

Grundlagen der Landtechnik

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE

Herausgegeben mit Unterstützung durch die
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft
Braunschweig-Völkenrode (FAL)

Schriftleitung: Dr. F. Schoedder, Institut
für landtechnische Grundlagenforschung

Grundl. Landtechnik Bd. 36 (1986) Nr. 2, S. 37 bis 60

Ermittlung der Lagerdichte bei der Silierung von Körnerfrüchten im Hochsilo

Von In-Hwan Oh und Hermann Josef Heege, Kiel*)

DK 633.004.12:664.8:621.796.6

Sowohl die Feuchtgetreidekonservierung als auch die Flüssigkonservierung sind durch einen hohen Kapitalbedarf für die Lagerräume gekennzeichnet. Daher ist die genaue Kenntnis und effiziente Nutzung der Lagerkapazität notwendig in der zur Zeit finanziell angespannten Lage der Landwirtschaft.

Anhand eines Modellsilos wurde die Lagerkapazität bei verschiedenen Feuchtegehalten nach einer iterativen Methode ermittelt. Die Flüssigkonservierung benötigt wegen des Wasserzusatzes mehr Lagerraum als die Feuchtconservierung. Durch Fördern von Futter nahe der Pumpgrenze kann der zusätzliche Lagerraum bei Flüssigkonservierung gering gehalten werden.

1. Einleitung

Die gasdichte Lagerung von feuchten Körnerfrüchten im Hochsilo ist derzeit ein Standardverfahren bei Betrieben mit mehr als 30 ha Anbaufläche betriebseigenen Futters. Bei diesem Verfahren läßt sich verlustarm konservieren, und es zeichnet sich aus durch einen hohen Mechanisierungsgrad [1, 2]. Um eine einfacher handhabbare Technik zu erhalten, wurde in den letzten Jahren das Verfahren der Flüssigkonservierung entwickelt [3]. Dabei werden die Körnerfrüchte vorher geschrotet und unter Wasserzusatz in den Hochsilo gepumpt. Auch die spätere Entnahme aus dem Silo erfolgt durch Pumpen, Bild 1. Sowohl bei der feuchten als auch bei der flüssigen Konservierung entstehen hohe Festkosten. Dabei spielt die Lagerkapazität eines Hochsilos für die Investitionen eine große Rolle. Bei der Flüssigkonservierung ändert sich die Lagerkapazität an Trockenmasse als Folge der Wasserzugabe, zumal auch die Komprimierbarkeit eines Materials sich je nach Feuchtegehalt verändert. Ziel der Arbeit ist die Ermittlung der Lagerkapazität eines Hochsilos bei der feuchten und flüssigen Konservierung.

Die Arbeit wurde gefördert von der H. Wilhelm Schaumann-Stiftung zur Förderung der Agrarwissenschaften.

*) Dr. agr. I.-H. Oh ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Prof. Dr. H.J. Heege ist Direktor im Institut für Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik der Universität Kiel.

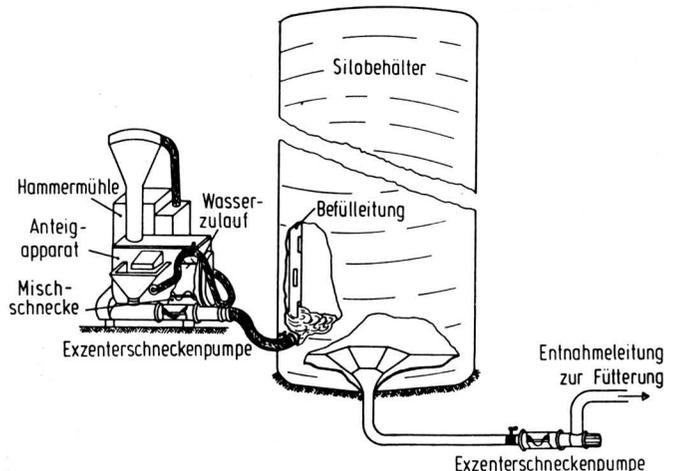


Bild 1. Verfahren der Flüssigkonservierung; System Ligavator.

2. Methodische Grundlagen

In einem Hochsilo weist das Material durch den Eigendruck je nach Fülltiefe verschiedene Lagerdichten auf. Die Lagerdichte ist von vielen Faktoren abhängig: Materialeigenschaften, Feuchtegehalt des Materials, Belastungsdauer, Rauigkeit der Silowand und Siloabmessungen [4, 5, 6].

Die Ermittlung der Lagerkapazität kann durch Einwiegen des Gutes mit einer Brückenwaage direkt am Großsilo erfolgen [7]. Diese Methode berücksichtigt die in der Praxis auftretenden Einflüsse, ist aber mit einem hohen Zeit- und Arbeitsaufwand verbunden. Dagegen ermöglicht der Modellsilo, mit geringem Aufwand die verschiedenen Varianten zu vergleichen.

Bei der Ermittlung der Lagerkapazität werden manchmal die Einflüsse der Wandreibung und das Verhältnis von Horizontaldruck zu Vertikaldruck (Horizontaldruckverhältnis) nicht berücksichtigt, oder es wird dafür ein bestimmter Wert von z.B. 0,5 angenommen [8]. 't Hart, Bosma u. Telle [9] haben einen konstanten Wert für das Horizontaldruckverhältnis unterstellt und den Reibungsbeiwert experimentell ermittelt. Jofriet u. Daynard [10] berücksichtigen als Randbedingungen das Produkt von Reibungsbeiwert und örtlichem Horizontaldruckverhältnis. Diese Methode wird auch in dieser Arbeit angewandt. Einzelheiten zur Methode sind an anderer Stelle [11] beschrieben.

