schlüssel zum Dauerarbeitsplatz. Berlin, Heidelberg und New York: Springer 1979. (Rehabilitation und Prävention 10).
- [ 7 ] Albrecht, H.: Grundlagen und Methoden der Beratung. Vorlesungsmanuskript Univ. Hohenheim, WS 1977/78.

## Druckverteilung unter einem Schüttguthaufen

Von Jiří Šmid, Prag\*)

DK 531.787:531.226:531.233

Die Kenntnis der in Haufwerken von Schüttgütern auftretenden Spannungen ist wichtig für die funktionsgerechte Gestaltung von Förder- und Lagerprozessen. Die Spannungen bestimmen einerseits die Beanspruchung des Einzelkorns innerhalb des Haufwerks und andererseits die vom Haufwerk auf die Umfassungswände ausgeübten Kräfte.

Hier wird über Messungen berichtet, bei denen mit einer Druckmeßzelle die Normal- und Scherspannungen in der Auflagefläche von Schüttguthaufwerken bestimmt wurden.

### 1. Einleitung

Das Ziel unserer Arbeit war die experimentelle Bestimmung des Profils der Normalspannungen und Scherspannungen in der Basis eines Schüttguthaufens. Für die Spannungsmessung wurden Druckmeßzellen auf Dehnungsmeßstreifen-Basis verwendet, die früher beschrieben [1, 2] und bei Druckmessungen von Schüttgütern an Silowänden überprüft wurden. Die Ergebnisse der Spannungsmessungen in Sandhaufen und Haufen von granuliertem Düngemittel NPK-1 bestätigen die Funktionsfähigkeit der Druckmeßzellen für Messungen unter Bedingungen in großem Maßstab, die jetzt vorbereitet werden.

Die Messungen in der Basis von Haufwerken bestätigten auch die berechneten Druckverteilungen in Schüttguthaufen, die auf einem ebenen mathematischen Modell [3] für einen Haufen unendlicher Länge basieren.

### 2. Versuchsapparatur

Der Hauptteil der Versuchsapparatur in Bild 1 ist die quadratische Meßplatte d, auf die das Schüttgut zur Bildung des Haufens c aufgeschüttet wird. Die Meßplatte mit den Abmessungen 2 x 2 m ist aus starren Stahlplatten zusammengesetzt. Die Mitte der Platte ist durch einen durchgehenden starren Träger verstärkt. In diesem ist eine Anzahl von Öffnungen vorhanden, um darin die Meßzellen für

die gleichzeitige Messung der Normal- und Scherspannungen zu installieren. Das in den Versuchen verwendete Schüttgut (Quarzsand und granulierter Dünger NPK-1) wird in den Bunkerzellen a gelagert und fließt von dort durch ein vertikales Rohr b auf das Zentrum der Platte aus. Für die Messung der Höhe des Haufens wurde ein einfaches Gerät verwendet, das aus einem Arm f und einem Ständer mit einer Skala g besteht.

Zwei elektrische Ausgangssignale (für die Normalspannung  $p_r$  und die Scherspannung  $p_t$ ) werden durch Kabel h von der Druckmeßzelle zu einem Trägerfrequenz-Meßverstärker i übertragen. Die Meßanordnung ermöglicht die Messung des Spannungsverlaufs während des Aufschüttens des Haufens. Nach der Verstärkung werden beide Ausgangssignale vom Trägerfrequenz-Meßverstärker durch Kabel j auf einen Kompensations-Linienschreiber k geführt, der als Millivoltmeter arbeitet.

