

Das Beulverhalten dünnwandiger  
Güllebehälter aus Stahl mit Wanddicken-  
verhältnissen  $r/t$  größer 2500 unter  
rotationssymmetrischem Außendruck

**T 2238**

T 2238

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)

A B S C H L U S S B E R I C H T

zum Forschungsvorhaben

Das Beulverhalten dünnwandiger GÜllebehälter  
aus Stahl mit Wanddickenverhältnissen  $r/t > 2500$   
unter rotationssymmetrischem Außendruck

Kurztitel: Beuluntersuchungen an GÜllebehältern

von

Dr.-Ing. Peter Martens

Dr.-Ing. Karl Wolf

Gesch.-Z.: IV/1-5-500/88

Das Forschungsvorhaben, das mit diesem Abschlußbericht beschrieben wird, wurde vom Institut für Bautechnik/Berlin finanziert. Die Durchführung des Forschungsvorhabens, das vor allem durch die Belastungsversuche an den Behältern geprägt ist, wäre jedoch nicht denkbar ohne die Mithilfe der Firmen

Farmatic Silotechnik GmbH, Nortorf und

Erich Stallkamp ESTA GmbH, Dinklage

Beide Firmen lieferten und montierten unentgeltlich die Versuchsbehälter. Die Firma Farmatic stellte darüberhinaus ihr Firmengelände für die Versuche zur Verfügung und lieferte die gesamte Versuchsausrüstung.

Dem Institut für Bautechnik und den beiden genannten Firmen sei an dieser Stelle gedankt.

Dr.-Ing. P. Martens

Dr.-Ing. K. Wolf



---

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
1.0 Einleitung	5
2.0 Konstruktionsbeschreibung der Güllebehälter	6
3.0 Stabilitätsuntersuchungen	9
3.1 Beulsicherheitsnachweis des Behältermantels	9
3.2 Ausbildung des oberen Randprofils	14
4.0 Windlastansätze	17
4.1 Windlasten in Abhängigkeit von der Höhe über dem Gelände	17
4.2 Windlasten um den Umfang	18
5.0 Rechnerische Parameterstudien	21
5.1 Behältergeometrie und Konstruktion	21
5.2 Lastansatz aus dem Wind	22
5.3 Ergebnisse der elektronischen Berechnung	22
5.3.1 Radialverschiebungen $w$ der Behälterwand	23
5.3.2 Längskräfte $n_x$	23
5.3.3 Ringkräfte $n_p$	24
5.3.4 Membrankräfte $n_x$ und $n_p$ bei Windbeanspruchung	24
6.0 Untersuchungen am emaillierten Behälter	26
6.1 Aufbau und Konstruktion des Behälters	28
6.2 Versuchsdurchführung	33
6.3 Versuchsergebnisse	34
6.3.1 Maßhaltigkeit des erstellten Behälters	34
6.3.2 Belastungsversuche	35
6.3.2.1 Belastungsversuch am Behälter ohne Ringversteifung	36
6.3.2.2 Belastungsversuch am Behälter mit 1 Ringversteifung	39

---

	Seite	
7.0	Untersuchungen am Behälter aus V2A-Stahl	43
7.1	Aufbau und Konstruktion des Behälters	43
7.2	Versuchsdurchführung	47
7.3	Versuchsergebnisse	47
7.3.1	Maßhaltigkeit des erstellten Behälters	47
7.3.1.1	Maßhaltigkeit des Behälters mit 1 Ring- versteifung	47
7.3.1.2	Maßhaltigkeit des Behälters mit 3 Ring- versteifungen	47
7.3.2	Belastungsversuche	48
7.3.2.1	Belastungsversuch am Behälter mit 1 Ring- versteifung	52
7.3.2.2	Belastungsversuch am Behälter mit 3 Ring- versteifungen	53
8.0	Praxisbezogene Konstruktionshinweise	59
8.1	Konstruktionshinweise für die Rand- und Ringprofile	59
8.2	Konstruktionshinweise für die Behälterwand	63
8.3	Beispiel	63
9.0	Ausblick	64
	Literaturverzeichnis	65
	Verzeichnis des Anhanges	

## 1.0 Einleitung

Die zur Zeit handelsüblichen oben offenen Güllebehälter aus Stahl werden in Durchmessern von 6,00 bis 35,00 m angeboten. Die Zylinderhöhen betragen bei kleinen Silodurchmessern bis zu 7,00 m und sind bei großen Durchmessern niedriger. Für die Wandtafeln werden Bleche zwischen 1,25 bis ca. 6,30 mm Dicke verwendet. Als obere Randaussteifung werden L-, [- oder T-förmige Walzprofile oder entsprechende kaltgeformte Profile angeordnet.

Bei der Berechnung derartiger Behälter sind zwei Lastfälle zu untersuchen:

- gefüllter Behälter
- Wind auf den leeren Behälter.

Der statische Nachweis für den Lastfall "gefüllter Behälter" kann ohne Schwierigkeiten unter Anwendung der anerkannten Regeln der Festigkeitslehre erbracht werden und führt durchaus zu wirtschaftlichen Abmessungen. Der Stabilitätsnachweis für den Lastfall "Wind auf den leeren Behälter" gestaltet sich hingegen wesentlich schwieriger. Hierfür liegen keine zufriedenstellenden Last- und Rechenansätze vor. Bei konsequenter Auslegung der bestehenden Vorschriften und Richtlinien, z.B. DAST-Ri 013 oder DIN E 18 800 T4, liegen die oben beschriebenen Behälter außerhalb derer Geltungsbereiche. Der behelfsweise Ansatz der dort aufgestellten Rechenregeln läßt jedoch schnell erkennen, daß der Lastfall "Wind auf den leeren Behälter" für die Dimensionierung der Wandbleche und des oberen Randprofiles maßgebend wird und daß sich hieraus wesentlich dickere Abmessungen ergeben, als für den Lastfall "gefüllter Behälter".

Daß aber wirtschaftliche Konstruktionen möglich sind, wurde durch langjährige positive Erfahrung an solchen Güllebehältern bewiesen, die mit einer bauaufsichtlichen Zulassung gebaut wurden.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Kenntnisse über das Stabilitätsversagen bei Güllebehältern aus Stahl zu vertiefen und einen Beitrag zur besseren Abschätzung der Beulsicherheit zu liefern. Zu diesem Zweck wurde an Modellen natürlicher Größe ein Unterdruck aufgebracht und das Beulverhalten studiert.

Es wurde eine Literaturlauswertung hinsichtlich der anzusetzenden Windlasten durchgeführt. Weiterhin werden Konstruktionsregeln für die Ausbildung des oberen Randprofils und der Ringversteifungen angegeben.

## 2.0 Die Konstruktionsbeschreibung der Güllebehälter

In Anlage 2 sind die Abmessungen und Konstruktionselemente der Güllebehälter von 8 verschiedenen Herstellern angegeben. Eine Zusammenfassung der Angaben erfolgt in Tabelle 2.1. Die Behälterwände der Fabrikate APA, ESTA, Farmatic, Harvestore und J.O.Z bestehen aus glatten, gekrümmten, ca. 1,30 m hohen und 2,90 m langen Blechtafeln (vgl. Anlage 2.1, 2.3 bis 2.6). Die Ausbildung der vertikalen und horizontalen Stöße erfolgt durch Überlappung und Verschraubung der Blechtafeln miteinander. Die Behälterwände der Firmen Duräumat und NEUERO bestehen aus in Ringrichtung gewellten Blechtafeln (vgl. Anlage 2.2 und 2.8). Bei dem System LIPP werden die Behälterwände aus Blechstreifen gewickelt und durch einen Doppelfalz miteinander verbunden (vgl. Anlage 2.7).

Mit Ausnahme der von der Fa. Duräumat hergestellten Güllebehälter erhalten die Behälter aller anderen Fabrikate als Randversteifung ein Stahlprofil. Die Behälter der Fa. ESTA erhalten zwischen dem 3. und 4. Schuß von unten eine zusätzliche umlaufende Ringversteifung. Bei den höheren Behältern der Fa. Harvestore wird eine zusätzliche Ringversteifung zwischen dem 4. und 5. Schuß von unten angeordnet.

Lfd. Nr.	Hersteller	Durchmesser		Höhe	Blechdicke		oberes Randprofil		Materialangaben		
		min (m)	max (m)		max (m)	min (mm)	max (mm)	min	max	Stahl	Blechform
1	APA	8,56	25,69	5,77	2,80	5,00	L 60·6		St 37	glatt	emailliert
2	Duräumat	8,00	20,00	4,00	2,75	5,00	-		St 37	gewellt	kunststoffbeschichtet
3	ESTA	7,76	22,50	4,91	1,25	2,50	[80·50·1,5		V 2 A	glatt	legiert
4	farmatic	9,16	25,96	7,12	1,80	6,30	L 60·6	2 L 60·6	St 37	glatt	emailliert
5	Harvestore	6,00	35,00	7,00	1,80	4,20	L 50·5		St 37	glatt	emailliert
6	J.O.Z.	8,56	25,67	5,77	2,80	50,00	L 60·6	L 70·7	St 37	glatt	emailliert
7	LIPP	8,00	22,00	6,50	1,50	4,00	T 60	T 80	St 37	gefalzt	Edelstahlauflage
8	NEUERO	9,83	26,82	6,60	1,50	4,00	L 80·65·6		St 37	gewellt	kunststoffbeschichtet

Tabelle 2.1  
Abmessungen und konstruktive Angaben der Güllebehälter

Der Fußpunkt besteht im allgemeinen aus einem umlaufenden, mit der Bodenplatte verdübelten Randprofil, mit dem die Wandplatten verschraubt werden. Die Abdichtung in der Schnittfuge Bodenplatte - Behälterwand wird über eine Betonabschrägung bzw. mit einer Abdichtmasse auf Kunststoffbasis vorgenommen.

Der Korrosionsschutz der Wandbleche erfolgt durch Emaillierung, Kunststoffbeschichtung, Edelstahlauflege (Plat-Inox) oder durch Verwendung eines nichtrostenden V2A-Stahles (Werkstoff-Nr. 1.4301). Die Schrauben, sowie das obere und untere Randprofil, erhalten einen Zinküberzug.

Die Zusammenstellung der Behälter in Anlage 1 erfolgt für jedes Fabrikat in 3 Gruppen und zwar für die Nenn-Durchmesser  $d \sim 10$  m,  $d \sim 18$  m und  $d \sim 24$  m. Durch die Gruppeneinteilung ist es möglich, die Behälter miteinander zu vergleichen und mögliche Gesetzmäßigkeiten abzuleiten, bzw. Parameterstudien durchzuführen. Als Nenn-Behälterhöhe werden  $h \sim 5,0$  m gewählt. Allerdings wird diese Höhe nicht von allen Fabrikaten erreicht. Insbesondere bei dem großen Durchmesser  $d = 24$  m tritt eine Höhenbegrenzung durch das Erreichen der Tragfähigkeit der Verschraubung oder der Wandbleche auf. Neben den Abmessungen sind die Dicken der Wandbleche und die vorhandenen Rand-, Fuß- und Zwischenprofile angegeben. Für die gewellten Wandbleche der Firmen Duräumat und NEUERO werden über das Trägheitsmoment ideale Dicken  $t_{i,I}$  und die tatsächlich zur Verfügung stehende Blechdicke  $t_{i,A}$  ermittelt. Desgleichen auch für die mit einem Falz versehenen Behälter des Fabrikates Lipp.

### 3.0 Stabilitätsuntersuchungen

#### 3.1 Beulsicherheitsnachweis des Behältermantels

Im Nachfolgenden wird an den unter Abschnitt 2.1 beschriebenen Behältern der Beulsicherheitsnachweis nach E DIN 18800 Teil 4 "Schalenbeulen" [3] durchgeführt. Am Beispiel eines der Behälter, an denen ein Großversuch durchgeführt wurde, sollen die Schwierigkeiten des Beulsicherheits-Nachweises verdeutlicht werden.

Der Behälter der Firma Farmatic besitzt die Abmessungen  $d/h = 18,32/4,80$  m. Die Höhe ergibt sich aus 4 Wandschüssen, deren Dicken von unten nach oben  $t_1 = 4,3$  mm,  $t_2 = t_3 = 3,5$  mm und  $t_4 = 2,23$  mm betragen. Die Wandbleche sind überlappt gestoßen und in den vertikalen und horizontalen Stößen miteinander verschraubt. Der obere Rand ist mit einem Winkelprofil L 60 x 6 ausgesteift. Der Fußpunkt wird ebenfalls durch ein mit der Fundamentplatte verdübeltes Winkelprofil L 60 x 6 gebildet, an das die Wandplatten angeschraubt werden.

In folgenden Punkten wird der Anwendungsbereich der Norm E DIN 18800 Teil 4 überschritten:

1. Nach Element 418 gelten die Formeln für die realen Beulspannungen nur für Kreiszyinderschalen mit einem Wanddickenverhältnis  $r/t \leq 2500$ . Im vorliegenden Fall überschreitet der Verhältniswert  $r/t = 9160/2,23 = 4180$  den zulässigen Wert um ca. 60 %.
2. Im Element 503 wird darauf hingewiesen, daß Kreiszyinderschalen mit abgestufter Wanddicke und mit freiem Rand in dieser Norm nicht geregelt sind. Die Regeln gelten nur für radial unverschiebliche Ränder. Das heißt, daß im vorliegenden Fall der obere Rand so ausgebildet werden muß, daß er radial unverschieblich ist.

3. Element 514 erlaubt die überlappende Stoßausbildung, begrenzt aber das Dickenverhältnis der sich überlappenden Bleche auf  $\min t/\max t \geq 0,8$  bzw. begrenzt den planmäßigen Versatz auf  $e_v \leq 1,1 \min t$ . Zwischen  $t_3$  und  $t_4$  wird das Verhältnis  $\min t/\max t = 2,3/3,5 = 0,66 < 0,8$  unterschritten bzw.  $e_v = 1,1 \cdot 2,3 = 2,53 \text{ mm} < (2,3 + 3,5)/2 = 2,90 \text{ mm}$  überschritten.
4. Die überlappende Stoßausbildung wird zwar in Element 514 aufgeführt, über die Verbindungsmittel wird jedoch keine Aussage getroffen. Inwieweit überlappende Schraubstöße zulässig sind, läßt sich nur dadurch rechtfertigen, daß diese Stoßausbildung üblich ist und positive Erfahrungen vorliegen.

Der Beulsicherheitsnachweis wird entsprechend DIN 18800 Teil 4 für einen dreischüssigen Ersatzzylinder geführt (vgl. Anlage 3.1, Seite 1 bis Seite 8).

Der Behälter weist folgende Abmessungen auf:

Radius	$r$	=	9.160 mm
Zylinderlänge	$l$	=	4.750 mm
obere Schußlänge	$l_o$	=	1.188 mm
mittlere Schußlänge	$l_m$	=	1.188 mm
untere Schußlänge	$l_n$	=	2.375 mm
obere Schußdicke	$t_o$	=	2,23 mm
mittlere Schußdicke	$t_m$	=	3,5 mm
untere Schußdicke	$t_n$	=	3,9 mm

Mit diesen Abmessungen errechnet sich ein rotationssymmetrischer Ersatz-Windlastanteil  $\delta^* = 1,22$ . Bei oben offenen



Behältern ist zusätzlich zur Ersatz-Windbelastung ein konstanter rotationssymmetrischer Manteldruck von  $0,6 \max q_w$  zur Berücksichtigung des Windsogs im Zylinderinnern anzusetzen. Somit beträgt die Belastung auf den Ersatz-Schuß  $w = (1,22 + 0,6) \cdot \max q_w$ . Bei einem Staudruck von  $q = 0,5 \text{ kN/m}^2$  ist eine rotationssymmetrische Radiallast  $w = 0,91 \text{ kN/m}^2$  anzusetzen, die mit dem Teilsicherheitsbeiwert und Kombinationswert um das 1,35-fache zu vergrößern ist, so daß die Membranspannungen aus der Windlast  $w = 1,23 \text{ kN/m}^2$  zu ermitteln sind. Im vorliegenden Fall errechnet sich bei einer Wanddicke  $t_1 = 2,23 \text{ mm}$  im obersten Schuß eine Membranspannung  $\sigma_\varnothing = 5,05 \text{ N/mm}^2$ . Die dazugehörige Beulspannung beträgt  $\text{grenz } \sigma_{\varnothing s} = 2,61 \text{ N/mm}^2$ . Die Beulsicherheit  $\gamma = \sigma_{\varnothing s} / \sigma_\varnothing = 0,52 < 1$  ist nicht ausreichend.

Bei folgender Vergrößerung der Wanddicken wird eine ausreichende Beulsicherheit erreicht:  $t_1 = 5,6 \text{ mm}$ ,  $t_2 = t_3 = 4,3 \text{ mm}$  und  $t_4 = 3,5 \text{ mm}$ . Gegenüber dem zuerst nachgewiesenen Behälter wird bei Einhaltung der E DIN 18800 Teil 4 [3] ein Mehraufwand beim Wandmaterial von ca. 30 % erforderlich.

In Anlage 3.1 wird der Beulsicherheitsnachweis für alle in Abschnitt 2.1 beschriebenen GÜllebehälter nach E DIN 18800 Teil 4 [3] führt. Das Ergebnis der Berechnung ist in Tabelle 3.1 zusammengefaßt. Bis auf die Fabrikate Duräumat, NEUERO und Lipp führt der Nachweis zu unzureichenden Beulsicherheiten. Eine Abschätzung nach DAST-Richtlinie 013 führt zu dem gleichen Ergebnis. Die elektronische Berechnung hierfür ist in Anlage 2 durchgeführt und das Ergebnis in Tabelle 3.2 zusammengefaßt.

Lfd. Nr.	Gruppe 1 d = 10 m h = 5 m				Gruppe 2 d = 18 m h = 5 m				Gruppe 3 d = 24 m h = 5 m			
	Durchmesser d (m)	Höhe h (m)	Dicke t <sub>i</sub> (mm)	Beulsicherheit s <sub>B</sub> (-)	Durchmesser d (m)	Höhe h (m)	Dicke t <sub>i</sub> (mm)	Beulsicherheit s <sub>B</sub> (-)	Durchmesser d (m)	Höhe h (m)	Dicke t <sub>i</sub> (mm)	Beulsicherheit s <sub>B</sub> (-)
1	10,27	5,77	2,80	0,91	18,84	4,34	2,80	0,55	23,98	2,91	2,80	0,57
2	10,00	4,00	2,75	39,01	18,00	4,00	2,75	15,26	24,00	4,00	2,75	12,57
3	10,86	4,91	1,25	0,10	18,62	4,91	1,25	0,06	22,50	4,91	1,25	0,05
4	10,69	4,75	1,80	0,48	18,32	4,75	2,23	0,52	24,42	4,75	2,83	0,46
5	10,20	5,60	1,80	0,29	18,80	5,60	1,80	0,14	25,60	5,60	1,80	0,13
6	10,27	5,27	2,80	0,77	18,82	5,77	2,80	0,47	23,96	4,34	2,80	0,41
7	10,00	4,80	1,50	2,54	18,00	5,33	1,50	1,45	22,00	5,09	1,50	1,23
8	9,83	5,28	1,50	1,93	19,66	5,28	2,00	1,15	23,24	3,96	2,00	1,18

Tabelle 3.1  
Abschätzung der Beulsicherheiten nach E DIN 18800 Teil 4 [3]

Lfd. Nr.	Gruppe 1 d = 10 m h = 5 m				Gruppe 2 d = 18 m h = 5 m				Gruppe 3 d = 24 m h = 5 m			
	Durch- messer d (m)	Höhe h (m)	Dicke t <sub>i</sub> (mm)	Beulsi- cherheit ∩ <sub>B</sub> (-)	Durch- messer d (m)	Höhe h (m)	Dicke t <sub>i</sub> (mm)	Beulsi- cherheit ∩ <sub>B</sub> (-)	Durch- messer d (m)	Höhe h (m)	Dicke t <sub>i</sub> (mm)	Beulsi- cherheit ∩ <sub>B</sub> (-)
1	10,27	5,77	3,10	1,61	18,84	4,34	3,60	1,08	23,98	2,91	3,40	0,94
2	10,00	4,00	25,04	296,86	18,00	4,00	25,79	124,01	24,00	4,00	27,99	95,17
3	10,86	1,22 3,69	1,25 1,25	0,60 0,21	18,62	1,22 3,69	1,25 1,58	0,27 0,16	22,50	1,22 3,69	1,25 1,92	0,20 0,20
4	10,69	4,75	2,36	0,89	18,32	4,75	3,38	0,89	24,42	4,75	5,08	1,55
5	10,20	5,60	1,95	0,51	18,80	5,60	2,35	0,29	25,60	5,60	2,95	0,31
6	10,27	5,27	2,80	1,24	18,82	5,77	3,65	0,88	23,96	4,34	3,60	0,73
7	10,00	4,80	6,81	14,75	18,00	5,33	9,08	10,56	22,00	5,09	10,06	10,18
8	9,83	5,28	6,01	10,12	19,66	5,28	7,21	5,08	23,24	3,96	7,15	4,77

Tabelle 3.2  
Abschätzung der Beulsicherheiten nach DAST-Richtlinie 013 [17]

Noch ungünstiger gestaltet sich der Nachweis nach AD-Merkblatt B6 - Zylindrische Mäntel unter äußerem Überdruck [19].

Einer generellen Vergrößerung der Blechdicken zur Erlangung einer rechnerisch ausreichenden Beulsicherheit widersprechen allerdings positive Erfahrungen mit bauaufsichtlich zugelassenen oder typengeprüften Behältern, die zum Teil weitaus dünnere Wandbleche aufweisen. Es kann davon ausgegangen werden, daß das hier angewendete Nachweisverfahren, das sich auf die vorstehenden Regelwerke stützt, als zu konservativ anzusehen ist.

### 3.2 Ausbildung des oberen Randprofils

In den Annahmen unter Abschnitt 2.3 wird der obere Rand des Behälters radial unverschieblich, axial verschieblich (wölbfrei) und gelenkig gelagert angenommen. Von dieser Annahme kann ausgegangen werden, wenn das obere Randprofil die entsprechende Biegesteifigkeit aufweist. In Tabelle 3.3 sind die Profile angegeben, mit denen der obere Rand der in Anlage 2 aufgeführten Behälter in der Praxis ausgesteift wird. Bis auf die Behälter der Firma Duräumat erhalten alle anderen Fabrikate ein oberes Randprofil und die höheren Behälter der Firmen Esta und Harvestore ein zusätzliches Zwischenprofil.

Das gesamte Trägheitsmoment an den Randprofilen und den Zwischenprofilen weist folgende Werte auf:

Gruppe 1 (d = 10 m) ->  $I_{ges} = 12,20 - 87,20 \text{ cm}^4$

Gruppe 2 (d = 18 m) ->  $I_{ges} = 14,00 - 87,20 \text{ cm}^4$

Gruppe 3 (d = 24 m) ->  $I_{ges} = 14,00 - 87,20 \text{ cm}^4$

lfd. Nr.	Gruppe 1 d = 10 m				Gruppe 2 d = 18 m				Gruppe 3 d = 24 m			
	Durch- messer d (m) h (m)	Randprofil (-)	Zwischen- profil (-)	Träg- heitsmo- ment I <sub>ges</sub> (cm <sup>4</sup> )	Durch- messer d (m) h (m)	Randprofil (-)	Zwischen- profil (-)	Träg- heitsmo- ment I <sub>ges</sub> (cm <sup>4</sup> )	Durch- messer d (m) h (m)	Randprofil (-)	Zwischen- profil (-)	Träg- heitsmo- ment I <sub>ges</sub> (cm <sup>4</sup> )
1	10,27 5,77	L 60·6		22,8	18,84 4,34	L 60·6		22,80	23,98 2,91	L 60·6		22,80
2				kein Randprofil vorhanden								
3	10,86 4,91	[80·50·1,5	[80·50·1,5	14,00	18,62 4,91	[80·50·1,5	80·50·1,5	14,00	22,50 4,91	[80·50·1,5	[80·50·1,5	14,00
4	10,69 7,12	L 60·6	L 50 · 5	33,80	18,32 7,12	L 60 · 6	L 50 · 5	33,80	24,42 5,94	2 L 60·6	L 50 · 5	56,60
5	10,20 7,00	L75·50·6,5	L75·50·6,5	87,20	18,80 7,00	L75·50·6,5	L75·50·6,5	87,20	25,60 5,60	L75·50·6,5	L75·50·6,5	87,20
6	10,27 5,77	L 60·6		22,80	18,82 5,77	L 70·7		42,40	23,96 4,34	L 70·7		42,40
7	10,00 4,80	T 60		12,20	18,00 7,11	T 80		37,00	22,00 5,82	T 80		37,00
8	9,83 6,60	L 80·65·6		40,10	19,66 5,28	L 80·65·6		40,10	23,24 3,96	L 80·65·6		40,10

Tabelle 3.3  
Ausbildung des oberen Randprofils und der Zwischenprofile

Im Vergleich zur klassischen Knickformel für einen Kreisringträger  $EI = q \cdot r^3/3$  und bei Berücksichtigung eines Sicherheitsbeiwertes von z.B.  $\kappa_i = 2,5$  müßte das Trägheitsmoment der Randprofile bei den größeren Behältern etwa um das 20fache vergrößert werden. Auch ein nach DIN 4119, Fassung 1964, nach der Formel  $W_{erf} = d^2 \cdot 1/17,3$  errechnetes Randprofil erfordert weitaus größere Querschnitte.

Es läßt sich zwar nach Herber [18] ein Stabilitätsnachweis des Kreisringes führen, allerdings geht dieses Berechnungsverfahren davon aus, daß das Randprofil durchgehend mit der Behälterwand verschweißt und nicht wie im vorliegenden Fall, punktuell mit der Wand verschraubt ist.

Die EKS [12] geben für Ringaussteifungen Rechenansätze für eine rotationssymmetrische Druckbelastung an, jedoch wird insbesondere darauf hingewiesen, daß eine Anwendung bei Windbelastung nicht möglich ist.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Berechnung von Kreisringträgern deuten die Erfahrungen der Praxis darauf hin, daß die angeordneten kleinen Randprofile als ausreichend anzusehen sind. Sie sind in der Lage, den Behälterrand gegen Windbeanspruchung und kleinere horizontale Lasten, wie z.B. die Stützkraft aus einer Leiter, auszusteißen. Zum gleichen Ergebnis führen Untersuchungen an Modellen im kleinen Maßstab. Die hierbei gewonnenen Ergebnisse zeigen ebenfalls, daß der Rand ohne jegliche Aussteifung sehr weich ist, daß aber schon ein relativ schwaches Randglied genügt, um eine ausreichende Biegesteifigkeit zu erlangen.

Es stellt sich somit die Frage nach der Diskrepanz zwischen dem tatsächlichen und dem rechnerischen Tragverhalten. Eine Ursache ist sicherlich in den Windlastansätzen zu suchen.

#### 4.0 Windlastansätze

Die für das Bauwesen maßgebende Norm für die anzusetzenden Windlasten ist DIN 1055 Teil 4 [9], Ausgabe August 1986. In der DIN 1055 Teil 4 wird darauf hingewiesen, daß Windlastfestlegungen für bestimmte Bauwerke in anderen Normen hiervon unberührt bleiben. Dadurch wird die Möglichkeit eröffnet, in einzelnen Fachnormen Sonderregelungen zu treffen.

Im folgenden wird eine Literaturlauswertung vorgenommen. Dabei wird das Augenmerk besonders auf Bauwerke mit niedriger Höhe gerichtet. Es wird überprüft, welche Beziehung zwischen Bauwerkshöhe und Staudruck besteht und welche Druckbeiwerte um den Umfang anzusetzen sind.

#### 4.1 Windlasten in Abhängigkeit von der Höhe über dem Gelände

Nach DIN 1055 Teil 4 wirkt auf eine Flächeneinheit der Bauwerks oberfläche ein Winddruck  $w$

$$w = c_p \cdot q \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$q$  (kN/m<sup>2</sup>) Staudruck

$c_p$  ( - ) Druckbeiwert

Der Staudruck  $q$  wird aus der Windgeschwindigkeit abgeleitet und ist von 0 bis 8 m über Geländeoberkante gleichmäßig mit 0,5 kN/m<sup>2</sup> anzusetzen. Dieser Ansatz ist für Bauten mit geringer Bauhöhe, bei denen die Windlast ein für die Bemessung maßgebender Lastfall wird, äußerst unbefriedigend, da die Windgeschwindigkeit nach unten hin abnimmt und in Höhe der Geländeoberfläche annähernd zu Null wird. Diesem Umstand trägt DIN 4112 (Fliegende Bauten) [10] dadurch Rechnung, daß bis zu einer Höhe von 5 m mit  $q = 0,3$  kN/m<sup>2</sup> gerechnet werden darf. In DIN 11535 Teil 1 (Gewächshäuser) [11] darf bis zu 4 m Höhe  $q = 0,25$  kN/m<sup>2</sup> und von 4 bis 6 m Höhe  $q = 0,40$  kN/m<sup>2</sup> angenommen werden.

Nach einem Forschungsergebnis der Kalksandsteinindustrie [16] kann der Staudruck  $q_m$  bei Bauwerkshöhen  $h \leq 5$  m nach folgendem Ansatz ermittelt werden:

$$q_m = 0,48 (z/10)^{0,32} \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$z$  (m) Höhe über Geländeoberfläche

Die verschiedenen Ansätze sind in Bild 4.1 aufgetragen.

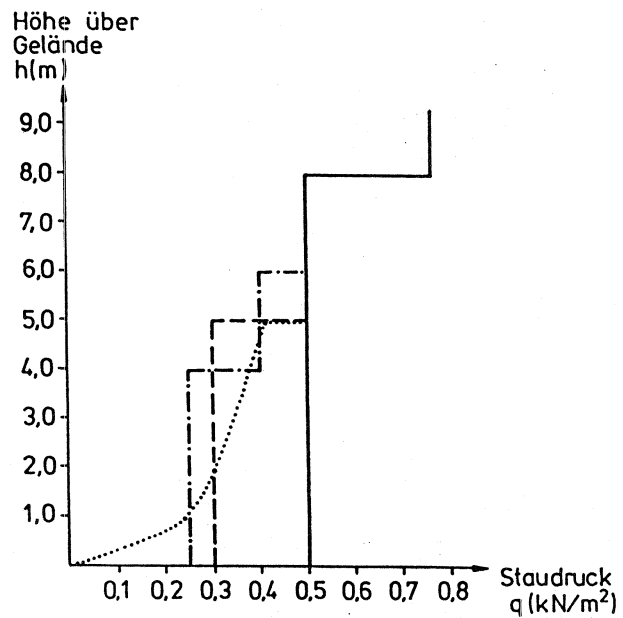
Weitere Untersuchungen bzw. Literaturlauswertungen müssen klären, inwieweit eine Berücksichtigung der geringen Bauhöhe beim Ansatz des Staudruckes möglich ist.

#### 4.2 Windlasten um den Umfang

In Tabelle 15 und Bild 13 der DIN 1055 T4 sind die Druckbeiwerte in Abhängigkeit von der Reynoldszahl angegeben. Für einen Behälterdurchmesser von  $d = 10$  m ergibt sich eine Reynoldszahl von  $Re = 1,9 \cdot 10^7$ . Er wird von der Darstellung in Bild 13 nicht mehr erfaßt, da dort die größte Reynoldszahl mit  $Re = 10^7$  angegeben ist. Die größeren Behälterdurchmesser ergeben noch größere Reynoldszahlen, z.B.  $Re = 4,5 \cdot 10^7$  bei  $d = 24$  m.

In Bild 4.2 sind die Druckbeiwerte  $c_{p0}$  der DIN 1055 T 4 für  $Re = 10^7$  über den abgewickelten Zylinderumfang angegeben. Dem Verlauf der Druckbeiwerte wurden die Versuchsergebnisse von Maher [20] und Gretler [21] gegenübergestellt. Deren systematische Untersuchungen wurden an Kleinmodellen gewonnen und sind unter anderem von Resinger und Greiner [22] veröffentlicht.





- DIN 1055 T4 (Windlast)
- - - DIN 4112 (Fliegende Bauten)
- · - · - DIN 11535 T1 (Gewächshäuser)
- Forschungsbericht der Kalksandsteinindustrie

Bild 4.1  
 Staudruckansätze  $q$  (kN/m<sup>2</sup>)  
 für Bauten mit geringer  
 Bauhöhe

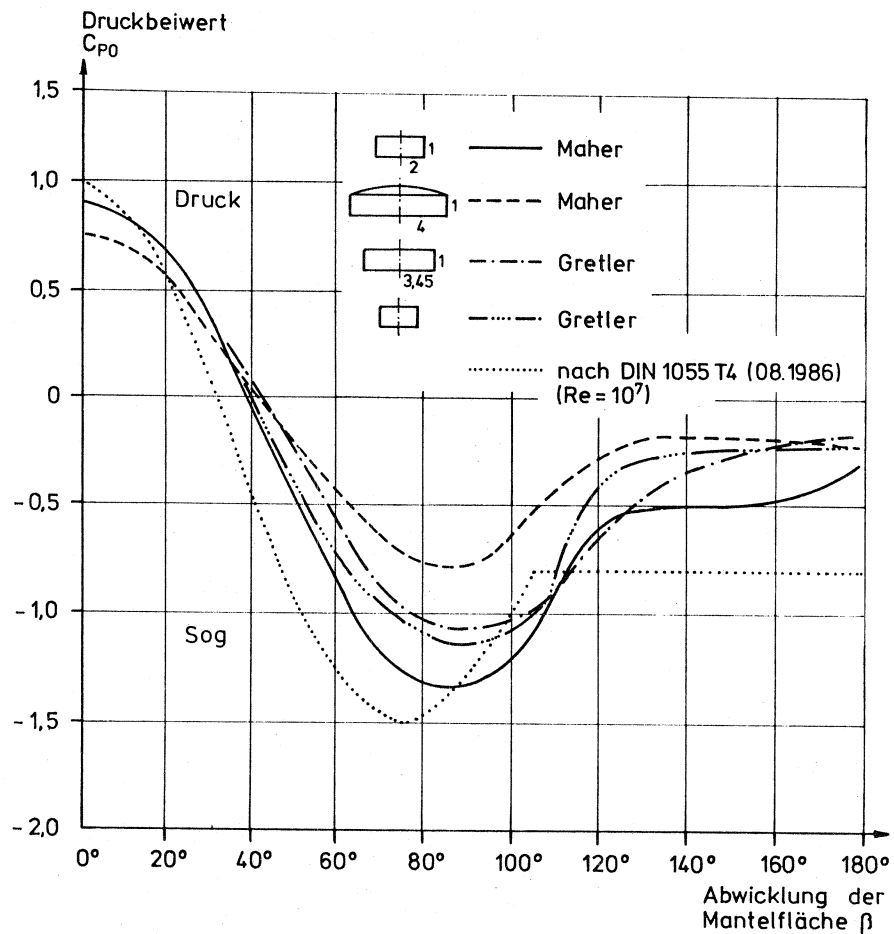


Bild 4.2  
 Verschiedene Ansätze für die Beiwerte  $C_{p0}$   
 über dem abgewickelten Zylinderumfang

Über den in der Anströmzone auftretenden Druckbereich liegen jedoch sehr unterschiedliche Druckbeiwerte vor. Die in Bild 4.2 aufgetragenen Druckbeiwerte schwanken zwischen 0,7 und 1,0. In der Veröffentlichung von Resinger und Greiner [22] wird darauf hingewiesen, daß nirgends der volle Staudruck mit  $c_{p0} = 1,0$  auftritt. Dies wird mit dem Geschwindigkeitsprofil des Windkanals begründet, da sich im Höhenbereich der Modelle geringere Werte ergeben, während beim Behälter im natürlichen Maßstab aber  $c_{p0} = 1,0$  anzusetzen ist.

Die von Ziölko [23] durchgeführten Untersuchungen an Kleinmodellen (Manteldurchmesser  $d = 400$  und  $500$  mm, Zylinderhöhe  $h = 70$  bis  $135$  mm) liefert für den luvseitigen Mantelteil einen Druckkoeffizienten von 1,4 bis 1,5. Der Druckkoeffizient resultiert aus dem Winddruck auf die äußere Mantelseite und dem Windsog auf die innere Mantelseite (vgl. Anlage 4, Seite 1).

Von Eßlinger u.a. [24] wurden an einem oben offenen Modellbehälter mit den Abmessungen  $d/h = 570/420$  mm Windkanalversuche durchgeführt. Hierbei wurden Druckkoeffizienten von 1,48 bis 1,84 gemessen (vgl. Anlage 4, Seite 2). Im ungünstigsten Fall tritt somit eine horizontal nach innen gerichtete Windlast  $w = 1,84 \cdot 0,50 = 0,92$  kN/m<sup>2</sup> auf. Der Rechenansatz nach E DIN 18800 Teil 4 [3] sieht bei einem Güllebehälter mit  $d/h = 10,86/4,91$  m eine Windlast von  $w_{min} = 0,88$  kN/m<sup>2</sup> vor. Bei einer Schlankheit  $d/h = 22,5/4,91$  beträgt die Windlast  $w_{max} = 1,27$  kN/m<sup>2</sup> (vgl. lfd. Nr. 3 in Anlage 2.1, Seite 7). Für den größeren Behälter ist somit eine um 38 % größere Windlast anzusetzen als nach den Versuchsergebnissen von Eßlinger u.a. [24]. Es kann davon ausgegangen werden, daß sowohl in der Größe des Staudruckes und dessen Verteilung um den Umfang als auch im Windsog bei einem Rechenansatz nach geltenden Vorschriften [3], [9], [17] große Sicherheiten enthalten sind.

Weitere Sicherheiten liegen in der Art der zeitlichen Beanspruchung. Die Untersuchungen gehen von einer statischen Beanspruchung aus, wohingegen es sich aber bei der Windlast um eine dynamische Beanspruchung handelt. Leider liegen den Verfassern keine Ergebnisse über Messungen an großen Behältern vor, die den dynamischen Einfluß auf die Umfangsverteilung der Windlast berücksichtigen.

## 5. Rechnerische Parameterstudien

### 5.1 Behältergeometrie und Konstruktion

Um den Einfluß des Durchmessers, der Behälterhöhe und der Behälterkonstruktion auf die Verschiebungen und Schnittgrößen zu ermitteln, wurden Parameterstudien durchgeführt. An nachfolgend aufgeführten Behältern wurden die elektronischen Berechnungen vorgenommen.

Versuchs-Nr.	Durchmesser d (m)	Höhe h (m)	Schüsse (Anzahl)	Randprofil J (cm <sup>4</sup> )
1	10	5	4	42,4
2	18	5	4	42,4
3	24	5	4	42,4
4	18	5	1	42,4
5	18	5	1	-
6	18	10	1	42,4
7	18	10	1	-
8	18	2,5	1	42,4
9	18	2,5	1	-

Als Blechdicke wurde konstant mit  $t = 3$  mm gerechnet. Zwischen den einzelnen Schüssen wurden Gelenke angenommen.

## 5.2 Lastansatz aus dem Wind

Der Verlauf der Windbelastung wurde mittels einer Fourieranalyse angegeben (vgl. Anlage 5, Seite 1).

$$w = w_0 = (-0,30 + 0,30 \cdot \cos \beta + 1,40 \cdot \cos 2 \beta + 0,30 \cos 3 \beta - 0,20 \cos 4 \beta)$$

Die Windbelastung  $w_0$  errechnet sich aus:

$$w_0 = c \cdot q$$

Nach DIN 4119, Teil 2, Bild 4 ist folgender Druckbeiwert  $c$  anzusetzen:

$$c = 1,0 + 0,6 = 1,6$$

Somit beträgt der größte Winddruck im Anströmpunkt

$$w_0 = 1,6 \cdot 0,5 = 0,80 \text{ kN/m}^2$$

## 5.3 Ergebnisse der Elektronischen Berechnung

Die elektronische Berechnung wurde mit der Rechenanlage Prime 2250 durchgeführt. Das Programm arbeitet nach dem Übertragungsmatrizen-Verfahren. Die Schnittführung für die elektronische Eingabe wird in Anlage 5, Seite 2 dargestellt. Für den oberen Rand wurden die Randbedingungen des freien Randes eingegeben und für den Fußpunkt die der gelenkigen Lagerung. Die Horizontalstöße der Schüsse wurden als Gelenke angenommen. In Anlage 5 sind die Ergebnisse der elektronischen Berechnungen dargestellt. Die Ergebnisse lassen folgende Schlüsse zu:

### 5.3.1 Radialverschiebungen $w$ der Behälterwand

Die errechneten Verschiebungen ergeben, daß die Wand im Anströmbereich hereingedrückt wird und an den Flanken herausgezogen wird. Die errechneten Verschiebungen sind klein und widersprechen der gefühlsmäßigen Vorstellung, nach der sie um mindestens eine 10-er Potenz größer erwartet werden. Bei Anordnung des vorgesehenen Randprofils ( $I_y = 42,4 \text{ cm}^4$ ) sind die Verschiebungen am oberen Rand überwiegend kleiner als im darunterliegenden Bereich der Wand (vgl. Anlage 5, Seite 3). Wenn kein Randprofil vorgesehen wird, treten am oberen Rand die größten Verschiebungen auf (vgl. Anlage 5, Seite 4). In Anlage 5, Seite 5 ist der Einfluß auf die Verschiebungen des oberen Randes dargestellt.

Nur mit der Behältergeometrie erklärbar ist das Ergebnis, wonach der kleinste Behälterdurchmesser die größte Verschiebung des oberen Randes erfährt (vgl. Anlage 5, Seite 6). Im Wandbereich stellt sich allerdings das erwartete Ergebnis ein, nämlich, daß die Verschiebungen bei größer werdendem Durchmesser ebenfalls größer werden.

### 5.3.2 Längskräfte $n_x$

Im Anströmbereich treten Zugkräfte auf und an den Flanken Druckkräfte. Die Membrankräfte werden vom Behälterrand zum Fußpunkt größer (vgl. Anlage 5, Seite 8). Die Längskräfte  $n_x$  werden bei größer werdendem Durchmesser kleiner (vgl. Anlage 5, Seite 9). Mit größer werdender Behälterhöhe werden die Längskräfte am Fußpunkt größer (vgl. Anlage 5, Seite 10).

### 5.3.3 Membrankräfte $n_{\varphi}$ in Ringrichtung

In Anlage 5, Seite 11, sind die Membrankräfte an einem Behälter mit Profil aufgetragen. An dem Behälter treten über den gesamten Umfang im Randprofil Druckkräfte auf (Schnittstelle 0), während im gesamten Bereich zwischen Randprofil und Fußprofil (Schnittstellen 2-8) nur im Anströmbereich Druckkräfte vorhanden sind. Der Fußpunkt selber wird durch annähernd gleichgroße, entgegengesetzt verlaufende Druck- und Zugkräfte beansprucht. In Anlage 5, Seite 12, sind für einen Behälter ohne Randprofil die Membrankräfte in Ringrichtung dargestellt. Gegenüber dem Behälter mit Profil entfallen die Druckkräfte am oberen Rand.

Bei größer werdendem Durchmesser werden die Ringkräfte größer (vgl. Anlage 5, Seite 13). Die Behälterhöhe übt keinen Einfluß auf die Größe der Ringkräfte aus (vgl. Anlage 5, Seite 14).

### 5.3.4 Membrankräfte bei Windbeanspruchung

Die Membrankräfte in Ringrichtung und in Meridianrichtung sind in Bild 5.1 räumlich für einen Behälter mit und ohne Randprofil qualitativ dargestellt. Die Darstellung erfolgt für die Schnittkraftkombination  $n_{\varphi}$ ,  $n_x$  (Zug)/  $n_{\varphi}$ (Druck),  $n_x$  (Zug)/ $n_{\varphi}$  (Zug),  $n_x$  (Druck).

Es ist zu erkennen, daß der Anströmbereich der gefährdete Bereich ist, da hier in Ringrichtung Druckkräfte auftreten. Allerdings entstehen in Meridianrichtung Zugkräfte, die das Tragverhalten begünstigen. Bei rotationssymmetrischer Außen-druckbelastung treten hingegen um den gesamten Umfang nur Druckkräfte in Ringrichtung auf.

