

Messung der bei Massenfluß am  
Übergang von der Silozelle zum Trichter  
auftretenden Lastspitze, des "SWITCH"

**T 1697**

T 1697

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00  
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

T 1697: Messung der bei Massenfluß am Übergang von der Silozelle zum Trichter auftretenden Lastspitze, des "SWITCH"



## MESSUNG DES „SWITCH“

von Dipl.-Ing. Hans-Günter Schneider

Abschlußbericht über das Forschungsvorhaben

„Messung der bei Massenfluß am Übergang von der Silozelle  
zum Trichter auftretenden Lastpitze“

unter der Leitung von Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Klaus Pieper

Januar 1986

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

Lehrstuhl für Hochbaustatik Pockelsstraße 4

3300 Braunschweig

F. 05 31 / 391-35 71

Vorbemerkung:

Die Untersuchungen, über deren Ergebnisse im folgenden berichtet wird, wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens

"Messung der bei Massenfluß am Übergang von der Silozelle zum Trichter auftretenden Lastspitze"

vom Institut für Bautechnik, Berlin, unter dem Az. IV/1-5 398/84 gefördert. Für die Bereitstellung der finanziellen Mittel sei dem Institut besonderer Dank ausgesprochen.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Bezeichnungen	
1. Einleitung	6
2. Voruntersuchungen	8
2.1 Literaturlauswertung	8
2.2 Schüttgutauswahl	10
2.2.1 Scherversuche	10
2.2.2 Schüttguteigenschaften	12
3. Meßsilo	15
3.1 Meßeinrichtungen und Trichter	16
3.2 Kalibrierung und Umrechnungsfaktoren	21
4. Meßsiloversuche	28
4.1 Versuchsprogramm	28
4.2 Auswertung der Meßdaten	29
4.3 Beobachtungen während der Versuchsdurchführung	32
4.4 Versuchsergebnisse	41
4.4.1 Horizontaldrücke im Siloschaft	41
4.4.2 Horizontaldrücke im unteren Silobereich	47
4.4.3 Drücke im Trichteransatz	48

	Seite
5. Wertung der Versuchsergebnisse	51
6. Vorschlag zur vereinfachten Berücksichtigung des Switch	55
7. Literaturverzeichnis	57
 Anlagen	
1-14 Horizontaldrücke im Siloschaft	60
15-24 Horiozontaldrücke im unteren Silobereich	74

Bezeichnungen

Geometrie

$A$ [m <sup>2</sup> ]	innere Querschnittsfläche
$u$ [m <sup>2</sup> ]	innerer Umfang
$d$ [m]	innerer Durchmesser
$r$ [m]	innerer Radius
$t$ [mm]	Wanddicke
$\alpha$ [°]	Trichterneigung gegen die Horizontale
$l$ [m]	Länge des Trichtermantels
$z$ [m]	Siloguttiefe
$x$ [mm]	Horizontalverschiebung

Untersuchungen von Schüttgutproben

$w$ [%]	Wassergehalt, bezogen auf die Trockenmasse
$d_k$ [mm]	Korndurchmesser
$\gamma$ [ $\frac{kN}{m^3}$ ]	Wichte
$\varphi_e$ [°]	Winkel des effektiven Fließortes
$\varphi_x$ [°]	Wandreibungswinkel
$\varphi'_k$ [°]	kritischer innerer Reibungswinkel
$\delta'_k$ [°]	kritischer Wandreibungswinkel

### Druckgrößen

$p_h \left[ \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right]$	Horizontaldruck auf vertikale Flächen
$p_n \left[ \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right]$	Normaldruck auf schräge Flächen
$p_w \left[ \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right]$	Wandreibungsdruck
$p_b \left[ \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right]$	vertikaler Druck auf waagerechte Siloböden

### Statistik

$\bar{x} \left[ \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right]$	arithmetischer Mittelwert
$s \left[ \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right]$	Standardabweichung
$v \left[ - \right]$	Variationskoeffizient

### Rechenwerte für Schüttgüter

$\lambda \left[ - \right]$	Horizontallastverhältnis = $p_h/p_v$
$\mu \left[ - \right]$	Wandreibungsbeiwert = $p_w/p_h$
$e_h \left[ - \right]$	Entleerungslastfaktor für die Horizontallast
$e_s \left[ - \right]$	Entleerungslastfaktor für die Horizontallast beim "Switch"

### Indizes

f	Füllen
e	Entleeren
u	Umlauf
s	"Switch"
i	ideel

1. Einleitung

Bei vielen industriellen Prozessen ist beim "Lagern und Bewegen" von Schüttgütern Massenfluß erwünscht. Aus theoretischen Untersuchungen ergeben sich am Übergang zwischen Trichter und Siloschaft große Lastspitzen, die in der englischsprachigen Literatur als "Switch" bezeichnet werden.

Im Entwurf DIN 1055 Teil 6 - Lastannahmen für Bauten, Lasten in Silozellen - wird in Abschnitt 3.5.4 auch auf das Auftreten von Lastspitzen hingewiesen. In der Literatur sind jedoch nur wenige und stark divergierende Angaben darüber vorhanden. Besonders über die Größe der Lastspitze, ihre Abhängigkeit vom Schüttgut und über die Größe der Fläche, auf der die Lastspitze auftreten kann, sind nur unzureichende Angaben bekannt.

Für die folgenden Güter sollen die Schüttgutdrücke auf die Silowand bei Massenfluß im Braunschweiger Siloversuchsstand gemessen werden:

- S o j a b o h n e n
- T i t a n e r z
- N a t u r s a n d
- K o k s

Die Schüttgutdrücke bei Kernfluß sind bereits in früheren Untersuchungen ermittelt, so daß Vergleichsmöglichkeiten bestehen.

Für den vorhandenen "Norm-Meßsilo" wurden dazu drei konische Trichter mit den Neigungen  $62,5^\circ$ ,  $70^\circ$  und  $77,5^\circ$  angeschafft.

Beim Trichter mit  $77,5^\circ$  Neigung können auch die Drücke im Trichteransatz gemessen werden. Um engere Meßhorizonte im unteren Siloschaft zu erhalten, wurde der "Norm-Meßsilo" hier etwas umgebaut.

Aus den Versuchsergebnissen sollen Angaben zur Berücksichtigung des "Switch" hergeleitet werden. Die Versuchsergebnisse können auch zum Vergleich mit theoretischen Untersuchungen verwendet werden.

## 2. Voruntersuchungen

Für die Bearbeitung des Forschungsvorhabens war zunächst zu klären, mit welchen Trichterneigungen und welchen Schüttgütern die Untersuchungen durchgeführt werden sollten. Damit Vergleiche zu den Ergebnissen der Messungen mit ebenem Boden möglich sind, wurde die Auswahl unter den Schüttgütern getroffen, für die entsprechende Untersuchungen vorhanden waren (s. SCHNEIDER 1985).

Für die drei vorgesehenen Trichter wurden die Neigungswinkel unter den Gesichtspunkten ausgewählt, daß Vergleiche mit bereits durchgeführten Untersuchungen möglich sind und Kern- und Massenfluß mit verschiedenen Schüttgütern erreicht werden können.

### 2.1 Literaturlauswertung

Die Anzahl der Veröffentlichungen über Silodruckmessungen bei Massenfluß ist verhältnismäßig gering.

Bekannt sind die von JENIKE (1973) durchgeführten Messungen an einem zylindrischen Modellsilo mit 0,290 m Durchmesser und einer Höhe von 0,914 m. Der verwendete konische Trichter hatte eine Neigung  $\alpha$  von  $78^\circ$ . Als Füllgut wurde F e i n - s a n d verwendet.

Messungen mit F e i n k o h l e sind von WALKER (1966 u. 1967) veröffentlicht worden. Es sind zwar hauptsächlich die Druckmessungen in verschiedenen Trichtern beschrieben, jedoch bei Trichtern mit  $60^\circ$  und  $70^\circ$  Neigung war auch ein kurzer Zellenstapel vorhanden. Der  $70^\circ$ -Modellsilo hatte einen Durchmesser von 0,152 m und eine Schafthöhe von 0,457 m. Die  $60^\circ$ -Modelle hatten konische und keilförmige Trichter mit max. 1,829 m Durchmesser und quadratischem Querschnitt mit gleicher Kantenlänge. Die Schafthöhe betrug 1,79 m.

Messungen an vier verschiedenen Modellsilos hat PERRY (1970) durchgeführt. Die drei zylindrischen Silos hatten einen Durchmesser von 0,146 m und eine Schafthöhe von 0,914 m.

Es waren konische Trichter mit  $70^\circ$ ,  $60^\circ$  und  $50^\circ$  Neigung angeordnet. Ein Modellsilo hatte einen rechteckigen Querschnitt mit 0,284 und 0,211 m Kantenlänge. Die Schafthöhe war für alle Silos gleich. Als Schüttgut wurde F e i n - s a n d verwendet.

MOTZKUS (1974) verwendete für seine Untersuchungen an einem Meßsilo mit quadratischem Querschnitt Q u a r z s a n d ( $\phi$  3-5 mm) und H a r t w e i z e n (Manitoba). Der Silo hatte eine Kantenlänge von 1 m und eine Schafthöhe von 4,49 m. Es war die Anordnung verschiedener Siloausläufe mit Neigungen von  $41^\circ$ ,  $61^\circ$  und  $75^\circ$  möglich.

V. EISENHART ROTHE (1975) verwendete einen Modellsilo mit 0,448 m Durchmesser und einer Schafthöhe von 1 m. Der konische Trichter hatte eine Neigung von  $70^\circ$ . Als Schüttgut wurde P V C - G r a n u l a t ( $\phi$  0,5-1,5 mm) verwendet. In dieser Arbeit sind zwar keine Drücke auf die Silowand ermittelt worden, sondern nur die Drücke in der Siloachse, für qualitative Vergleiche können die Ergebnisse jedoch herangezogen werden.

Den theoretischen Untersuchungen von HÄUSSLER (1984) wurde ein zylindrischer Silo mit 4,0 m Durchmesser und 10 m Schafthöhe zugrunde gelegt. Die Trichterneigungen betragen  $50^\circ$ ,  $60^\circ$  und  $70^\circ$ . Die verwendeten Stoffgesetze wurden an einem F e i n s a n d ermittelt.

Aus den Betrachtungen ergibt sich ein Bereich von  $60^\circ$  bis  $80^\circ$ , der für die Trichterneigung besonders interessant ist, da hierfür Untersuchungen vorliegen, die für spätere Vergleiche herangezogen werden können. Nach einer Untersuchung von TER BORG (1981) ist bei diesen Trichterneigungen für eine große Anzahl von Schüttgütern Massenfluß zu erwarten.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ist die Untersuchung von drei Trichtern vorgesehen. Aus den erwähnten Gründen sollte ein Trichter einen mittleren Neigungswinkel von  $70^\circ$  haben. Dafür konnte ein bereits vorhandener Trichter verwendet

werden. Die Bauhöhe des steilen Trichters mußte auf 1,35 m begrenzt werden, da ein höherer Trichter nicht unter dem Meßsilo hätte montiert werden können. Es ergab sich daraus ein Neigungswinkel von  $77,5^\circ$ . Um von der mittleren Trichter-  
neigung die gleiche Differenz zu erhalten, wurde für den flachen Trichter ein Neigungswinkel von  $62,5^\circ$  gewählt.

Die unter diesen Gesichtspunkten ausgewählten Konstruktionen sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

## 2.2 Schüttgutauswahl

Wie bereits erwähnt, konnten die für die Untersuchungen verwendeten Schüttgüter nur aus den Gütern ausgewählt werden, die bereits vorhanden waren. Da mit jedem Schüttgut noch ca. 50 Einzelversuche durchgeführt werden sollten, durften sich die Güter während der Messungen nicht zu stark verändern. Für die vorhandenen Fördereinrichtungen sollten die Güter ausreichende Fließeigenschaften haben, und sie sollten mit ihren Schüttguteigenschaften eine gewisse Bandbreite erfassen.

SCHÜTZ (1982) vermutete bei Massenfluß wesentlich geringere Schüttgutdrücke im Siloschaft als bei Kernfluß. Zur Untersuchung dieses Einflusses sollten die Schüttgüter möglichst verschiedene Lasterhöhungen beim Umlauf/Entleeren zeigen.

Nach den vorgenannten Kriterien wurden die Schüttgüter **S o - j a b o h n e n, T i t a n e r z, N a t u r s a n d u n d K o k s** ausgewählt.

### 2.2.1 Scherversuche

Für die theoretische Untersuchung bei welcher Trichter-  
neigung für die einzelnen Güter Massenfluß oder Kernfluß zu erwarten ist, müssen bestimmte Schüttguteigenschaften bekannt sein.

Dies sind die in der mechanischen Verfahrenstechnik verwendeten Parameter Wandreibungswinkel  $\varphi_x$  und Winkel des effektiven Fließortes  $\varphi_e$ . Die Parameter wurden am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik der TU Braunschweig mit dem Jenike-Schergerät ermittelt. Die Ergebnisse der Scherversuche sind in Tabelle 1 angegeben.

Die Wandreibungsmessungen wurden an einer Probeströmungsfläche aus dem VA-Material (Nr. 14301) durchgeführt, aus dem das Ober- teil des Trichters mit  $77,5^\circ$  Neigung hergestellt war. Da- zu wurde warmgewalztes VA-Blech verwendet.

Mit den S o j a b o h n e n konnten im Jenike-Schergerät keine Fließort-Messungen durchgeführt werden, da das Gut dafür zu grobkörnig war. Aus den Wandreibungsmessungen er- gaben sich minimale und maximale Wandreibungswinkel, die in der Tabelle angegeben sind.

Schüttgüter	Winkel des effektiven Fließortes $\varphi_e$ [°]	Oberfläche VA		größerer Grenzwert $\alpha$ [°] für Massenfluß	kleinster Grenzwert $\alpha$ [°] für Massenfluß	Winkel der inneren Reibung $\varphi'_k$ [°]	Wandreibungsw. $\delta'_k$ [°] Oberfläche VA	Wandreibungsw. $\delta'_k$ [°] Oberfläche ST 37
	Im Jenike-Schergerät	größerer Wandrei- bungswinkel $\varphi_x$ [°]	kleinster Wandrei- bungswinkel $\varphi_x$ [°]					
Sojabohnen	—	24,2	20,8	70,0	63,5	40,9	22,2	29,4
Titanerz	34,0	28,3	26,0	77,5	72,5	35,2	28,4	31,1
Natursand	33,0	24,3	19,7	70,0	62,0	32,6	26,6	28,4
Koks (Gesamtfraktion)	40,0	25,5	18,5	71,0	60,0	38,0	18,4	19,4

Tab.1: Ergebnisse der Scherversuche

Mit den Schüttgutparametern  $\varphi_e$  und  $\varphi_x$  können nach SCHWEDES (1984) Grenzwerte für die Neigung  $\alpha$  eines konischen Trichters ermittelt werden, bei denen noch Massenfluß eintritt. Werden diese Werte unterschritten, so ist Kernfluß zu erwarten.

Der kleinste und größte Grenzwert für die Trichterneigung ist in Tabelle 1 angegeben. Danach müßte sich mit dem steilen Trichter bei allen Schüttgütern mit Sicherheit Massenfluß einstellen. Mit dem flachen Trichter ist bei allen Schüttgütern Kernfluß wahrscheinlich. Mit dem Trichter mit der mittleren Neigung von  $70^\circ$  müßte sich bei den Schüttgütern S o j a b o h n e n, N a t u r s a n d und K o k s schon Massenfluß ergeben, während sich beim T i t a n e r z noch Kornfluß einstellen dürfte.

Ergänzend zu den Werten, die mit dem Jenike-Schergerät ermittelt wurden, sind noch die Ergebnisse von Scherversuchen mit dem Kastenschergerät in Tabelle 1 angegeben. Die Versuche wurden nach Entwurf DIN 18137 - Teil 1 durchgeführt. Eine ausführliche Darstellung der Versuchsdurchführung ist bei SCHNEIDER (1985, Abschn. 2.4) zu finden. Die Normalspannungen bei den Scherversuchen entsprachen generell den im Meßsilo ermittelten Vertikaldrücken.

### 2.2.2 Schüttguteigenschaften

Im Zusammenhang mit anderen Untersuchungen (SCHNEIDER 1985) wurden die Schüttguteigenschaften Wassergehalt, Korngrößenverteilung, Kornform und Wichte bei lockerster und dichtester Lagerung ermittelt. Die Ergebnisse sind, etwas zusammengefaßt, für die ausgewählten Güter S o j a b o h n e n, T i t a n z e r z, N a t u r s a n d und K o k s in Tabelle 2 angegeben.

Schüttgüter	Wasser- gehalt W [Gew.%]	d <sub>min</sub> - d <sub>max</sub> [mm]	mittl. Wichte b. lock. Lagerung $\gamma_{\min}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	mittl. Wichte b. dich. Lagerung $\gamma_{\max}$ [kN/m <sup>3</sup> ]
Sojabohnen	7,8	~7,0	6,94	7,68
Titanerz	0,1	0-0,6	23,18	26,62
Natursand	0	0,5-1,0	14,60	16,38
Koks	8,7	0-20	5,62	6,77

Tab. 2: Schüttguteigenschaften

Die Untersuchungen wurden nach üblichen Verfahren zur Untersuchung von Bodenproben durchgeführt; die verwendeten Normen sind im Literaturverzeichnis angegeben. Die Ermittlung der Wichten erfolgte nach EHLERS (1979).

Die angegebenen Guteigenschaften dokumentieren den Zustand der Schüttgüter, in dem sie angeliefert wurden. Während der Siloversuche verändern sich die Eigenschaften. Um für Scher- und Siloversuche annähernd gleiche Randbedingungen zu schaffen, wurden die Scherversuche generell mit Schüttgutproben durchgeführt, die nach ca. der Hälfte der Siloversuche entnommen wurden.

Im folgenden sollen die ausgewählten Schüttgüter kurz im einzelnen beschrieben werden.

### Sojabohnen

Die Sojabohnen stammten als ungereinigte Charge von einem Unternehmen im Hamburger Hafen. Es waren geringe Anteile von Fremdkörnern (Mais) und Stengeln enthalten. Die Körner hatte eine glatte Oberfläche und eine kugelige bis leicht eiförmige Form. Der maximale Durchmesser betrug 7 bis 8 mm.

### Titanerz

Das Gut konnte von der Kronos Titan-GmbH, Leverkusen, bezogen werden. Die Korndurchmesser reichten von 0 bis 0,6 mm. Der Anteil kleiner 0,2 mm betrug 60 Gew %. Die Korngrößenverteilung entsprach der eines stark mittelsandigen Feinsandes.

Die Kornform war plättchenförmig bis prismatisch mit scharfen Kanten.

### Natursand

Bei dem ausgewählten Schüttgut handelt es sich um einen natürlichen gewaschenen Quarzsand, der aus Kiegruben gewonnen wird. Gemäß technischem Merkblatt des Lieferanten beträgt der  $\text{SiO}_2$ -Anteil 99,6 Gew %. Die Korndichte beträgt  $2,65 \text{ g/cm}^3$ .

Zur Unterscheidung zum bereits von PIEPER/SCHÜTZ (1980) untersuchten gebrochenen Quarzsand wird das Gut in diesem Bericht als "Natursand" bezeichnet.

Die Körnungslinie reichte von 0,5 bis 1 mm Korndurchmesser. Die Kornform war überwiegend eiförmig bis kugelig. Die wenigen eckigen Körner hatten runde Kanten. Die Körner hatten eine glatte Oberfläche. Nach der festgestellten Korngrößenverteilung kann das Material als mittelsandiger Grobsand bezeichnet werden.

Die für den Natursand ermittelten Schüttguteigenschaften sind nahezu identisch mit den Eigenschaften des "Sacramento River Sandes", die bei den numerischen Untersuchungen von HÄUSSLER (1984) verwendet wurden.

### Koks

Der Koks konnte von der Erzvorbereitung der Salzgitter-AG bezogen werden. Er hatte eine sehr weitgestufte Körnungslinie. Die Korndurchmesser reichten von 0 bis 20 mm. Die Kornform war sehr unregelmäßig und scharfkantig.

### 3. Meßsilo

Der "Braunschweiger Norm-Meßsilo" wurde 1976 entwickelt. Die Konstruktion ist ausführlich bei SCHÜTZ (1982, Abschnitt 4.1) dargestellt. So soll hier nur das Konstruktionsprinzip beschrieben werden.

Der zylindrische Silo hat einen Innendurchmesser von 0,691 m bei glatter Silowand. Die Schafthöhe von 6,00 m ergibt sich aus 12 Ringelementen, die untereinander durch eine Fuge von fünf Millimetern getrennt sind. Die Ringe haben eine lotrechte Fuge von ebenfalls fünf Millimetern. Die Ringelemente sind aus einem warmgewalzten Baustahl St 37 hergestellt. Die an der Oberfläche befindliche Walzhaut ist nicht entfernt. Die Wandstärke der Ringe beträgt 10 mm.

Jeder Ring ist statisch bestimmt über zwei Flachstähle nach DIN 174 von 15 x 3 mm Querschnitt an zwei Stahlstützen aufgehängt. Die lotrechte Fuge wird von zwei Flachstäben gleichen Querschnitts aus Aluminium (AlMgSi 0,5/F 22) zusammengehalten, die durch Schraubenfedern vorgespannt sind. Die Fugen sind von innen mit einseitig aufgeklebten Metallstreifen abgedichtet. Die Metallstreifen sind 20 mm breit und 0,5 mm dick.

Zur elektrischen Aufnahme von Dehnungen sind auf den sogenannten Spangen Dehnungsmeßstreifen appliziert. Es können somit die auf den Ring horizontal und vertikal einwirkenden Kräfte integriert über den Umfang und eine Höhe von 0,50 m, entsprechend 0,72 d, gemessen werden.

Den unteren Abschluß bildet ein ebener Boden, der für den Einbau verschiedener zentrischer Abzugsöffnungen vorbereitet ist. Der Boden ist mit den gleichen Stahlmeßspangen wie die Ringe statisch bestimmt an den beiden Stahlstützen befestigt.

Über zwei Wägezellen, die unter den Stahlstützen angeordnet sind, kann die gesamte Vertikalkraft gemessen werden.

An die einzelnen Siloringe können jeweils zwei Halbringe geschraubt werden. Die Halbringe bestehen aus einem 2 mm dicken Blech, auf das alle 40 mm ein kreisförmiger Flachstahl horizontal geschweißt ist. Dadurch können Vertikalkräfte, überwiegend nur innerhalb einer Grenzsicht im Schüttgut, auf die Siloringe übertragen werden. Es wird eine extrem rauhe Wandoberfläche simuliert. Unter Berücksichtigung der Einbauten ergibt sich für die rauhe Wand ein Innendurchmesser von 0,667 m. Die Schraubenlöcher in der glatten Wand werden durch Schrauben mit Senkkopf bündig mit der Innenoberfläche verschlossen.

Die beschriebene Konstruktion ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. An ihr sind zahlreiche Untersuchungen durchgeführt worden: SCHÜTZ (1982), WOLF (1984) und SCHNEIDER (1985). Die Übertragbarkeit der am Meßsilo ermittelten Werte auf Großsilos ist an zahlreichen Beispielen nachgewiesen worden.

### 3.1 Meßeinrichtungen mit Trichter

Für die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchzuführenden Untersuchungen wurde der bestehende Meßsilo teilweise umgebaut. Die Veränderungen der Konstruktion sind in Abbildung 1 mit dargestellt.

Um im unteren Silobereich am Übergang zwischen Trichter und Siloschaft in einem engeren Abstand Meßwerte zu erhalten, ist der unterste Siloring in drei Meßringe aufgeteilt. In ihrer Summe ergeben die drei niedrigen Ringe wieder eine Höhe von 0,5 m.

Aus Montagegründen mußte eine ungerade Teilung gewählt werden. Die Höhe konnte ebenfalls aus Montagegründen nur auf 0,5/3 m verringert werden, da die gleichen Meßspangen wie bei den anderen Meßwertaufnehmern verwendet wurden.

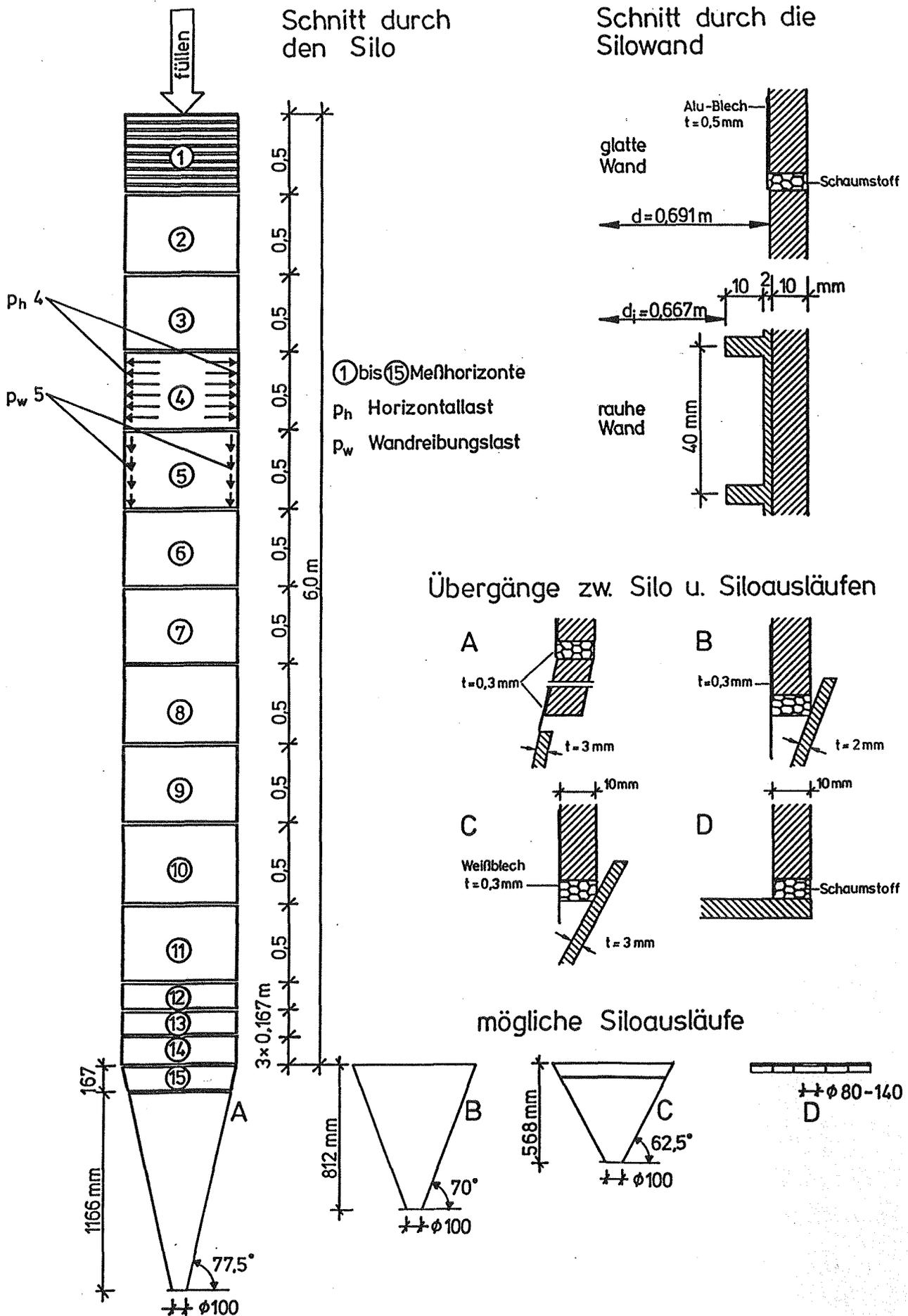


Abb. 1: Schematische Darstellung des Meßsilos

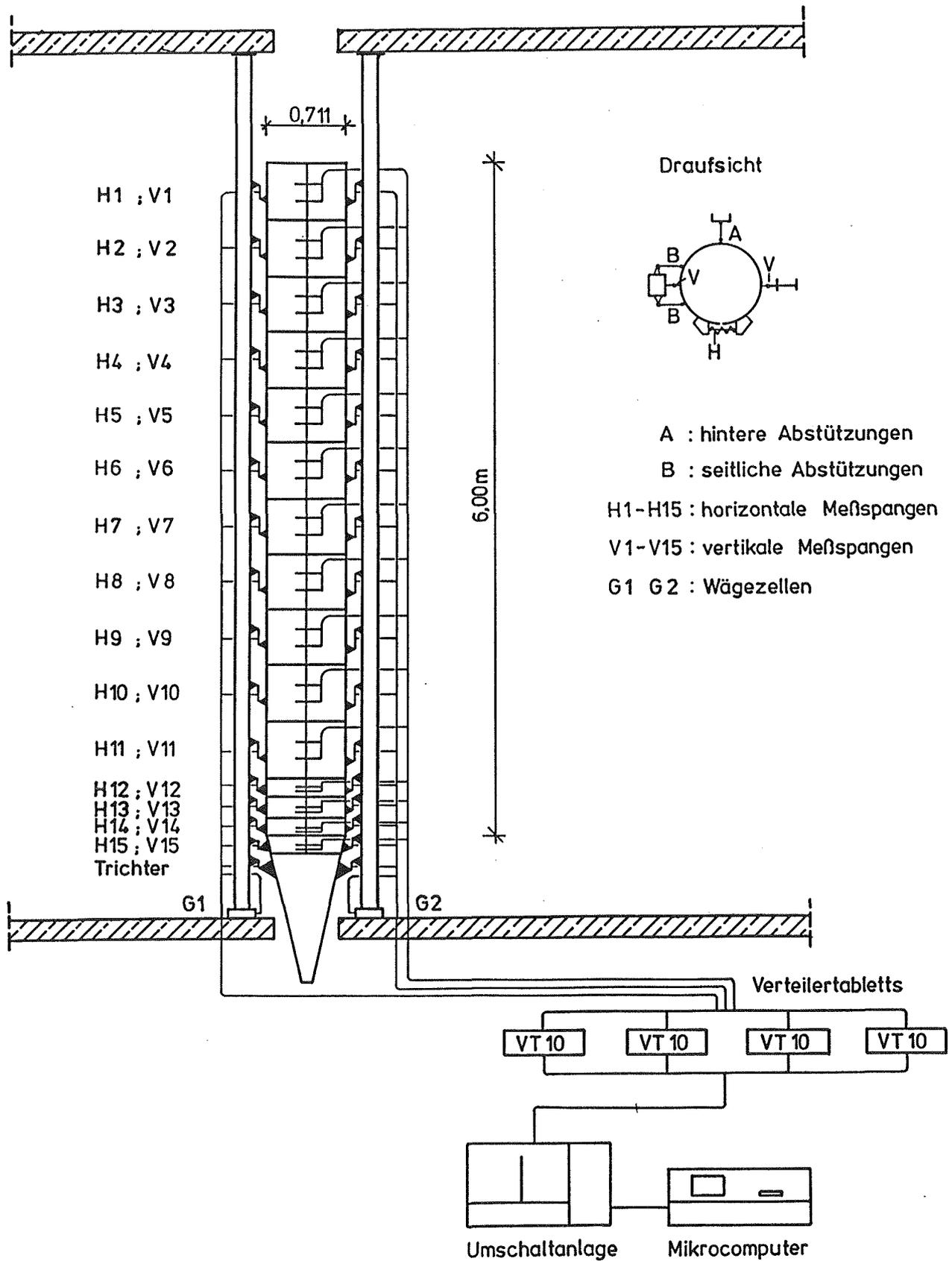


Abb. 2: Schematische Darstellung der Meßeinrichtungen

Für die niedrigen Siloringe ist das Konstruktionsprinzip des Meßsilos beibehalten. Die Ringelemente sind aus einem Blech rundgewalzt. Damit an der Vertikalfuge das Moment aus den Wandreibungsdrücken aufgenommen werden kann, sind je Ringelement zwei Horizontalmeßspangen in einem vertikalen Abstand von 0,10 m angeordnet. Zur Sicherheit ist der Abstand von den hohen Ringen übernommen, und die Meßspangen sind mit einer steiferen Schraubenfeder vorgespannt. In Unkenntnis der von den Meßspangen aufzunehmenden Kräfte sind die gleichen Querschnitte wie bei den hohen Ringen verwendet. Die je Ring zusammengehörenden Horizontal- und Vertikalmeßspangen sind mit jeweils zwei "passiven" DMS zur Wheatstone'schen Vollbrücke geschaltet. Somit besteht die Möglichkeit, im Siloschaft-Ansatz die auf die Silowand einwirkenden Schüttgutdrücke über eine Höhe von 0,167 m entsprechend  $0,24 \cdot d$  integriert zu messen.

Von früheren Untersuchungen war bereits ein konischer Trichter mit  $70^\circ$  Neigung vorhanden. Der Trichter ist aus einem kaltgewalzten VA-Blech (Nr. 14301) hergestellt. Die Wandstärke beträgt 2 mm. Die Auslauföffnung hat einen Durchmesser von 100 mm. Daß der Trichter damit eine geringere Wandrauigkeit hat als der Siloschaft, dürfte bei sehr vielen Silos der Wirklichkeit entsprechen. An Stahlbetonsilos werden oft Stahltrichter angehängt.

Damit weiterhin die gesamte Vertikalkraft gemessen werden kann, ist der Trichter über zwei Vertikalmeßspangen an den Stützen aufgehängt. Er mußte dazu etwas umgebaut werden. Zum Ausgleich der Herstellungstoleranzen zwischen Siloring und Trichter umfaßt der Trichter etwas den untersten Siloring. Der Knickwinkel zwischen Siloschaft und Trichter ist durch 0,3 mm dicke eingeklebte Leitbleche hergestellt, die unterschiedliche Längen haben. Die Ausführung der Übergänge ist in den Detailzeichnungen in Abbildung 1 dargestellt (s. Detail B).

Um für alle drei Trichter gleiche Oberflächen und damit gleiche Wandreibungen zu erhalten, sind die neu hergestellten Trichter ebenfalls aus VA gefertigt. Der flache Trichter mit einem Neigungswinkel von  $62,5^\circ$  ist wie der  $70^\circ$ -Trichter konstruiert (s. Trichter C). Die Wandstärke beträgt 3 mm. Bei Vorversuchen ergaben sich horizontale Verformungen des oberen Trichterrandes von ca. 2 mm. Der Rand ist deshalb durch einen außen aufgeschweißten Flachstahlring verstärkt. Bei dem  $70^\circ$ -Trichter waren keine Verformungen festzustellen.

Nach den Voruntersuchungen ist beim steilen Trichter mit einer Neigung von  $77,5^\circ$  für die ausgewählten Schüttgüter Massenfluß zu erwarten. Der Trichter ist daher zweiteilig ausgeführt, so daß die Schüttgutdrücke im Trichteransatz gemessen werden können.

Das obere Trichterelement ist analog der niedrigen Siloringe konstruiert. Die Höhe beträgt ebenfalls 0,167 m einschließlich Fuge. Zur Begrenzung der Verformungen ist die Trichterwand gleichfalls 10 mm dick. Hierfür mußte warmgewalztes Blechmaterial verwendet werden. Mit der Walzhaut ist die Oberfläche augenscheinlich etwas rauher als das kaltgewalzte Material. Für die Wandscherversuche wurde einheitlich das Material mit der Walzhaut verwendet.

Ein direktes Erfassen der Drücke auf die Trichterwand  $p_n$  und  $p_w$  ist mit den beschriebenen Meßeinrichtungen nicht möglich. Die Meßspangen sind daher so angeordnet, daß die Horizontal- und Vertikalkomponenten der auf die Trichterwand einwirkenden Drücke integriert gemessen werden. Aus einer Gleichgewichtsbetrachtung an der Trichterwand können die Normal- und Wandreibungsdrücke aus den Komponenten errechnet werden.

Der Übergang zwischen Siloschaft und Trichter ist analog der Fugen im Siloschaft ausgeführt (siehe Detail A). Durch Verwendung von Schablonen passen die Meßringe 14 und 15 genau übereinander. Fertigungstechnisch bedingt, muß die Wandstärke für das Trichterunterteil wesentlich geringer sein als 10 mm. Das Unterteil ist daher wie der flache Trichter aus 3 mm dickem VA-Blech gefertigt. Die Innenkan-

ten des Ober- und Unterteils passen ebenfalls genau übereinander. Die Horizontalfugen sind durch einseitig aufgeklebte Bleche überdeckt.

Die im Ausbau mit dem steilen Trichter vorhandenen Meßeinrichtungen sind schematisch in Abbildung 2 dargestellt. Mit den 15 Horizontal- und Vertikalmeßstellen, der Vertikalmeßstelle für den Trichter und den beiden Wägezellen sind insgesamt 33 Meßstellen vorhanden. Bei den Siloausläufen B, C und D entfallen  $H_{15}$  und  $V_{15}$ .

Die in den Meßsilo eingebauten Kraftaufnehmer werden mit einer automatischen Umschaltanlage abgefragt. Mit der Anlage können maximal 15 Messungen pro Sekunde erfolgen. Die Meßwerte werden über einen Mikrocomputer auf Magnetband übertragen, so daß sie für die weitere Auswertung auf einem Datenträger zur Verfügung stehen.

