

# Grundlagen der Landtechnik

Herausgegeben mit Unterstützung durch die  
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft  
Braunschweig-Völkenrode (FAL)

Schriftleitung: Dr. F. Schoedder, Institut  
für landtechnische Grundlagenforschung

Grundl. Landtechnik Bd. 33 (1983) Nr. 5, S. 121 bis 160

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE

## Druckspannungsmeßdosen für körnige Haufwerke

Von Theodor Hesse, Geesthacht\*)

DK 531.787:624.953

Die für eine festigkeitgerechte Dimensionierung von Schüttgutsilos erforderlichen Lastannahmen wurden bisher durch Belastungsmessungen an Wand und Boden der Silos ermittelt. Durch Einlegen geeigneter Druckspannungsmeßdosen in das Schüttgut eines Silos können die im Haufwerk herrschenden Spannungen direkt gemessen werden.

In diesem Beitrag wird erläutert, welche grundsätzlichen Überlegungen beim Einsatz von Druckspannungsmeßdosen in Schüttgütern erforderlich sind, um die Meßfehler aufgrund der Wechselwirkungen zwischen Schüttgut und Meßdose möglichst klein zu halten bzw. abschätzen zu können.

Es werden verschiedene Druckspannungsmeßdosen vorgestellt und deren Meßergebnisse miteinander verglichen. Abschließend werden erste Meßergebnisse der Spannungsverteilung in einem Modellsilo dargestellt und dabei die Betriebszustände Füllen und Entleeren einander gegenübergestellt.

### 1. Einleitung

Für eine festigkeitgerechte Dimensionierung von Silos steht in Deutschland die DIN 1055 T 6 zur Verfügung, die gegenwärtig neu überarbeitet wird. Die Verfasser dieser Berechnungsgrundlagen weisen immer wieder darauf hin, daß das heutige Wissen auf dem Gebiet der Lastannahmen für Silos noch lückenhaft ist und weiterführende Untersuchungen erforderlich sind.

Bisher war es in der Regel nur möglich, die während des Silobetriebes auftretenden Lasten an Wand und Boden des Silos experimentell zu ermitteln. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden in die theoretische Behandlung des Problems eingebaut. Da die am Behälter auftretenden Belastungen letztlich ihre Ursache in den Spannungen im Schüttgut haben, ist es sinnvoll, diese auch direkt zu messen.

So war das Ziel der hier beschriebenen Untersuchungen, zunächst ein geeignetes Meßverfahren zu entwickeln, um die örtli-

chen Spannungen in Schüttgutsilos bestimmen zu können: Durch Einlegen von geeigneten Meßdosen in das Schüttgut kann die örtliche Spannung während des gesamten Silobetriebes, d.h. während des Füllens, Lagerns und Entleerens ermittelt werden. Mit einer entsprechenden Registriereinrichtung kann dabei der zeitliche Spannungsverlauf mit seinen Spannungsspitzen festgehalten und ausgewertet werden.

Die im folgenden näher beschriebenen Druckmeßdosen stellen eine Ergänzung zu den bereits vorgestellten Mehrkomponenten-Spannungsmeßdosen dar [1], die für die Spannungsermittlung an Wand und Boden von Schüttgutsilos erfolgreich eingesetzt wurden. Darüber hinaus sind erste Überlegungen und Vorversuche zur Entwicklung einer in das Schüttgut einzulegenden Druckspannungsmeßdose sowie eine entsprechende Versuchseinrichtung zur Simulation hoher Silodrucke früher im Zusammenhang mit der Vorstellung des Spitzendruck-Sondiervorganges beschrieben worden [2, 3]. Eine ausführliche Darstellung aller Versuchsergebnisse mit den hier beschriebenen neuen Druckspannungsmeßdosen findet sich auch in einer umfangreicheren Arbeit [4].

### 2. Grundlegende Betrachtungen

Jede in ein Schüttgut eingelegte Meßdose ist letztlich als ein Fremdkörper anzusehen, wenn sie in ihrer Größe, Form und ihren Verformungseigenschaften gegenüber den Einzelkörnern differiert. Es sollen daher einige grundsätzliche Überlegungen für die Entwicklung und den Einsatz von geeigneten Spannungsmeßdosen, die in das Schüttgut eingelegt werden, angeführt werden. Dazu ist sowohl das zu untersuchende Schüttgut näher zu charakterisieren als auch die verwendete Meßdose auf etwaige systematische Meßfehler hin zu überprüfen.

#### 2.1 Schüttgut

##### 2.1.1 Wahl des Versuchsgutes

Bei früheren experimentellen Untersuchungen an und in körnigen Haufwerken wurden zunächst vorwiegend trockene landwirtschaftliche Schüttgüter wie Weizen, Gerste und Sojabohnen verwendet [1 bis 8], deren Stoffeigenschaften sich bei den während der Untersuchungen herrschenden Umweltbedingungen nur in vernachlässigbar geringem Umfang ändern. Bei diesen Gütern stellt sich bei unterschiedlichen Füllverfahren jeweils eine unterschiedliche mittlere Schüttdichte im Silo (s. Abschn. 2.1.2.2) ein, insbesondere bei Gerste bildet sich aber eine unterschiedliche Haufwerksstruktur aus [6]. Sojabohnen haben dagegen eine kugelhähnliche Form und sind daher für Modellbetrachtungen zunächst besser geeignet.

\*) Dr.-Ing. Th. Hesse war wissenschaftlicher Assistent am Institut für Landmaschinen (Direktor: Prof. Dr.-Ing. H.J. Matthies) der TU Braunschweig und ist nun nach 4jähriger Industriepraxis jetzt als Professor an der Fachhochschule Hamburg tätig.

Aus diesen Gründen wurden auch hier insbesondere bei den grundsätzlichen Untersuchungen der verschiedenen Meßdosen zunächst Sojabohnen als Haufwerk eingesetzt; anschließend wurden die so gewonnenen Ergebnisse mit Weizen überprüft. Daneben wurde aber auch stichprobenartig der Einfluß anderer landwirtschaftlicher Schüttgüter wie Gerste, Hafer, Raps, Roggen und Sojaschrot untersucht.

### 2.1.2 Kenngrößen

Im folgenden werden die wichtigsten Kenngrößen des Schüttgutes, die für den Einsatz von eingelegten Spannungsmeßdosen erforderlich sind, kurz beschrieben und soweit nötig ihr Zahlenwert angegeben.

#### 2.1.2.1 Korngröße

Häufig wird bei der Untersuchung körniger landwirtschaftlicher Haufwerke der mittlere reduzierte bzw. äquivalente Korndurchmesser  $d_K$  verwendet [9, 10]; er ist definiert als

$$d_K = 1,24 \sqrt[3]{m/N \rho} \quad (1),$$

wobei  $m$  die Masse einer Anzahl von  $N$  (etwa 1000 ausgezählten) Körnern und  $\rho$  deren Dichte ist. Dabei ist die Dichte eines Stoffes definiert als volumenbezogene Masse des Materials ohne Einbeziehung der geschlossenen und offenen Poren. Sie kann beispielsweise über das in [9] ausführlich beschriebene Petroleum-Exsikkator-Verfahren bestimmt werden. Für die überwiegend verwendeten Sojabohnen wurde hier als Mittelwert eine Dichte von  $1192 \text{ kg/m}^3$  ermittelt.

Der mittlere Korndurchmesser der bei diesen Versuchen verwendeten Sojabohnen ergab sich danach zu  $6,3 \text{ mm}$ . Dieser Wert wird vor allem für eine richtige Auslegung der Größe der Meßfläche einer Spannungsmeßdose benötigt (s. Abschn. 2.2.3).

#### 2.1.2.2 Schüttdichte

Üblicherweise wird die Schüttdichte  $\rho_S$  eines Haufwerkes als volumenbezogene Masse des geschütteten Gutes definiert. Im Hinblick auf die hier durchgeführten Untersuchungen geht die Schüttdichte eines eingelagerten Haufwerkes nach DIN 1055 T 6 in die Berechnung der Spannungen am und im Silo ein.

Frühere Untersuchungen haben gezeigt, daß die mittlere Schüttdichte je nach Schüttverfahren stark schwanken kann [1 bis 8]. Die im Rahmen dieser Untersuchungen verwendeten Füllmethoden, die in [4] näher beschrieben sind, führten zu Schüttdichten von  $755$  bis  $805 \text{ kg/m}^3$  für die überwiegend verwendeten Sojabohnen.

#### 2.1.2.3 Steifigkeit des Schüttgutes

Für den möglichst zu unterbindenden Fremdkörpereinfluß von Meßdosen in Schüttgütern bzw. Haufwerken ist das Elastizitätsverhalten bzw. die Steifigkeit des Haufwerkes von besonderer Bedeutung. Dabei ist es zunächst weniger wichtig, ob die Nachgiebigkeit der Schüttung von rein elastischer Natur ist oder nicht; vielmehr kommt es auf die Zusammendrückung, d.h. Stauchung an, die die Schüttgutsäule beispielsweise bei einer bestimmten vertikalen Belastung erfährt.

In Bild 1 ist das Verdichtungsverhalten einiger ausgewählter Getreidearten wiedergegeben, deren Verdichtungsfunktionen experimentell ermittelt wurden [8]. Die in Abhängigkeit von der Stauchung dargestellten Verdichtungsdrücke steigen je nach Schüttgutsorte unterschiedlich progressiv an. Auch der Gutfeuchtegehalt hat einen Einfluß auf die Verdichtungsfunktion [8]. Eigene Voruntersuchungen haben gezeigt, daß darüber hinaus vor allem die Ausgangsdichte, die, wie bereits erwähnt, durch unterschiedliche Füll-

verfahren variiert werden kann, für das Verdichtungsverhalten ausschlaggebend ist [4].

Wie aus Bild 1 weiter zu entnehmen ist, weisen landwirtschaftliche Schüttgüter kein lineares Verdichtungsverhalten auf. Obwohl in der Fachliteratur leider weit verbreitet, ist es daher falsch, in Anlehnung an die Mechanik oder Werkstoffkunde hier von einem (konstanten) "Elastizitätsmodul" zu sprechen. Es soll daher im folgenden die aus der Bodenmechanik (z.B. [11]) bekannte Bezeichnung "Steifzahl bei behinderter Seitendehnung"  $E_S$  verwendet werden. Diese Größe läßt sich — wie in Bild 2 schematisch dargestellt — aus der Neigung der Tangente bzw. der Sehne über den in Betracht kommenden Lastbereich  $\Delta\sigma$  der Verdichtungskurve mit der zugehörigen Stauchungsdifferenz  $\Delta\epsilon_S$  berechnen:

$$E_S = \Delta\sigma / \Delta\epsilon_S \quad (2).$$

Dieser Ausdruck hat zwar die Bedeutung und die Dimension einer Elastizitätszahl, ist jedoch nur über kleine Lastbereiche  $\Delta\sigma$  als einigermaßen konstant anzusehen.

