

Umwandlung von Kernflusssilos für Kraftfutter in Massenflusssilos

Optimierte Einbauten mit Hilfe der Finiten Element Methode

Um Verderb in Kraftfuttersilos zu verhindern, muss das Ausfließen im Massenfluss konzipiert werden. In ursprünglichen Kernflusssilos ist Massenfluss durch das nachträgliche Installieren von Einbautrichtern zu erzielen. Für das Optimieren dieser Einbautrichter wurde die Methode der Finiten Elemente (FEM) benutzt. Die Überprüfung der Ergebnisse erfolgte durch Versuche an einer Großsiloanlage.

Dr.-Ing. Thomas Schuricht war Doktorand in der Abt. „Technik der Aufbereitung, Lagerung und Konservierung“ (Leitung: Prof. Dr.-Ing. habil Christian Fürll) des Instituts für Agrartechnik Bornim e.V., Max Eyth Allee 100, 14469 Potsdam; e-mail: Thomas.Schuricht@warnowdesign.de; cfuerll@atb-potsdam.de
Die Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

Referierter Beitrag der **LANDTECHNIK**, die Langfassung finden Sie unter **LANDTECHNIK-NET.com**.

Schlüsselwörter

Kraftfuttersilo, Massenflusssilo, Trichter im Trichter

Keywords

Concentrate silo, mass flow silo, cone in cone

Literatur

Literaturhinweise sind unter LT 05303 über Internet <http://www.landwirtschaftsverlag.com/landtech/lo-cal/fliteratur.htm> abrufbar.

Bei der Lagerung von Konzentratfutter in Silos muss die Entleerung streng nach dem Prinzip „first in - first out“, also im Massenfluss, erfolgen, um die Bildung von Pilzen und Hefen sowie Toxinen zu vermeiden. Die Verweilzeiten der einzelnen Gutzone im Silo müssen deshalb nahezu gleich sein.

Massenflusssilos erfordern meist sehr geringe Trichterneigungswinkel zur Vertikalen. Aus diesem Grund gibt es vielfältige Bemühungen, mit Hilfe von Einbauten in Kernflusssilos Massenfluss zu erzeugen. Untersuchungen an einer Großsiloanlage ergaben, dass durch optimale Installation von starren koaxialen Einbauten in Kernflusssilos Massenfluss entsteht [1]. Nachteilig ist allerdings die relative Empfindlichkeit für asymmetrisches Fließen. Das „cone in cone“-Konzept eröffnet ebenfalls die Möglichkeit für das Erzeugen von Massenfluss in ursprünglichen Kernflusssilos [2]. Die Geometrie und Anordnung von Trichtereinbauten in Siloausläufen kann durch Anwendung der Finiten Elemente Methode (FEM) optimiert werden. Darüber wird nachfolgend berichtet.

Theoretische Untersuchungen

Das für die Berechnungen verwendete FEM-Programm „Silo-Flow-Program-System“ von Karlsson [3] und Klisinski [4] gewährleistet in der Ausgangsversion aufgrund des einfachen Aufbaus eines idealplastischen

Materialmodells mit wenigen Materialparametern numerisch stabile Simulationen für den Entnahmeprozess eines Silos.

Silo-Flow-Program-System

Die Bewegungsgleichungen für die Analysen sind in Eulerschen Koordinaten definiert:

$$\rho \dot{u}_i + \rho u_j u_{i,j} = \sigma_{ij,j} + f_i \quad (1)$$

mit dem Geschwindigkeitsfeld u_i , der konstanten Dichte ρ , dem Cauchy-Spannungstensor σ_{ij} und dem Lastvektor f_i . Das Materialmodell von Mohr-Coulomb erzeugt die ideal-plastische Fließbedingung im Hauptspannungsraum:

$$F(\sigma_{ij}) = mp + g(\theta)q - C = 0 \quad (2)$$

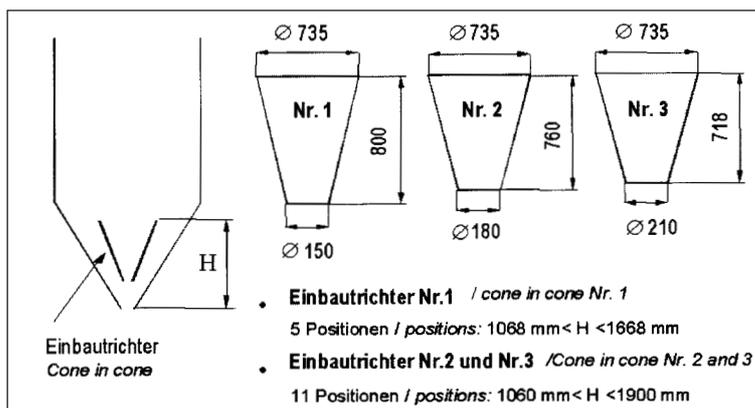
mit der hydrostatischen Spannung p , der Norm q des Spannungsdeviators, den Konstanten für die innere Reibung m und der Kohäsion C . Der Winkel θ definiert die Schnittebene für die Meridianfunktion $g(\theta)$ in der p - q -Ebene. Durch Minimieren der Materialparameter existierten nur lineare p - q -Funktionen.

