

Glasfaserverstärkte Kunststoff-Hochsilos

Sicherer Betrieb auch im Alter!

Rudolf Jakob, Alfons Schmidlin und Robert Kaufmann, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), CH-8356 Tänikon
 Masoud Motavalli und Peter Flüeler, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), CH-8600 Dübendorf

Gärfuttersilos aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) sind in der Schweizer Landwirtschaft weit verbreitet. Dank Vorteilen wie hohe Gasdichtigkeit und Flexibilität bei der Ernte von Kleinflächen werden sie auch in Zukunft neben Flachsilos und Silogrossballen einen Stellenwert behalten, vor allem für kleine und mittlere Betriebsstrukturen.

In den letzten Jahren häuften sich Schadenfälle bei diesen Silotypen infolge Umsturzes (Abb. 1). Ganz abgesehen von den materiellen Verlusten, die nur zum Teil Sachversicherungen decken, bleibt ein Risiko mit Personenschaden. Der Zusammenbruch der Wandstruktur ist meist auf die Verkettung verschiedener ungünstiger Umstände zurückzuführen.

Dieses Projekt, durchgeführt in Zusammenarbeit mit der EMPA Dübendorf, bezweckte die Verbesserung der Sicherheit beim Betrieb von Kunststoffsilos. Es wurden grundsätzliche Kenntnisse über die Schadenursachen erarbeitet, um daraus Empfehlungen für Hersteller und Benutzer ableiten zu können.

Zwei unterschiedliche methodische Ansätze dienen der Erklärung dieses komplexen Ursache/Wirkungs-Mechanismus: 1. Analyse der Umstände von Umsturzfällen im Zeitraum von 1982 bis 1996 (Schadenstatistik). 2. Untersuchung des Material- und Strukturverhaltens an zwei GFK-Silos unter praxisgerechten Füllbedingungen (Füllgutversuche).

Das Schadenbild ist in der Regel geprägt durch einen Bruch ausgehend von der untersten Luke und Umsturz in Richtung Lukenband. Die statische Behälterauslegung auf der Basis von Wasserdruck scheint nicht mehr für alle Belastungszustände ausreichend.

Die Behälter sind primär auf das chargenweise Einfüllen von relativ grobfaserigem Gras und Mais ausgelegt.

Die Umstellung auf ein anderes Einfüllmanagement – zum Beispiel Einfüllen in einem Zug – oder auf wesentlich feuchtere, wenig strukturierte Füllgüter – wie Zuckerrübenschnitzel und CCM – können die Umsturzgefahr deutlich erhöhen.



Abb. 1: Von Siloumstürzen sind geschleuderte und gewickelte Produkte betroffen.

Inhalt	Seite
Problemstellung und Methode	2
Silotypen und Futterarten	2
Schadenstatistik	2
Füllgutversuche	7
Schlussfolgerungen	8
Empfehlungen für den sicheren Betrieb von Kunststoff-Hochsilos	10
Literatur	10

In den letzten 30 Jahren wurden rund 33 000 GFK-Silos erstellt. Ein Grossteil davon ist bis heute im Einsatz. Gegenüber anderen Materialien wie Beton, Stahl und Holz haben diese Silotypen einige Vorteile, was deren grosse Verbreitung erklärt: hohe Gasdichtigkeit, geringes Gewicht, einfache Montage, geringer Unterhalt, Flexibilität bei der Ernte von Kleinflächen, Standortwechsel möglich. Neben Flachsilos und Silogrossballen konnte deshalb dieser Silotyp seinen Stellenwert vor allem in den kleinen und mittleren Betriebsstrukturen wahren.

In den letzten Jahren häuften sich Schadenfälle bei diesen Silotypen infolge Umsturzes. Ganz abgesehen von den materiellen Verlusten, die nur zum Teil Sachversicherungen deckten, bleibt auch das Risiko des Personenschadens.

Ein Umsturz ist meist nicht auf eine einzelne Schwachstelle zurückzuführen, sondern auf das Zusammentreffen von verschiedenen ungünstigen Umständen. Einflussfaktoren können sein: Mechanische Schäden der Wand im Lukenbereich, zu schwache Dimensionierung, Alterung, Einfüllung von strukturarmen und wasserreichen Futterarten, Einfüllen mit hoher Schlagkraft, exzentrische Befüllung und Setzung, Temperaturschwankungen, Sonneneinstrahlung, Wind.

Problemstellung und Methode

Zur Erforschung der komplexen Einflussfaktoren wurde ein umfangreiches Projekt, bestehend aus Schadenstatistik, Versuchen mit echten Füllgütern, statischen Berechnungen, echten Umsturzversuchen und Erprobung von Verbesserungen mit dem Ziel geplant, die Sicherheit gebrauchter GFK-Silos zu erhöhen. Aus verschiedenen Gründen musste dieses Projekt auf zwei Teilaspekte redimensioniert werden. Diese hatten das Teilziel, die vorhandene Sicherheit abzuklären, um daraus mögliche Empfehlungen für die Betreiber und evtl. auch für die Hersteller abzuleiten. Folgende Teilprojekte wurden realisiert:

- 1 Analyse der Umstände von Umsturzfällen (Schadenstatistik). 67 Siloeinstürze sind der FAT im Zeitraum von 1982 bis 1996 bekannt. In 42 Fällen liegen detaillierte Daten zu den Umsturzvorgängen vor.
- 2 Das Teilprojekt Füllgutversuche bezweckte, das Verhalten des Silokörpers

Tab.1: Anzahl/Fabrikate der verkauften Silos (Firmenangaben, Bemessungsjahre 1970–1998)

Produkt	Anzahl verkaufte Silos	Herstellung
Produkt A ¹⁾	16 800	Schleuderverfahren
Produkt B ¹⁾	zirka 12 000	Wickelverfahren
Andere ²⁾	zirka 5 000	Verschiedene Fabrikate
Total	zirka 33 000	

¹⁾ Betrifft Produkte von zurzeit existierenden Schweizer Firmen mit Eigenfabrikation

²⁾ Betrifft Firmen, die heute nicht mehr existieren oder lediglich im Handel tätig sind.

(Verformungen in Umfangs- und Längsrichtung, Dehnungen, Durchbiegungen usw.) infolge Belastung mit echtem Füllgut unter praxisingerechten Füllbedingungen kennenzulernen, weil darüber keine Messdaten bekannt waren. Dazu verwendete man zwei unterschiedlich hergestellte GFK-Silos mit einer Höhe von je 10 m, die verbreitet sind und heute noch hergestellt werden.

Silotypen und Futterarten

Beschreibung der wichtigsten Fabrikate

Bei den GFK-Hochsilos für die Lagerung von Silagen diverser Art sind heute noch zwei unterschiedliche Fabrikate von zwei Herstellern bekannt, die sich durch das Herstellungsverfahren grundsätzlich unterscheiden.

- Schleuderverfahren: Polyesterharz, Härter und die Fasern (Glasfasern von 1–3 cm, Kurzfasern) werden über einen Beschickungsarm in eine rotierende Form eingebracht. Durch die Zentrifugalkraft haben die schweren Anteile die Tendenz, nach aussen gegen die Wandung der Form zu wandern. Bei diesem Prozess orientieren sich die Verstärkungsfasern mehrheitlich in Umfangsrichtung.

- Wickelverfahren: Bei diesem Verfahren werden Matten und Faserbündel aus Glasfasergewebe, getränkt in Polyesterharz, um einen formgebenden Zylinder gewickelt (Langfasern). Dieser wird nach dem Aushärten entfernt.

Bei beiden Verfahren werden die Lukenöffnungen nachträglich herausgeschnitten, mit Rahmen versehen, der an die Wand anlaminiert wird.