3. Material und Methode

3.1 Material

Als Versuchsmaterial wurden Sommergerste, Sommerweizen und Corn-Cob-Mix (CCM) verwendet. Die Gerste und der Weizen waren eine Futtergetreidemischung verschiedener Sorten. Das CCM (Erntejahr 1983) war zum Versuchszeitpunkt einsiliert.

Die Getreidekörner waren entweder lagertrocken oder auf einen Feuchtegehalt von etwa 20 % bzw. 26 % angefeuchtet. Für die Flüssiglagerung wurde das Getreide geschrotet und anschließend auf verschiedene Feuchtegehalte zwischen 43 % und 66 % eingestellt. Für das CCM variierte der Feuchtegehalt im Bereich zwischen 47 % und 63 %. In Tafel 1 sind die Versuchsvarianten zusammengestellt.

	Feuchtegehalt in %	
	Körner	Schrot
Gerste	12,9; 19,8; 25,7	51,6; 58,5; 65,6
Weizen	13,7; 19,4; 25,1	43,5; 52,0; 58,0
CCM-Schrot	47,1; 53,2; 58,8; 63,1	
Druck (kPa):	0; 1; 4; 8; 13; 24; 55; 107	

Tafel 1. Versuchsvarianten bei der Ermittlung der Lagerkapazität.

3.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Zur Ermittlung der Lagerkapazität wurde ein Modellsilo aufgestellt. Dabei wurden sowohl die Stoffeigenschaften durch Verdichtungsversuche als auch die Randeinflüsse als Produkt aus Reibungsbeiwert und Horizontaldruckverhältnis berücksichtigt. In Bild 2 ist die Meßanordnung zur Ermittlung der Abhängigkeit zwischen Lagerdichte und Druck dargestellt.

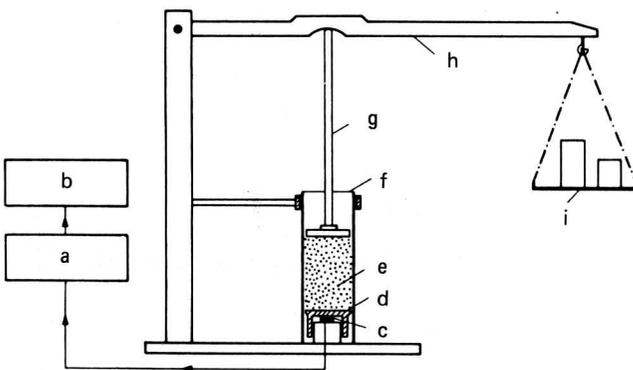


Bild 2. Versuchseinrichtung zur Ermittlung der Lagerdichte in Abhängigkeit vom Vertikaldruck.

- | | |
|--------------------------------|---------------------|
| a Trägerfrequenz-Meßverstärker | e Probe |
| b Y,T-Schreiber | f Acrylglaszylinder |
| c Druckaufnehmer | g Stempel |
| d Teller | h Hebel |
| | i Gewichtsstücke |

Für die Versuche wurde ein Acrylglaszylinder mit 200 mm Außendurchmesser (Innendurchmesser 190 mm) benutzt. Die definierten Drücke auf die Proben wurden mit Gewichtsstücken über eine Hebelanordnung ausgeübt. Den Zylinderboden bildete ein

freistehender Teller mit einem Durchmesser von 187 mm, der direkt einem Druckkraftaufnehmer auflag. Über einen Trägerfrequenz-Meßverstärker wurde der jeweilige Meßwert auf einen Y,T-Schreiber übertragen. Der Schreiber zeichnete über die Versuchsdauer den jeweilig resultierenden Bodendruck auf.

Um beim Versuch möglichst geringe apparativ bedingte Wandeinflüsse zu erhalten, wurden der Stempel oben und der Teller unten so dimensioniert, daß sie gegenüber dem Zylinder frei beweglich waren. Der Druckkraftaufnehmer wurde mit geeichten Gewichtsstücken kalibriert. Direkt vor jedem Versuch wurde der Druckkraftaufnehmer durch eine im Verstärker eingebaute Shunt-Kalibrierung überprüft.

Die Füllhöhe im Zylinder betrug ca. 400 mm; die Belastungsdauer für jeden Druck 8 Stunden. Das Material wurde vor dem Einfüllen gewogen und über die Füllhöhe die Anfangslagerdichte ermittelt. Die Höhe wurde bei jeder Druckbelastung erneut gemessen und daraus die entsprechende Lagerdichte errechnet. Bei höherem Feuchtegehalt wurde das Material in 0,1 mm dicke Polyethylenbeutel eingefüllt, um Saftaustritt zu vermeiden.

Durch die Verdichtungsversuche wurde die stoffabhängige Beziehung zwischen Vertikaldruck und Lagerdichte ermittelt. Der durchschnittliche Vertikaldruck einer Schicht kann aus der Gleichung von *Janssen* [12] für das Druckgleichgewicht eines zylindrischen Silos abgeleitet werden.

