

Gesetzmäßigkeiten des Verdichtens von angewelktem Grüngut unter statischen Belastungen und ihre Anwendung in der Praxis

Dr.-Ing. Ch. Füll, KDT, Universität Rostock, Sektion Landtechnik

1. Problematik

Das Verdichten von Halmgütern wurde in der Vergangenheit nahezu nur im Zusammenhang mit dem Erforschen der Vorgänge in Strangpressen untersucht. Gesetzmäßigkeiten beim Verdichten mit statischen Belastungen wurden in einigen Details nur von Müller /1/, Fiala /2/, Awtomonow /3/ und Osobow /4/ behandelt. Umfassende Kenntnisse auf diesem Gebiet sind jedoch wichtig z. B. für das Dimensionieren von Silos, für die Kapazitätsplanung von Behälteranlagen, für die Beurteilung gärbiochemischer Abläufe, für das Projektieren von Belüftungsanlagen und das Beherrschen vieler anderer verfahrenstechnischer Probleme. Im folgenden werden Ergebnisse aus Laboruntersuchungen über das Verdichten von angewelktem Grüngut unter statischen Belastungen dargelegt und Schlussfolgerungen für die praktische Anwendung erläutert.

2. Meßmethoden und Meßeinrichtungen

Die Gesetzmäßigkeiten des Verdichtens von angewelktem Grüngut unter statischen Belastungen können durch die rheologische Retardationsfunktion $\rho_L = f(p_v, t, TM, EI, I_H)$ ausgedrückt werden. Die mechanischen Eigenschaften der Einzelhalme, der Trockenmassegehalt TM und die mittlere Häcksellänge I_H sind dabei die zu berücksichtigenden Hauptfaktoren.

Die mechanischen Eigenschaften der Einzelhalme können durch das Bestimmen der Biegesteifigkeit EI gekennzeichnet werden. Das Pflanzenmaterial wird dabei näherungsweise als Hookescher Werkstoff betrachtet. Die Größe der Biegesteifigkeit ist in der Hauptsache vom Stengelquerschnitt, vom Trockenmassegehalt und vom Rohfasergehalt abhängig. Eine Zunahme dieser Faktoren bewirkt im allgemeinen ein Anwachsen der Biegesteifigkeit. Beim Errechnen einer resul-

tierenden Biegesteifigkeit für das Guthaufwerk aus den jeweiligen Mittelwerten für Blätter und Stengel müssen die Masseanteile von Blättern und Stengeln hinzugezogen werden. Die Temperatur des Gutes spielt in den Bereichen, die bei der Ernte, Einlagerung und Konservierung vorherrschen (Temperaturerhöhung: 5 bis 15 °C), keine Rolle. Osobow /5/ stellte beispielsweise bei der Untersuchung des Brikettiervorgangs fest, daß die Abnahme der Verdichtungsarbeit im Bereich von 25 bis 100 °C bei einem Temperaturanstieg des angewelkten Grüngutes um 10 °C lediglich 3 bis 4 Prozent beträgt. Aufbereitungsvorgänge (Knicken, Quetschen) verändern den Halmquerschnitt und zerstören teilweise den Zellenaufbau. Dadurch wird eine Verminderung der Biegesteifigkeit bewirkt.

Für das Bestimmen der Retardationsfunktion wurden zwei Anteile gebildet:

$$\rho_L = [(\rho_L - \rho_S) = f(p_v, t, TM, EI, I_H)] + [\rho_S = f(TM, EI, I_H)] \quad (1)$$

Beide Anteile, die Dichtedifferenz $(\rho_L - \rho_S)$ und die Schüttdichte ρ_S , wurden gesondert experimentell untersucht und mathematisch formuliert.

Zum Bestimmen des Funktionsanteils $(\rho_L - \rho_S)$ wurden Gutproben in fünf Behältern mit den Vertikaldrücken $p_{v0} = 0,12 \text{ kp/cm}^2, 0,30 \text{ kp/cm}^2, 0,59 \text{ kp/cm}^2, 0,97 \text{ kp/cm}^2$ und $1,46 \text{ kp/cm}^2$ belastet. Gemessen wurden jeweils die durch die Verdichtungseinrichtung erzeugte und statisch wirkende Vertikalkraft F_{v0} , die Wandreibungskraft F_W und die Absenkung s_1 des Kolbens als Funktion der Zeit.

