

sichtigung' der Haltbarkeit nur sehr gering sind. Einen Sonderfall stellen hier wiederum die Mischsilos dar, die mit der Entwicklung funktionssicherer einfacher Silos an Bedeutung verloren und nur in Sonderfällen Einsatzberechtigung haben. Im Interesse der Nutzungsdauer des Silos sollte man solchen aus korrosionsfesten Materialien den Vorzug geben.

Zusammenfassung

Mit diesen Ausführungen sollte ein kurzer Überblick auf die an Silos zu stellenden Forderungen gegeben werden, um für die Aufstellung von Futtermittelsilos an Ställen eine Beurteilungsgrundlage auf der Basis der bisherigen Erkenntnisse zu vermitteln. Dabei muß darauf hingewiesen werden, daß die theoretischen Grundlagen für das Verhalten der Futtermittel im Lagerbehälter noch sehr lückenhaft und weitere Untersuchungen zur Klärung dieser Probleme notwendig sind.

Vorschlag einer Berechnungsmethode für die Ermittlung von Lagerungsdichten

Dipl.-Ing. CHR. FURLL, KDT*

1. Problematik

Die Stoffe verhalten sich in der überwiegenden Anzahl nicht wie ideale elastische Körper (Hookescher Körper) oder wie ideale Flüssigkeiten (Newton-Körper). Landtechnische Materialien sind fast ausnahmslos in den Bereich zwischen den genannten Körpern einzuordnen. Als Voraussetzung für die Beherrschung von bestimmten Verfahren der landwirtschaftlichen Produktion müssen deshalb ihre spezifischen Eigenschaften erst untersucht und erforscht werden. Ein Beispiel, das im folgenden ausgeführt wird, ist die Berechnung von Lagerungsdichten. Die Kenntnis der Lagerungsdichten ist in der Landtechnik sowohl für den Konstrukteur von Anlagen als auch für den landwirtschaftlichen Verfahrenstechniker wichtig:

- Bei der Bemessung von Silobehältern können zur Bestimmung der Füllgutdrücke bei deformierbaren Stoffen (z. B. Trockengrünger, Trockenhackfrüchte, gehäckseltes Grünger, Mischfutter) nicht die nach einer bestimmten Methode gewonnenen Werte der Schüttdichte verwendet werden.
- Die Entleerungsvorgänge in Silos und Bunkern sind von den herrschenden Scherspannungen und somit auch von der Lagerungsdichte abhängig.
- Für einen ordnungsgemäßen Silierprozeß ist in Hochsilos ein bestimmtes maximal zulässiges Hohlraumvolumen Voraussetzung. Die rechnerische Ermittlung des Hohlraumvolumens ist nur bei Kenntnis der Lagerungsdichte möglich.
- Zur Bestimmung der Kapazität von Lagerungseinrichtungen muß die Lagerungsdichte bekannt sein.

2. Berechnungsmethode für die Ermittlung von Lagerungsdichten

2.1. Berechnung der Lagerungsdichte ohne Berücksichtigung des Absetzens

Lagerungsdichten können allgemein nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$\rho_L = \frac{m}{V_S - \Delta V(p_v, t)} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (1)$$

Literatur

- [1] TAKACHASI, K. / A. JAMBARA: Getreidedruck auf die Wände von Silos. Mitt. des Forschungslabors der Baugesellschaft. Simdsu, Tokio, April 1963, S. 17 bis 32
- [2] PARCHOMENKO, E. S.: Die physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Hühnerfutter (russ.). Pticevodstvo 14 (1964) Nr. 5, S. 28 bis 30
- [3] REIMBERT, M. und A.: Silos. Bauverlag GmbH, Wiesbaden — Berlin 1961
- [4] JACOBI, H.: Das Lagerverhalten von Getreide in Silozellen mit gedämmten und ungedämmten Außenwänden. Agroforum 1 (1967) Nr. 12, S. 8 bis 11
- [5] NIELEBOCK, E. W.: Kraftfutter und Legemehl aus dem Silo. Geflügelhof 31 (1968) Nr. 33, S. 580 bis 583
- [6] FECHNER / KLOSE / BEER / HELBIG: Entmischungsuntersuchungen mit radioaktiven Isotopen bei der Silolagerung ungepreßter Mischfuttermittel. Agroforum 1 (1967) Nr. 1, S. 20
- [7] ROB, E.: Praktische Erfahrungen mit Silos für Mischfutter. Deutsche Geflügelwirtschaft 21 (1969) Nr. 2, S. 37 bis 40 A 7923