Bild 3 zeigt das Druckgleichgewicht einer horizontalen Schicht mit der Höhe dz .

Die verwendeten Kurzzeichen bedeuten:

- D Silodurchmesser in m
- g Fallbeschleunigung in m/s^2
- p_v Vertikaldruck in kPa
- z Fülltiefe des zyl. Silos in m
- λ Verhältnis Horizontaldruck/Vertikaldruck
- μ Reibungsbeiwert
- ρ_L örtliche Lagerdichte in t/m^3 .

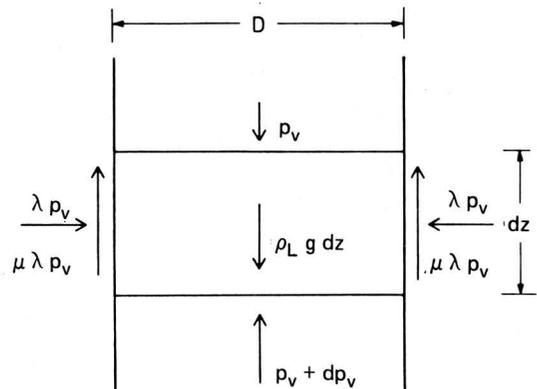


Bild 3. Druckgleichgewicht einer zylindrischen Gutsschicht im Silo.

Das Druckgleichgewicht ist bei einer beliebigen Siloschicht folgendermaßen zu beschreiben: die vertikale Kraft, die auf diese Schicht wirkt, zuzüglich der Kraft aus der eigenen Masse der Schicht, sind gleich der vertikalen Gegenkraft unterhalb dieser Schicht zuzüglich der vertikalen Gegenkraft aus der Wandreibung dieser Schicht. Also gilt:

$$0,25 \pi D^2 (p_v + \rho_L g dz) = 0,25 \pi D^2 (p_v + dp_v) + \mu \lambda p_v \pi D dz \quad (1)$$

Daraus läßt sich das Druckgleichgewicht in dieser Schicht mit einer Differentialgleichung darstellen, vorausgesetzt, daß die Lagerdichte und der Druck in der Ebene konstant sind:

$$\frac{dp_v}{dz} + \beta p_v = \rho_L g, \text{ wobei } \beta = 4 \mu \lambda / D \quad (2).$$

Die Differentialgleichung ist nach p_v schrittweise zu lösen. Die allgemeine Gleichung lautet:

$$p_v = (\rho_L g / \beta) + [p_0 - (\rho_L g / \beta)] e^{-\beta z} \quad (3).$$

p_0 kennzeichnet den Anfangsdruck, der auf der Probe lastet.

Den durchschnittlichen Vertikaldruck p_θ dieser Schicht erhält man durch Integration von Gl. (3):

$$p_\theta = (1/H) \int_0^H p_v dz \quad (4).$$

Die Beziehung zwischen Vertikaldruck und Lagerdichte läßt sich allgemein mit folgender Gleichung ausdrücken [13]:

$$\rho_L = \rho_0 + a(1 - e^{-bp_v}) \quad (5).$$

Mittels der Verdichtungsversuche wurden die Anfangslagerdichte ρ_0 und die gutabhängigen Konstanten a und b bestimmt. Aus den gewonnenen Daten wurden die Werte für ρ_0 , a und b mit dem Computerprogramm "NONLIN" errechnet.

Um Gl. (3) zu lösen, wird der Wert von β benötigt. Durch Umformulieren von Gl. (3) erhält man:

$$e^{-\beta z} = (p_v - \rho_L g / \beta) / (p_0 - \rho_L g / \beta) \quad (6)$$

und

$$\beta = \ln [(p_0 - \rho_L g / \beta) / (p_v - \rho_L g / \beta)] / z \quad (7).$$

Gl. (7) kann numerisch gelöst werden. Wenn β gefunden ist, werden die Randbedingungen als Produkt von Reibungsbeiwert und Horizontaldruckverhältnis berechnet:

$$\mu \lambda = 0,25 \beta D \quad (8).$$

Mit den Gln. (3) und (5) läßt sich die Lagerkapazität bei einer beliebigen Silogröße iterativ errechnen. Zuerst wird der Vertikaldruck einer dünnen oberen Schicht errechnet, dann die entsprechende Lagerdichte. Dieser Rechenvorgang wiederholt sich schichtweise bis zur untersten Schicht.

4. Versuchsergebnisse

In Bild 4 bis 6 sind für die drei untersuchten Güter die Abhängigkeiten zwischen der Lagerdichte und dem Vertikaldruck dargestellt. Sie veranschaulichen die Komprimierbarkeit des Materials mit unterschiedlichem Feuchtegehalt. Während die Lagerdichte trockener Körner bei höheren Drücken fast konstant bleibt, ergibt sich bei höherem Feuchtegehalt eine stärkere Zunahme der Lagerdichte in Abhängigkeit vom Vertikaldruck.

Schrote mit niedrigstem Feuchtegehalt haben eine höhere Anfangslagerdichte als Körner und lassen sich durch den Druck weiter leicht verdichten. Nach Erreichen der Feuchtesättigung läßt sich das Material durch wachsenden Vertikaldruck nicht komprimieren. Es wurde auch festgestellt, daß die Lagerdichte bei Feuchtaufnahme wegen einer Volumenausdehnung abnahm. Diese Erscheinung beruht in erster Linie auf der Quellung der Getreidestärke.

