

1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Seit jeher gibt es die Notwendigkeit verschiedenartige Massengüter zu speichern. Zum einen muss genügend Nahrung in erntefreien Zeiten vorhanden sein und zum anderen ist es aus logistischen und ökonomischen Gründen erforderlich Schüttgüter zwischenzulagern. Eine effektive Form ist die Speicherung in Silos. Diese können aus Holz, Stahl, Stahlbeton bzw. Spannbeton gebaut werden. Wesentlich vielfältiger sind die Materialien und Eigenschaften der Schüttgüter (Kapitel 4). Größe und Formen von Silobauwerken variieren sehr stark. Kleinere Stahlsilos, zur Zementlagerung, sind auf fast jeder Baustelle zu sehen. Größere Bauwerke aus Stahlbeton und Spannbeton sind für den Umschlag von Getreide und Futtermittel in Häfen errichtet worden. Bauhöhen von 80 m wurden schon überschritten, z. B. Silobatterie in Brake (Deutschland) [Ma 88]. Neben der Bauwerkshöhe sind, im Gegensatz zu Flüssigkeitsbehältern, die Grundrissabmessungen für die Wand- und Bodenlasten entscheidend. Je größer der einbeschriebene Durchmesser d_c (Bild 2.13) ist, umso höher sind die horizontalen Lasten auf die Silowand. Die Errichtung von Silos setzt sehr spezielles Wissen und Erfahrung voraus. Ebenso werden aus statischer Sicht sehr hohe Anforderungen an die Tragwerksplanung gestellt.

Die nationalen und internationalen Normen (Kapitel 2.3) versuchen die Schüttgutlasten mit der Theorie nach Janssen (Scheibenelementmethode) zu bestimmen. Dieses seit 1895 bestehende analytische Verfahren geht von einem konstanten Vertikaldruck über den Siloquerschnitt aus. Die Gleichgewichtsbetrachtungen werden anhand eines ebenen Schüttgutscheibenelementes mit der Höhe dz (Bild 2.11) formuliert. Die zu Beginn des Entleerens ansteigenden Horizontaldrücke können so nicht erfasst werden (Kapitel 2.3.2). Zur Ermittlung der Silolasten für die Entleerung werden in den internationalen Normen unterschiedliche semiempirische Wege gegangen (Kapitel 2.3). Eine Übereinstimmung der Ergebnisse ist in den meisten Fällen auszuschließen. Entsprechend hoch sind die Schäden an den Silobauwerken und stellen die Forschung immer wieder vor neue Aufgaben.

Ungenügende Lastansätze führten in der Vergangenheit zur vollständigen Zerstörung einiger Siloanlagen (Kapitel 10 in [Ma 88]). In anderen Fällen sind Nutzungsbeschränkungen die Folge. Durch sie ist oftmals nur noch ein unwirtschaftliches Betreiben der Anlage möglich.

Das Schäden an Silobauwerken nicht der Vergangenheit angehören kann aktuellen Artikeln, z. B. [Ka 04], entnommen werden. Bei diesen Zementsilos führte die große

Exzentrizität des Auslaufs zu erhöhten Schnittgrößen in der Silowand, für welche diese nicht bemessen wurden. Im Gegensatz zur [DIN 87] wird in [DIN 05] auf diesen Sachverhalt eingegangen. Große Exzentrizitäten sind in der [DIN 05] explizit berücksichtigt. Allerdings beziehen sie sich ausschließlich auf zylindrische Bauwerke. Andere Geometrien, z. B. Rechtecksilos, sind von diesen Verbesserungen ausgenommen.

Rechtecksilos mit vollexzentrischen Entleerungsöffnungen lassen sich nur mit Hilfe räumlicher Modelle beschreiben (Kapitel 10.3). Eine Rückführung auf ebene Systeme und eine damit verbundene vereinfachte numerische Berechnung ist nicht möglich. Räumliche Entleerungsvorgänge sind sehr komplex und bereiten in der numerischen Simulation erhebliche Schwierigkeiten. Das Materialverhalten ist ab dem beginnenden Fließen des Schüttgutes sehr komplex. Es erfordert sehr gute Stoffmodelle und ebenso stabile Rechenabläufe.