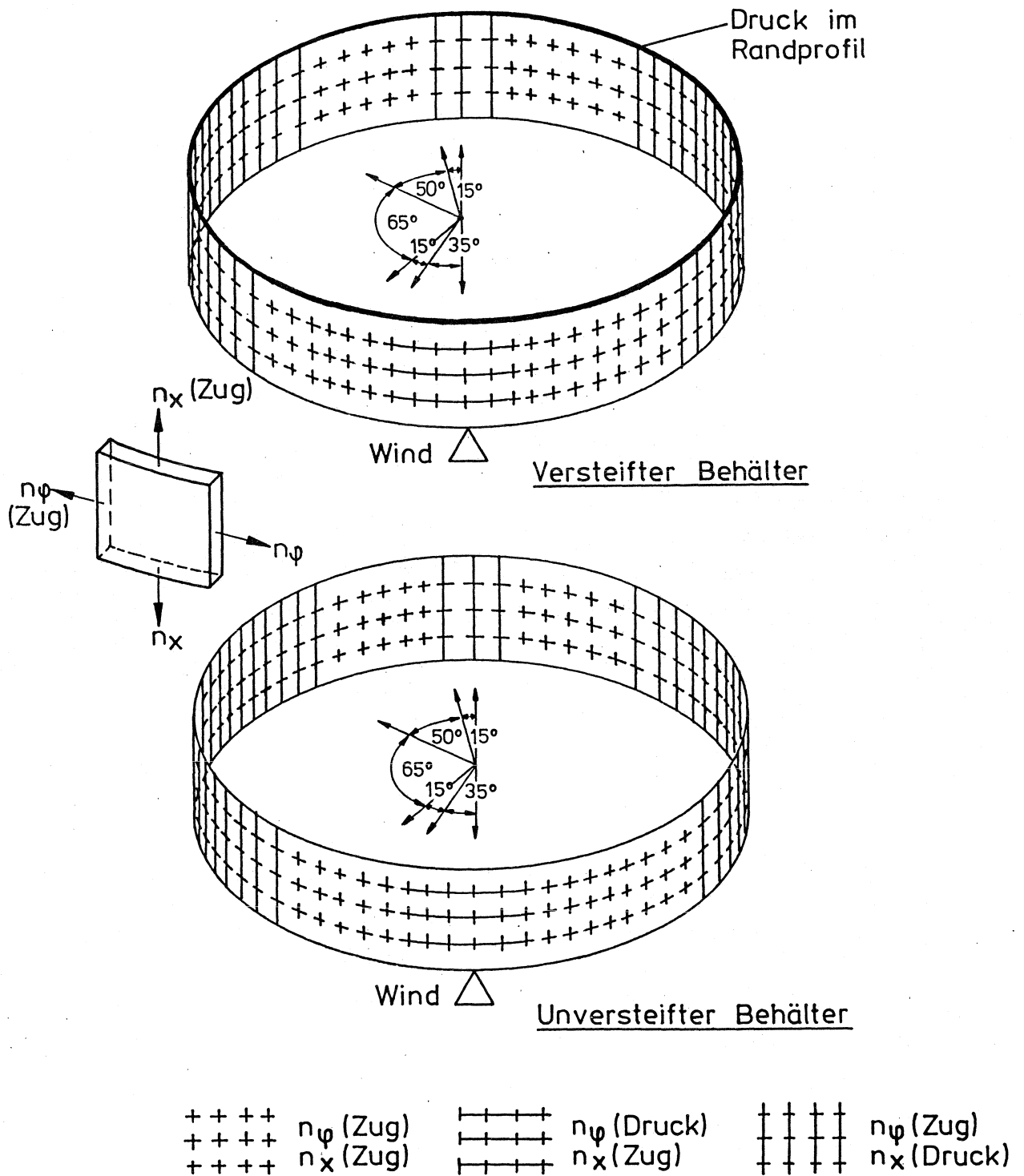


Bild 5.1  
Elektronisch ermittelte Membrankräfte  
bei Windbelastung

#### 6.0 Untersuchungen am emaillierten Behälter

Ursprünglich war geplant, die Probelastungen an von vier Herstellern gelieferten Behältern durchzuführen:

1. Fa. Farmatic (Glattblech aus emailliertem Stahl)
2. Fa. Harvestore (Glattblech aus emailliertem Stahl)
3. Fa. Esta (Glattblech aus V2A-Stahl)
4. Fa. Neuero (gewelltes Blech aus Stahl)

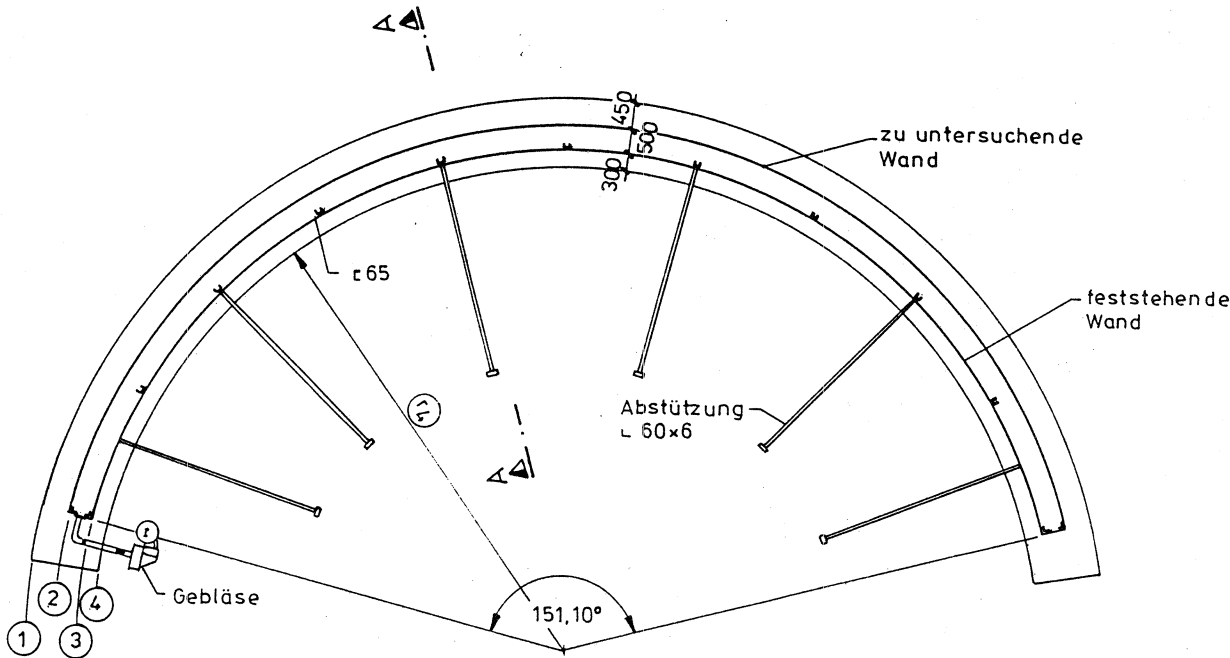
Damit sollten die emaillierten Glattbleche, die dünnen Glattbleche aus V2A-Stahl und die biegesteifen Wellbleche erfaßt werden. Da die Fa. Harvestore aus verschiedenen Gründen zurücktrat, war ein Vergleich mit den Versuchsergebnissen der Fa. Farmatic nicht mehr möglich. Die Fa. Neuero hat inzwischen die Produktion eingestellt, so daß die Behälter aus Wellblechen nicht erfaßt werden konnten.

Ein Ersatz für die beiden ausgefallenen Firmen konnte nicht gefunden werden, da die Erstellung der Versuchskörper sehr kostenaufwendig ist. Um diesen Ausfall auszugleichen, wurde das ursprünglich vorgesehene Versuchsprogramm an den Behältern der verbliebenen Firmen Farmatic und ESTA erweitert. Es wurden Belastungsversuche an unversteiften und zusätzlich an ringversteiften Behältern durchgeführt.

Um den Kostenaufwand in einem vertretbaren Rahmen zu halten - bei gleicher Aussagekraft, wie die Versuchsergebnisse zeigten - wurde kein vollständiger Behälter aufgebaut, sondern nur ein Kreisabschnitt von ca. 150°. Alle Versuchsdurchführungen fanden auf dem Betriebsgebäude der Fa. Farmatic statt. Die Probelastungen an dem Behälter der Fa. Farmatic fand am 05. und 06.06.1989 statt.



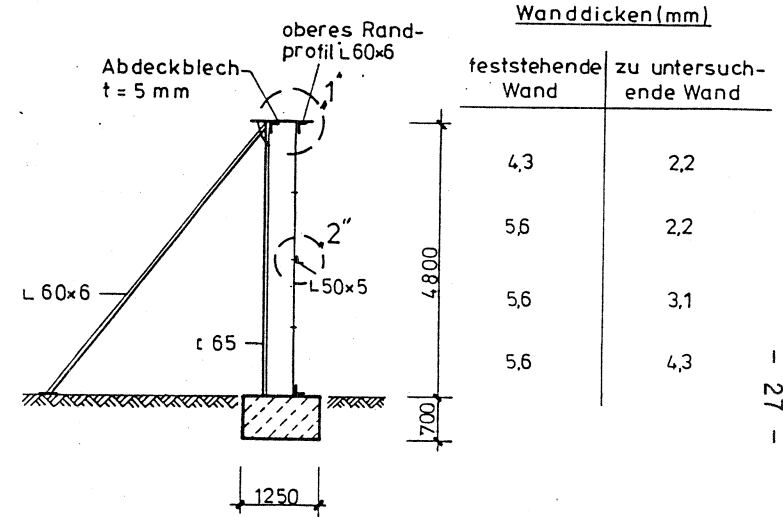
# Grundriß



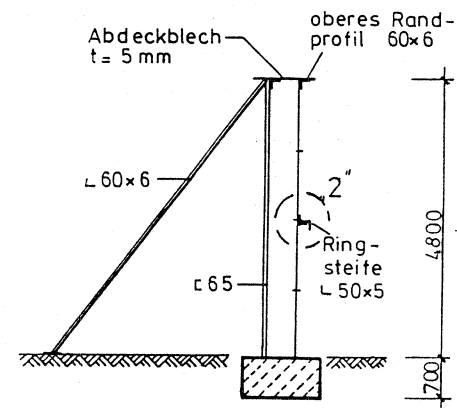
- ①  $r_1 = 9600$  mm (äußere Betonkante)
- ②  $r_2 = 9150$  mm (zu untersuchende Wand)
- ③  $r_3 = 8650$  mm (feste Wand)
- ④  $r_4 = 8350$  mm (innere Betonkante)

Bild 6.1  
Versuchsaufbau (Behälter aus  
emailliertem Stahl)

# Schnitt A-A



Behälter ohne Ringversteifung (Details s. Bild 6.2)



Behälter mit 1 Ringversteifung (Detail s. Bild, 6.2)

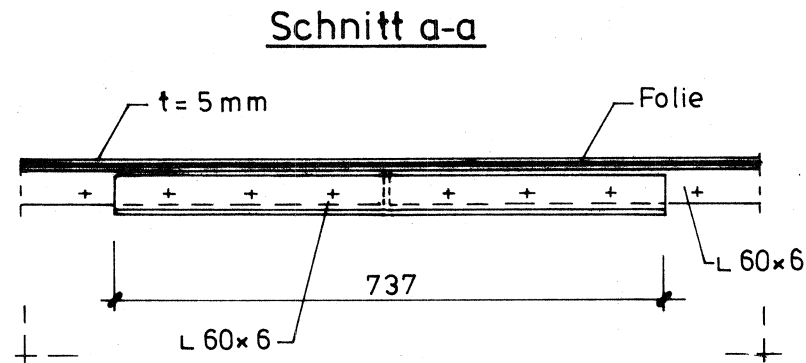
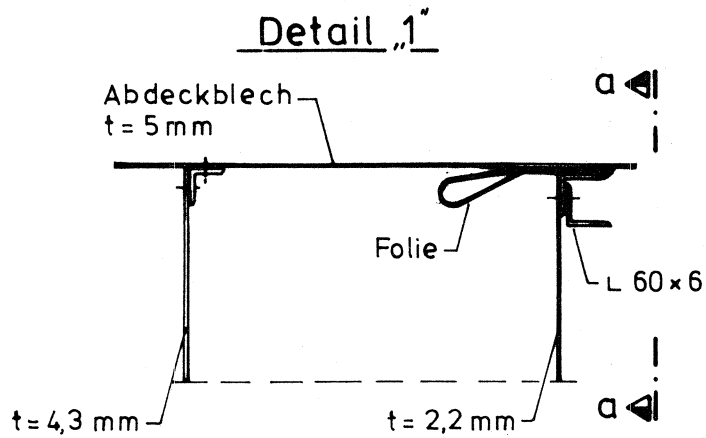
### 6.1 Aufbau und Konstruktion des Behälters

In den Bildern 6.1 bis 6.6 ist die Konstruktion des Versuchskörpers dargestellt. Der Versuchskörper bestand aus den Kreisabschnitten der zu untersuchenden Wand mit  $d/h = 18,30/4,30$  m und der innenliegenden festen Wand mit  $d/h = 17,30/4,30$  m. Der obere und der seitliche Abschluß des 0,50 m breiten Zwischenraumes erfolgte ebenfalls durch Bleche. Die Behälterwände wurden auf ein 1,25 m breites eigens dafür betoniertes Kreisringfundament gestellt.

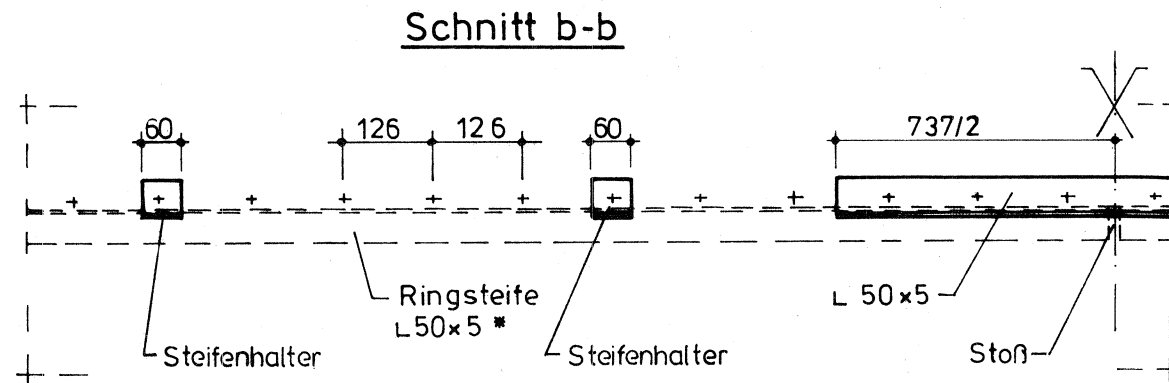
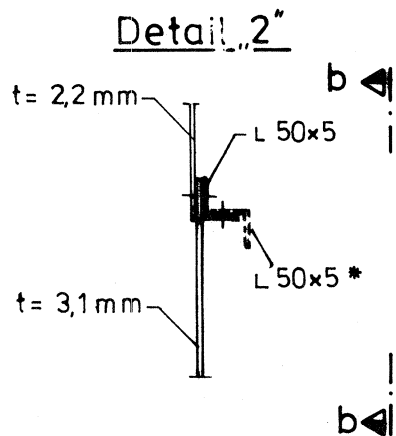
Die Dicken der vier Wandplatten-Schüsse für die feststehende und für die zu untersuchende Wand sind in Bild 6.1 angegeben. Sie betragen für die feststehende Wand oben 4,3 mm und unten 5,6 mm. Die zu untersuchende Wand war oben 2,2 mm und unten 4,3 mm dick. Die Wandplatten besaßen die Abmessungen  $l/b = 2500/1238$  mm.

Die Verschraubung der Wandbleche miteinander erfolgte über Schrauben M 12,7 (Zollmaß) der Festigkeitsklasse 8.8. Als umlaufendes oberes Randprofil war jeweils ein Winkelprofil L 60 x 6 mm angeordnet (vgl. Bild 6.2, Detail "1"). Am Fußpunkt waren die Wandplatten mit einem mit dem Fundament verdübelten Winkelprofil L 60 x 6 verschraubt. Die feststehende Wand war in den vertikalen Stößen zusätzlich durch Stahlprofile [ 65 ausgesteift und darüberhinaus durch geneigte Winkelprofile L 60 x 6 vom oberen Rand zur Bodenplatte hin gehalten.

Um für den zweiten Belastungsversuch die mittlere Ringaussteifung L 50 x 5 anbringen zu können, war eine Haltekonstruktion aus Winkelprofilen L 50 x 5 auf der Außenseite der zu untersuchenden Wand angeordnet (vgl. Bild 6.2).



Darstellung im  
Schnitt siehe Bild 6.1



\* (bei ringversteiftem Behälter  
siehe auch Bild 6.3, 6.4 und 6.6)

**Bild 6.2**  
Konstruktion der Behälterwand (emailierter Stahl)



Bild 6.3: Behälter ohne Ringversteifung (emailierter Stahl)



Bild 6.4: Behälter mit 1 Ringversteifung (emailierter Stahl)





Bild 6.5: Feste Wand mit Stützkonstruktion

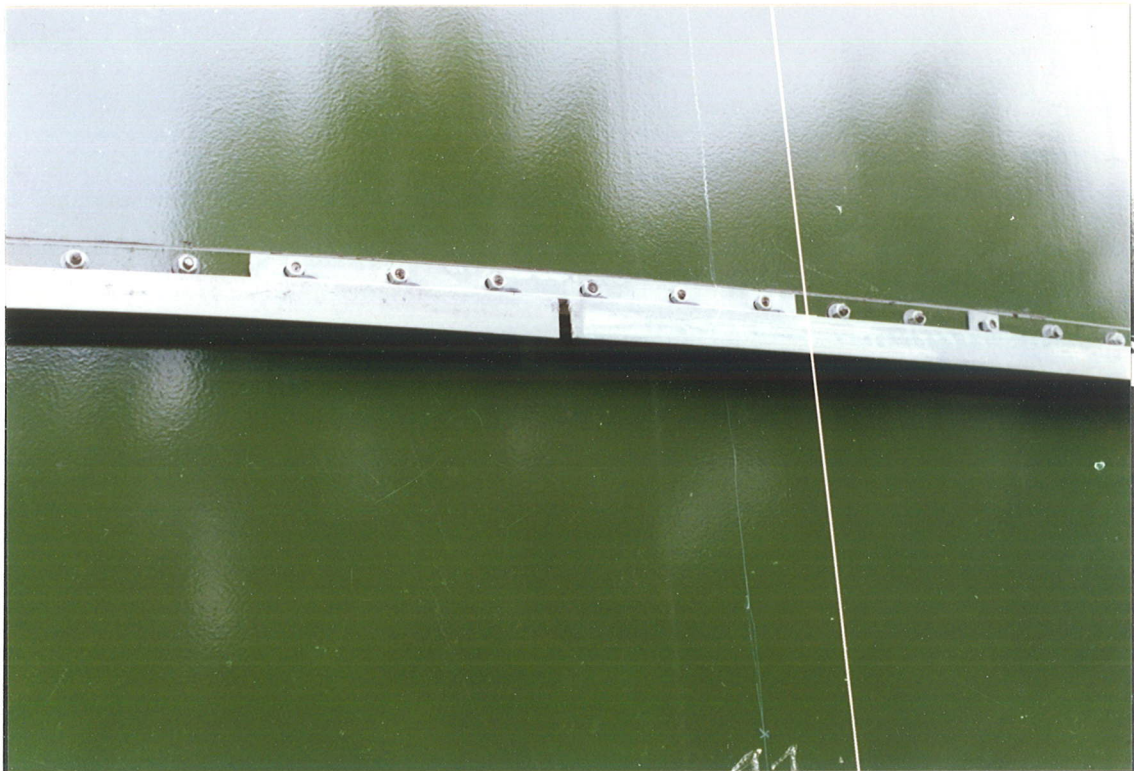
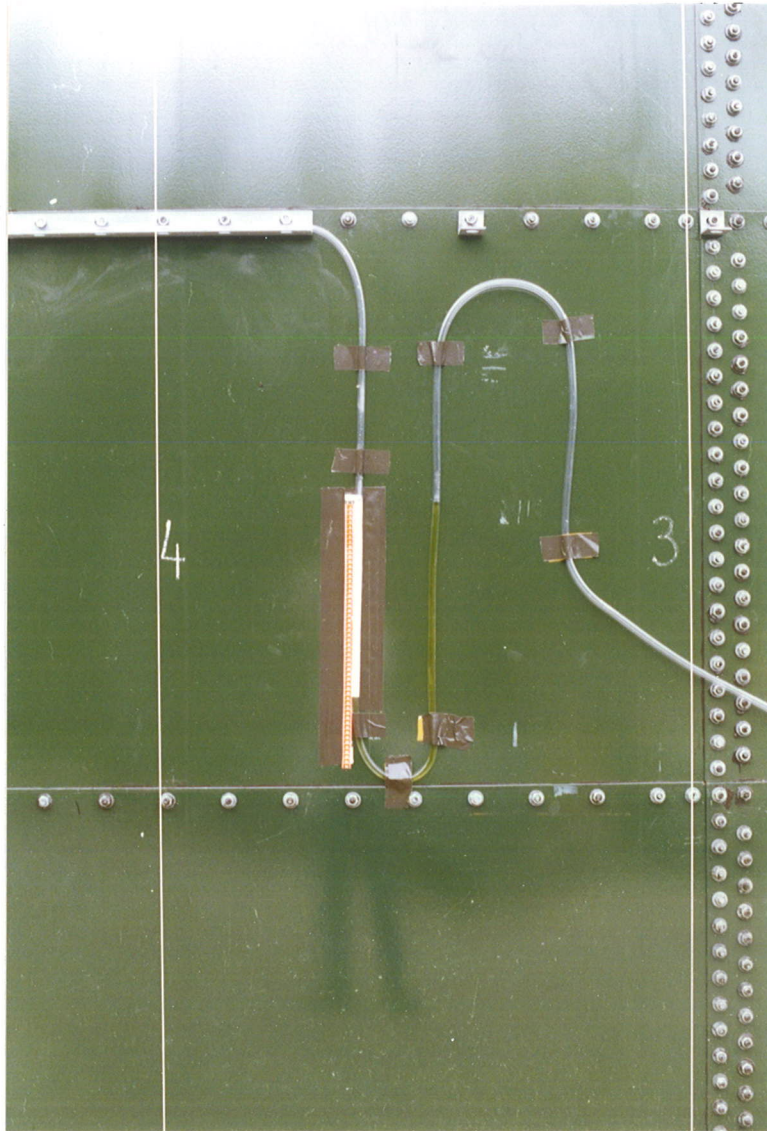


Bild 6.6: Ausbildung des Stoßes der Ringversteifung



**Bild 6.7:**  
U-Rohr zur Messung des  
Unterdruckes in mm WS

Die annähernd unbehindert mögliche radiale Verschiebung des oberen Randes bei rotationssymmetrischer Belastung wurde dadurch erreicht, daß eine Gleitfolie auf das obere Randprofil und auf das Abdeckblech geklebt wurde. Da die Gleitfolie nach innen gefaltet war, aus einem Stück bestand und das Randprofil mit dem Abdeckblech verband, war die Fuge gleichzeitig gegen einströmende Luft abgedichtet. Die feststehende Wand und das Abdeckblech waren unverschieblich miteinander verschraubt. Ebenso die Seitenbleche am vertikalen Rand des Versuchskörpers. Alle Nahtstellen wurden zusätzlich mit einem Dichtungsmittel auf Kunststoffbasis ausgepreßt. Der Fußpunkt wurde mit von außen angeschüttetem Sand abgedichtet.

Bei dem emaillierten Güllebehälter wird nachfolgend als unversteifte Behälterkonstruktion die Behälterwand bezeichnet, die mit einem oberen Randprofil L 60 x 6 und der Haltekonstruktion aus Winkelabschnitten L 50 x 5 versehen ist (vgl. Bild 6.2 + 6.3). Nach dem Einbau des umlaufenden Winkelprofiles L 50 x 5 an die Haltekonstruktion wird die zu untersuchende Wand als Behälter mit 1 Ringversteifung bezeichnet (vgl. Bild 6.4).

## 6.2 Versuchsdurchführung

Die Aufzeichnung während der Versuchsdurchführung bestand darin, daß die durch den Unterdruck hervorgerufenen Veränderungen der Behälterwand gemessen, notiert, fotografiert und mit Video aufgenommen wurden.

Die Einteilung des Meßrasters ist auf Anlage 6, Seite 1 dargestellt. Um den Umfang wurden 19 lotrechte Meßachsen im Abstand von ca. 1000 mm angeordnet. Jede vertikale Meßachse wurde mit 12 Meßpunkten versehen, wobei der Meßpunkt am oberen Rand die Bezeichnung 1 und am Fußpunkt 12 erhielt. Als Bezugsachse war vor die zu untersuchende Wand eine Schnur gespannt, die am Fußpunkt mittels eines Dübels im Fundament befestigt war.

Am oberen Rand war die Schnur durch Bohrungen am äußeren Rand des Abdeckbleches gefädelt und fiel auf der Innenseite vor der festen Wand herunter. Sie wurde durch ein Gewicht, das an ihrem freien Ende befestigt war, straff gehalten (vgl. Bild 6.3 bis 6.5).

Die Überprüfung der Maßhaltigkeit erfolgte, indem auf einem auf der Fundamentoberfläche markierten Kreis mittels eines Richtscheites das Lot gefällt wurde und der Abstand zu den Meßpunkten 9, 11 und 12 gemessen wurde. Die darüber liegenden Punkte wurden aus Gründen der Vereinfachung nicht erfaßt.

Die Belastung wurde aufgebracht, indem die Luft im Raum zwischen der feststehenden und zu untersuchenden Wand mittels eines Gebläses evakuiert wurde. Das Gebläse war mit einer Drosselklappe versehen, so daß der Unterdruck reguliert werden konnte. Die Anzeige des vorhandenen Unterdruckes in mm WS erfolgte durch das auf Bild 6.7 dargestellte U-Rohr.

### 6.3 Versuchsergebnisse

#### 6.3.1 Maßhaltigkeit des erstellten Behälters

Auf Anlage 6, Seite 6 sind die Meßwerte zur Überprüfung der Maßhaltigkeit angegeben. In Anlage 6, Seite 2 sind die Werte für die Meßpunkte 9, 11 und 12 aufgetragen.

Der Abstand des Bezugskreises zum Solldurchmesser betrug 460 mm. Größere Meßwerte bedeuten, daß die Behälterwand nach innen hereingezogen ist und kleinere Meßwerte einen zu großen Radius. Der Fußpunkt (Meßpunkt 12) weicht in Meßachse 15 um 24 mm vom Solldurchmesser ab. Für den oberen Rand des ersten Schusses (Meßpunkt 11) ergibt sich in Meßachse 4 die größte Abweichung mit 32 mm. Für den oberen Rand des zweiten Schusses (Meßpunkt 9) stellt sich die größte Abweichung in Meßachse 16 mit 29 mm vom Solldurchmesser dar.



Die größte Abweichung der montierten Wand vom Soll Durchmesser beträgt 1,75 ‰. In lotrechter Richtung beträgt die größte Neigung zwischen Meßpunkt 9 und 11 in Meßachse 16 ca. 1,6 ‰ (19 mm).

### 6.3.2 Belastungsversuche

In Anlage 6, Seite 7 bis 25, ist das Ergebnis der radialen Wegmessungen an der Behälterwand angegeben.

Folgende Versuchsschritte wurden durchgeführt:

1. Wegmessungen an der unbelasteten Behälterwand
2. Unterdruck von 37 mm WS aufgebracht und Wegmessungen durchgeführt.
3. Unterdruck auf 45 mm WS vergrößert und Wegmessungen durchgeführt.
4. Druckausgleich hergestellt (0 mm WS) und Wegmessungen durchgeführt.
5. Einbau der Ringversteifung und Wegmessungen im Meßpunkt 9
6. Aufbringen eines Unterdruckes von 85 mm WS und Wegmessungen in den Meßpunkten 1 bis 9
7. Vergrößerung des Unterdruckes auf 101 mm WS und Wegmessungen in den Meßpunkten 1 bis 9. Bei diesem Unterdruck war die Leistungsfähigkeit des Gebläses erschöpft. Die durch die undicht gewordenen Stöße einströmende Luftmenge übertraf die Leistungsfähigkeit des Gebläses.
8. Druckausgleich hergestellt (0 mm WS) und Ausbau der Ringversteifung.
9. Aufbringen eines Unterdruckes auf 75 mm WS und Wegmessungen im Meßpunkt 9. Bei diesem Unterdruck war die Leistungsfähigkeit des Gebläses erschöpft, da durch große Verformungen die Leckrate der Luft größer geworden war.

Die Punkte 1 bis 4 und 8 bis 9 betreffen die unversteifte Behälterwand, die Punkte 5 bis 7 die mit 1 Ringversteifung versehene Behälterwand.

#### 6.3.2.1 Belastungsversuch am Behälter ohne Ringversteifung

In Bild 6.8 ist das Beulbild aufgetragen, das sich an der Behälterwand ohne Ringversteifung bei einem Unterdruck von 37 mm WS einstellte.

Die Beulen gehen über die gesamte Höhe der Behälterwand. Sie sind allerdings im oberen Bereich tiefer. Die nach innen heringezogene Beule besitzt eine Breite von ca. 3,30 m und die herausgedrückte "Tragrippe" ist mit ca. 0,50 m wesentlich schmaler. Es fiel auf, daß das Beulmuster durch die Überlappung, die im Bereich der vertikalen Stöße eine Verstärkung bewirkt, nicht wesentlich beeinflusst wurde. Allerdings wurde eine Störung des Beulbildes durch die Haltekonstruktion für den Stoß der später einzubauenden Ringversteifung hervorgerufen.

In Bild 6.10 ist die Auswertung der Wegmessungen aufgetragen. Die größten Verschiebungen treten in dem 2. und 3. Schuß von unten auf. In Meßachse 3, Meßpunkt 7, wird die Wand um 108 mm hereingezogen und in Meßachse 12, Meßpunkt 9, um 38 mm herausgedrückt.

Bei einer weiteren Belastungssteigerung vergrößerten sich die Verschiebungen. Leider wurden die Wegmessungen nur für den Meßpunkt 9 durchgeführt und hier trat nur eine unwesentliche Vergrößerung der Verschiebungen auf. Im ungünstigsten Fall wurde bei einer Belastungssteigerung von 37 mm WS auf 75 mm WS in Meßachse 4 im Meßpunkt 9 eine ca. 100 %-Vergrößerung der Verschiebungen gemessen. In den anderen Meßachsen lag sie dagegen wesentlich niedriger (vgl. Anlage 6, Seite 4). Bei Rücknahme des Unterdruckes sprang das eingebeulte Blech wieder in die Ausgangslage zurück, so daß davon ausgegangen werden kann, daß es sich um elastische Verformungen handelte.

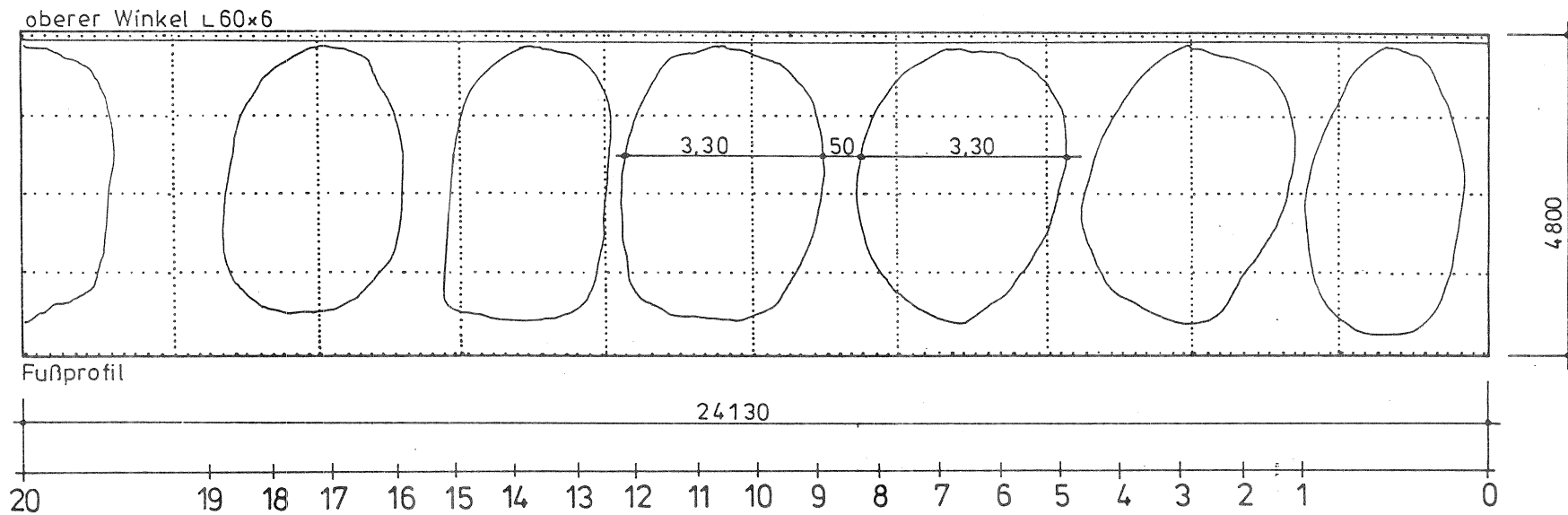


Bild 6.8  
 Beulbild bei einem Unterdruck von 37 mm WS  
 (Behälter ohne Ringversteifung, emaillierter Stahl)

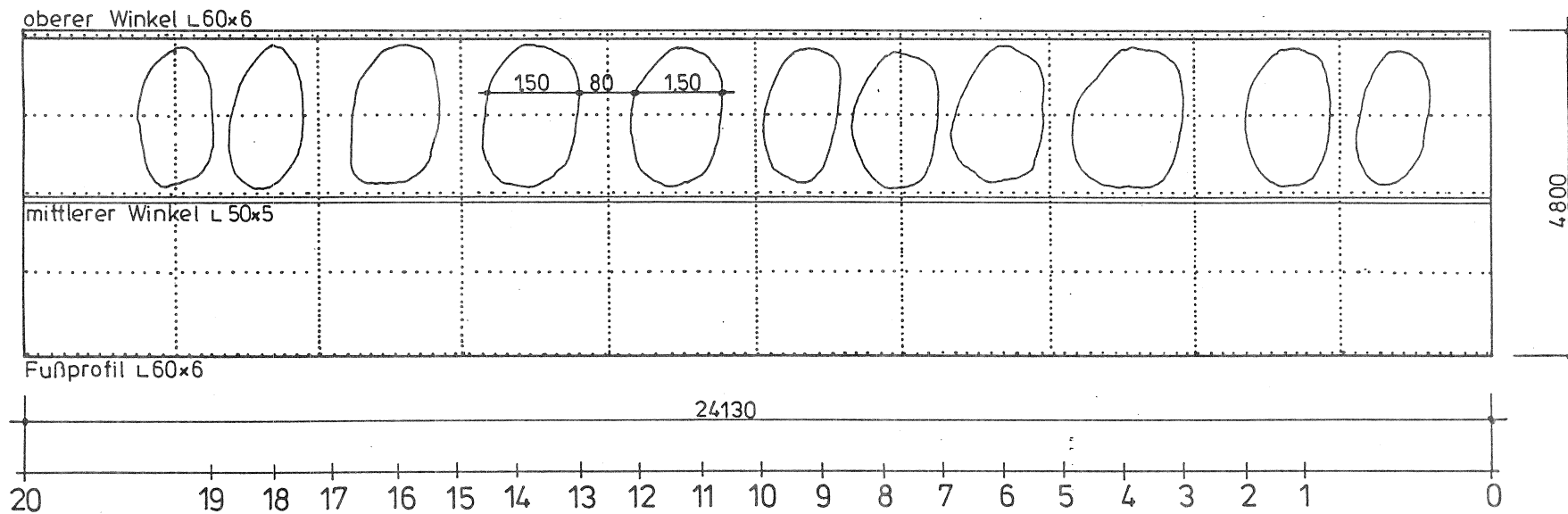


Bild 6.9  
 Beulbild bei einem Unterdruck von 85 mm WS  
 (Behälter mit 1 Ringversteifung, emaillierter Stahl)

Die Verschiebung des oberen Randprofiles ist auf Anlage 6, Seite 3 für einen Unterdruck von 37 mm WS aufgetragen. Es kann davon ausgegangen werden, daß die Verschiebungen klein sind und im Bereich von  $\pm 5$  mm liegen.

#### 6.3.2.2 Belastungsversuch am Behälter mit 1 Ringversteifung

In Bild 6.9 ist das Beulbild aufgetragen, das sich bei einem Unterdruck von 85 mm WS einstellte. Die Beulen traten nur in den beiden oberen Schüssen auf. Das Bild der Beulen war durch die Verstärkung der Behälterwand im Bereich der lotrechten Verschraubung vorgeprägt. Eine Ausnahme bildete die Beule zwischen Meßachse 7 und 8. Die nach innen hereingezogene Beule besitzt eine Länge von ca. 1,50 m und die herausgedrückte "Tragrippe" ist ca. 0,80 m breit.

In Bild 6.11 ist die Auswertung der Wegmessungen vorgenommen. In Meßachse 6, Meßpunkt 5, wird die Wand um 47 mm hereingezogen und in Meßachse 7, Meßpunkt 6 um 21 mm herausgedrückt. Die Verschiebungen sind also wesentlich kleiner als bei der Behälterwand ohne Ringversteifung.

Auf Anlage 6, Seite 5, sind die Verschiebungen in Höhe der Ringversteifung, Meßpunkt 9, aufgetragen. Die größten Verschiebungen wurden in Meßachse 3 gemessen. Sie betragen 22 mm bei einem Unterdruck von 101 mm WS. Desgleichen wurde in Meßachse 18 eine große Verschiebung gemessen. Es ist denkbar, daß es sich hier um Randstörungen handelt, zumal die Ringversteifung aus Montagegründen nicht bis an das Ende durchgeführt wurde (vgl. Bild 6.4). Ansonsten wurde eine geringere Verschiebung gemessen. In der Meßachse 7 beträgt sie nur 12 mm. Die Lasterhöhung von 85 auf 101 mm WS hatte keinen wesentlichen Einfluß mehr auf die Verschiebungen.

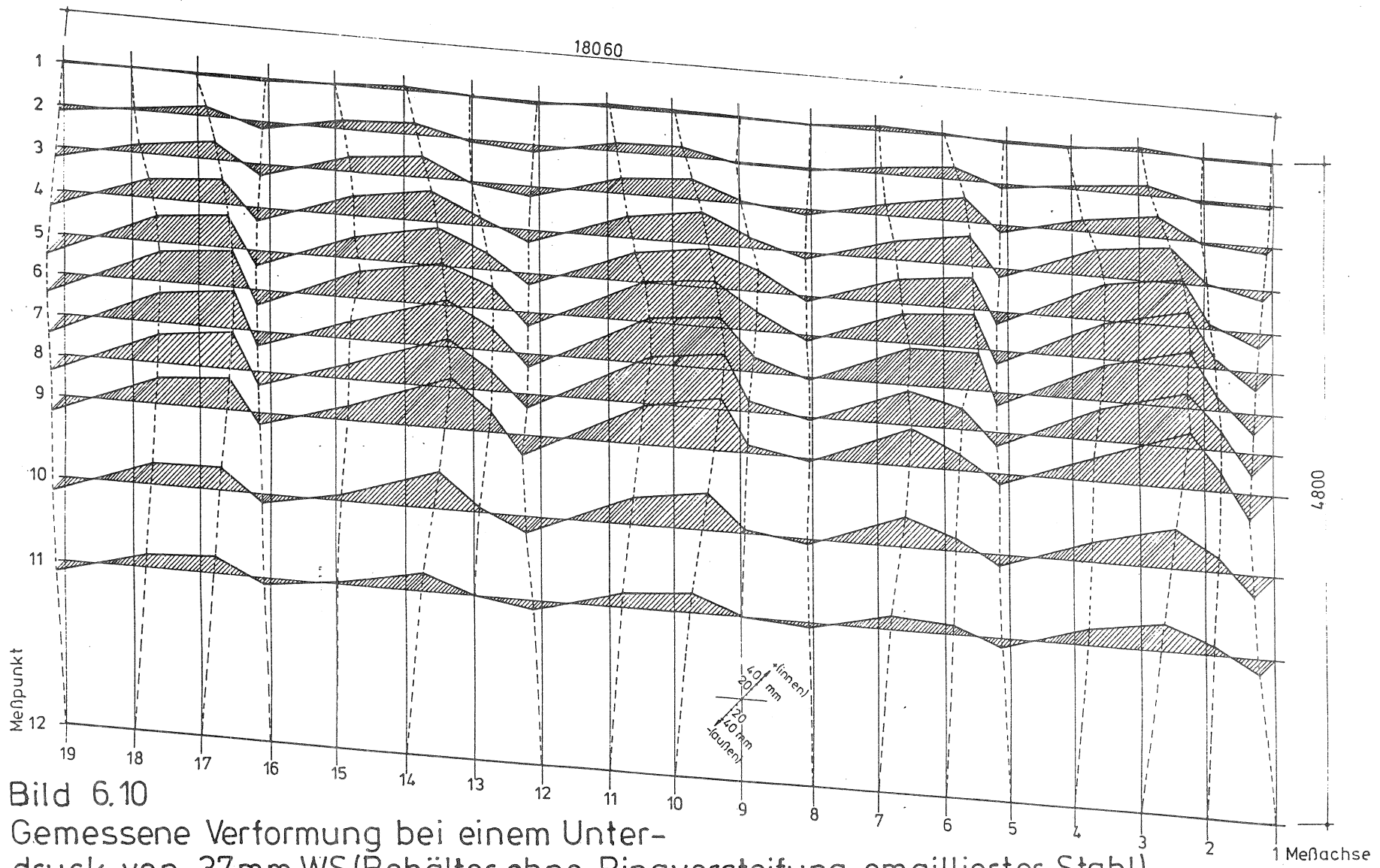


Bild 6.10  
 Gemessene Verformung bei einem Unterdruck von 37mm WS (Behälter ohne Ringversteifung, emaillierter Stahl)

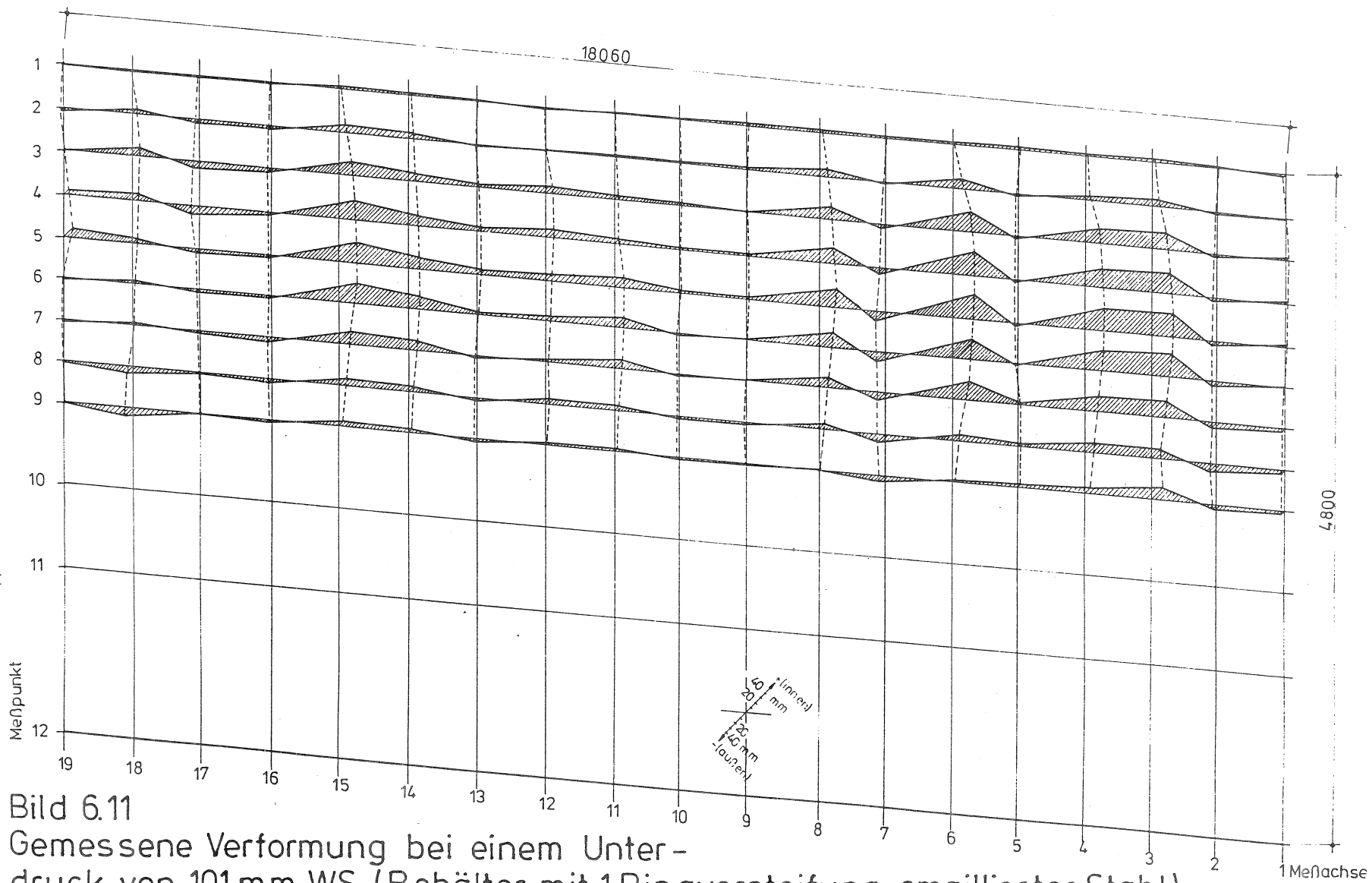


Bild 6.11  
 Gemessene Verformung bei einem Unter-  
 druck von 101 mm WS (Behälter mit 1 Ringversteifung, emaillierter Stahl)





Bild 6.12: Beulbild bei einem Unterdruck von 37 mm WS (Behälter ohne Ringversteifung)

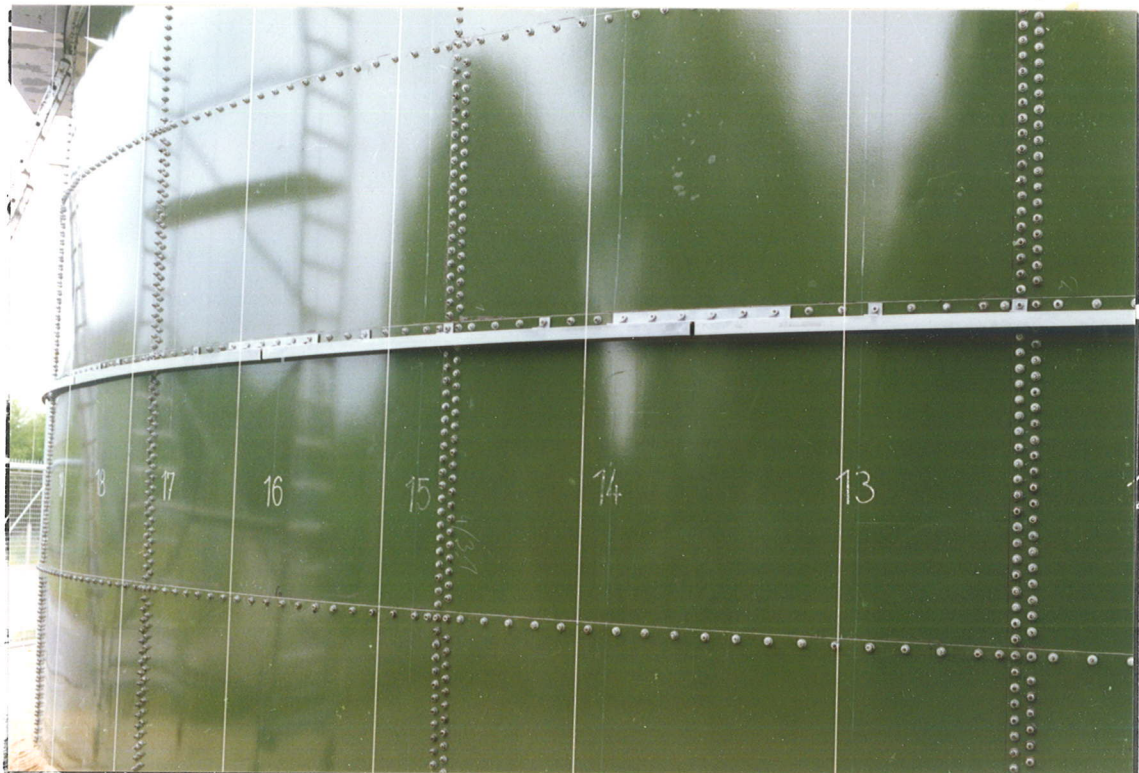


Bild 6.13: Beulbild bei einem Unterdruck von 105 mm WS (Behälter mit 1 Ringversteifung)




## 7.0 Untersuchungen am Behälter aus V2A-Stahl

Die Versuchsdurchführungen an dem Behälter der Fa. ESTA fanden auf dem Betriebsgelände der Fa. Farmatic in Nortorf statt. Am 20.07.89 wurde der Belastungsversuch an dem Behälter mit 1 Ringversteifung und am 29.08.1989 an dem Behälter mit 3 Ringversteifungen durchgeführt.

