

Verformungen und Beanspruchungen  
dünnwandiger zylindrischer Silozellen  
infolge Teilflächenlasten

**T 2520/1**

T 2520/1

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)

Forschungsvorhaben

Verformungen und Beanspruchungen dünnwandiger zylindrischer Silozellen  
infolge Teilflächenlasten

Geschäftszeichen: IV 1-5-322/83

Beanspruchungen und Verformungen dünnwandiger zylindrischer Silozellen infolge Teilflächenlasten

	Seite
1. Einleitung	1
2. Diskussion vorliegender Lastansätze, insbesondere unter Berücksichtigung des exzentrischen Entleerens	3
2.1 Vorschläge verschiedener Autoren	
2.1.1 Theimer (1970)	
2.1.2 Pieper (1978)	
2.1.3 Kaminski (1980)	
2.1.4 Jenike (1967)	
2.1.5 Roberts, Ooms (1983)	
2.1.6 Kordina, Fröning (1981)	
2.1.7 Rotter (1986)	
2.1.8 Wood (1983)	
2.1.9 Gladen (1985)	
2.1.10 Vergleich der verschiedenen Ansätze	
2.2 Ansätze in verschiedenen nationalen Regelungen	15
2.2.1 Bundesrepublik Deutschland	
Normenausschuß NABau im DIN	
Lastannahmen für Bauten; Lasten in Silozellen	
DIN 1055 Teil 6	
Ausgabe 1964	
Ergänzende Bestimmungen 1977	
Ausgabe 1987	
2.2.2 Deutsche Demokratische Republik	20
Bauakademie der DDR	
Lastannahmen für Bauwerke	
Lasten aus Schüttgütern in Bunkern, Flachsilos und Silos	
TGL 2274/09, Mai 1987	
2.2.3 Großbritannien	21
British Materials Handling Board, 1987	
Silos - Draft design code	
2.2.4 Australien	23
National Committee on Structural Engineering, 1986	
Guidelines for the Assessment of Loads on Bulk Solids Containers	
2.2.5 USA	24
ACI Standard 31-377, revised 1983	
Recommended Practice for Design and Construction of Concrete Bins, Silos and Bunkers for Storing Granular Materials.	

2.2.6	Frankreich Syndicat national du béton armé et des techniques industrialisées, 1986 Règles professionnelles de conception et de calcul des silos en béton armé ou précontraint	27
2.2.7	Vergleich der Regelungen	30
3.	Druckermittlung am Modellsilo ( $t = 10 \text{ mm}$ ) mit Meßplatten	31
3.1	Schüttgut	31
3.2	Versuchsaufbau	31
3.3	Meßelemente und Meßeinrichtung	33
3.4	Druckmessungen bei zentrischen und exzentrischen Auslaufanordnungen	35
3.4.1	Versuchsdurchführung	
3.4.2	Versuchsauswertung	
3.4.3	Versuchsergebnisse	
4.	Beanspruchungs- und Verformungsermittlung am dünnwandigen Modellsilo ( $t = 1 \text{ mm}$ )	51
4.1	Schüttgut	51
4.2	Versuchsaufbau	51
4.3	Grundlagen der Versuchsauswertung	53
4.3.1	Mögliche Fehlerquellen	
4.3.2	Eichversuche Eichversuche mit gleichmäßiger Belastung Eichversuche mit Einzellasten	
4.3.3	Imperfektionsmessung	
4.3.4	Gesamteinschätzung	
4.4	Dehnungs- und Verformungsmessungen bei zentrischen und exzentrischen Auslaufanordnungen	59
4.4.1	Versuchsdurchführung	
4.4.2	Versuchsauswertung	
4.4.3	Versuchsergebnisse	

5.	Rechnerische Untersuchungen über die Belastungen bei zylindrischen Silozellen	72
5.1	Lastansatz einer Teilflächenlast nach DIN 1055, Teil 6	72
5.2	Parameterstudien zu nichtrotationssymmetrischen Lastansätzen	80
6.	Diskussion und Vergleich der Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen (Kapitel 3 und Kapitel 4) und den rechnerischen Untersuchungen (Kapitel 5)	82
7.	Zusammenfassung	86
8.	Literaturverzeichnis	88
9.	Anhang	
	zu Kap. 2	
	- Untersuchung Lastansatz WOOD am geschlossenen Kreisring	
	- Rechenbeispiele zu den einzelnen nationalen Regelungen	
	zu Kap. 3	
	- Schüttguteigenschaften	A 3.1
	- Federsteifigkeit der einzelnen Meßelemente	A 3.5
	- Statistische Untersuchungen zu den Meßwerten	A 3.18
	- Einzeldarstellung der Versuchsergebnisse	A 3.25
	zu Kap. 4	
	- Eichversuche mit gleichmäßig verteilter Belastung	A 4.1
	- Eichversuche mit Einzellasten	A 4.34
	- Einzeldarstellungen Versuchsreihe M	A 4.59
	- Einzeldarstellungen Versuchsreihe Z	A 4.118
	- Einzeldarstellungen Versuchsreihe EZ	A 4.182
	- Einzeldarstellungen Versuchsreihe EX	A 4.242
	- Verlauf der Ringzugkraft über die Höhe	A 4.302
	- Verlauf der Ringzugkraft über den Umfang	A 4.308

zu Kap. 5	- Darstellung der Teilflächenlast als Fourierreihe	A 5.1
	- Fourierkoeffizienten	A 5.6
	- Beiwerte $n^*$ zur Berechnung der Normalkraft bei nichtrotationssymmetrisch verteilten Lastansätzen	
	Stahlbetonsilos	A 5.7
	Stahlsilos	A 5.16
	- Beiwerte $m^*$ zur Berechnung des Momentes bei nichtrotationssymmetrisch verteilten Lastansätzen	
	Stahlbetonsilos	A 5.28
	Stahlsilos	A 5.37
	- Steigerungsfaktoren $s^*$	
	Stahlbetonsilos	A 5.49
	Stahlsilos	A 5.52

## 1. Einleitung

Silozellen werden für größere Anlagen wirtschaftlich günstiger als Ringzellen erbaut (LUCHNER 1988). Schon LUFFT (1920) weist darauf hin, daß die Druckverhältnisse bei runder Zellenform am natürlichsten ihre Berücksichtigung finden. Dabei geht er von einer gleichmäßig über den Umfang verteilten Belastung aus, merkt aber an, daß ein nicht zentrisches Entleeren zu einer ungleichmäßigen Lastverteilung führen kann. Untersuchungen zeigen, daß auch durch ungleichmäßiges Füllen und die Eigenschaften des Schüttgutes selbst (NIELSEN, 1983) sowie durch die unvermeidlichen geometrischen Imperfektionen der Zellen der Belastungsverlauf ungünstig beeinflusst, d.h. ungleichmäßig wird (ASKEGARD et al., 1986). Aus betrieblichen Bedingungen ist es z.T. aber unerlässlich, daß Silozellen exzentrisch entleert und manchmal auch nicht genau zentrisch gefüllt werden.

Zuverlässige Angaben über die Lasten aus dem Schüttgut sind im Hinblick auf ihre ungleichmäßige Verteilung als Grundlage für eine sichere Dimensionierung unerlässlich. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es deshalb, einen Beitrag zur Frage der Umfangsverteilung der Horizontaldrücke in Abhängigkeit von der Lage der Entleerungsöffnung zu liefern. Die experimentellen Untersuchungen erfolgen an Modellsilos mit ebenem Boden, da bei Kernfluß die zu erwartenden Unregelmäßigkeiten im Horizontaldruckverlauf ausgeprägter als in einem Massenflußsilo sind.

Entgegen früheren Modellversuchen wurden die Versuche auch an einem dünnwandigen Silo durchgeführt, um den Einfluß der auftretenden Verformungen der Silowand beurteilen zu können. Insbesondere wurde der Frage nachgegangen, inwieweit durch die Wandverformungen einzelne Druckspitzen abgebaut werden und sich eine gewisse Vergleichmäßigung des Horizontaldruckes ergibt.

Zwar sind die horizontalen Lasten bei dünnwandigen Silozellen, z. B. bei Stahlsilos, nicht unbedingt bemessungsentscheidend, jedoch ist der Verlauf der Horizontaldrücke von besonderer Bedeutung, da ungleichförmig über den Umfang verteilte horizontale Belastungen zu hohen axialen Beanspruchungen in der Silowand führen, die bei den Beulnachweisen zu berücksichtigen sind. Weiterhin sind für die Beulnachweise die Kenntnisse über die Wandverformungen (Änderung des Radius/Wanddickenverhältnisses  $r/t$ ) bei dünnwandigen Silos von großer Bedeutung, da bei steigendem  $r/t$ -Verhältnis (Abflachungen des Silomantels) die zulässigen Beullasten abnehmen.

In Kapitel 2 werden verschiedene vorliegende Modelle zur Erfassung der Druckverteilung entlang des Umfanges bei zylindrischen Silozellen gegenübergestellt und erläutert. Ebenso werden die Ansätze über die Lastverteilung entlang des Umfanges in den verschiedenen nationalen Regelungen (Normen) überprüft und miteinander verglichen.



Der experimentelle Teil der Arbeit wird in den Kapiteln 3 und 4 beschrieben.

Kapitel 3 enthält die Darstellung der Versuche an einem Modellsilo mit Druckmeßplatten. Nach einer Beschreibung des Modellsilos, des verwendeten Schüttgutes sowie der Meßanlage werden die einzelnen Versuche erläutert und die wichtigsten Ergebnisse mitgeteilt.

Kapitel 4 beschreibt die Versuche an dem dünnwandigen Modellsilo. Neben den eigentlichen Versuchen sind hierbei die Eichversuche und die Imperfektionsmessungen von Bedeutung. Aus den gemessenen Ringdehnungen auf der Außen- und auf der Innenseite des Modellsilos werden, entsprechend dem Biege- und Normalkraftanteil, die Beanspruchungen der Silowand bestimmt.

In Kapitel 5 werden die Auswirkungen einer Teilflächenlast entsprechend dem Lastansatz nach DIN 1055 Teil 6 bei zylindrischen Behältern untersucht. Für die praktische Anwendung wird eine Rechenhilfe entwickelt. Weitere Parameterstudien werden mit nichtrotationssymmetrisch verteilten Einheitslasten durchgeführt. Sie dienen als Grundlage zur Beurteilung der aus den Messungen gewonnenen Druckverteilungen und als notwendiges Hilfsmittel zur Formulierung geeigneter Ersatzlasten.

In Kapitel 6 schließlich werden die wichtigsten Ergebnisse aus den experimentellen und theoretischen Untersuchungen zusammenfassend dargestellt und miteinander verglichen.

Weitergehende Erläuterungen zu den einzelnen Kapiteln und die Einzelergebnisse aus den Versuchen sind im Anhang dargestellt.

## 2. Diskussion vorliegender Lastansätze, insbesondere unter Berücksichtigung des exzentrischen Entleerens

### 2.1 Vorschläge verschiedener Autoren

Bei den Lastansätzen, die den Einfluß des exzentrischen Entleerens berücksichtigen, sind generell die folgenden Vorgehensweisen zu unterscheiden:

- Formulierung aufgrund experimentell ermittelter Druckverteilungen (am Groß- oder am Modellsilo), ohne Berücksichtigung des möglichen Fließbildes
- Herleitung theoretisch, experimentell oder aufgrund von Schadensanalysen, insbesondere unter Berücksichtigung des möglichen Fließbildes

Lastansätze nach der ersten Gruppe:

#### 2.1.1 THEIMER (1970)

Nach SAFARIAN/HARRIS (1985) schlägt Theimer vor, den Einfluß einer ausmittigen Entleerung bei Rundzellen durch eine vergrößerte Horizontallast  $p^* = E_2 \cdot p_{ne}$  zu erfassen.

mit  $E_2 = (1 + 2 e/r)/(1 + e/r)$

wobei

$e$	Außermittigkeit des Auslaufes
$r$	Halbmesser der Silozelle
$p_{ne}$	horizontale Entleerungslast beim zentrischen Entleeren

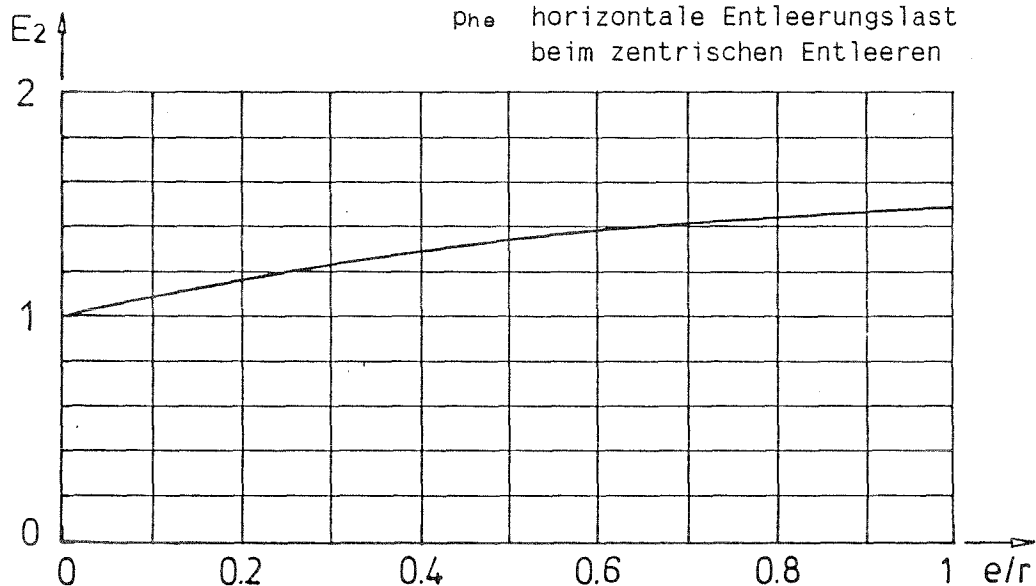


Abb. 2.1 Laststeigerungsfaktor nach THEIMER

## 2.1.2 PIEPER (1978)

Nach der Auswertung zahlreicher Messungen, insbesondere derjenigen von WAGNER (1971), schlägt PIEPER vor, den Einfluß des exzentrischen Entleerens durch einen Zuschlag zur Entleerungslast zu erfassen. Die Zusatzlast ist über eine bestimmte Höhe anzusetzen, die Intensität wird durch die Lage der Auslauföffnungen bestimmt. Der Vorschlag ist insofern bedeutend, da hier erstmals eine Lastverteilung angegeben wird, die auch bei Rundzellen zu einer Biegebeanspruchung führt und somit entscheidende Auswirkungen für die Bemessung hat.

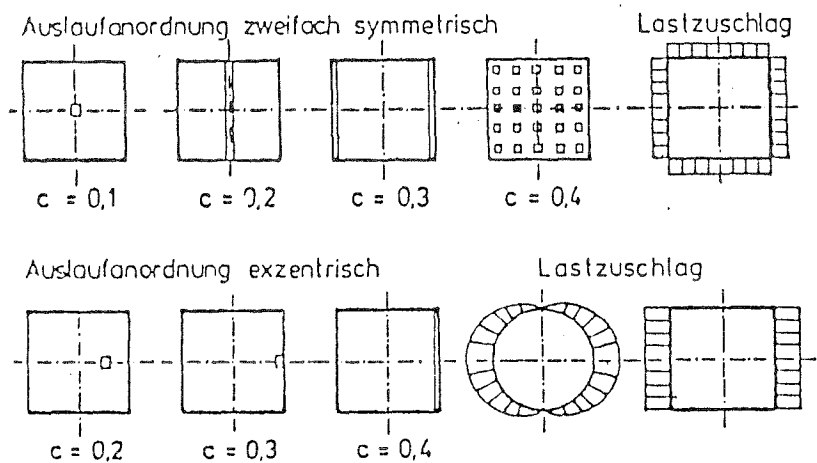
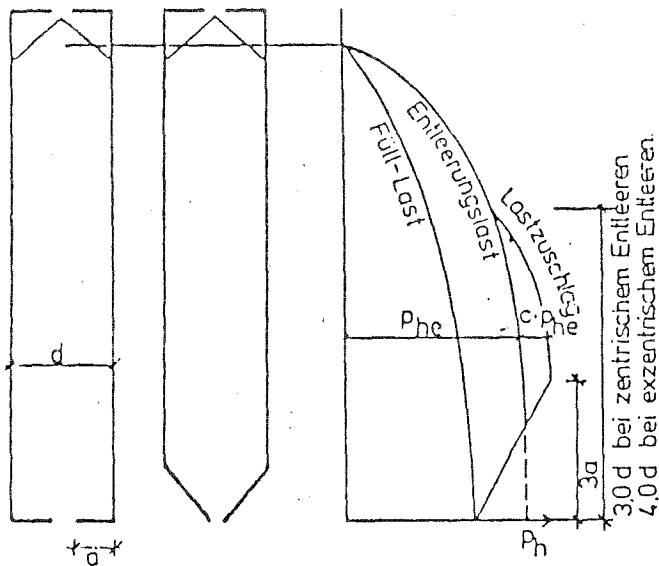
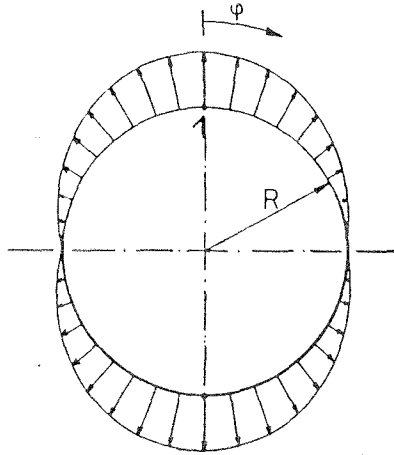
EINFLUSS DER FORM DES AUSLAUFES  
AUF DIE HORIZONTALE SILOLAST

Abb. 2.2 Lastansatz nach PIEPER



exzent. Entleeren:

$$\text{Zusatzlast } \Delta p_{he}(\varphi) = p_{1,1} \cdot \cos \varphi$$

$$\text{mit } p_1 = 0,3 \cdot p_{he}$$

Abb. 2.5 Lastansatz nach PIEPER bei Kreiszellen

Die Auswertung der Einflußlinien für den geschlossenen Kreisring (PETERSEN, 1988) ergibt im Punkt 1 die folgenden Schnittgrößen:

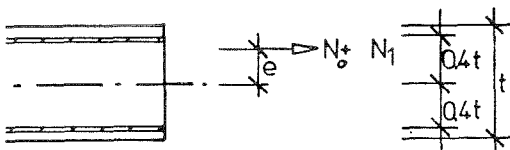
$$M_1 = (1/\pi - 1/4) \cdot 0,3 \cdot p_{he} \cdot R^2$$

$$N_1 = 0,75 \cdot 0,3 \cdot p_{he} \cdot R^2$$

Die durch diese Zusatzbelastung bedingte höhere Beanspruchung der Silowand ergibt sich aus der folgenden Betrachtung:

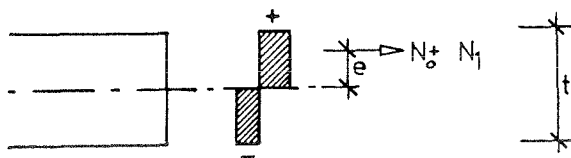
Es wird eine über den Umfang gleichmäßig verteilte Belastung  $p^*$  hergeleitet, die bei einer Bemessung den gleichen Querschnitt erfordert. Das Verhältnis  $p^*/p_{he}$  wird als Steigerungsfaktor  $s^*$  bezeichnet und dient als Maß für die Lasterhöhung beim exzentrischen gegenüber dem zentrischen Entleeren.

Stahlbetonsilos:



$$s^* = \left(1 + \frac{N_1}{N_0}\right) \left(1 + 2,5 \frac{e}{t}\right)$$

Stahlsilos:



$$s^* = \left(1 + \frac{N_1}{N_0}\right) \left(1 + 4 \cdot \frac{e}{t}\right)$$

2.1.3 KAMINSKI (1980)

Ein differenzierteres Lastbild für die Horizontallasten gibt KAMINSKI. Dabei wird der Silo in der Höhe in drei Bereiche unterteilt, für die unterschiedliche Lastansätze gelten. Vereinfachend werden zur Ermittlung der Schnittgrößen Faktoren angegeben, so daß das Ringbiegemoment und die Ringzugspannung in Abhängigkeit von der Fülllast  $p$  und dem Zellenradius  $R$  errechnet werden können. Allerdings beschränkt der Autor seinen Ansatz auf einen engen Anwendungsbereich: er gilt nur für die geometrischen Verhältnisse Silohöhe / Silodurchmesser  $h/d = 3.25$  und ein Radius / Wandickenverhältnis  $r/t = 20$  sowie nur für das Schüttgut Weizen.

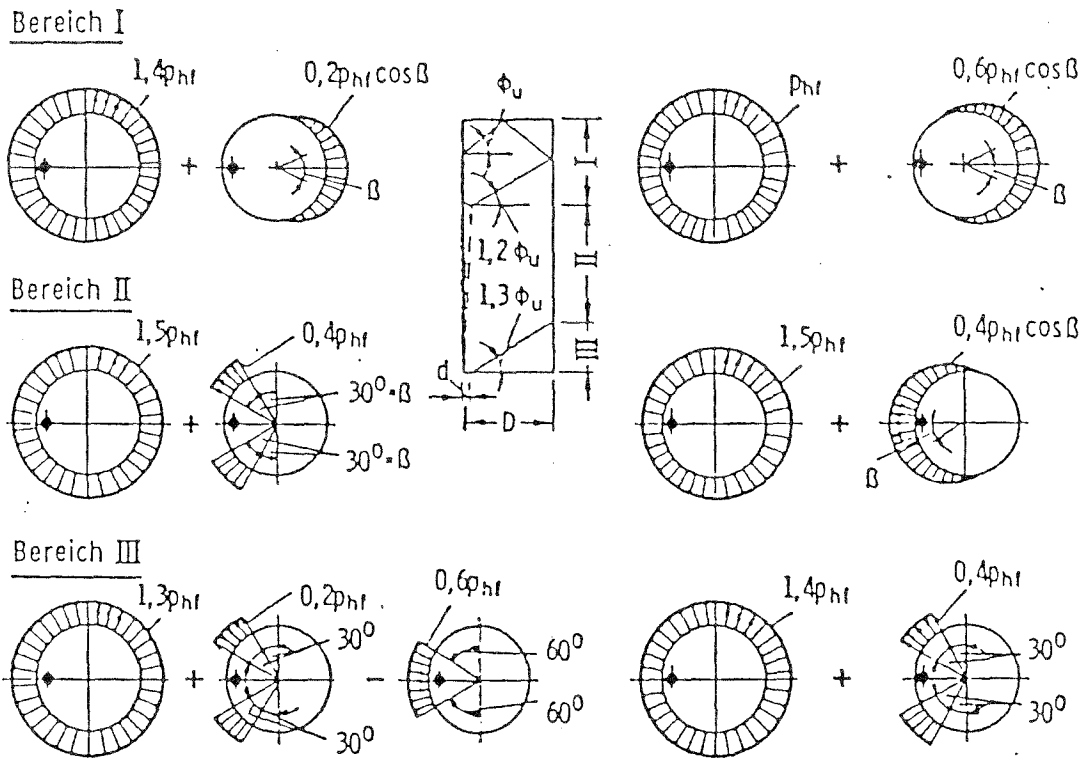


Abb. 2.3 Lastansatz nach KAMINSKI

### Lastansätze nach der zweiten Gruppe:

Im Gegensatz zu Massenflußsilos liegen bei Kernflußsilos Bereiche unterschiedlicher Schüttgutbewegung vor. Beim Entleeren erfolgt die Fließbewegung oft nur in eng begrenzten Fließzonen. Durch eine Vielzahl experimenteller Arbeiten (z. B. FRESE (1979), HOPPE (1979)), aber auch durch neuere theoretische Untersuchungen von GLADEN (1985) ist nachgewiesen, daß im Bereich des Fließkanals ein Abfall des Horizontaldruckes gegenüber den stehenden Bereichen stattfindet.

#### 2.1.4 JENIKE (1967)

Ausgehend von einer Schadensanalyse an einem Stahlsilo entwickelt JENIKE ein Modell für die Horizontaldruckverteilung beim exzentrischen Entleeren. Er geht dabei von der Vorstellung eines Fließkanals entlang der Silowand und stehenden Zonen im Schüttgut aus. Im Bereich des Fließkanals herrscht ein geringerer Horizontaldruck als der gleichmäßig verteilte Fülldruck im übrigen Wandbereich. Um das Gleichgewicht in Horizontalrichtung herzustellen, werden am Übergang der Fließzone zum stehenden Bereich (Stelle A) die Differenzkräfte  $Q$  eingeführt, die gleichzeitig eine Druckerhöhung darstellen.

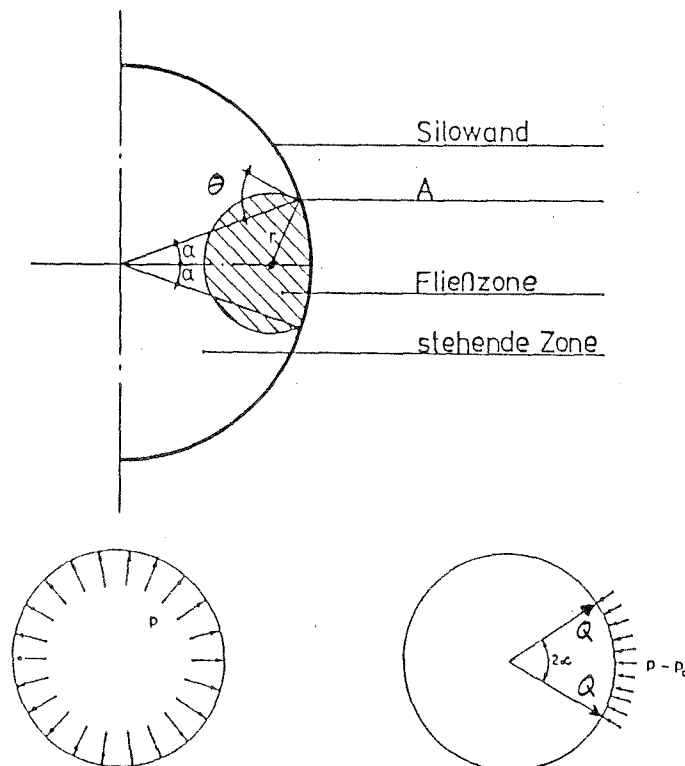


Abb. 2.4 Lastansatz nach JENIKE

Infolge der angesetzten Belastung gibt Jenike das maximale Umfangsbiegemoment in der Wand an der Stelle A mit

$$M = k_m \cdot p \cdot R^2 \quad \text{an.}$$

$$\text{wobei} \quad k_m = 1/\pi \cdot \sin^2 \alpha \cdot \tan \alpha \cdot \left( 1 - \frac{\sin \alpha}{\cos(\theta - \alpha)} \right)$$

$\alpha$  Winkel zur Beschreibung der Fließzone

$\theta$  Wandreibungswinkel

Aus den Bedingungen  $p_0 / p = r / R$  und  $r / R = \sin \alpha / \cos(\theta - \alpha)$  leitet JENIKE eine Beziehung zwischen dem Verhältnis  $R/t$  und dem maximal zulässigen Horizontaldruck  $p$  bei Stahlsilos ab.

$$\text{zul } p = \frac{16,2 (t/R)^2}{1 - \mu^2} \cdot \text{zul } \sigma$$

Aufgelöst nach  $R/t$  und  $\text{zul } \sigma = \sigma_f$  (Fließgrenze = 240 N/mm<sup>2</sup>) und bei Ansatz einer Querdehnzahl  $\mu = 0,3$  läßt sich das zulässige Radius/Wanddickenverhältnis  $R/t$  in Abhängigkeit von der gegebenen horizontalen Belastung  $p_h$  aus dem Schüttgut wie folgt darstellen:

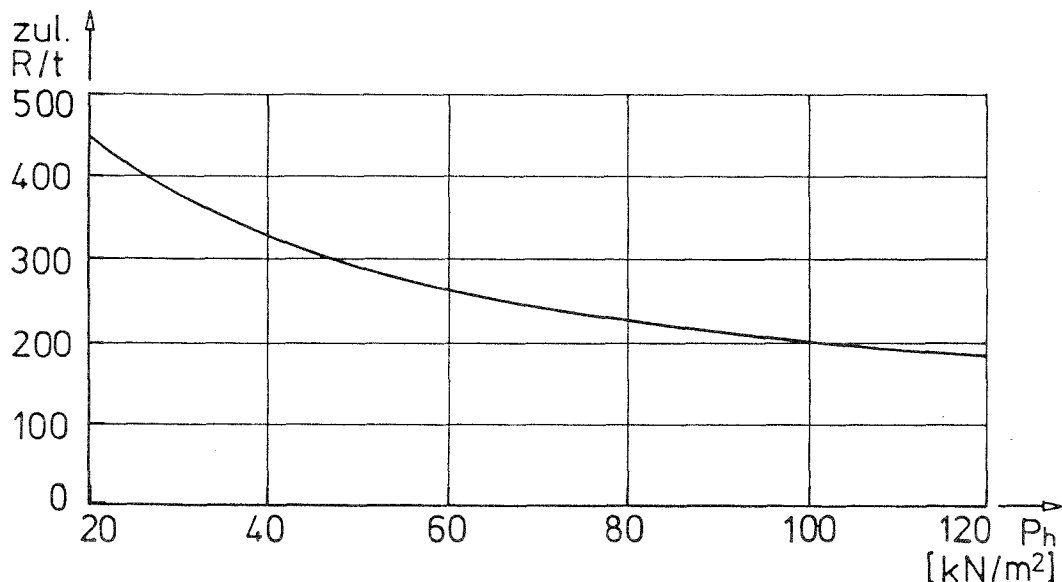


Abb. 2.5 max. zul. Radius/Wanddickenverhältnis  $R/t$  bei Stahlsilos in Abhängigkeit von der horizontalen Belastung  $p_h$  (nach JENIKE)

Der Vorschlag von JENIKE stellt eher eine konservative Abschätzung dar, ist allerdings insofern bedeutend, als hier erstmals ein Modell über einen möglichen Lastansatz beim exzentrischen Entleeren unter Berücksichtigung des auftretenden Fließkanales entwickelt wird.

GAYLORD/GAYLORD (1984) empfehlen bei der Betrachtung nach Jenike das plastische Widerstandsmoment  $W_{p1}$  des Querschnittes einzuführen. Mit  $W_{p1} = 1,5 W_{e1}$  ergibt sich somit bei einem Rechteckquerschnitt eine Vergrößerung des zulässigen  $R/t$ -Verhältnisses um ca. 22 %.

#### 2.1.5 ROBERTS/OOMS (1983)

Auf der Grundlage der Untersuchungen von Jenike wird ein Überlastfaktor bestimmt, so daß eine horizontale Ersatzlast ermittelt werden kann, die zu einer reinen Zugbeanspruchung führt. Für die Ringbeanspruchung wird nach JENIKE das Moment

$$M = k_m \cdot R^2 \cdot p \text{ zugrundegelegt mit dem Maximalwert für } k_m.$$

Dieser ergibt sich bei einem inneren Reibungswinkel des Schüttgutes von  $30^\circ$  und einem Wandreibungswinkel von  $21^\circ$  mit  $\max k_m = 0,010$ . Für das Verhältnis Biegespannung  $\sigma_b$  zu Ringzugspannung  $\sigma_h$  folgt somit

$$\sigma_b/\sigma_h = 0,055 \cdot R/t$$

Um die gleiche Beanspruchung zu erzielen wie aus der Zugkraft und dem Biegemoment, ist also die gleichmäßig über den Umfang verteilte horizontale Belastung  $p_h$  mit dem Faktor  $c = 1 + 0,055 \cdot R/t$  zu vergrößern.

ROBERTS/OOMS schlagen als Überlastfaktor zur Berücksichtigung des ausmittigen Entleerens vor

$$c = C_o (1 + 0,055 \cdot R/t),$$

dabei ist der Korrekturfaktor  $C_o$  zur Berücksichtigung örtlicher Spannungsumlagerungen kleiner 1 zu wählen.

#### 2.1.6 KORDINA/FRÖNING (1981)

Um die ungleichmäßige Horizontallastverteilung über den Umfang erfassen zu können, werden umfangreiche Berechnungen an Kreiszylinderschalen durchgeführt. Für den Lastansatz wird dabei eine Verteilung der Art  $p = p_o \pm p_o \cdot \cos^n \varphi$  gewählt. Die Untersuchungen gelten nur für Stahlbetonzellen. Zusammenfassend wird vorgeschlagen, für die Bemessung ein Zusatzmoment  $m_\varphi$  und eine zusätzliche Ringzugkraft  $n_\varphi$  einzuführen.

$$m_\varphi = 0,03 \cdot p_1 \cdot R^2$$

$$n_\varphi = 0,30 \cdot p_1 \cdot R$$

$$\text{mit } p_1 = 0,6 p_{he}$$

R Radius der betrachteten Silozelle



## 2.1.7 ROTTER (1986)

ROTTER baut die Überlegungen von JENIKE weiter aus. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Reibungsverhältnisse im Schüttgut und an der Silowand sowie unterschiedlicher Seitendruckverhältnisse in der Fließzone und im stehenden Bereich des Silogutes wird ein Diagramm entwickelt, mit dessen Hilfe bei vorgegebenem Durchmesser der Fließzone ihre Lage genauer bestimmt werden kann. Für den Lastansatz werden zwei mögliche Horizontaldruckverteilungen angegeben. Beim Vorschlag 1 ist für die Wandbelastung selbst das Gleichgewicht in horizontaler Richtung gewahrt, während bei der zweiten Lösung davon ausgegangen wird, dass das Gleichgewicht durch Scherkräfte an den Wänden und in Horizontalschnitten innerhalb des Schüttgutes hergestellt wird.

Der Modellcharakter der beiden Ansätze ist an den abrupten Lastveränderungen deutlich erkennbar.

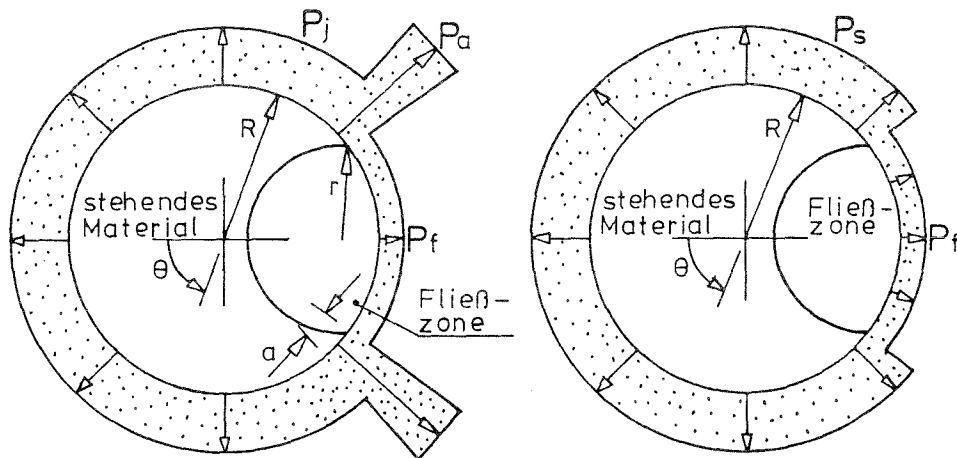


Abb. 2.6 Lastansatz nach ROTTER

ROTTER veröffentlicht weiterhin einen Ansatz, um für den Beulnachweis das durch die Verformung der Wand im Bereich des Fließkanals vergrößerte Radius/Wanddickenverhältnis  $R/t$  abschätzen zu können. In Abhängigkeit von  $r/R$ ,  $R/t$ , dem Elastizitätsmodul  $E$  des Wandbaustoffes und dem horizontalen Druck  $p_f$  aus dem Schüttgut im Fließkanal wird ein Faktor  $a$  bestimmt, mit dessen Hilfe das vorhandene Radius/Wanddickenverhältnis  $(R/t)_{\text{eff}}$  im Bereich des Fließkanales abgeschätzt werden kann.

$$(R/t)_{\text{eff}} = R/t / (1-a) \quad \text{mit } a = 7,7 \cdot (R/t)^3 \cdot p_f/E \cdot (r/R)^2$$

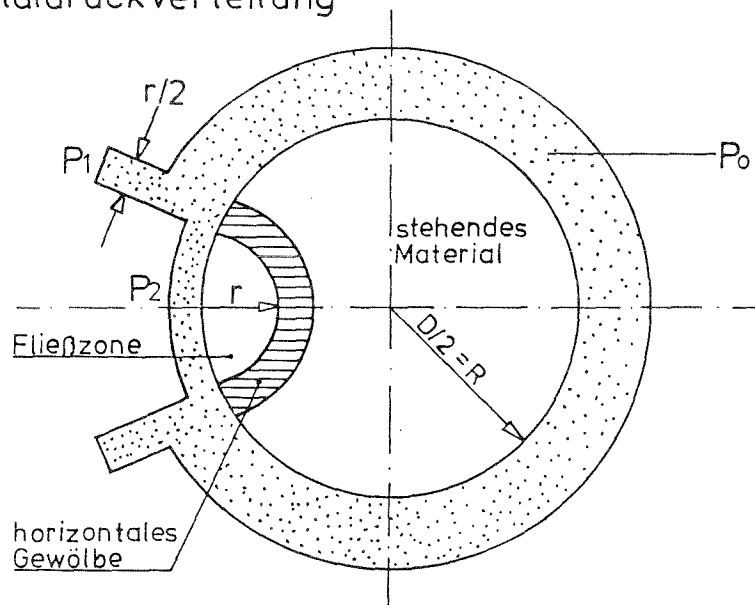
## 2.1.8 WOOD (1983)

Eine Horizontaldruckverteilung, ähnlich wie der Vorschlag 1 von ROTTER, gibt WOOD an.

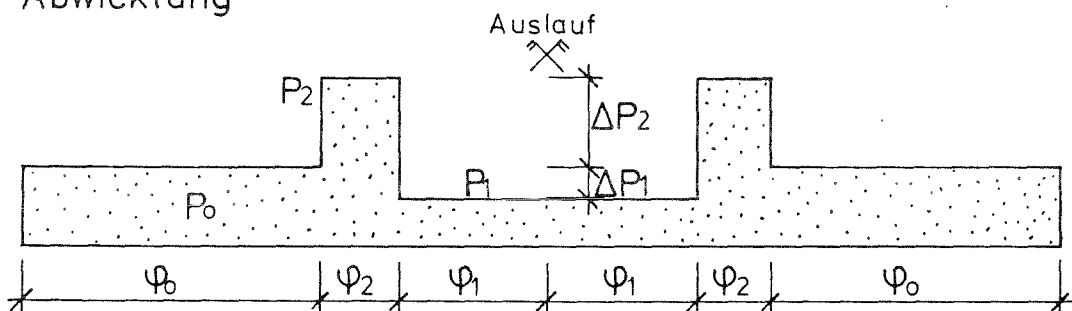
Dabei werden drei Bereiche unterschieden: Im Bereich des stehendem Schüttgutes wirkt die Fülllast als horizontale Belastung auf die Wand, im Bereich des Fließkanales erfolgt eine Verminderung der Horizontallast und an den Übergangszonen finden große Laststeigerungen statt. Die Größe dieser Laststeigerung ergibt sich aus der Geometrie und der Forderung nach Erfüllung des horizontalen Gleichgewichtes.