### 3.2 Kalibrierung und Umrechnungsfaktoren

Bei der Kalibrierung der selbst hergestellten Kraftaufnehmer wurde wie bei SCHÜTZ (1982, S. 34) vorgegangen. Die aneinandergehängten "aktiven" Meßspangen wurden an die Umschaltanlage angeschlossen und mit geeichten Gewichten belastet. Dabei konnte der in Abbildung 3 dargestellte lineare Zusammenhang zwischen der Zugkraft und dem digitalisierten Meßwert festgestellt werden. Die maximale Abweichung von der Ausgleichsgeraden betrug  $\pm 1 \%$ .

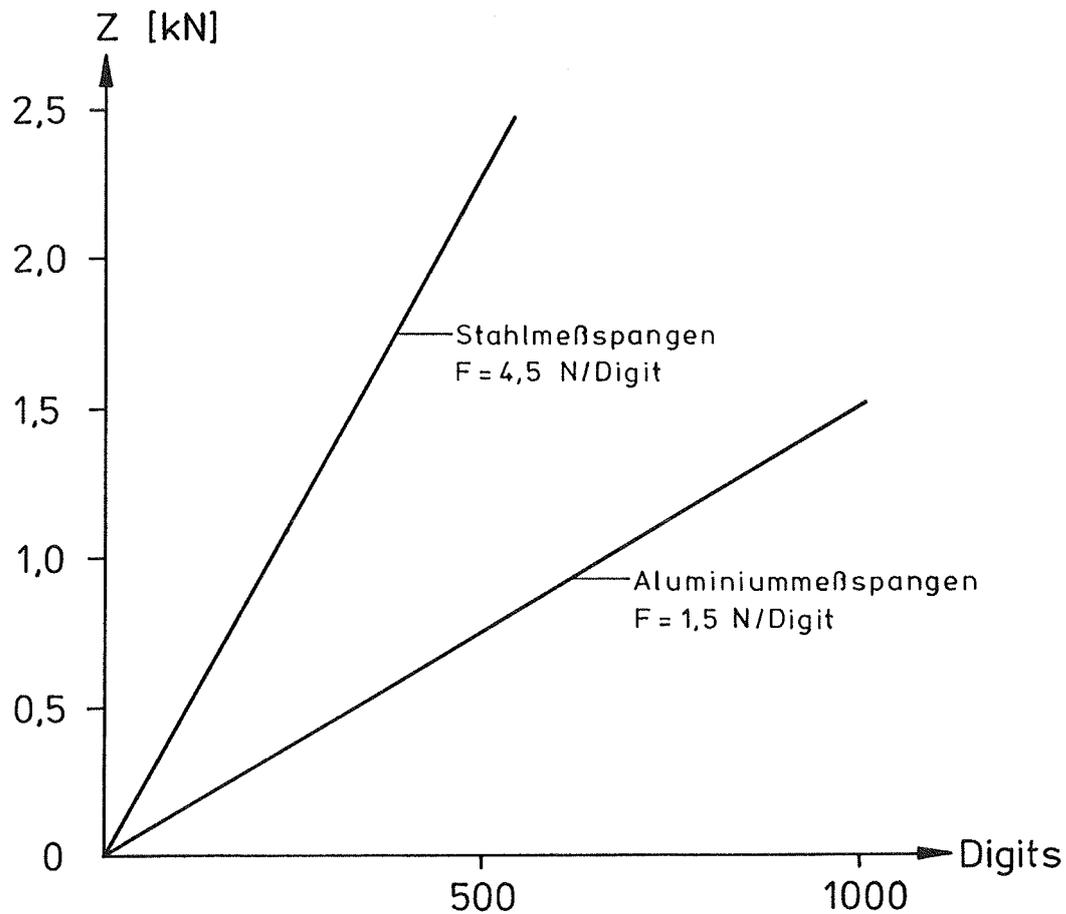


Abb.3: Kalibrierdiagramm d. Kraftaufnehmer

Aus den Ausgleichsgeraden lassen sich folgende Kalibrierwerte herleiten:

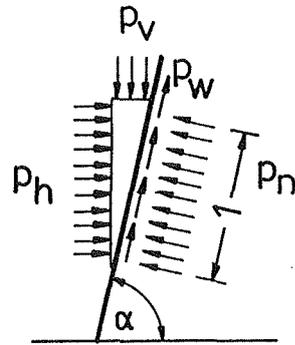
Stahlmeßspangen	$F_{Fe} = 4,50 \text{ N/Digit}$
Aluminiummeßspangen	$F_{Al} = 1,50 \text{ N/Digit}$

Das Verhältnis von 3:1 ist durch die Elastizitätsmodule von Stahl und Aluminium begründet, wenn sich geringe Unterschiede in den Kabellängen nicht auswirken.

Der rechnerische Zusammenhang zwischen Zugkraft in den Meßspangen und den Drücken auf die Silowand ist an gleicher Stelle ausführlich beschrieben. Mit den ermittelten Kalibrierwerten ergeben sich für die Meßhorizonte 12, 13 und 14 die in Tabelle 3 angegebenen Umrechnungsfaktoren. Die Werte für die hohen Siloringe sind von SCHÜTZ (1982) übernommen und nur auf die Meßempfindlichkeit der neuen Umschaltanlage umgerechnet.

Ausgehend von den Kräften an der Trichterwand gemäß Abbildung 4, können die Drücke im Trichter mit den Beziehungen

$$\begin{aligned} P_n &= P_h \cdot \sin^2 \alpha + P_v \cdot \cos^2 \alpha \\ P_w &= (P_v - P_h) \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \end{aligned}$$



errechnet werden.

Abb. 4

Mit der in Abbildung 5 dargestellten Geometrie des Trichteroberteils kann der auf die Grundrißfläche bezogene mittlere Vertikaldruck  $p_v$  folgendermaßen bestimmt werden:

$$\begin{aligned} P_v &= \frac{2 \cdot F_{Fe} \cdot 4}{\pi (d_o^2 - d_u^2)} \\ &= 0,117 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2 \cdot \text{Digit}} \end{aligned}$$

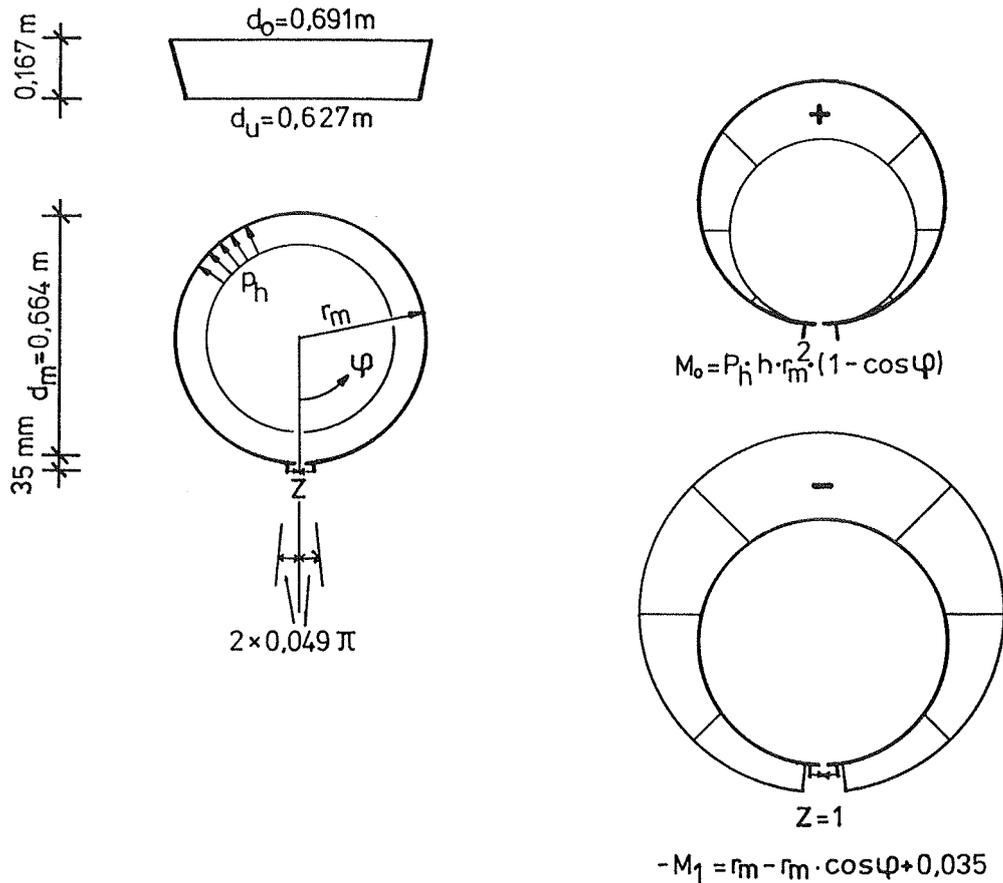


Abb. 5: Geometrie des Trichteroberteils mit Last- u. Einheitsmomenten

Der mittlere auf die Aufrißfläche bezogene Horizontaldruck  $p_h$  kann nach dem Kraftgrößenverfahren ermittelt werden. Ausgehend vom mittleren Radius  $r_m$  des konischen Trichteroberteils, ergibt sich:

$$Z = 2 \cdot F_{A1} = - \frac{\int M_o M_1}{\int M_1^2} r \cdot d\varphi$$

$$= \frac{0,049\pi \int_{1,951\pi} P_h \cdot h \cdot r_m^2 (1 - \cos\varphi) (r_m - r_m \cdot \cos\varphi + 0,035) r_m \cdot d\varphi}{1,951\pi \int_{0,049\pi} (r_m - r_m \cdot \cos\varphi + 0,035)^2 r_m \cdot d\varphi}$$

Mit  $r_m = 0,332\text{ m}$  folgt

$$P_h = \frac{2 \cdot F_{A1}}{0,3097 \cdot h} = 0,058 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2 \text{ Digit}}$$

Werden die Werte für  $p_h$  und  $p_v$  in die Beziehungen für  $p_n$  und  $p_w$  eingesetzt, so ergeben sich die in Tabelle 3 angegebenen Gleichungen.

		glatte Silowand	rauhe Silowand
Siloringe h=0,500 m	$p_w \left[ \frac{\text{kN/m}^2}{\text{Digit}} \right]$	$\frac{1}{123}$	$\frac{1}{125}$
	$p_h \left[ \frac{\text{kN/m}^2}{\text{Digit}} \right]$	$\frac{1}{54,4}$	$\frac{1}{51,7}$
Siloringe h=0,167 m	$p_w \left[ \frac{\text{kN/m}^2}{\text{Digit}} \right]$	$\frac{1}{40,2}$	$\frac{1}{40,9}$
	$p_h \left[ \frac{\text{kN/m}^2}{\text{Digit}} \right]$	$\frac{1}{18,1}$	$\frac{1}{17,2}$
Trichteransatz (15)	$p_w \left[ \frac{\text{kN/m}^2}{\text{Digit}} \right]$	$\frac{1}{40,6} \cdot V_{15} - \frac{1}{81,4} \cdot H_{15}$	—
	$p_h \left[ \frac{\text{kN/m}^2}{\text{Digit}} \right]$	$\frac{1}{18} \cdot H_{15} + \frac{1}{183,2} \cdot V_{15}$	—
	$p_b \left[ \frac{\text{kN/m}^2}{\text{Digit}} \right]$	$\frac{1}{42,5}$	$\frac{1}{39,6}$
	$G \left[ \frac{\text{kN}}{\text{Digit}} \right]$	$\frac{1}{80}$	$\frac{1}{80}$

Tab. 3 : Umrechnungsfaktoren

Bei einem weiteren Kalibrierversuch wurde der rechnerische Zusammenhang zwischen digitalisiertem Meßwert und Horizontaldruck auf die Silowand überprüft. Dazu wurde eine Dichtungshaut aus verschweißter PVC-Folie in den Meßsilo eingebaut (s. Abbildung 6). Somit war es möglich, den steilen Trichter und den Siloschaft 2 m hoch mit Wasser zu füllen. Bei bekanntem Füllstand ist ein direkter Vergleich zwischen rechnerischem und gemessenem Horizontaldruck möglich.

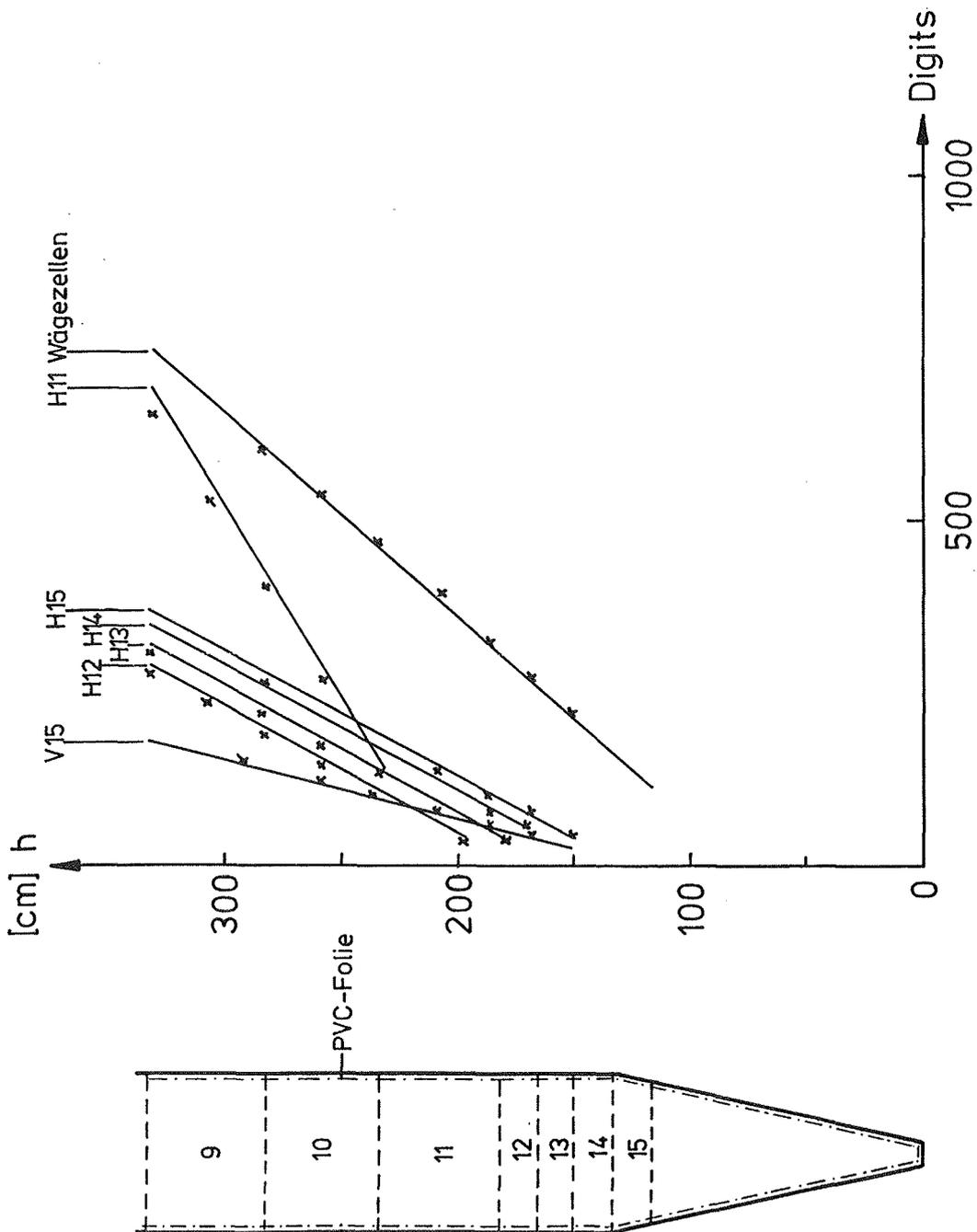


Abb.6: Abweichung der gemessenen von den rechnerischen Werten

Die Versuchsauswertung ist in Abbildung 6 dargestellt. Die maximale Abweichung der gemessenen Drücke von den rechnerischen beträgt  $\pm 5\%$ . Da in der statistischen Auswertung der Meßwerte von den 95 %-Fraktilen ausgegangen wird, liegen die Meßungenauigkeiten noch innerhalb des Sicherheitsniveaus von 95 %.

Bei niedrigen Füllhöhen sind die Meßwerte in der Regel größer als die rechnerischen Werte. Möglichkeiten für die Differenzen können durch Abweichungen der Silogeometrie von den Sollmaßen und in der Meßungenauigkeit der Füllhöhe entstehen. Bei großen Füllhöhen liegen die gemessenen Werte meist niedriger als die rechnerischen Werte. Hier könnte sich eine Dehnungsbehinderung durch das Gewebiband auswirken, mit dem die Fugen der Siloringe außen abgeklebt sind.

In dem bei den Siloversuchen vorkommenden Meßbereich von 150-600 Digits bei den hohen Siloringen und 50-250 Digits bei den niedrigen Siloringen sind die Abweichungen geringer.

#### 4. Meßsiloversuche

##### 4.1 Versuchsprogramm

Bei den Versuchen mit ebenem Boden (s. SCHNEIDER 1985, Abschnitt 3.2) hatte sich gezeigt, daß beim Umlauf höhere Drücke gemessen werden als beim Entleeren. Die Untersuchungen mit den Trichtern wurden daher mit den gleichen Versuchsvarianten durchgeführt wie beim ebenen Boden:

- |                        |                                 |
|------------------------|---------------------------------|
| 1. Betriebsbedingungen | Füllen<br>Umlauf<br>Entleeren   |
| 2. Wandoberflächen     |                                 |
| im Siloschaft          | glatt (walzrauh)<br>extrem rauh |
| im Trichter            | glatt                           |
| 3. Trichterneigungen   | 62,5°, 70° und 77,5°            |

Eine Übersicht über die durchgeführten Versuche gibt Tabelle 4.

Das Versuchsprogramm umfaßte damit für die Schüttgüter *S o - j a b o h n e n*, *T i t a n e r z* und *N a t u r s a n d* je eine Versuchsserie mit glatter und rauher Wand im Siloschaft für jede Trichterneigung mit mindestens fünf Einzelversuchen. Zur Kontrolle wurden bei jeder Versuchsserie noch zwei Versuche in der Betriebsart Füllen-Entleeren durchgeführt. Somit ergaben sich ca. 50 Einzelversuche für jedes Schüttgut.

Während der Versuche mit dem *K o k s* machte sich eine starke Veränderung des Schüttgutes bemerkbar. Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse der ersten beiden Meßserien mit dem 70°-Trichter sind ebenfalls starke Veränderungen zu erkennen (s. Anlage 14). Durch die große Ungleichförmig-

keit der Kornverteilung war bei den weiteren Siloversuchen eine Entmischung zu befürchten, die sich auch auf die Meßergebnisse auswirken konnte. Für die noch durchzuführenden Versuche war damit eine starke Veränderung der Meßergebnisse zu erwarten, so daß auf weitere Versuche mit dem Koks verzichtet wurde.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens waren Untersuchungen mit drei Schüttgütern vorgesehen. Für das vollständige Versuchsprogramm wurden S o j a b o h n e n, T i t a n e r z und N a t u r s a n d verwendet.

#### 4.2 Auswertung der Meßdaten

Die vom Mikrocomputer auf Magnetband aufgezeichneten Meßdaten wurden für die Auswertung zunächst auf Tabellierpapier ausgedruckt. Mit einem Programm konnten dann vom Magnetband die zu jeder Meßstelle gehörenden Maximalwerte ermittelt werden. Über die in Tabelle 3 angegebenen Umrechnungsfaktoren wurden aus den digitalisierten Meßwerten die maximalen Drücke berechnet. Mit den so gefundenen Maximalwerten erfolgte eine statistische Auswertung. Es wurden

der arithmetische Mittelwert  $\bar{x}$   
die Standardabweichung  $s$   
und der Variationskoeffizient  $V$

berechnet.

Die Variationskoeffizienten der Horizontal- und Wandreibungsdrücke haben die gleiche Größenordnung wie beim ebenen Boden. Sie liegen in einem Bereich von 0,006 bis 0,18. Für die Festlegung von Grenzwerten sind daher ebenfalls die 95 %-Fraktilen maßgebend.

Vers.Nr.	Schüttgut	Betriebsform		Trichterneigung			Silo- wand
		F/U/E	F/E	62,5°	70,0°	77,5°	
1,2 3-8 44-48,50 49,51	Sojabohnen		x		x		glatt glatt rauh rauh
1,8 2-7 34,38 35-37 39-41			x	x			rauh rauh glatt glatt glatt
17-19 20,24 21-23 25-27 28,29 30-32		x	x			x	glatt glatt glatt rauh rauh rauh
23 24-28 83-86 29-33 34	Titanerz		x		x		glatt glatt glatt rauh rauh
9,10 11,16 12-15 42,46 43-45 47-49		x	x	x			rauh rauh rauh glatt glatt glatt
1,5 2-4 6-8 41,45 42-44 46-48			x			x	glatt glatt glatt rauh rauh rauh

Tab .4 : Versuchsprogramm

Vers.Nr.	Schüttgut	Betriebsform		Trichterneigung			Silo- wand
		F/U/E	F/E	62,5°	70,0°	77,5°	
67,71	Natursand		x		x		rauh
68-70		x			x		rauh
72-74		x			x		rauh
75,79			x		x		glatt
76-78		x			x		glatt
80-82		x			x		glatt
87,90,93				x		x	glatt
88,89		x				x	glatt
91,92		x				x	glatt
17,21			x	x			rauh
18-20	x			x			rauh
22-24	x			x			rauh
25,29			x	x			glatt
26-28	x			x			glatt
30-32	x			x			glatt
9,13			x			x	glatt
10-12	x					x	glatt
14-16	x					x	glatt
33-35	x					x	rauh
36,40			x			x	rauh
37-39	x					x	rauh
17-21	Koks	x			x		glatt
22			x		x		glatt
35-39,41		x			x		rauh
40,42,43			x		x		rauh

Tab.4 : Versuchsprogramm

Verhältnismäßig große Streuungen ergaben sich beim K o k s. Die schon erwähnten Veränderungen der Schüttguteigenschaften innerhalb der Versuchsserien wirkten sich auch hierin aus.

Bei den Schüttgütern T i t a n e r z und N a t u r s a n d ergaben sich keine merkbaren Veränderungen während der Siloversuche. An ca. 50 reproduzierbaren Einzelversuchen konnte eine Normalverteilung der Meßwerte nachgewiesen werden. Zu gleichen Ergebnissen kommt NOTHDURFT (1976) für einen ähnlich aufgebauten rechteckigen Meßsilo.

Auf eine Untersuchung der Grundgesamtheit für jedes Schüttgut muß in der Regel verzichtet werden. Da sich die Schüttgüter jedoch während der 10 bis 15 Einzelversuche für zwei Versuchsserien nur unwesentlich verändern, ist die Annahme einer Normalverteilung auch für andere Schüttgüter hinreichend genau.

#### 4.3 Beobachtungen während der Versuchsdurchführung

Die ausgewählten Schüttgüter hatten bei den bereits durchgeführten Versuchen mit ebenem Boden mit den im "Braunschweiger Siloversuchsstand" zur Verfügung stehenden Fördereinrichtungen ein unproblematisches Fließverhalten gezeigt.

Beim Füllen des Meßsilos wurde der Auslaufmassenstrom aus den Vorratsbunkern generell so geregelt, daß der Meßsilo in ca. sechs Minuten gefüllt war. Das entspricht einer Füllgeschwindigkeit von ca. 1 m/min oder einem Massenstrom von ca. 5 bis 16 kg/s. Während des Füllens wurden alle 30 Sekunden alle Meßstellen abgefragt.

Für den Umlaufbetrieb wurde einheitlich eine Dauer von 10 min gewählt. Das entsprach ca. der zweifachen durchschnittlichen Entleerungsdauer der Schüttgüter. Die Meßstellen wurden dabei alle 20 Sekunden abgefragt. Die Folgezeit der Meßzyklen war, bedingt durch die Datenübertragung auf das Magnetband, auf minimal ca. 20 s begrenzt.

Das Entleeren erfolgte je nach Schüttgut in 5 bis 6 min.

Die Folgezeit der Meßzyklen betrug ebenfalls 20 s. Eine Übersicht der mittleren Entleerungszeiten und Massenströme gibt Tabelle 5.

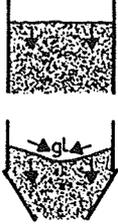
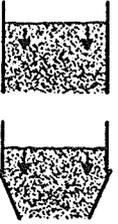
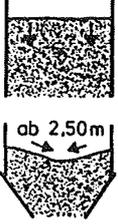
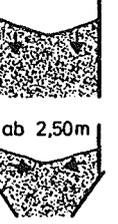
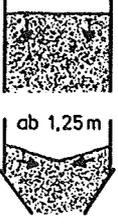
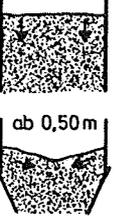
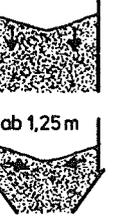
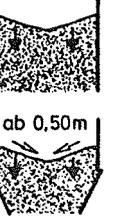
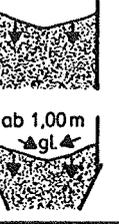
Im folgenden sollen augenscheinliche Veränderungen der Schüttgutkörner und das Verhalten im Meßsilo bei den unterschiedlichen Trichtern für die einzelnen Schüttgüter beschrieben werden.

Im Meßsilo kann während der Versuche die Schüttgutoberfläche beobachtet werden. Aus den Beobachtungen während des Umlaufs und des Entleerens können keine exakten Aussagen darüber gemacht werden, ob sich z.B. Massenfluß einstellt oder Kernfluß; für qualitative Vergleiche können sie jedoch herangezogen werden. Die wesentlichen Erkenntnisse aus der Beobachtung der Schüttgutoberfläche sind in Tabelle 6 dargestellt.

Bei allen Schüttgütern war bei glatter Silowand zunächst eine horizontale Oberfläche zu beobachten. Die Fließrichtung, in Tabelle 6 mit den Pfeilen angedeutet, war dabei überwiegend vertikal gerichtet. Im unteren Silobereich bildete sich meist eine flach geneigte Mulde aus, wobei unterschiedlich große Massenströme zur Mitte hin auftraten. Bei rauher Silowand bildete sich schon im oberen Siloschaft ein flach geneigter Trichter im Schüttgut aus, die Differenz zwischen Silorand und -mitte betrug ca. 10 bis 15 cm. Der wesentliche Massenstrom war vertikal gerichtet, nur vereinzelt rollte Schüttgut zur Mitte. Der Trichter wurde im unteren Silobereich meist flacher, wobei gleichzeitig der Massenstrom zur Silomitte größer wurde.

Schüttgut	Massenstrom beim Füllen	Entleerungsdauer [s]						Massenstrom beim Entleeren [kg/s]					
		Trichter 62,5°		Trichter 70°		Trichter 77,5°		Trichter 62,5°		Trichter 70°		Trichter 77,5°	
	[kg/s]	glatte W.	rauhe W.	glatte W.	rauhe W.	glatte W.	rauhe W.	glatte W.	rauhe W.	glatte W.	rauhe W.	glatte W.	rauhe W.
Sojabohnen	4,4 - 4,9	425	410	370	350	350	330	3,9	3,8	4,6	4,7	4,9	4,9
Titanerz	17,0 - 18,3	360	360	390	430	420	460	15,5	15,4	15,1	13,8	14,3	12,5
Natursand	9,1 - 11,1	340	330	325	315	310	290	10,2	10,1	11,0	10,4	11,8	11,0
Koks	5,1	—	—	460	420	—	—	—	—	4,6	4,7	—	—

Tab. 5: mittlere Massenströme im Meßsilo

Schüttgüter	glatte Silowand			rauhe Silowand		
	Trichter 62,5°	Trichter 70°	Trichter 77,5°	Trichter 62,5°	Trichter 70°	Trichter 77,5°
Sojabohnen						
Titanerz						
Natursand						
Koks						

Tab. 6 : Beobachtung der Schüttgutoberfläche beim Entleeren

Zusätzlich wurden mit Beginn der Versuche mit dem flachen und dem steilen Trichter die Schüttgutbewegungen an der Silowand mit einem dünnen Draht registriert. Dazu wurden, wie in Abbildung 7 dargestellt, in den Viertelspunkten des Umfanges in Silo- und Trichterwand Löcher mit 6 mm Durchmesser gebohrt. Mit einem Schweißdraht von 3 mm Durchmesser können die Schüttgutbewegungen registriert werden. Wird der Schweißdraht in kurzer Zeit verdreht, so treten Schüttgutbewegungen an der Silowand auf. In dem Fall liegt Massenfluß vor.

Für schnelle Schüttgutbewegungen wurde eine Zeit von ca. einer Sekunde für die Verdrehung gestoppt. Bei der Verdrehung kann man von einem Verschiebungsweg von ca. 15 mm ausgehen. Dieser Wert entspricht ungefähr der Strecke, die das Schüttgut in einer Sekunde beim Entleeren zurücklegt. Dauert die Verdrehung wesentlich länger als eine Sekunde, so ist das ein Hinweis für Kernfluß.

Bei der glatten Silowand waren mit dem Draht bei Massenfluß ab 5 bis 10 mm Tiefe im Schüttgut Bewegungen zu spüren. Ab ca. 20 mm wurde der Draht vom Gut verdreht. Bedingt durch die Einbauten bei rauher Wand, mußte der Draht weiter in den Meßsilo eingeführt werden.

### Sojabohnen

Mit zunehmender Versuchsanzahl war eine augenscheinliche Erhöhung des Bruchkornanteils festzustellen. Diese Veränderung der Korngrößenverteilung wirkte sich geringfügig in den Schüttgutdrücken aus (s. Anlagen 1 b. 4).

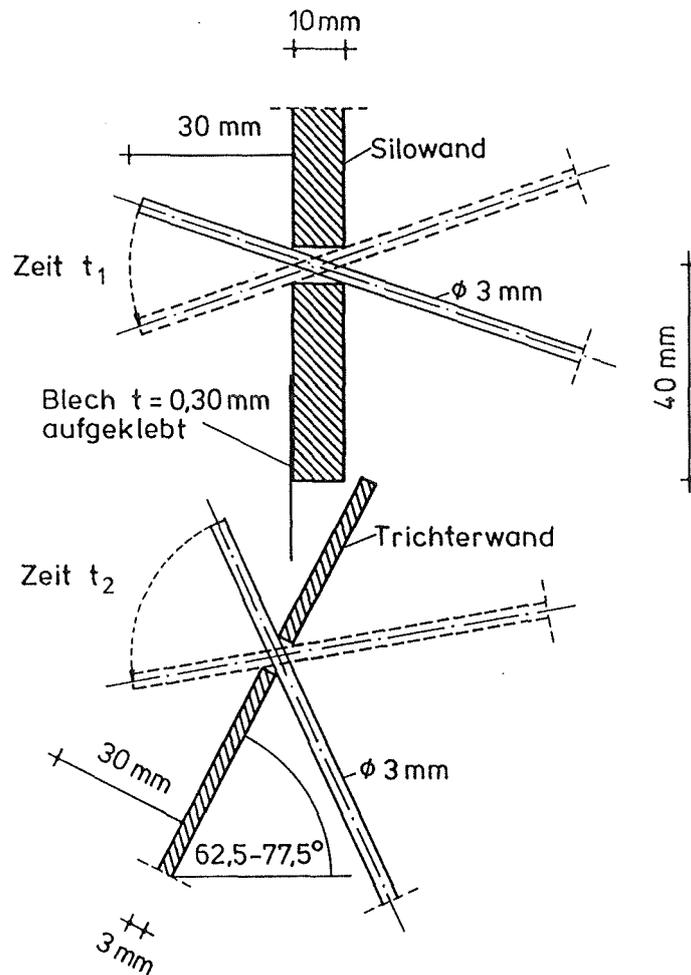


Abb. 7 : Beobachtung des Fließverhaltens  
an der Silo- und Trichterwand

Die Auflockerung beim Umlauf, rauhe Wand, vergrößerte sich gegenüber den Messungen bei ebenem Boden von 3,5 auf 9 Vol. % bei allen drei Trichtern. Bei der glatten Wand betrug die Auflockerung noch 2,5 Vol. %. Bei den Versuchen mit dem steilen Trichter, rauhe Wand, wurde deshalb konsequent der Siloschaft nur 5,50 m gefüllt.

Das "Schlagen" im Siloschaft blieb gegenüber den Messungen mit ebenem Boden unverändert.

Bei der Beobachtung der Schüttgutoberfläche konnte bei allen drei Trichtern im oberen Siloschaft die gleiche Form beobachtet werden. Nur beim flachen Trichter änderte sich die Form in der Nähe des Trichters. Hier waren der Massenstrom in vertikaler Richtung und zur Mitte annähernd gleich groß.

Die Verdrehung des Drahtes erfolgte im Siloschaft in einer Sekunde und im Trichter in zwei Sekunden. Nach dem Füllen dauerte es ca. 12 Sekunden nach Öffnen der Klappe am Trichter, bis an der Oberfläche eine Bewegung des Gutes zu bemerken war. Beim flachen Trichter und rauher Silowand dauerte es ca. zwei Minuten, bis auch an der Silowand Schüttgutbewegungen zu registrieren waren. Die Verdrehung des Drahtes dauerte hier deutlich länger als bei glatter Silowand.

#### Titanerz

Beim Titanerz waren keine Veränderungen des Schüttgutes festzustellen. Die Fülldrücke sind daher für die Versuche mit ebenem Boden und den drei Trichtern nahezu identisch (s. Anlagen 5 b. 8).

Waren bei den Versuchen mit ebenem Boden keine Volumenveränderungen festzustellen, so ergaben sich mit den Trichtern unterschiedliche Veränderungen. Bei den Untersuchungen mit dem mittleren und dem steilen Trichter waren die Volumenveränderungen ungefähr gleich. Bei glatter Wand ergab sich eine Verdichtung von ca. 3,5 Vol.% und bei rauher Wand von ca. 6,5 Vol.%. Beim flachen Trichter war die Verdichtung geringer, bei rauher Wand ca. 3,5 Vol.%. Bei glatter Wand war das Volumen unverändert.

Das Titanerz verursachte mit den Trichtern ebenfalls eine starke dynamische Beanspruchung. Die Frequenzen der Schwingungen waren etwas größer als bei ebenem Boden, sie betragen ca. 20 bis 40 Herz. Die Intensität des "Vibriierens" war bei rauher Wand größer als bei glatter Wand.

Bei den Untersuchungen mit dem flachen Trichter erfolgte ab 2,50 m Füllhöhe im Siloschaft bei beiden Wandrauhigkeiten ein Schüttgutfluß nur noch zur Silomitte. Diese Beobachtung stimmt mit den Beobachtungen bei ebenem Boden überein. Beim mittleren Trichter waren im unteren Silobereich gleichgroße Massenströme in vertikaler Richtung und zur Silomitte zu beobachten. Beim steilen Trichter waren die Schüttgutbewegungen zur Silomitte geringer. Bei glatter Silowand war die Ausbildung eines "Loches" zu beobachten (vgl. Tabelle 6).

Die Verdrehung des Drahtes, gemäß Abbildung 7, erfolgte ab 70° Trichterneigung wie bei den Sojabohnen in ein bis zwei Sekunden. Beim flachen Trichter hingegen konnte an der Silo- und Trichterwand nur eine langsame Absetzbewegung registriert werden. Für die gleiche Verdrehung wurden in der Silowand 15 Sekunden und im Trichter 30 Sekunden gemessen. Ähnlich wie bei den Sojabohnen dauerte es ca. drei Minuten, bis bei rauher Silowand Schüttgutbewegungen an der Wand zu spüren waren.

#### Natursand

Während der Versuchsdauer konnten augenscheinliche Veränderungen der Guteigenschaften nicht bemerkt werden. Bei den Fülldrücken sind jedoch geringe Veränderungen festzustellen (s. Anlagen 9 bis 12).

Bei den Untersuchungen mit rauher Silowand ergaben sich wie bei ebenem Boden nur geringe Veränderungen des Volumens beim Umlauf. Bei glatter Wand war die Verdichtung mit ca. 2 Vol.% etwas größer.

Die dynamischen Beanspruchungen blieben im wesentlichen unverändert. Nur bei den Messungen mit dem steilen Trichter ergab sich bei glatter Silowand ein stärkeres "Vibriieren" mit ca. 20 Herz. Die Intensität war ebenfalls deutlich größer.

Bei den Schüttgutoberflächen konnten ähnliche Beobachtungen wie beim Titanerz gemacht werden. Reiner Kernfluß erfolgte hier beim flachen Trichter ab 1,25 m Füllhöhe im Siloschaft. Beim steilen Trichter konnte im unteren Silobereich ebenfalls die Ausbildung eines "Loches" beobachtet werden, dabei war ein überwiegender Massenstrom in vertikaler Richtung zu erkennen.

Beim Natursand konnte beim Trichter mit 70° Neigung und glatter Silowand sehr deutlich beobachtet werden, wie mit abnehmender Füllhöhe im Siloschaft beim Entleeren plötzlich Kernfluß auftrat. Das konnte hier bei 0,5 m Füllhöhe beobachtet werden. Mit dem Draht konnten dann auch keine Fließbewegungen mehr festgestellt werden, obwohl vorher solche am Silo- und Trichterrand auftraten. Diese Erscheinung konnte gelegentlich auch bei anderen Versuchen beobachtet werden.

