

Extraction of bulk materials
Abzug von Schüttgütern

Extraction characteristics of bulk materials from silos

Part 1: Basic experimental and theoretical principles

Luigi Di Matteo¹, Jörg Schwedes²

¹ DI MATTEO Förderanlagen GmbH & Co. KG, Beckum/Germany

² Institut für Partikeltechnik, der Technischen Universität Braunschweig/Germany

Summary: As part of this work experimental investigations were carried out with a rectangular silo. The main focus was on the stress states during emptying by two silo extraction screws and the relationships between the wall normal stresses, the flow profiles and the torques required for the extraction screws. Among other things it was established that the wall normal stresses are lower in moving zones than in stationary zones. The findings and relationships that were discovered can be applied reliably to industrial plants. Part 1 of the article deals with the basic experimental and theoretical principles and Part 2 deals with the test results.

Austragverhalten von Schüttgütern aus einem Silo

Teil 1: Experimentelle und theoretische Grundlagen

Zusammenfassung: Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden experimentelle Untersuchungen an einem rechteckigen Silo durchgeführt. Im Vordergrund standen die Spannungszustände beim Entleeren mittels zweier Siloabzugschnecken sowie die Zusammenhänge zwischen den Wandnormalspannungen, den Fließprofilen und den erforderlichen Drehmomenten für die Abzugschnecken. Unter anderem konnte festgestellt werden, dass die Wandnormalspannungen in bewegten Zonen niedriger ausfallen als in ruhenden Zonen. Die gewonnenen Erkenntnisse und Zusammenhänge ermöglichen eine zuverlässigere Übertragung auf Industrieanlagen. Teil 1 des Beitrages beschäftigt sich mit den experimentellen und theoretischen Grundlagen, Teil 2 mit den Versuchsergebnissen.

1 Introduction

Silos have been used for centuries for storing bulk materials. It is important not only that the required quantity of bulk material can be stored in a silo but also that it can be emptied out of the silo at the required moment. The way the silo is emptied can, depending on the nature of the bulk material, play a central role. Furthermore, mass flow is usually the required flow profile, especially if the bulk material is sensitive to ageing or tends to consolidate with time. Mass flow is understood as the state in which the entire contents of the silo are in motion during the emptying and there are no dead zones. Process engineering silo design is necessary to ensure trouble-free emptying of a bulk material from a silo and is now state of the art. The optimum silo geometry for achieving mass flow is determined by taking the bulk material properties into account. The stresses that occur in the bulk material are of central importance in the silo design. Ever since Janssen [1], i.e. over a hundred years ago, people have been concerned with these stresses in silos. Janssen examined the stresses in a silo shaft in 1895. This was followed later by numerous works that considered the stress distribution in the cone. The best known are the works by Jenike [2, 3] and Schwedes [4]. The method of calculation employed by Jenike, the so-called Jenike method, now forms a central element in the process engineering design of a silo.

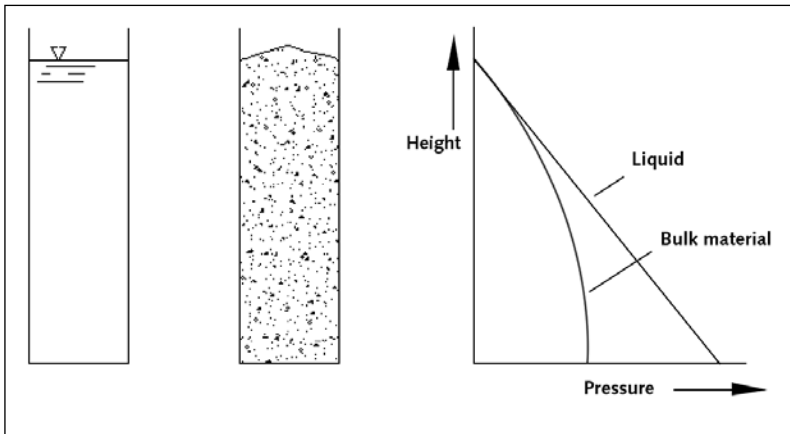
It often happens in practice that the silo geometry determined during the silo design cannot be implemented because, for example, of structural factors in an existing building or for cost reasons. It is often necessary to use an existing silo for a different bulk material. If process engineering problems are expected for a silo during extraction of the bulk material then suitable measures have to be taken that will have a beneficial effect on the bulk material flow in the silo. Extraction units are normally used. In addition to their main task of extracting the bulk material they also assist or stimulate the bulk material flow in and out of a silo. During this process the extraction units should ensure controlled and possibly also metered removal of the bulk material. The extraction units often used in practice are belt conveyors, apron conveyors, troughed chain conveyors, vibrating troughs, rotary-vane feeders and screw conveyors. With the exception of rotary-vane feeders these extraction units are, in principle, also suitable for extracting bulk materials from a rectangular, oblong, silo. A characteristic of belt conveyors, apron conveyors and troughed chain conveyors is that they are linear conveyors. This means that the belt, slat cell or chain moves linearly relative to the silo over the entire outlet opening in the direction of discharge. Uniform extraction of the bulk material over the entire outlet cross-section can only be ensured to a limited extent and requires adaptation of the silo geometry [5]. Not only are screw conveyors simple, inexpensive and enclosed units but they also have the advantage when used as silo extraction screws that the extraction of the bulk material is achieved by rotation. In contrast to linear conveyors, in which a section of belt, a chain segment with flights or a slat cell passes through the entire outlet opening from back to front, the screw flights or segments always remain within the outlet opening in the same position relative to the direction of conveying. This means that the screw geometry can be optimally adjusted so that theoretically the extraction of bulk material takes place over the entire outlet opening.

