

Ein Mährescherfahrer, der die Bedienung der Automatik beherrscht, schätzt den verbesserten Bedienkomfort als wesentlich ein, zumal Bodenberührungen mit ihren Folgeerscheinungen — wie Erdaufnahme, Verstopfung und Beschädigungen des Mähreschers — kaum noch auftreten. Nicht möglich ist allerdings die „Kopierung“ tiefer, steilwandiger Querrinnen und das Überfahren großer Feldsteine. Hier ist die Aufmerksamkeit des Fahrers noch erforderlich.

### 5. Ökonomische Gesichtspunkte und Anwendernutzen

Ein wesentlicher Faktor ist die Arbeitserleichterung.

Weiterhin tritt nach /3/ eine Senkung der Einsatzkosten um 1,65 M/ha ein, die durch die Steigerung der Arbeitsproduktivität, die Verringerung der Schnittährenverluste und die Verringerung der Instandhaltungskosten zustande kommt. Demgegenüber steht eine Erhöhung der Einsatzkosten durch Abschreibung, Schmierstoffe und Versicherung von 1,25 M/ha. Damit ergibt sich ein quantifizierbarer Anwendungsnutzen von 0,40 M/ha.

### 6. Zusammenfassung

Aufbau und Funktion der Zusatzausrüstung „Automatische Schnitthöhenregelung für den Mährescher E 512“ werden beschrieben.

Die technischen Vorzüge gegenüber vergleichbaren Erzeugnissen werden erläutert.

Der Nutzen der Einrichtung, die die Teilautomatisierung eines ständig wiederkehrenden Bedienvorgangs ermöglicht, besteht insbesondere in der Entlastung des Mährescherfahrers.

Der quantifizierbare Anwendernutzen wird angegeben.

### Literatur

- /1/ —: Aufbau- und Bedienanweisung mit Ersatzteilkatalog für Schnitthöhenregelung Mährescher E 512. VEB Kombinat Fortschritt — Landmaschinen
- /2/ —: DDR — Wirtschaftspatent 79 878 45 c, 55/32
- /3/ —: Agrotechnische Konzeption „Automatische Schnitthöhenregelung für den E 512“. Unveröffentlichtes Material des VEB Kombinat Fortschritt A 9176

## Aus der Forschungsarbeit unserer Institute und Sektionen

### Berechnen der Lagerungsdichten landwirtschaftlicher Halmgüter in Behältern

Dr.-Ing. Chr. Fühl, KDT\*

#### 1. Problemstellung

Beim Bau von Einrichtungen der Konservierung und Lagerung landwirtschaftlicher Halmgüter gibt es gegenwärtig eine Reihe von Problemen, die dringend einer Klärung bedürfen. Diese Feststellung trifft vor allem für das Errichten von Gärfutterhochsilos zu. Die Beantwortung der offenen Fragen ist außerordentlich wichtig, wenn optimale Konstruktionen entwickelt und die Forderungen der Konservierungstechnik, der landwirtschaftlichen Technologie und der Ökonomie erfüllt werden sollen. Eine Kernfrage ist vor allem die Erforschung der Dichteverteilung in den Behältern.

Die Größe der Lagerungsdichte ist neben anderen Faktoren für eine ordnungsgemäße Silierung maßgebend /1/. Ihre Kenntnis ist außerdem für das Berechnen der Druckverluste beim Betrieb von Belüftungseinrichtungen /2/, für die Kapazitätsplanung von Behälteranlagen und vor allem für das Bestimmen der Vertikal- und Horizontaldrücke /3/ /4/ erforderlich. Die genaue Angabe der vom Füllgut herrührenden Belastungen auf den Baukörper ist Grundvoraussetzung für die Konstruktion von Silos.

#### 2. Stand der Forschung

Lagerungsdichten von Halmgütern wurden bisher überwiegend experimentell am technischen Original bestimmt. In Tafel 1 sind eine Reihe von Berechnungsgleichungen enthalten, die bis auf die Beziehungen von Day und Panda /11/ und Voss /9/ mit Hilfe der Regressionsrechnung aus den praktisch ermittelten Meßergebnissen gewonnen wurden. Anwendungsreife Verfahren zum Berechnen der Lagerungsdichte von Halmgütern in Behältern, die uneingeschränkt benutzt werden können und die auf den im Labor ermittelten Stoffkennwerten aufbauen, existieren nicht. In den bisher formulierten Regressionsgleichungen wurden als Einflußgrößen nur der Trockenmassegehalt  $T_M$ , die Füllhöhe  $h_F$  oder der Abstand  $z$  zum Füllgutspiegel und die Häcksellänge  $l_H$  oder

der Kurzhäckselanteil  $m_H$  betrachtet. Die mechanischen Eigenschaften des Halmguts in allgemeiner Form und die Lagerungsdauer wurden nicht berücksichtigt.