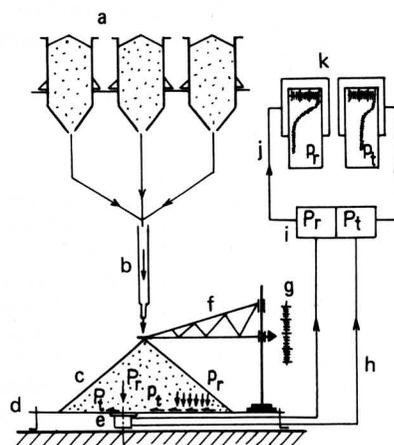
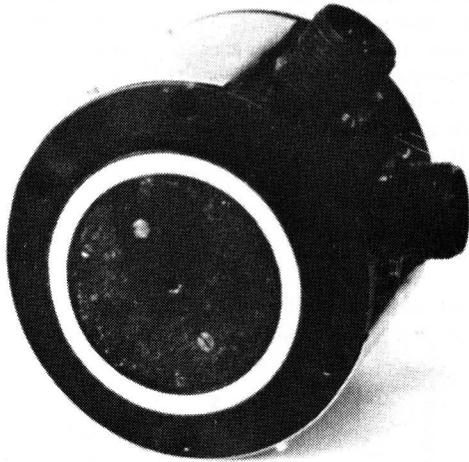


Bild 1. Versuchsaufbau für die Messung der Spannungen in der Basis eines Schüttgut-Haufwerks.

- |                   |                                 |
|-------------------|---------------------------------|
| a Bunkerzellen    | g Ständer mit Skala             |
| b Vertikalrohr    | h Kabel                         |
| c Haufwerk        | i Trägerfrequenz-Meßverstärker  |
| d Meßplatte       | j Kabel                         |
| e Druckmeßzelle   | k Kompensations-Linienschreiber |
| f Meßarm für Höhe |                                 |

\*) Dr. J. Šmid arbeitet am Institut für theoretische Grundlagen der chemischen Technik der Tschechoslowakischen Akademie der Wissenschaften, Prag.

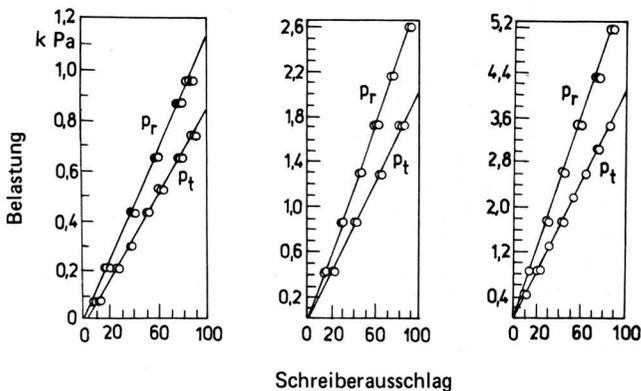
Die Druckmeßzelle, **Bild 2**, ist von einfacher Konstruktion und für die Messung der statischen und dynamischen Drücke von Schüttgütern auf Stützwände und Silowände geeignet. Sie ermöglicht die gleichzeitige und unabhängige Messung der beiden Komponenten des Spannungsvektors, d.h. der Normal- und Scherkomponente der Spannungen, in der begrenzenden Schüttgutschicht.



**Bild 2.** Mit Dehnungsmeßstreifen arbeitende Druckmeßzelle.

Für die Auswertung der Meßergebnisse werden Eichkurven verwendet, die die Abhängigkeit zwischen einer Eichkraft und dem Ausschlag des Millivoltmeters angeben. Diese Eichkurven sind in **Bild 3** für typische Druckbereiche, wie sie bei den Messungen in Schüttguthaufen auftreten, dargestellt.

