

Messung der Wandreibungskräfte in Gärfutterhochsilos aus glasfaserverstärktem Kunststoff und die Lastannahmen nach DIN 1055

Von Klaus Grimm, Weihenstephan

Aus den Arbeiten der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik Weihenstephan

Für die Herstellung von Gärfutterhochsilos wird seit einigen Jahren in größerem Umfang glasfaserverstärkter Polyester verwendet. Ziel der Untersuchung ist, nachzuweisen, ob die Lastannahmen nach DIN 1055 für dünnwandige Gärfuttersilos aus hochwertigem Kunststoff in der Praxis wirklich zutreffen oder ob sie niedriger angesetzt werden können, da durch eine Werkstoffeinsparung die Baukosten erheblich verringert werden könnten. Bei den unter normalen Einsatzbedingungen durchgeführten Befüllungs- und Entleerungsversuchen an ausgeführten Silos wurde festgestellt, daß die Lastannahmen nach DIN 1055 der Silagegruppen I bis III selbst unter höchstmöglicher Belastung und Lastfolge nicht erreicht werden. Für dünnwandige Hochsilos mit Obenentnahme lassen die Untersuchungsergebnisse den Schluß zu, daß mit den in der Schweiz üblichen geringeren Wandstärken noch eine ausreichende Sicherheit für die Behälter gegeben ist.

Der Gärfutterhochbehälter, **Bild 1**, dem nach dem Bekanntwerden des „Harvestore-Systems“ (Durchlaufsilos) in Europa vielfach der Lukenbandsilo mit Arbeitsbühne (Vorschlag Weihenstephan) und der Hochsilo mit Elektro-Selbstgreiferanlage (Drehkran bei großen Anlagen, Laufkran bei kleinen Anlagen, kombiniert mit Preßdeckel) folgte, nimmt in allen Ländern mit intensivem Futterbau und der Notwendigkeit, Futter zu konservieren, ständig an Bedeutung zu.

Die Verwendung von Kunststoffen für den Bau von Gärfuttersilos bietet gegenüber den bisher üblichen Baustoffen verschiedene Vorteile, **Bild 2**: weitgehende Gasdichtigkeit, Beständigkeit gegen Säuren, Wartungsfreiheit, geeignet für alle drei Silageklassen, geringes Eigengewicht, leichte Versetzbarkeit (damit verleihbar), schnelles Aufstellen.

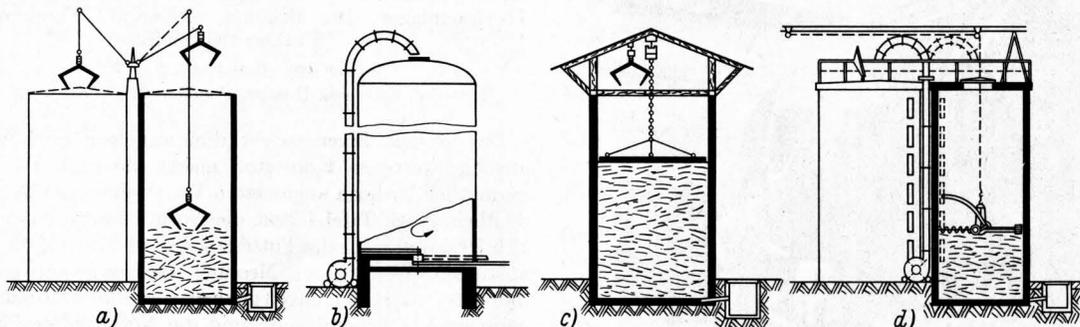


Bild 1. Systeme von Hochsilos.

- a) Gärfutterhochsilo; großer Tauchdeckel; Greifer für Beschickung und Entnahme (Thiemann 1930)
- b) Harvestore-System (Durchlaufsilos); Untenentnahme mit Fräse (A. O. Smith 1950)
- c) Hochsilo mit Preßdeckel; Greifer für Befüllung und Beschickung (ab 1955)
- d) Lukenbandsilo mit Arbeitsbühne (Bauart Weihenstephan 1960); Lukenband für Hand- oder Fräsenentnahme

Nachteilig ist, daß die Kunststoffe derzeit mit den anderen Baustoffen preislich nicht konkurrieren können. Die Kunststoffsilos sind ferner nicht so variabel in den Größen; z. B. ist der Durchmesser zur Zeit auf 3,5 m beschränkt, wenn der Behälter im Wickelverfahren hergestellt ist und in einem Stück per Achse angeliefert wird.

Einige Beispiele der Anwendung von Kunststoffen im Gärfutterbehälterbau sind in **Bild 3** dargestellt. Nach dem der-

Werkstoffe	gasdicht	Wartung Pflege	Versetzbarkeit	wärmedämmend	Silageklassen		
					I U < 65%	II U = 65-77%	III U > 77%
Beton							
monolith. Bauweise	■	■	■	■	■	■	■
Dauben	■	■	■	■	■	■	■
Formstein ¹⁾	■	■	■	■	■	■	■
Leichtbeton ²⁾	■	■	■	■	■	■	■
Metall							
Stahl emailliert	■	■	■	■	■	■	■
Stahl verzinkt	■	■	■	■	■	■	■
Aluminium verschraubt	■	■	■	■	■	■	■
Aluminium geschweißt	■	■	■	■	■	■	■
Kunststoff³⁾	■	■	■	■	■	■	■
Holz							
getränkt	■	■	■	■	■	■	■
imprägniert ⁴⁾	■	■	■	■	■	■	■

Bild 2. Die Brauchbarkeit verschiedener Baustoffe für den Bau von Gärfuttersilos.

- 1) innen und außen geschützt; 2) kunststoffbeschichtet;
- 3) glasfaserverstärkter Polyester; 4) mit Gütezeichen

Oberregierungsbaurat Dr.-Ing. Klaus Grimm ist Betriebsleiter der dem Institut für Landtechnik (Direktor: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. W. G. Brenner) der Technischen Hochschule München angeschlossenen Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik in Weihenstephan.

