

Silagedrücke in Silos aus glasfaserverstärktem Kunststoff

Von Wilfried Göbel, Tänikon, Schweiz*)

DK 664.8:621.796.6:633.004.12

In der Schweiz wird Silage vielfach in dünnwandigen Hochsilos aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) bereitet. Um Daten für die Belastungsannahmen bei der Dimensionierung solcher Silos zu ermitteln, wurden mit selbstentwickelten Druckmeßkissen aus Weich-PVC die horizontalen und vertikalen Drücke von Rübenblatt und Zuckerrübenschnitzeln in Silos von 3,5 m Durchmesser und etwa 10 m Gesamthöhe in verschiedenen Höhen gemessen. Da auch die Gewichte der über den Kissen eingelagerten Massen, das Setzen und der Saftabfluß erfaßt wurden, ließen sich die Wandreibungskräfte berechnen. Sie sind gleich nach dem Füllen am größten, wenn sie bis zu 50 % der Silagelast über die Silowand auf das Fundament übertragen. Auch bleiben sie in Abhängigkeit von der Höhe im unteren Silobereich konstant. Die horizontalen und vertikalen Drücke erreichen zu keinem Zeitpunkt den hydrostatischen Druck von Wasser gleicher Füllhöhe.

1. Einleitung

Siloeinstürze, teure Silokonstruktionen und die zunehmende Verbreitung der Gärfutterbereitung waren Gründe dafür, in verschiedenen Ländern immer wieder Untersuchungen zur Bestimmung der tatsächlich im Gärfutter auftretenden Drücke durchzuführen. Die meisten Untersuchungen waren indirekte Messungen der Drücke, indem man aus der Dehnung von Wanelementen auf die Drücke schloß [1, 2, 3]. In manchen Fällen waren Laboruntersuchungen die Grundlage für die Lastannahmen [4, 5]. Es ist klar, daß Untersuchungen in der Praxis nicht einfach sind und daß selbst sorgfältig ausgeführte Messungen in ihren Ergebnissen sehr von der Wirklichkeit abweichen können. Auch zeigte sich, daß mit diesen Methoden kaum Veränderungen der Drücke während der Lagerdauer erfaßt werden konnten. Doch für die Bemessung dickwandiger Silos genügen Angaben wie voller Wasserdruck oder ein definierter Bruchteil des hydrostatischen Druckes von Wasser gleicher Füllhöhe als Belastungsannahme [6, 3]. Für dünnwandige Silos aus GFK, Bild 1, hingegen, bei denen jeder Millimeter Wandstärke viel Geld kostet, ist die genaue Kenntnis der Lasten sehr wichtig.

2. Aufgabenstellung

Die neuen Untersuchungen sollten Aufschluß geben über den vertikalen Druck (p_v), den horizontalen Druck (p_h) und die flächenbezogene Wandreibungskraft (p_w) in Abhängigkeit von der Lagerzeit und der Silohöhe. Gleichzeitig sollten auch die für die statische Berechnung benötigten Druckverhältnisse p_h/p_v und p_w/p_h sowie das Verhältnis der von der Wand getragenen Last zur Fülllast $a = P_w/G$ für jeden Meßhorizont in Abhängigkeit von der Lagerdauer ermittelt werden [5]. Diese Untersuchungen erstreckten sich auf Rübenblatt und Zuckerrübenschnitzel, da diese Gärfutterarten die größten Drücke erwarten ließen.

*) Dipl.-Ing. W. Göbel ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Eidg. Forschungsanstalt für Betriebswirtschaft und Landtechnik Tänikon.



Bild 1. Versuchssilo aus glasfaserverstärktem Kunststoff (Mitte Wickelverfahren, rechts Schleuderverfahren) neben einem Holzsilos (links).

3. Methodische Grundlagen

Selbstgeklebte Kissen, Bild 2, in den Abmessungen 22 x 22 cm, bei 2 cm Höhe aus 0,3 mm dicker Weich-PVC-Folie dienten zur Messung der Drücke der Silage in vertikaler und horizontaler Richtung in verschiedenen Meßhorizonten. Die vertikal an der Silowand aufgestellten Kissen zur Messung des horizontalen Wanddruckes waren zur Kompensation der vertikalen Drücke durch einen Metallbügel von 5 mm Durchmesser ausgesteift. Da der Druck im Kissen so groß ist wie der Umgebungsdruck senkrecht auf die Kissenfläche, ließ sich der Gärfutterdruck aus dem Wasserstand in dem an jedes Kissen angeschlossenen Plastikschlauch ablesen. Die Plastikschläuche durchbrachen an einer Stelle die Silowand und wurden außen an ihr hochgeführt, Bild 3.

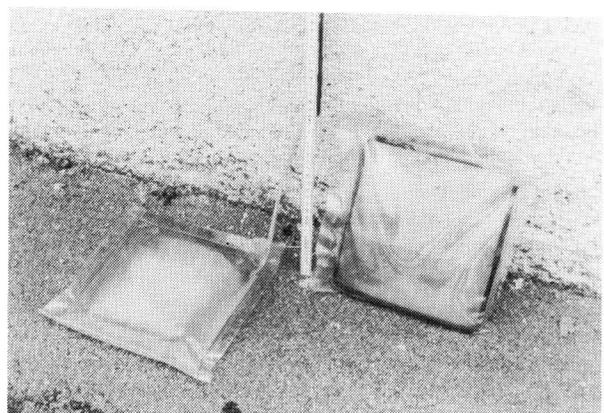


Bild 2. Meßkissen (22 x 22 x 2 cm) aus Weich-PVC-Folie (0,3 mm dick) zur Ermittlung der Horizontal- und Vertikaldrücke in Gärfuttersilos; Druckanzeige über den Wasserstand in angeschlossenen Plastikschläuchen; vertikal einzubauende Meßkissen für Horizontaldrücke ausgesteift durch 5 mm Stahldrahtrahmen.