In der Regel erfolgte die Verdrehung des Drahtes in ein bis zwei Sekunden. Nur beim flachen Trichter und rauher Silowand dauerte die Verdrehung wesentlich länger.

### Koks

Mit zunehmender Versuchsanzahl machte sich eine augenscheinliche Veränderung der Guteigenschaften bemerkbar, die sich auch bei den Horizontaldrücken (s. Anlagen 13 u. 14) auswirkte.

Die Volumenveränderung beim Umlaufbetrieb blieb gegenüber den Messungen mit ebenem Boden unverändert. Im Meßsilo konnte beim Koks eine stärkere Entmischung beobachtet werden. An der Silowand war oft grobkörniges Material vorhanden. Gelegentlich war auch eine Schichtung des feinen und groben Materials zu beobachten.

Der Koks verursachte bei den Versuchen mit dem 70°-Trichter wie beim ebenen Boden ein "Schlagen" von zwei bis drei Schlägen pro Sekunde.

#### 4.4 Versuchsergebnisse

Die 95 %-Fraktilwerte der gemessenen Horizontaldrücke beim Füllen, beim Umlauf und beim anschließenden Entleeren sind in den Anlagen zeichnerisch dargestellt. In den Anlagen 1 bis 14 sind die H o r i z o n t a l d r ü c k e im S i l o s c h a f t und in den Anlage 15 bis 24 die H o r i z o n t a l d r ü c k e im u n t e r e n S i l o b e r e i c h aufgetragen.

Auf die Darstellung der gemessenen Wandreibungsdrücke wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da sich hier keine neuen Erkenntnisse ergeben haben. Im wesentlichen stimmen die Wandreibungsdrücke bei den Untersuchungen mit den Trichtern mit den Drücken bei ebenem Boden überein. Bei einigen Versuchsserien ergibt sich bei den Meßhorizonten 12 bis 14 ein Anstieg der Wandreibungsdrücke beim Füllen auf  $1,7 \cdot \max p_{wf}$  nach dem Normentwurf.

##### 4.4.1 Horizontaldrücke im Siloschaft

Den Darstellungen der Horizontaldrücke bei den Untersuchungen mit den Trichtern sind zum Vergleich die Drücke bei den Untersuchungen mit ebenem Boden vorangestellt. In die grafischen Darstellungen der Drücke bei den Trichtern sind die rechnerischen Horizontaldruckverläufe bei ebenem Boden eingezeichnet. Die Parameter  $\gamma$ ,  $\mu$  und  $\lambda$  für die rechnerischen Druckverläufe nach JANSSEN (1895)

$$P_{hf}(z) = \frac{\gamma \cdot A}{\mu \cdot u} \cdot \phi(z)$$

mit  $\phi(z) = (1 - e^{-z/z_0})$  und  $z_0 = \frac{A}{u \cdot \lambda \cdot \mu}$

wurden aus der Angleichung der gemessenen Horizontaldrücke festgelegt (vgl. SCHNEIDER 1985, Absch. 3.6). Damit sind Veränderungen der Drücke bei den Trichtern gegenüber den Messungen bei ebenem Boden in den grafischen Darstellungen direkt zu erkennen.

### Sojabohnen

Die Ergebnisse der Untersuchungen mit den Sojabohnen sind in den Anlagen 1 bis 4 dargestellt. Es ist zu erkennen, daß die Fülldrücke und Umlauf-Entleerungsdrücke bei rauher und glatter Silowand von den rechnerischen Verläufen bei ebenem Boden abweichen.

Die neuen gemessenen Fülldrücke können jedoch auch recht gut durch eine Exponentialfunktion erfaßt werden. Diese ist in die Darstellungen strich-punktiert eingezeichnet. Die neuen Füllkurven sind ermittelt, indem die Verläufe bei ebenem Boden mit einem konstanten Faktor multipliziert wurden. Die neuen Umlauf-Entleerungskurven sind aus den neuen Füllkurven mit dem Faktor  $e_h$  bei ebenem Boden ermittelt. Sie sind ebenfalls strich-punktiert eingezeichnet.

Es ist zu erkennen, daß trotz veränderter Fülldrücke die Laststeigerung beim Umlauf-Entleeren konstant geblieben ist. Somit kann die Laststeigerung für den "Switch", ausgehend von den gemessenen Fülldrücken, auf die für den Normentwurf vorgeschlagenen Fülldrücke bei ebenem Boden übertragen werden.

Die Veränderung der Fülldrücke kann durch die im Abschnitt 4.3 beschriebenen Veränderungen der Schüttguteigenschaften begründet werden.

Bei glatter Silowand ist bei allen Trichtern eine ausgeprägte Lastspitze beim Meßhorizont 12 zu erkennen. Sie hat in allen Fällen nahezu den gleichen Maximalwert. An dieser Stelle ist auch ein höherer Fülldruck gemessen worden. Es ist möglich, daß sich hier durch die Setzungen im Schüttgut bei ansteigender Auflast schon beim Füllen eine Änderung des Verformungszustandes ergibt, so daß hier erhöhte Schüttgutdrücke auftreten.

Bei den darüber liegenden Meßhorizonten ergeben sich bezüglich der Laststeigerung keine Änderungen im Vergleich zum ebenen Boden.

Bei der rauhen Silowand wirken sich die Schwankungen in der Füllhöhe bei den oberen Meßwerten besonders stark aus. Es ergeben sich dadurch größere Streuungen der Einzelmeßwerte. Beim steilen Trichter liegen die Fraktilwerte günstiger, da hier auf eine konstante Füllhöhe von 5,50 m geachtet wurde. Der Verlauf der Meßwerte entspricht hier dem beim ebenen Boden, wo die oberen Werte auch etwas über der Füllkurve liegen.

Die Ausbildung einer Lastspitze ist in den Anlagen 2 bis 4 bei rauher Silowand an keiner Stelle zu erkennen.

Auffällig ist der Verlauf der Horizontaldrücke beim steilen Trichter. Hier deutet sich bereits beim Meßhorizont 8 der Übergang in einen anderen Verformungszustand an, so daß hier beim Füllen und Entleeren erhöhte Meßwerte auftreten.

#### Titanerz

Aus den Anlagen 5 bis 8 ist ersichtlich, daß die Horizontaldrücke beim Füllen und Umlauf-Entleeren sehr gut mit den rechnerischen Horizontaldruckverläufen bei ebenem Boden übereinstimmen. Selbst die extreme Lastspitze im oberen Silobereich bei rauher Wand ist bei allen drei Trichtern vorhan-

den. Die beobachtete größere Verdichtung des Schüttguts bei den Versuchen mit Trichter wirkt sich nicht auf die Schüttgutterdrücke aus.

Bei beiden Wandrauigkeiten ist beim Meßhorizont 12 beim steilen und beim mittleren Trichter eine Lastspitze zu erkennen. Die Maximalwerte sind zwar etwas unterschiedlich, in der Größenordnung passen sie jedoch zusammen. Wie bei den *S o j a b o h n e n* sind bei glatter Wand die Füllwerte beim Meßhorizont 12 schon etwas höher. Der Unterschied ist relativ recht gering, doch absolut in gleicher Größenordnung wie bei den *S o j a b o h n e n*.

Für die erhöhten Fülldrücke im untersten Meßhorizont beim flachen Trichter und den starken Abfall der Entleerungslast beim mittleren Trichter und glatter Wand gibt es keine plausible Erklärung. Eventuell sind die Werte durch die Übergangskonstruktion zwischen Siloschaft und Trichter bedingt oder durch ganz spezielle Formänderungen im Schüttgut.

Der beim steilen Trichter und rauher Silowand bei *S o j a b o h n e n* erkennbare Druckanstieg beim Meßhorizont 8 deutet sich in Anlage 8 ebenfalls an, er ist aber nicht sehr ausgeprägt.

#### Natursand

Die Horizontaldrücke für den Natursand sind in den Anlagen 9 bis 12 aufgetragen. Bei glatter Silowand liegen die Fülldrücke etwas über dem rechnerischen Verlauf bei ebenem Boden. Bei der rauhen Silowand dagegen sind die Fülldrücke im unteren Silobereich niedriger als bei ebenem Boden. Die Abweichungen sind mit maximal  $\pm 8\%$  vom rechnerischen Verlauf so gering, daß für die Laststeigung von den rechnerischen Füllkurven bei ebenem Boden ausgegangen werden kann.

Ab 70° Trichterneigung ist wieder beim Meßhorizont 12 eine Lastspitze zu erkennen. Die Drücke im oberen Siloschaft liegen zwar nicht wesentlich niedriger als bei ebenem Boden (s. Meßhorizont 9), an vielen Meßstellen sind jedoch nur geringe Unterschiede zwischen Füllwert und Umlauf-Entleerungswert zu erkennen.

Beim flachen Trichter sind die maximalen Horizontaldrücke beim untersten Meßhorizont 14 und beim Meßhorizont 12 annähernd gleich groß, so daß keine Lastspitze vorhanden ist. Möglicherweise hängt aber auch der Druckanstieg mit dem erhöhten Füllwert zusammen, der beim flachen Trichter auch schon beim T i t a n e r z aufgetreten ist.

Beim Meßhorizont 12 ist, wie bei den vorgenannten Schüttgütern, ein Anstieg der Füllwerte zu erkennen. In geringem Umfang könnte der Druckanstieg durch die Anhäufung von Horizontalfugen im unteren Silobereich und den Auswirkungen der Fertigungstoleranzen bedingt sein. Für die Laststeigerung beim "Switch" wird sicherheitshalber davon ausgegangen, daß der Anstieg der Fülldrücke beim Meßhorizont 12 nicht von der Bauart des Meßsilos abhängt.

Bei der rauhen Silowand sind keine Lastspitzen zu erkennen. Wie bei den S o j a b o h n e n ergibt sich beim steilen Trichter und rauher Silowand bereits beim Meßhorizont 8 eine Umlagerung im Schüttgut, so daß hier ein Druckanstieg auftritt.

#### Koks

Mit dem Koks wurden im Rahmen der Vorversuche nur Messungen mit dem 70°-Trichter durchgeführt. Die Meßwerte sind in Anlage 14 dargestellt. Dabei ist zu beachten, daß in Anlage 14 für die glatte Wand ein anderer Maßstab gewählt werden mußte.

Bei der rauhen Silowand stimmen die gemessenen Fülldrücke recht gut mit dem rechnerischen Verlauf bei ebenem Boden überein. Die Umlauf-Entleerungswerte sind bei den Meßhorizonten 7 bis 9 geringer als bei ebenem Boden. Dadurch liegt die Entleerungskurve etwas höher als die gemessenen Werte.

Bei der glatten Silowand dagegen liegen die gemessenen Fülldrücke über dem rechnerischen Verlauf. Die Lasterhöhung fällt etwas niedriger aus, so daß die gemessenen Umlauf-Entleerungsdrücke von der eingezeichneten rechnerischen Entleerungskurve abgedeckt werden. Für die Laststeigerung beim "Switch" wird einheitlich wie bei den *S o j a b o h n e n* von dem mit dem Trichter ermittelten Verlauf ausgegangen, der in Anlage 14 strich-punktiert eingezeichnet ist. Der Horizontaldruckverlauf bei ebenem Boden ist dazu mit einem konstanten Faktor multipliziert.

Es wird dabei vorausgesetzt, daß sich die Veränderungen der Schüttguteigenschaften nur auf die Fülldrücke auswirken und nicht auf die Laststeigerung beim "Switch".

Bei beiden Wandrauhigkeiten ist am unteren Siloschaft eine deutliche Lastspitze zu erkennen. Bei glatter Wand liegt sie wieder beim Meßhorizont 12. Bei rauher Wand haben die Werte bei den Meßhorizonten 12 und 13 die gleiche Größenordnung, bei H 13 ist jedoch die Streuung doppelt so groß wie bei H 12.

Beim Meßhorizont 14 ergibt sich wie beim *T i t a n e r z* ein großer Abfall der Entleerungsdrücke, der dort allerdings nur bei glatter Silowand auftritt.

Die Erhöhung der Fülldrücke bei der glatten Silowand kann durch die beobachteten Veränderungen der Schüttguteigenschaften erklärt werden. Durch Scherversuche konnte für den Feinanteil des Koks ( $\phi < 1 \text{ mm}$ ) eine wesentlich größere Wandreibung als für die größeren Korndurchmesser ermittelt

werden. Die innere Reibung war in beiden Fällen gleich. Das läßt bei der beobachteten Entmischung für das außen liegende gröbere Schüttgut bei glatter Silowand eine verminderte Wandreibung und damit höhere Fülldrücke erwarten. Zusätzlich wurde bei glatter Silowand eine Erhöhung der Wichte beim Füllen von 7,84 auf 8,47 kN/m<sup>3</sup> festgestellt.

#### 4.4.2 Horizontaldrücke im unteren Silobereich

In den Anlagen 15 bis 24 sind die Horizontaldrücke bis zu einer Siloschafthöhe von 2,0 m dargestellt. Neben der Höhenachse ist im gleichen Maßstab (1:25) der Meßsilo mit dem jeweiligen Trichter in die Darstellungen eingezeichnet. Die Maßstäbe für die Drücke sind für das jeweilige Schüttgut so gewählt, daß die Drücke im Trichteransatz noch dargestellt werden können. In den Anlagen 17, 20 und 23 sind die aus den Meßwerten nach Tabelle 3 errechneten Normaldrücke im Trichteransatz des steilen Trichters dargestellt.

Die zu den Meßwerten gehörenden rechnerischen Druckverläufe beim Füllen und beim Entleeren sind in die Anlagen eingezeichnet.

Die erkennbaren Lastspitzen sind in allen Fällen auf den Trichteransatz und den ersten halben Meter im Siloschaft, entsprechend 0,72 d, begrenzt. Ihre Größe ist von Schüttgut zu Schüttgut unterschiedlich. Die Laststeigerung, bezogen auf den Fülldruck, schwankt zwischen maximal 280 % (im Trichteransatz bei S o j a b o h n e n, rauhe Silowand) und minimal 40 % (im Trichteransatz beim N a t u r s a n d, glatte Silowand).

Bei den S o j a b o h n e n und dem N a t u r s a n d sind bei rauher Silowand keine Lastspitzen zu erkennen.

Für die jeweiligen Schüttgüter haben die Lastspitzen bei den drei Trichterneigungen die gleiche Größenordnung. Sie ist im Trichteransatz ungefähr gleich groß wie im Siloschaft.

Für die S o j a b o h n e n kann die Größe der Lastspitze mit  $2,0 \cdot p_{hf}$  angegeben werden. Der Wert wird nur im Trichteransatz bei rauher Silowand überschritten. Beim T i t a n e r z beträgt die Lastspitze  $1,0 \cdot p_{hf}$ . Eine größere Abweichung ist im Trichteransatz bei glatter Silowand zu erkennen. Hier beträgt allerdings der Variationskoeffizient für den Füllwert ca. das Zweieinhalbfache des Umlauf-Entleerungswertes. Die Ordinate für die Lastspitze beim N a t u r s a n d beträgt  $0,65 \cdot p_{hf}$ . Die Überschreitung des Wertes beim steilen Trichter im Siloschaft ist vermutlich auf den hohen Füllwert beim Meßhorizont 12 zurückzuführen. Für den K o k s ergibt sich die Lastspitze zu  $2,15 \cdot p_{hf}$ .

Auf die erhöhten Wandreibungsdrücke beim Füllen bei den drei untersten Meßhorizonten wurde bereits hingewiesen. Die Steigerung der Horizontaldrücke beim "Switch" wirkt sich ebenfalls auf die Wandreibungsdrücke an der Stelle der Lastspitze auf. Die maximale Laststeigerung kann für die Schüttgüter S o j a b o h n e n und K o k s mit ungefähr  $1,5 \cdot p_{wf}$  angegeben werden. Für das T i t a n e r z und den N a t u r s a n d beträgt die Laststeigerung  $1,0 \cdot p_{wf}$  und  $0,4 \cdot p_{wf}$ . Die Werte sind auf den rechnerischen Fülldruck nach dem Normentwurf bezogen. Die Form der Laststeigerung ist dem in den Anlagen 15 bis 24 dargestellten Verlauf der Lastspitzen ähnlich.

#### 4.4.3 Drücke im Trichteransatz

Die Fülllasten in Auslauftrichtern können mit den Angaben im Abschnitt 3.5 des Entwurfs DIN 1055 Teil 6 ermittelt werden. Im folgenden werden die im Trichteransatz gemessenen Fülldrücke den nach den Angaben der Norm rechnerisch ermittelten Drücken gegenübergestellt.

Dabei wird der Druck aus dem im Trichter liegenden Schüttgut vernachlässigt. Dies erscheint gerechtfertigt, da mit der Meßeinrichtung nur die Drücke im oberen Achtel des Trich-

ters gemessen werden. Zum anderen besteht eine Unsicherheit über die Größe des Beiwerts  $\mu$ , da Siloschaft und Trichter aus verschiedenen Materialien gefertigt sind.

Für die rechnerische Ermittlung der Drücke im Trichter wird daher nur der Anteil aus dem über dem Trichter liegenden Schüttgut berücksichtigt. Die Abminderung des Wertes  $p_{no}$  am oberen Trichterrand auf die Größe am Meßhorizont wird vernachlässigt. Vergleichsrechnungen haben gezeigt, daß beide vernachlässigten Einflüsse gleiche Größenordnung haben und sich damit aufheben.

Die Drücke werden mit den im Normentwurf enthaltenen Beziehungen

$$p_{no} = (p_b \cdot \cos^2 \alpha + p_{hf} \cdot \sin^2 \alpha) \left(1 + \frac{\sin 2\alpha}{4\mu}\right)$$

und  $p_w = p_n / 2$

errechnet.

In die obige Gleichung werden die bei ebenem Boden ermittelten Werte für die Schüttgüter eingesetzt, die den Vorschlägen zur Ergänzung der Tabelle 1 des Normentwurfs zugrunde liegen (vgl. SCHNEIDER 1985). Die somit errechneten Drücke sind in Tabelle 7 den gemessenen Drücken gegenübergestellt.

Nur bei den *S o j a b o h n e n* wurden die rechnerischen Drücke mit den Parametern der Druckverläufe beim 77,5°-Trichter ermittelt, da sonst keine Vergleichbarkeit vorhanden ist.

Schüttgut	glatte Silowand				rauhe Silowand			
	rechnerische Füll- drücke [kN/m <sup>2</sup> ]		gemessene Füll- drücke [kN/m <sup>2</sup> ]		rechnerische Füll- drücke [kN/m <sup>2</sup> ]		gemessene Füll- drücke [kN/m <sup>2</sup> ]	
	P <sub>n</sub>	P <sub>w</sub>	P <sub>n</sub>	P <sub>w</sub>	P <sub>n</sub>	P <sub>w</sub>	P <sub>n</sub>	P <sub>w</sub>
Sojabohnen	5,5	2,8	7,2	3,0	1,7	0,9	2,4	1,1
Titanerz	9,7	4,8	13,1	6,9	8,2	4,1	11,1	5,0
Natursand	6,1	3,1	8,1	3,8	6,0	3,0	6,7	2,9

Tab. 7: rechnerische und gemessene Füll-  
drücke im Trichteransatz

Aus den Werten in Tabelle 7 ist ersichtlich, daß für beide Wandrauigkeiten die gemessenen Normaldrücke größer sind als die rechnerischen. Die Erhöhung kann mit 30 % in bezug auf den rechnerischen Fülldruck angegeben werden. Nur beim N a t u r s a n d und rauher Silowand ist die Differenz geringer. Das liegt jedoch daran, daß der gemessene Fülldruck kleiner ist als der rechnerische (vgl. Anlage 12), so daß der rechnerische Wert zu groß ist.

Die Wandreibungsdrücke stimmen besser überein, die maximalen Abweichungen haben aber die gleiche Größenordnung wie bei den Normaldrücken.

5. Wertung der Versuchsergebnisse

Mit den beschriebenen Versuchseinrichtungen konnte für die untersuchten Schüttgüter bei unterschiedlichen Trichter-  
neigungen Massenfluß erreicht werden. Mit den Ergebnissen  
der zuvor durchgeführten Versuche mit ebenem Boden ist es  
möglich, die Schüttgutdrücke bei Kern- und Massenfluß zu  
vergleichen.

In Tabelle 8 sind die Beobachtungen im Meßsilo der theore-  
tischen Grenze für Massenfluß gegenübergestellt. Eine kleine  
Verschiebung des Grenzwinkels zu kleineren Trichter-  
neigungen ist zu erkennen. Dies kann durch die geringere Wandrei-  
bung des Materials des flachen und mittleren Trichters in  
bezug auf die Probeflächen für die Wandscherversuche er-  
klärt werden. Die in der Tabelle getroffenen Aussagen bezüg-  
lich Massenfluß sind durch die Beobachtungen der Schüttgut-  
bewegungen an der Silowand gemäß Abbildung 7 bestätigt.

Der aus theoretischen Untersuchungen abgeleitete "Switch"  
hat sich je nach Schüttgut in unterschiedlicher Größe er-  
geben. Im Siloschaft blieb er auf die untersten drei Meß-  
horizonte beschränkt. Im Trichteransatz konnte der "Switch"  
in gleicher Größenordnung wie im Siloschaft gemessen wer-  
den. Das Auftreten der Lastspitzen in einer Höhe von 0,6 d  
über dem unteren Silorand ist unerwartet und nicht erklär-  
bar. Diese Erscheinung ist jedoch durch andere Untersuchun-  
gen bestätigt.

Bei einigen Meßserien ist beim 70°-Trichter direkt nach dem  
Öffnen der Abzugsöffnung ein starker Abfall der Horizontal-  
drücke beim untersten Meßhorizont zu beobachten. Es kann  
nicht ganz ausgeschlossen werden, daß die gewählte Über-  
gangskonstruktion zwischen Siloschaft und Trichter hier  
einen Einfluß hat. Für zukünftige Untersuchungen ist eine  
Bauart wie beim steilen Trichter vorzuziehen. Die Beobach-  
tung kann so gedeutet werden, daß sich zwischen Trichter  
und Siloschaft im Schüttgut ein Übergangsbereich ausbildet,

Schüttgut	Kleinsten Grenzwert $\alpha$ [°] für Massenstrom	Versuchsergebnis im Meßsilo					
		glatte Silowand			rauhe Silowand		
		Trichter 62,5°	Trichter 70°	Trichter 77,5°	Trichter 62,5°	Trichter 70°	Trichter 77,5°
Sojabohnen	63,5	Massenfluß Lastspitze	Massenfluß Lastspitze	Massenfluß Lastspitze	Massenfluß keine Ausw.	Massenfluß keine Ausw.	Massenfluß keine Ausw.
Titanerz	72,5	Kernfluß	Massenfluß Lastspitze	Massenfluß Lastspitze	Kernfluß	Massenfluß Lastspitze	Massenfluß Lastspitze
Natursand	62,0	?	Massenfluß Lastspitze	Massenfluß Lastspitze	?	Massenfluß keine Ausw.	Massenfluß keine Ausw.
Koks	60,0	—	Massenfluß Lastspitze	—	—	Massenfluß Lastspitze	—

Tab. 8 : Vergleich der Versuchsergebnisse im Meßsilo mit der theoretischen Grenze für Massenfluß

der die Lastspitze etwas nach oben leitet und den unteren Bereich abschirmt.

Aus den Darstellungen der Meßergebnisse ist ersichtlich, daß analog dem Entleerungsfaktor  $e_h$  für ebenen Boden ein Faktor  $e_s$  für das Druckmaximum im Switch gebildet werden kann. Bei diesem muß jedoch anders als im Normentwurf zwischen glatter und rauher Silowand unterschieden werden. Die aus den Anlagen entnommenen Werte sind in Tabelle 9 zusammengestellt. Ein Zusammenhang beider Werte ist nicht erkennbar.

Schüttgüter	glatte Silowand		rauhe Silowand	
	$e_h$	$e_s$	$e_h$	$e_s$
Sojabohnen	1,8	3,0	2,0	2,0
Titanerz	1,4	2,0	1,8	2,1
Natursand	1,27	1,7	1,13	1,1
Koks	1,85	3,2	1,7	2,7

Tab. 9 : Entleerungslastfaktoren  $e_h$  und  $e_s$

Die Horizontaldrücke im darüberliegenden Siloschaft sind im wesentlichen unverändert. Nur beim K o k s und bei einigen Meßserien mit dem N a t u r s a n d ist die Lasterhöhung beim Umlauf-Entleeren geringer als bei ebenem Boden. Niedrigere Entleerungslasten im Siloschaft können daher bei Massenfluß nicht allgemein zugelassen werden.

Ob die großen Normallasten im Trichteransatz auch einer Switch-Spitze entsprechen oder ob die gemessenen Werte eine Erhöhung der gesamten Trichterlasten im Normentwurf notwendig machen, kann mit diesen Versuchsreihen nicht beantwortet werden.

Durch die Untersuchung weiterer Schüttgüter sollten die hier gewonnenen Erkenntnisse erweitert und die aus den Versuchsergebnissen gezogenen Schlußfolgerungen abgesichert werden.



Die Druckerhöhung in bezug auf die rechnerische Fülllast wurde im Siloschaft mit  $\Delta p_{hs} = 0,5$  bis  $2,15 \cdot p_{hf}$  gemessen. Für die Lasterhöhung beim Switch wird im Hinblick auf die wenigen untersuchten Schüttgüter ein Wert von  $\Delta p_{hs} = 2,5 \cdot p_{hf}$  vorgeschlagen. Zur Berücksichtigung des Switch im Siloschaft kann die Horizontallast mit der Beziehung

$$p_{hs} = e_s \cdot p_{hf} \quad \text{mit } e_s = 3,5$$

errechnet werden.

In allen Fällen ergibt sich ein dreieckförmiger Verlauf für die Lasterhöhung. Für die Form der Lasterhöhung wird näherungsweise ein gleichschenkliges Dreieck mit einer Basisbreite von  $0,8 \cdot d$  vorgeschlagen. Es ist vertretbar, daß die rechnerische Lastspitze damit etwas tiefer liegt als die gemessene.

Für die Normallasten im Trichteransatz wird die gleiche Erhöhung von  $\Delta p_{ns} = 2,5 \cdot p_{no}$  vorgeschlagen. Mit ausreichender Genauigkeit kann die Erhöhung auf die rechnerische Normallast nach dem Normentwurf bezogen werden. Der vorgeschlagene Wert wird damit nur in einem Fall überschritten. Zur Berücksichtigung des Switch kann die Normallast im Trichteransatz analog der Beziehung im Siloschaft ermittelt werden:

$$p_{ns} = e_s \cdot p_{no} \quad \text{mit } e_s = 3,5$$

Mit diesem Wert  $e_s = 3,5$  werden die Lastspitzen für die im "Norm-Meßsilo" untersuchten Schüttgüter sicher abgedeckt. Weitere Untersuchungen können zu differenzierten Verminderungen führen.

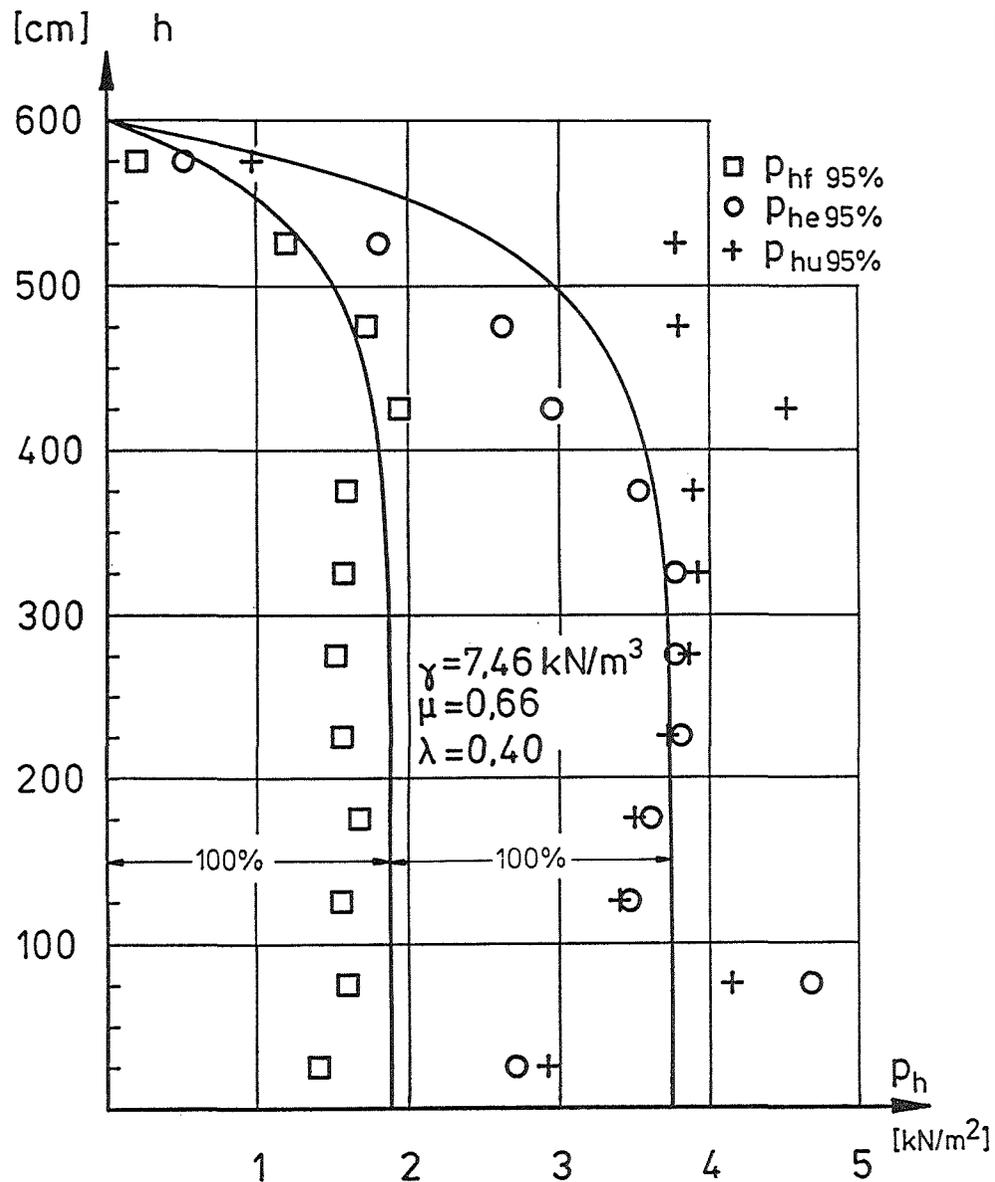
Eine Erhöhung der Wandreibungslasten kann unberücksichtigt bleiben, da am Übergangsbereich zwischen Siloschaft und Trichter meist kein Stabilitätsnachweis geführt werden muß.

7. Literaturverzeichnis

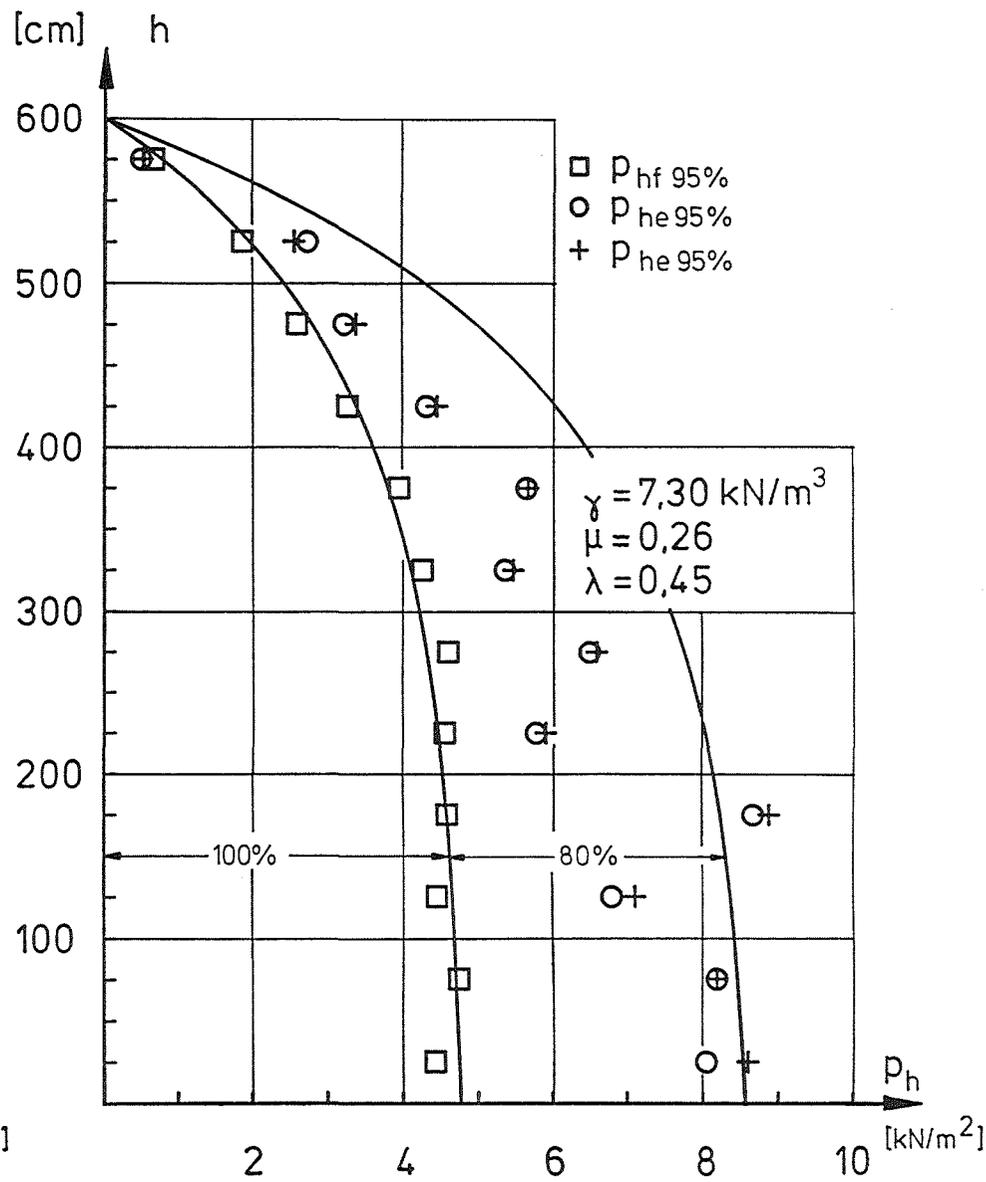
- DIN 1055 Teil 6 Lastnahmen für Bauten; Lasten in Silozellen. Entwurf 2/1984
- DIN 1055 Teil 6, Beiblatt Lastannahmen für Bauten; Lasten in Silozellen. Entwurf 2/1984
- DIN 18121 Teil 1 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben; Wassergehalt; Bestimmung durch Ofentrocknung. Ausgabe 4/1976
- DIN 18123 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung der Korngrößenverteilung. Ausgabe 4/1983
- DIN 18137 Teil 1 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung der Scherfestigkeit; Begriffe und grundsätzliche Versuchsbedingungen. Entwurf 6/1985
- EHLERS, K. Beiträge zur Ermittlung von Schüttgutkonstanten und deren Einfluß auf Silolasten. Dissertation TU Braunschweig, 1979.
- EISENHART ROTHE, M.v.; NATAU, O. Problematik und Anwendung eines neuen Messverfahrens zur Bestimmung der Fließspannungen in Schüttgütern. Powder Technology 12 (1975), S. 1-6.
- HÄUSSLER, U. Geschwindigkeits- und Spannungsfelder beim Entleeren von Silozellen. Dissertation Universität Karlsruhe (TH), 1984.

- JANSSEN, H.A.                    Versuche über Getreidedruck in Silozellen. VDI-Zeitschrift 39 (1895), S. 1045-1049.
- JENIKE, A.W.;  
JOHANSON, J.R.;  
CARSON, J.W.                    Bin Loads - Part 3: Mass-Flow Bins. Journal of Engineering for Industry, ASME, Series B, Vol. 95 (1973), S. 6-12.
- MOTZKUS, U.                     Belastung von Siloböden und Auslauftrichtern durch körnige Schüttgüter. Dissertation TU Braunschweig, 1974.
- NOTDURFT, H.                    Schüttgutlasten in Silozellen mit Querschnittsverengungen. Dissertation TU Braunschweig, 1976.
- PERRY, M.G.;  
JANGDA, H.A.S.                 Pressures in Flowing and Static Sand in Model Bunkers. Powder Technology 4 (1970/71), S. 89-96.
- PIEPER, K.;  
SCHÜTZ, M.                     Bericht über das Forschungsvorhaben "Norm-Meßsilo für Schüttguteigenschaften". Forschungsbericht. Lehrstuhl für Hochbaustatik, Braunschweig 1980.
- SCHNEIDER, H.-G.                Rechenwerte für Schüttgüter. Forschungsbericht. Lehrstuhl für Hochbaustatik, Braunschweig 1985.
- SCHÜTZ, M.                     Erörterungen zur Frage der Berechnung von Silolasten mit Werten aus Messungen am Modellsilo und aus Scherversuchen. Dissertation TU Braunschweig, 1982.