Erweiterung des Materialgesetzes

Um die kompressiblen Eigenschaften des Kraftfutters zu berücksichtigen, ist das ursprüngliche Materialgesetz zu erweitern. Auf der Grundlage von hydrostatischen und konventionellen triaxialen Kompressionsversuchen wurden deshalb plastische Materialparameter für ein Materialgesetz mit geschlossener Fließfläche kalibriert. Diese geschlossene Fließfläche setzt sich aus der

Bild 1: Geometrie der untersuchten Einbautrichter und ihre Anordnung im Silo

Fig. 1: Geometry of the examined cone in cone and position in the silo



Fließbedingung nach Drucker-Prager und aus einer Fließkappe zusammen [5].

Vergleich der Ergebnisse aus numerischen Berechnungen mit Experimenten

Die experimentellen Untersuchungen wurden an der Großsiloanlage [6] des Instituts für Agrartechnik Bornim durchgeführt. Das Versuchssilo hat eine Höhe von 8 m und einen Durchmesser von 2,4 m. Die Trichterhöhe beträgt 1,86 m und der Auslaufdurchmesser 250 mm. Aufgrund des Trichterwinkels zur Vertikalen von 30° und den entsprechenden Wandreibungswinkeln für Kraftfutter erfolgt das Ausfließen ohne Einbauten im Kernfluss. Um Massenfluss zu erzielen, wurden verschiedene Einbautrichter nach dem „cone in cone - concept“ mit verschiedenen Geometrien untersucht (Bild 1).

Für die numerische Simulation wurde die rotationssymmetrische Modellierung für den idealisierten Spannungs- und Dehnungszustand benutzt.

Entsprechend dem zeitlichen Ablauf eines Versuchs an der Großsiloanlage unterteilen sich die Arbeitsschritte einer FEM-Simulation ebenfalls in das Befüllen mit anschließendem Entleeren. Die für die FEM-Berechnungen benutzten elastischen Parameter sind ausführlich in [5] enthalten. Sie wurden in den Materialuntersuchungen gewonnen.

Kernflusssilo ohne Einbautrichter

Für das untersuchte Silo ohne Einbautrichter weisen die Berechnungen und durchgeführten Experimente Kernfluss aus [5, 6].

Kernflusssilo mit Einbautrichter

In Bild 2 sind im oberen Teil die Vertikal- und die Horizontalgeschwindigkeiten des Gutes über dem Siloquerschnitt bei 20 sec und 80 sec Entleerungszeit dargestellt. Der untere Teil zeigt die Bewegung von Partikel-tracern während des Ausfließens.

Im Vergleich zum Silo ohne Einbautrichter zeigt jeweils das linke und mittlere Diagramm der Geschwindigkeitsprofile durch die Wirkung des Einbautrichters 2 in den Höhenpositionen $H=1060$ mm und 1380 mm ein Aufheben der starken Gradienten in den Vertikalkomponenten.

Dies deutet auf Massenfluss hin. Aus den experimentellen Verweilzeiten geht für $H=1060$ mm noch ein geringer Kernfluss und für $H=1380$ mm Massenfluss hervor. Bei $H=1900$ mm Einbauhöhe lag wiederum Kernfluss vor.

Mit dem Postprocessing kann qualitativ gut vorausberechnet werden, dass die verminderten Geschwindigkeitsgradienten eine Aussage zum Massenfluss mit wesentlich geringeren Entmischungstendenzen zulassen.

