

Einsatz einer Spitzendrucksonde im Großsilo

Von Theodor Hesse und Wolfgang Borß, Braunschweig*)

DK 531.78:621.642.39

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, die Druckspannungsverteilung in einem Schüttgut-Silo mit einer Spitzendrucksonde zu ermitteln. In Ergänzung zu einem bereits erschienenen Aufsatz, in dem der Sondiervorgang und die Spannungs- und Verformungszustände vor der Sondenspitze näher erläutert wurden, wird an dieser Stelle über den erfolgreichen ersten Einsatz dieses Meßverfahrens in einem Großsilo berichtet.

1. Einleitung

In einem zuvor in dieser Zeitschrift erschienenen Aufsatz [1] wurde über das Spitzendrucksondieren als einem neuen Meßverfahren zur Ermittlung der Druckspannungsverteilung in einem Silo für körnige Schüttgüter berichtet.

Ausgehend von Drucksonden auf dem Gebiet der Bodenmechanik zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Tiefgründungen wurde am Institut für Landmaschinen der TU Braunschweig eine Meßsonde entwickelt, die in das Schüttgut eingefahren wird und dabei eine auf theoretische Grundlagen gestützte Bestimmung der Druckspannungsverteilung im Silo ermöglicht. Darüber hinaus konnte durch den Einsatz einer geeigneten Druckspannungsmessdose der direkte Zusammenhang zwischen den örtlichen maximalen Ruhedruckspannungen im Silo vor dem Eindringen der Sonde und den bei gleichartigen Versuchen dort gemessenen Eindringwiderständen der Sondenspitze speziell für Modellsilos experimentell bestätigt werden.

Als Ergänzung zu diesen Untersuchungen an Modellsilos soll in diesem Beitrag über den Einsatz der Spitzendrucksonde zu Druckspannungsmessungen in einem Großsilo und die ersten bereits vorliegenden Versuchsergebnisse berichtet werden.

2. Aufbau und Funktion der entwickelten Versuchseinrichtung

Um eine klare Zuordnung von Eindringwiderstand der Sondenspitze und örtlicher Druckspannung im Silo zu erhalten, müssen zunächst mit einer geeigneten Versuchseinrichtung die Sondeneindringwiderstände an bestimmten Stellen im Silo gemessen und danach nach Herstellung der gleichen Schüttungen an denselben Stellen mit einer speziell entwickelten Druckmeßdose die Druckspannungen gemessen werden. Am Modellsilo läßt sich die Kalibrierung auf diese Weise relativ einfach durchführen. Aus zeitlichen und finanziellen Gründen können Untersuchungen, bei denen die örtlichen Spannungen durch Einlegen von Meßdosen ermittelt werden, am Großsilo nicht durchgeführt werden. Daher mußten an einem geeigneten Modellsiloversuchsstand hohe Silodrücke simuliert werden, um die Spitzendrucksonde auch für die bei Großsilos zu erwartenden Druckspannungen kalibrieren zu können.

2.1 Spitzendrucksonde für Modellsilo

Im Gegensatz zu den Modellsilountersuchungen mit natürlicher Gutbelastung [1] sind für die Versuche mit einer künstlichen Spannungserhöhung im Modellsilo wesentlich höhere Eindringkräfte aufzubringen. Dazu wird die in Bild 1 schematisch wiedergegebene Sondiereinrichtung verwendet. Die Sonde, Bild 1 links, wird kontinuierlich vertikal von unten, wie beim späteren Einsatz am Großsilo, durch das im Modellsilo lagernde Schüttgut gedrückt. Ein Elektromotor mit Seilwinde a bewirkt über ein Zugseil b den Vorschub des Sondenrohres c in der Führung d. Die beim Eindringen in das Schüttgut e an der Sondenspitze f auftretende Widerstandskraft wird mit Hilfe eines piezoelektrischen Kraftaufnehmers g mit nachgeschaltetem Ladungsverstärker auf einem X,Y-Schreiber über dem Eindringweg aufgetragen.