Der Vertikaldruck in den Guthorizonten wird infolge der Wandreibung zum Behälterboden hin geringer. Es wurde deshalb ein mittlerer Vertikaldruck p_v hergerechnet. Die dabei angenommenen Druckverhältnisse im Füllgut sind im Bild 1 dargestellt. Die Masse des Halmgutes kann vernachlässigt werden.

Wird die Koordinate des mittleren Vertikaldruckes p_v mit z_0 bezeichnet, erhält man folgende Beziehung:

$$p_v = \frac{p_{v0}}{e^k z_0 U/A} \quad (2)$$

Da der Druckverlauf im zu betrachtenden Bereich annähernd linear ist, kann in (2) $z_0 = s_2/2$ gesetzt werden. Mit dieser Voraussetzung gilt für den mittleren Vertikaldruck p_v der Ausdruck:

$$p_v = \frac{p_{v0}}{e^k s_2 U/(2A)} \quad (3)$$

Das Bestimmen des Druckverhältnisses k erfolgte nach der Gleichung:

$$k = \frac{\ln(p_{v0}/p_b) A}{s_2 U} \quad (4)$$

Die Behälter wurden mit großer Sorgfalt gleichmäßig befüllt. Die Höhe des unverdichteten Häckselgutes betrug dabei 200 mm. Die Dichte entsprach der gemessenen Schüttdichte. Die Versuchsdauer betrug im Mittel 20 h bis 50 h.

Zum Messen der Schüttdichte wurde das Halmgut aus einer Höhe von maximal 50 cm über dem Gutsspiegel gleichmäßig in einen würfelförmigen Behälter (Kantenlänge 50 cm) eingestreut. Auf diese Weise wurde eine lose Schüttung erreicht. Aus dem Verhältnis der eingefüllten Masse und dem Volumen des Behälters ergab sich der Wert der Schüttdichte.

Verwendete Formelzeichen

A	m ²	Querschnittsfläche des Behälters
d _S	m	Innendurchmesser des Behälters
EI	kp·cm ²	mittlere Biegefestigkeit der Halme des Guthaufwerks
(EI) _{Bl}	kp·cm ²	mittlere Biegefestigkeit der Blätter eines Guthaufwerks
(EI) _{St}	kp·cm ²	mittlere Biegefestigkeit der Stengel eines Guthaufwerks
F _{v0}	kp	durch die Verdichtungseinrichtung erzeugte Vertikalkraft
F _W	kp	Wandreibungskraft
h _F	m	Füllhöhe
k	—	Druckverhältnis p _v /p _b
I _H	mm	mittlere Häcksellänge
m	kg	Masse
m _{Bl}	—	Massenanteil der Blätter an der Gesamtgutmasse
m _{St}	—	Massenanteil der Stengel an der Gesamtgutmasse
p _b	kp/cm ²	Horizontaldruck
p _v	kp/cm ²	Vertikaldruck
p _{v0}	kp/cm ²	durch die Verdichtungseinrichtung erzeugter Vertikaldruck
p _{vz}	kp/cm ²	örtlicher Vertikaldruck im Preßtopf
s ₁	m	Verdichtungsweg
s ₂	m	Guthöhe im Preßtopf
TM	%	Trockenmassegehalt
t	h	Zeit, Belastungsdauer
U	m	Innenumfang des Behälters
z	m	Abstand zum Füllgutsspiegel
V _H	—	relatives Hohlraumvolumen
λ	—	Horizontaldruckverhältnis p _H /p _v
ρ _L	kg/m ³	Lagerungsdichte
ρ _S	kg/m ³	Schüttdichte