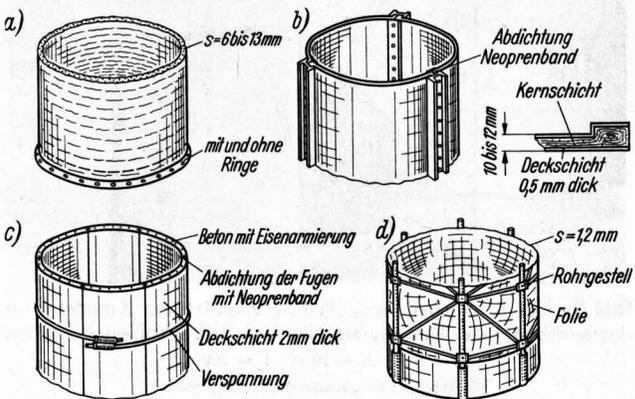


Bild 3. Beispiele für die Verwendung von Kunststoffen für den Bau von Gärfutterhochsilos.

- a) Glasfaserstränge (rovings) im Wickelverfahren; Silo ist selbsttragend aus einem Stück
- b) Segment-Bauweise. Silo besteht aus vorgefertigten Einzelteilen, die in U-Säulen zusammengehalten werden (Kernschicht: aus glasfaserverstärktem Kunststoff; Deckschicht: Polyester)
- c) Leichtbetonsilo mit Kunststoffbeschichtung; die Deckschicht aus Epoxidharz dient nur als Oberflächenschutz. Der Silo, aus Einzelfertigteilen, wird mit Spannräumen gehalten
- d) Kunststoffoliensilo. Silo besteht aus verschweißten Folien aus Polyäthylen mit Trevira-Einlage mit einem Rohrgestell als Stützkonstruktion

zeitigen Stand der Technik unterscheidet man zwischen Konstruktionen, die im Wickelverfahren aus einem Stück hergestellt sind, **Bild 4**, und solchen, die aus Einzelteilen in Segmentbauweise auf der Baustelle erst montiert werden, **Bild 5**. Bei beiden Behältern übernimmt die Glasfaser die Stabilität des Behälters, während das Polyester die Glasfaser luftdicht abschließt und durch Zugabe eines Härters eine Verschiebung derselben abschließt.

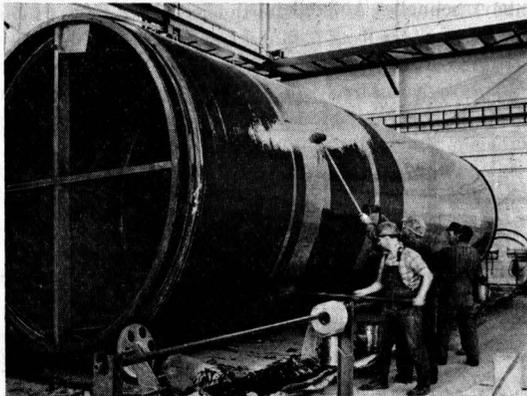
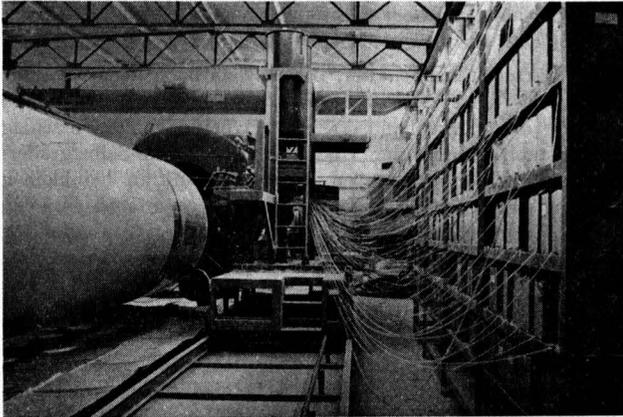


Bild 4a und b. Herstellung von Kunststoffhochsilos im Wickelverfahren mit Glasfasersträngen (rovings) als Einlage.
Werkfotos: Luipoldhütte AG, Amberg/Obb.

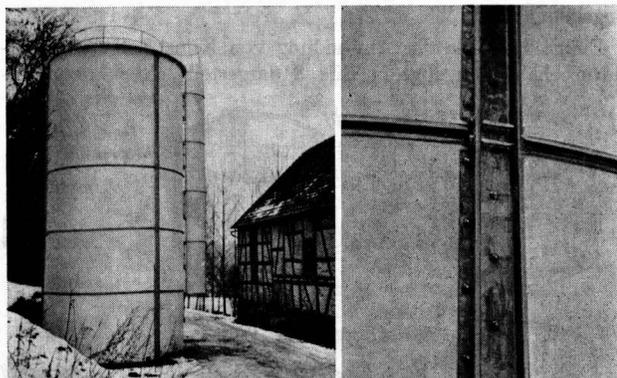


Bild 5a und b. Hochsilo aus glasfaserverstärktem Kunststoff in Segmentbauweise. Einzelfertigteile sind in U-Profilen gehalten.
 $D = 5 \text{ m} \quad H = 10 \text{ m} \quad V = 200 \text{ m}^3$
(Hersteller: Ver. Kunststoffwerke, Fulda)

Die von der Praxis immer mehr geforderte Wartungsfreiheit wird auch bei den Leichtbetonsilos mit vorgefertigten Segmenten durch Kunststoffbeschichtung, **Bild 6**, erzielt. Das Epoxyd-Harz wird auf die Einzelfertigteile im Werk auf den nassen Beton nach dem Plast-Veneer-Verfahren eingelassen. Die Abdichtung zwischen den einzelnen Fertigteilen erfolgt durch ein Neopremband und die Übernahme der Ringspannung durch außenliegende Spannringe, wie sie von Holzsilos bzw. Daubensilos her bekannt sind. Wenn man Hochsilos aus verschweißten Folien

mit Treviraeinlage erstellen will, muß zunächst die Siloform durch Rohrkonstruktion, **Bild 7**, vorgegeben werden. Praktische Versuche haben bisher ergeben, daß sich derartige Kunststoffsilos nur für die Handentnahme aus einem Lukenband eignen werden.