#### 3. Ziel der eigenen Untersuchungen

Die vollständige Klärung des physikalisch-mechanischen Verhaltens landwirtschaftlicher Halmgüter und das Aufstellen allgemeingültiger exakter Stoffgesetze erfordert intensive und umfangreiche Untersuchungen. Hierzu ist insbesondere das Schaffen und Anwenden präziser Meßverfahren Voraussetzung.

Aus der Vielzahl der bestehenden Probleme sollten unter Beachtung der Unzulänglichkeiten bisheriger Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet die folgenden gelöst werden:

- Für das Ermitteln von Lagerungsdichten war ein Berechnungsverfahren zu finden, das von den physikalisch-mechanischen Stoffeigenschaften ausgeht, die sich im Labor bestimmen lassen.
- Die Genauigkeit des gefundenen Berechnungsverfahrens war in der Praxis zu überprüfen. Für das Anwenden in breitem Maß waren Vorschläge auszuarbeiten und die Grenzen anzugeben.

#### 4. Berechnen der Lagerungsdichten

##### 4.1. Analyse der Einflußgrößen

Beim Entwickeln eines Berechnungsverfahrens ist es zunächst erforderlich, alle in Frage kommenden Einflußgrößen zu analysieren. Die Höhe der Lagerungsdichte landwirtschaftlicher Halmgüter in Behältern ist grundsätzlich von den folgenden drei Einflußgrößengruppen abhängig:

- Stoffeigenschaften des Halmguthaufwerks
- Parameter der Behälterkonstruktion
- Verfahrensbedingte Einflußgrößen.

Stoffeigenschaften, die einen Einfluß auf die Lagerungsdichte ausüben, werden durch das rheologische Retardations-

\* Universität Rostock, Sektion Landtechnik  
(Direktor: Prof. Dr.-Ing. habil. Chr. Eichler)

Tafel 1. Zusammenstellung bisher bekannter Berechnungsgleichungen für die Bestimmung der Lagerungsdichte landwirtschaftlicher Halmgüter

Literaturquelle	Berechnungsgleichung	Geltungsbereich
Grimm /5/	$\varrho_{LTM} = 11,958 + 3,691 \cdot TM + 25,727 \cdot z + 26,015 \cdot d_S + 34,484 \cdot d_S$	Langgut (Silage) 18% $\leq TM \leq 60\%$ 0,25m $\leq z \leq 11,00$ m 3,00m $\leq d_S \leq 5,00$ m 0,10m $\leq d_S \leq 2,50$ m
Grimm /5/	$\varrho_{LTM} = 25,627 + 0,786 \cdot TM + 10,154 \cdot z + 13,929 \cdot d_S + 27,583 \cdot d_S$	Häckselgut (Silage) 18% $\leq TM \leq 60\%$ 0,25m $\leq z \leq 11,00$ m 3,00m $\leq d_S \leq 5,00$ m 0,10m $\leq d_S \leq 2,50$ m
Müller /1/	$\varrho_L = 638,5 + 29,2 \cdot z$	Silage nach der Gärung TM: 40% (27% ... 55%) RG: 28% (21% ... 36%) in der TM 50% der Häckselmasse < 20mm 15% der Häckselmasse > 60mm 0 $\leq z \leq 15,00$ m d <sub>S</sub> = 7,30m
Müller /1/	$\varrho_L = 231,8 + 34,73 \cdot z$	Welkes Siliergut (gehäcksel) 30% $\leq TM \leq 50\%$
Müller u. a. /6/	$\varrho_L = 290,75 + 27,94 \cdot z + 5,78 \cdot m_H - 6,05 \cdot TM$	Silage 0,30m $\leq z \leq 16,00$ m 50% $\leq m_H \leq 85\%$ 30% $\leq TM \leq 60\%$
Müller u. a. /6/	$\varrho_L = 250 - 1030(1 - e^{-0,093z})$	Silage Geltungsbereich nicht angegeben
Schwandt und Fechner /7/	$\varrho_{LTM} = 77,03 + 11,04 \cdot z + 3,11 \cdot TM$	Silage Geltungsbereich nicht angegeben
Klamke /8/	$\varrho_L = 58,5 + 17,58 \cdot z$	Blattheu (Luzerne) 50% der Häckselmasse < 34mm, 15% der Häckselmasse > 105mm
Klamke /8/	$\varrho_L = 45,3 + 19,46 \cdot z$	Blattheu (Luzerne) 50% der Häckselmasse < 49mm, 15% der Häckselmasse > 110mm
Klamke /8/	$\varrho_L = 29,5 + 24,45 \cdot z$	Blattheu (Luzerne) 50% der Häckselmasse < 78mm 15% der Häckselmasse > 180mm
Klamke /8/	$\varrho_L = 30,3 + 12,09 \cdot z$	Halmheu 50% der Häckselmasse < 35mm, 15% der Häckselmasse > 72mm
Klamke /8/	$\varrho_L = 32,7 + 5,99 \cdot z$	Halmheu 50% der Häckselmasse < 105mm, 15% der Häckselmasse > 250mm
Voss /9/	$z = \frac{a \cdot m_1}{m_1 - 1} \varrho_L^{m_1 - 1} + C$	d <sub>S</sub> /h <sub>F</sub> → ∞ Die Konstanten a und m <sub>1</sub> müssen aus dem Verdichtungsversuch e = f(p) bestimmt werden C wird aus der Bedingung: bei z = 0: ρ <sub>L</sub> = ρ <sub>S</sub> bestimmt
Flala /10/	$\varrho_L = 1000 \cdot z / (0,216 + 1,076z)$	0 $\leq z \leq 8,00$ m 36,8% $\leq TM \leq 68,5\%$ TM > 75%
Day und Panda /11/	$\varrho_L = 40 e^{2,14(t - TM/100)} + 69,4 \cdot z \cdot e^{-\frac{480}{TM}(0,3 - \frac{TM}{100})}$	