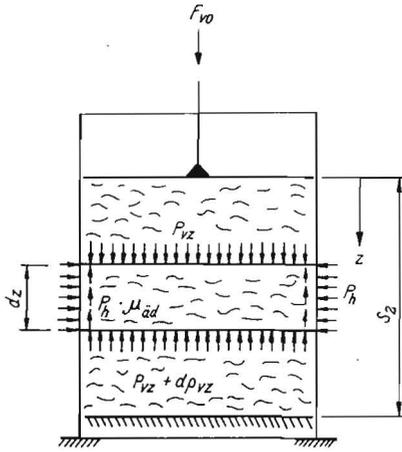


Bild 1. Druckverhältnisse im Füllgut beim Verdichten in den Preßlöpfen

Die mittlere Biegesteifigkeit EI der Halme des untersuchten Guthaufwerks wurde aus der mittleren Biegesteifigkeit $(EI)_{Bl}$ der Blätter, der mittleren Biegesteifigkeit $(EI)_{St}$ der Stängel, des Blattmassenanteils m_{Bl} und des Stängelmassenanteils m_{St} nach folgender Beziehung berechnet:

$$EI = m_{Bl} \cdot (EI)_{Bl} + m_{St} \cdot (EI)_{St} \quad (5)$$

Die Biegesteifigkeit wurde aus Durchbiegungsversuchen, in denen die Halme als Träger auf zwei Stützen behandelt wurden, bestimmt.

3. Ergebnisse

Für die Abhängigkeit der Schüttdichte von den Einflußgrößen Trockenmassegehalt TM , mittlere Biegesteifigkeit EI und mittlere Hacksellänge l_H ergab sich aus den Versuchswerten folgende Regressionsgleichung:

$$\rho_s = 3272,0 \cdot TM^{-1} + 2,6 \cdot EI^{-0,5} - 0,026 l_H + 0,3 \quad (6)$$

Bestimmtheitsmaß $B = 0,87$

Geltungsbereich:

$TM = 18,1$ Prozent ... $57,0$ Prozent

$EI = 0,0015$ $kp \cdot cm^2$... $0,7195$ $kp \cdot cm^2$

$l_H = 14,72$ mm ... $68,20$ mm

Es ist erkennbar, daß der Trockenmassegehalt TM und die Biegesteifigkeit EI im untersuchten Bereich den größten Einfluß auf die Schüttdichte haben.

Der Verlauf der Retardationsfunktion $(\rho_L - \rho_S)$ in Abhängigkeit von den analysierten Einflußgrößen ist in den Bildern 2 bis 5 dargestellt.

Der Wert der Dichtedifferenz $(\rho_L - \rho_S)$ vergrößert sich in Abhängigkeit von der Belastungsdauer t und vom Vertikaldruck p_v nach Potenzfunktionen. Dieses Verhalten kann näherungsweise durch ein rheologisches Modell, bestehend aus einer Feder, einem Kelvinelement und einem Keilglied (mit Selbsthemmung), die in Reihe geschaltet sind, beschrieben werden. Die Modellkonstanten sind im

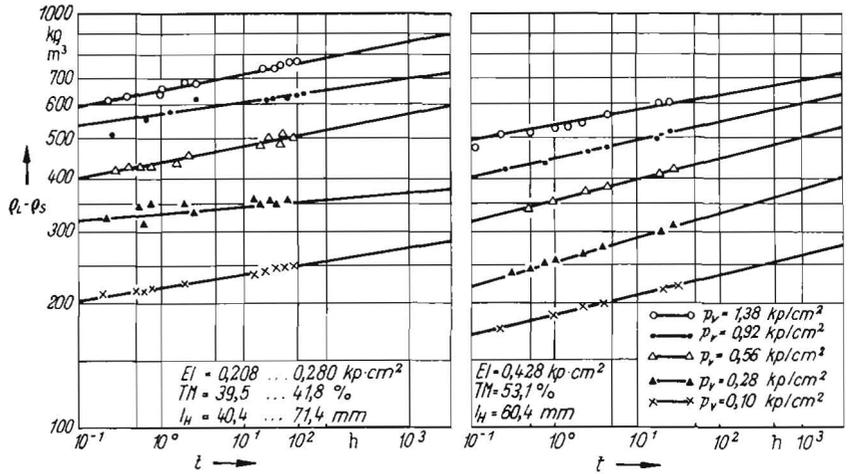


Bild 2. Verlauf der Dichtedifferenz $(\rho_L - \rho_S)$ in Abhängigkeit von der Belastungszeit t

