

Kennwerte von Raps- und Sojaschrot für die festigkeitsmäßige Siloauslegung nach DIN EN 1991-4

Auftraggeber: HHW Gesellschaft Beratender Ingenieure mbH
Wolfenbütteler Str. 31b
38102 Braunschweig

Angebot Nr.: 3-0201-17

Bestellung: 18.09.2017

Projekt: Siloschaden Hamm, Raiffeisen Sauerland Hellweg Lippe eG

Anzahl der Seiten: 13

Wolfenbüttel, den 26. September 2017

Kennwerte von Raps- und Sojaschrot für die festigkeitsmäßige Siloauslegung nach DIN EN 1991-4

Inhalt

	Seite
1 Aufgabenstellung	3
2 Kennwerte für DIN EN 1991-4	3
2.1 DIN EN 1991-4	3
2.2 Silo	4
2.3 Untersuchungen	5
3 Ergebnisse	6
3.1 Schüttgutdichte ρ_b und Schüttgutwichte γ	6
3.2 Böschungswinkel φ_r	8
3.3 Innerer Reibungswinkel φ_i	8
3.4 Horizontallastverhältnis K (λ nach DIN 1055-6 (1987))	9
3.5 Wandreibungsbeiwert μ	10
3.6 Bodenlastfaktor C_b	11
3.7 Entleerungslastfaktor C_h	11
3.8 Schüttgutbeiwert C_{op}	11
4 Zusammenfassung	12
5 Literatur	13

1 Aufgabenstellung

Im Auftrag der HHW Gesellschaft Beratender Ingenieure mbH waren anhand schüttgutmechanischer Untersuchungen Kennwerte für die Berechnung von Silolasten nach der Norm DIN EN 1991-4 zu ermitteln.

Für die Untersuchungen erhielten wir von Raiffeisen Sauerland Hellwege Lippe eG Proben von Raps- und Sojaschrot. Die Probe des Wandmaterials Normalstahl, verzinkt wurde aus unserem Laborbestand entnommen.

2 Kennwerte für DIN EN 1991-4

2.1 DIN EN 1991-4

Die Ermittlung von Lasten, die von einem Schüttgut auf Behälterwände und -boden ausgeübt werden, erfolgt nach der Norm DIN EN 1991-4. In der Norm werden für die Wichte, die innere Reibung, das Horizontallastverhältnis und den Wandreibungsbeiwert keine Einzelwerte, sondern Bandbreiten zwischen einem unteren (X_l) und einem oberen (X_u) charakteristischen Wert gefordert, die aus dem Mittelwert (X_m) experimentell ermittelter Daten mit Umrechnungsfaktoren a_x zu bestimmen sind.

$$a_x = \sqrt{\frac{1 + 1,28 \cdot \delta}{1 - 1,28 \cdot \delta}} \quad (1)$$

mit δ = Variationskoeffizient der Messwerte

Der Umrechnungsfaktor darf nicht kleiner als 1,10 angenommen werden, außer wenn ein kleinerer Wert durch Versuche und durch eine geeignete Abschätzung gesondert nachgewiesen werden kann.

Der untere charakteristische Wert X_l ergibt sich aus:

$$X_l = X_m / a_x \quad (2)$$

Der obere charakteristische Wert X_u ergibt sich aus:

$$X_u = X_m \cdot a_x \quad (3)$$

2.2 Silo

Der Silo, in dem die Rohware gelagert wird, hat einen Durchmesser von 12 m und eine zylindrische Höhe von 24,6 m. Der Silo ist als Flachbodensilo mit zentrischem Auslauf ausgeführt. Der Austrag erfolgt mit einer Räum Schnecke, die sich langsam um die Siloachse bewegt (Bild 1).

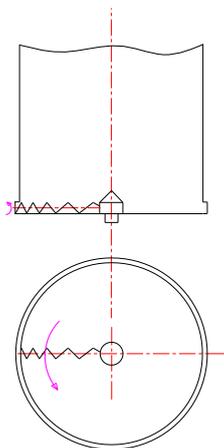


Bild 1: Prinzip Räum Schnecke

Bei einer Räum Schnecke ist davon auszugehen, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt nur Teilbereiche des Silos in der Nähe und oberhalb der jeweiligen Position der Räum Schnecke in Bewegung sind.