It is accepted that different stresses occur in regions of the bulk material that are flowing at different velocities [4–8]. If an ex-

1 Einleitung

Silos werden seit Jahrhunderten für die Lagerung von Schüttgütern eingesetzt. Dabei ist es nicht nur wichtig, dass sich in einem Silo eine geforderte Menge an Schüttgut lagern lässt, sondern auch, dass es zum erforderlichen Zeitpunkt aus dem Silo entleert werden kann. Je nach Beschaffenheit des Schüttguts können Art und Weise der Entleerung aus dem Silo eine zentrale Rolle spielen. Des Weiteren wird beispielsweise als Fließprofil meistens Massenfluss gefordert, insbesondere wenn das Schüttgut alterungsempfindlich ist oder zur Zeitverfestigung neigt. Unter Massenfluss versteht man den Zustand, bei dem beim Entleeren die gesamte Silofüllung in Bewegung gerät und somit keine toten Zonen entstehen. Um die problemlose Entleerung eines Schüttguts aus einem Silo sicherzustellen, ist eine verfahrenstechnische Siloauslegung notwendig und gehört heutzutage zum Stand der Technik. Dabei wird unter Berücksichtigung der Schüttguteigenschaften die optimale Silogeometrie für die Erzielung von Massenfluss ermittelt. Eine zentrale Bedeutung bei der Siloauslegung spielen die auftretenden Schüttgutspannungen. Mit diesen Spannungen in Silos befasst man sich seit Janssen [1], also nunmehr seit über hundert Jahren. Janssen betrachtete 1895 die Spannungen im Siloschaft. Später folgten zahlreiche Arbeiten, die den Spannungsverlauf im Trichter berücksichtigen. Am bekanntesten sind die Arbeiten von Jenike [2–3] und Schwedes [4]. Die Berechnungsmethode von Jenike, das so genannte Jenike-Verfahren, ist heute ein zentraler Baustein bei einer verfahrenstechnischen Siloauslegung.

In der Praxis kommt es häufig vor, dass die im Rahmen einer Siloauslegung ermittelte Silogeometrie, zum Beispiel aufgrund baulicher Gegebenheiten in einem bestehenden Gebäude oder aus Kostengründen nicht realisiert werden kann. Oft soll ein bereits vorhandenes Silo für ein anderes Schüttgut weiter genutzt werden. Sind verfahrenstechnisch für ein Silo Probleme beim Schüttgutaustrag zu erwarten, so sind geeignete Maßnahmen zu ergreifen, die den Schüttgutfluss im Silo positiv beeinflussen. In der Regel werden Austraggeräte eingesetzt. Neben ihrer Hauptaufgabe des Schüttgutabzugs zeichnen sie sich dadurch aus, dass sie den Schüttgutfluss in und aus einem Silo unterstützen bzw. anregen. Dabei sollen Austraggeräte eine kontrollierte und gegebenenfalls dosierte Entnahme des Schüttguts sicherstellen. In der Praxis häufig anzutreffende Austraggeräte sind Gurtförderer, Plattenbandförderer, Trogkettenförderer, Schwingrinnen, Zellenradschleusen und Schneckenförderer. Mit Ausnahme der Zellenradschleusen sind die oben genannten Austraggeräte grundsätzlich auch dafür geeignet, Schüttgut aus einem rechteckigen, länglichen Silo auszutragen. Gurtförderer, Plattenbandförderer und Trogkettenförderer sind dadurch gekennzeichnet, dass es sich um Linearförderer handelt. Das heißt, der Gurt, die Plattenzellen oder die Kette bewegen sich linear und, relativ zum Silo, über die gesamte Auslauföffnung in Austragrichtung. Der gleichmäßige Austrag des Schüttguts über den gesamten Auslaufquerschnitt kann nur beschränkt sichergestellt werden und erfordert Anpassungen der Silogeometrie [5]. Schneckenförderer in Form von Siloabzugschnecken genießen den Vorteil, abgesehen davon, dass es sich um einfache, kostengünstige und geschlossene Geräte handelt, dass der Schüttgutaustrag durch Rotation erzielt wird. Im Gegensatz zu den Linearförderern, bei denen ein Gurtabschnitt, ein Kettensegment mit Mitnehmern oder eine Plattenzelle von hinten bis vorne die gesamte Auslauföffnung durchlaufen, verbleiben die Schneckenflügel bzw. Segmente relativ zur Förderrichtung immer an der gleichen Stelle innerhalb der Auslauföffnung. Da-



1 Qualitative pressure and stress distribution curves for bulk materials and liquids in containers [10]

Qualitative Druck- bzw. Spannungsverläufe für Schüttgüter und Flüssigkeiten in Behältern [10]

traction unit withdraws bulk material unevenly then it follows that this will generate regions with different velocities, and therefore different stresses. Even with uniform bulk material extraction higher stresses will occur at the forward extraction end face when using an extraction unit such as silo extraction screws because of the bulk material friction. So far these increased stresses caused by the extraction unit have not been either quantitatively or qualitatively investigated. However, an understanding of this increased stressing can be of significant importance if the intention is to store and extract bulk materials that tend to consolidate. Even if the silo geometry means that only small stresses would occur at the outlet it is sometimes possible for critical increases in stress to be generated and exceeded by the extraction unit and cause excessive consolidation or flow problems in the bulk material. The extraction unit and the silo affect one another and are dependent on each other. Firstly, the extraction unit influences the bulk material flow and the stresses that occur in the silo and, secondly, the stresses in the silo in turn affect the extraction unit, e.g. with respect to the requisite drive rating. This publication indicates the relationships between the normal wall stresses that occur and the extraction characteristics of silo extraction screws in a silo.

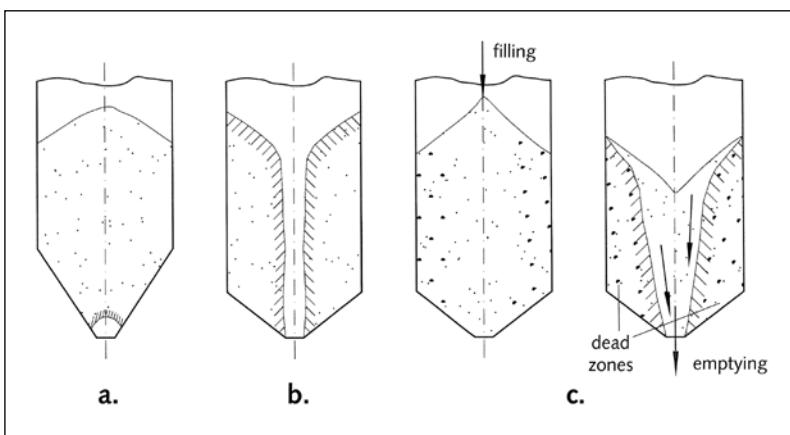
mit kann die Schneckengeometrie so optimal eingestellt werden, dass theoretisch über der gesamten Auslauföffnung ein Schüttgutaustrag erfolgt.