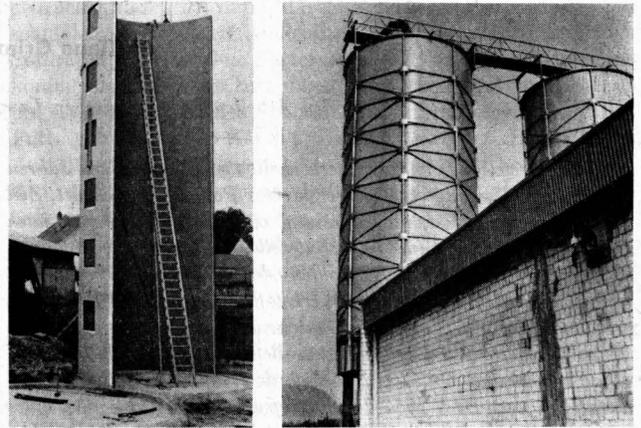


Bild 6. (links). Leichtbeton-Hochsilo mit Kunststoffbeschichtung in Segmentbauweise.

$$D = 5,1 \text{ m} \quad H = 12,5 \text{ m} \quad V = 255 \text{ m}^3$$

(Hersteller: Katz & Klumpp AG, München)

Bild 7 (rechts). Zwei Hochsilos aus verschweißten Folien mit Treviraeinlagen. Die Behälter stehen auf Fundamenten für Untenentnahmefräse.

$$D = 5 \text{ m} \quad H = 10 \text{ m} \quad V = 200 \text{ m}^3$$

(Hersteller: Farbwerke Hoechst, Frankfurt/M.; Vorschlag Weidemann)

Das geringe Eigengewicht dünnwandiger Gärfutterbehälter aus hochwertigem Kunststoff macht die nach DIN 1055 [6] vermutlich zu hoch angesetzten Wandreibungskräfte besonders deutlich. Nach **Tafel 1** geht die Norm nämlich davon aus, daß sich 70% und mehr des Futterstockgewichtes auf die Silowände abstützen. Wenn durch Messung nachgewiesen werden kann, daß unter den Bedingungen der heutigen Siloverfahren wesentlich geringere Kräfte auftreten, und die Norm entsprechend überarbeitet wird, könnten die Baukosten der Silos aus glasfaserverstärktem Polyester erheblich gesenkt werden.

Tafel 1. Lastannahmen für Gärfuttersilos in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt des Einfüllgutes nach DIN 1055.
z Futterstocktiefe, von der Oberfläche der Füllung aus gerechnet

Annahmen für die Berechnung der Silowände:	Klasse I stark vorgewinkelte Silage	Klasse II Vorwinkelsilage	Klasse III Naßsilage
Trockensubstanzgehalt %	> 35	35—23	< 23
Feuchtegehalt U^* %	< 65	65—77	> 77
Berechnungsgewicht γ Mp/m^3 Schüttdichte ρ^* t/m^3	} 0,65	0,75	1,00
Vertikaldruck p_v Mp/m^2			
Horizontaldruck p_h Mp/m^2	0,70 p_v	0,70 p_v	1,00 p_v
spez. Wandreibungskraft p_w Mp/m^2	0,16 p_h	0,14 p_h	0,10 p_h

*) Die Schüttdichte ρ und der Feuchtegehalt U sind in DIN 1055 nicht angegeben.

Nach DIN 1055 wirken in der Futterstocktiefe z im Siloquerschnitt F

$$\text{die Vertikalkraft } P_v = p_v F$$

und auf die (abgewinkelte) Zylinderwand bis zur Futterstocktiefe z

$$\text{die Horizontalkraft } P_h = \frac{p_h F_M}{2}$$

und senkrecht dazu

$$\text{die Wandreibungskraft } P_w = \frac{p_w F_M}{2},$$

wobei $F = D^2 \pi/4$ den Siloquerschnitt und $F_M = D \pi z$ die Zylindermantelinnenfläche von der Oberfläche bis zur Tiefe z des Futterstockes bedeuten. Für den gefüllten Silo, d. h. für die Futterstocktiefe z gleich der Füllhöhe h des Silos, erreichen die Kräfte P_v , P_h und P_w ihre Maximalwerte.

Die Glasfaser dient als Bewehrung dieses Kunststoffes; ihr gewichtsmäßiger Anteil beträgt je nach Verarbeitung 35 bis 70%. Dieses Material kostet verarbeitet etwa 7 bis 8 DM/kg.

Um die Ermittlung der Wandreibungskräfte praxisnah und unter den verschiedensten Bedingungen durchführen zu können, wurden für die Untersuchungen drei Gärfutterhochsilos eingesetzt¹⁾. Im folgenden wird über erste Forschungsergebnisse berichtet²⁾.

1 Versuchsdurchführung

Auf den Versuchsbetrieben stand uns durch eine schlagkräftige Feldhäckslerkette eine überdurchschnittliche Bergeleistung von 10 bis 16 t/h Luzerne (Feuchtegehalt $U = 60$ bis 70%) und 18 bis 24 t/h Silomais ($U = 55$ bis 72%) zur Verfügung, die eine rasche Füllung der Versuchsbehälter ermöglichte. Dies war erforderlich, da hohe Befüllleistung — wie Vorversuche ergaben — maximale Wandreibungslasten zur Folge haben. Die erste Vorversuchsreihe wurde mit zwei Behältern aus glasfaserverstärktem Kunststoff mit Obenentnahmetechnik durchgeführt, **Bild 8**. Die Entnahme erfolgte von Hand bzw. mit einer Obenfräse. Für die zweite Versuchsreihe standen drei Behälter aus glasfaserverstärktem Kunststoff, **Bild 9**, davon einer mit 5 Entnahmeluken, auf einem Prüfstand zur Verfügung; alle drei Behälter werden mit einer Untenfräse entleert.

¹⁾ Die Versuchsbehälter für Obenentnahme stellt die Luitpoldhütte Amberg in dankenswerter Weise kostenlos zur Verfügung.

²⁾ Der Bundesminister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten unterstützt das Forschungsvorhaben durch Bereitstellen von Mitteln über das Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL).

Der Verfasser dankt auch an dieser Stelle Ing. Leonhard Maier für die Mitarbeit bei den vorliegenden Untersuchungen.

Behälterdurchmesser 3,40 m;
Behälterhöhe 10,60 m;
Wanddicke oben 6 mm,
unten 9 mm;
Entnahmeluken 5 (Behälter 1)
bzw. 6 (Behälter 2)



Bild 8. Prüfstand zur Messung der Wandreibungskräfte in Gärfuttersilos aus glasfaserverstärktem Kunststoff bei Obenentnahmetechnik.