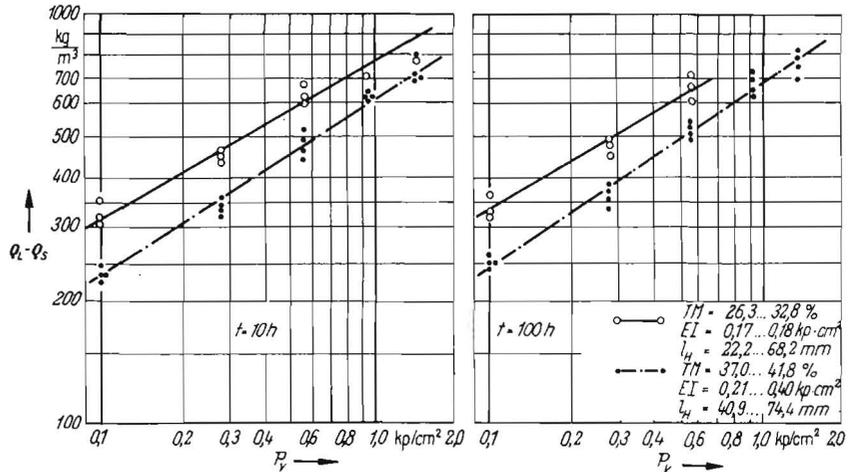
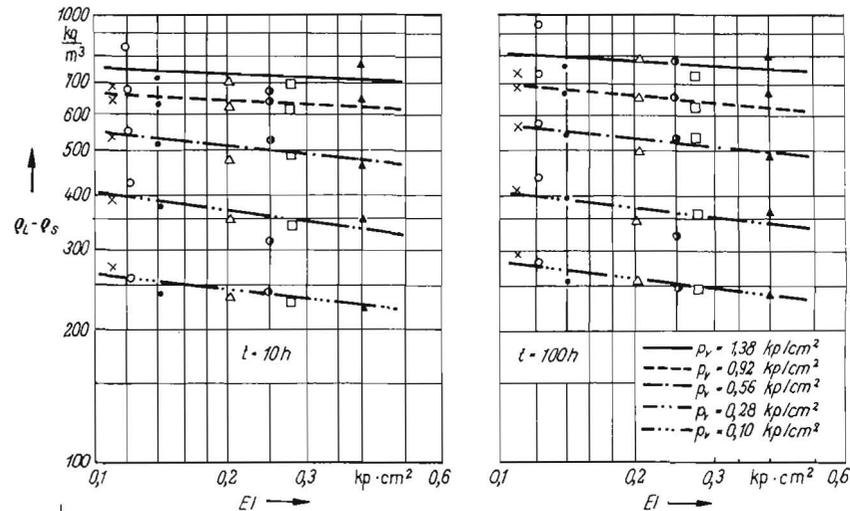


Bild 3. Verlauf der Dichtedifferenz $(\rho_L - \rho_S)$ in Abhängigkeit vom Vertikaldruck p_v



Guteigenschaften:			EI [kp·cm ²] TM [%] l _H [mm]				
x	0,1162	44,8	33,5	•	0,2496	40,6	49,7
o	0,1209	34,6	63,5	□	0,2798	39,5	74,4
•	0,1433	38,4	39,1	▲	0,4046	37,0	44,3
△	0,2083	41,8	40,9				

Bild 4. Verlauf der Dichtedifferenz $(\rho_L - \rho_S)$ in Abhängigkeit von der Biegesteifigkeit EI der Einzelhalme