Das Modell ist somit stark vereinfacht und einfach in der Handhabung. WOOD weist darauf hin, daß der Ansatz nur dazu dienen kann, den Einfluß einer ausmittigen Entleerung auf eine Silokonstruktion abzuschätzen.

## Horizontaldruckverteilung



## Abwicklung



$P_0$  – Fülldruck nach JANSSEN

$$P_1 = \frac{r}{R} \cdot P_0 \quad -\Delta P_1 = P_0 \left(1 - \frac{r}{R}\right)$$

$$P_2 = \left(3 - 2 \cdot \frac{r}{R}\right) P_0 \quad \Delta P_2 = 2P_0 \left(1 - \frac{r}{R}\right)$$

Abb. 2.8 Lastansatz nach WOOD

Der Ansatz von WOOD gilt für eine Berechnung des Silos als Schalen-tragwerk. Um den Einfluß unterschiedlicher Fließzonen abschätzen zu können, wird dieser Lastansatz anhand der Einflußlinien für den geschlossenen Kreisring (PETERSEN 1988) näher untersucht und wird analog zu den Überlegungen beim Lastansatz von PIEPER (vgl. Seite 4) ein Steigerungsfaktor  $s^*$  bestimmt. Dabei ist allerdings zu beachten, daß bei PIEPER der Lastansatz zur Berücksichtigung des ex-zentrischen Entleerens zusätzlich zu den Entleerungslasten anzusetzen ist, die Steigerung sich also auf die Entleerungslasten bezieht, während bei WOOD als Bezugsgröße die Fülllast anzusetzen ist.

In Abhängigkeit vom Winkel  $\theta_2$  werden Schnittgrößen M und N und die zugehörige Ausmitte im Bereich der Überlast  $p_2$  bestimmt.

Die maximalen Schnittgrößen ergeben sich für  $\theta_2 = 8^\circ$  zu

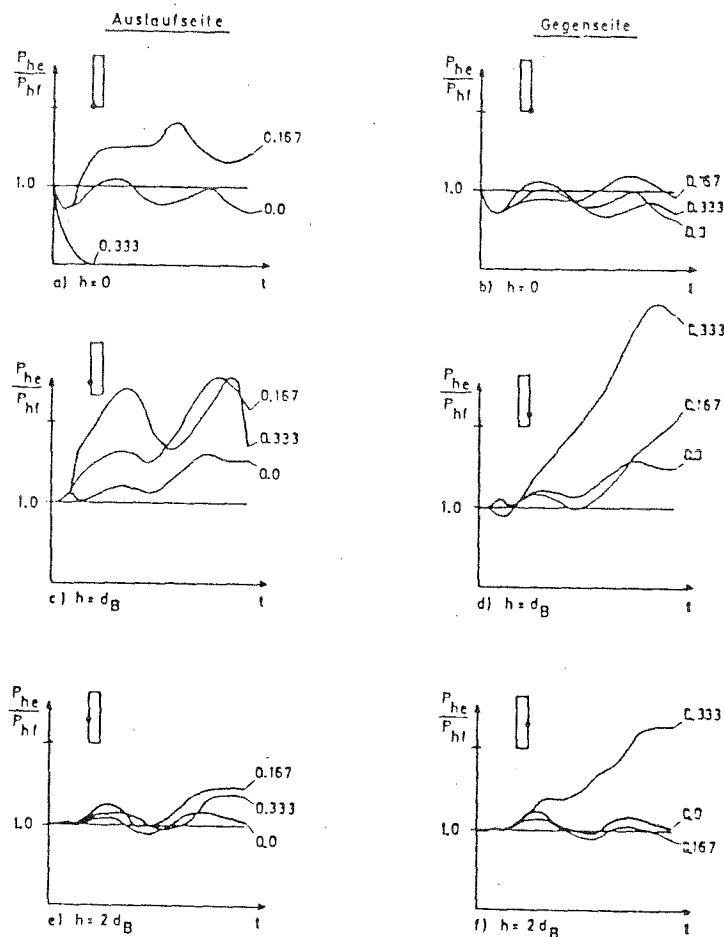
$$M_2 = 0,0258 \cdot p_0 \cdot R^2$$

$$N_2 = 1,0646 \cdot p_0 \cdot R$$

und somit  $e = M_2/N_2 = 0,0258 \cdot R$

## 2.1.9 GLADEN (1985)

Aufbauend auf den von LANDAHL (1982) und HÄUSSLER (1984) entwickelten Rechenverfahren ermittelt GLADEN die Druckverhältnisse in einer Spaltzelle beim exzentrischen Entleeren. Die Frage der Verteilung entlang des Umfanges kann zwar nicht gelöst werden, jedoch gibt die Arbeit wertvolle Hinweise zur Höhenlage der Druckerhöhungen an der Auslauf- und an der Gegenseite in Abhängigkeit von der Lage der Entleerungsöffnung. Um die auftretenden Druckerhöhungen quantitativ erfassen zu können, wird ein einfaches Fachwerkmodell entwickelt.



Laststeigerungen exzentrisches Entleeren

$$0,0 / 0,167 / 0,333 = \frac{\text{Ausmitte des Auslaufes}}{\text{Silodurchmesser}}$$

Abb. 2.9 Laststeigerungen beim ausmittigen Entleeren

## 2.1.10 Vergleich der verschiedenen Ansätze

Die aus den Ansätzen nach PIEPER, KORDINA/FRÖNING und WOOD resultierenden Lasterhöhungen werden im folgenden miteinander verglichen. Als Vergleichswert, um die durch das exzentrische Entleeren bedingten Laststeigerungen abschätzen zu können, gilt der Steigerungsfaktor  $s^*$ .

PIEPER

$$M_1 = 0,0209 \cdot p_{he} \cdot R^2$$

$$N_1 = 0,2250 \cdot p_{he} \cdot R$$

$$N_0 = p_{he} \cdot R$$

$$e = M_1 / (N_1 + N_0) = 0,0167 \cdot R$$

KORDINA/FRÖNING

$$M_1 = 0,0180 \cdot p_{he} \cdot R^2$$

$$N_1 = 0,1800 \cdot p_{he} \cdot R$$

$$N_0 = p_{he} \cdot R$$

$$e = M_1 / (N_1 + N_0) = 0,0153 \cdot R$$

WOOD

$$M_1 = 0,0258 \cdot p_{hf} \cdot R^2$$

$$N_1 = 1,0646 \cdot p_{hf} \cdot R$$

$$e = M_1 / N_1 = 0,0242 \cdot R$$

Stahlbetonsilos

$$R/t = 20 \dots 50$$

$$s^* = (1 + N_1/N_0) \cdot (1 + 2,5 \cdot e/t)$$

Stahlsilos

$$R/t = 300 \dots 1500$$

$$s^* = (1 + N_1/N_0) \cdot (1 + 4,0 \cdot e/t)$$

PIEPER  $s^* = 1,225 + 0,0417 \cdot R/t$   
 KORDINA/FRÖNING  $s^* = 1,180 + 0,0383 \cdot R/t$   
 WOOD  $s^* = 0,714 + 0,0432 \cdot R/t$

(Bei WOOD wurde angenommen, daß der Entleerungslastfaktor zur Bestimmung der horizontalen Entleerungslasten aus den Fülllasten 1,4 beträgt.)

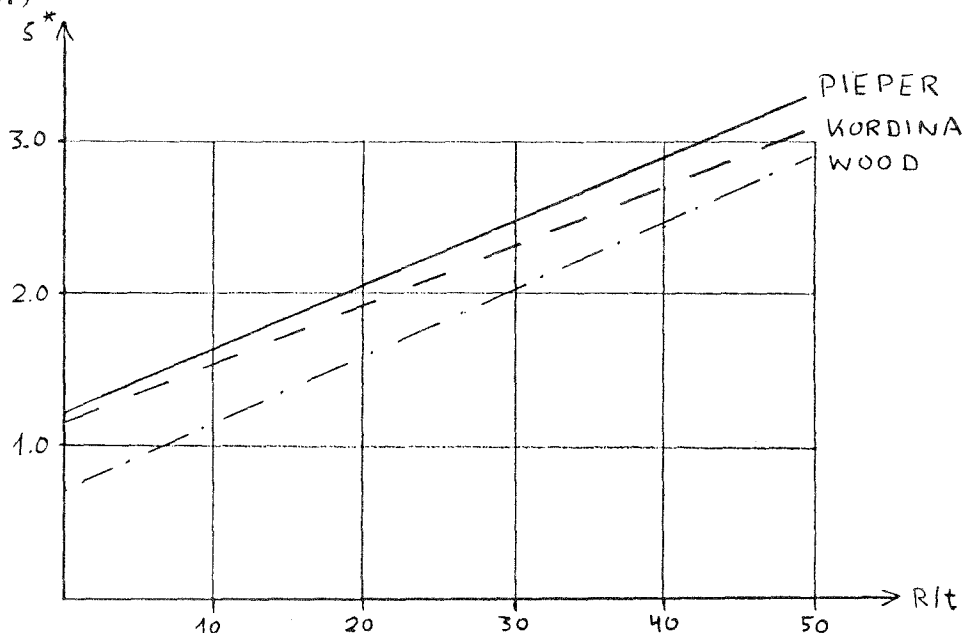


Abb. 2.10 Vergleich der Lastansätze nach PIEPER, KOORDINA/FRÖNING und WOOD (Betrachtung am ebenen Kreisring)

## 2.2 Ansätze in verschiedenen nationalen Regelungen

Auf die besonderen Probleme einer Vorschriftenregelung im Silobau wurde bereits in verschiedenen Veröffentlichungen hingewiesen (WOOD 1980, BLUME 1984, HAMPE 1986, HAMPE 1987). Die Regelwerke sollen dem in der Praxis tätigen Ingenieur angemessene Hilfsmittel zur Verfügung stellen, um ein Silobauwerk ausreichend sicher entwerfen und dimensionieren zu können. Um die gewünschte Anwenderfreundlichkeit sicherzustellen, ist oft eine weitgehende Vereinfachung erforderlich. Die teilweise noch ungeklärten Zusammenhänge und Einflüsse, wie sie aus den unterschiedlichen Geometrien der Silobauwerke, den oft nur unzureichend zu beschreibenden Materialeigenschaften des einzulagernden Schüttgutes sowie den betrieblich bedingten Gegebenheiten resultieren, zwingen zu Kompromissen. Als Indiz dafür mag gelten, daß in nahezu allen Vorschriften, trotz der bekannten Unzulänglichkeiten (EIBL et al. 1982), als Grundlage zur Ermittlung der Lasten noch immer die vor nahezu 100 Jahren aufgestellte Theorie von JANSSEN dient. Eine weitere Folge der notwendigen Vereinfachungen und Kompromisse ist, daß Vorschriftenregelungen in ihren Anwendungsbereichen oft begrenzt werden müssen, also nur den "Normalfall" ausreichend beschreiben können. Zumindest jedoch ist es erforderlich, die Grenzen und Möglichkeiten der angegebenen Berechnungsverfahren deutlich aufzuzeigen und auf wesentliche Einflüsse, die weitergehender Untersuchungen bedürfen, hinzuweisen.

Im folgenden werden verschiedene Regelungen einzelner Länder näher betrachtet. Dabei wird insbesondere auf die Bestimmungen zur Festlegung des der Bemessung zugrundezulegenden Horizontaldruckes auf die Seitenwände eingegangen. Das Hauptaugenmerk gilt den beim ausmittigen Entleeren erforderlichen zusätzlichen Lastansätzen für zylindrische Silozellen bei Kernfluß.

### 2.2.1 BR DEUTSCHLAND Normenausschuß Bauwesen (NABau) im DIN DIN 1055 Teil 6 "Lastannahmen für Bauten; Lasten in Silozellen"

#### - DIN 1055 Teil 6, Ausgabe 1964

Mit dieser Norm erfolgt erstmals eine weltweit aufgegriffene Vorschriftenregelung und somit Handlungsanweisung zur Bestimmung der aus dem Schüttgut resultierenden Lasten. Sie basiert vorwiegend auf der Arbeit PIEPER/WENZEL (1964), in der die wichtigsten bekannten Forschungsergebnisse zusammengestellt und ausgewertet wurden.

Die Ermittlung der Lasten aus dem Schüttgut geschieht nach JANSSEN, der Unterschied zwischen den Betriebszuständen Füllen und Entleeren wird durch jeweils unterschiedliche Parameter für den Seitendruck ( $\lambda = p_h / p_v$ ) und das Wandreibungsverhältnis ( $\mu = p_w / p_h$ ) berücksichtigt. Den die Lasten bestimmenden geometrischen Faktor bil-

det der sogenannte hydraulische Radius  $r_h$ , das Verhältnis der Querschnittsfläche  $A$  zum Umfang  $u$  der Silozelle. Zur Erfassung der vergrößerten Horizontallast beim exzentrischen Entleeren dient die folgende Regelung:

Für eine ideale Silozelle, deren Zentrum durch die Lage des Auslaufes der wirklichen Silozelle bestimmt wird, ist die Entleerungslast  $p_{hi}$  zu bestimmen, für die wirkliche Silozelle die Entleerungslast  $p_h$  bei mittiger Entleerung. Die Differenzlast  $p_h' = p_{hi} - p_h$  ist mit einer  $\cos$ -förmigen Verteilung entlang des Umfangs als zusätzliche Belastung zu berücksichtigen.

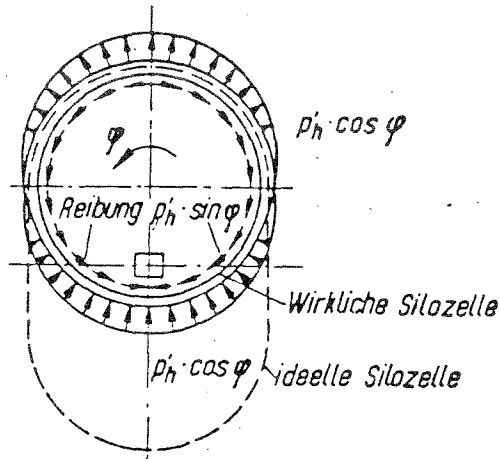


Abb. 2.11 Lastansatz nach DIN 1055 Teil 6, Ausgabe 1964 für ausmittiges Entleeren

Die ideale Horizontallast  $p_{hi}$  folgt somit aus dem Verhältnis der hydraulischen Radien:

$$p_{hi} = (r_{h \text{ ideell}} / r_{h \text{ reell}}) \cdot p_h = \frac{\pi + 4 \cdot e/r}{\pi + 2 \cdot e/r} \cdot p_h$$

Der Ansatz der Differenzlast mit einer  $\cos$ -förmigen Verteilung ergibt in Umfangsrichtung nur eine Steigerung der Normalkraft, es folgt

$$N_{ges} = p_{hi} \cdot r$$

Die Steigerung  $s^*$  der für die Bemessung maßgebenden Ringzugkraft ist somit von der bezogenen Ausmitte  $e/r$  abhängig und läßt sich wie folgt darstellen:

$$s^* = N_{ges} / N_0 = \frac{\pi + 4 e/r}{\pi + 2 e/r}$$

- DIN 1055 Teil 6, Ergänzende Bestimmungen 1977

Die Ergänzenden Bestimmungen 1977 sollen bis zur endgültigen Verabschiedung einer Neubearbeitung der Silonorm helfen, inzwischen er-

kannte Unzulänglichkeiten der ersten Normenfassung zu überbrücken. Die Lastansätze erfahren insoweit eine Änderung, als daß die horizontalen Entleerungslasten für organische Schüttgüter generell um 20 % angehoben werden. Die bisherige Regelung zur Berücksichtigung eines exzentrisch angeordneten Auslaufes wird aufgegeben und derart neu gefaßt, daß Laststeigerungen der Horizontallast  $p_h$  durch eine gleichmäßig über den Umfang verteilte zusätzliche horizontale Belastung

$$p_{he} = 0.2 \cdot e \cdot (u/A) / 1.5 \text{ zu berücksichtigen sind.}$$

Für Rundzellen mit  $u/A = 4/d$  ergibt sich somit der Laststeigerungsfaktor  $s^*$  zu

$$s^* = 0.267 \cdot e/r$$

Die Lastanhebung für ausmittige Entleerung fällt zwar geringer aus als in der vorhergehenden Regelung, jedoch muß berücksichtigt werden, daß für die organischen Schüttgüter das Lastniveau insgesamt um 20 % angehoben ist.

Ausgenommen von dieser Regelung bleibt das Schüttgut Zucker. Dadurch soll der Eigenart des Zuckers, sogenannte Rattenlöcher, d.h. schlotartige, eng begrenzte Fließzonen zu bilden, Rechnung getragen werden.

#### - DIN 1055 Teil 6, Ausgabe 1987

Die Ausgabe 1987 bringt grundlegende Änderungen der Norm. Zwar erfolgt die Bestimmung der Grundlasten nach wie vor mit dem Ansatz nach JANSSEN, getrennte Parameter zur Ermittlung der Füll- und Entleerungslasten werden allerdings nicht mehr vorgeschrieben. Vielmehr sind die einzelnen Kenngrößen für die wichtigsten Schüttgüter direkt in einer Tabelle zusammengefaßt. Zur Bestimmung der Entleerungslasten wird das in anderen Ländern bereits angewandte Prinzip der Überlastfaktoren eingeführt. Während die Entleerungslastfaktoren  $e_h$  zur Ermittlung der horizontalen Lastkomponente schüttgutabhängig sind, ist der Faktor zur Ermittlung der Wandreibungslast bei allen Schüttgütern konstant mit 1,1 anzusetzen. Der Einfluß der Geometrie einer Silozelle auf den Überlastfaktor wird dadurch berücksichtigt, daß dieser bei gedrunenen Zellen (niedriges Verhältnis  $h/d$ ) abgemindert werden darf.

Erstmals wird bei den Entleerungslasten der Einfluß des Fließprofils berücksichtigt (Unterscheidung Massenfluß - Kernfluß).

Um den bei Kernfluß während des Entleerungsvorganges auftretenden Ungleichförmigkeiten im Lastbild angemessen Rechnung zu tragen, ist eine zusätzliche Belastung in horizontaler Richtung auf die Zellenwände vorgeschrieben. Diese Zusatzbelastung ist als Teilflächenlast anzusetzen. Sie ist von verschiedenen Parametern abhängig, um unterschiedliche Einflüsse besser erfassen zu können. Im einzelnen sind dies



- die Geometrie des Silobauwerkes, gekennzeichnet durch das Verhältnis Höhe  $h$  / Durchmesser  $d$
- die Art der Entleerung, gekennzeichnet durch die bezogene Ausmitte  $e/r$
- die Steifigkeit der Silokonstruktion, beschrieben durch das Verhältnis Radius  $r$  / Wanddicke  $t$
- die spezifische Eigenart des einzulagernden Schüttgutes (z.B. Neigung zur Brückenbildung)

Zur einfacheren Handhabung ist ein Näherungsverfahren angegeben, das statt des Ansatzes einer Teilflächenlast eine Vergrößerung der gleichmäßig verteilten Horizontallast gestattet (sog.  $\alpha$ -Verfahren).

Die durch eine ausmittige Entleerung bedingte Laststeigerung läßt sich nach eigenen Berechnungen wie folgt abschätzen:

$$\xi^* = \frac{\partial \sigma_{\text{exzentr.}}}{\partial \sigma_{\text{zentr.}}} = 1 + \bar{A} \cdot (3 \cdot e/r - 1) \quad \text{mit } e/r \geq 1/3$$

Für Stahlbetonsilos gilt

$$\bar{A} = 1 + \frac{(0,5 + 0,02 r/t) \beta_{\text{zentr.}}}{1 + (0,5 + 0,02 r/t) \beta_{\text{zentr.}}}$$

und für Stahlsilos

$$\bar{A} = 1 + \frac{3 \sqrt{h/d} \cdot \beta_{\text{zentr.}}}{1 + 3 \sqrt{h/d} \cdot \beta_{\text{zentr.}}}$$

In Abhängigkeit von den nach der Norm leicht zu bestimmenden Beiwerten  $\beta_{\text{zentr.}}$  (zentrisches Entleeren) und dem Verhältnis  $r/t$  (Stahlbetonsilos) bzw.  $h/d$  (Stahlsilos) sind die Koeffizienten  $\bar{A}$  in den nachfolgenden Tabellen zusammengestellt.

Tab. 1: Koeffizienten  $\bar{A}$  (Stahlbetonsilos)

$r/t$	Beiwert $\beta_{\text{zentr.}}$ (zentrisches Entleeren)						
	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48
20	0,097	0,139	0,178	0,213	0,245	0,274	0,302
25	0,107	0,153	0,194	0,231	0,265	0,296	0,324
30	0,117	0,165	0,209	0,248	0,284	0,316	0,346
35	0,126	0,178	0,224	0,265	0,302	0,335	0,365
40	0,135	0,190	0,238	0,281	0,319	0,353	0,384
45	0,144	0,201	0,251	0,296	0,335	0,370	0,402
50	0,153	0,213	0,265	0,310	0,351	0,387	0,419
55	0,161	0,224	0,277	0,324	0,365	0,402	0,434
60	0,169	0,234	0,290	0,338	0,380	0,417	0,449

Beispiel: Für einen Weizensilo mit den Kennwerten  $h/d > 4$  und  $r/t = 30$  ergibt sich nach DIN 1055 Teil 6 den Beiwert  $\beta$  für zentrisches Entleeren zu  
 $\beta = 0,5 \cdot 1,6 \cdot 0,3 \cdot 1,0 = 0,24$   
 Aus Tab.1 folgt  $A = 0,209$   
 Soll der Silo ausmittigt entleert werden, d.h.  $e/r = 1$ , so ist die gleichmäßig verteilte horizontale Belastung um den Faktor  $s^* = 1 + 0,209 \cdot (3 \cdot 1 - 1) = 1,42$  zu vergrößern.

Tab. 2: Koeffizienten A (Stahlsilos)

h/d	Beiwerte $\beta_{\text{zentr.}}$ (zentrisches Entleeren)						
	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
1,0	0,057	0,083	0,107	0,130	0,153	0,174	0,194
2,0	0,078	0,113	0,145	0,175	0,203	0,229	0,253
3,0	0,094	0,135	0,172	0,206	0,238	0,267	0,294
4,0	0,107	0,153	0,194	0,231	0,265	0,296	0,324
5,0	0,118	0,168	0,212	0,251	0,287	0,320	0,349
6,0	0,128	0,181	0,227	0,269	0,306	0,340	0,370

Beispiel: Für ein Weizensilo in Stahlbauweise ( $r/t > 100$ ) ergibt sich bei einer Schlankheit  $h/d = 4$  nach DIN 1055 Teil 6 der Beiwert  $\beta$  für mittiges Entleeren zu  $\beta = 0,04$ .  
 Aus Tab 2. folgt  $A = 0,194$ .  
 Entsprechend ist zur Berücksichtigung des ausmittigen Entleerens die gleichmäßig verteilte horizontale Belastung um den Faktor  $s^* = 1 + 0,194 \cdot 2 = 1,39$  zu vergrößern.

Zusammengefaßt lassen sich die zusätzlichen Beanspruchungen infolge ausmittigen Entleerens entsprechend der Entwicklung der Silonorm DIN 1055 Teil 6 wie nachstehend gezeigt darstellen. Dabei ist zu beachten, daß die Lasten für zentrisches Entleeren, auf die sich die Steigerungsfaktoren  $s^*$  beziehen, im Laufe der Jahre selbst und z.T. nicht unbeträchtlich angehoben worden sind. D.H. im Bereich  $0 < e/r < 0,5$  sind die absoluten Lasten trotz jetzt fehlender oder geringerer Steigerungsfaktoren für exzentrisches Entleeren auch größer als früher. Insgesamt mag Abb. 2.12 als Beispiel dafür dienen, wie "die Entwicklungsgeschichte der Normen das Wechselspiel zwischen Erfahrung und sich weiterentwickelnden Erkenntnissen widerspiegelt" (HAMPE, 1987).

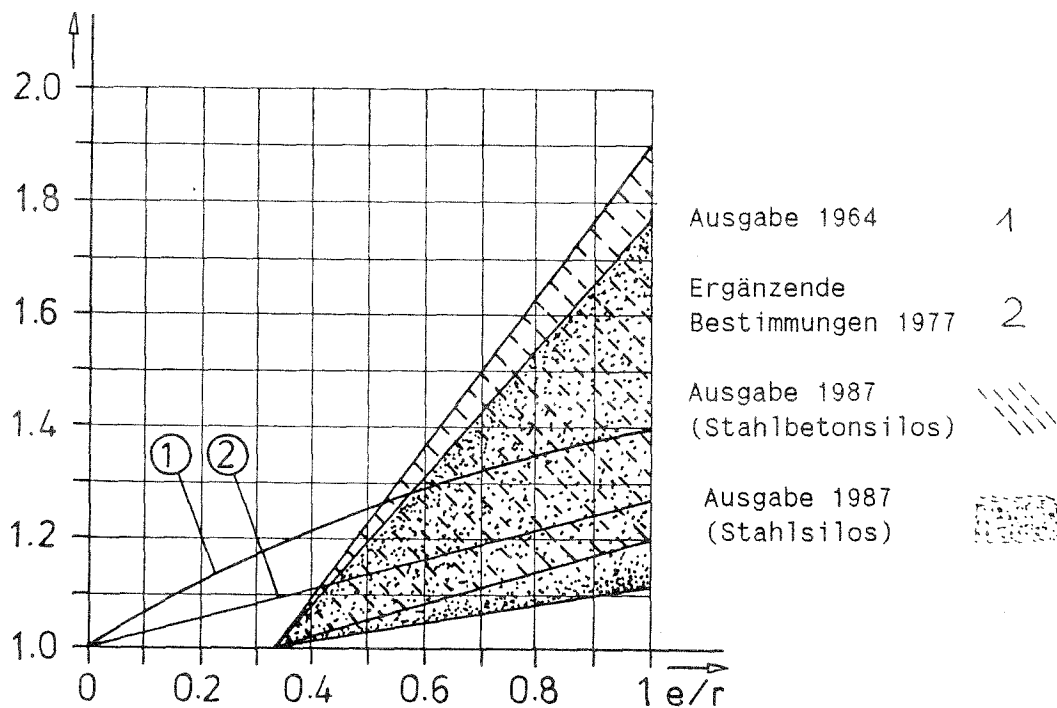


Abb.2.12 Laststeigerungen zur Berücksichtigung des ausmittigen Entleerens nach DIN 1055 Teil 6

2.2.2 DDR Bauakademie der DDR  
TGL 32274/09 "Lastannahmen für Bauwerke; Lasten aus Schüttgütern in Bunkern, Flachsilos und Silos" (1987)

Die Lastermittlung erfolgt analog zur DIN 1055 nach dem JANSSEN-Ansatz. Für die wichtigsten Schüttgüter ist wiederum eine Tabelle angegeben, die die Hauptparameter enthält. Dazu zählt auch ein schüttgutspezifischer Überlastfaktor  $c_1$  zur Bestimmung der horizontal wirkenden Entleerungsdrücke aus den Fülldrücken. Der Einfluß des ausmittigen Entleerens bei Kernflußzellen ist durch einen zusätzlichen Lastansatz zu berücksichtigen. Bei zylindrischen Zellen ist diese Zusatzlast als nicht rotationssymmetrisch über den Umfang verteilte Teilflächenlast  $p_{he}$  in halber Silohöhe anzusetzen.

$$p_{he} = (c_2 - c_1) \cdot e/r \cdot p_{hf}$$

Der die Lastintensität bestimmende Koeffizient  $c_2$  ist nicht nur schüttgut-, sondern auch von der Wandrauigkeit abhängig: bei glatten Wänden ist er größer anzusetzen als bei rauhen. In Abhängigkeit von der Ausmitte kann  $c_2$  abgemindert werden, somit ergibt sich

$$\frac{\Delta p_{he}}{p_{he}} = \left( \frac{c_2}{c_1} - 1 \right) \cdot e/r \quad \text{mit} \quad 0 < e/r < 1$$

Für die Verhältniszerte  $c_2/c_1$  folgt für die in Tabelle 5 der TGL angegebenen Schüttgüter

$1,1 < c_2/c_1 < 1,5$	rauhe Wand
$1,4 < c_2/c_1 < 1,9$	glatte Wand

Bezogen auf die horizontale Entleerungslast beim zentrischen Entleeren ergibt sich somit in Abhängigkeit von der Ausmitte und je nach Verhältniszerte  $c_2/c_1$  eine Zusatzbelastung von bis zu 50 % der gleichförmig verteilten Entleerungslast bei rauhen Wänden und eine Zusatzbelastung bis zu 90 % bei glatten Wänden.

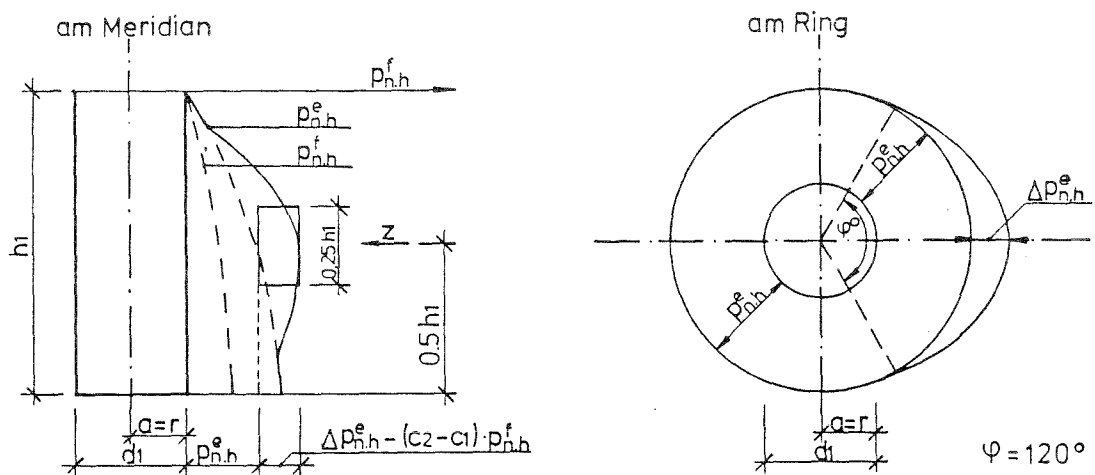


Abb. 2.13 Lastansatz nach TGL 32274/09 zur Berücksichtigung des ausmittigen Entleerens

Der Einfluß der Zusatzbelastung ist nicht nur in Ring-, sondern auch in Meridianrichtung zu verfolgen, eine Berechnung des Tragwerkes als Schale ist erforderlich.

Ein Berechnungsbeispiel (vgl. Anlage zu Kap. 2) zeigt den Einfluß der Zusatzbelastung.

### 2.2.3 GROSSBRITANNIEN British materials handling board: "Silos - Draft design code for silos, bins, bunkers and hoppers" (1987)

Die hier beschriebene Regelung wurde insbesondere unter der Mitwirkung von Verfahrenstechnikern erarbeitet und gilt im eigentlichen Sinne nicht als englische Norm (British Standard). Gleichwohl kann sie als erste Stufe eines entsprechenden Codes angesehen werden.

Für die wichtigsten Schüttgüter werden in einer Tabelle die erforderlichen Kenngrößen angegeben, um die auftretenden Schüttgutlasten nach dem Ansatz von JANSSEN zu bestimmen. Der Überlastfaktor zur Bestimmung der horizontalen Entleerungslasten beim zentrischen Ent-

leeren wird generell mit 1,6 festgesetzt. Dabei gilt eine Silozelle als zentrisch entleert, wenn die bezogene Ausmitte  $e/r$  kleiner 0,3 ist.

Angaben zum ausmittigen Entleeren beziehen sich nur auf rechteckige oder polygonale Silozellen und freifließende Schüttgüter. Bei zylindrischen Zellen wird ein exzentrisches Entleeren ausdrücklich ausgeschlossen, da man der Ansicht ist, daß ein geeigneter Lastansatz hierzu zur Zeit nicht besteht.

Für die praktische Anwendung wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

Als Hauptbezugsgröße zur Klassifizierung eines Silobauwerkes gilt seine Speicherkapazität. Die für die festigkeitsmäßige Auslegung maßgebenden Belastungen aus dem Schüttgut auf die Konstruktion können dabei bei allen Gruppen nach der vorliegenden Regelung bestimmt werden.

Es gibt 4 Gruppen von Silos mit unterschiedlichen Anforderungen

- Gruppe 1: Silozellen bis 100 t Speicherkapazität

Für aus Glattblechen hergestellte Stahlsilozellen sind in dem Entwurf die wichtigsten Kriterien zur Dimensionierung der Haupttragteile angegeben. Wird diesen Regelungen gefolgt, so ist eine besondere Überprüfung der Konstruktion nicht erforderlich.

- Gruppe 2: Silozellen bis 1000 t Speicherkapazität

Für zentrisch entleerte Silos dieser Gruppe wird gefordert, daß der mit dem Entwurf betraute Ingenieur durch eine Prüfinstanz auf die Einhaltung der fachspezifischen Regelungen (z.B. BS 5950: The use of structural steel in building und BS 8110: Structural use of concrete) überwacht wird.

Bei nicht zentrisch entleerten Silos dieser Gruppe sollte die Prüfinstanz besondere Erfahrung im Silobau aufweisen.

- Gruppe 3: Silozellen mit mehr als 1000 t Speicherkapazität

Bei allen Silozellen dieser Art ist der Entwurf durch Spezialisten mit Erfahrung im Silobau zu überprüfen.

- Gruppe 4: Silozellen mit mehr als 1000 t Speicherkapazität, insbesondere ausmittig entleerte zylindrische Zellen und Silozellen für nicht freifließende Produkte.

Silobauwerke dieser Gruppe gehören nicht zum Geltungsbereich des vorliegenden Entwurfes. Sowohl Entwurf als auch die erforderliche Überprüfung sind daher als Aufgabe zu sehen, die nur von erfahrensten Fachleuten übernommen werden sollte.

#### 2.2.4 AUSTRALIEN National Committee on Structural Engineering: "Guidelines for the assesement of loads on bulk solids containers" (1986)

Im Vorwort verweisen die Verfasser ausdrücklich auf die Schwierigkeiten, Lastannahmen für Silobauwerke regeln zu können. Die Aufgabe werde noch dadurch erschwert, daß in der Literatur oft sehr unterschiedliche Standpunkte vertreten würden. Andererseits wird nochmals auf die Forderung - insbesondere der Industrie - nach einer Standardvorgabe verwiesen.

Analog zu DIN 1055 Teil 6 erfolgt die Berechnung der maßgebenden Schüttgutlasten im zylindrischen Teil einer Silozelle nach der JANSSEN-Methode. Für die wichtigsten Schüttgüter sind die erforderlichen Kennwerte in einer Tabelle zusammengefaßt. Die Bestimmung der Entleerungslasten erfolgt multiplikativ durch einen Vergrößerungsfaktor. Dieser ist abhängig von der Höhenlage des betrachteten Schnittes sowie vom Wandreibungswinkel. Deutlich erkennbar ist die bei Kernflußsilos vorgegebene Reduktion des Erhöhungsfaktors im unteren Bereich einer Silozelle (bis zur einer Höhe  $h = d$  über dem Boden).

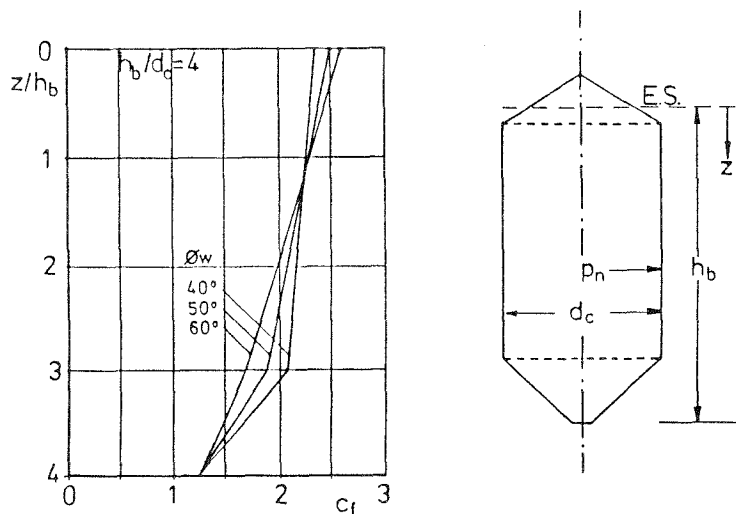


Abb. 2.14 Überlastfaktor  $c_f$  zur Bestimmung der horizontalen Entleerungslasten

Für relativ nachgiebige Wandkonstruktionen (als unterer Grenzwert wird das Verhältnis  $r/t = 250$  genannt) kann der Erhöhungsfaktor abgemindert werden. Voraussetzung hierfür ist, daß die Konstruktion in vertikaler Richtung durchlaufend ist, d.h. nicht aus einzelnen Elementen besteht. Die Reduktion sollte allerdings 10 % nicht überschreiten.

Eine zusätzliche Beanspruchung durch ausmittiges Entleeren wird durch die Laststeigerung nicht erfaßt. Um diesen Einfluß berücksichtigen zu können, wird ein Lastansatz vorgeschlagen, der das Vorhandensein eines Fließkanals entlang der Wand und damit verbundener Laststeigerungen auf der Auslaufgegenseite sowie Laststeigerungen und Lastminderungen auf der Auslaufseite vorsieht.