Behälterdurchmesser 3,35 m;
Behälterhöhe 11,0 m;
Wanddicke oben 9 mm,
unten 12 mm

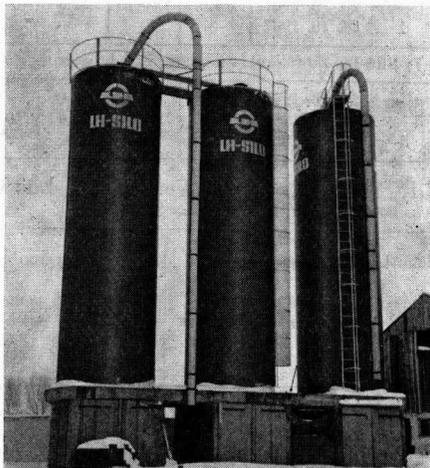


Bild 9. Prüfstand zur Messung der Wandreibungskräfte in Gärfuttersilos aus glasfaserverstärktem Kunststoff bei Untenentnahmetechnik.

2 Meßvorrichtung und deren Eichung

Zur Messung der senkrechten Stützlast wurde zwischen den kreisförmigen Behälterrund und das Fundament ein mit einem Frostschutzmittel gefüllter Wasserschlauch gelegt und dieser mit einem Manometer verbunden. Der Behälter steht damit auf einer Wasserwaage; während der Messung wurden die Sicherheitshalteschrauben für den Hochsilo gelöst. Zunächst wurde am Manometer die Anzeige für das Eigengewicht des Behälters ermittelt. Um bei der Eichung der Meßvorrichtung einen möglichst breiten Bereich meßtechnisch zu erfassen, wurden die vom Futterstock her zu erwartenden Wandreibungslasten für die verschiedenen Silagegruppen geschätzt.

Es wurden drei verschiedene Eichungen durchgeführt:

1. durch zusätzliches Belasten des leeren Behälters mit 10mal je 100 kg auf die Decke des Behälters;
2. ferner wurde ein Zehntel der Gesamtlänge des Prüfschlauches unter eine Prüfpresse gelegt und bei entsprechender Belastung geeicht.

Beide Eichkurven ergaben nur Werte für einen bestimmten Meßbereich; die Meßpunkte lagen jedoch nahezu auf einer Geraden.

3. Um sicherzugehen, daß auch über den ganzen Bereich diese Gerade erhalten bleibt, wurde die Gesamtlänge des jeweiligen Prüfschlauches so in Schneckenform auf eine Grundplatte gelegt, daß sich die Schlauchwandungen nicht gegenseitig berühren konnten, **Bild 10**. Darauf wurden diese mittels einer Platte nach **Bild 11** belastet und die Eichkurve ermittelt, **Bild 12**.

Alle drei ermittelten Eichkurven sind fast identisch und bestätigen so die Brauchbarkeit der gewählten Meßmethode.

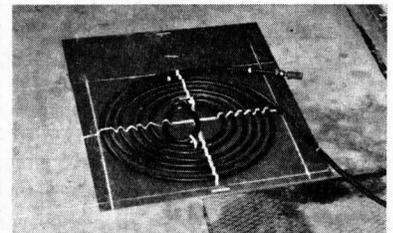
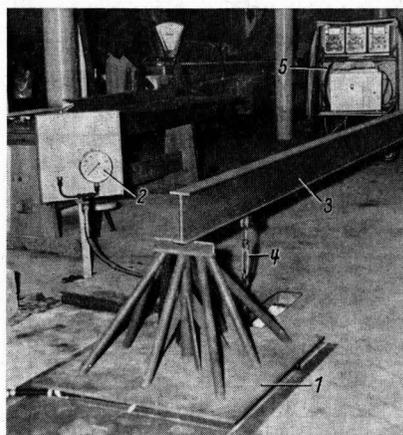


Bild 10. Spiralförmige Anordnung des Druckschlauches für die Eichung der Meßvorrichtung.



- 1 Belastungsplatte
- 2 Manometer zum Ablesen des Druckes (Wandreibungskraft) im Meßschlauch
- 3 zweifach gelagerter Belastungsbalken
- 4 Zugseil für die Belastung durch Eichgewichte bzw. Hydraulikzylinder im Unterschoß. Messung der Zugkraft mittels Dehnstab mit Dehnungsmeßstreifen
- 5 Verstärker und Oszilloscript

Bild 11. Ansicht der kompletten Vorrichtung zur Belastung bzw. Eichung des Prüfschlauches nach **Bild 10**.

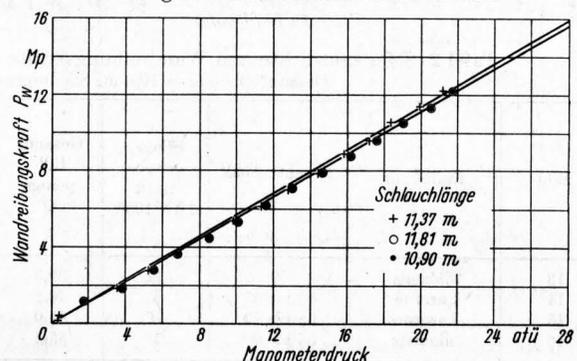


Bild 12. Eichdiagramm für den Prüfschlauch bei einer Eichung nach **Bild 11**.