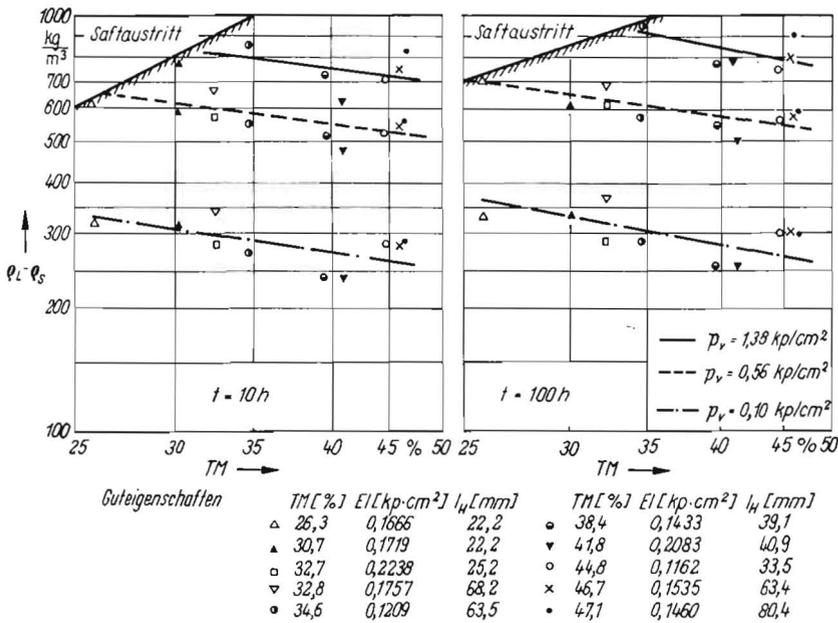
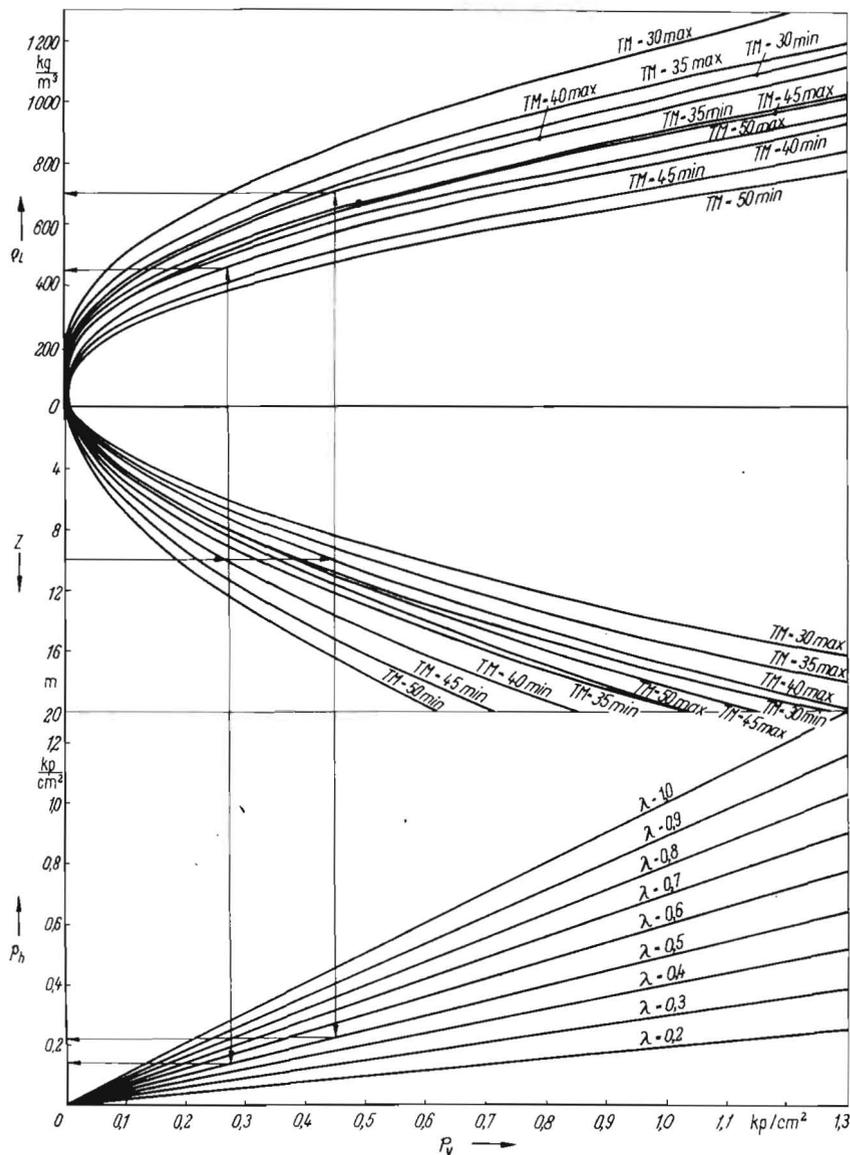


Bild 5. Verlauf der Dichtedifferenz ($\rho_L - \rho_S$) in Abhängigkeit vom Trockenmassegehalt des Gutes



untersuchten Vertikaldruckbereich belastungsabhängig. Diese Erscheinung ist darauf zurückzuführen, daß die Proportionalitätsgrenze in den mechanischen Eigenschaften der Einzelhalme überschritten wurde.

