

Sonderdruck:

Cornelius Ruckenbrod
Franz-Hermann Schlüter

Silolasten nach der neuen DIN 1055-6



Foto: J. Müller, Brake



Ingenieure im
Bauwesen GbR

ehem.

PROF. EIBL + PARTNER GbR

Karlsruhe, Dresden, Danzig

www.iibw.de

Cornelius Ruckebrod
Franz-Hermann Schlüter

Silolasten nach der neuen DIN 1055-6

Herrn Prof. *Josef Eibl* zum 70. Geburtstag gewidmet

In diesem Beitrag wird über den Inhalt und die Hintergründe der neuen DIN 1055-6 „Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter“ berichtet. In enger Anlehnung an die europäische Norm EN 1991-4 wurde die Ermittlung der Lasten an die neue Sicherheitsphilosophie entsprechend DIN 1055-100 angepaßt. Teilweise wurden neue Lastansätze eingeführt, teilweise vorhandene Ansätze der Vorgängernorm modifiziert oder erweitert. Davon sind insbesondere die ungleichmäßigen Lasten bei dünnwandigen Silos, die Lasten bei niedrigen und mittelschlanken Silos, die Trichterlasten und die Entleerung mit großen Exzentrizitäten betroffen.

Silo loads according to the new DIN 1055-6

An overview and some background information are given to the new DIN 1055-6 „Actions on Structures: Actions on Silos and Tanks“. Following the rules of EN 1991-4 the determination of silo loads is adjusted to the new safety philosophy of DIN 1055-100. In some cases new load rules have been introduced or existing rules have been replaced. In particular this concerns patch loads for thin-walled steel silos, loads in squat and intermediate standard silos, hopper loads or loads for large eccentricity of discharge.

1 Einleitung

Zu Beginn des Jahres 2006 werden die wesentlichen Teile der neuen DIN 1055 – Einwirkungen auf Tragwerke in die Musterliste der technischen Baubestimmungen aufgenommen und sollen voraussichtlich Anfang 2007 bauaufsichtlich eingeführt werden. Abweichend von vielen „Bemessungsnormen“ soll es für die Lastnormen keine Übergangsfristen geben, so daß der Tragwerksplaner mit dem Tag der Einführung diese Normen verbindlich anzuwenden hat. Somit wird für weite Bereiche des Bauwesens das neue Sicherheitskonzept eingeführt sein.

Während der einzelnen Bearbeitungsstufen der Normungsarbeit wurden die geläufigen Teile der DIN 1055 zu den Nutz-, Wind- und Schneelasten umfassend in der Öffentlichkeit diskutiert, so daß diese vielen Tragwerkplanern bereits bekannt sind. Der Teil 6 der Normenreihe DIN 1055 [1], der sich mit den Lasten in Silozellen und Flüssigkeitsbehältern befaßt, wurde jedoch wegen der speziellen Thematik nicht so bewußt wahrgenommen.

Gegenüber der bisher gültigen DIN 1055-6:1987-05 [2] haben sich sowohl der Umfang als auch der Inhalt stark verändert. Dieser Beitrag stellt die wesentlichen Inhalte der neuen DIN 1055-6:2005-03 vor und gibt Hinweise zu den Hintergründen wichtiger Regelungen.

2 Vorgeschichte

Nach der Erstfassung der DIN 1055-6 aus dem Jahre 1964 [3], ergänzt durch die Bestimmungen von 1977 [4], folgte die Fassung von 1987, die auch international weite Beachtung fand. Die nun aktuell vorliegende Fassung aus 2005 ist somit die dritte Generation der Silo-Lastnorm DIN 1055-6.

Die systematische Erfassung der Lastverhältnisse in Silozellen sowie die Bemessung von Silos besitzt bereits eine lange Tradition. Hierzu wird auf die umfangreiche Literatur verwiesen (z. B. [5]). Die erste Version der DIN 1055-6:1964-11 ist eng mit den beiden Namen *Pieper* und *Wenzel* [6] verbunden und gibt den damaligen Kenntnisstand in Form von Regelungen für die Praxis wieder. Veranlaßt durch die hohen Schadensraten an Silobauwerken im Vergleich zu sonst üblichen Bauwerken war die Grundlagenforschung zur wirklichkeitsnahen Erfassung der Silolasten in der Zeit zwischen 1964 und 1987 wesentlich von den Versuchen am Siloversuchsstand in Braunschweig geprägt. Gleichzeitig wurde die verfahrenstechnische Komponente mit in die Betrachtung der Silodrücke einbezogen. Es wurden theoretische Ansätze zur Ermittlung der Spannungszustände beim Füllen und Entleeren von Silozellen entwickelt. Hier seien stellvertretend für eine Reihe anderer Arbeiten die von *Jenike* [7] und *Schwedes* [8] genannt. Die Entwicklung des allgemeinen Kenntnisstandes zwischen 1964 und 1987 ist z. B. im Silo-handbuch [5] umfassend dargestellt.

In den 1980iger Jahren war es *Eibl*, der mit seinen Mitarbeitern eine konsistente Theorie zur Erfassung der Silolasten entwickelte und diese unter Verwendung der Finite-Element-Methode in ein numerisches Rechenmodell umsetzte. Damit konnten sowohl die Spannungszustände während des Füllens als auch die Fließvorgänge und die daraus resultierenden Spannungszustände im ausfließenden Schüttgut mit den für die Bemessung von Silos erforderlichen Lastzuständen an Wand und Boden wiedergegeben werden. Dieses Rechenmodell wurde zwischen 1988 und 2000 im Rahmen eines von der DFG geförderten Sonderforschungsbereiches (SFB 219) an der Universität Karlsruhe soweit weiterentwickelt, daß nahezu beliebige Geometrien unter Einbezug der Streuung der Schüttgutkennwerte und des Verformungsverhaltens des Silobauwerkes damit betrachtet werden können. Wesentliche Voraussetzung hierzu war die Entwicklung leistungsfähiger Stoffgesetze, die das Schüttgutverhalten sowohl in den

quasi-statischen Bereichen des Silos als auch im Auslaufbereich mit den dort auftretenden großen Fließgeschwindigkeiten und Deformationsraten adäquat beschreiben können (vergleiche [9], [10], [11]).

In Deutschland stand die Grundlagenforschung zur Erfassung der phänomenologischen Zusammenhänge der Silolasten und deren Quantifizierung im Vordergrund, sowohl bei den Forschungsarbeiten in Braunschweig als auch im SFB 219 in Karlsruhe. Im Vergleich dazu wurden in anderen Ländern, z. B. in Australien, zunächst stärker die Auswirkungen von typischen Lasten auf die Siloschale, insbesondere bei dünnwandigen Strukturen mit Hilfe der FE-Methode betrachtet ([12]). In Skandinavien und Polen standen die experimentellen Ermittlungen der Silolasten und Messungen an Silobauwerken im Vordergrund.

Erst die Entwicklung von modernen und leistungsfähigen FE-Programmsystemen ermöglichte eine breitere Anwendung von *Eibls* Grundidee der Ermittlung der Silolasten, die auf einer konsistenten Beschreibung des Schüttgutverhaltens in der Silozelle basiert. In einem europäischen Projekt „CA-Silo“ wurde Mitte der 1990iger Jahre der Stand der Siloforschung auf internationaler Ebene zusammengefaßt [13]. Dort wurden auch die Weiterentwicklungen von numerischen Modellen wie z. B. mit Hilfe der diskreten Partikelmodelle vergleichend dargestellt.

Parallel zu den regen Forschungsaktivitäten der späten 1980iger und zu Beginn der 1990iger Jahre gab es seitens der ISO (International Standardisation Organisation) und FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte) unter maßgeblicher Beteiligung *Eibls* erste Initiativen, ein international anerkanntes Regelwerk zur Beschreibung der Silolasten zu schaffen. Eine große Gruppe international bekannter Siloforscher war hier einbezogen. Innerhalb kürzester Zeit wurde die Vorversion des heutigen europäischen Normentwurfes zu den Silolasten ENV 1991-4 entwickelt [14] bis [16]. In Deutschland hingegen gab es zunächst starke Tendenzen, den europäischen Weg nicht mitzugehen, um an den „bewährten“ Regelungen der DIN 1055-6:1987-05 festzuhalten [17], [18].

Auch auf europäischer Ebene wurden im Zuge der Überführung der ENV 1991-4 [16] in den Status EN 1991-4 [19] die Inhalte stark überarbeitet. Dies war erforderlich, da der seinerzeit unter großem Zeitdruck erarbeitete Entwurf nur einen eng begrenzten Anwendungsbereich auswies und sich darüber hinaus Lastannahmen ergaben, die z. T. deutlich von dem anerkannten Lastniveau der DIN 1055-6:1987-05 abwichen. Aufbauend auf die neuen europäischen Aktivitäten entschloß sich der NABau Arbeitsausschuß 00.02.00 „Einwirkungen auf Bauten“, den neu zu bearbeitenden Teil 6 der DIN 1055 auf die überarbeitete EN 1991-4 abzustimmen. Durch die engagierte deutsche Vertretung in der Arbeitsgruppe des Eurocode und die parallele Mitarbeit im verantwortlichen NABau-Unterausschuß konnte erreicht werden, daß die bewährten Bestandteile und das Sicherheitsniveau der bisherigen Deutschen Norm auch auf europäischer Ebene berücksichtigt wurden. So stellt die im März 2005 als Weißdruck erschienene DIN 1055-6 zwar auf den ersten Blick die Übersetzung des in Europa mittlerweile ratifizierten europäischen Normentwurfes EN 1991-4 dar,

der Inhalt ist jedoch in den wesentlichen Punkten im Vorfeld von deutscher Seite mitgestaltet und mit dem deutschen Normenausschuß abgestimmt.

3 Gliederung und Anwendungsbereich

Die DIN 1055-6:2005:03 gliedert sich wie folgt in neun Hauptabschnitte: 1. Anwendungsbereich, 2. Normative Verweise, 3. Begriffe und Formelzeichen, 4. Darstellung und Klassifikation der Einwirkungen, 5. Bemessungssituationen, 6. Schüttgutkennwerte, 7. Lasten auf vertikale Silowände, 8. Lasten auf Silotrichter und Siloböden und 9. Lasten auf Flüssigkeitsbehälter.

In neun Anhängen (A bis I) sind Angaben zu den Teilsicherheitsfaktoren und Kombinationsbeiwerten für Silos und Flüssigkeitsbehälter (Anhang A und B), zur Messung und Abschätzung von Schüttgutkennwerten für die Ermittlung von Silolasten (Anhang C, D und E), Angaben zur Bestimmung der zur Ermittlung der Lasten zugrundeliegenden Fließprofile (Anhang F), Angaben zu Lasten bei seismischen Einwirkungen (Anhang G), alternative Regeln zur Ermittlung von Trichterlasten (Anhang H) und Regeln zu den Einwirkungen infolge von Staubexplosionen (Anhang I) gegeben.

Der Anwendungsbereich unterliegt, wie in der Vorgängernorm auch, gewissen geometrischen Grenzen, die den bisherigen Erfahrungsbereich für den Bau von Silozellen darstellen. Diese Grenzen waren in DIN 1055-6:1987-05 über das Verhältnis zwischen Vertikallasten und Schüttgutwichte beschrieben. In der neuen Fassung werden dagegen reine geometrische Grenzabmessungen angegeben ($h_b/d_c \leq 10$, $h_b < 100$ m, $d_c < 60$ m).

Während in [2] die Anwendbarkeit der angegebenen Silolasten auf das Verhältnis von Höhe (h_c) zu Durchmesser (d_c) ab $h_c/d_c = 0,8$ beschränkt war, gibt es in der neuen Fassung im Prinzip keine Beschränkung der Siloschlankheit nach unten. Bei kleineren und mittleren Schlankheiten $0,4 < h_c/d_c < 2$ sind jedoch andere Lastansätze zu verwenden als für schlanke Silozellen. Außerdem wurden zusätzlich die Lasten auf Flüssigkeitsbehälter in die neue Fassung mitaufgenommen.