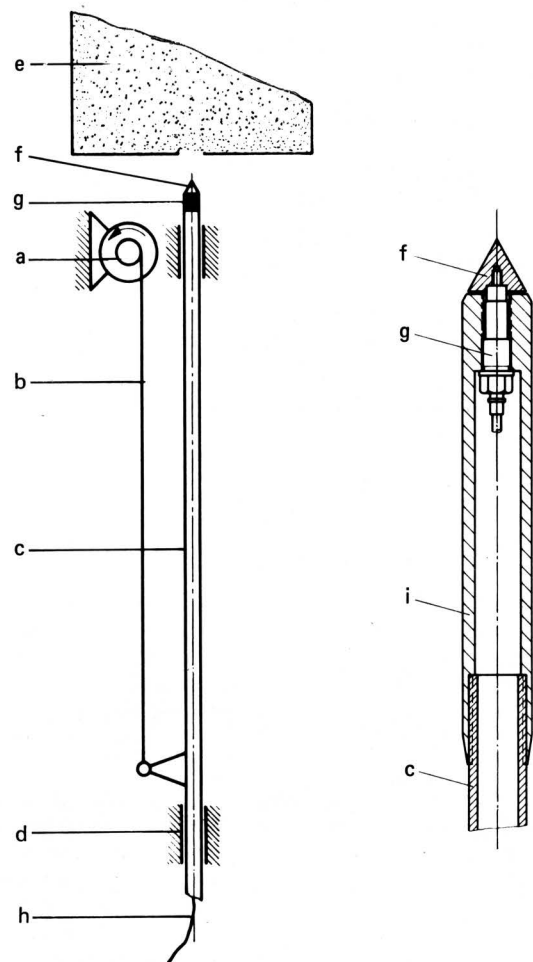


Bild 1. Schematischer Aufbau der Spitzendrucksonde.

- | | | | |
|---|----------------------------|---|------------------------------------|
| a | Elektromotor mit Seilwinde | f | Sondenspitze |
| b | Zugseil | g | piezoelektrischer Kraftaufnehmer |
| c | Sondenrohr | h | Verbindungskabel zum Meßverstärker |
| d | Sondenführung | i | Anschlußstück |
| e | Modellsilo mit Schüttgut | | |

*) Dipl.-Ing. Theodor Hesse ist wissenschaftlicher Assistent, Wolfgang Borß technischer Angestellter am Institut für Landmaschinen (Direktor: Prof. Dr.-Ing. H.J. Matthies) der TU Braunschweig.

Bild 1 zeigt rechts einen Schnitt durch die sowohl im Modellsilo als auch im Großsilo verwendete Sondenspitze. Der eigentliche Meßkegel f hat mit 20 mm einen kleineren Durchmesser als das Anschlußstück i (Durchmesser 24 mm); dadurch ist gewährleistet, daß der Kraftaufnehmer g unter dem Kegel insbesondere beim Einsatz der Sonde in Wandnähe eines Großsilos bei einer etwaigen Berührung der Wand vor einseitiger Überlastung bzw. Verbiegen geschützt ist. Die Verdickung des Anschlußstückes gegenüber dem Sondenrohr c (Außendurchmesser 20 mm) hat einen gewissen Maulwurfseffekt zur Folge, so daß die beim Einfahren der Sonde aufzubringenden Reibungskräfte zwischen Sondenrohr und Haufwerk dadurch wesentlich vermindert werden. Für die Siloversuche wird der auch für bodenmechanische Sondierungen übliche Kegelspitzenwinkel von 60° eingesetzt.

2.2 Druckspannungs-Meßdose

Die für die Zuordnung der gemessenen Eindringwiderstände zu den vorliegenden Druckspannungen erforderliche Messung der Druckspannungen im Haufwerk wurde mit Hilfe der in Bild 2 dargestellten Druckspannungsmessdose durchgeführt. Sie besteht im wesentlichen aus drei Teilen: dem Gehäuse a, dem eingesetzten piezoelektrischen Kraftaufnehmer mit Steckeranschluß für das Meßkabel und dem Meßteller c. Nachdem der Modellsilo bis zu einer bestimmten Höhe gefüllt ist, kann die Dose mit dem zugehörigen Anschlußkabel eingelegt werden. Beim weiteren Füllen und anschließenden künstlichen Belasten der Schüttgutsäule (s. Abschn. 2.3) wird die auf die Meßplatte wirkende Belastung von dem Kraftaufnehmer über einen angeschlossenen Ladungsverstärker auf ein Registriergerät übertragen.

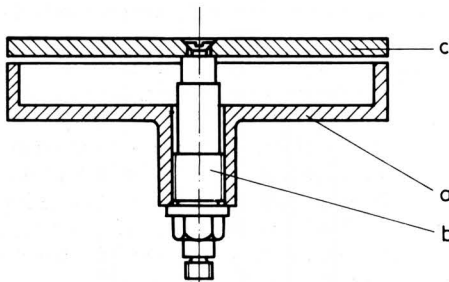


Bild 2. Druckspannungsmessdose (Durchmesser 76 mm).

- a Gehäuse
- b piezoelektrischer Kraftaufnehmer mit Kabelanschluß
- c Meßteller

2.3 Modellsilo-Versuchsstand

Der zylindrische Modellsilo (Stahlblech) des bereits in [1] ausführlich beschriebenen Siloversuchsstandes wurde mit einer Zusatzbelastungseinrichtung zur Simulation großer Silodrücke (bis 100 kPa) versehen. Der erweiterte Versuchsaufbau ist in Bild 3 skizziert. Die elektronischen Meß- und Steuergeräte sind wegen des anfallenden Staubes in einem separaten Raum untergebracht.