- SCHWEDES, H.                   Lagern und Fließen von Schüttgütern.  
Umdruck zum Hochschulkurs. Braunschweig:  
Eigenverlag 1984.
- TER BORG, L.                    Chemie-Ingenieur-Technik 53 (1981),  
S. 662-663.
- WALKER, D.M.                   An approximate theory for pressures  
and arching in hoppers. Chemical  
Engineering Science 21 (1966),  
S. 975-997.
- WALKER, D.M.;  
BLANCHARD, M.H.               Pressures in experimental coal  
hoppers. Chemical Engineering  
Science 22 (1967), S. 1713-1745.

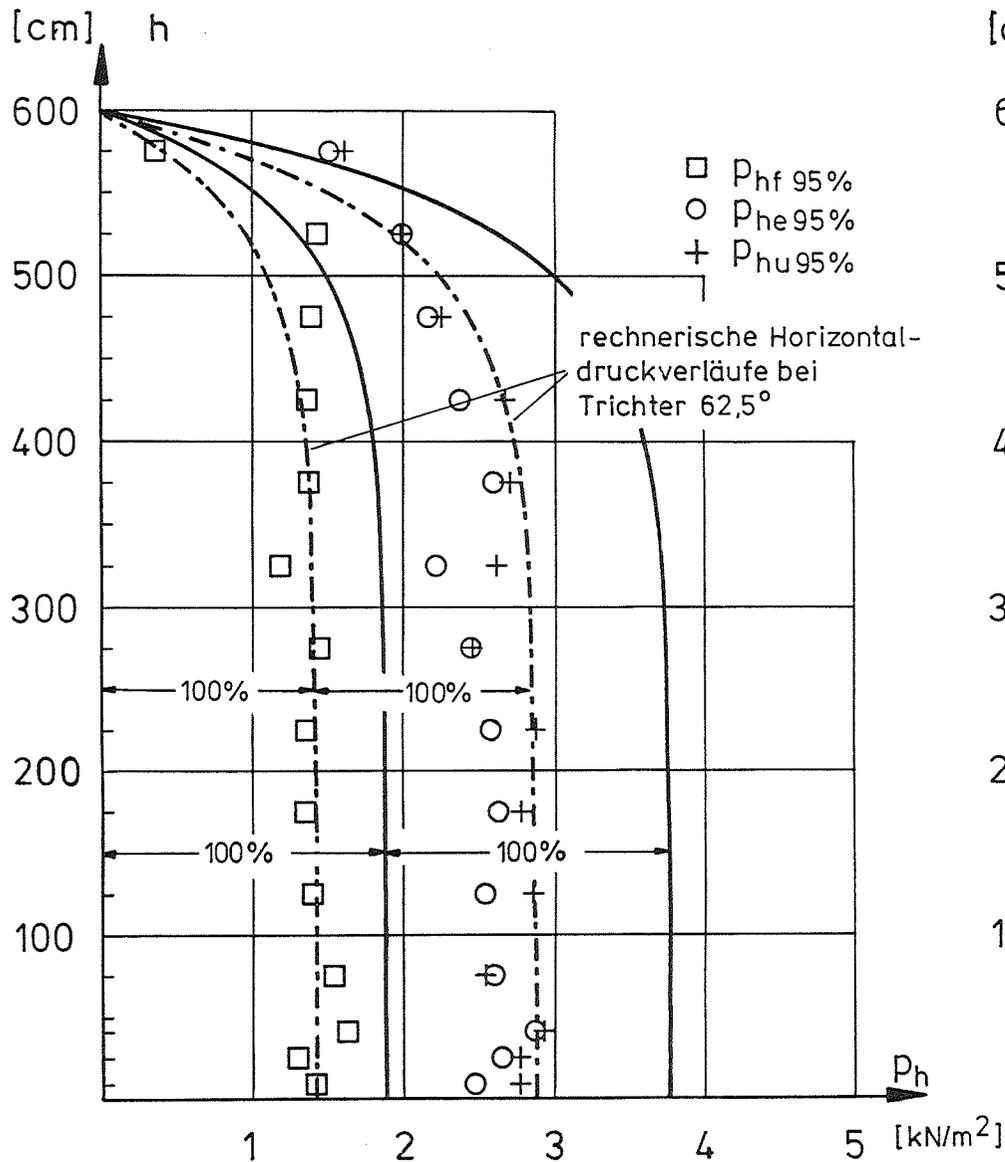


Schüttgut : Sojabohnen  
 Silowand : rauh

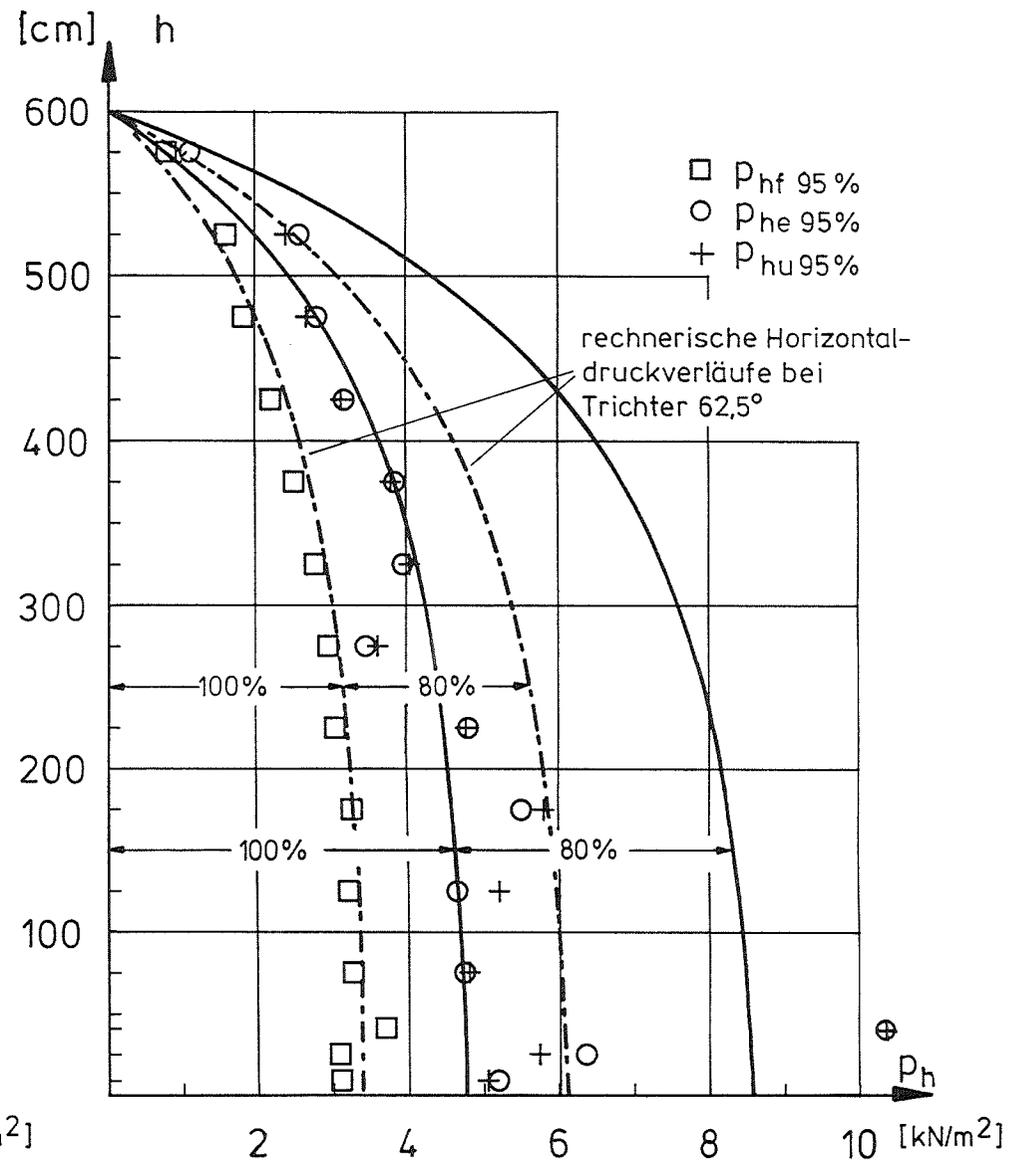


Schüttgut : Sojabohnen  
 Silowand : glatt

Anlage 1 : 95% - Fraktile der gemessenen Horizontaldrücke und rechnerische Horizontaldruckverläufe bei ebenem Boden

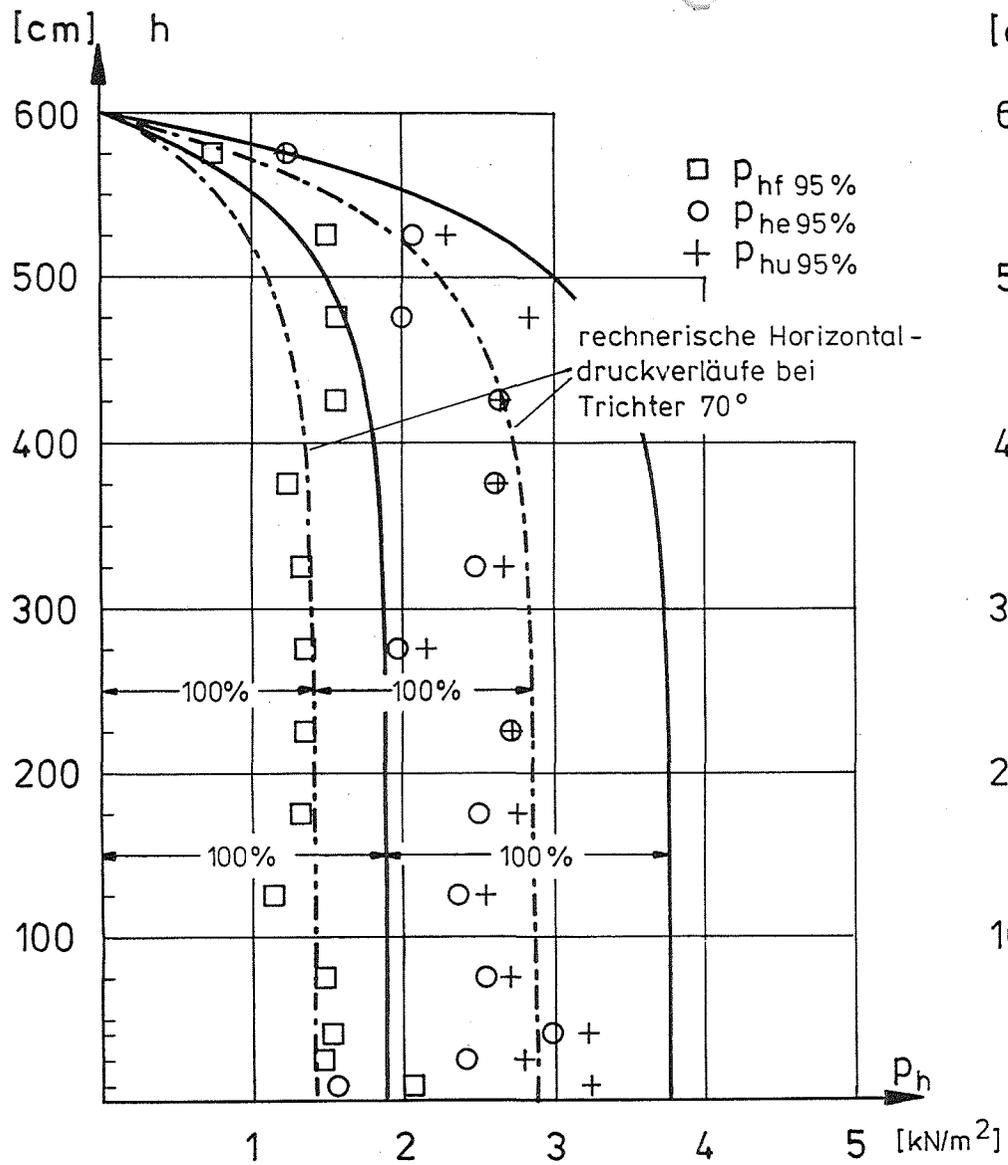


Schüttgut : Sojabohnen  
 Silowand : rauh

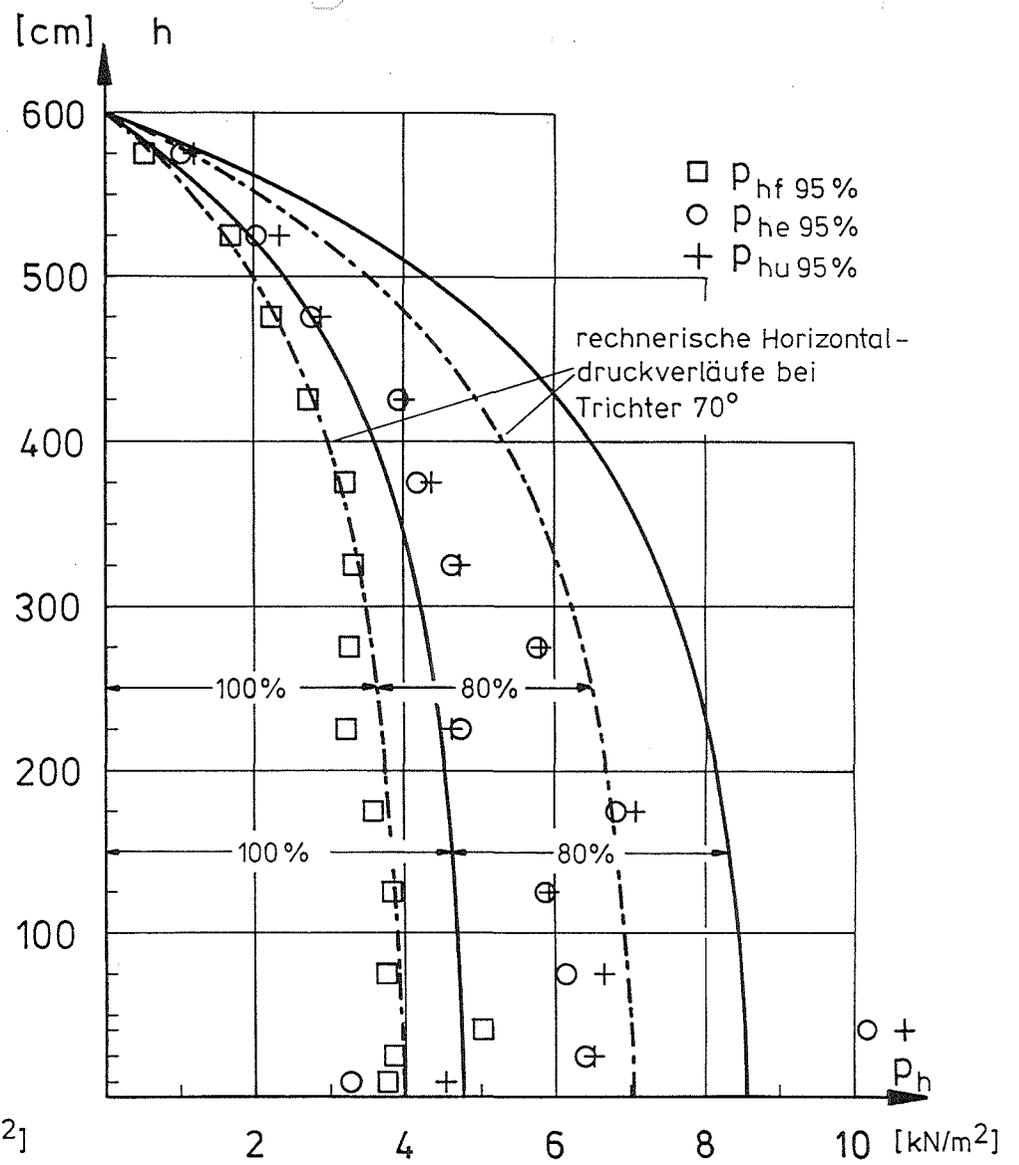


Schüttgut : Sojabohnen  
 Silowand : glatt

Anlage 2 : 95% - Fraktile der gemessenen Horizontaldrücke bei Trichter 62,5° und rechnerische Horizontaldruckverläufe bei ebenem Boden im Siloschaft

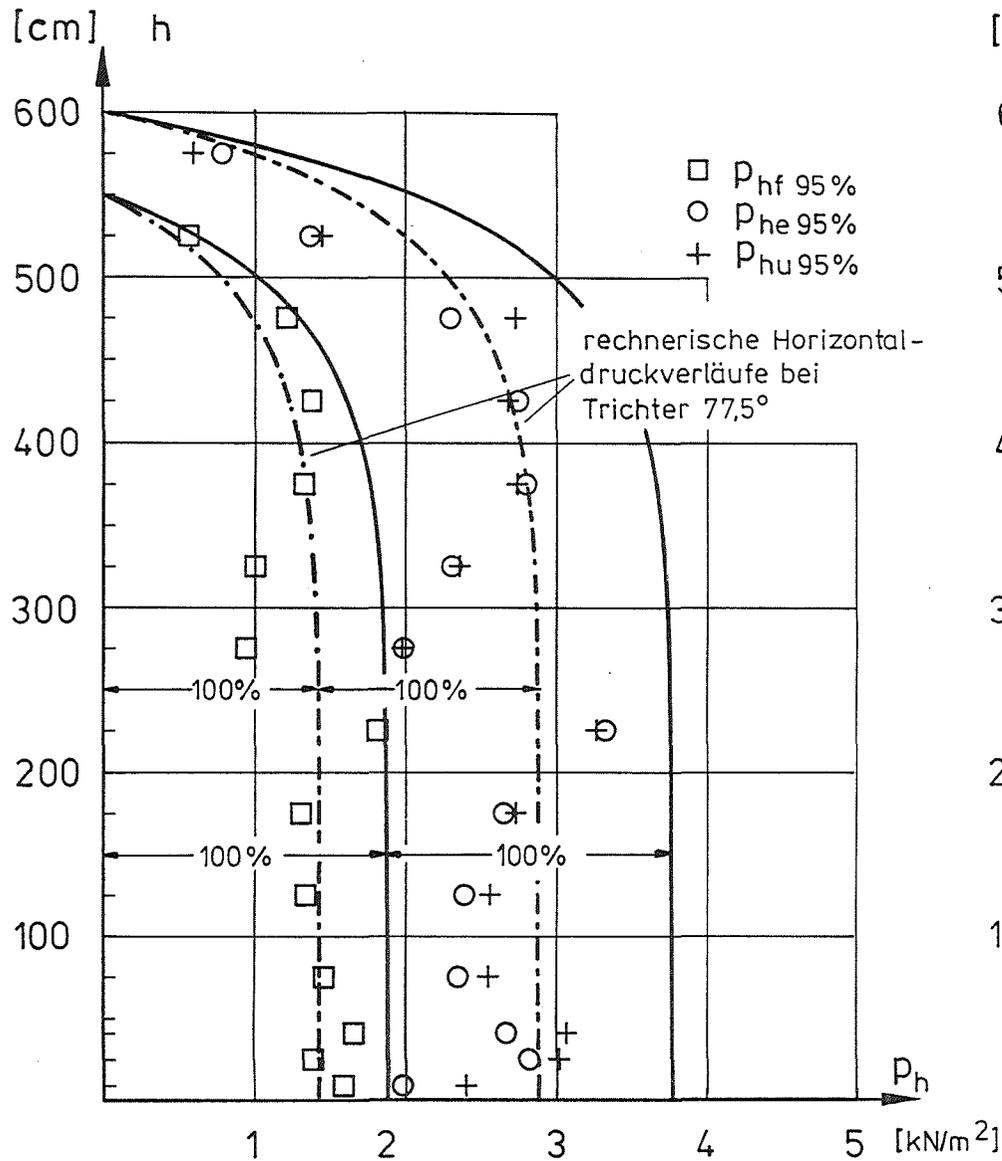


Schüttgut : Sojabohnen  
 Silowand : rauh

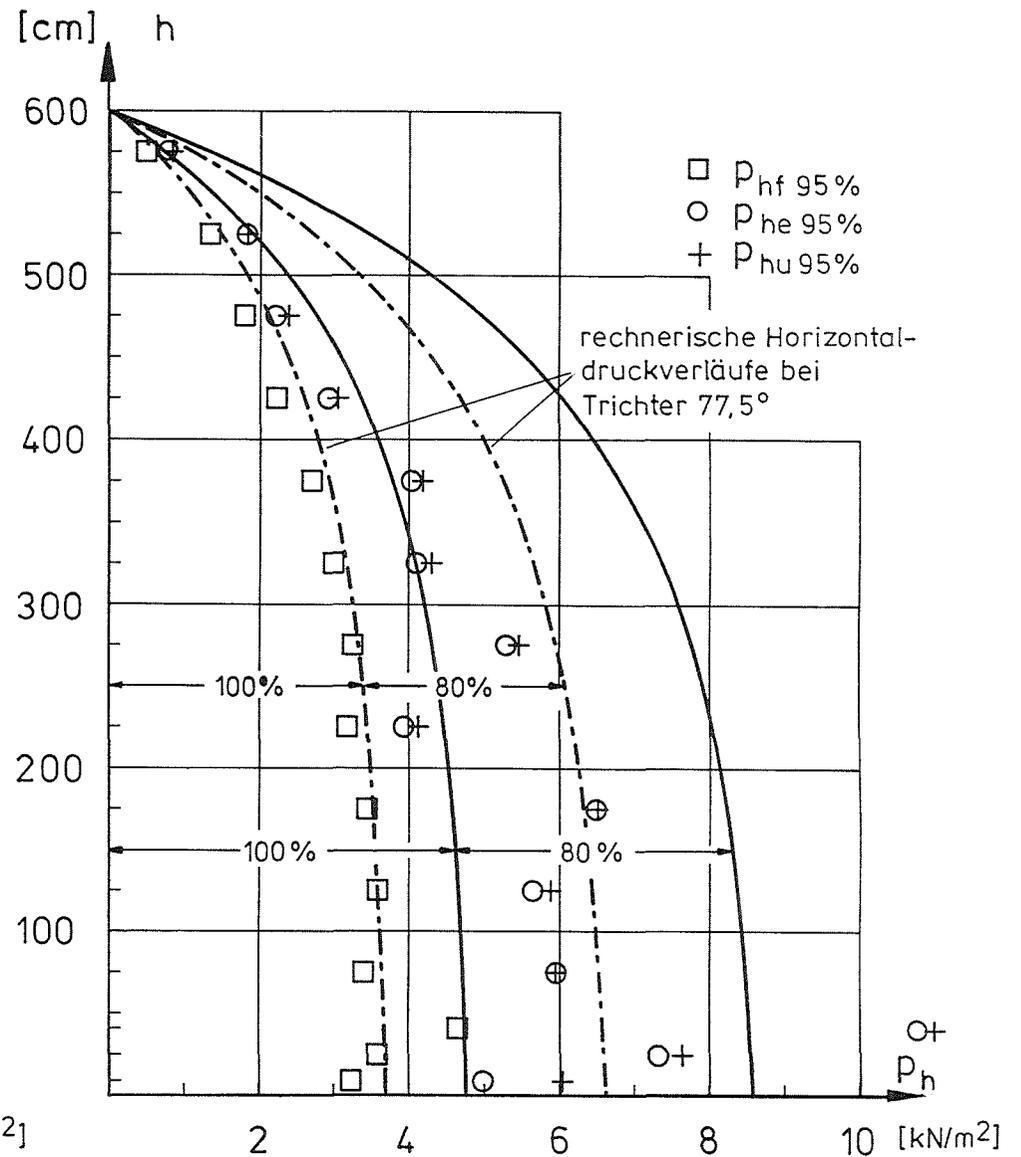


Schüttgut : Sojabohnen  
 Silowand : glatt

Anlage 3 : 95%-Fraktile der gemessenen Horizontaldrücke bei Trichter  $70^\circ$  und rechnerische Horizontaldruckverläufe bei ebenem Boden im Siloschaft

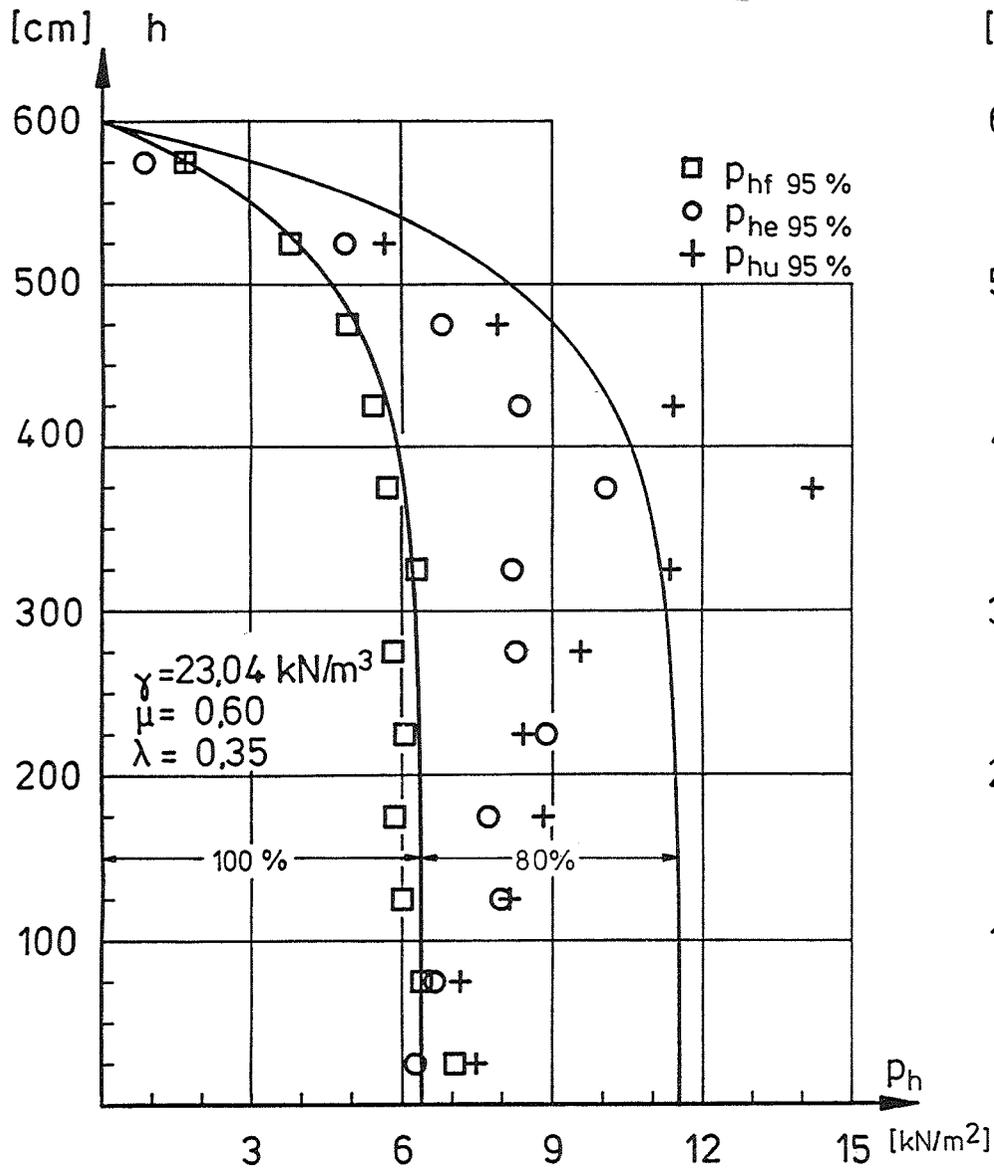


Schüttgut : Sojabohnen  
 Silowand : rauh

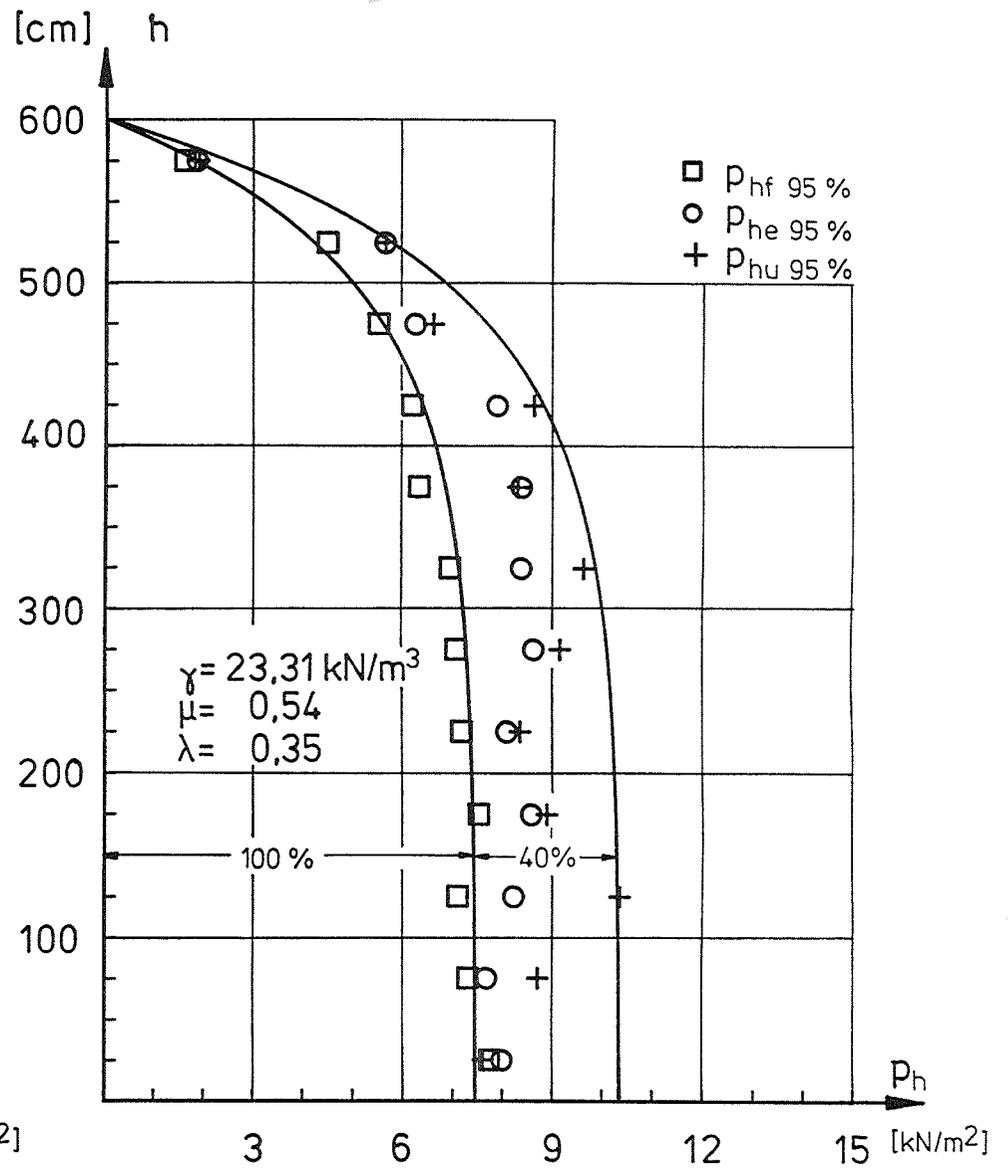


Schüttgut : Sojabohnen  
 Silowand : glatt

Anlage 4 : 95%-Fraktile der gemessenen Horizontaldrücke bei Trichter 77,5° und rechnerische Horizontaldruckverläufe bei ebenem Boden im Siloschaft

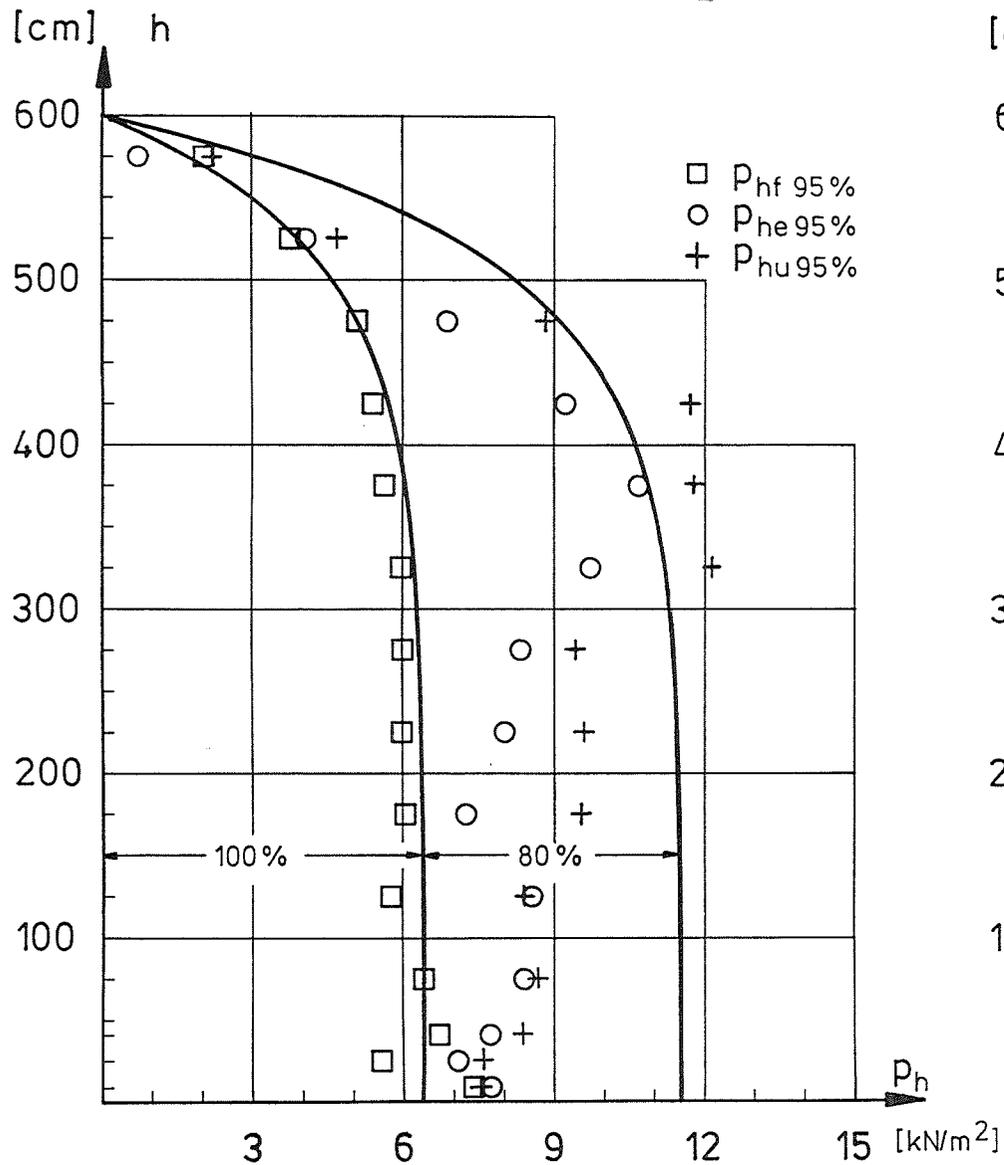


Schüttgut : Titanerz  
 Silowand : rauh

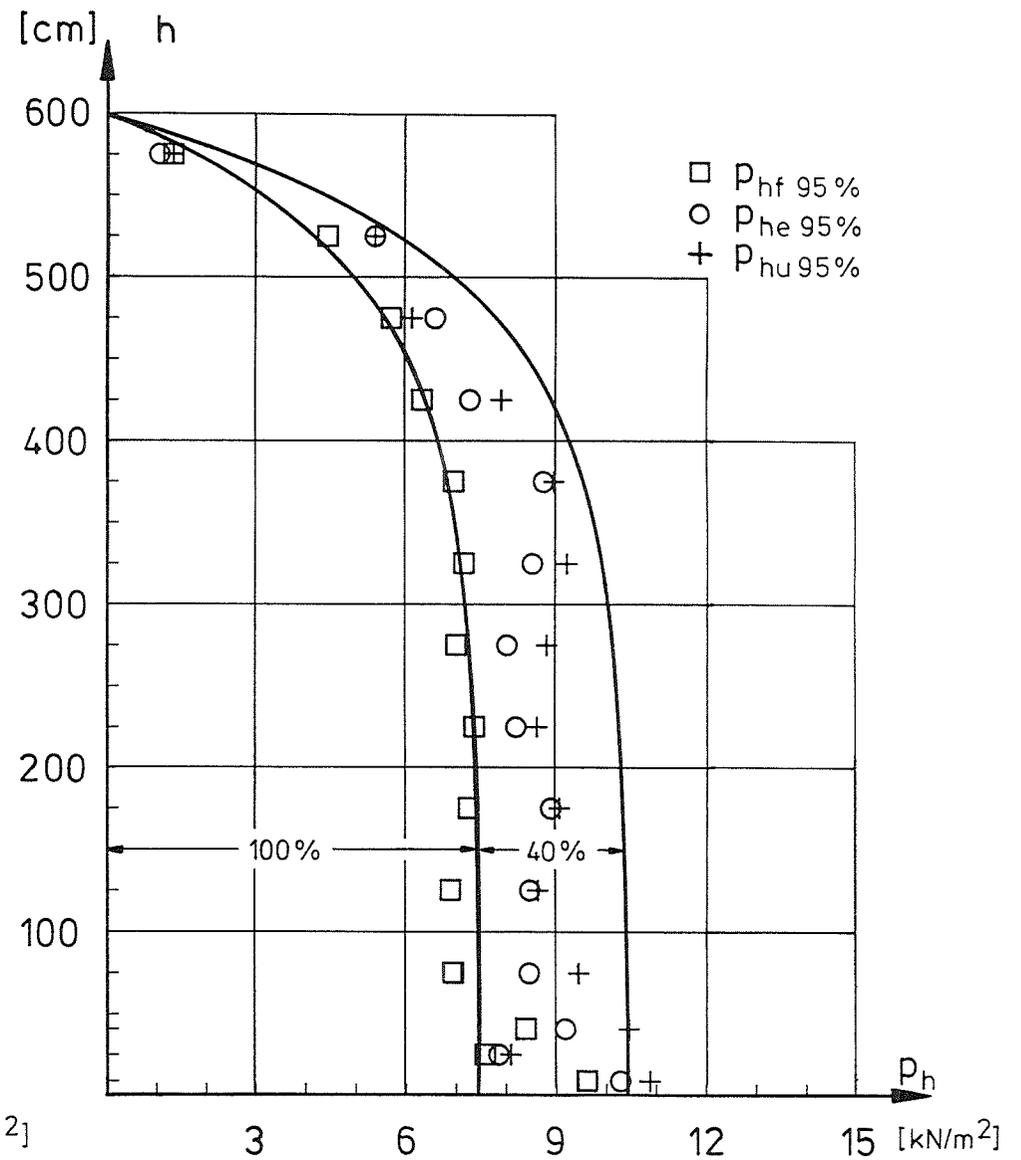


Schüttgut : Titanerz  
 Silowand : glatt

Anlage 5 : 95%-Fraktile der gemessenen Horizontaldrücke und rechnerische Horizontaldruckverläufe bei ebenem Boden