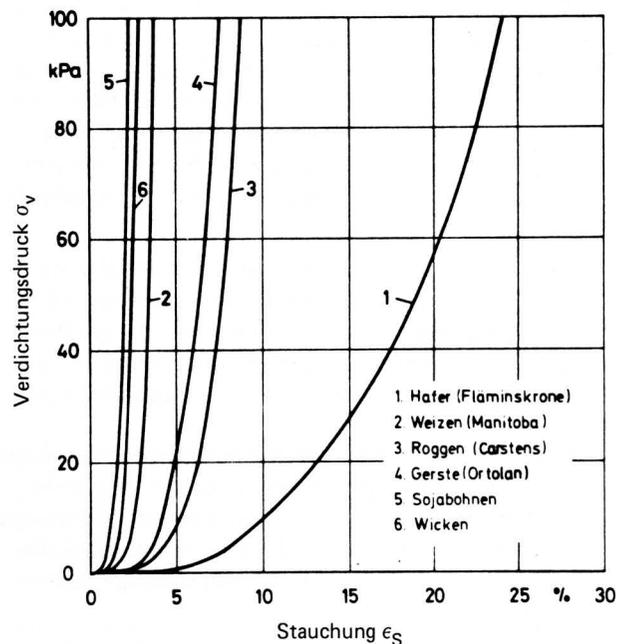


Bild 1. Verdichtungsverhalten landwirtschaftlicher Schüttgüter; nach Hoffmann [8].

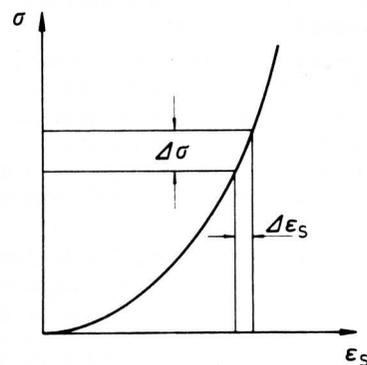


Bild 2. Definition der Steifzahl bei behinderter Seitendehnung aus der Steigung der Verdichtungskurve;  $E_S = \Delta\sigma / \Delta\epsilon_S$ .

Die für unterschiedliche landwirtschaftliche Schüttgüter ermittelten Meßwerte für das Verdichtungsverhalten, aus denen auch die in Bild 1 eingetragenen Verdichtungskurven erstellt sind, wurden mit Hilfe von Gl. (2) umgerechnet. Die Ergebnisse sind in Bild 3 als sich mit der Belastung ändernde Steifezahlen in Diagrammform wiedergegeben.

Schließlich zeigt Bild 4 am Beispiel von Weizen den Einfluß der Feuchtigkeit auf die Steifezahl für verschiedene Belastungen. Aus beiden Diagrammen geht deutlich hervor, daß die Steifezahl sowohl durch die Gutart und die Gutfeuchte als auch die jeweilige Belastung in starkem Maße beeinflußt wird.

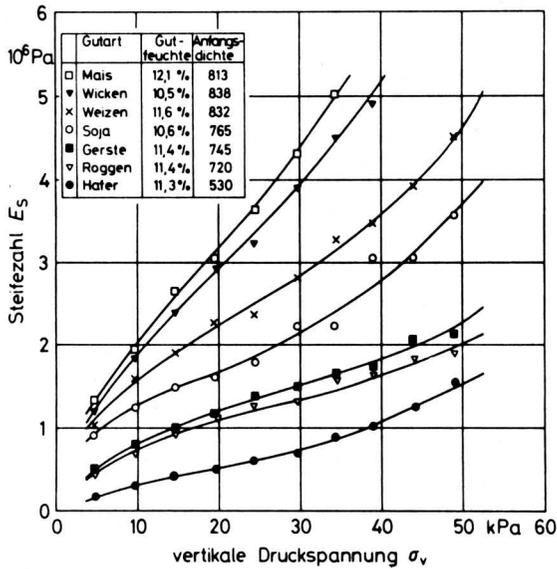


Bild 3. Steifezahl bei behinderter Seitendehnung für einige landwirtschaftliche Schüttgüter in Abhängigkeit von der vertikalen Druckspannung.

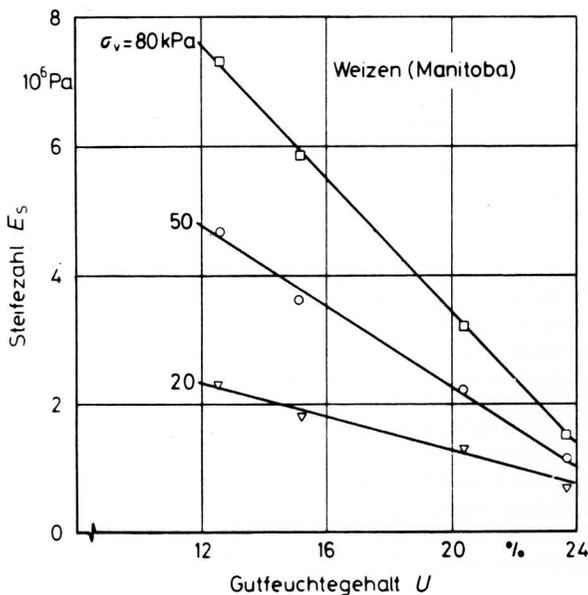


Bild 4. Steifezahl bei behinderter Seitendehnung in Abhängigkeit vom Gutfeuchtegehalt bei verschiedenen Belastungen.

## 2.2 Entwicklung der Druckspannungsmessdosen

### 2.2.1 Unterbrechung des Füllvorganges

Bei direkten Spannungsmessungen in Schüttgütern ist es unumgänglich, den Füllvorgang zu unterbrechen, um eine entsprechende Meßdose einlegen zu können. Erst danach wird die restliche Gutmenge nachgefüllt. Damit ergibt sich zwangsläufig die Frage, ob diese Unterbrechung des Füllens einen Einfluß auf den späteren Spannungszustand im Haufwerk hat.

Vor den eigentlichen Untersuchungen zur Optimierung einer Druckspannungsmessdose für Schüttgüter wurden daher mehrere Meßreihen durchgeführt, bei denen der Silo zum einen ohne Unterbrechung, zum anderen durch einmalige oder auch mehrmalige Unterbrechung von bis zu 5 min auf das gleiche Niveau gefüllt wurde. Die jeweils bei vollem Behälter gemessenen Endwerte der Druck- und Schubbelastungen sowohl an der Wand als auch am Boden des Silos wurden miteinander verglichen. Dabei wurden die Belastungen mit Mehrkomponenten-Meßeinrichtungen gemessen [1], die in verschiedenen Höhen in der Silowand und an mehreren Stellen des ebenen Silobodens eingebaut waren. Es konnte eindeutig nachgewiesen werden, daß auch eine mehrfache Unterbrechung des Füllvorganges keinen Einfluß auf die am Modellsilo auftretenden Belastungen und damit auf den Spannungszustand im Silo hat.

### 2.2.2 Kraftübertragung im Haufwerk

Ein körniges Haufwerk setzt sich aus einzelnen festen Teilchen zusammen; Spannungen im Haufwerk werden daher als Kräfte von Korn zu Korn übertragen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Verteilung der Berührungspunkte bzw. -flächen zwischen den einzelnen Teilchen je nach Lage und Anordnung der Körner sehr starken statistischen Schwankungen unterworfen ist; in gleicher Weise sind auch die Richtungen der verschiedenen Kontaktkräfte unregelmäßig und zufällig verteilt, so daß ein polygonales Kraftliniennetz entsteht [12], was auch experimentell durch fotoelastisches Material nachgewiesen werden konnte [13].

Bei Schüttgütern ist daher grundsätzlich zwischen "differenziellen" und "integralen" Druckspannungen zu unterscheiden [14]. Die differentielle Druckspannung mit ihrer punktförmigen Übertragung wird aus den oben genannten Gründen im folgenden nicht weiter verwendet. Unter einer integralen Druckspannung, mit der weiterhin gerechnet wird, soll hier, der üblichen Definition einer Druckspannung folgend, die Druckkraft pro Flächeneinheit verstanden werden [15].

### 2.2.3 Größe der Meßfläche

Für die experimentelle Ermittlung von Druckspannungen in Schüttgütern wäre es aufgrund der beschriebenen Kraftübertragung im Haufwerk falsch, den Durchmesser und die Form der Druckspannungsmessdose gleich denen der Teilchen zu gestalten. Die Meßfläche der Meßdose muß vielmehr im Vergleich mit den Körnern einen größeren Durchmesser haben, um der Tatsache Rechnung zu tragen, daß die Körner nicht gleichmäßig zur Kraftübertragung beitragen, sondern je nach Anordnung und Größe als stark belastete neben weniger belasteten oder gar unbelasteten im Korngefüge liegen. Insbesondere bei der Untersuchung der Spannungsverteilung in kleinen Lagerbehältern, z.B. Modellsilos, darf andererseits die Meßfläche im Verhältnis zum Silodurchmesser jedoch auch nicht beliebig groß gewählt werden, da sonst örtlich unterschiedliche Spannungen und vor allem Spannungsspitzen durch die Mittelung nicht erkannt würden.

Bei Modellsilos wird für das Verhältnis zwischen dem Meßdosendurchmesser und dem mittleren Korndurchmesser ein Wert von mindestens 6 empfohlen [16], andere Autoren aus dem Gebiet der Bodenmechanik gehen bis etwa 10 [17, 18] bzw. sogar bis 50 [19, 20, 21].

Eigene Druckspannungsuntersuchungen an landwirtschaftlichen Schüttgütern [2, 4] führten bei einer Meßfläche von 76 mm Durchmesser und einer halb so großen sowie auch doppelt so großen Meß-

fläche zu gleichen Ergebnissen. Lediglich wiesen die Meßwerte der kleineren Meßfläche erwartungsgemäß einen etwas größeren Streubereich auf, so daß in diesem Fall ein optimales Verhältnis von Meßflächen- zu Korndurchmesser

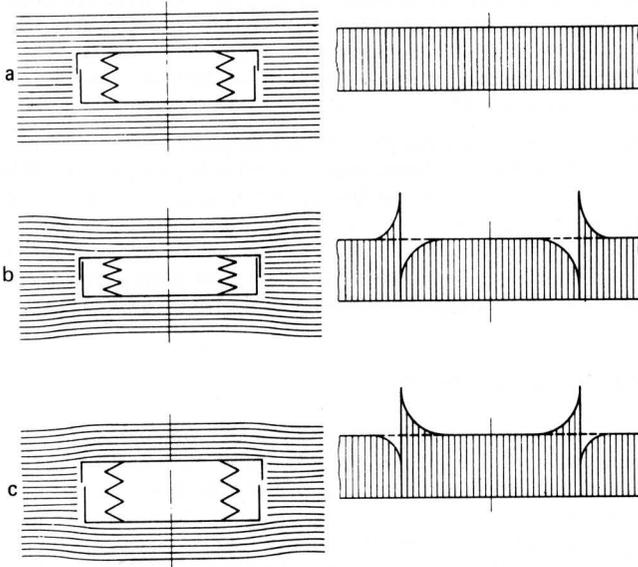
$$d_M/d_K \approx 12 \quad (3)$$

angegeben werden kann. Auch bei Belastungsmessungen an Wand und Boden von Modellsilos mit landwirtschaftlichen Schüttgütern hat sich eine Meßfläche dieser Größe bereits bewährt [1, 7].