Aus diesen Gründen ist die räumliche Verteilung der Wandlasten, insbesondere während des Fließens, bisher weitgehend unbekannt. Entwicklungen einfacher analytischer Verfahren sind deshalb nicht möglich.

Diese Arbeit soll einen Beitrag zum besseren Verständnis der räumlichen Druckverteilung auf Silowände und Siloböden leisten. Mit Hilfe der Kontinuumsmechanik und komplexer Stoffmodelle sollen die statischen und dynamischen Vorgänge im Inneren eines Silos räumlich simuliert werden.

Gliederung der Arbeit:

Begonnen wird mit einem Überblick über den jetzigen Forschungsstand bezüglich der Schüttgutlasten in Silozellen bei exzentrischer Entleerung und einen Einblick in die benötigten kontinuumsmechanischen Grundlagen für die numerische Simulation. Ein Vergleich der Schüttgutdrücke nach verschiedenen Normen zeigt erhebliche Unterschiede und große Differenzen zu einer Finiten Elemente Berechnung. Es besteht somit die Notwendigkeit, genauere Verfahren zur Lastermittlung zu entwickeln.

Im Anschluss werden verschiedene Stoffmodelle für granulare Medien erörtert. Mit den beiden besten Modellen wird eine Entleerungsberechnung durchgeführt und die Schüttgutdrücke verglichen.

Es folgt eine Darstellung der numerischen Grundlagen der Silosimulationen. Die wesentlichen Teile des Finite Elemente Programms ‚SILO-05‘ werden beschrieben. Die Abbildung realitätsnaher Silos machte eine erhebliche Reduzierung der

Rechenzeiten erforderlich. Hierzu werden verschiedene Gleichungslöser getestet.

Anknüpfend folgen Vergleichsrechnungen von ‚SILO-05‘ mit einem kommerziellen FE-Programm.

Bevor der Vorschlag eines neuen Lastansatzes für die Schüttgutdrücke bei exzentrischer Entleerung gemacht wird, werden ausführliche Entleerungsberechnungen räumlicher Systeme durchgeführt. Weiterhin wird der vorgeschlagene Lastansatz mit der aktuellen Lastnorm, in Bezug auf das Tragverhalten und die Schnittgrößen in der Silowand, verglichen.

2 Schüttgutlasten bei exzentrischer Entleerung / Stand der Erkenntnis

2.1 Allgemeines

Weil der Bau sowie der Betrieb von Siloanlagen und die Siloforschung ein breit gefächertes Spektrum bietet, gibt es hierüber viele Veröffentlichungen. Numerische Simulationen mit exzentrischen Entleerungsöffnungen sind ein Teil des Forschungsgebietes. Arbeiten zu diesem Thema sind sehr speziell und ihre Anzahl ist stark beschränkt. Experimentelle Untersuchungen an Silogeometrien mit unsymmetrisch angeordneten Auslauföffnungen hingegen gibt es in stattlicher Anzahl. Weshalb konzentrierte sich bislang die Forschung mehr auf Versuche als auf numerische Simulationen? Zum einen kann es an der fehlenden Notwendigkeit und zum anderen kann es an der schwierigen numerischen Abbildung liegen. Geometrien mit exzentrischer Entleerungsöffnung können nicht auf ebene Systeme zurückgeführt werden (Kapitel 10.3.2). Es ist daher erforderlich Berechnungen räumlicher Systeme durchzuführen, welche an die Grenzen der zur Verfügung stehenden Rechnerkapazitäten stoßen. 3-dimensionale Untersuchungen werden in dieser Arbeit vorgestellt.

Das Füllen von Silos kann als nahezu statischer Vorgang angesehen werden, wenn man das Einrieseln des Granulats vernachlässigt. Numerische Simulationen sind sowohl mit ebenen als auch räumlichen Modellen und den vorhandenen Rechenprogrammen möglich. Erhebliche Probleme bereiten die Entleerungsberechnungen. Im Gegensatz zu den Füll- sind die Entleerungsvorgänge dynamischer Natur (Kapitel 3 und 5). Weiterhin weisen die Schüttgüter ein sehr komplexes Materialverhalten (Kapitel 4) auf. Numerische Simulationen der Siloentleerung bieten schon im ebenen Fall eine Herausforderung. Bei räumlichen Modellen treten verschiedene numerische Probleme auf, welche stabile und lange Entleerungszeiten bislang weitgehend verhinderten. Aus diesen Gründen konzentriert sich diese Arbeit auf die numerische Simulation von räumlichen exzentrischen Entleerungsvorgängen.