Die ältesten der eingestürzten Silos wurden in den Jahren 1965–1970 im Schleuderverfahren hergestellt, damals noch verbunden mit viel Handarbeit. Ab 1970 kamen Silos im Wickelverfahren auf den Markt.

Verbreitung der GFK-Silos

Es dürften total 30 000 bis 35 000 GFK-Silos existieren.

Total Hochsiloraum (Betriebszählung 1990)	4 420 000 m ³
• davon 60% in GFK-Silos	2 650 000 m ³
• durchschnittliches Volumen GFK-Silos	80 m ³
Anzahl GFK-Silos	33 000 m ³ (Schätzungen)

Nach diesen Daten kann angenommen werden, dass die Verteilung der Behälter nach Herstellungsverfahren (geschleudert = Kurzfasern, gewickelt = Langfasern) ungefähr gleich ist.

Von den im Gebrauch stehenden GFK-Silos sind rund 15 000 mit Maishäcksel, je 2500 mit CCM (Maiskolbenschrot) bzw. Zuckerrübenschnitzeln und 10 000 mit Gras gefüllt; der Rest mit verschiedenen Futterarten wie Zuckerrübenblatt, Malz, Feuchtgerste, Strohhacksel usw. (Wirth 1985).

Schadenstatistik

Beschreibung des Vorgehens

Die von der FAT registrierten Einstürze bei GFK-Silos sind ab 1982 aufgenommen. Dabei sind nur Einstürze ohne Einwir-

kung von Brand, Sturm, Erdbeben oder anderen Elementarschäden. Über Siloeinstürze besteht keine Meldepflicht. Die Hinweise kamen an uns über betroffene Versicherungen, Firmen oder direkt von Landwirten. Es besteht folglich keine Garantie über eine lückenlose und repräsentative Aufnahme der Fälle. Via Aufruf in Publikationsorganen von Silolandwirten versuchte man den Rücklauf an Meldungen zu verbessern.

Von 1982 bis 1996 erfasste die FAT 67 Siloeinstürze. Vor allem bei früheren Schadenfällen sind die erforderlichen Angaben lückenhaft. In 42 Fällen wurden die Daten mittels systematischer Befragung detaillierter aufgenommen. Trotzdem waren nicht alle Fälle für die Auswertung nach den ausgewählten Kriterien verwendbar. In den nachfolgenden Ausführungen wird die Anzahl der ausgewerteten Fälle jeweils mit (n =) angegeben.



Abb. 2: Besonders wenn Silos auf Gebäude umstürzen, können hohe Sachschäden entstehen. In diesem Fall 150 000 Franken.

Resultate

Schäden, verursacht durch Siloeinstürze

Bis heute sind alle uns bekannten Schadenfälle – teilweise mit viel Glück – ohne Personenschäden verlaufen. Die Sachschäden waren aber im Einzelfall recht hoch, insbesondere bei Beschädigungen angrenzender Gebäude und Gerätschaften (Abb. 2/Tab. 2).

Tab. 2: Schadensumme Wiederbeschaffungswert (Versicherungswert)

	1995	1996
Anzahl Schadenfälle	7	15
Total Schadensumme	Fr. 220 000.–	591 000.–
Kleinste Schadensumme	Fr. 15 000.–	20 000.–
Grösste Schadensumme	Fr. 55 000.–	60 000.–
Durchschnittliche Schadensumme	Fr. 30 000.–	40 000.–
Grösster Schadenfall (1990)	Fr. 150 000.–	

Eingefüllte Futterarten

Es ist offensichtlich (Tab. 3 und 4), dass bei den Einstürzen vor allem Silos betroffen sind, die mit Futterarten mit einem hohen spezifischen Gewicht eingefüllt wurden. Über die gesamte Erfassungsperiode gesehen ist tendenziell eine Abnahme von Einstürzen bei Silos mit CCM und eine Zunahme mit Zuckerrübenschnitzeln festzustellen.

Es sind uns keine Siloeinstürze im Zusammenhang mit dem Einfüllen von pumpfähigen Futterarten bekannt, da für diese spezielle Anwendung die Silos stärker konstruiert wurden (Jakob 1988). Drei Einstürze von Silos mit gewässertem CCM sind bekannt. Um die Gefahr von Nachgärungen zu reduzieren, wird dabei CCM mit einem hohen TS-Gehalt während des Einfüllens zusätzlich mit Wasser angereichert, woraus spezifische Gewichte von über 1000 kg Futter/m³ resultieren können.

Tab. 3: Eingefüllte Futterarten (n = 66)

Futterarten	Anzahl Siloeinstürze 1982 – 1996	Anteil %
Zuckerrübenschnitzel	21	32
Maiskolbenschrot (CCM)	21	32
Grashäcksel (nass)	13	19
Grashäcksel unten, Maishäcksel oben	4	6
Grashäcksel unten, ZR-Schnitzel oben	1	1
Maishäcksel	3	5
CCM gewässert	3	5

CCM mit über 50% Spindelanteil wurde bis etwa 1990 häufig konserviert. Bei TS-Gehalten von weniger als 53% TS gilt CCM als feucht. Es kann sogar Gärsaft anfallen. Dank neuen Maissorten und einem reduzierten Spindelanteil – Spindeln sind immer feuchter als das Korn – sind die TS-Gehalte des konservierten Futters kontinuierlich angestiegen. TS-Untersu-

chungen an der FAT zeigen, dass die Gehalte in der Region Tänikon/Frauenfeld (Umfang rund 150–200 ha/Jahr) in den Jahren 1995 bis 1998 zwischen 58 bis 64% lagen.

Bei ZR-Schnitzeln fällt bei weniger als 18% TS-Gehalt Gärsaft an. Tendenzmässig weisen feuchte ZR-Schnitzel ein etwas höheres Raumgewicht auf. Generell ha-

Tab. 4: Maximale Raumgewichte in Hochsilos beim Einfüllen (gemäss Erhebungen FAT unter Praxisbedingungen bei Silos von 50 bis 120 m³)

Futterarten	TS %	Spez. Gewicht kg/m³
Flüssigfutter (CCM, Kartoffeln)	44	1190
CCM (über 50% Spindeln)	52	1040
CCM (20–30% Spindeln)	60	850
ZR-Schnitzel feucht	17	990
ZR-Schnitzel	20	950
Grashäcksel nass	15	850
Grashäcksel angewelkt	38	500
Maishäcksel nass	25	860
Maishäcksel normal	33	690
Grashäcksel/Maishäcksel	17/30	860
Grashäcksel/ZR-Schnitzel	16/18	930

Tab. 5: Fabrikate der eingestürzten Silos (n = 67)

Firma	Siloeinstürze		Herstellungsverfahren
	Anzahl	%	
Produkt A	19	29	geschleudert
Produkt B	37	55	gewickelt
Andere Produkte	3	4	geschleudert
Andere	8	12	gewickelt

Tab. 6: Erstellungsjahr und durchschnittliches Alter der eingestürzten Silos (n = 61)

Erstellungsjahr	Produkte					
	Produkt A		Produkt B		Andere Produkte	
	Anzahl	Ø Alter	Anzahl	Ø Alter	Anzahl	Ø Alter
Vor 1980	8	19	7	13	8	18
1980–1984	7	11	26	9	–	–
Nach 1984	4	5	1	4	–	–