Es gilt als allgemein bekannt, dass in unterschiedlich schnell fließenden Bereichen des Schüttguts unterschiedliche Spannungen auftreten [4–8]. Zieht ein Austraggerät ungleichmäßig Schüttgut ab, entstehen folglich Bereiche mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und damit auch unterschiedlichen Spannungen. Selbst bei einem gleichmäßigen Schüttgutabzug treten aufgrund der Schüttguteinwirkung beim Einsatz eines Austraggerätes wie beispielsweise Siloabzugschnecken höhere Spannungen an der vorderen, stirnseitigen Austragseite auf. Bislang wurden diese durch das Austraggerät verursachten Spannungserhöhungen weder quantitativ noch qualitativ untersucht. Die Kenntnis dieser Spannungserhöhungen kann jedoch von signifikanter Bedeutung sein, wenn Schüttgüter gelagert und ausgetragen werden sollen, die zur Verfestigung neigen: Auch wenn aufgrund der Silogeometrie im Auslaufbereich nur geringe Spannungen auftreten würden, können durch das Austraggerät gegebenenfalls kritische Spannungserhöhungen erreicht und überschritten werden und somit unzulässige Schüttgutverfestigungen bzw. Schüttgutflussprobleme auslösen. Austraggerät und Silo beeinflussen sich gegenseitig und sind voneinander abhängig: Zum einen beeinflusst das Austraggerät den Schüttgutfluss und die auftretenden Spannungen im Silo, zum anderen beeinflussen die Spannungen im Silo wiederum das Austraggerät, z. B. hinsichtlich der erforderlichen Antriebsleistung. Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden die Zusammenhänge zwischen den auftretenden Wandnormalspannungen und dem Austragverhalten von Siloabzugschnecken in einem Silo aufgezeigt.

lagert und ausgetragen werden sollen, die zur Verfestigung neigen: Auch wenn aufgrund der Silogeometrie im Auslaufbereich nur geringe Spannungen auftreten würden, können durch das Austraggerät gegebenenfalls kritische Spannungserhöhungen erreicht und überschritten werden und somit unzulässige Schüttgutverfestigungen bzw. Schüttgutflussprobleme auslösen. Austraggerät und Silo beeinflussen sich gegenseitig und sind voneinander abhängig: Zum einen beeinflusst das Austraggerät den Schüttgutfluss und die auftretenden Spannungen im Silo, zum anderen beeinflussen die Spannungen im Silo wiederum das Austraggerät, z. B. hinsichtlich der erforderlichen Antriebsleistung. Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden die Zusammenhänge zwischen den auftretenden Wandnormalspannungen und dem Austragverhalten von Siloabzugschnecken in einem Silo aufgezeigt.

2 Grundlagen

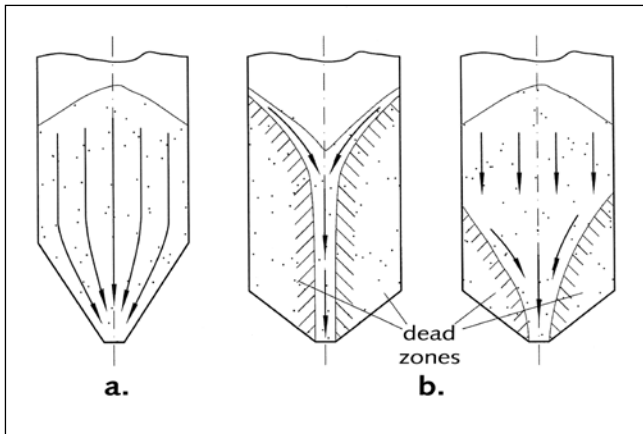
Bild 1 verdeutlicht anschaulich die unterschiedlichen Druck- bzw. Spannungsverläufe von Schüttgütern und Flüssigkeiten: In einem mit Flüssigkeit gefüllten Behälter bildet die Flüssigkeit eine waagerechte Oberfläche (Bild 1a). Der Flüssigkeitsdruck steigt mit zunehmender Tiefe linear und damit hydrostatisch an (Bild 1c). Bei einem mit Schüttgut gefüllten Behälter bildet sich, eine zentrische Befüllung angenommen, ein Schüttgutkegel (Bild 1b). Dies liegt daran, dass ein Schüttgut bereits in Ruhe Schubspannungen übertragen kann. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Behälterwand einen Teil des Gewichtes der Schüttgutsäule auf. Dementsprechend strebt der Druck in einem Schüttgut mit zunehmender Tiefe einem Maximal- und Grenzwert zu.



2 The most frequent problems that occur when bulk materials are stored in and flow out of a silo – bridging (a), rat-holing (b) and segregation (c) [5]

Die häufigsten Probleme beim Lagern und Ausfließen von Schüttgut in einem Silo – Brückenbildung (a), Schachtbildung (b) und Entmischung [5]

Die häufigsten Probleme beim Lagern und Fließen von Schüttgut in einem Silo sind Brückenbildung, Schachtbildung und Entmischung (**Bild 2**). Bei der Brückenbildung bildet sich oberhalb der Auslauföffnung ein stabiles Schüttgutgewölbe, welches den weiteren Schüttgutausschluss verhindert (Bild 2a). Bei der Schachtbildung fließt nur das Schüttgut aus, das sich unmittelbar oberhalb der Auslauföffnung befindet. Dadurch entsteht ein vertikaler Schacht (Bild 2b). Eine Entmischung nach Partikelgröße, Partikelform oder Partikeldichte ist beim Füllen