#### 2.2.4 Bauhöhe und Elastizität der Meßdose

Voraussetzung für eine theoretisch exakte Ermittlung der Druckspannungen in einem Haufwerk ist, daß der verwendete Meßkörper das gleiche Spannungs-Verformungs-Verhalten aufweist wie das Schüttgut selbst. In der Praxis wird sich dies kaum realisieren lassen (s. Abschn. 2.1.2.3), so daß jede ins Schüttgut eingelegte Meßdose als Störkörper anzusehen ist, die nicht die tatsächliche, sondern eine verfälschte Druckspannung mißt. Mit Hilfe theoretischer Überlegungen läßt sich der Störeinfluß jedoch abschätzen [16, 19, 20, 22, 23], so daß eine nachträgliche Meßwertkorrektur möglich ist.

Da die seitlichen Silowände als starr zu bezeichnen sind, hat die gesamte Gutsäule bei wachsender Belastung durch das Eigengewicht der oberen Schichten nur die Möglichkeit, sich in vertikaler Richtung zu verdichten. In der Regel stimmen die Verformungseigenschaften und damit die Elastizität von Meßdose und Schüttgut nicht überein. In Bild 5 ist links das Verhalten des Gutes im Bereich der Meßdose und rechts die daraus resultierende Meßwertbeeinflussung für den Fall der vertikalen Druckspannungsmessung erläutert.



**Bild 5.** Verhalten des Schüttgutes (links) und vertikale Druckspannungsverteilung (rechts) im Bereich von eingelegten Meßdosen.

- a der Elastizität des Schüttgutes angepaßte Meßdose
- b relativ weiche Meßdose
- c relativ harte Meßdose

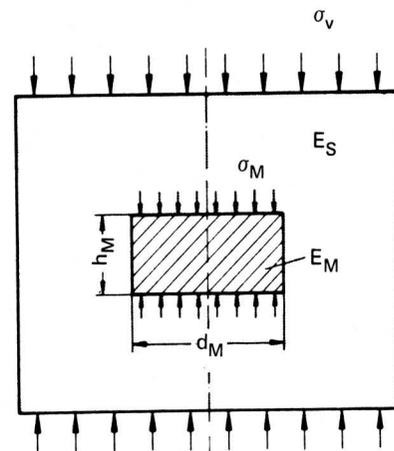
Die Meßdose kann nur durch Unterbrechung des Füllvorganges in die Schüttung eingebracht werden. Nach dem Einlegen wird beim weiteren Nachfüllen von Schüttgut sowohl die Meßdose als auch das sie seitliche umgebende Gut allmählich komprimiert. Hat die Meßdose die gleiche Elastizität wie das Schüttgut, so werden die Gutschichten auch im Bereich der Meßdose gleichmäßig verformt, im Bild links bei a durch Parallelen angedeutet, so daß die Meßdose die dort herrschende und im Bild rechts daneben als Flächenlast eingetragene Druckspannung richtig ermittelt. Ist hingegen die Meßdose weicher als das sie umgebende Gut, so stützt sich das

Schüttgut über der Dose infolge instabiler Brückenbildung teilweise auf dem Gut seitlich der Dose ab, wie bei b links schematisch angedeutet, so daß insgesamt auf der Meßfläche eine zu geringe Druckspannung gemessen wird, b rechts [24]. Bei einer Dose, die härter als das Versuchsgut ist, ergibt sich der gegenteilige Effekt, die Lagerung über der Dose ist dichter als in den Bereichen daneben, c links, so daß sich ein Teil des Gutes aus dem Umgebungsreich ebenfalls auf der Meßfläche abstützt und die gemessene vertikale Druckspannung zu groß erscheinen läßt, c rechts.

Aufgrund theoretischer Überlegungen [22] lassen sich unterschiedliche Verformungseigenschaften von Meßdose und Schüttgut durch eine nachträgliche Meßwertkorrektur hinreichend berücksichtigen. Die ursprünglich am Beispiel eines in Beton eingeschlossenen Meßgebers aufgestellte Fehlersystematik der Meßanzeige kann auf ein lagerndes Haufwerk übertragen werden, da in beiden Fällen sowohl der Meßkörper als auch das umgebende Medium elastisches bzw. nachgiebiges Verformungsverhalten aufweisen.

In Bild 6 ist eine in einem Schüttgutelement eingeschlossene zylindrische Meßdose skizziert. Die Meßdose mit der Elastizität  $E_M$ , der Bauhöhe  $h_M$  und dem Durchmesser  $d_M$ , der im Verhältnis zu den Ausmaßen des umgebenden Gutes klein sein soll, mißt die Druckspannung  $\sigma_M$ . An dieser Stelle herrscht im Schüttgut mit der Steifzahl  $E_S$  aber die tatsächliche vertikale Druckspannung  $\sigma_v$ . Die Abweichung wird durch einen Korrekturfaktor  $k$  berücksichtigt:

$$\sigma_v = \sigma_M/k \quad (4)$$



**Bild 6.** Druckspannungsmessdose im Schüttgut.

$\sigma_v$	tatsächliche Druckspannung	$E_S$	Steifzahl der Schüttung
$\sigma_M$	gemessene Druckspannung	$E_M$	"Elastizitätsmodul" der Meßdose
$d_M$	Durchmesser der Meßdose	$h_M$	Höhe der Meßdose

Loh [22] konnte nachweisen, daß der Korrekturfaktor im wesentlichen abhängig ist vom Verhältnis der Elastizitäten des Meßkörpers und des umgebenden Mediums sowie von den Abmessungen des Meßkörpers, d.h. vom Verhältnis  $h_M/d_M$ , und letztlich von der Poisson-Zahl bzw. Querdrukkzahl des umgebenden Materials, die aber im allgemeinen für Schüttgüter unbekannt sein dürfte. Eine aus diesem Grunde durchgeführte Grenzwertbetrachtung der von Loh aufgestellten Beziehung erbrachte, daß die Poisson-Zahl von so untergeordneter Bedeutung ist, daß dieser Einfluß auf die Korrektur des Meßergebnisses praktisch vernachlässigt werden kann. Damit läßt sich der Korrekturfaktor für eine Meßdose mit  $h_M/d_M < \pi/2$  vereinfachen und durch die Beziehung

$$k \approx 1 + \frac{(E_M/E_S) - 1}{(\pi/2) (d_M/h_M) (E_M/E_S) + 1} \quad (5)$$

ausdrücken, deren rechnerische Auswertung für bestimmte Werte von  $h_M/d_M$  in Bild 7 grafisch dargestellt ist.

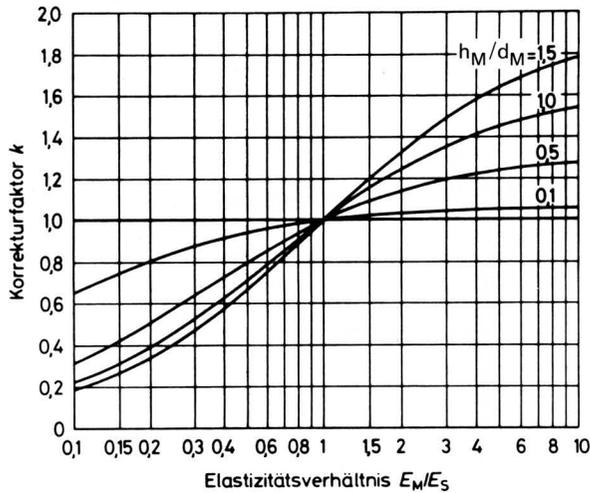


Bild 7. Diagramm zur Korrektur von Meßwerten; in Anlehnung an Loh [22].

Lediglich für den Sonderfall gleicher Elastizität von Meßdose und sie umgebendem Material — d.h.  $E_M/E_S = 1$ , ein Fall, der ohnehin praktisch nicht zu realisieren ist —, haben die Abmessungen der Dose keinen Einfluß auf die Spannungsmessung, d.h.  $k = 1$ . Bei näherer Betrachtung des Diagramms ist leicht einzusehen, daß es für den praktischen Einsatz am günstigsten ist, eine harte Meßdose von relativ flacher Bauart zu verwenden. Für den Fall  $h_M/d_M \ll 1$  und  $E_M \gg E_S$  nähert sich nämlich der Korrekturfaktor  $k$  einem konstanten Wert, so daß auch kleinere Ungenauigkeiten bei der Ermittlung der Elastizitäten keinen nennenswerten Einfluß auf das Ergebnis der Spannungsmessung haben.

### 2.2.5 Schlußfolgerung

Aufgrund der zuvor dargestellten Überlegungen hinsichtlich der Lastverteilung auf der Meßfläche einer eingelegten Meßdose einerseits und der vorgesehenen nachträglichen Meßwertkorrektur andererseits können beim Bau bzw. bei der Konstruktion von Druckspannungsmessdosen für die experimentelle Ermittlung des Spannungszustandes in Schüttgütern grundsätzlich zwei verschiedene Wege eingeschlagen werden:

1. Die Meßfläche nimmt wie üblich den gesamten Durchmesser der Dose ein. Die tatsächlich im Gut herrschende Druckspannung kann nur über eine nachträgliche Korrektur des Meßwertes bestimmt werden. Voraussetzung dafür ist aber eine genaue Kenntnis des Elastizitätsverhaltens der Meßdose wie auch des eingelagerten Schüttgutes. Der bei der Messung auftretende und nicht zu vermeidende systematische Fehler kann darüber hinaus bei Verwendung einer relativ flachen Dose von vornherein gering gehalten werden (Meßdose I).
2. Die Meßdose wird so gebaut, daß die eigentliche Meßfläche einen kleineren Durchmesser hat als die gesamte Dose und dabei etwa so groß ist wie der innenliegende Bereich einer annähernd konstanten Flächenlast in Bild 5b und c. Im Bereich ungleichmäßiger Belastung weiter außen wird in diesem Fall ein "toter" Ring vorgesehen (Meßdose II).

Im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchungen wurden beide Wege berücksichtigt:

Es wurden zwei entsprechende Druckspannungsmessdosen entwickelt, deren Aufbau im folgenden Abschnitt ausführlich beschrieben ist, und die damit erzielten Meßergebnisse miteinander verglichen (s. Abschn. 4.1).