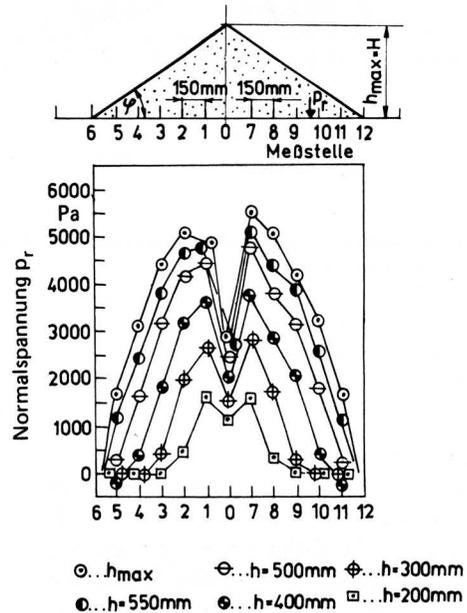
Die Dicke des elastischen Ringes der Druckmeßzelle, d.h. seine Steifigkeit, wurde so festgelegt, daß sogar bei der Messung des Maximaldruckes im Modellhaufen die Radialdeformation des Ringes nicht größer als  $3 \cdot 10^{-3}$  mm ist. Dieser Wert entspricht den Empfehlungen von *Boltjanskij u.a.* [4] für die Konstruktion von Druckmeßzellen. Wie durch *Banit u. Platonov* [5], *Kovtun u. Platonov* [6] sowie *Arthur u. Roscoe* [7] nachgewiesen wurde, beeinflusst die Größe der Deformation des Kraftmeß-Elements während der Druckmessung von Schüttgutschichten deutlich die Genauigkeit der Messung. Mit zunehmender Deformation des Kraftmeß-Elements der Druckmeßzelle nimmt der Wert des gemessenen Druckes ab und der Meßfehler steigt an. Die belastete starre Aufnehmerplatte oder Membran der Druckmeßzelle wird dann nach der Deformation des Kraftmeß-Elements (in unserem Falle des Stahlrings) nur durch einen Teil der Kraft beansprucht, die von der Schüttgutschicht ausgeübt wird. Dieser Effekt ist mit der Ausbildung einer lokalen Brücke in der Schicht über der Aufnehmerplatte zu erklären. In diesem Fall wird die von der Brücke aufgenommene Kraft nicht auf die Aufnehmerplatte übertragen.



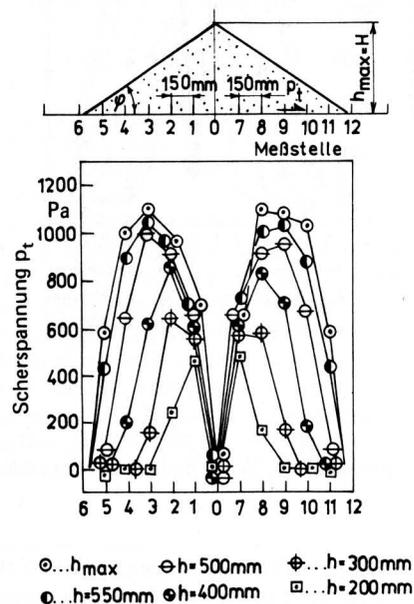
**Bild 3.** Eichdiagramme für die Druckmeßzelle.

### 3. Meßergebnisse

Während des Aufschüttens des Haufens wurden die Höhe  $h$ , die Normalspannung (Vertikaldruck)  $p_r$  und die Scherspannung  $p_t$  in der Basis des Haufens gemessen. Die Verteilung von Normal- und Scherspannungen in der Basis des Haufens sind in **Bild 4** und **5** für Sand und in **Bild 6** und **7** für den Dünger NPK-1 gezeigt. Aus den Bildern 4 bis 7 ist zu ersehen, daß die Normalspannungen und damit der Vertikaldruck in der Mitte des Haufens, d.h. in seiner vertikalen Mittelachse, eine bedeutende Absenkung erfahren (Position 0 der Druckzelle). Andererseits erreichen die Normalspannungen nahe der Mitte in den Positionen 1 und 7 oder 2 und 8 ein Maximum. In der Mitte des Haufens sind, wie aus den Bildern 5 und 7 zu entnehmen ist, die Scherspannungen gleich Null, da in dieser Position die wirkenden Reibungskräfte im Gleichgewicht sind.