Das Volumen des Silos beträgt 2780 m³ brutto. Nach Tabelle 1 beträgt die Schüttgutdichte 660 kg/m³. Damit ergibt sich ein Fassungsvermögen von 1835 t. Die DIN EN 1991-4 nimmt eine Klassifikation zur Bemessungssituation vor, in der das Fassungsvermögen und die Exzentrizität beim Entleeren von Bedeutung sind, um sog. „Anforderungsklassen“ festzulegen.

Nach DIN EN 1991-4 ist für Silos mit großen Exzentrizitäten bei der Entleerung ein besonderes Vorgehen nötig. Eine große Exzentrizität liegt vor, wenn Gleichung (4) erfüllt ist.

$$e_c / d_c > 0,25 \quad (4)$$

mit e_c = Exzentrizität des Fließkanals beim Entleeren

d_c = Silodurchmesser

Der Auslauf des Silos ist zwar zentrisch angeordnet, allerdings wird sich ein Fließkanal entlang der Schnecke ausbilden. Der Steigungsaufbau der Schnecke ist nicht bekannt. Es ist aber davon auszugehen, dass Schüttgut besonders aus dem Bereich Siloaußenradius ausgetragen wird, so dass $e_c > d_c/4$ anzusetzen ist und daher Gleichung (4) erfüllt ist.

Silos mit einer Füllmenge > 1000 t und einer Exzentrizität nach Glg. (4) sind in die Anforderungsklasse 3 einzuordnen.

2.3 Untersuchungen

Für die festigkeitsmäßige Auslegung nach DIN EN 1991-4 lassen sich die nachfolgend aufgeführten Größen messtechnisch erfassen:

- Wichte γ bzw. Schüttgutdichte ρ_b
- Böschungswinkel
- Innerer Reibungswinkel beim stationären Fließen φ_{sf} und effektiver Reibungswinkel φ_e
- Horizontallastverhältnis K bzw. λ
- Wandreibungskoeffizient μ bzw. Wandreibungswinkel φ_x .

Zur Bestimmung der genannten Größen führten wir mit den Schüttgutproben folgende Arbeiten durch:

- Ermittlung der Schüttgutdichte
- Ermittlung des Böschungswinkels
- Ermittlung des effektiven Reibungswinkels und des inneren Reibungswinkels beim stationären Fließen der Schüttgutprobe durch Messung von einem Fließort mit einem Ringschergerät.
- Direkte Ermittlung des Horizontallastverhältnisses durch einaxialen Verdichtungsversuch mit dem Lambdameter
- Ermittlung der Wandreibung gegen das Wandmaterial Normalstahl, verzinkt durch Messung von einem Wandfließort

Die Messungen wurden bei einer Temperatur von ca. 20 °C und einer Luftfeuchtigkeit von ca. 60 % rF durchgeführt. Die Versuche wurden bei dem Spannungsniveau, wie es annähernd in dem Silo auftreten kann, durchgeführt.

3 Ergebnisse

3.1 Schüttgutdichte ρ_b und Schüttgutwichte γ

Die Schüttgutdichte ρ_b bzw. die Schüttgutwichte γ hängen von der auf das Schüttgut wirkenden Spannung ab, und zwar steigen sie im Allgemeinen mit zunehmender Verfestigungsspannung an.

Die Messergebnisse zeigen Tabelle 1 und Bild 1 und Bild 2. Die Auswertung nach DIN EN 1991-4 zeigt Tabelle 2.

Verfestigungsspannung [kPa]	Schüttgutdichte [kg/m ³]	
	Rapsschrot	Sojaschrot
→ 0	568	649
7	604	660
29	613	660
50	622	660
120	625	660

Tab. 1: Schüttgutdichte für Rohware

	Rapsschrot	Sojaschrot
Schüttgutwichte γ [kN/m ³]	6,1	6,5
Umrechnungsfaktor a_γ [-]	1,10	
Unterer charakteristischer Wert von γ [-]	5,6	5,9
Oberer charakteristischer Wert von γ [-]	6,7	7,2