In den ersten Abschnitten werden unterschiedliche Einwirkungen auf Silos (symmetrische, ungleichförmige Lasten, Füllen, Entleeren etc.) und Flüssigkeitsbehälter (symmetrischer Flüssigkeitsdruck) dargestellt und klassifiziert sowie die zu berücksichtigenden Einflüsse der unterschiedlichen Bemessungssituationen (Fließprofile, Schüttgut, Konstruktionsform, Betriebsbedingungen) erläutert.

In Abhängigkeit von dem Fassungsvermögen und der Exzentrizität beim Entleeren werden Silozellen in drei Anforderungsklassen eingeteilt. Entsprechend der jeweiligen Anforderungsklasse werden unterschiedlich differenzierte bzw. vereinfachte Lastansätze zur Verfügung gestellt, wobei in der Anforderungsklasse 1 die vereinfachten Lastansätze zu einer auf der sicheren Seite liegenden Bemessung führen. Bei großen Silos und Silos mit großen Entleerungsexzentrizitäten ($e_o/d_c > 0,25$) sind die einzelnen Lastansätze nach den angegebenen genaueren Verfahren anzuwenden. Nur sehr kleine Silos mit Schüttgütern geringer Wichte (z. B. Holzhackschnitzel) fallen unter die Anforderungsklasse 1. Silos mit großen Durchmessern fallen in der Regel schon bei mittlerer Schlankheit unter die

Anforderungskategorie 3. Bei einem Silo mit einem Durchmesser von 7 m und einer Schüttgutwichte von 9 kN/m³ (z. B. für Getreide) sind ab einer Schlankheit von $h_c/d_c = 4$ die aufwendigeren Lastansätze für Anforderungskategorie 3 zu verwenden, bei einem Silodurchmesser von 10 m bereits ab einer Schlankheit von 1,7.

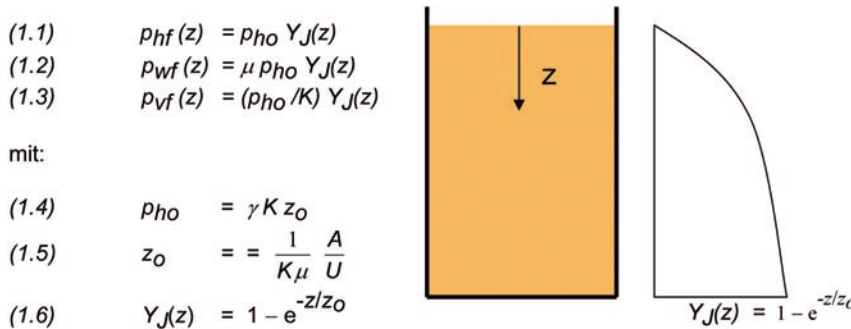
4 Theoretische Grundlagen

Hinsichtlich der Schlankheit der Silozelle wird zwischen schlanken Silos ($h_c/d_c \geq 2$), Silos mit mittlerer Schlankheit ($1,0 < h_c/d_c < 2,0$), niedrigen Silos ($0,4 < h_c/d_c \leq 1,0$) und Stützwandsilos ($h_c/d_c \leq 0,4$ und waagrechter Siloboden) unterschieden.

Bei Silos mittlerer und kleiner Schlankheit werden die Silolasten nach einer modifizierten Theorie von Reimbert berechnet.

Bei schlanken Silos werden die Silolasten auf vertikale Silowände und waagrechte Siloböden entsprechend der klassischen Theorie nach Janssen [20] berechnet (Bild 1). Diese Theorie ist allgemein bekannt und z. B. im Silohandbuch ausführlich erklärt. Bei schlanken Silos ist der

Einfluß von Schüttkegeln an der Schüttgutoberfläche auf die Silodrücke relativ gering, so daß die Theorie von Janssen, die von einer ebenen Schüttgutoberfläche ausgeht, eine ausreichend zutreffende Beschreibung der Silodrücke liefert. Bei niedrigeren Silos ist dieser Einfluß jedoch nicht mehr vernachlässigbar. Berechnungsgrundlage der alten Norm ist hier die sogenannte äquivalente Schüttgutoberfläche. Die Approximation nach dem Prinzip der „eingebneten Schüttgutoberfläche“ führt jedoch zu unrealistischen Silolasten am oberen Bereich der Silowand. Eine weitere Theorie zur Beschreibung der Silodrücke wurde von Reimbert [21] entwickelt. Sie basiert auf der Grundlage des aktiven Spannungsverhältnisses $K_a = (1 - \sin\phi)/(1 + \sin\phi)$ nach Rankine. Hiermit wird zwar die Situation im oberen Wandbereich besser erfaßt, führt aber wiederum zu einem unrealistischen schnellen Anstieg der Schüttgutlasten im Bereich geringer Schüttguttiefen. Bei sehr niedrigen Silozellen wie bei den Stützwandsilos führt sie daher zu unrealistischen Lastgrößen. Für Silos mittlerer Schlankheit und niedrige Silos wird deshalb eine von Rotter [22], [23] modifizierte Reimbert-Theorie angewendet. In diesem Ansatz wird das Horizontallastverhältnis nach Janssen verwendet und der Lastverlauf über die Schüttgutparameter Böschungswinkel, Horizontallastverhältnis, Wandreibung und den hydraulischen Radius gesteuert (Bild 2).



- Dabei ist
- γ der charakteristische Wert der Schüttgutwichte;
 - μ der charakteristische Wert des Wandreibungskoeffizienten für das Schüttgut an der vertikalen Silowand;
 - K der charakteristische Wert des Horizontallastverhältnisses;
 - z die Siloguttiefe unterhalb der äquivalenten Schüttgutoberfläche des Schüttgutes;
 - A die innere Querschnittsfläche des Silos;
 - U der Umfang der inneren Querschnittsfläche des Silos.

Bild 1. Silodruckverteilung nach der Theorie von Janssen für schlanke Silozellen

Fig. 1. Load profile according to the theory of Janssen for slender silos

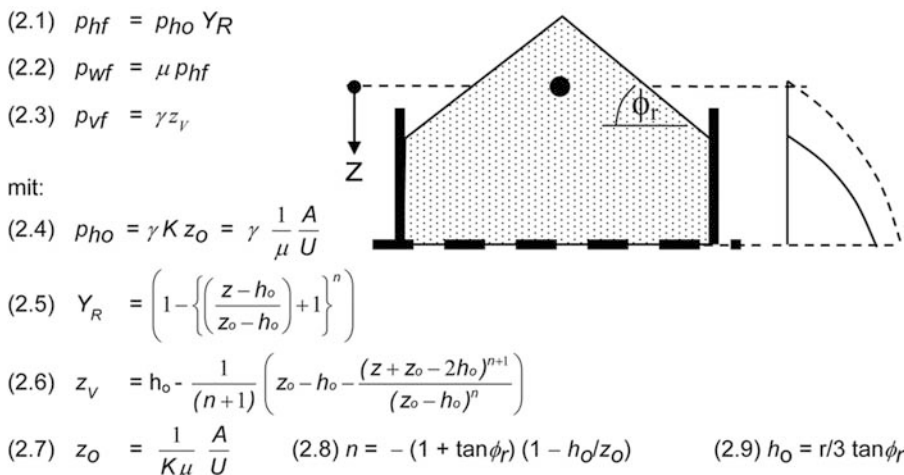


Bild 2. Silodruckverteilung für niedrige Silos und Silozellen mit mittlerer Schlankheit nach der von Rotter [21] modifizierten Theorie von Reimbert [20]

Fig. 2. Pressure profile in case of squat and intermediate silos according to the theory of Reimbert [20] modified by Rotter [21]

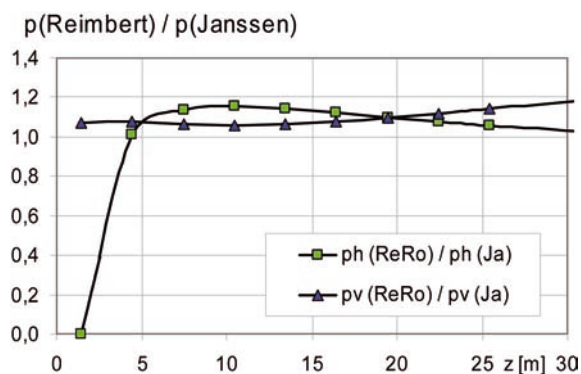


Bild 3. Vergleich der horizontalen und vertikalen Silolasten nach der Reimbert/Rotter-Theorie (ReRo) und der Janssen-Theorie (Ja) bei einer Schüttgutwichte $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$, einer Siloschlankheit von $h_c/d_c = 2$ (30 m/15 m) und jeweils ungünstigster Konstellation der Schüttgutkennwerte nach DIN 1055-6:2005, Tabelle E.1 ($p_h \cdot \mu = 0,18$ und $K = 0,66$; $p_v \cdot \mu = 0,55$ und $K = 0,67$)

Fig. 3. Comparison of horizontal and vertical silo loads according to the theory of Reimbert/Rotter (ReRo) and Janssen (Ja) with $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$, a slenderness of $h_c/d_c = 2$ (30 m/15 m) and the most worst combination of bulk material properties of Table E.1 of DIN 1055-6:2005 leading to the largest discrepancies ($p_h \cdot \mu = 0,18$ and $K = 0,66$; $p_v \cdot \mu = 0,55$ and $K = 0,67$)

Für eine Silogeometrie mit einer Schlankheit $h_c/d_c = 2$ wird in Bild 3 der Ansatz von Janssen mit dem von Rotter modifizierten Ansatz von Reimbert für eine ebene Schüttgutoberfläche und einem realistischen Böschungswinkel von 30° verglichen. Es zeigt sich, daß bei den Horizontallasten die größten Unterschiede zwischen den beiden Ansätzen bei kleinen Horizontallastverhältnissen K und Wandreibungskoeffizienten μ auftreten. Deshalb wird hier mit den kleinsten Wandreibungswerten μ_1 (Wandkategorie D1) nach Tabelle E.1 [1] sowie dazugehörigem K_u -Wert für die Bestimmung der Horizontallasten gerechnet. Diese ungünstige Kombination liegt z. B. beim Schüttgut Mais vor. Bei den Vertikallasten ist dagegen bei großen K - und μ -Werten mit den größten Unterschieden zu rechnen. Deshalb wird in diesem Vergleich mit den K - und μ -Werten gerechnet, bei denen das Produkt aus K_1 und dazugehörigen μ_1 -Werten (Wandkategorie D3) maximal ist z. B. Sojabohnen). Zusammenfassend wird festgestellt, daß die Horizontallasten nach der modifizierten Reimbert-Theorie maximal 20 Prozent größer sind als die Werte nach Janssen, die Vertikallasten dagegen nur um ca. 10 Prozent.

Bei sehr niedrigen Schlankheiten – die neue DIN 1055-6 spricht ab $h_c/d_c < 0,4$ von Stützwandsilos –, bei denen die Anwendung der Ansätze nach alter Norm ausgeschlossen war, stellen sich Lastverhältnisse ein, die denen der Erddrucktheorie nahekommen. Dabei stellt sich die Frage, ob eher mit aktivem Erddruck oder Erdruhedruck gerechnet werden muß. Von einem aktiven Erddruck kann ausgegangen werden, wenn sich die Silowand entsprechend bewegen kann. Im radialsymmetrischen Fall ist jedoch davon auszugehen, daß sich die erforderlichen Wandverformungen in der Regel nicht einstellen. Die Lastansätze für Stützwandsilos entsprechen deshalb im wesentlichen den Lastansätzen der Erddrucktheorie unter

Ruhedruckverhältnissen mit den Vereinfachungen nach [24]. Sie sind als Empfehlungen auf der sicheren Seite zu betrachten. Bei Silobehältern mit endlichen Abmessungen zwischen den gegenüberliegenden Wandflächen können unter Umständen deutlich abweichende Lasten angesetzt werden, weil hier davon ausgegangen werden kann, daß der für den Erdruhedruck erforderliche Gleitkreis die Böschung des Aufschüttkegels auf der gegenüberliegenden Böschungsseite schneidet. Ansätze zur Berücksichtigung dieser Einflüsse gibt beispielsweise [25].