Bei den Varianten mit Feuchtegehalten über dem Sättigungspunkt, z.B. 58,5 % und 65,6 % Feuchtegehalt bei Gerste, 52,0 % und 58,0 % Feuchtegehalt bei Weizen und 58,8 % und 63,1 % Feuchtegehalt bei CCM, läßt sich das Material durch hohen Druck nicht komprimieren. Hier ist ohne Berücksichtigung der Volumenausdehnung die Anfangslagerdichte gleich der durchschnittlichen Lagerdichte. Das Druckverhalten des Materials ist quasi hydrostatisch.

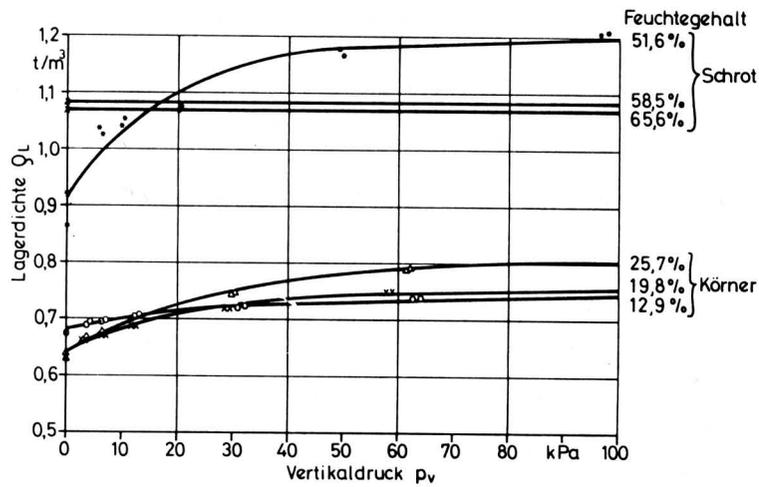


Bild 4. Lagerdichte bei der Konservierung von Gerste in Abhängigkeit vom Vertikaldruck.

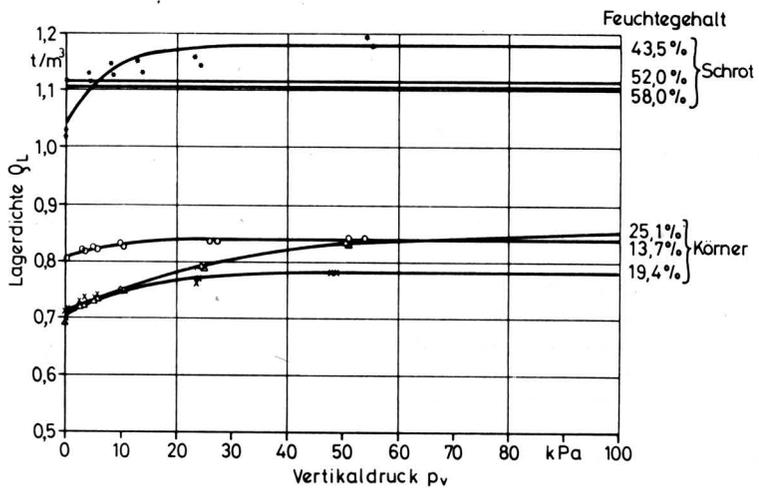


Bild 5. Lagerdichte bei der Konservierung von Weizen in Abhängigkeit vom Vertikaldruck.

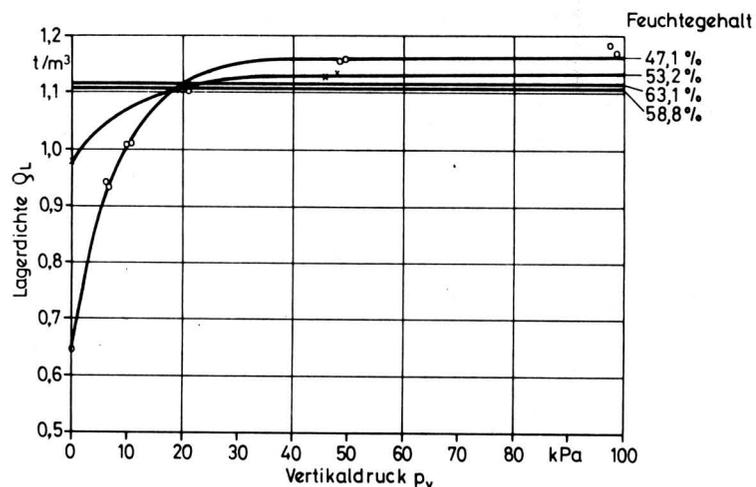


Bild 6. Lagerdichte bei der Konservierung von Corn-Cob-Mix in Abhängigkeit vom Vertikaldruck.

In Tafel 2 sind die Gleichungen und die Bestimmtheitsmaße für die Kurven der Bilder 4 bis 6 dargestellt.

Für die Ermittlung der Lagerkapazität von Großsilos wurden Silodurchmesser zwischen 4,4 m und 7,6 m sowie für das Verhältnis Durchmesser/Höhe Werte von 1 : 2 bis 1 : 3 unterstellt.