Zuvor erfolgt eine detaillierte Zusammenfassung der verschiedenen Arbeiten, welche sich mit den Schüttgutdrücken bei exzentrischer Entleerung beschäftigt haben.

2.2 Numerische Untersuchungen zur exzentrischen Entleerung

Ein ausführlicher Literaturüberblick, bis zum Jahre 1991, zu diesem Thema ist in Rombach [Ro 91] zu finden.

Die ersten exzentrischen Entleerungsberechnungen führte Gladen [Gl 85] durch. Basierend auf der Finite-Elemente-Methode wurde nur der ebene Verzerrungszustand (entspricht unendlich langer Spaltzelle) betrachtet. Hierbei blieben die Berechnungen auf ein Schüttgut, Sacramento River Sand, beschränkt.

Erste räumliche exzentrische Entleerungsberechnungen, basierend auf der Finite-Elemente-Methode, stellte **Rombach** [Ro 91] vor. In Bild 2.1 ist die der Berechnung zu Grunde liegende Silogeometrie dargestellt ($a = b = 6$ m; $H = 27$ m, $\mu = 0,4$). Der Auslauf ist voll exzentrisch aber in der Symmetrieachse (mittig) angeordnet. Für die Simulation wurde das Stoffmodell von Kolymbas mit einer konstanten Dichte und Viskosität verwendet. Die Diskretisierung des Schüttgutkörpers erfolgte mit isoparametrischen 8 Knoten Elementen. Die Reibung zwischen Schüttgut und Wand wurde mit Hilfe von Stabelementen iterativ dargestellt. Auf Grund sehr langer Rechenzeiten konnte nur der untere Silobereich abgebildet werden, wobei die Vertikaldrücke aus dem oberen Silobereich durch eine Auflast erfasst wurden.

Basierend auf diesem FE-Programm werden die Schüttgutdrücke in der vorliegenden Arbeit ermittelt. Auf vorgenommene Programmänderungen wird in den jeweiligen Kapiteln dieser Arbeit detailliert eingegangen.