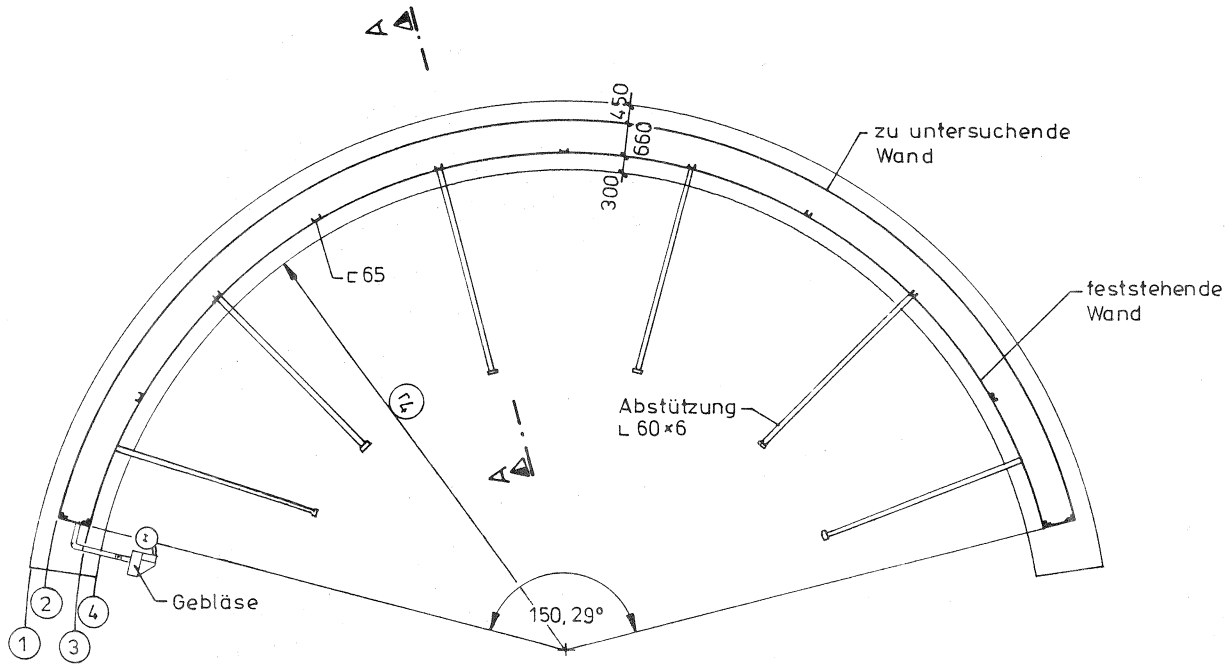
## 7.1 Aufbau und Konstruktion des Behälters

Der Aufbau der Konstruktion glich dem des in Abschnitt 6.1 beschriebenen Versuchskörpers aus emailliertem Stahl. Die feststehende Wand, die oberen und seitlichen Abdeckbleche sowie die Meßvorrichtungen wurden übernommen. Auf den Bildern 7.1 bis 7.3 und 7.9 bis 7.11 ist die Konstruktion dargestellt.

Die Wandplatten der zu untersuchenden Wand bestanden aus V2A-Stahl (Werkstoffnummer 1.4301) und waren 2500 mm lang und 1250 mm breit. Der Behälter war vier Schüsse hoch. Das Wandblech des letzten Schusses war 1,25 mm dick und der unterste Schuß besaß eine Blechdicke von 2,0 mm (vgl. Bild 7.1).

Die Verschraubung der Wandbleche miteinander erfolge über Schrauben M 10. Der Schraubenwerkstoff bestand ebenfalls aus V2A-Stahl. Als umlaufende obere Randaussteifung war ein kalt gewalztes Profil  47 x 114 x 18 x 1,5 angeordnet (vgl. Bild 7.2, Detail "1"). Zwischen dem 3. und 4. Schuß von unten war eine außen umlaufende Ringversteifung aus einem kalt gewalzten Profil [ 80 x 50 x 1,5 angeordnet. Daraus ergab sich die Konstruktion "Behälterwand mit 1 Ringversteifung" (vgl. Bild 7.2). Am Fußpunkt waren die Wandplatten mit einem mit dem Fundament verdübelten Kaltprofil [ 80 x 50 x 1,5 verschraubt.

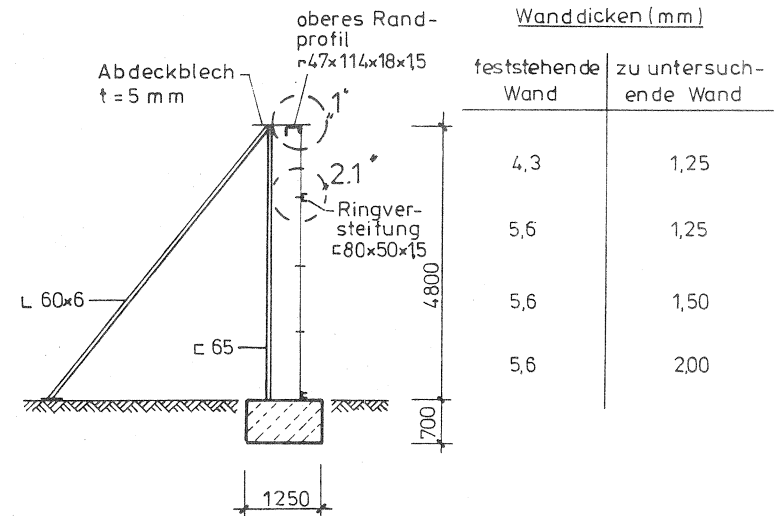
Grundriß



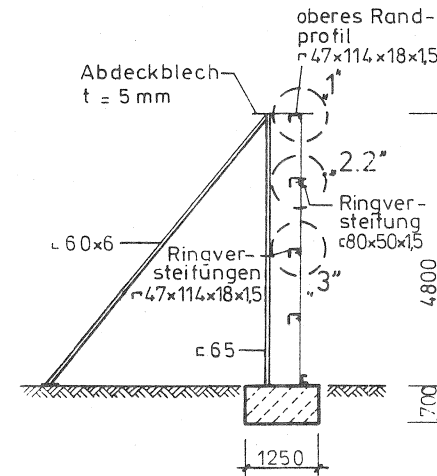
- ①  $r_1 = 9600$  mm (äußere Betonkante)
- ②  $r_2 = 9310$  mm (zu untersuchende Wand)
- ③  $r_3 = 8650$  mm (feste Wand)
- ④  $r_4 = 8350$  mm (innere Betonkante)

Bild 7.1  
Versuchsaufbau (Behälter aus V2A-Stahl)

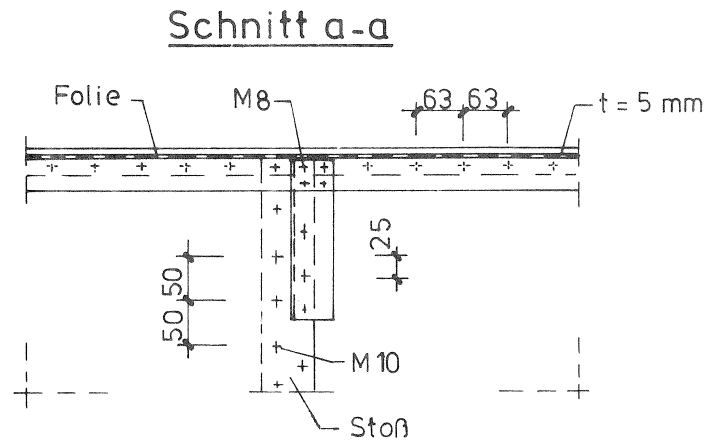
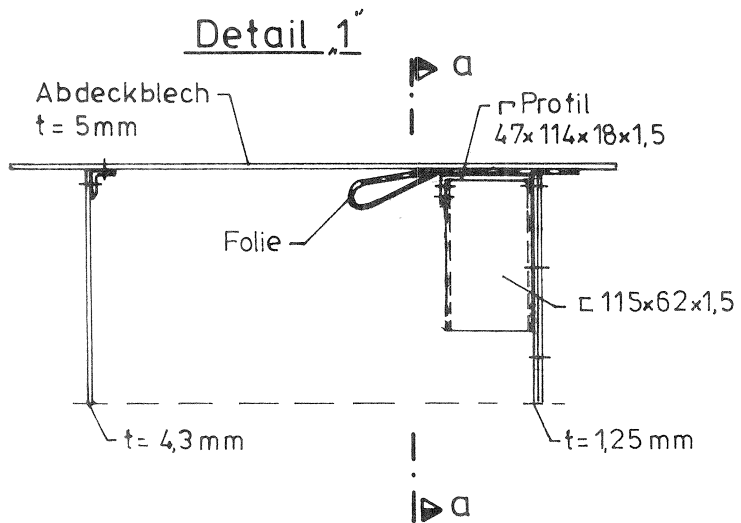
Schnitt A-A



Behälter mit 1 Ringversteifung (Details s. Bild 7.2)



Behälter mit 3 Ringversteifungen (Details s. Bild 7.2 u. 7.3)



Darstellung im  
Schnitt siehe Bild 7.1

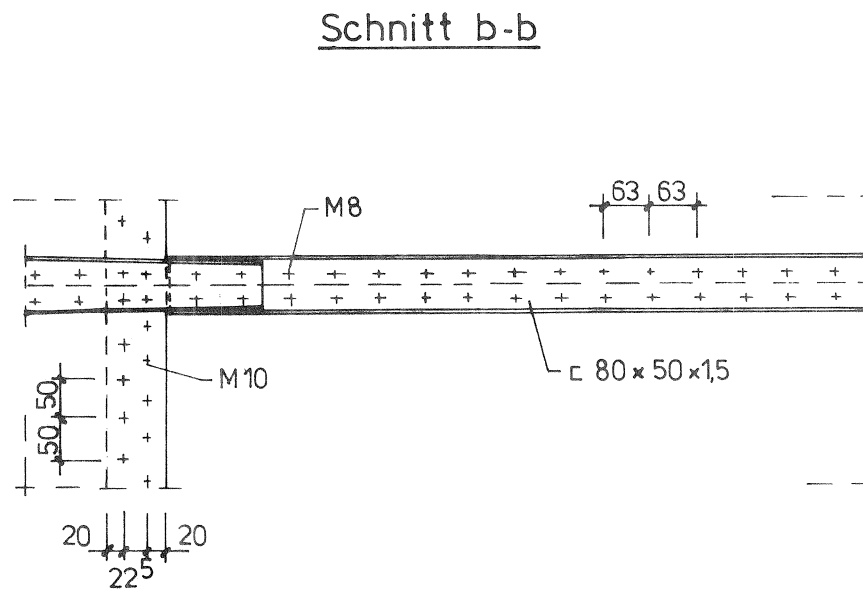
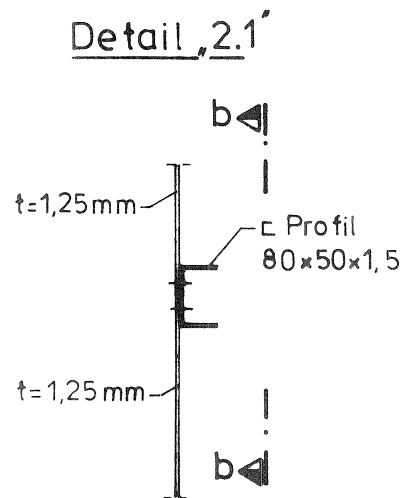
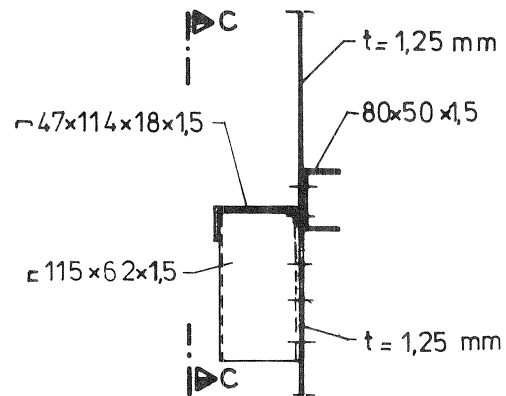
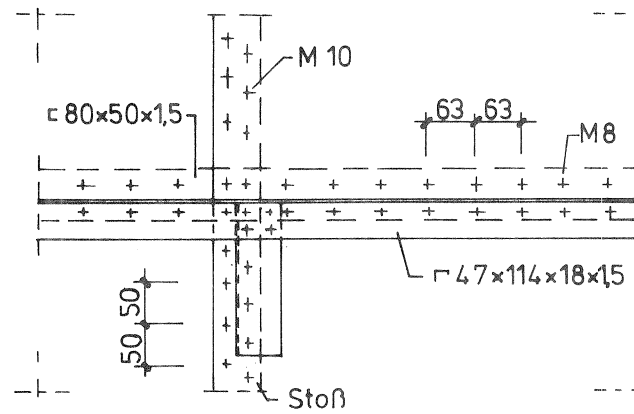


Bild 7.2  
Konstruktion der Behälterwand (V2A-Stahl)

Detail „2.2“

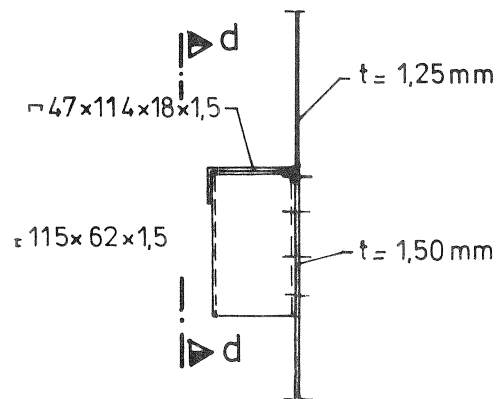


Schnitt c-c



Darstellung im  
Schnitt siehe Bild 7.1

Detail „3“



Schnitt d-d

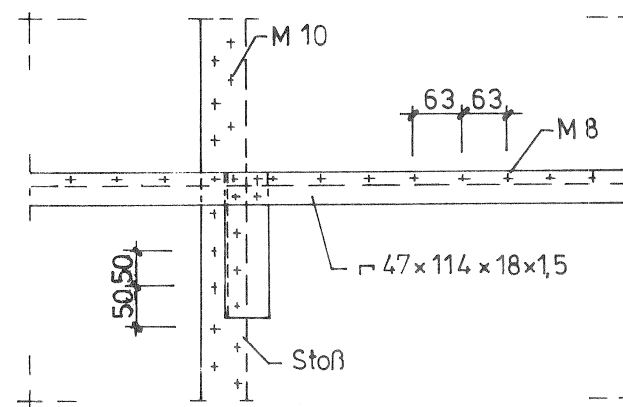


Bild 7.3  
Detail 2.2 und 3

Bei der Behälterwand mit 3 Ringversteifungen waren zusätzlich in den horizontalen Stößen innenliegende Kaltprofile  $\square$  47 x 114 x 18 x 1,5 vorhanden (vgl. Bild 7.3 und 7.11).

## 7.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung entspricht der in Abschnitt 6.2 beschriebenen Vorgehensweise bei der emaillierten Behälterwand. In Anlage 7, Seite 1, ist die Einteilung des Meßrasters dargestellt.

## 7.3 Versuchsergebnisse

### 7.3.1 Maßhaltigkeit des erstellten Behälters

#### 7.3.1.1 Maßhaltigkeit des Behälters mit 1 Ringversteifung

In Anlage 7, Seite 9, sind die Meßwerte zur Überprüfung der Maßhaltigkeit angegeben. In Anlage 7, Seite 2, sind die Werte für die Meßpunkte 7, 10 und 12 aufgetragen.

Der Abstand des Bezugskreises zum Soll Durchmesser betrug 300 mm. In der Meßachse 5 im Meßpunkt 7 wird die Behälterwand um 46 mm nach innen hereingezogen und in Meßachse 1 im Meßpunkt 7 vergrößert sich der Sollradius um 30 mm. Die größte Abweichung vom Soll Durchmesser beträgt somit 2,47 ‰. In lotrechter Richtung beträgt die größte Lot-Abweichung in Meßachse 5, zwischen Meßpunkt 7 und 10, ca. 28 mm auf 1200 mm, d.h. 2,33 ‰.

#### 7.3.1.2 Maßhaltigkeit des Behälters mit 3 Ringversteifungen

Bei dem Belastungsversuch am Behälter mit 1 Ringversteifung stellten sich bei Erreichen des maximalen Unterdruckes von 75 mm WS elastische und plastische Verformungen ein.

In Anlage 7, Seite 10 und 11, sind die geglätteten Meßwerte aufgetragen. Es wird davon ausgegangen, daß in Höhe der umlaufenden Ringversteifungen die Behälterwand durch die Verschraubung glattgezogen wurde. Somit ergeben sich die Sollabstände zwischen den Ringversteifungen durch die lineare Beziehung.

Die Differenzen zwischen Sollabständen und Meßwerten stellen die Vorbeulen dar. In Anlage 7, Seite 3, sind die augenscheinlichen Plastifizierungen vor dem Belastungsversuch aufgetragen. Die Auswertung der Meßwerte erfolgt in Anlage 7, Seite 4. In der Meßachse 9 im Meßpunkt 6 wurde eine Vorbeule von 37 mm gemessen. Größere Vorverformungen waren insbesondere im 3. Schuß von unten vorhanden.

### 7.3.2 Belastungsversuche

In Anlage 7, Seite 12 bis 17, ist das Ergebnis der radialen Wegmessungen an der Behälterwand angegeben.

Folgende Versuchsschritte wurden hierbei durchgeführt:

1. Wegmessungen an der unbelasteten Behälterwand (Meßpunkte 1 bis 12)
2. Unterdruck auf 37 mm WS aufgebracht und Wegmessungen für Meßpunkte 7 bis 10 durchgeführt.
3. Unterdruck auf 50 mm WS vergrößert und Wegmessungen für die Meßpunkte 7 bis 10 durchgeführt.
4. Unterdruck auf 75 mm WS vergrößert. Bei diesem Unterdruck war die Leistungsfähigkeit des Gebläses erschöpft. Die einströmende Luftmenge entsprach der Leistungsfähigkeit des Gebläses.
5. Druckausgleich hergestellt.
6. Einbau der 3 innen liegenden Ringversteifungen und Wegmessungen für die Meßpunkte 1 bis 12 durchgeführt.

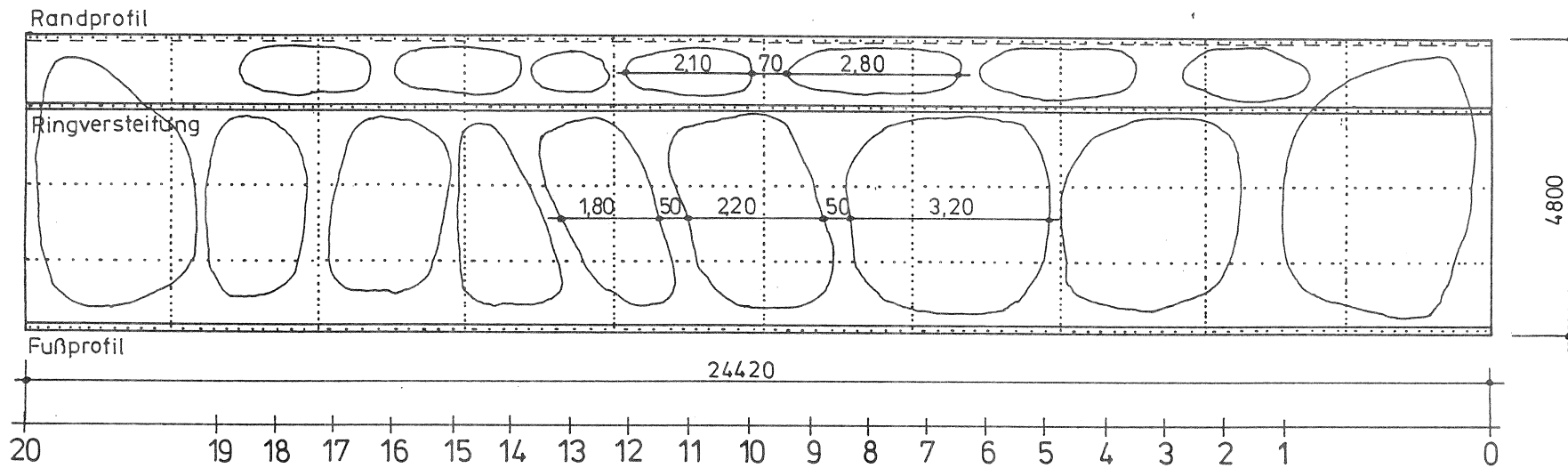


Bild 7.4  
 Beulbild bei einem Unterdruck von 50 mm WS  
 (Behälter mit 1 Ringversteifung, V2A-Stahl)

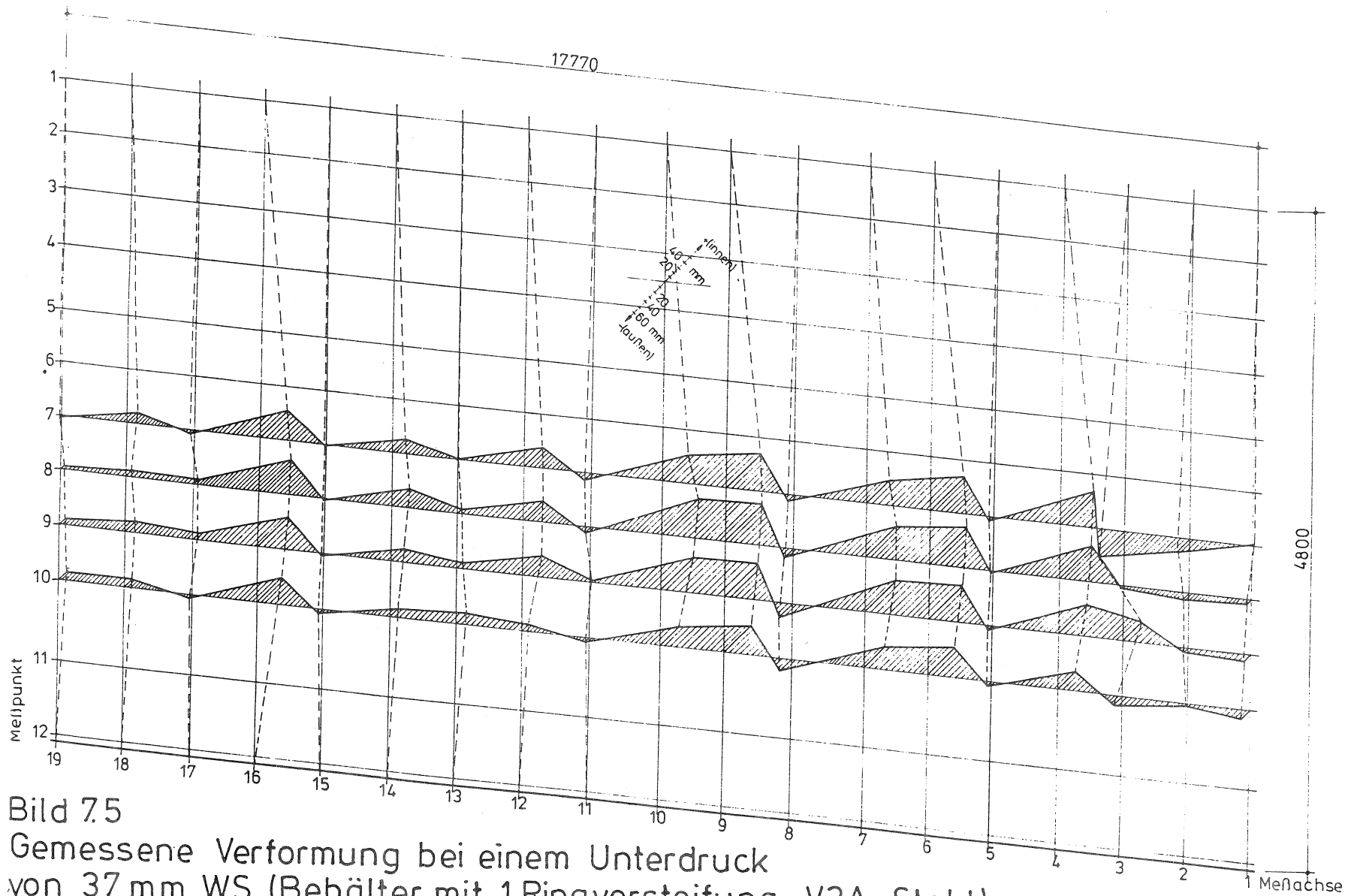


Bild 7.5  
Gemessene Verformung bei einem Unterdruck  
von 37 mm WS (Behälter mit 1 Ringversteifung, V2A-Stahl)



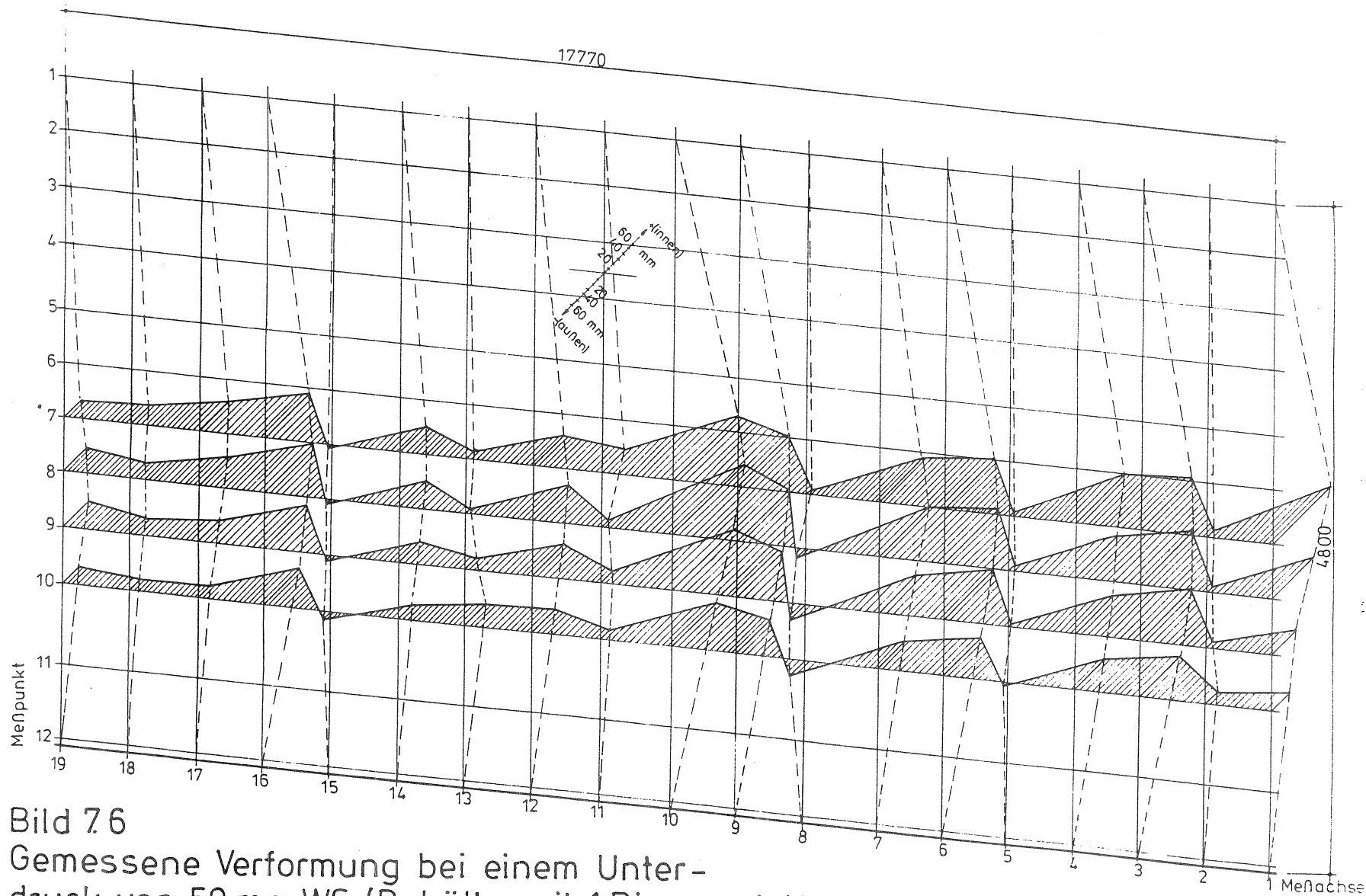


Bild 7.6  
 Gemessene Verformung bei einem Unter-  
 druck von 50 mm WS (Behälter mit 1 Ringversteifung, V2A-Stahl)

7. Aufbringen eines Unterdruckes von 150 mm WS. Bei diesem Unterdruck war die Leistungsfähigkeit des Gebläses erschöpft.

Die Punkte 1 bis 5 betreffen die Behälterwand mit 1 Ringversteifung und die Punkte 6 und 7 die Behälterwand mit 3 Ringversteifungen.

#### 7.3.2.1 Belastungsversuch am Behälter mit 1 Ringversteifung

In Bild 7.4 ist das Beulbild aufgetragen, das sich an der Behälterwand mit 1 Ringversteifung bei einem Unterdruck von 50 mm WS einstellte. Durch die Ringversteifung zwischen dem 3. und 4. Schuß wurden die Beulen unterbrochen. Die Beulen besaßen kein einheitliches Aussehen. Im oberen Abschnitt, dem Bereich zwischen dem Randprofil und der Ringversteifung, waren die Beulen annähernd ebenso lang wie im unteren Abschnitt. Wobei als unterer Abschnitt der Bereich zwischen der Ringversteifung und dem Fußprofil bezeichnet wird. Die Höhe der Beulen war annähernd mit der Abschnittshöhe identisch. In den Endbereichen wurde das Beulbild durch eine jeweils über die gesamte Behälterhöhe verlaufende Beule gestört. Das Beulmuster besaß nicht ein so einheitliches Aussehen, wie das am emaillierten Behälter. Aus technischen Gründen war es leider nicht möglich, die Wegmessungen über die gesamte Behälterwand durchzuführen. Im Bild 7.5 sind die Ergebnisse der Wegmessungen des 2. Schusses für einen Unterdruck von 37 mm WS aufgetragen und in Bild 7.6 für einen Unterdruck von 50 mm WS. In der Achse 10 wurde im Meßpunkt 7 die Wand bei einem Unterdruck von 37 mm WS um 55 mm hereingezogen. Bei 50 mm WS vergrößerte sich die Beulentiefe auf 127 mm. In Achse 8, Meßpunkt 10, entstand eine Rippe, die bei 37 mm WS um 26 mm und bei 50 mm WS um 33 mm hervortrat. Auf Anlage 7, Seite 5, ist die Verschiebung des Meßpunktes 8 dargestellt. Es wird besonders deutlich, daß die Tiefe der Beulen bei größeren Drücken zunimmt, die Höhe der Tragrippen aber kaum.

Bei einem Unterdruck von 75 mm WS war die Tragfähigkeit der Behälterwand erschöpft (vgl. Bild 7.12). In der Behälterwand und am Ende der Ringversteifung traten Plastifizierungen auf. Die nach dem hergestellten Druckausgleich gemessenen Verformungen des oberen Randes sind in Anlage 7, Seite 6, aufgetragen. Die bleibenden Verformungen bewegten sich dabei in einer Spanne von  $\pm 10$  mm.

#### 7.3.2.2 Belastungsversuch am Behälter mit 3 Ringversteifungen

Bei einem Unterdruck von 150 mm WS stellte sich das in Bild 7.7 dargestellte Beulmuster ein. Die Tiefe der Beulen ist in Bild 7.8 angegeben. Die beiden oberen Schüsse ( $t = 1,25$  mm) weisen die tiefsten Beulen auf. Im untersten Schuß ( $t = 2,00$  mm) waren die Beulen mit dem bloßen Auge kaum erkennbar (vgl. Bild 7.13).

Die größte Beultiefe in Meßachse 3, Meßpunkt 3, beträgt 49 mm und ist weitaus kleiner als beim Behälter mit 1 Ringversteifung. Bekräftigt wird diese Aussage durch einen Vergleich der Darstellungen in Anlage 7, Seite 5 und Anlage 7, Seite 7, in denen die Verschiebung des Meßpunktes 8 dargestellt wird. Die Verschiebung des oberen Randprofils war bei einem Unterdruck von 150 mm WS maximal 8 mm groß (vgl. Anlage 7, Seite 8).

Es kann davon ausgegangen werden, daß die Beulentiefen bei gleichem Unterdruck, aber ohne die signifikanten Vorverformungen (siehe Abschnitt 7.3.1.2), noch deutlich kleiner gewesen wären, da die Beulen - soweit nicht durch die zusätzlichen Aussteifungen verhindert - im allgemeinen wieder an den gleichen Stellen auftraten. Sie waren also durch die Vorverformungen ausgelöst worden.

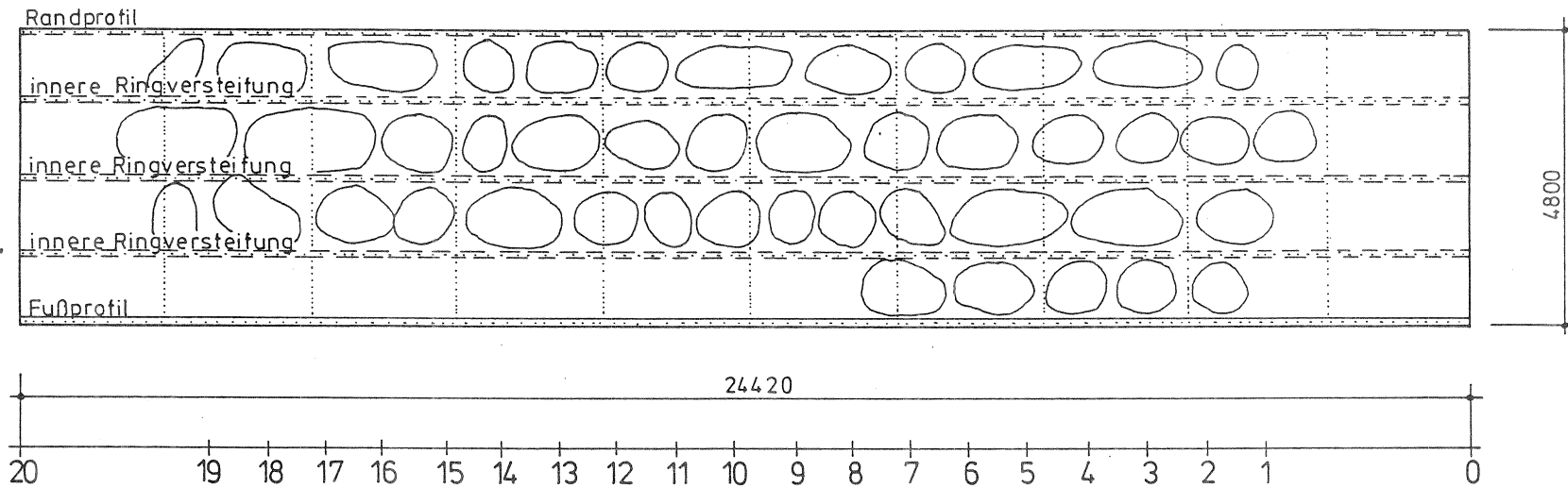


Bild 7.7

Beulbild bei einem Unterdruck von 150 mm WS (Behälter mit 3 Ringversteifungen, V2A-Stahl)

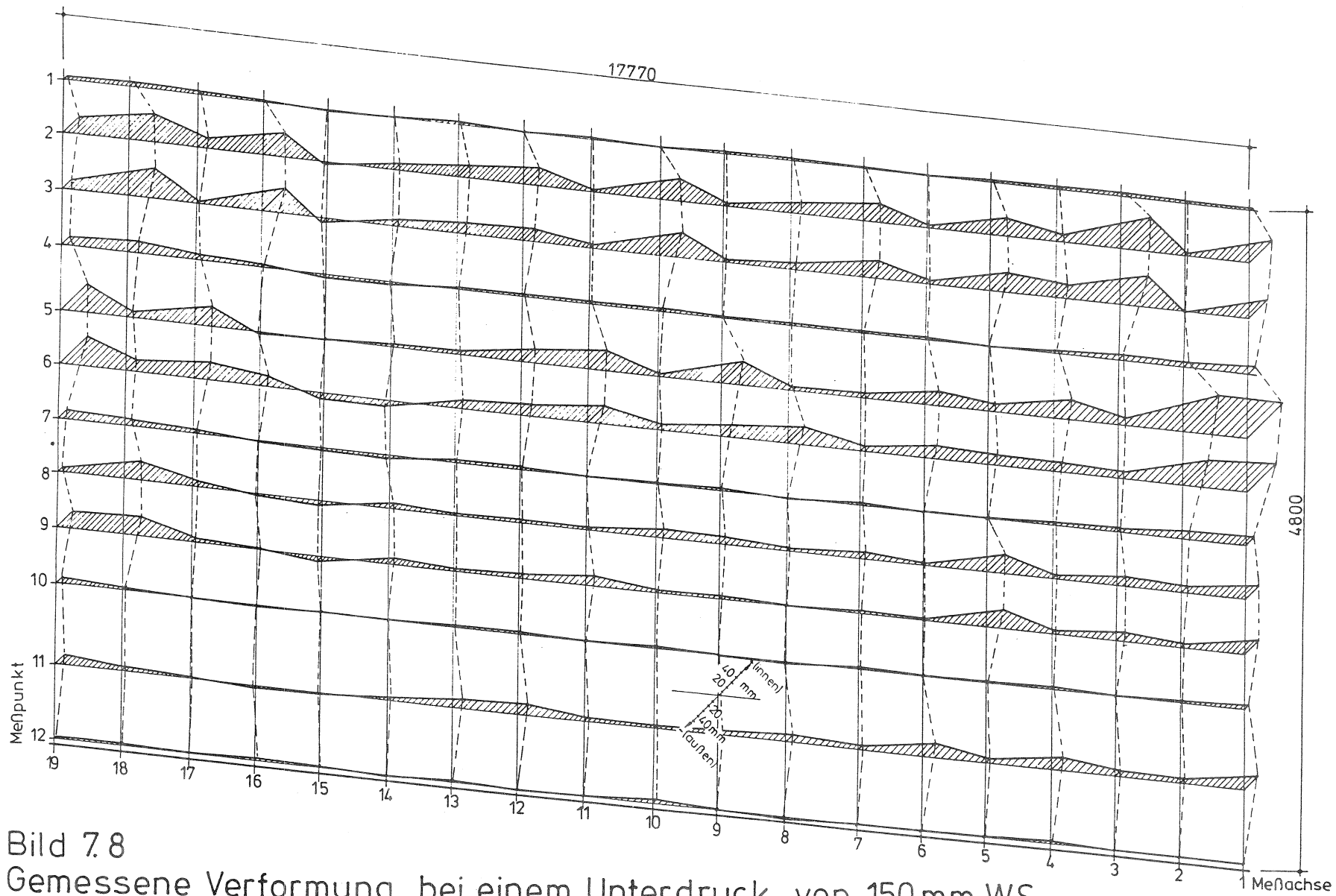


Bild 7.8  
 Gemessene Verformung bei einem Unterdruck von 150 mm WS  
 (Behälter mit 3 Ringversteifungen, V2A-Stahl)



Bild 7.9: Behälter mit 1 Ringversteifung (V2A-Stahl)



Bild 7.10: Beulbild bei einem Unterdruck von 37 mm WS  
(Behälter mit 1 Ringversteifung)



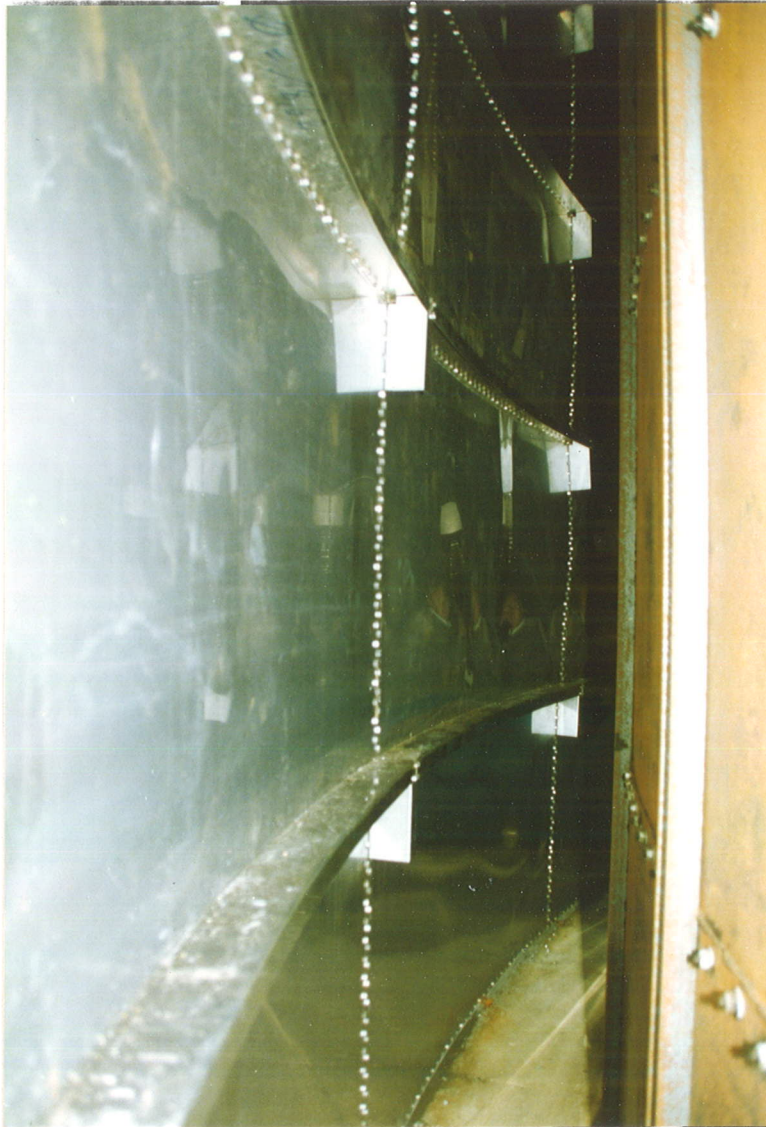


Bild 7.11: Anordnung der 3 inneren Ringversteifungen



Bild 7.12: Beulbild bei einem Unterdruck von 75 mm WS  
(Behälter mit 1 Ringversteifung)



Bild 7.13: Beulbild bei einem Unterdruck von 150 mm WS  
(Behälter mit 3 Ringversteifungen)



## 8.0 Praxisbezogene Konstruktionshinweise

### 8.1 Trägheitsmoment der Ringsteifen

Aus den Erfahrungen mit jenen Ringsteifen, die bisher bei den einzelnen Güllebehälter-Fabrikaten (s. Anlage 2) eingebaut wurden und die sich bewährt haben, lassen sich bereits erste Schlüsse ziehen.

