

BUWAL/ Forstdirektion  
Fonds zur Förderung der Wald- und Holzfor-  
schung  
Herr Michael Gautschi  
Papiermühlestrasse 172  
3003 Bern

## Schlussbericht: BUWAL-Projekt Nr. 2004.15 Statisches Konzept von Streugutsilos. Erkenntnisse & Massnahmen

---

### Projekt-Zeitraum:

18. August 2004 – 10. Juni 2005

### Projekt-Inhalt:

1. Die ersten Silolösungen in Holzbauweise
2. Ist-Zustandserfassung bestehender Streugutsilos hinsichtlich derer Befindlichkeit
3. Bestimmung der statischen Wirkungsweise von erfassten Siloanlagen in Holz
4. Auswertung der statischen Zustandsanalyse und Aufskizzierung potentieller Risiken
5. Statische Modellentwicklung auf Basis der Erkenntnisse realisierter Anlagen
6. Massnahmenplan für bestehende Streugutanlagen
7. Merkmale 'Beeinträchtigung der Standsicherheit von Streugutsilos'
8. Beilagen

### Projekt-Ergebnis:

- Merkmale 'Beeinträchtigung der Standsicherheit von Streugutsilos' für Projektleiter und Bauherren
- Arbeitspapiere / Handlungsanweisungen extern und intern

9200 Gossau SG, 10. Juni 2005

Projektverantwortliche:



Katharina Lehmann

Projektbegleitung Blumer-Lehmann AG:

Bodo Uehli  
Dipl. Bauing. FH/STV

## 1. Die ersten Silolösungen in Holzbauweise

Die Entwicklung der ersten standardisierten Streugut-Silolösungen in Holzbauweise in der Schweiz geht in die späten 70er / frühen 80er Jahre zurück. Die Siloentwicklung entscheidend mitgeprägt hat seinerzeit die sich zunehmend auf Silobau spezialisierende Holzbauunternehmung Schmid, Wattwil. Fast wie im 18. Jahrhundert die Baumeisterfamilie Grubenmann Holzbrücken und Kirchen modellierten, entwickelten und aus derer Modellerkenntnisse schliesslich 1:1 umsetzten, wurden in ähnlicher Bauweise auch die ersten Silobauwerke realisiert. Auf der Baustelle wurden die Streugut-Lagerkörper abgebunden und zusammengezimmert. Auswirkungen aus dem Tragwerksverhalten von ersten Silobauten wurden interpretiert und mit einfachen Modellberechnungen ausgewertet. Diese Erkenntnisse wurden wiederum in neue Silobauvorhaben eingebracht und auch stetig weiterentwickelt. Entsprechend wurden die Werkstoffwahl, Bauteilsabmessungen oder etwa die Detail- und Knotenausbildungen angepasst. Über Jahre hinweg wurden so Silobauten weiterentwickelt und die Tragkonstruktion verfeinert, gefeilt und nicht zuletzt auch der Materialaufwand optimiert. Einzelne Bauteile wurden losgelöst betrachtet in statische Tragwerksmodelle gefügt und daraufhin dimensioniert. Das Gesamtbauwerksverhalten wurde aufgrund von Beobachtungsmethoden und Erfahrungswerten beurteilt, wurde aber rein rechnerisch nie gefasst. So kommt es, dass gewisse zwischenzeitlich entwickelte Ausführungsmerkmale lose betrachtet einwandfrei funktionieren, im Gesamtverbund des Silo-tragwerks jedoch einer andersartigen Beanspruchungsweise unterliegen und übermässig stark ausgelastet sind. Diesen Ausnutzungsgrad gilt es nun im vorliegenden Projekt zu fassen, um damit bei der Weiterentwicklung von Siloanlagen mit mehr als 250m<sup>3</sup>-Lagervolumen die notwendigen Massnahmen treffen zu können.