5 Schüttgutkennwerte für die Ermittlung der Lasten

Die meisten Schüttgüter sind natürliche Produkte und weisen unterschiedlich starke Streuungen in ihren Eigenschaften und somit auch in den die Lasten bestimmenden Kennwerten auf. Auch kleine Schwankungen beispielsweise der Feuchtigkeiten, können zu Änderungen der Kennwerte führen. Die folgenden angeführten Zusammenhänge zeigen, daß diese inhärenten Streuungen der Schüttgutkennwerte bei der Festlegung der Schüttgutkennwerte entsprechend zu berücksichtigen sind. Sie sind im Rahmen der Sicherheitsphilosophie bei der Bemessung üblicher Bauwerke nicht mitabgedeckt.

In der bisher gültigen DIN 1055-6:1987-05 waren die tabellierten Wandreibungsbeiwerte und Horizontallastverhältnisse darauf festgelegt, daß mit diesen aus den Erfahrungen der Arbeitsgruppe heraus und im Vergleich zu den zahlreichen Silodruckmessungen die im Füllzustand größten gemessenen Horizontallasten abgedeckt wurden. Lasterhöhungen beim Entleeren wurden durch einen schüttgutspezifischen Erhöhungsfaktor e_h berücksichtigt. Dieses Vorgehen führte zu relativ kleinen tabellierten Wandreibungsbeiwerten und hohen Horizontallastbeiwerten, was eine Unterschätzung der Vertikal- und Wandreibungslasten nach sich zog. Diese Defizite wurden durch Einführung von Lasterhöhungsfaktoren für diese Lastkomponenten ausgeglichen. Bei den Bodendrücken wurde die Unterschätzung der Vertikallasten durch einen relativ großen Bodendruckerhöhungsfaktor $C_b = 1,5$ kompensiert. Zur Bestimmung der Wandreibungslasten für die Beulbetrachtungen oder den Lastabtrag über an die Silowände befestigte Einzelstützen wurden weitere zusätzliche Erhöhungsfaktoren eingeführt.

Auf relativ einfache Weise wurde dadurch gewissermaßen auch die Streuung der Schüttgutparameter mitberücksichtigt. Diese war bei diesem Vorgehen jedoch für nahezu alle Schüttgüter gleich angesetzt. Ein weiterer Nachteil war, daß die in der bisherigen DIN 1055-6:1987-05 eingeführten Schüttgutkennwerte keine „echten“, das heißt über Messungen nachvollziehbaren Kennwerte für die jeweiligen Schüttgüter darstellten. In besonderem Maße galt dies für den Erhöhungsbeiwert für die Horizontallasten beim Entleeren e_h und den Schüttgutbeiwert β_G bei den Teilflächenlasten. Diese Werte beruhten zwar auf gewissen Erfahrungen, waren im Prinzip jedoch willkürlich festgelegt. Bei diesem Vorgehen bestand bei jedem weiteren nicht explizit in den Tabellen der DIN und dessen Beiblatt aufgelisteten Schüttgut die Schwierigkeit, adäquate Schüttgutkennwerte zu definieren. Neu zu bewertende Schüttgüter wurden zur Festlegung der nicht meßbaren Kennwerte anhand der Vergleichbarkeit der

meßbaren Kennwerte mit gelisteten Schüttgütern eingestuft. Dieses pragmatische Vorgehen führte zu einem bisher international anerkannten Sicherheitsniveau, stimmt jedoch nun nicht mit der Sicherheitsphilosophie der neuen Normengeneration überein.

Der Bestimmung der Schüttgutkennwerte wurde mehr Bedeutung zugemessen. Der Schüttgutparameter wurde aus den Schüttgutkennwerten der bisher gültigen DIN 1055-6:1987-05 und deren Lastniveau abgeleitet.

Bereits in [15] wurde versucht, durch sogenannte obere und untere Grenzwerte für die Schüttgutkennwerte die Streuung in den Bestimmungsgleichungen der unterschiedlichen Bemessungslasten zu berücksichtigen [26]. Die schüttgutspezifische Streuung der Kennwerte wurde erstmals mit der Überarbeitung des ENV 1991-4 [16] berücksichtigt.

Bei der Festlegung der Schüttgutkennwerte stand der Ausschuß vor dem Problem, daß weltweit keine umfassenden Untersuchungen für eine ausreichende Anzahl von Schüttgütern über die tatsächlichen Kennwerte und deren Streuungen zur Verfügung standen. Um dem Tragwerksplaner weiterhin Bemessungshilfen in Form von Tabellen mit Kennwerten für die gängigsten Schüttgüter zur Verfügung zu stellen, wurde das bisherige Sicherheitsniveau der DIN 1055-6:1987-05 im wesentlichen beibehalten. Dabei wurden die Mittelwerte und Streukennwerte der wesentlichen Schüttgutkennwerte unter Zugrundelegung einer logarithmischen Normalverteilung zurückgerechnet (Bild 4). Der Kennwert C_{op} zur Mitbestimmung der über den Siloumfang ungleichförmig verteilten Lasten wurde aus den Kennwerten für die Streuung der Schüttgutparameter Wandreibung a_μ und Horizontallastverhältnis a_K abgeleitet (Bild 5).

Parallel dazu werden Vorgaben zur experimentellen Bestimmung der wesentlichen Schüttgutkennwerte gemacht bzw. bereitgestellt. In EN 1991-4 wird grundsätzlich die Bestimmung der Schüttgutkennwerte anhand von Versuchen bevorzugt, für Silozellen der Anforderungsklasse 3 wird diese sogar vorgeschrieben. Dem grundsätzlichen Vorzug der experimentellen Bestimmung der Schüttgutkennwerte folgte der Ausschuß der DIN 1055-6 bislang jedoch nicht.

In Abschnitt 4 und Anlage C der DIN 1055-6:2005-03 werden umfassende Angaben für die experimentelle Ermittlung der Schüttgutkennwerte und die dabei zu verwendenden Versuchsaapparaturen und -verfahren gemacht. Diese basieren für die Ermittlung der Lasten im wesentlichen auf den Prinzipien der Bodenmechanik und nicht der klassischen Schüttgutmechanik. Bei der experimentellen Bestimmung der Schüttgutkennwerte sind die Beanspruchungszustände der Schüttgüter in der Silozelle zu berücksichtigen (siehe Bild 6 und [27], [28]). In der neuen DIN 1055-6 wird demzufolge den Schüttgutkennwerten wesentlich mehr Bedeutung zugemessen als dies bisher der Fall war.

Sowohl nach der Theorie von *Janssen* entsprechend Gln. (1.1) bis (1.4) in Bild 1 als auch nach der modifizierten Theorie von *Reimbert* Gln. (2.1) bis (2.10) in Bild 2 sind für die Größe und die Verteilung der Lasten über die

$$K_u = \lambda_{Tab} \text{ (DIN1055/6)}$$

$$K_l = e_h / (C_o C_b) \lambda_{Tab} \text{ (DIN1055/6)}$$

$$\mu_l = C_o / e_h \mu_{Tab} \text{ (DIN1055/6)}$$

$$\mu_u = 1,1 \mu_{Tab} \text{ (DIN1055/6)}$$

Verwendung der logarithmischen Normalverteilung:

$$K_m = e^{1/2(\ln(K_u) + \ln(K_l))}$$

$$\mu_m = e^{1/2(\ln(\mu_u) + \ln(\mu_l))}$$

$$Cov_K = \ln(K_u) - \ln(K_m) / 1,28$$

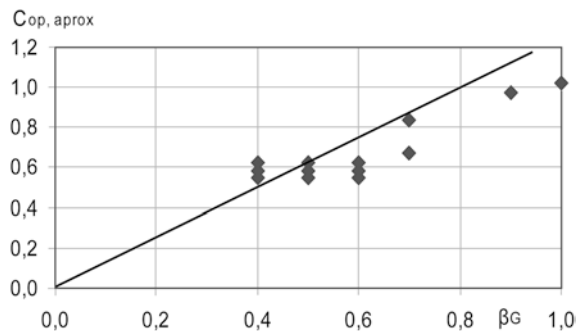
$$Cov_\mu = \ln(\mu_u) - \ln(\mu_m) / 1,28$$

$$a_K = \sqrt{\frac{K_u}{K_l}}$$

$$a_\mu = \sqrt{\frac{\mu_u}{\mu_l}}$$

Bild 4. Ableitung der in DIN 1055-6:2005 tabellierten Schüttgutkennwerte von den Kennwerten der DIN 1055-6:1987

Fig. 4. Derivation of material properties in Table E.1 of DIN 1055-6:2005 from the material parameters tabled in DIN 1055-6:1987



$$C_{op, approx} = 3,5 a_\mu + 2,5 a_K - 6,2$$

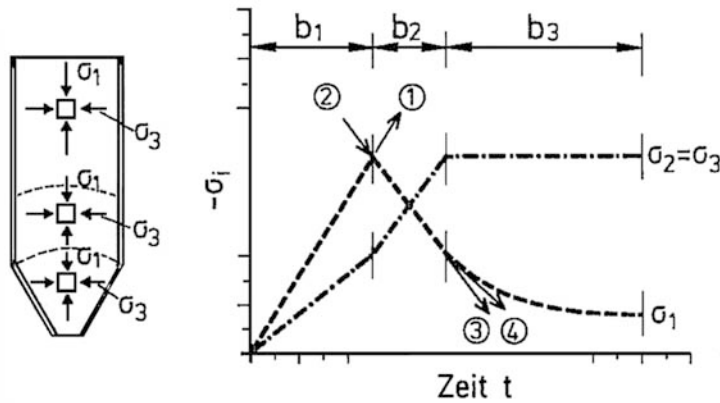
β_G nach Tabelle der DIN 1055-6:1987

Bild 5. Vergleich der Schüttgutbeiwerte für die Teilflächenlasten nach DIN 1055-6:1987 mit den aus den Streufaktoren für die Wandreibung a_μ und des Horizontalastbeiwertes a_K ermittelten Werten $C_{op, approx}$

Fig. 5. Comparison of patch load solid reference factor (load magnifying factor) for stored solid: values tabled in DIN 1055-6:1987 and approximated with $C_{op, approx}$

Silohöhe die Kennwerte der Schüttgutwichte, des Wandreibungskoeffizienten und des Horizontallastverhältnisses bestimmend. Die Größenordnung der Lasten wird durch die Vorfaktoren vor dem Klammersdruck bestimmt. Die Lastverteilung über die Höhe wird durch den Klammersdruck mit der Exponentialfunktion $(1 - e^{-z/z_0})$ festgelegt.