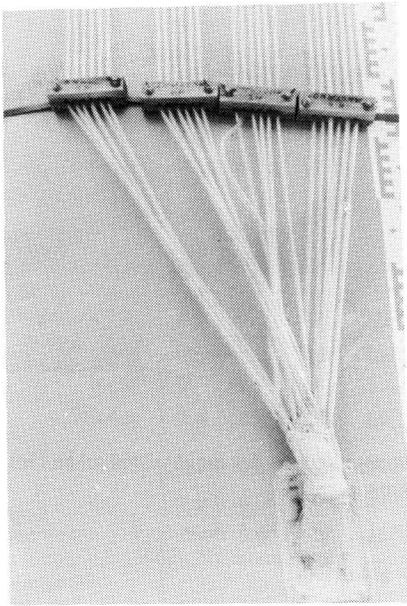


Bild 3. Durchführung der Plastschläuche durch die Silowand (Schleuderverfahren).

Die Druckmeßkissen waren zu je drei oder vier Paaren in drei oder vier Horizonten eingelegt, Bild 4. Durch Niveauanzeiger, mit Alufolie überzogene Sperrholzplatten (20 x 20 cm), die auf die Stirnseite einer 1,5 m langen horizontal eingelegten Dachlatte genagelt waren, konnte das Setzen der einzelnen Füllschichten von außen durch einen Metalldetektor verfolgt werden. Das Gewicht der Schichten zwischen bzw. über den Meßhorizonten wurde vor dem Einfüllen ermittelt.

Da sich die Gärfutterdrücke in Abhängigkeit von der Lagerdauer verändern, sollten auch die Umstände, die diese Veränderungen verursachen, erfaßt werden. Außer dem Setzen gehören der Saft- und Gasabfluß sowie der Gärtemperaturverlauf zu diesen Ursachen. Der über eine Bodendrainage und einen Siphon abfließende Saft wurde aufgefangen und über eine intervallweise betriebene Pumpe weiter befördert. Zur Gasmessung dienten zwei Gasuhren, um einerseits das ausfließende Gas und andererseits die bei einem Temperatursturz eintretende Luft zu messen. Es waren zwei Temperaturmeßsonden (Pt100) in Silomitte auf ungefähr 1 und 2 m Höhe plaziert.

Da die Einfülllast über jedem Meßhorizont bekannt ist und gleichzeitig auch der vertikale Druck p_v , läßt sich aus der Differenz zwischen Einfülllast und der sich aus dem vertikalen Druck ergebenden Last die von der Wand aufgenommene Last und damit die flächenbezogene Wandreibungskraft p_w berechnen. p_w läßt sich dabei einerseits exakt aus der Zunahme der Reibungskräfte von Meßhorizont zu Meßhorizont bestimmen oder andererseits aus dem von der Wand übernommenen Lastanteil und unter der Annahme erfassen, daß p_w über dem gesamten Bereich des entsprechenden Meßhorizontes konstant verläuft. (Die Ergebnisse unterscheiden sich kaum voneinander.) Mit p_w erhält man auch p_w/p_h , den dritten gesuchten Verhältnswert neben p_h/p_v und a .

4. Versuchsaufbau

Die beiden zur Verfügung stehenden Silos unterschieden sich praktisch nur im Herstellungsverfahren, nämlich gewickelt bzw. geschleudert, Tafel 1. Sie wurden im Laufe von zwei Jahren je einmal mit Rübenblatt (RB) und einmal mit Zuckerrübenschnitzeln (ZRS) beschickt. Rund 96,6 bzw. 94,1 t Zuckerrübenschnitzeln wurden in beiden Fällen innerhalb von 11 Tagen in fünf Schüben

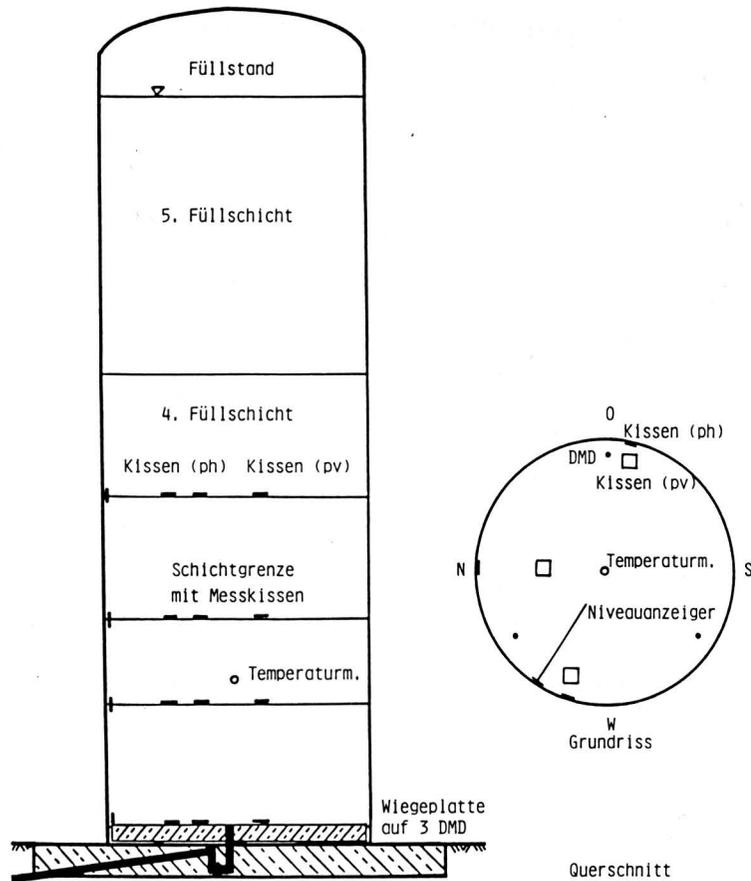


Bild 4. Anordnung der Meßkissen beim Silieren von Rübenblatt (Silo nach dem Schleuderverfahren); in vier Meßhorizonten jeweils drei Meßkissenpaare, Wiegeplatte mit drei Druckmeßdosen (DMD).

Herstellverfahren		gewickelt	geschleudert
Durchmesser	m	3,47	3,48
Querschnittsfläche	m ²	9,46	9,51
Höhe	m	10,2	10,5
Inhalt	m ³	96,5	99,9
Wandzustand, innen		glatt	weniger glatt
Drainage		Boden	Boden

Tafel 1. Siloabmessungen und Wandzustand.

eingefüllt, während das Füllen mit rund 64,4 bzw. 55,9 t Rübenblatt an zwei Tagen bzw. an einem Tage geschah, Tafel 2. Die Trockensubstanzgehalte (TS) unterschieden sich kaum. Bei den Zuckerrübenschnitzeln waren es 18,2 und 18,4 %, beim Rübenblatt 13,9 und 13,4 %. Damit waren aus dieser Sicht also vergleichbare Meßergebnisse bei den Parallelversuchen zu erwarten.