verhalten des Guthaufwerks repräsentiert. Die mechanischen Eigenschaften der Einzelhalme, der Trockenmassegehalt und die Häcksellängenverteilung (Textur) sind dabei die zu berücksichtigenden Hauptfaktoren. Die mechanischen Eigenschaften der Einzelhalme können durch das Bestimmen der Biegesteifigkeit EI gekennzeichnet werden. Eine entsprechende Methode ist in /12/ und /13/ beschrieben.

Einflußgrößen durch die Konstruktion sind bei zylindrischen Behältern der Behälterdurchmesser, die Behälterhöhe und die Beschaffenheit der Oberfläche des inneren Behältermantels. Zunehmende Behälterhöhen erlauben bei optimaler Raumausnutzung größere Füllhöhen. Durch die damit verbundene Steigerung des mittleren Vertikaldruckes  $p_v$  wird

eine Erhöhung der mittleren Lagerungsdichte erzielt. Die Größe des Behälterdurchmessers beeinflußt den Wandreibungsanteil. Bei größeren Behälterdurchmessern werden deshalb unter der Voraussetzung konstanter Füllhöhe auch größere Vertikaldrücke vorhanden sein als bei kleineren Durchmessern. Die Oberflächenbeschaffenheit der Behälterinnenwand trägt zum Ablauf der Vorgänge an der Wirkpaarung Halmgut — Wand bei und beeinflußt die Größe der äußeren Reibungskoeffizienten.

Die verfahrensbedingten Einflüsse umfassen die Einflüsse durch das technische Verfahren und die Einflüsse durch das biologische Verfahren. Zu den Einflüssen durch das technische Verfahren gehören die Art des Befüllens und zusätzliche Verdichtungsmaßnahmen während und nach dem Befüllen. Die Verteilmethode und die Art des Befüllens sind beim Berechnen der Wandreibungskräfte zu berücksichtigen. Werden mit dem Lagern landwirtschaftlicher Halmgüter gleichzeitig Maßnahmen zu ihrer Konservierung verbunden, wie es beim Silieren und Belüften der Fall ist, muß durch den Ablauf bestimmter biologischer, chemischer und physikalischer Vorgänge mit einer Änderung der Stoffeigenschaften des eingelagerten Guts gerechnet werden.