Der Modellsilo a mit einem Innendurchmesser von 600 mm und einer Höhe von 1 200 mm hat eine Wandstärke von 10 mm, damit auch bei großen Wandbelastungen keine Verformungen auftreten, die den Spannungszustand im lagernden Haufwerk beeinflussen [2]. Nach dem Füllen des Silos bis zu einer Füllhöhe von etwa 1 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 und mit einer aufgeklebten Dichtung d versehene Deckel e des Modellsilos mittels Knebeschrauben f luftdicht 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. Da der Modellsilo auf einem Gestell etwa 1,5 m oberhalb des Erdbodens steht, kann das Sondieren mit der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Einrichtung durch die Öffnung l vertikal von unten erfolgen.

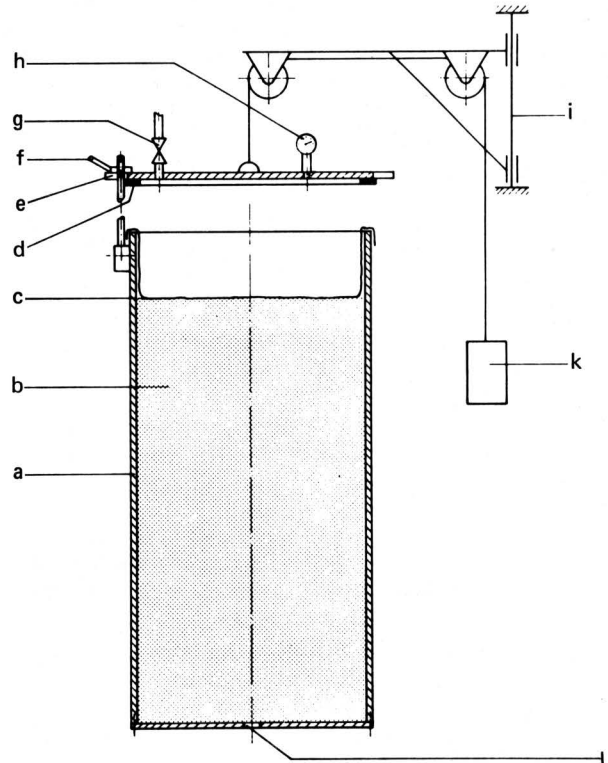


Bild 3. Aufbau des Modellsilo-Versuchsstandes zur Simulation von Schüttgut-Drücken in Großsilos.

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

2.4 Spitzendrucksonde für Großsilo

Für die experimentelle Ermittlung der Spannungsverteilung im Großsilo wurde eine größere Sondiereinrichtung neu entwickelt und in einem ca. 40 m hohen Getreidesilo der Hamburger Getreidehaus-Lagergesellschaft (HGL) in Hamburg eingesetzt. Das Sondieren erfolgte vom Silokeller aus durch eine entsprechende Öffnung im Auslauftrichter des Silos in Richtung auf die Haufwerksoberfläche (s. auch Skizze in Bild 7). Dadurch war es möglich, die beim Eindringen der Sonde als Reaktionskraft auftretende Reibkraft am Sondenrohr (über 10 kN) auf den Fundamentboden abzustützen. Darüber hinaus bietet diese Versuchsanordnung zwei weitere Vorteile: Einerseits kann kontrolliert werden, ob der Spitzendruck nach Durchfahren der gesamten Schütthöhe an der Gutoberfläche auf den Anfangswert Null zurückgeht — der Versuch dauert immerhin etwa 30 min — andererseits kann an der aus dem Gut herausragenden Spitze überprüft werden, ob die vorgesehene Sondierrichtung eingehalten wurde.

Die Spitzendrucksonde für den Einsatz im Großsilo mit der zugehörigen Registriereinrichtung ist in Bild 4 dargestellt. Der Eindringwiderstand der Sondenspitze a wird mit Hilfe des in Bild 1 gezeigten piezoelektrischen Kraftaufnehmers über ein durch das Sondenrohr b geführtes Kabel c und über einen Verstärker d zunächst auf ein Magnetband e aufgenommen und kann gleichzeitig an einem

Digitalvoltmeter f an Ort und Stelle überprüft werden. Das ca. 60 m lange Kabel muß vor dem Versuch durch das gesamte Sondenrohrgestänge (im Bild nicht sichtbar) gezogen werden. Das Rohrgestänge ist ca. 42 m lang und besteht aus Einzelstücken von 2 m Länge, die während des Versuches nach und nach angeschraubt und in das Schüttgut nachgeschoben werden.