Die etwas geringere Menge Rübenblattsilage im zweiten Versuch gab den Ausschlag dafür, acht Tage später noch 9,8 t Rübenblatt mit 15,1 % TS und 40 Tage darauf noch 54,8 t Zuckerrübenschnitzeln mit 17,4 % TS nachzufüllen. Dieses Nachfüllen ist eine oft geübte Praxis in der Schweiz. Die Silodrucke konnten so auch unter noch extremeren Verhältnissen untersucht werden.

Herstellverfahren	gewickelt	geschleudert
Füllung 1985		
Datum	10., 11. Okt.	29. Nov. 2., 4., 6., 9. Dez.
Silageart	RB	ZRS
Menge t	64,40	96,57
Füll-Last kN	631,8	947,4
TS-Gehalt %	13,9	18,2
Füllung 1986		
Datum	10., 11., 13., 17., 20. Nov.	13. Okt.
Silageart	ZRS	RB
Menge t	94,08	55,87
Füll-Last kN	922,9	548,1
TS-Gehalt %	18,4	13,4
1. Nachfüllung		
Datum		21. Okt.
Silageart		RB
Menge t		9,75 (total 65,62)
Füll-Last kN		95,6 (total 643,7)
TS-Gehalt %		15,1 (total 13,7)
2. Nachfüllung		
Datum		1., 2., 3. Dez.
Silageart		ZRS
Menge t		54,84
Füll-Last kN		538,0
TS-Gehalt %		17,4

Tafel 2. Fülldatum und -mengen.

5. Versuchsdurchführung

Die Meßwerte konnten je nach Bedarf zu beliebigen Zeiten erhoben werden. Die Werte derselben Druckrichtung eines Horizontes wurden gemittelt. Es kam allerdings vor, daß das eine oder andere Meßkissen ausfiel. Diese Ausfälle wurden ausschließlich durch Verklemmen der Schläuche verursacht. Geplatzte Kissen gab es nicht.

In bezug auf die Genauigkeit der Meßkissenanzeige wurden anfangs Einwände erhoben. Aus diesem Grunde wurden die Kissen in Wasser, in Sand und in Silage sowohl in horizontaler wie auch in vertikaler Lage auf ihre Anzeige überprüft. Zur Überprüfung in Sand diente eine ungefähr 1 m³ fassende Holzkiste, die auf eine Waage gestellt war und in der die Kissen auf dem Boden und unten an den Seitenwänden angeordnet waren. Die Meßwerte der Drücke p_v und p_h stimmten im Sand wie im Wasser sehr genau mit den zu erwartenden Werten überein. Bei Sand mußte zuvor der Böschungswinkel gemessen werden, um auf die zu erwartende Horizontalkraft umrechnen zu können. Für die Überprüfung der Haltbarkeit und der Anzeigegenauigkeit in Silage wurde eine Presse mit Druckmeßdosenanzeige angefertigt. Die Kissen wurden darin einem Druck von bis zu 120 kN/m² ausgesetzt. Die Anzeige der Wassersäule in den Plastikschläuchen stimmte auch hier mit dem vorgegebenen Druck überein.

Der Einbau einer auf drei Druckmeßsonden (Hottinger 400 kN) ruhenden Wiegeplatte, Bild 4 und Bild 5, im geschleuderten Silo gestattet die Überprüfung der Anzeige der Meßkissen im untersten Horizont auch im Praxiseinsatz. Die Abdichtung zur Silowand bestand in dauerelastischem Kitt. Beide Ergebnisse stimmten überein, das heißt, die Meßkissen gaben bis zu 5 % höhere Werte als die Druckmeßdosen an. Eine ganz genaue Übereinstimmung gab es in den entscheidenden Phasen wie kurz nach dem Füllen oder Nachfüllen.

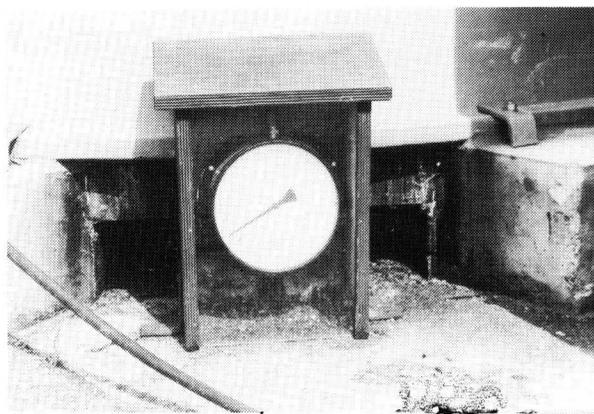


Bild 5. Druckanzeige für eine der drei hydraulischen Druckmeßdosen an der Silowiegeplatte.

6. Versuchsergebnisse

In Tafel 3 finden sich die Ergebnisse aller Versuche für Rübenblatt und für Zuckerrübenschnitzel, wobei die aufgeführten Drücke sich jeweils auf den untersten Meßhorizont beziehen.

6.1 Setzen, Gas, Saft und Temperatur

Der größte Unterschied zwischen beiden Silagearten besteht im unterschiedlichen Setzverhalten der Silage, Bild 6 und 7. Während sich Rübenblatt um 50 % zusammendrückt, setzen sich Zuckerrübenschnitzel nur um 5 %. (Im selben Ausmaß verändert sich auch die Dichte bei beiden Gärfutterarten.) Während bei Rübenblatt 40 % der eingefüllten Silage in Form von Saft im Laufe der Lagerzeit abfließt (Bild 8, 22 m³ im Laufe eines Monats, siehe auch Bild 9), scheiden Zuckerrübenschnitzel im Vergleich dazu kaum Saft ab (weniger als 0,3 m³). Rübenblatt entwickelte während eines Monats über 80 m³ Gas, bei Zuckerrübenschnitzeln war keine Gasentwicklung festzustellen. Während die Zuckerrübenschnitzel sich im Laufe von drei Wochen von 41 °C auf 32 °C abkühlten, nahm bei Rübenblatt die Temperatur innerhalb der ersten acht Tage Lagerzeit im Herbst um 4 °C auf 19,2 °C zu.