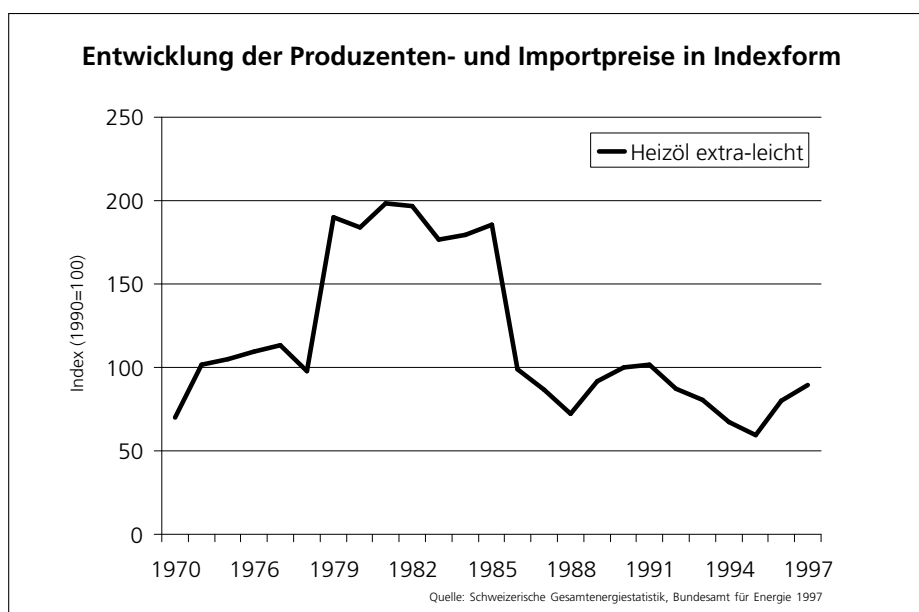


Abb. 3: Entwicklung Ölpreis seit 1970

ben aber ZR-Schnitzel ein hohes spezifisches Gewicht (heutiger TS-Bereich = 17 bis 21%).

Gras kann auf verschiedene Arten eingesilert werden: gehäckselt oder mit Lade-wagenschnitt, nass oder angewelkt. Man kann annehmen, dass mangels Alternativenmöglichkeiten die Silos bis zirka 1993 häufig mit nassem Gras beschickt wurden. Seit dem Aufkommen der Wickeltechnik bei Grossballen wird bei ungenügendem Anwelken oft auf diese Technik ausgewichen. GFK-Silos werden heute vermehrt nur noch mit angewelktem Futter gefüllt oder mit nassem Gras schichtweise beschickt.

Über 25% TS kann man Gras als angewelkt bezeichnen und ab 30% TS fällt auch kein Gär-saft mehr an. Jeder der FAT gemeldete Siloeinsturz war mit Häcksel-gras unter 25% TS gefüllt. Normalerweise wird Maishäcksel (ganze Pflanze) mit über 30% TS geerntet. Unterhalb einem Gehalt von 32% TS entsteht bei den heutigen Maissorten Gär-saft. Begründung: Der Kolben ist ideal in der Teigreife, während die Restpflanze noch grün ist. Bei allen Siloeinstürzen wurde Gär-saftanfall festgestellt.

Silofabrikate (Tab. 5)

Anzunehmen ist, dass wir die Repräsen-tativität der uns bekannten Fälle, beson-ders nach Fabrikaten, nicht beurteilen können. Vor allem kleinere Schadenfälle wurden vermutlich weder den Versiche-rungen noch der FAT gemeldet oder von den Versicherungen ohne weitere Ab-klärungen als Elementarschäden über-nommen.

Erstellungsjahr und durchschnittliches Alter der eingestürzten Silos (Tab. 6)

In den Jahren 1976–1984 wurden ver-mutlich von den Produkten A und B am meisten GFK-Silos auf den Markt ge-bracht. Von den Firmen sind keine Ver-kaufsstatistiken pro Jahr erhältlich. Trotz-dem fällt auf, dass mehr als die Hälfte der Siloeinstürze auf die Jahrgänge 1980 bis 1984 fällt. Zu Beginn dieser Zeit sind die Erdölpreise sehr stark gestiegen, was die Vermutung zulässt, dass mit geänderten Rezepturen gearbeitet wurde. Die Fir-men bestreiten dies nicht. Sie hatten kei-ne absolute Kontrolle über die ihnen gelieferten Produkte (Abb. 3).

Alter der eingestürzten Silos

Kunststoff und damit auch Kunststoffsilos sind einem Alterungsprozess unterworfen. Dies ist besonders bei alten, gewickelten und noch ohne UV-Schutz ausgestatteten Silos an der zum Teil freigelegten Glasfaserwicklung zu beobachten. Es ist davon auszugehen, dass ein Silo mit zunehmendem Alter statisch geschwächt wird.

Abbildung 4 zeigt, dass vor allem Silos im Alter von 11 bis 15 Jahren betroffen sind. Es ist zu berücksichtigen, dass dies vor allem gewickelte Silos mit den Herstellungsjahren 1980 bis 1984 betrifft. Silos – fabriziert vor 1980 – wurden in kleineren Stückzahlen hergestellt, sind ausgemustert oder werden durch die Firmen als Occasionen zurückgenommen und anschliessend überholt. Bei Silos ab Baujahr 1990 sind der FAT keine Schadenfälle bekannt.

Silodurchmesser, Silohöhe

Knapp 70% der Einstürze betreffen Silos mit einem Durchmesser von 3,5 m und einer Höhe von 10 bis 12 m (Tab. 7).

Dauer des Einfüllens, Einsturzzeitpunkt

Vor allem bei CCM erfolgte der Umsturz oft am ersten Tage nach dem Einfüllen (Tab. 8). Eine Hypothese geht davon aus, dass diese Umstürze durch die natürliche Gärgasentwicklung nach dem Einfüllen und dem dabei aufgebauten Überdruck auf die Silowand verursacht sein könnten. Da nach Aussagen aller Landwirte die betroffenen Silos mit einem funktionierenden Überdruckventil und einem Siphon für anfallende Gärsäfte versehen waren, müsste es sich allenfalls um partielle Überdrücke im Gärgut handeln. Beobachtungen an der FAT bei Harvestore-Silos, die mit einem Gasaustauschsystem oder bei luftdichten GFK-Silos, die mit einem Überdruckventil versehen sind, deuten darauf hin, dass in den ersten 24 Stunden keine oder nur eine sehr schwache Gasproduktion stattfindet. Nach verschiedenen Literaturangaben ist die Gasproduktion – vor allem CO₂ – nach dem ersten bis zum 20. Tag am höchsten und nimmt dann wieder ab (Honig 1968, Zimmer 1973, Woolford 1977). Die «Gasproduktionskurve» ist stark abhängig vom TS-Gehalt und den jeweiligen klima-

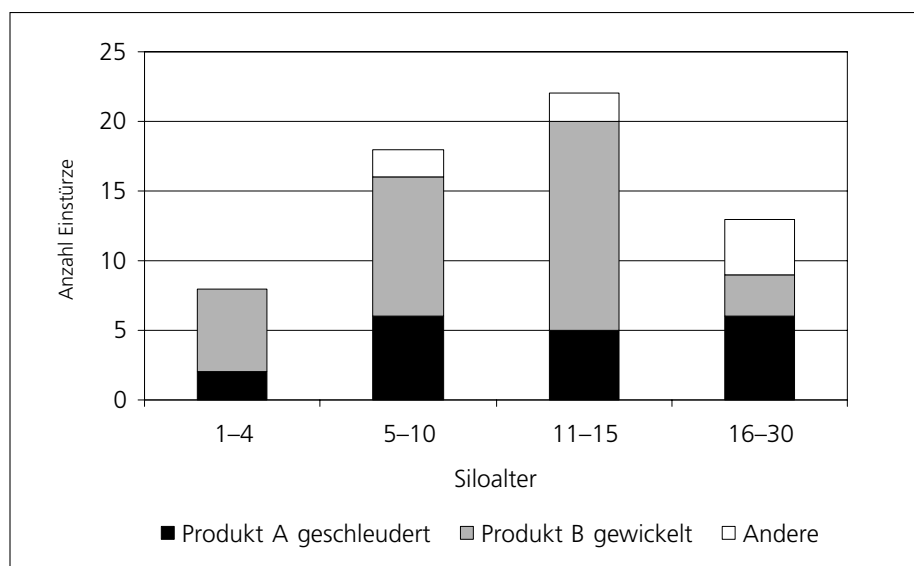


Abb. 4: Alter (Herstellung bis Einsturz) der gemeldeten Schadenfälle (n = 61)