In allen Gleichungen geht die Wichte linear ein. Das bedeutet, eine hohe Wichte führt zu hohen Lasten. Für die Vorfaktoren gilt, daß durch eine möglichst kleine Wandreibung große Horizontallasten verursacht werden. Die maximalen Vertikallasten werden sowohl bei kleinen Werten der Wandreibung als auch bei kleinen Werten des Horizontallastbeiwertes erreicht. Einen völligen Verlauf der Lastkurven – das heißt größere Lasten durch einen ra-



| | | |
|----------------|--|--|
| b ₁ | Verdichten mit behinderter Seitendehnung (K _o -Versuch) bis zu σ_1 | oberer Silobereich Spannungen Füllen und Entleeren annähernd gleich |
| b ₂ | Zunahme der Horizontalspannung $\sigma_2 = \sigma_3$ auf den Wert σ_1 | Übergangszone Hauptspannungsachse rotieren (aktiven - passiven Zustand) |
| b ₃ | Abnahme der Vertikalspannung bis zum Bruch mit konstanter Horizontalspannung $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{konst.}$ | im Trichter sehr große Auflockerung, Material fließt als loser Partikelstrom |

Bild 6. Typische Belastungspfade bei der Entleerung von schlanken Silozellen nach [27]
 Fig. 6. Stress-strain history relevant for discharge [27]

| Lastfalluntersuchung | Anzusetzender charakteristischer Wert | | | |
|--|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--|
| | Wandreibungskoeffizient μ | Horizontal-lastverhältnis K | Winkel der inneren Reibung ϕ_f | |
| Vertikaler Wandabschnitt | | | | <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">$l \hat{=} \text{lower}$</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">$u \hat{=} \text{upper}$</div> </div> |
| Maximale Horizontallasten senkrecht auf die vertikalen Wände | Unterer Grenzwert | Oberer Grenzwert | Unterer Grenzwert | $p_{hf}(z) = \gamma_u r_h / \mu_l (1 - e^{-z K u \mu_l / r_h})$ |
| Maximale Wandreibungslasten auf die vertikalen Wände | Oberer Grenzwert | Oberer Grenzwert | Unterer Grenzwert | $p_{wf}(z) = \gamma_u r_h (1 - e^{-z K u \mu_u / r_h})$ |
| Maximale Vertikallast auf den Trichter oder den Siloboden | Unterer Grenzwert | Unterer Grenzwert | Oberer Grenzwert | $p_{vf}(z) = \gamma_u r_h / (K_l \mu_l) (1 - e^{-z K_l \mu_l / r_h})$ |

mit $r_h = A/U$ (hydraulischer Radius)

Bild 7. Maßgebliche Parameterkombination für die Ermittlung der maximalen Horizontallasten nach Tabelle 1 DIN 1055-6:2005

Fig. 7. Relevant combination of bulk material parameters tabled in Table E.1 of DIN 1055-6:2005 for determining of horizontal loads

schen Anstieg im oberen Silowandbereich – bewirken dagegen möglichst große Reibungs- und Horizontallastbeiwerte. Insgesamt ist bei den üblichen Bandbreiten der Kennwerte im wesentlichen der Vorfaktor für die Gesamtgröße der Lasten bestimmend. Deshalb sind für die Bemessung von Silozellen nach der neuen Sicherheitsphilosophie folgende Kombinationsbetrachtungen sinnvoll (Bild 7):

- Maximale Horizontallast kleiner Wandreibungskoeffizient
großer Horizontallastbeiwert
- Maximale Vertikallast kleiner Wandreibungskoeffizient
kleiner Horizontallastbeiwert
- Maximale Wandreibungslast großer Wandreibungskoeffizient
großer Horizontallastbeiwert

6 Vergleich der Lasten im Siloschaft nach alter und neuer Norm

Neben den über den Siloumfang gleichmäßig verteilten Lasten sind im Regelfall zusätzliche ungleichmäßig verteilte Lasten anzusetzen. Für den Fall einer Entleerung mit stark exzentrischen Fließvorgängen sind weitere ungleichmäßig verteilte Lastansätze zu berücksichtigen. Bei niedrigen Silos und Silos mittlerer Schlankheit ist zusätzlich der Füllzustand bei stark exzentrischem Befüllen zu beachten.

6.1 Gleichmäßige Lasten

Es wird zwischen den Lasten im Füllzustand und den Entleerungslasten unterschieden. Beide Lastfälle enthalten

über den Wandumfang gleichmäßig verteilte Lasten, die wie bereits erläutert entsprechend der Siloschlankheit nach der Theorie von *Janssen, Reimbert* oder den Erd-druckansätzen bestimmt werden. Im Entleerungsfall werden die gleichmäßigen Lasten des Füllzustandes mit einem Lastvergrößerungsfaktor (Entleerungsfaktor) C_o erhöht. Bei schlanken Silos nimmt der Entleerungsfaktor einen konstanten Wert von $C_o = 1,15$ an. Bei Silos mittlerer Schlankheit nimmt der Wert linear bis auf den Wert $C_o = 1,0$ für niedrige Silos ab.

In Bild 8 sind für alle in der Schüttguttabelle von [1] enthaltenen Schüttgüter (mit Ausnahme der Futtermittel),

die Schüttgutlasten mit den Werten nach der alten Norm für Schlankheiten von $2 \leq h_c/d_c \leq 10$ miteinander verglichen. Die im Einführungsersaß vorgesehene 10-prozentige Erhöhung der Lasten bei Berechnung der Lasten mit den im Beiblatt von [2] angegebenen Schüttgutkennwerten ist hier nicht berücksichtigt. Es zeigt sich, daß mit den nach Bild 5 abgeleiteten Schüttgutkennwerten das Lastniveau der alten Norm im wesentlichen beibehalten wird. Lediglich im Bereich geringer Schlankheiten führt die neue Norm bei $h_c/d_c = 2$ zu im Mittel 5 Prozent geringeren Horizontallasten und zu 14 Prozent niedrigeren Bodenlasten. Die größten Unterschiede sind für die Schüttgüter Mehl und Mais zu verzeichnen. Bei den Horizontal-lasten wird dies jedoch teilweise durch in diesem Bereich nach neuer Norm höhere Teilflächenlasten ausgeglichen (siehe unten). Auch bei den Bodenlasten findet teilweise ein Ausgleich dadurch statt, daß bei Bedingungen, die zu dynamischen Lasten beim Entleeren führen können, eine 20-prozentige Erhöhung der Bodenlasten vorzusehen ist. Diese Effekte sind in den Ansätzen der alten DIN 1055-6:1987-05 bereits enthalten.

Die Größenordnung der sich nach DIN 1055-6:2005-03 ergebenden Lasten für schlanke Silozellen entspricht im wesentlichen dem Lastniveau der bisher gültigen DIN 1055-6:1987-05.

Bei kleinen Silos der Anforderungsklasse 1 kann auf die Berücksichtigung der Streuung der Schüttgutkennwerte verzichtet werden. Dabei sind aber wie in der alten DIN 1055-6:1987-05 entsprechend größere Lasterhöhungsfaktoren für die einzelnen Lastfälle zu verwenden.

6.2 Ungleichmäßige Lasten

Streuungen der Schüttgutkennwerte, Einflüsse infolge Imperfektionen, wie z. B. Unebenheiten der Silowand, führen in den meisten Fällen zu unsymmetrischen Lastverteilungen im Silo. Diese werden zudem durch unterschiedliche Lagerungsdichten beim Befüllen der Silos und insbesondere durch Exzentrizitäten beim Füllen und Entleeren hervorgerufen. Die Folge ist eine Biegebeanspruchung der Silowände, die insbesondere bei kreiszylindrischen Silozellen durch entsprechende Lastansätze zu betrachten ist.

Diese Einflüsse wurden erstmals in der DIN 1055-6:1987-05 durch die Einführung der Teilflächenlasten berücksichtigt. Der durch ingenieurmäßige Betrachtungen [29] entwickelte Ansatz erfaßt die Einflüsse der Siloschlankheit, der Dicke der Silowand, des Schüttgutes und die Exzentrizität beim Entleeren. Lediglich unter der Voraussetzung einer am Fuß- und Kopfe ausreichenden Aussteifung der Schale konnte die Teilflächenlast durch eine zusätzliche Erhöhung der gleichmäßigen Lasten ersetzt werden.

Ein Nachteil des „alten“ Ansatzes war, daß sowohl für Stahl- als auch Stahlbetonsilos der gleiche Lastansatz verwendet wurde. Lokal hohe Biegemomente lassen sich bei dünnen Schalen jedoch in aller Regel ohnehin nicht durch entsprechende Biegesteifigkeiten abtragen. Deshalb wird der Ingenieur bei der Bemessung von Stahlsilos lokal

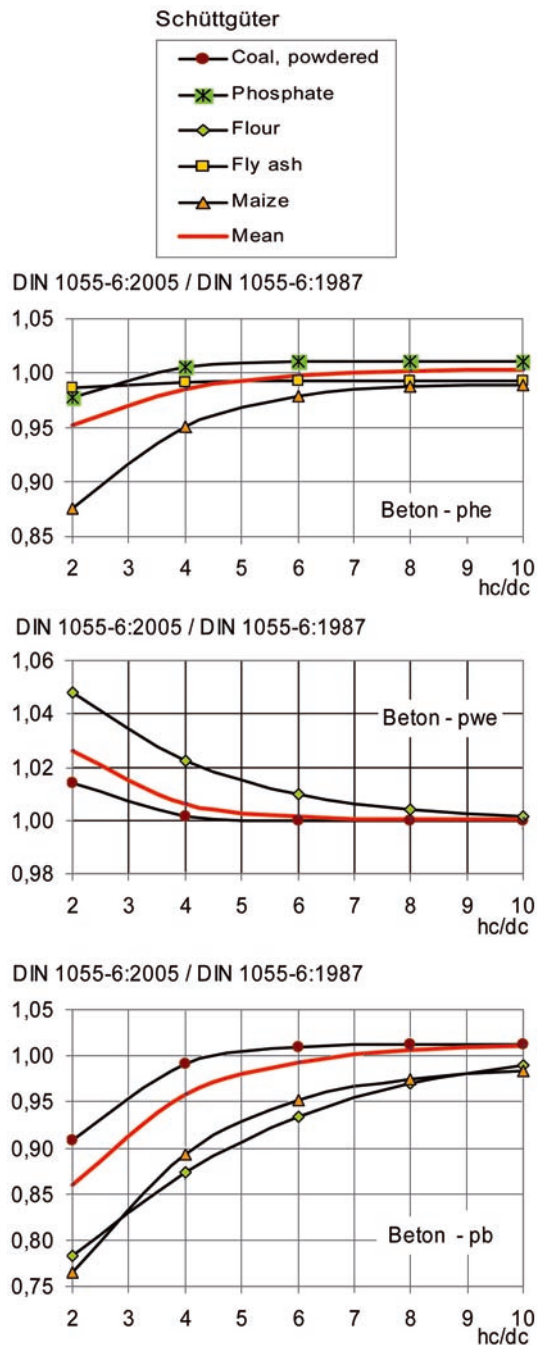
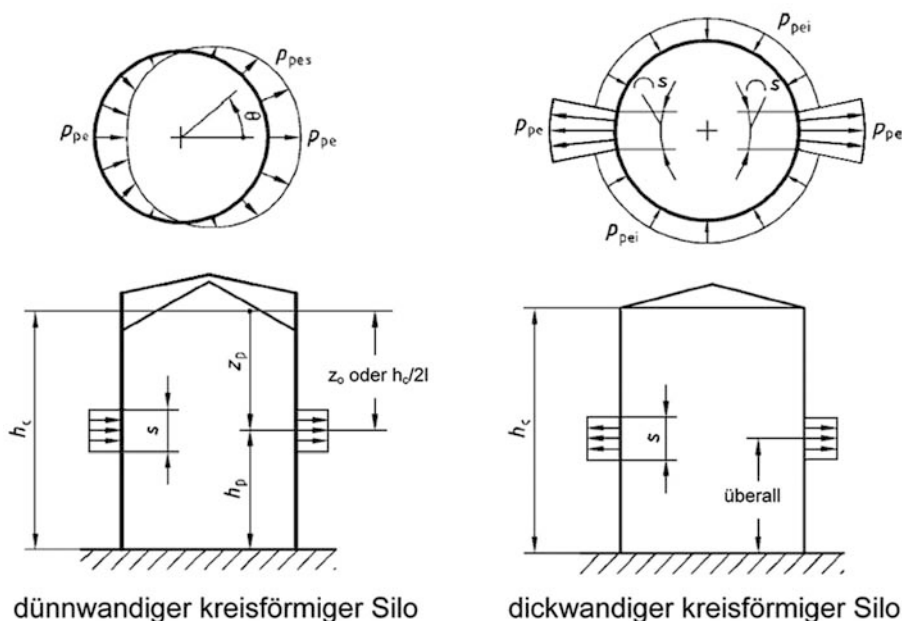


Bild 8. Vergleich der Horizontal-, Wandreibungs- und Bodenlasten nach alter und neuer DIN 1055-6 für ein Stahlbetonsilo (Mittelwert und Streuband)
Fig. 8. Comparison of horizontal, wall friction and bottom loads due to DIN 1055-6:1987 and DIN 1055-6:2005 (mean value and scattering)



$p_{pe} = C_{pe} p_{he}$

$p_{pei} = 1/7 p_{pe}$

$C_{pe} = 0,42 C_{Op} [1 + 2E^2] (1 - \exp\{-1,5 [(h_c/d_c) - 1]\}) \geq 0; h_c/d_c > 1,2$

$C_{pe} = 0,272 C_{Op} \{(h_c/d_c) - 1\} + E \geq 0; h_c/d_c \leq 1,2$

$s = \pi d_c / 16 \approx 0,2 d_c$

$E = 2 e / d_c$

Bild 9. Ansatz der Teilflächenlasten nach DIN 1055-6:2005

Fig. 9. Side elevation and plan view of discharge patch load of DIN 1055-6:2005 for circular thin walled (steel) silo (left side) and other circular (concrete) silo (right side)

hohen Biegemomenten mit einem im Stahlbau grundsätzlich durchaus legitimen Zulassen von Plastifizierungen begegnen. Dies wiederum widerspricht dem ursprünglichen Gedanken des Ansatzes der Teilflächenlast als Ersatzlast.