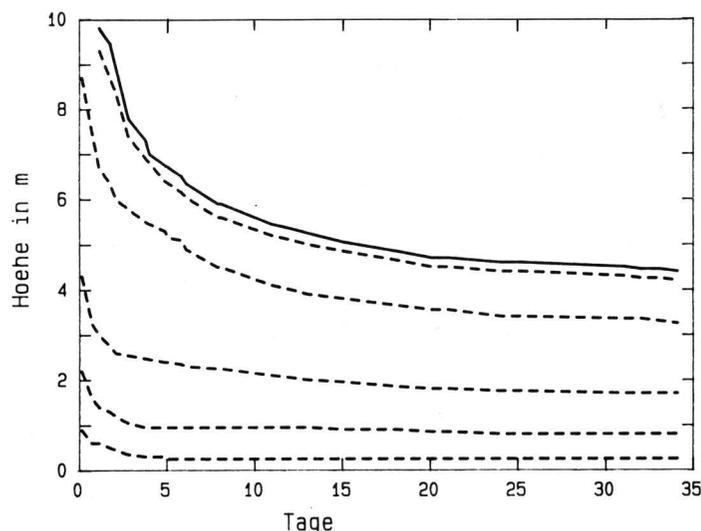


Bild 6. Setzverhalten von Rübenblatt; Silowand gewickelt, 1985.

— Silageoberfläche
- - - Grenze der Schichten 1 bis 5

Herstellerverfahren	gewickelt			geschleudert		
Rübenblatt:						
Tag nach dem Füllen	1985 1. 3. 34.			1986 1. 3. 8.		
Füll.-Höhe m	9,8	7,3	4,4	9,5	5,5	4,8
Dichte t/m ³	0,68	0,83	1,01	0,62	0,86	0,92
Volumenbez. Last kN/m ³	6,7	8,1	9,9	6,1	8,4	9,0
Temperatur °C				15,2	17,3	19,2
Gasproduktion m ³	1	25	83	0	15	39
Saftabfluß m ³	0,9	7,3	22,0	0	11,0	13,7
Höhe der Meßstelle m	0,6	0,3	0,25	0*)	0*)	0*)
P _V kN/m ²	35	59	36	26	46	42
P _H kN/m ²	9	57	28	16	43	39
P _W kN/m ²	2,6	0,0	0,3	2,9	0,0	0,2
P _H /P _V	0,26	0,93	0,77	0,62	0,93	0,93
P _W /P _H	0,29	0,00	0,01	0,18	0,00	0,01
P _W /G (a)	0,44	0,00	0,05	0,55	0,00	0,03
Zuckerrübenschnitzel:						
Tag nach dem Füllen	1986 1. 8.			1985 1. 8. 24.		
Füll.-Höhe m	9,90	9,65		10,5	10,2	10,15
Dichte t/m ³	1,01	1,03		0,97	1,00	1,00
Volumenbez. Last kN/m ³	9,9	10,1		9,5	9,8	9,8
Temperatur °C				41	38	32
Gasproduktion m ³				0	0	0
Saftabfluß m ³				0	0,3	0,3
Höhe der Meßstelle m	0*)	0*)		0*)	0*)	0*)
P _V kN/m ²	80	88		68	80	81
P _H kN/m ²	70	78		59	74	76
P _W kN/m ²	1,5	0,9		2,6	1,7	1,6
P _H /P _V	0,87	0,88		0,87	0,92	0,94
P _W /P _H	0,02	0,01		0,04	0,02	0,02
P _W /G (a)	0,18	0,10		0,32	0,20	0,19

*) am Silofuß

Tafel 3. Meßergebnisse für das Silieren von Rübenblatt und Zuckerrübenschnitzeln.

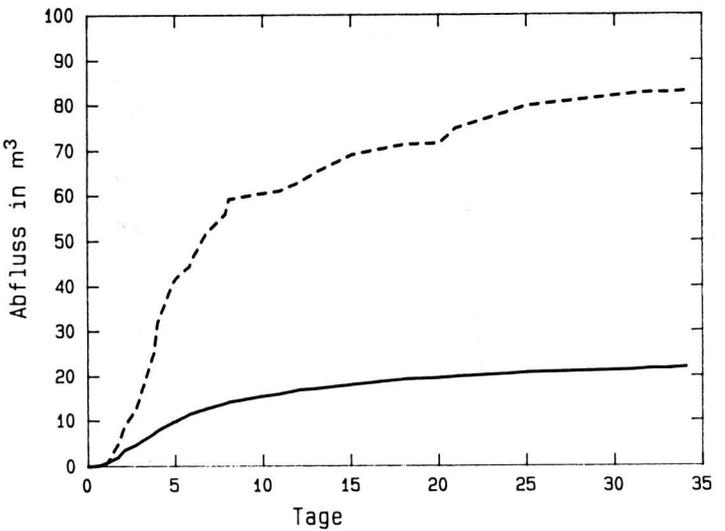
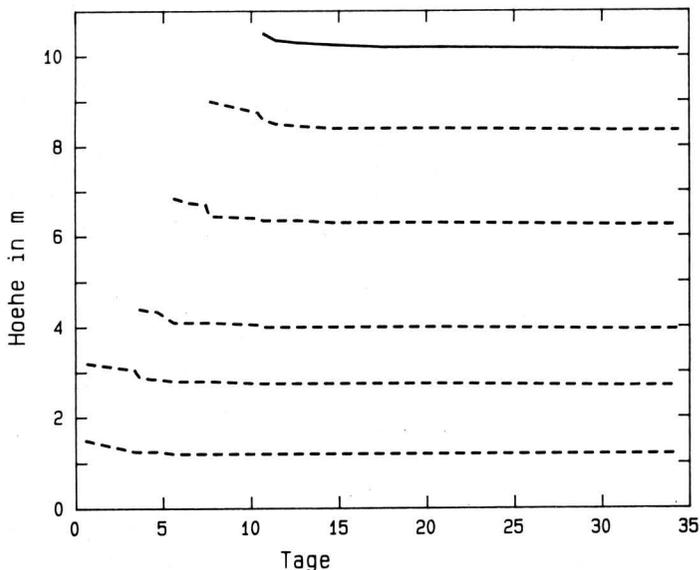


Bild 8. Abfluß von Silosaft und Gärgas (CO₂) beim Silieren von Rübenblatt; 1985.