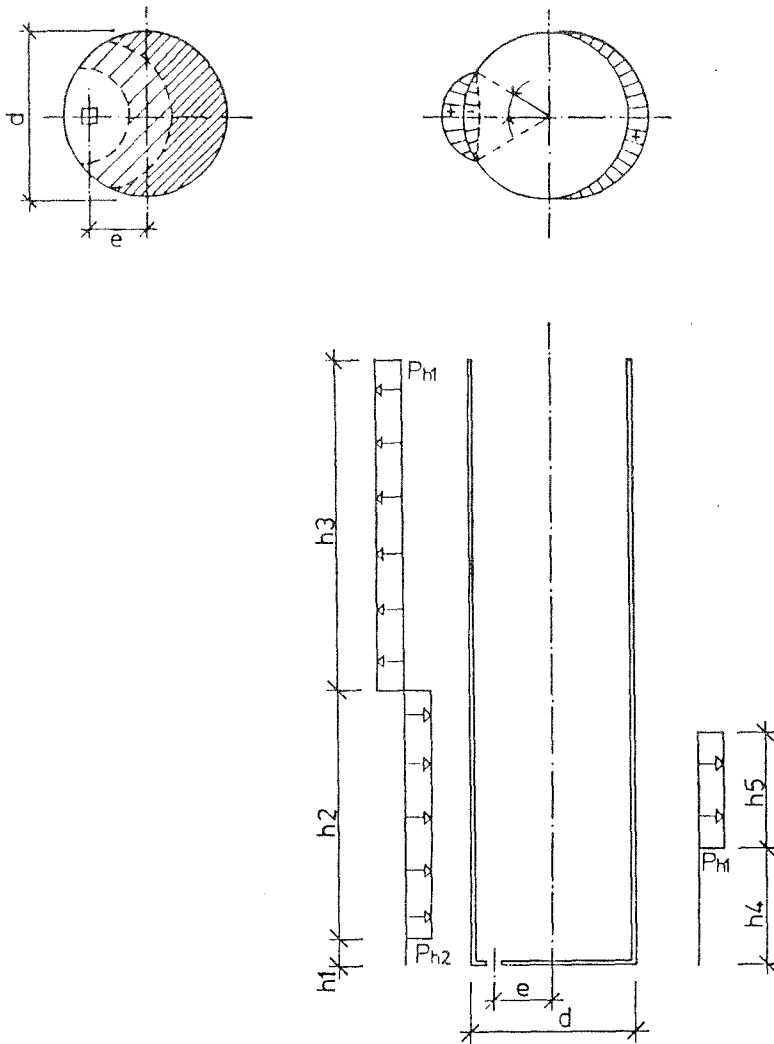


Abb. 2.15 Lastansatz für ausmittiges Entleeren

- 2.2.5 USA: American Concrete Institute:  
 "Recommended practice for design and construction of concrete bins, silos and bunkers for storage of granular materials (ACI 313-77) (revised 1983) and commentary - ACI 313R-77 (1983)."

Nach der amerikanischen Regelung können zur Ermittlung der Grundlasten zwei Verfahren angewandt werden: die Methode nach JANSSEN oder alternativ der Ansatz nach REIMBERT (1961). Die Horizontallasten sind gleichmäßig verteilt über den Umfang anzusetzen. Die für die Dimensionierung maßgebenden horizontalen Seitendrucke beim Entleeren werden durch Multiplikation mit Überlastfaktoren aus den Fülllasten ermittelt. Die für alle Schüttgüter einheitlichen Überlastfaktoren sind in einer Tabelle vorgegeben, eine Differenzierung erfolgt nach der Höhenlage des betrachteten Horizontalschnittes. Je nach verwendetem Rechenansatz (JANSSEN oder REIMBERT) sind sie un-

terschiedlich, wobei die bei einer Berechnung nach JANSSEN anzusetzenden Überlastfaktoren im oberen Bereich höhere Werte annehmen. Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, daß die REIMBERT-Methode die größeren horizontalen Lasten im oberen Zellenbereich ergibt. Zur Berücksichtigung des Einflusses einer ausmittigen Entleerung wird in den Erläuterungen eine Erhöhung der gleichmäßig über den Umfang verteilten horizontalen Belastung vorgeschlagen. Die zusätzliche Belastung ist mit 25 % der maximalen Fülllast zu ermitteln.

Abhängig von der bezogenen Ausmitte  $e/r$  ergibt sich für den Laststeigerungsfaktor:

$$s^* = p_{he \text{ ges.}} / p_{he} = 1 + (0,25 * e/r) / C_d$$

Mit einem Überlastfaktor  $C_{d \text{ min}} = 1.65$  ergibt sich somit für die Steigerung der Belastung infolge ausmittigen Entleerens

$$s^* = 1 + 0,15 * e/r$$

d.h. eine Steigerung der Horizontallast um max. 15 %.

Ausdrücklich wird darauf verwiesen, daß dieser Lastansatz – insbesondere für größere zylindrische Silozellen (Durchmesser größer 9.0 m) und nicht freifließende Materialien – zu gering sein kann und daß die Zellenwände für eine Biegebeanspruchung auszulegen sind.

Gegenwärtig wird die amerikanische Silovorschrift überarbeitet, es soll ein Ansatz formuliert werden, der es erlaubt, ungleichmäßige Lastverteilungen zu erfassen.

Den Anlaß für die Überarbeitung bilden zahlreiche Schäden, insbesondere an Kohlesilos, wo man starke Ovalisierungen des Querschnittes mit entsprechenden Rißbildungen feststellte.

Hauptursache war die durch die Bildung von Fließkanälen (Silo im Silo) bedingte ungleichmäßige Lastverteilung und die damit vorhandene Biegebeanspruchung. Die Silos waren zumeist nur einlagig bewehrt und somit auch nur begrenzt in der Lage, Biegemomente aufzunehmen.

Die Bildung ausmittiger Fließkanäle ist auch beim mittigen Entleeren möglich, wenn sich ein Fließkanal zur Wand hin entwickelt. Beim Füllen kann zum Beispiel eine Entmischung des Silogutes derart erfolgen, daß größere Partikelteilchen auf der Oberfläche des entstehenden Füllkegels zur Wand hin abrollen. Wegen der geringeren inneren Reibung können dann Fließkanäle verstärkt in den Zonen des Grobkornes auftreten.

In dem vorliegenden Entwurf (7.th draft, 1988 ) wird zur Ermittlung der Entleerungslasten das folgende Verfahren vorgeschlagen:



- Festlegung eines möglichen Fließkanales.

In Abhängigkeit von der Lage der Auslauföffnung und einer möglichen Entmischung des Schüttgutes während des Füllens können mit Hilfe der Diagramme nach GUINTA (1968) Lage und Abmessungen eines Fließkanales abgeschätzt werden.

- Ermittlung der Drücke im Fließkanal

Der Fließkanal ist als Silo im Silo zu betrachten. Die Belastung aus dem Schüttgut ist nach dem JANSSEN-Ansatz zu ermitteln. Dabei ist die Wichte des Schüttgutes auf 90 % zu reduzieren, um die Auflockerung während des Ausfließens in Rechnung zu stellen. Als Seitendruckbeiwert wird das aktive Spannungsverhältnis

$$k = (1 - \sin \varphi) / (1 + \sin \varphi)$$

eingeführt.

Bei der Bestimmung des hydraulischen Radius sind die unterschiedlichen Reibungsverhältnisse (Schüttgut/Schüttgut und Schüttgut/Wand) zu berücksichtigen.

- Ermittlung der Drücke im stehenden Material

Um den aus dem Fließkanal auf das stehende Material ausgeübten Reibungskräften Rechnung zu tragen, ist die Wichte entsprechend zu vergrößern. Als Spannungsverhältnis ist der sogenannte Ruhedruckbeiwert  $k = 1 - \sin \varphi$  in den JANSSEN-Ansatz einzuführen. Der hydraulische Radius ist unter Berücksichtigung der Fließzone zu bestimmen.

Aus der so ermittelten Umfangsverteilung des Horizontaldruckes sind die Bemessungsschnittgrößen herzuleiten.

Will man auf eine aufwendige Schalenberechnung verzichten, so kann man ein beschriebenes Näherungsverfahren anwenden: An einem Ersatzstab wird ein Gesamtbiegemoment ermittelt, das in Abhängigkeit von der Größe des Fließkanales und dem Durchmesser des Silos in einen positiven Anteil (auf der Innenseite Zug erzeugend) und einen negativen Anteil aufgespalten wird.

Die zu berücksichtigende Ringzugkraft ist gleichmäßig entlang des Umfanges anzunehmen und aus der horizontalen Belastung infolge des Füllzustandes zu ermitteln.

Im Anhang ist zu diesem Verfahren ein Beispiel gerechnet. Die gegenüber der ursprünglichen Regelung deutliche Steigerung der erforderlichen Bewehrung sowie die sich zwingend ergebende Bewehrungsanordnung sind erkennbar.

- 2.2.6 FRANKREICH: Syndicat national du beton armé et des techniques industrialisées:  
 "Règles professionnelles de conception et de calcul des silos en beton armé ou précontraint" (1986).

Wie in den meisten Regelungen sind die Lasten nach JANSSEN zu ermitteln. Als Arbeitshilfe enthält die Norm eine Tabelle, in der für die wichtigsten Schüttgüter die erforderlichen Kennwerte angegeben sind. Für die Bestimmung der Fülllasten ist der sogenannte Gleichgewichtszustand 1 maßgebend.

Weitere Gleichgewichtszustände beschreiben den Entleerungszustand, der für die Bestimmung der Drücke auf die Wände maßgebend ist. Dabei ist zwischen "normaler" und "anormaler" Entleerung zu unterscheiden, wobei unter normaler Entleerung das zentrische Entleeren zu verstehen ist, während ausmittiges Entleeren als geometrisch anormal bezeichnet wird. Weiterhin wird unterschieden zwischen mechanisch anormalem (z.B. Druckluft als Entleerungshilfe) und strukturell anormalem Entleeren (z.B. Entleeren mit Hilfe eines eingebauten perforierten Entleerungsrohres).

Um geringe Unregelmäßigkeiten der Belastung zu berücksichtigen, sind alle Drücke auf die Wände grundsätzlich um 15 % zu erhöhen.

Nachstehend wird nur das geometrisch anormale Entleeren (sogenannter Zustand 3) betrachtet. Es wird bestimmt durch die Lage der Entleerungsöffnung und liegt dann vor, wenn die bezogene Ausmitte  $> 0,4$  beträgt. Für diesen Fall ist der hydraulische Radius  $r = A/u$  auf 7,50 m begrenzt, d.h. die Regelung gilt für kreiszylindrische Zellen mit einem maximalen Durchmesser von 30,0 m.

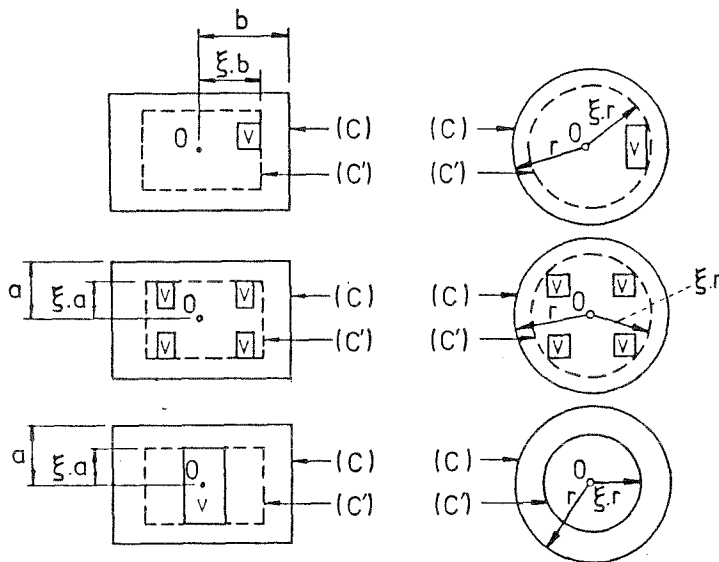


Abb. 2.16 Definition der bezogenen Ausmitte

Zur Erfassung der zusätzlichen Belastung infolge des ausmittigen Entleerens sind zwei Fälle zu unterscheiden.

- Ansatz einer gleichmäßig verteilten Horizontalbelastung  $p_{h3}$

Zusätzlich zur Horizontallast  $p_{h2}$  beim zentrischen Entleeren ist die gleichmäßig verteilte Belastung  $n_1/15$  zu berücksichtigen. Für den Verlauf dieser Zusatzbelastung in Abhängigkeit von der bezogenen Ausmitte gilt die folgende Darstellung.

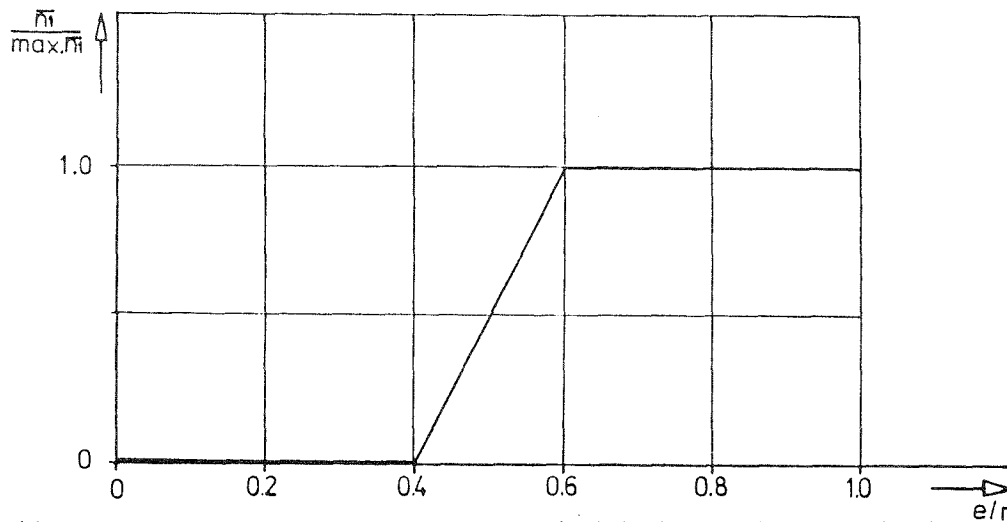


Abb. 2.17 Lastansatz zur Berücksichtigung des ausmittigen Entleerens

Bei einer Betrachtung in "unendlicher Tiefe" ergibt sich  $n_1 = p_{h2}$ , d.h. die Laststeigerung beträgt höchstens  $1/15 = \text{ca. } 7\%$ .

- Ansatz einer gleichmäßig verteilten Horizontalbelastung  $p_{h2}$  und eines zusätzlichen Momentes, als "Ovalisierungsmoment"  $M_{Ova1}$  bezeichnet.

Das Zusatzmoment  $M_{Ova1}$  ist von mehreren Parametern abhängig:

- Referenzmoment:

Es verläuft analog Abb. 2.17, d.h. für Ausmitten größer  $0,6 \cdot r$  erfolgt keine Differenzierung. Weiterhin ist das Referenzmoment von einem Beiwert  $\mu$  abhängig, der die Anforderungen an die Rißweite bestimmt.

- Faktor  $G$ :

Mit diesem Faktor werden die folgenden Einflüsse erfaßt:

- Randbedingungen der Zylinderschale
- Verhältnis  $h/d$
- Verhältnis  $r/t$
- Höhenlage des betrachteten Horizontalschnittes

Zur Bestimmung des Beiwertes G enthalten die Regeln die im Anhang Kap. 2 wiedergegebenen Diagramme.

$$\text{Beiwert} = \frac{1}{1 + \frac{4n_{o2}}{E} \cdot \left(\frac{r}{t}\right)^3}$$

Mit diesem Faktor werden über das Verhältnis  $r/t$  und den Elastizitätsmodul  $E$  des Betons die Steifigkeit des Bauwerkes berücksichtigt, ferner wird durch den Term  $n_{o2}$  das Lastniveau erfaßt.

Die Auswirkungen des Zusatzmomentes können nach eigenen Untersuchungen wie folgt abgeschätzt werden:

Ein Vergleich mit dem zentrischen Entleeren ergibt sich durch eine Gegenüberstellung der jeweils erforderlichen Bewehrungsmenge auf einer Wandseite. Dabei wird der Faktor  $G$  mit seinem Maximalwert 1,0 angenommen, sowie mit  $\mu = 1/200$ , d.h. an die Begrenzung der Rißweite werden die höchsten Anforderungen gestellt.

Beim zentrischen Entleeren ergibt sich die Bewehrung zu

$$A_{s0} = 0,5 \cdot p_{h2} \cdot r / \beta_s$$

und beim ausmittigen Entleeren zu

$$A_{s \text{ ex}} = p_{h2} \cdot r / \beta_s \cdot (0,5 + 1,25 \cdot e/t)$$

Daraus folgt der Steigerungsfaktor

$$S^* = A_{s \text{ ex}} / A_{s0} = 1 + 2,5 \cdot e / t$$

$$\text{wobei } e = M_{ov} / N_2 = \bar{\mu} \cdot r \cdot \frac{1}{1 + \frac{4n_{o2}}{E} \cdot \left(\frac{r}{t}\right)^3}$$

die Ausmittigkeit des Lastangriffes darstellt.

$$\text{Für den Term } \frac{1}{1 + \frac{4n_{o2}}{E} \cdot \left(\frac{r}{t}\right)^3}$$

ergibt sich in Abhängigkeit von  $r/t$  der Maximalwert, wenn der Nenner ein Minimum annimmt.

$$\text{mit } \min \left( \frac{4}{1,15} \cdot \frac{\gamma \cdot d}{4\mu} \cdot \frac{1}{E} \right) = 10^{-6} \text{ folgt somit}$$

$$s^* = 1 + 2,5/200 / (1 + 10^{-6} \cdot (r/t)^3) \cdot r/t$$

(mit  $r/t \leq 50$ , Stahlbetonsilos)

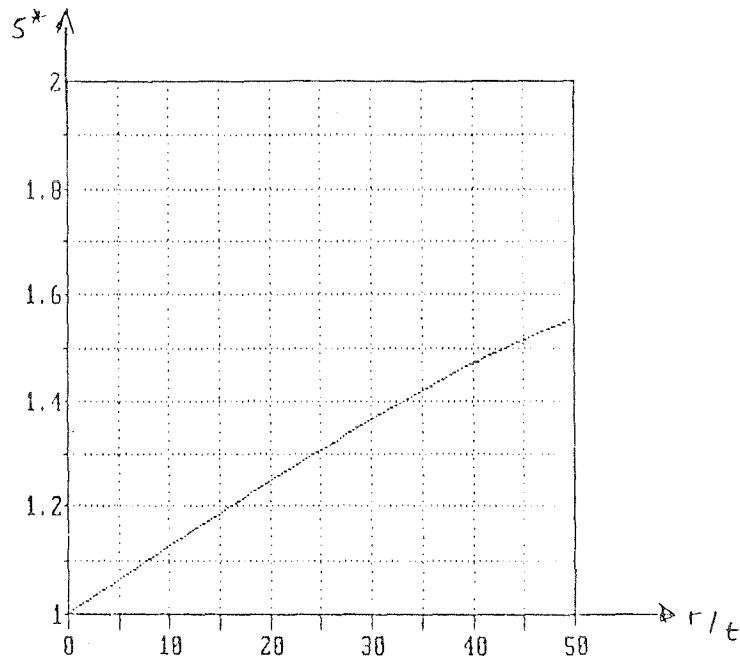


Abb. 2.18 Steigerung der Bewehrung beim ausmittigen gegenüber dem mittigen Entleeren in Abhängigkeit von  $r/t$

### 2.2.7 Vergleich der Regelungen

Nach allen Vorschriften erfolgt die Ermittlung der Belastung auf die vertikalen Wände eines Silos auf der Grundlage der von JANSSEN angegebenen Gleichungen. Die einzelnen Parameter sind dabei unterschiedlich, entsprechende Anhaltswerte sind zumeist schüttgut-spezifisch in Tabellen vorgegeben.

Alle Modelle zur Erfassung des ausmittigen Entleerens müssen als Näherung gesehen werden. Teilweise sind die Angaben nur als Abschätzungen zu verstehen, dies gilt insbesondere für die Ausführungen zum ausmittigen Entleeren zylindrischer Silozellen.

### 3. Druckermittlungen am Modellsilo ( $t = 10 \text{ mm}$ ) mit Meßplatten

Um ein geschlossenes Bild über die Verteilung der Horizontaldrücke in einem zylindrischen Silo zu erhalten, ist es erforderlich, die Drücke in verschiedenen Horizonten an mehreren Meßstellen entlang des Umfanges gleichzeitig zu messen. Im Rahmen dieser Versuchsserie wurden die Horizontaldrücke für verschiedene Auslaufanordnungen erfaßt, um jeweils charakteristische Druckverteilungen ermitteln und daraus auf die Beanspruchungen der Siowand schließen zu können. Im Vordergrund des Interesses stand die Verteilung der Horizontaldrücke, auf die Messung der auftretenden Wandreibungslasten wurde verzichtet.

#### 3.1 Schüttgut

Als Schüttgut wurde Quarzsand verwendet. Den gleichen Sand benutzte SCHNEIDER (1985) in seinen Versuchen, so daß ein Vergleich möglich ist. Die Schüttguteigenschaften wurden am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik der TU Braunschweig bestimmt; Messungen vor und nach Abschluß der Versuche zeigten nur geringfügige Änderungen der Eigenschaften an. Der Wandreibungswinkel wurde mit einer Jenike-Scherzelle gemessen.

Im einzelnen ergaben sich die folgenden Kennwerte:

Schüttgutwichte	$\tau = 15,69 \text{ kN/m}^3$
Wandreibungsbeiwert	$\mu = \tan \delta = 0,39$
Winkel der inneren Reibung	$\theta = 33^\circ$

Die Schüttgutuntersuchungen sind im Anhang zu Kap. 3 dokumentiert. Mit diesen Kennwerte sind zum Vergleich mit den Meßergebnissen die Horizontaldrücke nach dem Ansatz von Janssen ermittelt und diesen gegenübergestellt (Abb. 3.12).

#### 3.2 Versuchsaufbau

Für die Versuchsdurchführung stand im Siloversuchsstand der TU Braunschweig der von FRESE entwickelte Modellsilo zur Verfügung. Der Silo besteht aus einzelnen Plexiglaszylindern von 0,78 m Durchmesser und hat eine Bauhöhe von insgesamt 5,0 m. In drei Horizonten sind jeweils acht Meßelemente angeordnet, so daß eine entsprechend enge Verteilung entlang des Umfanges gegeben ist.

Die Versuche wurden mit ebenem Boden durchgeführt.

Durch die unterschiedliche Anordnung der Auslauföffnungen war es möglich, die Messungen für zentrischen, halbexzentrischen und voll-exzentrischen Auslauf vorzunehmen.

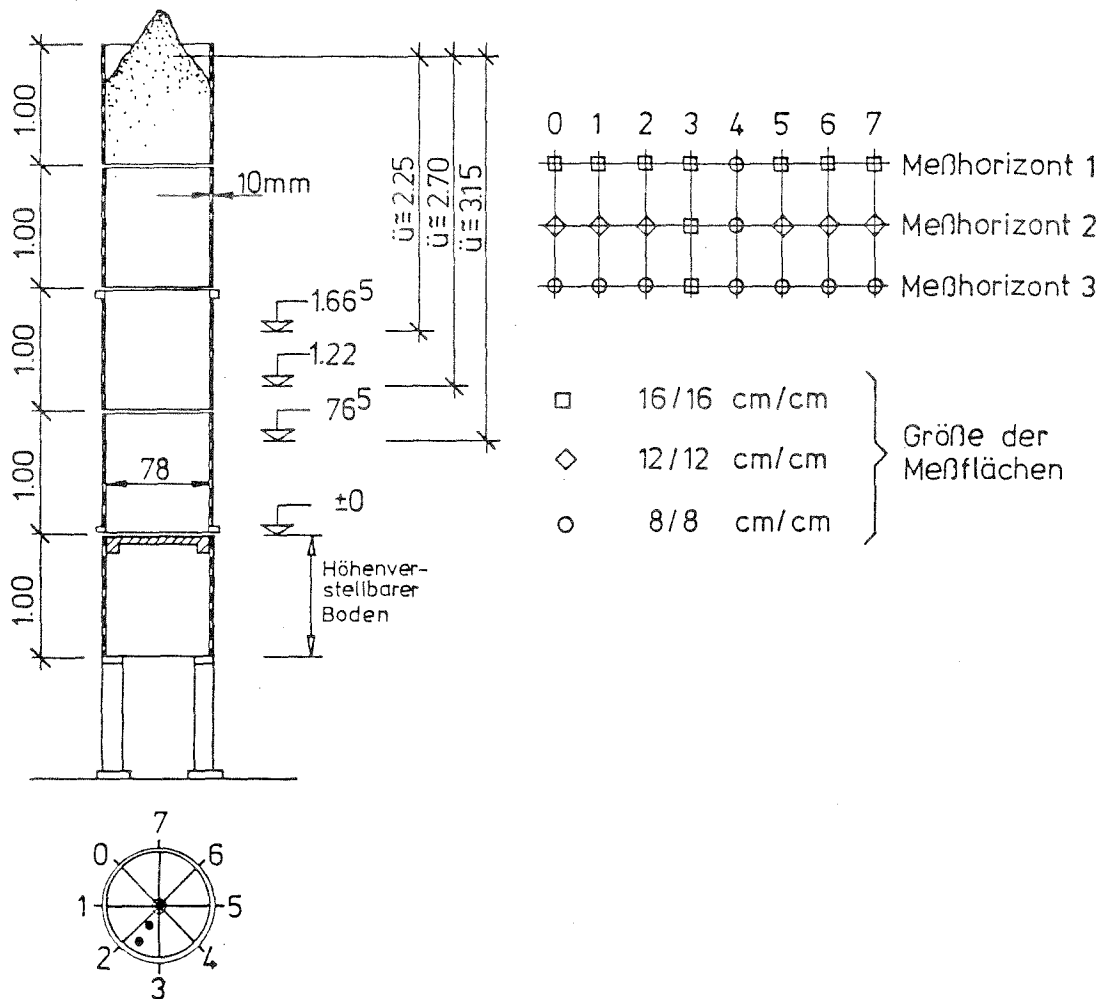


Abb. 3.1 Modellsilo

Für die Festlegung der Höhenlage des ebenen Bodens galten die folgenden Vorüberlegungen:

Die Lage des Verschneidungspunktes des inneren Fließtrichters mit der Silowand läßt sich nach EVERTS/v.ZANTEN/RICHARDS anhand eines Diagrammes in Abhängigkeit vom Winkel der inneren Reibung annähernd bestimmen (Abb. 3.3). Nach den theoretischen Untersuchungen von GLADEN ergeben sich die max. Drucksteigerungen in einer Höhe, die etwa dem 1,0 bis 2,0 - fachen Durchmesser des Silos entspricht (vgl. Abb. 2.9).

Für die einzelnen Meßhorizonte ergaben sich dabei Überschüttungshöhen zwischen 2,25 m und 3,15 m (Abb. 3.1). Um annähernd gleiche Bedingungen der Wandreibung wie bei den in Kap. 4 beschriebenen Versuchen zu schaffen, wurde der Silo auf der Innenseite mit einer PE-Folie ausgekleidet. Somit konnte auch ein Verklemmen der Meßelemente durch das Schüttgut ausgeschlossen werden.

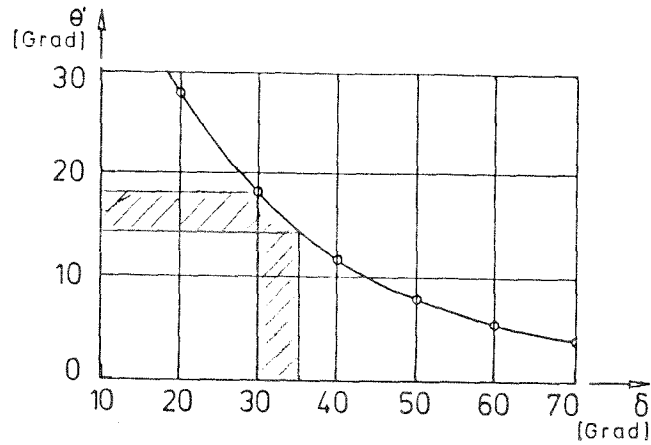


Abb. 3.2 Lage des Verschneidungspunktes innerer Fließtrichter - Silowand (nach EVERTS/v.ZANTEN/RICHARDS)

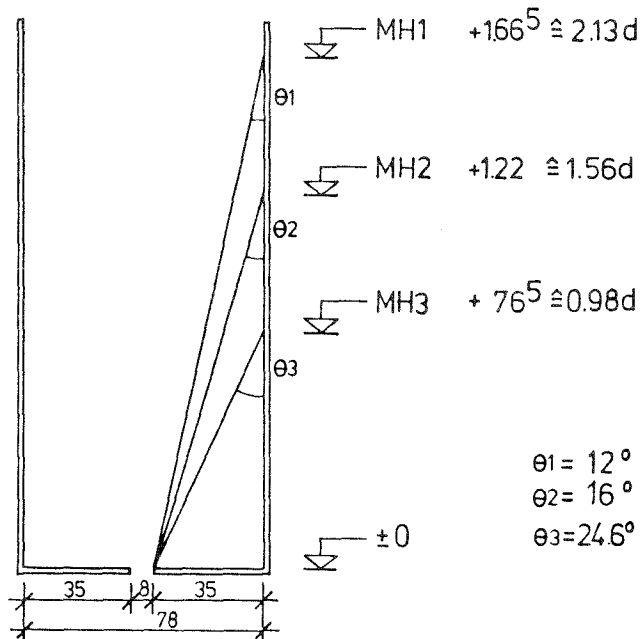


Abb. 3.3 Höhenlage des Bodens

### 3.3 MeBelemente und MeBeinrichtung

Die MeBelemente bestehen aus einzelnen in die Silowand eingepaßten Platten unterschiedlicher Größe. Die Meßplatten sind auf einer Konstruktion unabhängig von der Silowand auf Rechteckrohren angeordnet. Eine Belastung der Platten erzeugt Dehnungen in dieser Unterkonstruktion, die durch in Vollbrücke geschaltete Dehnungsmeßstreifen in ein Meßsignal umgewandelt werden.



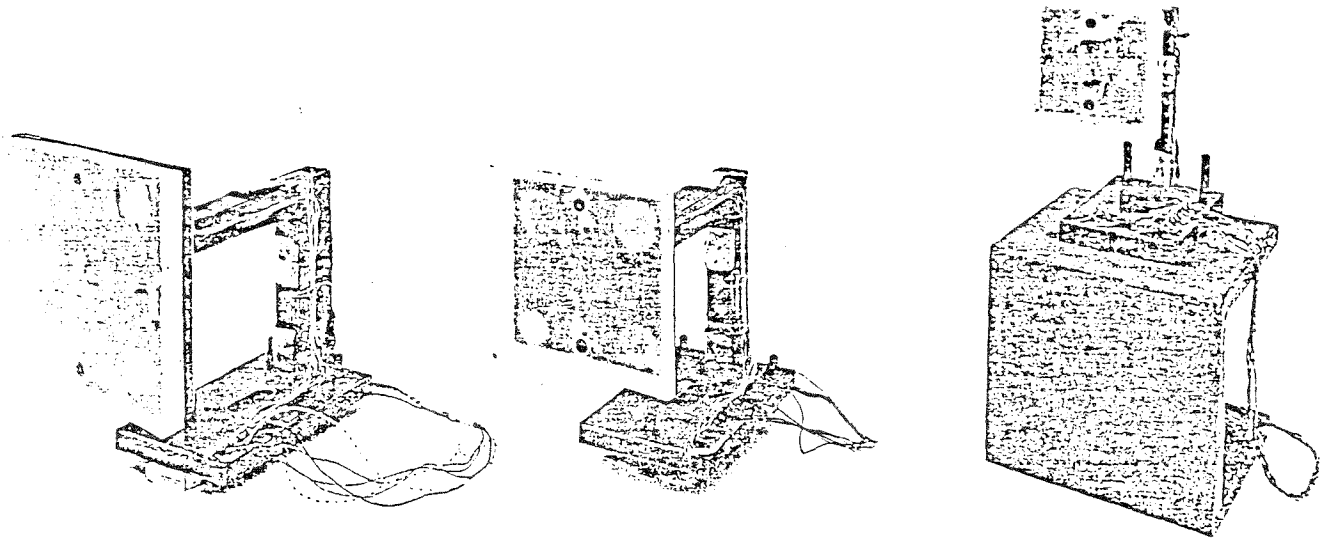


Abb. 3.4 Meßelemente

Vor der Versuchsdurchführung wurden die einzelnen Elemente geeicht, um einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Belastung und registriertem Signal zu erhalten. Die Meßwerte wurden für verschiedene Laststufen registriert. Für jedes Meßelement wurden für die Wertepaare Ausgleichsgeraden ermittelt, die bei der späteren Versuchsauswertung zugrundegelegt wurden. Alle Meßelemente lieferten lineares Verhalten und ließen sich somit durch Regressionsgeraden eindeutig beschreiben. Im Rahmen der Eichversuche wurden auch die auftretenden Verschiebungen ermittelt. Sie liegen im Bereich von  $1/1000$  mm und bestätigen somit den Erfolg der Absicht, steife Meßelemente zu entwickeln. Auch hier zeigten die Meßelemente weitgehend lineares Verhalten, so daß für jedes Element die Federsteifigkeit  $c = P / v$  eindeutig zu bestimmen ist.

Beim Einbau in die Silowand wurde besondere Sorgfalt darauf verwendet, die Elemente genau einzupassen, um keine Versprünge und daraus Beeinflussungen der Druckverteilung zu erhalten. Eine nach Abschluß der Versuche durchgeführte Messung ergab keine Imperfektionen im Wandverlauf. Zur Aufnahme der Meßsignale stand eine Vielstellenmeßanlage UPH 3200 der Firma Hottinger und Baldwin zur Verfügung, die es ermöglichte, die insgesamt 24 Meßstellen innerhalb von 3 sec abzufragen. Der Zeitbedarf für die Abspeicherung der Meßwerte machte es allerdings nötig, den Abstand zwischen den einzelnen Meßzyklen mit ca. 20 sec festzulegen. Durch eine Beschränkung auf ausgewählte Meßstellen konnte bei einigen Versuchen die Zyklusfolgezeit verringert werden.

Lineare Regression :

$$y = 0,0007x + 0,244$$

EICHUNG

Messhorizont: 1

Element: 1

Grösse: 16 \* 16

Bestimmtheitsmaß : .999978

Korrelationskoeff. : .999989

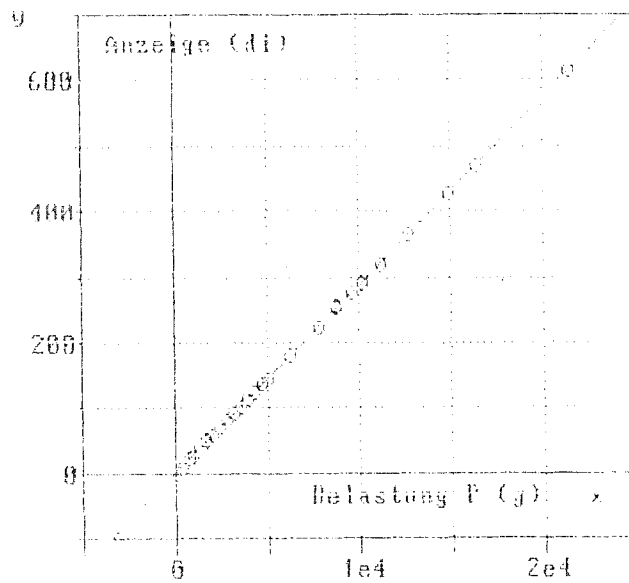


Abb. 3.5 Eichkurve MeBelement

W E G M E S S U N G :

$$y = 0,126x + 14,056$$

Messhorizont: 2

Element.Nr. 2

Grösse 12 \* 12

$c = 2956,5 \text{ MN/m}$

Bestimmtheitsmaß : .984552

Korrelationskoeff. : .992246

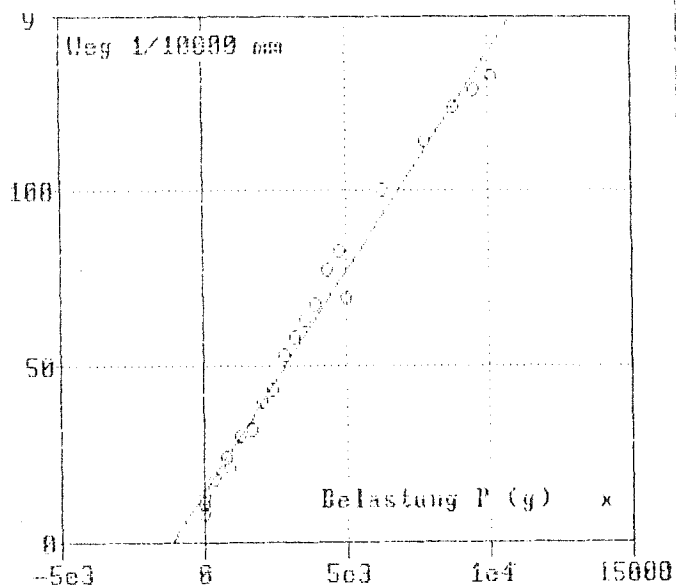


Abb. 3.6 Steifigkeit eines MeBelements

### 3.4 Druckmessungen bei verschiedenen Auslaufanordnungen

#### 3.3.1 Versuchsdurchführung

Der Füllvorgang erfolgte jeweils zentrisch mit einer mittleren Füllgeschwindigkeit von ca. 0,6 cm/sec, so daß ein Füllvorgang ca. 11 Minuten dauerte.

Im Anschluß an den Füllvorgang wurde jeweils ein sogenannter Umlaufbetrieb gestartet, d.h. beim Entleeren wurde der Silo gefüllt. Somit ergab sich die Möglichkeit, mehrere Messungen bei jeweils

gleicher Überschüttungshöhe durchzuführen. Aus diesem Grunde lag der Schwerpunkt der gesamten Messungen auf diesem Betriebszustand. Die Dauer des Umlaufbetriebes wurde so festgelegt, daß mindestens 15 Messungen ausgeführt werden konnten.

Bei der verwendeten kreisrunden Entleerungsöffnung mit 8 cm Durchmesser ergab sich beim Entleeren eine Bewegung des Schüttgutes im Zylinder mit einer Geschwindigkeit von 0,8 cm/sec, d.h. ein Absinken des Schüttgutes um ca. 0,50 m je Minute. In jedem Versuchszyklus (je Anordnung der Auslauföffnung) wurden jeweils mindestens 5 Einzelversuche durchgeführt.

### 3.4.2 Versuchsauswertung

Trotz des sorgfältigen Einbaues der Druckmeßplatten in die Silowandung und der Verwendung eines Einfülltrichters, um ein zentrisches Befüllen zu gewährleisten, ergaben sich nach Abschluß des Füllens unregelmäßige Horizontaldruckverläufe entlang eines Meßhorizontes.

Für die einzelnen Horizonte sind diese Meßwerte nachstehend dargestellt.

Aufgetragen sind jeweils für jede Versuchsserie (5 Einzelversuche) die in den einzelnen Meridianen nach Abschluß des Füllens gemessenen Horizontaldrücke, bezogen auf den Mittelwert in dem entsprechenden Horizont. Deutlich erkennbar sind die Abweichungen der einzelnen Werte vom Mittelwert, aber auch, daß die sich ergebenden Horizontaldruckverläufe entlang eines Umfanges in allen Versuchsserien die gleiche Tendenz aufweisen.

Die Auswertung der Meßdaten aller Versuche mit zentrischem Umlauf (5 Versuche mit je 15 Messungen) zeigt ein ähnliches Ergebnis: Druckschwankungen entlang des Umfanges bis über 20 % bezogen auf den Mittelwert.

Die Abweichungen sind bedingt durch die unterschiedliche Steifigkeit der Meßelemente; mit zunehmender Steifigkeit ergeben sich größere Meßwerte.