Tab. 7: Silodurchmesser, Silohöhe (n = 66)

	Silodurchmesser m			Silohöhe m		
	≤ 2,5	3,0	3,5	≤ 8	8-10	10-12
Anzahl Einstürze	5	17	44	6	14	46

Tab. 8: Dauer vom Einfüllen bis zum Einsturz (n = 42)

Dauer	Futterarten (Anzahl Fälle)			
	CCM	ZR-Schnitzel	Grashäcksel	Kombiniert
Bis 1 Tag	7	5	4	1
1-10 Tage	1	2	1	5
10-30 Tage	–	3	–	–
1-10 Monate	9	2	2	–

tischen Voraussetzungen. In der Regel ist eine Silage nach vier Wochen bei dichten GFK-Silos stabil, das heisst, es findet ohne Luftzutritt keine weitere Gasproduktion statt.

Eine wesentliche Erhöhung des Behälterinnendrucks in eng umgrenzten Bereichen (partieller Überdruck) liess sich experimentell nicht nachweisen. Erfolglos wurde versucht, mittels Einpressen von CO₂ lokal eine relevante Erhöhung des Druckes im Wandbereich aufzubauen.

CCM

Bei grösseren Einheiten (ab ca. 80 m³ Siloinhalt) erfolgten in der Regel eine oder mehrere Nachfüllungen mit einer Zeitspanne von 1 bis 20 Tagen. Einstürze nach mehreren Monaten betrafen ausschliesslich Silos mit den Herstellungsjahren 1980 bis 1984, unabhängig vom Siloalter. Ein Zusammenhang mit Nach-

gärungen – unter Luftzutritt bildet sich nach mehreren Monaten noch CO₂ – kann in diesen Fällen aufgrund von einzelnen Untersuchungen (Sonderegger 1990) praktisch ausgeschlossen werden. Bei den Sinnenproben fühlten sich gewisse Partien sehr feucht an, obwohl es sich beim Einfüllen um das gleiche Futter handelte (Maissorte, Einfülltechnik, Einfüllzeitpunkt, TS-Gehalt). Offenbar liegt der Grund darin, dass während der Lagerung das Wasser je nach Temperatur und Luftfeuchtigkeit innerhalb der Futterpartikel umgelagert wird. Physikalisch und chemisch gebundenes Wasser diffundiert vermehrt an die Oberfläche des Futters. Über gleichzeitig auftretende Gasbildungen sind keine Versuche bekannt (Hügel 1994).

Silos, die innerhalb von 24 Stunden nach dem Einfüllen eingestürzt sind, wurden sehr schlagkräftig durch Lohnunterneh-

mer gefüllt, was üblicherweise mit einem hohen Setzverhalten verbunden ist (über 10% der eingefüllten Futterhöhe). Alle ab 1995 registrierten Schadenfälle fallen in diese Kategorie (n = 5).

ZR-Schnitzel

Die Einfülldauer ist sehr unterschiedlich. Bei kleinen Siloeinheiten (bis ca. 50 m³) geschieht dies überwiegend in einem Tag. Grössere Silos werden oft nachgefüllt, entweder auf bereits früher bezogene ZR-Schnitzel, sehr häufig aber auf vorher einsiliertes Gras bzw. Mais. Die Dauer zwischen der letzten Einfüllung bis zum Einsturz variiert sehr stark (drei Stunden bis zehn Monate).

Grashäcksel

Die vier registrierten Silos, die kurz nach dem Einfüllen einstürzten, wurden alle an einem Tag durch Lohnunternehmer oder Landwirte gefüllt. Eine hohe Gasentwicklung in dieser kurzen Zeit ist unwahrscheinlich. Bei den anderen drei Schadenfällen wurde mehrmals nachgefüllt.

Kombinierte Einfüllungen

Bei sechs Schadenfällen wurde kombiniert eingefüllt. Das bedeutet, die Silos wurden im Frühjahr mit nassem Grashäcksel eingefüllt und im Herbst mit Maishäcksel nachgefüllt. Fünf von sechs dieser Silos sind mit Verzögerung nach der letzten Befüllung eingestürzt. Da beim nachgefüllten Maishäcksel Gärstoff auftrat und auf eine sehr kompakte Grasilage aufgefüllt wurde, ist möglicherweise ein Saftstau aufgetreten.

Einfluss der Entnahmeluke auf die Sturzrichtung der Silos (Abb. 5)

Bis auf zwei Fälle stürzten die Silos Richtung Entnahmeluke, mehrheitlich von der Entnahmeluke her gesehen auf die rechte Seite. Bei einer Ausnahme war der Silo lukenseitig einbetoniert, im anderen Falle lag vermutlich zirka 10 cm ab Boden eine mechanische Beschädigung vor, der Silo stürzte gegen hinten Richtung 11 Uhr von der Luke her gesehen.

Einfluss des Einfüllens auf die Sturzrichtung

Alle erfassten Silos sind mit Gebläse befüllt worden. Gemäss Füllgut-Versuchen an der FAT (siehe Kapitel Füllgutversuche) ist das spezifische Gewicht des Futters an der gegenüberliegenden Wand, vom Ein-

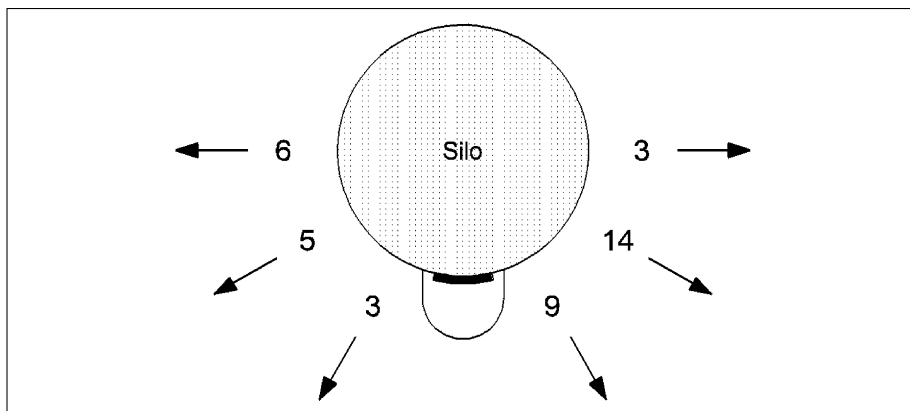


Abb. 5: Entnahmeluke – Sturzrichtung (n = 40). Der Umsturz erfolgte mehrheitlich in Richtung Lukenband.

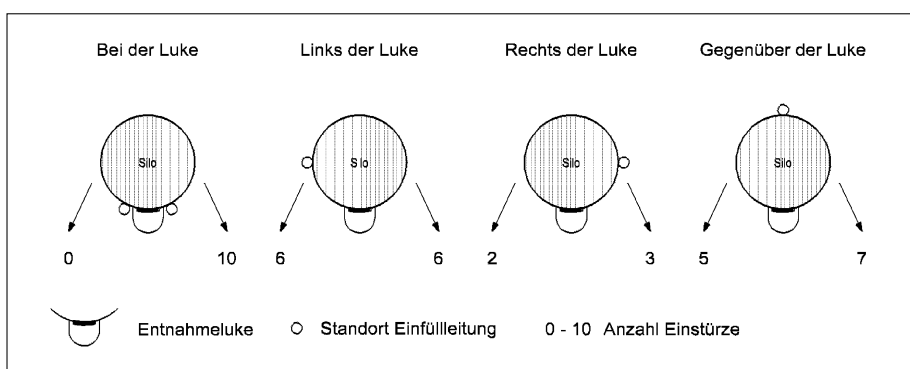


Abb. 6: Einfüllort – Sturzrichtung (n = 39). Die Einfüllrichtung dürfte von untergeordneter Bedeutung als Umsturzursache sein.

füllort her gesehen, am höchsten. Dies gilt auch bei zusätzlicher Handverteilung. Unabhängig von der Einfüllrichtung fällt der Silo immer Richtung Entnahmeluke (Abb. 6).