— Silosaft
- - - Gärgas

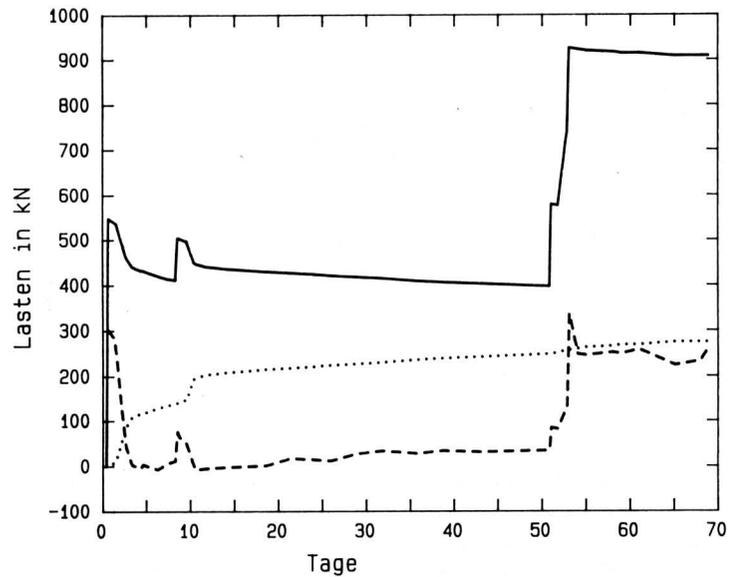


Bild 9. Zeitlicher Verlauf der Last des Siloinhaltes, der Wandlast und des Saftabflusses beim Silieren von Rübenblatt mit zweimaligem Nachfüllen; 1985.

— Silageinhalt
- - - Wandlast
..... Saftabfluß

Bild 7. Setzverhalten von Zuckerrübenschnitzeln; Silowand geschleudert, 1985.

— Silageoberfläche
- - - Grenze der Schichten 1 bis 5

6.2 Drücke in Abhängigkeit von der Zeit

Da bei beiden Silagearten der Setzvorgang unmittelbar nach Abschluß des Füllens am intensivsten abläuft und dann am meisten Silage an der Silowand nach unten rutscht, ist es nicht erstaunlich, daß unmittelbar nach Abschluß des Füllens die Silowand einen größeren Teil der Fülllast auf das Fundament überträgt als sonst (Bild 9 und Bild 10). Bei Rübenblatt können dabei über 50 % und bei Zuckerrübenschnitzeln über 30 % der Fülllast auf die Silowand übertragen werden. Die flächenbezogene Wandreibungskraft p_w ist dann am größten, nämlich bei beiden Silagearten bis zu rund 3 kN/m^2 .

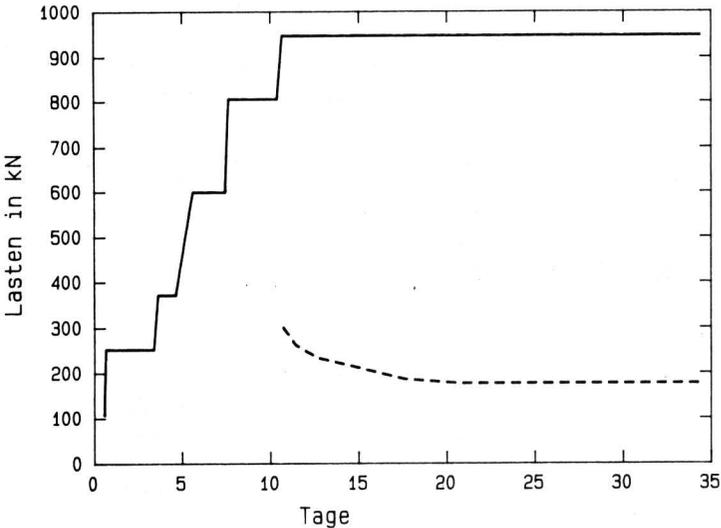


Bild 10. Zeitlicher Verlauf der Last des Siloinhaltes und der Wandlast beim Silieren von Zuckerrübenschnitzeln mit viermaligem Nachfüllen; 1985.

— Silageinhalt
- - - Wandlast

Da bei Rübenblatt der Gärprozess das Setzverhalten überlagert, müssen Vertikal- und Horizontaldruck zeitlich anders verlaufen als bei Zuckerrübenschnitzeln. Der Gärprozess bewirkt am zweiten und dritten Tag nach Abschluß des Füllens die höchste Gasproduktion ($11 \text{ m}^3/\text{Tag}$) und veranlaßt dann den größten Saftabfluß (rund $3 \text{ m}^3/\text{Tag}$). Zu dieser Zeit stellen sich auch bei Rübenblatt die größten Vertikal- und Horizontaldrücke ein, Bild 11, die dann sogar nahezu gleich groß werden können (1986).

Obwohl die Silage nicht nur aus Rübenblatt, sondern auch aus Rübenstücken besteht, also eine inhomogene Schüttung aus grobem Material ist, stellten sich in allen Kissen eines Meßhorizontes 1985 durch die Gasentwicklung genau gleich hohe Drücke ein. Entsprechend der gegenüber Wasser um 20 % niedrigeren Dichte der Silage waren auch die Drücke um 20 % niedriger als bei gleich hoch anstehendem Wasser, ein Hinweis auf die Meßgenauigkeit. Allerdings muß gesagt werden, daß die Drücke am Silofuß zu diesem Zeitpunkt nur 50 oder 60 % des hydrostatischen Drucks von Wasser mit der Füllhöhe bei Abschluß des Füllens ausmachen und daß die flächenbezogene Wandreibungskraft p_w dann null ist [2].