Die statistische Auswertung der Messwerte aus dem Umlaufbetrieb zeigt, daß für die Grundgesamtheit eine Normalverteilung angenommen werden kann. Mit den Kennwerten Mittelwert und Standardabweichung aus der gesamten Stichprobe (bis zu 600 Meßwerte) sind jeweils die Dichtefunktion mit dem zugehörigen Histogramm sowie die Verteilungsfunktion und die Summenhäufigkeit aufgetragen (vgl. Anhang zu Kap.4).

Die Einzelmeßstellen zeigen das gleiche Verhalten, die Stichproben (75 Meßwerte) zeigen eine Normalverteilung.

Das Verhalten der Meßanlage kann somit als zuverlässig angesehen werden. Um den Einfluß der unterschiedlichen Steifigkeit der Meßelemente zu berücksichtigen, werden Korrekturfaktoren ermittelt:

Da keine erkennbaren geometrischen Abweichungen vorliegen, kann beim zentrischen Umlauf eine gleichmäßige Horizontaldruckverteilung entlang des Umfanges angenommen werden, als Korrekturfaktoren für

die einzelnen Meßstellen können also die Kehrwerte der in Abb. 3.10 dargestellten Abweichungen vom Mittelwert angenommen werden.

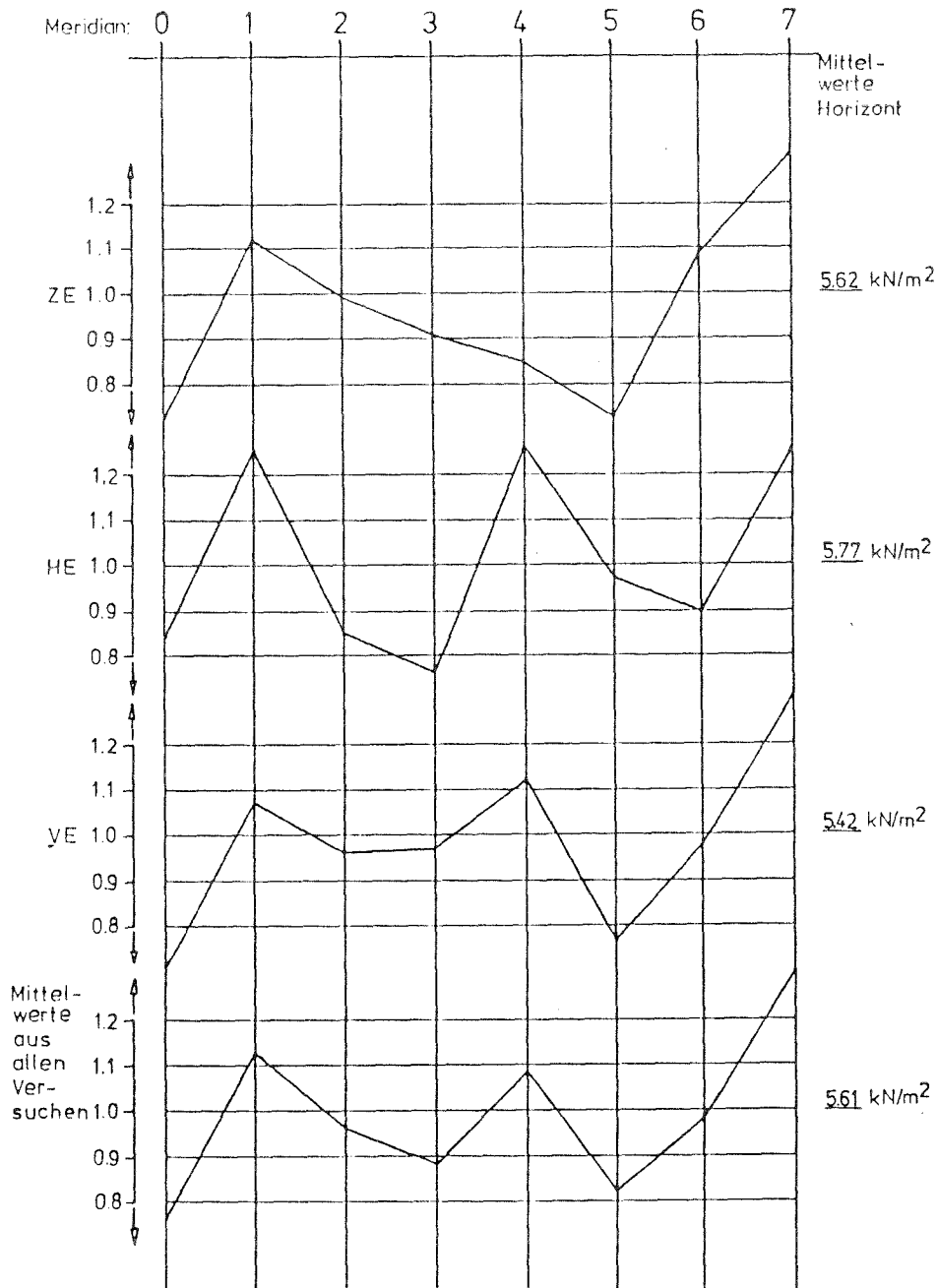


Abb. 3.7 Mittelwert aus allen Messungen nach Abschluß des Füllens  
 Horizont 1 (oben)  
 ZE Versuchsreihe mit zentrischem Auslauf  
 HE Versuchsreihe mit halbexzentrischem Auslauf  
 VE Versuchsreihe mit vollexzentrischem Auslauf  
 (dargestellt sind jeweils die Mittelwerte der einzelnen Meßstellen bezogen auf den Mittelwert des gesamten Horizontes)

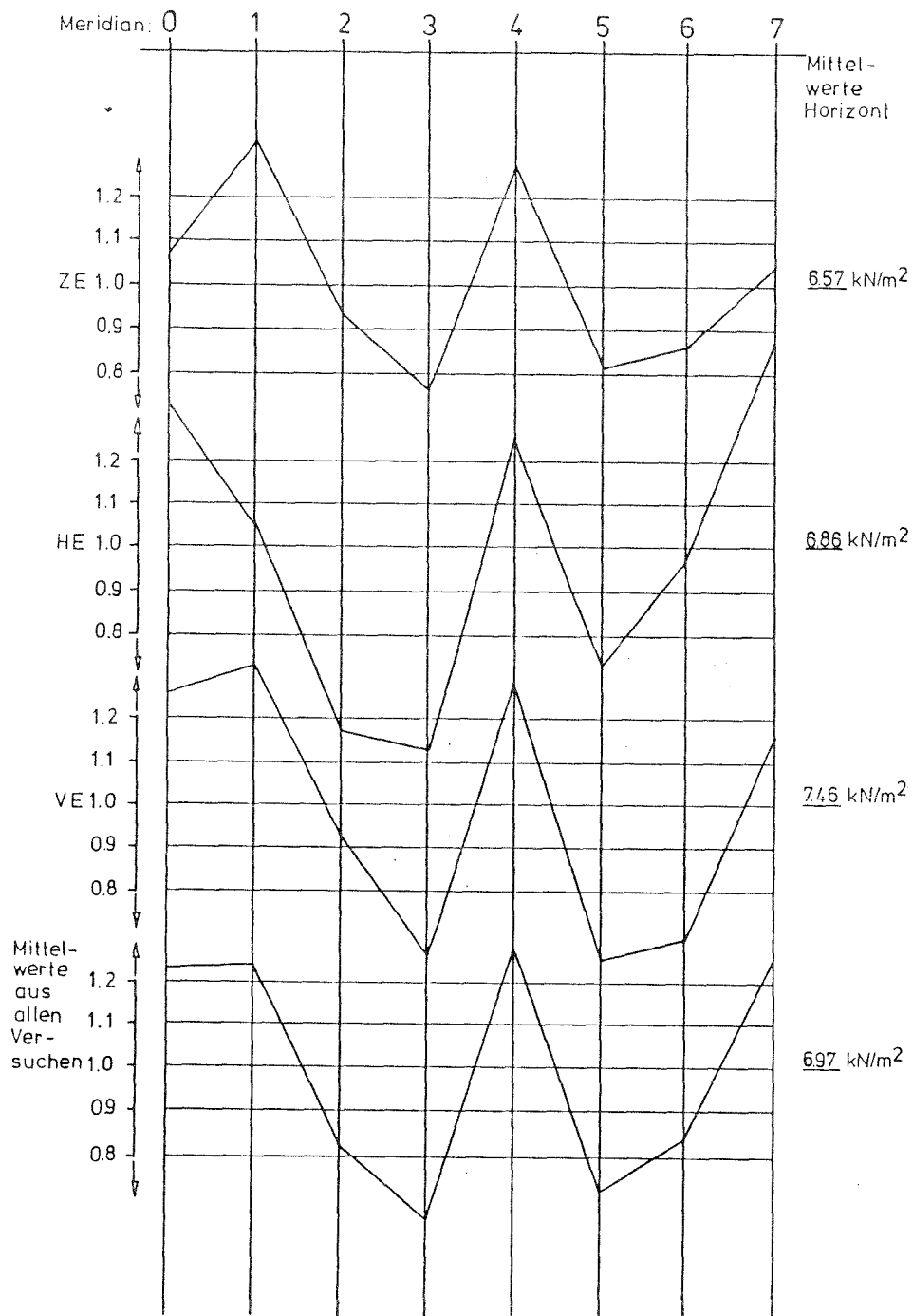


Abb. 3.8 Mittelwert aus allen Messungen nach Abschluß des Füllens  
 Horizont 2 (Mitte)  
 ZE Versuchsreihe mit zentrischem Auslauf  
 HE Versuchsreihe mit halbxentrischem Auslauf  
 VE Versuchsreihe mit vollxentrischem Auslauf  
 (dargestellt sind jeweils die Mittelwerte der einzelnen Meßstellen bezogen auf den Mittelwert des gesamten Horizontes)

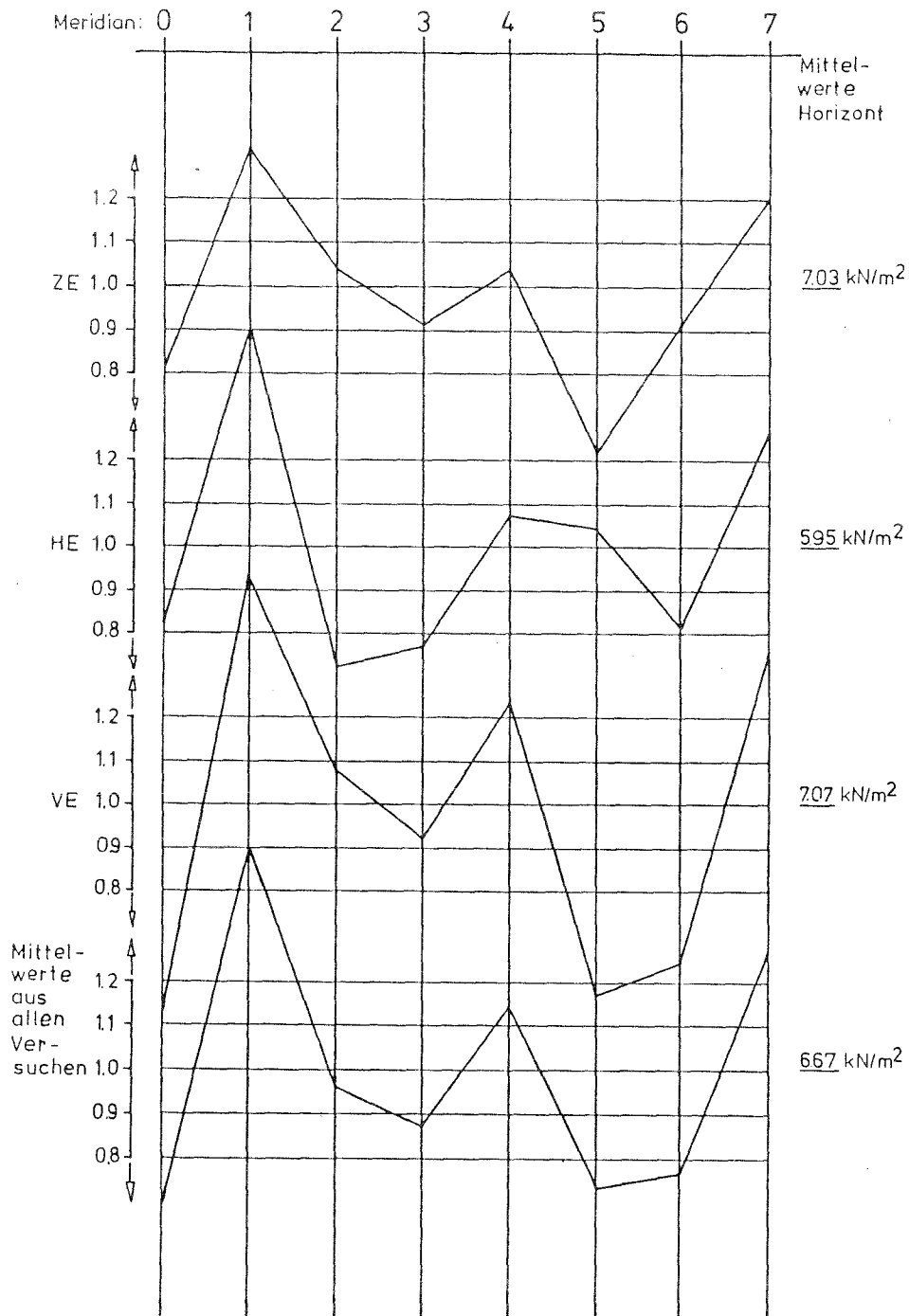


Abb. 3.9 Mittelwert aus allen Messungen nach Abschluß des Füllens  
 Horizont 3 (unten)  
 ZE Versuchsreihe mit zentrischem Auslauf  
 HE Versuchsreihe mit halbexzentrischem Auslauf  
 VE Versuchsreihe mit vollexzentrischem Auslauf  
 (dargestellt sind jeweils die Mittelwerte der einzelnen Meßstellen bezogen auf den Mittelwert des gesamten Horizontes)

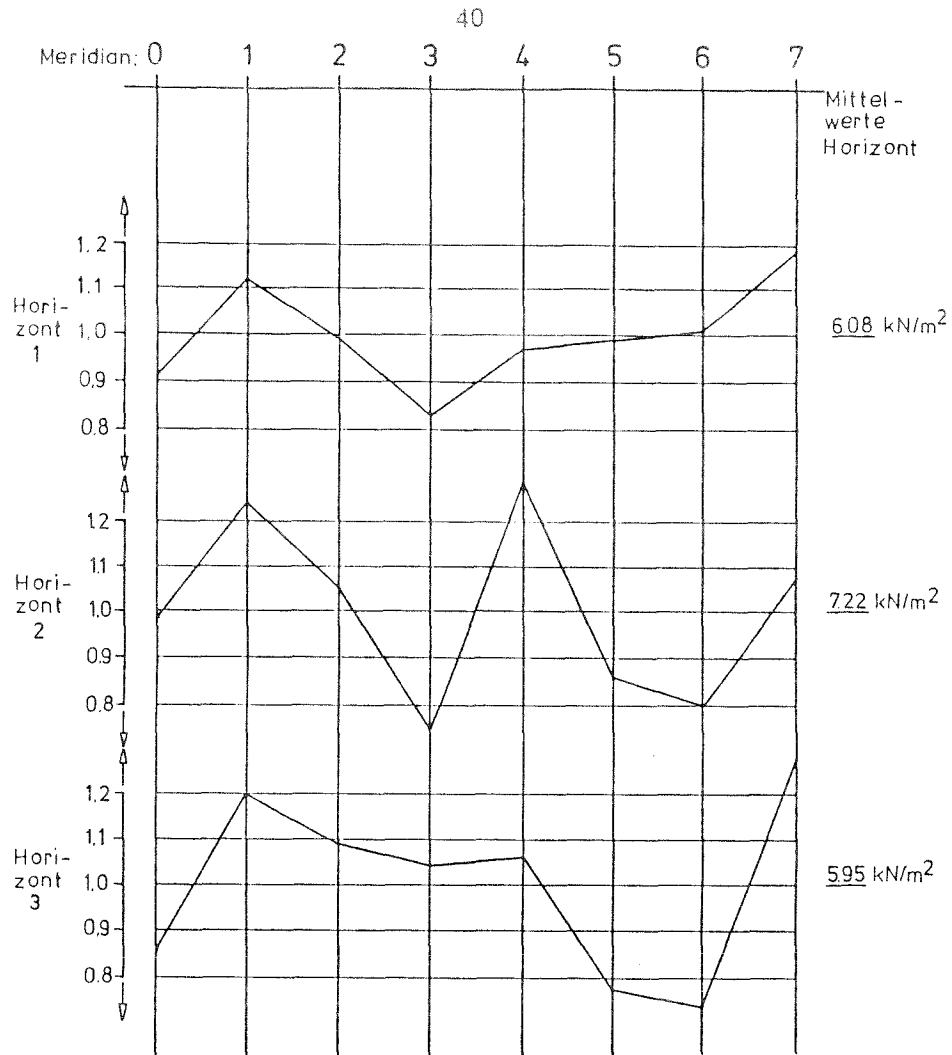


Abb. 3.10 Mittelwert aus allen Messungen beim zentrischen Umlauf Horizont 1, 2 und 3 (dargestellt sind jeweils die Mittelwerte der einzelnen Meßstellen bezogen auf den Mittelwert des gesamten Horizontes)

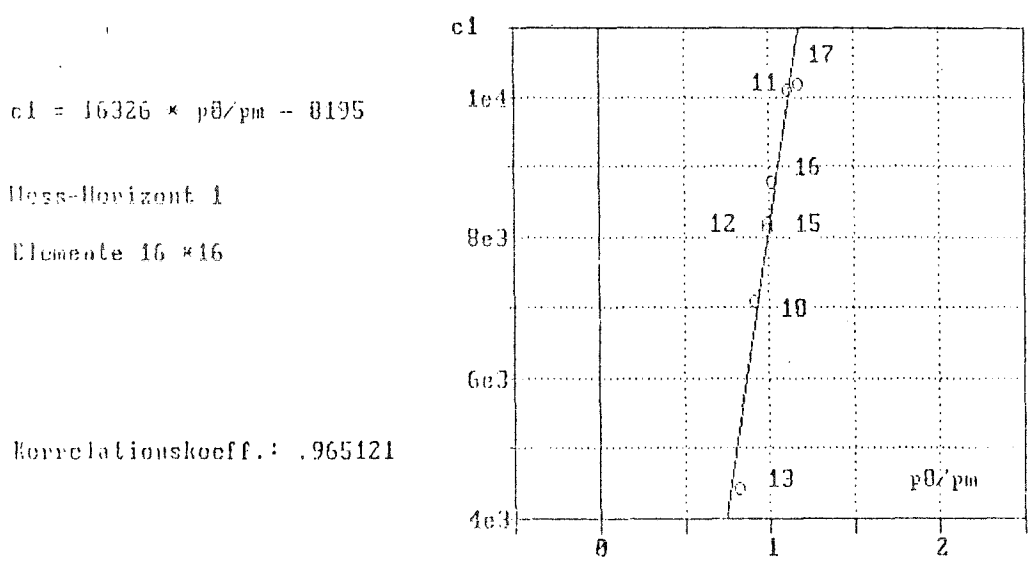


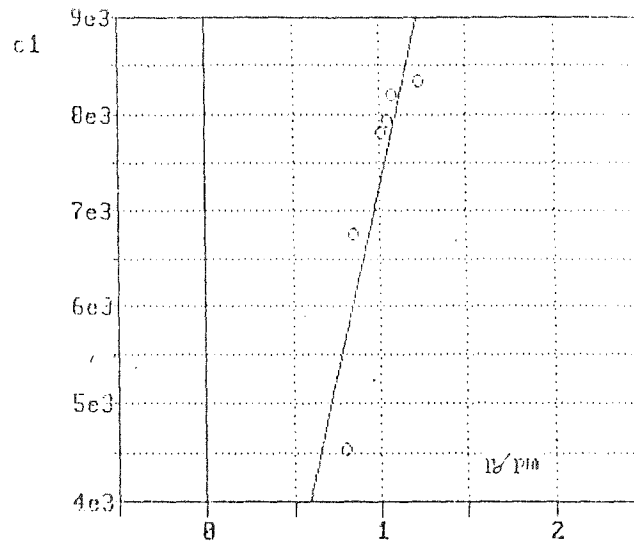
Abb.3.11 a Abhängigkeit des Meßwertes von der Steifigkeit des Meßelementes

Lineare Regression :

$$y = 7967,87x - 704,37$$

III 2 (12 \* 12)

Korrelationskoeff.: .85968



Lineare Regression :

$$y = 8386,25x - 179,09$$

III 3 (9 \* 9)

Korrelationskoeff.: .917438

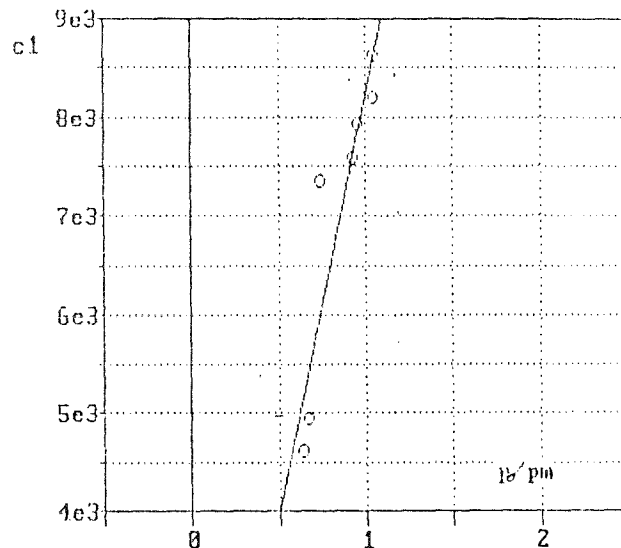


Abb.3.11 b Abhängigkeit des Meßwertes von der Steifigkeit des Meßelementes  
(In Abhängigkeit von der Steifigkeit des Meßelementes sind die mit diesem Element gemessenen Drücke  $p_0$  bezogen auf den Mittelwert im Horizont  $p_m$  dargestellt.)

### 3.4.3 Versuchsergebnisse

Eine Zusammenstellung der Versuchsergebnisse enthält Abb. 3.12. Für die einzelnen Meßhorizonte sind jeweils die aus den Versuchsserien zusammengefaßten Mittelwerte eingetragen.

Zum Vergleich wurden auch die rechnerisch nach dem Ansatz von JANSSEN ermittelten Horizontaldrücke mit aufgenommen. Dabei wurden die gemessenen Schüttgutkennwerte (vgl. 3.1) zugrundegelegt.

Weitere Ergebnisse liefern die vollständigen Überblicke über die Einzelversuche (vgl. Anhang zu Kap. 3).



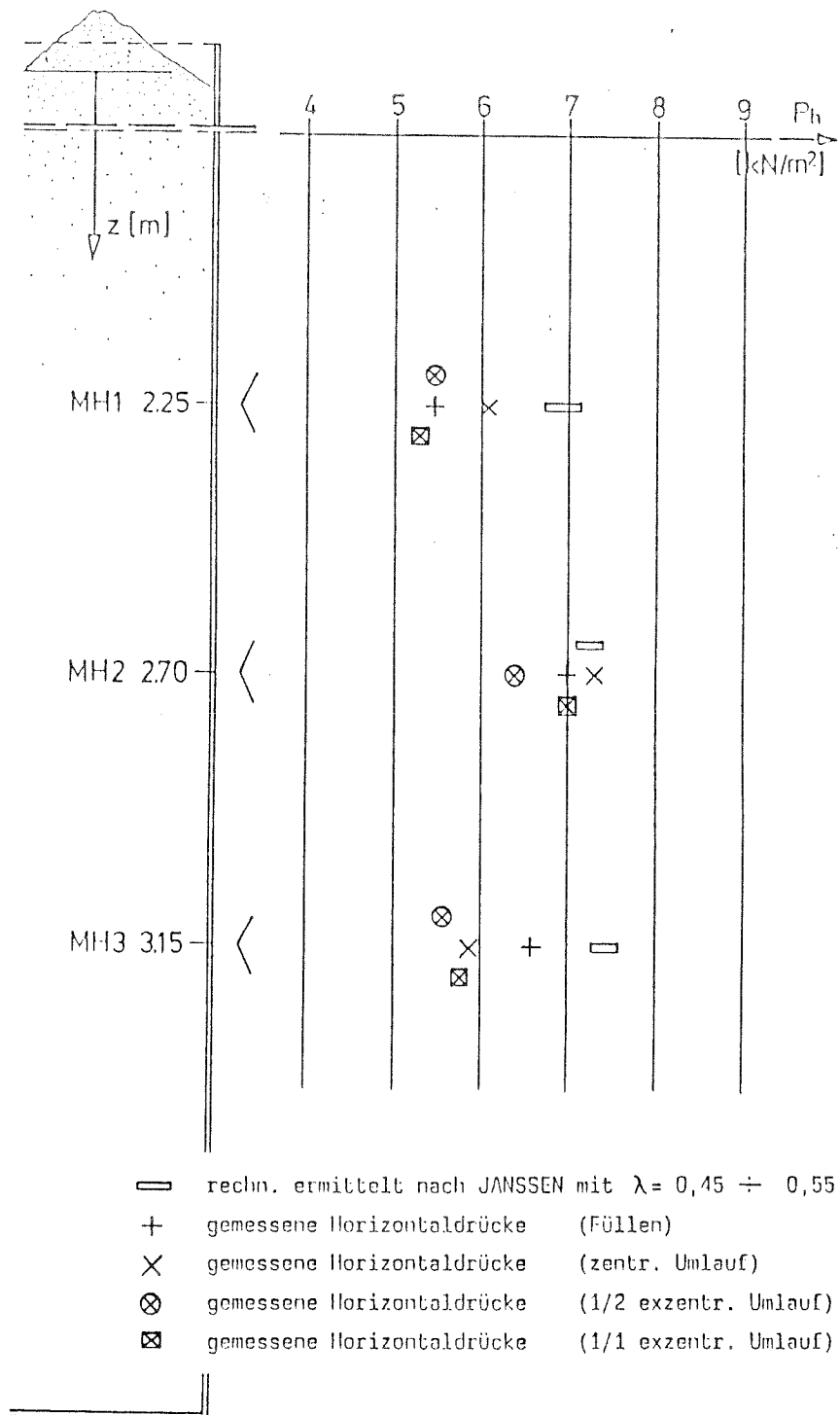


Abb. 3.12 Versuchsergebnisse

- Füllen

Die horizontalen Fülldrücke nehmen asymptotisch zu. Zwar ergeben sich ungleichmäßige Verteilungen entlang des Umfanges, die einzelnen Meßstellen jedoch zeigen keine ausgeprägten Schwankungen. Die rechnerisch ermittelten Drücke werden nicht erreicht.

- Umlauf / Entleeren

Bei den nachstehenden Erläuterungen werden die beiden Betriebszustände Umlauf und Entleeren jeweils zusammengefaßt.

Die Horizontaldruckverläufe sind gekennzeichnet durch starke Schwankungen, nicht nur der Drücke an den einzelnen Meßstellen, sondern auch des Mittelwertes über einen Horizont.

Für das zentrische Entleeren beträgt die Zunahme des Mittelwertes gegenüber der Fülllast ca. 10 %. Diese Beobachtung deckt sich mit den Aussagen von SCHNEIDER, der für das gleiche Schüttgut bei seinen Versuchen auch nur einen geringen Lastanstieg beim Entleeren gegenüber dem Füllen feststellte.

Im Meßhorizont 3 erfolgt sogar ein deutlicher Abfall des Horizontaldruckes gegenüber dem Füllen, der Einfluß des ebenen Bodens ist erkennbar.

Für die Beurteilung der Horizontaldruckverläufe über den Umfang werden die gemessenen Drücke an den einzelnen Meßstellen jeweils auf den sich am gesamten Horizont ergebenden Mittelwert bezogen und die einzelnen Abweichungen betrachtet. Dabei zeigt sich folgendes Ergebnis:

Bei zentrischer Lage der Auslauföffnung betragen die Druckunterschiede benachbarter Meßstellen maximal 15 %. Auch vom Mittelwert selbst sind keine größeren Abweichungen festzustellen.

Bei exzentrischer und halbexzentrischer Lage der Auslauföffnung sind die ungleichmäßigen Druckverteilungen entlang des Horizontes deutlicher. An den einzelnen Meßstellen ergeben sich jeweils signifikante Abweichungen vom Mittelwert im Horizont.

Die Schwankungen entlang des Umfanges sind relativ stark ausgeprägt, insbesondere sind die Drucksteigerungen seitlich neben der Entleerungsöffnung sowie der Druckabfall im Bereich der Entleerungsöffnung deutlich erkennbar.

Mit einer angenäherten harmonischen Analyse lassen sich die Horizontaldruckverläufe entlang des Umfanges beschreiben. Aufgrund der vorliegenden 8 Meßstellen können die Reihenentwicklungen bis zur 4. Harmonischen verfolgt werden. Der Horizontalallastverlauf über den Umfang läßt sich damit wie folgt darstellen:

$$p_h(\theta) = p_0 (A_0 + A_1 \cdot \cos(\theta) + A_2 \cdot \cos(2\theta) + A_3 \cdot \cos(3\theta) + A_4 \cdot \cos(4\theta) )$$

## Zentrisches Entleeren

Es ergeben sich drei mögliche Horizontallastverteilungen, die die vorhandenen Schwankungen abdecken. Eine Unterscheidung zwischen den einzelnen Horizonten ist nicht erforderlich.

	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>
Verteilung 1	1.00	0	0.15	0	0
Verteilung 2	1.00	0	0	0	0
Verteilung 3	1.039	0.066	-0.112	0.009	0

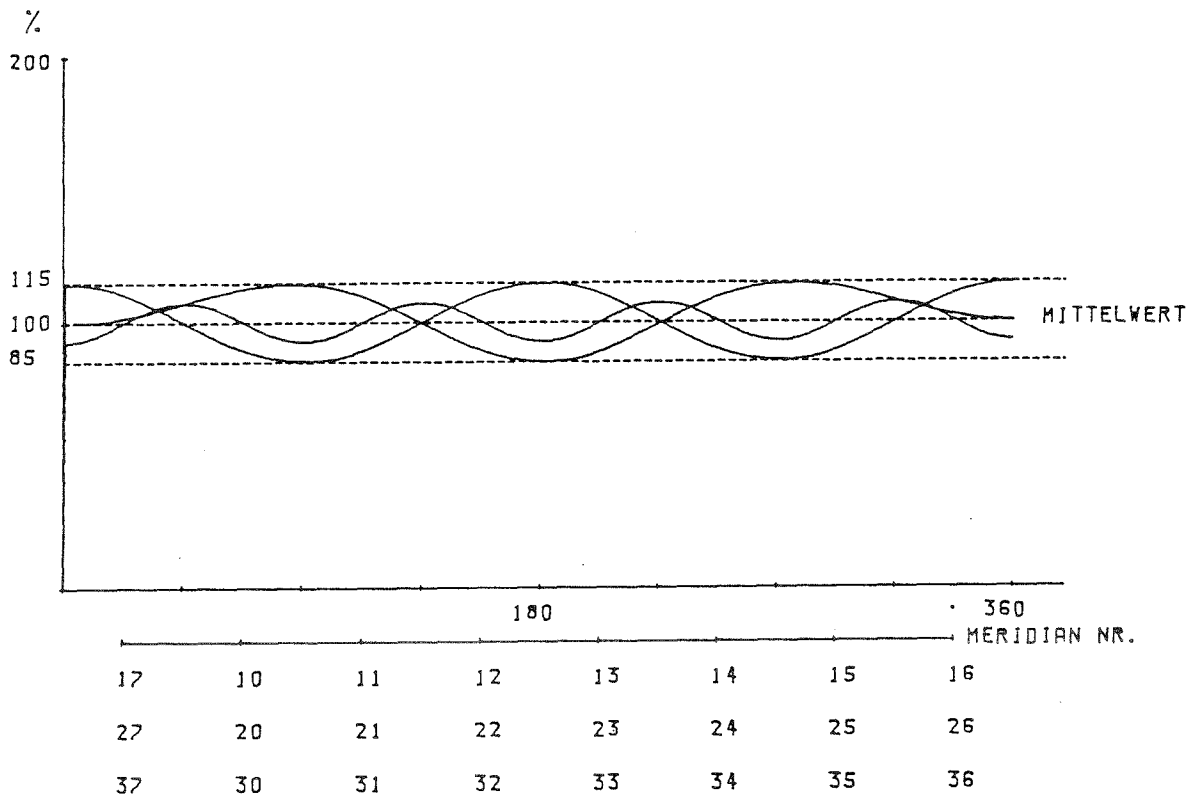


Abb. 3.13 Horizontaldruckverteilung  
zentrisches Entleeren, Horizonte 1 - 3

halbexzentrisches Entleeren

	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>
Horizont 1	1.004	0.051	-0.197	0.044	-0.001

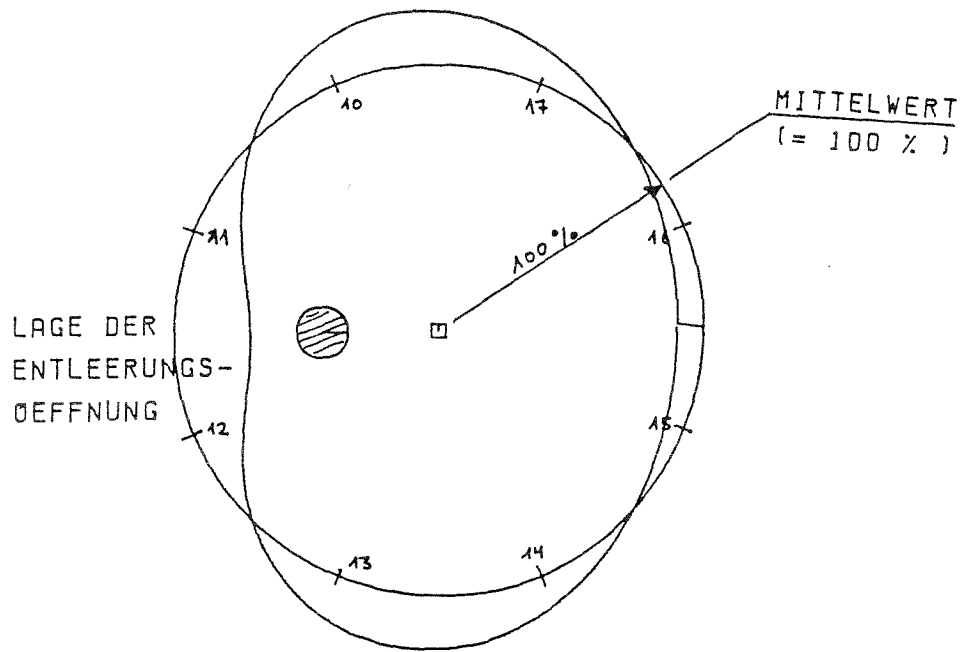
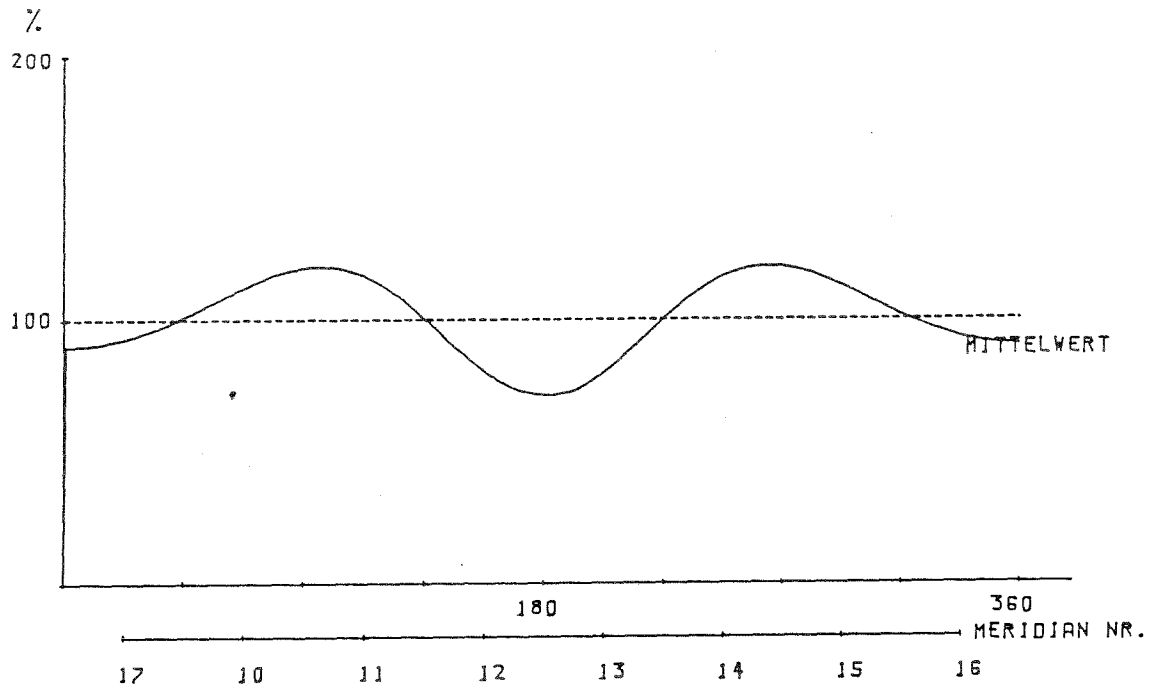


Abb. 3.14 Horizontaldruckverteilung halbexzentrisches Entleeren, Horizont 1

halbexzentrisches Entleeren

	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>
Horizont 2	1.019	0.345	0.018	0.090	-0.001