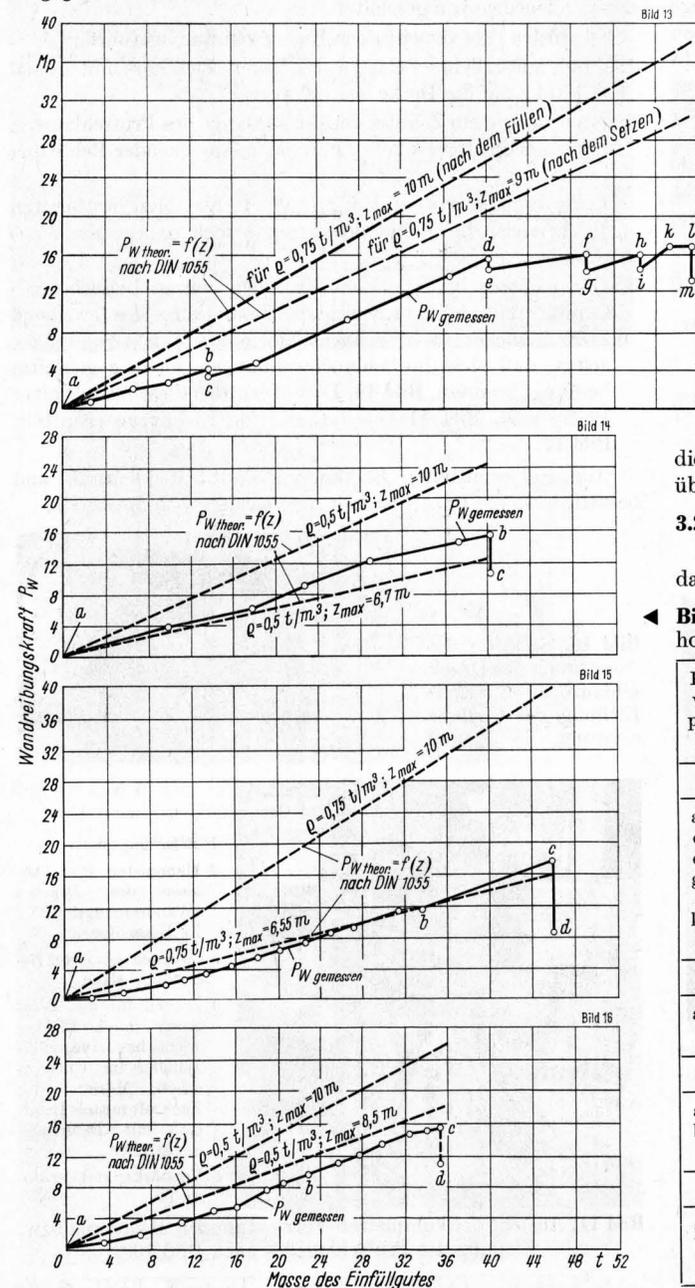
3 Messung der Wandreibungskräfte

3.1 Einfluß der Futterart und des Feuchtegehalts

Nach DIN 1055 ist bei den Lastannahmen beim Entwurf eines Silos der Feuchtegehalt des Futters zu berücksichtigen. Die in dieser Norm festgelegten Konstanten für die verschiedenen Silagegruppen wurden in nachstehend beschriebenen Großversuch mit großer Sicherheit bestätigt, z. T. aber als zu hoch angesetzt ermittelt.

Eingelagert wurden

- a) Luzerne, die erfahrungsgemäß die größte Reibungswirkung gegenüber anderen Futterarten hat, in der Silagegruppe I



Tafel 2. Schüttgutedichte und Wandreibungskräfte nach DIN 1055 und nach den Versuchen in Bild 13 bis 16. Gesamtfüllhöhe z = 10,0 m; Silodurchmesser D = 3,4 m (Silo in Bild 13: D = 3,55 m)

Bild	Einfüllgut	Feuchtegehalt U %	Silagegruppe nach DIN 1055	Gesamtfüllmenge Q t	Schüttgutedichte $\rho = \frac{4Q}{\pi D^2 z}$			Wandreibungskraft P_W		
					nach DIN 1055 t/m ³	nach dem Füllen t/m ³	nach dem Setzen t/m ³	gerechnet nach DIN 1055*) Mp	gemessen nach dem Füllen Mp	$\frac{P_{W \text{ gemessen}}}{P_{W \text{ gerechnet}}}$ %
13	Silomais	69	II	59,3	0,75	0,67	0,75	38,7	17,3	45
14	Luzerne	59 bis 67	I	40,2	0,50	0,44	0,66	29,9	15,3	51
15	Luzerne	68 bis 73	II	46,0	0,75	0,50	0,77	39,2	17,3	44
16	Silomais	55 bis 60	I	35,4	0,50	0,39	0,46	29,9	15,5	52

*) $P_{W \text{ max}} = \frac{\rho W F_M}{2}$;

$P_W = 0,7 \mu \gamma z$;
 $F_M = \pi D z$;

Silagegruppe I: $\gamma_I = 0,5 \text{ Mp/m}^3$;
Silagegruppe II: $\gamma_{II} = 0,75 \text{ Mp/m}^3$;

$\mu_I = 0,16$
 $\mu_{II} = 0,14$

(Feuchtegehalt U = 58 bis 64%) und in der Silagegruppe II (U = 68 bis 73%) und

- b) Silomais, der — insbesondere wenn er in der Teig- bis Körnerreife eingelagert wird — eine kratzende Wirkung auf die Behälterwand ausübt.

Bild 13 bis 16 zeigen die gemessenen Wandreibungskräfte von vier Versuchen in Abhängigkeit von der Masse des eingefüllten Gutes während der Füllzeit.

Eine Unterbrechung der Füllung über einen Zeitraum von 10 bis 12 h bewirkt bereits einen Abfall der Wandreibungskraft um etwa 6 bis 10%, wie in Bild 13 deutlich zu erkennen ist. Daraus folgt, daß die Steigung der Wandreibungskurve beim Füllen (und damit die Lastannahme) dann am höchsten ist, wenn der Behälter schlagartig, d. h. ohne Unterbrechung, gefüllt werden kann, Bild 14. Die bei diesem Versuch zur Verfügung stehende Schlagkraft reichte aus, um einen 100-m³-Silo in 4 h zu füllen. Eine solche Schlagkraft ist aber bei dieser Siloeinheit in der landwirtschaftlichen Praxis nicht zu erwarten. Damit liegen die gemessenen Werte weit im sicheren Bereich der DIN-Vorschrift. Wird der Behälter in zwei bis drei Füllungen (auch Nachfüllung) in einem größeren Zeitraum gefüllt (Bild 13, 15 und 16), was im praktischen Betrieb in der Regel zutrifft, dann erreichen die gemessenen Wandreibungskräfte nur 50 bis 60% der theoretischen Werte nach DIN 1055, **Tafel 2**. Diese Versuchsergebnisse für die Befüllung von Obenentnahmesilos (Lukenbandsilos u. dgl.)

lassen es wünschenswert erscheinen, die Konstanten für die Silagegruppen, insbesondere für dünnwandige Behälter, zu überarbeiten.

3.2 Einfluß des Vergärungsvorganges

Alle vier Versuche haben durch das Setzen eindeutig gezeigt, daß bereits während des Einfüllens ein Siliervorgang des Futter-

◀ Bild 13 bis 16. Wandreibungskraft beim Befüllen von Gärfutterhochsilos in Abhängigkeit von der Masse des Einfüllgutes.