Bei Zuckerrübenschnitzeln ist der Setzvorgang zwei bis drei Wochen nach Abschluß des Füllens praktisch abgeklungen, Bild 12. Zu diesem Zeitpunkt erreicht die Silage bleibende höchste Vertikal- und Horizontaldrücke. Die Vertikaldrücke am Silofuß betragen höchstens 90 % und die Horizontaldrücke 80 % des hydrostatischen Drucks von Wasser mit der Füllhöhe bei Abschluß des Füllens. Die flächenbezogene Wandreibungskraft p_w erreicht dann ein Minimum von nur rund 1 kN/m^2 .

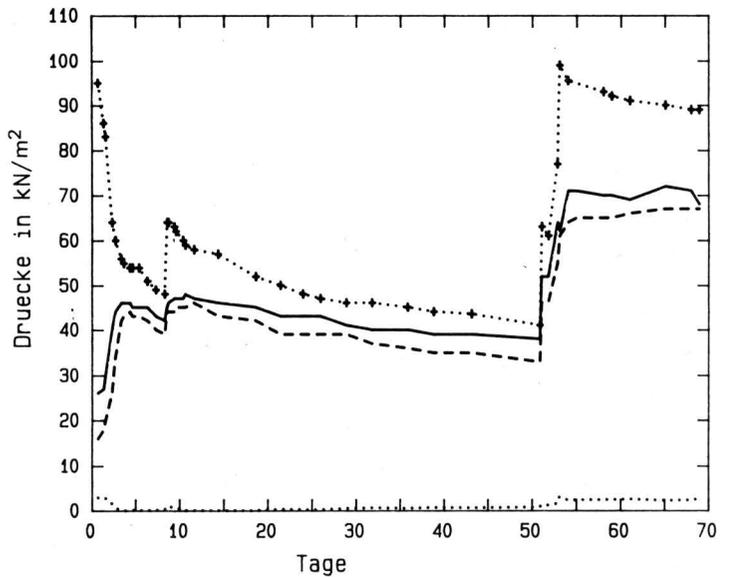


Bild 11. Zeitlicher Verlauf des Vertikal- und Horizontaldrucks sowie der flächenbezogenen Wandreibungskraft am Silofuß; zum Vergleich hydrostatischer Druck von Wasser gleicher Füllhöhe; Rübenblatt; 1986.

+...+ hydrostatischer Druck
— Vertikaldruck p_v
- - - Horizontaldruck p_h
..... flächenbez. Wandreibungskraft p_w

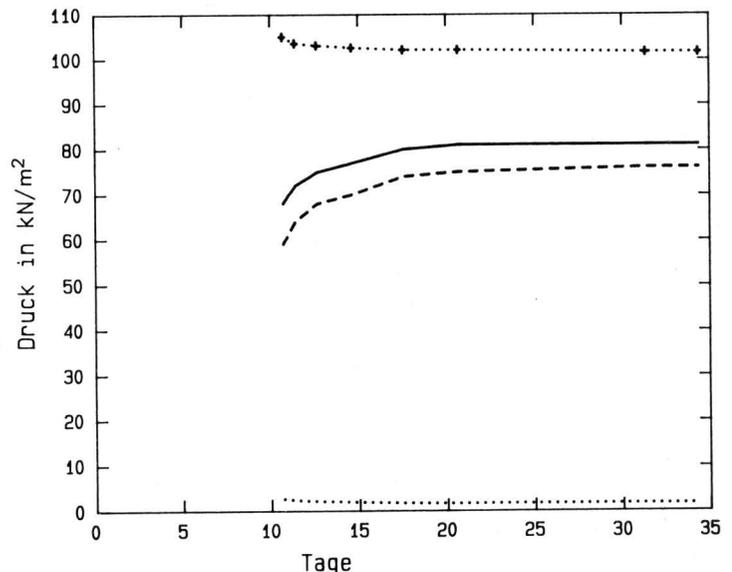


Bild 12. Zeitlicher Verlauf des Vertikal- und Horizontaldrucks sowie der flächenbezogenen Wandreibungskraft am Silofuß; zum Vergleich hydrostatischer Druck von Wasser gleicher Füllhöhe; Zuckerrübenschnitzel, 1985.

+...+ hydrostatischer Druck
— Vertikaldruck p_v
- - - Horizontaldruck p_h
..... flächenbez. Wandreibungskraft p_w

Trotz ungefähr gleicher Füllmenge und gleichem TS-Gehalt war der Druck p_v am Silofuß in dem im Schleuderverfahren hergestellten Silo um über 15 % kleiner und die flächenbezogene Wandreibungskraft p_w etwa doppelt so groß. Die nur ganz geringfügig weniger glatte Wand des im Schleuderverfahren hergestellten Silos muß hierfür die Ursache sein, was die Bedeutung der Wandrauigkeit für die Druckausbildung unterstreicht.

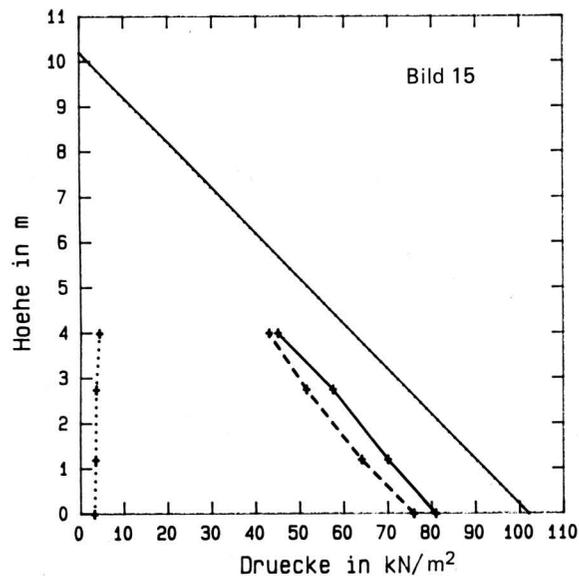
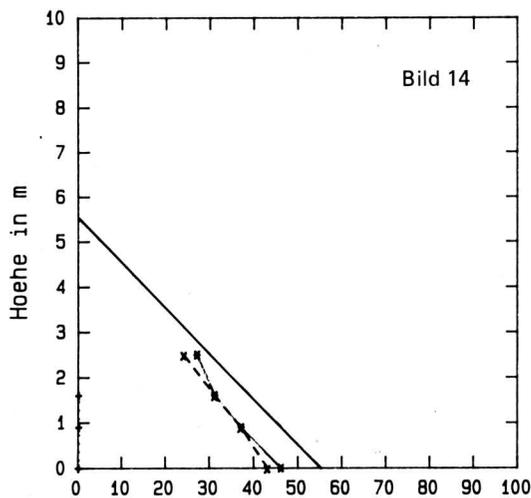
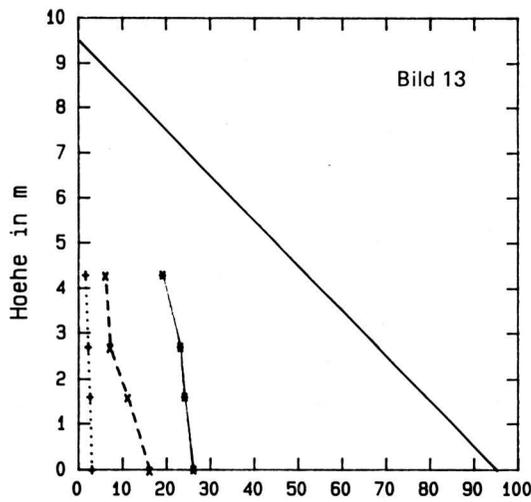