Beim Einfüllort Entnahmeluken mit Sturzrichtung rechts betrifft dies in acht Fällen gewickelte Silos mit den Herstellungsjahren 1980 bis 1984. Allgemein beeinflusst der Einfüllort die Sturzrichtung des Silos nicht zusätzlich.

Witterungseinflüsse auf den Siloeinsturz (n = 40)

Es stellt sich auch die Frage, ob die Exposition des Silos, insbesondere die Sonneneinstrahlung, den Hergang des Einsturzes beeinflusst (Abb. 7).

Obwohl bei 17 von den 40 entsprechenden ausgewerteten Fällen die Silos vor dem Umsturz voll der Sonne ausgesetzt waren, kippten sie in alle Richtungen. Bei 17 Silos waren die Luken Süd/Südost/Südwest exponiert. Folglich ist in erster Linie der Standort der Luken und nicht die Exposition des Silos bzw. der Luken massgebend.

Die Analyse der Umstürze im Tagesablauf zeigte, dass 40% der Siloeinstürze sich in der Nacht zwischen 21.00 bis 05.00 Uhr ereigneten, teilweise ohne dass dies der Landwirt wahrgenommen hat («Am Morgen lag der Silo am Boden»).

Bei 14 Schadenfällen war das Wetter vor oder während des Einsturzes schön und warm bis heiss, in acht Fällen schön, aber kühl, und bei vier Einstürzen regnete es. 14 Siloeinstürze wurden bei bewölkten oder hochnebelartigen Wetterlagen registriert, das heisst ohne grosse Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht.

Bruchstelle der eingestürzten Silos (n = 40)

Anhand der Schadensbilder sowie Aussagen der Landwirte befindet sich die Rissstelle bzw. der Auslöser eines Siloumsturzes in unmittelbarer Nähe der untersten Entnahmeluke. Von den 40 in dieser Hinsicht erfassten Umstürzen traf dies bei 36 zu. Bei vier Objekten lag die Bruchstelle zwischen der ersten und zweiten Luke oder 10–20 cm über der Bodenplatte. Der Silo reiss bei der untersten Luke in

der Umfangsrichtung. Bei gewickelten Fabrikaten stürzt der Silo direkt in die aufgeführten Richtungen, bei geschleuderten Silos fällt er zuerst in sich zusammen und kippt unmittelbar danach um.

Verschieben der Silos (n = 42)

Beim Kippen, Aufladen und Transport der Silos kann die Struktur beschädigt werden. Bei zehn der 42 Schadenfällen wurden die Silos entweder innerhalb oder ausserhalb des Betriebes versetzt. In acht Fällen geschah dies durch die Hersteller-Firmen selbst. Unter der Annahme, dass dies fachmännisch durchgeführt wurde, fällt eine mechanische Beschädigung beim Umstellen der Silos als Einsturzursache eher weg.

Wahrnehmungen der Landwirte bei Siloumstürzen

Die Aussagen verschiedener Landwirte stimmen interessanterweise darin überein, dass ein Knistern dem eigentlichen Sturz oder Bruch der Silowand («Ein dumpfer Knall, wie wenn ein grosser Baum gefällt wird») vorausgegangen sei. Diese Aussagen weisen nicht zwingend auf ein plötzliches Ereignis, sprich «Gasexplosion», sondern eher auf einen sich langsam anbahnenden Bruch der Silowand hin.

Füllgutversuche

Zielsetzung

Das Ziel des Teilprojektes war, in einem ersten Schritt das globale Verformungsverhalten dünnwandiger, hoher Silokörper unter realistischen Füll- und Setzbedingungen im Massstab 1:1 experimentell zu untersuchen, ohne den Versagenszustand zu erreichen.

Beschreibung der Versuchsanlage

Die Versuche wurden an zwei GFK-Silos mit 95 m³ Inhalt durchgeführt, die auf dem Gelände der FAT seit sieben Jahren in Betrieb sind (Abb. 8). Verschiedene Messtechniken dienten der Erfassung des

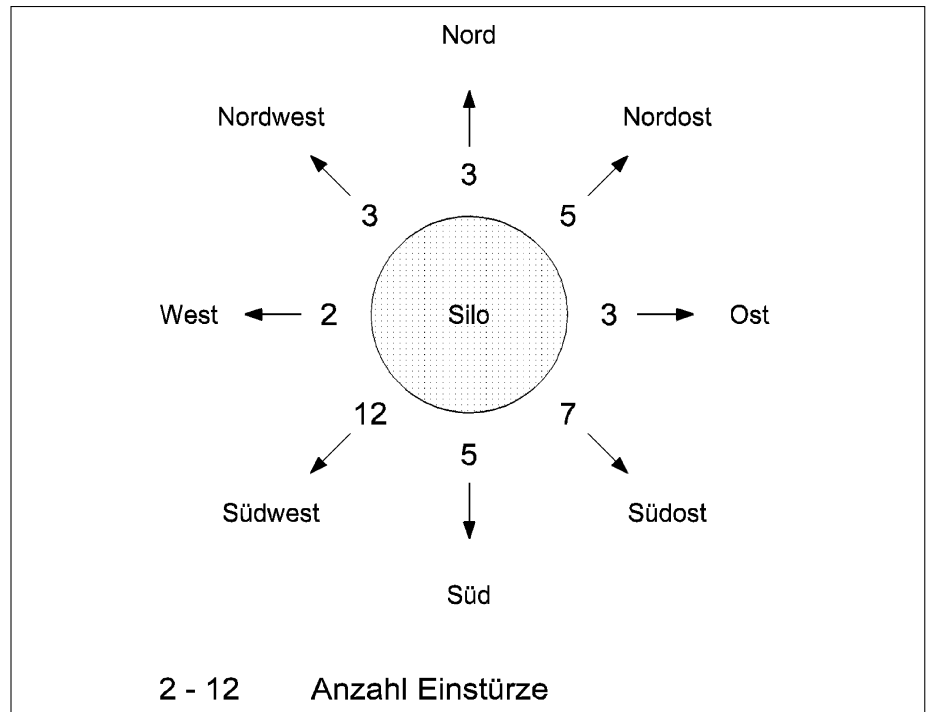


Abb. 7: Siloexposition – Sturzrichtung (n = 40). Die Häufung der Umsturzurichtung Südwest dürfte mehr mit einer vermehrten Ausrichtung des Lukenbandes in diese Richtung zusammenhängen.



Abb. 8: Links geschleudertes Silo, rechts gewickeltes Silo. Die beiden Versuchssilos hatten folgende Abmessungen: $h = 10$ m, $d = 3,5$ m, $V = 100$ m³. Alter bei Versuchsbeginn: 7 Jahre.

