


|   |   |                               |
|---|---|-------------------------------|
|  | <b>Lastannahmen für Bauwerke</b><br>Lasten aus Schüttgütern in Bunkern,<br>Flachsilos und Silos | <b>TGL</b><br><b>32274/09</b> |
|   |   | Gruppe 921 020                |

Нагрузки и воздействия на здания и строительные сооружения; Нагрузки от насыпных материалов в бункерах, силосных сооружениях с башнями малой высоты и силосных сооружениях

Design Loads for buildings; Loads for storing materials in Silos

Deskriptoren: **Lastannahme**; Schuettgut; Silobau; Bunker

Umfang 22 Seiten

Verantwortlich: Bauakademie der DDR, Institut für Projektierung und Standardisierung, Berlin

Bestätigt: 19. 5. 1987, Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung, Berlin

Verbindlich ab Mai 1987

Dieser Standard gilt nicht für Lastannahmen zur Einlagerung von nichtfließfähigen kohäsiven Schüttgütern, z. B. Gärfutter.

### Inhaltsverzeichnis

|  | Seite |
|--|-------|
| 1. Grundsätze                                | 1     |
| 1.1. Allgemeine Forderungen                  | 1     |
| 1.2. Formelzeichen, Termini und Definitionen | 2     |
| 1.3. Schüttgüter                             | 4     |
| 1.4. Bauwerksgeometrie                       | 4     |
| 1.5. Bunker-, Flachsilo- und Silobetrieb     | 5     |
| 2. Schüttgutkennwerte und Lastbeiwerte       | 5     |
| 3. Ermittlung der Normlasten                 | 5     |
| 3.1 Bunker                                   | 5     |
| 3.2 Flachsilos                               | 5     |
| 3.3 Silos                                    | 8     |
| 4. Normlasten aus dem Silobetrieb            | 12    |
| 4.1. Füllen und Lagern                       | 12    |
| 4.2. Entleeren und Umlagern                  | 12    |
| 4.3. Technologische Bedingungen              | 19    |
| 5. Temperatureinwirkungen                    | 20    |
| 6. Besondere Einflüsse                       | 21    |
| 7. Rechenlasten                              | 21    |

## 1. GRUNDSÄTZE

### 1.1. Allgemeine Forderungen

Die Festlegungen dieses Standards sind bei der Berechnung der Lasten anzuwenden, die das Schüttgut auf die Bunker-, Flachsilo- oder Silokonstruktion überträgt. Lasten aus dem Schüttgut sind grundsätzlich als langfristig wirkende und vorwiegend ruhende Lasten anzusehen. Die Veränderlichkeit der Schüttguteigenschaften ist dabei besonders zu beachten. Lasten aus dem Schüttgut beim Entleeren können als kurzzeitig wirkend angenommen werden, wenn entsprechende nutzertechnologische Bedingungen gegeben sind. Für die Nachweise der 2. Gruppe der Grenzzustände sind mindestens 50% der kurzzeitig wirkenden Lastanteile aus dem Entleeren als langfristig wirkend anzusetzen:

- z. B. aus Abschnitt 4.2.1.  $0,5 \cdot (p_{n,h}^e - p_{n,h}^f)$   
 aus Abschnitt 4.2.2.  $0,5 \cdot (p_{n,h}^e + \Delta p_{n,h}^e - p_{n,h}^f)$   
 aus Abschnitt 4.2.3.1.  $0,5 \cdot (p_{n,h}^e + \Delta p_{n,h}^k - p_{n,h}^f)$   
 aus Abschnitt 4.2.3.2.  $0,5 \cdot (p_{n,h}^e + \Delta p_{n,h}^m - p_{n,h}^f)$   
 aus Abschnitt 4.2.4.  $0,5 \cdot (p_{n,h,d}^e - p_{n,h}^f)$

Lasterrhöhungen, die sich aus außergewöhnlichen Betriebszuständen oder Zellen- und Auslaufformen in Bunkern, Flachsilos und Silos ergeben können, z. B. exzentrisches Füllen und Entleeren über die Zellenwand, sind qualitativ einzuschätzen und entsprechend bei den Lastannahmen zu berücksichtigen.

Dieser TGL wurde digitalisiert vom Ingenieurbüro Friedrich Bau & Reko, Pellenstraße 7b, 08324 Bockau.