#### 4.2. Darstellen möglicher Berechnungsvarianten

Die möglichen Berechnungsvarianten sind im Bild 1 dargestellt. Beim Betrachten eines Halmguthaufwerks in einem Behälter mit unendlich großem Durchmesser  $d_s$  entfällt der Wandeinfluß. Die Druckverhältnisse an einer Gutschicht der differentiellen Höhe dz sind im Bild 1 unter Variante 1 angegeben. Die Gleichgewichtsbeziehung lautet für diesen Fall:

$$p_v + dp_v = p_v + \varrho_L \cdot g \cdot dz \cdot \frac{10^{-4}}{9,81} \quad (1)$$

Durch Umformen der Gleichung (1) erhält man:

$$9,81 \cdot 10^4 \cdot \frac{dp_v}{\varrho_L \cdot g} = dz \quad (2)$$

Bevor die Integration der Gleichung (2) ausgeführt werden kann, muß für das Differential  $dp_v$  ein Ausdruck mit dem Differential  $d\varrho_L$ , das aus der Retardationsfunktion (auch Kriechfunktion genannt)  $\varrho_L = f(p_v, t, EI, TM, I_H)$  gewonnen werden kann, eingesetzt werden. Hat die Retardationsfunktion für einen Zeitpunkt  $t = \text{const.}$  das Aussehen:

$$\varrho_L = C_1 p_v^{m_1} + \varrho_S \quad (3)$$

ist die erste Ableitung:

$$\frac{d\varrho_L}{dp_v} = C_1 \cdot m_1 \cdot p_v^{m_1 - 1} \quad (4)$$

Dann ist:

$$dp_v = \frac{d\varrho_L}{C_1 \cdot m_1 \cdot p_v^{m_1 - 1}} \quad (5)$$

Aus Gleichung (3) erhält man für  $p_v^{m_1 - 1}$ :

$$p_v^{m_1 - 1} = \left( \frac{\varrho_L - \varrho_S}{C_1} \right)^{\frac{m_1 - 1}{m_1}} \quad (6)$$

Setzt man Gleichung (6) in Gleichung (5) und den so erhaltenen Ausdruck in Gleichung (2) ein, ergibt sich:

$$\frac{9,81 \cdot 10^4 \cdot d\varrho_L}{\varrho_L \cdot g \cdot C_1 \cdot m_1 \cdot \left( \frac{\varrho_L - \varrho_S}{C_1} \right)^{\frac{m_1 - 1}{m_1}}} = dz \quad (7)$$

Das Ergebnis der Integration von Gleichung (7) ist eine Funktion der Form:

$$z = f(\varrho_L) + K \quad (8)$$

Die Integrationskonstante K wird aus der Anfangsbedingung bestimmt:

$$\text{bei } z = 0 \text{ ist } \varrho_L = \varrho_0 \quad (9)$$

Die Anfangsdichte  $\varrho_0$  ist in den meisten Fällen größer als die Schüttdichte  $\varrho_S$ . Sie wird maßgeblich durch das Befüll-

verfahren, durch zusätzliche Verdichtungs Vorgänge (z. B. Festtreten durch das Bedienungspersonal bei Pflege und Wartungsarbeiten an den Verteileinrichtungen oder beim Abdecken des Füllguts) und durch den Konservierungsverlauf in den oberen Füllgutschichten (oftmals entsteht durch Fäulnis ein Gut mit höherer Dichte) beeinflusst.

Werden mehrere Gutarten mit unterschiedlichen Guteigenschaften in einem Silo eingelagert, muß der Verlauf der Lagerungsdichte abschnittsweise berechnet werden. Die Integrationskonstante K muß hierbei aus der Bedingung berechnet werden, daß bei

$$z_v = 0, \quad \rho_L = \rho_v \quad \text{ist.} \quad (10)$$

Die Dichte  $\rho_v$  ergibt sich aus dem Vertikaldruck  $p_{v_v}$ , der auf die betrachtete Füllgutschicht wirkt.

In der Variante 2 wird der Wandeinfluß berücksichtigt. Der Verlauf der Lagerungsdichte wird von der Gutoberfläche beginnend schichtweise errechnet. Wenn das Verhältnis aus Wandreibungskraft  $F_W$  und Gutgewicht  $F_G$  an der Stelle  $z = n \cdot \Delta z$  den Wert  $\alpha$  besitzt, und die Retardationsfunktion zum betrachteten Zeitpunkt  $t = \text{const.}$  von der Form der Gleichung (3) ist, beträgt die Lagerungsdichte an der Stelle  $z = n \cdot \Delta z$ :

$$\rho_{L(z=n \cdot \Delta z)} = \left( (1 - \alpha_{(z=n \cdot \Delta z)}) \frac{\Delta z \cdot g}{9,81 \cdot 10^4} \sum_{i=0}^{n-1} \rho_{Li} \right)^{m_1} \cdot C_1 + \rho_S \quad (11)$$