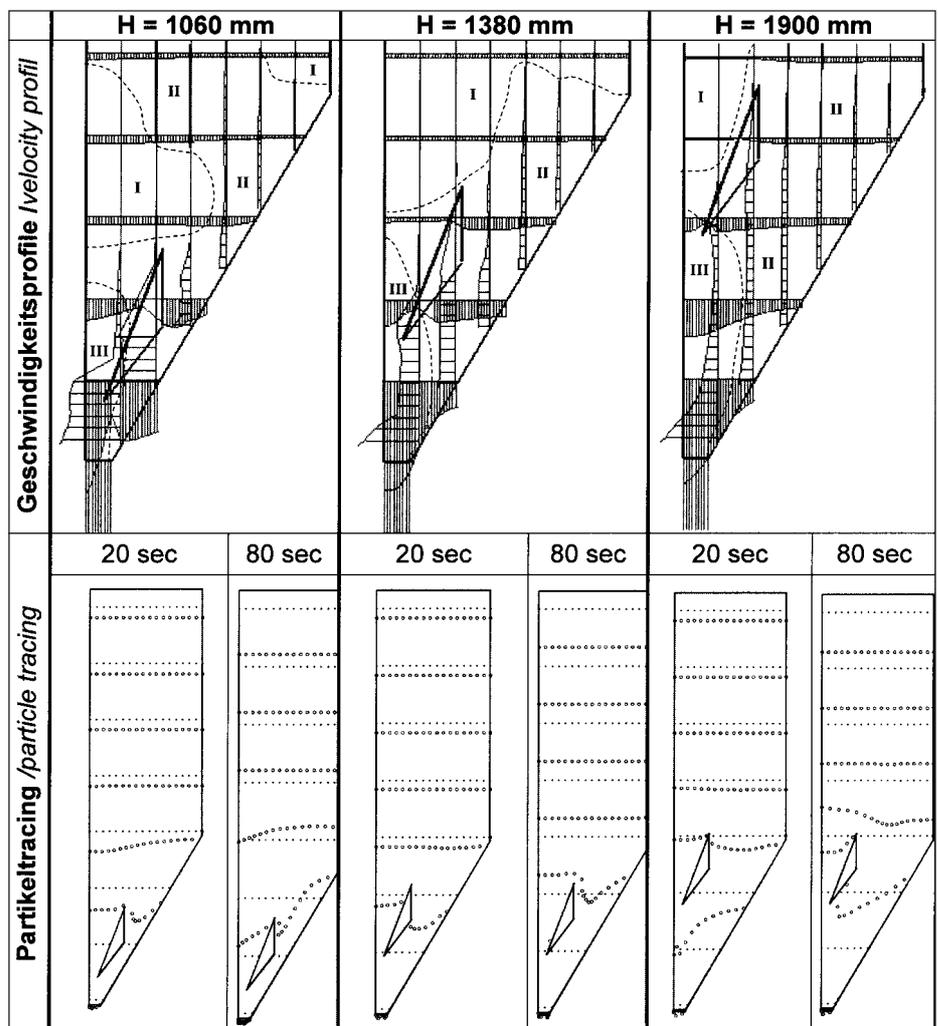


Bild 2: Berechnete Geschwindigkeitsprofile und Bewegung der Partikel-Tracer

Fig. 2: Calculated velocity profiles and movement of particle tracer

sen. In der Höhenposition $H=1060$ mm spiegeln sich die leicht erhöhten vertikalen Geschwindigkeitskomponenten im Bereich des unteren Einbautrichters auch in den FEM-Tracer-Bewegungen wieder. Für den Schafsbereich zeigen die Partikel-Tracer ein gleichmäßiges Absinken über dem gesamten Siloradius an. Mit Übergang zum Silotrichter beschleunigen die Partikel im Bereich der Symmetrieachse deutlich stärker und markieren entlang der Trichterwand eine Verzögerung im Bewegungsverhalten (Bild 2, unterer Teil). Die berechneten FEM-Verweilzeiten für $H=1380$ mm zeigen in den Partikel-Bewegungen geringste Gradienten im Geschwindigkeitsfeld und in den Verweilzeiten. Die berechneten Verweilzeiten verdeutlichen ein gleichmäßiges Bewegungsverhalten der Partikel-Tracer für den zentralen und den äußeren Bereich. Die oberste Höhenposition $H=1900$ mm veranschaulicht, dass die Anordnung des Einbautrichters nicht optimal ist.

Die Experimente zeigen für die Höhenpositionen $H=1110$ mm bis $H=1550$ mm des Trichters Massenfluss. In der untersten Höhenposition $H=1060$ mm und für $H=1630$ mm bis $H=1900$ mm ist in den Experimenten Kernfluss vorhanden.

Zusammenfassung

Für die Berechnungen wurde ein Programm benutzt, das in seiner Ausgangsversion die konstitutiven Gleichungen eines ideal-plastischen Materialgesetzes enthält. Mit der implementierten Erweiterung um ein neues Materialgesetz werden die kompressiblen Eigenschaften dieses Schüttguts berücksichtigt. Die komplette Siloentleerung wird in einer Fluiddefinition berechnet.

Auf Grundlage von hydrostatischen und konventionellen triaxialen Kompressionsversuchen wurden plastische Materialparameter für ein Materialgesetz mit geschlossener Fließfläche kalibriert. Die Ergebnisse wurden mit Versuchen in Großsilos überprüft. Anhand von Verweilzeitmessungen konnte man schließen, bei welchen Trichter-geometrien und Einbaupositionen aus dem ursprünglichen Kernfluss Massenfluss erzielt wird.

Der Vergleich zwischen Experiment und der numerischen Simulation zeigt eine gute qualitative Annäherung der FEM-Ergebnisse bei der Bewertung der Geschwindigkeitsverteilung im Silo.