Bild 13 bis 15. Drücke und flächenbezogene Wandreibungskraft in Abhängigkeit von der Höhe beim Silieren von Rübenblatt bzw. Zuckerrübenschnitzeln.

Bild 13: unmittelbar nach dem Füllen, 1986, Rübenblatt

Bild 14: am 3. Tag nach dem Füllen, 1986, Rübenblatt

Bild 15: zwei Wochen nach dem Füllen, 1985, Zuckerrübenschnitzel

- x—x— Vertikaldruck p_v
- x—x— Horizontaldruck p_h
- +.....+ flächenbez. Wandreibungskraft p_w
- hydrostatischer Druck

6.3 Drücke in Abhängigkeit von der Höhe

Die **Bilder 13 bis 15** zeigen Drücke in Abhängigkeit von der Höhe im Vergleich zum hydrostatischen Druck von Wasser, das gleich hoch ansteht wie die Silage, und zwar für Rübenblatt gleich nach dem Füllen (**Bild 13**) sowie für den dritten Tag nach dem Füllen (**Bild 14**) und für Zuckerrübenschnitzel zwei Wochen nach dem Füllen (**Bild 15**).

Zum Zeitpunkt der höchsten Drücke sind in der unteren Hälfte des Silos bei beiden Silagearten die Vertikal- und Horizontaldrücke ungefähr proportional dem Abstand zur Silageoberfläche. Bei der flächenbezogenen Wandreibungskraft p_w stellt sich ein konstanter Verlauf bei beiden Silagearten und bei beiden Lastfällen (maximale Wandreibung und maximaler Vertikal- und Horizontaldruck) ein. p_w ist von der Länge des Setzungsweges und von der Materialhaftfähigkeit und nicht von der Höhe des Horizontaldruckes p_h abhängig. Bei Zuckerrübenschnitzeln wird die Wandreibung zu keinem Zeitpunkt null, obwohl sich die Silage kaum setzt. Offenbar spielt hier die Haftfähigkeit die größere Rolle. Bei Rübenblatt verursacht eher lang fortschreitendes Setzen die Wandreibung.

Allerdings wird zum Zeitpunkt des größten Aufblähens (bei maximaler Gasentwicklung) das Setzen bzw. p_w kompensiert, oder es tritt sogar unter speziellen Umständen eine Richtungsumkehr ein, wie bereits früher festgestellt [2].

6.4 Verhältniszerte

Für die Verhältniszerte ergibt sich in der unteren Hälfte des Füllbereiches folgendes: Gleich nach Abschluß des Füllens ist bei Rübenblatt p_h/p_v und a rund 0,5, während p_w/p_h vom Silofuß bis zur Mitte der Füllhöhe von 0,2 auf 0,4 zunimmt. Zum Zeitpunkt der höchsten Vertikal- und Horizontalkraft (2. und 3. Tag nach Abschluß des Füllens) sind die Verhältniszerte p_h/p_v größer als 0,9 und a und p_w/p_h werden null, **Bild 16**.

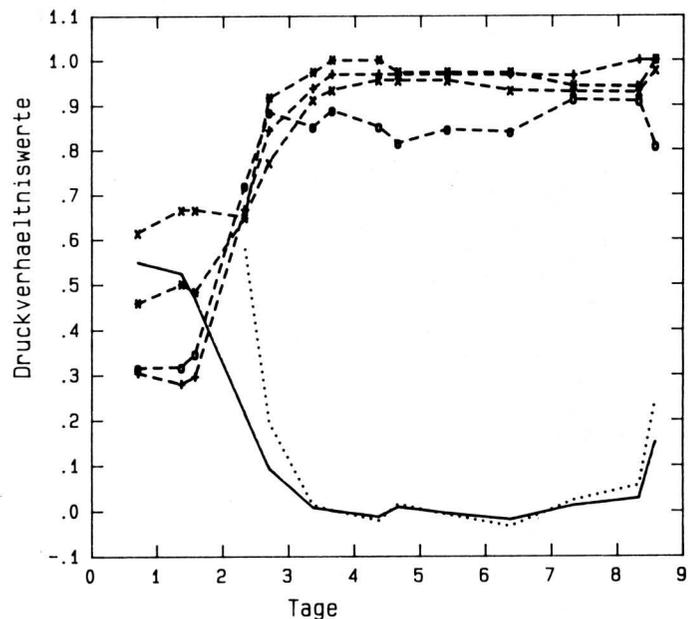


Bild 16. Zeitlicher Verlauf des Verhältniszertes p_h/p_v in den verschiedenen Meßhorizonten und von a sowie p_w/p_h am Silofuß beim Silieren von Rübenblatt, 1986.