Das Wandreibungskraftverhältnis  $\alpha$  kann für den jeweiligen Behälter mit dem Durchmesser  $d_S$  aus den von Grimm /14/, Otis und Pomroy /3/ und McCalmont /15/ für den speziellen Behälter mit dem Durchmesser  $d_0$  ermittelten Verhältnis  $\alpha_0$  näherungsweise nach folgender Beziehung errechnet werden:

$$\alpha = \frac{d_0}{d_S} \cdot \alpha_0 \quad (12)$$

In der Variante 3 wird der Einfluß der Wandreibung nach der klassischen Silotheorie berücksichtigt. Die Druckverhältnisse an einer Gutschicht der differentiellen Höhe  $dz$  sind für diese Variante im Bild 1 dargestellt. Die Gleichgewichtsbeziehung lautet:

$$-dp_v - p_w \cdot \frac{U}{A} \cdot dz + \frac{10^{-4}}{9,81} \cdot \rho_L \cdot g \cdot dz = 0 \quad (13)$$

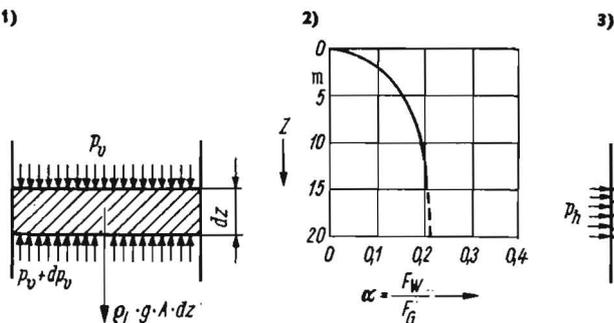
Wird das Druckverhältnis  $k = p_w/p_v$  eingeführt, erhält man nach Umformen der Gleichung (13) den Ausdruck:

$$\frac{dp_v}{\left( \frac{\rho_L \cdot g}{10^4 \cdot 9,81} - k \cdot p_v \cdot \frac{U}{A} \right)} = dz \quad (14)$$

Die weiteren Schritte entsprechen denen, die bei der Variante 1 erläutert wurden. Zur Bestimmung des Druckverhältnisses  $k$  erfolgten bisher keine genauen Untersuchungen. Für eine Berechnung bietet sich das Produkt aus dem Horizontaldruckverhältnis  $\lambda = p_h/p_v$  und dem äußeren dynamischen Reibbeiwert  $\mu_{\text{ad}}$  an:

$$k = \lambda \cdot \mu_{\text{ad}} \quad (15)$$

Aus der Darstellung der Berechnungsvarianten geht hervor, daß bis auf die Struktur des Halmguthaufwerks alle Einfluß-



größen exakt oder näherungsweise berücksichtigt werden. Notwendige Voraussetzung für das Ermitteln der Lagerungsdichte ist also das Bestimmen der Retardationsfunktion  $\rho_L = f(p_v, t, E_I, TM, I_H)$ , der Anfangsdichte  $\rho_0$ , des Wandreibungskraftverhältnisses  $\alpha$ , des Horizontaldruckverhältnisses  $\lambda$  und des äußeren dynamischen Reibwertes  $\mu_{\text{ad}}$ .

#### 4.3. Ergebnisse beim Anwenden der Berechnungsvarianten

##### 4.3.1. Bestimmen der Ausgangsgrößen

Retardationsfunktion  $\rho_L = f(p_v, t, E_I, TM, I_H)$ :

Die Untersuchungen über die Anwendungsmöglichkeiten und die Genauigkeit der entwickelten Varianten für das Berechnen der Lagerungsdichte wurden anhand der praktischen Verhältnisse in zwei Welksilagehochsilos vom Typ HS 09 ( $d_S = 7,35$  m) im VEG Dudendorf durchgeführt. Beim Befüllen der Silos wurden täglich Gutproben entnommen, für die die Retardationsfunktion bestimmt wurde. Versuchsaufbau und -durchführung zum Ermitteln der Retardationsfunktion sind in /12/ und /13/ ausführlich beschrieben. Die Retardationsfunktion kann im Preßtopf nur für Gutarten ermittelt werden, bei denen unter den wirkenden Vertikaldrücken kein Zellsaft austritt. Tritt beim Verdichten im Preßtopf Zellsaft aus, kann man die Laborergebnisse nicht bedenkenlos auf das technische Original übertragen.