## 3. Versuchseinrichtungen

In diesem Abschnitt werden sowohl die neuentwickelten Spannungsmessdosen näher beschrieben als auch der gesamte Versuchsstand mit dem Versuchsablauf kurz erläutert. Auf eine genaue Beschreibung der verwendeten elektronischen Meß-, Registrier- und Auswertegeräte wird an dieser Stelle verzichtet; gegebenenfalls sei dazu auf [4] verwiesen.

### 3.1 Spannungsmessdosen

Zur Messung der örtlichen Druckspannungen im Haufwerk wurden die in Bild 8 und 9 dargestellten Druckspannungsmessdosen entwickelt. Dabei werden die Meßdosen I und II (Bild 8 oben und unten) nur zur Messung der vertikalen Druckspannungen und die Meßdose III (Bild 9) lediglich zur Messung der horizontalen Druckspannungen eingesetzt. Alle drei abgebildeten Meßdosen bestehen im wesentlichen aus drei Teilen: einem Meßsteller a, einem eingesetzten piezoelektrischen Kraftaufnehmer b mit Steckeranschluß für das Meßkabel und einem Gehäuse c.

Die Meßdose I stellt die Grundform dar. Die Meßdose II besitzt zusätzlich einen über das eigentliche Gehäuse geschobenen und mit ihm verschraubten harten Zusatzring d, der bündig sowohl mit dem Meßsteller als auch mit dem Gehäuseboden abschließt. Dieser äußere Ring soll die in Abschn. 2.2.4 anhand von Bild 5 rechts erläuterten (Fehler-) Spannungsspitzen aufnehmen, die sich aufgrund der in der Praxis vorhandenen ungleichen Elastizitäten von Meßdose und Schüttgut zwangsläufig bei der Ermittlung der vertikalen Druckspannung ergeben. Um gegenüber dem festen Zusatzring eine möglichst geringe Verformung der Meßeinrichtung in vertikaler Richtung zu erreichen, ist die Meßdose II aus Stahl gefertigt. Der eingesetzte piezoelektrische Kraftaufnehmer ist ebenfalls als praktisch starr anzusehen. Der Zusatzring besteht aus Gewichtsgründen aus relativ leichtem, aber sehr hartem Kunststoff. Im Gegensatz dazu soll die Meßdose I durchaus eine gewisse Elastizität aufweisen, so daß der 3 mm dicke Meßsteller und das Gehäuse mit 1 mm dickem Boden in der Version Ia zunächst aus Gewichtsgründen aus Aluminium und in der Version Ib zur Erzielung einer größeren Steifigkeit aus Stahl hergestellt wurden.

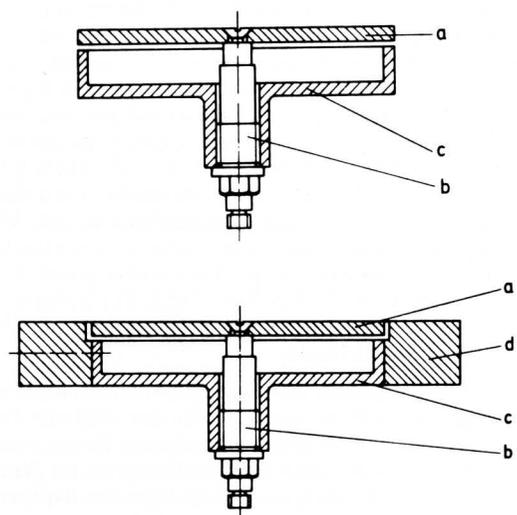
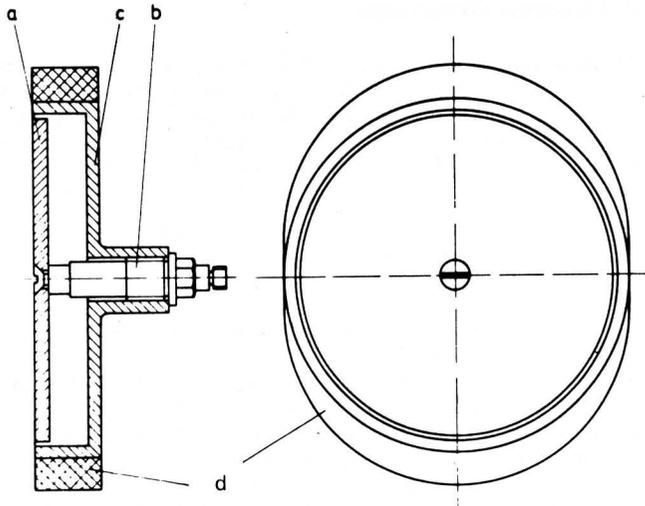


Bild 8. Aufbau der Meßdosen für die Messung vertikaler Druckspannungen.

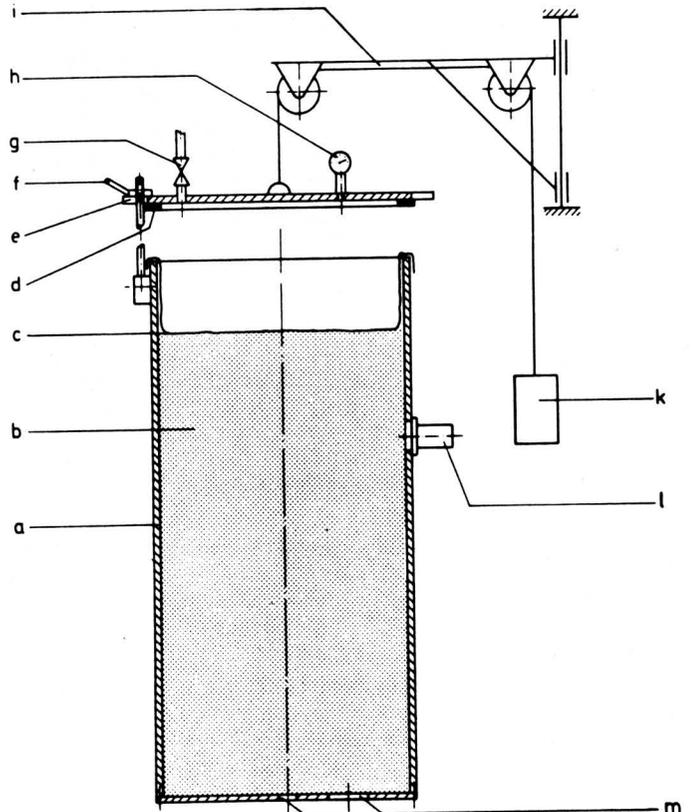
oben: Meßdose I;	Durchmesser der Meßfläche	76 mm
unten: Meßdose II;	Durchmesser der Meßfläche	76 mm
	Gesamtdurchmesser	115 mm
	Luftspalt	1,5 mm

- |                               |              |
|-------------------------------|--------------|
| a Meßfläche                   | c Gehäuse    |
| b piezoelektr. Kraftaufnehmer | d Zusatzring |



**Bild 9.** Meßdose für die Messung horizontaler Druckspannungen (Meßdose III).

Durchmesser der Meßfläche 76 mm  
 größter Gesamtdurchmesser mit  
 aufgesetztem Hartschaumgummi 100 mm  
 a Meßfläche c Gehäuse  
 b piezoelekt. Kraftaufnehmer d Hartgummibelag



**Bild 10.** Modellsilo zur Simulation der Druckspannungen im Großsilo; Durchmesser 1000 mm, Höhe 2100 mm.

a Modellsilo g 3-Wege-Ventil  
 b Schüttgut h Manometer  
 c Gummisack i schwenkbarer Ausleger  
 d Dichtung k Gegengewicht  
 e Deckel l Wandmeßstelle  
 f 6 Knebelschrauben am Umfang m Siloentleerungsöffnungen

### 3.2 Versuchsstand

Aus zeitlichen, finanziellen und sicherheitstechnischen Gründen können Untersuchungen, bei denen die örtlichen Spannungen durch Einlegen von Meßdosen ermittelt werden, kaum an einem Großsilo durchgeführt werden. Um dennoch hohe Silodrücker, wie sie in der Praxis auftreten, untersuchen zu können, wurden diese an einem entsprechenden Modellsilo-Versuchsstand simuliert.

**Bild 10** zeigt schematisch den Modellsilo mit der auf Druckluftbasis arbeitenden Belastungseinrichtung zur Simulation hoher Silodrücker. Nach dem Füllen des Silos bis zu einer Füllhöhe von etwa 1,9 m wird ein Gummisack c in der im Bild skizzierten Weise auf die Schüttung gelegt und über den Behälterrand gestülpt. Anschließend wird der von einem schwenkbaren Ausleger i gehaltene Deckel e, mit einer aufgeklebten Dichtung d zum luftdichten Verschießen des Modellsilos, mittels Knebelschrauben f fest verschlossen. Zur Simulation großer Schüttgutsäulen kann über das 3-Wege-Ventil g Druckluft (max. 1 bar) in den Hohlraum zwischen Deckel und Gummisack eingelassen werden. Die Entlüftung nach Versuchsende erfolgt ebenfalls über dieses Ventil. Zur leichteren Handhabung ist der Deckel über ein Seil und Umlenkrollen mit einem Ausgleichsgewicht k verbunden.

Der zylindrische Modellsilo mit ebenem Boden hat einen Innendurchmesser von 1000 mm und eine Höhe von 2100 mm. Der Behälter ist aus Stahl und hat eine Wandstärke von 10 mm, um alle störenden Einflüsse durch ein elastisches Nachgeben der Wand auszuschalten, die den Spannungszustand im lagernden Haufwerk beeinflussen.

Der Modellsilo wird aus einem oberhalb angebrachten Füllbehälter befüllt. Bei zwischenzeitlicher Unterbrechung des Füllvorganges kann eine der neuentwickelten Spannungsmeßdosen eingelegt werden. Nach Beendigung der Messung fließt das Schüttgut aus den Bodenöffnungen m über eine Rutsche in einen Vorratsbehälter ab, der über eine Seilwinde hochgezogen wird, damit das Schüttgut ohne größere Beschädigungen erneut über ein Zulaufrohr in den Füllbehälter gelangen kann.

Der innen relativ glatte Modellsilo-Stahlbehälter und das Höhen/Durchmesser-Verhältnis von etwa 2 haben zur Folge, daß der Siloeffekt erwartungsgemäß kaum zur vollen Wirkung kommt [25]. Dies hat den Vorteil, daß beim Einsatz der Zusatzbelastungseinrichtung die Druckspannungen über einen großen Bereich des oberen Siloteils fast in gleichem Maße zunehmen und sich nicht nach unten hin sofort durch Brückenbildung im Gut wieder abbauen. Damit können also im gesamten Modellsilo wesentlich höhere Spannungen erzeugt werden, als sie allein aus der Schüttungshöhe resultieren.

## 4. Experimentelle Ergebnisse

Die experimentelle Ermittlung der Spannungsverteilung im Silo setzt eine richtige Messung voraus. Im Rahmen von Vergleichsuntersuchungen wurde daher zunächst für vertikale und für horizontale Druckspannungen jeweils eine Meßdose optimiert, die dann bei den Untersuchungen der örtlichen Spannungszustände im Silo eingesetzt wurde.