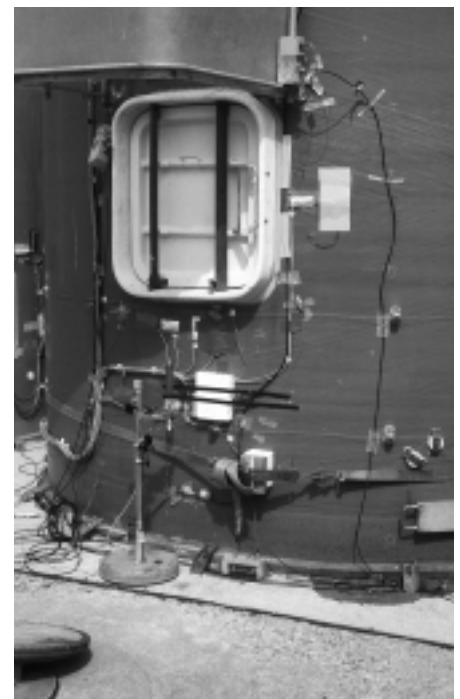


Abb. 9: Besonders im Bereich der untersten Luke waren die beiden Versuchssilos mit vielen Messeinrichtungen versehen, wie ein Dehnmessstreifen, Temperatursonden, Ablesegeräte für die Innendruckmessungen usw.

mechanischen Verhaltens der Silos. Die tangentialen und axialen Dehnungen wurden mittels 24 Dehnmessstreifen (DMS) gemessen. Die globale axiale

Verschiebung sowie die Schiefelage des Silos während der Versuche wurden mit einem Theodoliten von vier Fixpunkten aus vermessen. Ein randübergreifender Dila-

tometer in Umfangs- und Querrichtung mass die Deformation im Lukenbereich. Mittels zwei komprimierbarer Gefässe hat man den vom Gärfutter erzeugten Druck im Füllgut erfasst. Die Temperatur der Luft und der Silowand wurde mittels 15 Thermoelementen gemessen. Von den vier an der Silowand vertikal aussen-seitig angeordneten Standrohren war der Flüssigkeitsstand im Silo bzw. der sich ergebende hydrostatische Druck abzulesen (Abb. 9). An mehreren Stellen wurde die Silowand mittels Schallemissions-Sensoren abgetastet.

Zuerst füllte man die Silos mit Wasser und entleerte sie wieder. Nach den Lastfällen Wind und Temperatur wurden die Silos in einem Zug mit nassem Grashäcksel in einem Zug mit nassem Grashäcksel auf 6 m Höhe gefüllt und nach zweiwöchiger Setzung auf 10 m Höhe nachgefüllt. Nach viereinhalb Monaten erfolgte eine Nachfüllung mit Zuckerrübenschnitzel. Dieser Füllvorgang kann auch in der Praxis von der statischen Belastung her gesehen als extrem gelten.

Mit CO₂-Gasinjektionen ins gefüllte Silo wurden Zustände simuliert, die bei der Bildung von Gärgasen auftreten könnten.

Wichtigste Ergebnisse

Bereits durch das Verschliessen der Luken und Anpressen an die Randabdichtung konnten Signale von lokalen Spannungskonzentrationen registriert werden.

Beide Silos konnten trotz verschiedener Undichtheiten bis auf eine Höhe von 10 m mit Wasser gefüllt werden. Die grösste Dehnung infolge 10 m Wassersäule wurde bei beiden Silos in tangentialer Richtung im Bereich der untersten Luke mit 0,17% gemessen. Die Längenänderung des Siloumfangs gegenüber der untersten Luke betrug nur 10 bis 18% des Wertes der Lukenaufweitung. Die Temperaturmessungen an der Silowand zeigten, dass die Temperatur auf der sonnenexponierten Seite bis auf 58 °C steigen kann. Infolge Temperatureinwirkung verformte sich der Silokörper derart, dass zwischen sonnenexponierter und beschatteter Seite ein Höhenunterschied bis zirka 11 mm resultierte. Daraus kann man ableiten, dass sich der Silo infolge Temperatur verbiegt.

Bei den Futterfüllungen bildete sich ausserhalb des Silomittelpunktes im Innern ein asymmetrischer Schüttkegel, der periodisch ausgeglichen wurde. Obwohl beide Silos mit je einem funktionierenden

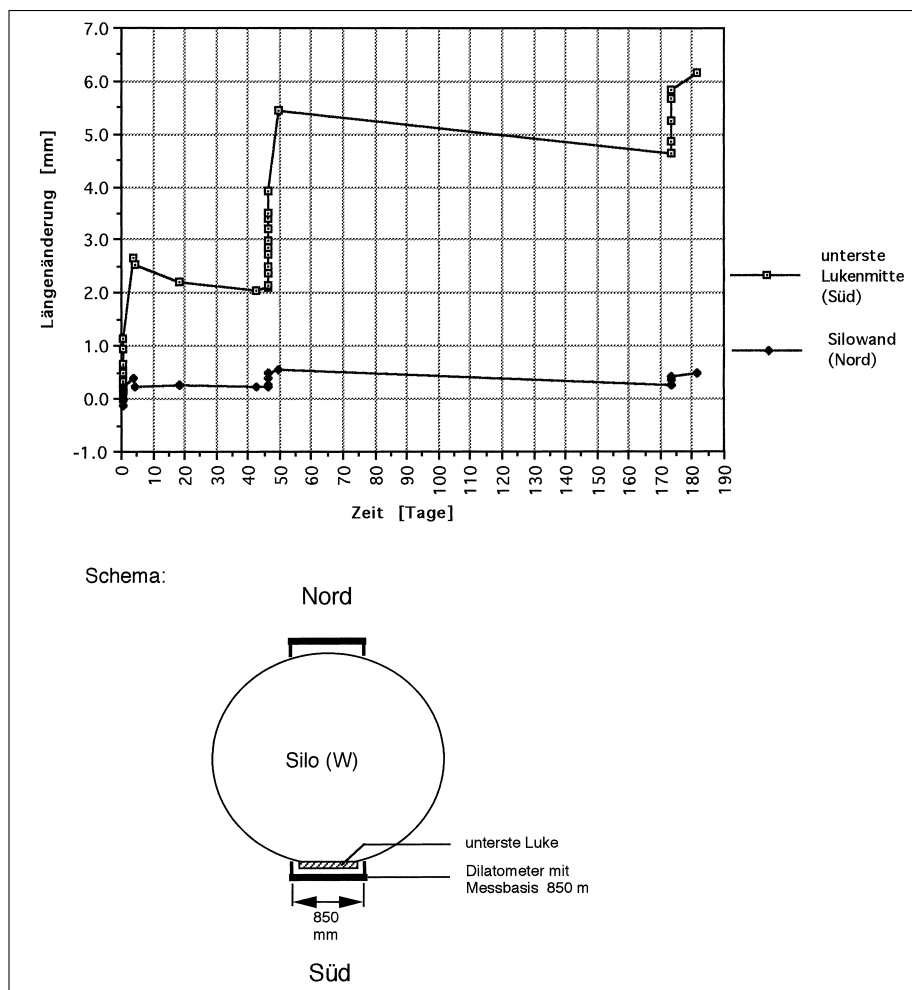


Abb. 10: Dehnungsmessungen (Dilatometermessungen) am gewickelten Silo (W) (05.05.1995 bis 01.11.1995; insgesamt 181 Tage). Umfangrichtung, Messbasis: 850 mm. Erste Futterfüllung 05.05.1995; zweite Futterfüllung 19.06.1995; dritte Futterfüllung 24.10.1995.

Saftablass versehen waren, staute sich Gärtsaft bei den auf 10 m gefüllten Silos auf zirka 7,5 m. Infolge der Futterfüllung wurde ein Innendruck von maximal 0,85 bar gemessen. Ähnlich wie beim Lastfall «Wasserfüllung» wurden die grössten Dehnungen unmittelbar unterhalb der untersten Luke festgestellt. Abbildung 10 zeigt die zeitabhängige Längenänderung in Umfangsrichtung infolge der drei Futterfüllungen. Die Messungen ergaben im gefüllten Zustand eine Vergrösserung der Lukenöffnung, die zehn Mal dem Wert der Längenänderung der GFK-Silowand entspricht. Diese Messung zeigt auch, dass sich der Silo infolge Futterfüllungen stark asymmetrisch deformiert. Dies muss in der statischen Berechnung künftig berücksichtigt werden.