Die Häcksellänge besitzt im untersuchten Bereich keinen eindeutigen Einfluß auf die Höhe der Dichtedifferenz. Dies ist ebenfalls aus dem Überschreiten der Proportionalitäts- und der Fließgrenze bei der Verformung der Einzelhalme zu erklären.

Blätter und Stengel, die beispielsweise während des Verdichtungsvorgangs geknickt werden, sind Beanspruchungen ausgesetzt, die größer als die kritischen Knicklasten sind. Es kommt ferner hinzu, daß sich die Kraftangriffspunkte während des Verdichtungsvorgangs verändern.

Der Verlauf der Dichtedifferenz ($\rho_L - \rho_S$) in Abhängigkeit von der mittleren Biegesteifigkeit EI der Einzelhalme ($TM = 34,6 \dots 44,8$ Prozent) ist im Bild 4 dargestellt. Zunächst war im Druckbereich $p_v = 0,1$ bis $0,56$ kp/cm^2 ein Abfall zu erkennen, während im Bereich $p_v = 0,92$ bis $1,38$ kp/cm^2 kein Einfluß der Biegesteifigkeit EI bestand. Bei größeren Belastungszeiten ($t = 1$ bis 100 h) war jedoch auch hier ein Abfall mit zunehmender Biegesteifigkeit EI festzustellen. Diese Erscheinungen können nur wie folgt erklärt werden: Bei niedrigen Vertikaldrücken (bis $p_v = 0,56$ kp/cm^2) wird die Verdichtung vor allem durch die Knickung und Biegung der Blätter und Stengel des Halmgutes bewirkt. Die Fließgrenze wird dabei nicht ausnahmslos überschritten. Bei Vertikaldrücken von $p_v = 0,92$ bis $1,38$ kp/cm^2 sind die kritischen Knick- und Biegekräfte bereits unmittelbar nach dem Aufbringen der Last im gesamten Biegesteifigkeitsbereich erreicht. Bei längerem Einwirken der Belastung ist die weitere Dichteerhöhung auf das Zusammenquetschen der Stengelquerschnitte zurückzuführen, das bei Halmgütern mit geringerer Biegesteifigkeit intensiver geschieht als bei Halmgütern mit hoher Biegesteifigkeit. Der Einfluß des Trockenmassegehalts auf die Größe der Dichtedifferenz ($\rho_L - \rho_S$) bei nahezu gleicher Biegesteifigkeit der Halme ($EI = 0,1162$ bis $0,2238$ $kp \cdot cm^2$) wird im Bild 5 gezeigt. Ein Erhöhen des Trockenmassegehalts bewirkt im gesamten Druckbereich trotz ansteigender Substanzdichte des Halmgutes einen Abfall der Dichtedifferenz ($\rho_L - \rho_S$), der nach einer Potenzfunktion verläuft.

Bild 6. Nomogramm zum Bestimmen der Lagerungsdichte ρ_L und des Horizontaldruckes p_H in Gärfutterhochsilos in Abhängigkeit vom Trockenmassegehalt TM und vom Abstand z zum Füllgutspiegel bei einer Lagerungsdauer von $t = 3000$ h

Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den Erkenntnissen, die Busse /6/ und Sacht /7/ bei Verdichtungsversuchen mit stetiger Belastungssteigerung im Druckbereich bis $p_v = 30 \text{ kp/cm}^2$ gewonnen haben. Eine Erklärung dafür ist, daß bei höherem Trockenmassegehalt durch das Zerstören des Zellverbandes absolut weniger Saft austritt, so daß der Porenraum im Aufwerk relativ mehr mit Luft und Gär gasen gefüllt ist.