Nach Ausrichten der Sondereinheit werden zunächst die zwei Führungsrohre g, die unten auf einem Fundament stehen und oben mit einem Querträger versehen sind, unter der Kellerdecke, dem eigentlichen Siloboden, verspannt. Beim anschließenden Einfahren der Sonde wird das Sondenrohr b von einem geführten Hubjoch mit Klemmechanismus h erfaßt und nach oben gedrückt, was mittels einer Seilwinde i mit 2 Seilen k über die Umlenkrollen l an der Decke geschieht. Die Seilwinde wird über ein Schaltgetriebe m von einem Elektromotor n angetrieben. Damit das sich noch außerhalb der Schüttung befindliche Rohrstück bei der Hubbewegung nicht ausknicken kann, wird es von 3 an zwei dünnen Seilen o hängenden Führungsjochen p gestützt, die die Hubbewegung des geführten Hubjochs h mitmachen können. Nach Erreichen der oberen Endlage der jeweiligen Hubbewegung wird der Motor über einen Endschalter ausgeschaltet. Nachdem das nächste Sondenrohr von Hand angeschraubt ist, kann der Klemmechanismus, der sich jetzt vom Sondenrohr löst, durch Umkehr der Drehrichtung am Antriebsmotor heruntergefahren werden, um zu einer neuen Hubbewegung anzusetzen.

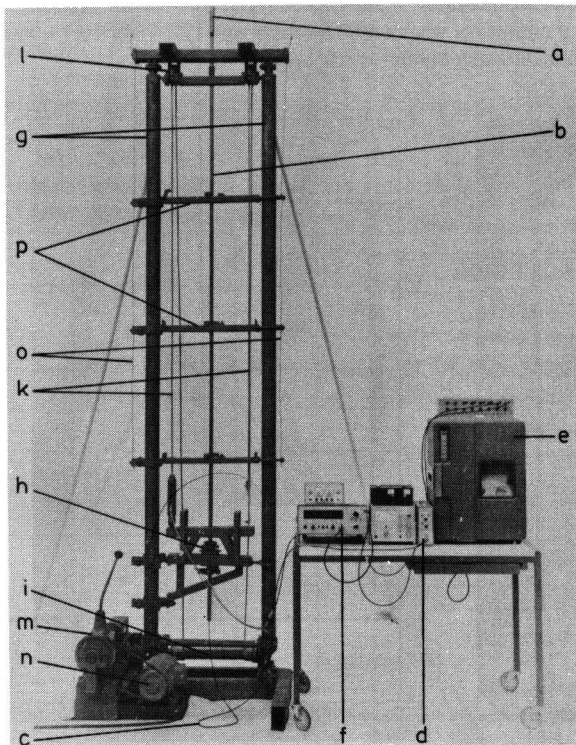


Bild 4. Sondereinrichtung für Großsilos.

- | | |
|--------------------|---------------------------|
| a Sondenspitze | i Seilwinde |
| b Sondenrohr | k Seile |
| c Kabel | l Umlenkrollen |
| d Verstärker | m Schaltgetriebe |
| e Magnetbandgerät | n Elektromotor |
| f Digitalvoltmeter | o Seile für Führungsjoche |
| g Führungsrohre | p Führungsjoche |
| h Klemmechanismus | |

Zum Herausziehen des Sondenrohrgestänges aus dem Gut nach Beendigung des Versuches wird das Hubjoch mit dem Klemmechanismus h um 180° gedreht und von Hand nach oben gebracht. Die Seile k laufen nun nicht über die Umlenkrollen l, so daß die Seilwinde i das Sondengestänge hubweise aus dem Silo herausziehen kann, wobei das Gestänge wieder zerlegt werden muß.

3. Bisherige Untersuchungen

3.1 Kalibrierung der Druckspannungsmeßdose

Für den erfolgreichen Einsatz der in Abschn. 2.2 beschriebenen und in ihrem Aufbau relativ einfach erscheinenden Spannungsmeßdose zur Ermittlung von örtlichen Druckspannungen in Schüttgütern und damit zur Kalibrierung der Spitzendrucksonde waren zunächst umfangreiche Voruntersuchungen notwendig [4], auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden soll; dennoch erscheint es angebracht, kurz auf ein Problem hinzuweisen, das sich allgemein bei der Verwendung von Spannungsmeßdosen in Schüttgütern ergibt.

Da die seitlichen Silowände starr sind, hat die gesamte Gutsäule bei wachsender Belastung durch das Eigengewicht der oberen Schichten nur die Möglichkeit, sich in vertikaler Richtung zu verdichten. Die Verformbarkeit einer eingelegten Meßdose sollte daher im Idealfall insbesondere in dieser Richtung der des eingelagerten Gutes entsprechen. In Bild 5a ist dieses Verhalten des Schüttgutes im Bereich der Meßdose durch Parallelen angedeutet, die die einzelnen Gutschichten idealisieren. In der Regel stimmen die Verformungseigenschaften und damit die Elastizität von Meßdose und Schüttgut aber nicht überein, so daß sich ein systematischer Meßfehler ergeben wird. Ist die Meßdose weicher als das sie umgebende Gut, Bild 5b, stützt sich das Schüttgut infolge instabiler Brückenbildung teilweise auf dem Gut seitlich der Dose ab, so daß eine zu geringe Druckspannung gemessen wird. Bei einer Dose, die härter als das Versuchsgut ist, Bild 5c, ergibt sich der gegenteilige Effekt, so daß sich ein Teil des Gutes aus dem Umgebungsbereich zusätzlich auf der Meßdose abstützt und die abgelesenen Meßwerte zu groß sind.