In Bild 8.1 sind die Steifigkeiten der Rand- und Ringprofile für die untersuchten Behälter aufgetragen. Hierbei wurde eine Beziehung zwischen den  $4/\pi$ -fachen Volumina  $d^2 \cdot h$  ( $m^3$ ) und den vorhandenen Gesamt-Trägheitsmomenten  $J_y$  ( $cm^4$ ) aller vorhandenen Ringsteifen hergestellt. Aus der Verteilung wird deutlich, daß einige konstruktiv gewählte Ringsteifen offensichtlich reichlich bemessen sind, andere dagegen zu leicht ausgeführt wurden. Eine sinnvolle Abgrenzung zum kleinsten erforderlichen Gesamt-Trägheitsmoment für die Ringversteifungen läßt sich nach folgenden Zahlenwertgleichungen bestimmen:

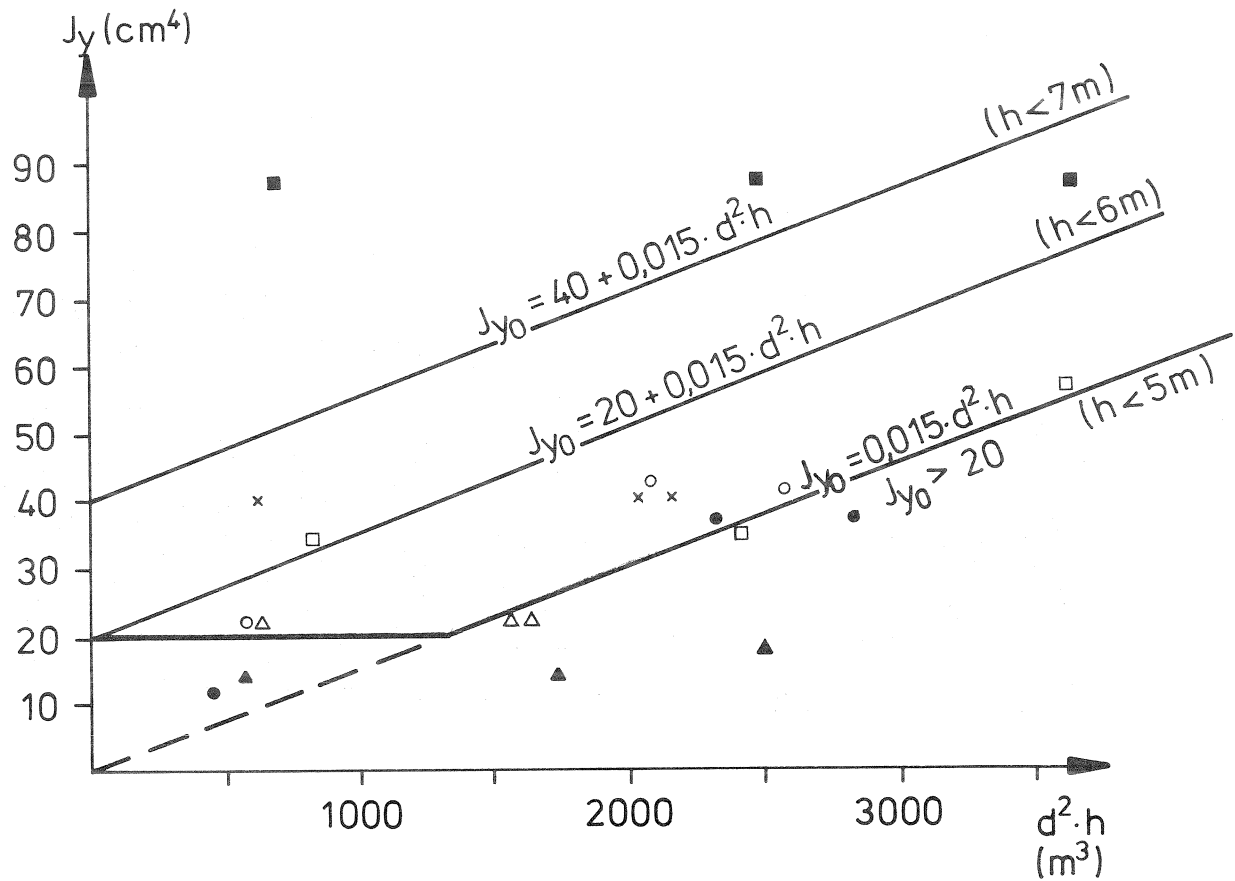
$$J_{y0} = 0,015 \cdot d^2 \cdot h \geq 20 \text{ (cm}^4\text{) für } h \leq 5 \text{ m}$$

$$J_{y0} = 20 + 0,015 \cdot d^2 \cdot h \text{ (cm}^4\text{) für } 5 \text{ m} < h < 6 \text{ m}$$

$$J_{y0} = 40 + 0,015 \cdot d^2 \cdot h \text{ (cm}^4\text{) für } 6 \text{ m} < h < 7 \text{ m,}$$

wobei  $d$  und  $h$  in  $m$  einzusetzen sind.

Hierbei wird aufgrund der größeren Beulgefährdung bei hohen Behältern eine Abstufung zwischen den Höhen  $h \leq 5 \text{ m}$ ,  $5 \text{ m} < h < 6 \text{ m}$  und  $6 \text{ m} < h < 7 \text{ m}$  vorgenommen. Um den Erfahrungsbereich nicht zu überschreiten, ist die Anwendung der Beziehung auf  $d^2 \cdot h < 3500 \text{ m}^3$  zu begrenzen.

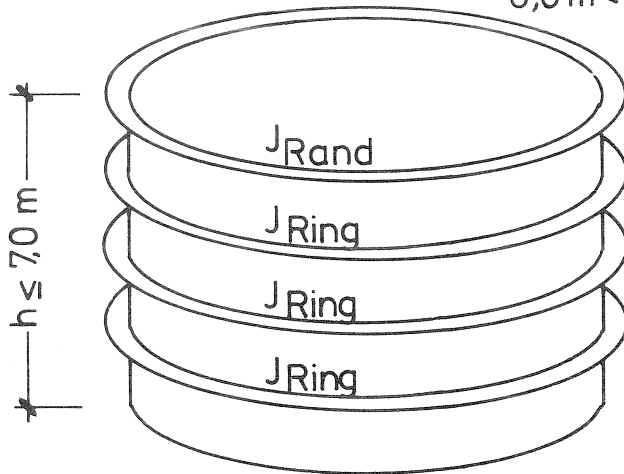


- △ Lfd. Nr. 1
  - ▲ Lfd. Nr. 3
  - Lfd. Nr. 4
  - Lfd. Nr. 5
  - Lfd. Nr. 6
  - Lfd. Nr. 7
  - × Lfd. Nr. 8
- Maximalwerte der Gruppen 1 bis 3 nach Tabelle 3.3

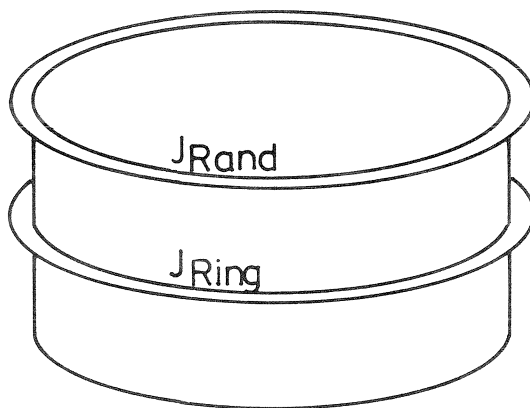
Bild 8.1

Ermittlung des erforderlichen Trägheitsmomentes  $J_{y0}$  für die Ringversteifung anhand ausgeführter Konstruktionen

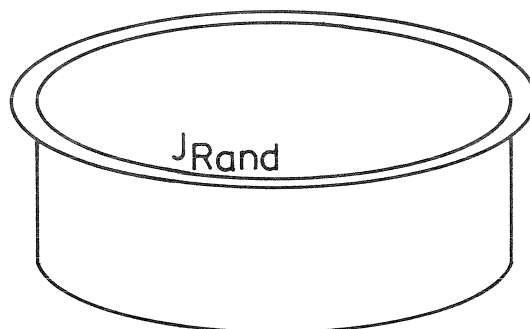
$$h \leq 5,0 \text{ m} : J_{y_0} = 0,015 \cdot d^2 \cdot h \geq 20 \text{ cm}^4$$
$$5,0 \text{ m} < h \leq 6,0 \text{ m} : J_{y_0} = 20 + 0,015 \cdot d^2 \cdot h$$
$$6,0 \text{ m} < h \leq 7,0 \text{ m} : J_{y_0} = 40 + 0,015 \cdot d^2 \cdot h$$



$$J_{\text{Rand}} = 0,7 J_{y_0} \geq 20 \text{ cm}^4$$
$$J_{\text{Ring}} = 0,5 J_{y_0} \geq 15 \text{ cm}^4$$

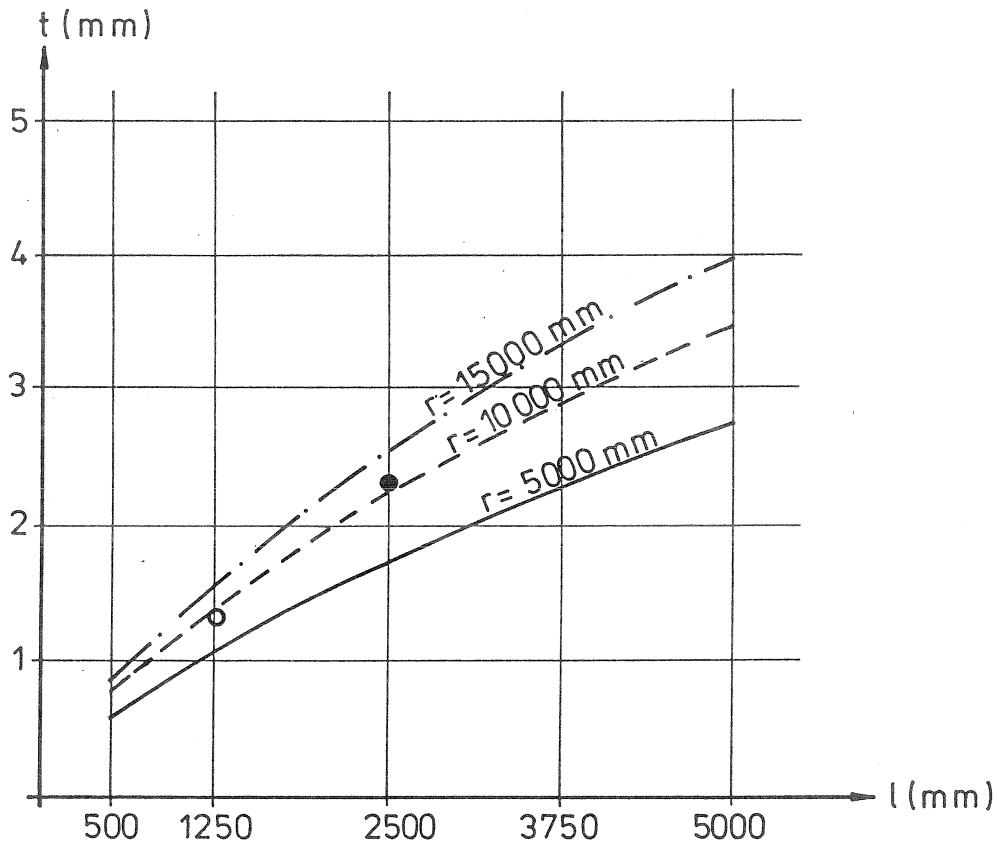


$$J_{\text{Rand}} = 0,7 J_{y_0} \geq 20 \text{ cm}^4$$
$$J_{\text{Ring}} = 0,5 J_{y_0} \geq 15 \text{ cm}^4$$



$$J_{\text{Rand}} = J_{y_0}$$

Bild 8.2  
Mindeststeifigkeit der Rand- und Ring-  
versteifungsprofile



- o Versuchsergebnis V2A-Stahl
- Versuchsergebnis emaillierter Stahl

Bild 8.3  
Erforderliche Blechdicke zwischen  
den Ringversteifungen

Bei dem so ermittelten Gesamt-Trägheitsmoment handelt es sich um Querschnittswerte ohne Einrechnung des mittragenden Wandbleches. Wenn mehrere Ringsteifen angeordnet werden, sind die in Bild 8.2 aufgezeigten Aufteilungen möglich. Mit  $n$  Ringen =  $n$  Wandfeldern sind für  $n \geq 2$  folgende Mindestwerte für die einzelnen Steifen zu wählen:

$$J_{yRand} = 0,7 \cdot J_{y0} \geq 20 \text{ cm}^4$$

$$J_{yRing} = 0,5 \cdot J_{y0} \geq 15 \text{ cm}^4$$

Für  $n = 1$  wird  $J_{yRand} = J_{y0}$ .

### 8.2 Mindestdicke der Behälterwand

Wie die Messungen gezeigt haben (s. Bild 7.4 und 7.7), nimmt die Wandsteifigkeit mit größer werdendem Ringabstand ab. Aus der Kenntnis, daß ein 1,25 mm dickes Blech mit einer Zylinderlänge von 1,23 m zwischen den Ringversteifungen im Versuch einem Unterdruck von 150 mm WS standhält und eine Zylinderlänge von 2,50 m ein 2,2 mm dickes Wandblech erfordert, läßt sich aus den Versuchsergebnissen folgende Beziehung für die erforderliche Mindestdicke des Wandbleches aufstellen (vgl. Bild 8.3).

$$t_{\min} = 5,5 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{l^2 \cdot r} \quad (\text{mm})$$

Hierin ist  $l$  der Abstand der Ringsteifen untereinander bzw. der unteren Ringsteife vom Behälterboden.

### 8.3 Beispiel

Ein Behälter mit 18,80 m Durchmesser hat vier gleich hohe Schüsse von 1,40 m mit  $t = 3,4 \text{ mm}$ ,  $2,4 \text{ mm}$ ,  $1,8 \text{ mm}$  und  $1,8 \text{ mm}$ . Das Trägheitsmoment der Ringsteifen beträgt hierfür

$$J_{y0} \geq 20 + 0,015 \cdot 18,8^2 \cdot 5,6 = 50 \text{ cm}^4$$

Am oberen Rand ist eine Randsteife mit

$$J_{yRand} = 0,7 \cdot 50 = 35 \text{ cm}^4.$$

vorzusehen, z.B. L 75•50•6,5 mit  $J_y = 43,6 \text{ cm}^4$ .

Bei einem Ringabstand von 1400 mm beträgt die Mindestblechdicke

$$t = 5,5 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{1400^2 \cdot 9400} = 1,45 \text{ mm} < 1,8 \text{ mm}.$$

Zwischen dem 2. und 3. sowie zwischen dem 3. und 4. Schuß ist

eine Ringsteife mit

$$J_{y\text{Ring}} \geq 0,5 \cdot 50 = 25 \text{ cm}^4$$

vorzusehen, z.B. L 70·50·6 mit  $J_y = 33,5 \text{ cm}^4$ .

Die mittlere Blechdicke der beiden unteren Schüsse beträgt

$$t_m = (3,4 + 2,4)/2 = 2,9 \text{ mm}$$

gegenüber einer Mindestblechdicke von

$$t = 5,5 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{2800^2 \cdot 9400} = 2,3 \text{ mm}$$

Neben dem oberen Randwinkel sind somit noch zwei weitere Ringsteifen erforderlich.

## 9.0 Zusammenfassung und Ausblick

Die bekannten Last- und Berechnungsansätze führen bei dünnwandigen Güllebehältern zu unbefriedigenden Ergebnissen. Deshalb wurden an Modellen natürlicher Größe Belastungsversuche durchgeführt, wobei durch Aufbringen von Unterdruck eine gleichmäßig verteilte Belastung erzeugt wurde.

Aufgrund der durchgeführten Belastungsversuche können für Güllebehälter aus miteinander verschraubten Wandplatten Konstruktionshinweise angegeben werden, die zu einer ausreichend sicheren Konstruktion führen. Für den Lastfall "Wind auf den leeren Behälter" wird in Kapitel 8 für die Behälterkonstruktion die erforderliche Mindestdicke der Wandplatten angegeben und für die Rand- und Ringversteifungen die erforderliche Mindeststeifigkeit festgelegt.

Die durchgeführten Messungen an Behältern natürlicher Größe mit Wanddickenverhältnissen  $r/t > 2500$  stellen lediglich erste Tastversuche dar, um Aufschlüsse über das Beulverhalten dünnwandiger Konstruktionen zu erhalten (siehe Bild 8.3).

Um die tatsächliche Standsicherheit (Beulsicherheit) der Behälterkonstruktion ermitteln zu können, sind weitere empirische

nische und theoretische Untersuchungen erforderlich. Hierfür sind zwei Hauptschwerpunkte zu nennen:

- die genauere Erfassung der Windbelastung für die gedrungene Behälter und
- die Reduzierung der sich nach DIN 18800 T4 und nach DAST-Ri 013 ergebenden Beulsicherheiten für gedrungene, dünnwandige Behälter mit Verhältnissen  $r/t \gg 2500$  durch theoretische Untersuchungen.

Es wird empfohlen, das in Abschnitt 8 dargestellte Bemessungsverfahren in DIN 11622 T3 - Gärfuttersilos und Güllebehälter aus Stahl - aufzunehmen.

#### Literaturverzeichnis

- [1] E DIN 18800 Teil 1 Stahlbauten, Bemessung und Konstruktion, 03/1988
- [2] E DIN 18800 Teil 3 Stahlbauten, Plattenbeulen, 03/1988
- [3] E DIN 18800 Teil 4 Stahlbauten, Schalenbeulen, 10/1988
- [4] DIN 18914 Dünnwandige Rundsilos aus Stahl, Ausgabe September 1985
- [5] DIN 11622 Blatt 1 Gärfutterbehälter, Bemessung, Ausführung, Beschaffenheit. Allgemeine Richtlinien für Hoch- und Tiefbehälter, Ausgabe August 1973.
- [6] DIN 11622 Blatt 4 Gärfutterbehälter, Bemessung, Ausführung, Beschaffenheit. Gärfutterbehälter aus Stahl. Ausgabe August 1973
- [7] DIN 4119 Teil 1 Oberirdische zylindrische Flachboden-Tankbauwerke aus metallischen Werkstoffen. Grundlagen, Ausführung, Prüfungen. Ausgabe Juni 1979.
- [8] DIN 4119 Teil 2 Oberirdische zylindrische Flachboden-Tankbauwerke aus metallischen Werkstoffen. Berechnung. Ausgabe Februar 1980.

- 
- [9] DIN 1055 Teil 4 Lastannahmen für Bauten. Verkehrslasten, Windlasten bei nicht schwingungsanfälligen Bauwerken. Ausgabe 08/1986
- [10] DIN 4112 Fliegende Bauten. Richtlinien für Bemessung und Ausführung. Ausgabe Februar 1983.
- [11] DIN 11535 Blatt 1 Gewächshäuser; Grundsätze für Berechnung und Ausführung. Ausgabe Juli 1974.
- [12] EKS Buckling of Steel Shells. European Recommendations. Europäische Konvention für Stahlbau. Fourth Edition 1988.
- [13] Martens, P.: Silo-Handbuch, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1988.
- [14] Stracke, M.: Stabilität kurzer stählerner Kreiszyinderschalen unter Außendruck. Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf 1987.
- [15] Klöppel, K.; Glock, D.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zu den Traglastproblemen biegeweicher, in die Erde eingebetteter Rohre. Heft 10, Veröffentlichung des Institutes für Statik und Stahlbau der Technischen Hochschule Darmstadt.
- [16] Kalksandstein Information GmbH & Co. KG KS-Mauerwerk; Konstruktion und Statik. Hannover 1979.
- [17] DAST-Richtlinie 013: Beulsicherheitsnachweise für Schalen. Deutscher Ausschuß für Stahlbau, Juli 1980.
- [18] Herber, K.-H.: Vorschlag von Berechnungsgrundlagen für Beul- und Traglasten von Schalen. Der Stahlbau, Heft 5 (1966).
- [19] Vereinigung der Technischen Überwachungsvereine e.V. Essen (Hrsg.): AD-Merkblatt B6 - Zylindrische Mäntel unter äußerem Überdruck. Berlin: Heymanns/Beuth 1983
- [20] Maher, F.-J.: Wind Loads on Dome-Cylinder and Dome-Cone Shapes. Proc. of the American Soc. of Civil Eng., Journal of Structural Division 92 (1966), No. St 5 (Oct), S. 79-96.
- [21] Gretler, W.: Beulversuche an zylindrischen Modellen im Windkanal. Institut für Strömungslehre und Gasdynamik, TU Graz (1978).
- [22] Resinger, F.; Greiner, R.: Kreiszyinderschalen unter Winddruck-Anwendung auf die Beulberechnung oberirdischer Tankbauwerke. Der Stahlbau, Heft 3 (1981).
- [23] Ziölko, J.: Modelluntersuchungen der Windeinwirkung auf Stahlbehälter mit Schwimmdach. Der Stahlbau, Heft 11 (1978).
- [24] Eßlinger, M.; Ahmed, S.-R.; Schroeder, H.-H.: Stationäre Windbelastung offener und geschlossener kreiszyindrischer Silos. Der Stahlbau, Heft 12 (1971).



Anhang

- Anlage 1        Untersuchte Güllebehälter
- Anlage 2        Konstruktion der Güllebehälter
- Anlage 3        Stabilitätsuntersuchungen der Behälterwand
- Anlage 4        Windlastansätze
- Anlage 5        Rechnerische Parameterstudien
- Anlage 6        Untersuchungen am emaillierten Behälter
- Anlage 7        Untersuchungen am Behälter aus V2A-Stahl

A N H A N G   Z U M   S C H L U S S B E R I C H T  
für Forschungsvorhaben

Das Beulverhalten dünnwandiger Güllebehälter aus Stahl  
mit Waddickenverhältnissen  $r/t > 2500$   
unter rotationssymmetrischem Außendruck

Kurztitel: Beuluntersuchungen an Güllebehältern

Finanziert vom Institut für Bautechnik  
Gesch.-Z.: IV/1-5-500/88

---

Anhang

- |          |  |
|----------|--|
| Anlage 1 | Untersuchte Güllebehälter                  |
| Anlage 2 | Konstruktion der Güllebehälter             |
| Anlage 3 | Stabilitätsuntersuchungen der Behälterwand |
| Anlage 4 | Windlastansätze                            |
| Anlage 5 | Rechnerische Parameterstudien              |
| Anlage 6 | Untersuchungen am emaillierten Behälter    |
| Anlage 7 | Untersuchungen am Behälter aus V2A-Stahl   |

Anlage 1      Untersuchte Güllebehälter

Verzeichnis der Lieferanten

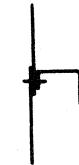
1. APA Armaturen- und Anlagenbau GmbH  
Robert-Koch-Str. 36  
2000 Hamburg



2. Duräumat  
Stalleinrichtungen GmbH & Co. KG  
Hamburger Chaussee 9  
2067 Reinfeld



3. Erich Stallkamp ESTA GmbH  
Industriegebiet West  
2843 Dinklage



4. farmatic  
Silotechnik GmbH  
Kolberger Str. 13  
2353 Nortorf



5. Henze Harvestore GmbH  
Schmelzerstr. 28  
4750 Unna-Königsborn



6. J.O.Z. Agrotechnische  
Handelonderneming B.V.  
Rijksweg  
1756 EJ't Zand - Holland



7. Lipp GmbH  
Maschinen- und Stahlsilobau  
7097 Tannhausen



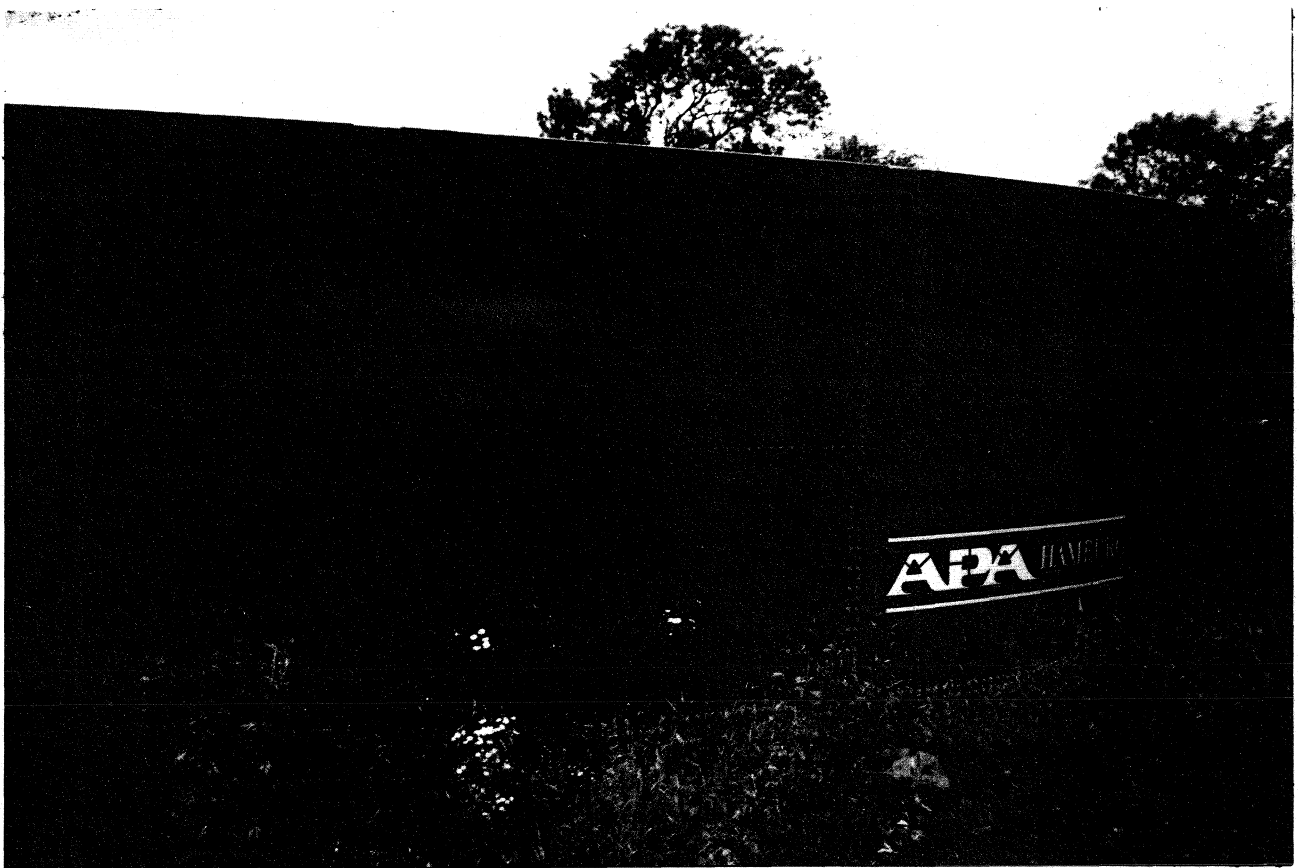
8. NEUERO Landtechnik  
4520 Melle 1



Anlage 2      Konstruktion der Güllebehälter

Güllebehälter der Firma:

APA Armaturen- und Anlagenbau GmbH  
Robert-Koch-Str. 36  
2000 Hamburg



Hersteller: APA Armaturen- und Anlagenbau GmbH

Robert-Koch-Str. 36, 2000 Hamburg

Behälter:

Durchmesser: von 8,56 m bis 26,69 m

Höhe: bis 5,77 m

Wandbleche:

Länge: 2690,5 mm

Breite: 1480 mm

Schubhöhe: 1430 mm

Materialgüte: (0,8) St 37

Korrosionsschutz: Emaille

Schrauben:

Durchmesser: 12,7 mm

Festigkeitsklasse: 8.8

Oberes Randprofil:

Profil L 60 x 6 Stahl St 37

Zwischenprofil:

kein Zwischenprofil

Unteres Randprofil:

Profil L 60 x 6 Stahl St 37

Hersteller: APA Armaturen- und Anlagenbau GmbH

	Schuß von oben	1 d = 10 m h = 5 m	2 d = 18 m h = 5 m	3 d = 24 m h = 5 m
Durchmesser (m)		10,27	18,84	23,98
Höhe (m)		5,77	4,34	2,91
Wandblech Dicke t (mm)	1	2,80	2,80	2,80
	2	2,80	3,00	4,00
	3	2,80	5,00	
	4	4,00		
	5			
Oberes Rand- profil		L 60 x 6	L 60 x 6	L 60 x 6
Zwischen- profil	3 + 4			
	2 + 3			
	1 + 2			
Unteres Rand- profil		L 60 x 6	L 60 x 6	L 60 x 6

### Konstruktion der Behälter

Glatte Wandbleche aus emailliertem Stahl



Güllebehälter der Firma:

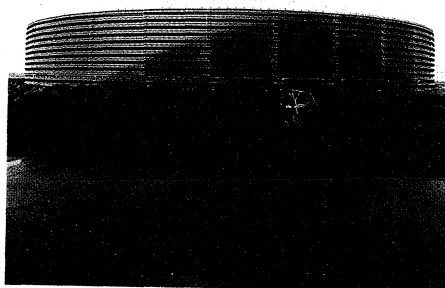
Duräumat  
Stalleinrichtungen GmbH & Co. KG  
Hamburger Chaussee 9  
2067 Reinfeld



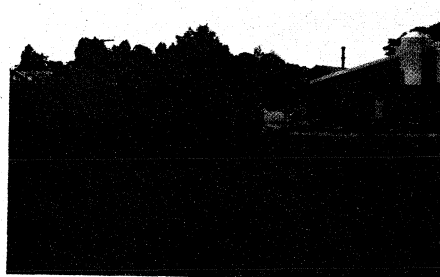
Der einzige Stahlbehälter, der voll in das Erdreich eingebaut werden kann. Einfahrtsschutz und Sicherheitszaun nach Vorschrift.



Aufstockbarer Güllesilo mit Anbaustützen zum späteren Einbau eines Propeller-Rührgerätes.



Hochsilo mit Mittelsäule und Planenabdeckung gegen Geruchsbelästigung.



Hochsilo, aufgestockt, ungleichmäßig angeschüttet, in Verbindung mit Rohrentmischung im Maststall und P. o. V. (Pumpe ohne Vorgrube).

Hersteller: Duräumat, Stalleinrichtungen Gmbh & Co. KG

Hamburger Chaussee 9, 2067 Reinfeld

Behälter:

Durchmesser: von 8,00 m bis 20,00 m

Höhe: bis 4,00 m

Wandbleche:

Länge: 1880 mm

Breite: 2000 mm

Schubhöhe: 2000 mm

Materialgüte: St 37

Korrosionsschutz: kunststoffbeschichtet

Schrauben:

Durchmesser: 20,0 mm

Festigkeitsklasse: 8.8

Oberes Randprofil:

kein oberes Randprofil

Zwischenprofil:

kein Zwischenprofil

Unteres Randprofil:

kein unteres Randprofil

(Ankerschrauben)

Hersteller: Duräumat GmbH & Co. KG

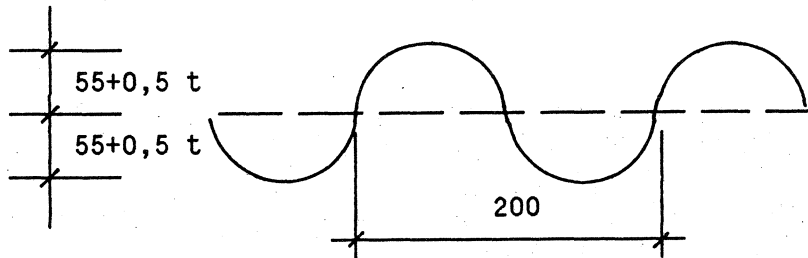
	Schuß von oben	1 d = 10 m h = 5 m	2 d = 18 m h = 5 m	3 d = 24 m h = 5 m
Durchmesser (m)		10,00	18,00	24,00
Höhe (m)		4,00	4,00	4,00
Wandblech Dicke t (mm)	1	2,75	2,75	2,75
	2	2,75	3,25	5,00
	3			
	4			
	5			
Oberes Rand- profil		./.		
Zwischen- profil	3 + 4			
	2 + 3	./.		
	1 + 2			
Unteres Rand- profil	Ankerschrauben			

**Konstruktion der Behälter**

Gewellte, kunststoffbeschichtete Wandbleche  
(Querschnittswerte siehe folgende Seite)

Hersteller: Duräumat GmbH & Co. KG

Wellung 200/(55 + 0,5 t)



idealisierte Blechdicken

$$t_{i,A} = A/b \quad (\text{mm})$$

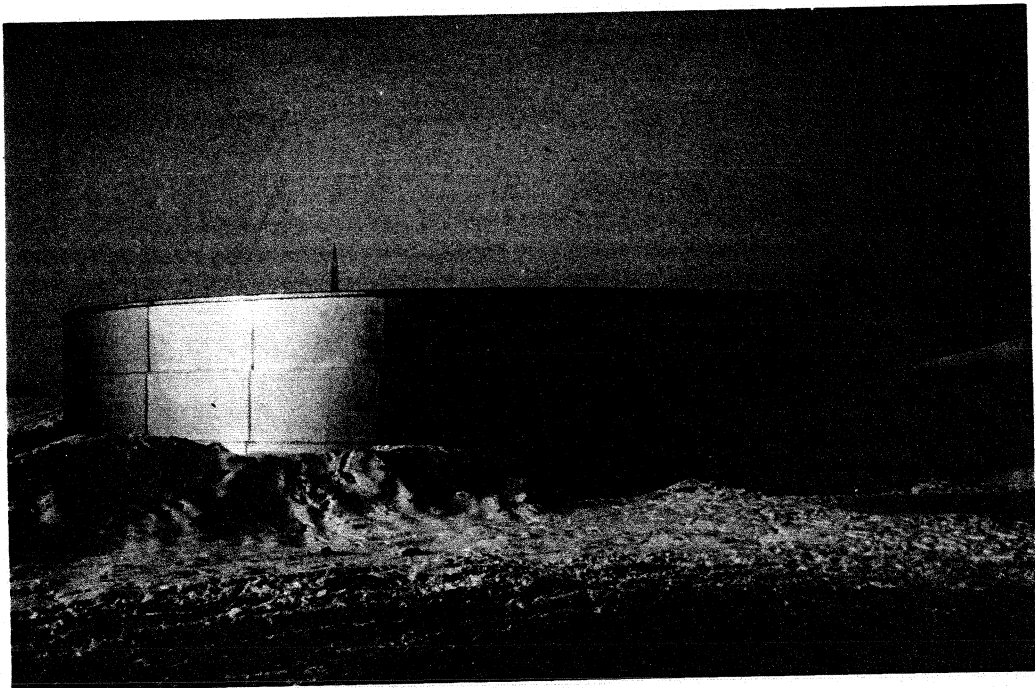
$$t_{i,J} = \sqrt{\frac{12 \cdot J}{b}} \quad (\text{mm})$$

Blechdicke t (mm)	Fläche A (cm <sup>2</sup> /m)	Trägheitsmoment J (cm <sup>4</sup> /m)	idealisierte Blechdicke	
			t <sub>i,A</sub> (mm/m)	t <sub>i,J</sub> (mm/m)
2,75	32,75	130,87	3,28	25,04
3,25	38,70	155,63	3,87	26,53
5,00	59,54	246,52	5,95	30,93

Querschnittswerte

Güllebehälter der Firma:

Erich Stallkamp ESTA GmbH  
Industriegebiet West  
2843 Dinklage



Hersteller: Erich Stallkamp ESTA GmbH

Industriegebiet West, 2843 Dinklage

Behälter:

Durchmesser: von 7,76 m bis 22,50 m

Höhe: bis 4,91 m

Wandbleche:

Länge: 2500 mm

Breite: 1250 mm

Schußhöhe: 1220 mm

Materialgüte: V2A (Werkstnr.: 1.4301)

Korrosionsschutz: nichtrostender Stahl

Schrauben:

Durchmesser: 10,0 mm

Festigkeitsklasse: V2A

Oberes Randprofil:

Profil [ 80 x 50 x 1,5 Stahl V2A

Zwischenprofil:

Profil [ 80 x 50 x 1,5 Stahl V2A

Unteres Randprofil:

Profil [ 80 x 50 x 1,5 Stahl V2A

Hersteller: Erich Stallkamp ESTA GmbH

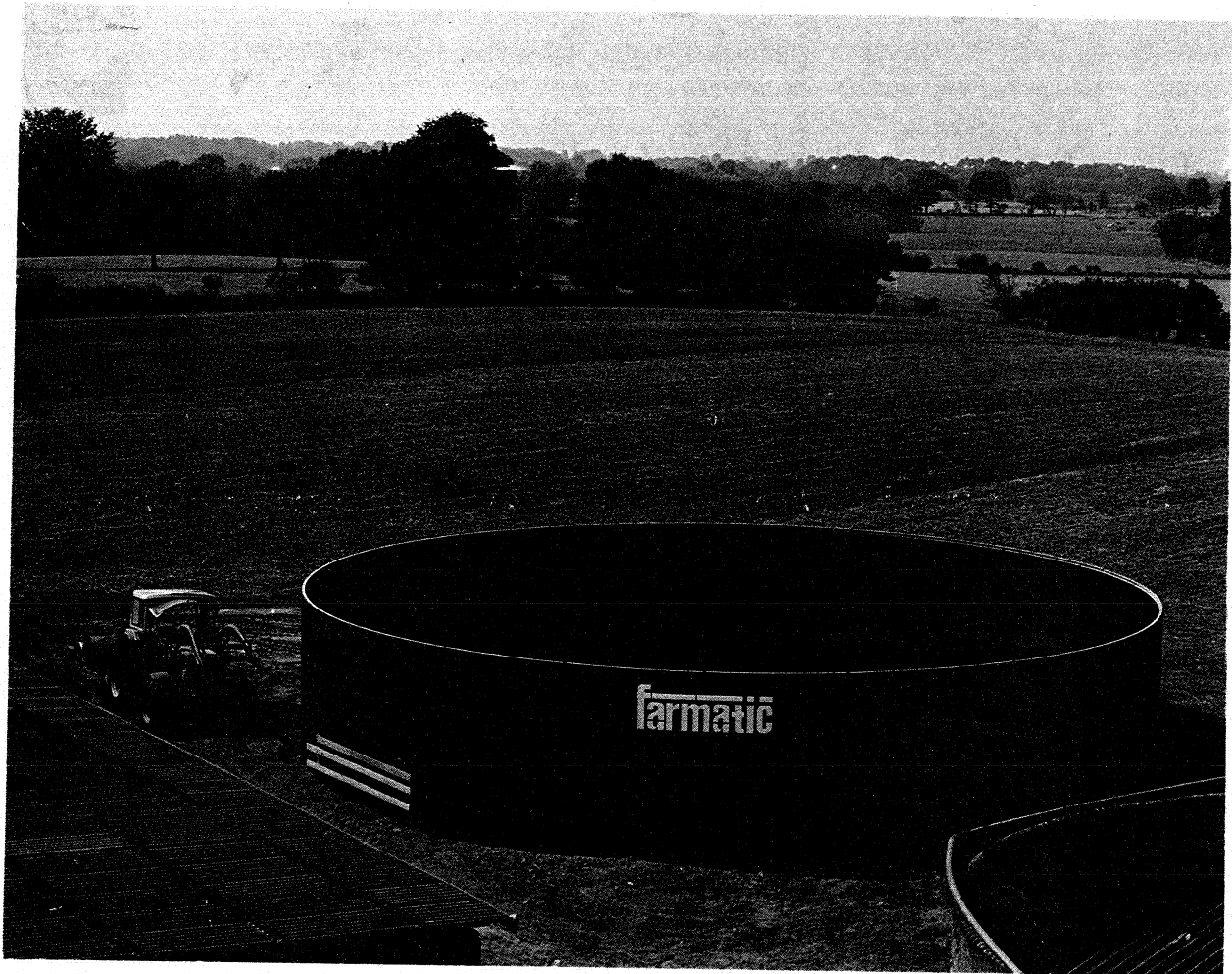
	Schuß von oben	1 d = 10 m h = 5 m	2 d = 18 m h = 5 m	3 d = 24 m h = 5 m
Durchmesser (m)		10,86	18,62	22,50
Höhe (m)		4,91	4,91	4,91
Wandblech Dicke t (mm)	1	1,25	1,25	1,25
	2	1,25	1,25	1,25
	3	1,25	1,50	2,00
	4	1,25	2,00	2,50
	5			
Oberes Randprofil		[80x50x1,5	[80x50x1,5	[80x50x1,5
Zwischenprofil	3 + 4			
	2 + 3			
	1 + 2	[80x50x1,5	[80x50x1,5	[80x50x1,5
Unteres Randprofil		[80x50x1,5	[80x50x1,5	[80x50x1,5

Konstruktion der Behälter

Die Wandbleche bestehen aus glattem, nichtrostenden V2A Stahl  
(Werkstoffnummer 1.4301)

Güllebehälter der Firma:

farmatic  
Silotechnik GmbH  
Kolberger Str. 13  
2353 Nortorf





Hersteller: farmatic Silotechnik GmbH

Kolberger Str. 13, 2353 Nortorf

Behälter:

Durchmesser: von 9,16 m bis 25,95 m

Höhe: bis 7,12 m

Wandbleche:

Länge: 2500 mm

Breite: 1238 mm

Schubhöhe: 1187 mm

Materialgüte: St 37-2

Korrosionsschutz: Emaille

Schrauben:

Durchmesser: 12,7 mm

Festigkeitsklasse: 8.8

Oberes Randprofil:

Profil L 60 x 6 Stahl St 37 oder

Profil 2 L 60 x 6 Stahl St 37

Zwischenprofil:

Profil L 50 x 5 Stahl St 37

Unteres Randprofil:

Profil L 60 x 6 Stahl St 37

Hersteller: farmatic Silotechnik GmbH

	Schuß von oben	1 d = 10 m h = 5 m	2 d = 18 m h = 5 m	3 d = 24 m h = 5 m
Durchmesser (m)		10,69	18,32	24,42
Höhe (m)		4,75	4,75	4,75
Wandblech Dicke t (mm)	1	1,80	2,23	2,83
	2	2,23	3,50	3,50
	3	2,23	3,50	4,30
	4	3,18	4,30	6,30
	5			
Oberes Rand- profil		L 60 x 6 *)	2 L 60 x 6 *)	2 L 60 x 6 **)
Zwischen- profil	3 + 4			
	2 + 3	L 50 x 5	L 50 x 5	L 50 x 5
	1 + 2			
Unteres Rand- profil		L 60 x 6	L 60 x 6	L 60 x 6

#### Konstruktion der Behälter

Die Wände bestehen aus glatten, emaillierten Blechen

\*) Wird auch bei h = 7,12 m eingesetzt.