Material	Feuchtegehalt U in %	Gleichung	Bestimmtheitsmaß B
Gerste	Körner 12,9	$\rho_L = 0,680 + 0,062 (1 - e^{-0,038 p_V})$	0,972
	Körner 19,8	$\rho_L = 0,642 + 0,111 (1 - e^{-0,045 p_V})$	0,985
	Körner 25,7	$\rho_L = 0,642 + 0,165 (1 - e^{-0,034 p_V})$	0,984
	Schrot 51,6	$\rho_L = 0,914 + 0,284 (1 - e^{-0,054 p_V})$	0,933
Weizen	Körner 13,7	$\rho_L = 0,806 + 0,034 (1 - e^{-0,104 p_V})$	0,931
	Körner 19,4	$\rho_L = 0,710 + 0,073 (1 - e^{-0,076 p_V})$	0,952
	Körner 25,1	$\rho_L = 0,702 + 0,154 (1 - e^{-0,036 p_V})$	0,982
	Schrot 43,5	$\rho_L = 1,035 + 0,145 (1 - e^{-0,148 p_V})$	0,852
CCM	Schrot 47,1	$\rho_L = 0,646 + 0,515 (1 - e^{-0,123 p_V})$	0,997
	Schrot 53,2	$\rho_L = 0,979 + 0,154 (1 - e^{-0,091 p_V})$	0,999

Tafel 2. Gleichungen zur Berechnung der Lagerdichte (t/m^3) in Abhängigkeit vom Vertikaldruck (kPa).

Die auf iterativem Wege ermittelten Werte der Lagerkapazität für Feuchtmaterial in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt und der Silogröße sind in Tafel 3 bis 5 zusammengetragen.

Die eingelagerte Masse nimmt bei Gerstenkörnern mit dem Feuchtegehalt gering zu. Bei Weizenkörnern steigt sie erst bei ca. 25 % Feuchtegehalt an. Es wird deutlich, daß die Komprimierbarkeit der Körner mit zunehmendem Feuchtegehalt auch zunimmt. Die Feuchtegehalte der Schrote liegen von vornherein deutlich höher als die der Körner. Vom Schrot mit dem niedrigsten Feuchtegehalt kann am meisten eingelagert werden. Von diesem Feuchtegehalt an nimmt die einzulagernde Masse mit dem Feuchtegehalt wieder stetig ab.

Siloabmessungen m	Feuchtegehalt in %					
	Körner			Schrot		
Ø Höhe	12,9	19,8	25,7	51,6	58,5	65,6
4,4 x 8,8	95	94	96	149	145	143
4,4 x 11,0	119	118	121	188	181	179
4,4 x 13,2	144	142	146	228	217	214
5,2 x 10,4	158	156	160	249	239	236
5,2 x 13,0	198	196	202	315	299	295
5,2 x 15,6	238	237	245	380	358	354
6,0 x 12,0	243	241	248	386	367	363
6,0 x 15,0	305	304	314	487	459	453
6,0 x 18,0	368	367	380	588	550	544
6,8 x 13,6	355	353	365	566	534	528
6,8 x 17,0	446	445	461	713	668	660
6,8 x 20,4	537	537	558	861	801	792
7,6 x 15,2	497	496	514	794	746	737
7,6 x 19,0	624	624	649	1000	932	921
7,6 x 22,8	751	753	785	1207	1119	1105

Tafel 3. Lagerkapazität (t Feuchtmasse) von Silos verschiedener Abmessungen bei der Konservierung von Gerste mit unterschiedlichem Feuchtegehalt.

Siloabmessungen m	Feuchtegehalt in %					
	Körner			Schrot		
Ø Höhe	13,7	19,4	25,1	43,5	52,0	58,0
4,4 x 8,8	111	101	103	156	149	148
4,4 x 11,0	139	127	130	195	186	185
4,4 x 13,2	168	153	157	235	224	222
5,2 x 10,4	184	168	172	258	246	244
5,2 x 13,0	231	211	217	323	308	305
5,2 x 15,6	277	254	261	388	369	366
6,0 x 12,0	283	260	267	396	378	375
6,0 x 15,0	354	326	336	496	473	468
6,0 x 18,0	426	392	406	596	567	562
6,8 x 13,6	413	379	391	578	550	545
6,8 x 17,0	516	475	493	723	688	682
6,8 x 20,4	620	572	595	869	826	818
7,6 x 15,2	576	531	550	807	768	762
7,6 x 19,0	721	665	694	1011	961	952
7,6 x 22,8	866	800	837	1214	1153	1142

Tafel 4. Lagerkapazität (t Feuchtmasse) von Silos verschiedener Abmessungen bei der Konservierung von Weizen mit unterschiedlichem Feuchtegehalt.

Siloabmessungen m	Feuchtegehalt in %			
	47,1	53,2	58,8	63,1
Ø Höhe				
4,4 x 8,8	144	148	148	149
4,4 x 11,0	183	186	185	186
4,4 x 13,2	222	224	222	223
5,2 x 10,4	242	245	244	246
5,2 x 13,0	306	308	305	307
5,2 x 15,6	370	370	367	369
6,0 x 12,0	374	378	375	378
6,0 x 15,0	473	474	469	472
6,0 x 18,0	571	570	563	567
6,8 x 13,6	549	551	546	550
6,8 x 17,0	692	691	683	687
6,8 x 20,4	835	831	820	825
7,6 x 15,2	770	771	763	768
7,6 x 19,0	970	966	954	960
7,6 x 22,8	1170	1161	1144	1152

Tafel 5. Lagerkapazität (t Feuchtmasse) von Silos verschiedener Abmessungen bei der Konservierung von geschrotetem Corn-Cob-Mix mit unterschiedlichem Feuchtegehalt.