Anfangsdichte  $\rho_0$ :

Die Anfangsdichte  $\rho_0$  ist in der Praxis größer als die im Labor ermittelte Schüttdichte  $\rho_S$ . Ursache dafür sind gewollte und ungewollte Verdichtungsmaßnahmen während und nach dem Befüllen. Im vorliegenden Fall konnten dynamische Kräfte, die beim Verteilen des Guts im Silo durch das Bedienungspersonal entstehen, zu diesen Effekten führen. Die Kräfte beim pneumatischen Befüllen können mit Hilfe des Impulsatzes berechnet werden:

$$F_{\text{dyn}} \cdot \Delta t = m \cdot v \quad (16)$$

Die Kraft  $F_{\text{dyn}}$  ist sehr klein, selbst wenn man berücksichtigt, daß der maximal mögliche Förderstrom, der vom Wurfeblase FG 35/2 erzielt werden kann /16/, 5,55 kg/s beträgt, und wenn man weiterhin annimmt, daß kein Luftwiderstand wirkt und die Geschwindigkeit des Massestroms beim Auftreffen auf die Gutoberfläche gleich der Austrittsgeschwindigkeit (10 m/s /17/) am Auswurfbogen ist. Der entstehende Druck liegt noch unter 0,01 kp/cm<sup>2</sup>. Der Druck, der durch eine männliche Person beim Gehen im Silo auf die Füllgutoberfläche wirkt, beträgt etwa 0,35 bis 0,40 kp/cm<sup>2</sup>. Diese Belastungsverhältnisse wurden in den Versuchen von Müller /1/ angenähert. Er ermittelte für verschiedene Halmgüter die Dichte, die sich nach fünf aufeinanderfolgenden Be- und

Bild 1. Varianten zum Berechnen von Lagerungsdichten landwirtschaftlicher Halmgüter in Behältern:

Variante 1: keine Berücksichtigung der Wandreibung

$$9,81 \cdot 10^4 \frac{dp_v}{\rho_L \cdot g} = dz$$

Variante 2: Berücksichtigung der Wandreibung nach Messungen von Grimm am technischen Original

$$\rho_{L,z} = n \cdot \Delta z \left[ (1 - \alpha_{z=n \cdot \Delta z}) \frac{\Delta z \cdot g}{9,81 \cdot 10^4} \sum_{i=0}^{n-1} \rho_{Li} \right]^{m_1} C_1 + \rho_S$$

Variante 3: Berücksichtigung der Wandreibung nach der klassischen Silotheorie

$$\frac{dp_v}{\left( \frac{\rho_L \cdot g}{10^4 \cdot 9,81} - k \cdot p_v \cdot \frac{U}{A} \right)} = dz$$

Hierbei ist  $k = \frac{p_h}{p_v} \cdot \mu_{\text{ad}}$

Entlastungen mit einem Druck von 0,4 kp/cm<sup>2</sup> bei einer Belastungszeit von 5 s und einer Entlastungszeit von 60 s einstellte.

Die Anfangsdichte  $\rho_0$  im obersten Guthorizont des Silos wurde deshalb nach den so gewonnenen Ergebnissen angenommen.

Wandreibungskraftverhältnis  $\alpha$ :

Der Verlauf des Wandreibungskraftverhältnisses wurde entsprechend der Gleichung (12) nach den Messungen von Grimm /14/ bestimmt (Bild 1).

Horizontaldruckverhältnis  $\lambda$ :

Das Horizontaldruckverhältnis  $\lambda$  wurde in umfangreichen Laborversuchen, die in /12/ und /13/ ausführlich beschrieben sind, ermittelt. Für eine Lagerungsdauer von  $t = 3000$  h ergab sich dabei ein mittlerer Wert  $\lambda = 0,46$ .

Äußerer dynamischer Reibwert  $\mu_{\text{äd}}$ :

Der äußere dynamische Reibwert  $\mu_{\text{äd}}$  wurde ebenfalls in Laborversuchen bestimmt. Aus den dabei gewonnenen Ergebnissen ging in die Rechnung ein mittlerer Wert von  $\mu_{\text{äd}} = 0,5$  ein.

#### 4.3.2. Vergleich von berechneten und gemessenen Ergebnissen

Für das Überprüfen der Anwendungsmöglichkeit und der Genauigkeit der Berechnungsvarianten wurden die jeweils errechneten Lagerungsdichten mit den mit Hilfe einer  $\gamma$ -Rückstreusonde praktisch gemessenen Lagerungsdichten verglichen. Dies war nur für den Zeitpunkt der Entnahme möglich. Als weiteres Kriterium wurde das Verhältnis der theoretischen Füllhöhen  $h_{\text{FB}}$ , die sich aus den berechneten Lagerungsdichten und der Masse des eingelagerten Guts (bei Berücksichtigen der Masseverluste) ergaben, zu den praktisch gemessenen Füllhöhen  $h_{\text{FG}}$  herangezogen.