**Bild 4.** Normalspannungen (Vertikaldrücke)  $p_r$  in der Basis eines Sandhaufens.



**Bild 5.** Scherspannungen  $p_t$  in der Basis eines Sandhaufens.

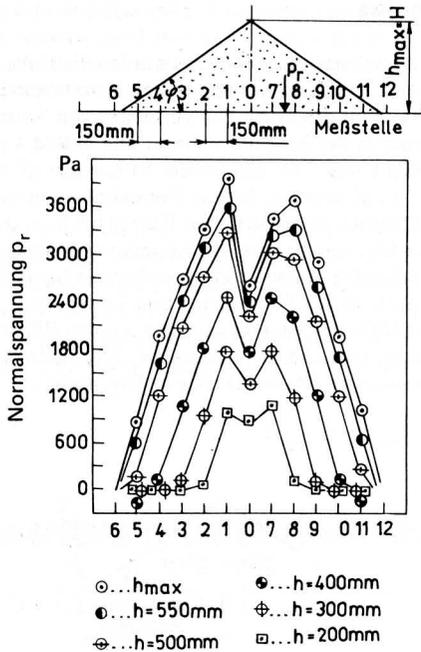


Bild 6. Normalspannungen (Vertikaldrücke)  $p_r$  in der Basis eines Mineraldünger-Haufens.

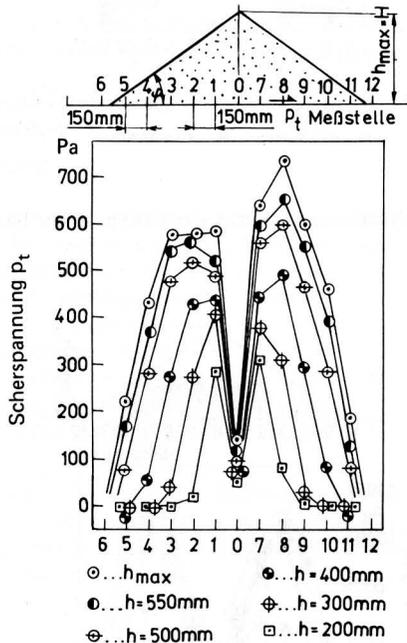


Bild 7. Scherspannungen  $p_t$  in der Basis eines Mineraldünger-Haufens.

Nach der Ausbildung des Haufens wurden sowohl die Höhe  $h_{max}$  als auch der Durchmesser an der Basis des Kegels gemessen. Aus diesen Messungen wurde der Böschungswinkel bestimmt. Er war für Sand  $\varphi = 32,6^\circ$  und für den Dünger NPK-1  $\varphi = 33,7^\circ$ .

Einander entsprechende Werte von Vertikalspannung  $p_r$  und Scherspannung  $p_t$  in der Basis des Haufens erlauben für die Meßstellen die Bestimmung des lokalen Wandreibungsbeiwertes  $f_w = p_t/p_r$  für die Reibung zwischen dem Schüttgut und dem Stahl der Grundplatte, auf die der Haufen aufgeschüttet wurde. Die Meßanordnung mit der Druckmeßzelle ermöglicht die gleichzeitige Aufzeichnung beider Spannungskomponenten in Abhängigkeit von der Aufschüttzeit des Haufens. Auf diese Weise ist es daher möglich, in den für die Meßzelle gewählten Punkten den lokalen Wandreibungsbeiwert als Verhältnis der gleichzeitig gemessenen Scher- und Normalspannungen für die jeweilige Höhe des Haufens zu bestimmen. In Bild 8 und 9 sind für Sand und in Bild 10 und 11 für NPK-1 die erhaltenen Abhängigkeiten des Wandreibungsbeiwertes von der Haufenhöhe  $h$  dargestellt.