Tab. 2: Schüttgutwichte für Rohware nach DIN EN 1991-4

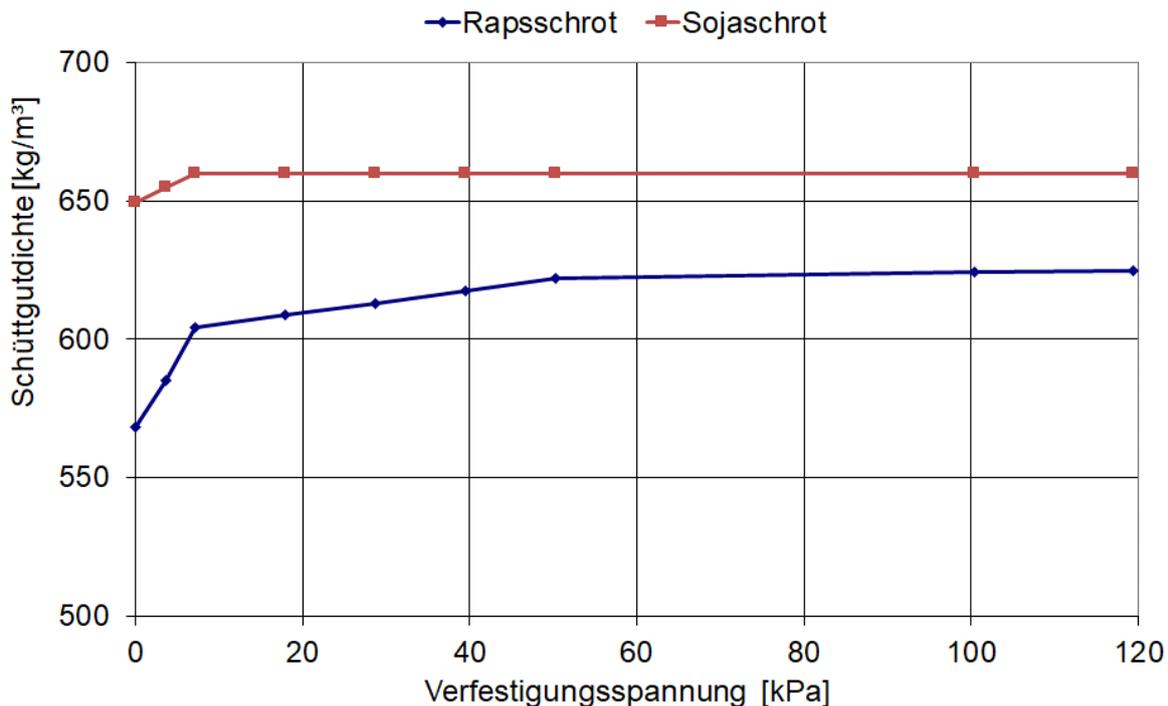


Bild 2: Gemessene Schüttgutdichte für Rohware

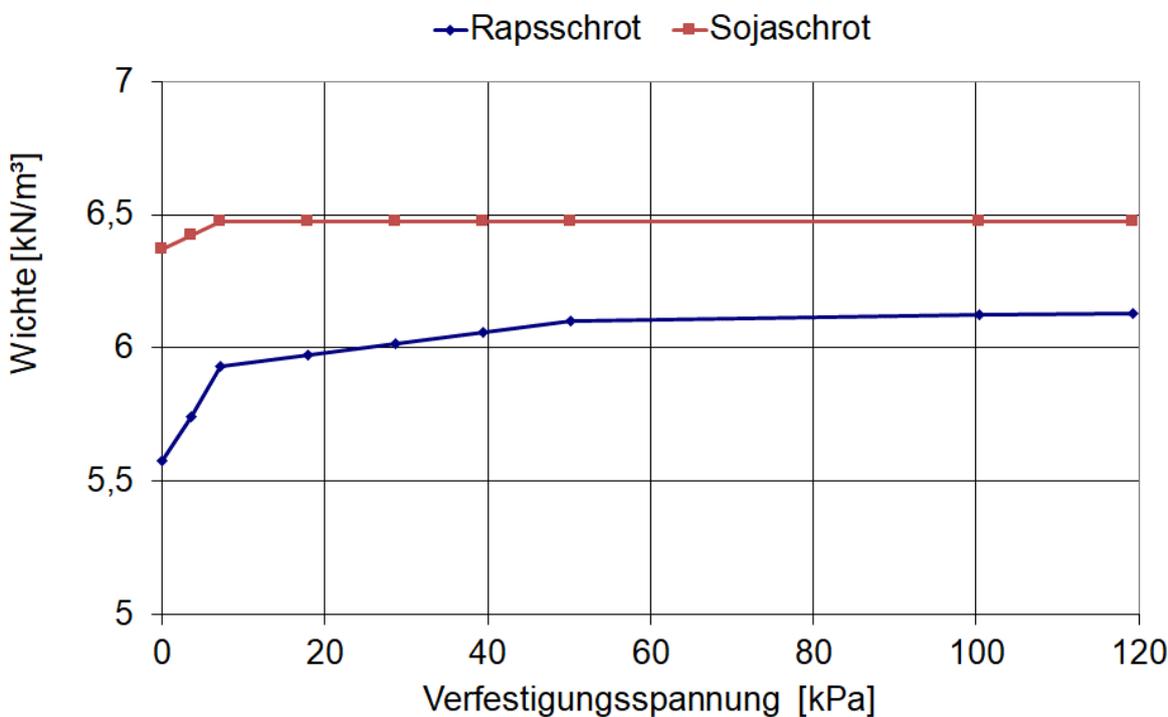


Bild 3: Gemessene Schüttgutwichte von Rohware

3.2 Böschungswinkel φ_r

Die Werte für den Böschungswinkel sind in Tabelle 3 angegeben. Die DIN EN 1991-4 sieht nicht vor, eine Bandbreite für die Werte des Böschungswinkels festzulegen. Wir empfehlen dennoch, dieses Verfahren anzuwenden.

	Rapsschrot	Sojaschrot
Böschungswinkel φ_r [°]	33	33
Umrechnungsfaktor a_r [-]	1,10	
Unterer charakteristischer Wert von φ_r [-]	30	30
Oberer charakteristischer Wert von φ_r [-]	36	36

Tab. 3: Böschungswinkel für Rohware nach DIN EN 1991-4

3.3 Innerer Reibungswinkel φ_i

Aus dem gemessenen Fließort ergeben sich der effektive Reibungswinkel φ_e und der innere Reibungswinkel beim stationären Fließen φ_{sf} , der dem inneren Reibungswinkel φ_i nach DIN EN 1991-4 entspricht. Die gemessenen Werte sind in Tabelle 4 angegeben.

	Rapsschrot	Sojaschrot
Effektiver Reibungswinkel φ_e [°]	37	43
Innerer Reibungswinkel beim stationären Fließen φ_{sf} [°]	35	40

Tab. 4: Innere Reibung von Rohware

Die Bandbreite der Werte für den inneren Reibungswinkel φ_i nach DIN EN 1991-4 wird durch einen unteren und einen oberen charakteristischen Wert gegeben, der sich mit dem Umrechnungsfaktor a_o nach Gleichung (1) berechnen lässt. Da Rohware nicht in der Norm aufgeführt ist, werden in Tabelle 5 Werte für ein ähnliches Schüttgut und der maximale Wert aus der Norm genannt.