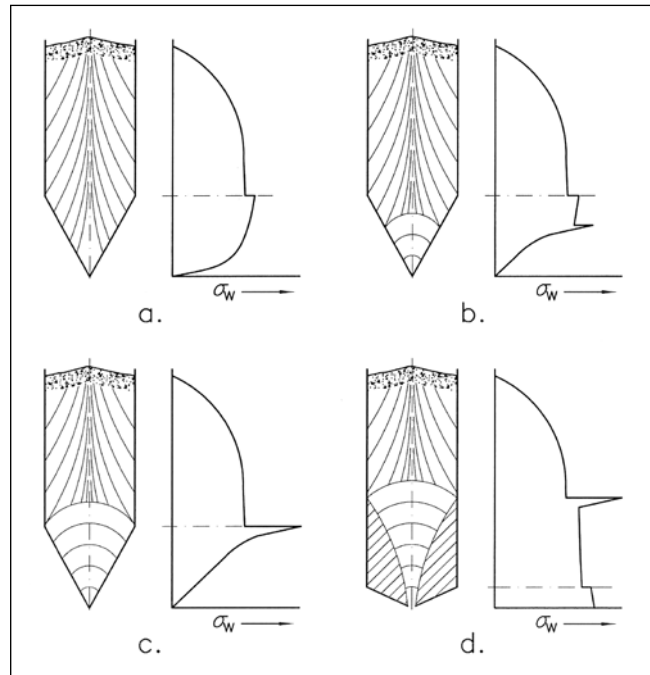
3 Flow profiles – mass flow (a) and funnel flow (b) [5]
Fließprofile – Massenfluss (a) und Kernfluss (b) [5]

2 Basic principles

Figure 1 provides a clear illustration of the different pressure and stress distribution curves for bulk materials and liquids – in a container filled with liquid the liquid forms a horizontal surface (Fig. 1a). The liquid pressure increases linearly, and hence hydrostatically, with increasing depth (Fig. 1c). In a container filled with bulk material a cone of bulk material is formed, assuming central filling (Fig. 1b). This is because a bulk material can transmit shear stresses even when at rest. With increasing depth the container wall takes part of the weight of the column of bulk material. Consequently, with increasing depth the pressure in a bulk material rapidly approaches a maximum and limiting value.

The most frequent problems encountered when bulk materials are stored and flow in a silo are bridging, rat-holing and segregation (Fig. 2). With bridging the bulk material forms a stable arch above the outlet opening that prevents any further discharge of the material (Fig. 2a). With rat-holing the only material that flows out is the bulk material directly above the outlet. This results in a vertical shaft (Fig. 2b). Segregation by particle size, particle shape or particle density can occur when a silo is being filled (Fig. 2c). This is most serious with bulk materials with a wide particle size distribution. With central filling the larger particles collect at the perimeter and the fines collect in the centre. When the flow profile is examined a distinction is made between mass flow and funnel flow (Fig. 3) [2–6, 8–9]. The aim is usually to achieve mass flow because all the material in the silo moves during the discharge, while dead zones are formed with funnel flow. These dead zones are regions in which the bulk material is stationary at first (Fig. 3b) and only moves during complete emptying. Very wide residence time distributions occur in funnel flow silos because of the dead zones.

A stress distribution curve of the type shown in Figure 4 is formed after an empty silo has been filled. This stress state (Fig. 4a) is also designated an active stress state or filling state. The stress in the silo shaft increases in the downward direction with increasing distance from the surface of the bulk material and tends towards a maximum value. The transition to the cone causes a point of discontinuity for the wall normal stress σ_w . The stress in the cone may rise further or decrease depending on the geometry. A striking feature of the filling state is that the greatest principal stress σ_1 at the silo axis points vertically



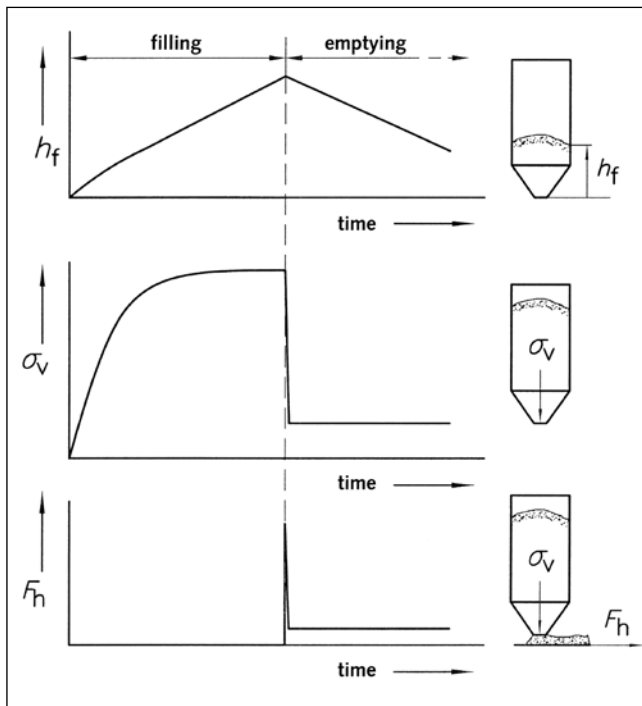
4 Qualitative distribution curves of the normal stress at the silo wall and assumed trajectories of the greatest principal stress; b, c: mass flow, d: funnel flow [5]

Qualitative Verläufe der Normalspannung auf die Silowand und angenommene Trajektorien der größten Hauptspannung, b, c: Massenfluss, d: Kernfluss [5]

eines Silos möglich (Bild 2c). Am gravierendsten sind Entmischungen bei Schüttgütern mit einer breiten Partikelgrößenverteilung. Dabei sammeln sich bei einer zentralen Befüllung die größeren Partikel in der Peripherie und das Feingut sammelt sich im Zentrum. Betrachtet man die Fließprofile, so unterscheidet man zwischen Massenfluss und Kernfluss (Bild 3) [2–6; 8–9]. Massenfluss wird üblicherweise angestrebt, weil dabei während des Ausfließens die gesamte Silofüllung in Bewegung kommt. Im Gegensatz dazu bilden sich bei Kernfluss tote Zonen, das heißt Bereiche, in denen das Schüttgut zunächst in Ruhe verbleibt (Bild 3b) und erst bei vollständiger Entleerung in Bewegung gerät. Wegen der toten Zonen ergeben sich bei Kernflusssilos sehr breite Verweilzeitverteilungen.