1.2. Formelzeichen, Termini und Definitionen

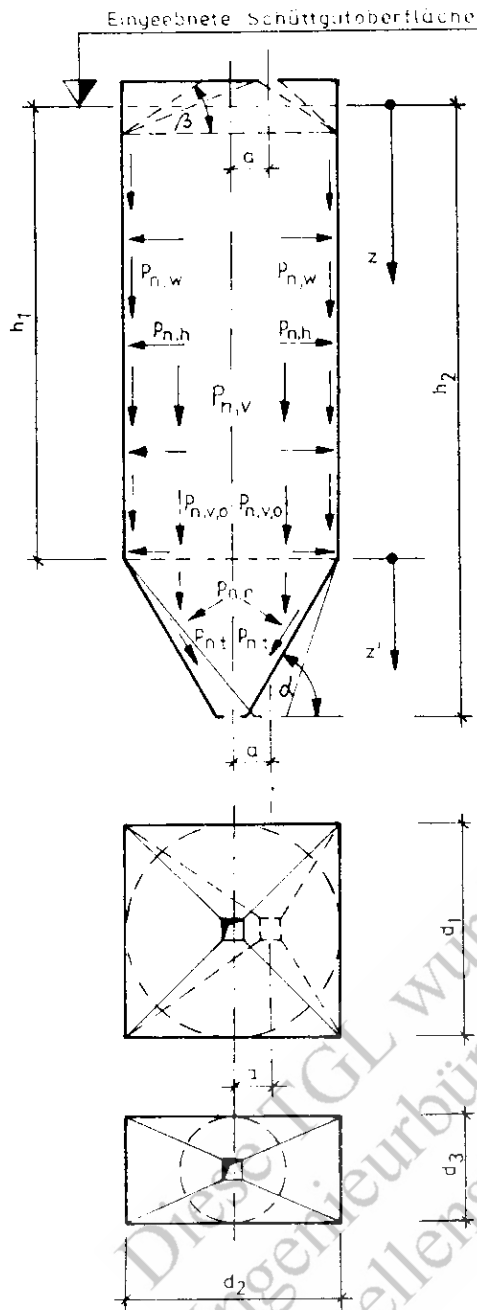


Bild 1 Silo und Bunker mit Bezeichnungen

Formelzeichen/Einheit  
Definition

- r/m  
Radius des einbeschriebenen Kreises einer Zelle
- z/m  
Abstand zwischen der eingeebneten Schüttgutoberfläche und dem betrachteten Querschnitt in der Zelle
- z'/m  
Abstand zwischen Oberkante Trichter zum betrachteten Querschnitt des Trichters
- a/m  
Außermittigkeit des Ein- oder Auslaufes
- b/m  
innere Weite einer Spaltzelle
- A/m<sup>2</sup>  
innere Querschnittsfläche der Zelle
- U/m  
innerer Umfang der Zelle
- p<sub>n</sub>/kN/m<sup>2</sup>  
Normlast
- p<sub>n,v</sub>/kN/m<sup>2</sup>  
vertikale Normlast
- p<sub>n,h</sub>/kN/m<sup>2</sup>  
horizontale Normlast
- p<sub>n,w</sub>/kN/m<sup>2</sup>  
Normlast infolge Wandreibung parallel zu einer vertikalen Fläche
- P<sub>n,w</sub><sup>(z)</sup>/kN/m  
resultierende Wandreibungslast in der Schüttguttiefe z infolge Wandreibung
- p<sub>n,n</sub>/kN/m<sup>2</sup>  
Normlast senkrecht zu einer geneigten Fläche
- p<sub>n,t</sub>/kN/m<sup>2</sup>  
Normlast parallel zu einer geneigten Fläche
- p<sub>n,v,o</sub>/kN/m<sup>2</sup>  
vertikale Normlast am Übergang zwischen Silozelle und -trichter
- P<sub>n,v</sub><sup>(z)</sup>/kN/m<sup>2</sup>  
vertikale Normlast im Trichter
- p<sub>n,b</sub>/kN/m<sup>2</sup>  
vertikale Normlast auf den horizontalen Zellenboden
- p<sub>n,h,d</sub><sup>e</sup>/kN/m<sup>2</sup>  
horizontale Normlast aus schüttgutspezifischen dynamischen Wirkungen
- V<sub>B</sub>/m<sup>3</sup>  
Volumen eines Bunkers
- V<sub>V</sub>/m<sup>3</sup>  
Volumen eines Bunkertrichters
- γ/kN/m<sup>3</sup>  
Normeigenlast des Schüttgutes
- α/„ (Grad)“  
Winkel der Trichterneigung zur Horizontalen
- β/„ (Grad)“  
Böschungswinkel des Schüttgutes zur Horizontalen
- φ/„ (Grad)“  
Winkel der inneren Reibung des Schüttgutes
- δ/„ (Grad)“  
Wandreibungswinkel des Schüttgutes
- k/1  
Verhältnis der horizontalen zur vertikalen Normlast
- f/1  
Wandreibungsbeiwert des Schüttgutes

Tabelle 1 Formelzeichen und Definitionen

Formelzeichen/Einheit  
Definition

- h<sub>1</sub>/m  
Höhe zwischen Oberkante Trichter und eingeebneten Schüttgutoberfläche
- h<sub>2</sub>/m  
Höhe zwischen Oberfläche des Zellenbodens und der eingeebneten Schüttgutoberfläche
- d<sub>1</sub>/m  
Durchmesser des einbeschriebenen Kreises einer Zelle
- d<sub>2</sub>/m  
größte innere Weite einer Zelle mit rechteckigem Querschnitt
- d<sub>3</sub>/m  
kleinste innere Weite einer Zelle mit rechteckigem Querschnitt