Anhand theoretischer Überlegungen von Loh [5] lassen sich die unterschiedlichen Verformungseigenschaften von Meßdose und Schüttgut durch eine nachträgliche Meßwertkorrektur hinreichend berücksichtigen. Dazu muß neben dem Elastizitätsmodul der Meßdose ebenfalls das Verformungsverhalten des zu untersuchenden Schüttgutes bekannt sein. Mit Hilfe der von Hoffmann [6] am hiesigen Institut durchgeführten Grundlagen-Untersuchungen des Verdichtungsverhaltens körniger landwirtschaftlicher Haufwerke konnte die Meßdose für einen erfolgreichen Einsatz im Silo kalibriert werden, d.h. eine Zuordnung geschaffen werden zwischen der auf die Meßfläche wirkenden Kraft und der tatsächlich im Schüttgut herrschenden Druckspannung.

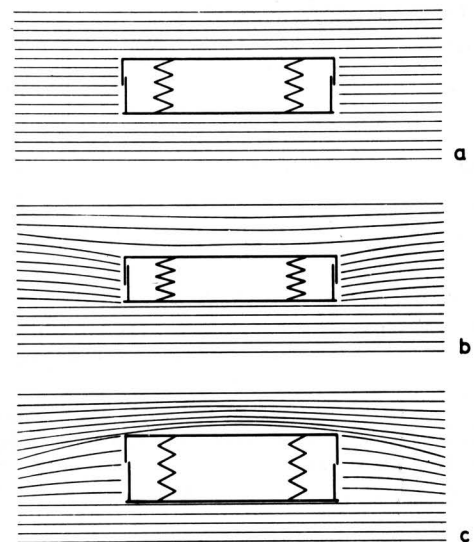


Bild 5. Verhalten des Schüttgutes im Bereich einer eingelegten Meßdose.

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

3.2 Kalibrierkurve der Spitzendrucksonde

In der früheren Arbeit [1] ist darauf hingewiesen worden, daß der Eindringwiderstand der Sondenspitze theoretisch in einem direkten Verhältnis zu der vorher dort herrschenden Ruhedruckspannung steht, wenn man voraussetzt, daß sich während des Sondiervorganges der Körnerverband um die Sondenspitze herum rein plastisch verformt. Experimentelle Untersuchungen von Paul [3] sowie eigene Untersuchungen [1] konnten diesen linearen Zusammenhang für Modellsilos, d.h. für kleine Druckspannungen bis max. 20 kPa, bestätigen.

Untersuchungen mit den in Abschn. 2.1–2.3 beschriebenen Meßeinrichtungen weisen jedoch bei größeren Druckspannungen im Schüttgut, wie sie etwa im Großsilo auftreten, erhebliche Abweichungen von dieser Linearität auf: Bei gleichmäßigem Anstieg der Ruhedruckspannung nimmt der aufzubringende Eindringwiderstand der Sondenspitze weniger stark zu. Diese Erscheinung ist auch aus Einsätzen von Spitzendrucksonden bei bodenmechanischen Untersuchungen bekannt, z.B. [7]. Sie ist dadurch zu erklären, daß sich die Körner während des Verdrängungsvorganges um die Sondenspitze herum bei größeren Drücken weniger plastisch als zunehmend elastisch verformen, wobei im Verhältnis weniger Reibung zwischen den Körnern zu überwinden ist.

Bild 6 verdeutlicht dieses Ergebnis, es ist auch als Kalibrierkurve für die in Bild 1 rechts dargestellte Sondenspitze speziell beim Einsatz in einem mit Sojabohnen gefüllten Silo mit einer mittleren Schüttdichte von etwa 800 kg/m^3 zu verwenden. Das Diagramm wurde aus einer Vielzahl von Meßwerten erstellt, die im Mittel weniger als 5 % von dem eingetragenen Kurvenzug abweichen. Darüber hinaus wurde empirisch gefunden, daß die in Bild 6 dargestellte Zuordnung mathematisch einfach und hinreichend genau durch die Potenzfunktion

$$\sigma_v = 0,04 \cdot P_S^{1,3} \quad (1)$$

ausgedrückt werden kann, wobei die Ruhedruckspannung σ_v in kPa und der Eindringwiderstand P_S in N einzusetzen ist.