Injektionen von CO₂-Gas während fünf Minuten durch mehrere Bohrungen in die Silage bewirkten nur während der Einblasphase eine Druckänderung, die sich nach dem Einblasen sofort wieder

zurückbildete (Abb. 11). Die registrierte Dehnungsänderung in der Silowand lag im Bereich der Messgenauigkeit von $\pm 0,01\%$.

Schlussfolgerungen

Der Ablauf der Umstürze ist mehrheitlich geprägt durch einen Bruch mit Rissausgang im Bereich der untersten Luke, der sich dann weiter fortpflanzt. Sobald diese lokale Schwächung eine bestimmte Ausdehnung erreicht hat, beginnt der Silo sich zu neigen und stürzt um. Lokale Spannungskonzentrationen infolge konstruktiver Ausbildung der Luken, Krafteinleitungsstellen, Beschädigungen usw. begünstigen diesen Vorgang. Ersteres konnte in den Füllversuchen nachgewiesen werden.



Abb. 11: Injektion von CO_2 -Gas in den voll mit nassem Grashäcksel gefüllten Silo. Bei keiner Messung konnte ein Gasdruck von über einem bar festgestellt werden.

Eine Explosion auf Grund eines Gasüberdruckes kann dagegen eher ausgeschlossen werden. Dagegen sprechen unter anderem: Intakte Überdrucksicherungen und Gärsaftsiphons bei allen untersuchten Fällen; die vorherrschende Fallrichtung über das Lukenband als schwächste Stelle des Silos; Beobachtungen der Landwirte bezüglich der Geräuschentwicklung beim Sturz; häufige Umstürze unmittelbar nach dem Einfüllen, wo eine

Gasentwicklung üblicherweise noch gar nicht eingesetzt hat.

Schadenfälle traten auffällig gehäuft bei Füllungen mit CCM und Zuckerrübenpressschnitzel auf, das heisst bei Futterarten mit einem hohen spezifischen Gewicht (über 850 kg/m^3). Berücksichtigt man, dass diese Güter nur rund 8% des total vorhandenen Siloraumes beanspruchen, so ist das Umsturzrisiko um einen Faktor 10 höher als bei den ver-

breiteten Gärfutter wie Mais-Ganzpflanzensilage und angewelkte Grassilage. Es konnten – wenn auch im bedeutend geringeren Anteil – Schadenfälle im Zusammenhang mit Einfüllen von nassem Grashäcksel festgestellt werden.

Nicht geklärt ist, warum Behälter, die in der Regel auf einfachen Wasserdruck ausgelegt sind, bei Füllgütern mit einem spezifischen Gewicht um 800 kg/m^3 (beispielsweise Grashäcksel) versagen. Eine Vermutung geht dahin, dass durch Brückenbildung während der Setzbewegung des Futters Querdrücke auf die Behälterwand entstehen können, die die Festigkeitsgrenze des Materials übersteigen. Diese Vermutung wird erhärtet durch das auffällige Zusammentreffen von raschem Einfüllen in einem Zug, zum Beispiel durch Lohnunternehmer, und dem anschliessenden, kurz nach dem Einsilieren erfolgten Umsturz.

Für die Herstellung lässt sich schliessen, dass die bisherigen statischen Auslegungskriterien nicht ausreichen. Es müssten höhere Sicherheitsfaktoren eingerechnet werden. Die Höhe des Grenzwertes müsste experimentell durch die betroffenen Firmen nachgewiesen werden. Zur Zeit fehlen jedenfalls die diesbezüglichen Nachweise.

Es muss untersucht werden, ob das gehäufte Auftreten von Umstürzen bestimmter Jahrgänge auf Umstellungen in den Rezepturen und/oder Reduktion des Materialeinsatzes zur Produktion schwächerer Behälter geführt hat.

Die Verbindung von der Alterung des Materials und der Schwächung des Materials wird mit der statistischen Erhebung nicht klar beurteilt. Obwohl die Silos ab 1970 als Serienprodukt hergestellt werden, ist die Materialzusammensetzung (Harz, Härter, Glasfasern) und der Prozessparameter sehr unterschiedlich. Materialtechnisch können Siloumstürze folglich nur im Einzelfall oder durch eigentliche Berstversuche beurteilt werden. Der Aspekt der Alterung sollte vertieft abgeklärt werden.

Silos von über 10 m Höhe, in Kombination mit einem hohen spezifischen Gewicht des Futters, können das Umsturzrisiko erhöhen. Keinen Einfluss haben dagegen die Einfüllrichtung und die verwendete Fördertechnik auf Sturzrichtung und Häufigkeit. Das Versetzen der Silos im Betrieb oder auf einen anderen Betrieb fällt als Unfallursache weniger in Betracht. Voraussetzung ist hier allerdings, dass die Arbeit fachmännisch, das heisst mit Vorteil von der Herstellerfirma selber durchgeführt wird auf einer horizontalen,

ingenieurmässig berechneten Unterlage. Witterungseinflüsse als Umsturzursache (Sonneneinstrahlung, Wind) konnten durch diese Statistik nicht direkt belegt werden. Verschiedene Materialtests zeigten aber, dass die Elastizitätsmodule durch Temperatureinwirkung stark herabgesetzt wurden und der Silo sich infolge der Temperaturdehnung aus der Vertikalposition bewegte. Für eine vollständige Abklärung der Sicherheit der bestehenden GFK-Silos wären echte Berstversuche an mehreren

Silos durchzuführen und die Lukenkonstruktionen detailliert zu untersuchen. Zusätzlich müssten Berechnungsmodelle aufgestellt werden, um die Ergebnisse der Füllgutversuche und Berstversuche zu analysieren. Anschliessend kann die Sicherheit der GFK-Silos aus einer Synthese der experimentellen, schadenstatistischen und theoretischen Untersuchungen geklärt werden. In einem weiteren Schritt wären Verstärkungsmassnahmen zu untersuchen.

Literatur

Honig H., 1968. Die Völkenroder Bilanzanlage für Silierversuche. Das wirtschaftseigene Futter 14.

Hügel C., 1994. Einfluss verfahrenstechnischer Parameter bei der Lagerbelüftungstrocknung auf Pilzwachstum und Toxinbildung. Dissertation Universität Hohenheim.

Institut für Futterbau und Futterkonservierung Braunschweig-Völkenrode. Jakob R. und Schmidlin A., 1988. Verfahrenstechnische Aspekte bei der Flüssigkonservierung und Verfütterung von rohen Kartoffeln an Mastschweine. Landwirtschaft Schweiz 5/1988.

Schweizer Silovereinigung, BUL, 1994. Merkblatt für die Silosicherheit «Rechtzeitige Reparaturen schützen vor bösen Überraschungen».

Sonderegger H., 1990. Expertise zu einem Schadenfall (nicht veröffentlicht).

Wirth A. und Moresino M., 1985. Energieplanung für die Ernährungssicherung in Krisenzeiten. Datenbeschaffung Projekt Schweizerischer Nationalfonds. FAT-interner Schlussbericht (nicht veröffentlicht).

Woolford M.K., 1977. Untersuchungen über aerobe Umsetzungen in Silage mit Hilfe einer Labortechnik. Das wirtschaftseigene Futter 1.

Zimmer E. und Honig H., 1973. Umsetzungen bei Körner- und Maisschrotsilagen unter verschiedenen siliertechnischen Bedingungen.