Kurvenpunkte	Einfülltag	mittl. Tages-temp. °C	Einfüllzeit Uhrzeit	Füllleistung t/Tag	Füllstockhöhe m	Bemerkungen
Bild 13. Einfüllgut: Silomais; Feuchtegehalt U = 69%						
a—b	9. 10. 1967	13,0	13—18	13,7		
c—d	10. 10. 1967	12,0	8—18	26,4		
e—f	11. 10. 1967	10,5	8—12	9,2		
g—h	16. 10. 1967	15,6		5,0		
i—k	18. 10. 1967	4,3		2,8		
k—l	19. 10. 1967	3,1		2,2	10,0	nach dem Füllen
m	10. 12. 1967	—		—	9,0	nach dem Setzen
Bild 14. Einfüllgut: Luzerne; Feuchtegehalt U = 59 bis 67%						
a—b	19. 6. 1967	15,0	13—17	40,2	10,0	nach dem Füllen
c	26. 7. 1967	—	—	—	6,7	nach dem Setzen
Bild 15. Einfüllgut: Luzerne; Feuchtegehalt U = 68 bis 73%						
a—b	19. 9. 1967	13,4	13—18	33,6		
b—c	20. 9. 1967	11,6	13—15	12,4	10,0	nach dem Füllen
d	24. 10. 1967	—	—	—	6,55	nach dem Setzen
Bild 16. Einfüllgut: Silomais; Feuchtegehalt U = 55 bis 60%						
a—b	23. 10. 1967	9,0	9—18	22,0		
b—c	24. 10. 1967	11,6	9—17	13,4	10,0	nach dem Füllen
d	18. 3. 1968	—	—	—	8,5	nach dem Setzen

stockes erfolgt und ein zunächst schneller, dann langsamer Rückgang der Wandreibungslast zu verzeichnen ist, und zwar je nach Silagegruppe um 30 bis 50%. Die entstehenden Gärgase wirken dabei eher positiv als negativ, da anzunehmen ist, daß diese vorzugsweise nach oben ausweichen — zum Teil auch am Silomantel —, was sich günstig auf das Nachrutschen des Futterstockes auswirken kann.

3.3 Einfluß der Futterentnahme mittels Oberfräse

Der Gärvorgang dauert etwa 3 bis 4 Wochen. In diesem Zeitraum setzt sich der Futterstock naturgemäß je nach Füllungsgrad und Füllmethode: bei öfterem Nachfüllen um 10 bis 15%, bei einmaligem Nachfüllen um etwa 30%. Die Wandreibung geht dabei entsprechend der Futterstockhöhe vor und nach dem Setzen ebenfalls zurück. Bei der täglichen Futterentnahme von 700 bis 900 kg sinkt die Wandreibungskraft schnell ab, jedoch nicht proportional mit der Futterstockhöhe bzw. -masse, **Bild 17**.

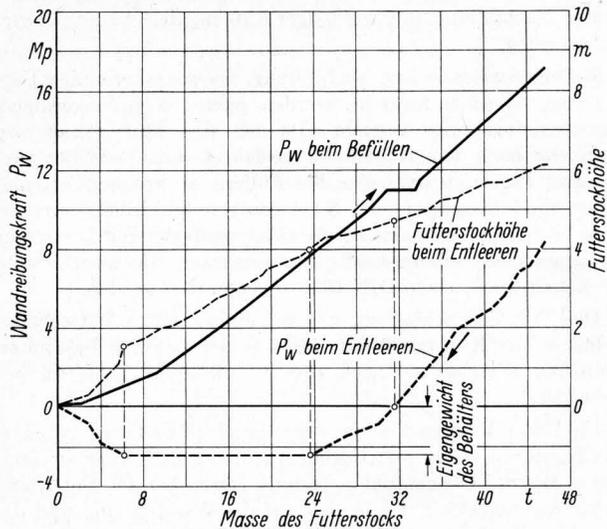


Bild 17. Verlauf der Wandreibungskraft beim Befüllen und Entleeren eines Gärfutterhochsilos aus Kunststoff bei Obenentnahme der Silage.

Befüllungsversuch mit Luzerne ($U = 68$ bis 78%) nach Bild 15

Bereits bei der Futterstockhöhe von 4,80 m werden keine nach unten gerichteten Wandreibungskräfte mehr gemessen. Von dieser Futterstockhöhe an werden bei weiterer Entleerung nach oben gerichtete Wandreibungskräfte gemessen, die den Behälter anzuheben versuchen. Das Ansteigen dieser nach oben gerichteten Wandreibungskräfte konnte meßtechnisch so lange verfolgt werden, bis das Eigengewicht des Behälters von 2,3 Mp bei einer Futterstockhöhe von etwa 4,8 m kompensiert war. Da man auf diese Erscheinung nicht vorbereitet war, konnte mit der angewandten Meßmethode das Ansteigen der nach oben gerichteten Wandreibungskräfte bei weiterem Entleeren nicht ermittelt werden. Es ist aber anzunehmen, daß bei einer Befestigung des Behälters auf dem Fundament senkrecht nach oben gerichtete Wand-

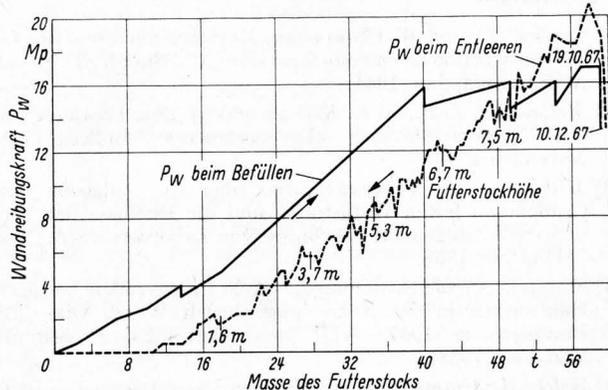


Bild 18. Verlauf der Wandreibungskraft beim Befüllen (Bild 13) und Entleeren eines Gärfutterhochsilos bei Entnahme von Silage durch Untenfräse.