Nach der Befüllung eines leeren Silos ergibt sich ein Spannungsverlauf gemäß Bild 4. Diesen Spannungszustand (Bild 4a) bezeichnet man auch als aktiven Spannungszustand oder Füllzustand. Im Siloschaft nimmt die Spannung mit zunehmendem Abstand zur Schüttgutoberfläche nach unten hin zu und strebt dabei einen Maximalwert an. Der Übergang zum Trichter verursacht eine Unstetigkeitsstelle für die dargestellte Wandnormalspannung σ_w . In Abhängigkeit von der Geometrie kann im Trichter die Spannung weiter ansteigen oder abnehmen. Markantes Merkmal für den Füllzustand ist, dass die größte Hauptspannung σ_1 in der Siloachse in die vertikale Richtung nach unten zeigt. Die eingezeichneten Kurven sind Trajektorien der größten Hauptspannung σ_1 .

Sobald das Schüttgut erstmalig aus dem Silo abgezogen wird, schlägt der aktive Spannungszustand im Trichter vom Auslauf ausgehend in den passiven Spannungszustand um (Bild 4b). Ausgehend von der Trichterspitze, breitet sich im konvergenen Trichter das radiale Spannungsfeld nach oben hin bis



5 Behaviour with time of the filling height h_f , vertical stress σ_v and extraction force F_h [5]

Zeitlicher Verlauf von Füllhöhe h_f , Vertikalspannung σ_v und Abzugskraft F_h [6]

downwards. The curves shown are trajectories of the greatest principal stress σ_1 .

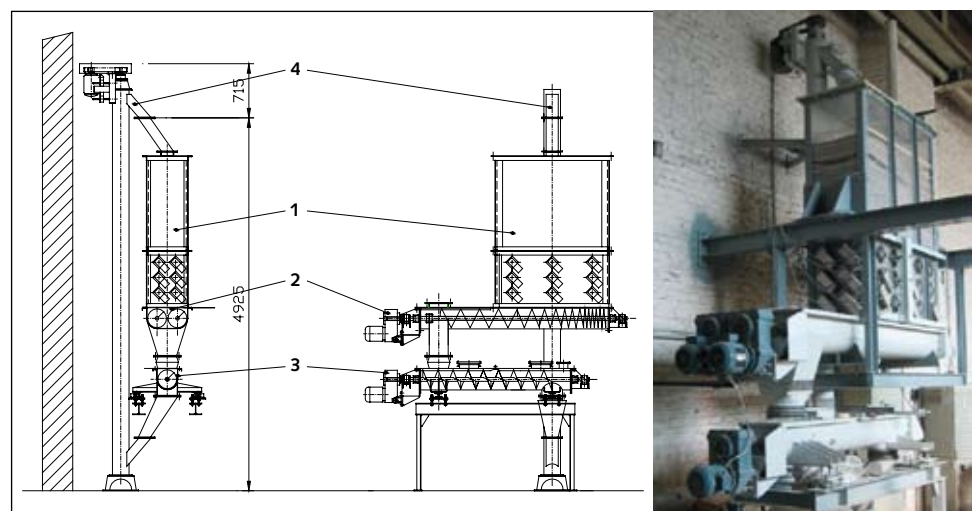
As soon as the bulk material starts to be extracted from the silo the active stress state in the cone changes abruptly to the passive stress state, starting from the outlet (Fig. 4b). Starting from the tip of the cone the radial stress field in the convergent cone spreads upwards as far as the transition to the vertical silo shaft (Fig. 4c). The active stress field is retained in the vertical silo shaft even while the bulk material is being extracted. If the extraction of bulk material is interrupted then the entire stress state is retained just as it is.

A characteristic of the passive stress field is that the trajectories of the greatest principal stress σ_1 run horizontally at the silo axis. The "switch" forms at the transition from passive to active stress field and designates the stress peak that marks the point of transition from the active to the passive stress field (Fig. 4 b–d). The stress peaks are a consequence of the equilibrium of forces between the weight of the entire filling of bulk material and the vertical components of the wall normal stresses and wall shear stresses [5]. If dead zones (funnel flow) are formed in a silo during the extraction (Fig. 4d), then a stress peak also occurs at the point at which the dead zone meets the silo wall. This is because, as with a cone, a convergent flow of bulk material is formed inside

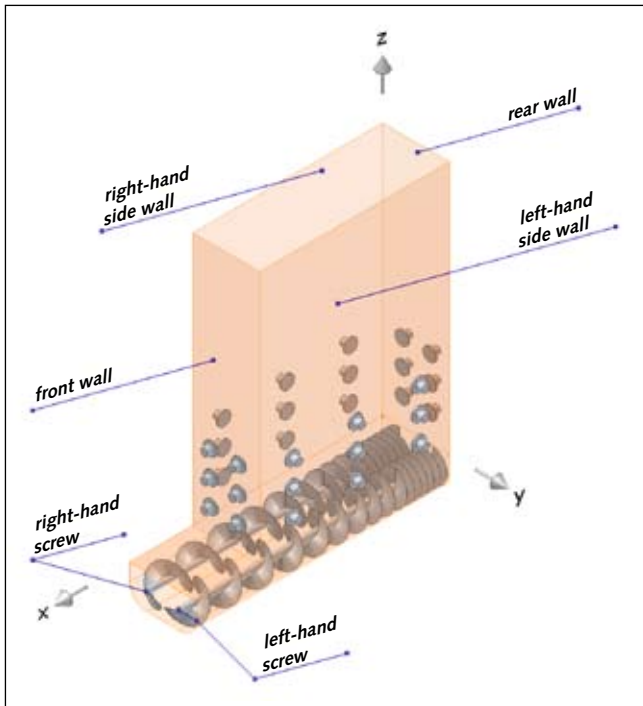
zum Übergang zum vertikalen Siloschaft aus (Bild 4c). Im vertikalen Siloschaft bleibt das aktive Spannungsfeld auch bei fortschreitendem Schüttgutabzug erhalten. Wird der Schüttgutabzug unterbrochen, so bleibt der gesamte Spannungszustand ebenso erhalten.