Die beste Annäherung an die gemessenen Dichteverläufe wurde durch die Berechnungsvariante 2 erreicht. Variante 1 lieferte durch das Vernachlässigen der Wandreibung in den unteren Füllguthorizonten erwartungsgemäß zu hohe Dichten. Durch die Variante 3 wurden insgesamt zu geringe Dichten errechnet. Das ist ein Beweis dafür, daß die angenommenen Druckverhältnisse im Silo nicht der Wirklichkeit entsprechen.

Die berechneten Füllhöhen wichen von den gemessenen zum Zeitpunkt der Entnahme mehr als zum Zeitpunkt unmittelbar nach Füllende ab. Als Ursachen dafür können zu gering angenommene Masseverluste und die Extrapolation der Retardationsfunktion für längere Lagerungsdauern aus den experimentell bis zu 160 h ermittelten Verläufen angeführt werden.

### 5. Schlußfolgerungen und praktische Empfehlungen

Wie die Untersuchungen zeigten, können die Berechnungsvarianten 1 und 2 mit ausreichender Genauigkeit zum Ermitteln von Lagerungsdichten benutzt werden. Beim Anwenden der Variante 1 werden die theoretisch möglichen höchsten Dichten errechnet. Sie sollte deshalb beispielsweise beim Bestimmen der Vertikal- und Horizontaldrucke in Gärfutterhochsilos verwendet werden.

Wenn beim praktischen Gebrauch das Integrieren der Gleichung (7) Schwierigkeiten bereitet, kann die Lagerungsdichte nach der Variante 1 auch von der Gutoberfläche beginnend schichtenweise in kleinen Schritten errechnet werden, ohne einen nennenswerten Fehler zu begehen. Die Lagerungsdichte  $\rho_L$  an der Stelle  $z = n \cdot \Delta z$  wird dabei nach folgender Gleichung bestimmt:

$$\rho_{L(z=n \cdot \Delta z)} = \left[ \left( \frac{\Delta z \cdot g}{9,81 \cdot 10^4} \right) \sum_{i=0}^{n-1} \rho_{Li} \right] C_1 + \rho_s \quad (17)$$

Beim experimentellen Ermitteln der Retardationsfunktion im Preßtopf sollte auf das Messen der Wandreibungskräfte nicht verzichtet werden. Bereits bei einem Verhältnis der Höhe des verdichteten Guts im Preßtopf zum Innendurchmesser des Preßtopfes von 1 : 5 ist der mittlere wirksame

Vertikaldruck  $p_v$  gegenüber dem Vertikaldruck  $p_{v0}$ , der durch die Verdichtungseinrichtung erzeugt wird, um etwa 10 Prozent geringer.

Das vorgeschlagene Berechnungsverfahren ist nur für Halmgüter geeignet, bei deren Lagerung im Behälter kein Zellsaft austritt.

### Verwendete Bezeichnungen

A	Querschnittsfläche des Silobehälters in m <sup>2</sup>
C <sub>1</sub>	Konstante
d <sub>g</sub>	Innendurchmesser des Silobehälters in m
d $\bar{s}$	Abstand von der Innenwand des Silobehälters in m
Ei	mittlere Biegesteifigkeit der Halme eines Guthaufwerks in kp · cm <sup>2</sup>
F <sub>dyn</sub>	dynamische Auftreffkraft, die beim Befüllen durch den Gutstrom auf die Gutoberfläche wirkt in kp
F <sub>w</sub>	Wandreibungskraft in kp
g	Erdbeschleunigung in m/s <sup>2</sup>
h <sub>F</sub>	Füllhöhe in m
h <sub>FB</sub>	berechnete Füllhöhe in m
h <sub>FG</sub>	gemessene Füllhöhe in m
k	Druckverhältnis $p_w/p_v$
K	Integrationskonstante
l <sub>H</sub>	mittlere Häcksellänge in mm
m	Masse in kg
m <sub>H</sub>	Kurzhäckselanteil in Prozent (l <sub>H</sub> = 40 mm)
m <sub>t</sub>	Konstante
n	Zahl
Ph	Horizontaldruck in kp/cm <sup>2</sup>
P <sub>v</sub>	Vertikaldruck in kp/cm <sup>2</sup>
P <sub>w</sub>	Wandreibungsdruck in kp/cm <sup>2</sup>
TM	Trockenmassegehalt in Prozent
t	Zeit in h
U	Innenumfang des Silobehälters in m
v	Geschwindigkeit in m/s
z	Abstand zum Füllgutspiegel in m
$\alpha$	Wandreibungskraftverhältnis $F_w/P_v$
$\lambda$	Horizontaldruckverhältnis $P_h/P_v$
$\mu_{\text{äd}}$	äußerer dynamischer Reibwert
$\rho_L$	Lagerungsdichte in kg/m <sup>3</sup>
$\rho_0$	Anfangsdichte in kg/m <sup>3</sup>
$\rho_s$	Schüttdichte in kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{\text{LTM}}$	Trockenmasselagerungsdichte in kg/m <sup>3</sup>
RG	Rohfasergehalt in %