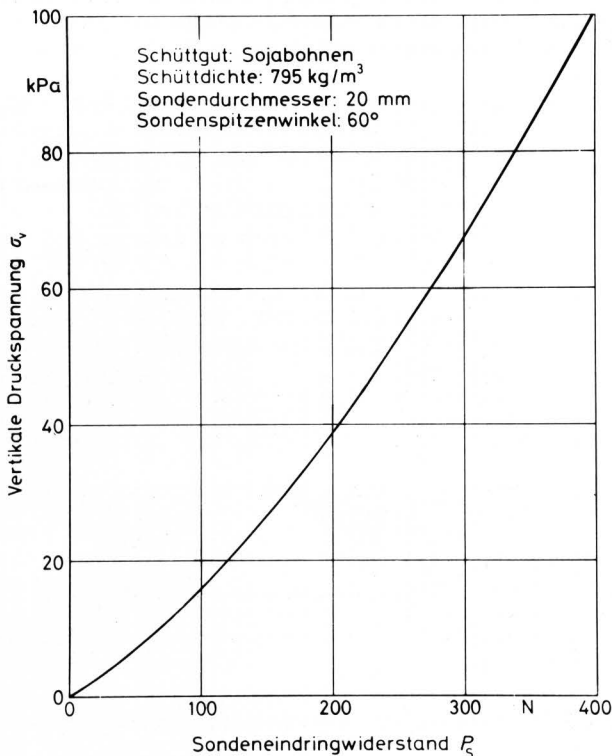


Bild 6. Kalibrierkurve der Spitzendrucksonde.

3.3 Allgemeiner Spannungsverlauf im Großsilo

Erste Sondenuntersuchungen am Großsilo wurden von Paul [3] durchgeführt. Über eine Extrapolation seiner am Modellsilo gefundenen linearen Kalibrierkurve (s. Abschn. 3.2) ermittelte er beispielsweise für einen mit Sojabohnen gefüllten Großsilo vertikale Druckspannungen in der Größenordnung von hydrostatischen Drücken einer vergleichbaren Flüssigkeit. Aber aufgrund aller bisherigen Erkenntnisse der Siloforschung muß dieses Ergebnis stark angezweifelt werden.

Aus den Großsilo-Untersuchungen von Paul wurden daher im folgenden lediglich die mit der Spitzendrucksonde gemessenen und als richtig anzusehenden Eindringwiderstände für eine Sojabohnenschüttung herausgegriffen und in Verbindung mit der eigenen Kalibrierkurve Gl. (1) für die Ermittlung der vertikalen Ruhedruckspannungen weiterverarbeitet. Die Sondierung erfolgte, wie bereits in Abschnitt 2.4 begründet, vom Silokeller aus durch ein Loch in der Schrägen eines der 4 Auslauftrichter (siehe linke schematische Darstellung in Bild 7), so daß die gestrichelt eingezeichnete Sondierrichtung etwa mit der Silomittelachse zusammenfällt. Aus Symmetriegründen entspricht sie ebenfalls annähernd der Richtung der gesuchten maximalen Hauptspannung bei der Lagerung.

Im rechten Diagramm ist der gemessene Verlauf des Eindringwiderstandes — nicht in Abhängigkeit vom Sondenweg, sondern daraus ermittelt — als Funktion der Silotiefe, die von der Gutoberfläche aus zählt, wiedergegeben. Der Sondeneindringwiderstand nimmt bei wachsender Silotiefe nicht gleichmäßig zu, sondern nähert sich asymptotisch einem Grenzwert.

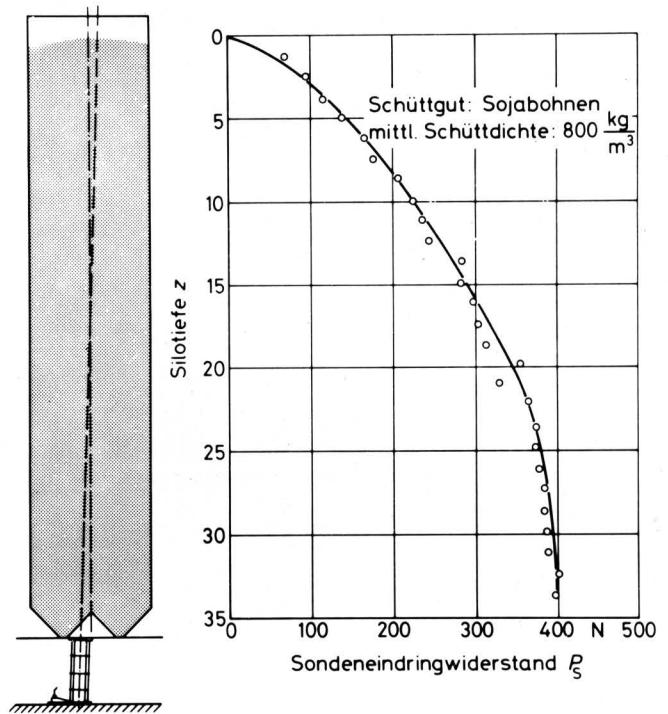


Bild 7. Verlauf des Sondeneindringwiderstandes in Abhängigkeit von der Silotiefe.