	Variationskoeffizient δ [-]
Kraftfuttermisch	0,07
Maximaler Wert	0,18

Tab. 5: Variationskoeffizient δ für die innere Reibung nach DIN EN 1991-4

Der Variationskoeffizient wird zu $a_o = 0,07$ gewählt. Damit ergibt sich ein Umrechnungsfaktor von $a_{\mu} = 1,09$, der kleiner ist als 1,10. Dies ist nach DIN EN 1991-4 nur nach einem gesonderten Nachweis zulässig, so dass der Umrechnungsfaktor zu $a_o = 1,10$ gesetzt wird. In Tabelle 6 werden die damit berechneten Werte angegeben.

	Rapsschrot	Sojaschrot
Innerer Reibungswinkel beim stationären Fließen φ_{sf} [°]	35	40
Umrechnungsfaktor a_o nach Glg. (1) [-]	1,10	
Unterer charakteristischer Wert von φ_i [-]	32	36
Oberer charakteristischer Wert von φ_i [-]	38	44

Tab. 6: Innerer Reibungswinkel φ_i für Rohware nach DIN EN 1991-4

3.4 Horizontallastverhältnis K (λ nach DIN 1055-6 (1987))

Das Horizontallastverhältnis wurde, wie in der DIN EN 1991-4 angegeben, durch einen einaxialen Verdichtungsversuch mit dem Lambdameter gemessen. Das gemessene Horizontallastverhältnis K_o wird um 10 % erhöht, um den Einfluss der Wandreibung im Silo im Vergleich zur Messmethode zu berücksichtigen.

$$K = 1,1 K_o \quad (5)$$

Die Bandbreite der Werte für das Horizontallastverhältnis wird mit dem Umrechnungsfaktor a_K festgelegt, der sich nach Gleichung (1) berechnen lässt. Da Rohware nicht in der Norm aufgeführt ist, werden in Tabelle 7 Werte für den Variationskoeffizienten für ein ähnliches Schüttgut und der maximale Wert aus der Norm genannt.