Darin bedeuten:

- ρ_L Lagerungsdichte in kg/m^3
- V_S Schüttvolumen in m^3
- ΔV Volumenänderung in m^3
- m Masse des Schüttgutes in kg
- p_v vertikaler Füllgutdruck in N/m^2
- t Zeit in s

Das Verhältnis von Volumenänderung ΔV und Schüttvolumen V_S wird unter Voraussetzung des einachsigen Beanspruchungsfalles, der bei der Verdichtung in Lagerungseinrichtungen vorliegt, als Dehnung ϵ bezeichnet:

$$\epsilon = \frac{\Delta V}{V_S} \quad [-] \quad (2)$$

Bei Verwendung der Gleichung (2) errechnet sich die Lagerungsdichte nach der Gleichung:

$$\rho_L = \frac{\rho_S}{1 - \epsilon(p_v, t)} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3)$$

mit ρ_S Schüttdichte in kg/m^3 .

Die Dehnung ϵ ist eine Funktion des Druckes p_v und der Zeit t . Sie muß in Laboruntersuchungen für den speziellen Stoff ermittelt werden.

Bei der Berechnung des vertikalen Druckes p_v sind zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Fall:

Bei Lagerungseinrichtungen, deren Verhältnis von Höhe h zu Durchmesser d kleiner als 1,5 ist ($h/d < 1,5$) wird nach der sowjetischen Norm TU 124 — 56 (sowjetische Norm für die Projektierung von Silos) [1] die Wandreibung nicht berücksichtigt. Der vertikale Füllgutdruck errechnet sich unter diesen Bedingungen nach der Gleichung:

$$p_v = (h_S - z) \rho_S \cdot g \quad [\text{N/m}^2] \quad (4)$$

Hierin sind:

- h_S Füllguthöhe, bezogen auf die Schüttdichte ρ_S in m
- z Abstand des betrachteten Füllguthorizonts vom Boden der Lagerungseinrichtung in m

* Sektion Landtechnik der Universität Rostock (Direktor: Prof. Dr.-Ing. CHR. EICHLER)

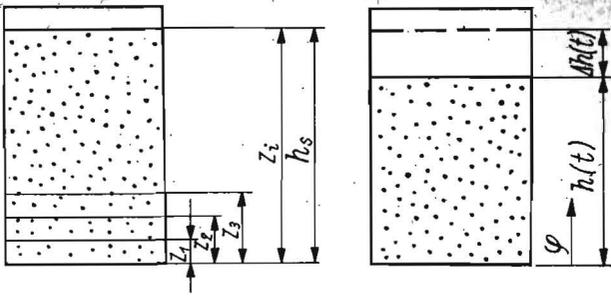


Bild 1. Lagerungseinrichtungen im nicht abgesetzten Zustand des Füllgutes mit der Dichte ρ_s (links) und im abgesetzten Zustand des Füllgutes (rechts)

- ρ_s Schüttdichte in kg/m^3
- g Erdbeschleunigung in m/s^2

2. Fall:

Bei Lagerungseinrichtungen mit einem Verhältnis von $h/d > 1,5$ (nach sowjetischer Norm TJ 124 — 56) muß bei der Berechnung des vertikalen Füllgutdruckes die Wandreibung berücksichtigt werden. Grundlage für die Berechnung des vertikalen Füllgutdruckes in Silos ist trotz vieler neuer Untersuchungen immer noch die Formel nach JANSSEN [1]:

$$p_v = \frac{g \cdot \rho_s \cdot \omega}{K \cdot \mu_w} \left(1 - e^{-\frac{(h_s - z) \cdot K \cdot \mu_w}{\omega}} \right) \quad [\text{N/m}^2] \quad (5)$$

Dabei bedeuten:

- ρ_s Schüttdichte des Füllgutes in kg/m^3
- g Erdbeschleunigung in m/s^2
- ω hydraulischer Radius des Siloquerschnitts in m
- μ_w Wandreibungskoeffizient
- h_s Schütthöhe, bezogen auf die Schüttdichte ρ_s in m
- z Abstand des betrachteten Füllguthorizontes vom Boden des Silos in m
- K Rankinsches Grenzspannungsverhältnis
 $K = \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$
- φ innerer Reibungswinkel des Füllgutes $[\circ]$

Nach Gleichung (5) ist die Druckverteilung über dem Querschnitt gleichmäßig. Untersuchungen von EMELJANOW [2] ergaben jedoch eine Ungleichmäßigkeit der Druckverteilung von maximal 10 bis 12 % in den Füllguthorizonten.

2.2. Berechnung des Absetzens des Füllgutes

Mit Hilfe der Gleichung (3) kann die Lagerungsdichtenverteilung nur für ein Koordinatensystem, dem ein homogener Füllgütörper mit der Schüttdichte ρ_s zugrunde liegt, bestimmt werden. Ist die Kenntnis der Dichteverteilung zum Zeitpunkt t unter Berücksichtigung des Absetzens von Interesse, müssen die absoluten Absetzbeträge der einzelnen Füllguthorizonte bekannt sein (Bild 1).

Bezieht man sich auf ein Koordinatensystem, das für ein nicht abgesetztes Füllgut mit der Dichte ρ_s gültig ist (Bild 1, links), läßt sich die Absenkung $\Delta h(t)$ des Füllgutspiegels wie folgt berechnen:

$$\Delta h(t) = \sum_{n=0}^i \varepsilon(z_{n+1,t}) \Delta z \quad (\Delta z = z_{n+1} - z_n)$$

Grenzübergang: $\Delta z \rightarrow 0, z_n \rightarrow \infty$

$$\Delta h(t) = \int_0^{h_s} \varepsilon(z,t) dz \quad (6)$$

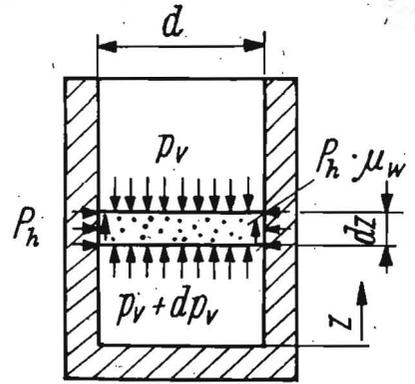


Bild 2. Beanspruchung einer differentiellen Schicht des Füllgutes

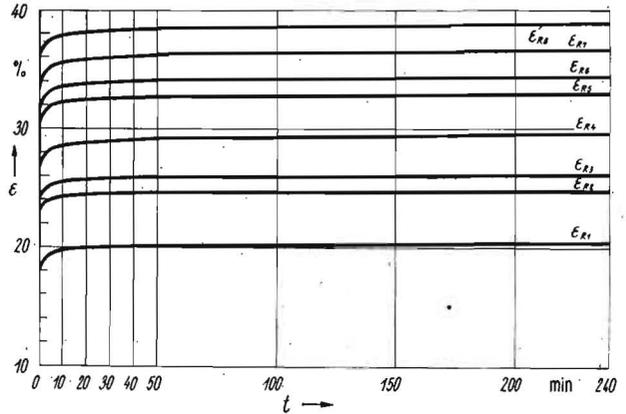


Bild 3. Qualitativer Verlauf der Dehnungskriechfunktion $\varepsilon(p_v, t)$ für Grünmehl ($p_v = 0,125; 0,25; 0,375; \dots; 1,0 \text{ kp/cm}^2$)

Die Absenkung des Füllguthorizontes an der Stelle z_0 beträgt:

$$\Delta l(z_0, t) = \int_0^{z_0} \varepsilon(z, t) dz \quad (7)$$

Die Dichteverteilung über der Füllguthöhe $h(t)$ zum Zeitpunkt t wird unter Einbeziehung von Gleichung (7) nach folgender Beziehung bestimmt:

$$\rho(\rho_0, t) = \rho(z_0, t) \quad (8)$$

wobei $\rho_0 = z_0 - \Delta l(z_0, t)$ ist.