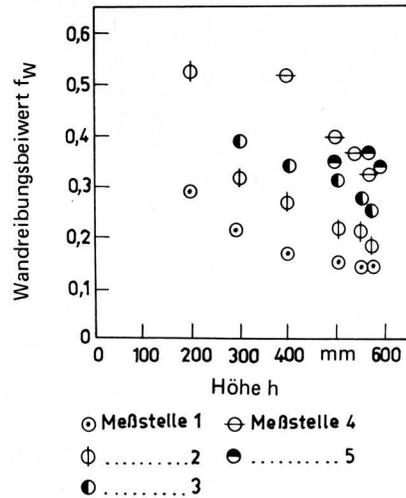


Bild 8. Reibungsbeiwert  $f_w$  für Sand in Abhängigkeit von der Haufenhöhe  $h$ ; Meßort als Parameter (linke Seite des Haufens).

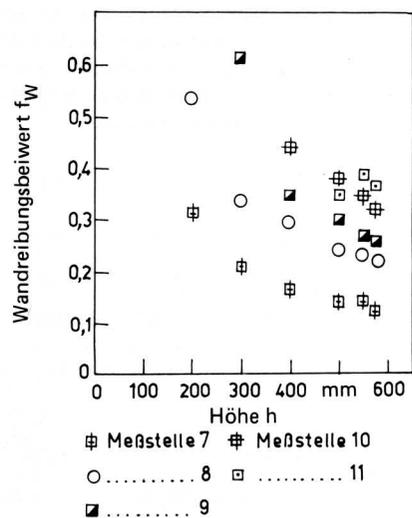


Bild 9. Reibungsbeiwert  $f_w$  für Sand in Abhängigkeit von der Haufenhöhe  $h$ ; Meßort als Parameter (rechte Seite des Haufens).

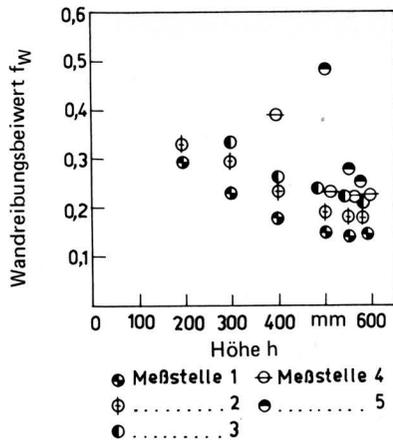


Bild 10. Reibungsbeiwert  $f_W$  für Mineraldünger in Abhängigkeit von der Haufenhöhe  $h$ ; Meßort als Parameter (linke Seite des Haufens).

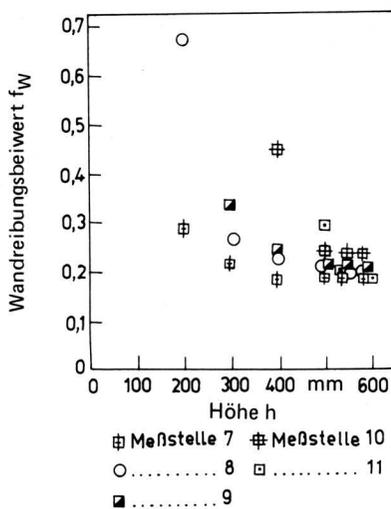


Bild 11. Reibungsbeiwert  $f_W$  für Mineraldünger in Abhängigkeit von der Haufenhöhe  $h$ ; Meßort als Parameter (rechte Seite des Haufens).

#### 4. Diskussion der Versuchsergebnisse

Die vergleichsweise sehr niedrigen gemessenen Werte der Normalspannungen in der Mitte des Haufens zeigen an, daß ein Teil des Materialgewichtes im Zentrum des Haufens auf die äußeren Regionen des Haufens übertragen wird. Dort werden, besonders im Übergang vom Zentrum zu den äußeren Regionen, Maximalwerte der Normalspannungen (des Vertikaldruckes) und der Scherspannungen in der Basis des Haufens ermittelt.

Es sollte festgestellt werden, daß das Minimum der Normalspannungen in der Mitte des Haufens ein charakteristisches Merkmal während der gesamten Aufschüttzeit ist und daß dieses Minimum sofort mit Beginn des Experiments beobachtet wird. Somit kann das Minimum nicht durch eine Deformation der Grundplatte oder durch eine Ungenauigkeit der Messungen, die mit Zunahme des Druckes auf die Druckmeßzelle anwächst, erklärt werden.