### Literatur

- /1/ Müller, M.: Beitrag zu verfahrenstechnischen Grundlagen der Silagebereitung. Habilitationsschrift an der Universität Rostock, 1969
- /2/ Holze, H.: Untersuchungen über den Strömungswiderstand landwirtschaftlicher Halmgüter. VDI-Forschungsheft 545, Düsseldorf, VDI-Verlag 1971
- /3/ Otis, C. K./J. H. Pomroy: Density: A Tool in Silo Research. Agricultural Engineering (1957) H. 11, S. 806–807 und H. 12, S. 860–863
- /4/ Zschaage, F.: Druck- und Dehnungsmessungen am Welksilage-Hochsilo im IML Potsdam-Bornim. Kap. 5.1. in /6/
- /5/ Grimm, A.: Die Kosten der Grasanweilksilage bei verschiedenen Ernte-, Konservierungs- und Fütterungsverfahren. KTL-Bericht über Landtechnik 106, München: Neureuter Verlag 1967
- /6/ Müller, M., u. a.: Welksilage-Hochsilo HS 25. Forschungsabschlussbericht am IML Potsdam-Bornim. 1971 (unveröffentlicht)
- /7/ Schwandt, W./M. Fechner: Untersuchungen zur industriemäßigen Organisation der Welkgrassilageproduktion in der Kooperationsgemeinschaft Ferdinandshof. Dissertation an der DAL Berlin, 1970
- /8/ Klamke, R.: Untersuchungen zur Rohfutterentnahme und -verteilung bei mobiler und stationärer Mechanisierung der Fütterung. Dissertation an der DAL Berlin, 1969
- /9/ Voss, H.: Ermittlung von Stoffgesetzen für Halmgut. Dissertation an der TU Braunschweig, 1969
- /10/ Fiala, J.: Fyzikální vlastnosti porených materialů v procesu přípravy sanaze a zavádě sitaze. Zemed. techn. (1965) H. 11, S. 505–518
- /11/ Day, C. L./H. H. Panda: Effect of moisture content, depth of storage and length of cut on bulk density of alfalfa hay. Trans. of the ASAE (1966) S. 428–432
- /12/ Füll, Chr.: Ein Beitrag zum Berechnen von Dichten und Horizontaldrücken bei der Lagerung landwirtschaftlicher Halmgüter in Behältern. Dissertation an der Sektion Landtechnik der Universität Rostock, 1972
- /13/ Füll, Chr.: Ein Beitrag zum Berechnen von Dichten und Horizontaldrücken bei der Lagerung landwirtschaftlicher Halmgüter in Behältern. Forschungsabschlussbericht an der Sektion Landtechnik der Universität Rostock, 1972
- /14/ Grimm, K.: Messungen der Wandreibungskräfte in Gärfutterhochsilos aus glasfaserverstärktem Kunststoff und die Lastannahmen nach DIN 1055. Grundlagen der Landtechnik 19 (1969) H. 3, S. 85–90
- /15/ Mc Calmont, I. R. u. a.: Pressures and other factors affecting silo construction. New Jersey Agricultural Experiment Station Bulletin 731, zitiert in /3/
- /16/ Noack, H.: Der Hochsilo aus dem LIW Nauen. Dt. Agrartechnik 18 (1968) H. 5, S. 202–203
- /17/ Helbig, W./E. Scherping: Messung der Teilchengeschwindigkeit in Rohrleitungen von Fördergebläsen. Dt. Agrartechnik 20 (1970) H. 10, S. 469–470