Die Teilflächenlasten für dünnwandige Silos haben sich grundlegend geändert.

Diesem Rechnung tragend wurde auf europäischer Ebene bereits in [16] für Stahlsilos ein anderer ungleichförmiger Lastansatz (Teilflächenlast) in Form eines über den Umfang cosinusförmig verlaufenden Lastbandes eingeführt (Bild 9). Dieses Lastband führt gewollt zu Ungleichgewichtskräften, die neben einer Biegebeanspruchung in Umfangsrichtung auch zu Biegebeanspruchungen in Meridianrichtung und infolge dessen zu zusätzlichen Vertikalbeanspruchungen in der Siloschale führen, die sich zum Fußpunkt des Silos aufsummieren.

Die Teilflächenlasten für schlanke Stahlbetonschalen (dickwandige Silos) und geringen bis mittleren Exzentrizitäten $e_o/d_c \leq 0,25$ entsprechen von der Größenordnung den Ansätzen der DIN 1055-6:1987-05 (Bild 10). Aus Gleichgewichtsgründen werden diametral gegenüberliegende Teilflächenlasten p_p gleicher Größenordnung angesetzt. Um zusätzliche Ringzugnormalkräfte in der Schale zu verhindern, wurde im Bereich außerhalb der Teilflächenlast ein nach innen gerichteter Ringdruck mit $\alpha \cdot p_p$ der Größe der Teilflächenlast berücksichtigt. Der Beiwert läßt sich aus folgender Gleichgewichtsbetrachtung abschätzen:

$$Z = r \int_0^{\pi/32} \cos \varphi \cdot p_p \cdot d\varphi + r \int_{\pi/32}^{\pi/4} \cos \varphi \cdot \alpha \cdot p_p \cdot d\varphi = 0$$

$$\frac{Z}{r} = [p_p \cdot \sin \varphi]_0^{\pi/32} + [p_p \cdot \alpha \cdot \sin \varphi]_{\pi/32}^{\pi/4} = 0$$

$$\alpha = \frac{\sin(\pi / 32)}{\sin(\pi / 4) - \sin(\pi / 32)} \approx 1 / 7$$

Die nach DIN 1055-6:2005 anzusetzende Teilflächenlast ist abhängig vom Schüttgut (Schüttgutbeiwert C_{Op} siehe Abschn. 5.), von der Exzentrizität des Füll- und Entleerungsvorganges und der Schlankheit. Die Abhängigkeiten der beiden letzten Einflußfaktoren sind in Bild 11 vergleichend dargestellt. Die Ansätze unterscheiden sich demnach für schlanke Silos aus Stahlbeton nur unwesentlich. Im Bereich von Silos mit geringer und mittlerer Schlankheit wird in der DIN 1055-6:2005 nun der Einfluß der Teilflächenlast stark reduziert. Bei niedrigen Silos ist eine Teilflächenlast im Lastfall Entleeren nur bei exzentrischer Entleerung mit $e_o > 0,1 d_c$ anzusetzen.

Die bei ausreichend ausgesteiften Schalen ersatzweise ansetzbare Erhöhung der gleichmäßigen Lasten für dickwandige kreiszylindrische Schalen wurde aus den gleichen Überlegungen hergeleitet wie die ersatzweise ansetzbare Erhöhung nach der alten DIN 1055-6:1987-05.

7 Lasten beim Entleeren mit großen Exzentrizitäten

Bei Entleerung mit großen Exzentrizitäten ist damit zu rechnen, daß sich im Silo ein Schlotfluß einstellt und die-

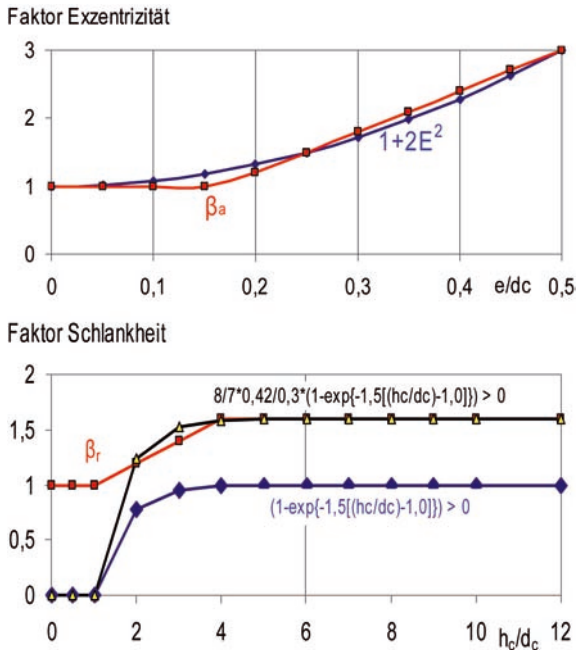


Bild 10. Vergleich der Einflüsse Exzentrizität und Schlankheit auf die Teilflächenlasten nach DIN 1055-6:2005-03 und DIN 1055-6:1987-05
 Fig. 10. Comparison of the patch load influences of eccentricity of discharge and slenderness of silos according to the rules of DIN 1055-6:2005-03 and DIN 1055-6:1987-05

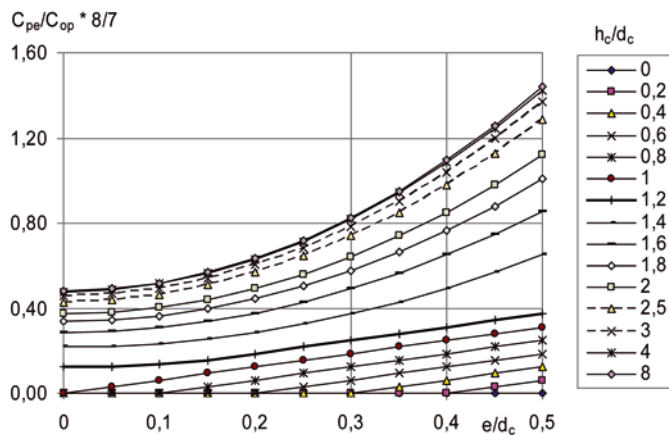
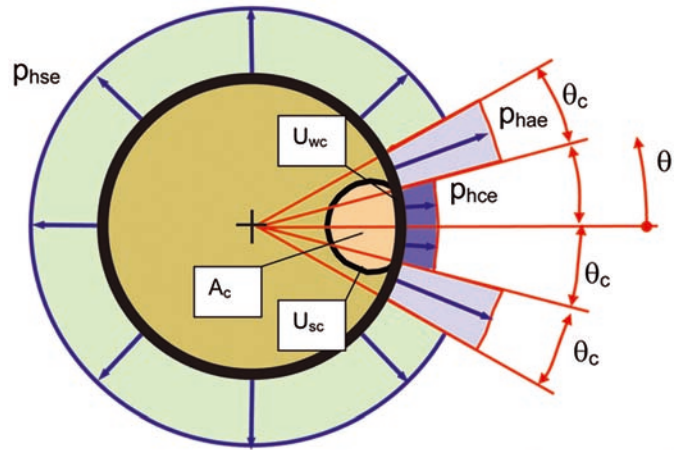


Bild 11. Abhängigkeit der Teilflächenlast nach DIN 1055-6:2005-03 von Exzentrizität und Schlankheit bei niedrigen und Silos mittlerer Schlankheit
 Fig. 11. Influence of eccentricity of discharge and silo slenderness in case of squat and intermediate silos according to DIN 1055-6:2005-03

ser sich in der Nähe der Wand ausbildet. In den Kontaktbereichen des fließenden Schüttgutes mit der Silowand treten deutlich niedrigere Horizontaldrücke auf als in den Kontaktflächen des sich in Ruhe befindlichen Schüttgutes außerhalb des Fließkanals. Dies ergibt sich bereits aus der Betrachtung des den Silodruck bestimmenden hydraulischen Radius, der bei einem Schlotfluß – als Silo im Silo interpretierbar – sehr viel kleinere Werte annehmen kann, wie der des Gesamtsilos. Diese Zusammenhänge sind nicht neu (z. B. [30], [31]), werden aber durch die Ergebnisse der neueren Forschungsarbeiten weiter belegt. Bereits im Ausschuß zur DIN 1055-6:1987-05 wurden diese



Fließkanal-Silowand $p_{hce} = \gamma K z_{oc} (1 - e^{-z/z_{oc}})$
 Ruhezone-Silowand $p_{hse} = p_{hf}$
 Übergang-Silowand $p_{hae} = \xi p_{hf}$
 $z_{oc} = \frac{1}{K} \left(\frac{A_c}{U_{wc} \mu + U_{sc} \tan \phi_i} \right)$ $\xi = \frac{\sin 2\theta_c - \beta \sin \theta_c}{\sin 2\theta_c - \sin \theta_c}$
 $\beta = \frac{(\pi - \psi)G^2 + \theta_c - G \sin(\psi - \theta_c)}{\theta_c + G(\pi - \psi) \frac{1}{\eta}}$

Bild 12. Lastansätze für Silos mit großen Entleerungsexzentrizitäten nach DIN 1055-6:2005-03
 Fig. 12. Pressure distribution in case of eccentric discharge flow channel according to DIN 1055-6:2005-03

Lastsituationen betrachtet und unterschiedliche Ansätze zur Berücksichtigung dieses Lastfalles diskutiert. Letztendlich sah man jedoch diesen Lastfall durch den Ansatz der Teilflächenlast offenbar als ausreichend abgedeckt an. Tatsächlich gab es aber seit Einführung von DIN 1055-6:1987-05 insbesondere beim Entleeren von dünnwandigen und verformungsempfindlichen Stahlsilos Schäden, die auf diese speziellen Lastsituationen beim exzentrischen Entleeren zurückzuführen sind [32], [33]. Für dünnwandige Silobauten nach DIN 18914 [34] sind deshalb diese Lastsituationen grundsätzlich ausgeschlossen. Aber auch Schäden an Stahlbetonsilos lassen sich zumindest zum Teil auf diesen Lastfall zurückführen [35], [36].

Die neue Fassung von DIN 1055-6:2005 sieht für die sich über den Siloumfang einstellenden ungleichförmigen Lasten beim Entleeren mit großen Exzentrizitäten einen separaten neuen Lastansatz vor.

Der in [1] enthaltene Lastansatz für kreiszylindrische Silozellen wurde von Rotter [22] durch Anwendung der Scheibenelementmethode entwickelt. In der aktuellen Berichtigung zur DIN 1055-6:2005 sind in den Einzelregelungen zur Umsetzung dieses Lastansatzes geringe Abweichungen zu den entsprechenden Regelungen in ENV 1991-4 enthalten.