Die Ergebnisse der Retardationsversuche können durch die Gleichung (7) ausgedrückt werden:

$$(\rho_L - \rho_S) = 502,82 p_v^{0,5} + 133,54 t^{0,03} - 0,06 TM^{-0,16} - 7,03 EI^{-0,08} \quad (7)$$

Bestimmtheitsmaß $B = 0,97$

Wenn für die Schüttdichte ρ_S die Abhängigkeit (6) eingesetzt wird, bekommt man für die gesamte Retardationsfunktion die Gleichung:

$$\rho_L = 502,82 p_v^{0,5} + 133,54 t^{0,03} - 0,06 TM^{-0,16} - 7,03 EI^{-0,08} + 3272,00 TM^{-1} + 2,60 EI^{-0,5} - 0,03 l_H + 0,30 \quad (8)$$

Geltungsbereich:

TM = 23,2 Prozent ... 71,6 Prozent (jedoch nur bis zum Zeitpunkt des Saftaustritts)

EI = 0,0014 $\text{kp} \cdot \text{cm}^2$... 0,4280 $\text{kp} \cdot \text{cm}^2$

$l_H = 40,7 \text{ mm}$... 80,4 mm

$p_v = 0,10 \text{ kp/cm}^2$... 1,38 kp/cm^2

$t = 0$... 160,00 h (bei geringen Trockenmassegehalten nur bis zum Zeitpunkt des Saftaustritts)

Gleichung (8) gilt nur für die angegebenen Bereiche des Trockenmassegehalts, der Biegesteifigkeit der Einzelhalme, der Häcksellänge, des Vertikaldruckes und der Zeit.

Zur Klärung des Einflusses der Belastungsdauer wurden Vorversuche bis zu 160 h durchgeführt. Nach Angaben aus der Gärungsbiologie war zu erwarten, daß sich die Dichteerhöhungen insbesondere in der ersten Silierphase (1 bis 5 Tage), die durch das Veratmen des Restsauerstoffs, das Absterben der Pflanzen, das Freiwerden der Zellsäfte, das Absetzen des Futters und durch intensive Gärung gekennzeichnet ist, einstellt. Diese Annahme wurde durch die Ergebnisse bestätigt. Der Dichtezuwachs verläuft in Abhängigkeit von der Belastungsdauer nach einer Potenzfunktion, deren Tendenz schon nach 20 h festgelegt ist.

4. Schlußfolgerungen und Anwenden der Ergebnisse in der Praxis

4.1. Bestimmen von Vertikal- und Horizontaldrücken in Gärfuttersilos

Zum Bestimmen der Vertikal- und Horizontaldrücke bei der Lagerung von angewelktem Grün gut in Behältern kann das Nomogramm (Bild 6) benutzt werden. Beim Aufstellen der dargestellten Zusammenhänge wurde die Wandreibung des Gutes an der Behälterinnenwand vernachlässigt. Diese Annahme ist theoretisch nur für ein Verhältnis $d_s/h_F \rightarrow \infty$ gültig. Untersuchungen haben gezeigt, daß für die in unserer Republik vorhandenen Silos diese Voraussetzung ebenfalls anwendbar ist.

Die möglichen minimalen und maximalen Werte bei gleichem Trockenmassegehalt ergeben sich aus den extremen mechanischen Eigenschaften (Biegesteifigkeit EI der Einzelhalme).

4.2. Bestimmen der Gutmasse in Gärfuttersilos

Mit Hilfe des Nomogramms (Bild 6) kann der Zusammenhang zwischen der Lagerungsdichte ρ_L und dem Abstand z zum Füllgutspiegel konstruiert werden. Daraus läßt sich durch einfache Rechengänge die Siliergutmasse bestimmen.

4.3. Bestimmen des Strömungswiderstands beim Belüften von Halmguthaufwerken

Holze /8/ ermittelte, daß die Strömungsverluste beim Belüften von Halmguthaufwerken vom spezifischen Hohlraum-

volumen ε_H abhängen. Die Berechnungsgleichung für ε_H ist nach /8/:

$$\varepsilon_H = 1 - (\rho_L / 700) \quad (9)$$

Der Verlauf der Lagerungsdichte $\rho_L = f(z)$ kann nach den unter 4.2. gegebenen Hinweisen ermittelt werden.