Kennzeichnend für das passive Spannungsfeld ist, dass die Trajektorien der größten Hauptspannung σ_1 in der Siloachse horizontal verlaufen. Der so genannte „switch“ bildet sich am Übergang vom passiven zum aktiven Spannungsfeld aus und bezeichnet die Spannungsspitze, welche die Übergangsstelle vom aktiven zum passiven Spannungsfeld markiert (Bild 4 b–d). Gründe für die Spannungsspitzen folgen aus dem Kräftegleichgewicht zwischen dem Gewicht der gesamten Schüttgutfüllung und den vertikalen Komponenten von Wandnormal- und Wandschubspannungen [5]. Bilden sich in einem Silo beim Ausfließen tote Zonen (Kernfluss), Bild 4d, tritt an der Stelle, an der die tote Zone auf die Silowand trifft, ebenfalls eine Spannungsspitze auf. Dies liegt darin begründet, dass sich, wie auch bei einem Trichter, innerhalb der toten Zone ein konvergenter Schüttgutfluss ausbildet. Da die Grenzlinie zwischen Ruhe (tote Zonen) und Bewegung nicht analytisch bestimmt werden kann, sind auch die genauen Positionen von Spannungsspitzen bei Kernflusssilos im Vorfeld nicht bekannt. Es müssen daher bei der statischen Dimensionierung der Silowände im gesamten Siloschaft mögliche Spannungsspitzen berücksichtigt werden.

Für den Austrag von Schüttgut aus einem Silo stehen eine Vielzahl von unterschiedlichen Austragorganen zur Verfügung [5–6; 9–16]. Die richtige Dimensionierung von Austragorganen muss stets für den größten Belastungsfall erfolgen. Dieser tritt bei der größten wirkenden Vertikalspannung auf. Wie bereits oben erläutert, ist die Vertikalspannung im Füllzustand (aktiver Spannungszustand) größer als im Entleerungszustand (passiver Spannungszustand). Daher muss ein Austragorgan beim erstmaligen Schüttgutabzug nach dem Füllen eines leeren Silos die verhältnismäßig größte Abzugskraft aufbringen. Nachdem sich im konischen Trichter der passive Spannungszustand eingestellt hat, sinken die Vertikalspannung und damit auch der Kraftbedarf für den weiteren Schüttgutabzug. Die Zusammenhänge sind in **Bild 5** dargestellt. Nach Angaben von Schwedes und Schulze [6] sowie nach Messungen von Schulze [5] kann die



6 Test set-up • Versuchsaufbau



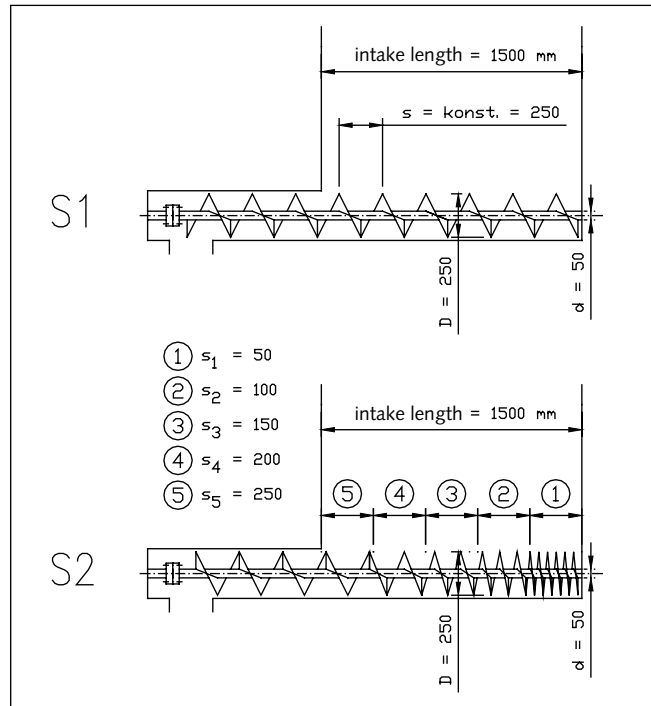
7 General structure of the test silo
Prinzipieller Aufbau des Versuchssilos

the dead zone. The boundary line between rest (dead zone) and movement cannot be determined analytically so the precise positions of the stress peaks in a funnel flow silo are not known in advance. This means that possible stress peaks in the entire silo shaft must be taken into account during the static dimensioning of the silo walls.

A large number of different extraction devices are available for extracting bulk materials from a silo [5–6, 9–16]. The extraction devices must always be corrected dimensioned for the case of the greatest loading, i.e. for when the greatest vertical stress occurs. As already explained above, the vertical stress in the filling state (active stress state) is greater than in the emptying state (passive stress state). An extraction device therefore has to apply the relatively greatest extraction force when first extracting bulk material after an empty silo has been filled. After the passive stress state has become established in the cone the vertical stress drops, so the force required for further extraction of the bulk material also drops. These relationships are shown in Figure 5. According to information from Schwedes and Schulze [6] and according to measurements by Schulze [5] the vertical stress in the filling state can amount to five- to ten-times the vertical stress in the emptying state. If the bulk material flows off-centre or asymmetrically from a silo then this is termed eccentric emptying [6]. Eccentric emptying means principally an uneven stress distribution around the perimeter. It is imperative that this is taken into account when dimensioning the silo for strength. Numerous cases of damage to silos are known in practice that can be attributed, among other things, to eccentric emptying and the associated uneven and therefore locally higher loading in a silo [17].

3 Test set-up

The following aspects of the extraction characteristics of different silo extraction screws were examined during the investigations that were carried out:



8 Geometry of the screws used
Eingesetzte Schneckengeometrien

Vertikalspannung im Füllzustand das Fünf- bis Zehnfache von der Vertikalspannung im Entleerungszustand betragen. Fließt ein Schüttgut außermittig oder unsymmetrisch aus einem Silo aus, so bezeichnet man dies als exzentrisches Entleeren [6]. Exzentrisches Entleeren bedeutet vor allem eine über den Umfang ungleichmäßige Spannungsverteilung, die bei der festigkeitsmäßigen Silodimensionierung unbedingt berücksichtigt werden muss. In der Praxis sind zahlreiche Schäden an Silos bekannt, die unter anderem auch auf exzentrisches Entleeren und die damit verbundene ungleichmäßige und dadurch lokal höhere Beanspruchung eines Silos zurückzuführen sind [17].