Fortsetzung der Tabelle 1

| Formelzeichen/Einheit<br>Definition  | Formelzeichen/Einheit<br>Definition   |
|--|---|
| $d_f$ /mm<br>Korndurchmesser des Schüttgutes                                       | $\Delta p_{n,h}^e$ /kN/m <sup>2</sup><br>zusätzliche horizontale Normlast aus exzentrischem Entleeren |
| $\delta_{1,„}$ (Grad)“<br>δ für sehr raue Wände oder Wände mit horizontalen Rillen | $\Delta p_{n,h}^k$ /kN/m <sup>2</sup><br>zusätzliche horizontale Normlast aus Kernfluß                |
| $\delta_{2,„}$ (Grad)“<br>δ für raue bis mittelglatte Wände                        | $\Delta p_{n,h}^m$ /kN/m <sup>2</sup><br>zusätzliche horizontale Normlast aus Massenfluß              |
| $\delta_{3,„}$ (Grad)“<br>δ für glatte Wände                                       | $\rho_{n,h}^l$ /kN/m <sup>2</sup><br>zusätzliche horizontale Normlast aus Temperatureinwirkungen      |
| $f_1/1$<br>f für sehr raue Wände oder Wände mit horizontalen Rillen                | $v_s$ /m/h<br>Steiggeschwindigkeit des Schüttgutes beim schnellen Füllen                              |
| $f_2/1$<br>f für raue bis mittelglatte Wände                                       | $v_{SG}$ /m/h<br>Grenzsteiggeschwindigkeit des Schüttgutes beim schnellen Füllen                      |
| $f_3/1$<br>f für glatte Wände  |   |
| $\varrho_{„}$ (Grad)“<br>Grenzwinkel zwischen Kern- und Massenfluß                 |   |
| $t_a/h$<br>Absetzzeit des Schüttgutes  |   |
| $k_{oh}$ /–<br>Erdruehdrukbeiwert nach TGL 11 464/03                               |   |
| Index f/–<br>Füllen  |   |
| Index e/–<br>Entleeren   |   |
| Index o/–<br>Flachsilo   |   |
| Index l/–<br>Luftzusatz  |   |
| Index H/–<br>Homogenisierung   |   |
| Index s/–<br>Schnelles Füllen  |   |
| $k_f/1$<br>k für Materialbruch   |   |
| $\bar{k}_f/1$<br>k für Gleitbruch  |   |
| $k_e/1$<br>k für Kernfluß  |   |
| $\bar{k}_e/1$<br>k für Massenfluß  |   |
| $\delta_{f,„}$ (Grad)“<br>δ für Materialbruch                                      |   |
| $\bar{\delta}_{f,„}$ (Grad)“<br>δ für Gleitbruch                                   |   |
| $\delta_{e,„}$ (Grad)“<br>δ für Massenfluß   |   |
| $c_o$ /–<br>Lastbeiwert für räumlichen Ruhedruck                                   |   |
| $c_1$ /–<br>Lastbeiwert für zentrisches Entleeren                                  |   |
| $c_2$ /–<br>Lastbeiwert für exzentrisches Entleeren                                |   |
| $c_3$ /–<br>Lastbeiwert für Kernfluß   |   |
| $c_4$ /–<br>Lastbeiwert für Massenfluß   |   |
| $c_5$ /–<br>Lastbeiwert für schüttgutspezifische dynamische Wirkungen              |   |
| $n$ /–<br>Lastfaktor   |   |

## TERMINI UND DEFINITIONEN

### Betriebszustand Füllen

ist das Beschicken des Bunkers, Flachsilos oder Silos mit Schüttgut, dabei sind die entstehenden Lasten nach Art des Füllens wie folgt zu unterscheiden:

Bei zentrischem und peripherem Füllen entsteht eine symmetrische Lastverteilung auf die Zellenwände.

Bei exzentrischem Füllen entstehen ungleichmäßige und damit unsymmetrische Lastverteilungen auf die Zellenwände.

### Betriebszustand Lagern

ist die Aufbewahrung des Schüttgutes im Bunker, Flachsilo oder Silo in der Zeit zwischen Füllen und Entleeren. Die Lasten entsprechen denen aus dem Füllen, wenn zeitabhängige qualitative Änderungen der Schüttguteigenschaften weitestgehend ausgeschlossen sind.

### Betriebszustand Entleeren

ist die Entnahme des Schüttgutes aus dem Bunker, Flachsilo oder Silo über den Zellenboden oder Trichter. Die entstehenden Lasten ergeben sich aus dem Fließprofil und der Art des Entleerens wie folgt:

Aus dem Fließprofil ergeben sich für Kern- und Massenfluß Unterschiede in der Größe der symmetrisch anzunehmenden Lastverteilung auf die Zellenwände.

Bei zentrischem Entleeren entsteht eine symmetrische Lastverteilung auf die Zellenwände.

Bei exzentrischem Entleeren entsteht eine unsymmetrische Lastverteilung auf die Zellenwände.

Bei peripherem Entleeren entsteht Massenfluß.

### Betriebszustand Umlagern

ist das gleichzeitige Füllen und Entleeren eines Bunkers, Flachsilos oder Silos, dabei sind die entstehenden Lasten in Abhängigkeit von der Füllhöhe zu unterscheiden:

Ändert sich die Füllhöhe bei voller oder annähernd voller Füllung beim Umlagern nicht wesentlich, können höhere Lasten als beim Entleeren entstehen.

Bei nur teilweiser Füllung können keine höheren Lasten als beim Entleeren entstehen, da die max. Füllhöhe nicht erreicht wird.

### Kernfluß

ist das Fließen des Schüttgutes in einem inneren Fließprofil im Schüttgut. Die geometrischen Grenzen des Fließprofils ergeben max. Lasterhöhungen. Beim Entleeren entstehen Bereiche von fließendem und ruhendem Schütt-

gut. Die Sonderfälle des Kernflusses, wie z. B. Kolbenfluß und Schachtbildung, sind hierin enthalten.

**Massenfluß**

ist das Gleiten des Schüttgutes an den Zellenwänden und seine Gesamtbewegung in vertikaler Richtung. Das zuerst eingelagerte Schüttgut wird beim Entleeren zuerst entnommen (First in – first out).