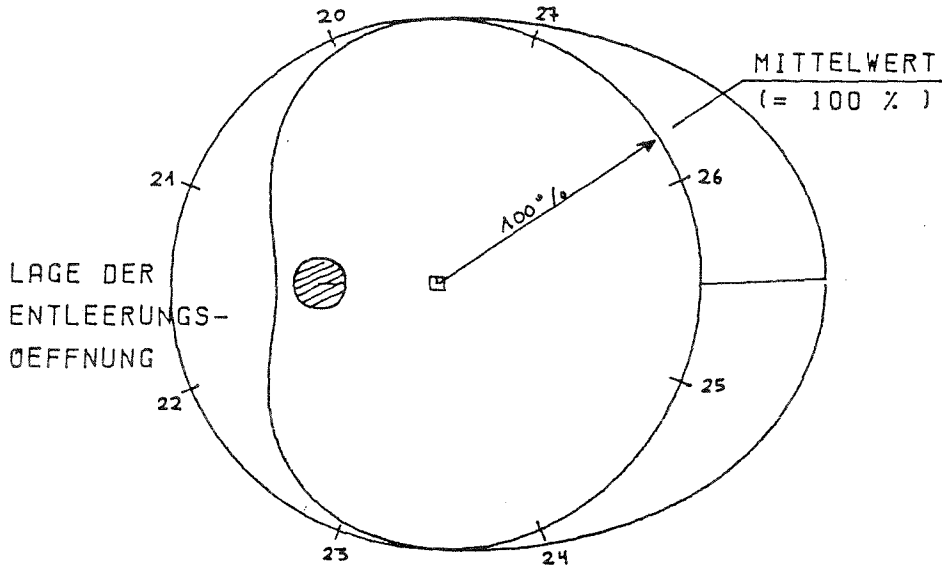
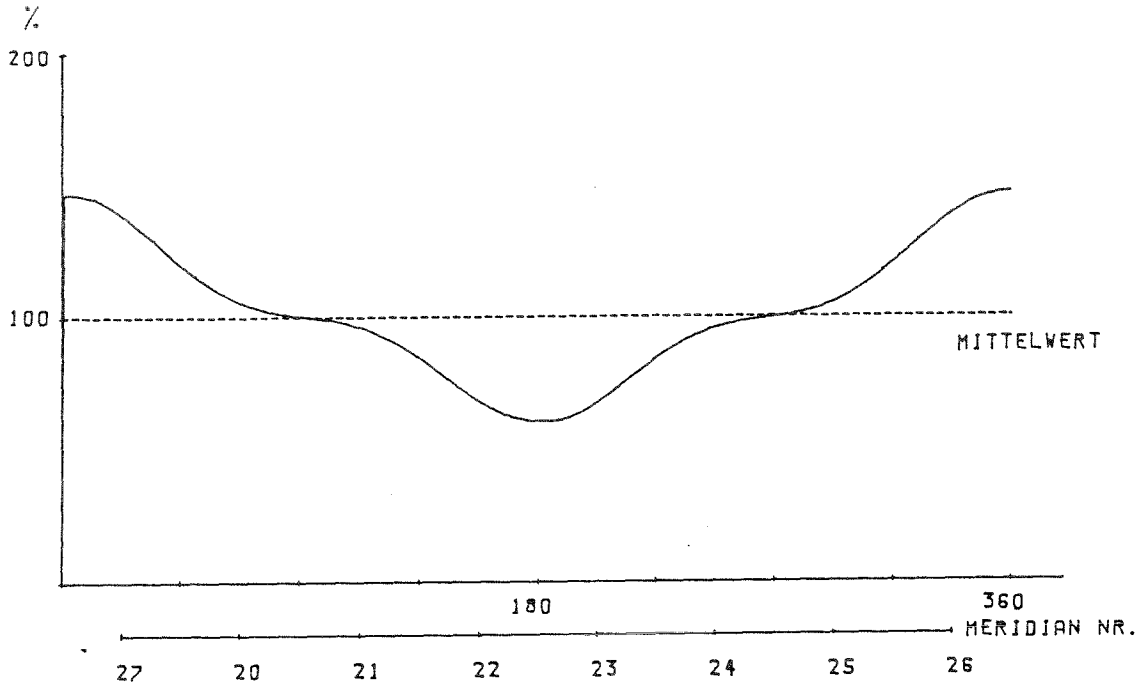


Abb. 3.15 Horizontaldruckverteilung halbexzentrisches Entleeren, Horizont 2

halbexzentrisches Entleeren

	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>
Horizont 3	1.004	0.154	-0.107	0.091	-0.001

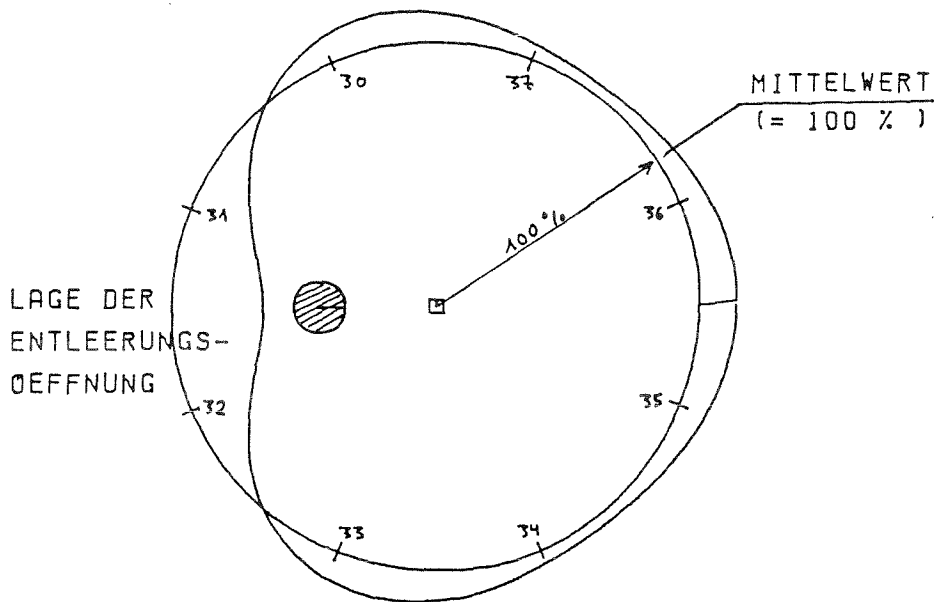
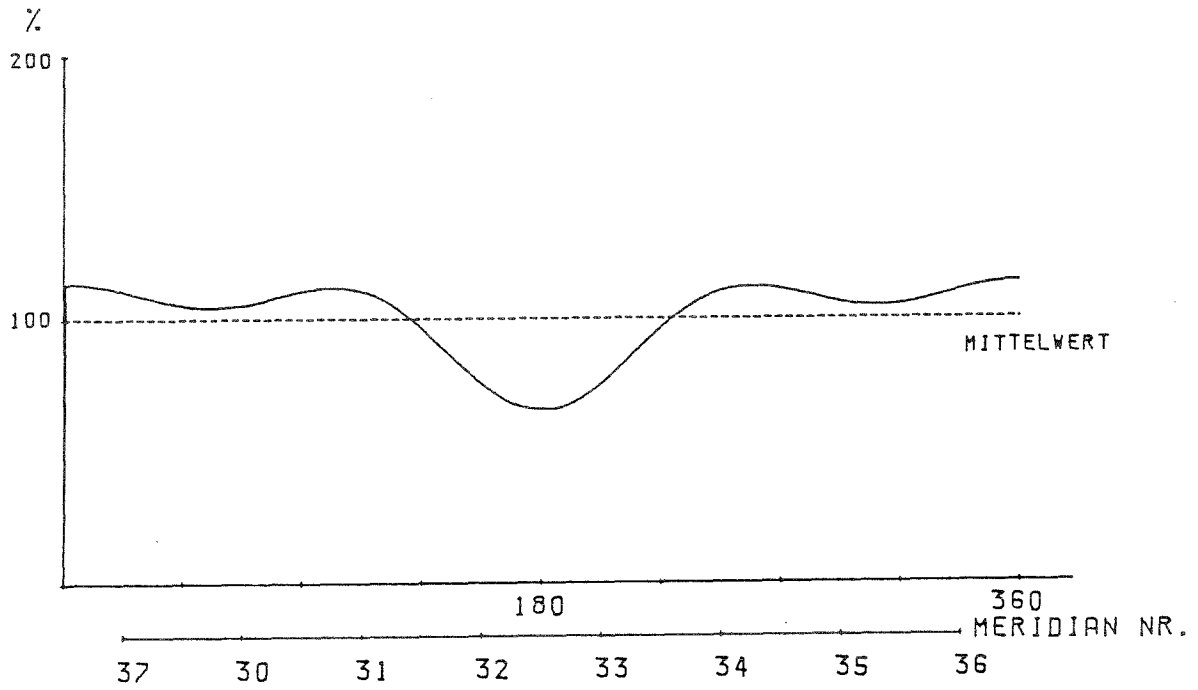


Abb. 3.16 Horizontaldruckverteilung halbexzentrisches Entleeren, Horizont 3

exzentrisches Entleeren

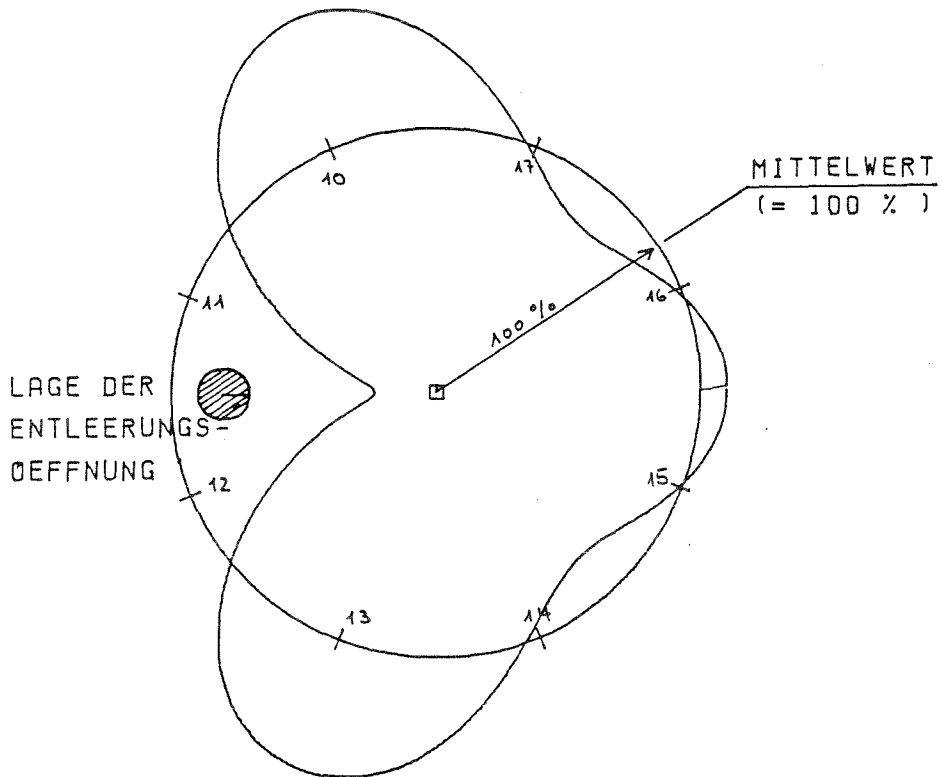
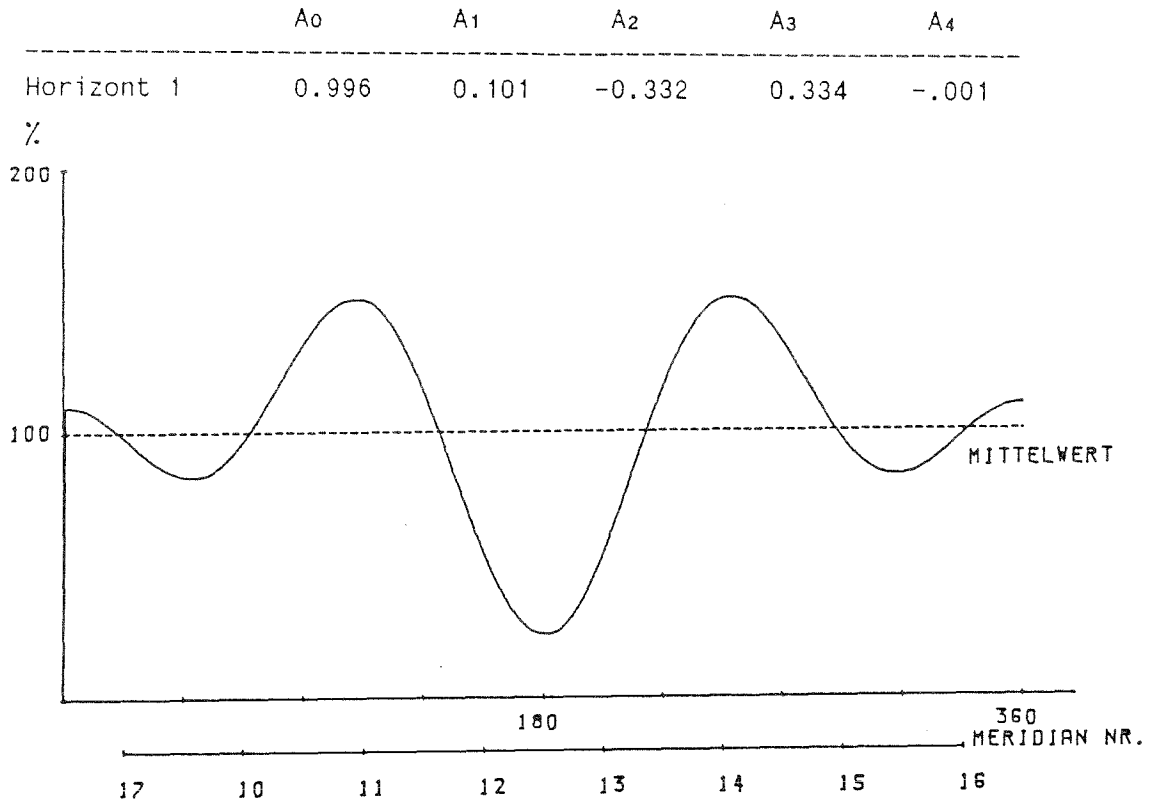


Abb. 3.17 Horizontaldruckverteilung exzentrisches Entleeren, Horizont 1

exzentrisches Entleeren

	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>
Horizont 2	1.004	0.271	-0.247	0.194	-0.001

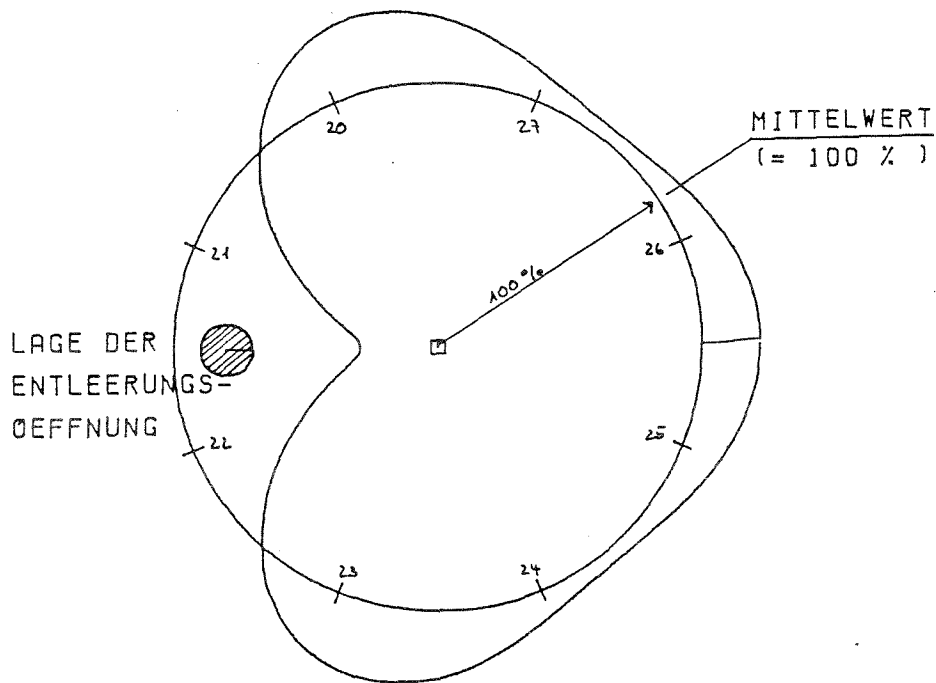
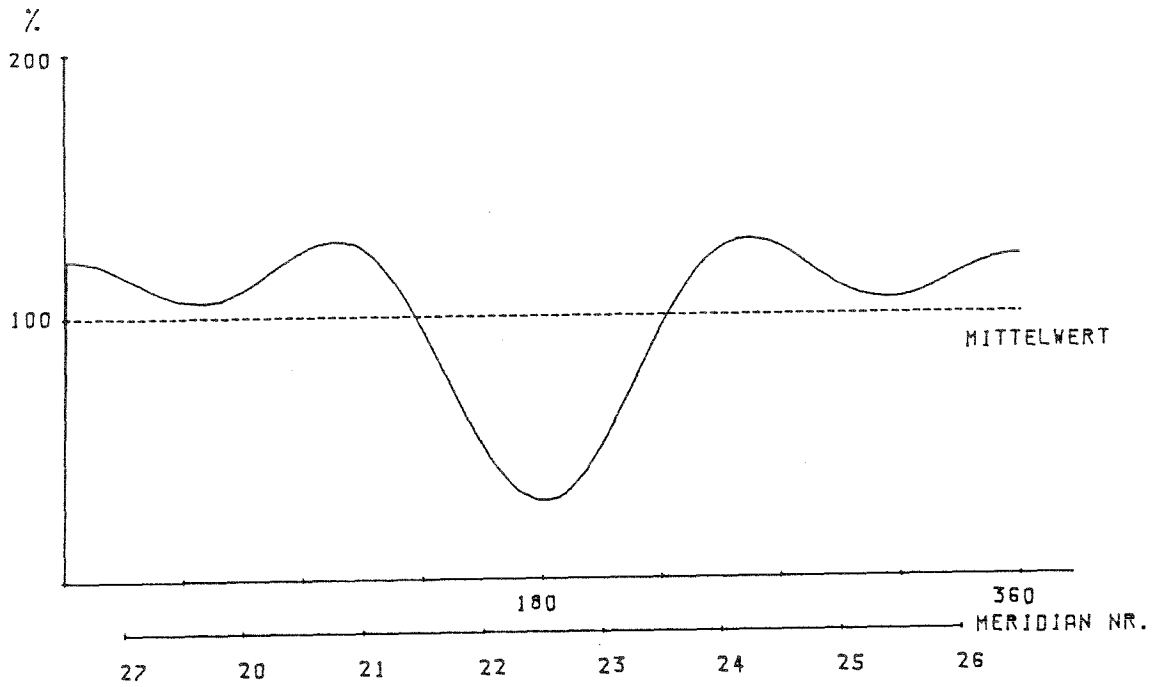


Abb. 3.18 Horizontaldruckverteilung exzentrisches Entleeren, Horizont 2



exzentrisches Entleeren

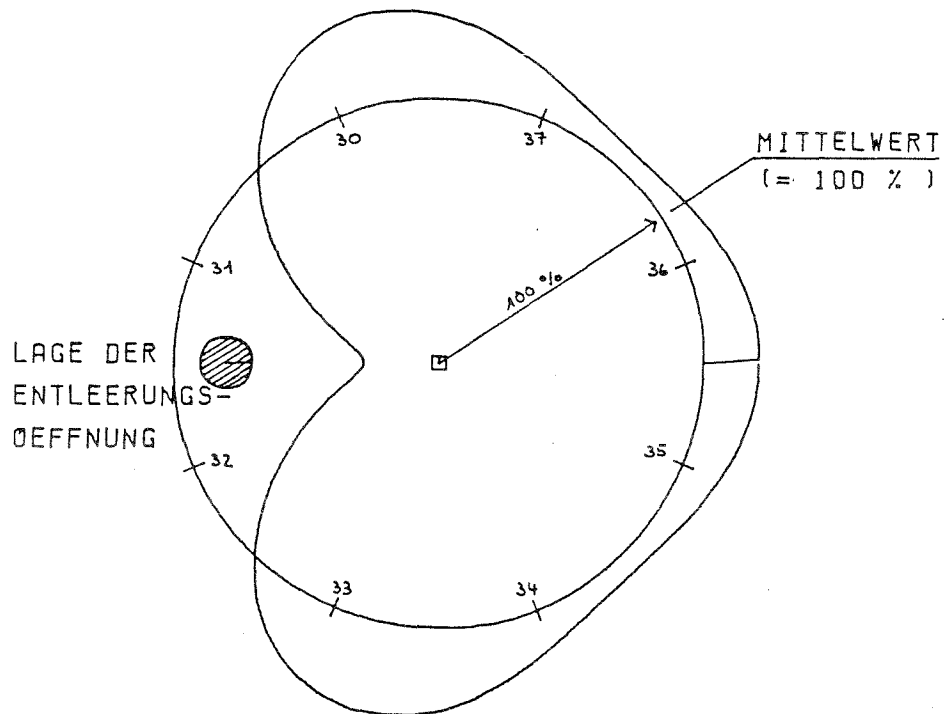
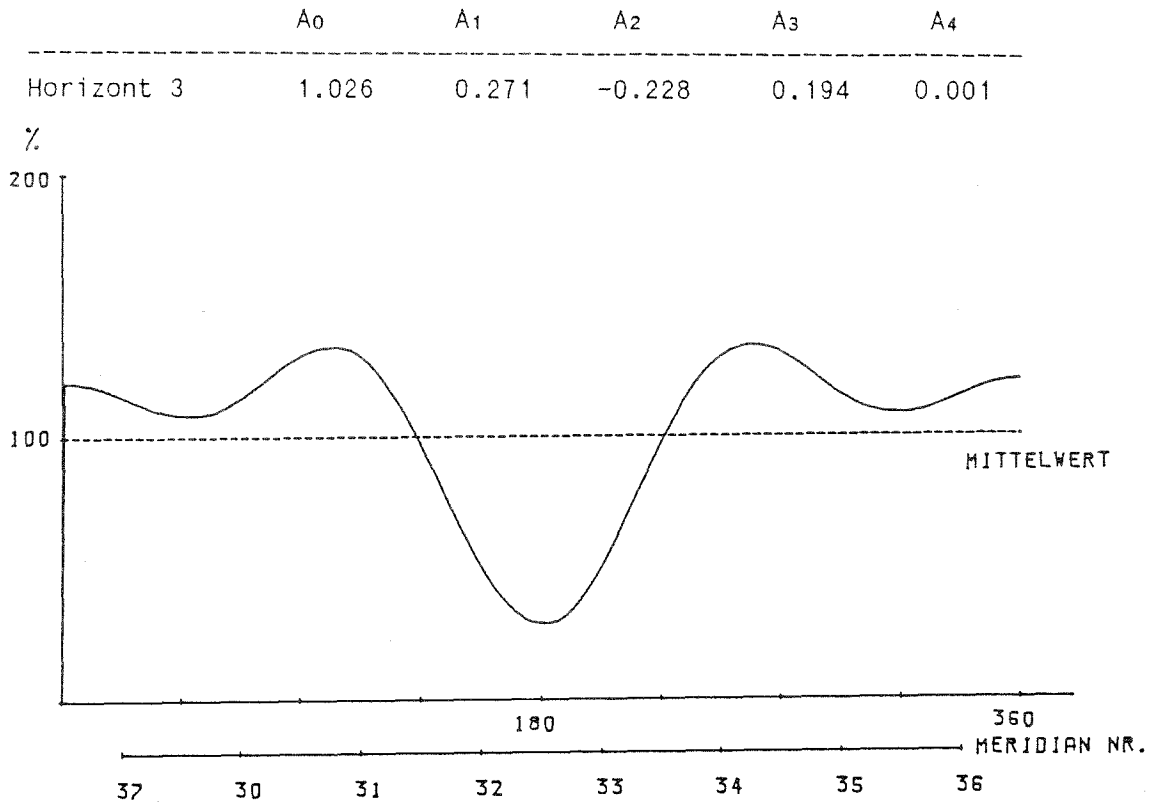


Abb. 3.19 Horizontaldruckverteilung  
exzentrisches Entleeren, Horizont 3

#### 4. Beanspruchungs - Verformungsermittlung am dünnwandigen Modellsilo ( $t = 1 \text{ mm}$ )

##### 4.1 Schüttgut

Für die Versuchsreihe am dünnwandigen Modellsilo wurde das gleiche Schüttgut wie bei den in Kap. 3 beschriebenen Versuchen verwendet. Für die Schüttgutkennwerte gelten somit die Ausführungen aus 3.1.

##### 4.2 Versuchsaufbau

Um die gleichen Randbedingungen (Silogeometrie, Art der Befüllung, Anordnung des Auslaufs, gleiche Wandreibung) wie bei den in Kapitel 3 beschriebenen Versuchen zu erhalten, wurde der vorhandene Silo umgebaut. Die beiden unteren Plexiglaszylinder wurden ausgebaut und durch einen Zylinder aus Aluminium AL 99,5 ersetzt.

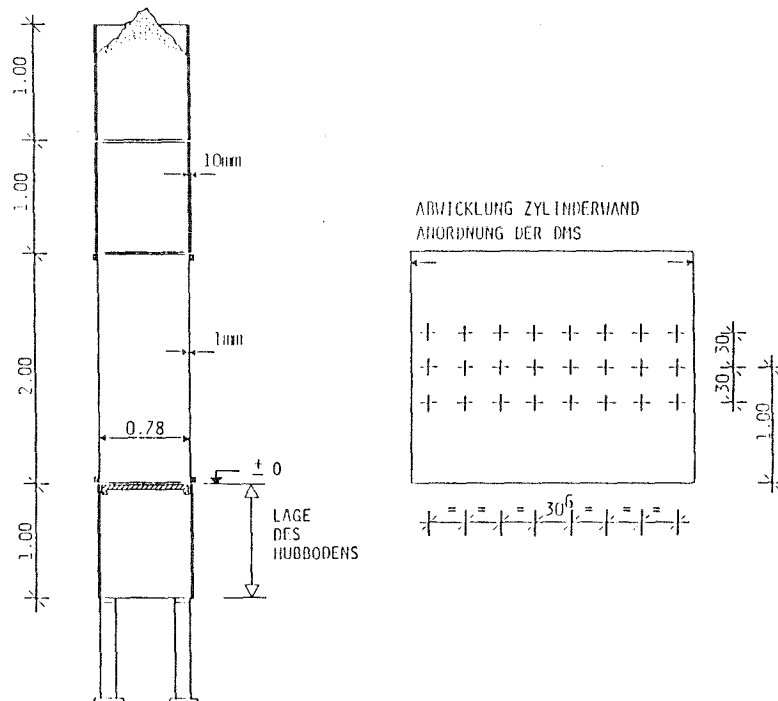
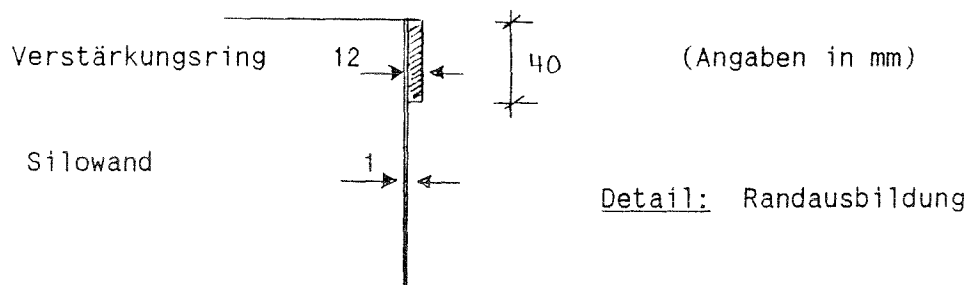


Abb. 4.1 Modellsilo

Die eingebaute Zylinderröhre hat die Wandstärke  $t = 1 \text{ mm}$  und besitzt an beiden Enden Verstärkungsringe.



Die Röhre ist am oberen Rand an vier Konsolen aufgehängt, während der untere Rand des Zylinders frei beweglich ist. Um gleiche Wandreibungsverhältnisse wie bei den Versuchen mit dem Meßplattensilo (Kap. 3) herzustellen, war es erforderlich, den Silo im Inneren mit einer PE-Folie auszukleiden. Diese Folie war nur am oberen Rand befestigt. Somit konnte die Beanspruchung der Wand in Meridianrichtung durch die Wandreibungslasten weitgehend ausgeschlossen werden.

An drei Horizonten wurden an dem Zylinder an jeweils 8 Meßpunkten auf der Außen- und der Innenseite Dehnungsmeßstreifen (Folien-DMS mit einer Meßgitterlänge von 3 mm) appliziert. Gewählt wurden 90-Grad-Rosetten, um die Dehnungen sowohl in Ring- als auch in Meridianrichtung erfassen zu können.

Der spezifische Widerstand der DMS beträgt 120 OHM, der k-Faktor ist mit 2,1 angegeben.

Zur Applikation der temperaturkompensierenden DMS, d.h. dem Wärmedehnungskoeffizienten des Bauteilwerkstoffes angepaßten Dehnungsmeßstreifen, wurde als kalthärtender Klebstoff der sog. Schnellkleber Z 70 (Fa. Hottinger & Baldwin) verwendet.

Die eingehängte Folie diente auch dazu, die Dehnungsmeßstreifen auf der Innenseite zu schützen. Auf den üblicherweise angewandten Schutz durch Abdeckkitt konnte nicht zurückgegriffen werden, da diese Abdeckung zu sehr aufträgt und die dadurch gegebenen Unebenheiten in der Wand das Druckverhalten des Silogutes zu stark beeinflussen.

Zur Berücksichtigung möglicher Temperatureffekte wurde als Kompensations-DMS für jeweils 8 Meßstellen ein sog. "central dummy" in die Schaltung einbezogen.

Hierfür wurde ein Dehnungsmeßstreifen gewählt, der ebenfalls auf Aluminiumstreifen der Dicke  $t = 1$  mm, allerdings ohne Lastbeanspruchung, appliziert war.

Zur Abfrage und Erfassung der Meßstellen stand eine rechnergesteuerte Vielstellenmeßanlage OPTILOG zur Verfügung. Die Meßstellen wurden mit einer sogenannten Dreileiterschaltung als Viertelbrücken einzeln geschaltet, um die Meßsignale getrennt speichern und auswerten zu können.

Mit der Meßanlage ist es möglich, die passiven Geber im Konstantstromverfahren zu betreiben. Gewählt wurde eine Stromspeisung von 10,0 bzw. 13,9 mA.

Weiterhin erlaubt die Meßanlage bei dem gewählten Meßbereich von + 30 mV eine Auflösung bis zu 1 Microvolt. Diese hohe Auflösung war erforderlich, da Vorberechnungen zeigten, daß infolge der bei den Siloversuchen zu erwartenden Belastung der Wandung durch das Schüttgut nur mit relativ geringen Dehnungen des Zylindermantels und somit geringen Meßwerten zu rechnen ist.

Im mittleren Horizont wurden zusätzlich auf der Außenseite Linearpotentiometer als Wegaufnehmer angeordnet, um die radialen Verschiebungen des Silomantels messen zu können. In Verbindung mit der vorhandenen Vielstellenmeßanlage erlaubten die Wegaufnehmer eine Meßgenauigkeit von 2/1000 mm.

Insgesamt ergeben sich somit 104 Meßstellen (96 Dehnungsmeßstreifen, 8 Wegaufnehmer).

Bei der gewählten Meßrate von 33 Messungen/sec konnten somit sämtliche Meßstellen in 3 sec abgefragt werden. Die Zyklusfolge wurde allerdings durch die Übertragung und Abspeicherung der Meßwerte bestimmt und lag bei ca. 40 Sekunden.

Fertigungstechnisch war es erforderlich, den Aluminiumzylinder mit einer durchgehenden Schweißnaht in Meridianrichtung und einer umlaufenden Schweißnaht in Ringrichtung herzustellen. Die umlaufende Naht liegt 50 cm vom unteren Rand entfernt, die Meridiannaht zwischen den Meßmeridianen 1 und 8. Zwar wurden die Nähte sorgfältig ausgeführt und nachbearbeitet, Einflüsse auf die benachbarten Meßstellen können jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Die gewählte Meßeinrichtung (Konstant-Strom-Verfahren, Dreileiter-schaltung) sowie die Unabhängigkeit von der Witterung schließen eine Beeinflussung der Meßwerte durch Temperatureinflüsse und z.B. unterschiedliche Kabelwiderstände weitgehend aus.

Andererseits ist es gerade aufgrund der zuvor beschriebenen erforderlichen hohen Auflösung der Meßsignale notwendig, mögliche Einflußgrößen weitgehend zu erfassen.

#### 4.3 Grundlagen der Versuchsauswertung

##### 4.3.1 mögliche Fehlerquellen

In der experimentellen Spannungsanalyse mit Dehnungsmeßstreifen wird aus den gemessenen Dehnungen auf die vorhandenen Spannungen geschlossen. Bei der Bewertung der Ergebnisse sind dabei die folgenden Einflüsse und damit Fehlerquellen zu berücksichtigen:

##### - Einfluß der Meßanlage

Hierunter werden sowohl die Einflußgrößen im Zusammenhang mit dem Dehnungsmeßstreifen selbst (k-Faktor, Einfluß der Klebung) als auch mögliche Einflüsse durch die Meßanlage (z.B. Verkabelung) verstanden. Bei dem vorliegenden dünnwandigen Querschnitt ist auch der Versteifungseffekt durch die Dehnungsmeßstreifen zu berücksichtigen.

##### - Einfluß Werkstoff

Hierbei sind insbesondere die Werkstoffparameter Materialdicke, Elastizitätsmodul und Querdehnzahl von Einfluß.

##### - Einfluß Modell

Es ist erforderlich, den Berechnungen eine bestimmte Geometrie zugrundezulegen. Mögliche Abweichungen des realen Modells von dem der Berechnung zugrundeliegenden Modell sind bei der Bewertung der Ergebnisse ebenfalls in Betracht zu ziehen (z.B. eine Abweichung des Zylinders von der Kreisform).

Die Einflüsse der Meßanlage sind durch die Wahl der Meßeinrichtung weitgehend eliminiert. Um mögliche Auswirkungen aus dem Werkstoff und dem Modell berücksichtigen zu können, wurden Eichversuche und eine Imperfektionsmessung durchgeführt.

#### 4.3.2 Eichversuche

##### Eichversuche mit gleichmäßiger Belastung

Die Eichung erfolgte mit einer vorgegebenen Belastung. Dazu wurde der Silo mit Hilfe eines Kunststoffmantels im Innern luftdicht abgeschlossen und durch Druckluft gleichmäßig belastet. In einzelnen Stufen wurde der Druck variiert, die Kontrolle des aufgetragenen Druckes erfolgte über ein Schlauchmanometer.

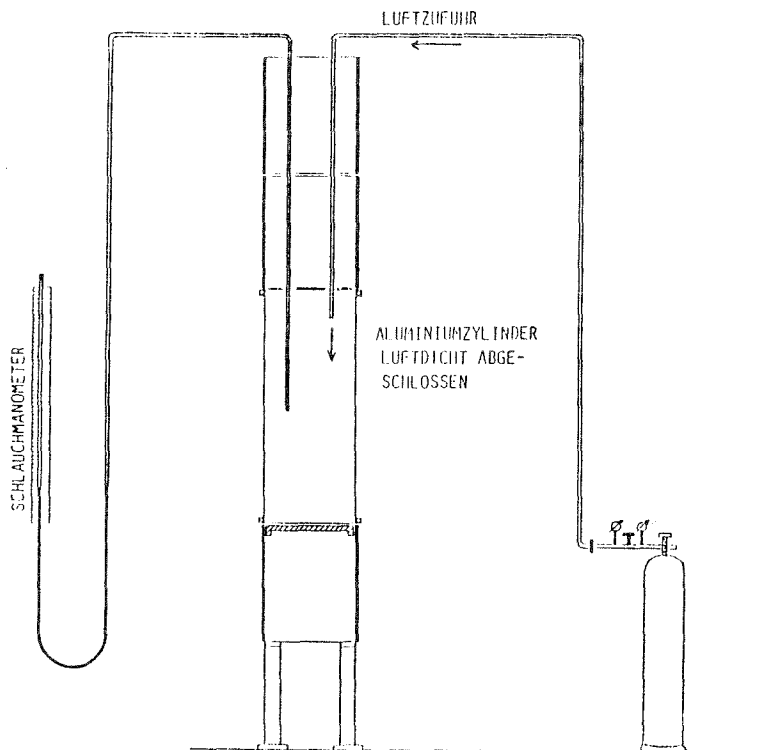


Abb. 4.2 Eichvorrichtung

Die in den einzelnen Eichversuchen gewählten Ganglinien der Druckbelastung sowie die zugehörigen Meßergebnisse sind im Anhang dargestellt.

Die Berechnung der aufgetretenen Spannungen aus den gemessenen Dehnungen erfolgt nach dem Hookeschen Gesetz für den zweiachsigen Spannungszustand:

$$\sigma_y = E \cdot t / 2 / (1 - \mu^2) \cdot \left[ \epsilon_{y,a} + \epsilon_{y,i} + \mu \cdot (\epsilon_{x,a} + \epsilon_{x,i}) \right]$$

$$m_{\varphi} = E \cdot t^2 / 12 / (1 - \mu^2) \cdot \left[ \epsilon_{\varphi,a} - \epsilon_{\varphi,i} + \mu \cdot (\epsilon_{x,a} - \epsilon_{x,i}) \right]$$

Hierin bedeuten:  $\epsilon$       Dehnungen  
 $x$       in Meridianrichtung  
 $\varphi$       in Umfangrichtung  
 $a, i$     auf der Außen- bzw. Innenseite

Dabei wurden die folgenden Werte angesetzt:

Wanddicke             $t = 1 \text{ mm}$   
Elastizitätsmodul  $E = 70\,000 \text{ N/mm}^2$   
Querdehnzahl         $\mu = 0.3$

- Auswertung der Eichversuche:

Aus den gemessenen Dehnungen wird mit den angegebenen Materialkenngrößen für jede Laststufe die vorhandene Spannung und die zugehörige Schnittgröße ermittelt. Aus den insgesamt 5 Eichversuchen ergaben sich somit für die Ringzugkraft an jeder Meßstelle 125 Wertepaare. Aus der Gesamtheit dieser Messungen wurde für jede Meßstelle die Druckbelastung  $p$  in Abhängigkeit von der gemessenen Normalkraft dargestellt.

Die durchgeführten Regressionen zeigten für alle Meßstellen ein lineares Verhalten.

$$10 p = A \cdot n_{\varphi} + B$$

mit  $n_{\varphi}$  als der aus den gemessenen Dehnungen errechneten Ringzugkraft

Unter der Annahme, daß ein idealer Zylinder mit einem Radius von  $r = 0,39 \text{ m}$  vorliegt, werden Faktoren  $C$  und  $D$  ermittelt, mit denen die aus den gemessenen Dehnungen errechnete Ringzugkraft so angepaßt werden kann, daß sich die rechnerisch ermittelte "Sollzugkraft"  $n_{\varphi}^*$  ergibt.

$$n_{\varphi}^* = C \cdot n_{\varphi} + D$$

Korrekturfaktoren  $C$  und  $D$  für Meßhorizont 2 (Meßstellen 21 - 28)

	M E S S - S T E L L E							
	21	22	23	24	25	26	27	28
C	1.060	0.980	1.067	1.011	1.030	0.968	0.933	0.948
D	0.250	0.316	0.521	0.562	0.496	0.314	0.259	0.222

### Eichversuche mit Einzellasten

Bei den zuvor beschriebenen Eichversuchen mit einer gleichmäßig verteilten Druckbelastung ergaben sich auch Biegebeanspruchungen an den einzelnen Meßstellen. Inwieweit sie durch geometrische Imperfektionen des Versuchszylinders bedingt sind oder sich als reine Meßfehler durch nicht zu vermeidende Ungenauigkeiten bei der Applikation der Dehnungsmeßstreifen ergeben, kann nicht vollständig beantwortet werden.

Um das Verhalten der einzelnen Meßstellen bei auftretender Biegung beurteilen zu können, wurden Eichversuche mit einer gezielten Biegebeanspruchung durchgeführt. Dazu wurden im mittleren Horizont Einzellasten aufgebracht.