Einfüllgut: Silomais; Feuchtegehalt $U = 69\%$ (Kl. II)

reibungskräfte von maximal — 4 Mp auftreten können, die durch das Ausdehnen der unteren Schichten des Futterstockes beim Entleeren des Behälters von oben verursacht werden. Bei einer Futterstockhöhe von etwa 1,5 m zeigt das Meßmanometer wieder Meßwerte (entsprechend dem Eigengewicht des Behälters) an; bei weiterem Entleeren geht die nach oben gerichtete Wandkraft allmählich auf Null zurück.

Aus dieser Versuchsreihe geht hervor, daß die Wandreibungskräfte bei Obenentnahme (maschinell oder von Hand) weit geringer sind als die bei der Befüllung und daher keine Bedeutung für die Bemessung der Behälter haben. Ferner wurde nachgewiesen, daß Gärfutterbehälter aus spezifisch leichtem Kunststoff auf jeden Fall mit dem Fundament verankert werden sollten, da durch Ausdehnung des Futterstockes eine nach oben gerichtete Wandreibung den Behälter anzuheben versucht.

3.4 Einfluß der Untenentnahme des Futters

Zunächst wurde für kurz gehäckselten Silomais festgestellt, daß sich im Zentrum des Arbeitsbereiches der Untenfräse ein Hohlraum bildet, der etwa einem Hohlkegel von 60 bis 120 cm Höhe und 50 bis 120 cm Durchmesser entspricht. Dieser Hohlraum setzt sich beim Arbeiten mit der Fräse nicht bis zur Silowand fort, da die Silage nach Durchlaufen der Fräse im ganzen Bereich des Fräsarmes nachrutscht, so daß sich selbst im Bereich des genannten Kegels etwa ein Drittel bereits wieder abgesetzt hat. Wie der unten beschriebene Versuch zeigt, gilt diese Beobachtung jedoch für Grassilage nicht.

Nach dem Gärungsvorgang wurde die Untenfräse erstmalig — und in diesem Falle sogar bei Frostwetter — am 12. 12. in Betrieb genommen. Wie in **Bild 18** zu erkennen ist, stieg bei der ersten Entnahme von etwa 600 kg Silage (Silomais) die Wandreibungskraft an, und zwar bis auf den Höchstwert, den sie beim letzten Befüllungsvorgang hatte. Diese Zunahme stellt sich, wenn auch weniger stark, bei jeder folgenden Entnahme ein. Sie entsteht durch die bei der Entnahme sich einstellende Hohlraumbildung im Zentrum des Fräsbereiches, wodurch kurzzeitig der Vertikaldruck im Außenbereich des Futterstockes zunimmt. Sowie der Entnahmevorgang beendet ist, baut sich die Wandreibungskraft entsprechend dem noch verbleibenden Inhalt ab.

Während des Entleerungsvorganges, der sich über den ganzen Winter erstreckte, wurden auch die Witterungseinflüsse beobachtet. Da Silomais und dritter Schnitt Wiesengras (z. T. gemischt mit einem Feuchtegehalt der Silagegruppe II) eingelagert worden waren, war ein Gefrieren des Futters möglich. Aus diesem Grunde wurden die Temperaturmaxima und -minima innerhalb 24 Stunden über einen längeren Zeitraum (2,5 Monate) gemessen. **Bild 19** (ein Ausschnitt aus Bild 18) läßt erkennen, daß bei langanhaltendem Frostwetter ein Nachrutschen des Futters nach der Futterentnahme geringer sein kann und daß deshalb zunächst bei der Entnahme eine größere Zunahme der Wandreibungskräfte zu verzeichnen war als bei Temperaturen über 0°C . Da diese Versuchsergebnisse an einem Behälter mit 3,35 m Durchmesser ermittelt wurden, ist mit großer Wahrscheinlichkeit anzunehmen, daß bei größerem Durchmesser die Wandbelastungen infolge der

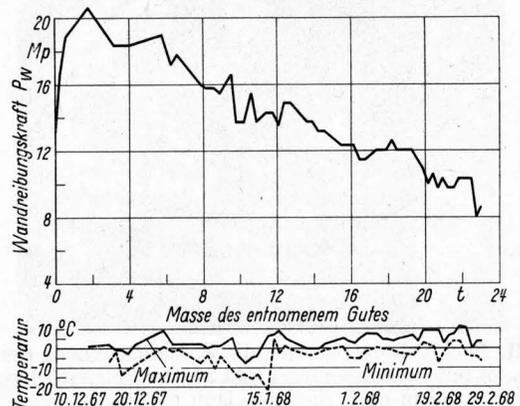


Bild 19. Einfluß des Temperaturverlaufes der Außenluft auf die Wandreibungskraft beim Entleeren eines Gärfuttersilos mittels Untenfräse (Ausschnitt aus Bild 18).

Einfüllgut: Silomais; Feuchtegehalt $U = 69\%$ (Kl. II)

Temperaturschwankungen geringer sind, da die Wärmekapazität im Gegensatz zum Umfang mit dem Quadrat des Silodurchmessers wächst. Hinzu kommt, daß Silos mit Untenentnahme grundsätzlich mit der Silagegruppe I gefüllt werden sollten, so daß keine Einfriergefahr mehr besteht.

Dieser Entnahmeversuch mit Untenfräse wurde im letzten Winter mit Grassilage mit niedrigem Feuchtegehalt ($U = 40\%$) wiederholt, weil nicht sicher war, ob die Ergebnisse hinsichtlich der Wandreibungskräfte bei Silomais (Bild 18) als allgemeingültig angesehen werden durften. Obwohl es sich um denselben Versuchssilo handelte, traten bei der Grassilage die in der Praxis bekannten Schwierigkeiten auf, daß die Untenentnahmefräse oft wenig, manchmal sogar gar nichts entnehmen konnte, weil der Futterstock nicht nachrutschte.