3. Ermittlung der Dehnungskriechfunktion

Die Kenntnis der Dehnungskriechfunktion $\varepsilon(p, t)$ ist Voraussetzung sowohl für die Ermittlung der Lagerungsdichte als auch für die Berechnung der Absetzbeträge. Ihre experimentelle Bestimmung bringt insofern Probleme, als die Verdichtung des betreffenden Guthaufwerkes aufgrund des Schüttgutcharakters nur in einem Gefäß erfolgen kann. Die Versuche müssen deshalb so angelegt sein, daß die Reibungskräfte an den Gefäßwandungen ein Minimum betragen. Zur Beurteilung des Randeinflusses kann das Verhältnis von Reibkraft F_R und Vertikalkraft F_V , das als Randflußzahl zu definieren ist, herangezogen werden:

$$\begin{aligned} F_R &= p_v \tan^2(45^\circ - \varphi/2) \cdot \mu_w \cdot d \cdot \pi \cdot z \\ F_V &= p_v \cdot \pi \cdot d^2/4 \\ \frac{F_R}{F_V} &= \frac{\tan^2(45^\circ - \varphi/2) \cdot \mu_w \cdot z \cdot 4}{d} \end{aligned} \quad (9)$$

Bild 2 zeigt die Beanspruchung einer differentiellen Schicht des Füllgutes.

Durch entsprechende Wahl der Größen μ_w , z und d kann der Randeinfluß durch die Laboreinrichtung vermindert werden. Der innere Reibwinkel φ ist eine unveränderliche Stoffkonstante.

Die mathematische Formulierung der in Versuchen gewonnenen Dehnungskriechfunktion ist insofern etwas problematisch, als sie eine Approximation einer Funktion von zwei unabhängigen Variablen darstellt, wenn Trockensubstanzgehalt und Temperatur konstant gehalten werden.

Versuche mit Trockengrünmehl ergaben, daß die Dehnungskriechfunktion durch eine Potenzfunktion mit den beiden unabhängigen Variablen Zeit t und Vertikaldruck p_v darstellbar ist:

$$\epsilon(p_v, t) = A p_v^a \cdot t^b + B p_v^c \quad (10)$$

Bild 3 zeigt dafür ein Beispiel.

Temperatur und Trockensubstanzgehalt wurden bei den Untersuchungen konstant gehalten. Aus Gleichung (10) ist ersichtlich, daß bei der Verdichtung von Grünmehl die Deh-

nungskriechfunktion einen nichtlinearen Charakter hat. Das Aufstellen eines rheologischen Modells wird durch diesen Tatbestand erschwert.

Zusammenfassung

Ausgehend von der Kenntnis der Dehnungskriechfunktion, die für den Stoff im Labor zu ermitteln ist, werden Berechnungsmethoden für die Bestimmung der Lagerungsdichten und der Absatzbeträge von landtechnischen Materialien in Lagerungseinrichtungen vorgeschlagen. Damit erhalten sowohl der Konstrukteur landtechnischer Anlagen als auch der landwirtschaftliche Verfahrenstechniker ein notwendiges Hilfsmittel.

Literatur

- [1] FISCHER, W.: Silos und Bunker in Stahlbeton. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1966
- [2] EMELJANOW, L. M.: Der Spannungszustand eines Schüttgutkörpers, der von parallelen Wänden begrenzt wird. Sowjetski Metro-politen (1940) H. 12 A 7862

Hubschrauber montiert Silo K 850 und Beschickungsbrücke K 890

Die Montage der Al-Lagersilos K 850 und der Beschickungsbrücke erfolgte bisher mit einem Autokran (22 m Ausladung), oder mit einem auf der Stahlkonstruktion der Beschickungsbrücke K 890 befestigten Ausleger. Die Höhe der Al-Silos beträgt 7,65 m bei 5,70 m Dmr. und 150 t Fassungsvermögen.