**1.3. Schüttgüter**

Schüttgüter sind eingeteilt:

- a) nach ihrem Fließverhalten in
  - fluide Staub-Luftgemische
  - frei fließende Schüttgüter
  - fließfähige kohäsive Schüttgüter, z. B. Getreidemehl, Zement, Kalksteinmehl
- b) nach ihrer Korngröße in
  - grobkörnig ( $d_i > 10 \text{ mm}$ )

- feinkörnig ( $0,1 \text{ mm} \leq d_i \leq 10 \text{ mm}$ )
- staubförmig ( $d_i < 0,1 \text{ mm}$ )

Bei der Ermittlung der Lasten für fließfähige kohäsive Schüttgüter muß sichergestellt sein, daß durch eine verfahrenstechnische Dimensionierung des Auslaufes Auslaufstörungen, z. B. Bildung stabiler Gewölbe, ausgeschlossen werden.

**1.4. Bauwerksgeometrie**

Bei der Ermittlung der Lasten aus dem Schüttgut ist die Bauwerksgeometrie nach den Angaben von Tabelle 2 und 3 zu berücksichtigen. Die in Tabelle 2 angegebenen Grenzwerte für Bunker, Flachsilo und Silos sind Richtwerte und in den Übergängen von den konkreten Fließbedingungen abhängig. Für die Anwendung der Silotheorie zur Ermittlung der Lasten aus dem Schüttgut ist die Herausbildung von Fließzonen in den wandnahen Bereichen des Zellenquerschnittes entscheidend.

Tabelle 2 Grenzwerte der Bauwerksgeometrie

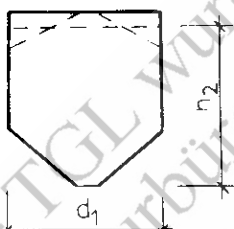
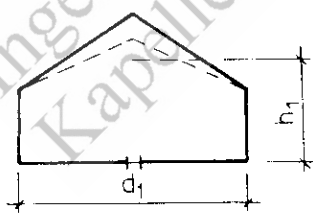
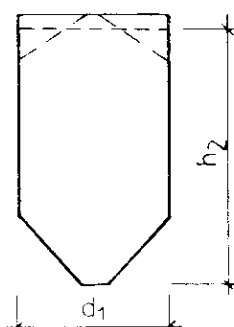
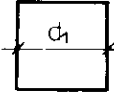
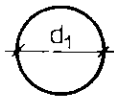
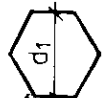
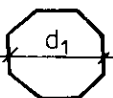
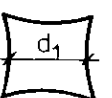
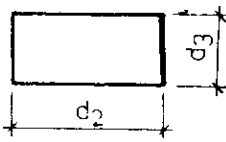

| Benennung | Bauwerksgeometrie   |  | Lastansatz   |
|-----------|---|--|--|
|           | Bild  | Grenzwert  |  |
| Bunker    |  | $\frac{h_2}{d_1} < 1,5$ und $\frac{1}{2} V_B \leq V_T$ | Klassische Erddrucktheorie   |
| Flachsilo |  | $\frac{h_1}{d_1} \leq 1,0$                             | Modifizierte Erddrucktheorie (Berücksichtigung von räumlichen Ruhedrucklasten) |
| Silo      |  | $\frac{h_2}{d_1} > 1,0$ bzw. $\frac{h_2}{d_3} > 1,0$   | Silotheorie nach der Methode von Janssen                                       |

Tabelle 3 Verhältnis A/U

| Grundriß/Zellenquerschnitt  |   |   |  |   | Verhältnis A/U                              |
|---|---|---|--|---|---|
|  |  |  |  |  | $\frac{d_1}{4}$                             |
| Quadrat   | Kreis   | Sechseck  | Achteck  | Zwickelzelle  |   |
|  |   |   |  |   | $\frac{d_2 \cdot d_3}{2 \cdot (d_2 + d_3)}$ |
|  |   |   |  |   | $\frac{b}{2}$                               |
| Rechteck  |   |   |  |   |   |
| Spaltzelle  |   |   |  |   |   |

### 1.5. Bunker-, Flachsilo- und Silobetrieb

Bei der Ermittlung der Normlasten sind die Einflüsse aus dem Bunker-, Flachsilo- und Silobetrieb nach den Angaben von Tabelle 4 zu berücksichtigen, und durch qualitative Untersuchungen entsprechend zu ergänzen. Für die Inbetriebnahme und den Betrieb von Bunkern, Flachsilos und Silos sind Festlegungen zum Betriebsregime und zur Einhaltung der getroffenen Lastannahmen aus dem Schüttgut zu treffen.

Kunststoff, beschichteten Flächen, oberflächenbehandelten glatten Beton- und Putzflächen.

Das Glätten der Zellenwände aus dem Silobetrieb ist in den Werten  $f$  und  $\delta$  der Tabelle 5 berücksichtigt. Für Silos mit Massenfluß wird empfohlen, die Richtwerte  $\varphi$  und  $\delta$  durch Werte, die aus Laborversuchen mit dem einzulagernden Schüttgut und dem verwendeten Wandbaustoff gemessen wurden, zu ersetzen.

## 2. SCHÜTTGUTKENNWERTE UND LASTBEIWERTE

Die Ermittlung der Normlasten aus dem Schüttgut darf mit den in Tabelle 5 angegebenen schüttgutspezifischen Richtwerten erfolgen, wenn keine anderen Kennwerte aus Laborversuchen vorliegen. Die Richtwerte für  $\varphi$ ,  $k$ ,  $f$  und  $\delta$  dürfen vereinfachend über die Schüttguttiefe  $z$  als konstant angenommen werden. Die Werte  $k$ ,  $f$ , und  $\delta$  sind dabei unter Berücksichtigung schüttgutspezifischer Eigenschaften aus dem Richtwert  $\varphi$  abgeleitet. Für den Wandreibungskoeffizient ( $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ) und Wandreibungswinkel ( $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$ ) gilt:

$f_1$  und  $\delta_1$  für sehr raue Wände oder Wände mit horizontalen Rillen

Reibung erfolgt im wesentlichen innerhalb des Schüttgutes, z. B. bei Wänden mit horizontalen Rillen wie Well- oder Trapezblech;

$f_2$  und  $\delta_2$  für raue bis mittelglatte Wände

Reibung erfolgt im wesentlichen an der Wand, z. B. bei Wänden aus schalungsrauhem Beton, geschraubten oder genieteten Stahltafeln mit sehr vielen Verbindungsmitteln;

$f_3$  und  $\delta_3$  für glatte Wände

Reibung erfolgt ausschließlich an der Wand, z. B. bei Wänden aus geschweißtem Aluminium- und Stahlblech,

## 3. ERMITTLUNG DER NORMLASTEN

### 3.1. Bunker

Für Bunker sind die Normlasten nach der klassischen Erd-drucktheorie mit dem Ruhedruck des Schüttgutes nach TGL 11 464/03 zu ermitteln.

Für Trichter in Bunkern dürfen die Lasten aus dem Schüttgut nach Abschnitt 3.3.2.2. und 3.3.2.3. ermittelt werden. Bei exzentrischem Füllen von Bunkern sollen die nicht-rotationssymmetrischen oder unsymmetrischen Lasten aus der schrägen Schüttgutoberfläche qualitativ untersucht und bei der Ermittlung der Lasten aus dem Schüttgut entsprechend berücksichtigt werden.

### 3.2. Flachsilos

Die Ermittlung der Normlasten in zylindrischen Flachsilos darf näherungsweise mit den Formeln nach Tabelle 6 erfolgen, da die Entleerungsvorgänge durch zentrisches Füllen und zentrisches Entleeren so ablaufen können, daß in den wandnahen Bereichen des Zellenquerschnittes keine vertikalen Schüttgutbewegungen auftreten. Die Normlasten sind dann als räumliche Ruhedrucklasten anzunehmen. Andere Berechnungsverfahren, die räumliche Ruhedrucklasten berücksichtigen, sind zugelassen.

Tabelle 4 Einfluß aus Bunker-, Flachsilo- und Silobetrieb auf die Normlast

| Einflüsse auf die Normlast durch                               | Bauwerksgeometrie und Fließprofil |                        |          |            |
|--|-----------------------------------|------------------------|----------|------------|
|  | Bunker mit Kern- und Massenfluß   | Flachsilo mit Kernfluß | Silo mit |            |
|  |                                   |                        | Kernfluß | Massenfluß |
| 1. Betriebszustand   | ●                                 | ●                      | ●        | ●          |
| Füllen   | zentrisch                         | ●                      | ●        | ●          |
|  | peripher                          | ◐                      | ●        | ●          |
|  | exzentrisch                       | ◐                      | ●        | ●          |
|  | schnell                           | ○                      | ◐        | ●          |
| Lagern   | ○                                 | ◐                      | ◐        | ◐          |
| Entleeren  | zentrisch                         | ◐                      | ●        | ●          |
|  | peripher                          | ○                      | ◐        | ●          |
|  | exzentrisch                       | ○                      | ●        | ○          |
| Umlagern   | ○                                 | ○                      | ◐        | ○          |
| 2. Schüttgutspezifische dynamische Wirkungen aus dem Entleeren | ◐                                 | ◐                      | ●        | ●          |
| 3. Trichtergeometrie   | ●                                 | ○                      | ●        | ●          |
| 4. Luftzufuhr  | ○                                 | ○                      | ●        | ●          |
| 5. Temperatureinwirkung  | ◐                                 | ●                      | ●        | ●          |

In Tabelle 4 bedeutet:



Einflüsse sind zu berücksichtigen



Einflüsse sind qualitativ zu untersuchen und entsprechend zu berücksichtigen



Einflüsse sind nicht zu berücksichtigen

Tabelle 5 Richtwerte zur Ermittlung der Lasten aus dem Schüttgut

| Schüttgutart           | Nr. | Norm-eigenlast $\gamma$ in $\text{KN/m}^3$ | Winkel der inneren Reibung $\varphi$ | Horizontal-druck-verhältnis $k$ | Wandreibungsbeiwert |       |       | Wandreibungswinkel |            |            | Lastbeiwert |       |       |       |       |       |       |
|------------------------|-----|--|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------|-------|-------|--------------------|------------|------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                        |     |  |                                      |                                 | $f_1$               | $f_2$ | $f_3$ | $\delta_1$         | $\delta_2$ | $\delta_3$ | $C_1$       |       | $C_2$ |       | $C_3$ |       | $C_4$ |
|                        |     |  |                                      |                                 |                     |       |       |                    |            |            | rauh        | glatt | rauh  | glatt | rauh  | glatt |       |
| 1                      | 2   | 3  | 4                                    | 5                               | 6                   | 7     | 8     | 9                  | 10         | 11         | 12          | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    |       |
| Weizen                 | 1   | 9,0  | 30°                                  | 0,45                            | 0,60                | 0,40  | 0,30  | 30°                | 22°        | 17°        | 1,4         | 2,0   | 2,4   | 3,0   |       | 1,8   |       |
| Gerste, Roggen, Hafer  | 2   | 8,0  | 28°                                  | 0,50                            | 0,55                | 0,45  | 0,35  | 28°                | 24°        | 19°        | 1,3         | 2,0   | 2,4   | 2,1   | 2,4   | 1,7   |       |
| Mais                   | 3   | 8,0  | 33°                                  | 0,50                            | 0,60                | 0,35  | 0,25  | 31°                | 19°        | 14°        | 1,6         | 2,2   | 2,7   | 3,5   | 4,0   | 2,1   |       |
| Reis                   | 4   | 8,0  | 33°                                  | 0,50                            | 0,65                | 0,50  | 0,40  | 33°                | 27°        | 22°        | 1,4         | 2,0   | 2,4   | 2,6   | 3,1   | 1,8   |       |
| Zucker                 | 5   | 10,0                                       | 32°                                  | 0,50                            | 0,60                | 0,50  | 0,45  | 32°                | 27°        | 24°        | 1,2         | 1,5   | 2,0   | 2,3   | 2,9   | 1,8   |       |
| Getreidemehl           | 6   | 7,0  | 30°                                  | 0,40                            | 0,55                | 0,40  | 0,30  | 30°                | 22°        | 17°        | 1,6         | 2,0   | 2,2   | 2,5   | 3,3   | 1,9   |       |
| Sojabohnen             | 7   | 8,0  | 25°                                  | 0,50                            | 0,45                | 0,35  | 0,25  | 25°                | 20°        | 14°        | 1,5         | 1,9   | 2,7   | 2,1   | 2,6   | 1,8   |       |
| Zement                 | 8   | 16,0                                       | 30°                                  | 0,55                            | 0,50                | 0,40  | 0,35  | 27°                | 22°        | 19°        | 1,3         | 1,7   | 2,0   | 2,5   | 2,8   | 1,8   |       |
| Kalksteinmehl          | 9   | 14,0                                       | 30°                                  | 0,55                            | 0,50                | 0,40  | 0,35  | 27°                | 22°        | 19°        | 1,2         | 1,7   | 2,2   | 2,5   | 2,8   | 1,8   |       |
| Gips                   | 10  | 14,0                                       | 34°                                  | 0,50                            | 0,65                | 0,55  | 0,45  | 33°                | 29°        | 22°        | 1,3         | 1,5   | 2,0   | 2,6   | 3,2   | 1,9   |       |
| Kalkhydratgemahlen     | 11  | 12,0                                       | 34°                                  | 0,50                            | 0,65                | 0,55  | 0,40  | 33°                | 29°        | 22°        | 1,3         | 1,6   | 2,1   | 2,7   | 3,5   | 1,9   |       |
| Zementklinker          | 12  | 18,0                                       | 36°                                  | 0,50                            | 0,65                | 0,60  | 0,50  | 33°                | 31°        | 27°        | 1,4         | 1,6   | 2,2   | 2,7   | 3,5   | 2,0   |       |
| Kalkstein in Stücken   | 13  | 12,0                                       | 34°                                  | 0,50                            | 0,65                | 0,55  | 0,45  | 34°                | 30°        | 24°        | 1,4         | 1,6   | 2,2   | 2,5   | 3,1   | 1,9   |       |
| Quarzsand              | 14  | 16,0                                       | 35°                                  | 0,50                            | 0,70                | 0,55  | 0,45  | 35°                | 29°        | 24°        | 1,4         | 1,6   | 2,1   | 2,8   | 3,5   | 1,9   |       |
| Betonkies              | 15  | 18,0                                       | 30°                                  | 0,50                            | 0,60                | 0,45  | 0,40  | 30°                | 24°        | 22°        | 1,3         | 1,8   | 2,3   | 2,4   |       | 1,7   |       |
| Braunkohlenfilterasche | 16  | 12,0                                       | 33°                                  | 0,50                            | 0,55                | 0,45  | 0,35  | 30°                | 25°        | 20°        | 1,2         | 1,7   | 2,2   | 2,9   | 3,4   | 1,8   |       |
| Rohbraunkohle          | 17  | 8,5  | 30°                                  | 0,50                            | 0,55                | 0,45  | 0,40  | 30°                | 24°        | 22°        | 1,3         | 1,9   | 2,2   | 2,3   | 3,0   | 1,7   |       |
| Braunkohlenbriketts    | 18  | 8,0  | 32°                                  | 0,50                            | 0,60                | 0,50  | 0,45  | 32°                | 26°        | 24°        | 1,3         | 1,7   | 2,1   | 2,6   |       | 1,8   |       |
| Braunkohlenstaub       | 19  | 7,5  | 30°                                  | 0,50                            | 0,55                | 0,40  | 0,30  | 30°                | 22°        | 16°        | 1,4         | 1,9   | 2,7   | 2,5   | 3,1   | 1,8   |       |
| Braunkohlenschwelkoks  | 20  | 10,0                                       | 35°                                  | 0,50                            | 0,70                | 0,60  | 0,45  | 35°                | 30°        | 25°        | 1,3         | 1,8   | 2,2   | 2,6   | 3,2   | 1,9   |       |
| Steinkohle             | 21  | 10,0                                       | 35°                                  | 0,50                            | 0,70                | 0,60  | 0,45  | 35°                | 30°        | 25°        | 1,3         | 1,6   | 2,4   | 2,6   | 3,2   | 1,9   |       |
| Kunststoffgranulat     | 22  | 6,5  | 25°                                  | 0,55                            | 0,45                | 0,35  | 0,30  | 24°                | 19°        | 17°        | 1,4         | 1,7   | 2,6   | 2,1   |       | 1,7   |       |
| Aluminiumoxyd          | 23  | 12,0                                       | 32°                                  | 0,55                            | 0,50                | 0,50  | 0,45  | 29°                | 27°        | 24°        | 1,3         | 1,5   | 2,3   | 2,4   | 2,7   | 1,8   |       |
| Thomasphosphat         | 24  | 19,0                                       | 30°                                  | 0,60                            | 0,55                | 0,50  | 0,40  | 30°                | 26°        | 22°        | 1,3         | 2,0   | 2,3   | 2,2   | 2,5   | 1,7   |       |
| Eisenerz               | 25  | 30,0                                       | 35°                                  | 0,50                            | 0,60                | 0,55  | 0,50  | 31°                | 30°        | 27°        | 1,4         | 1,6   | 2,0   | 2,6   | 3,2   | 1,9   |       |