3 Versuchsaufbau

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurde das Abzugsverhalten von unterschiedlichen Siloabzugschnecken, insbesondere hinsichtlich folgender Gesichtspunkte, betrachtet:

- auftretende Fließprofile
- auftretende Wandnormalspannungen
- erforderliche Antriebsleistung

Der Aufbau der verwendeten Versuchsanlage ist in **Bild 6** dargestellt. Die Anlage bestand aus einem prismatischen Versuchssilo (1), dem Austragsystem (2) und zwei Schneckenförderern (3) und (4), welche das Schüttgut im Kreislauf wieder in den Versuchssilo förderten. Um unzulässige Schwingungen und somit eine negative Beeinflussung der Messungen am Versuchssilo zu vermeiden, waren vor dem Versuchssilo und nach dem Austragsystem flexible Verbindungen eingebaut. Diese entkoppelten das Versuchssilo und das Austragsystem von der übrigen Anlagentechnik. Der prinzipielle Aufbau des Versuchssilos geht aus **Bild 7** hervor. Das Silo wurde im unteren Bereich an allen vier Silowänden mit Spannungsmesszellen [18–19] bestückt. Die Anordnung erlaubte die Messung der Wandnormalspannungen in drei Ebenen. Somit konnte die Spannungsverteilung sowohl innerhalb von drei horizontalen Ebenen als auch in mehreren vertikalen Ebenen gemessen werden.

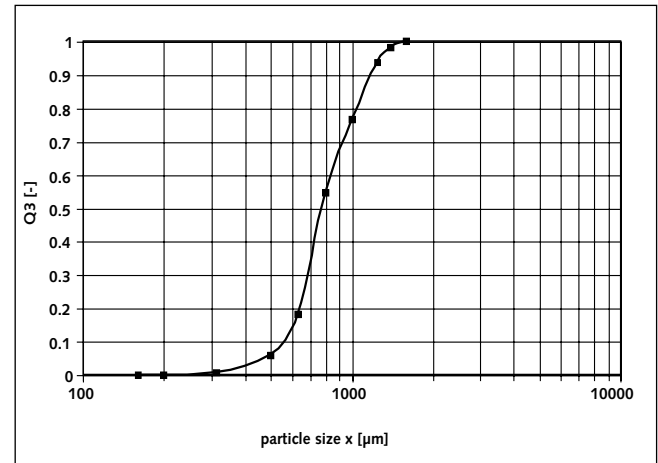
- resulting flow profiles
- resulting wall normal stresses
- requisite drive rating

The set-up of the test plant used is shown in **Figure 6**. The plant consists of a prism-shaped test silo (1), the extraction system (2) and two screw conveyors (3) and (4), which transport the bulk materials back into the test silo in a closed circuit. Flexible connections were installed before the test silo and after the extraction system to avoid excessive vibrations or any detrimental effects on the measurements in the test silo. These flexible connections isolated the test silo and the extraction system from the rest of the plant. The general structure of the test silo can be seen in **Figure 7**. The lower part of the silo was fitted with stress-measuring cells [18–19] on all four silo walls. The arrangement meant that the wall normal stresses could be measured in three planes so that the stress distribution could be measured both in three horizontal planes and also in several vertical planes.

The extraction system used consisted of two silo extraction screws that were arranged parallel to each other at the base of the test silo and were loaded with bulk material over the entire length and width of the silo. Because of the characteristic features of extraction screws with respect to their extraction and intake behaviour the screw geometry for the investigations was as follows:

The external diameter D was kept constant to ensure fundamental activation of the entire silo base and to avoid dead zones caused solely by the design. The shaft diameter d was also kept constant. The screw geometries shown in **Figure 8** were chosen in principle in order to be able to determine and compare the different extraction characteristics. Extraction only from the rear area would be expected with the screw geometry S1 with constant pitch, while the chosen screw geometry S2, characterized by a graduated progression, should achieve uniform extraction over the entire length of the silo.

The test series shown in **Table 1** were used for the investigations. For the listed screw pairing the left-hand extraction screw (seen in the direction of transport) is shown in the first column and the right-hand extraction screw in the second column. The bulk material used for the test was free-flowing, furnace-dried,



9 Particle size distribution of the quartz sand used
Partikelgrößenverteilung des verwendeten Quarzsandes

Das verwendete Austragsystem bestand aus zwei Siloabzugschnecken, welche am Boden des Versuchssilos parallel zueinander angeordnet und über die gesamte Silolänge und -breite mit Schüttgut belastet waren. Aufgrund der charakteristischen Merkmale von Abzugschnecken hinsichtlich dem Abzugs- und Einzugsverhalten wurden für die weiteren Untersuchungen die Schneckengeometrien wie folgt zu Grunde gelegt:

Der Außendurchmesser D wurde konstant belassen, um die grundsätzliche Aktivierung des gesamten Silobodens sicherzustellen und rein konstruktiv bedingte tote Zonen zu vermeiden. Der Wellendurchmesser d wurde ebenfalls konstant belassen. Um das unterschiedliche Abzugsverhalten zu ermitteln und gegenüberstellen zu können, wurden prinzipiell die Schneckengeometrien gemäß **Bild 8** gewählt. Während die Schneckengeometrie S1 mit konstanter Flügelsteigung einen Abzug nur aus dem hinteren Bereich erwarten ließ, sollte die gewählte Schneckengeometrie S2, gekennzeichnet durch eine abgestufte Progression, einen gleichmäßigen Abzug über die gesamte Silolänge realisieren.