\*\*\*) Wird auch bei h = 5,94 m eingesetzt.

Güllebehälter der Firma:

Henze Harvestore GmbH  
Schmelzerstr. 28  
4750 Unna-Königsborn



Hersteller: Henze Harvestore GmbH

Schmelzerstr. 28, 4750 Unna-Königsborn

Behälter:

Durchmesser: von 6,00 m bis 35,00 m

Höhe: bis 7,00 m

Wandbleche:

Länge: 2681 mm

Breite: 1405 mm

Schußhöhe: 1400 mm

Materialgüte: St 37, St 52

Korrosionsschutz: Emaille

Schrauben:

Durchmesser: 12,7 mm

Festigkeitsklasse: 8.8 + 10.9

Oberes Randprofil:

Profil L 75 x 50 x 6,5 Stahl St 37

Zwischenprofil:

Profil L 75 x 50 x 6,5 Stahl St 37

Unteres Randprofil:

Profil L 50 x 5 Stahl St 37

Hersteller: Henze Harvestore GmbH

	Schuß von oben	1 d = 10 m h = 5 m	2 d = 18 m h = 5 m	3 d = 24 m h = 5 m
Durchmesser (m)		10,20	18,80	25,60
Höhe (m)		5,60	5,60	5,60
Wandblech Dicke t (mm)	1	1,80	1,80	1,80
	2	1,80	1,80	2,40
	3	1,80	2,40	3,40
	4	2,40	3,40	4,20
	5			
Oberes Rand- profil		L 75x50x6,5 *)	L 75x50x6,5 *)	L 75x50x6,5 *)
Zwischen- profil	3 + 4			
	2 + 3			
	1 + 2	L 50 x 5	L 50 x 5	L 50 x 5
Unteres Rand- profil		L 50 x 5	L 50 x 5	L 50 x 5

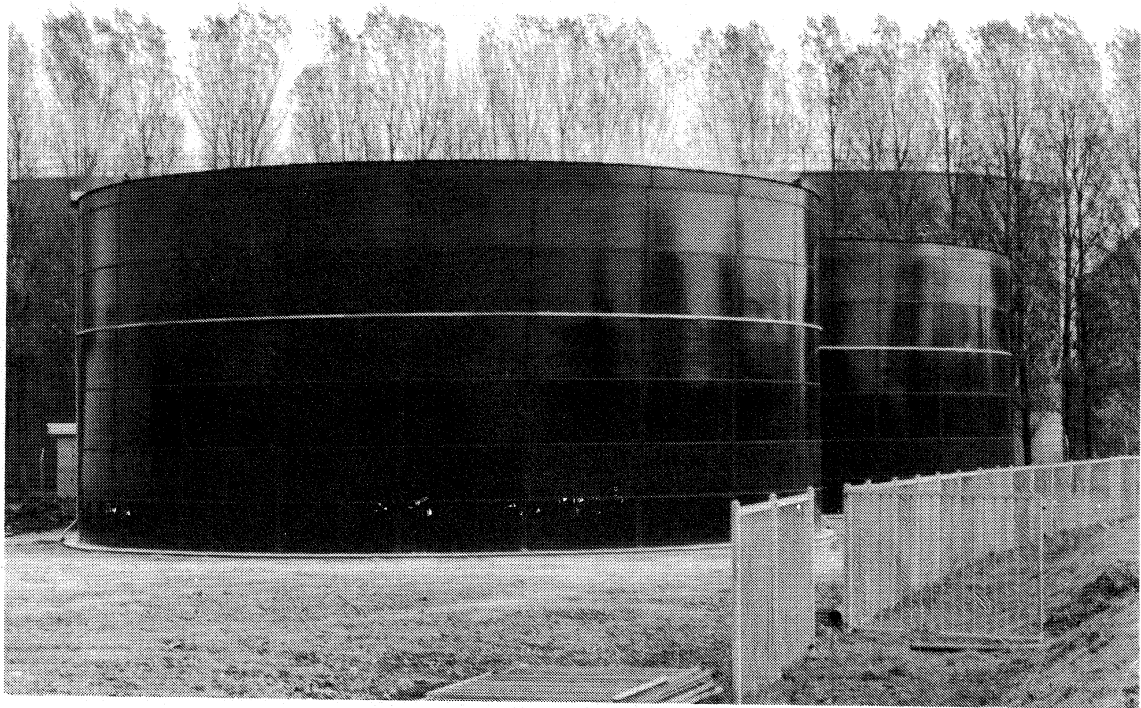
#### Konstruktion der Behälter

Die Wände bestehen aus glatten, emaillierten Blechen

\*) Wird auch bei h = 7,0 m eingesetzt.

Güllebehälter der Firma:

J.O.Z. Agrotechnische  
Handelsonderneming B.V.  
Rijksweg  
1756 EJ't Zand - Holland



Hersteller: J.O.Z. Agrotechnische Handelonderneming B. V.

Rijksweg, 1756 EJ't Zand - Holland

Behälter:

Durchmesser: von 8,56 m bis 25,67 m

Höhe: bis 5,77 m

Wandbleche:

Länge: 2690 mm

Breite: 1480 mm

Schubhöhe: 1430 mm

Materialgüte: St 37

Korrosionsschutz: Emaille

Schrauben:

Durchmesser: 12,7 mm

Festigkeitsklasse: 8.8

Oberes Randprofil:

Profil L 60 x 6 Stahl St 37

Profil L 70 x 7 Stahl St 37

Zwischenprofil:

kein Zwischenprofil

Unteres Randprofil:

Profil L 60 x 6 Stahl St 37

Hersteller: J.O.Z. Agrotechnische Handelonderneming B.V.

	Schuß von oben	1 d = 10 m h = 5 m	2 d = 18 m h = 5 m	3 d = 24 m h = 5 m
Durchmesser (m)		10,27	18,82	23,96
Höhe (m)		5,77	5,77	4,34
Wandblech Dicke t (mm)	1	2,80	2,80	2,80
	2	2,80	2,80	3,00
	3	2,80	4,00	5,00
	4	2,80	5,00	
	5			
Oberes Rand- profil		L 60 x 6	L 70 x 7	L 70 x 7
Zwischen- profil	3 + 4			
	2 + 3			
	1 + 2			
Unteres Rand- profil		L 60 x 6	L 60 x 6	L 60 x 6

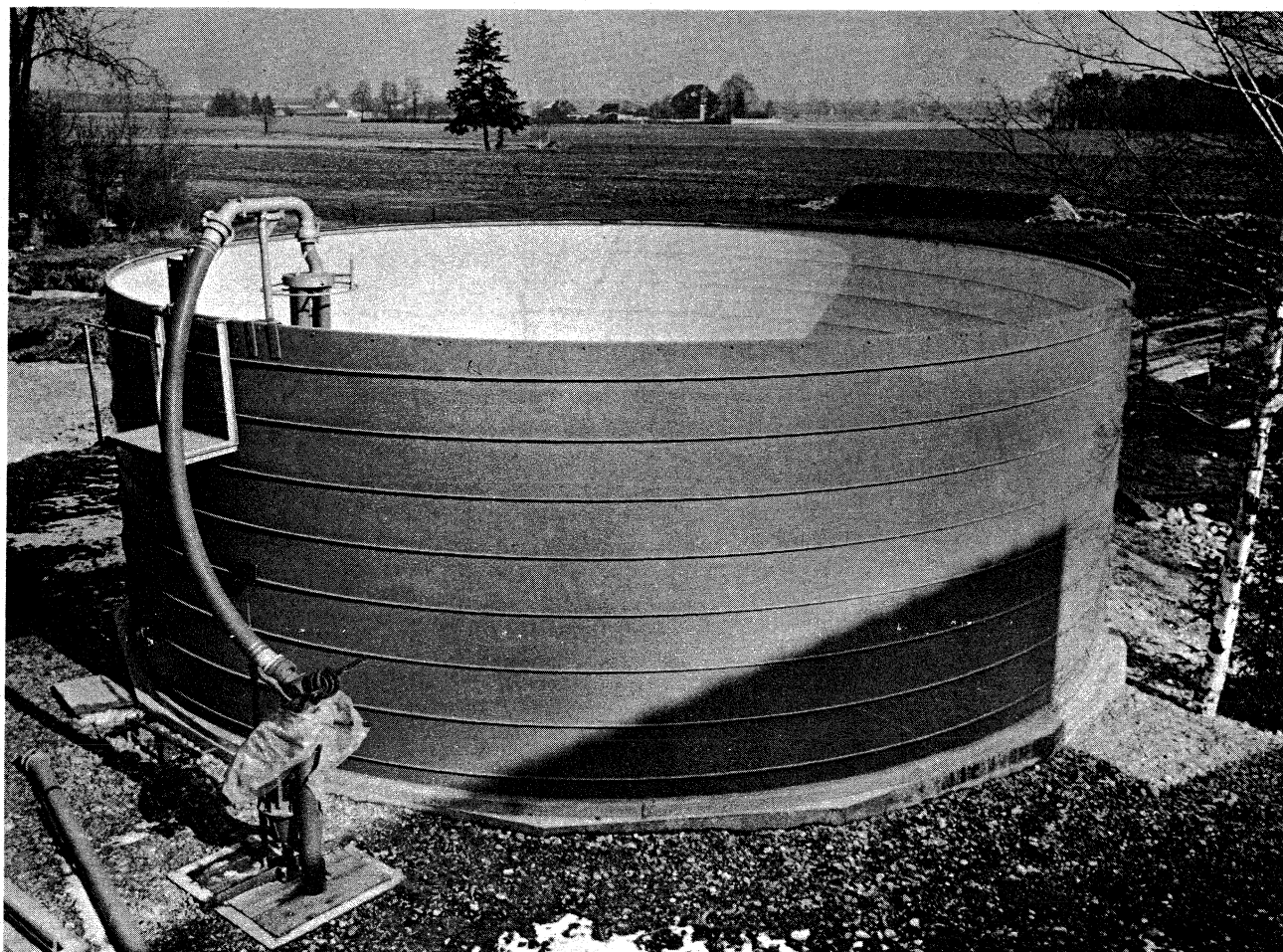
#### Konstruktion der Behälter

Die Wände bestehen aus glatten, emaillierten Blechen



Güllebehälter der Firma:

Lipp GmbH  
Maschinen- und Stahlsilobau  
7097 Tannhausen



Hersteller: Lipp Maschinen- und Stahlsilobau GmbH

7097 Tannhausen

Behälter:

Durchmesser: von 8,00 m bis 22,00 m

Höhe: bis 6,50 m

Wandbleche:

Länge: vom Coil

Breite: 500 mm (Coilbreite)

Schubhöhe: 400 mm

Blechbreite: 500 mm

Materialgüte: St 37-2

Korrosionsschutz: Edelstahl-Plat-Inox

Schrauben:

keine Schrauben

Oberes Randprofil:

Profil T 60 Stahl St 37 (d ≤ 10 m) oder

Profil T 80 Stahl St 37 (d ≤ 15 m) oder

Profil T 100 Stahl St 37 (d > 15 m)

Zwischenprofil:

kein Zwischenprofil

Unteres Randprofil:

kein unteres Randprofil

(Ankerschrauben)

Hersteller: Lipp Maschinen- und Stahlsilobau GmbH

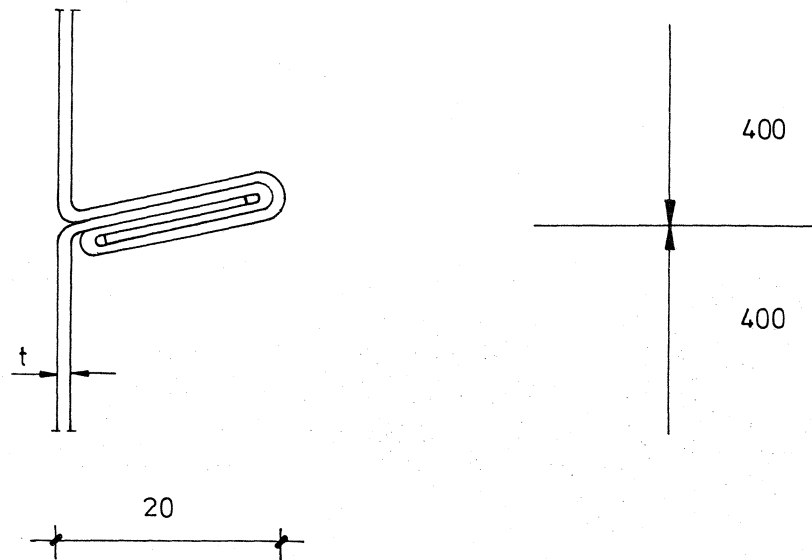
	Schuß von oben	1 d = 10 m h = 5 m	2 d = 18 m h = 5 m	3 d = 24 m h = 5 m
Durchmesser (m)		10,00		
Höhe (m)		4,80		
Wandblech Dicke t (mm)	1	Höhen- abschn.Dicke (m) (mm)	Höhen- abschn.Dicke (m) (mm)	Höhen- abschn.Dicke (m) (mm)
	2			
	3			
	4			
	5			
Oberes Rand- profil		T 60	T 80	T 100
Zwischen- profil	3 + 4			
	2 + 3			
	1 + 2			
Unteres Rand- profil	Ankerschrauben			

#### Konstruktion der Behälter

Die Wände werden aus 500 mm breiten Blechstreifen im Wickelverfahren hergestellt. Die Verbindung erfolgt über einen Falz.

(Querschnittswerte siehe folgende Seite)

System Lipp



Idealisierte Wanddicke:

Blechstreifenbreite      500 mm

Schußhöhe                400 mm

Fläche:

$$t_{i,A} = t \cdot 500/400 = 1,25 t$$

Trägheitsmoment:

$$t = 1,5 \text{ mm}$$

$$J_{Fa1z} \approx 5 \cdot 1,5 \cdot 20^3/12 = 5000 \text{ mm}^4$$

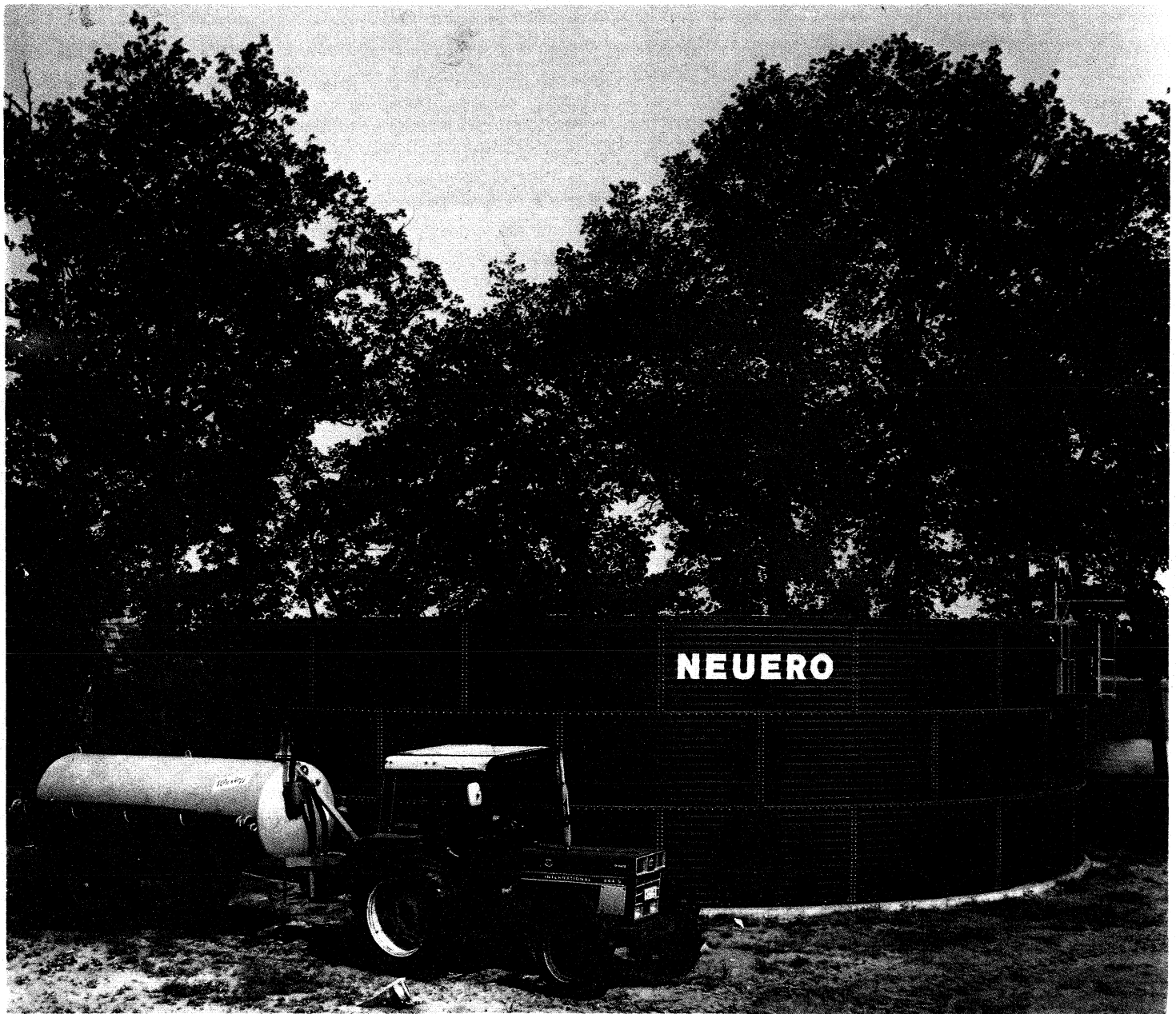
$$t_i = \sqrt[3]{12 \cdot 5000/400} = 5,31 \text{ mm}$$

$$t_{i,J} = t + 5,31/1,5 t = t + 3,54 t$$

$$t_{i,J} = 4,54 t$$

Güllebehälter der Firma:

NEUERO Landtechnik  
4520 Melle 1



Hersteller: NEUERO Landtechnik

4520 Melle 1

Behälter:

Durchmesser: von 9,83 m bis 26,82 m

Höhe: bis 6,60 m

Wandbleche:

Länge: 2808 mm

Breite: 1408 mm

Schubhöhe: 1320 mm

Materialgüte: St 37-2

Korrosionsschutz: kunststoffbeschichtet

Schrauben:

Durchmesser: 10 mm

Festigkeitsklasse: 8.8

Oberes Randprofil:

Profil L 80 x 65 x 6 Stahl St 37-2

Zwischenprofil:

kein Zwischenprofil

Unteres Randprofil:

Profil Flachst. Stahl St 37-2

(Ankerschrauben)

Hersteller: NEUERO Landtechnik, Melle

	Schuß von oben	1 d = 10 m h = 5 m	2 d = 18 m h = 5 m	3 d = 24 m h = 5 m
Durchmesser (m)		9,83	19,66	23,24
Höhe (m)		5,28	5,28	3,96
Wandblech Dicke t (mm)	1	1,50	2,00	2,0
	2	1,50	2,00	2,5
	3	1,50	3,00	3,5
	4	2,00	4,00	
	5			
Oberes Rand- profil		L 80x65x6 *)	L 80x65x6 *)	L 80x65x6
Zwischen- profil	3 + 4			
	2 + 3			
	1 + 2			
Unteres Rand- profil	Flachstahl			

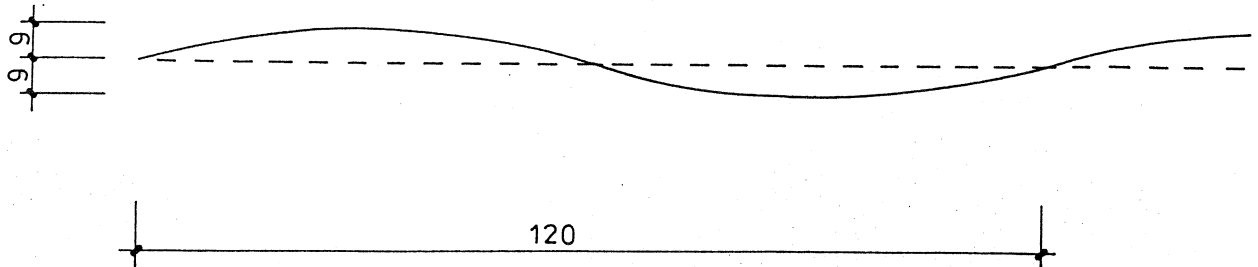
#### Konstruktion der Behälter

Die Wände bestehen aus gewellten, kunststoffbeschichteten Blechen.

\*) auch bei h = 6,60 m

NEUERO:

Wellung 120/9 mm



idealisierte Blechdicken

$$t_{i,A} = A/b \quad (\text{mm})$$

$$t_{i,J} = \sqrt{\frac{12 \cdot J}{b}} \quad (\text{mm})$$

Blech- dicke t (mm)	Fläche A (cm <sup>2</sup> /m)	Trägheits- moment J (cm <sup>4</sup> /m)	idealisierte Blechdicke	
			t <sub>i,A</sub> (mm/m)	t <sub>i,J</sub> (mm/m)
1,5	1,83	1,67	1,83	5,85
2,0	2,44	2,26	2,44	6,47
2,5	3,04	2,88	3,04	7,02
3,0	3,65	3,52	3,65	7,50
3,5	4,26	4,21	4,26	7,96
4,0	4,87	4,93	4,87	8,39

Querschnittswerte



**Anlage 3      Stabilitätsuntersuchungen der  
Behälterwand**

### 3.1 Beulsicherheitsnachweis E DIN 18800 Teil 4

Der Beulsicherheitsnachweis wird nach dem E DIN 18800 Teil 4 [3] für Kreiszyinderschalen mit abgestufter Wanddicke geführt. Die Abmessungen und Wanddicken für die einzelnen Fabrikate sind Anlage 2 entnommen.

Die Wellung der Fabrikate Duräumat, Neuero und die Falze des Systems Lipp wurde über das Trägheitsmoment durch eine idealisierte Blechdicke  $t_i$  ersetzt.

$$t_i = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot J}{b}}$$

Ersatzzylinder:

Entsprechend Abschnitt 5.3.2 Element 509 erstreckt sich die obere Schußlänge  $l_o$  bis zum oberen Rand jenes Schusses, dessen Wanddicke  $t_j$  die 1,5-fache Wanddicke überschreitet, maximal bis  $l/2$ .

$$l_m = l_o, \quad l_u = 1 - 2 l_o, \quad \text{wenn } l_o \leq l/3$$

$$l_m = l_u = 0,5 (1 - l_o), \quad \text{wenn } l/3 < l_o < l/2$$

Ersatzwindbelastung:

Ersatzwindbelastung für die Ermittlung der Umfangsdruckspannung

517 - Element 424 gilt sinngemäß, wenn in Gleichung (422) anstelle von  $\delta$  nach Gleichung (423)  $\delta^*$  nach Gleichung (511) eingesetzt wird.

$$\delta^* = 0,46 (1 + 0,037 m_B) \quad (511)$$

Hierin ist  $m_B$  nach Gleichung (512) zu bestimmen:

$$\text{Für } \frac{t_U}{t_0} \leq 0,4 \left( \frac{t_m}{t_0} + \frac{0,2}{l_0/l} + 2 \right):$$

$$m_B = 2,74 \sqrt{\frac{r}{l} \sqrt{\frac{r}{t_m^*}}} \quad (512 a)$$

$$\text{mit } t_m^* = (t_0 \cdot l_0 + t_m \cdot l_m + t_U \cdot l_U) / l$$

$$\text{Für } \frac{t_U}{t_0} > 0,4 \left( \frac{t_m}{t_0} + \frac{0,2}{l_0/l} + 2 \right):$$

$$m_B = 2,74 \cdot \beta \left( 0,92 + \frac{0,38}{(t_m/t_0)^2} \right) \sqrt{\frac{r}{l_0} \sqrt{\frac{r}{t_0}}} \quad (512 b)$$

mit  $\beta$  nach Bild 502.

Auf Seite 3 und 4 ist die Berechnung in tabellarischer Form durchgeführt.

Ifd. Nr.	Radius r (mm)	Längen				Blechdicken							Beiwert $\beta$ (-)	Umfangswelle $m_B$ (-)	Beiwert $\delta^*$ (-)
		l (mm)	$l_o$ (mm)	$l_m$ (mm)	$l_u$ (mm)	$t_o$ (mm)	$t_m$ (mm)	$t_u$ (mm)	$t^*_m$ (mm)	$\frac{l_o}{l}$ (-)	$\frac{t_m}{t_o}$ (-)	$\frac{t_u}{t_o}$ (-)			
1	5135	5770	2885	1443	1443	2,80	2,80	4,00	3,10	0,50	1,00	1,43	0,60	18,65	0,78
	9420	4340	2170	1085	1085	2,87	3,67	5,00	3,60	0,50	1,28	1,74	0,75	32,63	1,02
	11990	2910	1455	727,5	727,5	2,80	4,00	4,00	3,40	0,50	1,43	1,43	0,88	42,86	1,19
2	5000	4000	2000	1000	1000	25,04	25,04	25,04	25,04	0,50	1,00	1,00	0,50	11,52	0,66
	9000	4000	2000	1000	1000	25,04	26,53	26,53	25,79	0,50	1,06	1,06	0,51	17,76	0,76
	12000	4000	2000	1000	1000	25,04	30,94	30,94	27,89	0,50	1,24	1,24	0,68	21,60	0,83
3	5430	4910	2455	1228	1228	1,25	1,25	1,25	1,25	0,50	1,00	1,00	0,50	23,39	0,86
	9310	4910	2455	1228	1228	1,25	1,50	2,00	1,50	0,50	1,20	1,60	0,71	36,86	1,09
	11250	4910	2455	1228	1228	1,25	2,00	2,50	1,75	0,50	1,60	2,00	0,90	48,47	1,28
4	5345	4750	2375	1188	1188	2,02	2,23	3,18	2,36	0,50	1,10	1,57	0,65	21,65	0,83
	9160	4750	1188	1188	2375	2,23	3,50	3,90	3,38	0,25	1,57	1,75	0,78	44,92	1,22
	12210	4750	2375	1188	1188	3,17	4,30	6,30	5,08	0,50	1,36	1,99	0,85	40,81	1,15

Ermittlung der Beiwerte  $\beta$  und  $\delta^*$

Ifd. Nr.	Radius r (mm)	Längen				Blechkicken				$\frac{l_o}{l}$ (-)	$\frac{t_m}{t_o}$ (-)	$\frac{t_u}{t_o}$ (-)	Beiwert $\beta$ (-)	Umfangswelle $m_B$ (-)	Beiwert $\delta^*$ (-)
		l (mm)	l <sub>o</sub> (mm)	l <sub>m</sub> (mm)	l <sub>u</sub> (mm)	t <sub>o</sub> (mm)	t <sub>m</sub> (mm)	t <sub>u</sub> (mm)	t* <sub>m</sub> (mm)						
5	5100	5600	2800	1400	1400	1,80	1,80	2,40	1,95	0,50	1,00	1,33	0,55	18,70	0,78
	9400	5600	2800	1400	1400	1,80	2,40	3,40	2,35	0,50	1,33	1,89	0,80	33,72	1,03
	12800	5600	2800	1400	1400	2,10	3,40	4,20	2,95	0,50	1,62	2,00	0,92	44,82	1,22
6	5135	5770	2885	1443	1443	2,80	2,80	2,80	2,80	0,50	1,00	1,00	0,50	16,92	0,75
	9410	5770	2885	1443	1443	2,80	4,00	5,00	3,65	0,50	1,43	1,79	0,90	32,71	1,02
	11980	4340	2170	1085	1085	2,87	3,68	5,00	3,60	0,50	1,28	1,74	0,75	39,02	1,12
7	5000	4800	2400	1200	1200	6,81	6,81	6,81	6,81	0,50	1,00	1,00	0,50	14,56	0,71
	9000	5330	2670	1335	1335	6,81	9,84	12,78	9,08	0,50	1,44	1,88	0,88	25,67	0,90
	11000	5090	2545	1273	1273	7,14	11,02	14,91	10,06	0,50	1,54	2,09	0,90	30,45	0,98
8	4915	5280	2640	1320	1320	5,85	5,85	6,47	6,01	0,50	1,00	1,11	0,52	14,14	0,70
	9830	5280	2640	1320	1320	6,47	7,50	8,39	7,21	0,50	1,16	1,30	0,63	22,72	0,85
	11620	3960	1980	990	990	6,65	7,33	7,96	7,15	0,50	1,10	1,20	0,63	29,80	0,97

Ermittlung der Beiwerte  $\beta$  und  $\delta^*$

## a) Beulspannung

Ideale Beulspannung

$$\sigma_{\phi si} = \frac{t_o}{t_j} 0,92 E \frac{r}{l_o/\beta} \left[ \frac{t_o}{r} \right]^{1,5} \quad (503)$$

Bezogener Schlankheitsgrad

$$\bar{\lambda}_{s\phi} = \sqrt{\frac{\beta_s}{\sigma_{\phi si}}} \quad (201b)$$

Abminderungsfaktor

$$\bar{\lambda}_s \geq 1,2 : \alpha_1 = 0,65/\bar{\lambda}_s^2 \quad (203c)$$

(normal imperfektionsempfindlich)

Reale Beulspannung

$$\sigma_{\phi su} = \alpha_1 \cdot \beta_s \quad (202b)$$

Grenzbeulspannung

$$\text{grenz } \sigma_{\phi s} = \sigma_{\phi su}/1,1 \quad (205b)$$

## b) Membranspannung

Einwirkungen aus dem Wind w

$$w = (\delta^* + 0,6) \cdot q_w \cdot \gamma_F \cdot \psi_i \quad (\text{kN/m})$$

 $\delta^*$  Faktor zur Ermittlung der Ersatzdrucklast

0,6 Faktor für Windsog

 $q_w = 0,5 \text{ kN/m}^2$  max Staudruck [3] $\gamma_F = 1,5$  Teilsicherheitsbeiwert [1] $\psi_i = 0,9$  Kombinationswert [1]

Ringzugkraft

$$n_{\phi} = w \cdot r \quad (\text{kN/m})$$

$r$  (m)                      Radius des Behälters

Membranspannung

$$\sigma_{\phi} = n_{\phi} / (b \cdot t) \quad (\text{kN/cm}^2)$$

$$\hat{=} 10 n_{\phi} / (b \cdot t) \quad (\text{N/mm}^2)$$

$b = 100$  cm Breite

$t$  (cm) Wanddicke

Die Membranspannungen werden mit den tatsächlichen Blechdicken ermittelt (Duräumat, Neuero, Lipp)

c) Nachweis

$$\text{grenz } \sigma_{\phi s} > \sigma_{\phi} \quad \text{bzw.}$$

$$\gamma = \text{grenz } \sigma_{\phi s} / \sigma_{\phi} > 1$$

Auf den Seiten 7 und 8 wird die Beulsicherheit für die Güllebehälter ermittelt.

Ifd. Nr.	Radius	Er-satz-schuß-länge	Er-satz-schuß-dicke	tat-säch-liche Dicke	ideali-sierte Dicke	Bei-wert (vgl. S.3+4)	Bei-wert (vgl. S.3+4)	Wind-last	Ideale Beul-span-nung	Grenz-span-nung	Mem-bran-span-nung	Beul-sicher-heit
	r (mm)	l <sub>o</sub> (mm)	t <sub>o</sub> (mm)	t <sub>j</sub> (mm)	t <sub>j</sub> (mm)	β (-)	δ* (-)	w (kN/m <sup>2</sup> )	σ <sub>φsi</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	σ <sub>φs</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	σ <sub>φ</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	γ (-)
1	5135	2885	2,80	2,80	2,80	0,60	0,78	0,93	2,63	1,55	1,71	0,91
	9420	2170	2,87	2,80	2,80	0,75	1,02	1,09	3,43	2,03	3,68	0,55
	11990	1455	2,80	2,80	2,80	0,88	1,19	1,21	5,00	2,95	5,15	0,57
2	5000	2000	25,04	3,28	25,04	0,50	0,66	0,85	85,59	50,57	1,30	39,01
	9000	2000	25,04	3,28	25,04	0,51	0,76	0,92	65,07	38,45	2,52	15,26
	12000	2000	25,04	3,28	25,04	0,68	0,83	0,97	75,14	44,40	3,53	12,57
3	5430	2455	1,25	1,25	1,25	0,50	0,86	0,99	0,75	0,44	4,28	0,10
	9310	2455	1,25	1,25	1,25	0,71	1,09	1,14	0,81	0,48	8,50	0,06
	11250	2455	1,25	1,25	1,25	0,90	1,28	1,27	0,93	0,55	11,42	0,05
4	5345	2375	2,02	1,80	1,80	0,65	0,83	0,97	2,33	1,38	2,87	0,48
	9160	1188	2,23	2,23	2,23	0,78	1,22	1,23	4,41	2,61	5,05	0,52
	12210	2375	3,17	2,83	2,83	0,85	1,15	1,18	3,96	2,34	5,10	0,46

Beulsicherheitsnachweis



lfd. Nr.	Radius	Er-satz-schuß-länge	Er-satz-schuß-dicke	tat-säch-liche Dicke	ideali-sierte Dicke	Bei-wert (vgl. S.3+4)	Bei-wert (vgl. S.3+4)	Wind-last	Ideale Beul-span-nung	Grenz-span-nung	Mem-bran-span-nung	Beul-sicher-heit
	r (mm)	l <sub>0</sub> (mm)	t <sub>0</sub> (mm)	t <sub>j</sub> (mm)	t <sub>j</sub> (mm)	β (-)	δ* (-)	w (kN/m <sup>2</sup> )	σ <sub>φsi</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	σ <sub>φs</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	σ <sub>φ</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	γ (-)
5	5100	2800	1,80	1,80	1,80	0,55	0,78	0,93	1,28	0,76	2,64	0,29
	9400	2800	1,80	1,80	1,80	0,80	1,03	1,10	1,37	0,81	5,75	0,14
	12800	2800	2,10	1,80	1,80	0,92	1,22	1,23	1,99	1,18	8,74	0,13
6	5135	2885	2,80	2,80	2,80	0,50	0,75	0,91	2,19	1,29	1,67	0,77
	9410	2885	2,80	2,80	2,80	0,90	1,02	1,09	2,91	1,72	3,67	0,47
	11980	2170	2,87	2,80	2,80	0,75	1,12	1,16	3,45	2,04	4,97	0,41
7	5000	2400	6,81	1,88	6,81	0,50	0,71	0,88	10,12	5,98	2,35	2,54
	9000	2670	6,81	1,88	6,81	0,88	0,90	1,01	11,93	7,05	4,85	1,45
	11000	2545	7,14	1,88	6,81	0,90	0,98	1,07	13,03	7,70	6,24	1,23
8	4915	2640	5,85	1,83	5,85	0,52	0,70	0,88	7,68	4,54	2,36	1,93
	9830	2640	6,47	2,44	6,47	0,63	0,85	0,98	7,65	4,52	3,94	1,15
	11620	1980	6,65	2,44	6,47	0,63	0,97	1,06	10,05	5,94	5,05	1,18

Beulsicherheitsnachweis

### 3.2 Beulsicherheitsnachweis nach DAST-Richtlinie 013

Die Abschätzung der Beulsicherheit nach der DAST-Richtlinie 013 [17] erfolgt mit folgenden vereinfachenden Annahmen:

Der obere Rand wird als radial unverschieblich angenommen. Es wird eine ideale Blechdicke für die gewellten und gefalzten Bleche ermittelt (vgl. Anlage 1.2, 1.7 und 1,8).

Der Beulsicherheitsnachweis wurde für die aus allen Schußdicken gemittelte Blechdicke geführt.

Der Staudruck  $q_w = 0,5 \text{ kN/m}^2$  wird durch einen rotationssymmetrischen Unterdruck  $q = \delta \cdot \max q_w$  ersetzt. Der Windsog des oben offenen Behälters wird dadurch berücksichtigt, indem der Unterdruck um  $0,6 \max q_w$  erhöht wird.

Auf den beiden folgenden Seiten wird die Berechnung elektronisch mit einem eigenen Programm durchgeführt.

**DAST - Richtlinie 013**  
 Beulsicherheitsnachweis am Kreiszyylinder

=====

E-Modul: 2.10e+05 (N/mm\*\*2)      Wandmaterial: St 37.2  
 Fließspannung: 240.0 (N/mm\*\*2)      Querdehnzahl: 0.30  
 Sicherheitsbeiwerte (Ga) Lf H: 1.50      Lf HZ: 1.30 (Moment, Wind)

Forderung bei Last-Kombination:  
 $(Ga * Sx / Sx,u) ** 1.1 + (Ga * Sehi / Sehi,u) ** 1.1 + (Ga * Tau / Tau,u) ** 2 \leq 1.00$

zul. Last = krit. Beulsp. \* t / Ga      (kN/m) = (N/mm\*\*2) \* (mm) / (-)

Benutzte Einheiten bei Lasten: (kN/m), (kN/m\*\*2), (kNm)

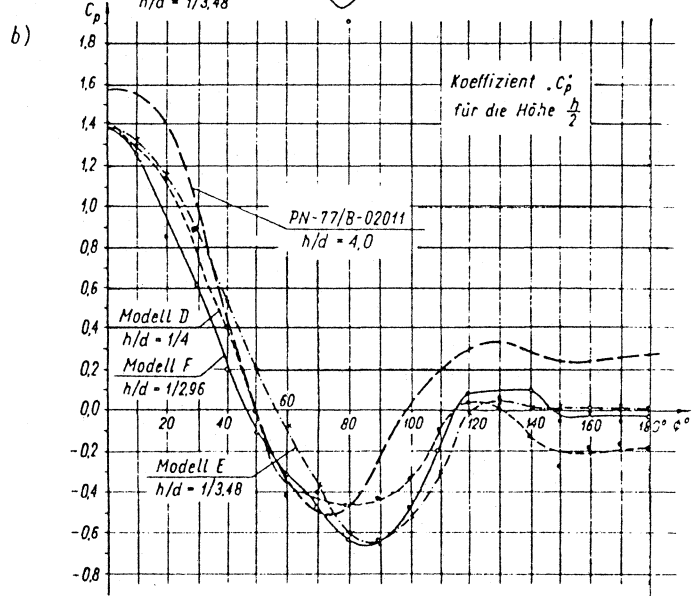
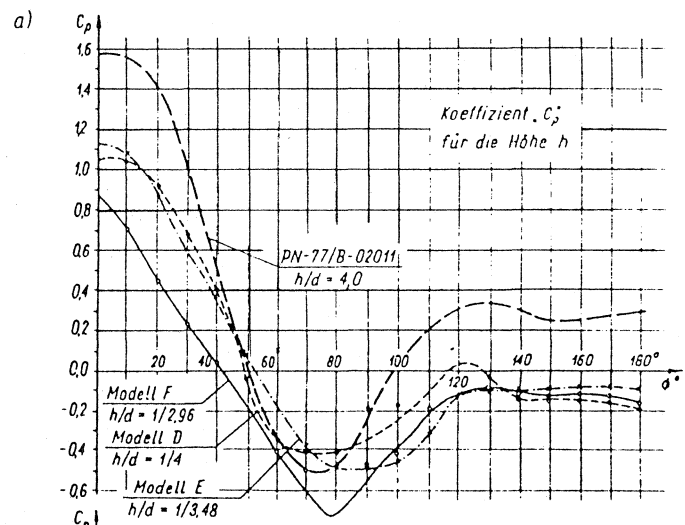
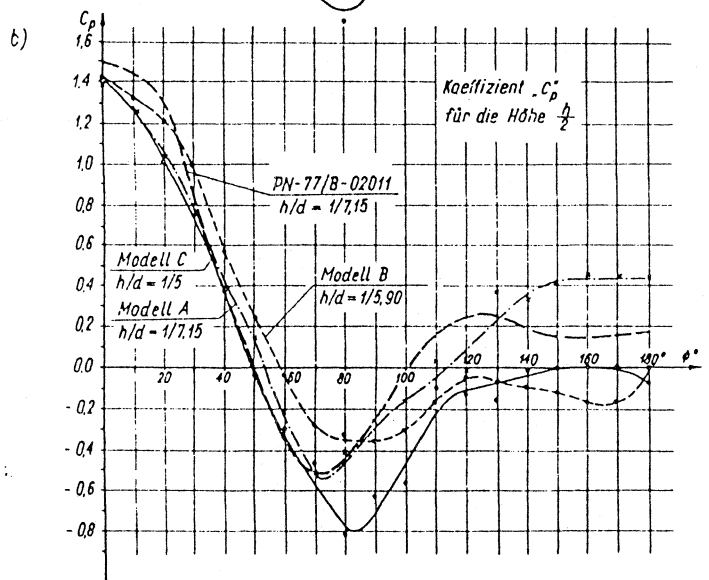
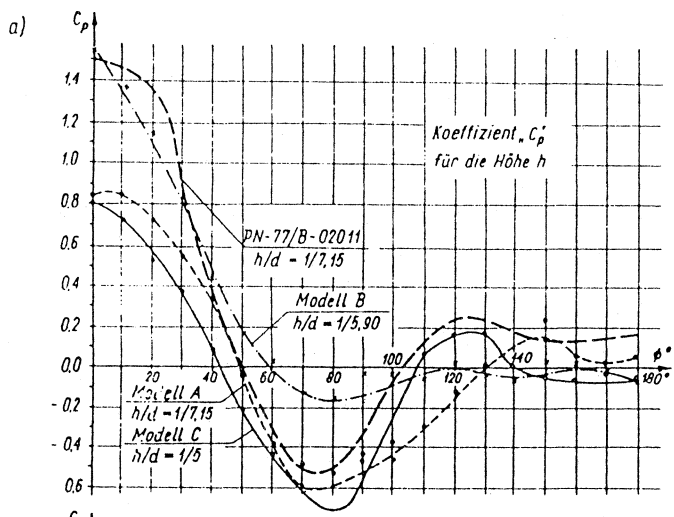
Lfd-Nr	t (mm)	Laenge (m)	Radius (m)	Lager o u	Lastart	vorh. L.wert (kN:m)	vorh. L.spänn ( N / mm ** 2 )	krit. Beulsp.	vorh. Gamma
①	3.10	5.77	5.135	α α	Wind, o	0.50	1.11	1.78	1.61
	3.60	4.34	9.420	α α	Wind, o	0.50	2.02	2.19	1.00
	3.40	2.91	11.990	α α	Wind, o	0.50	2.02	2.65	0.94
②	25.04	4.00	5.000	f e	Wind, o	0.50	0.12	35.86	296.06
	25.79	4.00	9.000	f e	Wind, o	0.50	0.23	27.94	124.01
	27.99	4.00	12.000	f e	Wind, o	0.50	0.29	27.35	95.17
③	1.25	1.22	5.430	α α	Wind, o	0.50	3.48	2.10	0.60
	1.25	3.69	5.430	α α	Wind, o	0.50	3.29	0.69	0.21
	1.25	1.22	9.310	α α	Wind, o	0.50	5.96	1.60	0.27
	1.58	3.69	9.310	α α	Wind, o	0.50	4.71	0.75	0.16
	1.25	1.22	11.250	α α	Wind, o	0.50	7.20	1.46	0.20
	1.92	3.69	11.250	α α	Wind, o	0.50	4.69	0.92	0.20
④	2.36	4.75	5.345	α α	Wind, o	0.50	1.58	1.41	0.89
	3.38	4.75	9.160	α α	Wind, o	0.50	2.06	1.84	0.89
	5.08	4.75	12.210	α α	Wind, o	0.50	1.89	2.94	1.55
⑤	1.95	5.60	5.100	α α	Wind, o	0.50	1.80	0.92	0.51
	2.35	5.60	9.400	α α	Wind, o	0.50	3.07	0.90	0.29
	2.95	5.60	12.800	α α	Wind, o	0.50	3.47	1.00	0.31