- x—x—x— (p_h/p_v)₁
- x—x—x— (p_h/p_v)₂
- +—+—+— (p_h/p_v)₃
- o—o—o— (p_h/p_v)₄
- $a = p_w/G$
- (p_w/p_h)₁

Bei Zuckerrübenschnitzeln ergeben sich nach dem Füllen die Verhältnisse p_h/p_v größer als 0,9, α zu 0,2 bzw. 0,3 und p_w/p_h liegt bei 0,03 bis 0,06. Nach zwei bis drei Wochen ist vom Silofuß bis zur Mitte der Füllhöhe p_h/p_v auch über 0,9, α ist 0,2 und p_w/p_h ist 0,02 bis 0,04, Bild 17.

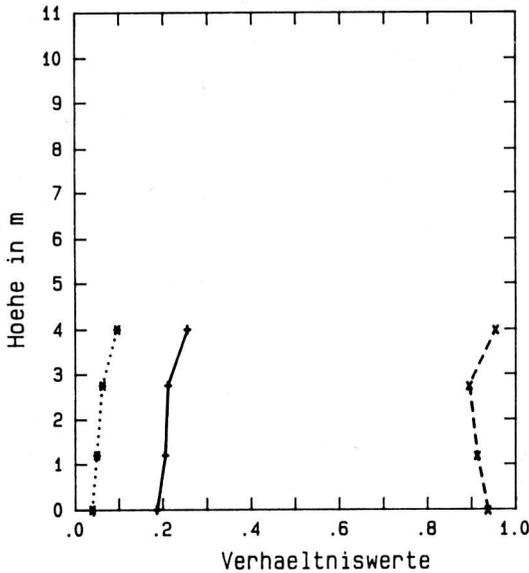


Bild 17. Verhältniszerte in Abhängigkeit von der Höhe beim Silieren von Zuckerrübenschnitzeln; 1985, 2 Wochen nach dem Füllen.

+ — $\alpha = P_w/G$
 x - - - p_h/p_v
 x · · · P_w/p_h

6.5 Nachfüllen

Das 2. Nachfüllen von 54,8 t Zuckerrübenschnitzeln auf das zusammengesunkene Rübenblatt 50 Tage nach dem Beginn des Füllens vergrößerte die von der Wand auf das Fundament übertragene Last nach dem Zufüllen zunächst kurzfristig auf 330 kN und später auf 250 kN. Im Vergleich zum hydrostatischen Druck von Wasser mit der ursprünglichen Füllhöhe macht p_v am Silofuß dennoch nur 75 % und p_h nur 65 % aus (Bild 11).

7. Zusammenfassung

Dünnwandige Hochsilos aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) dienen in der Schweiz als Gärfutterlager. Genaue Kenntnisse über das Druckverhalten der Silage würde eine wirtschaftliche Dimensionierung der GFK-Silos gestatten.

Mit selbstgebauten Druckmeßkissen aus Weich-PVC konnten zu verschiedenen Zeitpunkten und in verschiedenen Höhen im Silo die vertikalen und horizontalen Gärfutterdrücke p_v und p_h direkt gemessen und die flächenbezogene Wandreibungskraft p_w berechnet werden. Da die Gasproduktion, der Saftabfluß und die Temperatur in der Silage wie die Einfüllmenge und der TS-Gehalt einen Einfluß auf das Setzen und die Drücke haben können, wurden auch alle diese Einflußgrößen erfaßt.

Es standen zwei GFK-Silos von 3,5 m Durchmesser und rund 10 m Höhe zur Verfügung, die im Laufe von zwei Jahren je zweimal mit Rübenblatt bzw. Zuckerrübenschnitzeln gefüllt wurden.

Rübenblattsilage setzte sich im Laufe der Lagerdauer um 50 % und verlor 40 % der Einfüllmasse als Saft. Zuckerrübenschnitzeln setzten sich nur um 5 % und schieden kaum Saft aus.

Gleich nach Abschluß des Füllens setzte sich die Silage am stärksten. Zu diesem Zeitpunkt übertrug die Silowand bei Rübenblatt über 50 % der Fülllast auf das Fundament, bei Zuckerrübenschnitzeln 30 %. Rübenblatt und Zuckerrübenschnitzeln erreichten zu keinem Zeitpunkt den hydrostatischen Druck von Wasser mit einer Füllhöhe, wie sie bei Abschluß des Füllens vorlag. Bei Rübenblatt betrug der maximale Vertikaldruck p_v wie auch der maximale Horizontaldruck p_h nur 60 % dieses Wasserdruckes, bei Zuckerrübenschnitzeln erreichten p_v etwa 90 % und p_h etwa 80 % des entsprechenden hydrostatischen Druckes. Dabei trat der maximale Druck bei Rübenblatt am zweiten und dritten Tag nach Abschluß des Füllens auf, als die Gasproduktion und der Saftabfluß am größten waren. Bei Zuckerrübenschnitzeln gab es keine Gasproduktion und kaum einen Saftabfluß. Die maximalen Drücke p_v und p_h traten bei Zuckerrübenschnitzeln erst nach zwei bis drei Wochen auf, nachdem sich die Silage um 5 % gesetzt hatte.

Die flächenbezogene Wandreibungskraft p_w war — wenn sie am größten war, wie gleich nach dem Füllen, und wenn sie am kleinsten war, wenn p_h und p_v ihr Maximum erreichen — in allen Meßhorizonten (untere Silohälfte) bei beiden Silagearten immer konstant, also nicht vom Horizontaldruck abhängig.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] Göbel, W.: Überblick über die Methoden und die Messungen von Gärfutterdrücken in Hochsilos. Schweiz. landw. Forschung, Heft 4, Bern 1973.
- [2] Göbel, W. u. A. Schmidlin: Messungen an einem mit Rübenblatt gefüllten glasfaserverstärkten Kunststoffsilos. Blätter für Landtechnik 55, Tänikon 1973.
- [3] • Oertling, K.: Druckverhältnisse in Gärfuttersilos. Diss., Karlsruhe 1978.
- [4] • Nilsson, L.: Properties of silage and the design of forage tower silos. Lund 1982.
- [5] • 't Hart, C.: Proposals for directives on the loads exerted by silage on tower silos. IMAG, Wageningen 1984.
- [6] DIN 1055, Blatt 6: Lastannahmen für Bauten; Lasten in Silozellen. Berlin/Köln: Beuth Verlag 1964.