Diese herkömmliche Technologie erforderte hohen Zeit- und Arbeitsaufwand und eine Gefährdung der Werkstätten durch Arbeiten in großen Höhen. Außerdem konnte man dazu die Vormontage der Silos nur direkt an der Baustelle durchführen. Die dafür erforderliche ebene Bodenfläche ist besonders in bergigem, bängigem Gelände oft nicht vorhanden und verursacht beim Bau und bei der Standortauswahl Schwierigkeiten. Man mußte auf eine rationelle Vormontage verzichten und direkt auf den Fundamenten arbeiten, allerdings unter sehr ungünstigen Bedingungen, da die Montage auf dem 3,20 m hohen Untergestell erfolgte. Arbeitsaufwand und Arbeitszeit wurden höher bei verminderter Arbeitssicherheit.

Darüber hinaus müssen die Fundamente fertiggestellt und der Beton abgebunden sein, ehe die Montage beginnen kann, da auf den Fundamenten gearbeitet wird. Die Folge ist ein weiterer erheblicher Zeitverlust.

Der Einsatz von Hubschraubern verwirklicht das Gesetz der Ökonomie der Zeit bei der Montage der Silos K 850.

Erstmals führten wir mit Hilfe eines Hubschraubers Mi 8 (2,5 t Tragfähigkeit) am 9. Aug. 1969 beim Bau eines Getreidesilos K 850, Variante II, in Annaberg eine neue Technologie der „fliegenden Kräne“ ein. Dabei wurden mit dem Hubschrauber der Interflug folgende Arbeiten vorgenommen:

- a) Einfliegen der Siloberteile auf die Unterteile (Bild 1).¹ Die Vormontage wurde auf einem 4 km von der Baustelle entfernten Sportplatz durchgeführt und konnte parallel zu den eigentlichen Bauarbeiten ohne Zeitverzug vor sich gehen (Bild 2). Die Arbeitsbedingungen verbesserten sich wesentlich, da eine ebene Fläche (Sportplatz) ausgewählt werden konnte. Die Montagezeiten auf der eigentlichen Baustelle sanken dadurch fühlbar.
- b) Einfliegen der Stützen- und Brückenteile (Bild 3). Die Vormontage der Brücken, Stützen und Baugruppe der K 890 erfolgte in der

Nähe der Baustelle auf dem Boden, während bisher nach der herkömmlichen Methode die Brückenteile, Förderkettenröge und Ketten, Schieber, Klappenkästen, Geländer und Gitterroste, Spannkopf, Antrieb und Elevatorkopf in 14 m Höhe montiert werden mußten. Auch in dieser Bauphase zeigten sich die Erhöhung der Sicherheit und die Steigerung der Arbeitsproduktivität. Sofort nach beendeter Vormontage beginnt der Einflug der genannten Baugruppen.

Zuerst werden die 24 Siloberteile auf die gleichzeitig fertiggestellten Unterteile aufgesetzt (Bild 4).

Danach folgen die mit der Trogkettenförderbrücke verbundenen 2 Brückenstützen zwischen die Silos (Bild 5). Bei einer 24er-Silolanlage also viermal. Anschließend setzt man die restlichen Zwischenbrücken auf die Stützen. Es folgt die letzte Brücke für den Trogkettenförderer mit dem Antrieb und zuletzt fliegt man Brücken- und Elevatorkopf mit Spannstation ein (Bild 6 und 7).

Für die Montage aller 24 Silos und der Stahlkonstruktion aus 4 km Entfernung (Luftlinie) benötigten wir 7 Flugstunden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden:

Die Vorteile dieser neuen Montagetechnologie liegen

1. in einer enormen Zeiteinsparung. Die erwähnte Annaberger Anlage hätte nicht termingemäß übergeben werden können;
2. in der Verringerung der manuellen Arbeit;
3. in der Erhöhung der Sicherheit und Verringerung der Gefahrenquellen;
4. in einem rationellen Arbeitsablauf und -einsatz der AK. Die Arbeitsproduktivität erhöht sich;
5. in der Beseitigung von Standortsschwierigkeiten in ungünstigen Lagen, die die Vormontage behindern.

Im Bezirk Karl-Marx-Stadt werden 1970 weitere vier solcher Anlagen K 850 nach dieser neuen Technologie montiert (Bild 8). Die gesammelten Erfahrungen brachten bereits neue Erkenntnisse, die sich in weiteren Verbesserungen niederschlagen.

W. STUVE, Ltr. d. BfN

Ing. R. EIDAM, Chefmonteur

¹ Alle Bilder auf der 3. Umschlagseite