Die in Bild 7 im Abstand von 1,25 m eingetragenen Meßwerte der Spitzendrucksonde sind über Gl. (1) in die gesuchten örtlichen vertikalen Ruhedruckspannungen umgerechnet und in Bild 8 ebenfalls in Abhängigkeit von der Silotiefe dargestellt (ausgezogene Kurve).

Wie bereits ausführlich erläutert wurde [1], werden Silos z.Z. nach der 1964 erstellten DIN 1055 Blatt 6 [8] dimensioniert. In Bild 8 ist daher zum Vergleich mit der Messung der nach dieser Dimen-

sionierungsgrundlage zu erwartende vertikale Druckspannungsverlauf nach beendetem Füllen gestrichelt eingetragen. Der Druckspannungsverlauf ist errechnet für diesen Silo mit 9,4 m Durchmesser und das Schüttgut Sojabohnen, dessen mittlere Schüttdichte nach Angabe der Siloverwaltung mit etwa 800 kg/m^3 angesetzt wird, was auch nach DIN 1055 Blatt 1 [9] allgemein für Getreide vorgeschlagen wird, und einem inneren Reibungswinkel von 30° nach dieser Norm. Beide Kurven geben deutlich den aus der Literatur bekannten Siloeffekt wieder, d.h. die Druckspannungen nähern sich in einem Schüttgut-Silo im Gegensatz zu einer Flüssigkeit bei großen Silotiefen asymptotisch einem Grenzwert. Obwohl im unteren und oberen Silobereich geringe Abweichungen der beiden Kurven voneinander zu beobachten sind, kann die Übereinstimmung als gut bezeichnet werden, da der maximale Unterschied kaum mehr als 10 % beträgt. Die Abweichungen sind insbesondere durch unterschiedliche Dichten der Schüttung zu erklären. Wurde sowohl für die Sondenkalibrierung (siehe Bild 6) als auch für die Berechnung nach der Silonorm eine über der Silotiefe konstante mittlere Schüttdichte von 800 kg/m^3 angenommen, so ist leicht einzusehen, daß die Dichte infolge der unterschiedlich großen Druckspannungen oben im Silo kleinere und unten größere Beträge einnehmen wird. Nach Hoffmann [6], der das Verdichtungsverhalten körniger Haufwerke näher untersuchte, sind die nach der DIN errechneten Druckspannungen – beispielsweise für Sojabohnen und auf diesen Silo angewendet – daher im unteren Silobereich um mehr als 4 % höher anzusetzen. Darüber hinaus haben eigene, bisher nur qualitativ ausgewertete Sondenuntersuchungen gezeigt, daß bereits eine geringe Änderung der Schüttdichte des untersuchten Haufwerkes einen nicht zu vernachlässigenden Einfluß auf den gemessenen Eindringwiderstand und damit auf die mit der Spitzendrucksonde ermittelten vertikalen Ruhedruckspannungen hat, d.h. bei gleichem Spannungszustand im Haufwerk haben größere Dichten auch größere Eindringwiderstände zur Folge. Berücksichtigt man diese beiden Einflüsse, so werden die in Bild 8 eingetragenen Kurven noch näher zusammenrücken.

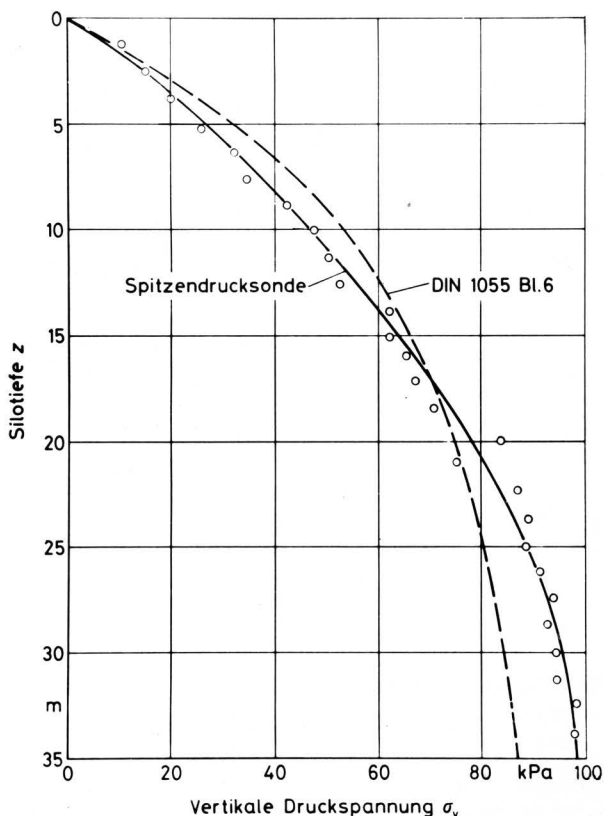


Bild 8. Vertikale Ruhedruckspannung als Funktion der Silotiefe (Silotdurchmesser: 9,4 m, Schüttgut: Sojabohnen, mittlere Schüttdichte 800 kg/m^3).