An einem im Innern des Versuchszylinders montierten Stempel waren an beiden Enden Luftkissen (Durchmesser ca. 15 cm) angebracht. Die Belastung wurde somit als schlaffes Lastbündel aufgebracht. Die Größe der vorhandenen Belastung konnte über eine am Stempel befindliche Druckmessdose ermittelt werden.

Für die gemessenen Schnittgrößen (Ringzugkraft und Ringbiegemoment) sowie für die gemessene radiale Verschiebung werden in Abhängigkeit von der aufgetragenen Belastung  $P$  jeweils Beiwerte bestimmt, die mit vorliegenden Untersuchungen (HENNIG, 1971) bzw. eigenen Berechnungen verglichen werden können.

Die so ermittelten Beiwerte sind im Anhang dargestellt. Es zeigt sich, daß die einzelnen Meßstellen zufriedenstellende Ergebnisse liefern.

#### 4.3.3 Imperfektionsmessung

Die sich bei den Eichversuchen mit gleichmäßiger Druckbelastung ergebenden radialen Verschiebungen und die Biegemomente deuten auf Abweichungen des Zylinders von der Kreisform hin. Um diesen Einfluß beurteilen zu können, wurde eine Imperfektionsmessung durchgeführt, bei der eine Abwicklung der Zylinderwand mit den vorhandenen "Unebenheiten" erstellt wurde. Die Messung wurde am eingebauten Zylinder durchgeführt, d.h. ein Meßverfahren mit Wegaufnehmern außerhalb des Silos wie bei STRACKE/SCHMIDT (1984) beschrieben, war nicht möglich, sondern es war erforderlich, mit Meßuhren im Siloinnern die Abwicklung der Umfangslinien zu ermitteln. Mit einer Klemmvorrichtung wurde im Siloinnern eine Meßachse festgelegt, von der aus in diskreten Abständen ( $1/16$  des Umfanges) die Distanz zur Wand gemessen wurde. Diese Messung wurde am oberen und am unteren Rand des Zylinders durchgeführt.

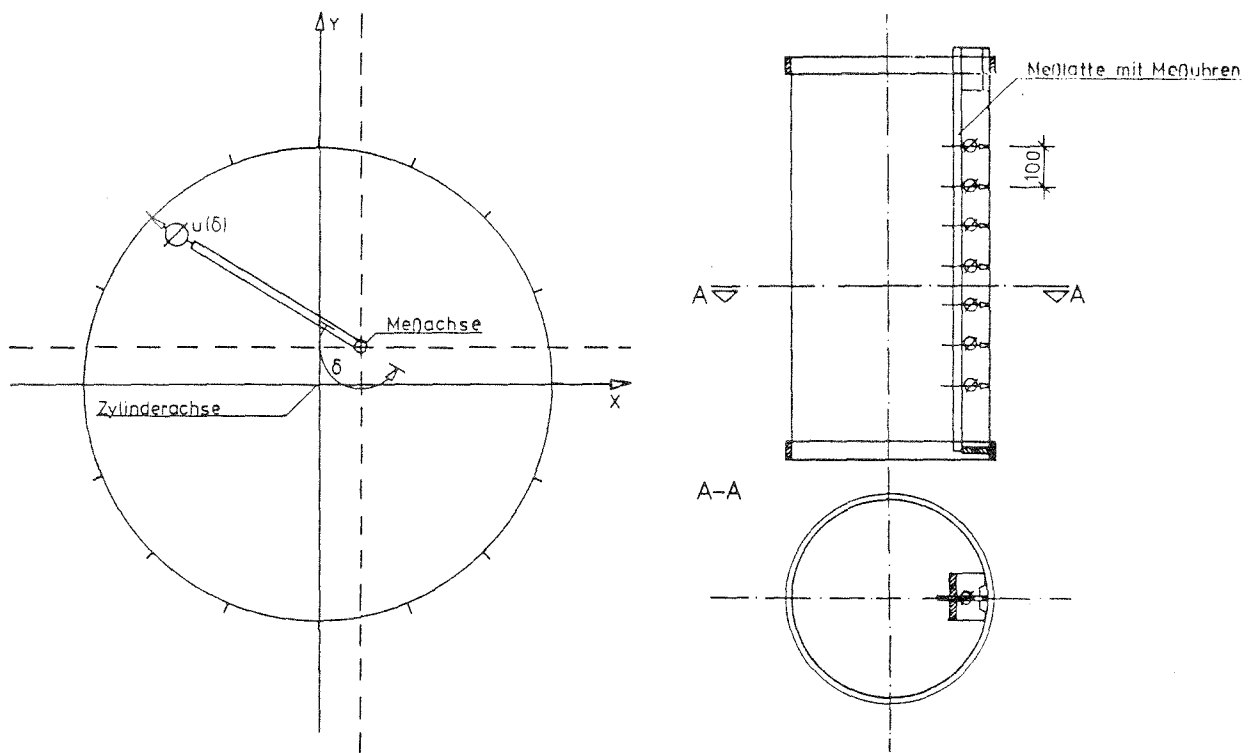


Abb. 4.3 Imperfektionsmessung

Mit den so erhaltenen Stützstellen kann die Umfangsabwicklung als Fourierreihe dargestellt werden:

$$u(\sigma) = A_0 + \sum_{k=1}^n (a_k \cos K \cdot \sigma + b_k \cdot \sin K \cdot \sigma)$$

Um die Abweichungen des Zylinders von einer idealen Kreisform darzustellen, sind systematische Meßfehler zu eliminieren.

Das konstante Glied  $A_0$  der Reihenentwicklung entspricht dem Radius des Kreises um den Zylinderkreismittelpunkt. Da dieser nicht zwangsweise mit der Meßachse zusammenfällt, ist die Exzentrizität zwischen dieser frei gewählten Meßachse und dem Zylinderkreismittelpunkt zu berücksichtigen. Sie wird beschrieben durch die beiden Reihenglieder  $a_1 \cdot \cos \sigma$  und  $b_1 \cdot \sin \sigma$  (translatorische Verschiebungen des Kreises in x-Richtung bzw. y-Richtung). Die um diese beiden Glieder und das konstante Glied  $A_0$  bereinigte Reihenentwicklung zeigt somit die Abweichungen der vorhandenen Abwicklung von der idealen Kreisform.

Um die Stützstellen für weitere Umfangsabwicklungen an den einzelnen Höhenschnitten zu erhalten, wurden in den Meridianen mit einer Meßlatte die Abweichungen zu einer Bezugshöhe gemessen. Auf diese Weise wurden in Höhenschnitten im Abstand von 100 mm die Imperfektionen der Silowand ermittelt. Da nicht sichergestellt werden kann, daß die einzelnen Zylinderkreismittelpunkte alle auf einer vertikalen



ten Achse liegen, enthält das Verfahren möglicherweise noch einen systematischen Fehler, der unter den vorgegebenen Bedingungen nicht ausgeschlossen werden kann.

Das Ergebnis der Imperfektionsmessung ist in Bild 4.4 dargestellt. Auffallend sind die Abweichungen von der idealen Kreisform im Meridian 3, wo der Zylinder eine Verschiebung nach außen aufweist. Ebenfalls eine Verschiebung nach außen ergibt sich im Meridian 7. Der mittlere Meßhorizont (Horizont H 10), in dem während der Versuche die Verschiebungen gemessen wurden, ist gesondert in Abb. 4.5 dargestellt. Die maximale Abweichung nach außen ergibt sich zu ca. 5 mm.

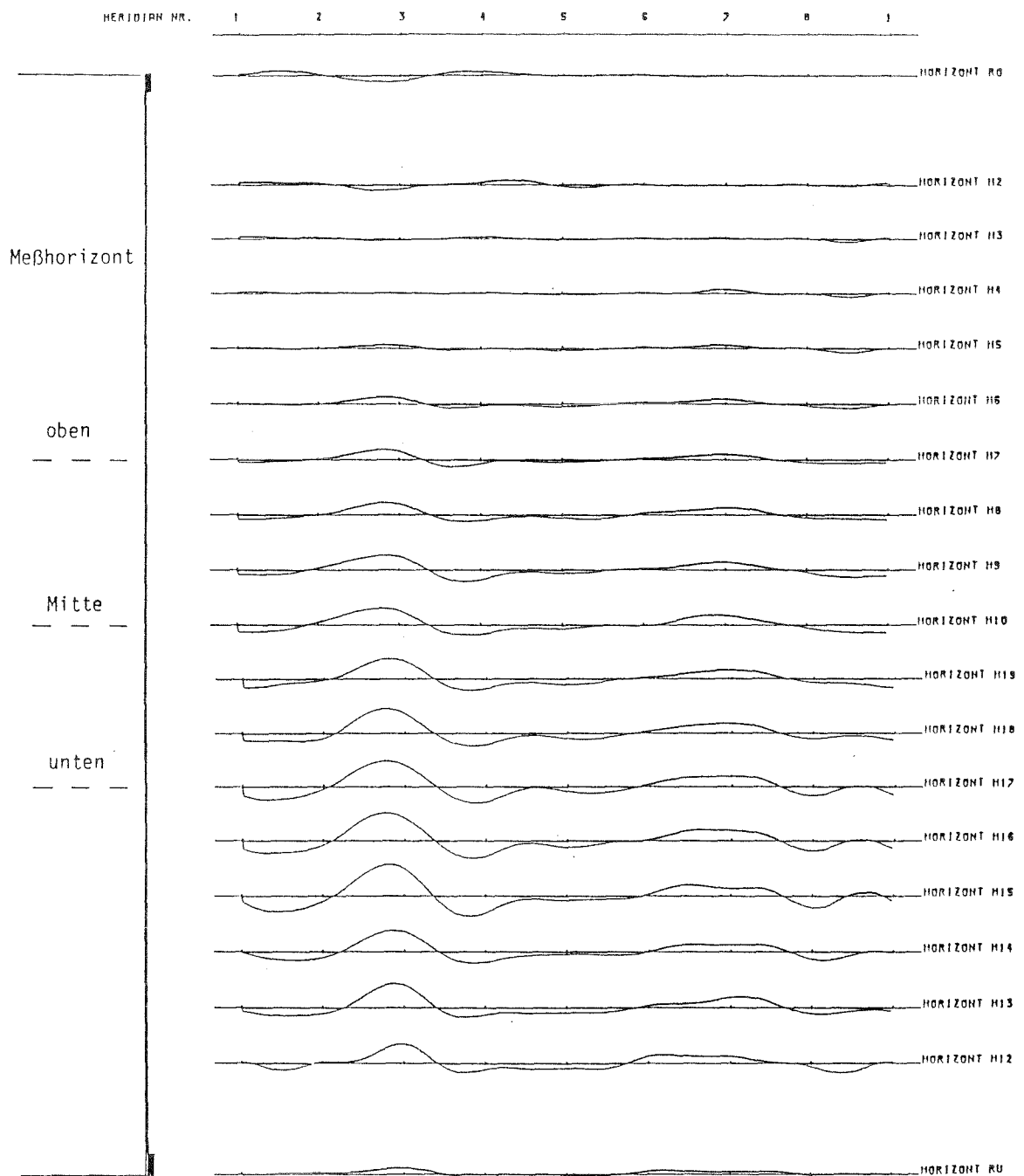


Abb. 4.4 Ergebnis Imperfektionsmessung

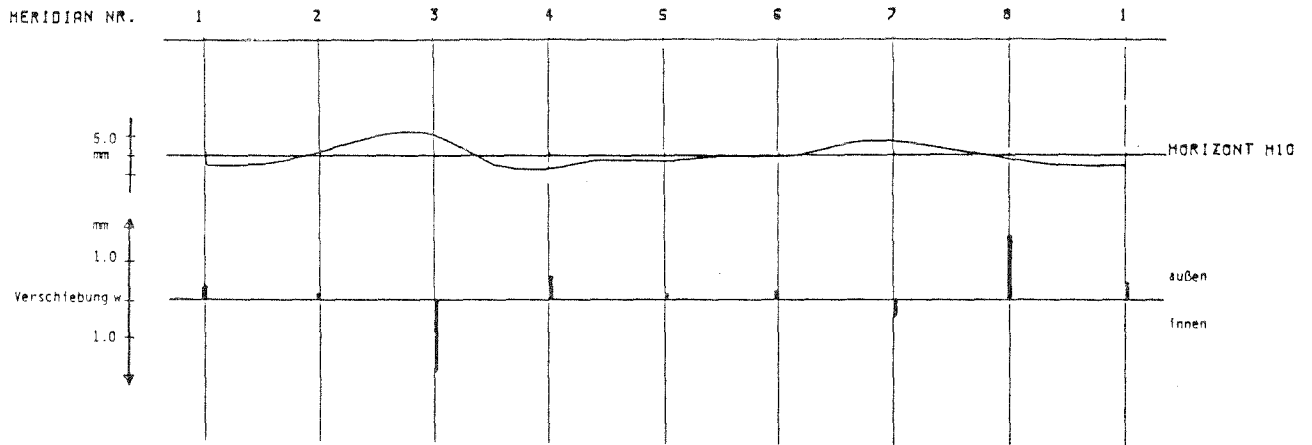


Abb. 4.5 Imperfektionen im mittleren Horizont und gemessene radiale Verschiebungen während eines Eichversuches

#### 4.3.4 Gesamteinschätzung

In voneinander unabhängigen Eichversuchen konnte ein reproduzierbares Verhalten der einzelnen Meßstellen nachgewiesen werden. Der Verlauf der Ringzugkraft läßt sich in sehr guter Näherung in linearer Abhängigkeit von einer gleichmäßig verteilten Belastung darstellen. Die auftretenden Biegemomente zeigen in ihrem qualitativen Verlauf Übereinstimmung mit den auftretenden radialen Verschiebungen. Planmäßige Biegebeanspruchungen werden von der Meßeinrichtung weitgehend richtig erfaßt. Die Imperfektionsmessung belegt den Verlauf der bei den Eichversuchen auftretenden Verschiebungen (Abb. 4.5).

Gleichzeitig zeigen die Imperfektionsmessungen eine Abweichung des Modells von der idealen Kreisform. Die vorliegende Querschnittsform läßt sich als Ellipse mit dem Verhältnis der Halbmesser  $a/b = 0,97$  beschreiben. Vergleichsrechnungen an einer Ellipse mit diesem Verhältnis ergeben einen Momentenverlauf, der der gemessenen Biegebeanspruchung qualitativ entspricht.

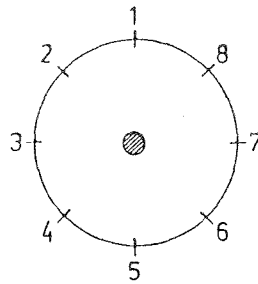
#### 4.4 Dehnungs- und Verformungsmessungen bei zentrischen und exzentrischen Auslaufanordnungen

##### 4.4.1 Versuchsdurchführung

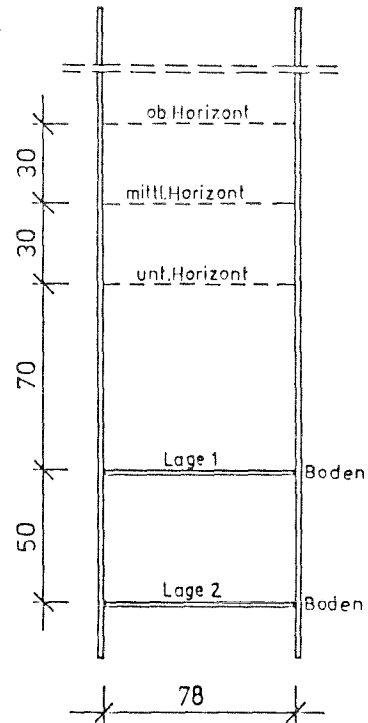
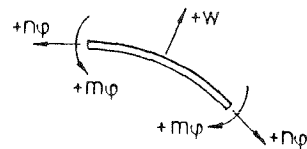
Insgesamt wurden vier Versuchsreihen mit jeweils 8 Einzelversuchen durchgeführt. Im Gegensatz zu den in Kapitel 3 beschriebenen Versuchen wurde auf eine halbausmittige Anordnung der Auslauföffnung verzichtet, es wurden also nur Versuche mit mittlerer und vollausmittiger Entleerung durchgeführt. Allerdings wurde die Lage des Bodens verändert, so daß ein größerer Bereich der möglichen Verschneidung des inneren Auslauftrichters mit der Silowand erfaßt

werden konnte. Der Versuchsablauf erfolgte wie bereits in Kapitel 3 beschrieben. Aufgrund der größeren Zeitspanne zwischen 2 Meßzyklen konnten während des Umlaufbetriebes allerdings nicht so viele Messungen durchgeführt werden. Die Umlaufphase entsprechend zu verlängern war nicht möglich, da die Gefahr bestand, daß dann die im Siloinnern angebrachte Folie durch das Schüttgut abgerissen wurde.

Meß-Meridiane



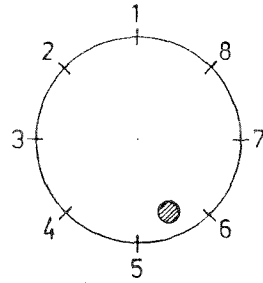
Schnittgrößen und Verschiebung  $w$



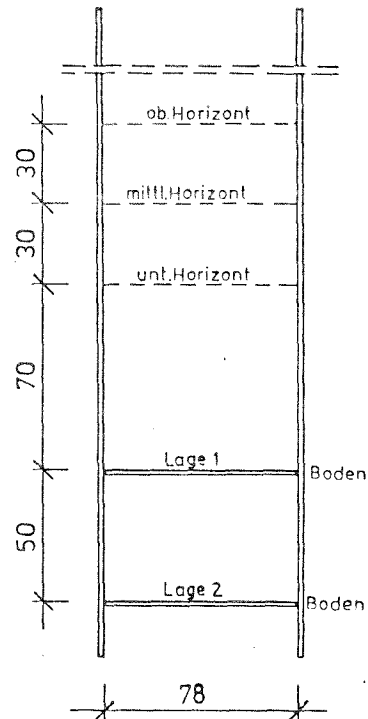
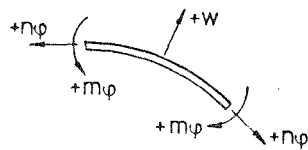
Versuchs- bezeichnung	Lage des Bodens	Anzahl Messungen
M 1	1	26
M 2	1	30
M 3	1	34
M 4	1	27
M 5	1	27
M 6	1	27
M 7	1	28
M 8	1	34
Z 3	2	37
Z 4	2	38
Z 5	2	36
Z 6	2	36
Z 7	2	38
Z 8	2	34
Z 9	2	33
Z 10	2	34

Abb. 4.6 Übersicht: Versuche mit mittiger Entleerung

Meß-Meridiane



Schnittgrößen und Verschiebung  $w$



Versuchs- bezeichnung	Lage des Bodens	Anzahl Messungen
EZ 1	1	27
EZ 2	1	33
EZ 3	1	28
EZ 4	1	27
EZ 5	1	27
EZ 6	1	27
EZ 7	1	26
EZ 8	1	28
EX 1	2	38
EX 2	2	32
EX 3	2	39
EX 4	2	34
EX 5	2	43
EX 6	2	35
EX 7	2	39
EX 8	2	34

Abb. 4.7 Übersicht: Versuche mit ausmittiger Entleerung

#### 4.4.2 Versuchsauswertung

Mit den in 4.3 beschriebenen Grundlagen wurden für jede Meßstelle die Ringzugkraft und das Ringbiegemoment aus den ermittelten Dehnungen errechnet. Für die im mittleren Horizont gemessenen radialen

Verschiebungen war lediglich eine Umrechnung mit dem Eichfaktor des Gebers erforderlich. Alle Versuchsabläufe und die erhaltenen Meßgrößen sind im Anhang dargestellt. Der Verlauf der Ringzugkraft kennzeichnet die bestehenden Druckverhältnisse. Von Interesse ist dabei insbesondere, ob größere Schwankungen sowohl entlang des Umfanges als auch an einzelnen Meßstellen auftreten. Aufgrund der erkannten Imperfektionen kann der Absolutwert des Ringbiegemomentes nicht bei der Wertung der Ergebnisse berücksichtigt werden, bewertet wird nur die Momentenänderung als Maß für die auftretende Krümmungsänderung und damit zusammenhängend die Frage, inwieweit sich durch die Krümmungsänderung eine zusätzliche Membranlastabtragung einstellt.

#### 4.4.3 Versuchsergebnisse

Alle Versuchsergebnisse sind als Anlagen zu Kap. 4 wiedergegeben. Dargestellt sind jeweils die gemessenen Ringzugkräfte, die Ringbiegemomente sowie die im mittleren Horizont gemessenen radialen Verschiebungen.

Ringzugkräfte (Abb. 4.8 - 4.10)

Die Einzeldarstellungen im Anhang zeigen, daß die Ringzugkräfte während des Füllens ohne nennenswerte Schwankungen asymptotisch ansteigen. Auffallend ist der übermäßig starke Anstieg der Fülllasten über den Mittelwert an den Meßstellen, für die die Imperfektionsmessung eine Abweichung des Zylinders von der Sollform nach außen erkennen läßt. Durch das eingelagerte Schüttgut wird eine Verformung der Zylinderwandung nach innen behindert, so daß sich große Zugspannungen aufbauen. Mit dem beginnenden Ausfließen des Schüttgutes ändert sich dessen Lagerungsdichte, verbunden mit einer radialen Verschiebung der Wand nach innen werden die Spannungsspitzen abgebaut.

Nach Abschluß des Füllvorganges ergaben sich in den einzelnen Horizonten für die Ringzugkraft die folgenden Mittelwerte und entsprechend zugehörige gleichmäßig verteilte horizontale Ersatzlasten:

	Mittelwert $n$ :	$p = n / r$
oben:	1,96 kN/m	5,0 kN/m <sup>2</sup>
mitte:	2,72 kN/m	6,97 kN/m <sup>2</sup>
unten:	2,28 kN/m	5,85 kN/m <sup>2</sup>

Diese Werte entsprechen in etwa den direkt gemessenen Drücken (vgl. Kap. 3, Abb. 3.12).

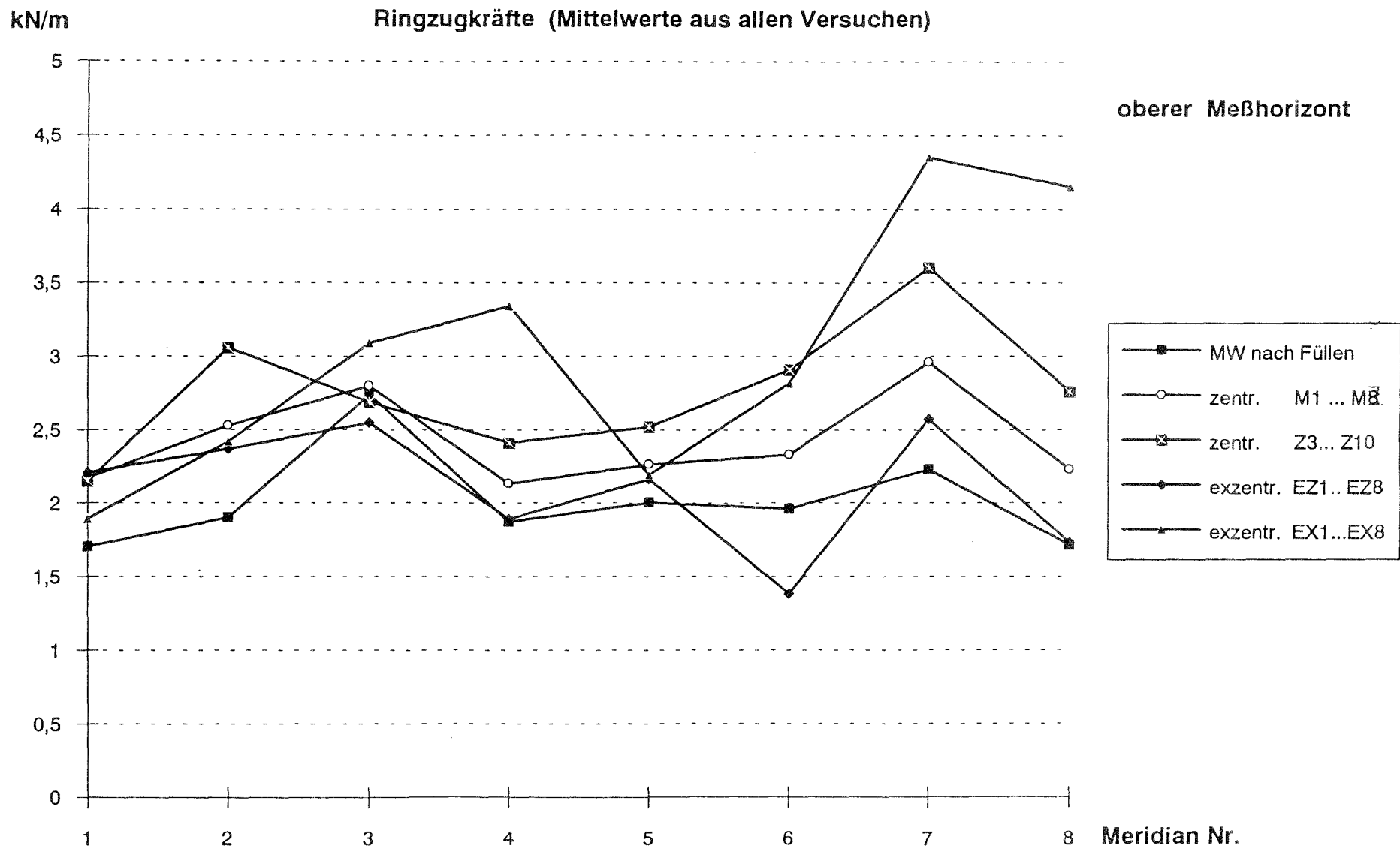


Abb. 4.8 Ringzugkraft oberer Horizont

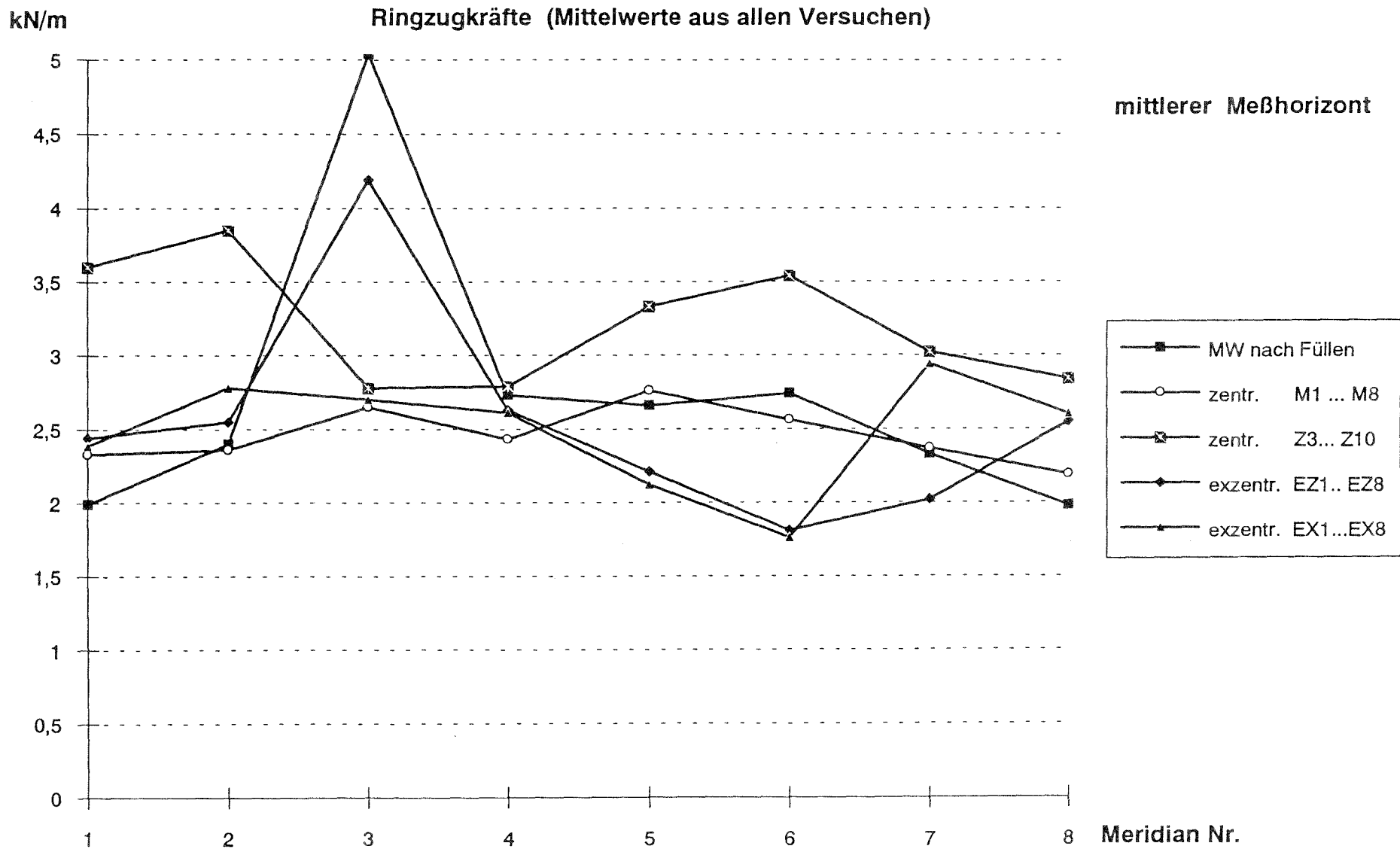


Abb. 4.9 Ringzugkraft mittlerer Horizont

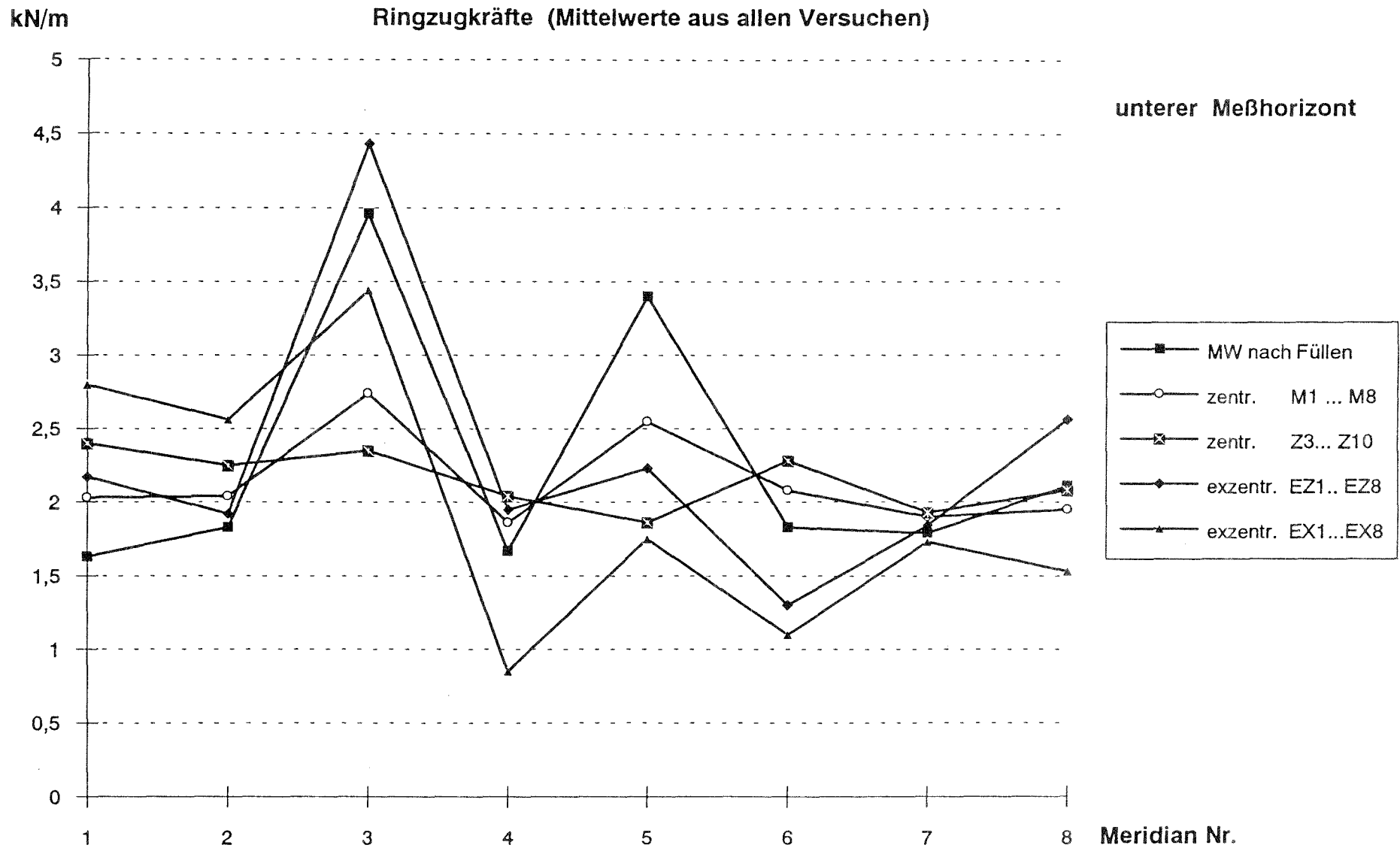


Abb. 4.10 Ringzugkraft

unterer Horizont



Der Umlaufbetrieb ist sowohl mit einer Steigerung des Lastniveaus als auch mit stärkeren Schwankungen der einzelnen Meßwerte verbunden (vgl. Einzeldarstellungen im Anhang). Der unterschiedliche Lastanstieg bei den Versuchen der Versuchsreihe M (Bodenlage hoch) und der Versuchsreihe Z (Bodenlage tief) ist bedingt durch den Verschneidungspunkt des inneren Fließtrichters mit der Silowand. Die Auswertung der einzelnen Meßreihen unter Berücksichtigung der einzelnen Meßhorizonte zum Boden kennzeichnet den Verlauf der Belastung über die Höhe (vgl. Anlagen zu Kap.4). Die größten Laststeigerungen sind etwa in der Höhenlage  $h^* = 1,50$  bis  $1,80$  m über dem Boden festzustellen, dies kennzeichnet den Schnittpunkt des inneren Fließtrichters mit der Silowand. Bei den Versuchen mit zentrischem Auslauf ergibt sich die Neigung des Fließtrichters zu

$$\tan \theta = (0,39 - 0,04) / h^*$$

mit  $h^* = 1,50$  m folgt  $\theta = 13^\circ$   
 $h^* = 1,80$  m folgt  $\theta = 11^\circ$

Dies entspricht etwa den Werten nach EVERTS/v.ZANTEN/RICHARDS (vgl. Abb. 3.2).

Die Umfangsverteilung beim mittigen Entleeren ist etwa gleichmäßig, während sie beim ausmittigen Entleeren durch starke Ansteige seitlich der Fließzone über der Entleerungsöffnung und Reduktionen bis auf 40 - 60 % des Mittelwertes im Bereich der Fließzone gekennzeichnet ist (vgl. Anlagen zu Kap.4).

Weiterhin zeigen die Versuchsergebnisse, daß beim exzentrischen Entleeren die Schwankungen in der Belastung weniger ausgeprägt sind als beim zentrischen Entleeren. Es ist auffallend, daß die beim Füllen an den Stellen mit Imperfektionen hervorgerufenen Spannungskonzentrationen weniger stark abgebaut werden: Die Belastung beim ausmittigen Entleeren ist ausgeprägter.

#### Ringbiegemomente (Abb. 4.11 - 4.13)

Aufgrund der Imperfektionen des Modellzylinders sind die quantitativen Wertungen der gemessenen Momente problematisch. Für die Bewertung werden nur die Änderungen der Momente gegenüber dem Füllzustand betrachtet. Am auffälligsten sind die Momentenänderungen bei ausmittigen Entleeren. In den Fließzonen über der Entleerungsöffnung ergeben sich große negative Momente (Zuspannungen an der Wandinnenseite erzeugend), während in den seitlichen Übergangszonen große positive Momente gemessen wurden.

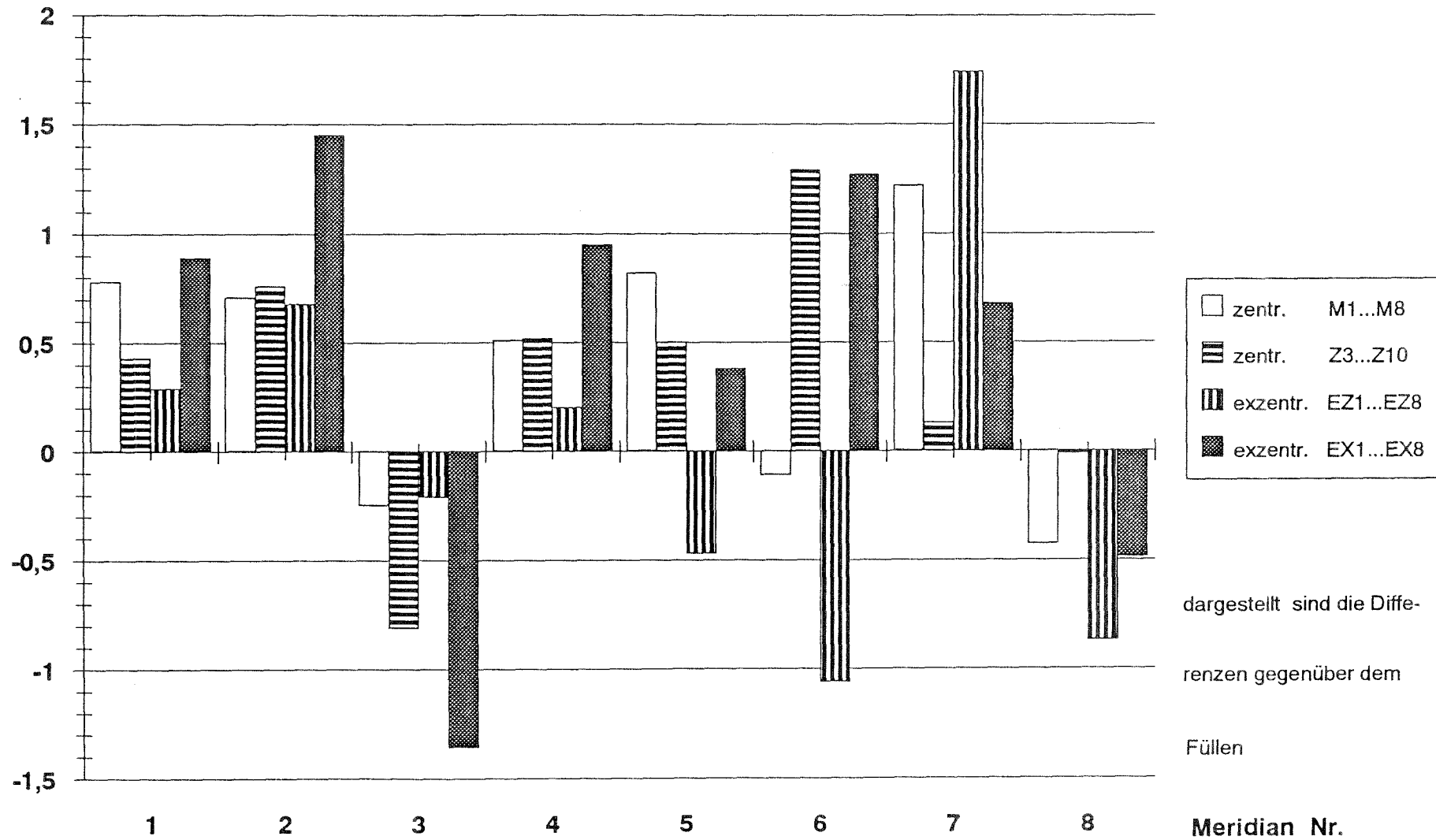
#### Radialverschiebungen (Abb. 4.14)

Die nach dem Füllen gemessenen radialen Verschiebungen im mittleren Horizont entsprechend qualitativ den bei den Eichversuchen mit einer gleichmäßig verteilten Belastung festgestellten Verschiebungen

(Abb. 4.5): an den Stellen mit Imperfektionen nach außen erfolgen Verschiebungen nach innen (Meridiane 3 und 7). Dies deutet darauf hin, daß die Fülllasten gleichmäßig über den Umfang verteilt sind. Bei zentrischer Anordnung des Auslaufes ergeben sich keine nennenswerten Verschiebung, während beim ausmittigen Entleeren ausgeprägte Verformungen des Silomantels nach innen im Bereich des Fließkanales und nach außen in den seitlichen Übergangszonen zu erkennen sind.