Von besonderem Interesse ist aber die Lagerkapazität des Silos an Trockenmasse, da sie Aufschluß über die Nährstoffkapazität je m^3 Silorum gibt. Sie wurde rechnerisch ermittelt und in Tafel 6 bis 8 wiedergegeben.

Während die Lagerkapazität an Feuchtmasse mit höherem Feuchtegehalt ansteigt – ausgenommen die Zunahme der Feuchte bei den Schrotvarianten –, nimmt die Lagerkapazität an Trockenmasse mit dem Feuchtegehalt allgemein ab. Die eingelagerte Trockenmasse von Gerstenschrot mit einem Feuchtegehalt von 51,6 % entspricht aber der von Feuchtkörnern mit einem Feuchtegehalt von 25,7 %. Die Lagerkapazität an Trockenmasse bei Weizenschrot mit einem Feuchtegehalt von 43,5 % ist geringer als die trockener Körner, aber höher als die feuchter Körner. Bei CCM nimmt die Lagerkapazität an Trockenmasse mit zunehmendem Feuchtegehalt einheitlich ab.

Siloabmessungen m		Feuchtegehalt in %					
		Körner			Schrot		
Ø	Höhe	12,9	19,8	25,7	51,6	58,5	65,6
4,4 x 8,8		83	75	71	72	60	49
4,4 x 11,0		104	95	90	91	75	62
4,4 x 13,2		125	114	108	110	90	74
5,2 x 10,4		138	125	119	121	99	81
5,2 x 13,0		172	157	150	152	124	101
5,2 x 15,6		207	190	182	184	149	122
6,0 x 12,0		212	193	184	187	152	125
6,0 x 15,0		266	244	233	236	190	156
6,0 x 18,0		321	294	282	285	228	187
6,8 x 13,6		309	283	271	274	222	182
6,8 x 17,0		388	357	343	345	277	227
6,8 x 20,4		468	431	415	417	332	272
7,6 x 15,2		433	398	382	384	310	254
7,6 x 19,0		544	500	482	484	387	317
7,6 x 22,8		654	604	583	584	464	380

Tafel 6. Lagerkapazität (t Trockenmasse) von Silos verschiedener Abmessungen bei der Konservierung von Gerste mit unterschiedlichem Feuchtegehalt.

Siloabmessungen m		Feuchtegehalt in %			
		47,1	53,2	58,5	63,1
Ø	Höhe				
4,4 x 8,8		76	69	61	55
4,4 x 11,0		97	87	76	69
4,4 x 13,2		117	105	91	82
5,2 x 10,4		128	115	101	91
5,2 x 13,0		162	144	126	113
5,2 x 15,6		196	173	151	136
6,0 x 12,0		198	177	155	139
6,0 x 15,0		250	222	193	174
6,0 x 18,0		302	267	232	209
6,8 x 13,6		290	258	225	203
6,8 x 17,0		366	323	281	254
6,8 x 20,4		442	389	338	304
7,6 x 15,2		407	361	314	283
7,6 x 19,0		513	452	393	354
7,6 x 22,8		619	543	471	425

Tafel 8. Lagerkapazität (t Trockenmasse) von Silos verschiedener Abmessungen bei der Konservierung von geschrotetem Corn-Cob-Mix mit unterschiedlichem Feuchtegehalt.

Siloabmessungen m		Feuchtegehalt in %					
		Körner			Schrot		
Ø	Höhe	13,7	19,4	25,1	43,5	52,0	58,0
4,4 x 8,8		96	81	77	88	72	62
4,4 x 11,0		120	102	97	110	89	78
4,4 x 13,2		145	123	118	133	108	93
5,2 x 10,4		159	135	129	146	118	102
5,2 x 13,0		199	170	163	182	148	128
5,2 x 15,6		239	205	195	219	177	154
6,0 x 12,0		244	210	200	224	181	158
6,0 x 15,0		306	263	252	280	227	197
6,0 x 18,0		368	316	304	337	272	236
6,8 x 13,6		356	305	293	327	264	229
6,8 x 17,0		445	383	369	408	330	286
6,8 x 20,4		535	461	446	491	396	344
7,6 x 15,2		497	428	412	456	369	320
7,6 x 19,0		622	536	520	571	461	400
7,6 x 22,8		747	645	627	686	553	480

Tafel 7. Lagerkapazität (t Trockenmasse) von Silos verschiedener Abmessungen bei der Konservierung von Weizen mit unterschiedlichem Feuchtegehalt.

Im Unterschied zu Jofriet u. Daynard [10], die für jede Druckstufe eine bestimmte Belastungsdauer (bis zu 30 Tage) wählten, dauerte die Druckbelastung bei den eigenen Versuchen je Druckstufe 8 Stunden, so daß insgesamt 64 Stunden bis zur höchsten Stufe nötig waren. Die Belastungsdauer von 30 Tagen unterstellt, daß nach dem Absetzen des Materials der Silo wieder nachgefüllt wird. Die Belastungsdauer in den eigenen Versuchen hingegen geht aus von einer Befülldauer von knapp 3 Tagen und der danach erreichten Lagerdichte.