Empfehlungen für den sicheren Betrieb von Kunststoff-Hochsilos

Der Benutzer muss sich bewusst sein, dass der Behälter auf das chargenweise Einfüllen von relativ grobfaseriger Gras- und Maissilage ausgelegt ist. Dabei entstanden in der Vergangenheit auch keine grösseren Probleme. Bei der Umstellung auf ein anderes Einfüllmanagement – zum Beispiel Einfüllen in einem Zug – oder auf in den physikalischen Eigenschaften wesentlich andere Füllgüter wie Zuckerrübenschnitzel, CCM oder nasses Grashäcksel, kann das Umsturzrisiko deutlich steigen (vgl. auch Merkblatt Silovereinigung 1994).

Es empfehlen sich einige Vorsichtsmassnahmen:

- Vor dem Befüllen ist eine visuelle Kontrolle des Behälters auf Beschädigungen durchzuführen. Bei Unsicherheiten oder sichtbaren Beschädigungen (Abb. 12) sind die Behälter vor dem Einfüllen von den Herstellern überprüfen zu lassen. Es ist auf die sofortige Reparatur von mechanischen Schäden zu achten.
- Das Futter soll nicht gewässert werden. Das Einfüllen mit flüssigen Futtermitteln ist zu vermeiden. Im Zweifelsfall hat man sich vorher mit dem Hersteller in Verbindung zu setzen.
- Behälter mit Futterarten wie Zuckerrübenschnitzel, CCM, nassem Grashäcksel sind nicht ganz zu füllen. Dies betrifft vor allem Silos bis zum Herstellungsjahr 1990. Bei massgeblicher Änderung in der Benutzung ist im Zweifelsfall ebenfalls der Hersteller zu konsultieren.
- Bei diesen Futterarten ist unmittelbar nach dem Einfüllen besonders die unterste Luke zu beobachten. Bei vermehrtem Saftaustritt mit Blasenbil-



Abb. 12: Silos auf äussere Schäden beobachten. Es können mechanische oder altersbedingte Schäden auftreten.

dung nach dem Einfüllen ist der Umsturzrisiko deutlich steigen (vgl. auch Merkblatt Silovereinigung 1994). Es empfiehlt sich einige Vorsichtsmassnahmen:

- Bei der Befüllung ist eine asymmetrische Ausbildung des Schütt- und Setzkegels zu vermeiden.
- Ablauf-Siphon und Überdruckventil sind regelmässig zu überprüfen.
- Besondere Vorsicht ist bei Occasionsbehältern geboten. Diese sind nur von einer Firma mit speziellen Fahrzeugen versetzen zu lassen. Demontage und Montage müssen durch Fachleute überwacht werden.
- Nach den vorliegenden Ergebnissen kann bei Umstürzen von GFK-Silos mit grosser Wahrscheinlichkeit ein Elementarschaden ausgeschlossen werden. Die Versicherungspolice sind auf den entsprechenden Einbezug von Siloumstürzen zu überprüfen.
- Bei neuen oder überholten Silos sind bei den Firmen die entsprechenden Garantieleistungen abzuklären.

Anfragen über das behandelte Thema und über andere landtechnische Probleme sind an die unten aufgeführten Berater für Landtechnik zu richten. Weitere Publikationen und Prüfberichte können direkt bei der FAT (CH-8356 Tänikon) angefordert werden. (Tel. 052 368 31 31, Fax 052 365 11 90).

E-Mail: info@fat.admin.ch, Internet: <http://www.admin.ch/sar/fat>

- ZH** Kramer Eugen, Landw. Schule Strickhof, 8315 Lindau, Telefon 052 354 98 30
Blum Walter, Landw. Schule Strickhof, 8315 Lindau, Telefon 052 354 98 30
- BE** Jutzeler Martin, Bergbauernschule LBBZ, 3702 Hondrich, Telefon 033 654 95 45
Hügi Kurt, LBBZ Seeland, 3232 Ins, Telefon 032 312 91 21
Oppliger Fritz, Landw. Schule Waldhof, 4900 Langenthal, Telefon 062 916 01 32
Marti Fritz, LBBZ Rütli, 3052 Zollikofen, Telefon 031 910 52 10
Hofmann Hans Ueli, LBBZ Schwand, 3110 Münsingen, Telefon 031 720 11 21
- LU** Moser Anton, LBBZ Schüpfheim, 6170 Schüpfheim, Telefon 041 484 25 25
Hodel René, LBBZ, Centralstr. 21, 6210 Sursee, Telefon 041 921 91 91
Marti Pius, LBBZ Willisau, 6130 Willisau, Telefon 041 970 20 77
Widmer Norbert, LMS, 6276 Hohenrain, Telefon 041 910 26 02
- UR** Landw. Beratungsdienst, Aprostr. 44, 6462 Seedorf, Telefon 041 871 05 66
- SZ** Landolt Hugo, Landw. Schule Pfäffikon, 8808 Pfäffikon, Telefon 055 415 79 22
- OW** Müller Erwin, Landw. Schule Obwalden, 6074 Giswil, Telefon 041 68 16 16
- NW** Egli Andreas, Zentralstelle für Betriebsberatung, 6370 Stans, Telefon 041 618 40 05
- GL** Kant. Zentralstelle für landw. Betriebsberatung, Poststr. 29, 8750 Glarus, Telefon 055 646 67 00
- ZG** Müller Alfons, Landw. Schule Schluethof, 6330 Cham, Telefon 041 780 46 46
- FR** Krebs Hans, Landw. Schule Grangeneuve, 1725 Posieux, Telefon 026 305 58 50
- SO** Wyss Stefan, Bildungszentrum Wallierhof, 4533 Riedholz, Telefon 032 627 09 62
- BL** Zjörjen Fritz, Landw. Schule Ebenrain, 4450 Sissach, Telefon 061 971 21 21
- SH** Kant. landw. Bildungszentrum Charlottenfels, 8212 Neuhausen, Telefon 052 674 05 00
- AI** Koller Lorenz, Gaiserstrasse 8, 9050 Appenzell, Telefon 071 788 95 76
- AR** Vuilleumier Max, Regierungsgebäude, 9102 Herisau, Telefon 071 353 67 56
- SG** Haltiner Ulrich, Landw. Schule Rheinhof, 9465 Salez, Telefon 081 757 18 88
Steiner Gallus, Landw. Schule Flawil, 9230 Flawil, Telefon 071 394 53 53
- GR** Urwyler Hansueli, Grabenstrasse 1, 7000 Chur, Telefon 081 257 24 03
Föhn Josef, Landw. Schule Plantahof, 7302 Landquart, Telefon 081 323 12 01
- AG** Müri Paul, LBBZ Liebegg, 5722 Gränichen, Telefon 062 855 86 27
- TG** Herrmann Samuel, LBBZ Arenenberg, Fachstelle Betriebsberatung und Landtechnik, Amriswilerstr. 50, 8570 Weinfelden, Telefon 071 622 10 22
- TI** Müller Antonio, Ufficio consulenza agricola, 6501 Bellinzona, Telefon 091 814 35 53

Landwirtschaftliche Beratungszentrale, Abt. Landtechnik, 8315 Lindau, Telefon 052 354 97 58

Die FAT-Berichte erscheinen in zirka 20 Nummern pro Jahr. – Jahresabonnement Fr. 50.–. Bestellung von Abonnements und Einzelnummern: FAT, CH-8356 Tänikon. Tel. 052 368 31 31, Fax 052 365 11 90.

E-Mail: info@fat.admin.ch – Internet: <http://www.admin.ch/sar/fat> – Die FAT-Berichte sind auch in französischer Sprache als «Rapports FAT» erhältlich. – ISSN 1018-502X.