Zur Bestimmung der Lasten, die durch Exzentrizitäten beim Entleeren hervorgerufen werden, wird ausgehend von

der Entleerungsöffnung (Mittelpunkt der Exzentrizität des Fließkanals) ein Fließkanal mit vertikalen Schlotwänden parallel zur Silowand angesetzt. Der Fließkanalquerschnitt wird somit über die Höhe als konstant angenommen. Dabei wird von einem kreisförmigen Fließkanal ausgegangen, der die Silowand unter einem Öffnungswinkel θ_c (vom Querschnittsmittelpunkt betrachtet) schneidet (Bild 12). Der gesamte Öffnungswinkel beträgt damit $2\theta_c$. Der Radius des Fließkanals läßt sich nur in den seltensten Fällen bestimmen oder herleiten und muß daher im Regelfall vorgegeben werden. Es sollen mindestens drei Fließkanalgeometrien mit unterschiedlichen Fließkanalradien untersucht werden: $G = r_c/r = 0,35$, $G = 0,50$ und $G = 0,65$.

Die Größe der im Fließkanal auf die Silowand wirkenden Lasten und die Geometrie des Fließkanals hängen neben dem zu wählenden Fließkanalradius nur noch von den Schüttgutkennwerten, Wandreibung und innerer Reibung ab. Auch die Exzentrizität des Fließkanals läßt sich aus diesen Werten ableiten: $e_c/r = \{\eta(1-G) + (1-\eta)\sqrt{1-G}\}$

Im Bereich der Berührungsflächen des Fließkanals mit der Silowand werden sich aufgrund der Janssen-Theorie umso niedrigere Silodrücke einstellen, je kleiner der Fließkanalradius ist. Im Bereich der Silowand außerhalb des Einflußbereiches des Fließkanals werden auch im Entleerungsfall in erster Näherung die Lasten des Lastfalls Füllen angesetzt. Unmittelbar neben dem Fließkanal wird bis zu einem Öffnungswinkel von $2\theta_c$ eine Druckerhöhung angesetzt, die das in experimentellen, numerischen und theoretischen Untersuchungen festgestellte horizontale Druckgewölbe bei stark exzentrischen Entleerungen berücksichtigt.

Die Höhe der Horizontallasten neben dem Fließkanal wird so berechnet, daß für die theoretischen Tangentenwerte der Horizontallasten $p_{he}(z = \infty) = \gamma r_h/\mu$ in theoretischer unendlicher Tiefe $z = \infty$ (was bedeutet: $1 - e^{-z/z_0} = 1$) in einem horizontalen Schnitt Gleichgewicht herrscht.

Mit den folgenden Ansätzen

$$p_{hce}(z = \infty) = \beta \cdot p_f(z = \infty)$$

$$p_{hae}(z = \infty) = \xi \cdot p_f(z = \infty)$$

$$p_{hse} = p_f$$

$$\beta = \frac{p_{hce}(z = \infty)}{p_{hf}(z = \infty)} = \frac{(\pi - \psi)G^2 + \theta_c - G \sin(\psi - \theta_c)}{\theta_c + G(\pi - \psi)} \frac{1}{\eta}$$

und der Kesselformel $Z = p_f \cdot r$ sowie der Aufintegration in der Tiefe $z = \infty$

$$Z = r \int_0^{\theta_c} \cos \varphi \cdot p_{hce} \cdot d\varphi + r \int_{\theta_c}^{2\theta_c} \cos \varphi \cdot p_{hae} \cdot d\varphi + r \int_{2\theta_c}^{\pi/2} \cos \varphi \cdot p_{hse} \cdot d\varphi$$

$$\frac{Z}{r} = [p_{hce} \cdot \sin \varphi]_0^{\theta_c} + [p_{hae} \cdot \sin \varphi]_{\theta_c}^{2\theta_c} + [p_{hse} \cdot \sin \varphi]_{2\theta_c}^{\pi/2}$$

ergibt sich für das Gleichgewicht $Z = p_f \cdot r$. Damit läßt sich der gesuchte Wert ξ bestimmen zu:

$$p_f = p_{hce} \cdot \sin \theta_c + p_{hae} (\sin 2\theta_c - \sin \theta_c) + p_{hse} (1 - \sin 2\theta_c)$$

$$1 = \beta \sin \theta_c + \xi (\sin 2\theta_c - \sin \theta_c) + (1 - \sin 2\theta_c)$$

$$\xi = \frac{\sin 2\theta_c - \beta \sin \theta_c}{\sin 2\theta_c - \sin \theta_c}$$

Vollständiges Gleichgewicht läßt sich über diese Betrachtung dennoch nicht ganz erreichen, weil die Lastanteile für die Lasten im und außerhalb des Fließkanals unterschiedliche Funktionsverläufe über die Silotiefe der Exponentialfunktion, das heißt Völligkeiten, aufweisen. Dies ist über diese Modifikation nicht erfaßt. Es läßt sich aber zeigen, daß bei großen Fließkanalradien und den tabellierten Schüttgütern diese Ungleichgewichtskräfte selbst in kleinen Schüttguttiefen nur gering sind. Bei kleinen Fließkanalradien sind die Ungleichgewichtskräfte ohnehin nicht groß.

Bei großen Fließkanalbegrenzungswinkeln θ_c nehmen die Randlasten p_{hae} zu, bei einem Fließkanalbegrenzungswinkel von ca. $\theta_c = 45^\circ$ sogar überproportional stark. Ab einem Fließkanalbegrenzungswinkel $\theta_c = 60^\circ$ läßt sich bei einem Verhältnis $\beta = p_{hce}/p_f < 1$ überhaupt kein Gleichgewicht herstellen. Es ist daher sinnvoll, Bedingungen grundsätzlich auszuschließen, die Verhältnisse mit Fließkanalbegrenzungswinkel $\theta_c > 45^\circ$ ergeben und somit zu einer starken Zunahme der Lasten neben dem Fließkanal führen. Diese Grenzverhältnisse ($\theta_c > 45^\circ$) stellen sich z. B. bei einem Verhältnis $\eta = \mu/\tan \phi_i = 0,25$ ab einem Fließkanalradius von $r_c/r = 0,75$ ein (Bild 13). Eine Begrenzung des Fließkanalradius ist grundsätzlich auch deshalb sinnvoll, weil die Annahme, daß außerhalb des Einflußbereiches des Fließkanals die Horizontallasten auf dem Niveau der Fülllasten bleiben, bei großen Fließkanalbegrenzungswinkeln nicht realistisch ist. Als sinnvoller oberer Fließkanalradius wurde $r_c = 0,65 r$ festgelegt.

Bei großen Wandreibungswerten (diese führen zu hohen η -Werten) existieren nur kleine Kontaktbereiche zwischen dem Fließkanal und der Silowand, da die Fließkanalbegrenzungswinkel klein sind. Daraus resultieren nur lokal begrenzte Biegemomente.

Bei den meisten tabellierten Schüttgüter ergäben sich für Stahlbetonsilos Verhältniszahlen von η , die nahe dem Wert 1 liegen, was zu sehr kleinen bis keinen Kontaktbereichen zwischen Fließkanal und Silowand führen würde. Deshalb ist es sinnvoll, das Verhältniszahlen η zwischen der Wandreibung und dem Winkel der inneren Reibung zu begrenzen. Als Begrenzung wurde der Wert $\eta_{\text{grenz}} = 0,8$ festgelegt.

Aus der Berechnung eines Silos mit den Ansätzen der Teilflächenlast und mit einem Fließkanal nahe der Silowand nach Bild 12 ergeben sich die Verformungsbilder von Bild 14 und der Verlauf der Biegemomente von Bild 15. Sie zeigen einen prinzipiellen Unterschied in der Beanspruchung einer Stahlbetonsiloschale. In dieser Vergleichsberechnung entspricht der Fließkanalradius der Größe der mit der Teilflächenlast beaufschlagten Fläche.

Während die nach außen gerichtete Teilflächenlast über Biegung vorwiegend zusätzliche Zugkräfte an der Außenseite der Schale erzeugt, kann es beim Lastansatz mit Fließkanal unter Umständen zu beträchtlichen zusätzlichen Zugkräften an der Innenseite und somit zu erforderlicher inneren horizontaler Bewehrung führen. Die Momentenänderungen sind zudem mit nicht zu vernach-

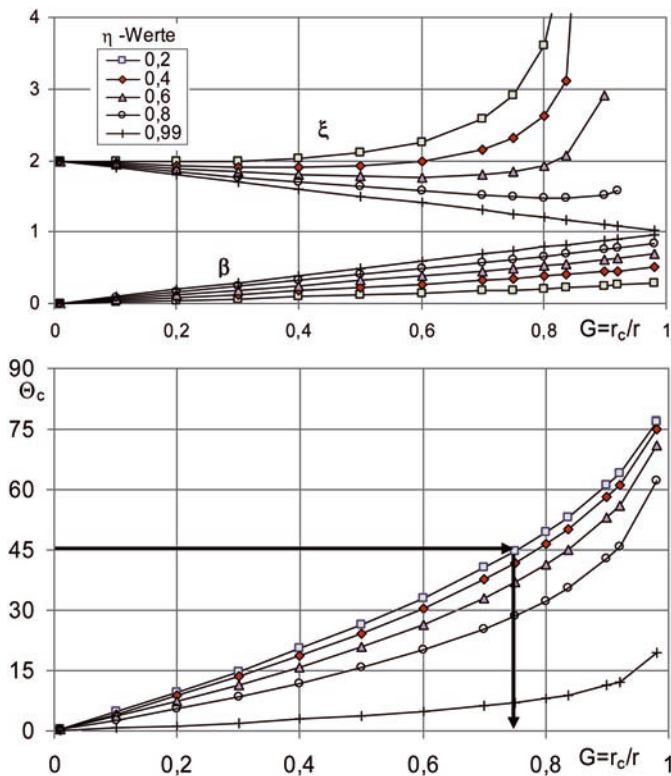


Bild 13. Abhängigkeiten des Fließkanalöffnungswinkels und der Lastfaktoren ξ und β von dem Fließkanalradius $G = r_c/r$ und dem Verhältnis $\eta = \mu/\tan \phi_i$

Fig. 13. Influence of flow channel radius $G = r_c/r$ and friction ratio $\eta = \mu/\tan \phi_i$ for the eccentric flow channel wall contact angle and the pressure multiplier factors ξ und β

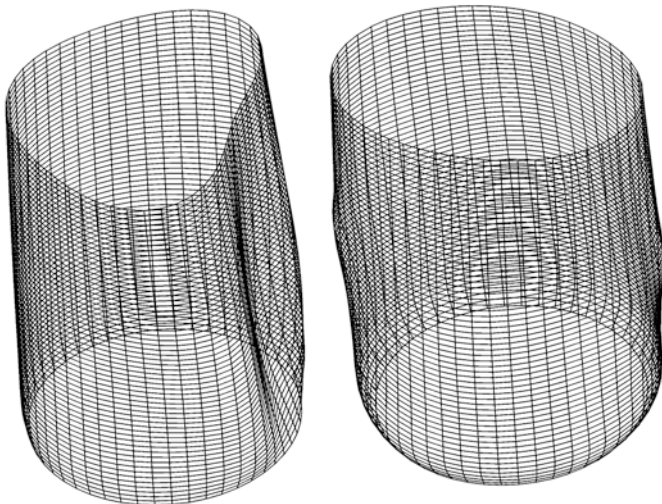


Bild 14. Vergleich der Beanspruchung einer Belastung mit exzentrischem Fließkanal nach [22] und Teilflächenlast beaufschlagte Siloschale mit frei verformbarem oberem Rand (Stahlbetonsilo $h_c/d_c = 24/16$; Schüttgut Gerste); Lastansätze entsprechend DIN 1055-6:2005-03, aber mit $G = 0,2$

Fig. 14. Comparison of deformation pattern of silo shell loaded by eccentric discharge flow channel pressure distribution and patch load pattern with nonfixed upper boundary of shell (concrete silo $h_c/d_c = 24/16$; bulk material: barley); load pressure according to DIN 1055-6:2005-03 but with $G = 0,2$