DAST - Richtlinie 013  
 Beulsicherheitsnachweis am Kreiszyylinder

=====

Lfd.Nr	t (mm)	Laenge (m)	Radius (m)	Lager o u	Lastart	vorh. L.wert (kN:m)	vorh. L.spann ( N / mm <sup>2</sup> )	krit. Beulsp.	vorh. Gamma
⑥	2.80	5.77	5.135	α α	Wind. o	0.50	1.23	1.53	1.24
	3.65	5.77	9.410	α α	Wind. o	0.50	1.91	1.68	0.88
	3.60	4.34	11.980	α α	Wind. o	0.50	2.66	1.94	0.73
⑦	6.81	4.80	5.000	α α	Wind. o	0.50	0.48	7.06	14.75
	9.08	5.33	9.000	α α	Wind. o	0.50	0.69	7.30	10.56
	10.06	5.09	11.000	α α	Wind. o	0.50	0.79	8.06	10.18
⑧	6.01	5.28	4.915	α α	Wind. o	0.50	0.53	5.37	10.12
	7.21	5.28	9.830	α α	Wind. o	0.50	0.98	4.99	5.08
	7.15	3.96	11.620	α α	Wind. o	0.50	1.27	6.04	4.77

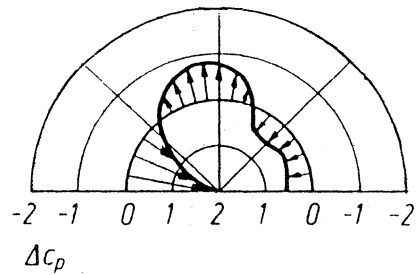
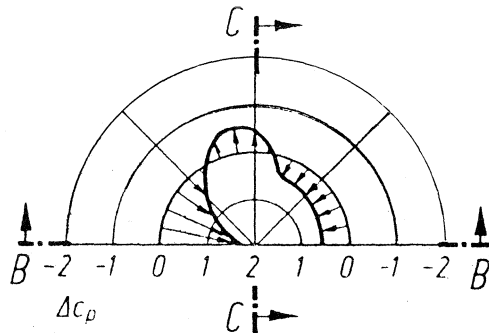
**Anlage 4      Windlastansätze**



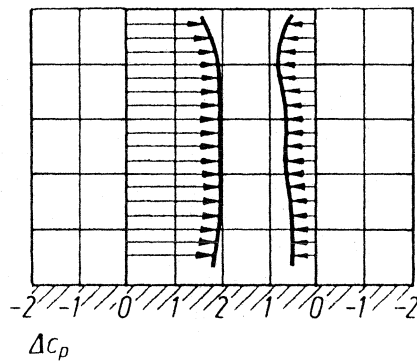
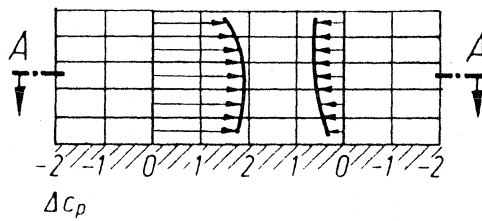
Veränderlichkeit des Winddruckkoeffizienten auf der Umfangsabwicklung

- a) an der oberen Mantelkante
- b) in halber Mantelhöhe

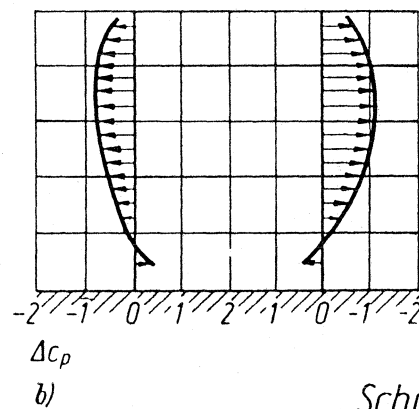
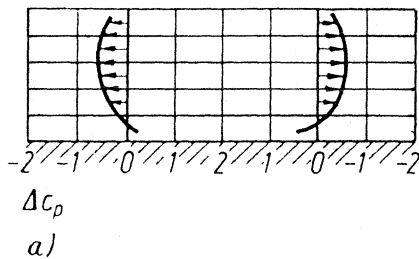
# Untersuchungen der Windeinwirkung auf Stahlbehälter mit Schwimmdach nach Ziölka [23]



Schnitt A-A



Schnitt B-B



Schnitt C-C

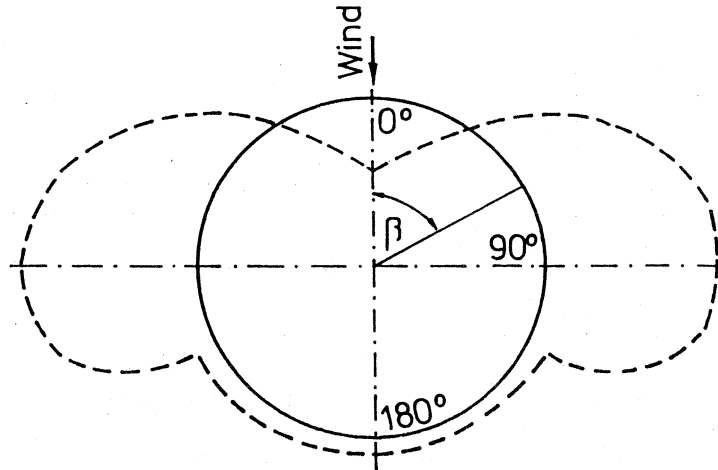
- a) Kurzer Behälter ohne Dach, Differenzdruck:  $\Delta p = \Delta c_p \cdot q$
- b) Langer Behälter ohne Dach, Differenzdruck:  $\Delta p = \Delta c_p \cdot q$

Stationäre Windbelastung offener und geschlossener kreiszylindrischer Behälter nach Eßlinger, Ahmed und Schroeder [24]

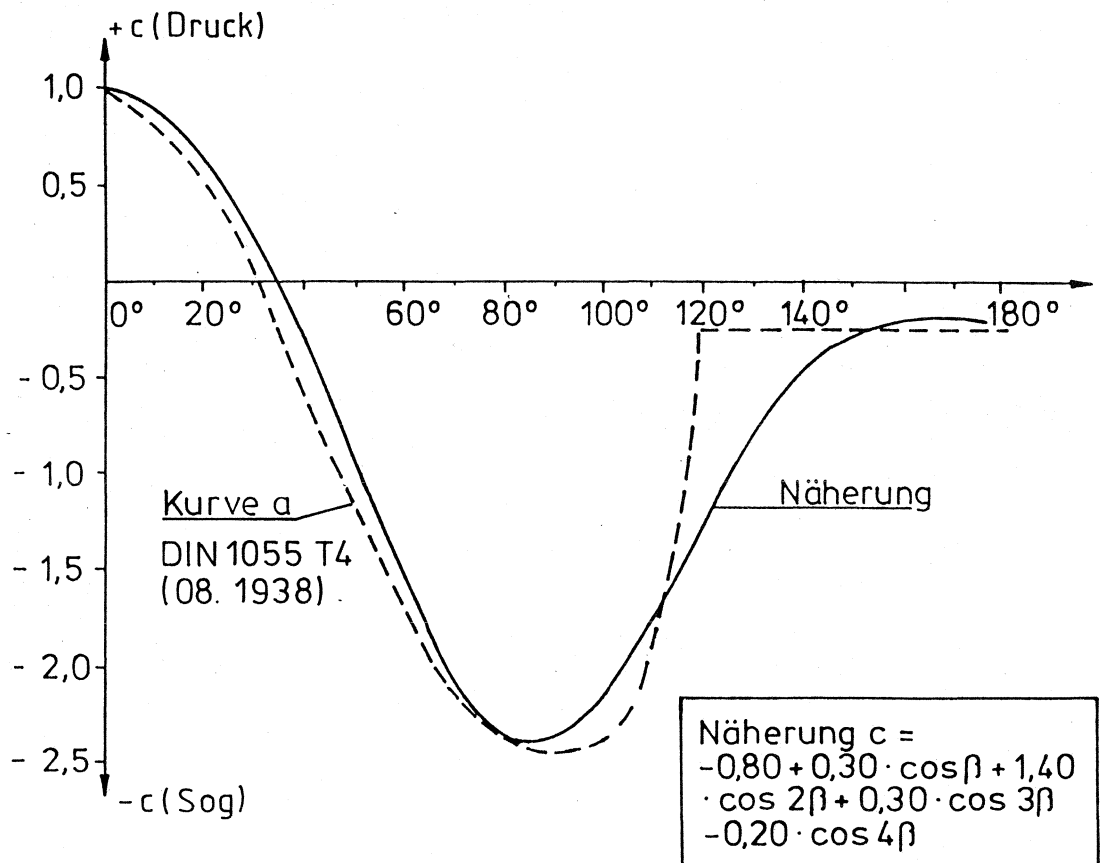
**Anlage 5      Rechnerische Parameterstudien**



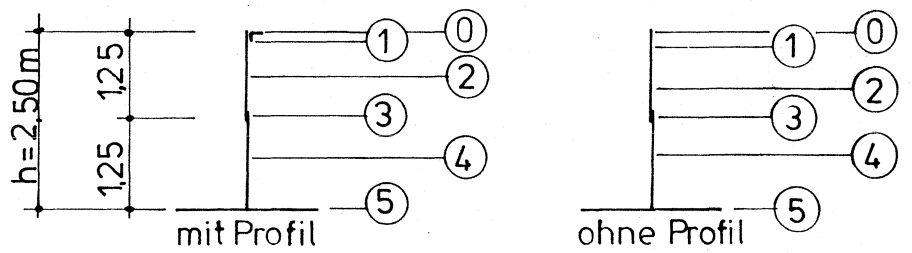
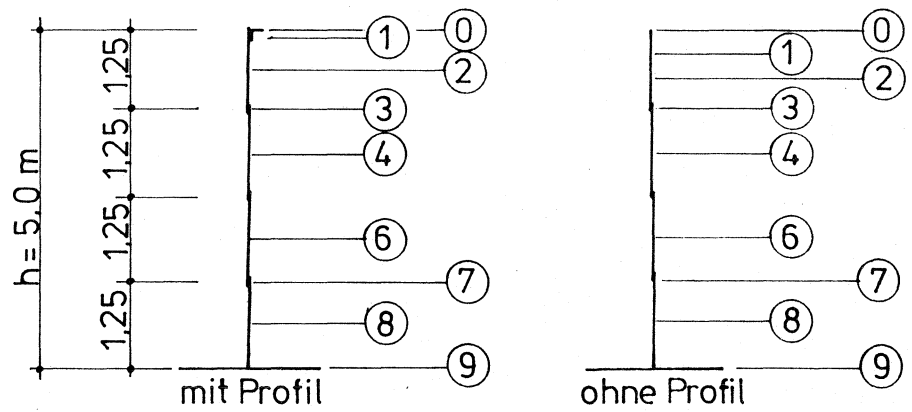
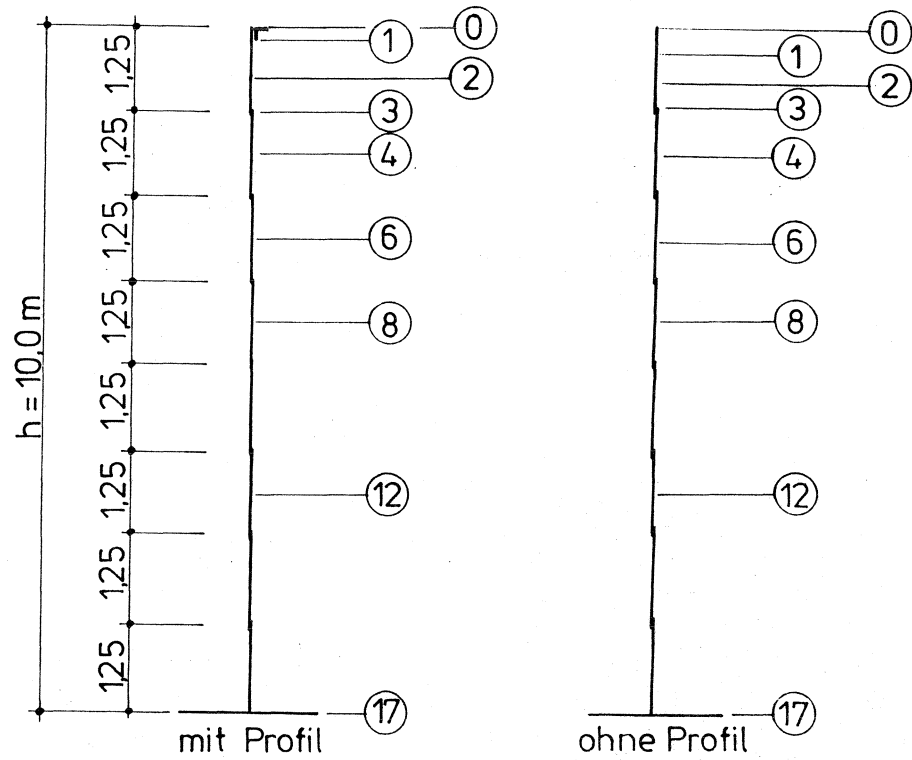
Winddruckverteilung über den Umfang



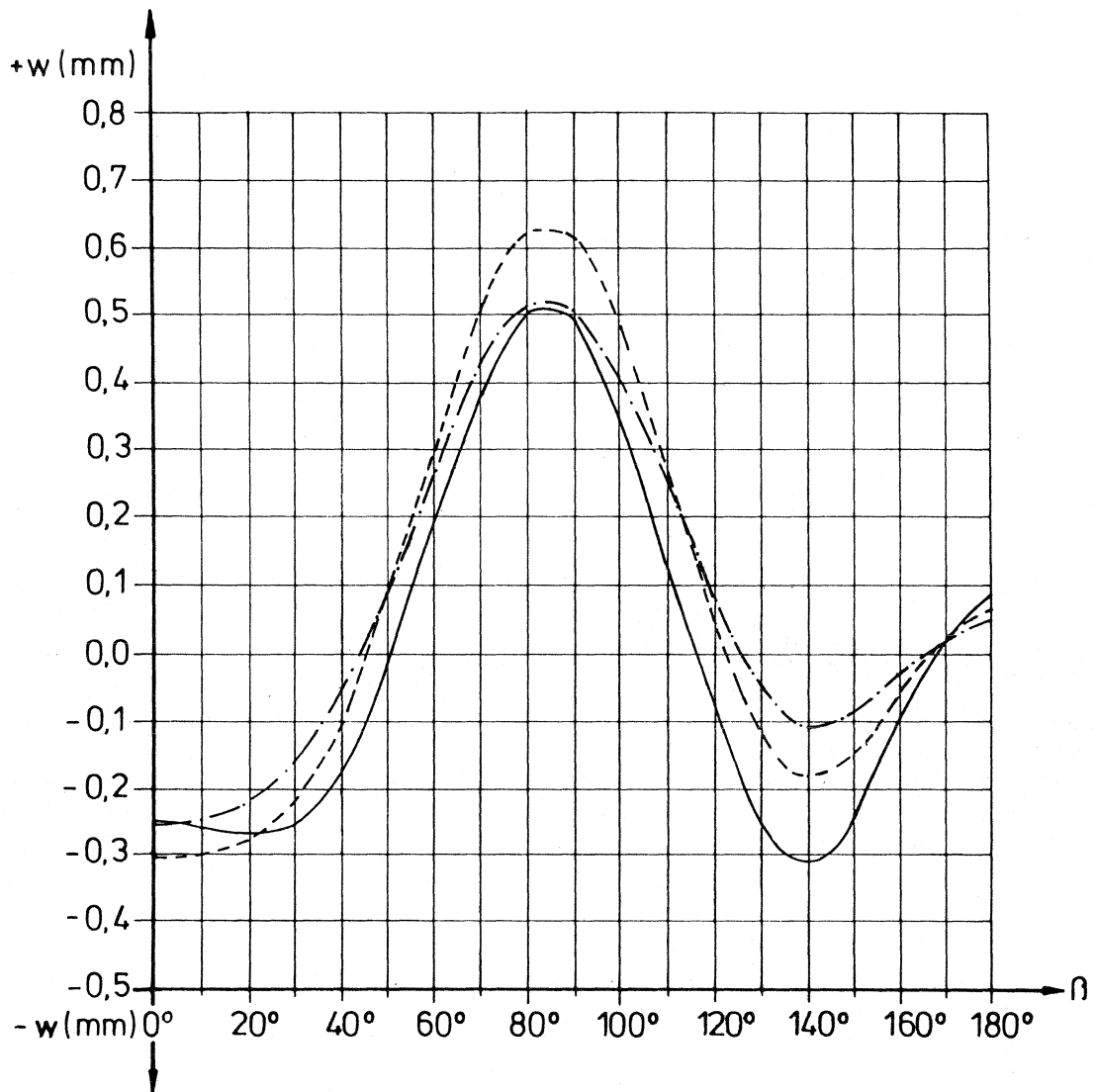
Winddruckverteilung über dem abgewickelten Zylinderumfang



Lastansatz der elektronischen Berechnung durch eine Fourierreihe

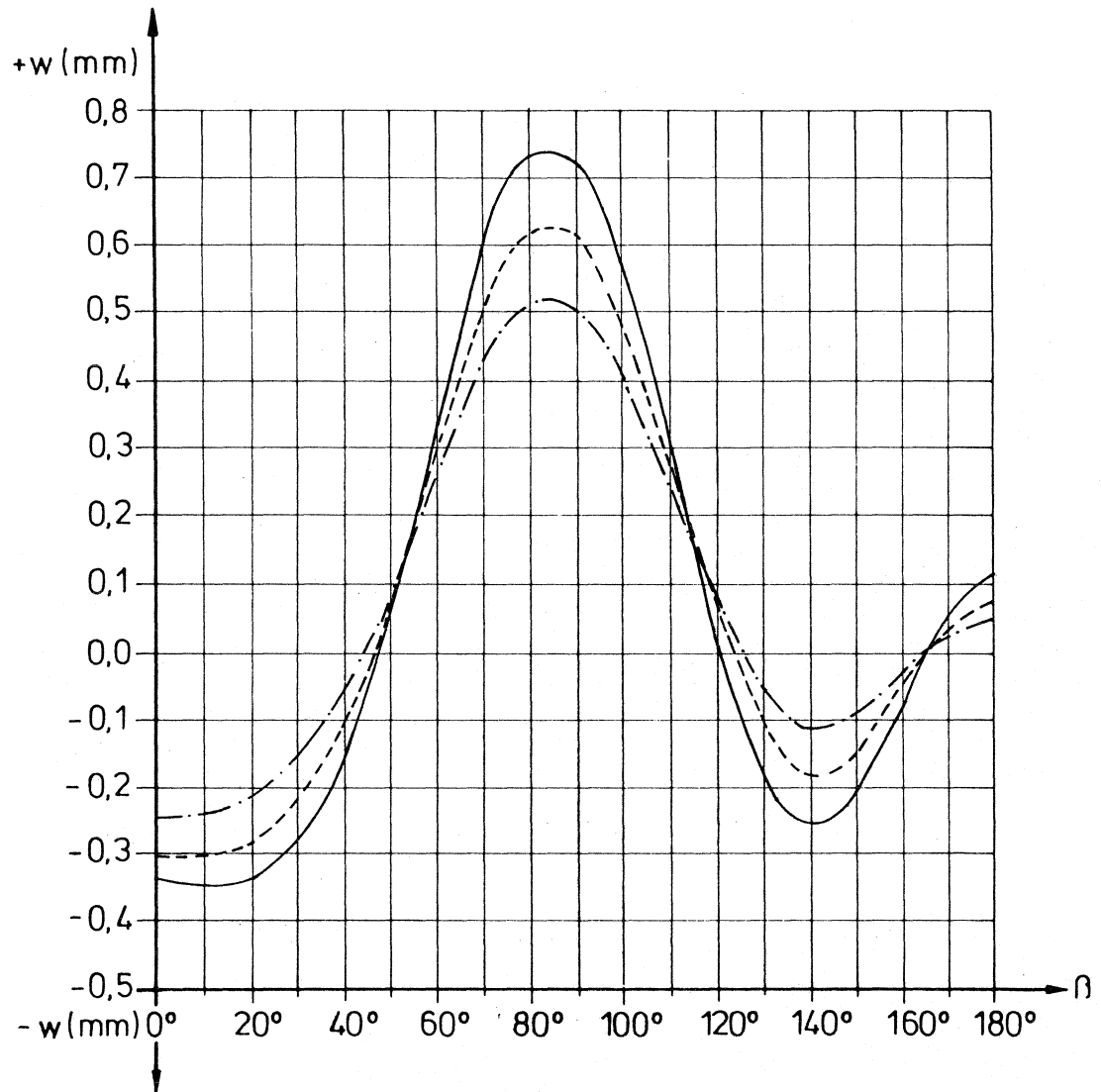


Schnittführung für die elektronischen Berechnung



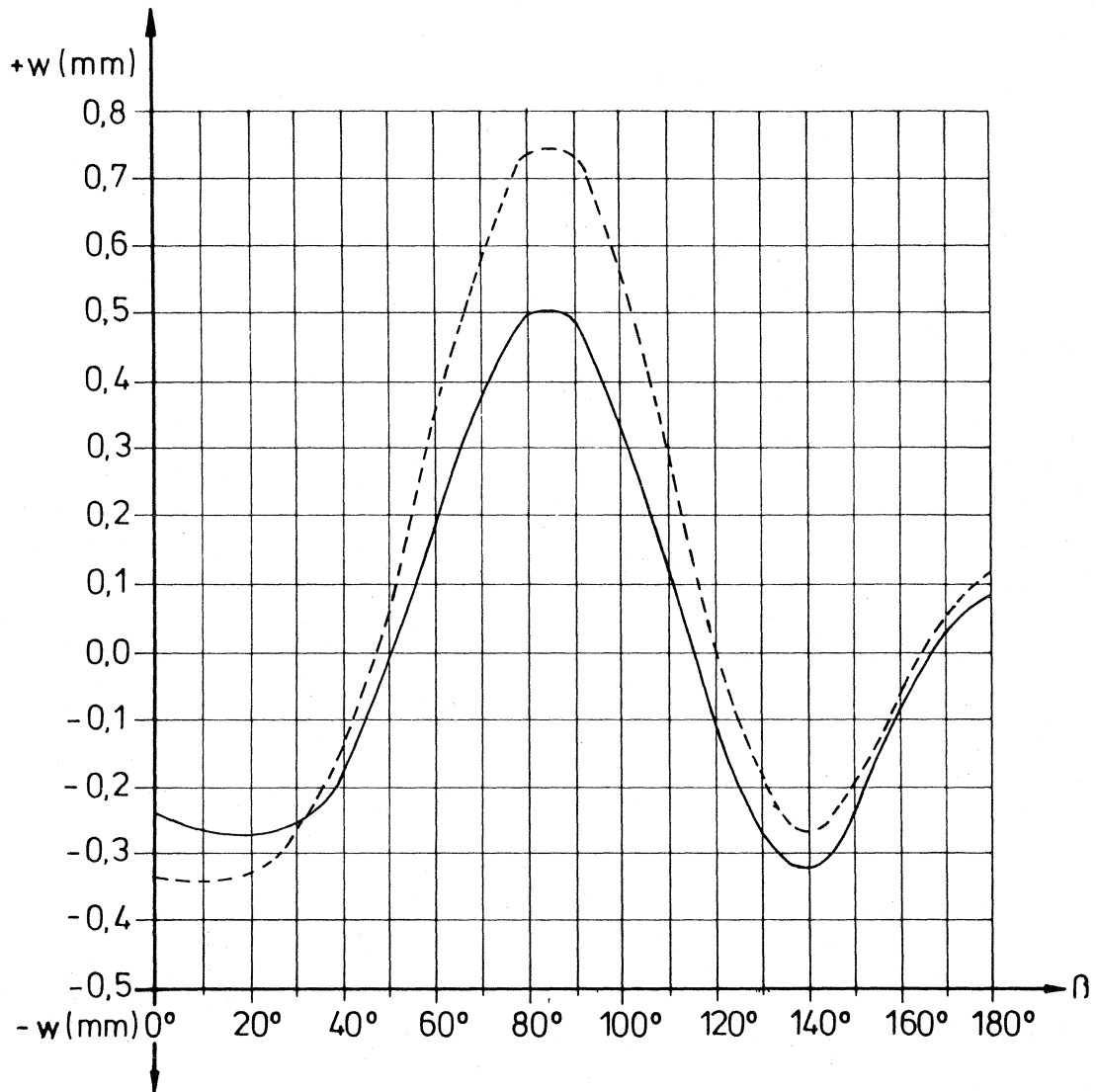
- Schnittstelle 0
- Schnittstelle 4
- Schnittstelle 6

Radialverschiebungen  $w$  eines Behälters mit oberem Randprofil ( $d/h = 18,0/5,0$  m)



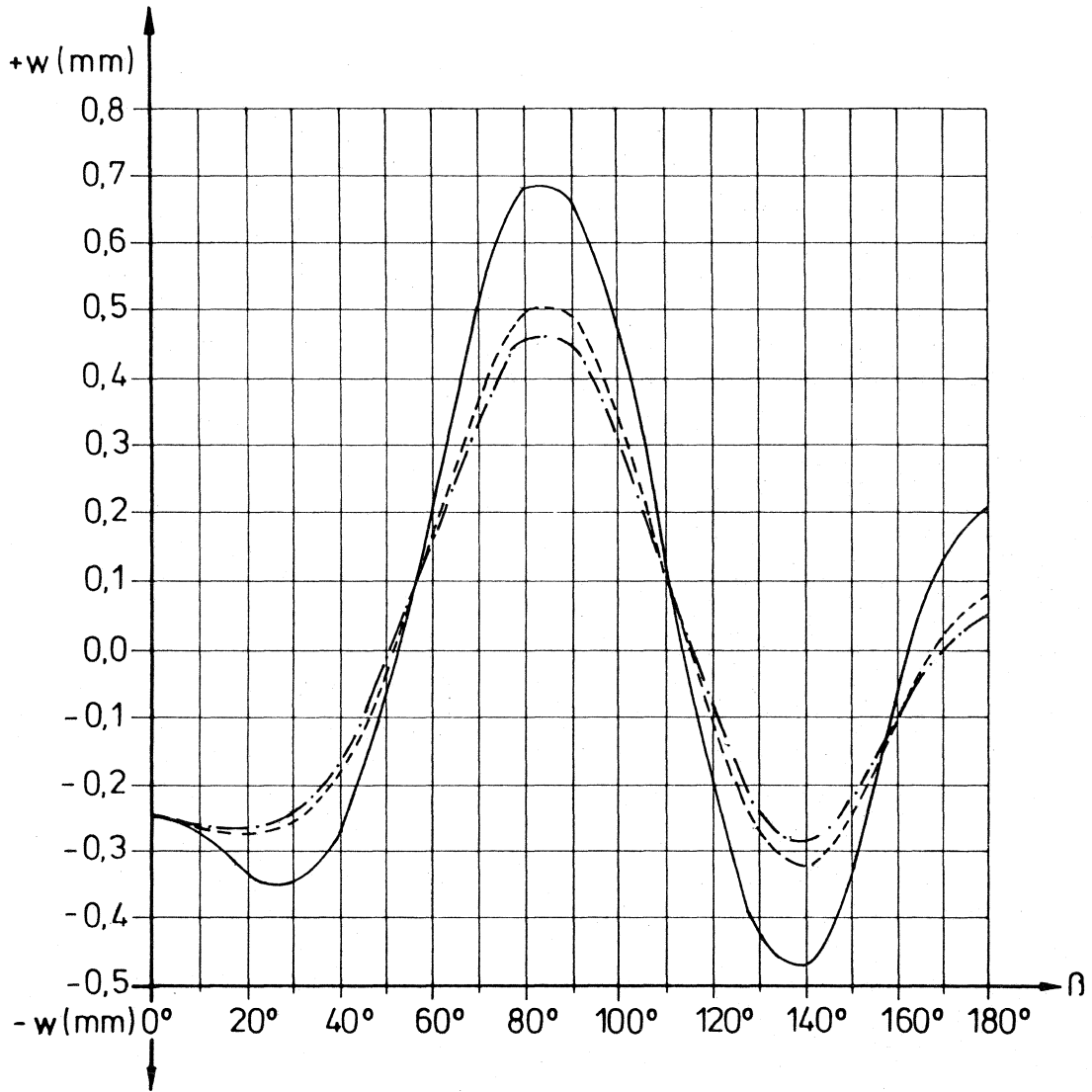
- Schnittstelle 0
- Schnittstelle 4
- · - Schnittstelle 6

Radialverschiebungen  $w$  eines Behälters ohne oberes Randprofil ( $d/h = 18,0/5,0$  m)



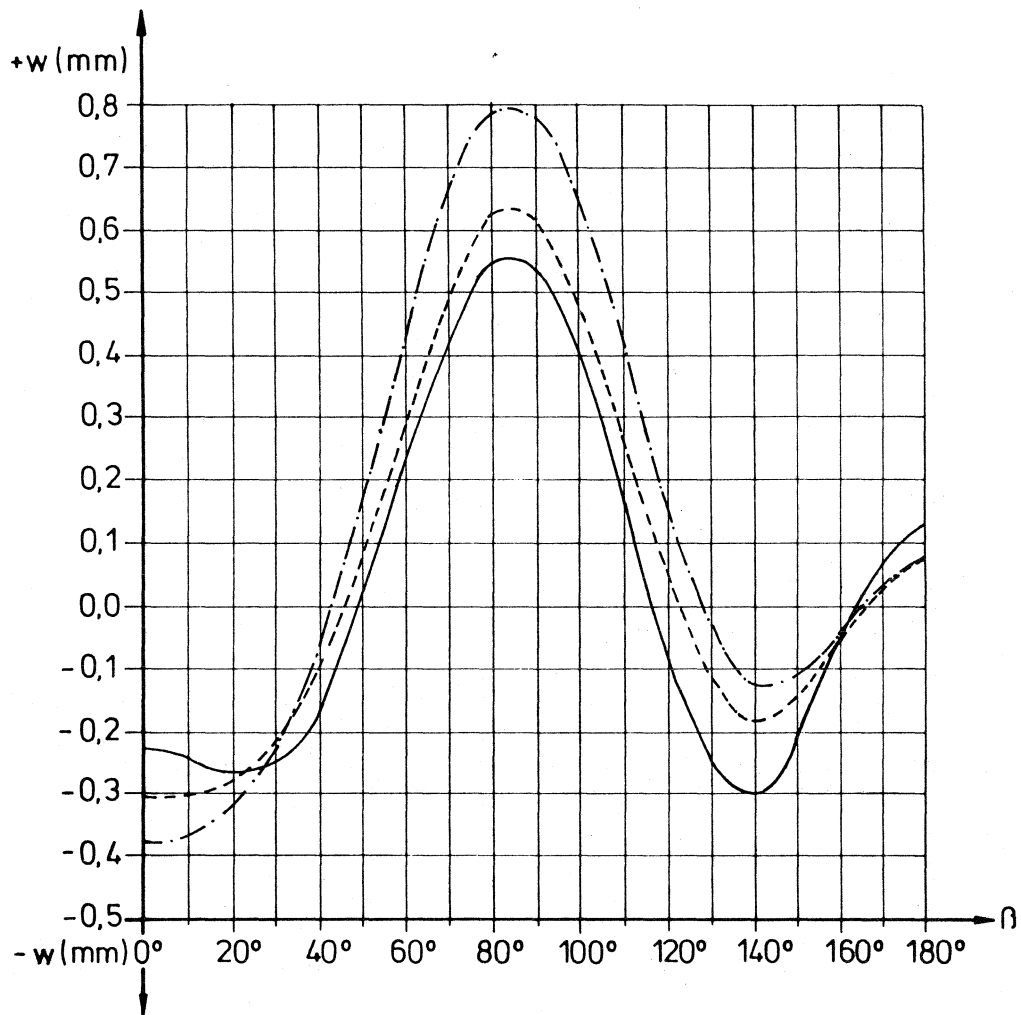
—  $d/h = 18,0/ 5,0$  m (mit Profil)  
 ----  $d/h = 18,0/ 5,0$  m (ohne Profil)

Einfluß des oberen Randprofils auf die Radialverschiebungen des oberen Randes



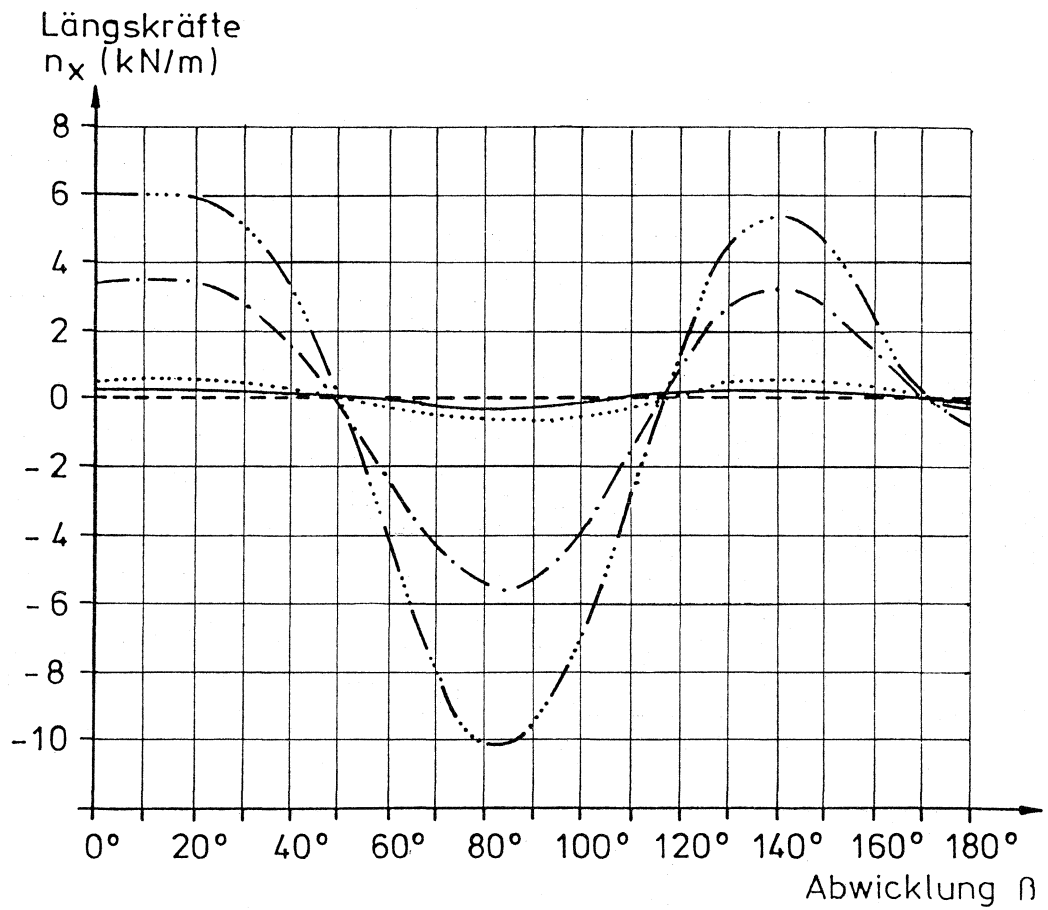
- $d/h = 10,0 / 5,0$  m
- - -  $d/h = 18,0 / 5,0$  m
- · -  $d/h = 24,0 / 5,0$  m

Einfluß des Durchmessers auf die Radialverschiebungen  $w$  des oberen Randes (mit Profil)



- $d/h = 10,0/5,0$  m
- - -  $d/h = 18,0/5,0$  m
- · -  $d/h = 24,0/5,0$  m

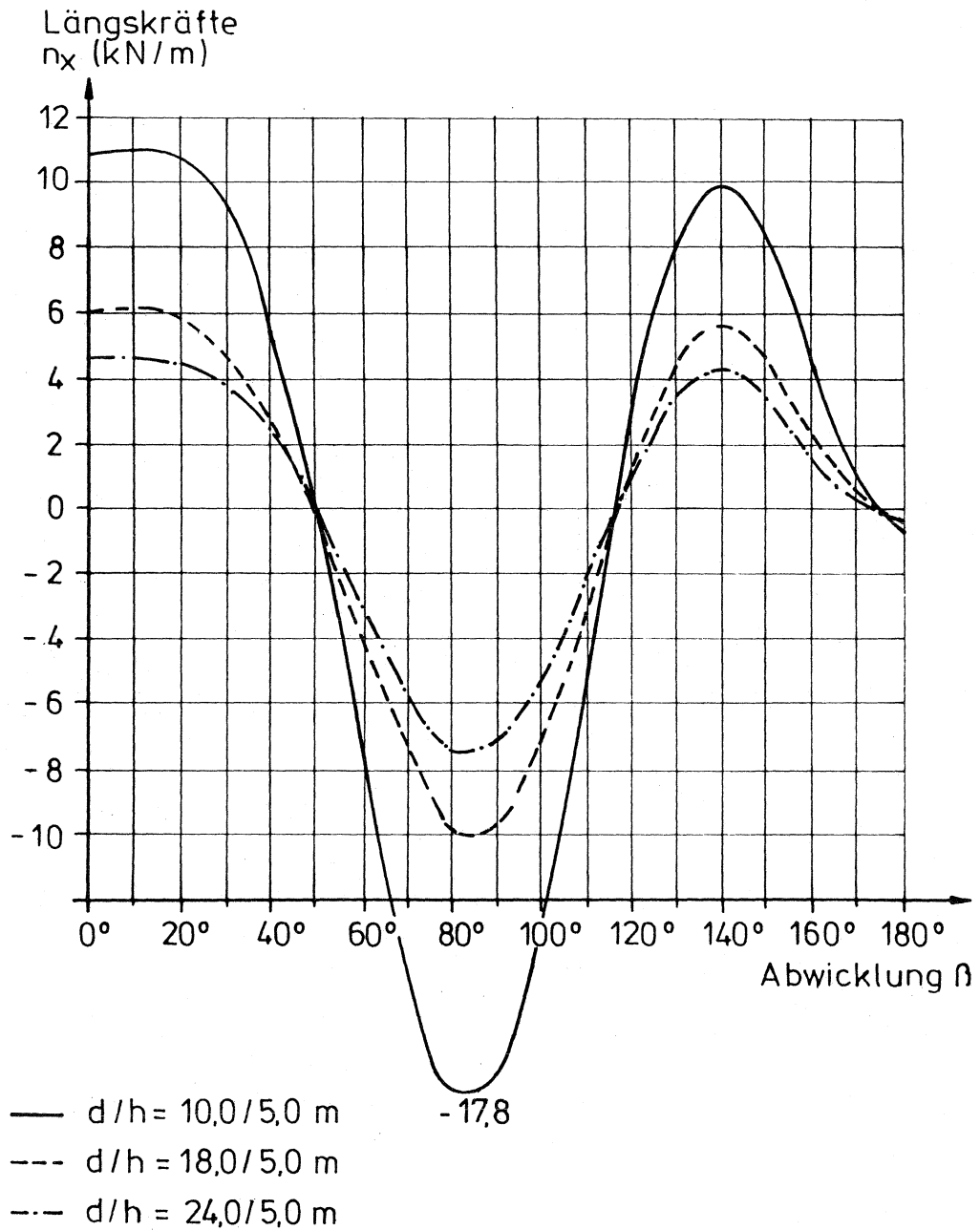
Einfluß des Durchmessers auf die Radialverschiebungen  $w$  der Wand (mit Profil) in Höhe der Schnittstelle 4



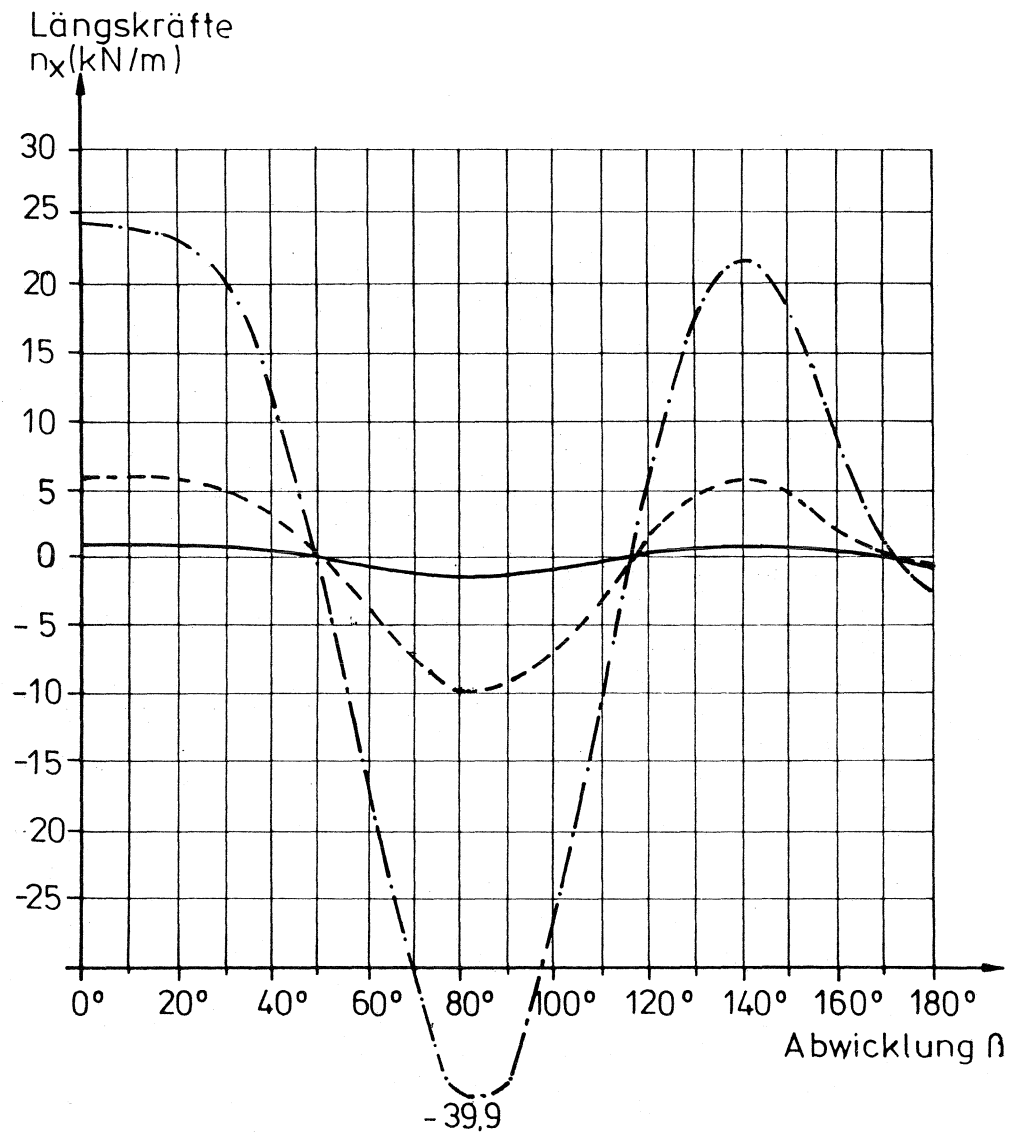
- Schnittstelle 0
- Schnittstelle 2
- ..... Schnittstelle 3
- · - · - Schnittstelle 7
- - - - Schnittstelle 9

Längskräfte  $n_x$  an den Behältern  
 $d/h = 18,0/5,0$  m mit und ohne Randprofil