Wie aus Bild 20 hervorgeht, wurde wieder die höchste Wandreibungskraft bei der Beendigung der Füllung erzielt (12,7 Mp). Während des Setzvorganges nimmt die Wandreibungskraft (auf 5,0 Mp) wie bei den anderen Versuchen ab, um dann bei Entnahmebeginn wieder anzusteigen; sie erreicht dabei jedoch nicht die Höhe, die bei der Befüllung erzielt wurde. Bei der Entnahme in den letzten drei Monaten wurde festgestellt, daß die Fräse des öfteren leer durchlief und dabei nur sehr geringe Futtermengen entnahm. Wir führten zunächst das schlechte Nachrutschen des Futterstocks auf die Futterart und die Häcksellänge zurück. Bild 21 zeigt einen Blick von unten durch die Entnahmeöffnung in den Behälter. Die glatte Silowand ist deutlich zu erkennen, während die Futterhalme, da sie an der Wand nicht nachrutschen, auf eine enge Verflechtung unter-

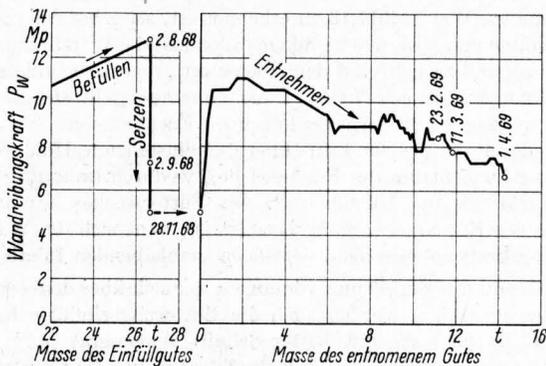


Bild 20. Verlauf der Wandreibungskraft beim Entleeren eines Gärfutterhochsilos durch Untenfräse.

Einfüllgut: Grassilage, 2. Schnitt; Feuchtegehalt $U = 40\%$ (Kl. I)
Häcksellänge < 40 mm (77%)
Überlängen 80 bis 150 mm (20%)

Futterstockhöhe nach dem Füllen am 2. 8. 1968:
 $z = 9,5$ m; $e = 0,32$ t/m³

Futterstockhöhe nach dem Setzen bzw. bei Beginn der Entnahme:
 $z = 6,7$ m; $e = 0,46$ t/m³



Bild 21. Blick von unten durch die Entnahmeöffnung des Gärfutterhochsilos mit Untenfräse nach Bild 20. Der Futterstock rutscht nicht nach, die Fräse läuft leer durch.

Silage wie in Bild 20
a Siloboden
b Silowand
c Unterseite des nicht nachgerutschten Futterstocks

einander hinweisen. Bild 20 verdeutlicht, daß Grassilage mit geringem Feuchtegehalt und Überlängen von 80 bis 150 mm (20%) für die Untenentnahme nicht geeignet ist.

4 Zusammenfassung

Die vorliegenden Untersuchungen, die mit dem Ziel eingeleitet wurden, der Landwirtschaft preisgünstige Gärfutterbehälter aus Kunststoff anbieten zu können, haben gezeigt, daß die Lastannahmen nach DIN 1055, aufgrund deren die Behälter dimensioniert werden, revidiert werden müssen.

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, daß selbst bei einer in der ländlichen Praxis kaum möglichen kurzfristigen Beschickung der Gärfutterhochsilos und einer höchstmöglichen Belastung der Silos mit Vorwelsilage der Gruppe I und II Wandreibungskräfte von höchstens 50% der Lastannahmen nach DIN 1055 gemessen wurden. Diese Werte sind nur bei wiederholter Nachfüllung in kurzfristiger Aufeinanderfolge annähernd zu erreichen.

Bei einer wiederholten Nachfüllung, die sich über einige Tage oder gar Wochen hinzieht, werden jedoch weitaus geringere Wandreibungskräfte erreicht. Da bei der Einlagerung von Gärfutter nach dem Kohlensäureverfahren mit einer über zwei bis drei Tage sich erstreckenden Füllung zu rechnen ist, und dabei ein Füllungsgrad des Silos von nur 80 bis 90% erreicht wird, treten in der Praxis bei der Silagegruppe I und II weitaus geringere Wandreibungskräfte und somit auch Horizontalkräfte im Behälter auf, als in DIN 1055 angenommen werden.

Dies läßt den Schluß zu, daß für dünnwandige Wirtschaftsbehälter aus Kunststoff mit den aus der Schweiz bekannten dünneren Wanddicken noch eine ausreichende Sicherheit gegeben ist.

Die Untersuchungen haben weiter ergeben, daß man zwischen Behältern mit Oben- und Untenentnahmetechnik unterscheiden sollte. Bei der Obenentnahmetechnik treten bei der Entnahme keine Zusatzkräfte auf, die sich auf die Wandreibung und die Horizontalkräfte auswirken könnten. Bei Gärfuttersilos mit Obenentnahme sollte man deshalb auf jeden Fall Erleichterung hinsichtlich der Bewehrung geben.

Bei Untenentnahme deuten die Versuche darauf hin, daß durch eine Pfropfenbildung und darauf folgendes Abbröckeln der Schichten im unteren Bereich (30 bis 50 cm bei Gras; 100 bis 150 cm bei Mais) eine Beulgefahr für die Silowand verbunden sein kann, wenn das eingelagerte Futter nicht exakt gehäckselt ist und vorwiegend aus dem zweiten und dritten Schnitt Wiesen-gras besteht.

Gärfuttersilos aus spezifisch leichten Kunststoffen müssen mit dem Fundament verankert werden, weil sich die unteren Futterstockschichten bei Obenentnahme mit abnehmender Futterstockhöhe ausdehnen und nach oben gerichtete Wandreibungskräfte entstehen lassen, die den Behälter anzuheben versuchen.

5 Schrifttum

- [1] Gurney, W., und W. Chainmann: Recommended practice for the construction of concrete farm silos. ACJ Standard 714—46 ACJ Journal, Jan. 1944.
- [2] McCalmout, J. R., W. C. Krueger und Cl. Eby: Pressures and other factors affecting silo construction. Bulletin 731, November 1946.
- [3] Mittelbach, B.: Untersuchungen über die Adhäsion von Grünut an festen Werkstoffen und die Einflüsse der Versuchsbedingungen auf Ergebnisse von Laborversuchen. Diss. TH Aachen 1968.
- [4] Stoppel, Alfred: Spannungszustände in lagernden körnigen Haufwerken in der Nähe einer ebenen Wand. Diss. TH Braunschweig 1967. [VDI-Forsch.-heft 525. Düsseldorf: VDI-Verl. 1968].
- [5] Wilcke, J.: Untersuchungen über die Druckausgleichssysteme von gasdichten Gärfutterbehältern. Diss. Univ. Kiel 1966. [s. a. Grundl. Landtechn. 17 (1967) Nr. 5, S. 165/71].
- [6] DIN 1055, Blatt 6. Lastannahmen für Bauten. Lasten in Silozellen (November 1964).