Nmm/mm

Ringbiegemoment  $m_{\varphi}$  im oberen Horizont



dargestellt sind die Differenzen gegenüber dem Füllen

Abb. 4.11 Ringbiegemoment oberer Horizont

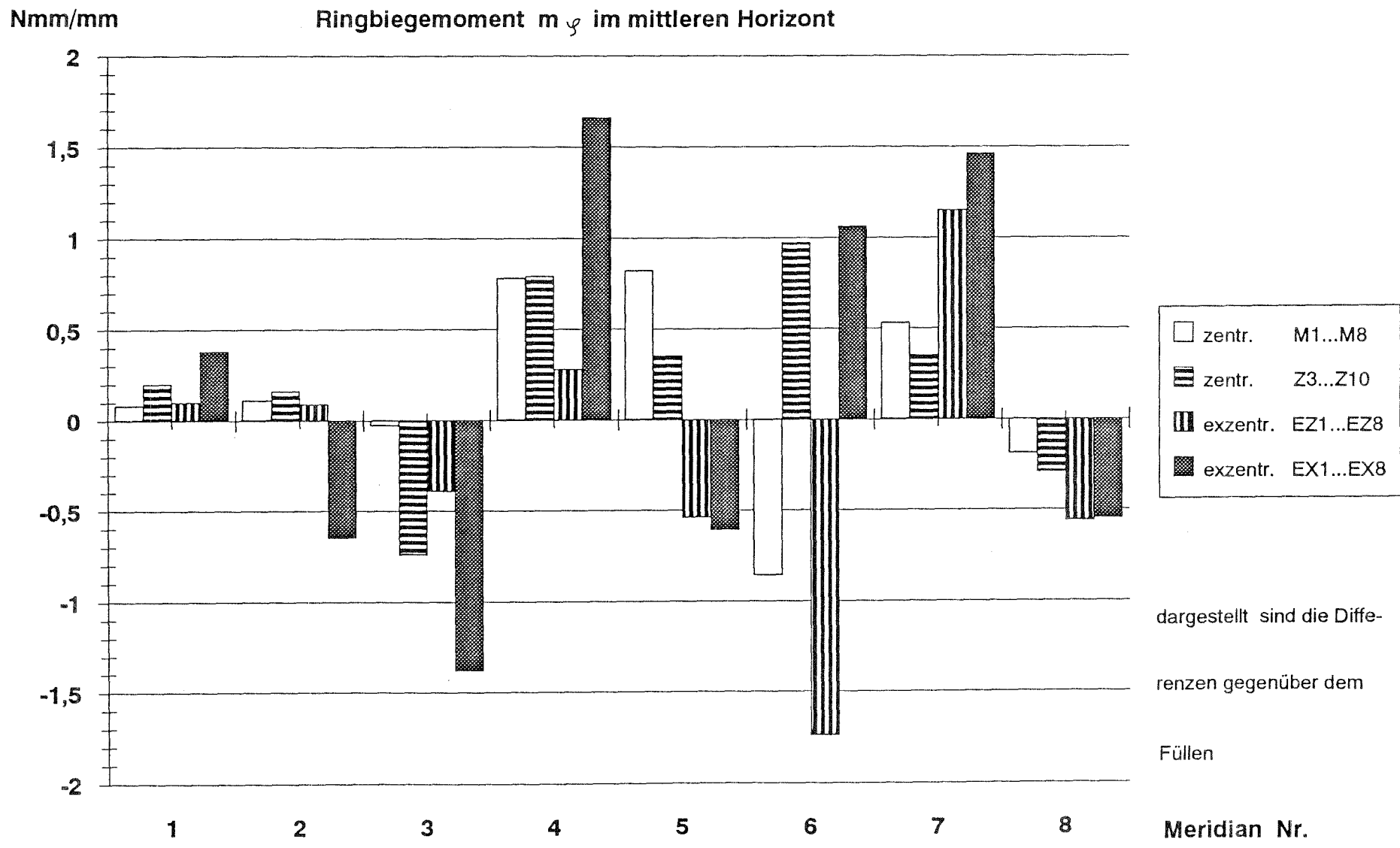
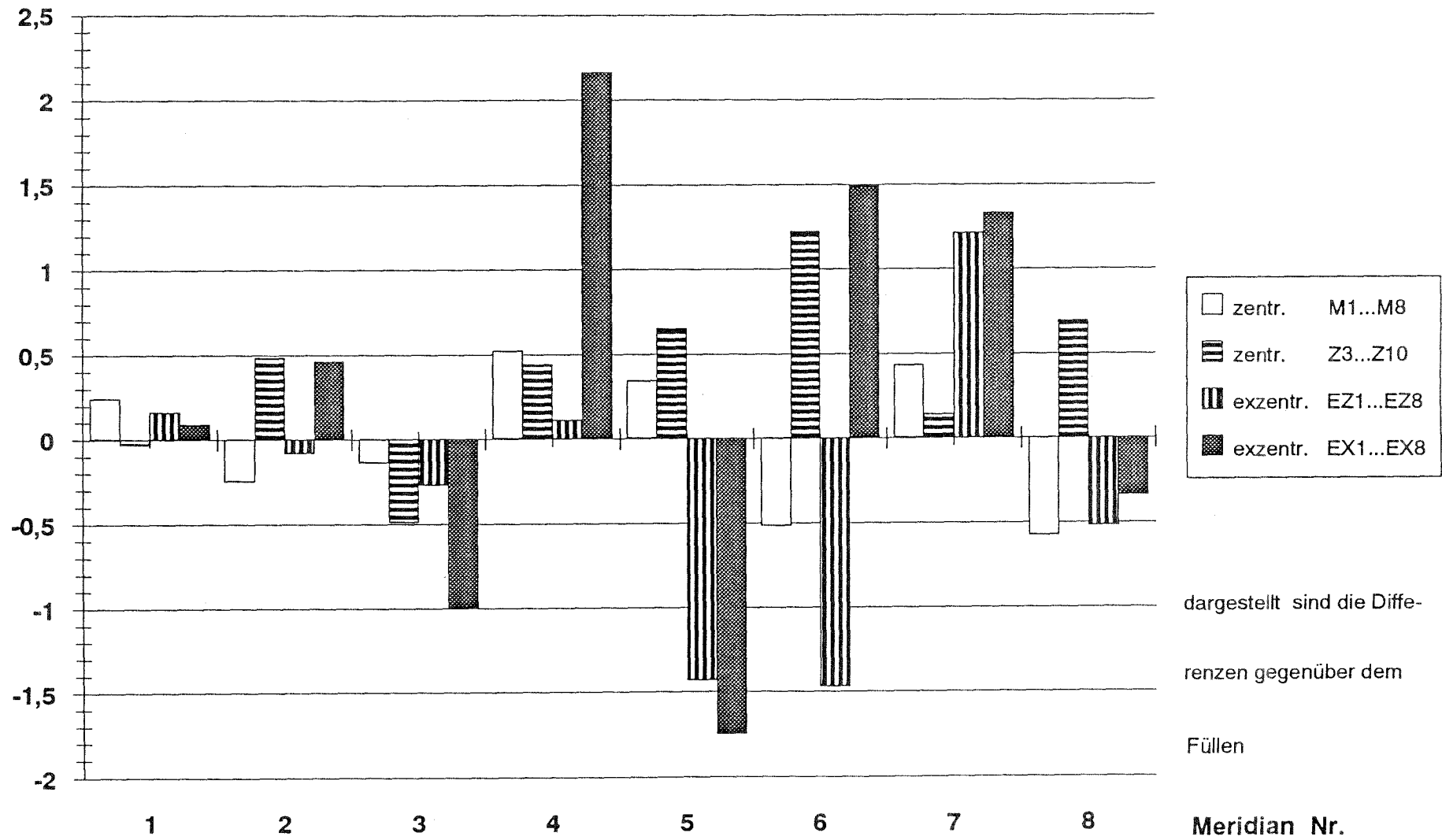


Abb. 4.12 Ringbiegemoment mittlerer Horizont

Nmm/mm

### Ringbiegemoment $m_{\varphi}$ im unteren Horizont



dargestellt sind die Diffe-  
renzen gegenüber dem  
Füllen

Abb. 4.13 Ringbiegemoment unterer Horizont

1/10 mm

### Radialverschiebung w im mittleren Horizont

(Mittelwerte aus allen Versuchen)

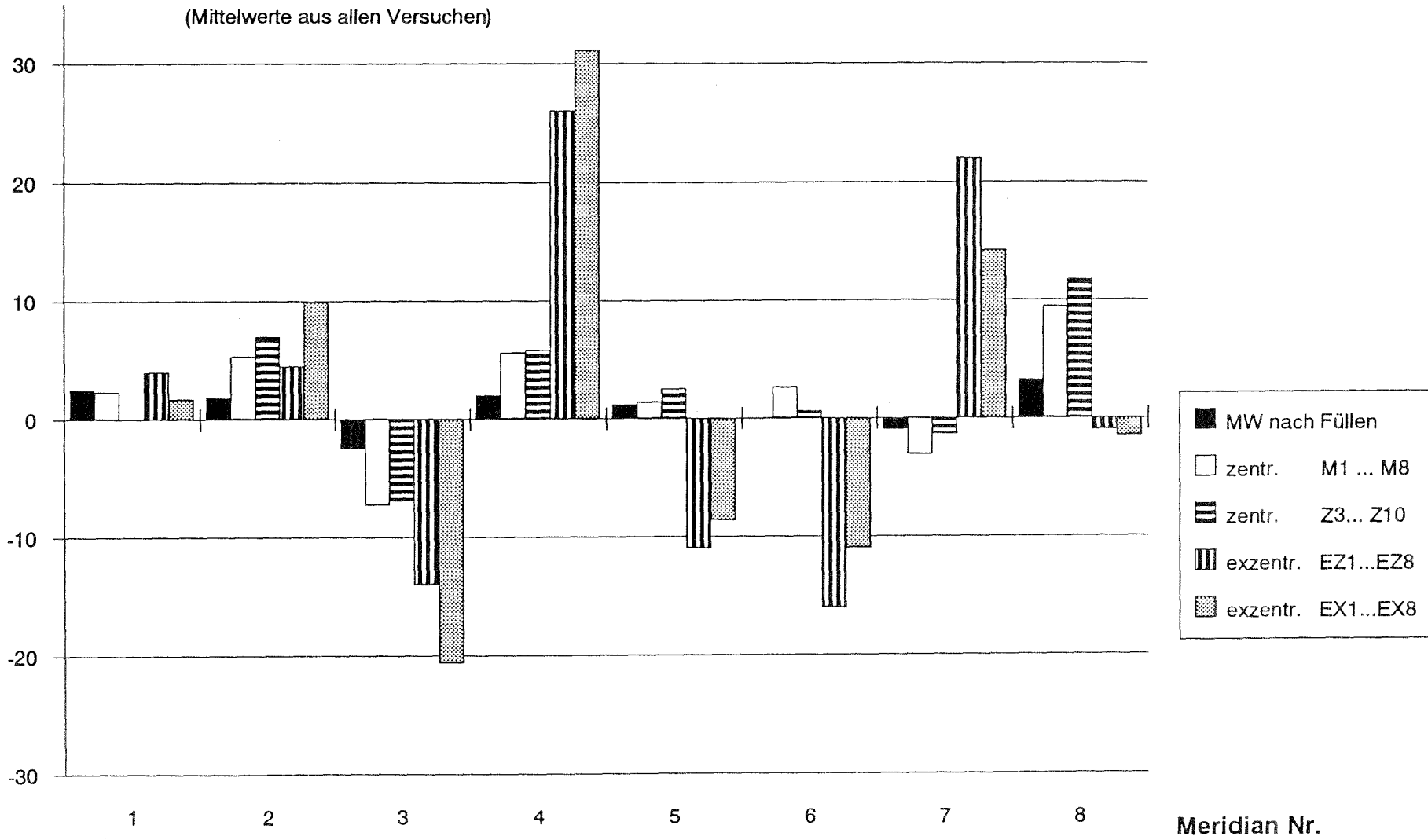


Abb. 4.14 Radialverschiebung mittlerer Horizont

17

## 5. Rechnerische Untersuchungen über die Belastungen bei zylindrischen Silozellen

### 5.1 Lastansatz einer Teilflächenlast nach DIN 1055 Teil 6

Zur Erfassung der ungleichmäßigen Verteilung der Horizontaldrücke entlang des Umfangs ist nach DIN 1055 Teil 6 eine örtlich begrenzte, diametral wirkende Teilflächenlast in halber Silohöhe anzusetzen. Für die praktische Anwendung stehen Tabellenwerte zur Verfügung, z.B. Hennig, (1971) für Radius-Wanddickenverhältnisse  $r/t < 300$  und British Standard 5500 für  $r/t$ -Verhältnisse  $< 2000$ .

Für einen beidseitig gelenkig gelagerten Zylinder, unterschiedliche Höhen/Durchmesser-Verhältnisse  $h/d$  und die im Silobau üblichen Radius/Wanddickenverhältnisse  $r/t$  (15 bis 50 für Stahlbetonkonstruktionen und 100 bis 1500 für Stahlkonstruktionen) wurden mit dem FEM-Programms ASHSD2 (GHOSH, S. / WILSON, E. , 1975) entsprechende Berechnungen durchgeführt. Die in halber Silohöhe auf eine quadratische Lastfläche mit der Seitenlänge  $0,2 \cdot d$  anzusetzende Teilflächenlast wurde dabei durch eine harmonische Analyse als gerade Fourierreihe dargestellt, wobei bis zu 50 Reihenglieder erfaßt werden (vgl. Anhang zu Kap. 5).

Die Auswertung der Berechnungen erlaubt es, zur Bestimmung der zusätzlichen Beanspruchung infolge der Teilflächenlast in Abhängigkeit von  $r/t$  und  $h/d$  die folgenden Diagramme als Rechenhilfen anzugeben.

Bei einer quadratischen Lastfläche mit der Seitenlänge  $0,2d = 0,4 r$ , die mit einer gleichmäßig verteilten Last  $p$  belastet wird, ergibt sich als Gesamtlast  $P = 0,16 \cdot r^2 \cdot p$ .

Durch diese Belastung ergeben sich im Lastaufpunkt die Schnittgrößen

$$n = n^* \cdot P / r$$

$$\text{und } m = m^* \cdot P$$

Mit Hilfe der Abb. 5.1 – 5.4 können für verschiedene  $r/t$  und  $h/d$ -Verhältnisse die Beiwerte  $n^*$  und  $m^*$  bestimmt werden.

Analog zu dem in Abs. 2.1.2 hergeleiteten Steigerungsfaktor  $s^*$  wird ein Überlastfaktor bestimmt, der die zusätzliche Beanspruchung durch die Teilflächenlast berücksichtigt. Dies entspricht dem sog.

- Verfahren der DIN 1045 Teil 6. Nach der Norm ist die anzusetzende Teilflächenlast von sog. Ungleichförmigkeitsfaktor  $\beta$  abhängig. In den Abb. 5.5 – 5.7 ist die erforderliche Steigerung der gleichmäßig verteilten Horizontallast auf diesen Wert bezogen, ein Vergleich zur Norm ist also unmittelbar gegeben. Abb. 5.5 gilt für Stahlbetonsilos, Abb. 5.6 und 5.7 für Stahlsilos, wobei in Abb. 5.6 eine plastische, in Abb. 5.7 eine elastische Spannungsverteilung zugrundegelegt wurde. Zum Vergleich sind die Steigerungsfaktoren wie sie sich aus dem Ansatz in der Norm ergeben mit eingetragen. Es ist ersichtlich, daß das Näherungsverfahren nach der Norm eine genaue Berechnung ausreichend abdeckt.

# Ringzugkraft infolge Teilflächenbelastung

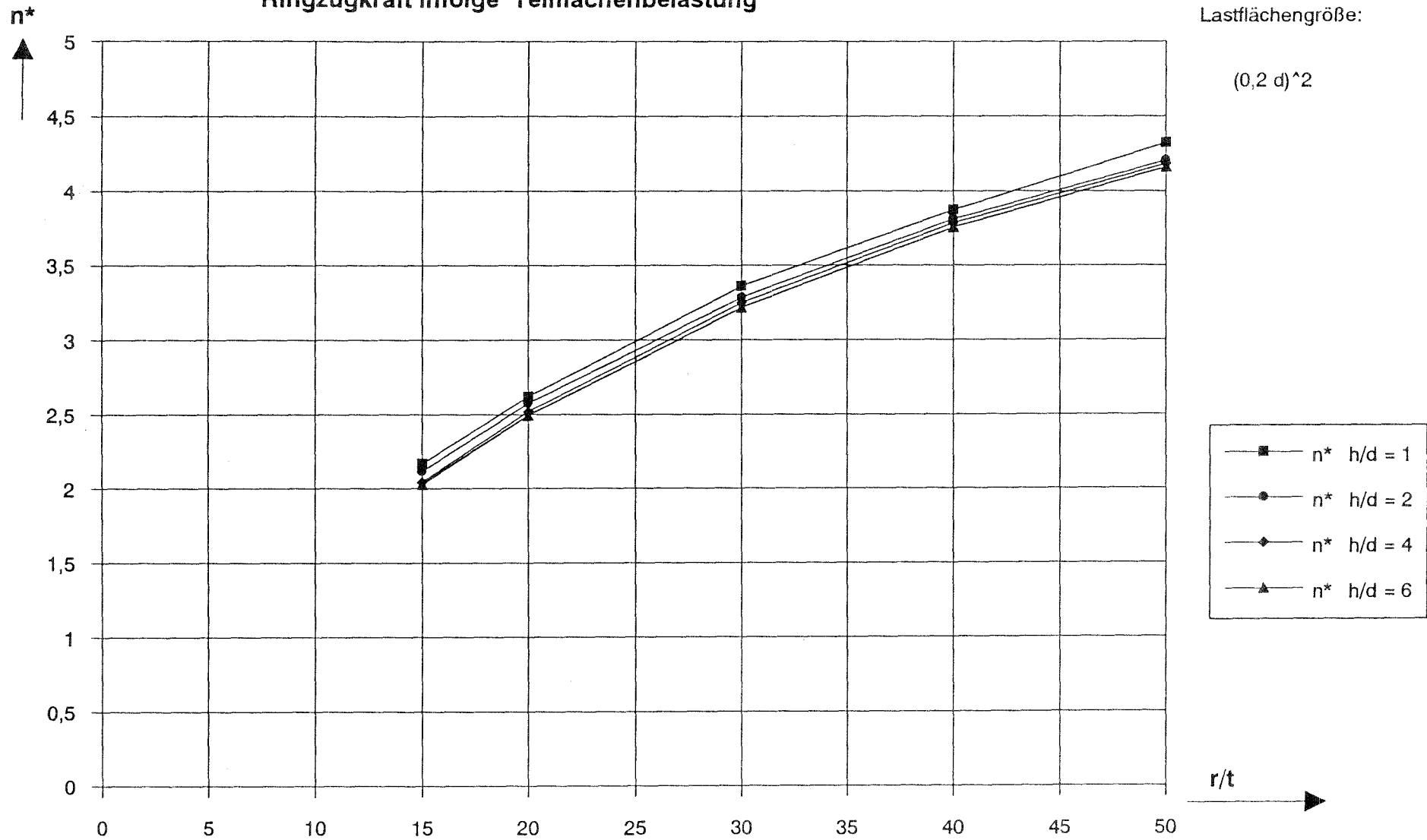


Abb. 5.1



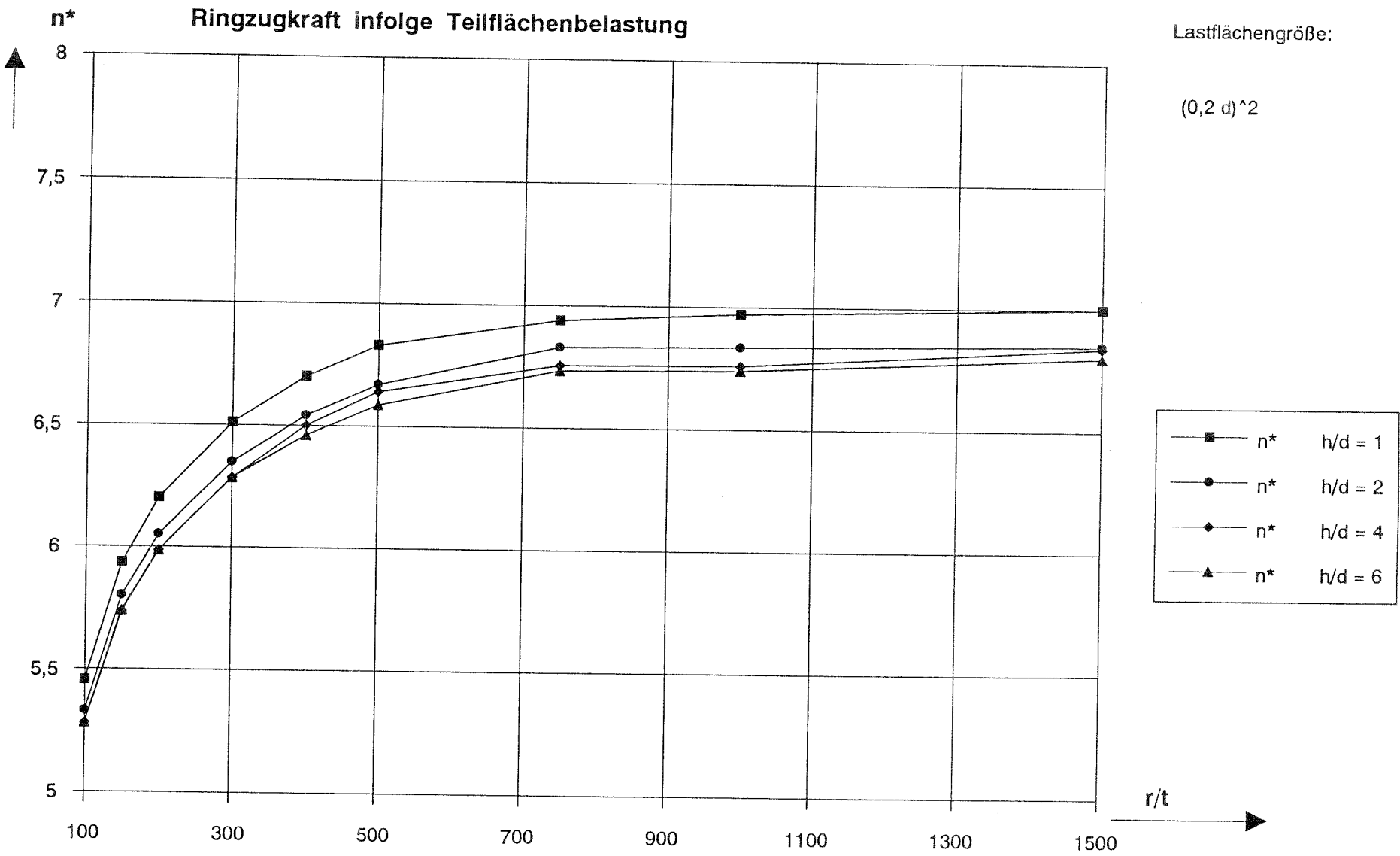


Abb. 5.2

100m\*

### Ringbiegemoment infolge Teilflächenbelastung

Lastflächengröße:

$$(0,2 d)^2$$

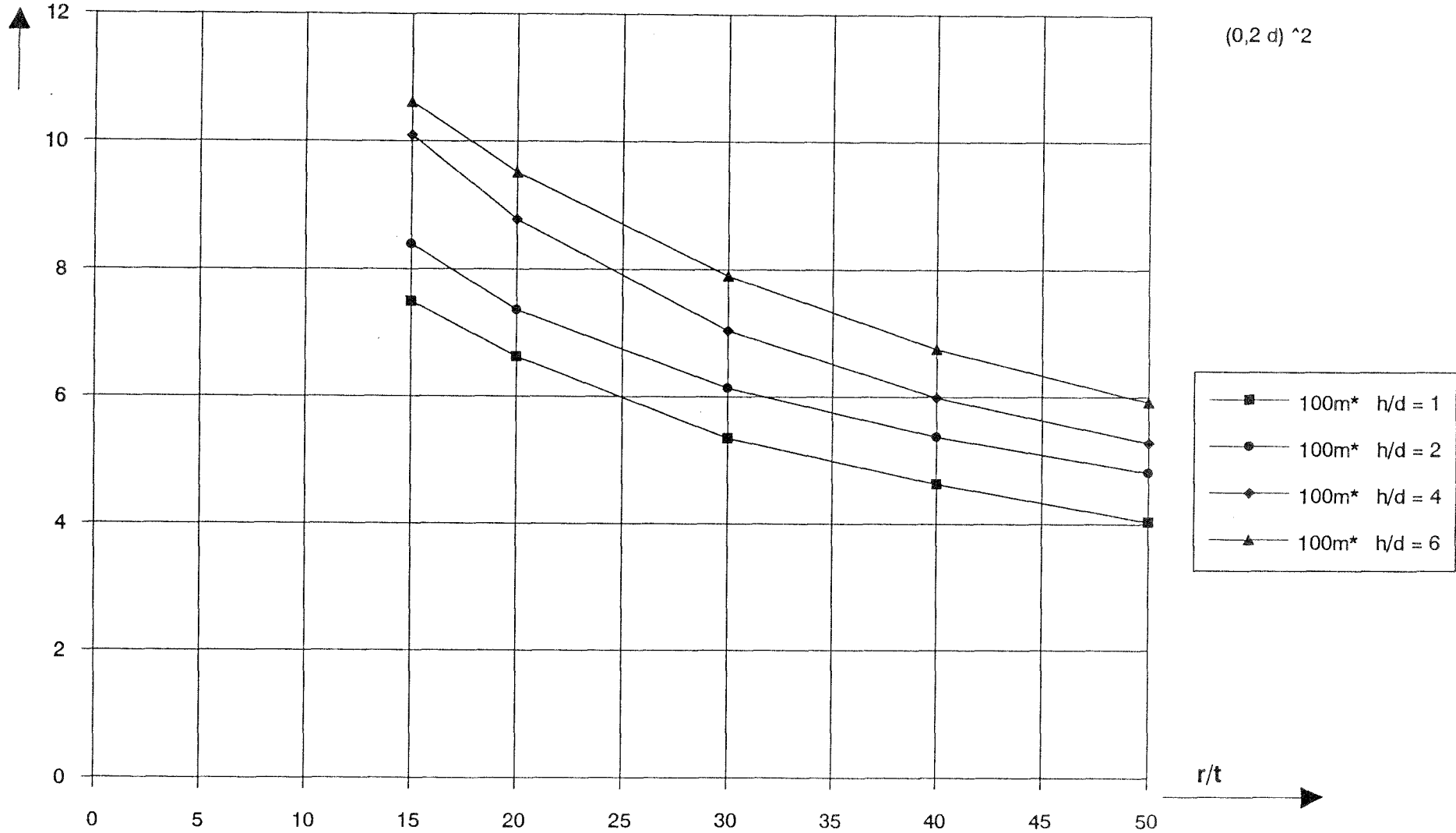


Abb. 5.3

100m\*

### Ringbiegemoment infolge Teilflächenbelastung

Lastflächengröße:

$$(0,2 d)^2$$

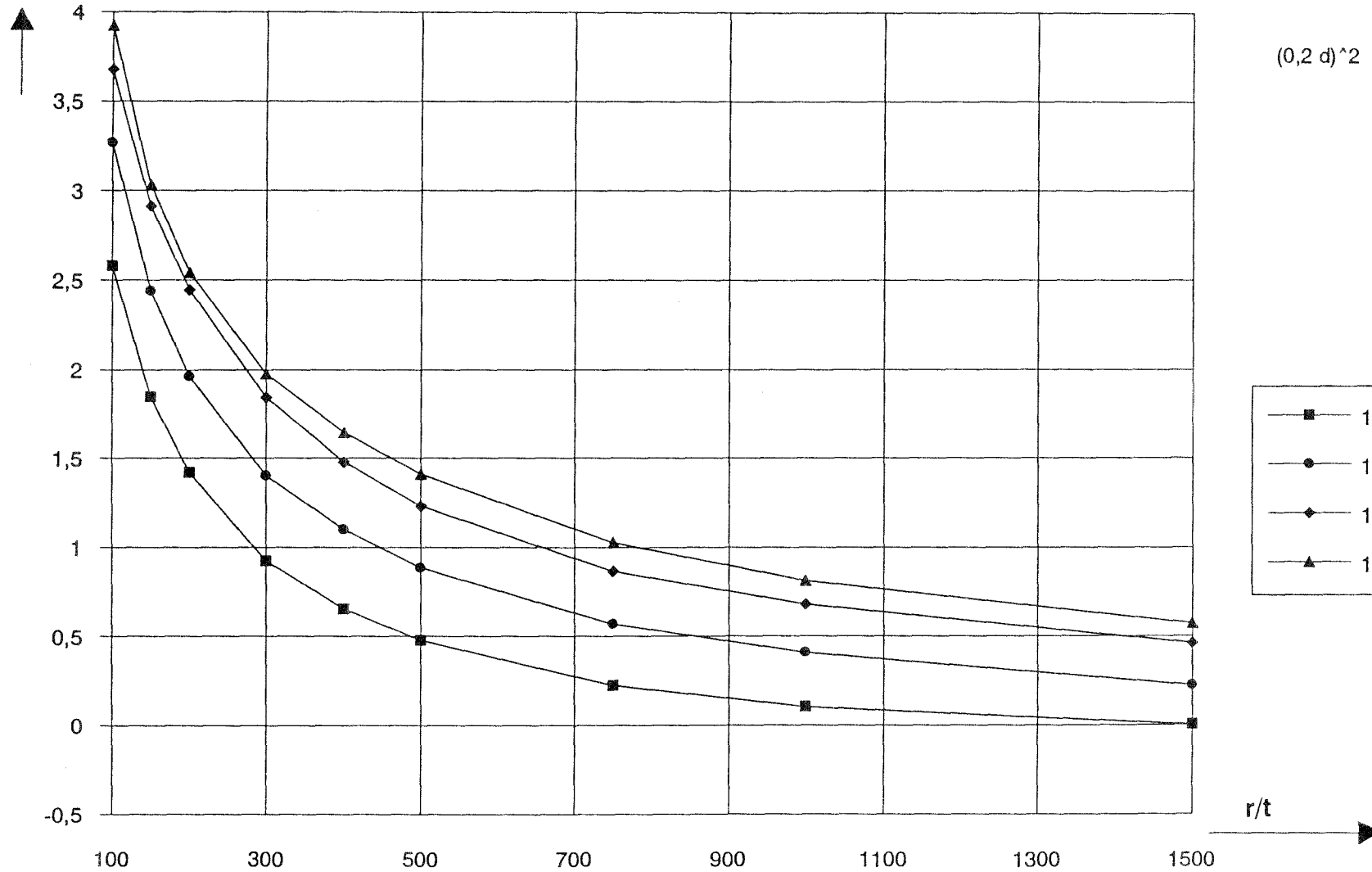


Abb 5.4

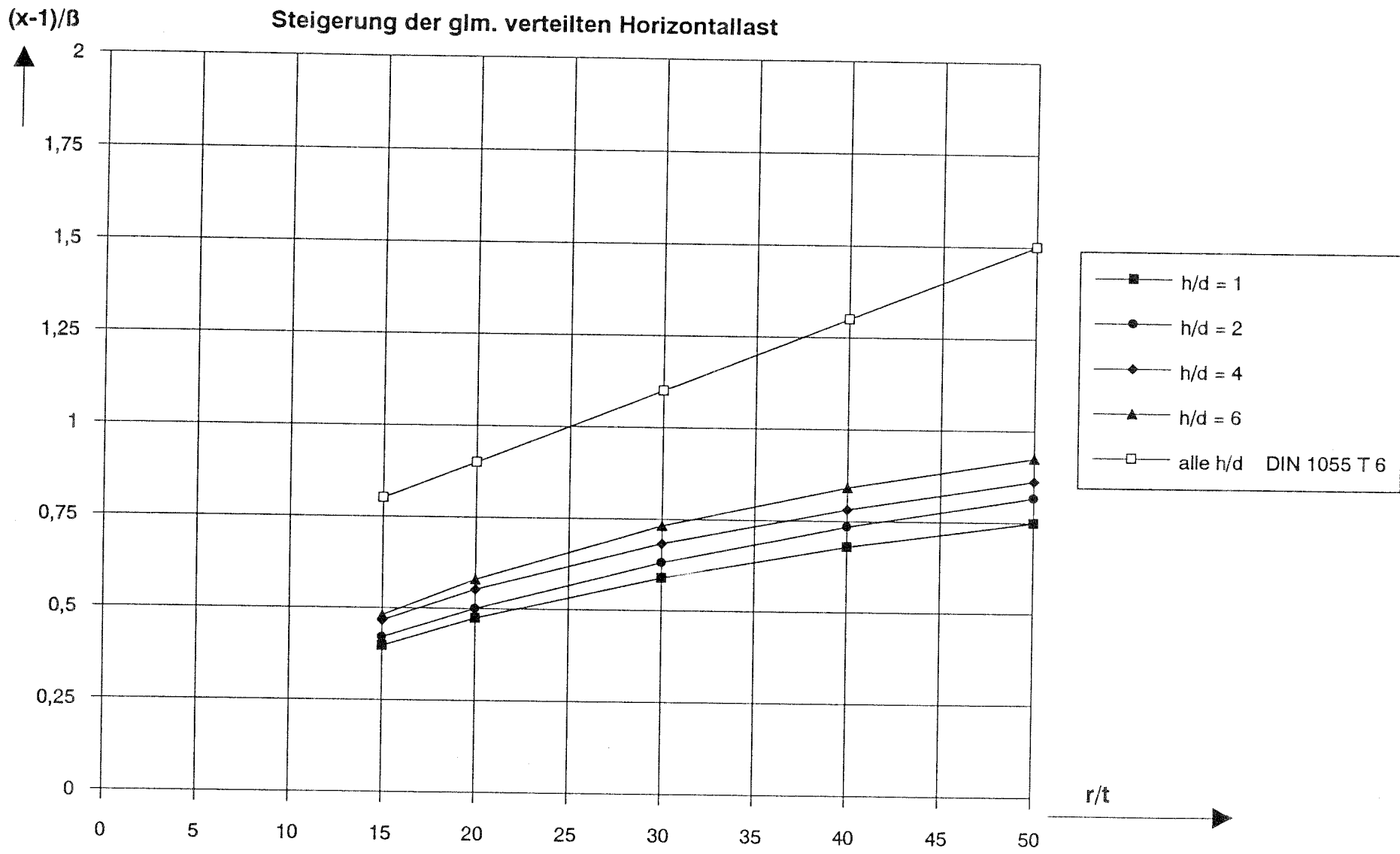


Abb. 5.5

$(x-1)/\beta$

### Steigerung der glm. verteilten Horizontallast

W = W elast.

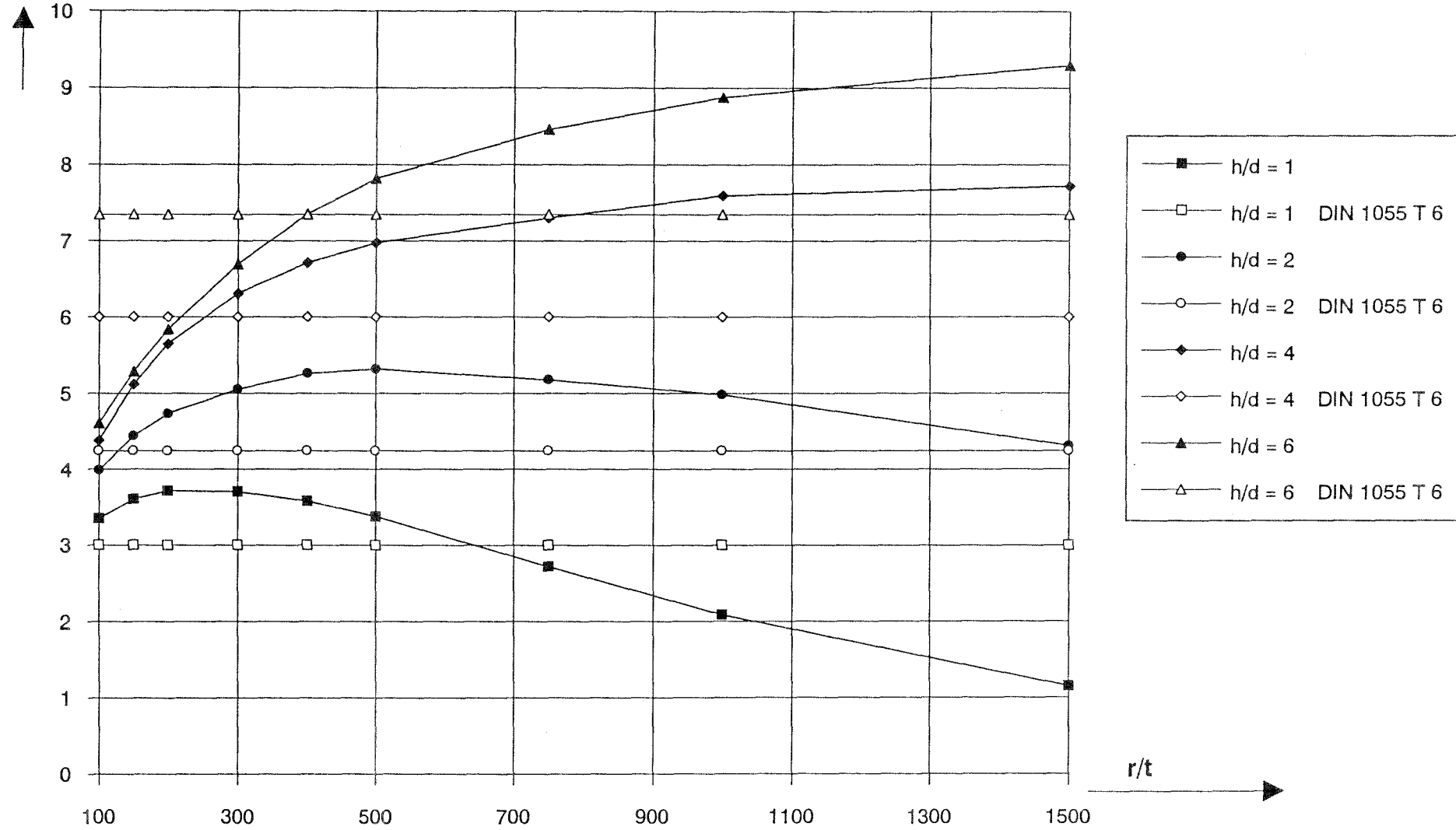


Abb. 5.6

$(x-1)/\beta$

### Steigerung der glm. verteilten Horizontallast

W = W plast.