Für die weiteren Untersuchungen ergaben sich die Versuchsergebnisse gemäß **Tabelle 1**. Die aufgeführte Schneckenpaarung bezeichnet, in Förderrichtung gesehen, in der ersten Spalte die linke Abzugschnecke und in der zweiten Spalte die rechte Abzugschnecke. Als Versuchsschüttgut wurde ein frei fließender, feuergetrockneter Quarzsand verwendet. Der verwendete Quarzsand war kohäsionslos und besaß eine nahezu von der Spannung unabhängige Schüttgutdichte. Der effektive Reibungswinkel φ_e wurde mit einem Ringschergerät nach Schulze [20] ermittelt. Der Wandreibungswinkel φ_w wurde mit einem Schergerät nach Jenike gemessen. Als Wandmaterial wurde Plexiglas eingesetzt, aus dem die Silowände gefertigt wurden. Die mittlere Partikelgröße d_{50} (Medianwert der Q_3 -Verteilung) wurde mithilfe einer Siebanalyse ermittelt (**Bild 9**). Das Hori-

Tab.1: Trials • Versuchsreihen

Trial Versuchsreihe	Screw geometry Schneckengeometrie		Turning direction Drehrichtung (in conveying direction Förderrichtung)
	Left screw linke Schnecke	Right screw Rechte Schnecke	
1	S1 left-hand extraction linksgängig	S1 right-hand extraction rechtsgängig	
2	S1 right-hand extraction rechtsgängig	S1 left-hand extraction linksgängig	
3	S1 right-hand extraction rechtsgängig	S1 right-hand extraction rechtsgängig	
4	S2 left-hand extraction linksgängig	S2 right-hand extraction rechtsgängig	
5	S2 right-hand extraction rechtsgängig	S2 left-hand extraction linksgängig	

Tab. 2: Properties of the bulk material used
Schüttguteigenschaften des verwendeten Versuchsschüttgutes

Bulk material Schüttgut	d_{50} [mm]	ρ_b [kg/m³]	φ_e [°]	φ_w [°]	λ [-]
Quartz sand Quarzsand	0,78	1.490	36	17	0,5

quartz sand. The quartz sand used was cohesionless and had a bulk density that was virtually independent of the stress. The effective angle of friction φ_e was determined with a ring shear apparatus as described by Schulze [20], and the angle of wall friction φ_w was measured with a shear apparatus as described by Jenike. Plexiglas was used as the wall material for the silo walls. The average particle size d_{50} (median value of the Q_3 distribution) was determined with the aid of a sieve analysis (Fig. 9). The horizontal load ratio λ was measured in a lambda meter [19]. A constant horizontal load ratio was measured when the vertical stress σ_v was varied from 5 to 78 kPa. The bulk material properties are summarized in Table 2.

zontallastverhältnis λ wurde in einem Lambdameter [19] gemessen. Dabei wurde, bei Variation der Vertikalspannung σ_v von 5 bis 78 kPa, ein konstantes Horizontallastverhältnis gemessen. Zusammenfassend sind die Schüttguteigenschaften in Tabelle 2 aufgeführt.

Literaturverzeichnis/Literature

- [1] Janssen, H. A.: Versuche über den Getreidedruck in Silozellen, VDI-Z. 39 (1895), pp.1045.
- [2] Jenike, A. W.: Gravity flow of bulk solids, Bulletin No. 108, Utah Eng. Exp. Station, Univ. of Utah, Salt Lake City, 1961.
- [3] Jenike, A. W.: Storage and flow of solids, Bulletin No. 123, Utah Eng. Exp. Station, Univ. of Utah, Salt Lake City, 1964.
- [4] Schwedes, J.: Fließverhalten von Schüttgütern in Bunkern, Verlag Chemie, Weinheim (1968)
- [5] Schulze, D.: Untersuchungen zur gegenseitigen Beeinflussung von Silo und Austragorgan, Dissertation, TU Braunschweig (1991).
- [6] Schwedes, J.; Schulze, D.: Lagern von Schüttgütern, H. Schubert (Hrsg.), Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik, Band 2, Wiley-VCH Verlag, Weinheim (2003), pp.1137–1253
- [7] Motzkus, U.: Belastung von Siloböden und Auslauftrichtern durch körnige Schüttgüter, Dissertation, TU Braunschweig (1974).
- [8] Hampe, E.: Silos, Band 1 (Grundlagen), VEB Verlag für Bauwesen, Berlin (1987).
- [9] Schwedes, J.: Fließeigenschaften von Schüttgütern, P. Martens (Hrsg.), Wilms, H.: Silo-Handbuch, Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, Berlin (1988), pp. 39–58.
- [10] Hoormann, W.: Zuteiler für Zerkleinerungsmaschinen, Aufbereitungstechnik Nr. 8 (1966), S. 510–523.
- [11] Reisner, W. v. Eisenhart; Rothe, M.: Silos und Bunker für die Schüttgutspeicherung, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld (1971).
- [12] Breucker, T.: Volumetrische Dosiergeräte, technische Mitteilungen 77. Jahrgang Heft 12 (1984).
- [13] Mazza, M.: Bunkerabzugsvorrichtungen, Deutsche Hebe- und Fördertechnik 8 (1961) 5, pp. 208–212.
- [14] Möller, H.: Siloabzug und lose Verladung von staubförmigem und feinkörnigem Schüttgut, Aufbereitungstechnik 6 (1965) 2, pp. 65-72.
- [15] John, P.: Neue Austragvorrichtungen zum Dosieren von Schüttgut in Aufbereitungsanlagen, Aufbereitungstechnik 6 (1965) 9, S. 536–543.
- [16] Reed, A. R.: A review of hopper discharge aids, Bulk solids handling 3. Duffell, C. H. (1983) 1, pp. 149–156.
- [17] Kaldenhoff, M.: Schäden an Silos mit großen Entleerungsexzentrizitäten, Schütte, J., Bauingenieur, Band 79 (2004), pp. 560–567.
- [18] Di Matteo, Luigi: Austragverhalten von Doppelschnecken aus einem Silo, Dissertation, TU Braunschweig (2006).
- [19] Hardow, B.: Spannungsschwankungen im Schüttgut beim Entleeren in einem Silo, Dissertation, TU Braunschweig (1999).
- [20] Schulze, D.: Fließeigenschaften von Schüttgütern und verfahrenstechnische Siloauslegung [online], erhältlich im Internet unter: <http://www.dietmar-schulze.de/fr.html>, Dokument „Dr_Dietmar Schulze_powtvd“, PDF-Format [Stand: 28.10.2005].