### 4.1 Kalibrierung der Druckspannungsmeßdosen

Ob eine eingelegte Meßdose die im Schüttgut tatsächlich herrschende Druckspannung richtig wiedergibt, kann nur überprüft werden, wenn entweder ein Vergleichsnorm zur Verfügung steht oder wenn die örtliche Druckspannung im Gut bereits bekannt ist.

#### 4.1.1 Vertikale Druckspannungen

Ein Vergleichsnormal steht nicht zur Verfügung, aber es kann bei der Betrachtung der vertikalen Druckspannungen mit hinreichender Genauigkeit davon ausgegangen werden, daß der Siloeffekt im oberen Bereich des Silos (bis zu einer Tiefe von etwa einem Viertel seines Durchmessers und insbesondere in der Siloachse) noch nicht zum Tragen kommt [26], so daß dort eine dem Gewicht der darüber lagernden Schüttung entsprechende vertikale Druckspannung herrschen wird; bei einer zusätzlich auf der Schüttgutoberfläche aufgetragenen Belastung muß man diese Belastung zu dem Gewicht der betrachteten Schüttgutsäule hinzuaddieren. Der im oberen Bereich in der Siloachse mit einer Druckmeßdose gemessene Druck ist mit  $\rho_S$  als mittlerer Schüttdichte,  $g$  als Erdbeschleunigung und  $z$  als Silotiefe (von der Gutoberfläche aus gemessen):

$$\sigma_v = \rho_S g z \quad (6)$$

und bei einer zusätzlichen Belastung  $p_L$  der Schüttgutoberfläche:

$$\sigma_v = \rho_S g z + p_L \quad (7);$$

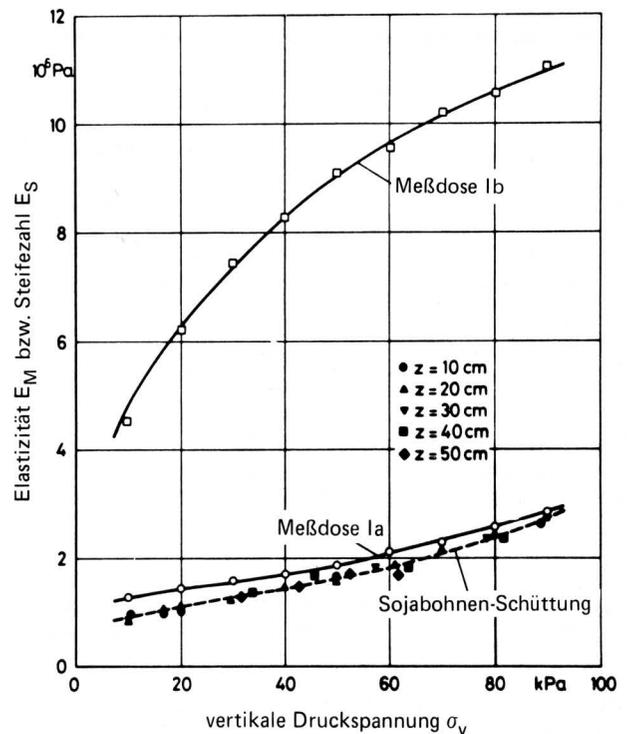
dabei ist  $p_L$  der Luftdruck der nach Bild 10 aufgetragenen Zusatzbelastung.

Die aus den Überlegungen in Abschn. 2.2.4 entwickelten und in Abschn. 3.1 vorgestellten Meßdosen I und II wurden jeweils unter denselben Bedingungen miteinander verglichen, wobei sowohl die Bauart Ia aus Aluminium als auch die Bauart Ib aus Stahl berücksichtigt wurde.

Bei Verwendung von Meßdose I mit einer nachträglichen Meßwertkorrektur über Gl. (4) und (5) ist die genaue Kenntnis des Elastizitätsverhaltens sowohl des Schüttgutes als auch der Meßdose erforderlich. Wegen der in Abschn. 2.1.2.3 dargelegten Problematik bei der Bestimmung der Steifzahl eines Gutes wurde die gesuchte Verdichtungskurve für die hier verwendeten Sojabohnen aus einem direkt im Modellsilo gemessenen Verdichtungs Vorgang des Schüttguts bestimmt. Dazu wurden die relativen Absenkungen eines in verschiedenen Silotiefen im oberen Bereich des Silos eingelegten Meßstellers von 80 mm Durchmesser über einen 2 mm dünnen Stahldraht von einem unterhalb des Behälters angebrachten induktiven Wegaufnehmer gemessen. Durch entsprechende Differenzbetrachtungen konnten die Stauchungen der einzelnen Gutschichten in Abhängigkeit von der Belastung erfaßt und die Steifzahlen mit Hilfe von Gl. (2) berechnet werden. Die auf diese Weise in dem untersuchten Bereich, d.h. in einem Abstand von  $z = 10$  bis 50 cm von der Gutoberfläche, gefundenen Steifzahlen des Gutes sind in Bild 11 als volle Punkte eingetragen. Trotz der unterschiedlichen Meßhöhen und Zusatzbelastungen liegen die Werte etwa auf einer gestrichelt eingetragenen mittleren Kurve. Daraus kann gefolgert werden, daß im gesamten oberen Silobereich gleichmäßige Verdichtungsverhältnisse vorliegen.

Im Vergleich zu der in Bild 3 dargestellten Kurve für Sojabohnen aus Messungen mit einem kleinen Drucktopf liegen die oben im Silo ermittelten Steifzahlen trotz der größeren Schüttdichte insbesondere bei höheren Belastungen niedriger. Dies kann nur durch den größeren Behälterdurchmesser erklärt werden, wo sich bei einer Verdichtung der Wandeinfluß weniger stark bemerkbar macht. Bei einem kleinen Behälter dagegen wirkt sich der Einfluß der Wand hindernd auf die Verformung aus und führt so zu entsprechend höheren Steifzahlen. Daraus wird nochmals deutlich, daß die Steifzahl keine Größe ist, die das Schüttgut charakterisiert, sondern u.a. auch stark geometrieabhängig ist.

Das Elastizitätsverhalten  $E_M$  der Meßdosen Ia und Ib wurde über Gl. (2) bestimmt, nachdem vorher die mittleren vertikalen elastischen Stauchungen der Dosen gemessen worden waren. Diese Werte sind ebenfalls in Bild 11 eingetragen. Aufgrund der jeweiligen Membranwirkung von Meßdosenboden und Meßdosendeckel haben beide Dosen keine konstante Elastizität, sondern sie werden mit zunehmender Belastung härter. Erwartungsgemäß liegen auch die Werte für die Meßdose Ib aus Stahl über denen der Meßdose Ia



**Bild 11.** Elastizität verschiedener Meßdosen und Steifzahlen einer Sojabohnen-Schüttung in Abhängigkeit von der vertikalen Druckspannung.

aus Aluminium, letztere erreicht etwa die Elastizität des Schüttgutes und ist somit für diese Sojabohnen-Schüttung als optimal zu betrachten. Es erübrigt sich hier auch eine nachträgliche Meßwertkorrektur nach Abschn. 2.2.4.

Der für eine Korrektur der Meßdose Ib aus Bild 11 zu bildende Quotient aus  $E_M$  und  $E_S$  schwankt im Druckspannungsbereich von 10–90 kPa zwischen 4 und 5. Das mittlere Höhen/Durchmesser-Verhältnis der Meßdose I liegt bei 0,22. Mit diesen Angaben ergibt sich nach Gl. (5) bzw. nach Bild 7 je nach Belastung ein Korrekturfaktor von 1,11 bis 1,10, d.h. die abgelesenen Meßwerte werden etwa 10 % zu hoch sein und können über Gl. (4) korrigiert werden.

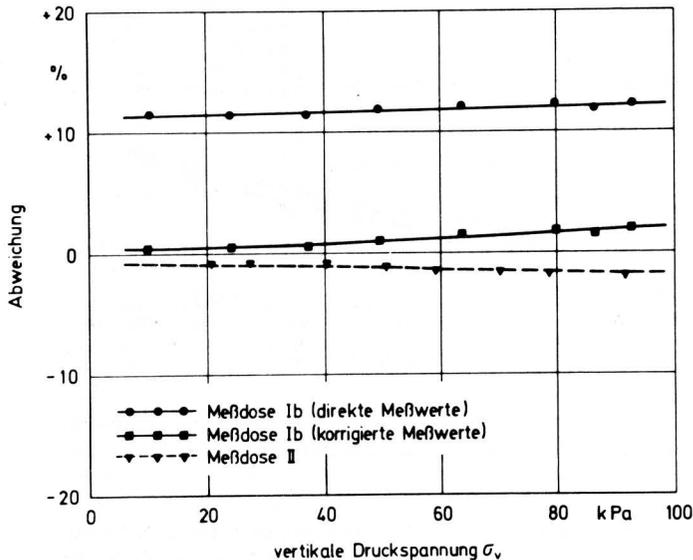
**Bild 12** zeigt die Abweichung der mit den Meßdosen Ib und II gemessenen vertikalen Druckspannungen von den rechnerisch nach Gl. (6) bzw. (7) ermittelten vertikalen Druckspannungen. Die obere Kurve stellt die direkten Meßwerte der Meßdose Ib dar. Man erkennt die starke Abweichung von der tatsächlichen Druckspannung, die jedoch durch eine nachträgliche Korrektur fast vollständig (bis auf etwa 2 %) abgebaut werden kann, so daß die korrigierte Kurve dann im allgemeinen Streubereich der Messungen von bis zu 5 % untergeht.

Bei der Meßdose II (eingesetzte Meßfläche) ergibt sich die Frage, wie breit der nicht zur Meßfläche gehörende feste Außenring sein muß, um den in Bild 5 angedeuteten Störbereich einer nicht konstanten Flächenlast abzudecken. In Bild 12 sind zum Vergleich die Meßwerte der Meßdose II mit einem Meßflächendurchmesser von 76 mm und einem Außendurchmesser von 115 mm eingetragen und durch eine gestrichelte Kurve verbunden. Schon der schmale Außenring von 18 mm Breite führt maximal zu einer Abweichung von unter 2 % vom rechnerisch ermittelten Wert, was in Anbetracht der allgemeinen Meßwertstreuung von bis zu 5 % praktisch zu vernachlässigen ist. Jede weitere Vergrößerung des Ringes bis zu einem untersuchten Außendurchmesser von 200 mm bei jeweils konstanter Meßfläche ergab keine nennenswerte Verbesserung.

Die Meßwerte der harten Dose II wurden aufgrund der ungleichen Spannungsverteilung nach Bild 5c eigentlich etwas höher erwartet. Sie liegen aber etwas unterhalb des rechnerisch ermittelten Wertes, was nur dadurch zu erklären ist, daß sich der Randbereich des relativ steifen Stahl-Meßstellers doch noch etwas gegenüber dem festen

Außenring absetzen kann und die Dose unter Berücksichtigung von Bild 5b immer etwas zu wenig anzeigen wird.