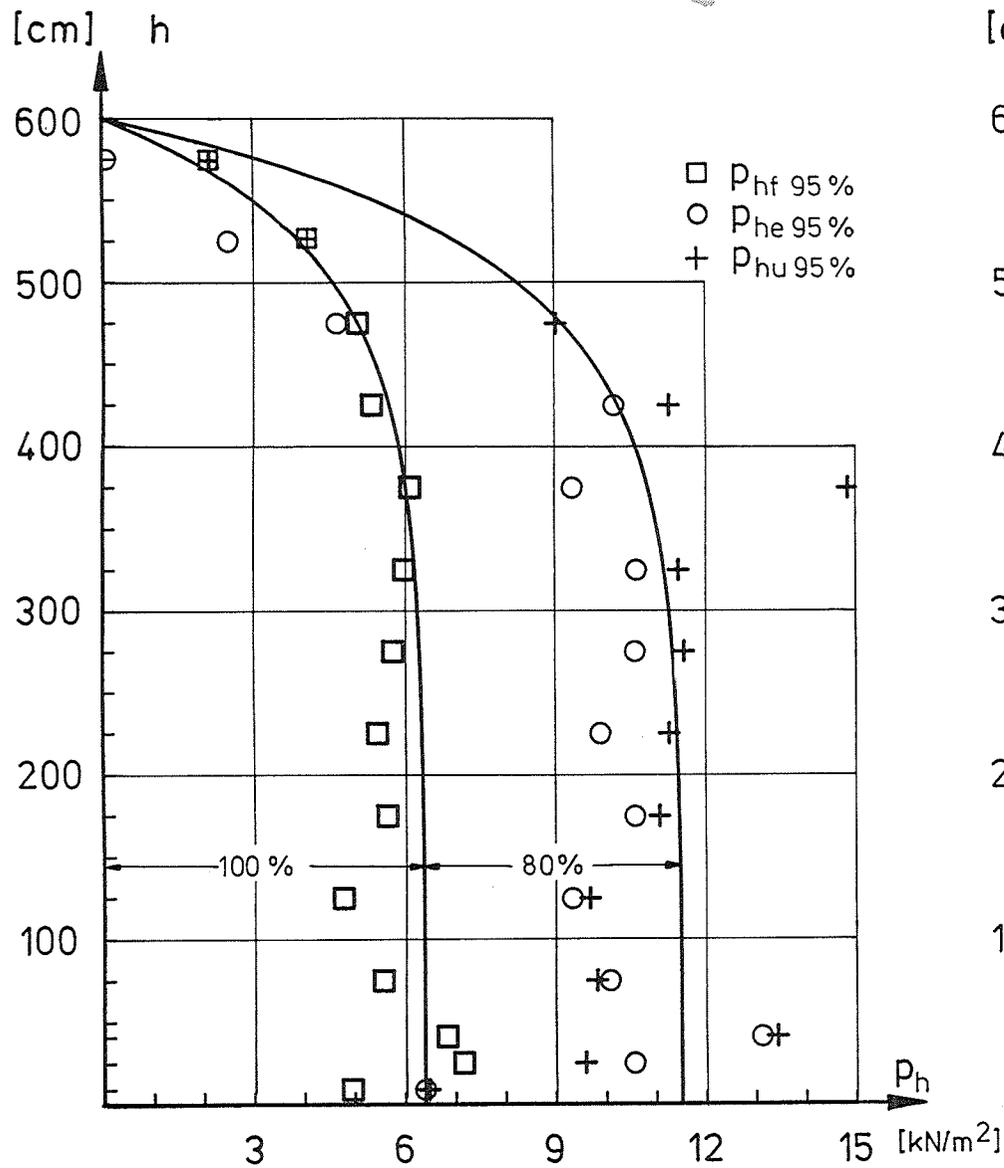


Schüttgut : Titanerz  
 Silowand : rauh

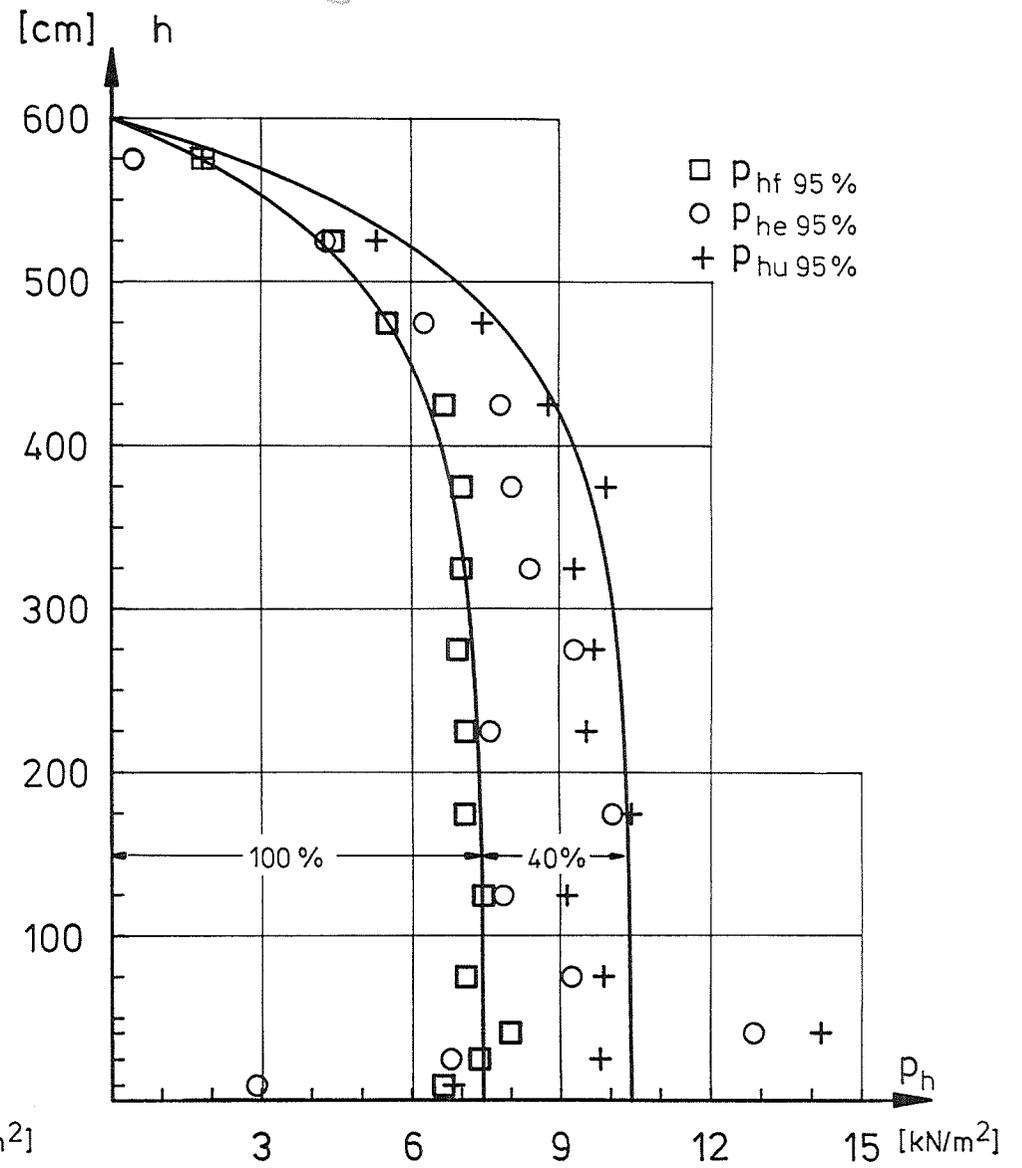


Schüttgut : Titanerz  
 Silowand : glatt

Anlage 6 : 95%-Fraktilen der gemessenen Horizontaldrücke bei Trichter 62,5° und rechnerische Horizontaldruckverläufe bei ebenem Boden im Siloschaft

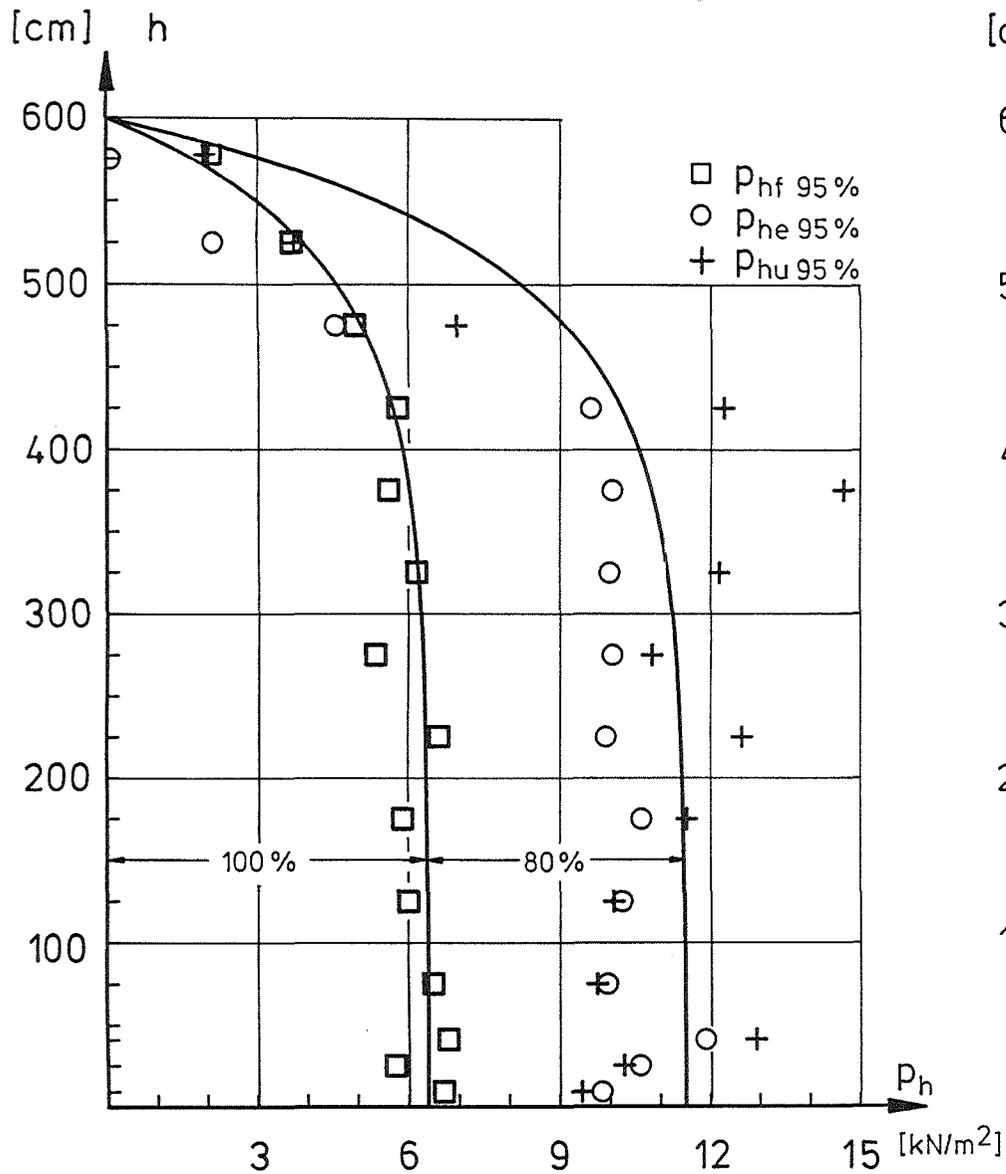


Schüttgut : Titanerz  
 Silowand : rauh

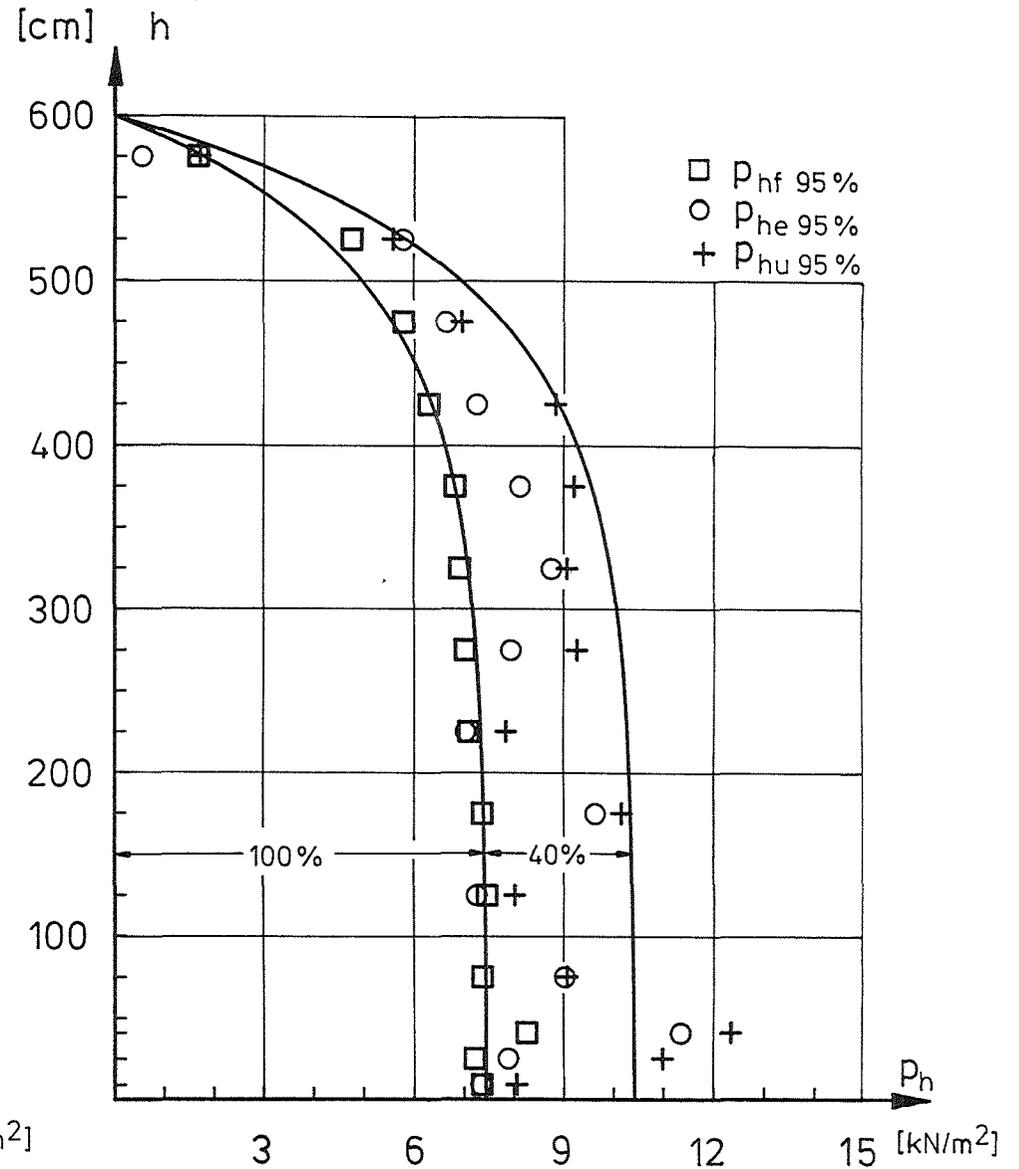


Schüttgut : Titanerz  
 Silowand : glatt

Anlage 7 : 95%-Fraktile der gemessenen Horizontaldrücke bei Trichter  $70^\circ$  und rechnerische Horizontaldruckverläufe bei ebenem Boden im Siloschaft

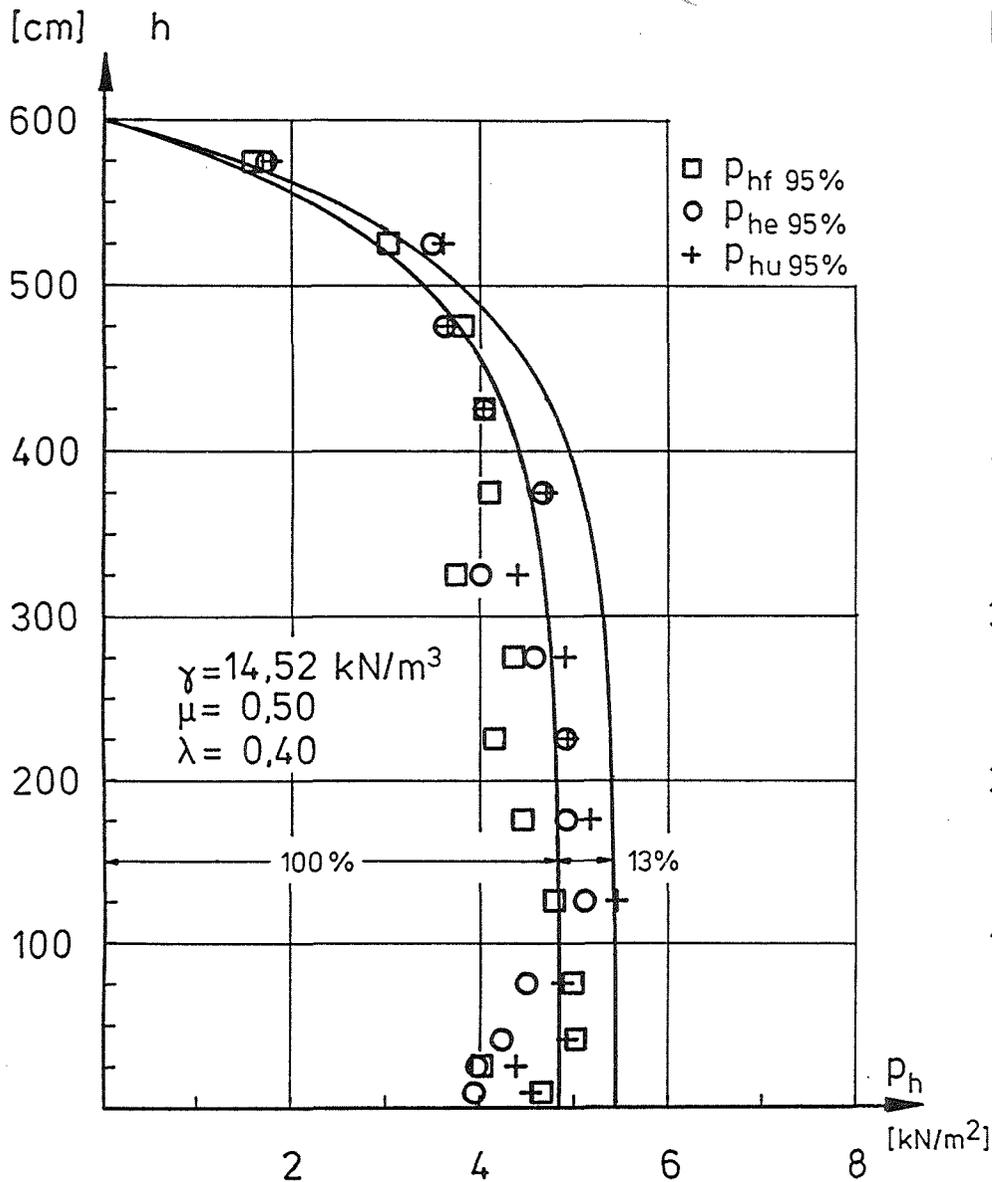


Schüttgut : Titanerz  
 Silowand : rauh

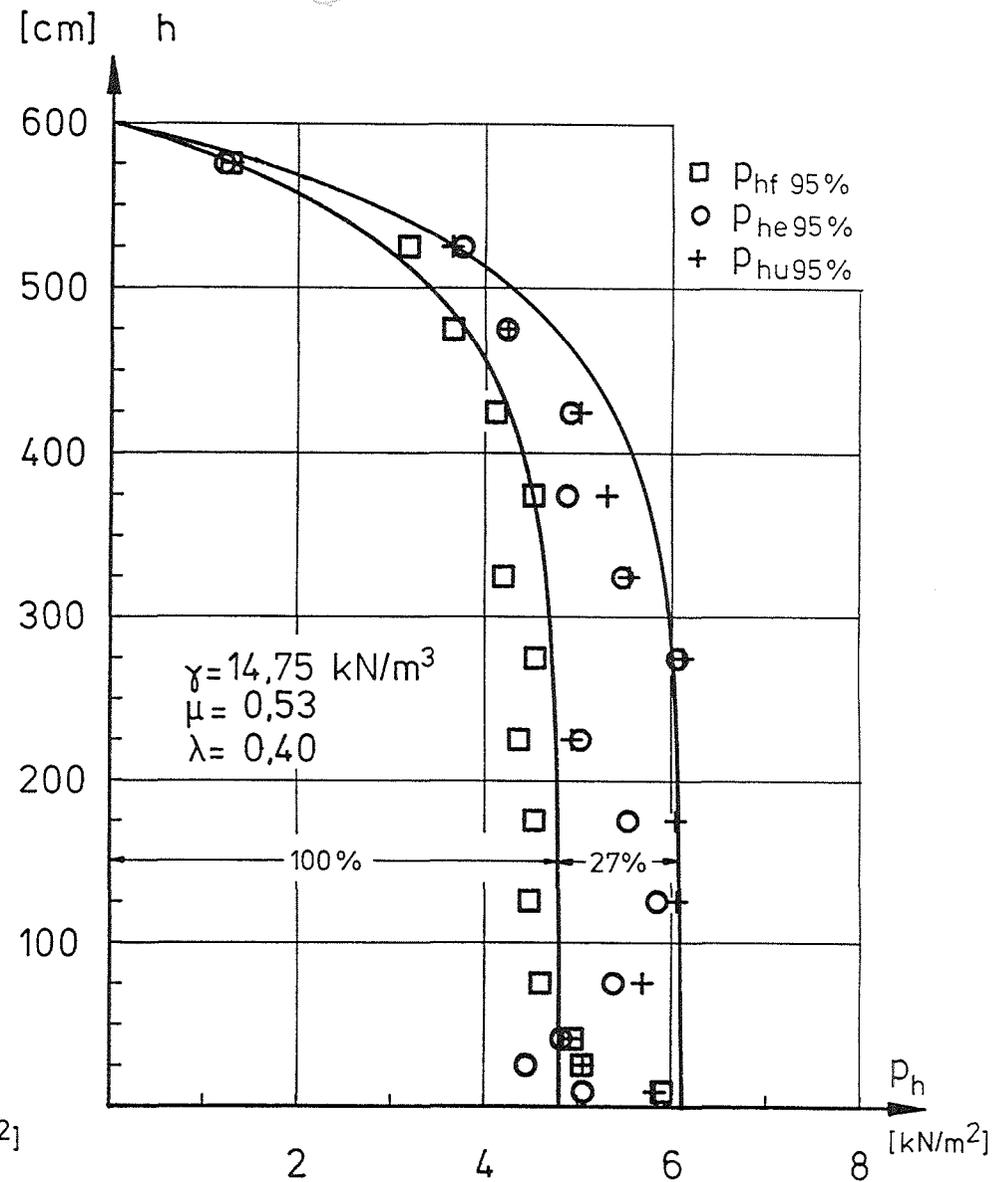


Schüttgut : Titanerz  
 Silowand : glatt

Anlage 8 : 95%-Fraktile der gemessenen Horizontaldrücke bei Trichter 77,5° und rechnerische Horizontaldruckverläufe bei ebenem Boden im Siloschaft

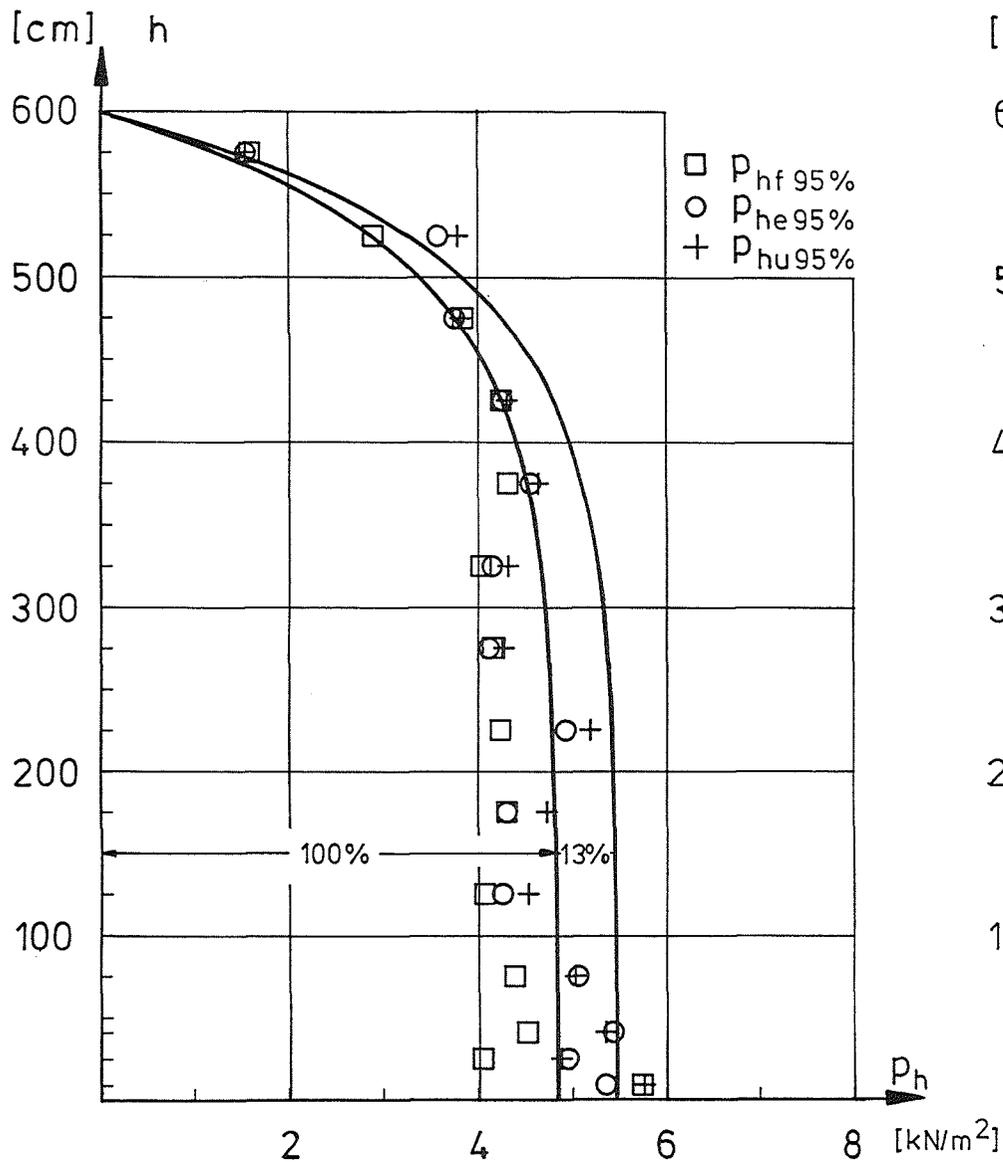


Schüttgut : Natursand  
 Silowand : rauh

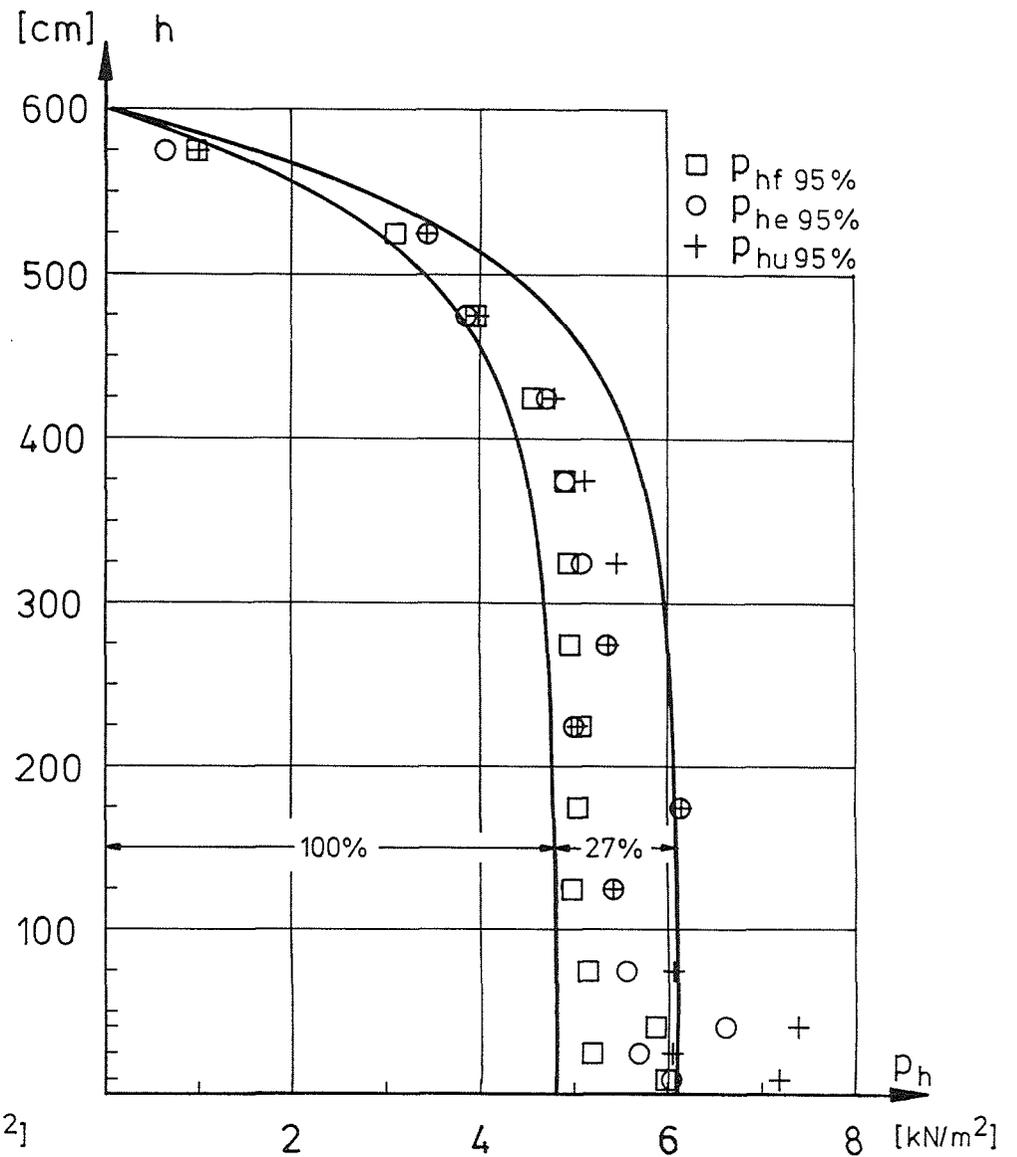


Schüttgut : Natursand  
 Silowand : glatt

Anlage 9 : 95%-Fraktilen der gemessenen Horizontaldrücke und rechnerische Horizontaldruckverläufe bei ebenem Boden

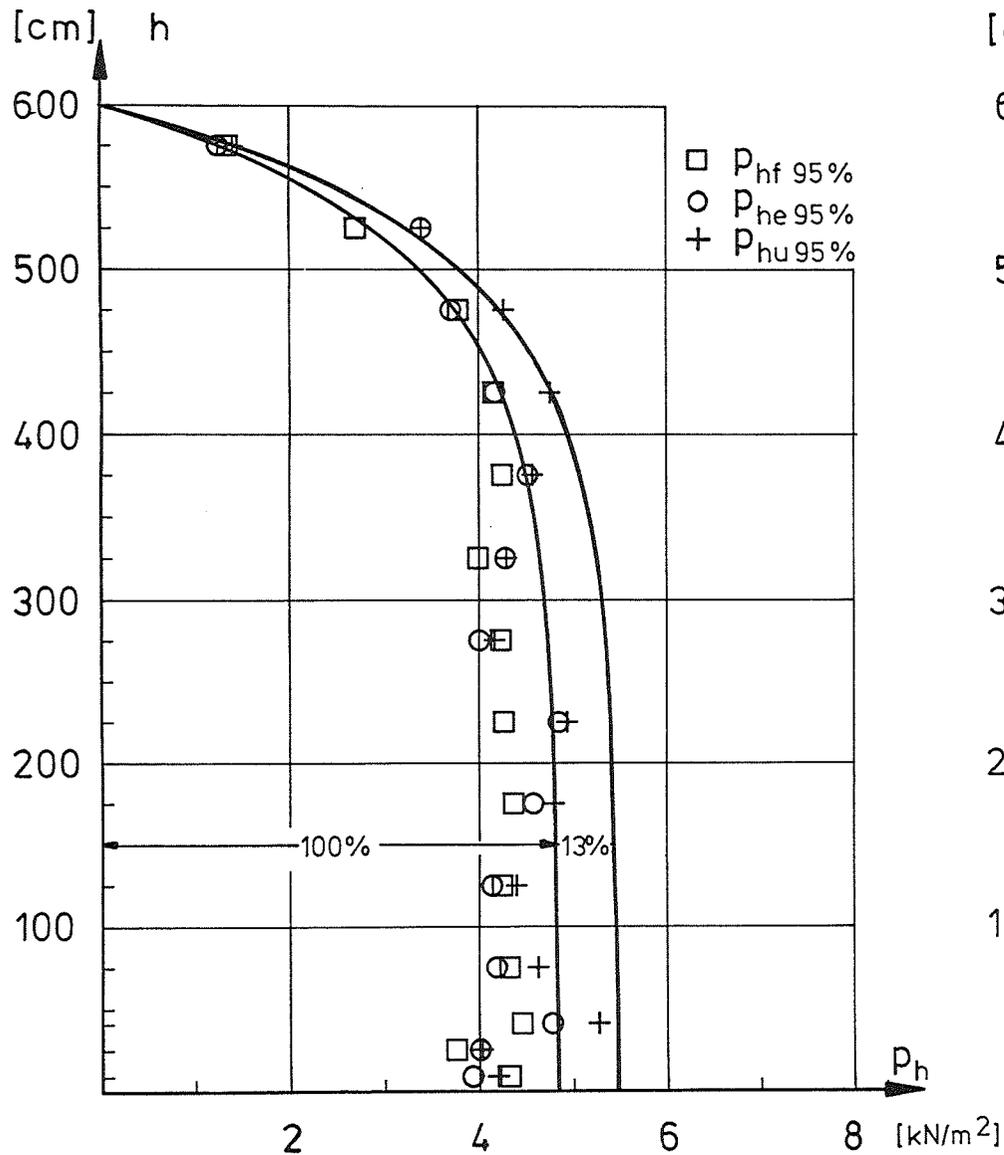


Schüttgut : Natursand  
 Silowand : rauh

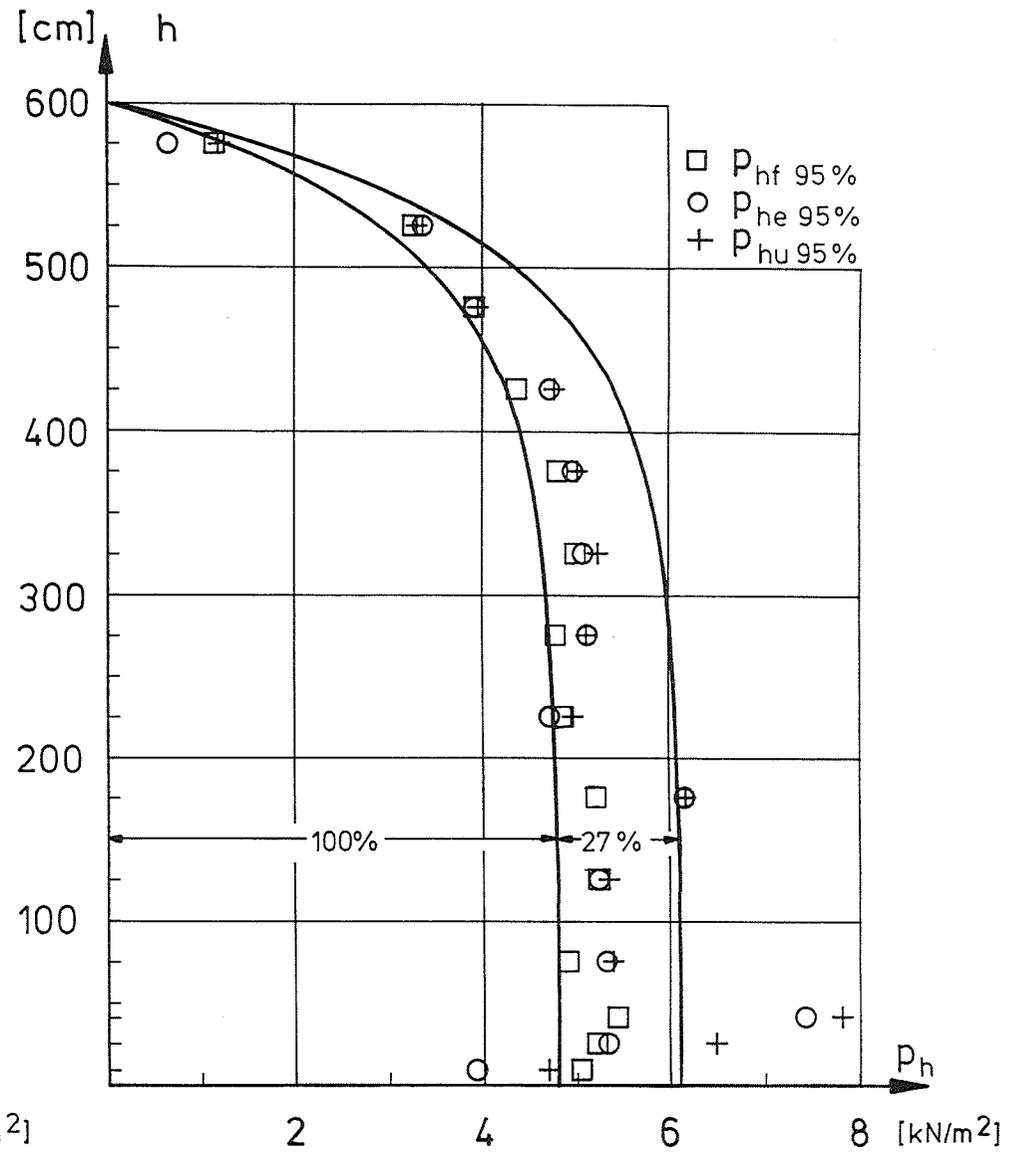


Schüttgut : Natursand  
 Silowand : glatt

Anlage 10 : 95%-Fraktilen der gemessenen Horizontaldrücke bei Trichter 62,5° und rechnerische Horizontaldruckverläufe bei ebenem Boden im Siloschaft