Die Anfangslagerdichte (Schüttdichte) entspricht mit 0,6–0,7 t/m³ bei Gerstenkörnern und 0,7–0,8 t/m³ bei Weizenkörnern den Erfahrungen aus der Praxis. Die durchschnittliche Lagerdichte von 1,1 t/m³ bei CCM im Feuchtebereich von 47–53 % dagegen liegt höher als Daten von Albrecht [14], die indes für andere Feuchtegehalte und nach einer anderen Meßmethode ermittelt wurden.

In der Praxis sind für das Verfahren "Flüssigkonservierung" bestimmte Mindest-Feuchtegehalte nötig, damit das Futter pumpfähig ist. Für Gerstenschrot ist ein Feuchtegehalt von etwa 58 %, für Weizenschrot von 52 % und für CCM von annähernd 55 % als Mindestwert anzusehen. Vergleicht man die Lagerkapazität an Trockenmasse bei diesen für die Anwendung erforderlichen Einlagerungsfeuchten, so ist bei der Flüssigkonservierung für Gerste 16 bis 23 % an zusätzlichem Lagerraum erforderlich, wenn man einen Feuchtegehalt von 58,5 % bei der Flüssigkonservierung und von 19,8 % oder 25,7 % bei der Feuchtkonservierung zugrunde legt. Bei Weizen werden etwa 7–14 % mehr Lagerraum benötigt, falls 52,0 % Feuchte bei der Flüssiglagerung und 19,4 % bzw. 25,1 % für die Feuchtlagerung unterstellt werden. Der zusätzliche Lagerbedarf für CCM beträgt 9–24 %, wenn man der Feuchtlagerung mit 47,1 % Feuchte die Flüssiglagerung mit 53,2 % bzw. 58,8 % Feuchtegehalt gegenüberstellt. Die Ausnutzung des Siloraumes hängt also stark von der Einlagerungsfeuchte ab.

Beim Vergleich des Lagerraumbedarfs sind noch zwei weitere Faktoren zu berücksichtigen: die vorübergehende Volumenausdehnung bei der Flüssiglagerung durch Quellung und der Raumspruch des Entnahmegertes bei der Feuchtlagerung. Da bei der Flüssigkonservierung mit einer außerhalb des Behälters befindlichen Pumpe entnommen wird, beansprucht hierbei das Entnahmegert keinen Siloraum. Die Volumenausdehnung durch Quellung bei der Flüssiglagerung von etwa 5 % entspricht etwa dem Raumspruch des Untenentnahmegertes bei der Feuchtlagerung. Deshalb bleibt der zusätzliche Lagerraumbedarf bei Getreide unverändert.

Für das geschrotete CCM wird bei Feuchtlagerung in der Regel ein Obenentnahmegert eingesetzt, das etwa 10 % des Siloraumes in Anspruch nimmt. Die Differenz zwischen dem Raumbedarf für die vorübergehende Quellung des flüssig gelagerten CCM und dem Raumbedarf für die Obenfräse bei der Feuchtlagerung beträgt somit 5 %. Der Bedarf an zusätzlichem Lagerraum für die Flüssiglagerung anstelle der Feuchtlagerung von CCM verringert sich nach einem Abzug dieser Differenz von 5 % auf 4–19 %.

5. Zusammenfassung

Die Silierung von Körnerfrüchten im Hochsilo – ob feucht oder flüssig – ist durch hohe Festkosten belastet. Die genaue Information über die Lagerkapazität ist daher von besonderer Bedeutung für die Betriebsplanung.

Anhand eines Modellsilos wird die stoffabhängige Beziehung zwischen Lagerdichte und Vertikaldruck unter Berücksichtigung der Randeinflüsse festgestellt. Der durchschnittliche Vertikaldruck wird, ausgehend von dem Vorschlag von *Janssen* [12], aus dem Druckgleichgewicht einer dünnen Schicht abgeleitet und in einer mathematischen Beziehung ausgedrückt. Die Lagerkapazität eines Hochsilos läßt sich dann auf iterativem Wege ermitteln.

Die Komprimierbarkeit des Futters ist abhängig vom Feuchtegehalt. Sie nimmt mit dem Feuchtegehalt zu und erreicht bei Schrot mit einem Feuchtegehalt von 40–50 % ihr Maximum. Bei diesem Feuchtegehalt ergibt sich daher die höchste Lagerdichte bezogen auf die Feuchtmasse. Bei weiterer Zunahme des Feuchtegehaltes wird das Material mit Wasser übersättigt. Oberhalb der Wassersättigungsgrenze ist das Druckverhalten des Materials quasi hydrostatisch.