Für die Messung der vertikalen Druckspannungen kann zusammenfassend gesagt werden, daß die Meßdose II und die der Elastizität der verwendeten Sojabohnen-Schüttung angeglichene Meßdose Ia etwa gleiche Meßwerte liefern und daß darüber hinaus die mit Meßdose Ib gemessenen und korrigierten Werte mit diesen übereinstimmen. Aufgrund der speziellen Anwendbarkeit der Meßdose Ia und der relativ umständlichen Meßwertkorrektur bei der Bauart Ib wurde bei den weiteren Untersuchungen die Meßdose II bevorzugt eingesetzt.



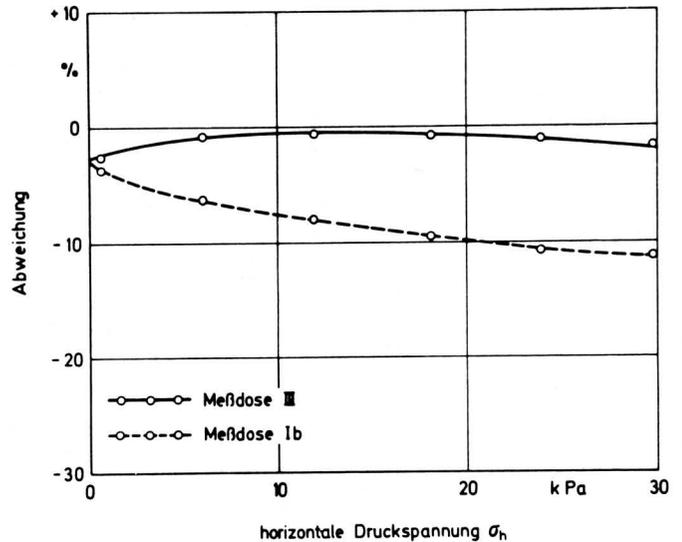
**Bild 12.** Abweichung der Meßergebnisse der in Schüttgut eingelegten Druckspannungs-Meßdosen Ib und II von der rechnerisch ermittelten vertikalen Druckspannung; Silotiefe  $z = 20$  mm.

#### 4.1.2 Horizontale Druckspannungen

Bisher wurden ausschließlich Meßdosen zur Ermittlung der vertikalen Druckspannungen im Schüttgut betrachtet. Bei der Beurteilung einer Meßdose zur Ermittlung der horizontalen Druckspannungen im Silo ist nur eine Überprüfung des Meßwertes in Wandnähe möglich, wobei angenommen werden kann, daß sich die horizontale Druckspannung bis zu einem Abstand von der Wand, der etwa einem Zehntel des Silodurchmessers entspricht, nur unwesentlich ändert. Um dies zu beweisen, wurden die mit der in Abschn. 3.1 beschriebenen Meßdose III (s. Bild 9) gewonnenen Meßwerte mit den über eine Wand-Meßstelle ermittelten tatsächlichen Werten verglichen. (Der Aufbau dieser Wand-Meßstelle ist in [4] ausführlich beschrieben.)

**Bild 13** zeigt die Abweichungen der Meßdosenergebnisse von der tatsächlichen horizontalen Druckspannung an der Wand. Bei diesem Vergleich wurde die Meßdose III sowohl direkt an der Wand als auch im Abstand von 5, 10 und 15 cm eingelegt. Die in Bild 13 eingetragenen Abweichungen vom "tatsächlichen" Wert liegen unter 2,5 %, so daß sie im allgemeinen Streubereich der Messungen untergehen.

Zum Vergleich wurde auch die Meßdose Ib, die eigentlich zur Messung der vertikalen Druckspannungen konzipiert wurde, eingesetzt, — aber um 90° gedreht. Bild 13 zeigt, daß ihr Einsatz zu Abweichungen von über 10 % vom tatsächlichen Wert führen kann. Das liegt an ihrer Unelastizität gegenüber dem vertikal zusammendrückbaren Schüttgut, die die Bildung von Gutbrücken oberhalb der Meßfläche zur Folge hat. Aus diesem Grunde ist nur die Meßdose III für Messungen der horizontalen Druckspannung geeignet.



**Bild 13.** Abweichung der Meßergebnisse der in Schüttgut eingelegten Druckspannungs-Meßdosen III und Ib von der tatsächlichen (mit der Wandmeßstelle ermittelten) horizontalen Druckspannung; Silotiefe  $z = 50$  mm.

## 4.2 Druckspannungen nach dem Füllen

### 4.2.1 Vertikale Druckspannungen

Die vertikalen Druckspannungen in der Siloachse, die aus Symmetriegründen Hauptspannungen sind [4], wurden durch Einlegen der entsprechend Abschn. 4.1.1 besonders geeigneten Meßdose II in verschiedenen Silotiefen gemessen. Darüber hinaus wurden zur Simulation der Drücke in Großsilos über Luftdruck verschiedene Zusatzbelastungen auf die Schüttgutoberfläche aufgebracht. Die nach dem Füllvorgang in der Siloachse ermittelten Meßwerte und die sich daraus ergebenden Verläufe der vertikalen Druckspannung über der Silotiefe sind in **Bild 14** mit dem jeweiligen Zusatzdruck als Parameter dargestellt. Dabei wurden zwei unterschiedliche Schüttdichten durch Anwendung zweier verschiedener Füllverfahren, die in [4] näher beschrieben sind, untersucht.

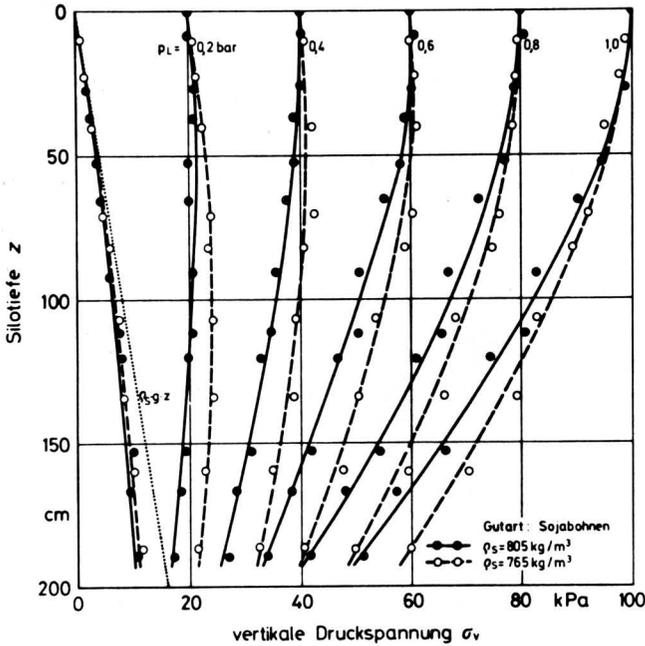
Im Modellsilobereich, d.h. ohne Zusatzbelastung, steigt die vertikale Druckspannung mit der Silotiefe zunächst annähernd linear an, was durch die punktierte Gerade angedeutet ist, die das Gewicht der Schüttung als Druck wiedergibt. Erst bei größeren Silotiefen macht sich der Siloeffekt stärker bemerkbar, d.h. ein Teil des Schüttgutgewichtes wird über Gutbrücken in die Silowand geleitet, so daß sich die  $\sigma_v$ -Kurve einem Grenzwert nähert, der auch bei sehr großen Silotiefen nicht überschritten wird.

Im Bereich der Simulation des Großsilos steigen die vertikalen Druckspannungen ausgehend vom jeweiligen an der Gutoberfläche herrschenden Luftdruck  $p_L$  in der Regel entsprechend Gl. (7) zunächst geringfügig an, um sich dann bei größeren Silotiefen aufgrund des Siloeffektes immer mehr abzubauen. Bei Betrachtung jeweils eines Füllverfahrens streben dessen Kurven einem Grenzwert zu, der mit dem Grenzwert identisch sein dürfte, der sich ohne Zusatzbelastung einstellt. Ein geringer Einfluß des Füllverfahrens besteht darin, daß eine größere Schüttdichte unter sonst gleichen Bedingungen etwas geringere vertikale Druckspannungen im Gut zur Folge hat als eine geringere Schüttdichte. Dies wurde auch bei Belastungsmessungen am ebenen Boden eines Modellsilos beobachtet [7].

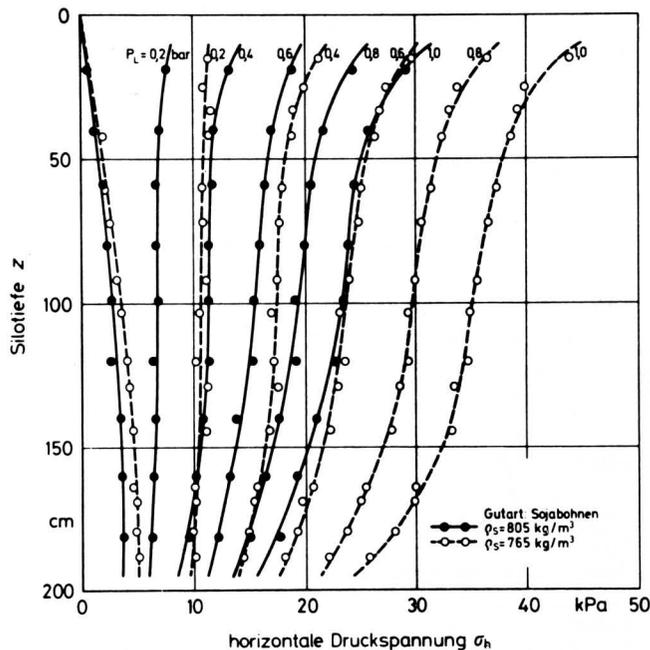
### 4.2.2 Horizontale Druckspannungen

Analog zu Bild 14 sind in **Bild 15** die horizontalen Druckspannungen dargestellt. Im Gegensatz zur vertikalen Druckspannung macht

sich hier der Einfluß der Schüttdichte sehr stark bemerkbar: Die lockerere Schüttung weist im gesamten Meßbereich wesentlich höhere Horizontalspannungen auf. Die eingetragenen Kurven nähern sich auch hier wieder bei sehr großen Silotiefen aufgrund des Siloeffektes für jede Schüttdichte einem Grenzwert, der dann auch bei der dichteren Schüttung niedriger liegt als bei der lockeren. Bei den simulierten Drücken in Großsilos ist im oberen Silobereich besonders auffallend, daß sich dort unerwartet hohe horizontale Druckspannungen einstellen. (Auf die Zusammenhänge wird in [4] näher eingegangen.)



**Bild 14.** Vertikale Druckspannungen im Schüttgut nach dem Füllen in Abhängigkeit von der Silotiefe bei zwei verschiedenen mittleren Schüttdichten, Luftdruck zur Erzeugung der Zusatzlast als Parameter.