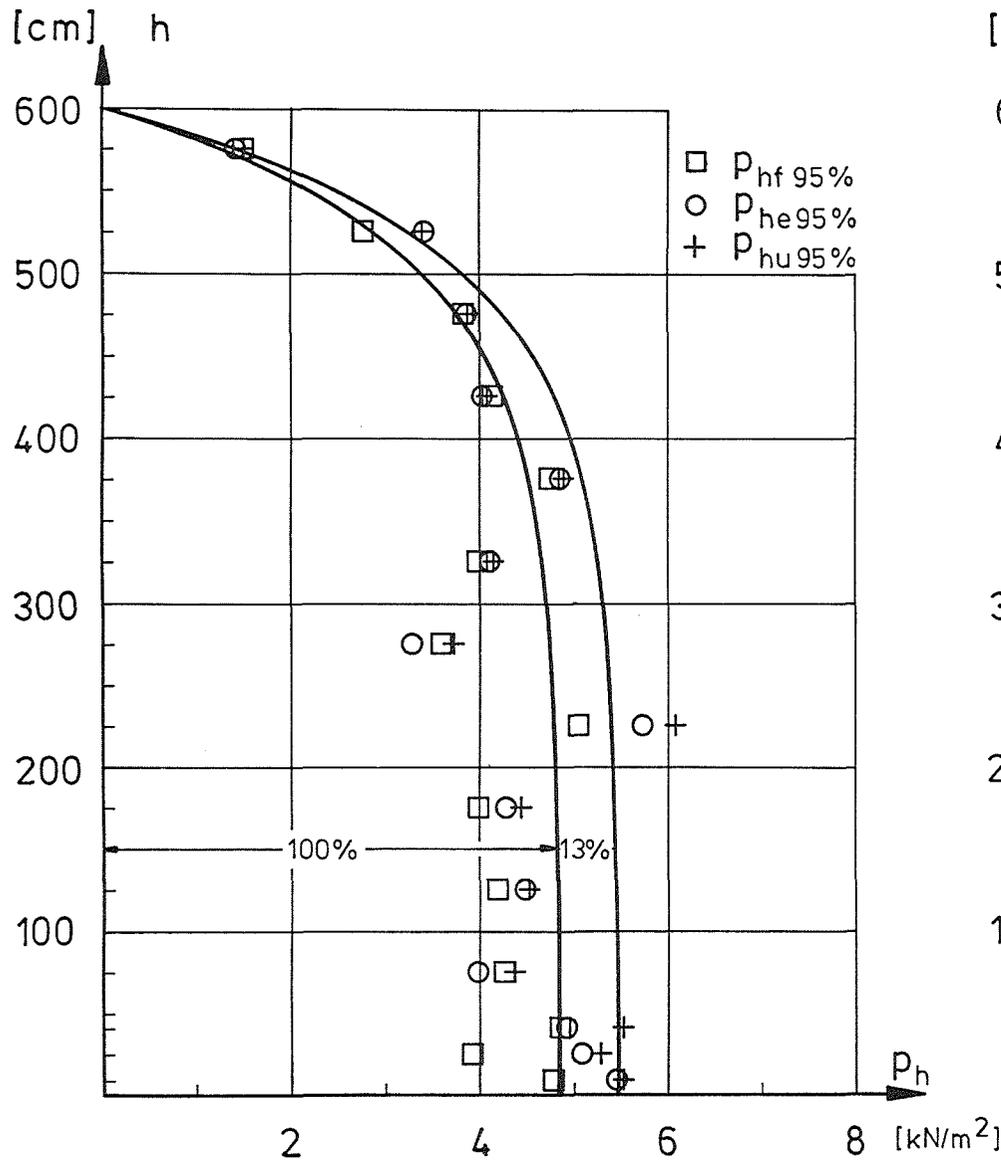


Schüttgut : Natursand  
 Silowand : rauh

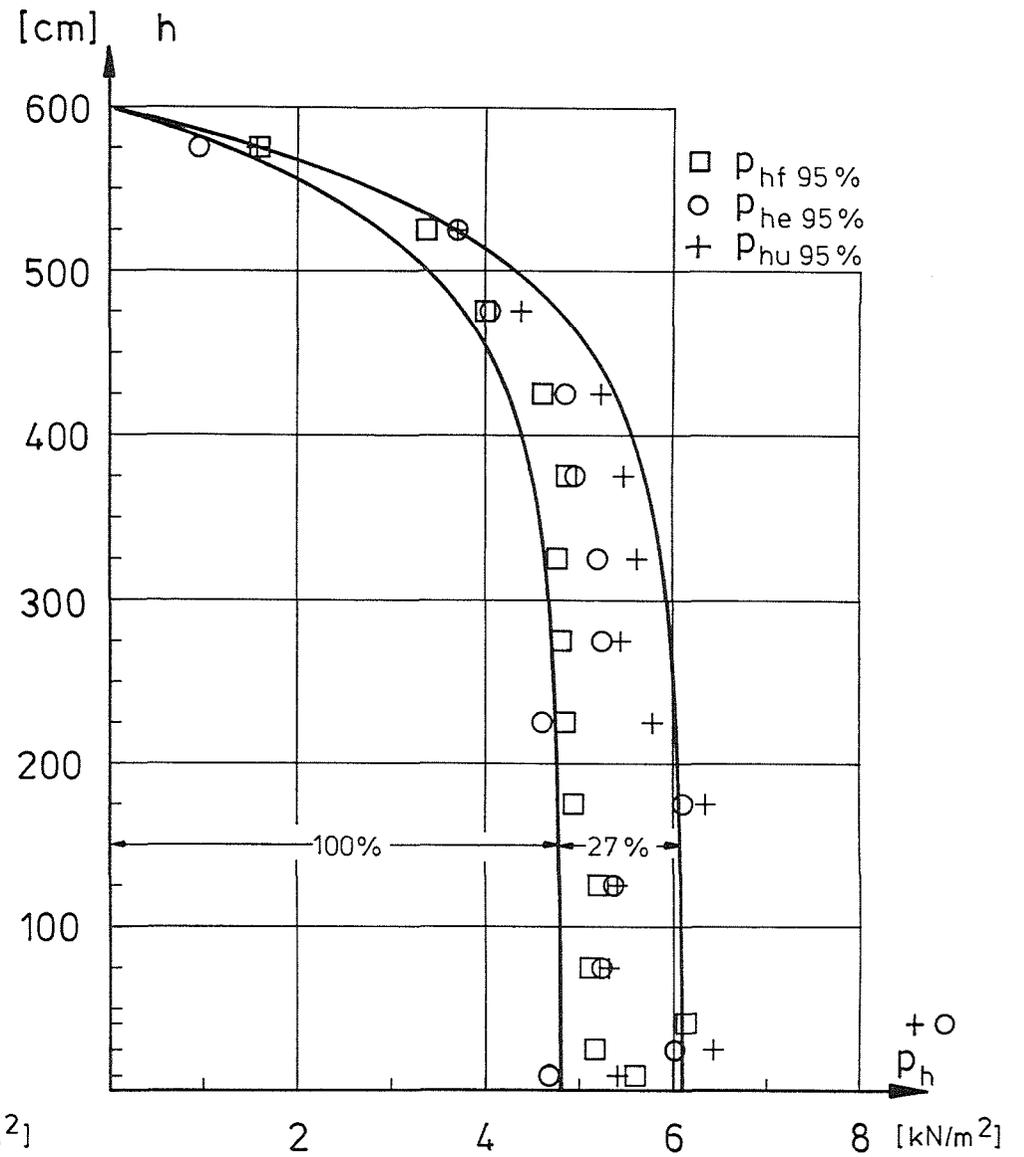


Schüttgut : Natursand  
 Silowand : glatt

Anlage 11 : 95%-Fraktile der gemessenen Horizontaldrücke bei Trichter 70° und rechnerische Horizontaldruckverläufe bei ebenem Boden im Siloschaft

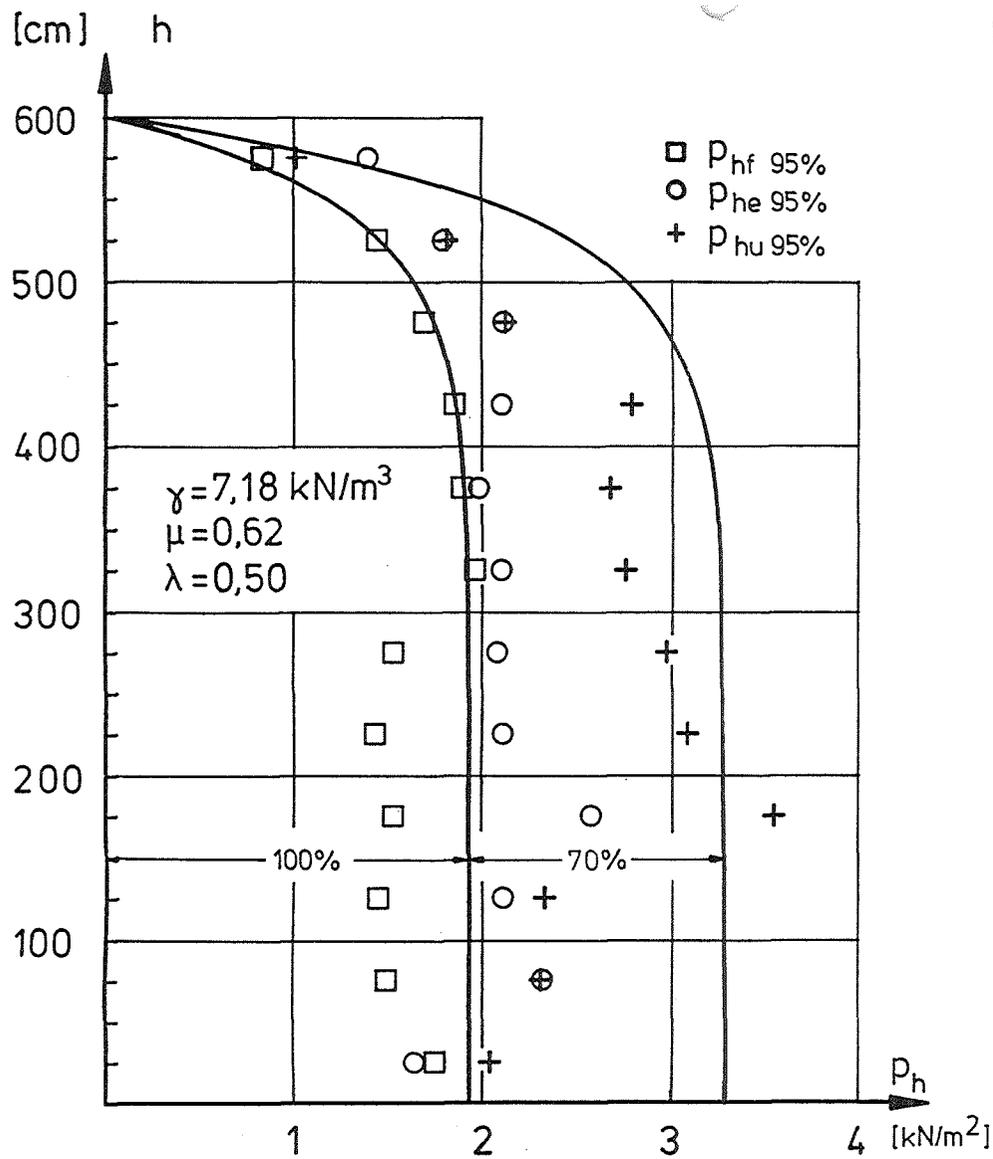


Schüttgut : Natursand  
 Silowand : rauh

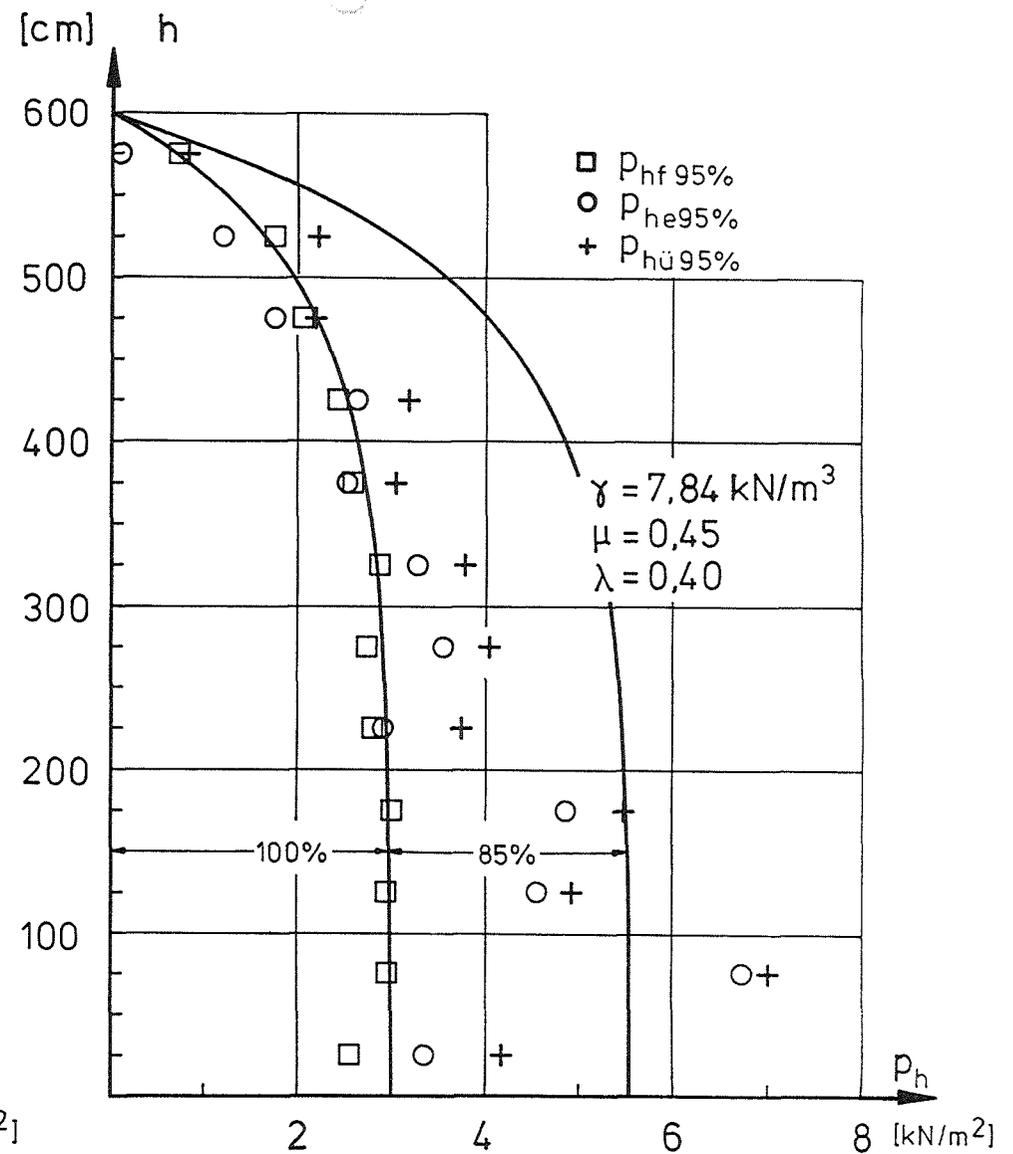


Schüttgut : Natursand  
 Silowand : glatt

Anlage 12 : 95%-Fraktile der gemessenen Horizontaldrücke bei Trichter 77,5° und rechnerische Horizontaldruckverläufe bei ebenem Boden im Siloschaft

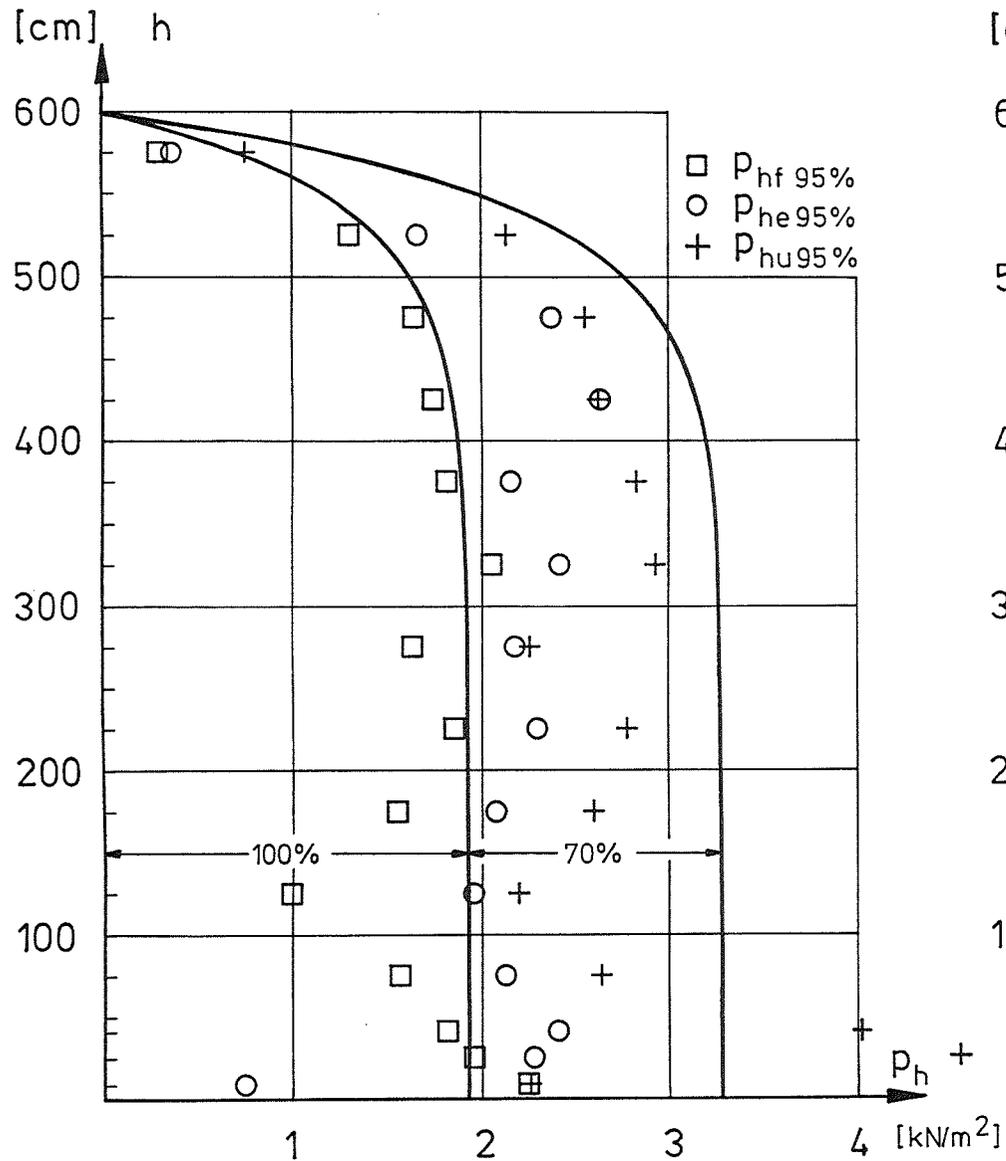


Schüttgut : Koks  
 Silowand : rauh

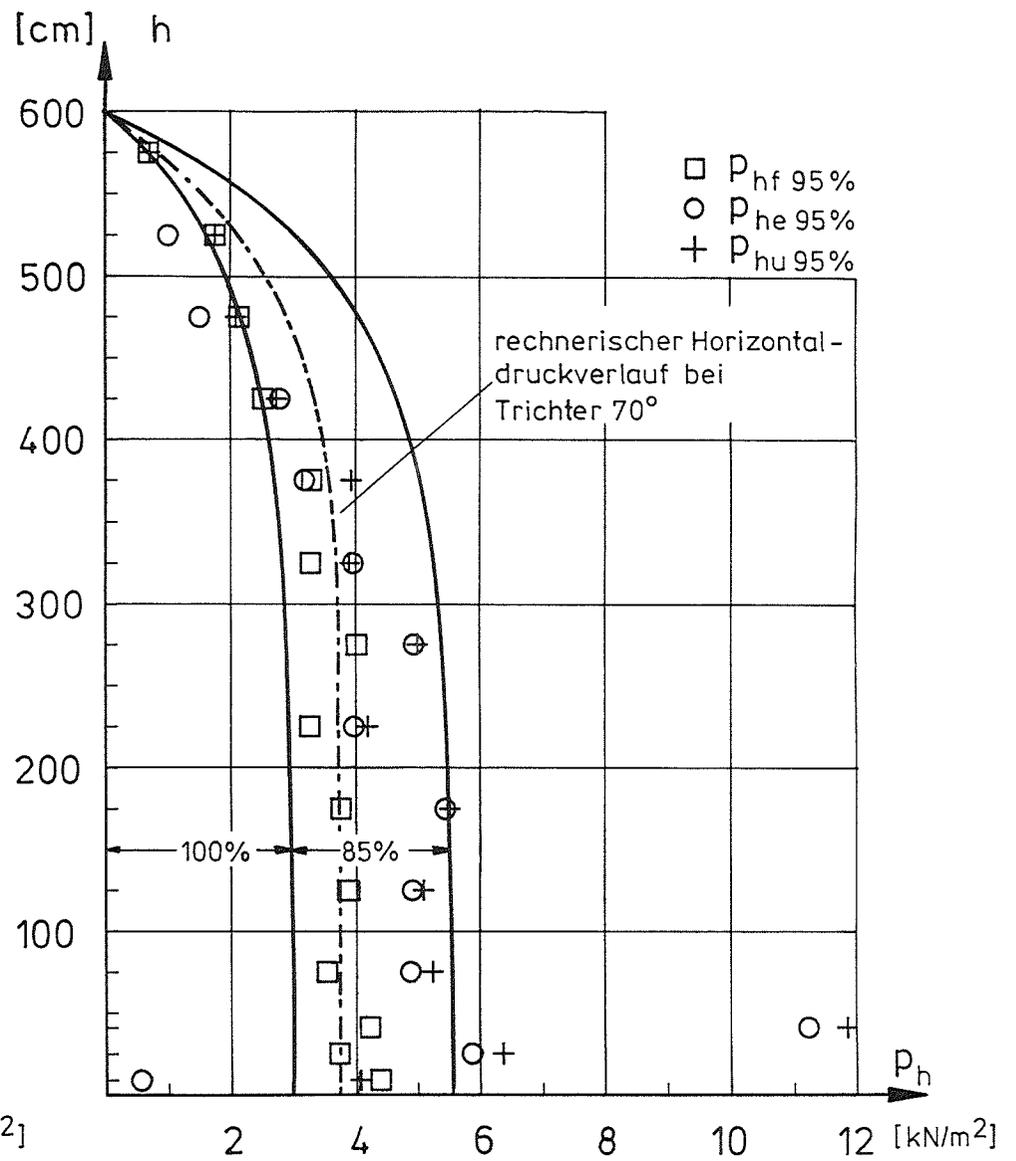


Schüttgut : Koks  
 Silowand : glatt

Anlage 13 : 95% -Fraktile der gemessenen Horizontaldrücke und rechnerische Horizontaldruckverläufe bei ebenem Boden

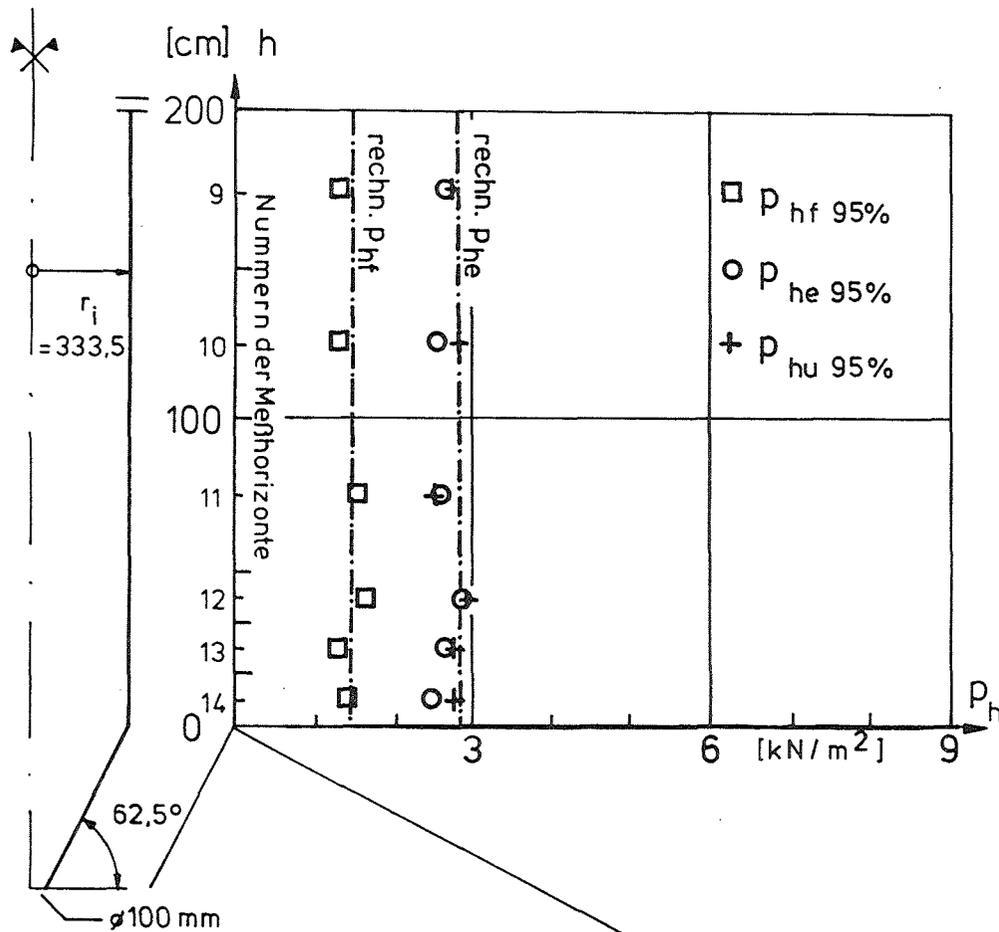


Schüttgut : Koks  
 Silowand : rauh

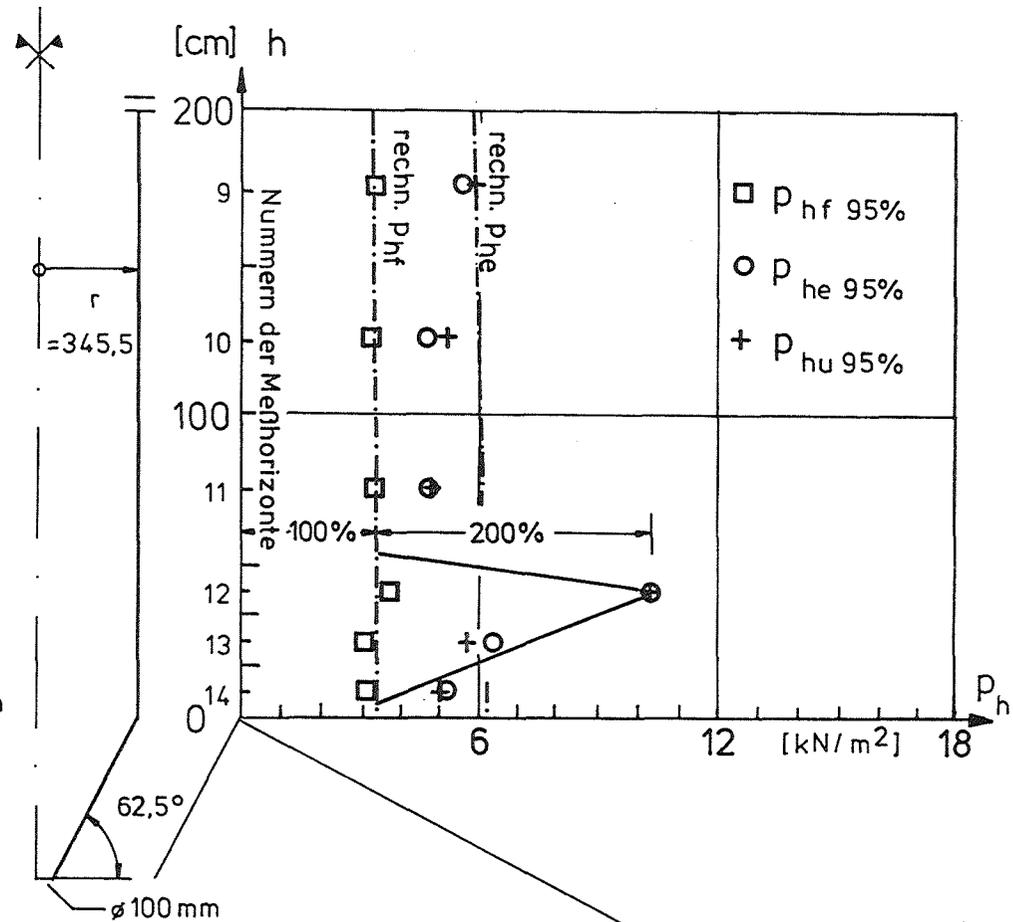


Schüttgut : Koks  
 Silowand : glatt

Anlage 14 : 95% - Fraktile der gemessenen Horizontaldrücke bei Trichter 70° und rechnerische Horizontaldruckverläufe bei ebenem Boden im Siloschaft

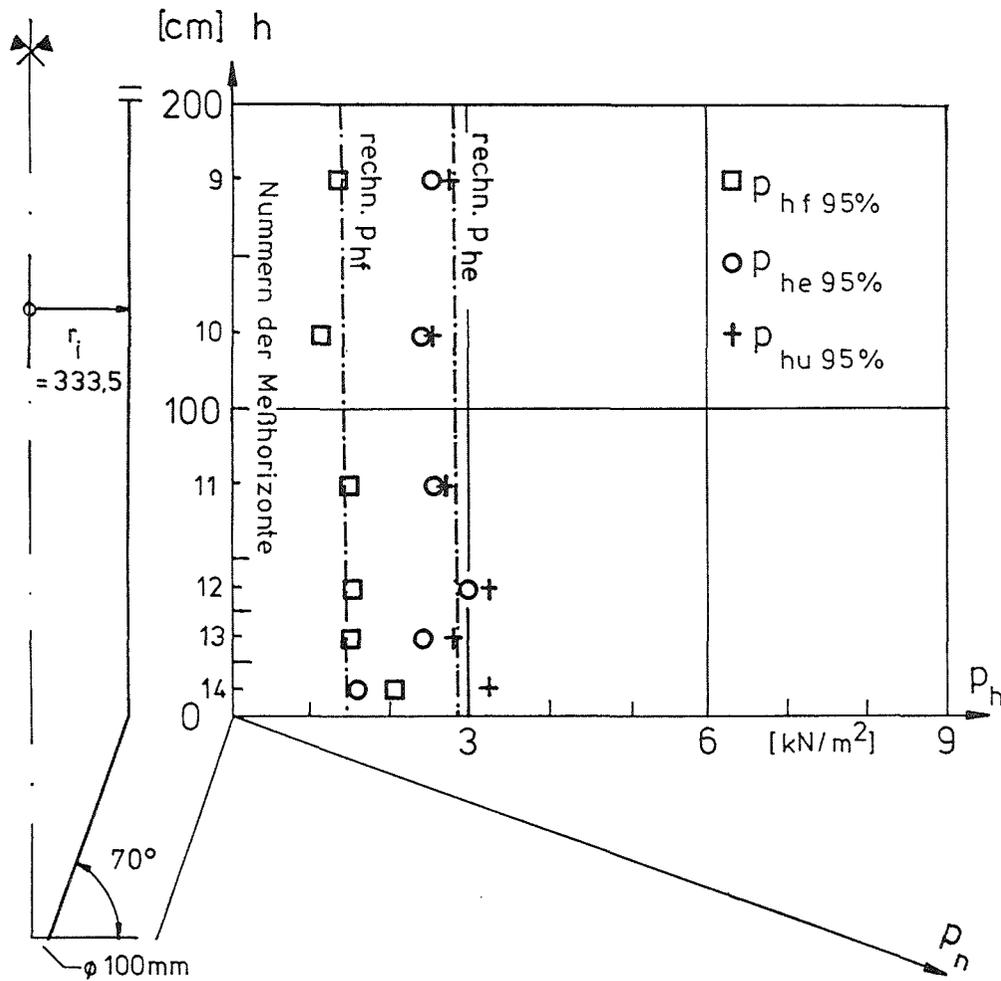


Schüttgut : Sojabohnen  
 Silowand : rauh

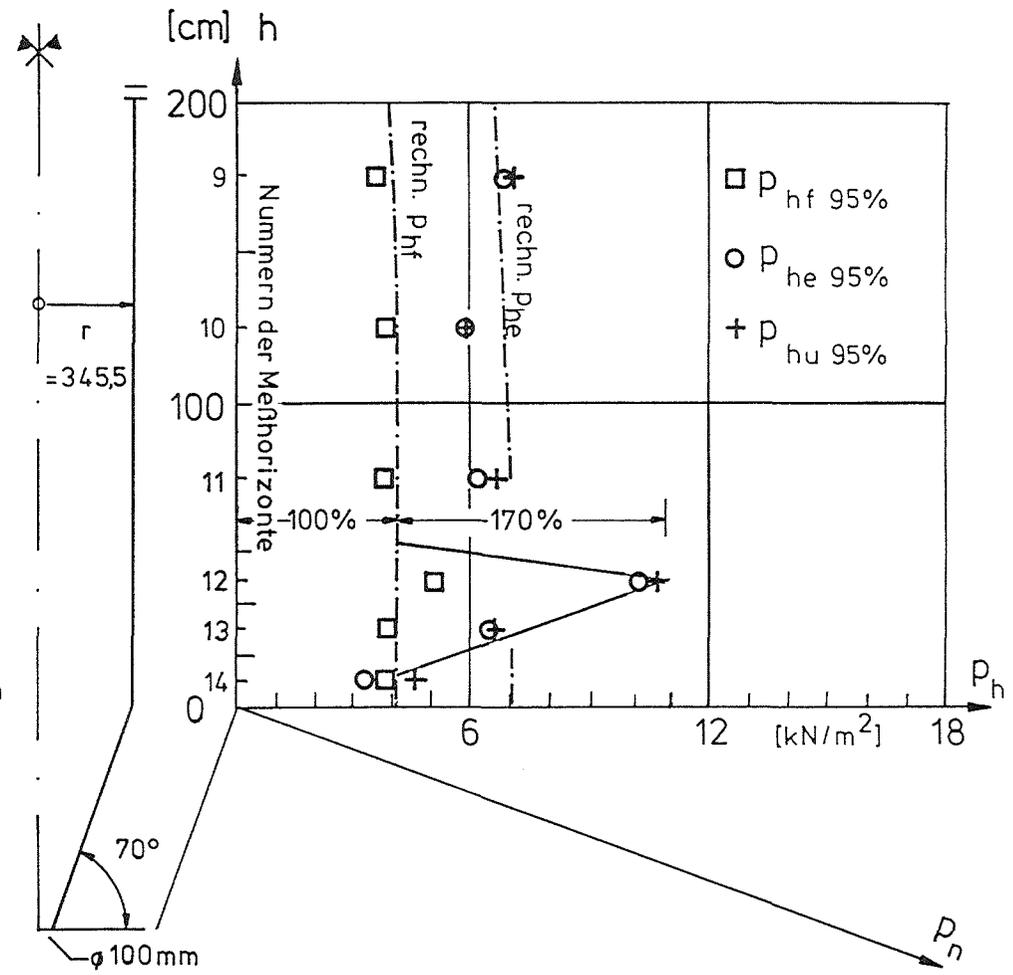


Schüttgut : Sojabohnen  
 Silowand : glatt

Anlage 15 : 95%-Fraktile der gemessenen Horizontaldrücke bei Trichter  $62,5^\circ$  im unteren Silobereich