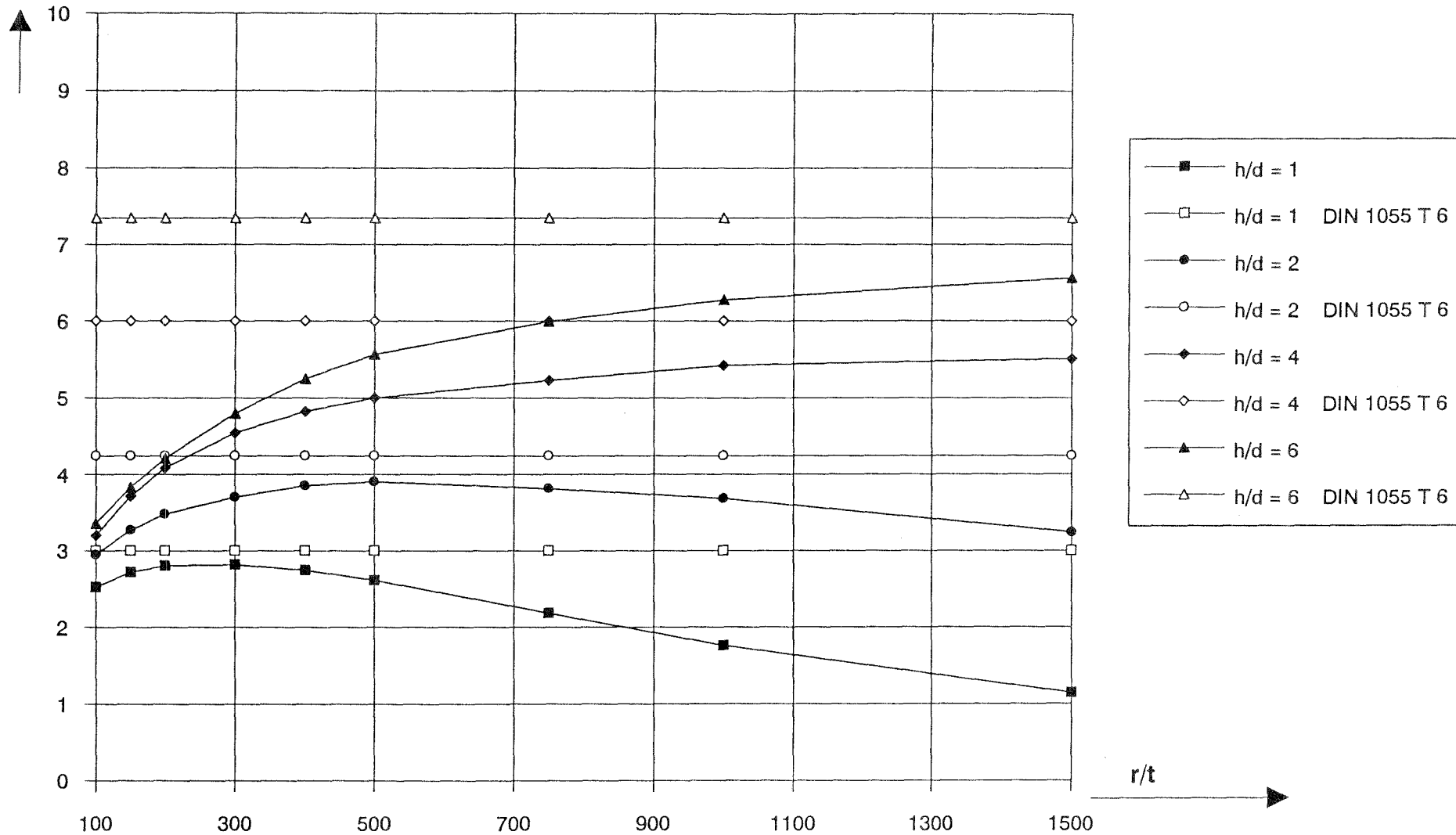


Abb. 5.7

## 5.2 Parameterstudien zu nichtrotationssymmetrischen Lastansätzen

Die sich bei den Messungen (Kap. 4) ergebenden Druckverteilungen sind als gerade Fourierreihen

$$p(\theta) = p_0 \cdot \sum ( a_n \cdot \cos(n \cdot \theta) )$$

dargestellt. Dabei sind Reihenglieder bis zu  $n = 4$  berücksichtigt. Um die daraus resultierenden Beanspruchungen der Silowand zu erfassen, werden Parameterstudien mit Einheitslastfällen durchgeführt. Für unterschiedliche  $r/t$ - und  $h/d$ -Verhältnisse werden die Schnittgrößen infolge der horizontalen Belastungen  $p(\theta) = p_0 \cdot \cos(n \cdot \theta)$  für  $n = 1$  bis  $n = 4$  ermittelt. Die Belastung wird dabei über die Höhe konstant angesetzt.

Durch Überlagerung können die aus den einzelnen Lastverteilungen resultierenden Beanspruchungen ermittelt werden. Gleichzeitig ist es möglich, den Einfluß der ungleichmäßigen Verteilungen aufzuzeigen.

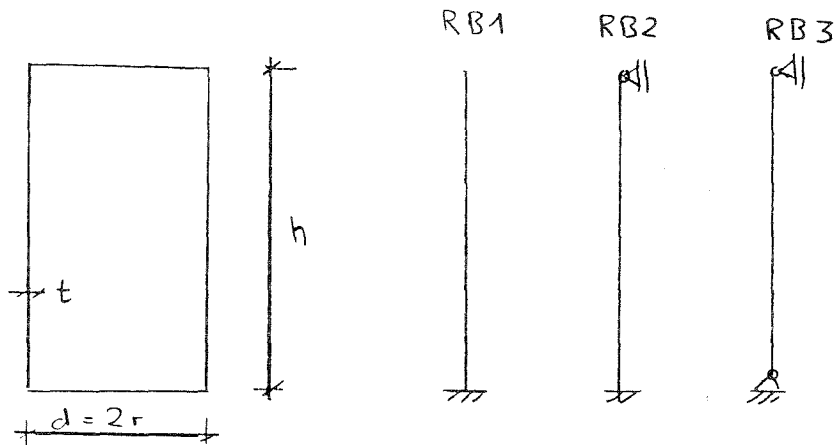
Betrachtete  $r/t$ -Verhältnisse:

Stahlbeton	20	30	40	
Stahlsilos	300	500	750	1500

Betrachtete  $h/d$ -Verhältnisse:

2, 4 und 6

Betrachtete Randbedingungen:



Um die einzelnen Systeme miteinander vergleichen zu können, werden nicht die maximalen Schnittgrößen  $n$  und  $m$  betrachtet, sondern die Schnittgrößen an der Stelle  $z = d$ , d.h. in einer Höhenlage über dem Boden, die dem Durchmesser des Zylinders entspricht.

Für die Ringzugkraft  $n_{\varphi}$  und das Umfangsmoment  $m_{\varphi}$  werden dimen-

sionslose Beiwerte  $n^*$  und  $m^*$  abgeleitet.

Es gilt:

$$n = n^* \cdot p_0 \cdot r \quad \text{und} \quad m = m^* \cdot p_0 \cdot r^2$$

Für die einzelnen Berechnungen sind die Beiwerte  $n^*$  und  $m^*$  im Anhang dargestellt.

Zur Herleitung einer gleichmäßig verteilten Ersatzlast  $p^*$ , die zu der gleichen Beanspruchung wie die nichtrotationssymmetrisch entlang des Umfanges verteilte Last  $p_0$  führt, dient der Steigerungsfaktor  $s^*$ .

Mit den gleichen Überlegungen wie in Abs. 2.1.2. gilt

$$\text{bei Stahlbetonsilos} \quad s^* = n^* + 2,5 \cdot m^* \cdot r/t$$

$$\text{bei Stahlsilos} \quad s^* = n^* + 4 \cdot m^* \cdot r/t$$

Die Steigerungsfaktoren  $s^*$  sind im Anhang zu Kap. 5 dargestellt. Es ist ersichtlich, daß insbesondere höhere Reihenglieder ( $n = 4$ ) bei großen  $h/d$ -Verhältnissen zu einer sehr hohen Beanspruchung führen.



6. Diskussion und Vergleich der Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen (Kap. 3 und 4) und den rechnerischen Untersuchungen (Kap. 5)

Mit Hilfe der in Kap. 5.2 hergeleiteten Steigerungsfaktoren  $s^*$  lassen sich für die aus den Versuchen (Kap. 4) ermittelten ungleichmäßigen Druckverteilungen gleichmäßig verteilte Ersatzlasten  $p^*$  bestimmen.. Anhand dieser Ersatzlasten kann die Veränderung der Beanspruchung in der Silowand aus der Horizontallast  $p_h$  bei den verschiedenen Betriebszuständen (mittiges, 1/2-ausmittiges und vollausmittiges Entleeren) ermittelt werden.

- Berechnungsgang:

Aus den Messungen ergaben sich Horizontaldruckverteilungen entlang des Umfanges, die sich als Fourierreihen darstellen lassen.

$$p = p_0 \cdot (a_0 + a_1 \cdot \cos \theta + a_2 \cdot \cos(2\theta) + a_3 \cdot \cos(3\theta) + a_4 \cdot \cos(4\theta))$$

Die zugeordnete gleichmäßig verteilte Ersatzlast  $p^*$  läßt sich beschreiben mit

$$p^* = p_0 \cdot (a_0 \cdot s_0^* + a_1 \cdot s_1^* \cdot \cos \theta + a_2 \cdot s_2^* \cdot \cos(2\theta) + a_3 \cdot s_3^* \cdot \cos(3\theta) + a_4 \cdot s_4^* \cdot \cos(4\theta))$$

Daraus ergibt sich  $p^*/p_0$ .

Mit den Koeffizienten  $a_i$  und  $s_i^*$  wird diese Verteilung  $p^*/p_0$  entlang des Umfanges berechnet.

Aus diesem Verlauf über den Umfang kann unmittelbar sowohl die Stelle der maximalen Beanspruchung als auch die Höhe der Beanspruchung je nach Entleerungsart abgelesen werden.

Für den Fall  $h/d = 4$  und Randbedingung 1 (d.h. Silo am Fuß eingespannt, oberes Ende frei beweglich) sind die entsprechenden Kurven für die untersuchten  $r/t$ -Verhältnisse (20, 30 und 40) dargestellt (Abb. 6.1 bis Abb. 6.3).

Aus dem Vergleich zwischen dem ausmittigen und dem mittigen Entleeren folgt :

r/t	maximaler Faktor $p^*/p_0$		
	mittiges Entleeren	ausmittiges Entleeren	durch das ausmittige Entleeren bedingte Steigerung
20	1,75	2,70	1.54
30	1,65	2,90	1.75
40	1,60	3,00	1.875

Ersatzlast  $p^*/p_0$

$h/d = 4$

Art der Entleerung :

$r/t = 30$

RB 1

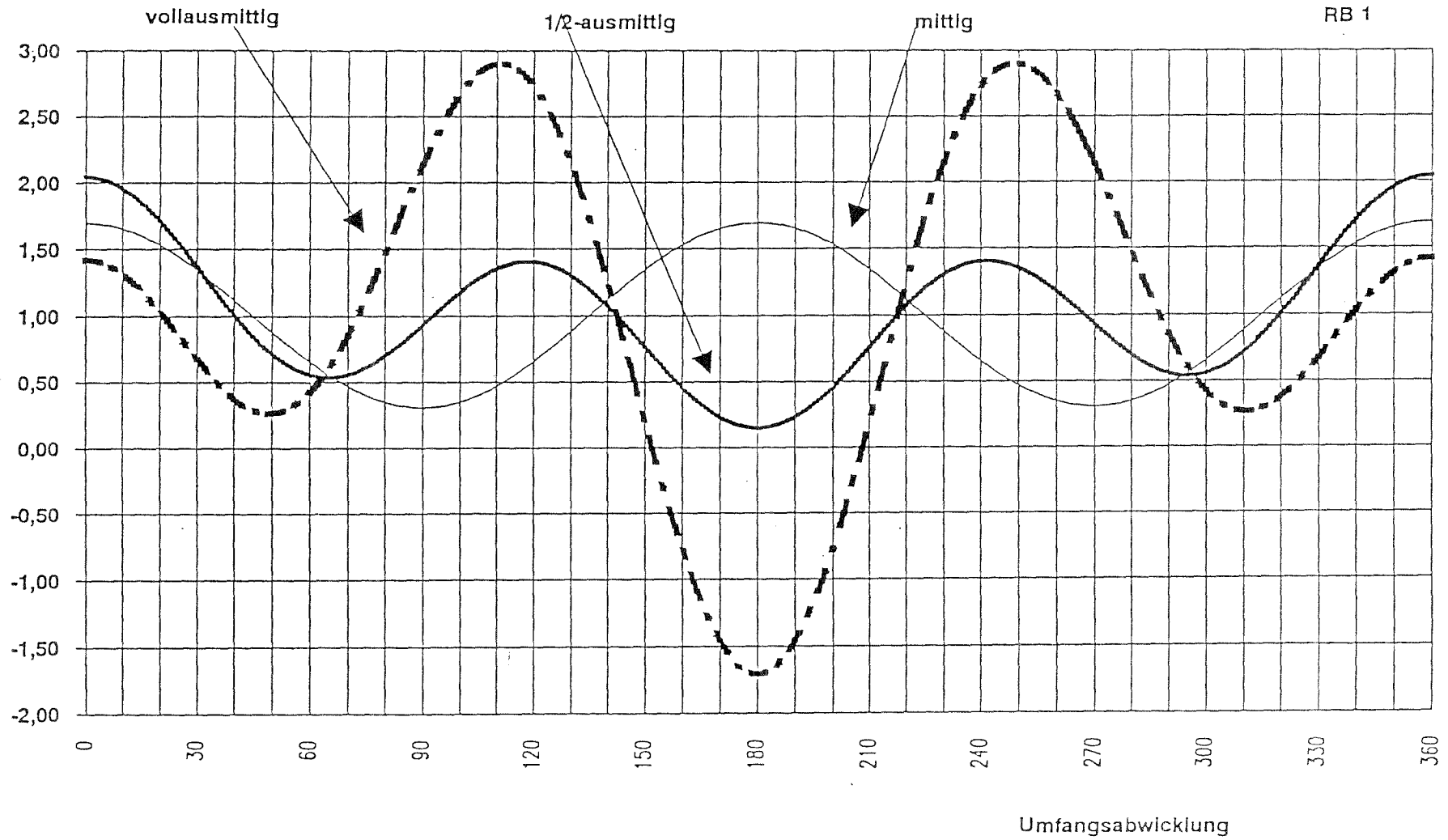


Abb 6.2.

Ersatzlast  $p^*/p_0$

$h/d = 4$

Art der Entleerung :

$r/t = 20$

RB 1

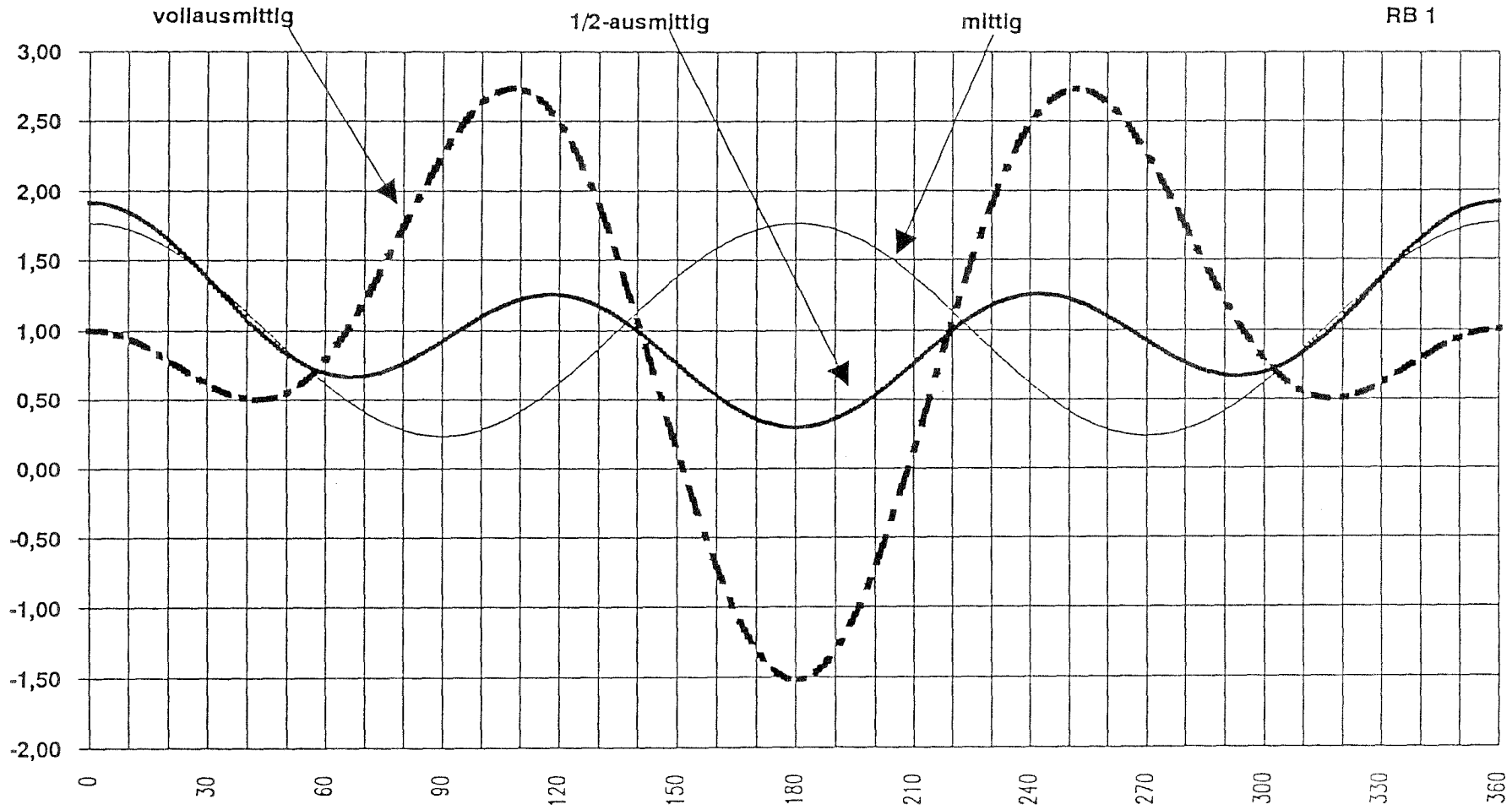


Abb 6.1

Umfangsabwicklung

Ersatzlast  $p^*/p_0$

$h/d = 4$

Art der Entleerung :

$r/t = 40$

RB 1

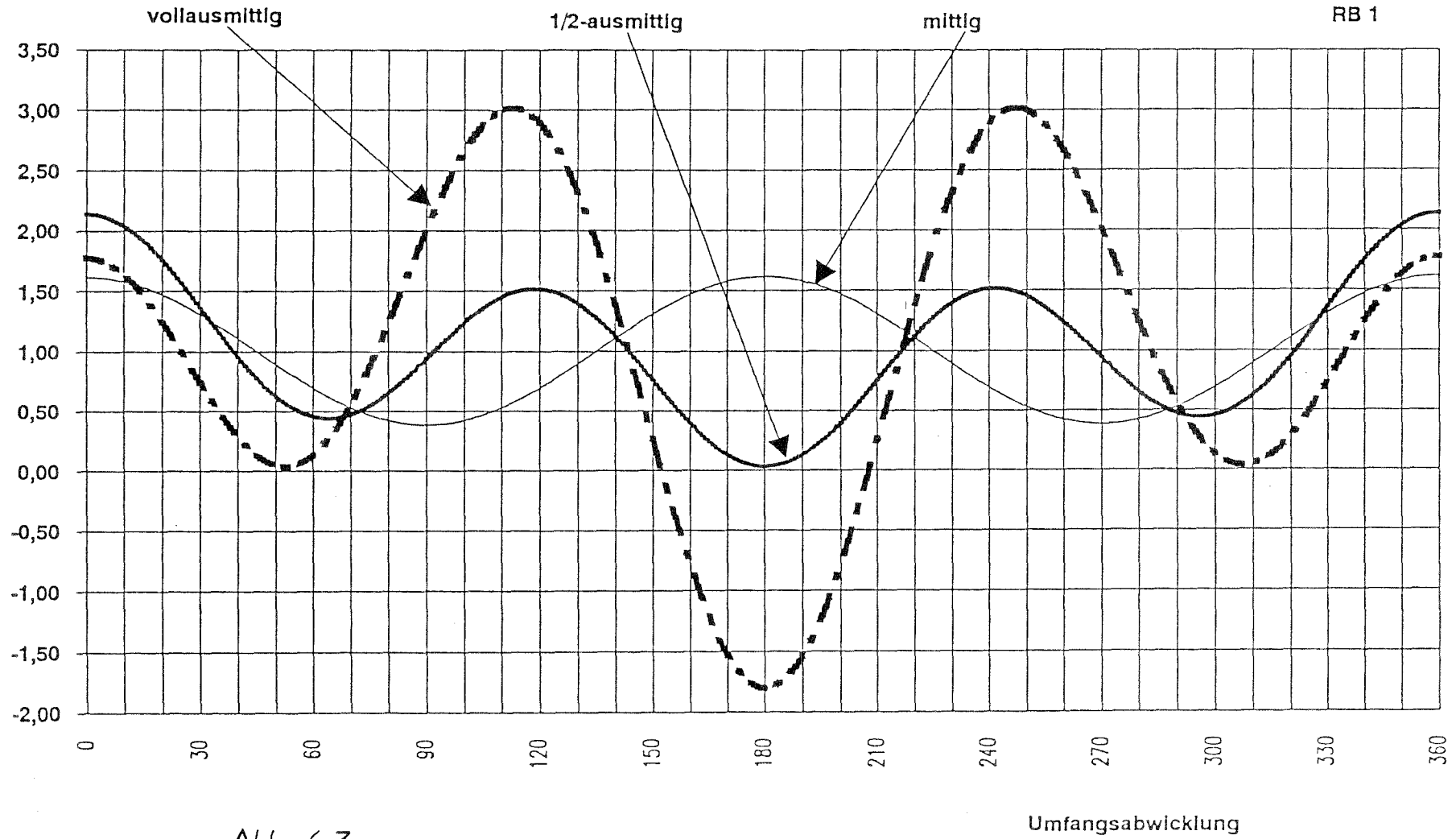


Abb 6.3

## 7. Zusammenfassung

Neben einer mangelhaften Bauausführung liegen die Hauptschadensursachen bei Silobauwerken in unzureichenden Lastannahmen. Im Gegensatz zu sonstigen Hochbauten haben im Silobau falsche Lastannahmen gravierende Folgen, da das Verhältnis von Nutzlast (eingelagertes Schüttgut) zu ständiger Last sehr hoch ist und dementsprechend die hier oftmals vorhandenen "versteckten Reserven" fehlen. Insbesondere für das ausmittige Entleeren mangelt es an zutreffenden Lastansätzen.

In der vorliegenden Forschungsarbeit werden zunächst die aus der Literatur bekannten Lastansätze dargelegt und miteinander verglichen. Weiterhin werden die Ansätze für das ausmittige Entleeren in den anerkannten internationalen Regelungen die Ansätze für das ausmittige Entleeren überprüft.

Im Rahmen eines Versuchsprogrammes an Modellsilos, durchgeführt im Siloversuchsstand der TU Braunschweig, wurde der Frage der Umfangsverteilung der Horizontaldrücke beim zentrischen und exzentrischen Entleeren nachgegangen.

In einer ersten Versuchsreihe wurden an einem relativ steifen Silo mit eingebauten Druckmeßplatten die Horizontaldrücke direkt gemessen, während in einer zweiten Versuchsreihe an einem dünnwandigen Silo die Beanspruchungen (Ringzugkraft und Ringbiegemoment) mittels Dehnungsmeßstreifen erfaßt wurden.

Aus den Versuchen mit den Druckmeßplatten an dem relativ steifen Silo (gemessen wurde in drei Horizonten mit jeweils 8 Meßelementen) ergab sich ein eindeutiges Bild über die Umfangsverteilung der Horizontaldrücke. Die Fülllasten nehmen gleichmäßig asymptotisch zu. Beim Entleeren erfolgt eine Laststeigerung, lediglich in Bodennähe erfolgt kein Lastzuwachs. Beim zentrischen Entleeren schwanken die Drücke um bis zu 15 % um einen Mittelwert, während beim exzentrischen Entleeren ausgeprägte Druckanstiege und Druckabfälle zu beobachten sind. Für die Umfangsverteilung der Horizontaldrücke werden charakteristische Verteilungen angegeben.

In rechnerischen Untersuchungen wird nachgewiesen, daß aufgrund der gemessenen Umfangsverteilung durch ausmittiges Entleeren die Beanspruchung eines relativ steifen Silobauwerkes aus Stahlbeton um bis zu 80 % höher liegen kann als beim zentrischen Entleeren.

Die Messungen am dünnwandigen Modellsilo zeigen beim ausmittigen Entleeren ebenfalls eine sich entlang des Umfanges ändernde Beanspruchung. Die gemessenen Steigerungen der Ringzugkräfte sind allerdings nicht so hoch und betragen ca. 20 %. Problematisch erscheint allerdings beim ausmittigen Entleeren die starke Zunahme der Momente im Übergangsbereich zwischen der Fließzone und dem Be-

reich des stehenden Materials. Diese Modellvorstellung, die von der Annahme einer Fließzone und eines seitlichen Übergangsbereiches mit erhöhten Wandbelastungen ausgeht, wird durch die gemessenen radialen Verschiebungen bestätigt. Im Bereich über der Entleerungsöffnung verformt sich die Wand nach innen, während in den Nachbarzonen eine starke Verformung nach außen stattfindet, es also zu einer Vergrößerung des  $r/t$ -Verhältnisses kommt, dem beim Beulnachweis unbedingt Rechnung zu tragen ist.

Aufgrund der am Modell durchgeführten Imperfektionsmessungen konnte der Einfluß baulicher Imperfektionen nachgewiesen werden: Durch Abweichungen von der idealen Kreisform können sich bereits beim Füllen erhebliche Spannungsspitzen aufbauen, da eine freie Bewegung der Wand durch das eingelagerte Schüttgut behindert wird. Erst durch die Auflockerung des Schüttgutes beim Fließen werden diese Spannungsspitzen abgebaut.

Die Arbeit wird ergänzt durch Parameterstudien über den Einfluß einer Teilflächenlast bei zylindrischen Bauwerken, entsprechend dem Lastansatz in der deutschen Silonorm DIN 1055 Teil 6. Die Berechnungen zeigen, daß durch das Näherungsverfahren der Norm, der Ansatz einer Teilflächenlast abgedeckt wird.

## 8. Literaturverzeichnis

- ASKEGAARD, V. Measurement of silos.  
 NIELSEN, J. British society for strain measurement, Institution of civil engineers. Joint conference 1977  
 Univ. of Newcastle upon Tyne, 5.- 8. Sept. 1977
- ASKEGAARD, V. Probleme bei der Messung des Silodruckes mit  
 BERGHOLDT, M. Hilfe von Druckzellen.  
 NIELSEN, J. Die Bautechnik 49 (1972), H. 3, S. 83 - 85
- ASKEGAARD, V. Instrumentation of reinforced concrete silos.  
 NIELSEN, J. Bulk solids handling. Vol. 6, Nr. 5, Oct. 1986.
- BLUME, F. Zur Wirklichkeitsnähe der Lastannahmen in Silovorschriften für Zellen aus Stahlbeton und Spannbeton.  
 Dissertation 1984, TU Braunschweig
- BRONSTEIN, I.N. Taschenbuch der Mathematik.  
 SEMENDJAJEW, K.A. 11.Auflage, B.G.Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1972
- COLIJN, H. Non-symmetrical bin flow problems.  
 PESCHL, I. Bulk solids handling, Vol. 1, Nr. 3, 1981
- DUDDECK, H. Kreiszyklrische Behälter.  
 NIEMANN, H. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin - München - Düsseldorf, 1976
- EIBL, J. Zur Frage des Silodrucks.  
 LANDAHL, Beton- und Stahlbetonbau 77 (1982), Heft 4,  
 HÄUSSLER, S. 104 - 110  
 GLADEN, W.
- EVERTS, R. Bunker Design - Part 4: Recommendations.  
 v.ZANTEN, D.C. Transactions of the ASME, Nov. 1977  
 RICHARDS, P.C.
- FORDHAM, A. The direct measurement of lateral pressures on walls and bins.  
 Engng. 143 (1937) Nr. 5 Seite 561 - 562
- FRANZ, G. Die Seitendrücke in Getreidesilos.  
 Vortrag Deutscher Betontag 1967
- FRESE, B. Druckverhältnisse in zylindrischen Silozellen.  
 Dissertation 1977, TU Karlsruhe

- GAYLORD, E.H.  
GAYLORD, C.N. Design of steel bins for storage of bulk solids.  
Prentice-Hall, Inc. USA, 1984
- GHOSH, S.  
WILSON, E. ASHSD2 - Dynamic stress analysis of axisymmetric  
structures under arbitrary loading.  
University of California, Berkley, 1975
- GLADEN, W. Numerische Untersuchungen der Lasten in Silo-  
zellen beim exzentrischen Entleeren.  
Dissertation 1985, Universität Karlsruhe (TH)
- GUINTA, J.S. Flow-patterns of granular materials in flat-bot-  
tom bins.  
Transactions of the ASME, May 1968, S. 406 - 413
- HAMPE, E. Erfassung des Entleerungsdruckes in internatio-  
nalen Silovorschriften.  
Bautechnik (63), 1986, Seite 117 - 125
- HAMPE, E.  
BURZEL, W. Tragverhalten von zylindrischen Schalentragwerken  
unter nichtrotationssymmetrischen Einwirkungen.  
Bauakademie der Deutschen Demokratischen Republik,  
Berlin 1988
- HAMPE, E.  
KAMINSKI, M. Der Einfluß exzentrischer Entleerung auf die  
Druckverhältnisse in Silozellen.  
Bautechnik (61), 1984, S. 73 - 82, S. 136 - 142
- HARTLEN, J.  
et al. The wall pressure in large grain silos.  
Inventory, pressure measurements, material in-  
vestigations.  
Swedish council for building research, Stock-  
holm 1981
- HÄUSSLER, U. Geschwindigkeits- und Spannungsfelder beim Ent-  
leeren von Silozellen.  
Dissertation 1984, Universität Karlsruhe (TH)
- HENNIG, E. Experimentelle und analytische Untersuchung der  
Spannungsverteilung in örtlich belasteten dünn-  
wandigen zylindrischen Schalen.  
Fortschrittsberichte der VDI-Zeitschriften,  
Reihe 1, Nr. 33, 1971
- HOPPE, H. Experimentelle Darstellung der Spannungsvertei-  
lung in Bunkern und Silos in Abhängigkeit vom  
Fließbild der Anlage.  
Dissertation 1979, TU Clausthal



- JAMIESON, J.A. Grain pressure in deep bins.  
Engng. News 51 (1904) Nr. 10 S. 236 - 243
- JANSSEN, H.A. Versuche über Getreidedruck in Silozellen.  
Z. VDI 39 (1895) Nr. 39 S.1045 - 1049
- JENIKE, A. Denting of circular bins with eccentric draw-  
points.  
Journal of the structural division, ASCE Proc.,  
Vol. 93, Febr. 1967, Seite 27 - 35
- JOHANSON, J.R. Modeling flow of bulk solids.  
Powder technology 5, (1971/1972) S.93-99
- KAMINSKI, M. Vorschläge zur Bestimmung der vom Schüttgut aus-  
geübten horizontalen Druckkräfte beim unsymme-  
trischen Entleeren der Silos.  
Die Mühle + Mischfuttertechnik 1980, Heft 51/52,  
Seite 707 - 717
- KORDINA, K.  
FRÖNING, H. Silozellen bei nicht-rotationssymmetrischen  
Silolasten unter Einbeziehung des Zusammenwir-  
kens zwischen Füllgut und Silomantel einschließ-  
lich des verformten Zustandes.  
Forschungsvorhaben (1981), durchgeführt am Lehr-  
stuhl für Massivbau der Technischen Universität  
Braunschweig
- KORDINA, K.  
FRÖNING, H. Silodruckmessung mit einer neu entwickelten Meß-  
sonde.  
Bautechnik (1980), Heft 7, Seite 222 - 225
- KREYSZIG, E. Statistische Methoden und ihre Anwendungen.  
7. Auflage, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen  
1988
- LANDAHL, H. Berechnung der Druckverhältnisse in zylindrischen  
Silozellen mit nichtlinearem Stoffgesetz für den  
Füllzustand und beim Entleerungsbeginn.  
Dissertation Universität Dortmund (1982)
- LUCHNER, H. Silos aus Stahlbeton und Spannbeton.  
in: Silo-Handbuch, Verlag Ernst & Sohn, Berlin  
1988
- LUFFT, E. Druckverhältnisse in Silozellen.  
2. Auflage, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn,  
Berlin 1920

- MARTENS, P. Silolasten aus staubförmigen Schüttgütern und aus Luftzufuhr.  
Dissertation 1969, TU Braunschweig
- NILSSON, L. The effect of imperfections on the pressure in grain silos.  
Bulk solids handling. Vol. 6, Nr. 5, Oct. 1986
- NOTHDURFT, H. Schüttgutlasten in Silozellen mit Querschnittsverengungen.  
Dissertation, TU Braunschweig 1976
- PATERSON, W.S. Measurement of pressures in hoppers and silos.  
Conference: "Design of silos for strength and flow"  
2. - 4. Sept. 1980, Lancaster, England
- PETERSEN, CH. Stahlbau.  
Verlag Fr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1988
- PETROW, B.A. Experimentelle Bestimmung des auf die Wände von Eisenbetonbehältern ausgeübten Zementdruckes.  
Tsement 24 (1958), S. 21 - 25
- PIEPER, K.  
MITTELMANN, G.  
WENZEL, F. Messungen des Getreidedruckes in einer 65 m hohen Silozelle.  
Beton und Stahlbetonbau 59 (1964), Heft 11,  
S. 241 - 246
- RAVENET, J. Überdrücke in Silos mit ausmittig angeordneten Entleerungsöffnungen.  
ACIER-Stahl-Steel, Heft 3 (1976), Seite 109-116
- ROBERTS, A.W.  
OOMS, M. Wall loads in large steel and concrete bins and silos due to eccentric draw-down and other factors.  
2nd Internat. Conference on the design of silos for strength and flow.  
Nov. 1983, Stratford-upon-Avon, England
- ROTTER, J.M. The analysis of steel bis subject to eccentric discharge.  
2nd. Internat. Conference on bulk materials storage, handling and transportation.  
1986, Wollongong (Australien)
- SAFARIAN, S.S.  
HARRIS, E.C. Design and construction of silos and bunkers.  
Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, 1985

- SCHNEIDER, H.G.      Rechenwerte für Schüttgüter.  
Abschlußbericht über das Forschungsvorhaben  
"Ermittlung von Rechenwerten für 12 Schüttgüter  
im Braunschweiger Modellsilo".  
TU Braunschweig, Lehrstuhl für Hochbaustatik,  
1985
- SCHNEIDER, H.G.      Experimentelle Untersuchungen der Schüttgut-  
drücke bei Kern- und Massenfluß.  
Dissertation 1987, TU Braunschweig
- SPAETHE, G.          Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen.  
VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1987
- STAMOU, K.          Lasten in niedrigen Silos.  
Dissertation 1983, TH Braunschweig
- STRACKE, M.  
SCHMIDT, H.          Beulversuche an längsgeschweißten stählernen  
Kreiszylinderschalen unter Außendruck im ela-  
stisch-plastischen Bereich.  
Forschungsbericht 28 aus dem Fachbereich Bau-  
wesen, Universität-Gesamthochschule-Essen, 1984
- THEIMER, O.          Bersten von Stahlsilos bei tiefen Temperaturen.  
Der Bauingenieur, 42 (1967), Seite 102 - 105
- WENZEL, F.  
FRESE, B.  
SCHMIDT, K.H.        Ermittlung von Druckzustandslinien in zylindri-  
schen Silozellen und Entwicklung entsprechender  
Berechnungsregeln für den entwerfenden Inge-  
nieur und die Bauaufsicht.  
Aus Forschung und Lehre, Heft 15, Institut für  
Tragkonstruktionen, Universität Karlsruhe (TH),  
1984
- WIGRAM, S.          An inventory of swedish grain silos.  
2nd Internat. Conference on the design of silos  
for strength and flow.  
Nov. 1983, Stratford-upon-Avon, England
- WOOD, J.G.M.        The analysis of silo structures subject to ec-  
centric discharge.  
2nd Internat. Conference on the design of si-  
los for strength and flow.  
Nov. 1983, Stratford-upon-Avon, England
- WOLF, K.            Der Anfangsschlag und andere Belastungsgrößen  
im Silo.  
Dissertation TU Braunschweig, 1984

- WOLF, K.                   Messungen an einem Zementsilo in Lägerdorf.  
Technische Universität Braunschweig, Lehrstuhl  
für Hochbaustatik, Braunschweig 1984
- WRIGHT, H.                Successful failure ? A reassessment of the  
cause of stress cracking of the wall of a 3.000  
t capacity reinforced concrete coal bunker in  
1961.  
1st. Internat. Conference on the design of si-  
los for strength and flow.  
2.-4. Sept. 1980, Lancaster, England
- YOUNG W.C.                ROARK'S Formulas for stress & strain  
6.th edition, Mc Graw-Hill book company, 1989
- v.ZANTEN, D.C.  
MOOIJ, A.                 Bunker Design - Part 2: Wall pressures in mass  
flow.  
Transactions of the ASME, Nov. 1977