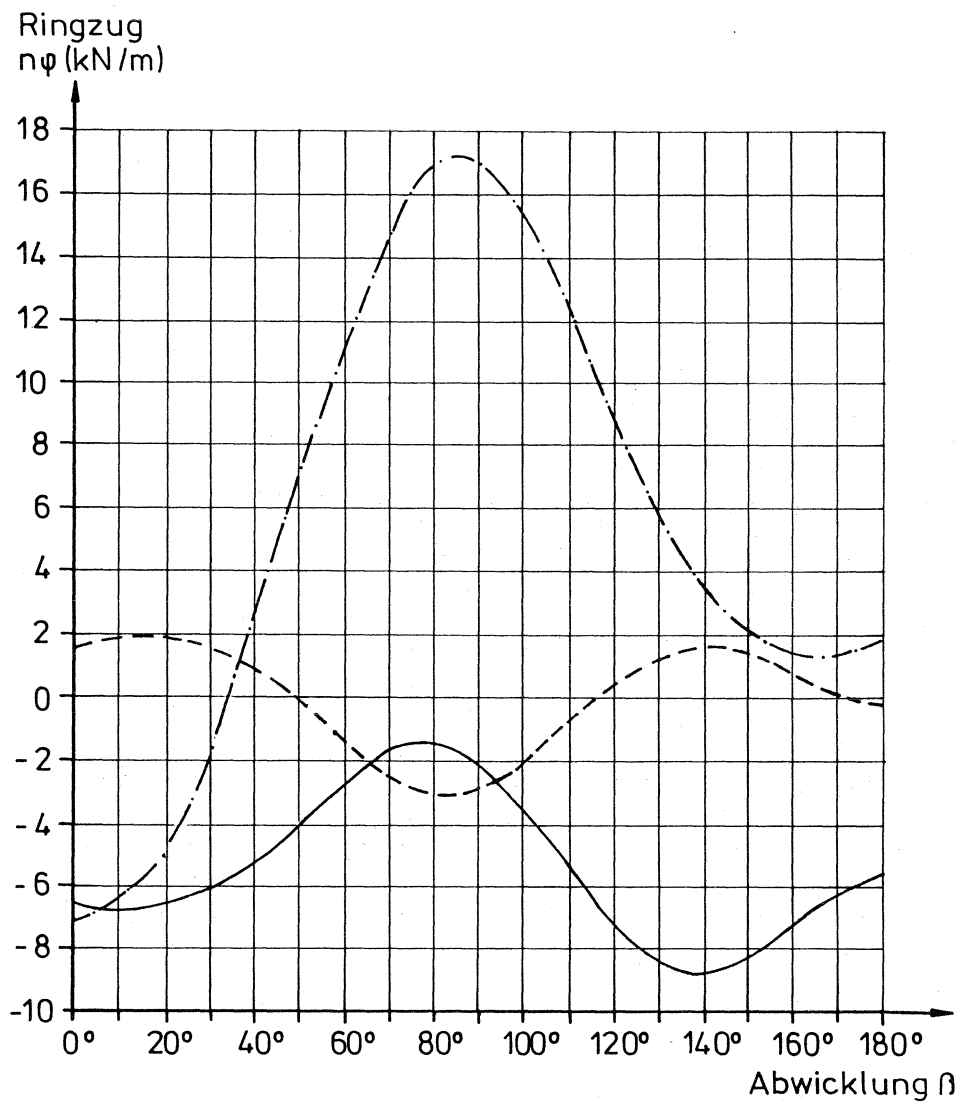


Einfluß des Durchmessers auf die Längskräfte  $n_x$



- $d/h = 18,0 / 2,5 \text{ m}$
- - -  $d/h = 18,0 / 5,0 \text{ m}$
- · -  $d/h = 18,0 / 10,0 \text{ m}$

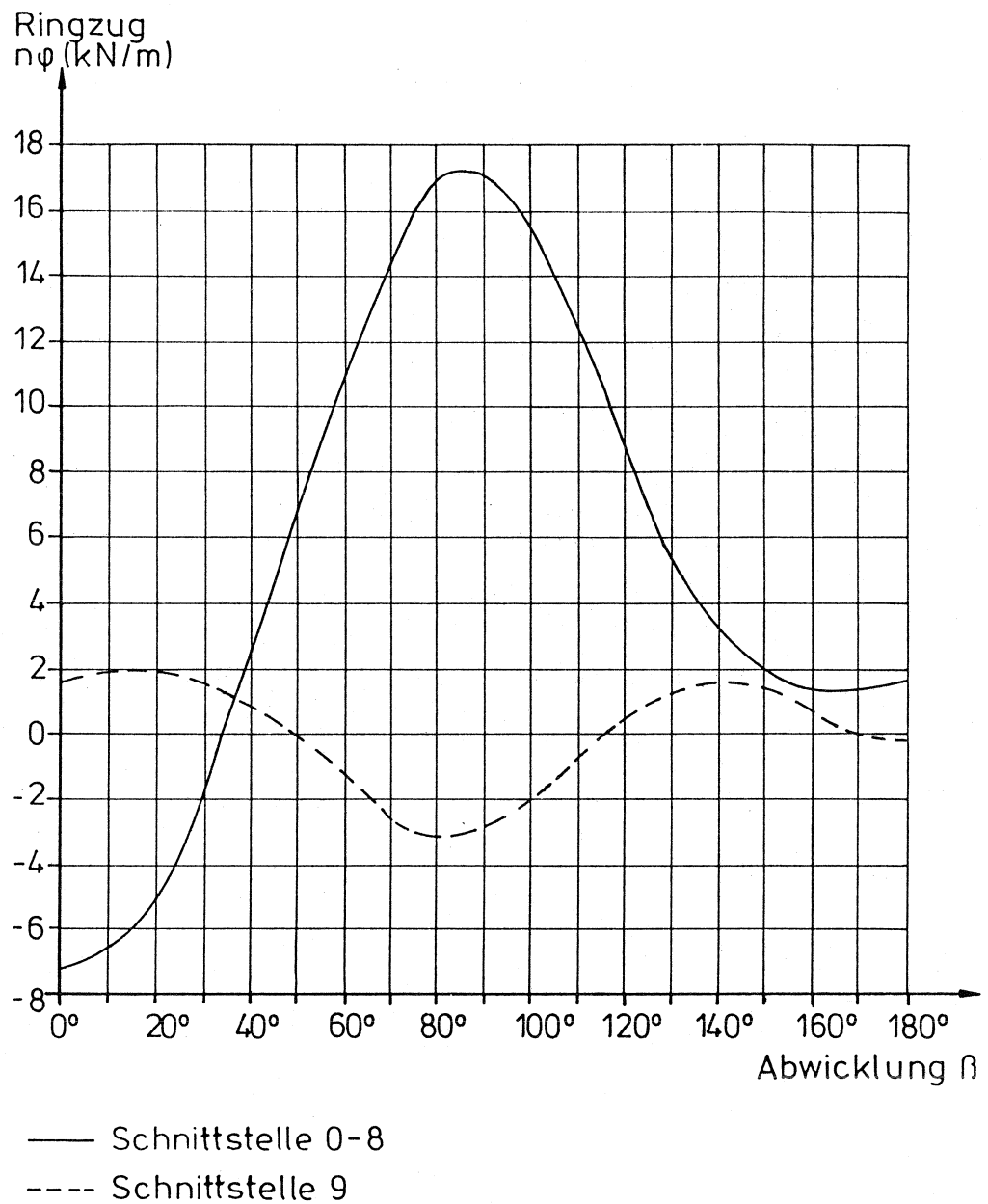
Einfluß der Höhe auf die Längskräfte  $n_x$   
am unteren Rand



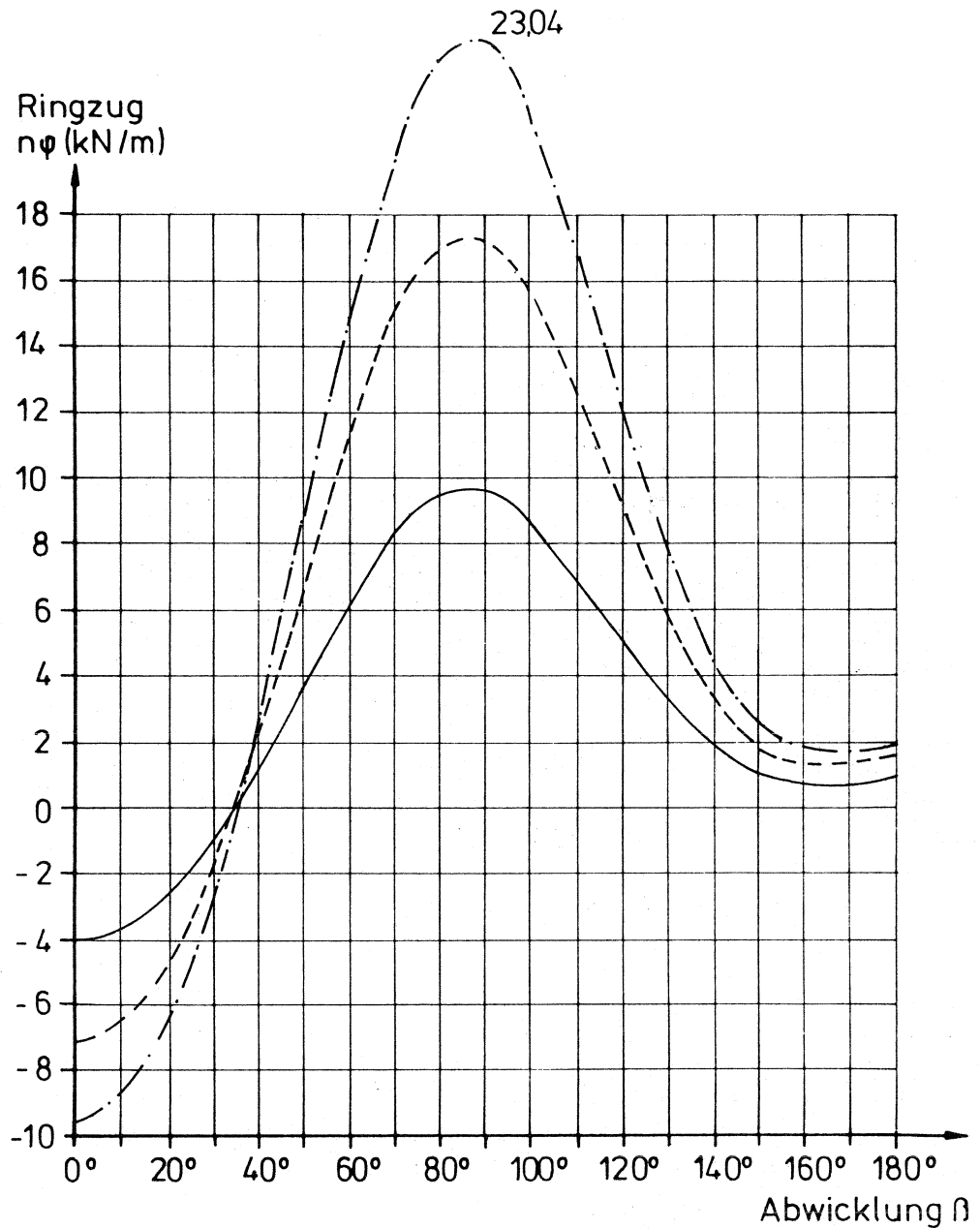
- Schnittstelle 0
- Schnittstelle 2-8
- Schnittstelle 9

Vgl. Bericht Seite 24

Membrankräfte in Ringrichtung  $n_\varphi$  am Behälter  $d/h = 18,0/5,0$  m mit Profil

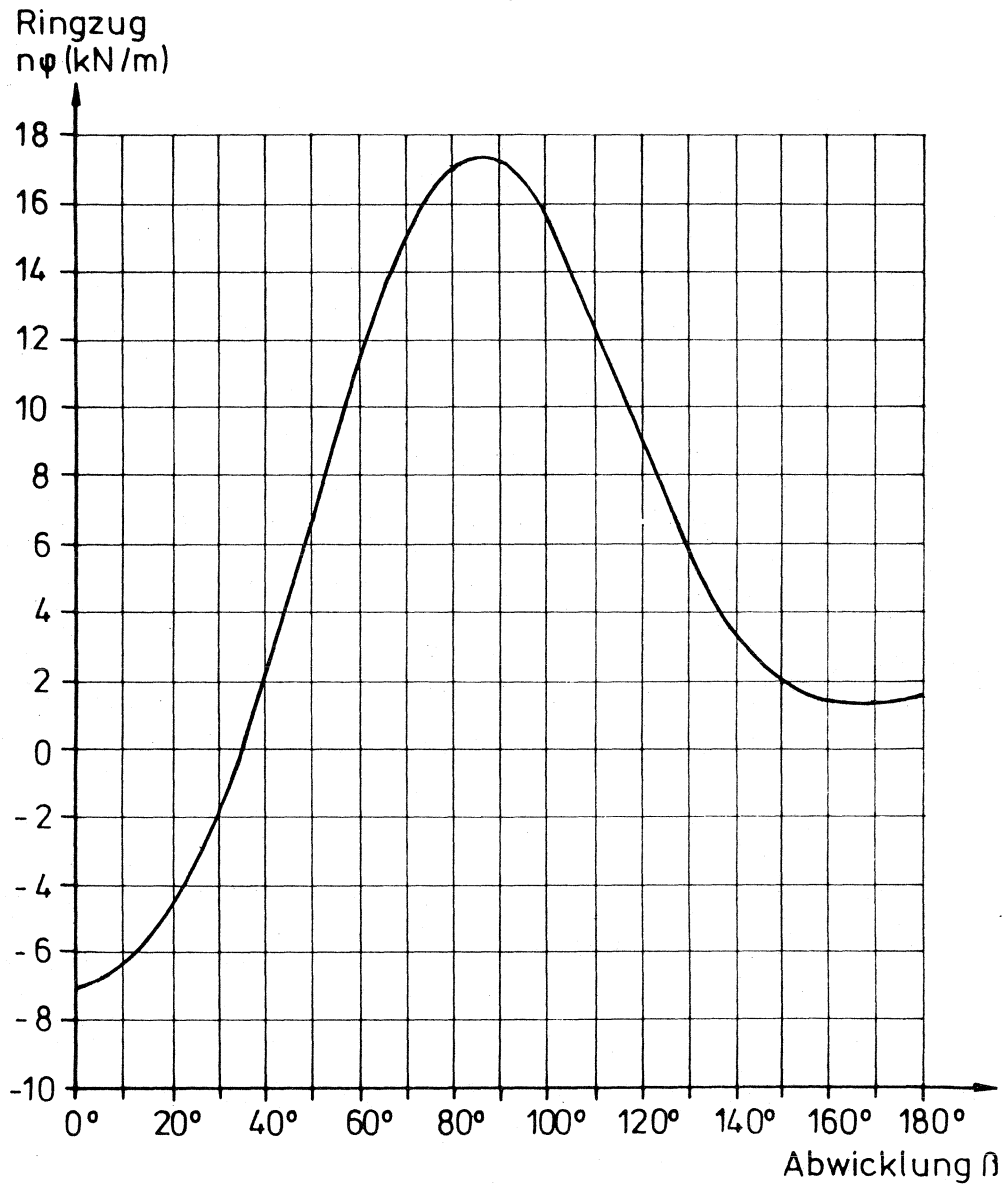


Membrankräfte in Ringrichtung  $n_\phi$  am Behälter  $d/h = 18,0/5,0$  m mit Profil



- $d/h = 10,0 / 5,0$  m
- $d/h = 18,0 / 5,0$  m
- $d/h = 24,0 / 5,0$  m

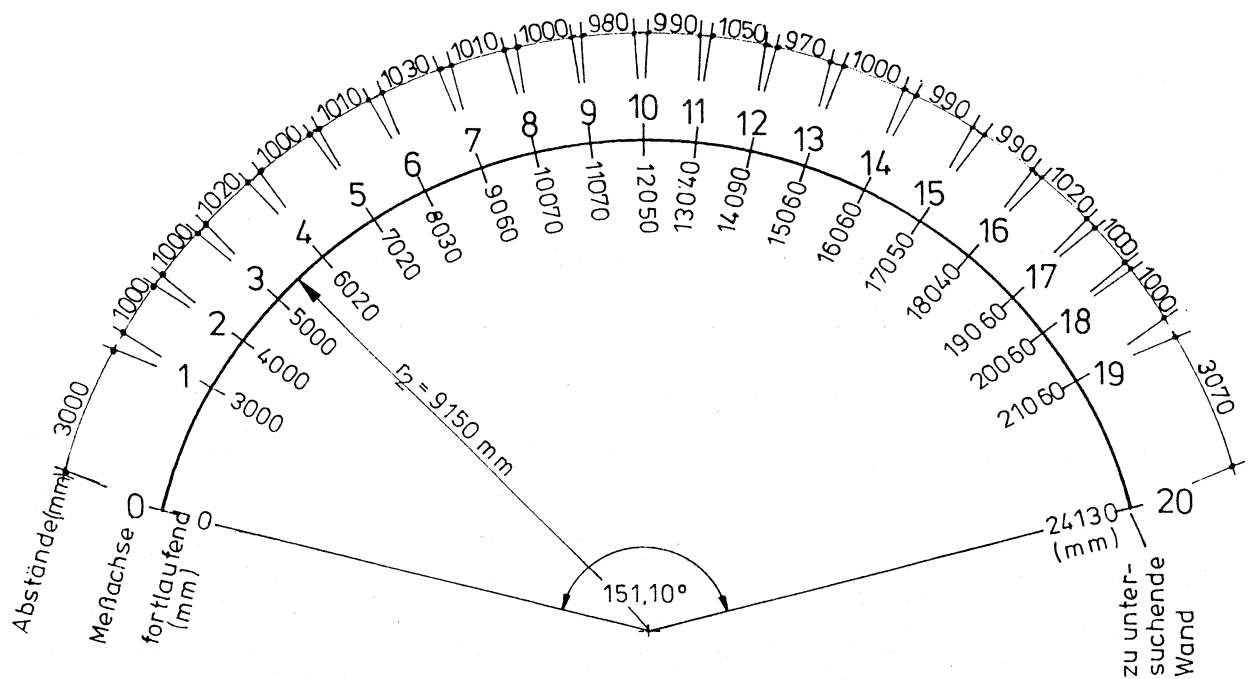
Einfluß des Durchmessers auf die Membrankräfte in Ringrichtung  $n_\phi$



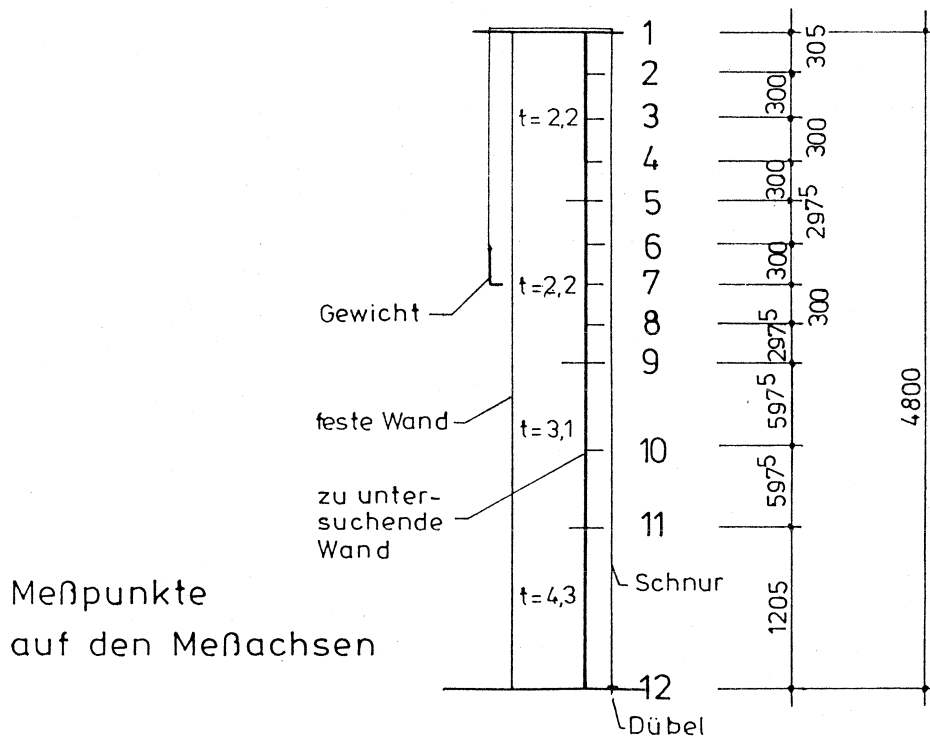
—  $d/h = 18,0/2,5\text{ m}, 18,0/5,0\text{ m}, 18,0/10,0\text{ m}$

Einfluß der Höhe auf die Membrankräfte  
in Ringrichtung  $n_\varphi$

Anlage 6 Untersuchungen am emaillierten  
Behälter



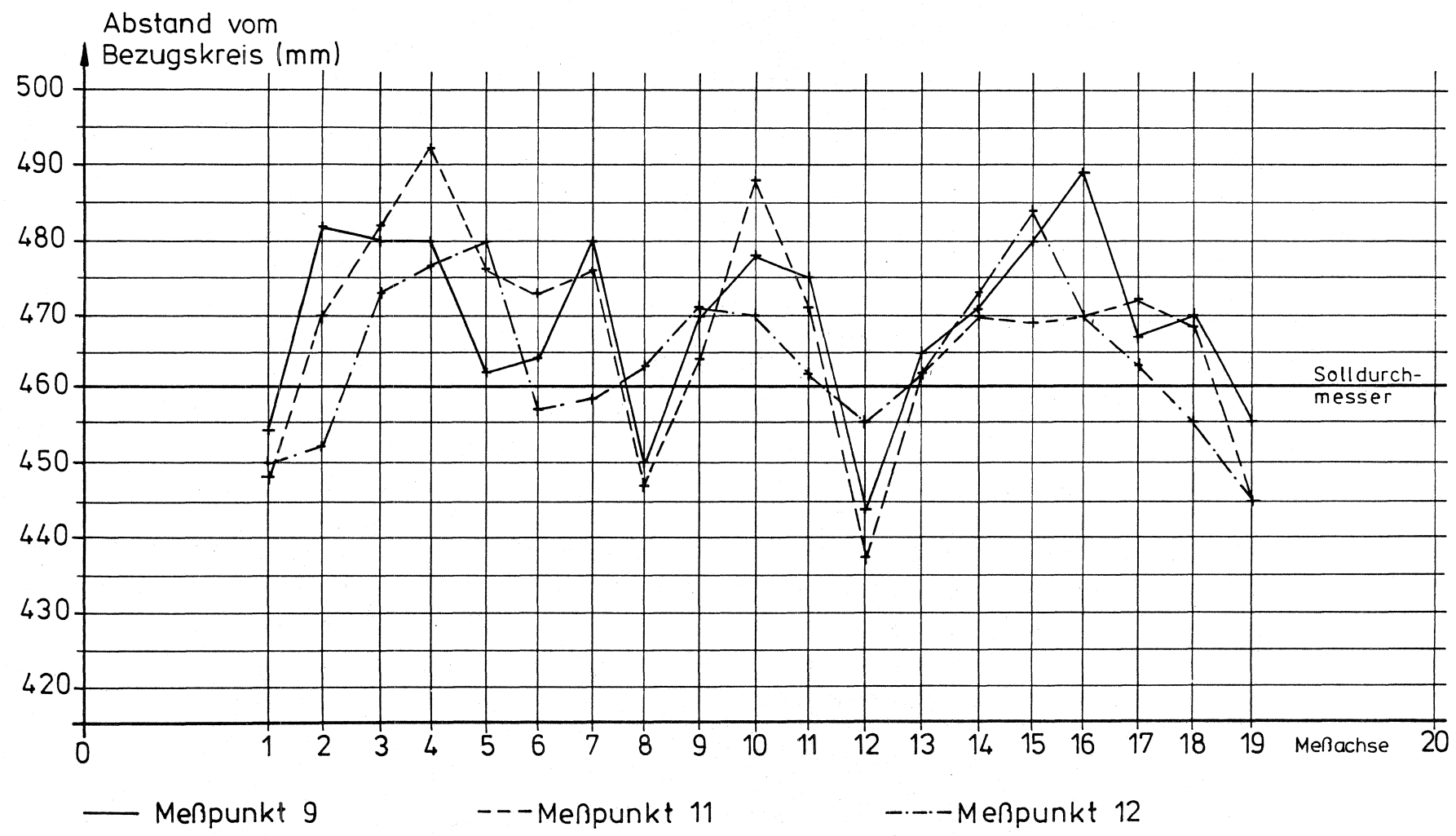
Meßachsen im Grundriß



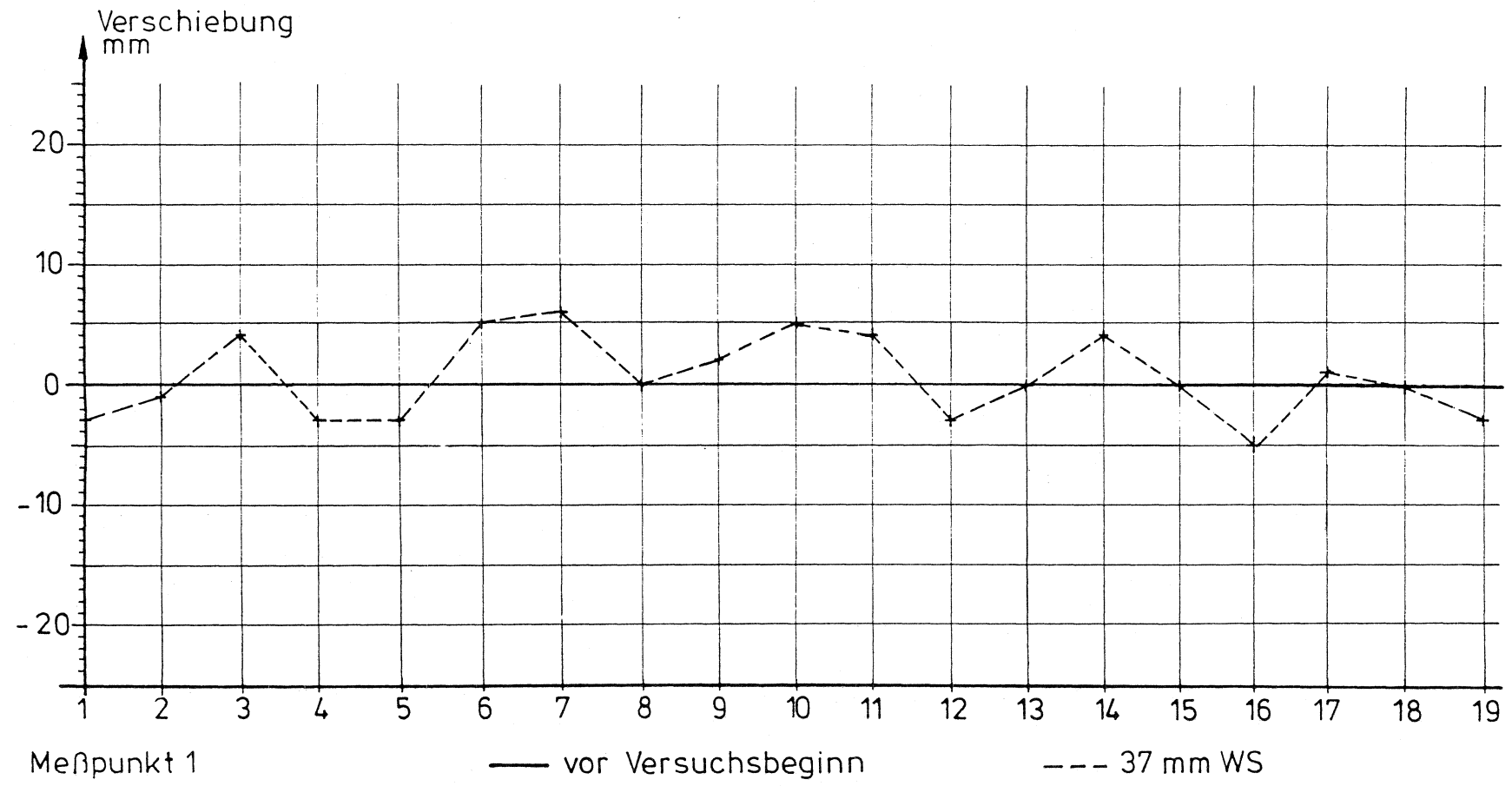
Meßpunkte auf den Meßachsen

Anordnung der Meßstellen (emaillierter Stahl)

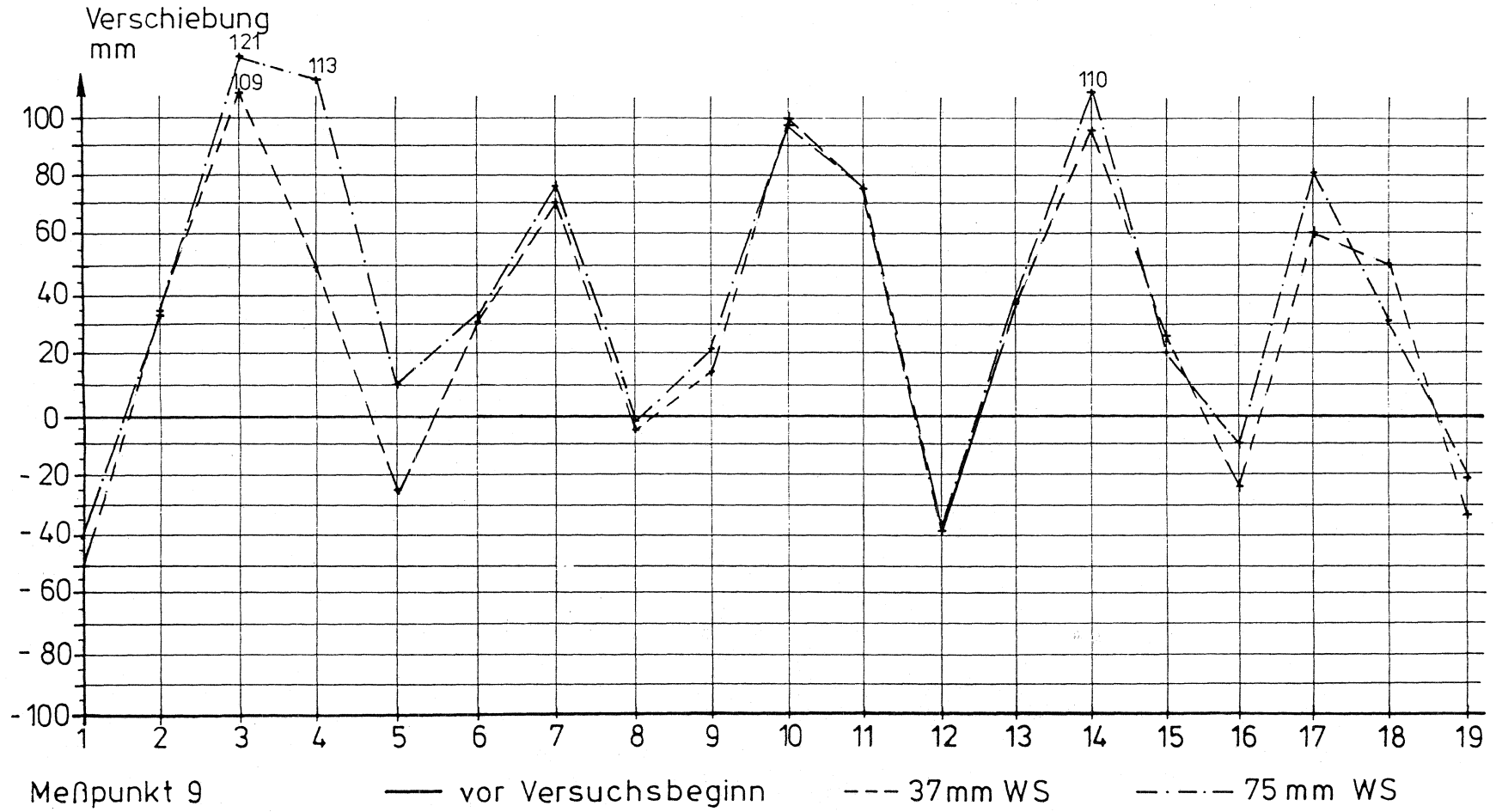




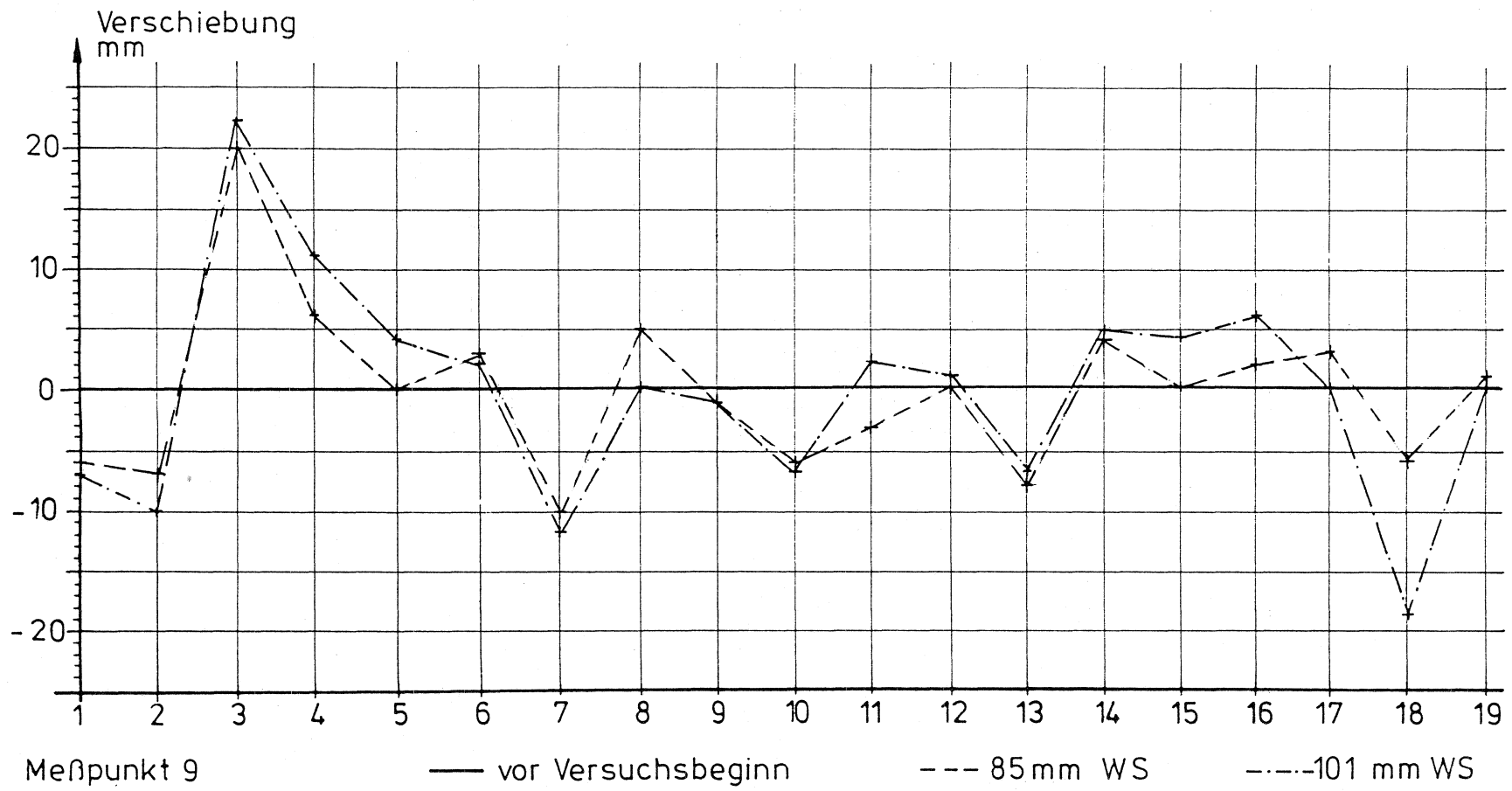
Überprüfung der Maßhaltigkeit (Behälter ohne Ringversteifung, email-lierter Stahl)



Verschiebung des oberen Randes (ohne Ringversteifung)



Verschiebung in Höhe der mittleren Ringsteife (Behälter ohne Ringversteifung, emaillierter Stahl)



Verschiebung in Höhe der mittleren Ringsteife (Behälter mit 1 Ringversteifung, emaillierter Stahl)

Meßachse	Meßergebnis (mm) im Meßpunkt		
	9	11	12
1	454	448	450
2	482	470	452
3	480	482	473
4	480	492	477
5	462	476	480
6	464	473	457
7	480	476	458
8	450	447	463
9	470	464	471
10	478	488	470
11	475	471	462
12	444	437	455
13	465	462	462
14	471	470	473
15	480	469	484
16	489	470	470
17	467	472	463
18	470	468	455
19	455	445	445

MESSUNGEN AM BEHÄLTER ZUR ÜBERPRÜFUNG DER MASSHALTIGKEIT (radiale Abstände zwischen Bezugsebene und Behälter, Wand aus emailliertem Stahl)

SILOKONSTRUKTION mit Ringversteifung					x	x	x	
ohne Ringversteifung		x	x	x				x
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	0	0	85	101	75
MESSERGEBNIS (mm)								
Meßpunkt	1	193	190	194		193	191	
	2	195	189	195		195	194	
	3	198	183	198		202	201	
	4	202	182	201		206	201	
	5	202	174	202		204	204	
	6	204	170	203		203	204	
	7	209	168	206		203	203	
	8	211	164	207		205	204	
	9	211	161	205	208	205	204	169
	10	213	170	210				
	11	208	176	208				

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 1 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus emailliertem Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit Ringversteifung					x	x	x
ohne Ringversteifung		x	x	x			x
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	0	0	85	101
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt	1	189	188	190		190	190
	2	193	189	193		190	190
	3	196	192	197		191	190
	4	200	202	200		193	194
	5	202	212	201		196	191
	6	208	227	206		198	197
	7	214	241	212		205	202
	8	220	254	218		211	203
	9	221	256	218	217	214	211
	10	219	245	216			
	11	207	225	207			

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER MESSACHSE 2 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus emailliertem Stahl)

SILOKONSTRUKTION								
mit Ringversteifung					x	x	x	
ohne Ringversteifung		x	x	x				x
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	0	0	85	101	75
MESSERGEBNIS (mm)								
Meßpunkt	1	202	206	203		207	208	
	2	207	227	210		221	222	
	3	211	255	214		236	241	
	4	213	282	216		247	253	
	5	210	303	213		245	256	
	6	211	315	216		242	254	
	7	213	321	218		235	242	
	8	214	317	219		229	230	
	9	201	310	216	215	221	223	322
	10	218	295	223				
	11	216	268	219				

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 3 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus emailliertem Stahl)



SILOKONSTRUKTION							
mit Ringversteifung					x	x	x
ohne Ringversteifung		x	x	x			x
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	0	0	85	101
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt	1	195	192	192		198	197
	2	196	202	194		207	208
	3	197	222	195		221	228
	4	196	246	198		232	238
	5	195	261	198		235	240
	6	196	267	200		227	236
	7	198	268	201		220	228
	8	200	262	202		213	220
	9	200	249	200	200	206	211
	10	203	243	206			
	11	202	232	204			

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 4 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus emailliertem Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit Ringversteifung					x	x	x
ohne Ringversteifung		x	x	x			x
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	0	0	85	101
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt	1	185	182	187		189	190
	2	184	172	183		184	181
	3	180	162	179		176	174
	4	175	148	172		169	170
	5	165	135	161		159	160
	6	165	136	163		162	164
	7	166	137	165		164	167
	8	165	137	165		164	168
	9	161	137	161	163	161	165
	10	167	144	167			
	11	172	152	172			

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 5 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus emailliertem Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit Ringversteifung					x	x	x
ohne Ringversteifung		x	x	x			x
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	0	0	85	101
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt	1	187	192	187		190	190
	2	186	211	188		202	206
	3	184	231	187		212	224
	4	184	240	186		213	230
	5	180	242	184		208	227
	6	181	245	184		203	221
	7	182	242	184		196	218
	8	182	220	185		189	194
	9	176	207	180	176	179	178
	10	182	207	182			
	11	186	205	187			

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 6 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus emailliertem Stahl)

SILOKONSTRUKTION mit Ringversteifung ohne Ringversteifung							
	x	x	x	x	x	x	x
UNTERDRUCK (mm WS)	0	37	0	0	85	101	75
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt 1	187	193	190		190	190	
2	190	203	193		190	187	
3	194	217	196		188	184	
4	197	234	200		187	182	
5	199	249	201		186	180	
6	202	260	204		189	181	
7	205	267	208		190	184	
8	208	275	211		194	190	
9	202	272	205	193	192	190	278
10	197	256	201				
11	196	222	200				

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 7 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus emailliertem Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit Ringversteifung					x	x	x
ohne Ringversteifung		x	x	x			x
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	0	0	85	101
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt	1	190	190	191		193	193
	2	189	183	190		201	203
	3	189	177	190		210	214
	4	189	174	190		211	220
	5	183	171	185		203	219
	6	185	175	185		200	213
	7	186	181	185		196	205
	8	185	181	186		193	196
	9	181	175	181	189	186	178
	10	182	172	181			
	11	178	169	179			

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 8 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus emailliertem Stahl)

SILOKONSTRUKTION mit Ringversteifung					x	x	x	
ohne Ringversteifung		x	x	x				x
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	0	0	85	101	75
MESSERGEBNIS (mm)								
Meßpunkt	1	188	190	190		190	191	
	2	188	185	190		188	189	
	3	188	190	189		190	188	
	4	187	206	190		193	190	
	5	187	225	191		194	191	
	6	193	228	195		195	194	
	7	198	225	198		198	198	
	8	203	221	202		202	200	
	9	204	218	203	204	203	215	312
	10	208	213	208				
	11	208	209	208				

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 9 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus emailliertem Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit Ringversteifung					x	x	x
ohne Ringversteifung		x	x	x			x
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	0	0	85	101
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt	1	189	194	189		188	190
	2	195	213	195		194	196
	3	201	240	202		201	204
	4	204	261	205		205	205
	5	205	280	205		203	206
	6	209	296	212		216	206
	7	212	311	217		209	208
	8	216	319	220		208	209
	9	214	314	218	205	208	207
	10	222	292	225			
	11	229	265	230			

WEGMESSUNGEN AM BRHÄLTER IN MESSACHSE 10 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus emailliertem Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit Ringversteifung					x	x	x
ohne Ringversteifung		x	x	x			x
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	0	0	85	101
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt	1	188	192	187		188	190
	2	190	206	190		190	191
	3	194	223	194		198	200
	4	198	241	199		209	209
	5	202	261	202		220	221
	6	205	281	205		224	226
	7	206	294	207		221	224
	8	208	298	209		214	215
	9	204	279	204	200	201	202
	10	204	255	203			
	11	202	229	201			

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 11 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus emailliertem Stahl)



SILOKONSTRUKTION							
mit Ringversteifung					x	x	x
ohne Ringversteifung		x	x	x			x
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	0	0	85	101
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt	1	188	185	186		187	187
	2	187	174	184		185	187
	3	183	161	180		192	196
	4	181	156	178		196	196
	5	180	154	176		190	193
	6	179	151	176		185	186
	7	177	148	173		183	182
	8	175	145	172		185	184
	9	179	141	170	180	179	180
	10	178	146	167			
	11	165	148	164			

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 12 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus emailliertem Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit Ringversteifung					x	x	x
ohne Ringversteifung		x	x	x			x
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	0	0	85	101
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt	1	184	184	186		184	185
	2	183	180	183		181	182
	3	182	181	182		189	185
	4	183	197	183		181	189
	5	184	214	185		183	190
	6	185	225	187		182	186
	7	186	228	189		179	181
	8	186	224	188		176	179
	9	182	219	182	176	174	175
	10	186	195	186			
	11	182	182	182			

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 13 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus emailliertem Stahl)

SILOKONSTRUKTION mit Ringversteifung ohne Ringversteifung							
	x	x	x	x	x	x	x
UNTERDRUCK (mm WS)	0	37	0	0	85	101	85
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt 1	187	191	188		189	190	
2	191	212	191		196	200	
3	194	234	196		206	208	
4	200	257	203		203	219	
5	201	271	205		220	223	
6	202	282	204		220	224	
7	198	288	200		211	214	
8	194	285	196		201	203	
9	185	270	188	187	189	190	295
10	189	259	191				
11	185	221	188				

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 14 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus emailliertem Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit Ringversteifung					x	x	x
ohne Ringversteifung		x	x	x			x
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	0	0	85	101
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt	1	187	187	189		187	189
	2	187	201	190		182	181
	3	186	216	188		180	178
	4	184	219	185		179	179
	5	181	222	182		176	177
	6	184	226	186		180	183
	7	189	221	189		187	190
	8	192	224	192		191	193
	9	190	216	190	190	190	194
	10	185	198	187			
	11	181	182	182			

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 15 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus emaillertem Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit Ringversteifung					x	x	x
ohne Ringversteifung		x	x	x			x
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	0	0	85	101
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt	1	186	181	186		187	188
	2	191	176	192		204	207
	3	195	171	196		216	223
	4	200	170	200		224	236
	5	202	171	201		229	240
	6	203	173	202		228	238
	7	205	176	205		223	231
	8	209	181	208		217	223
	9	205	182	205	206	207	211
	10	200	180	200			
	11	193	179	195			

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 16 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus emailliertem Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit Ringversteifung				x	x	x	
ohne Ringversteifung	x	x	x				x
UNTERDRUCK (mm WS)	0	37	0	0	85	101	75
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt 1	187	186	187		185	183	
2	194	210	195		186	185	
3	198	231	198		190	185	
4	201	251	202		194	182	
5	200	261	201		195	193	
6	200	271	201		196	194	
7	200	274	203		198	194	
8	201	272	205		201	198	
9	201	261	205	206	204	201	282
10	208	252	210				
11	212	243	216				

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 17 (radiale Abstände zwischen Messachse und Behälterwand, Wand aus emailliertem Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit Ringversteifung				x	x	x	
ohne Ringversteifung	x	x	x				x
UNTERDRUCK (mm WS)	0	37	0	0	85	101	75
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt 1	185	185	185		185	184	
2	183	186	184		186	192	
3	182	200	184		190	197	
4	183	221	187		197	197	
5	183	235	187		201	194	
6	186	245	190		200	191	
7	189	248	191		195	185	
8	191	247	195		190	176	
9	190	241	192	187	184	171	221
10	192	233	193				
11	190	216	190				