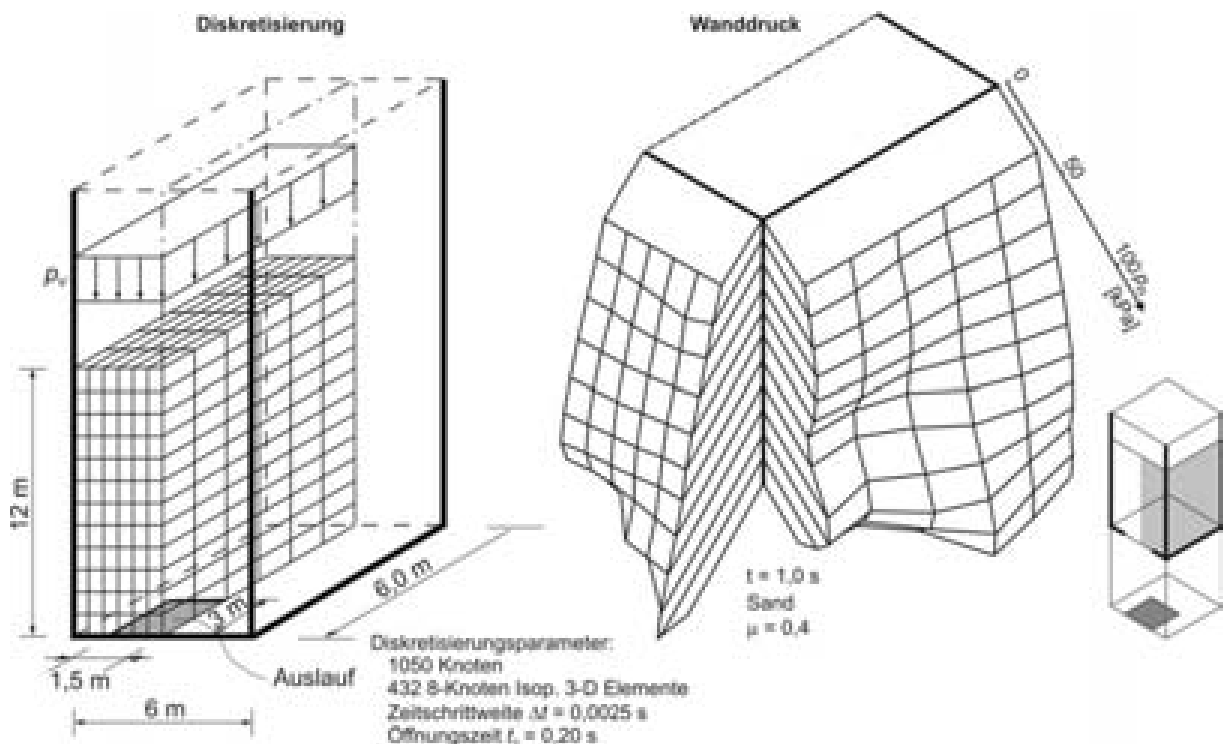


Bild 2.1: Silogeometrie, Diskretisierung und Wanddrücke bei exzent. Entleerung nach Rombach

Dahlhaus [Da 95] modellierte stochastische Formulierungen des Silodruckproblems unter Verwendung räumlicher Zufallsfelder. Als Betrachtungsweise wählte er das Lagrangesche (ortsfeste) Bezugssystem (Kapitel 3.2) wodurch nur kurze Entleerungszeiten möglich sind. Zur Lösung im Zeitbereich entschied er sich für die Newmark-Methode (Kapitel 5.2). Variiert wurden die Kräfte- und Randbedingungen, die kinematischen Randbedingungen, die Materialeigenschaften und die Silogeometrie. Der Parameterstudie lagen zwei rotationssymmetrische Silogeometrien (Bild 2.2) zugrunde. Um die Auswirkungen auf die Beanspruchungen der Siloschale zu erfassen, bildete er eine rotationssymmetrische Silogeometrie räumlich ab. Er kam zu der Feststellung, dass der Winkel der inneren Reibung φ beim Füllen zur betragsmäßig größten Beeinflussung der Silodrücke führt. Während des Entleerens kam es zum Anstieg der Schüttgutlasten für alle betrachteten Stoffparameter im Vergleich zum Füllen.

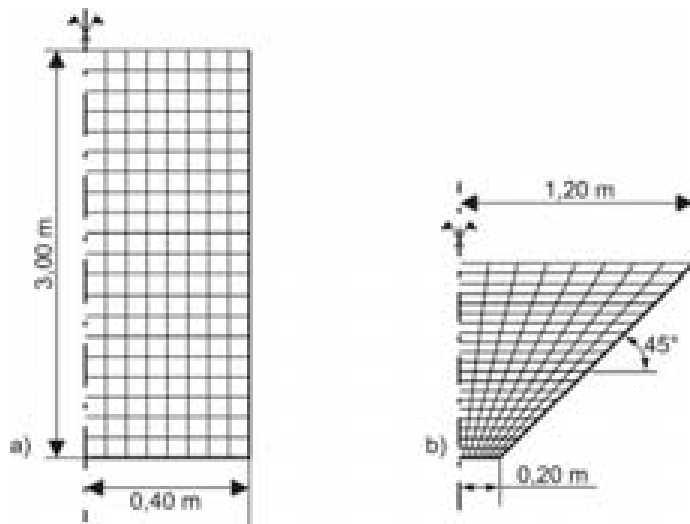


Bild 2.2: Systemgeometrie und Diskretisierung: a) zylindrischer und b) trichterförmiger Silo nach Dahlhaus