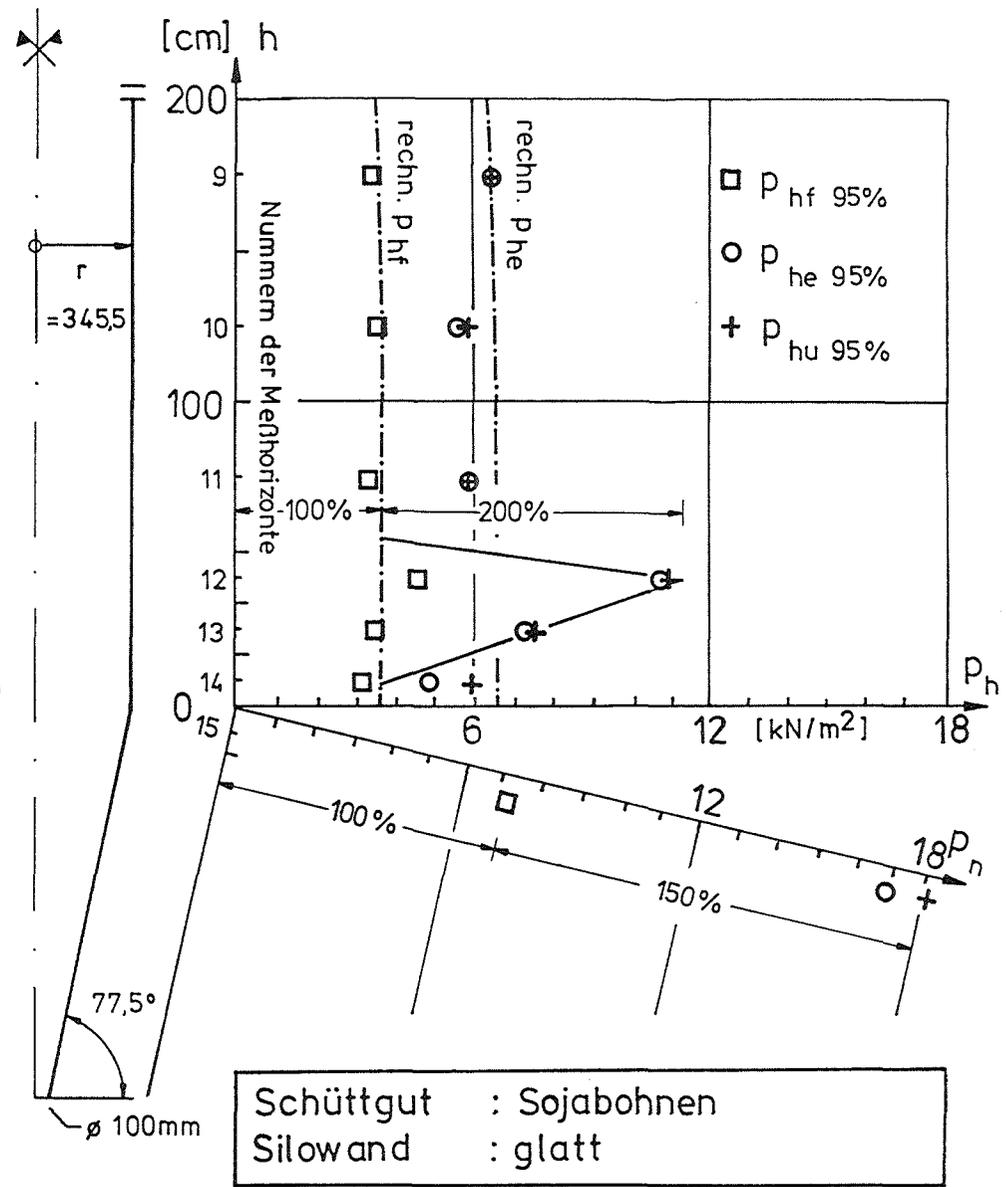
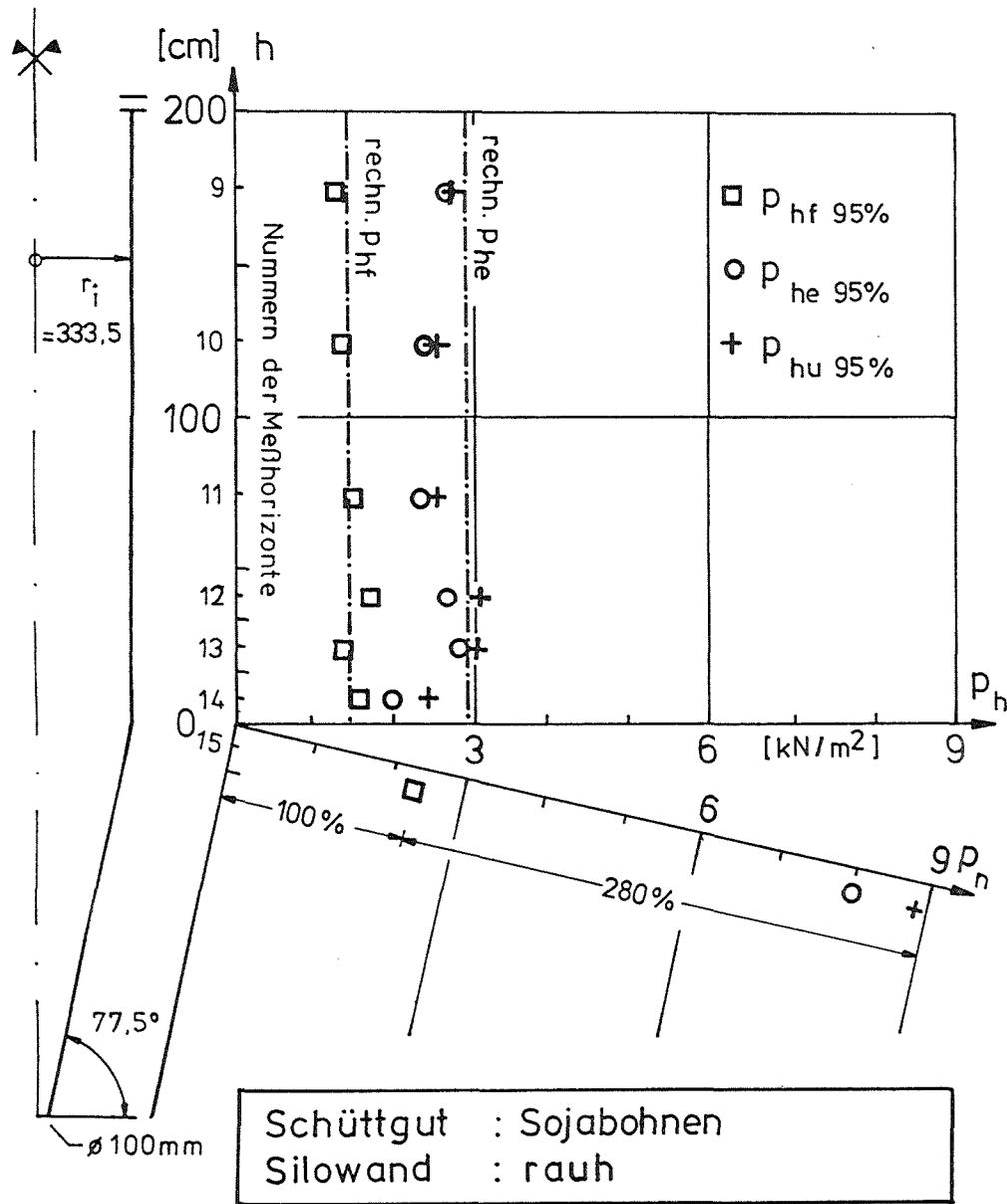


Schüttgut : Sojabohnen  
 Silowand : rauh

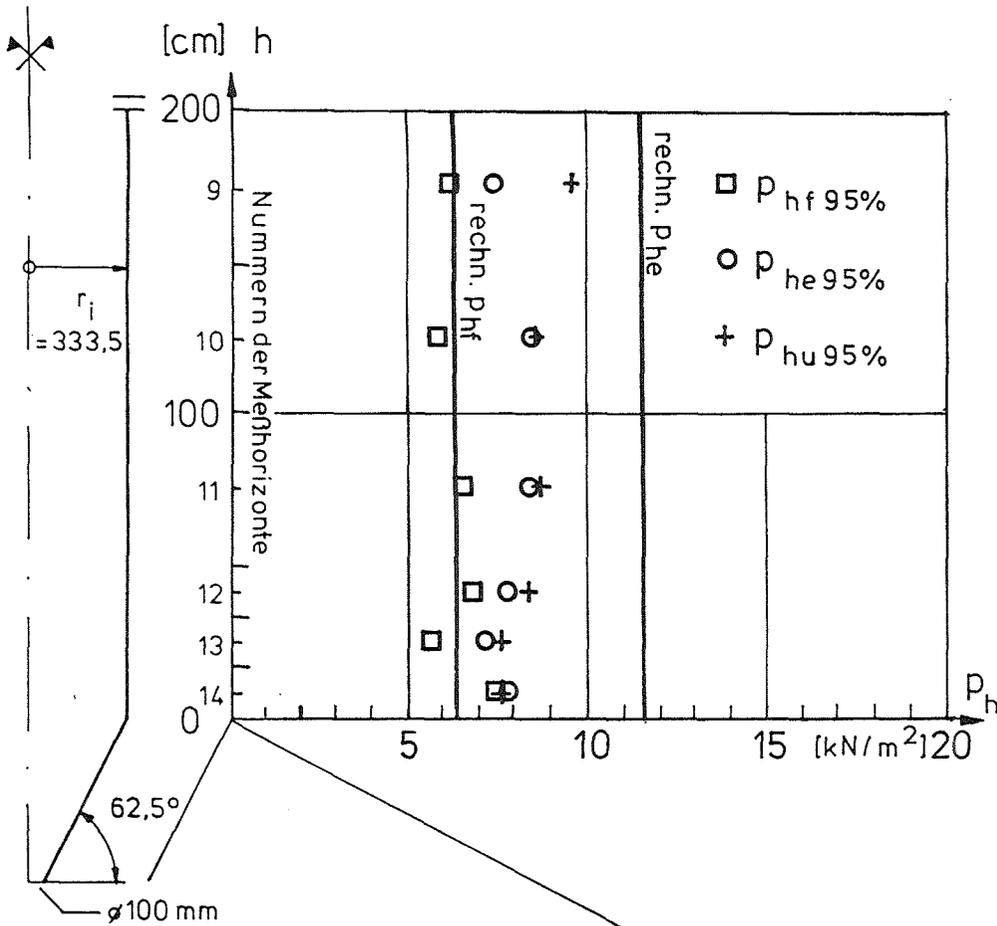


Schüttgut : Sojabohnen  
 Silowand : glatt

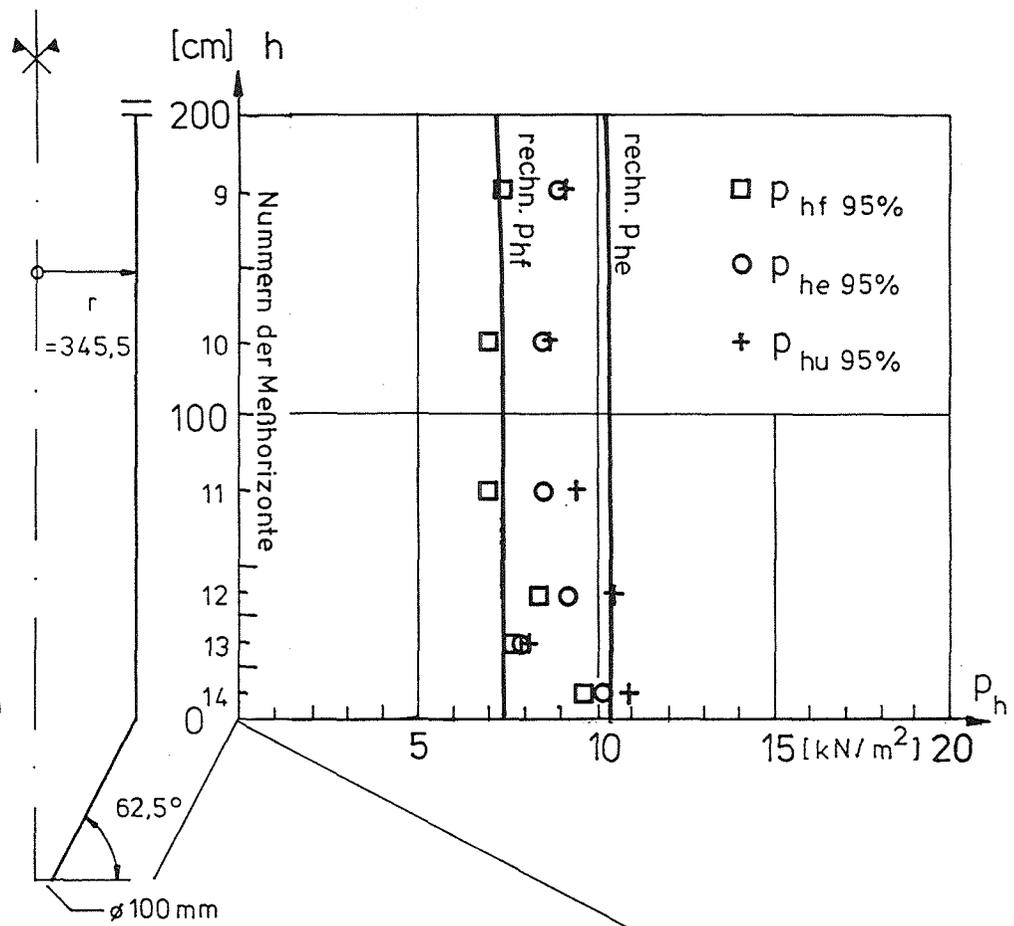
Anlage 16 :95%-Fraktilen der gemessenen Horizontaldrücke bei Trichter 70° im unteren Silobereich



Anlage 17 : 95%-Fraktile der gemessenen Horizontaldrücke bei Trichter 77,5° im unteren Silobereich und im Trichteransatz

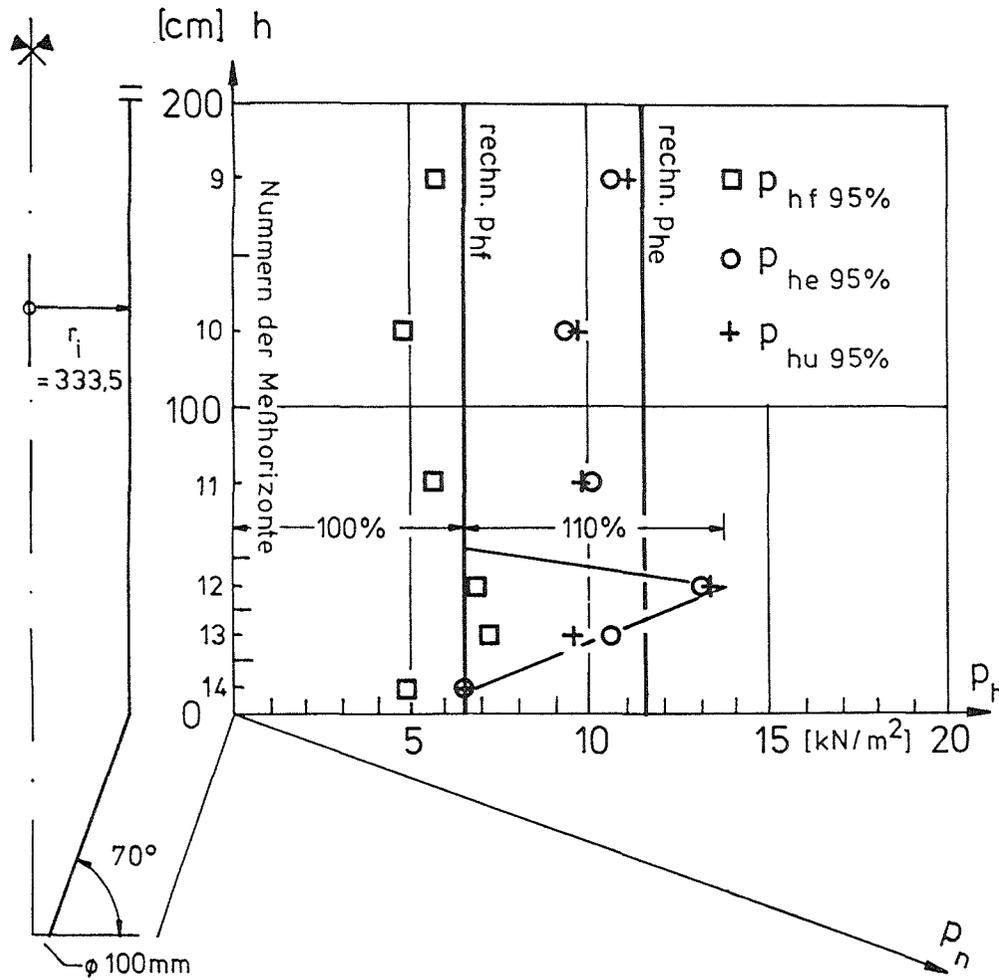


Schüttgut : Titanerz  
 Silowand : rauh

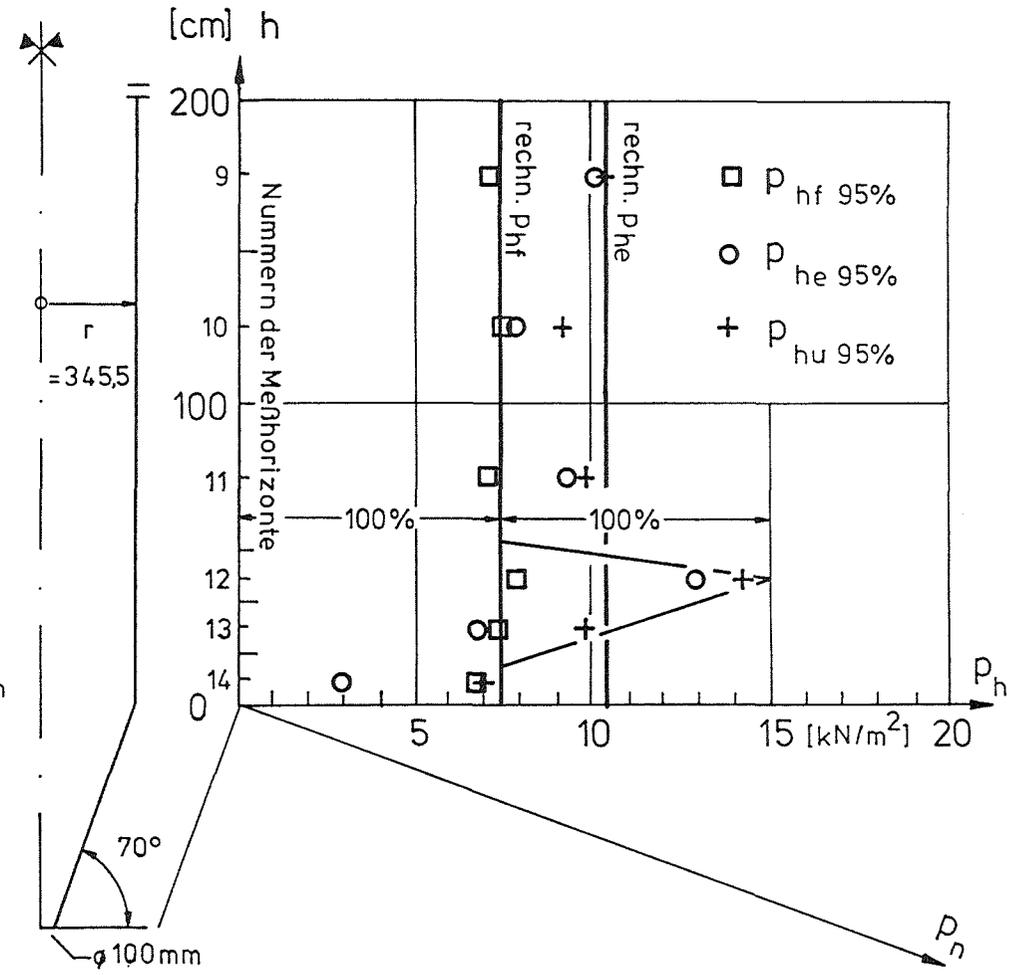


Schüttgut : Titanerz  
 Silowand : glatt

Anlage 18 : 95%-Fraktile der gemessenen Horizontaldrücke bei Trichter 62,5° im unteren Silobereich

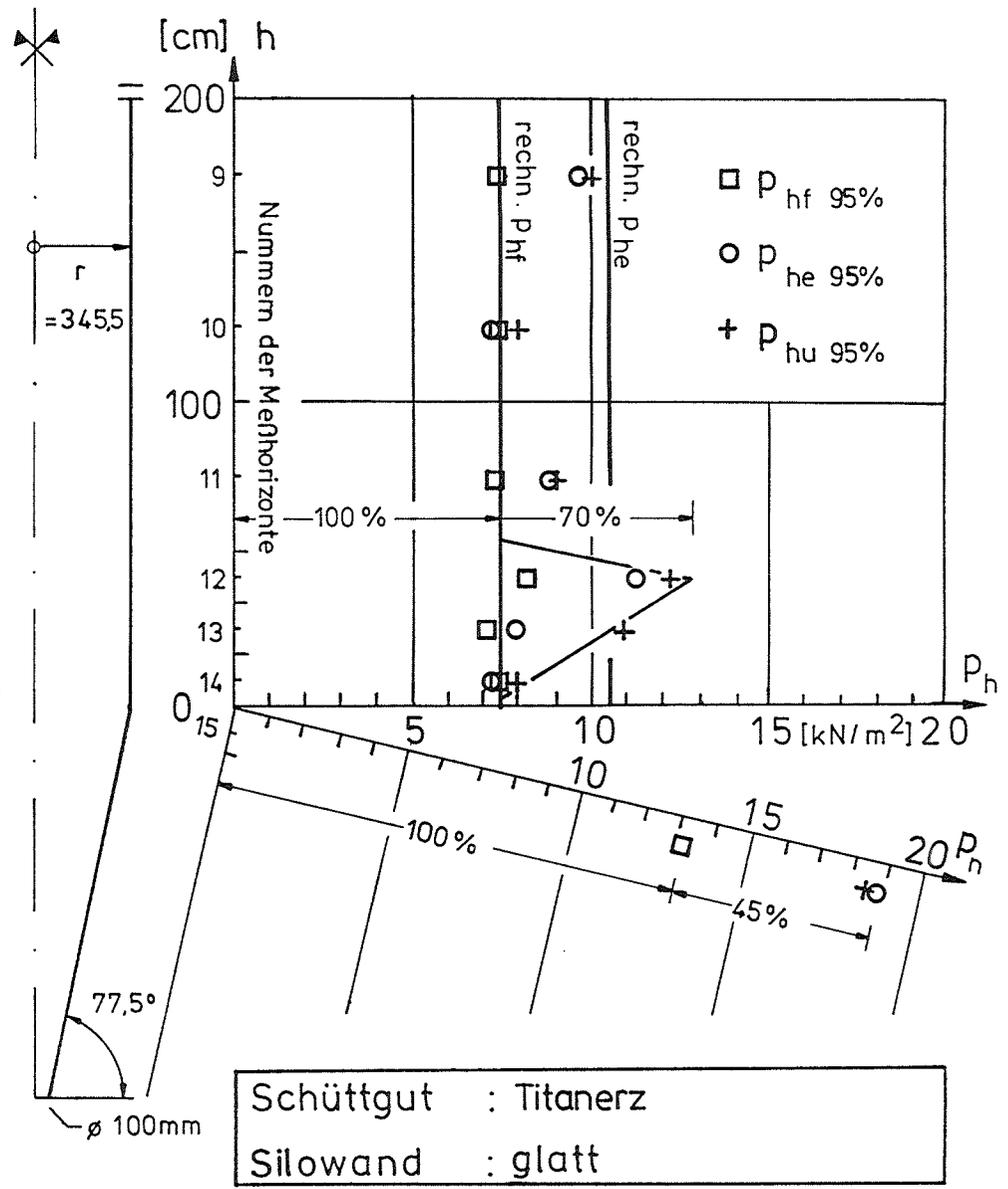
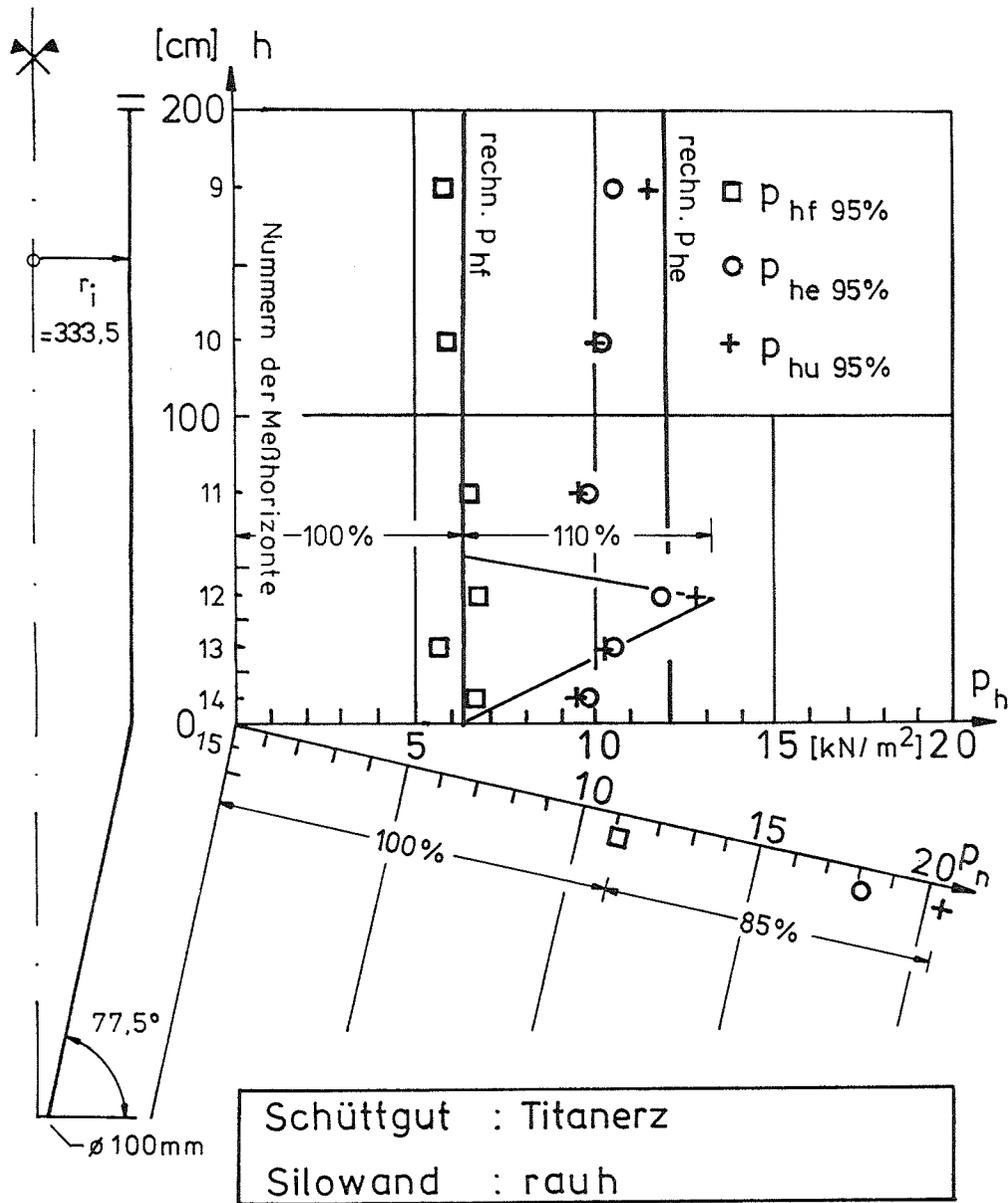


Schüttgut : Titanerz  
 Silowand : rauh

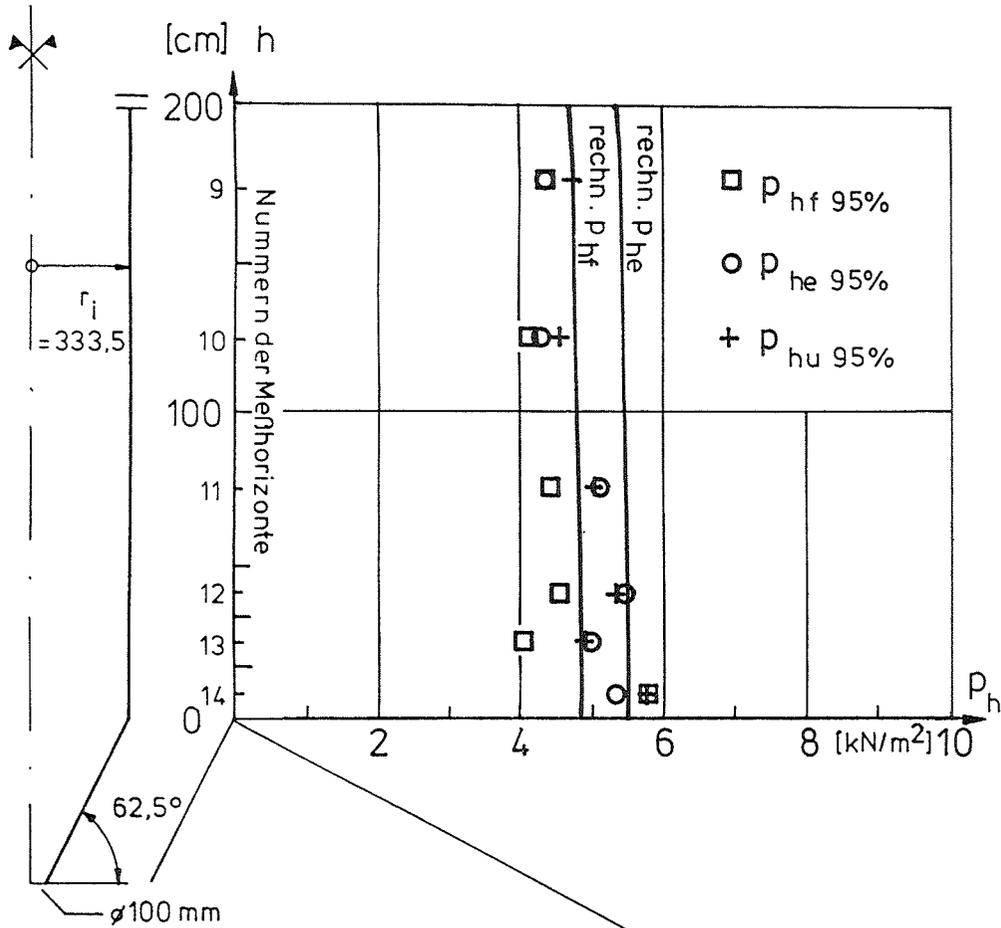


Schüttgut : Titanerz  
 Silowand : glatt

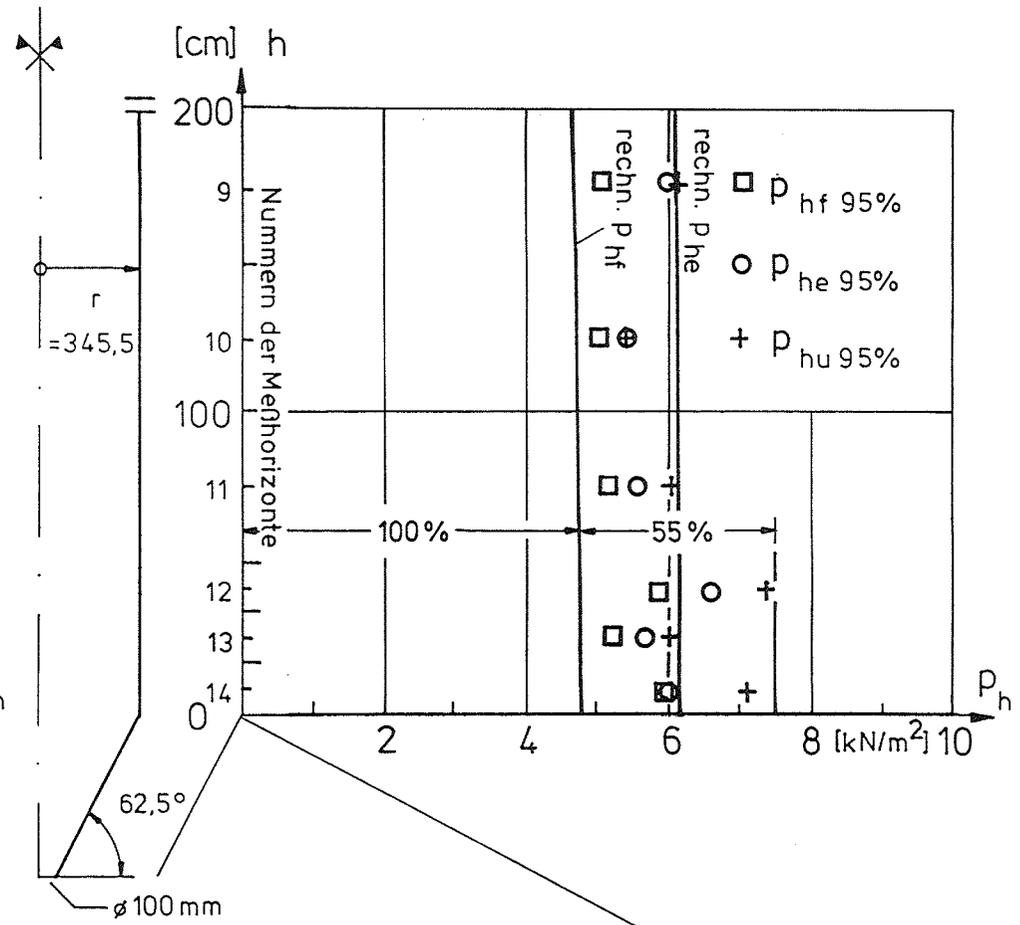
Anlage 19 : 95%-Fraktilen der gemessenen Horizontaldrücke bei Trichter 70° im unteren Silobereich



Anlage 20 : 95%-Fraktile der gemessenen Horizontaldrücke bei Trichter 77,5 im unteren Silobereich und im Trichteransatz