4.4. Hinweise für die Züchtung von Futterpflanzen und die Verfahrensgestaltung der Silagebereitung

Beim Silieren von Futterpflanzen sind hohe Lagerungsdichten erforderlich. Diese werden bei Gutarten mit niedriger Biegesteifigkeit EI der Einzelhalme und niedrigem Trockenmassegehalt TM erreicht. Für die Züchtung ergibt sich daraus die Aufgabe, dünnstenglige und blattreiche Sorten heranzuziehen. Bei der Verfahrensgestaltung zur Herstellung von Welksilage muß darauf geachtet werden, daß der Trockenmassegehalt TM des Gutes, unter Berücksichtigung des Vermeidens von Sickersaft, so niedrig wie möglich gewählt wird ($TM_{\min} = 34$ Prozent).

5. Zusammenfassung

Das Verdichten von angewelktem Grün gut unter statischen Belastungen wird durch die mechanischen Eigenschaften der Einzelhalme, den Trockenmassegehalt und die mittlere Häcksellänge beeinflusst. Die in Laborversuchen gewonnenen Ergebnisse wurden in der rheologischen Retardationsfunktion $\rho_L = f(p_v, t, EI, TM, l_H)$ zusammengefaßt. Die Dichte ρ_L nimmt mit Zunehmen des Vertikaldruckes und der Belastungsdauer größere Werte an. Ein Ansteigen der mittleren Biegesteifigkeit und des Trockenmassegehalts bewirkt Abnehmen der Dichte ρ_L . Die mittlere Häcksellänge hatte im untersuchten Bereich nur einen geringen Einfluß.

Für das Anwenden der Ergebnisse in der Praxis werden Hinweise zum Bestimmen der Vertikal- und Horizontal drücke in Gärfuttersilos, zum Ermitteln der Gutmasse in Gärfuttersilos, zum Berechnen des relativen Hohlraumvolumens im Zusammenhang mit dem Bestimmen der Strömungswiderstände beim Belüften von Halmguthaufwerken gegeben und Schlußfolgerungen für die Züchtung von Futterpflanzen und die Verfahrensgestaltung der Silagebereitung gezogen.

Literatur

- 1/ Müller, M.: Beitrag zu verfahrenstechnischen Grundlagen der Silagebereitung. Habilitationsschrift an der Universität Rostock, Rostock 1969.
- 2/ Fiala, J.: Dusání silaze. Zemedelska Technika 10 (1964) H. 4. S. 215 bis 229.
- 3/ Awtonomow: O pokhosatele opredelenija stepeni uplotnenija silosa. Shiwtownodstwo (1958) H. 8, S. 37-40.
- 4/ Osobow, V. U.: Posledstvie pri uplotnenii voloknistich rastitelnych materialov. Vestnik selsk. choz. nauki 3 (1968), S. 115-119.
- 5/ Osobow, V. U.: Brikettierovanie sena i solomy s nagravanjem. Mech. i elektr. soz. selsk. choz. 26 (1968) H. 9, S. 43-44.
- 6/ Busse, W.: Das Verdichten von Halmgütern mit hohen Normaldrücken. Fortsch.-Berichte, VDI-Z., Reihe 14, Nr. 1.
- 7/ Sacht, H. O.: Das Verdichten von Halmgütern in Strangpressen. Fortsch.-Berichte, VDI-Z., Reihe 14, Nr. 4.
- 8/ Holze, H.: Untersuchungen über den Strömungswiderstand landwirtschaftlicher Halmgüter. VDI-Forschungsheft 545. VDI-Verlag Düsseldorf, Düsseldorf 1971. A 9501

KDT-Lehrgang „Technische Diagnostik“

Der Fachauschuß Technische Diagnostik der Wissenschaftlichen Sektion Erhaltung landtechnischer Arbeitsmittel führt den KDT-Lehrgang „Technische Diagnostik“ in der Zeit vom 9. bis 14. Juni und einen zweiten Durchgang vom 16. bis 20. Juni an der Spezialschule für Landtechnik Großenhain durch.

Anmeldungen können bis zum 30. April erfolgen beim Sekretariat des Fachverbands Land-, Forst- und Nahrungsgütertechnik beim Präsidium der Kammer der Technik, 1086 Berlin, Postfach 1315, Telefon 2 20 25 31

AK 9830