## 2. Ist-Zustandserfassung bestehender Streugutsilos hinsichtlich derer Befindlichkeit

Die ersten standardisierten Silobauwerke in Holz erreichen nun mittlerweile ein Betriebsalter von über 20 Jahren und zeigen so langsam ihre Alterserscheinungen. Bedingt durch die witterungsbedingte Exponiertheit, die grossen Temperaturunterschiede sowie die über lange Zeit hohen Lasten (ein 100m<sup>3</sup> Silosilo wiegt gefüllt gegen 130 to.), zeigen sich durch das mitunter ausgelöste Verformungsverhalten Undichtigkeiten im Lagergefäss sowie schadhafte Holzbauteile. Weiter wird durch die besagten Einwirkungen die Achsstruktur verändert, was wiederum zu Mehrbeanspruchungen 2. Ordnung insbesondere im Silo-unterbau (Stützen- und Strebenkonstruktionen) führt. Und schliesslich werden teils Knoten und Bauteile durch die Einwirkung von Feuchtigkeit, Nässe, Schnee und Hagel beansprucht, was zu einer zusätzlichen Festigkeitseinbusse führt. Entscheidend hierfür sind nebst den mikroklimatischen Standortverhältnissen sowie der Anlageausrichtung- und umliegenden Überbauungsverhältnissen auch die Unterhalts- und Wartungsmassnahmen durch die Anlagebetreiber selbst. Alle diese Erkenntnisse konnten anlässlich von Felduntersuchungen an über 25 Siloanlagen – 5 bis 25jährige Streugutsilos in Holzbauweise, stationiert in 12 Kantonen der Schweiz – gewonnen werden.

### 3. Beschreibung der statischen Wirkungsweise von erfassten Siloanlagen in Holz

Das Silobauwerk – sei dies im Grundriss betrachtet rund oder polygonal – wird grundsätzlich in drei Werkteile aufgesplittet: Erstens dem in sich geschlossenen Zylinderkörper, zweitens dem Silotrichter in Kegelform sowie drittens dem Silounterbau, zusammengesetzt aus Stützen- oder Streben-Tragwerksmodulen mit dem zugehörigen zusammengesetzten Siloring. Im Folgenden wird nur auf das kreisrunde Silobauwerk eingegangen. In Analogie wird das polygonale Plattensilo, wie es der Name schon sagt, mittels Grossformatplatten realisiert und ist in den Grundsätzen gleich konzipiert wie das Rundsilobauwerk.

Der Zylinderkörper ist aufgebaut aus vertikal angeordneten Fi/Ta- oder Lärchendauben, welche mittels einer Doppelnut-Doppelkamm Fuge zu einem Kreisrunden Körper geschlossen werden. Feuerverzinkte Spannkabel (Rundstangen) werden horizontal angeordnet, und entsprechend dem Kräftefluss angeordnet um die Zylinderdauben gespannt. Deren Lage wird kontinuierlich gesichert. Ein Verdrehen des Zylinders – aus der Beanspruchung von Wind, Schwinden/Quellen bei Feuchte- und Temperatureinwirkungen, sowie aus dem Fließverhalten des Streusalzes – wird mittels kraftschlüssig angeschlossenen Diagonal-Zugbändern verhindert. Die vertikale Lastabtragung, beziehungsweise Krafteinleitung auf den Silounterbau geschieht über die Siloring-Schnittstelle, an welcher auch die Horizontalkräfte (aus Wind) eingeführt werden.

Der Silotrichter wird ebenfalls als in sich geschlossenes, räumliches und formstabiles Tragwerk angesehen. Konisch gefertigte Trichterdauben, der Dichtigkeit wegen wiederum mit einem Nut/Kamm-Profil versehen, werden zu einem Kegel gefertigt und wiederum mittels Stahlringen zusammengespannt. Der aus Stahl gefertigte, kraftschlüssig aufgesetzte Trichterauslauf bildet die formgebende Trichteröffnung im besagten Teilwerk. Dieser Kegel wird als sich in den Siloring verpfropfenden Körper betrachtet, der ohne jede Aufhängemassnahme die Krafteinleitung des gelagerten Streugutes im Trichter und Zylinder über die Kontaktpressung auf die Siloringe zum Silounterbau bringen kann. Dessen Stahl-Hösenträger übernehmen die alleinige Aufgabe der Lagesicherung und Krafteinleitung der Trichter-Spannkabel in den Siloring.

Der Siloring als Teil des Silounterbaus wird gefertigt aus mehreren, mittels Ringdübel schubfest zusammengesetzten und verschränkten Ringsegmenten. Dieses Brettschichtholz-Ringgebilde ist im Querschnitt konisch bearbeitet und dem Trichter angepasst. Schliesslich liegt der Siloring auf regelmässig verteilt angeordneten Pfosten- oder Strebenmodulen auf, deren Schnittstelle mittels einglatteten oder aufgeschraubten Stahlschweissteilen oder etwa mittels Hartholz-sattel/Laschen-Ausführungen bewerkstelligt wird. Bei den Pfostenmodulen sorgen Strebenbauteile, welche ab ca. Trichterkote Diagonal zu den Siloringen ragen und ebenfalls zur vertikalen Lastabtragung hingezogen werden, für die Gesamtstabilität des Bauwerks. Diese Streben werden in der Regel auf Beipfosten aufgesetzt und mittels Zangenpaaren zusätzlich ausgesteift und mit dem Hauptpfosten gesichert. Ein Ausknicken des Pfosten- oder Strebenmoduls wird mit der Trichteraussteifung verhindert. Das gesamte Silobauwerk wird schliesslich mit eingelegten Fussplatten (Konstruktiver Holzschutz) sowie Gabellagerungen auf Betonsockel gesetzt und gegründet.