**Bild 15.** Horizontale Druckspannungen im Schüttgut nach dem Füllen in Abhängigkeit von der Silotiefe bei zwei verschiedenen mittleren Schüttdichten, Luftdruck zur Erzeugung der Zusatzlast als Parameter.

### 4.3 Vergleich der Druckmeßwerte vom Füllen und Entleeren

Um die Spannungen im Schüttgut für die unterschiedlichen Betriebszustände des Silos vergleichen und den ungünstigsten, d.h. den maximalen Spannungszustand ermitteln zu können, wurde zunächst der gesamte Spannungsverlauf nach dem Einlegen einer Meßdose während der Betriebszustände Füllen, Lagern und Entleeren mit Hilfe eines Schnellschreibers aufgezeichnet. In **Bild 16** sind beispielhaft zwei Meßschriebe für zwei verschiedene Füllverfahren (zentrisch und exzentrisch), aber mit etwa gleicher mittlerer Schüttdichte wiedergegeben. Die dargestellten Kurven wurden im Rahmen von Vorversuchen mit einem Modellsilo von 60 cm Durchmesser und 3 m Höhe, der mit grobem Schmirgelleinen der Körnung 60 ausgekleidet war, für eine Silotiefe von 90 bzw. 150 cm und Sojabohnen als Schüttgut gewonnen.

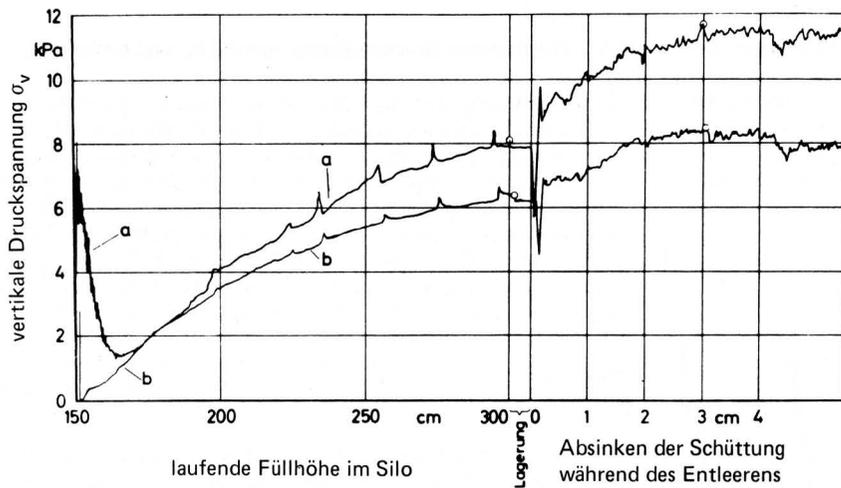
Die Zeitablenkung des Schreibers auf der Abszisse, die beim Füllen der laufenden Füllhöhe, beim Lagern der Lagerungszeit und beim Entleeren der kontinuierlichen Absenkung der Schüttgutoberfläche und damit etwa der der eingebetteten Meßdose entspricht, wurde für diese drei Bereiche entsprechend der gewünschten Auflösung unterschiedlich groß gewählt.

Wenn die Meßdose beim exzentrischen Füllen in einer bestimmten Höhe in der Siloachse eingelegt wird, liegt sie außerhalb des Füllstrahles und wird allmählich von dem vom Schüttkegel herabrieselnden Gut bedeckt und mit einer kontinuierlich steigenden Gutsäule belastet. Die registrierte Spannung (z.B. Kurve b in **Bild 16**) steigt dabei nicht im gleichen Maße, wie die Schüttgutsäule wächst, sondern strebt aufgrund des Siloeffektes einem Grenzwert zu, was je nach untersuchter Meßhöhe mehr oder weniger ausgeprägt ist. Beim zentrischen Füllen (Kurve a) macht sich nach dem Einlegen der Meßdose in der Siloachse zunächst ein sprunghafter Anstieg der Druckspannung bemerkbar, der durch die Dynamik des direkt auf die Meßdose treffenden Füllstrahles zu erklären ist. Während des weiteren Füllens wird der bereits erreichte Wert wieder abgebaut, und der Verlauf ähnelt dem Druckspannungsverlauf beim exzentrischen Füllen.

Beim Öffnen des Entleerungsschiebers treten schlagartig Spannungsänderungen im Silo auf. Je nach Meßstelle und Spannungsrichtung ist ein mehr oder weniger ausgeprägtes sprunghaftes Ansteigen oder Abfallen bzw. Abfallen und anschließendes Ansteigen zu beobachten. Der in **Bild 16** zunächst auftretende Abfall der vertikalen Druckspannung ist durch die plötzliche Auflockerung des Gutes beim Öffnen des Auslasses zu erklären. Durch das anschließend nachstürzende Gut steigt die Druckspannung sofort wieder an, um sich beim weiteren Entleeren je nach Meßstelle langsam auf einen höheren oder niedrigeren Wert einzupendeln. Das dabei erreichte bzw. auch durchlaufene Maximum ist für eine festigkeitsgerechte Dimensionierung eines Silos von besonderem Interesse.

Die in das Schüttgut eingelegten Druckspannungs-Meßdosen sind mit einem Meßkabel verbunden (s. Abschn. 3.1). Darüber hinaus waren sie für Messungen während des Entleerungsvorgangs jeweils mit einem 2 mm dicken, etwa 15 cm langen in das Dosengehäuse eingesetzten Stabilisierungsstab versehen, der beim Einlegen der Meßdose vertikal in das Gut gesteckt wurde. Da beim Ausfließen des Gutes eine Behinderung der Dose durch das zwar locker und reichlich eingelegte Verbindungskabel einerseits sowie eine Drehung der Dose um eine gedachte horizontale Achse und damit Messung der Spannung in einer falschen Richtung andererseits insbesondere bei längeren Ausflußzeiten bzw. Durchflußwegen nicht auszuschließen ist, können derartige Meßdosen nur während der Befüllung und der Lagerung sowie für das beginnende Entleeren eingesetzt werden. In diesem Zusammenhang war also zunächst zu klären, wann die größten Spannungen beim Entleeren auftreten und ob bis dahin eine Meßwertverfälschung aus den genannten Gründen auszuschließen ist.

Neuere Veröffentlichungen (z.B. [7, 27, 28]) weisen ausdrücklich darauf hin, daß die örtlich größten Belastungen am Silo in der Regel während des beginnenden Entleerens auftreten. Dies konnte durch eigene Untersuchungen am Modellsilo bestätigt werden:



**Bild 16.** Meßschiebe einer in der Siloachse eingelegten Druckspannungs-Meßdose für das Füllen, Lagern und Entleeren.

- a zentrisches Füllen, Silotiefe  $z = 150$  cm
- b exzentrisches Füllen, Silotiefe  $z = 90$  cm

Alle während des Entleerens in verschiedenen Silotiefen durchgeführten Spannungsmessungen im Schüttgut haben gezeigt, daß außer im Bereich der Gutoberfläche, der im Hinblick auf eine Dimensionierung relativ uninteressant ist, bereits während der ersten 2 s nach Entleerungsbeginn ein Höchstwert der horizontalen Druckspannungen erreicht, bzw. in der Regel sogar inzwischen schon wieder unterschritten wird. Während dieser relativ kurzen Zeit werden somit schon örtlich die höchsten horizontalen Spannungen und damit die größten Belastungen der Silowand (s. Abschn. 1) erreicht. Die Zeitspanne entspricht in dem verwendeten Modellsilo einem relativ gleichmäßigen Absinken einer in der Siloachse im Gut eingeschlossenen Meßdose von bis zu 3 cm, was experimentell für verschiedene Silotiefen nachgewiesen werden konnte. Dazu wurde in das Schüttgut ein dünner Meßsteller mit 10 cm Durchmesser eingelegt, dessen Absinken beim Entleeren über einen daran befestigten und oben aus der Schüttgutsäule herausragenden 2 mm dicken Draht und damit verbundenen induktiven Wegaufnehmer in Abhängigkeit von der Ausflußzeit gemessen wurde.

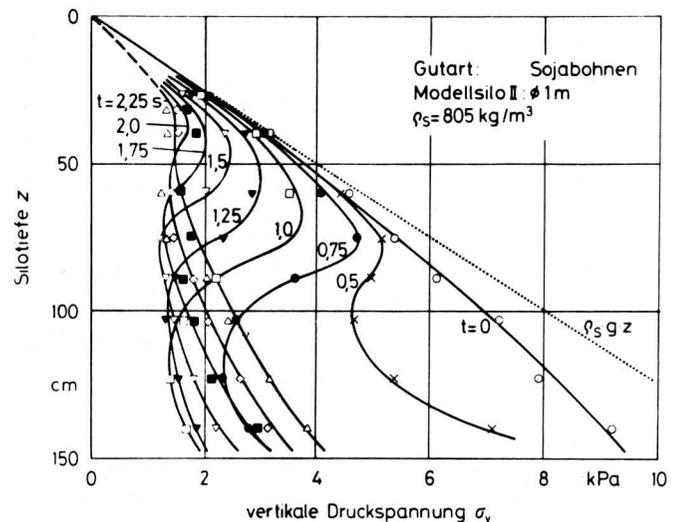
Da für diesen minimalen Absenkweg sowohl eine Behinderung durch das ebenfalls frei mitfließende Kabel als auch eine Drehung der Meßdose auszuschließen ist, spricht nichts gegen eine Ausdehnung des Meßvorganges mit diesen Meßdosen auf das "beginnende" Entleeren des Silos.

Die während des Entleerens speziell in der Achse des Modellsilos ermittelten Druckspannungen für die vertikale und die horizontale Richtung sind in **Bild 17 und 18** in Abhängigkeit von der Silotiefe aufgetragen. Parameter dieser Kurven ist die Auslaufzeit  $t$ . Zum Vergleich ist die Spannung im Ruhezustand nach dem Füllen ( $t = 0$ ) hinzugefügt. Für diese Darstellung wurden die Spannungswerte aus den Ausfluß-Meßschieben (vgl. Bild 16) für bestimmte Zeiten (in diesem Fall in Abständen von 0,5 bzw. 0,25 s) herausgegriffen.