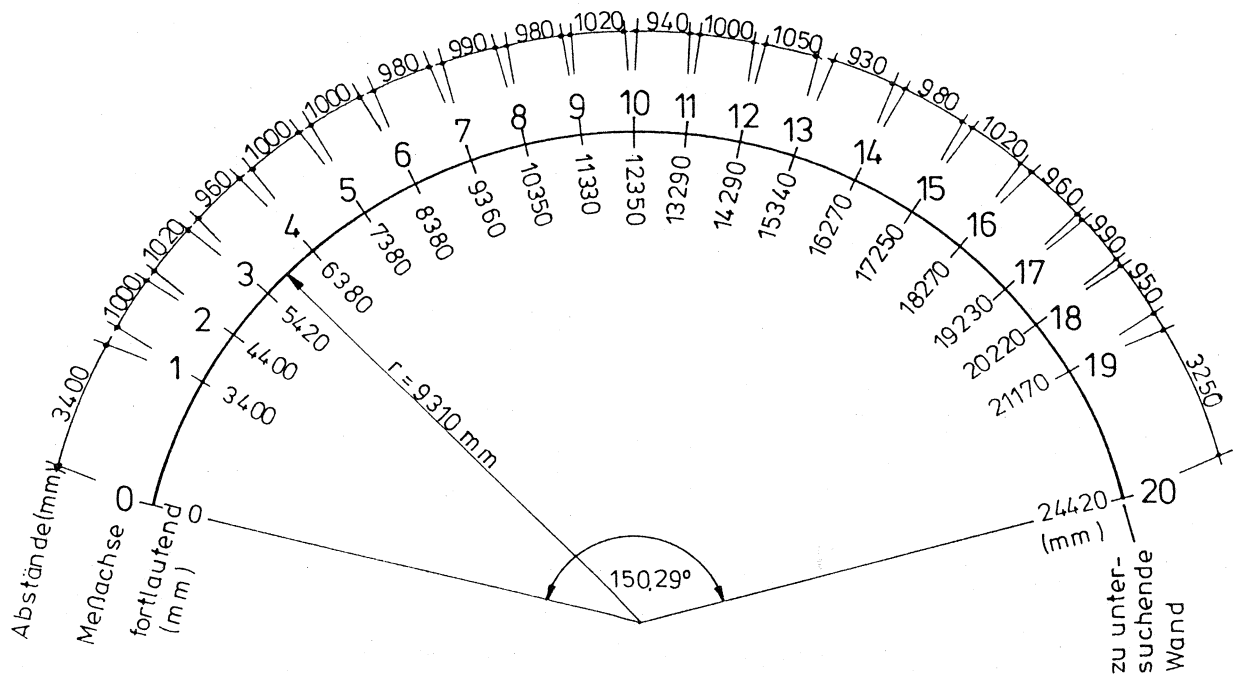
WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 18 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus emailliertem Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit Ringversteifung				x	x	x	
ohne Ringversteifung	x	x	x				x
UNTERDRUCK (mm WS)	0	37	0	0	85	101	75
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt 1	190	187	190		190	190	
2	185	172	184		180	178	
3	182	161	181		179	182	
4	180	147	178		177	190	
5	176	136	171		173	185	
6	174	136	170		171	173	
7	173	136	171		170	170	
8	172	138	173		170	171	
9	170	137	169	169	169	170	148
10	169	143	170				
11	166	146	164				

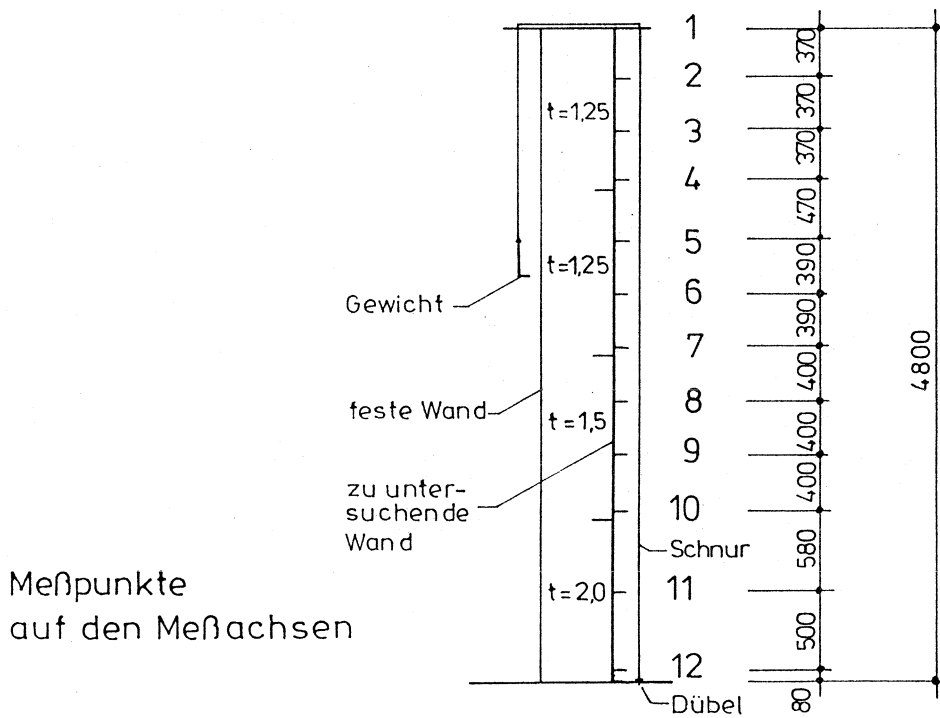
WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 19 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus emailiertem Stahl)



Anlage 7 Untersuchungen am Behälter  
aus V2A-Stahl

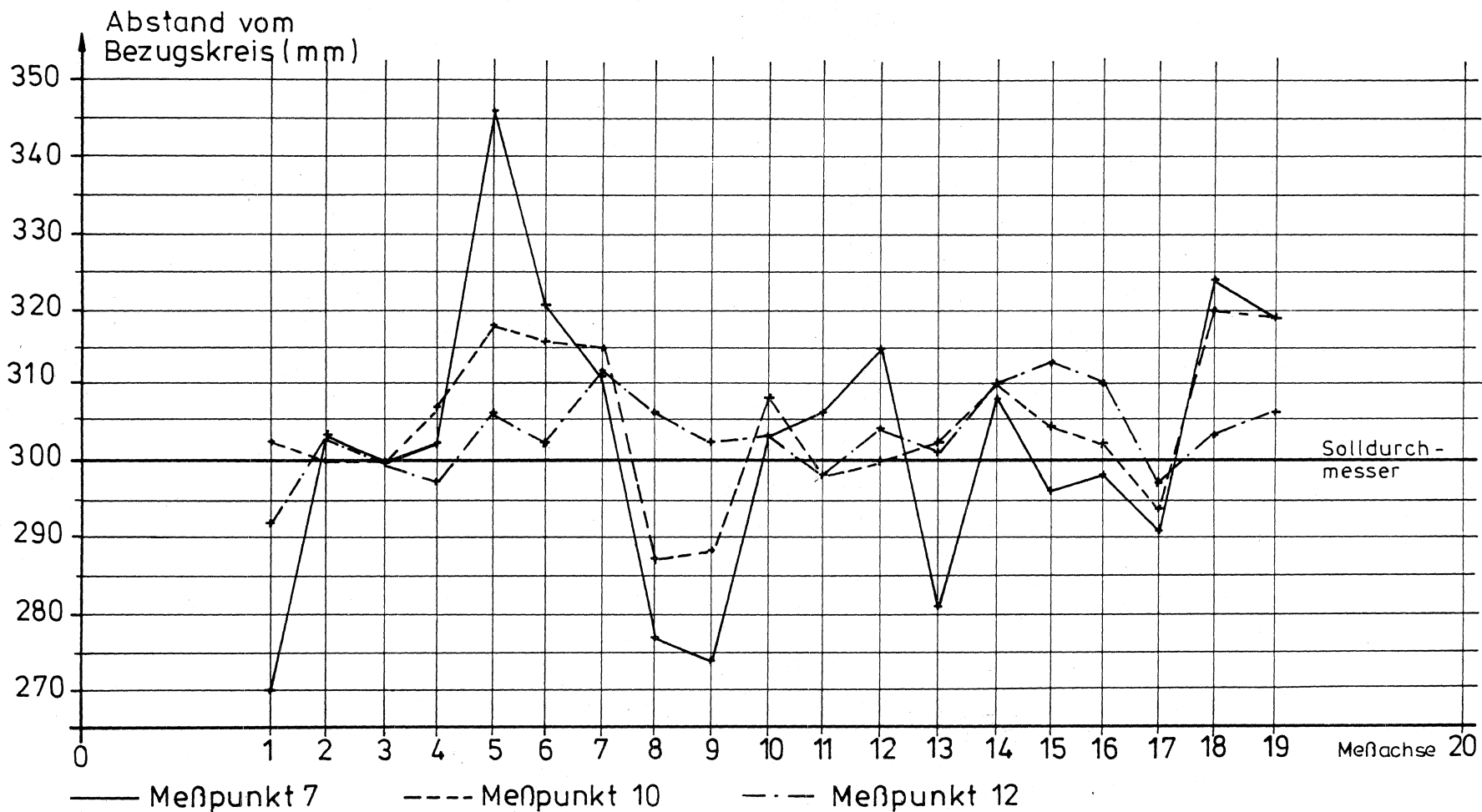


Messachsen im Grundriß

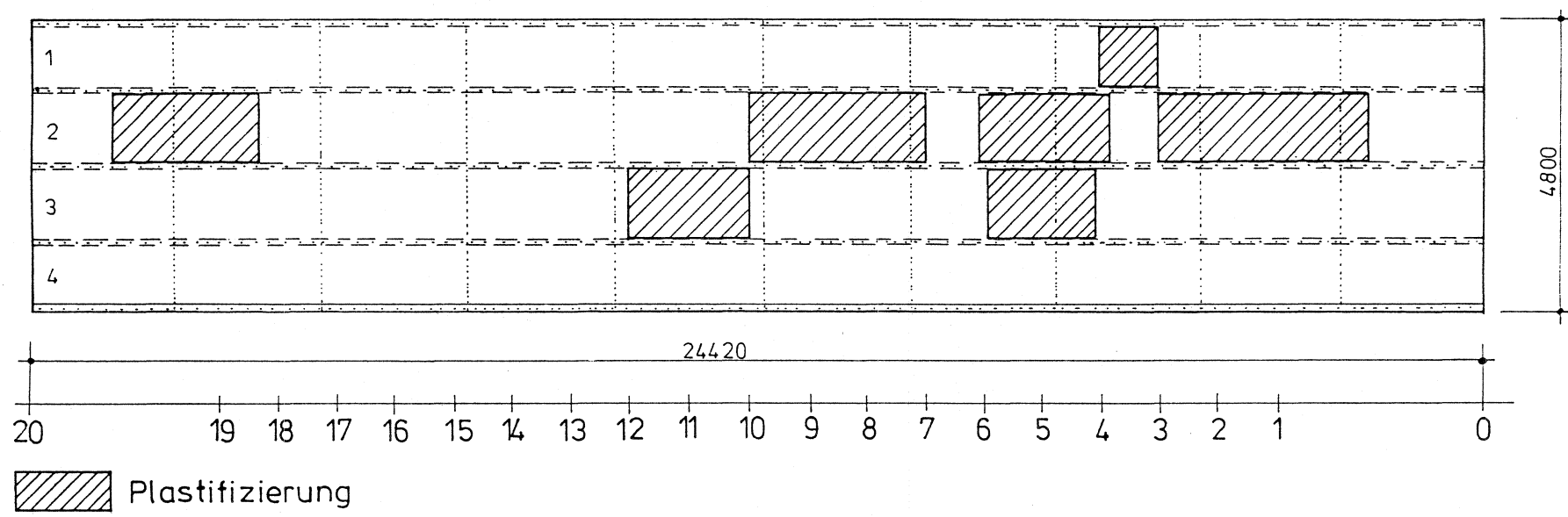


Messpunkte auf den Messachsen

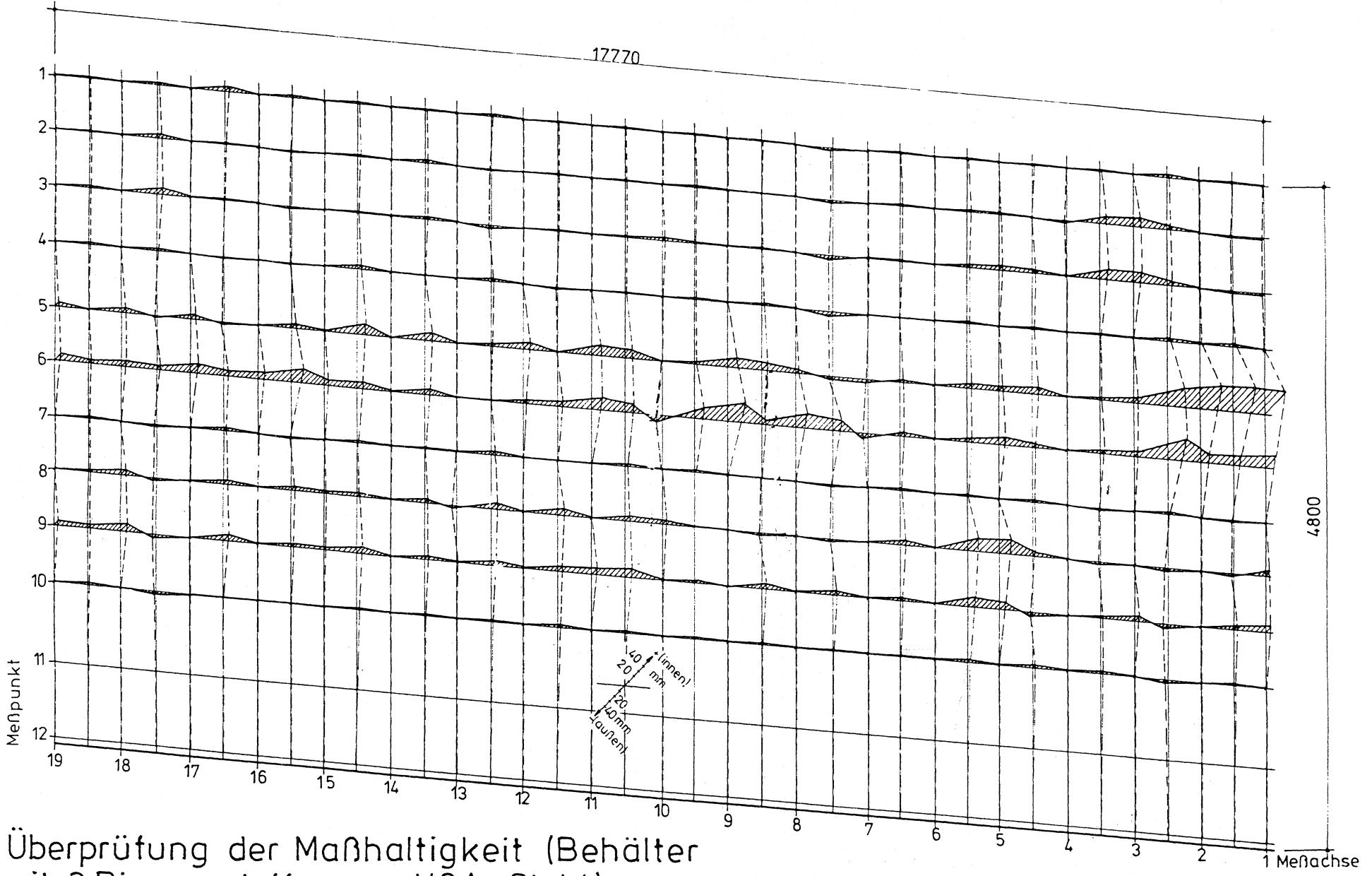
Anordnung der Messstellen (V2A-Stahl)



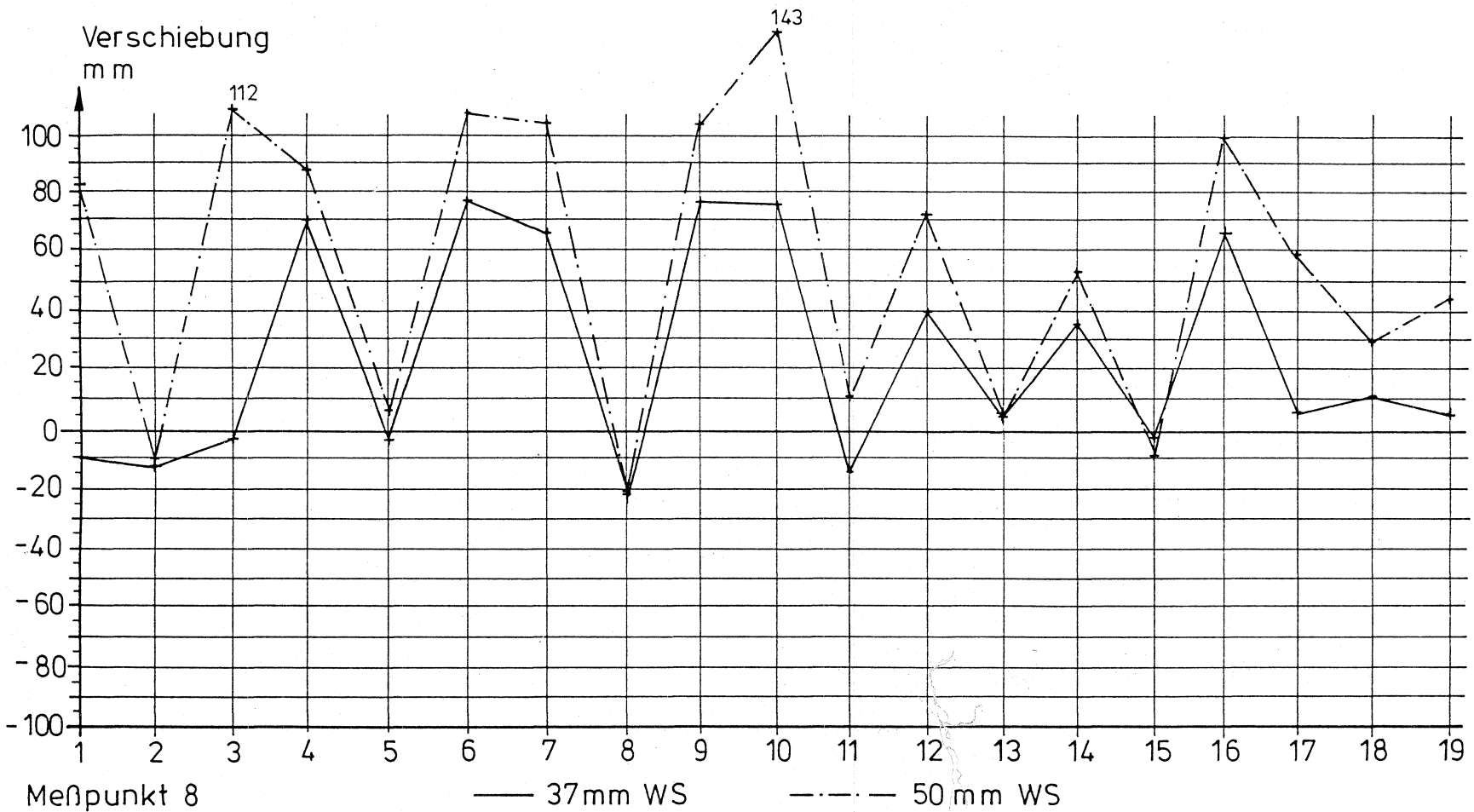
Überprüfung der Maßhaltigkeit (Behälter mit 1 Ringversteifung, V2A-Stahl)



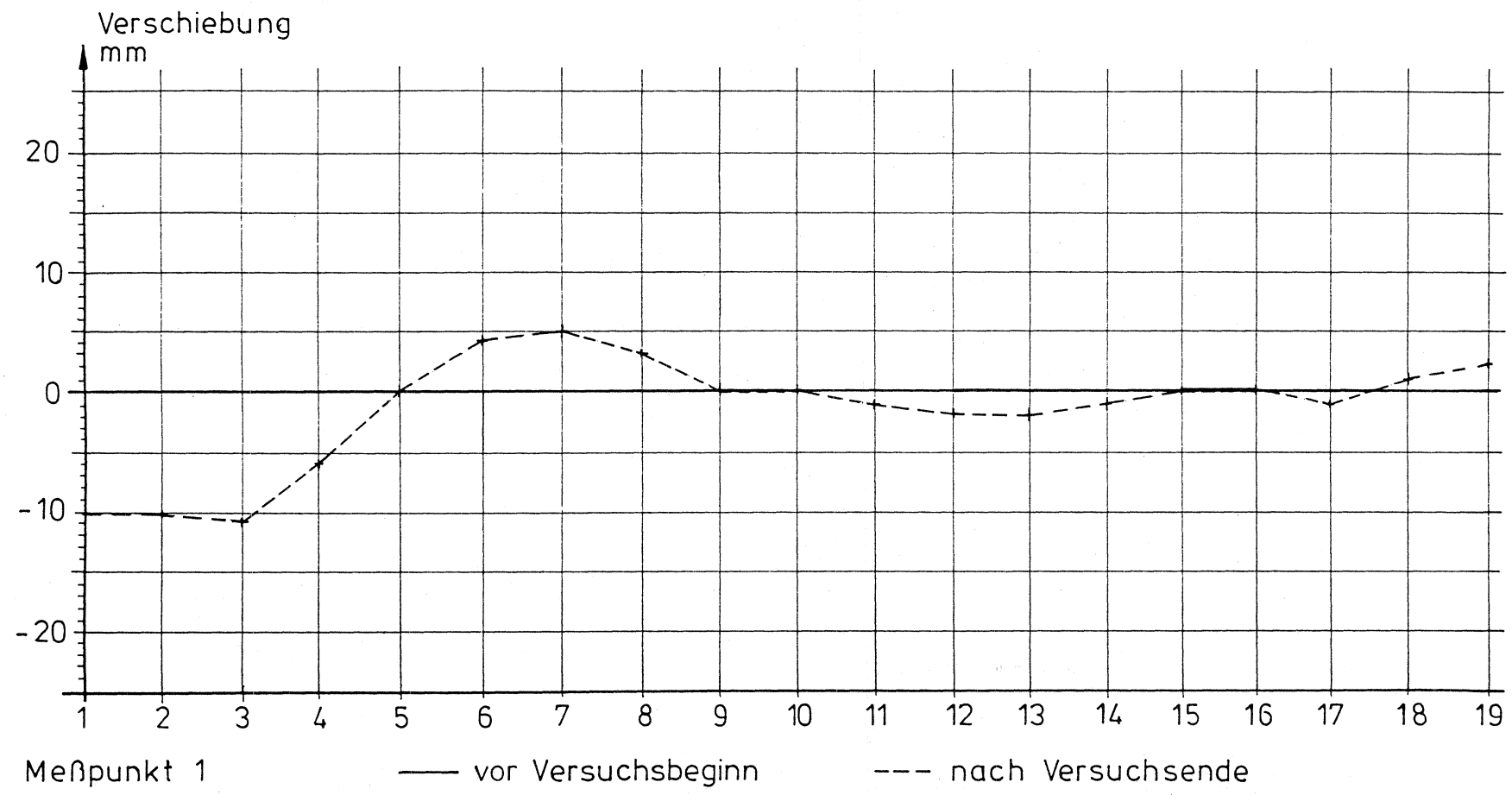
Augenscheinliche Beulen und Plastifizierungen vor dem Belastungsversuch (Behälter mit 3 Ringversteifungen, V2A-Stahl)



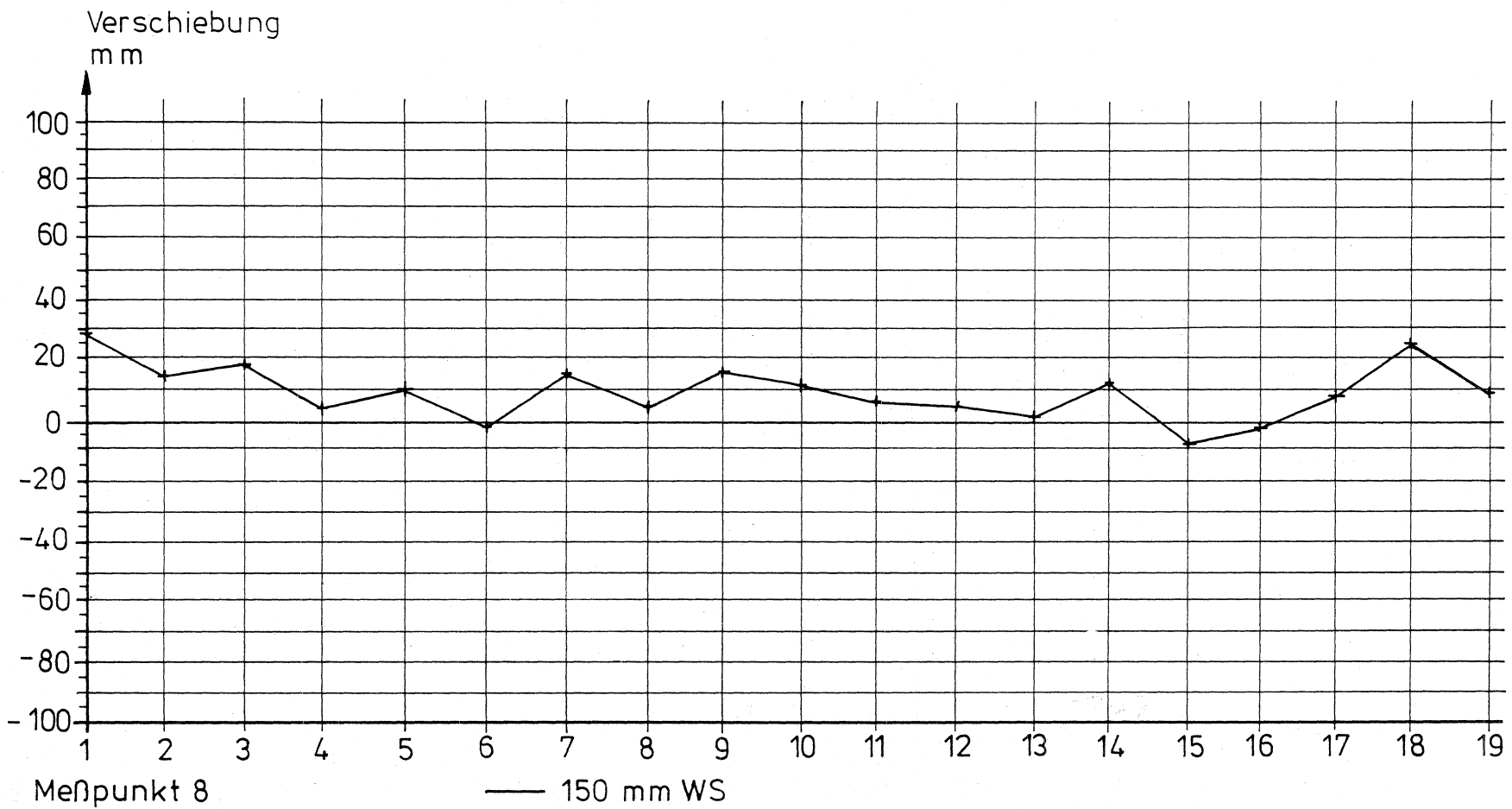
Überprüfung der Maßhaltigkeit (Behälter mit 3 Ringversteifungen, V2A-Stahl)



Verschiebung in Höhe des Meßpunktes 8  
(Behälter mit 1 Ringversteifung, V2A-Stahl)

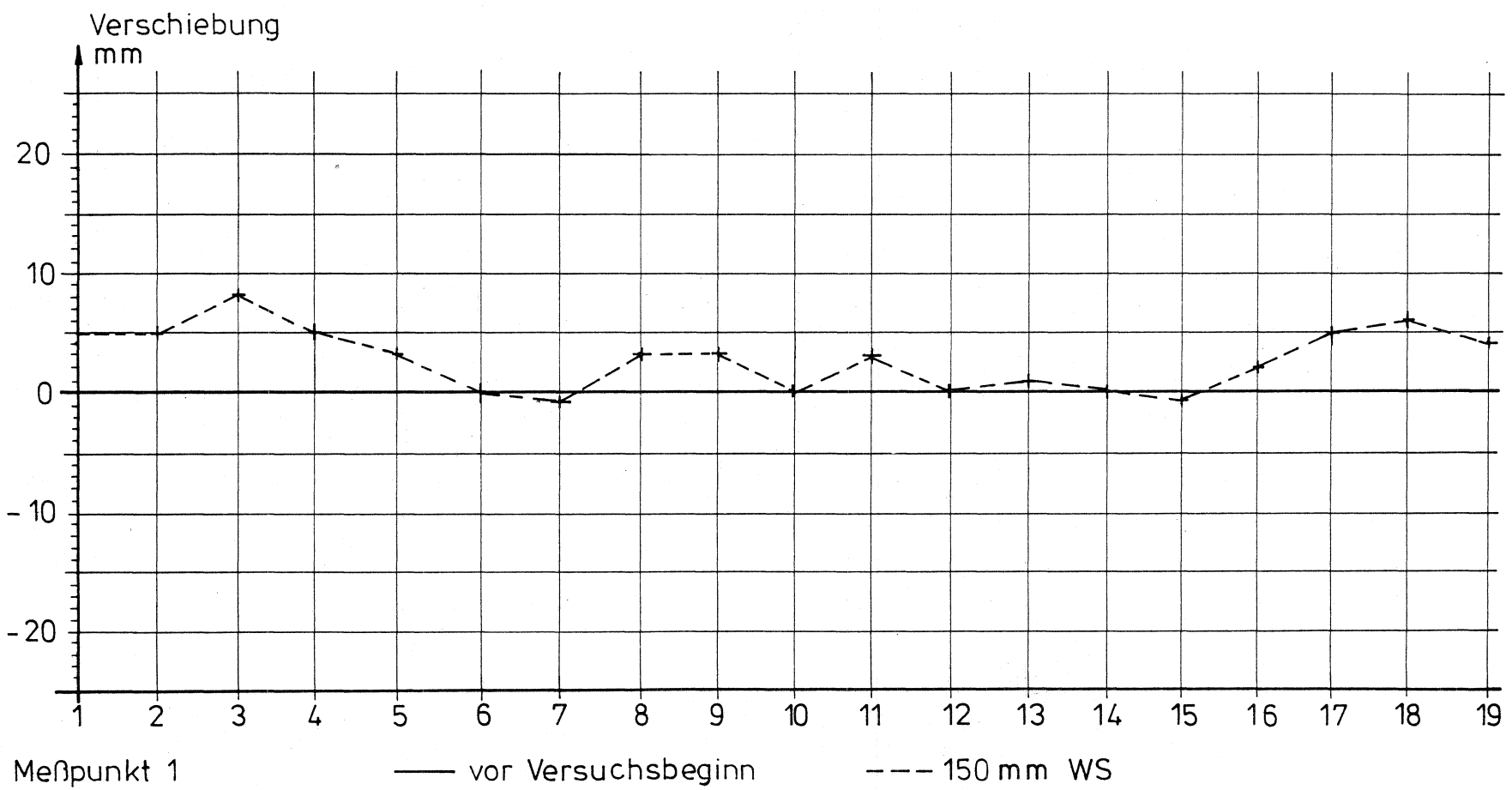


Verschiebung des oberen Randes nach Versuchsbeendigung  
(Behälter mit 1 Ringversteifung, V2A-Stahl)



Verschiebung in Höhe des Meßpunktes 8  
(Behälter mit 3 Ringversteifungen, V2A-Stahl)





Verschiebung des oberen Randes bei einem Unterdruck von 150 mm WS (Behälter mit 3 Ringversteifungen, V2A-Stahl)

Meßachse	Meßergebnis (mm) im Meßpunkt		
	7	10	12
1	270	302	292
2	303	300	300
3	300	300	300
4	302	312	297
5	346	318	306
6	321	316	300
7	311	315	312
8	277	287	306
9	274	288	302
10	303	308	303
11	306	298	298
12	315	300	304
13	281	302	301
14	308	310	310
15	296	304	313
16	298	302	310
17	291	294	297
18	324	320	303
19	319	319	311

MESSUNGEN AM BEHÄLTER ZUR ÜBERPRÜFUNG DER MASSHALTIGKEIT (radiale Abstände zwischen Bezugsebene und Behälter, Wand aus V2A-Stahl)

Meßachse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Meßergebnis (mm)																				
Meßpunkt 1	120	117	119	116	117	115	116	120	120	119	115	115	113	117	117	116	115	115	115	
2	119	113	116	113	116	114	116	120	117	117	114	118	115	116	111	113	120	116	115	
3	117	114	114	108	113	116	118	122	120	113	115	122	120	116	106	114	126	118	116	
4	116	115	111	108	112	117	122	125	120	110	117	127	124	117	97	113	130	124	120	
5	115	113	111	110	115	118	124	126	118	107	117	126	121	118	100	115	130	123	120	
6	113	112	112	114	117	123	127	128	116	110	118	125	117	109	100	115	130	122	119	
7	112	110	112	116	120	127	129	129	114	110	120	124	119	111	100	116	131	121	119	
8	116	110	113	121	119	122	128	130	110	110	120	120	119	113	103	115	133	121	121	
9	120	116	114	120	118	123	125	130	110	108	120	122	118	119	106	113	128	120	121	
10	124	119	115	120	118	126	126	125	111	111	120	121	119	117	100	113	127	120	123	
11	125	125	117	118	116	123	125	125	110	115	119	120	120	119	117	115	126	116	122	
12	129	132	122	120	116	125	125	126	115	120	120	120	120	120	118	117	127	114	120	

WEGMESSUNGEN IN DEN MESSACHSEN VOR VERSUCHSBEGINN (geglättete Meßwerte, Behälter mit 3 Ringversteifungen, Wand aus V2A-Stahl)

zwischen Meßachse	<u>1</u> <u>2</u>	<u>2</u> <u>3</u>	<u>3</u> <u>4</u>	<u>4</u> <u>5</u>	<u>5</u> <u>6</u>	<u>6</u> <u>7</u>	<u>7</u> <u>8</u>	<u>8</u> <u>9</u>	<u>9</u> <u>10</u>	<u>10</u> <u>11</u>	<u>11</u> <u>12</u>	<u>12</u> <u>13</u>	<u>13</u> <u>14</u>	<u>14</u> <u>15</u>	<u>15</u> <u>16</u>	<u>16</u> <u>17</u>	<u>17</u> <u>18</u>	<u>18</u> <u>19</u>
Meßergebnis (mm)																		
Meßpunkt 1	16	20	18	16	17	17	9	16	17	17	16	18	16	18	18	22	18	16
2	16	12	25	16	16	16	10	15	16	16	16	14	18	16	13	16	22	16
3	21	11	29	15	18	16	6	16	14	13	16	9	18	16	13	15	28	18
4	17	18	16	16	17	15	7	16	16	16	14	17	17	20	14	15	17	17
5	14	30	14	23	20	20	12	20	6	19	-5	11	26	35	23	10	6	7
6	11	42	15	14	17	23	24	-10	27	25	12	13	25	25	29	10	7	10
7	14	17	13	16	17	16	12	15	17	18	15	22	16	16	13	19	12	17
8	6	11	13	5	27	23	12	14	11	17	30	32	24	21	23	22	5	12
9	7	3	12	3	34	20	21	25	18	25	18	22	19	26	19	26	3	8
10	16	10	17	17	19	16	11	16	16	17	17	16	16	16	15	15	10	17

WEGMESSUNGEN ZWISCHEN DEN MESSACHSEN VOR VERSUCHSBEGINN (Stichmaß zwischen den Meßachsen, Behälter mit 3 Ringversteifungen, Wand aus V2A-Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit 1 Ringversteifung		x	x	x	x	x	
mit 3 Ringversteifungen						x	x
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	50	75	0	150
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt	1	123			113	120	125
	2	118				116	166
	3	119				113	154
	4	120				116	131
	5	110				163	190
	6	115				139	173
	7	100	102	210		112	130
	8	112	102	195		125	144
	9	124	107	176		131	150
	10	132	114	170		124	132
	11	130				125	155
	12	128				129	129

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 1 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus V2A-Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit 1 Ringversteifung		x	x	x	x	x	
mit 3 Ringversteifungen						x	x
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	50	75	0	150
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt	1	118				108	117
	2	117					113
	3	117					114
	4	115					115
	5	120					162
	6	115					131
	7	110	78	99			110
	8	112	95	102			110
	9	122	113	110			116
	10	127	126	107			119
	11	130					125
	12	134					132

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 2 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus V2A-Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit 1 Ringversteifung		x	x	x	x	x	
mit 3 Ringversteifungen							
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	50	75	0	0
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt	1	123				112	119
	2	130					133
	3	125					136
	4	106					111
	5	113					120
	6	120					120
	7	125	180	231			112
	8	120	117	232			113
	9	115	155	224			124
	10	114	134	201			115
	11	120					117
	12	125					122

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 3 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus V2A-Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit 1 Ringversteifung	x	x	x	x	x		
mit 3 Ringversteifungen						x	x
UNTERDRUCK (mm WS)	0	37	50	75	0	0	150
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt 1	120				114	116	121
2	115					108	126
3	115					108	132
4	112					108	111
5	106					110	146
6	117					114	132
7	110	182	210			116	120
8	115	185	202			121	125
9	122	182	200			120	125
10	126	163	190			120	121
11	122					118	141
12	120					120	121

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 4 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus V2A-Stahl)



SILOKONSTRUKTION							
mit 1 Ringversteifung		x	x	x	x		
mit 3 Ringversteifungen						x	x
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	50	75	0	150
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt	1	120				120	117
	2	130					120
	3	132					120
	4	123					112
	5	142					127
	6	147					133
	7	133	122	139			120
	8	118	115	125			146
	9	114	105	117			134
	10	120	110	113			118
	11	122					116
	12	118					116

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 5 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus V2A-Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit 1 Ringversteifung		x	x	x	x	x	
mit 3 Ringversteifungen							
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	50	75	0	150
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt	1	117				121	115
	2	120					115
	3	124					114
	4	133					116
	5	135					117
	6	140					118
	7	142	214	244			123
	8	141	218	252			127
	9	142	213	241			122
	10	140	194	218			123
	11	132					126
	12	124					123
							125

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 6 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus V2A-Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit 1 Ringversteifung		x	x	x	x	x	
mit 3 Ringversteifungen							
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	50	75	0	0
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt	1	118				123	116
	2	120					116
	3	123					118
	4	125					122
	5	130					118
	6	137					117
	7	140	190	231			129
	8	140	215	245			128
	9	142	210	222			125
	10	135	179	191			126
	11	129					125
	12	123					125

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 7 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus V2a-Stahl)

SILOKONSTRUKTION								
mit 1 Ringversteifung		x	x	x	x	x		
mit 3 Ringversteifungen							x	x
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	50	75	0	0	150
MESSERGEBNIS (mm)								
Meßpunkt	1	120				123	120	117
	2	120					120	143
	3	120					122	136
	4	120					125	121
	5	118					129	132
	6	115					156	163
	7	110	95	114			129	127
	8	112	90	91			130	134
	9	115	85	81			130	130
	10	110	84	77			125	123
	11	117					125	140
	12	123					126	125

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 8 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus V2A-Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit 1 Ringversteifung		x	x	x	x	x	
mit 3 Ringversteifungen						x	x
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	50	75	0	150
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt	1	120			120	120	117
	2	117				117	120
	3	118				120	117
	4	120				120	118
	5	115				137	162
	6	110				153	161
	7	107	179	210		114	115
	8	109	185	214		110	125
	9	112	182	206		110	115
	10	110	163	179		111	111
	11	114				110	119
	12	118				115	115

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 9 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus V2A-Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit 1 Ringversteifung	x	x	x	x	x		
mit 3 Ringversteifungen						x	x
UNTERDRUCK (mm WS)	0	37	50	75	0	0	150
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt 1	118				118	119	119
2	116					117	161
3	115					118	161
4	113					110	117
5	115					107	103
6	110					97	97
7	119	174	246			110	111
8	122	198	265			117	128
9	120	188	245			108	112
10	123	162	212			111	112
11	127					120	120
12	123					120	124

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 10 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus V2A-Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit 1 Ringversteifung		x	x	x	x	x	
mit 3 Ringversteifungen						x	x
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	50	75	0	150
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt	1	119				118	115
	2	117					114
	3	118					115
	4	119					117
	5	121					138
	6	125					141
	7	126	111	164			120
	8	129	115	140			120
	9	129	130	151			132
	10	122	113	140			120
	11	122					119
	12	123					120

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 11 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus V2A-Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit 1 Ringversteifung	x	x	x	x	x		
mit 3 Ringversteifungen						x	x
UNTERDRUCK (mm WS)	0	37	50	75	0	0	150
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt 1	119				117	115	115
2	120					118	152
3	125					122	145
4	132					127	128
5	130					141	152
6	130					132	148
7	135	174	196			124	126
8	138	178	210			120	125
9	132	162	195			122	130
10	118	131	167			121	123
11	120					120	141
12	120					120	122

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 12 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus V2A-Stahl)



SILOKONSTRUKTION							
mit 1 Ringversteifung		x	x	x	x	x	
mit 3 Ringversteifungen						x	x
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	50	75	0	150
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt	1	117				115	113
	2	119					115
	3	125					120
	4	130					124
	5	124					121
	6	119					117
	7	112	112	124			119
	8	116	120	121			115
	9	125	135	144			118
	10	128	149	171			119
	11	125					120
	12	123					120

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 13 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus V2A-Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit 1 Ringversteifung	x	x	x	x	x		
mit 3 Ringversteifungen						x	x
UNTERDRUCK (mm WS)	0	37	50	75	0	0	150
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt 1	119				118	117	117
2	120					116	130
3	120					116	130
4	123					117	112
5	120					118	122
6	120					109	122
7	120	148	170			111	107
8	120	155	173			113	125
9	125	152	168			119	132
10	123	139	151			117	117
11	121					119	113
12	120					120	119

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 14 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus V2A-Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit 1 Ringversteifung	x	x	x	x	x		
mit 3 Ringversteifungen						x	x
UNTERDRUCK (mm WS)	0	37	50	75	0	0	150
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt 1	117				117	117	116
2	110					111	107
3	104					106	97
4	95					97	91
5	100					100	100
6	103					109	112
7	98	97	92			100	96
8	100	98	91			101	93
9	103	98	92			102	96
10	109	99	92			110	110
11	117					117	116
12	120					118	119

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 15 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus V2A-Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit 1 Ringversteifung		x	x	x	x	x	
mit 3 Ringversteifungen						x	x
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	50	75	0	150
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt	1	115				115	116
	2	112					113
	3	109					114
	4	109					113
	5	108					115
	6	108					126
	7	107	165	201			116
	8	110	176	210			115
	9	111	175	200			113
	10	112	165	185			113
	11	115					115
	12	120					117

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 16 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus V2A-Stahl)

SILOKONSTRUKTION mit 1 Ringversteifung mit 3 Ringversteifungen	x	x	x	x	x	x	x
UNTERDRUCK (mm WS)	0	37	50	75	0	0	150
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt 1	115				114	115	120
2	118					120	138
3	122					126	127
4	128					130	138
5	128					137	177
6	135					148	174
7	128	121	188			131	138
8	122	128	180			133	141
9	122	134	165			128	134
10	127	119	150			127	128
11	125					126	125
12	128					127	127

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 17 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus V2A-Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit 1 Ringversteifung		x	x	x	x	x	
mit 3 Ringversteifungen						x	x
UNTERDRUCK (mm WS)		0	37	50	75	0	150
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt	1	115				116	115
	2	118					116
	3	120					118
	4	126					124
	5	132					132
	6	132					129
	7	130	152	165			121
	8	134	155	165			131
	9	135	155	165			133
	10	130	145	152			120
	11	123					116
	12	115					114

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 18 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus V2A-Stahl)

SILOKONSTRUKTION							
mit 1 Ringversteifung	x	x	x	x	x		
mit 3 Ringversteifungen						x	x
UNTERDRUCK (mm WS)	0	37	50	75	0	0	150
MESSERGEBNIS (mm)							
Meßpunkt 1	117				115	115	119
2	118					115	148
3	122					116	135
4	126					120	135
5	125					127	175
6	125					132	175
7	122	120	155			119	137
8	123	128	167			121	130
9	123	135	175			127	153
10	125	142	158			123	133
11	124					122	142
12	120					120	121

WEGMESSUNGEN AM BEHÄLTER IN MESSACHSE 19 (radiale Abstände zwischen Meßachse und Behälterwand, Wand aus V2A-Stahl)