#### 4. Auswertung der statischen Zustandsanalyse und Aufskizzierung potentieller Risiken

Untersuchungen und Beobachtung an den teilweise über 20jährigen Siloanlagen zeigten klar, dass für die Beurteilung der Standsicherheit die Witterungseinflüsse mit ihren Auswirkungen für die Tragsicherheit einerseits, und das Tragwerk-Design (Tragwerkskonzept, Abmessungen und Detailgestaltung) andererseits differenziert betrachtet werden muss. Durch die Witterungseinflüsse und den damit verbundenen hohen Feuchtigkeitsbeanspruchungen werden exponierte Holzbauteile, insbesondere im Pfosten- und Strebenfussbereich, im Anschlussknoten von Hauptpfosten-Beifpfosten-Streben oder bei ständig von Schattenwurf befallenen sowie kaum windumspülten Holzbauteilen stark beeinträchtigt. In Einzelfällen wurde bereits örtliche Fäulnis in Holzbauteilen geortet. Es ist bekannt, dass eine erhöhte Feuchtigkeit im Holz dessen Tragfähigkeit bereits empfindlich reduzieren kann und bei festgestellter Fäulnis in statisch beanspruchten Bauteilen die Standsicherheit des Silobauwerks nicht mehr sichergestellt werden kann. Bei von der Witterung hervorgerufenen Schwind- und Quellbewegungen im Silo-Zylinder, welche diesen im schlechtesten Fall gar in eine verdrehte Schiefelage bringen könnte, ist ebenfalls von einer nicht mehr gesicherten Standsicherheit die Rede. Bei den Untersuchungen sind aber auch Teilkörper-Verhalten festgestellt worden, welche sich aufgrund der Streugut-Befüllung und -Entleerung einstellen und sich durch äussere Witterungseinflüsse zusätzlich verschärfen können. Durch das mehr oder weniger lose Einsetzen des verpfropfenden Trichters in den Siloring, einer exzentrischen Befüllung des Silos und schliesslich ein aus der Sonneneinstrahlung ausgelöstes Schwinden (Verringerung der Mantel-Abwicklungslänge), kann das damit verbundene Kräftespiel aus dem Gleichgewicht geraten und ein Abdrehen des Silotrichters bewirken. In demselben Übergangsbereich spielt auch die Krafteinleitung der so genannten Hosenträger in den Ring mit. Das bei Rundsilos mit grossen Durchmessern zusätzlich vorhandene Schwund- und Quellmass wird verstärkt Auswirkungen auf benachbarte Bauteile auslösen. Die Hosenträger werden aufgrund des ganzen Verformungsspiels im Übergangsbereich mit Zwängungen und Kräfteflüssen bedacht, für deren Grössenordnung sie eindeutig nicht bestimmt sind. Zusätzlich ist auch den Steifigkeitsverhältnissen aus der Konstruktionsausbildung sowie dem Gesamtsystemverhalten genügend Rechnung zu tragen, beziehungsweise diese sind genau abzustimmen. Vor allem bei Grosssiloanlagen wird dieser Anspruch zusehends höher einzustufen sein, worauf im Folgenden vertieft eingegangen wird.