Jarrett u.a. [Mo 95] führten Messungen an einem Silo mit quadratischer Grundfläche (2 m x 2 m) und einer Gesamthöhe von 3 m (Schaft 2 m und Trichter 1 m) durch. Messwerte sind nur während des Füllvorganges aufgenommen worden. Alle Wände müssen auf Grund ihrer geringen Steifigkeit als flexibel betrachtet werden. Bei konstantem Abstand zur Entleerungsöffnung wirkten extrem unterschiedlich hohe Horizontaldrücke auf die Außenwände. Diese nahmen von der Wandmitte zum Eckbereich von 6,8 kPa auf 17,3 kPa zu. Vergleichsrechnungen mit analytischen Modellen (Janssen etc.) zeigten, dass diese sehr weit auf der sicheren Seite liegen. Die Ursache dafür wird in der Vernachlässigung der Interaktion zwischen Schüttgut – Wand und in der Voraussetzung sehr steifer Wände in diesen Modellen gesehen.

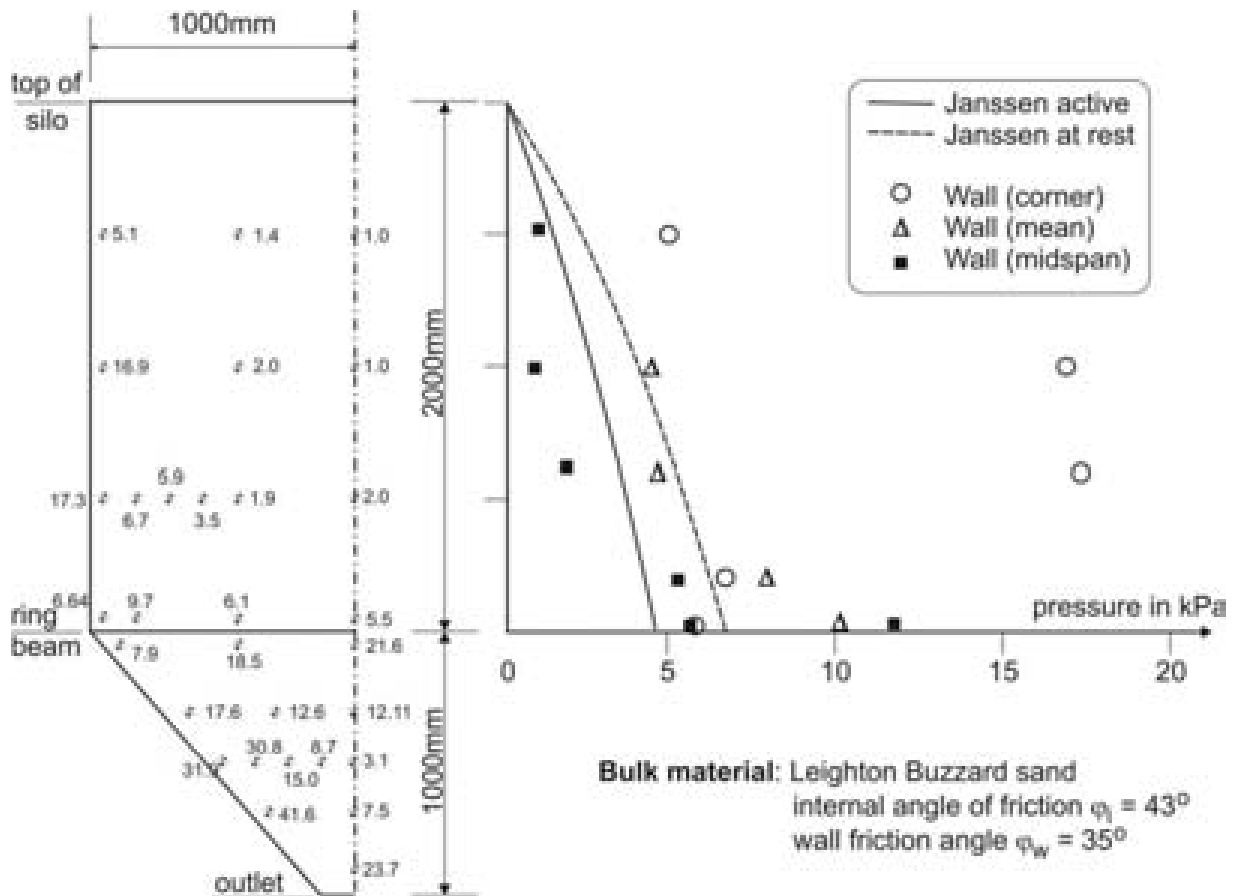


Bild 2.3: Gemessene Wandnormaldrücke nach dem Füllen in kPa [Mo 95]