Es könnte auch angenommen werden, daß das Minimum der Normalspannungen in der Haufenmitte durch eine Entmischung während des Aufschüttens hervorgerufen wird. Diese Ansicht könnte experimentell durch Verwendung eines monodispersen Schüttgutes oder eines Schüttgutes mit enger Korngrößenverteilung überprüft werden.

Der Wandreibungsbeiwert  $f_W$  gegenüber Stahl hängt von der Haufenhöhe ab, wie es in den Bildern 8 bis 11 gezeigt wird. Es ist notwendig festzustellen, daß der Wandreibungsbeiwert in diesem Fall ein lokales Verhältnis der Scher- und Normalspannungskomponenten der Schüttgutschicht auf der Grundplatte darstellt und damit die Richtung des allgemeinen Spannungsvektors auf der horizontalen Oberfläche der Grundplatte bestimmt. Dieser Wert kann daher nicht mit dem in einem Schertest ermittelten Wert, der auf dem Coulombschen Reibungsgesetz basiert, gleichgesetzt werden.

Aus den Bildern 8 bis 11 ist ersichtlich, daß der Reibungsbeiwert  $f_W$  in der Basis des Haufens mit Zunahme der Höhe  $h$  abnimmt. Diese Abnahme bei wachsender Höhe ist nicht linear, es scheint vielmehr, daß für größere Höhen die Abnahme des Reibungsbeiwerts kleiner ist und der Reibungsbeiwert einem bestimmten Grenzwert zustrebt.

#### 5. Zusammenfassung

Die Normal- und Scherspannungen wurden in der Basis eines Modellhaufens von Schüttgut (Sand und granulierter Mineraldünger NPK-1) gemessen. Die Verteilung dieser Spannungen wurde in der Basis des Haufens, die eine Stahlplatte darstellte, bestimmt. Der Wandreibungsbeiwert zwischen dem Schüttgut und Stahl wurde ebenfalls ermittelt. Das in den Versuchen verwendete Schüttgut ist durch den Böschungswinkel charakterisiert. Die Meßergebnisse zeigen, daß die Spannungen in Schüttguthaufen nicht unmittelbar in der Mittelachse des Haufens maximal sind, sondern in einer bestimmten Zone, die der Zentralachse des Haufens benachbart ist. Dort kann das Material, z.B. der Mineraldünger, während der Lagerung besonders durch Agglomeration Qualitätsveränderungen erfahren.

#### Schrifttum

- [ 1 ] Šmid, J. u. J. Novosad: Pressure cell for measuring normal and shear stresses. Proc. POWTECH 71 Conference, Harrogate (England), 12th–14th May 1971, Symp. Nr. 4 – Powder Mechanics, S. 137/41.
- [ 2 ] Šmid, J.: Coll. Czech. Chem. Commun., Bd. 40 (1975), S. 2424.
- [ 3 ] Zenkov, R.L.: Mekhanika nasypnykh gruzov. 2. Aufl. Moskau, UdSSR: Mashinostroenie 1964.
- [ 4 ] Boltjanskij, E.Z. u.a.: Eksploatatsionnaya nadezhnost elevatorov. Moskau, UdSSR: Kolos 1976.
- [ 5 ] Banit, E.A. u. P.N. Platonov: Izv. vys. ucheb. zavedenii, Pishchevaya tekhnologiya (1958) Nr. 1, S. 92/96.
- [ 6 ] Kovtun, A.P. u. P.N. Platonov: Datchiky dlya izmerenya davleniya v sypuchikh sredakh. Peredovoi nauch.-tekh. i proizv. opyt, (1959) Nr. P-59-9/3, Tema 34, Moskau, UdSSR.
- [ 7 ] Arthur, J.R.F. u. K.H. Roscoe: Civil Engng. and Public Works Rev., Bd. 56 (1961) Nr. 659, S. 765, 767/70.