	Variationskoeffizient δ [-]
Kraftfuttermisch	0,08
Maximaler Wert	0,21

Tab. 7: Variationskoeffizient δ für das Horizontallastverhältnis K nach DIN EN 1991-4

Als Variationskoeffizient wird der Wert 0,08 gewählt. Damit ergibt sich ein Wert für $a_K = 1,11$. In Tabelle 8 werden das mit dem Lambdameter gemessene und das nach DIN EN 1991-4 berechnete Horizontallastverhältnis K angegeben.

	Rapsschrot	Sojaschrot
Gemessen mit Lambdameter	0,44	0,36
DIN EN 1991-4		
Horizontallastverhältnis K (gemessen mit Lambdameter, bestimmt nach Glg. (5))	0,48	0,40
Umrechnungsfaktor a_K nach Glg. (1) [-]	1,11	
Unterer charakteristischer Wert K_l [-]	0,43	0,36
Oberer charakteristischer Wert K_u [-]	0,53	0,44

Tab. 8: Gemessenes und berechnetes Horizontallastverhältnis für Rohware nach DIN EN 1991-4

3.5 Wandreibungsbeiwert μ

Der Wandreibungsbeiwert μ ist definiert als:

$$\mu = \tan \varphi_x \quad (6)$$

Der Wandreibungswinkel φ_x der Schüttgutprobe wurde gegen das Wandmaterial Normalstahl, verzinkt mit einem Jenike-Schergerät gemessen.

Die Bandbreite der Werte für den Wandreibungsbeiwert wird mit dem Umrechnungsfaktor a_μ festgelegt, der sich nach Gleichung (1) berechnen lässt. Da Rohware nicht in der Norm aufgeführt ist, werden in Tabelle 9 Werte für ein ähnliches Schüttgut und der maximale Wert aus der Norm genannt.

	Variationskoeffizient δ [-]
Kraftfuttermisch	0,19
Maximaler Wert	0,19

Tab. 9: Variationskoeffizient δ für den Wandreibungsbeiwert μ nach DIN 1055 Teil 6 (2005)

Als Variationskoeffizient wird der Wert 0,19 gewählt. Damit ergibt sich ein Umrechnungsfaktor von $a_\mu = 1,28$. Der hohe Wert wurde auch deswegen gewählt, da keine Wandprobe aus dem Silo entnommen werden konnte und Rohware mit wechselnden Fettgehalten vorliegen kann. Erfahrungsgemäß beeinflusst der Fettgehalt vor allem die Wandreibung.

In Tabelle 10 werden die damit berechneten Werte angegeben.

	Rapsschrot	Sojaschrot
Wandreibungswinkel φ_x [°]	24 – 27	16 – 21
Wandreibungsbeiwert μ [-]	0,44 – 0,51	0,29 – 0,38
Wandreibungsbeiwert μ_m [-]	0,48	0,33
Umrechnungsfaktor a_μ [-]	1,28	
Unterer charakteristischer Wert μ_l [-]	0,38	0,26
Oberer charakteristischer Wert μ_u [-]	0,61	0,42

Tab. 10: Wandreibungswinkel φ_x und Wandreibungsbeiwert μ für Rohware gegen Normalstahl, verzinkt

Für beide Proben wurde bei den Wandreibungsmessungen ein Slip-Stick-Verhalten festgestellt. Slip-Stick-Verhalten kann als Wechsel zwischen Haft- und Gleitreibung interpretiert werden und beim Fließen im Silo zu Erschütterungen führen [1].

3.6 Bodenlastfaktor C_b

Wenn das gelagerte Schüttgut beim Entleeren des Silos eine signifikante Neigung zu dynamischen Lasten aufweist, gilt nach der DIN EN 1991-4 für Silos der Anforderungsklasse 3:

$$C_b = 1,2 \quad (7)$$

3.7 Entleerungslastfaktor C_h

Der Entleerungslastfaktor C_h hängt im Allgemeinen von der Siloform und der Anforderungsklasse des Silos ab:

Siloform:

Es wird zwischen schlanken, mittelschlanken und niedrigen Silos unterschieden:

schlanke Silos: Höhe/Durchmesser (= h/d) im Schaft $\geq 2,0$

mittelschlanke Silos: $1 < h/d < 2,0$

niedrige Silos: $0,4 < h/d \leq 1,0$

Der vorliegende Silo ist danach als schlanker ($h/d = 25 \text{ m}/12 \text{ m} > 2$) Silo zu bezeichnen, und es gilt für die Anforderungsklasse 3:

$$C_h = 1,15 \quad (8)$$

3.8 Schüttgutbeiwert C_{op}

Der Kennwert C_{op} entspricht dem Schüttgutbeiwert β_G der DIN 1055-6 (1987). Die Entleerungsfaktoren C berücksichtigen eine Reihe von Phänomenen, die beim Entleeren von Silos auftreten. Die Schüttgutabhängigkeit der unsymmetrischen Komponente wird durch den Schüttgutbeiwert C_{op} repräsentiert. Er kann mit den Umrechnungsfaktoren a_K und a_μ nach Gleichung (9) abgeschätzt werden.

$$C_{op} = 3,5 a_\mu + 2,5 a_K - 6,2 \leq 1,0 \quad (9)$$

Mit $a_\mu = 1,28$ und $a_K = 1,11$ folgt:

$$C_{op} = 1,0 \quad (10)$$

Alle Angaben sind nur für die untersuchte Probe gültig. Insbesondere bei der Angabe von Bereichen für einzelne Kennwerte sind die Ergebnisse so zu benutzen, dass die nach DIN EN 1991-4 berechneten Lastannahmen auf der sicheren Seite liegen. Zudem ist darauf hinzuweisen, dass es sich bei den angegebenen Messwerten um Werte handelt, die keine Sicherheitszuschläge enthalten.

4 Zusammenfassung

In Tabelle 11 sind die Kennwerte für beide Proben für die Siloauslegung nach DIN EN 1991-4 angegeben.

	Rapsschrot	Sojaschrot
Anforderungsklasse	3	
Schüttgutwichte, maximal [kN/m ³]	6,7	7,2
Böschungswinkel φ_r [°]	30 – 36	30 – 36
Innere Reibung φ_i [°]	32 – 38	36 – 44
Horizontallastverhältnis K [-]	0,43 – 0,53	0,36 – 0,44
Wandreibungsbeiwert μ [-] für Normalstahl, verzinkt	0,38 – 0,61	0,26 – 0,42
Bodenlastfaktor C_b [-]	1,2	
Entleerungslastfaktor C_h [-]	1,15	
Schüttgutbeiwert C_{op} [-]	1,0	

Tab. 11: Vereinfachte Zusammenfassung der Schüttgutkennwerte von Rohware

In Tabelle 12 sind die Kennwerte zusammengefasst für beide Proben für die Siloauslegung nach DIN EN 1991-4 angegeben. Zum Vergleich sind die Werte, die für die Silostatik eingesetzt wurden, angegeben.

	Rohware	Silostatik (Mehl)
Anforderungsklasse	3	2
Schüttgutwichte, maximal [kN/m ³]	7,2	7,0
Böschungswinkel φ_r [°]	30 – 36	45
Innere Reibung φ_i [°]	32 – 44	40 – 44
Horizontallastverhältnis K [-]	0,36 – 0,53	0,30 – 0,43
Wandreibungsbeiwert μ [-] für Normalstahl, verzinkt	0,26 – 0,61	0,28 – 0,38
Bodenlastfaktor C_b [-]	1,2	1,2
Entleerungslastfaktor C_h [-]	1,15	1,15
Schüttgutbeiwert C_{op} [-]	1,0	0,6

Tab. 12: Vereinfachte Zusammenfassung der Schüttgutkennwerte von Rohware

Nach der Auftragsbestätigung des Anlagenlieferanten, Fa. Ottevanger BV, ist der Silo geeignet zur Lagerung von Sojaschrot. Nach Angaben von Raiffeisen soll er auch geeignet sein zur Lagerung von Rapsschrot. Gerechnet wurde die Silostatik aber für Getreidemehl. Im Vergleich mit den gemessenen Daten für Rohware ergeben sich lasterhöhende und lasterniedrigende Einflüsse, so dass die vorliegende Statik entsprechend nachzurechnen ist.

5 Literatur

- [1] Schulze, D. Pulver und Schüttgüter, Springer Verlag, (3.Auflage), 2014

Für Rückfragen stehen wir Ihnen jederzeit gerne zur Verfügung.

SCHWEDES + SCHULZE SCHÜTTGUTTECHNIK GmbH