Bezogen auf die Trockenmasse ist der Raumbedarf bei der Flüssigkonservierung höher als bei der Feuchtkonservierung. Der zusätzliche Lagerraumbedarf des Flüssigverfahrens beträgt bei Gerste etwa 16–23 %, bei Weizen etwa 7–14 % und bei Corn-Cob-Mix etwa 4–19 %. Es empfiehlt sich, das Futter mit einem Feuchtegehalt geringfügig oberhalb der Pumpgrenze zu fördern, damit der zusätzliche Bedarf an Lagerraum gering bleibt.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] • *Riemann, U.*: Das Arbeitsverfahren Feuchtgetreide. Habilitationsschrift Univ. Kiel, 1965.
- [2] *Vogt, C.*: Getreidekonservierung und Lagerung unter Luftabschluß. Landtechnik Bd. 35 (1980) Nr. 7, S. 310/13.
- [3] *Ratschow, J.-P.*: Konservierung von CCM unter Wasserzusatz. Mais (1984) Nr. 3, S. 28/30.
- [4] *Clower, R.E., I.J. Ross u. G.M. White*: Properties of compressible materials as related to forces in bulk storage structures. Trans. ASAE Bd. 16 (1973) Nr. 3, S. 478/81.
- [5] *Leask, W.C. u. T.B. Daynard*: Effects of percent moisture and compaction pressure on the ensiling of corn stover in laboratory silos. Can. J. Plant Sci. Bd. 53 (1973) Nr. 3, S. 523/31.
- [6] *Negi, S.C., J.C. Jofriet u. J. Buchanan-Smith*: Density-pressure relationship of whole-plant corn silage. ASAE Paper No. 83-4001, St. Joseph, Mich., USA, 1983.
- [7] *Jackson, H.A. u. J.R. Lessard*: Effects of moisture content on corn silage density and storage losses in a large tower silo. Can. Agric. Eng. Bd. 19 (1977) Nr. 2, S. 57/58.
- [8] *Gordon, J.E., D.R. Landphair u. W.P. Jensen*: Silo capacity determination. ASAE Paper No. 74-1004, St. Joseph, Mich., USA, 1974.
- [9] *'t Hart, C., A.H. Bosma u. M.G. Telle*: Physical properties of ensiled grass and corn, silo capacities and silage pressures in cylindrical tower silos. Institute of Agricultural Engineering (IMAG) Wageningen/The Netherlands, 1979, Research Report 79-3.
- [10] *Jofriet, J.C. u. T.B. Daynard*: Pressure-density models for whole shelled, ground shelled and ground ear corn. Trans. ASAE Bd. 25 (1982) Nr. 3, S. 725/29 und 734.
- [11] • *Oh, In-Hwan*: Verfahren der Flüssigkonservierung von Getreide und Mais. Diss. Univ. Kiel, 1985.
- [12] *Janssen, H.A.*: Versuche über Getreidedruck in Silozellen. Z.-VDI Bd. 39 (1895) Nr. 39, S. 1045/49.
- [13] • *Negi, S.C.*: Pressures developed by silage materials in cylindrical tower silos. Ph. D. Thesis, Dept. Agric. Engng., McGill University Montreal, Canada, 1974.
- [14] • *Albrecht, D.*: Ermittlung von Verfahrenskennwerten und vergleichende Beurteilung landwirtschaftlicher Körnerfrucht-konservierungsverfahren. Diss. Univ. Hohenheim, 1981, MEG-Schrift Nr. 56.

Bodenschonende Fahrwerke landwirtschaftlicher Transportanhänger

Von Adolf Heine, Hohenheim*)

DK 631.372:629.11.012.3:531.211:631.43

Für einen bodenschonenden Einsatz sollten die Fahrwerke landwirtschaftlicher Transportanhänger so beschaffen sein, daß unzulässige Bodenverdichtungen, tiefe Fahrspuren und das Abscheren der Bodenoberfläche vermieden werden. Zur Bewertung der wichtigsten Fahrwerksarten wurde deshalb das Schräglauf- und Seitenkraftverhalten bei Kurvenfahrt, der Rollwiderstand der Fahrwerke und der Bodendruck unter den Fahrwerksreifen herangezogen. Im Vergleich zu Tandemachsfahrwerken und Einachsfahrwerken mit Zwillingsbereifung scheinen sich für einen bodenschonenden Einsatz Doppelpendelachs-Fahrwerke besonders zu eignen.

*) Dipl.-Ing. A. Heine ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Grundlagen der Landtechnik (Leiter: Prof. Dr.-Ing. H.D. Kutzbach) des Instituts für Agrartechnik der Universität Hohenheim.

1. Einleitung

In den letzten 25 Jahren haben sich die in den landwirtschaftlichen Betrieben zu transportierenden Massen nahezu verdoppelt [1]. Um die für Bestellung, Düngung und Ernte günstigen Termine einzuhalten, ist darüber hinaus die Schlagkraft der Transportverfahren durch den Einsatz von Transportfahrzeugen mit großen Nutzmassen erhöht worden. Damit nimmt jedoch die Gefahr von unzulässigen Bodenverdichtungen, Ausbildung tiefer Fahrspuren und Abscheren der Bodenoberfläche zu.

Um solche bodenschädigenden Wirkungen durch das Befahren landwirtschaftlicher Nutzflächen möglichst zu vermeiden, müssen nicht nur die Fahrwerke von Ackerschleppern und Erntemaschinen, sondern besonders auch die Fahrwerke landwirtschaftlicher Transportanhänger den höheren Gesamtgewichten angepaßt werden.

Erweiterte Fassung des Vortrages auf der Internat. Tagung Landtechnik am 7. Nov. 1985 in Braunschweig.