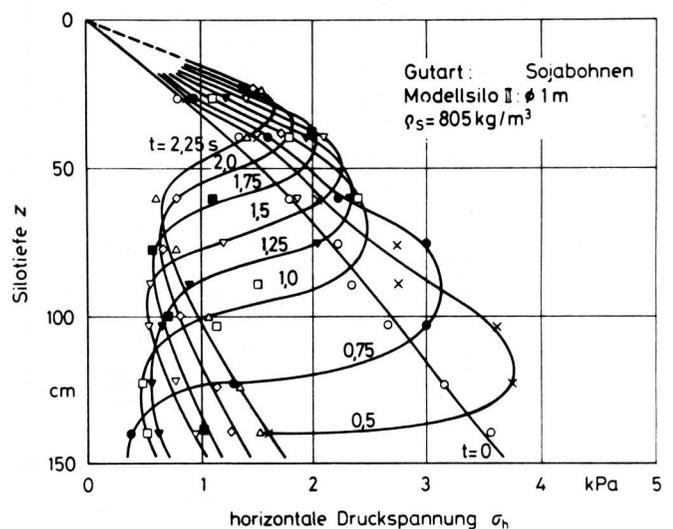
Wie bereits erwähnt, wurden die Meßschiebe in Bild 16 aus Untersuchungen an einem anderen Modellsilo mit einem großen Höhen/Durchmesser-Verhältnis und grobem Schmirgelleinen als Wandbelag aufgezeichnet. Dort zeigte sich, daß nach dem Öffnen des Auslasses aufgrund der dabei auftretenden Auflockerung des Gutes und der damit verbundenen geringeren Wandabstützung ein Teil des vorher vorhandenen Siloeffektes gewissermaßen aufgehoben wurde und sich daher mit zunehmender Ausflußzeit ein geringer Anstieg der vertikalen Druckspannung bemerkbar machte. Im Gegensatz dazu ist aus Bild 17 zu entnehmen, daß nach dem Füllen ( $t = 0$ ) aufgrund des verwendeten relativ glatten Modellsilos mit kleinem Höhen/Durchmesser-Verhältnis kein nennenswerter Siloeffekt in Form einer großen Abweichung der Druckspannung vom punktiert eingetragenen der Silotiefe proportionalen Druck  $\rho_S g z$  auftritt. Beim Ausfließen ist daher kein Anstieg, sondern ein Ab-

fall der vertikalen Spannungen zu beobachten; er ist mit der beim Ausfließen beginnenden Auflockerung des Gutes zu erklären, und er wächst mit wachsender Silotiefe. Die horizontalen Druckspannungen (Bild 18) steigen dagegen beim Öffnen des Auslasses fast über der gesamten Silotiefe zunächst wieder erwartungsgemäß an, um dann von unten beginnend auf kleinere Werte abzufallen.

Die obige Darstellungsweise gibt zwar einen guten Überblick über die jeweilige Spannungsänderung in Abhängigkeit von der Silotiefe und Ausflußzeit, aber keine direkte Aussage über den jeweiligen Spannungszustand an der betrachteten Stelle im Silo. Auf diese Zusammenhänge wurde in [4] ausführlicher eingegangen.



**Bild 17.** Vertikale Druckspannungen im Schüttgut während des Entleerens in Abhängigkeit von der Silotiefe, Auslaufzeit  $t$  als Parameter; zum Vergleich gepunktet die Kurve  $\sigma_v = \rho_S g z$ .



**Bild 18.** Horizontale Druckspannungen im Schüttgut während des Entleerens in Abhängigkeit von der Silotiefe, Auslaufzeit als Parameter.

## 5. Zusammenfassung

Die an den Wänden und am Boden bzw. Auslaufrichter eines Silos auftretenden Belastungen haben ihre Ursache in Spannungen, die im Innern des eingelagerten Haufwerkes herrschen. Diese Spannungen sind für die verschiedenen einzulagernden Schüttgüter unterschiedlich hoch und in der Regel nicht bekannt.

Nach erfolgreichem Abschluß meßtechnischer Voruntersuchungen zur Ermittlung von Meßfehlern infolge der gegenseitigen Beeinflussung von Schüttgut und Meßeinrichtung war es möglich, funktionsfähige Druckspannungsmeßdosen, die in das Schüttgut eingelegt werden, zu entwickeln und praktisch zu erproben. Dabei wurde von dem Gedanken ausgegangen, daß jede in ein Schüttgut eingelegte Meßdose einen Fremdkörper darstellt, wenn sie in ihrer Größe und Form sowie den Verformungseigenschaften gegenüber den Schüttkörpern differiert. Anhand von theoretischen Überlegungen lassen sich aber die unterschiedlichen Verformungseigenschaften von Meßdose und Schüttgut durch eine nachträgliche Meßwertkorrektur hinreichend berücksichtigen.

Es wurden für die Messung sowohl der vertikalen als auch der horizontalen Druckspannungen verschiedene Meßdosen gebaut, die dann für die hier beschriebenen Modellsiloversuche verwendet wurden. Ein Vergleich der mit den verschiedenen Meßdosen gemessenen und evtl. korrigierten Werte zeigte eine gute Übereinstimmung.

Darüber hinaus wurden mit diesen Meßdosen die Spannungsverläufe über der Silotiefe ermittelt, und zwar für den normal gefüllten Silo und nach Aufbringen von verschiedenen Zusatzlasten auf die Gutoberfläche zur Simulation der Verhältnisse im Großsilo; dabei wurde der Zustand des Füllens und Entleerens untersucht. Die größten Druckspannungen in vertikaler Richtung treten beim Füllen, in horizontaler Richtung beim Entleeren auf; letztere treten teilweise nur kurzzeitig auf.

### Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [ 1 ] *Hesse, Th. u. J. Paul:* Mehrkomponentenmeßeinrichtung zur direkten Messung von Druck- und Schubbelastungen an Silos. Grundl. Landtechnik Bd. 26 (1976) Nr. 1, S. 5/11.
- [ 2 ] *Hesse, Th.:* Das Spitzendrucksondieren – Ein Meßverfahren zur Bestimmung der Druckverteilung in einem Schüttgut-silo. Grundl. Landtechnik Bd. 26 (1976) Nr. 3, S. 73/78.
- [ 3 ] *Hesse, Th. u. W. Borß:* Einsatz einer Spitzendrucksonde im Großsilo. Grundl. Landtechnik Bd. 28 (1978) Nr. 1, S. 13/17.
- [ 4 ] *Hesse, Th.:* Zur Entwicklung eines Meßverfahrens für die Ermittlung der Spannungsverteilung in Schüttgut-Silos. Diss. TU Braunschweig 1978, Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 14, Nr. 20, Düsseldorf: VDI-Verlag 1978.
- [ 5 ] *Hesse, Th. u. O.-H. Hoffmann:* Scherverhalten körniger landwirtschaftlicher Haufwerke. Grundl. Landtechnik Bd. 27 (1977) Nr. 6, S. 205/13.
- [ 6 ] *Stroppel, A.:* Spannungszustände in lagernden körnigen Haufwerken in der Nähe einer ebenen Wand. VDI-Forsch.-Heft 525, Düsseldorf: VDI-Verlag 1968.
- [ 7 ] *Paul, J.:* Spannungsverteilungen in körnigen kohäsionslosen Haufwerken bei der Lagerung in Behältern. Diss. TU Braunschweig 1974, Forsch.-Bericht Agrartechnik des Arb.-kreises Forsch. u. Lehre der MEG (1975) H. 11.
- [ 8 ] *Hoffmann, O.-H.:* Verdichtungsverhalten körniger landwirtschaftlicher Haufwerke. Diss. TU Braunschweig 1975, Forsch.-Ber. Agrartechnik d. Arb.-kreises Forsch. u. Lehre der MEG (1975) H. 10.
- [ 9 ] *Matthies, H.J.:* Der Strömungswiderstand beim Belüften landwirtschaftlicher Erntegüter. VDI-Forsch.-Heft 454, Düsseldorf: VDI-Verlag 1956.
- [ 10 ] *Matthies, H.J. u. H. Petersen:* Ausbau eines Verfahrens zur Berechnung des Strömungswiderstandes ruhender kornförmiger Schüttgüter. Grundl. Landtechnik Bd. 23 (1973) Nr. 2, S. 50/53.
- [ 11 ] • *Muhs, H.:* Die physikalischen Eigenschaften der Böden. "Bodenmechanik I", Ingenieurwissen Bd. 6, Düsseldorf: VDI-Verlag 1964.
- [ 12 ] *Oda, M.:* A mechanical and statistical model of granular material. Soils a. Found. Bd. 14 (1974) Nr. 1, S. 13/27.
- [ 13 ] *Konishi, J.:* On the deformation mechanism of granular material. Proc. 27. Annual Meeting of Japan Soc. Civil Engng., Vol. 3, S. 69/70.
- [ 14 ] *Bedening, D. u. G. Merten:* Zur Messung der Druckverteilung im Kugelhaufen mit Hilfe von stabförmigen Sonden. EURATOM, THTR Symposium, Jülich 1968, S. 295/307.
- [ 15 ] *Schwedes, J.:* Ein Aufnehmer zur Ermittlung von Normal- und Schubspannungen in Schüttgütern. HBM-Meßtechn. Briefe (1973) 1, S. 11/15.
- [ 16 ] *Eisenhart Rothe, M. v. u. O. Natau:* Problematik und Anwendung eines neuen Meßverfahrens zur Bestimmung der Fließspannungen in Schüttgütern. Powder Techn. Bd. 12 (1975) Nr. 1, S. 1/6.
- [ 17 ] *Handley, M.F. u. M.G. Perry:* Measurements of stresses in flowing granular materials. Rheol. Acta Bd. 4 (1965) Nr. 3, S. 225/33.
- [ 18 ] *Lakshman, P. u. D. Venkateswarlee:* Internal pressures in flowing granular materials from mass flow hoppers. Powder Techn. Bd. 11 (1975) S. 133/46.
- [ 19 ] *Brown, S.F.:* The measurements of in-situ stress and strain in soils. Conf. on Field Instrumentation in Geotechn. Engng., Brit. Geotechn. Soc., London, Mai 1973, S. 38/51.
- [ 20 ] *Kallstenius, T. u. W. Bergau:* Investigations of soil pressure measuring by means of cells. Royal Swedish Geot. Inst., Proc. 12 (1956).
- [ 21 ] *Triandafilidis, G.E.:* Soil-Stress gage design and evaluation. ASTM J. Test. Evaluation 2 (1974) Nr. 3, S. 146/58.
- [ 22 ] *Loh, Y.C.:* Internal stress gauges for cementitious materials. Proc. Soc. Exp. Stress Analysis (Cambr.) Vol. 11 (1954) Nr. 2, S. 13/20.
- [ 23 ] *Prange, B.:* Ein Beitrag zum Problem der Spannungsmessung im Halbraum. Diss. TH Karlsruhe 1965.
- [ 24 ] *Getzler, Z., M. Gellert u. R. Eitan:* Analysis of arching pressures in ideal elastic soil. J. Soil Mech. Found. Div., SM 4 (1970) S. 1357/72.
- [ 25 ] *Hesse, Th.:* Gestaltung und Betrieb von Schüttgut-Silos. Landtechnik Bd. 31 (1976) Nr. 4, S. 158/61.
- [ 26 ] *Jaky, J.:* Pressure in silos. Proc. 2. Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng. Rotterdam 1948, S. 103/107.
- [ 27 ] *Jenike, A.W.:* Storage and flow of solids. Univ. Utah, Engng. Exp. Station, Bull. 123 (1961).
- [ 28 ] *Wagner, K.:* Probleme des Silodrucks. Diss. TU Braunschweig 1971.