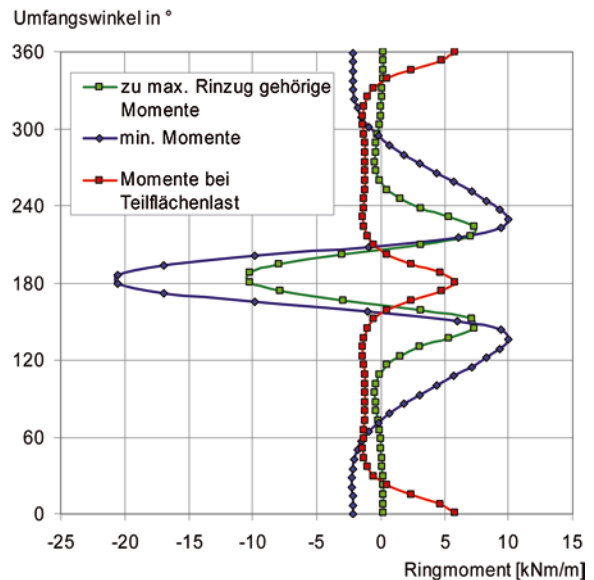


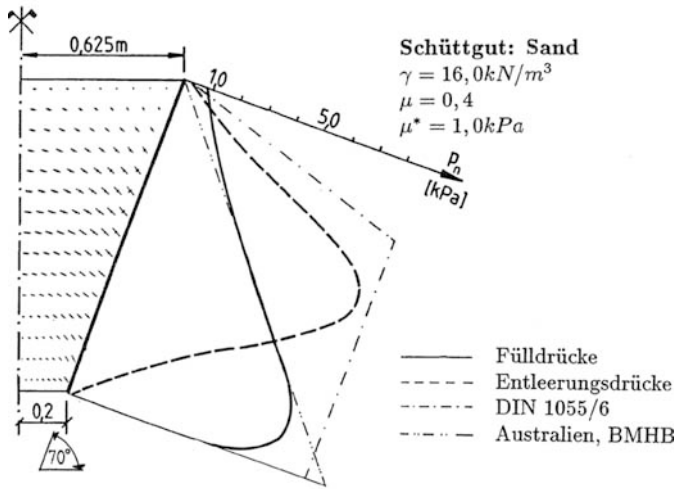
Bild 15. Vergleich der Momentenbeanspruchungen in Umfangsrichtung aus Teilflächenlast und Berechnung mit exzentrischem Fließkanal für einen Silo ohne obere Randverstärkung (Stahlbetonsilo $h_c/d_c = 38/7$; Schüttgut Gerste); Lastansätze entsprechend DIN 1055-6:2005-03 mit einem der Teilflächenlast entsprechenden Fließkanalradius $r_c/r = 0,2$

lässigen Querkräften verbunden, welche bei der Bemessung selbstverständlich zu berücksichtigen sind. Es liegt somit eine für Stahlbeton sehr ungünstige Belastungskonstellation von Ringzug-, Biege- und Querkraftbeanspruchung vor [36], so daß der Einsatz einer teilweisen Vorspannung der Siloschale bereits viel früher als nach der Betrachtung der bisherigen Lastansätze zu empfehlen ist.

8 Trichterlasten

Die Lasten auf Trichterwände von Silozellen setzen sich aus den Lastanteilen des im Trichter und des im vertikalen Siloschaft gelagerten Schüttgutes zusammen. Die Gleichungen zur Ermittlung der Lasten auf Auslauftrichter nach der DIN 1055-6:1987-05 basieren auf empirischen Untersuchungen. Anhand von Auslaufberechnungen (Bild 16) läßt sich zeigen, daß der Ansatz für den Anteil der Trichterfüllung die Umhüllende der Lastzustände des Füllzustandes, des Entleerungsbeginns und des stationären Entleerens darstellt. Dies kann am Trichteransatz zu Anschlußschnittkräften führen, die deutlich höher sind als die, die sich aus einer Gleichgewichtsbetrachtung mit dem im Trichter gelagerten Schüttgut und den auf den Trichter wirkenden Überschüttungslasten ergäben.

Dieses Konzept zur Ermittlung der Trichterlasten wird weiterhin als Alternative im Anhang G der DIN 1055-6:2005 beibehalten. Die favorisierten Lastansätze im Hauptteil der Norm wurden von Rotter [22] auf der Grundlage der Theorie von Walker [38] und unter Berücksichtigung der von Motzkus [39] untersuchten



Hauptspannungsfeld für Lastfall Entleeren

Bild 16. Anhand Entleerungsberechnungen numerisch ermitteltes Spannungsfeld im Schüttgut und zugehörige Trichterwandlasten im Vergleich zu dem Lastansatz von DIN 1055-6:1987-05 ([11])

Fig. 16. Numerically calculated stress field inside discharged silo hopper and pressure profile at hopper wall for filling and discharge compared with loads according to DIN 1055-6:1987-05 ([11])

maßgeblichen empirischen Phänomene abgeleitet. Sie stellen eine geschlossene Lösung der Zustandsgleichungen im Trichter unter Bewahrung des Gleichgewichtes dar. Die Basisgleichung zur Bestimmung der Vertikallasten im Trichter lautet:

$$p_v = \left(\frac{\gamma h_h}{n-1} \right) \left\{ \left(\frac{x}{h_h} \right) - \left(\frac{x}{h_h} \right)^n \right\} + p_{vft} \left(\frac{x}{h_h} \right)^n$$

Die Variable x bezeichnet den Abstand von der gedachten Trichterspitze und h_h die Trichterhöhe. Der erste Teil der Gleichung resultiert aus dem im Trichter gelagerten Schüttgut, der zweite Teil berücksichtigt eine eventuelle Überschüttung p_{vft} .

Die Bestimmungsgleichungen für die Trichterlasten berücksichtigen die unterschiedlichen Grenzspannungsbeziehungen an den Trichterwänden bei unterschiedlichen Fließarten und in Abhängigkeit von dem Trichterneigungswinkel und den Schüttgutkennwerten.

Die senkrecht auf die Trichterwände anzusetzenden Lasten errechnen sich aus $p_n = F \cdot p_v$. Der Parameter F beschreibt die sich in Abhängigkeit vom Trichterneigungswinkel und den Schüttgutkennwerten an der Trichterwand einstellenden Spannungsverhältnisse (Bild 17).

Es ist zwischen steilen und flachen Trichtern zu unterscheiden. Das Grenzkriterium ist über die Bedingung $\tan\beta < \frac{(1-K)}{2\mu_h}$ definiert, wobei β den Trichterneigungswinkel bezogen auf die Vertikale darstellt. Ist diese Bedingung erfüllt, liegt ein steiler Trichter mit „Gleiten“ an der

| flache Trichter | Füllen | steile Trichter |
|--------------------------------------|--------|--|
| $\mu_{eff} = (1-K) / (2 \tan \beta)$ | | $\mu_{eff} = \mu_{h,l}$ |
| $n = 2 (1-b) \mu_{eff} \cot \beta$ | | $n = S (1-b) \mu_h \cot \beta$ |
| $F_f = 1$ | | $F_f = 1 - \frac{b}{1 + (\tan \beta / \mu_h)}$ |
| wie Füllen | | Entleeren |
| | | $n = S (F_e \mu_h \cot \beta + F_e) - 2$ |
| | | $F_e = \frac{1 + \sin \phi_s \cos \varepsilon}{1 - \sin \phi_s \cos (2\beta + \varepsilon)}$ |
| | | $\varepsilon = \phi_{wh} + \arcsin(\sin \phi_{wh} / \sin \phi_s)$ |
| | | (1-b) = 0,8 (empirische Konstante) |

abgeleitet aus Theorie von Walker [1966]

Bild 17. Parameter zur Berechnung der Trichterlasten nach DIN 1055-6:2005-03

Fig. 17. Parameters for calculating the hopper loads according to DIN 1055-6:2005-03 depending on different load cases and steepness of hopper wall

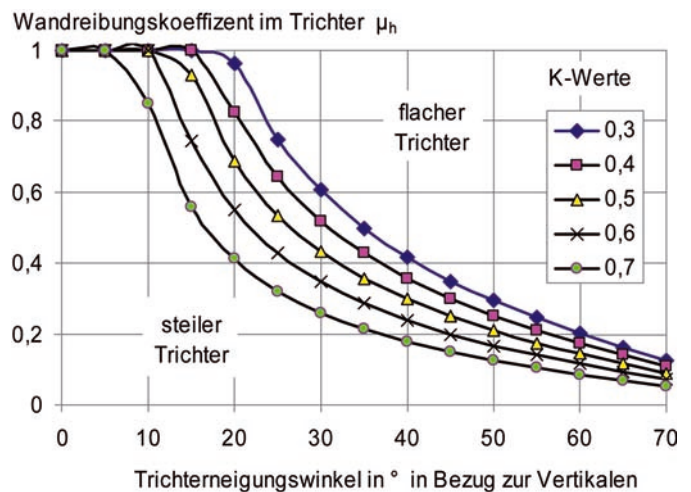


Bild 18. Grenze zwischen steilem und flachem Trichter in Abhängigkeit vom Trichterneigungswinkel β , Wandreibungskoeffizient μ_h und Horizontallastverhältnis K

Fig. 18. The boundary between steep and shallow hoppers with influence of hopper inclination angle measured from the vertical β , hopper wall friction coefficient μ_h and lateral pressure ratio K

Trichterwand, ansonsten ein flacher Trichter mit „Gleiten“ innerhalb des Schüttgutes vor (Bild 18).

In steilen Trichtern, bei denen sich beim Entleeren Massenfluß im Trichter einstellt, wird zusätzlich zwischen dem Lastfall Füllen und Entleeren unterschieden. Die Lastspitze am Übergang vom Siloschaft zum Trichter (in [2] als „Switch“ bezeichnet) ist bereits als Ergebnis aus den Zustandsgleichungen enthalten und muß nicht als zusätzlicher Lastfall wie in den Ansätzen der alten DIN 1055-6:1987-05 angesetzt werden. Bei flachen Trichtern bildet sich beim Entleeren ein Schlotfluß innerhalb des Trichters entsprechend DIN 1055-6:2005-03, Bild 2b und

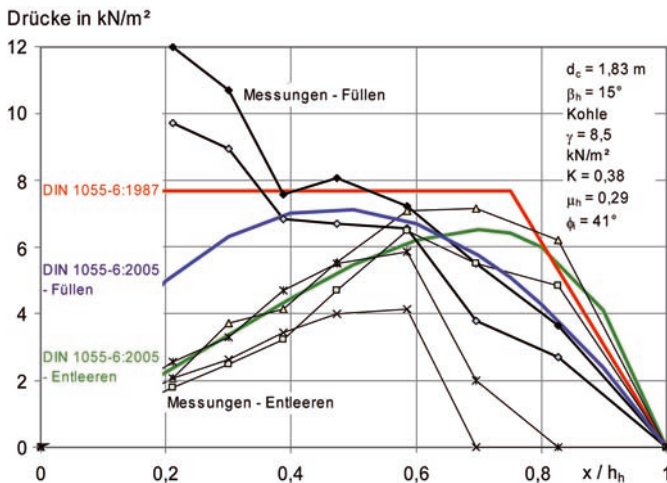


Bild 19. Vergleich der Trichterlasten aus Messungen mit den Lastansätzen nach DIN 1055-6:2005-03 und DIN 1055-6:1987-05 für einen steilen Trichter
Fig. 19. Measured hopper loads compared with hopper load pattern according to DIN 1055-6:2005-03 and DIN 1055-6:1987-05 in case of a steep hopper

Bild 2c aus, der die Lasten auf die Trichterwände nur unwesentlich beeinflusst.

Bild 19 zeigt für einen steilen Trichter ohne Überschüttung einen Vergleich der Lasten nach den Gleichungen der alten und neuen DIN 1055-6 mit experimentell bestimmten Silowandlasten. Man erkennt, daß die Ansätze der neuen DIN 1055 die gemessenen Lastverteilungen sehr gut wiedergeben.