Ruckenbrod [Ru 95] untersuchte die dynamischen Effekte bei der Entleerung, wobei er den Schwerpunkt seiner Arbeit auf das Anfangsschlagen und selbsterregte bzw. selbsterhaltende Schwingungen legte. Auf Grund hoher Rechenzeiten beschränkte sich Ruckenbrod bei seinen FE-Simulationen auf ebene und rotationssymmetrische Geometrien mit zentrisch angeordneter Entleerungsöffnung (Bild 2.4). Die dynamischen Phänomene erforschte er in Abhängigkeit von z.B. dem Öffnungsdurchmesser, wobei er für den Füll- und Entleerungsvorgang unterschiedliche Silogeometrien nutzte (Bild 2.4). Durch die symmetrischen Randbedingungen musste nur eine Silohälfte diskretisiert werden. Die Grundlage von Ruckenbrods Simulationen bildete das von Rombach [Ro 91] entwickelte Forschungsprogramm ‚SILO‘.

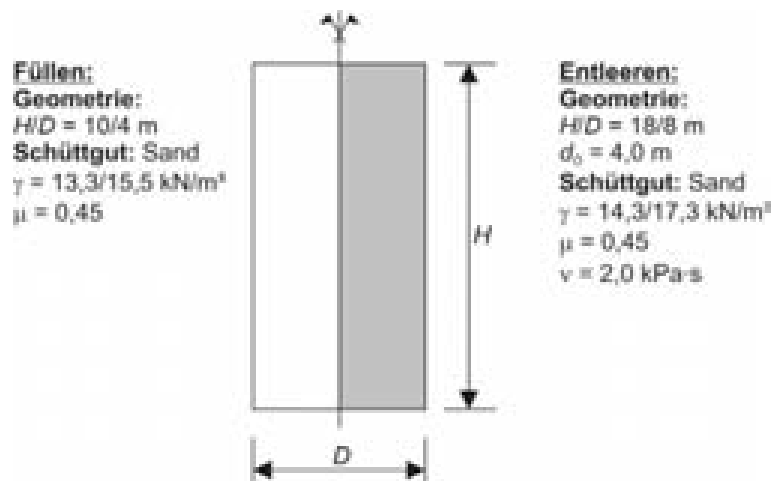


Bild 2.4: Silogeometrie nach Ruckebrod [Ru 95]

Für die Berechnungen wählte er das Eulersche Bezugssystem und ein hypoplastisches Stoffmodell. Dieses wurde um den Dichteindex I_e erweitert, bezogen auf die Grundversion des Stoffmodells von Wu [Wu 92]. Ziel dieser Modifikation ist die Erfassung des Einflusses der Schüttgutdichte bzw. der zugeordneten Porenzahl auf das Schüttgutverhalten (Pyknotropie) und der Abhängigkeit des Stoffverhaltens vom vorliegenden Spannungsniveau (Barotropie).

Lehmann [Le 96] erforschte das Verhalten von Silos mit Einbauten (Bild 2.5). Ein Schwerpunkt dieser Arbeit wurde auf die zwei- und dreidimensionalen Erweiterungen des Rechenprogramms SILO, welches die Grundlage bildete, gelegt. Er führte aber nur ebene Entleerungsberechnungen durch. Lediglich 2 räumliche Füllberechnungen, Geometrie siehe Bild 2.5, dienten der Überprüfung der zur zweidimensionalen Diskretisierung getroffenen vereinfachenden Annahmen. Für die Simulation verwendete er das Verfahren der Finiten Elemente gekoppelt mit dem Eulerschen Bezugssystem und dem Stoffmodell von Kolymbas. Die zur Berechnung erforderlichen Silogeometrien generierte Lehmann für den 2d Fall mit einem, in Fortran programmierten, Preprozessor. Räumliche Netze wurden mit einem kommerziellen Preprozessor (PATRAN) erzeugt.