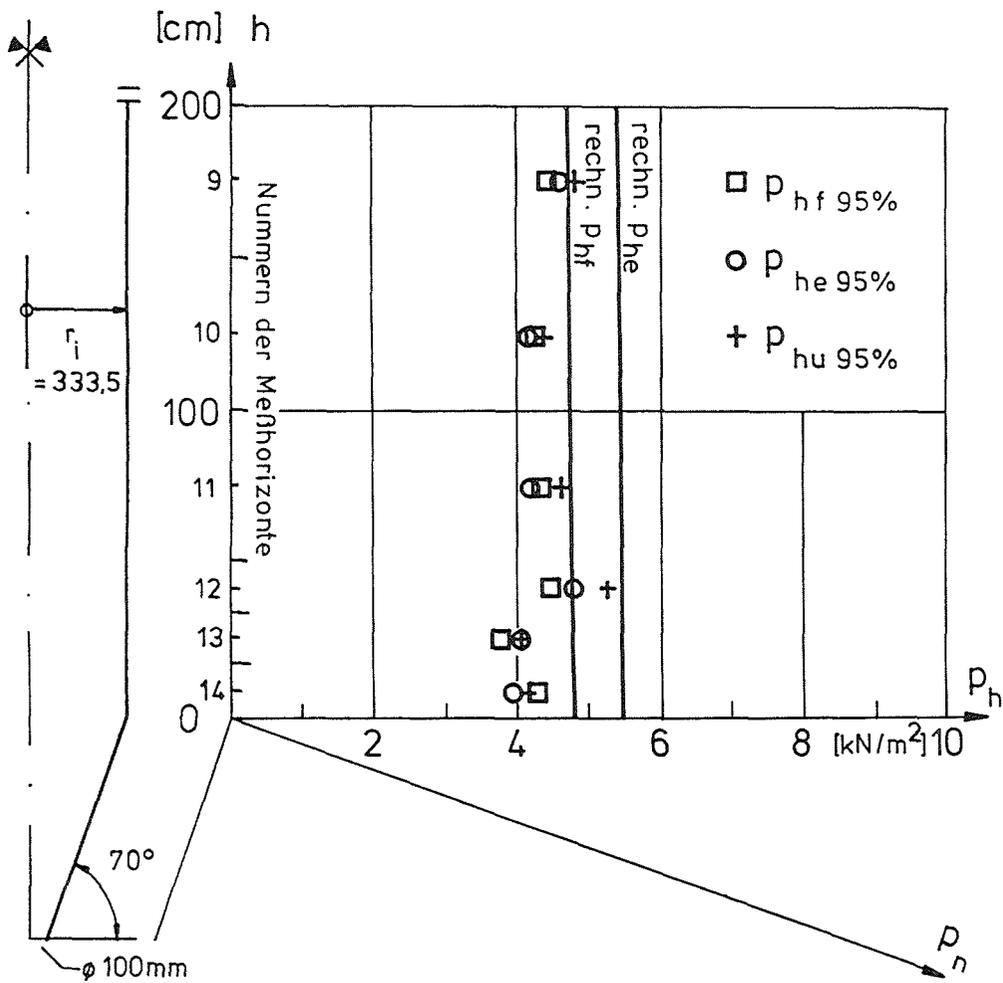


Schüttgut : Natursand  
 Silowand : rau

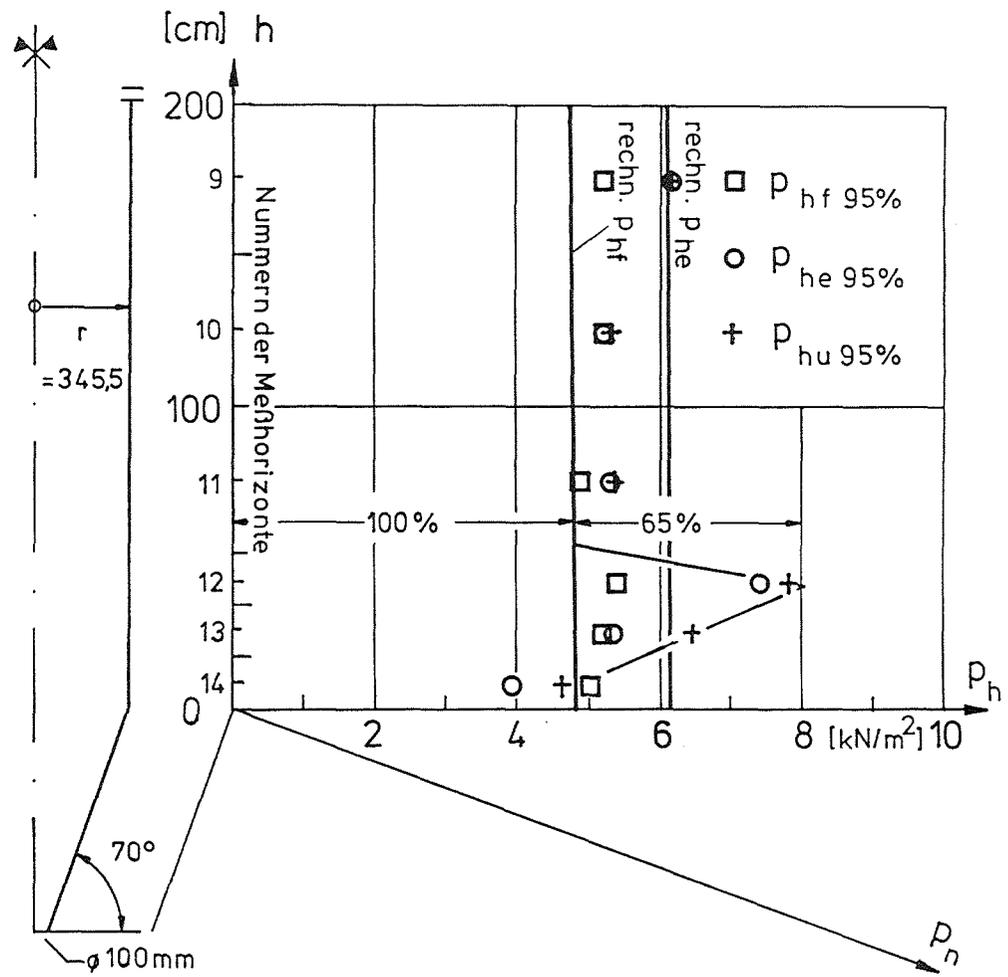


Schüttgut : Natursand  
 Silowand : glatt

Anlage 21 : 95%-Fraktile der gemessenen Horizontaldrücke bei Trichter 62,5° im unteren Silobereich

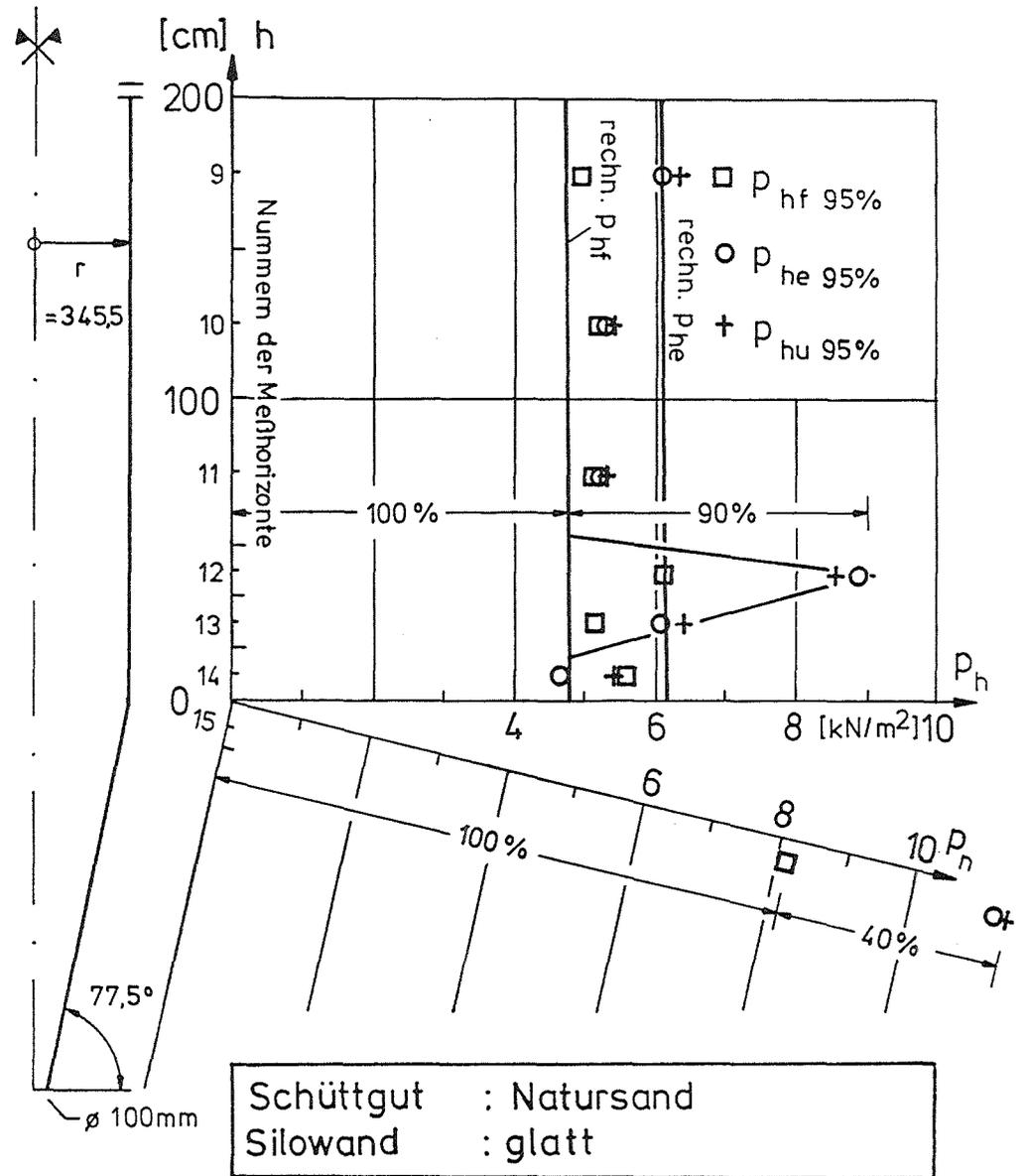
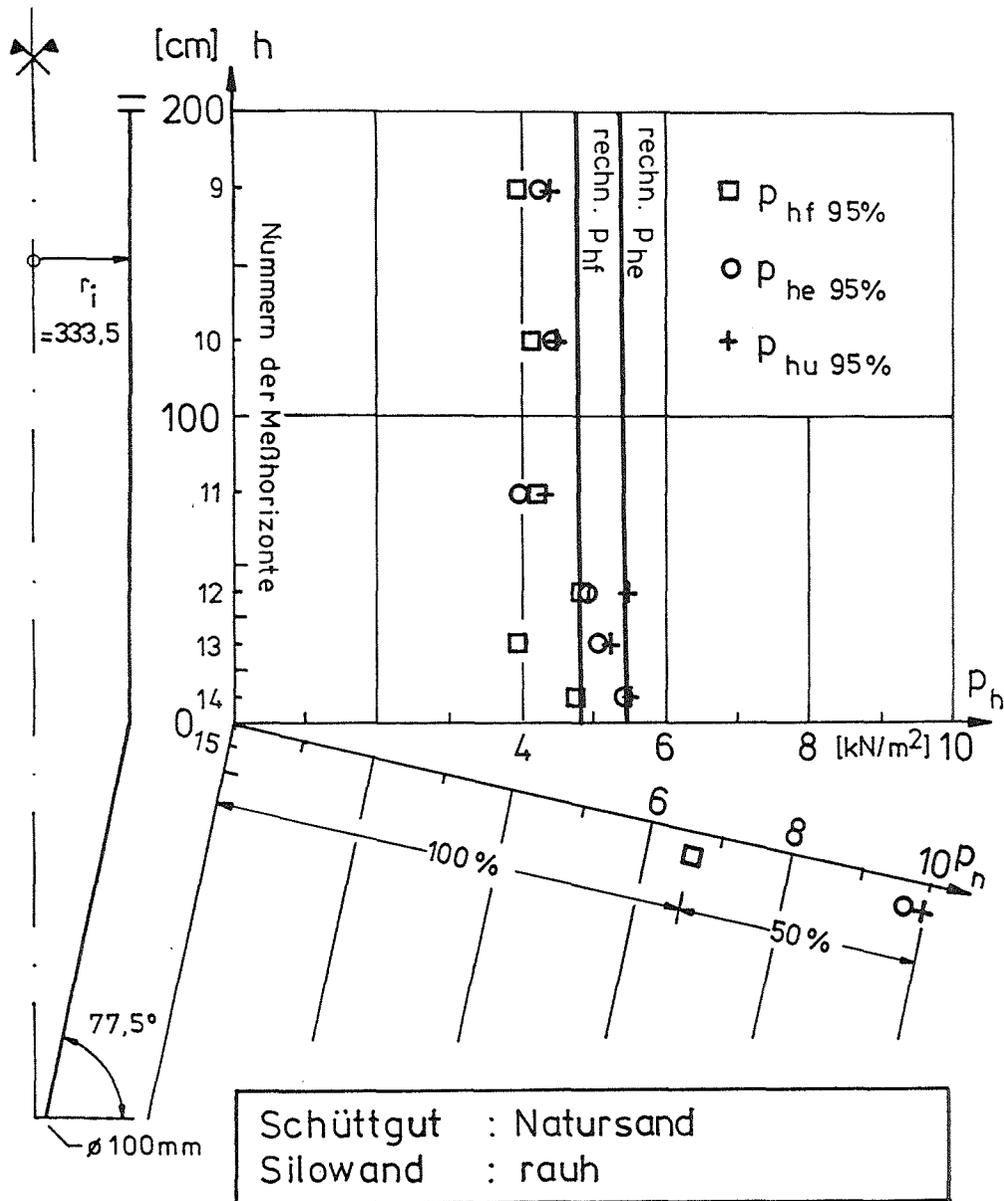


Schüttgut : Natursand  
 Silowand : rauh

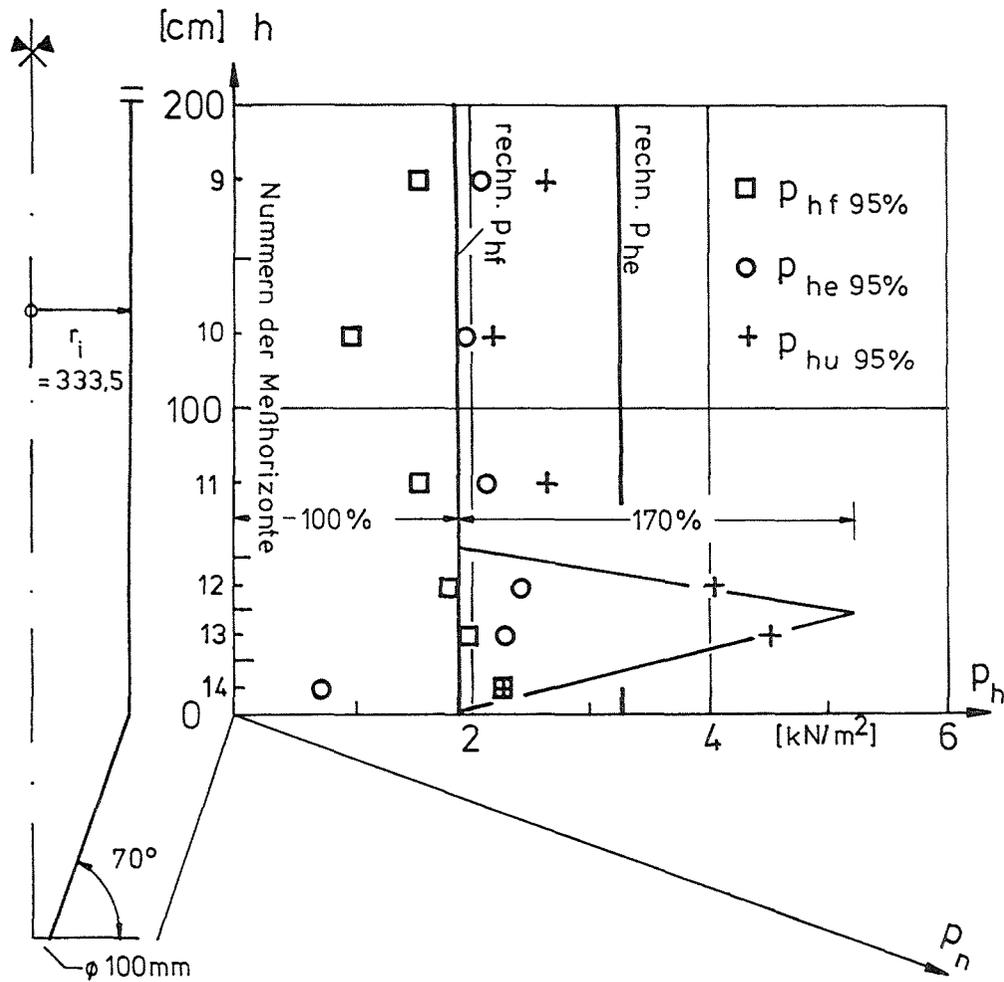


Schüttgut : Natursand  
 Silowand : glatt

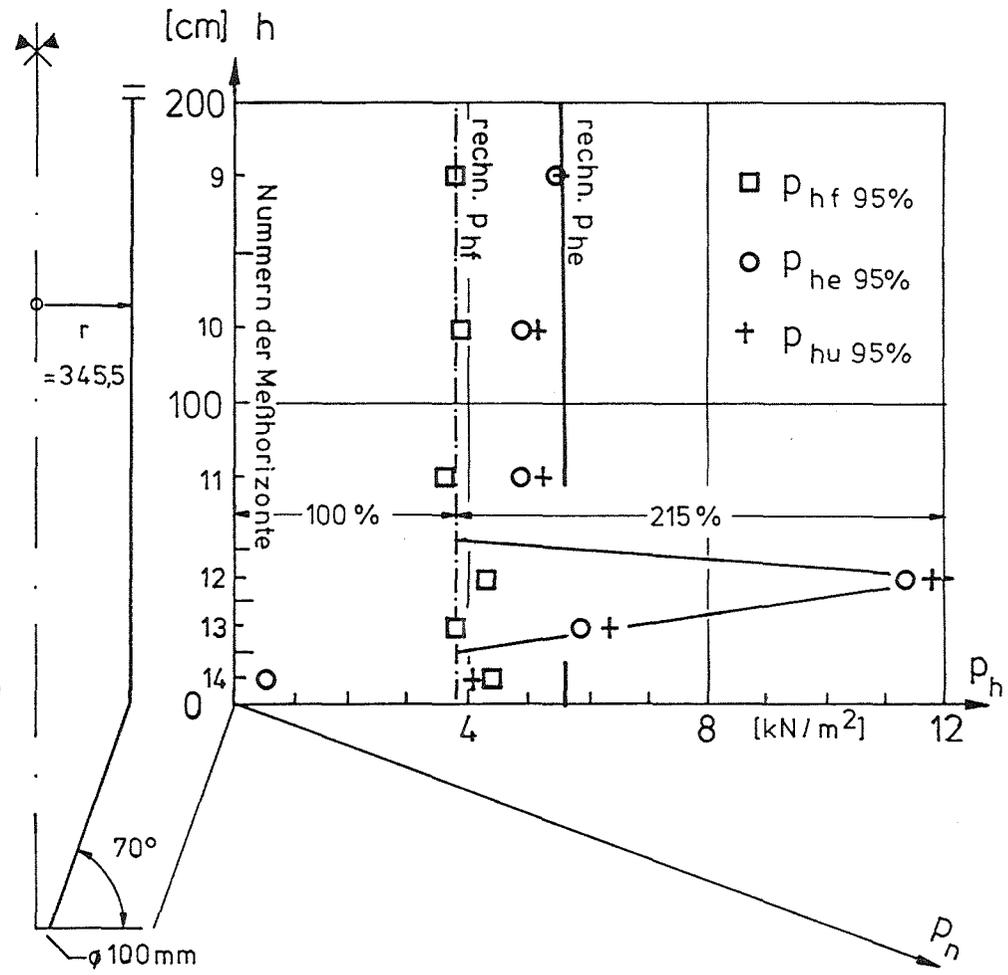
Anlage 22 : 95%-Fraktilen der gemessenen Horizontaldrücke bei Trichter  $70^\circ$  im unteren Silobereich



Anlage 23 : 95%-Fraktile der gemessenen Horizontaldrücke bei Trichter 77,5° im unteren Silobereich und im Trichteransatz



Schüttgut : Koks  
 Silowand : rauh



Schüttgut : Koks  
 Silowand : glatt

Anlage 24 :95%-Fraktile der gemessenen Horizontaldrücke bei Trichter 70° im unteren Silobereich

K u r z f a s s u n g des Abschlußberichtes

Forschungsvorhaben: MESSUNG DER BEI MASSENFLUSS AM ÜBERGANG DER SILOZELLE ZUM TRICHTER AUFTRETENDEN LASTSPITZE, DES "SWITCH"

Forschende Stelle: Prof.em. Dr.-Ing. Klaus Pieper  
Techn. Universität Braunschweig  
Lehrstuhl für Hochbaustatik  
Pockelsstraße 4, Tel. 0531/391-3571  
3300 Braunschweig

Sachbearbeiter: Dipl.-Ing. Hans-Günter Schneider

Im Entwurf DIN 1055 Teil 6 - Lastannahmen für Bauten, Lasten in Silozellen - wird im Abschnitt 3.5.4 auf das Auftreten von Lastspitzen am Übergang vom Siloschaft zum Trichter hingewiesen. In der Literatur sind jedoch nur wenige und stark divergierende Angaben über die Lastspitzen vorhanden. Besonders über die Größe der Lastspitze, ihre Abhängigkeit vom Schüttgut und über die Größe der Fläche, auf der die Lastspitze auftreten kann, sind nur unzureichende Angaben bekannt.

Unter verschiedenen Randbedingungen wurden daher diese Schüttgutdrücke für Sojabohnen, Titanerz, Natursand und Koks im Braunschweiger "Norm-Meßsilo" ermittelt. Der bestehende zylindrische Silo wurde dazu etwas umgebaut. Für den untersten von 12 Meßringen mit je 0,500 m Höhe und 0,691 m Durchmesser wurden drei niedrige Meßringe eingebaut, die im Prinzip wie die übrigen Meßringe konstruiert waren.

Die Untersuchungen wurden mit drei konischen Trichtern mit Neigungswinkeln gegen die Horizontale von 62,5°, 70° und 77,5° durchgeführt. Der steile Trichter war zweiteilig ausgeführt, wobei das Oberteil im Prinzip den niedrigen Meßringen mit 0,167 m Höhe entsprach.

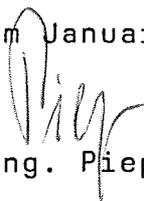
Somit konnten die Schüttgutdrücke  $p_h$  und  $p_w$  im Übergangsbereich integriert über den Umfang und eine Höhe von 0,167 m entsprechend 0,24 · d gemessen werden.

Mit dem steilen Trichter trat bei allen Schüttgütern Massenfluß auf. Bei den kleineren Trichterneigungen war dies nur mit den Schüttgütern mit geringer Wandreibung festzustellen.

Für die untersuchten Schüttgüter kann die maximale Ordinate der Lastspitze mit 3,5  $p_{hf}$  angegeben werden. Die Form läßt sich durch ein gleichschenkliges Dreieck mit 0,8 · d Basisbreite über dem Trichtertrand, das auf die Füllkurve aufgesetzt wird, beschreiben.

Im oberen Trichterbereich ergab sich, bezogen auf den Füllwert, eine bis zu 250 % höhere Normallast als nach dem Norm-Entwurf.

Braunschweig, im Januar 1986

  
(Prof.em. Dr.-Ing. Pieper)

## S U M M A R Y of Final Report

Research project: MEASUREMENT OF THE PEAK LOAD OCCURRING WITH MASS FLOW AT THE TRANSITION OF THE SILO BIN TO THE FUNNEL, THE SO-CALLED "SWITCH"

Research institute: Prof.em. Dr.-Ing. Klaus Pieper  
Techn. Universität Braunschweig  
Lehrstuhl für Hochbaustatik  
Pockelsstraße 4, Tel. 0531/391-3571  
3300 Braunschweig

Technical supervisor: Dipl.-Ing. Hans-Günter Schneider

In the draft DIN 1055, part 6 - design loads for buildings; loads in silo bins - in section 3.5.4 it is referred to the occurrence of peak loads at the transition from the silo shaft to the funnel. However, in the technical literature only few and considerably divergent data on these peak loads can be found. Especially as to the size of the peak load, its dependence on the bulk material used or the size of the areas on which a peak load may occur only insufficient data is available.

Therefore the bulk material pressures for soybeans, titaniferous ore, natural sand and coke were determined in the Braunschweig "standard measuring silo" under different marginal conditions. For this purpose the existing cylindrical silo was slightly reconstructed. The lowest of the 12 measuring rings, each of 0.500 m height and a diameter of 0.691 m, was replaced by three lower measuring rings which, in principle, were of the same construction as the other measuring rings.

The tests were carried out with three conical funnels with angles of inclination of  $62.5^\circ$ ,  $70^\circ$  and  $77.5^\circ$  against the horizontal line. The steep funnel consisted

## A\_b\_r\_é\_g\_é\_\_du\_rapport\_final

Projet de recherches           MESURAGE DE LA POINTE DE CHARGE  
                                  QUI SE PRODUIT AU PASSAGE ENTRE  
                                  LA CHAMBRE SILO ET LA TRÉMIE  
                                  LORS DU FLUX DES MASSES,  
                                  - APPELEE "SWITCH" -

Lieu de recherches            Prof.em. Dr.-Ing. Klaus Pieper  
                                  Techn. Universität Braunschweig  
                                  Lehrstuhl für Hochbaustatik  
                                  Pockelsstraße 4, Tel. 0531/391-3571  
                                  3300 Braunschweig

Personne compétente         Dipl.-Ing. Hans-Günter Schneider

Le projet de norme DIN 1055, 6ème partie, - Charges admises pour constructions, charges dans des silos -, signale l'apparition de pointes de charge dans la partie entre la chambre silo et la trémie.

La littérature ne donne à ce sujet que peu d'indications lesquelles divergent fortement. Il n'existe surtout pas des renseignements concernant la grandeur de la pointe de charge, son dépendance du produit en vrac et la grandeur de la surface sur laquelle peut se produire la pointe de charge.

C'est voilà pourquoi on a déterminé à des conditions marginales diverses les charges des produits en vrac suivants: fève de soja, fer titané, sable naturel et coke, à l'aide du "silo de mesure standardisé" de Brunswick. A cette fin, le silo cylindrique existant a été modifié un peu. Pour le dernier des 12 anneaux de mesure qui ont une hauteur de 0,500 m et un diamètre de 0,691 m chacun, ont été installés trois anneaux de mesure plus bas qui étaient en principe construits de la même façon que les autres anneaux.

Les recherches ont été effectuées avec trois trémies coniques avec des angles d'inclinaison contre la horizontale de 62,5°, 70° et 77,5°. La trémie raide est construite en deux parties, la partie supérieure ayant en principe la même hauteur que les anneaux de mesure bas, c'est-à-dire 0,167 m.

Ainsi, les charges  $p_h$  et  $p_w$  ont pu être mesurées conformément à 0,24 . d dans la zone de passage intégralement par le périmètre et une hauteur de 0,167 m.

Grâce à la trémie raide un flux des masses est apparu dans le cas de tous les produits en vrac. Dans le cas des inclinaisons de la trémie plus petites, on n'a constaté ce phénomène qu'avec les produits en vrac d'un frottement plus faible de la paroi.

Pour les produits en vrac examinés l'ordonnée maximale de la pointe de charge peut être indiquée avec 3,5 phf. La forme se laisse décrire par un triangle isocèle d'une largeur de base de 0,8 . d au-dessus du bord de la trémie, lequel sera posé sur la courbe de remplissage. Dans la partie supérieure de la trémie on a constaté - appliqué à la valeur de remplissage - une charge normale qui peut être jusqu'à 250 % plus haute que celle du projet de norme.

Braunschweig, en janvier 1986

Z u s a m m e n f a s s u n g \_ \_ \_ des Abschlußberichtes  
mit Wertung für die praktische Anwendung

Forschungsvorhaben:           MESSUNG DER BEI MASSENFLUSS AM  
                                  ÜBERGANG DER SILOZELLE ZUM TRICHTER  
                                  AUF TRETENDEN LASTSPITZE, DES "SWITCH"

Forschende Stelle:           Prof.em. Dr.-Ing. Klaus Pieper  
                                  Techn. Universität Braunschweig  
                                  Lehrstuhl für Hochbaustatik  
                                  Pockelsstraße 4, Tel. 0531/391-3571  
                                  3300 Braunschweig

Sachbearbeiter:               Dipl.-Ing. Hans-Günter Schneider

**A U F G A B E N S T E L L U N G :**

Bei vielen industriellen Prozessen ist beim "Lagern und Bewegen" von Schüttgütern Massenfluß erwünscht. Aus theoretischen Untersuchungen ergeben sich dann am Übergang zwischen Trichter und Siloschaft große Lastspitzen, die in der englischsprachigen Literatur als "Switch" bezeichnet werden.

Im Entwurf DIN 1055 Teil 6 - Lastannahmen für Bauten, Lasten in Silozellen - wird im Abschnitt 3.5.4 auch auf das Auftreten von Lastspitzen hingewiesen. In der Literatur sind jedoch nur wenige und stark divergierende Angaben darüber vorhanden. Besonders über die Größe der Lastspitze, ihre Abhängigkeit vom Schüttgut und über die Größe der Fläche, auf der die Lastspitze auftreten kann, sind nur unzureichende Angaben bekannt.

Für drei Schüttgüter wurden die Drücke auf die Silowand am Übergang zum Trichter bei Massenfluß im Braunschweiger Siloversuchsstand gemessen.

**M E S S E I N R I C H T U N G E N :**

Der vorhandene zylindrische "Norm-Meßsilo" wurde dazu etwas umgebaut. Für den untersten von 12 Meßringen mit je 0,500 m Höhe und 0,691 m Durchmesser wurden drei niedrige Ringe eingebaut, die im Prinzip wie die übrigen Meßringe konstruiert waren. Die neuen Ringe wurden aus walzrauhem Blech der Güte St 37 hergestellt.

Zusätzlich zu einem vorhandenen Trichter aus Edelstahl mit 70° Neigung wurden noch zwei Trichter mit 62,5° und 77,5° Neigung beschafft. Die beiden Trichter sind ebenfalls aus Edelstahl hergestellt. Der steile Trichter ist zweiteilig ausgeführt, wobei das Oberteil im Prinzip den niedrigen Meßringen entspricht.

Somit können die Schüttgutdrücke  $p_h$  und  $p_w$  im Übergangsbereich integriert über den Umfang und eine Höhe von 0,167 m entsprechend 0,24 · d gemessen werden.

Die Untersuchungen wurden bei glatter und extrem rauher Wand im Siloschaft durchgeführt.

**S C H Ü T T G Ü T E R :**

Damit Vergleiche zu den Ergebnissen der Messungen mit ebenem Boden möglich sind, wurde die Auswahl unter den Schüttgütern getroffen, für die entsprechende Untersuchungen vorhanden waren. Da bei Massen-

für ebenen Boden ein Faktor  $e_s$  gebildet, der auf die rechnerische Füll-Last des Norm-Entwurfs bezogen ist. Die sich aus den Messungen ergebenden Werte für  $e_s$  sind in Tabelle 2 den Werten  $e_h$  der Untersuchungen mit ebenem Boden gegenübergestellt. Anders als im Norm-Entwurf muß für  $e_s$  zwischen glatter und rauher Silowand unterschieden werden.

Schüttgüter	glatte Silowand		rauhe Silowand	
	$e_h$	$e_s$	$e_h$	$e_s$
Sojabohnen	1,8	3,0	2,0	2,0
Titanerz	1,4	2,0	1,8	2,1
Natursand	1,27	1,7	1,13	1,1
Koks	1,85	3,2	1,7	2,7

Tab. 2: Entleerungslastfaktoren  $e_h$  und  $e_s$

Auffällig ist, daß sich bei rauher Silowand für Sojabohnen und Natursand beim Massenfluß kein Switch ergeben hat. Ein Zusammenhang zwischen  $e_h$  und  $e_s$  ist nicht zu erkennen.

V O R S C H L A G zur vereinfachten Berücksichtigung des Switch: Der maximale Horizontaldruck beim Switch wurde mit  $3,2 \cdot p_{hf}$  gemessen. Im Hinblick auf die wenigen untersuchten Schüttgüter wird für die Entleerungslast ein Wert von  $3,5 \cdot p_{hf}$  vorgeschlagen. Der Verlauf der Lasterhöhung kann durch ein gleichschenkliges Dreieck mit einer Basisbreite von  $0,8 \cdot d$  über dem Trichterrand beschrieben werden.

Bei den Messungen mit dem steilen Trichter ergab sich im Trichteransatz eine Lasterhöhung in gleicher Größenordnung wie im Siloschaft, so daß die maximale Normallast hier ebenfalls mit  $3,5 \cdot p_{no}$  ermittelt werden kann.

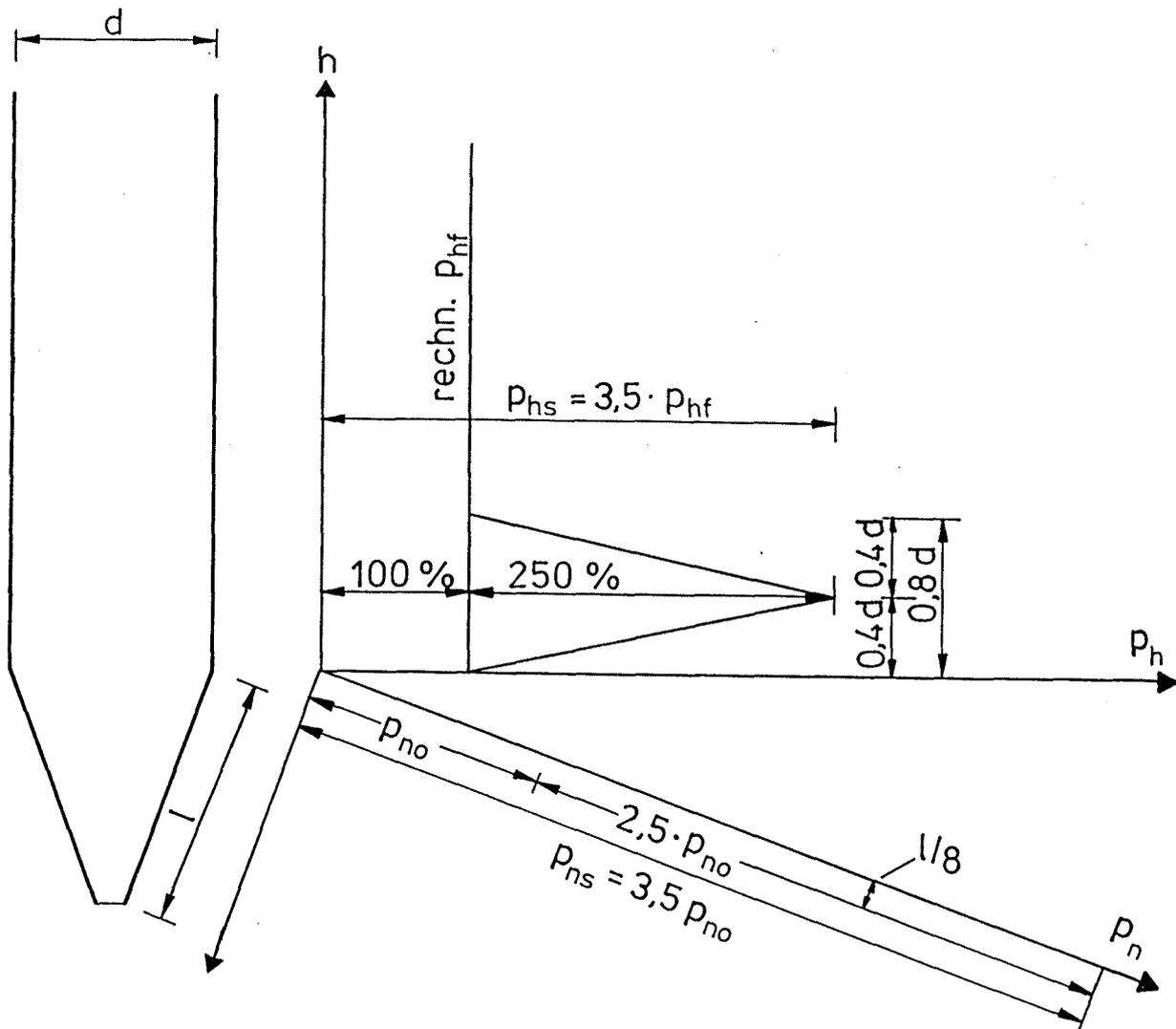
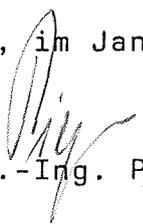


Abb. 1 : Vorschlag zur vereinfachten Berücksichtigung des Switch

Mit diesem Wert  $e_s = 3,5$  werden alle Lastspitzen für die im "Norm-Meßsilo" untersuchten Schüttgüter abgedeckt. Weitere Untersuchungen können zu differenzierten Verminderungen führen.

Auf eine Berücksichtigung der festgestellten erhöhten Wandreibungslasten kann verzichtet werden, da am Übergangsbereich zwischen Siloschaft und Trichter meist kein Stabilitätsnachweis geführt werden muß.

Braunschweig, im Januar 1986

  
(Prof. em. Dr.-Ing. Pieper)