9 Sonderlastfälle Erdbeben und Staubexplosion

In den Anhängen H und I werden zwei Lastsituationen beschrieben, die zwar keine reinen Lastfälle aus dem gespeicherten Schüttgut sind, von diesem aber wesentlich gekennzeichnet werden. Die Rede ist hier von Lasten infolge Erdbeben und infolge Staubexplosion.

Zur Staubexplosion werden allgemeine Angaben und Hinweise gegeben. Es wird auf den DIN-Fachbericht 140 [40] verwiesen, in dem Bemessungshilfen zur Abschätzung des Bemessungsdruckes und der zugehörigen erforderlichen Entlastungsflächen und der Rückhaltekräfte für die Entlastungskonstruktionen angegeben werden ([41]).

Zur Bemessung für den Lastfall Erdbeben werden einfache Lastansätze gegeben. Diese Bemessungsregeln ergänzen die allgemeinen Regeln der DIN 4149 zur Berechnung von Konstruktionen unter seismischen Einwirkungen. Die Lastansätze sind als Lasten im Sinne des Ersatzlastverfahrens zu sehen. Es werden ausschließlich die horizontalen Erdbebenbeschleunigungen berücksichtigt. Vergleichende Untersuchungen mit Hilfe von numerischen Simulationen zum Teil nach den speziellen Regeln der europäischen Vornorm prENV 1998-4 [44], [43] und unter Zugrundelegung der elastischen Bemessungswertspektren zeigen [42], daß das Ersatzlastverfahren bei schlanken Silozellen relativ gute Übereinstimmung mit den numerischen Berechnungen liefert. Bei niedrigen Silos liegt dagegen das Ersatzlastverfahren zum Teil extrem auf der sicheren Seite. Erklärt wird dies dadurch, daß bei

gedrungen Silos, ein großer Teil der Horizontallasten aus der Beschleunigung des Schüttgutes direkt über Reibung in den Baugrund abgetragen wird und die in dem Ersatzlastverfahren angesetzte horizontale Beschleunigung unabhängig von der Siloschlankheit definiert ist [43].

In der Bundesrepublik Deutschland ist der Lastfall Erdbeben selten die maßgebende Lastsituation. Aufwendige numerische Betrachtungen scheinen nach derzeitigem Erkenntnisstand deshalb nicht gerechtfertigt. Mit den Lasten des Ersatzlastverfahrens soll der Lastfall Erdbeben zumindest bei der Bemessung berücksichtigt werden. Die Lastansätze in [1] können dazu verwendet werden, bis an anderer Stelle genauere Angaben gemacht werden. Erste jedoch unwesentlich genauere Ansätze hierzu, die den Ansätzen in [1] ähnlich sind, sind im prEN 1998-4 [44] zu finden.

10 Fazit

Mit Vorliegen des Weißdruckes der neuen DIN 1055-6:2005-03 wird die bis jetzt gültige Version aus dem Jahr 1987 abgelöst, die bereits auf ein international anerkanntes Niveau der Lasten in Silozellen führte. Dieses Lastniveau wird mit der Einführung der neuen DIN 1055-6:2005 in den wesentlichen Anwendungen beibehalten. Der physikalischen Bedeutung der die Silolasten bestimmenden Schüttgutkennwerte sowie der Berücksichtigung deren Streuung wurde erstmals gebührende Beachtung geschenkt. Wesentliche Änderungen sind in den Lastansätzen für die ungleichförmigen Lasten bei dünnwandigen Silos und für Silos mit kleinen Schlankheiten von $h_c/d_c < 2$ sowie bei den Lasten auf Auslaufrichter zu verzeichnen. Diese Änderungen führen zu adäquateren Lastansätzen, aber insgesamt nicht auf ein wesentlich anderes Sicherheitsniveau. Neue Lastansätze wurden für die Entleerung mit großen Exzentrizitäten eingeführt, um Siloschäden, die auch in der jüngsten Vergangenheit aufgetreten sind, gebührend Rechnung zu tragen und diese in Zukunft zu vermeiden. In den Anhängen werden zudem Hilfen für die Berücksichtigung der Lastsituationen infolge von Erdbeben und Staubexplosionen gegeben.

Literatur

- [1] DIN 1055-6 Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 6: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter. Ausgabe März 2005.
- [2] DIN 1055-6 Lastannahmen für Bauten. Lasten in Silozellen. Ausgabe Mai 1987.
- [3] DIN 1055-6 Lastannahmen für Bauten. Lasten in Silozellen. Ausgabe November 1964.
- [4] Ergänzende Bestimmungen zu DIN 1055-6 - Ausgabe November 1964. Lastannahmen für Bauten; Lasten in Silozellen. Fassung Mai 1977.
- [5] Martens, P. (Hrsg.): Silohandbuch. Berlin 1988.
- [6] Pieper, K. und Wenzel, F.: Druckverhältnisse in Silozellen. Berlin 1964 und Aktuelle Fragen des Entwurf, der Belastung, der Berechnung und der Ausführung von Silozellen. Beton- und Stahlbetonbau 73 (1978), 192–198.
- [7] Jenike, A. W.: Storage and Flow of Solids. Bull. 123, Utah Engng. Exp. Station, Univ. of Utah, Salt Lake City, 1964.
- [8] Schwedes, J.: Fließverhalten von Schüttgütern in Bunkern. Weinheim 1968.

- [9] *Eibl, J. und Häussler, U.*: Silodrücker beim Füllen und Entleeren. *Beton- und Stahlbetonbau* 81 (1996), 136–138 und 189–193.
- [10] *Eibl, J., Rombach, G. A., Ruckebrod, C., Braun, B. und Mehrafza, M.*: Rechnerische Erfassung der Silodrücker – Algorithmen. In: *Eibl, J. und Gudehus, G.* (Hrsg.): *Silobauwerke und ihre spezifischen Beanspruchungen. Sonderforschungsbereiche*. Deutsche Forschungsgemeinschaft, Weinheim 2000.
- [11] *Gudehus, G.*: Siloprobleme aus bodenmechanischer Sicht. *Herle, I., Kolybas D.*: Mechanisches Verhalten von Silogütern. In: *Eibl, J. und Gudehus, G.* (Hrsg.): *Silobauwerke und ihre spezifischen Beanspruchungen. Sonderforschungsbereiche*. Deutsche Forschungsgemeinschaft, Weinheim 2000.
- [12] *Rotter, J. M.* (ed.): *Design of Steel Bins for Storage of Bulk Solids*. University of Sydney, Australia 1985.
- [13] *Brown C. J., Nielsen J.* (ed.): *Silos. Fundamentals of Theory, Behaviour and Design*. London, New York 1998.
- [14] ISO/DIS 11697: *Basis for Design of Structures – Loads due to Bulk Materials*. 1992.
- [15] FIP-Working Group “Silo Design”: *Recommendation for Concrete Silo Design*. 1991.
- [16] ENV 1994-1: *Eurocode 1: Basis of Design and Actions on Structures -Part 4: Actions in Silos and Tanks*. May 1995.
- [17] Entwurf DIN 1055-6 *Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 6: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter*. Ausgabe September 2000.
- [18] Entwurf DIN 1055-6 *Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 6: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter*. Ausgabe Mai 2002.
- [19] Final Draft prEN 1994-1: *Eurocode 1: Actions on Structures -Part 4: Silos and Tanks*. May 2004.
- [20] *Janssen, H. A.*: Versuche über Getreidedruck in Silozellen. *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure* 39 (1985), 1045–1049.
- [21] *Reimbert, M. and Reimbert, A.*: *Silos: Theory and Practice*. Trans Tech Publications, Clausthal, Bay Village, Ohio.
- [22] *Rotter, J. M.*: *Guide for the Economic Design of Circular Metal Silos*. London and New York 2001.
- [23] *Rotter, J. M.*: *Pressures in Squat Silos*. Note presented to CEN TC250/SC1/PT4 for EN 1991-4, Edinburgh August 2002.
- [24] *Munch-Andersen, J.*: *Last på planlagre fra friktionsmateriale og ensilage*. SBI-Anvisning 176, Statens Byggeforskningsinstitut, Horshølm, Denmark.
- [25] *Peter, J. und Lochner, G.*: *Zur Statik, Konstruktion und Ausführung eines Klinkerrundlagers – Hinweise für die Berechnung von Silowänden*. *Beton- und Stahlbetonbau* 72 (1977), 92–98 und 127–133.
- [26] *Rombach, G. A., Ruckebrod, C. and Stoffers, C.*: *Material Class System*. FIP/ISO-WG 5, Paper No 02/90.
- [27] *Nielsen, J. and Weidner, J.*: *The Choice of Constitutive Laws for Silo Media*. In [13].
- [28] *Kwade, A., Schulze A. und Schwedes, J.*: *Auslegung von Silos: Unmittelbare Messung des Horizontallastverhältnisses*. *Beton- und Stahlbetonbau* 89 (1994), 58–63 und 117–119.
- [29] *Schmidt, K. H. und Stiglat, K.*: *Anmerkungen zur Bemessungslast von Silos*. *Beton- und Stahlbetonbau* 82 (1987), 239–242.
- [30] *Peschl, I.*: *Probleme der Silostatik*. Haus der Technik e.V. Essen, Heft 386 Vulkan Verlag Essen 1976.
- [31] *Wagner, K.*: *Probleme des Silodruckes*. TU Karlsruhe 1971.
- [32] *Carson, J. W. and Holmes, T.*: *Silo Failures: Why Do They Happen?* In: *Tejchman J.* (ed.): *Task Quarterly*. Scientific Bulletin of Academic Computer Centre in Gdansk. Gdansk 2003.
- [33] *Pasternak, H., Hotala, E. und Vayas, I.*: *Schäden an Stahlsilos – weitere Beispiele*. *Stahlbau* 77 (2002), 108–112.
- [34] DIN 18914 *Dünnwandige Rundsilos aus Stahl sowie Erläuterungen*. September 1985.
- [35] *Kaldenhoff, M. und Schütte, J.*: *Schäden an Silos mit großen Entleerungsexzentrizitäten*. *Bauingenieur* 79 (2004), 560–567.
- [36] *Lippold, D. and Harder, J.*: *Analysis and Design of Silo Walls*. World Cement, November 2004.
- [37] *Kaldenhoff, M. und Ruckebrod, C.*: *Fließkanalradien*. Unveröffentlichtes Arbeitspapier des Unterausschusses SILOS des NA 005-51-02 AA „Einwirkungen auf Bauten“. Braunschweig/Karlsruhe Oktober 2005.
- [38] *Walker, D. M.*: *An Approximate Theory for Pressure and Arching in Hoppers*. *Chemical Engineering Science*, 21 (1966), 975–997.
- [39] *Motzkus, U.*: *Belastung von Siloböden und Auslauftrichtern durch körnige Schüttgüter*. TU Braunschweig 1974.
- [40] DIN-Fachbericht 140: *Auslegung von Siloanlagen gegen Staubexplosionen*. Ausgabe Januar 2005.
- [41] *Eibl, J., Nasr, T. und Friedrich, J.*: *Staubexplosionen in Siloanlagen – Die Auslegung einer Anlage*. *Bauingenieur* 79 (2004), 193–199.
- [42] *Braun, A.*: *Schüttgutbeanspruchungen von Silozellen unter Erdbebeneinwirkungen*. TU Karlsruhe 1997.
- [43] *Meskouris, K. und Hinzen, K.-H.*: *Bauwerke und Erdbeben*. *Gundlagen-Anwendung-Beispiele*. Wiesbaden 2003.
- [44] prEN 1998-4: *Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 4: Silos, Tanks and Pipelines*. December 2004.



Dr.-Ing. Cornelius Ruckebrod
c.ruckebrod@iibw.de



Dr.-Ing. Franz-Hermann Schlüter
fh.schluerer@iibw.de

Ingenieure im Bauwesen GbR
(ehem. Prof. Eibl + Partner GbR)
Stephanienstraße 102
76133 Karlsruhe