#### 5. Statische Modellentwicklung auf Basis der Erkenntnisse realisierter Anlagen

Erste Versuche, das komplette Silobauwerk in einem Stabstatik-Programm zu simulieren, scheiterten schon sehr bald aufgrund der höchst komplexen Mischbauweise von Stabstatik-, Flächen-, Scheiben- und Schalenbauteilen innerhalb des Gesamtgerüsts. Es musste also ein Tragwerksmodell gefunden werden, welches eine Untersuchung von in sich statisch geschlossenen Teilsystemen erlaubt und deren Schnittstellen-Modellierung trotzdem realitätsgetreu gefasst werden kann. Demnach sollten die Kräfteflüsse innerhalb des kreisrunden Zylinders weiterhin mit der Kesselformel geschlossen bestimmt werden können. Bei der Salzdruck-Bestimmung wird unterschieden zwischen einem Füll- sowie einem Entleerungsvorgang. Entsprechend werden dabei die vertikalen und horizontalen Salzdruckberechnungen geführt sowie die Reibung auf die Silowand mitberücksichtigt. Demzufolge bildet sich die Summe des Streugut-Gewichts aus dem Wandreibungs-Anteil der Silozylinder sowie aus den Vertikallasten auf den Silotrichter. Die anteilmässige Krafteinleitung aus der Zylinderwand erfolgt über Kontaktpressung der Zylinder-Dauben (GFP im Falle des Plattensilos) auf den Siloring. Erfahrung mit dem Fließverhalten der Streugüter in Silos zeigen, dass der Massenfluss gänzlich vernachlässigt werden kann. Grundsätzlich wird das Kräftespiel im Silotrichter ebenfalls mit der Kesselformel bestimmt. Die Ablenkkräfte aus den Spannkabeln werden in regelmässiger Anordnung von aufgeschraubten Haltenocken direkt in die Trichterwand eingeleitet und nicht mehr mittels der

Hosenträger in den Siloring geführt. Die Krafteinleitung aus dem Trichter in den Siloring wurde im Rahmen dieser Entwicklungsarbeit zusehends zum Kernthema. Wohl hat sich die Betrachtungsweise des Trichter-Verpfropfens in den Siloring bei über 300 kleineren bis mittelgrossen Siloanlagen mit den beobachteten, geringen Systemverformungen als vernünftig und zuverlässig erwiesen. Nur konnten keine verbindlichen Aussagen über das vorhandene Sicherheits-Niveau gemacht werden. Um diese Unsicherheit inskünftig besser fassen zu können, wird die Krafteinleitung vom Trichter in den Siloring bei grösseren Siloanlagen (150m<sup>3</sup> und grösser) kontrolliert über eine Verschraubung bewerkstelligt. Auf eine Verleimung wird vorderhand verzichtet (Trapezförmige Daubensegmente auf kreisrunden Siloring ungeeignet, Rollschubbeanspruchung bei Plattenkonstruktionen). Nebst der gesicherten Krafteinleitung von Trichter in den Siloring wird mit der Verschraubung auch die Trichterposition fixiert. Diese absolute Lagesicherung bringt hinsichtlich der Dichtigkeit im Übergangsbereich von Zylinder zu Trichter zusätzliche Verbesserungen mit sich. Die resultierenden Horizontalkräfte aus der Trichterlagerung auf den Siloring werden über zusätzliche Spannkabel gefasst. Füll- und Entleerzustände bestimmen die Auswirkungsgrössen von Ringdruck und Ringzug-Spannungen. Die Auswirkungen auf Zylinder und Trichter werden über den Verbund-Siloring auf den Silounterbau abgetragen, dessen Kräfte schliesslich wieder mit Hilfe eines Stabstatik-Programms einfach bestimmt werden können.