4. Zusammenfassung und Ausblick

Das aus der Bodenmechanik bekannte und bereits an Modellsilos erprobte Spitzendruck-Sondierverfahren wurde für Druckspannungsmessungen in Großsilos weiterentwickelt.

Für die Kalibrierung des neuen Meßverfahrens mußte zunächst eine geeignete Versuchseinrichtung geschaffen werden, um eine klare Zuordnung von Eindringwiderstand der Sondenspitze und örtlicher vertikaler Druckspannung im Haufwerk zu finden. Dabei zeigte sich, daß nicht von einer theoretisch exakten direkten Proportionalität beider Größen über den ganzen Druckspannungsbereich ausgegangen werden darf, sondern daß insbesondere bei Großsilo-Druckspannungen ein degressiver Verlauf des Eindringwiderstandes bei gleichmäßigem Anstieg der Ruhedruckspannung auftritt. Diese Erscheinung kann durch eine bei hohen Drücken zunehmend auftretende elastische Verformung der Körner anstelle einer mit viel Reibung verbundenen plastischen Verschiebung erklärt werden.

Mit dieser neuen Kalibrierkurve ausgewertet zeigen die ersten von Paul [3] durchgeführten Messungen am Großsilo mit Sojabohnen in der Tendenz eine gute Übereinstimmung der aus den Sondenversuchen ermittelten mit den nach der z.Z. gültigen Silonorm berechneten Ruhedruckspannungen. Dabei gehen sowohl das Meß- als auch das Rechenverfahren noch von einer über der Silotiefe fälschlicherweise als konstant angenommenen Schüttdichte aus. Da aber die unterschiedlichen örtlichen Schüttdichten wiederum Auswirkungen auf die örtlichen inneren Reibungswinkel des Gutes haben [10, 11] und damit auf die Eindringwiderstände der Sonde, ist letztlich eine genaue Kenntnis über das Reibverhalten der eingelagerten Schüttgüter erforderlich.

Es werden daher z.Z. erste Untersuchungen mit einer 3-Komponenten-Sonde durchgeführt, mit der außer dem Eindringwiderstand der Sondenspitze gleichzeitig der örtliche innere Reibungswinkel des Schüttgutes gemessen wird. Mit Hilfe dieses erweiterten Spitzendruck-Sondierverfahrens ist es möglich, die Druckspannungen in Silos unter den verschiedensten Bedingungen und für die unterschiedlichsten Güter exakt zu ermitteln.

Schrifttum

- [1] Hesse, Th.: Das Spitzendrucksondieren – Ein Meßverfahren zur Bestimmung der Druckverteilung in einem Schüttgut-Silo. *Grundl. Landtechnik* Bd. 26 (1976) Nr. 3, S. 73/78.
- [2] 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.
- [3] Paul, J.: Spannungsverteilung in körnigen kohäsionslosen Haufwerken bei der Lagerung in Behältern. Diss. TU Braunschweig 1974, Forschungsbericht Agrart. des Arbeitskreises Forschung und Lehre der MEG, H. 11 (1975).
- [4] Hesse, Th.: Grundlegende Untersuchungen zur Ermittlung des kritischen Betriebszustandes in Silos für landwirtschaftliche Güter. *Interner Institutsbericht* v. 27.4.1977.
- [5] Loh, Y.C.: Internal stress gauges for cementitious materials. *Proc. Soc. Exp. Stress Anal.* 11 (1954) Nr. 2, S. 13/20.
- [6] Hoffmann, O.-H.: Verdichtungsverhalten körniger landwirtschaftlicher Haufwerke. Diss. TU Braunschweig 1975, Forschungsbericht Agrart. des Arbeitskreises Forschung und Lehre der MEG, H. 10 (1975).
- [7] Melzer, K.-J.: Sondenuntersuchungen in Sand. Diss. TH Aachen 1967.
- [8] DIN 1055 Blatt 6: Lastannahmen für Bauten; Lasten in Silozellen.
- [9] DIN 1055 Blatt 1: Lastannahmen für Bauten; Lagerstoffe, Baustoffe und Bauteile.
- [10] Hoffmann, O.-H.: Neuere Grundlagen der Mechanik körniger Haufwerke. *Grundl. Landtechnik* Bd. 25 (1975) Nr. 2, S. 48/59.
- [11] Hesse, Th. u. O.-H. Hoffmann: Scherverhalten körniger landwirtschaftlicher Haufwerke. *Grundl. Landtechnik* Bd. 27 (1977) Nr. 6, S. 205/13.