## 6. Massnahmenplan für bestehende Streugutanlagen

Nach Auswertung der Felduntersuchungen von über 25 bestehenden Streugutanlagen in der Schweiz müssen die anzugehenden Massnahmen in standardisierte Wartungs- und Unterhaltsarbeiten sowie in Tragwerks-Systemsanierungen unterteilt werden. Unter Wartungs- und Unterhaltsarbeiten werden die regelmässigen Massnahmen an den Streugutsilos über die gesamte Anlage-Nutzungsdauer verstanden. Diese Arbeiten werden im Wartungs- und Unterhaltsplan formuliert und bei der Anlage-Inbetriebnahme dem Betreiber respektive dem Eigentümer kommuniziert und mittels eines Planes festgehalten. Dabei wird unterschieden zwischen Kontroll- und Unterhaltsarbeiten an der Anlage durch den Betreiber selbst sowie Arbeiten, welche durch den Silobaufachmann getätigt werden. Bei Anlageinspektionen durch den autorisierten Silounterhaltungsdienst an bereits betriebenen Silobauten werden anlagebezogene Massnahmen ausgearbeitet und dem Betreiber zur Umsetzung empfohlen. Grundlage hierfür bilden Standortbedingungen, Objektgefährdungen und besondere Einwirkungen, der Anlage-Zustand mit all seinen erlittenen und ertragenen Beanspruchungen sowie die mit dem Betreiber ausgearbeitete, weitere Anlagenutzung und -dauer. Entsprechend des Anlagezustandes werden allfällig erforderliche Kontrollintervalle festgelegt. Dabei werden insbesondere die statisch relevanten Bauteile betrachtet, zugleich aber auch der Gesamtanlage-Zustand wie beispielsweise der chemische Holzschutz oder die Bedien- und Verschleisselemente der Anlage beurteilt und nötigenfalls saniert. Zu den oben aufgeführten Unterhaltsmassnahmen kommen wie Eingang erwähnt allfällige Massnahmen des Tragwerk-Systems hinzu. Aus der Nutzung und Anlagebewirtschaftung hervorgerufene Verformungen, Verschiebungen, Verdrehungen oder Setzungen gehören hierbei erwähnt. Dabei spielt es eine untergeordnete Rolle, ob das Lagervolumen 50m<sup>3</sup>, 150m<sup>3</sup> oder 250m<sup>3</sup> beträgt. Die Bauteilsabmessungen und Tragwerkstrukturen sind jeweils den Gegebenheiten sowie den Lagerungs- beziehungsweise Nutzungsanforderungen angepasst und bestimmt worden. Entsprechend den zulässigen Verformungsverhältnissen wurde dabei auch das Tragwerk dimensioniert. Quintessenz aus den Felduntersuchungen, Objektbeobachtungen, Datenauswertungen und statischen Nachüberprüfungen von realisierten Siloanlagen ist, dass nicht einfach ein generelles Merkblatt für deren Standsicherheit entworfen werden kann. Aus der Vielzahl von inneren und äusseren Einflüssen auf die Anlage ist es vielmehr sinnvoller, Beeinträchtigungspunkte und Einflüsse im Zusammenhang auf die Standsicherheit zusammenzustellen, welche durch den Betreiber oder Eigentümer selber geortet und überprüft werden können. Wichtig ist vor allem, dass bei Vorliegen nachstehender Ist-Verhältnisse der Silobaufachmann (und die entsprechenden technischen Geräte) zur Beurteilung hinzugezogen wird, um allfällige Gefährdungen rechtzeitig zu verhindern.

## 7. Merkmale 'Beeinträchtigung der Standsicherheit von Streugutsilos'

Standortfaktoren, welche ein Durchnässen der Holzbauteile bewirken:

- Schattenwurf auf das Silobauwerk infolge nahe stehender Gebäude, Anlagen, Einrichtungen, Bäume oder dergleichen (Besonders gefährdet ist der Silounterbau)
- Grünwuchs, Hecken und Pflanzen am Silobau selber (zum Beispiel Efeu-Bewuchs am Silo selbst)
- der Witterung besonders exponierte, tragende Bauteile, welche nur schwer Austrocknen können (hier drängt sich allenfalls eine wirkungsvoll hinterlüftete Konstruktionsverkleidung auf)
- Oberflächen-, Sprüh- und Spritzwasser oder gar Schnee-Anhäufungen
- weiter können auch Anlageinstallationen wie Beschilderungen, Füllrohr- oder Entwässerungsrohr-Installationen oder Technik-Befestigungen zu dauerhafter Durchnässung führen
- Nicht mehr intakter chemischer Holzschutz (Holzschutzanstrich je nach Standort und Beanspruchung nach ca. 5-7 Jahre zu erneuern, zB. nach Hagelschlag unbedingt überprüfen)

Systemfaktoren, welche die Standsicherheit vermindern:

- Verformung/Bauchen der Pfosten- und Strebenmodule (ein Ausknicken in x- oder y-Richtung)
- Verdrehen des Silounterbaus, des Silozylinders oder gar des kompletten Silobauwerks
- Bauchen des Silozylinders
- Schlaffen der Spannkabel (Stahlzugringe um den Silozylinder sowie Silotrichter)
- Schwund- und Spannungsrisse in tragenden Holzbauteilen

## 9. Beilagen

- Besuchs-Protokoll
- Wartungs- und Unterhaltsplan für Siloanlage
- Unterlagen interne Schulung
- Grobkonzept Siloanlage

**Blumer-Lehmann AG**  
CH-9200 Gossau/Erlenhof  
Tel. +41 (0) 71 388 58 58  
Fax. +41 (0) 71 388 58 59  
jakob.frischknecht@blumer-lehmann.ch  
www.holzsilos.com

## Silo 150m<sup>3</sup>, Rund, Ø 5.70m, Mst. 1:175