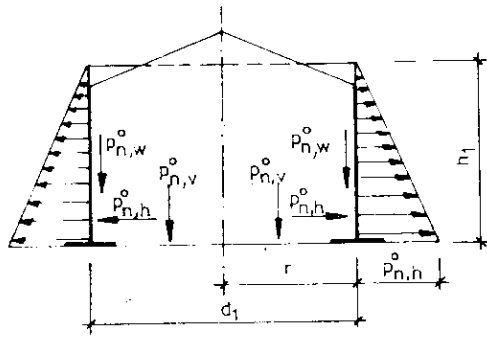


Bild 2 Lastverteilung am Meridian

Tabelle 6 Normlasten im Flachsilo

| Benennung                | max. Normlasten  |     |
|--------------------------|--|-----|
| vertikale Normlast       | $p_{n,v}^o = \gamma \cdot h_1$                         | (1) |
| horizontale Normlast     | $p_{n,h}^o = \gamma \cdot h_1 \cdot c_o \cdot k_{ohz}$ | (2) |
| Normlast aus Wandreibung | $p_{n,w}^o = p_{n,h}^o \cdot \tan \frac{\varphi}{2}$   | (3) |

Für die Ermittlung von  $c_o$  gilt:

$$c_o = 0,9 \text{ bei } \frac{h_1}{d_1} = 0,3$$

$$c_o = 0,7 \text{ bei } \frac{h_1}{d_1} = 1,0$$

Bei  $0,3 < \frac{h_1}{d_1} < 1$  ist linear zu interpolieren.

Bei exzentrischem Füllen von zylindrischen Flachsilos sollen die nichtrotationssymmetrischen Lasten aus der schrägen Schüttgutoberfläche qualitativ untersucht und bei der Ermittlung der Lasten aus dem Schüttgut entsprechend berücksichtigt werden.

Bei exzentrischem Entleeren ist Abschnitt 1.4. zu beachten. Für die Restentleerung sind die nichtrotationssymmetrischen Lasten mit dem Ruhedruck der Erddrucktheorie nach TGL 11464/03 zu ermitteln.

### 3.3. Silos

#### 3.3.1. Silozelle

Die Ermittlung der Normlasten ist mit den Formeln nach Tabelle 7 durchzuführen. Für die Bauwerksgeometrie gilt Tabelle 2 und 3.

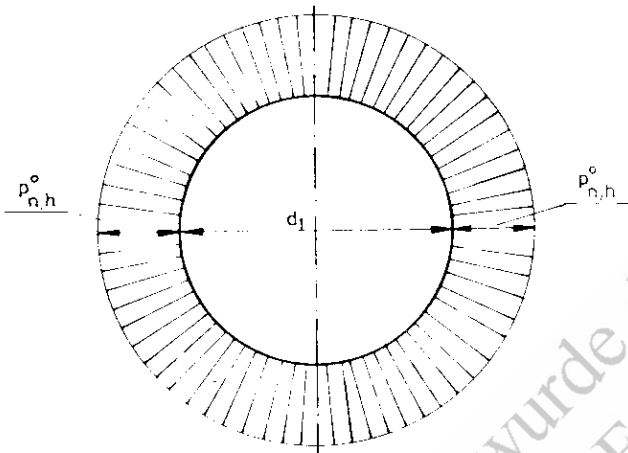


Bild 3 Lastverteilung am Ring

Tabelle 7 Normlasten im Silo

| Benennung       | Normlast                                 |  |
|-----------------|--|--|
|                 | in der Tiefe z                           | in der Tiefe z   |
| vertikal        | $p_{n,v} = \gamma \cdot z_o$ (4)         | $p_{n,v} = \gamma \cdot z_o \cdot \Phi(z)$ (5)         |
| horizontal      | $p_{n,h} = \gamma \cdot z_o \cdot k$ (6) | $p_{n,h} = \gamma \cdot z_o \cdot k \cdot \Phi(z)$ (7) |
| aus Wandreibung | $p_{n,w} = \gamma \cdot A/U$ (8)         | $p_{n,w} = \gamma \cdot A/U \cdot \Phi(z)$ (9)         |

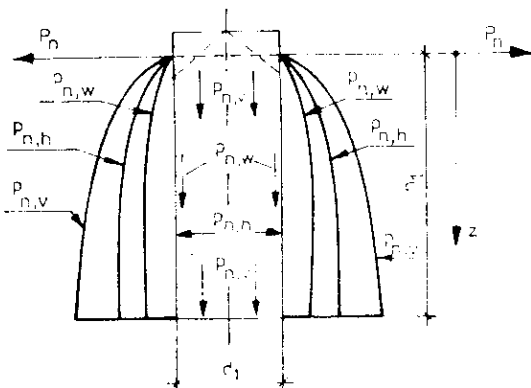


Bild 4 Lastverteilung am Meridian

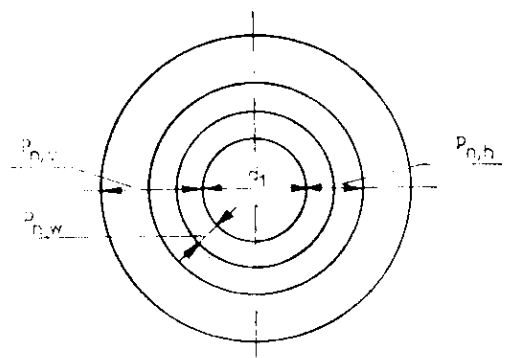


Bild 5 Lastverteilung am Ring



Die Werte der Funktion  $\Phi(z)$  sind abhängig von  $\frac{z}{z_0}$

Tabelle 8 zu entnehmen, dabei sind  $\Phi(z)$  und  $z_0$  wie folgt zu ermitteln:

$$-\Phi(z) = \left(1 - e^{-\frac{z}{z_0}}\right) \quad (10) \quad \text{mit } z_0 = \frac{A}{k \cdot f \cdot U} \quad (11)$$

Die resultierende Wandreibungslast in der Schüttguttiefe  $z$  ist nach der Formel

$$P_{n,w}(z) = \frac{\gamma \cdot A}{U} \cdot z_0 \left[ \frac{z}{z_0} - \Phi(z) \right] \quad (12)$$

zu ermitteln.

Hierbei gilt:

- $\gamma, k, f_1, f_2, f_3$  nach Tabelle 5
- das Verhältnis  $A/U$  nach Tabelle 3.

Tabelle 8 Werte der Funktion  $\Phi(z)$

| $\frac{z}{z_0}$ | Funktionswert $\Phi(z)$ |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                 | ,0                      | ,1   | ,2   | ,3   | ,4   | ,5   | ,6   | ,7   | ,8   | ,9   |
| 0               | 0,00                    | 0,10 | 0,18 | 0,26 | 0,33 | 0,39 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,59 |
| 1               | 0,63                    | 0,67 | 0,70 | 0,73 | 0,75 | 0,78 | 0,80 | 0,82 | 0,83 | 0,85 |
| 2               | 0,86                    | 0,88 | 0,89 | 0,90 | 0,91 | 0,92 | 0,93 | 0,93 | 0,94 | 0,94 |
| 3               | 0,95                    | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,98 | 0,98 | 0,98 |
| 4               | 0,98                    | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| 5               | 0,99                    | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

### 3.3.2. Horizontale Zellenböden, Trichter, Keilböden

#### 3.3.2.1. Horizontale Zellenböden

Die Normlast für den horizontalen Zellenboden ist als mittlere vertikale Normlast  $p_{n,v}$  im Füllzustand an der Stelle  $z = h_1$  nach der Formel

$$p_{n,b} = \frac{\gamma \cdot A}{k_f \cdot f \cdot U} \cdot \Phi(h_1) < \gamma \cdot h_1 \quad (13)$$

zu ermitteln. Dabei ist  $p_{n,b}$  näherungsweise als gleichmäßig verteilte Flächenlast auf den Zellenboden anzunehmen.

Für die Berechnung von  $p_{n,b}$  sind zu verwenden:

- $\gamma, f_1, f_2, f_3$  nach Tabelle 5, das Verhältnis  $A/U$  nach Tabelle 3,
- $k_f$  nach Tabelle 12 mit  $\varphi, \delta_1, \delta_2, \delta_3$ , nach Tabelle 5, wobei  $\delta_1, \delta_2, \delta_3 = \delta_1$  anzunehmen ist und
- $\Phi(h_1)$  nach Tabelle 8, mit  $z = h_1$ .

#### 3.3.2.2. Trichter

Die Normlasten in Trichtern sind abhängig von schüttgutspezifischen und geometrischen Kennwerten zu ermitteln. Das Berechnungsverfahren gilt für Trichterneigung  $30^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ$  und kreisförmige, quadratische sowie rechteckige Querschnittsformen. Dabei ist das Verhältnis  $A/U$  nach Tabelle 3 zu verwenden.

Bei Trichterneigung  $\alpha < 30^\circ$  sind die Normlasten nach Formel (13) zu berechnen.

Für die Ermittlung der Normlasten im Trichter sind die in Tabelle 9 angegebenen Formeln, die in Tabelle 10 zusammengestellten Berechnungswerte und der in Bild 7 dargestellte Berechnungsalgorithmus zu verwenden.

Die Normlasten sind für die Betriebszustände Füllen und Entleeren zu ermitteln. Die für die Bemessung maßgebende Trichterbelastung wird durch die umhüllende Normlast aus dem Füllen und Entleeren bestimmt. Es ist beim Füllen zwischen Material- oder Gleitbruch und beim Entleeren zwischen Kern- oder Massenfluß zu unterscheiden. Zur Bestimmung des Fließprofils ist der Grenzwinkel  $\varrho$  für das Füllen ( $\varrho_f$ ) und das Entleeren ( $\varrho_e$ ) zu ermitteln.

Für den Grenzwinkel  $\varrho$  gilt:

- Füllen

$$\varrho_f = \arcsin \left( \frac{\sin \delta_f}{\sin \varphi} \right) \quad \text{mit} \quad (14)$$

$\varrho_f > \alpha = \text{Materialbruch}$

$\varrho_f \leq \alpha = \text{Gleitbruch}$

- Entleeren

$$\varrho_e = \frac{1}{2} \left[ 90^\circ + \delta_e - \delta_e + \arcsin \left( \frac{\sin \varphi_e}{\sin \varphi} \right) \right] \quad \text{mit} \quad (15)$$

$\varrho_e > \alpha = \text{Kernfluß}$

$\varrho_e \leq \alpha = \text{Massenfluß}$

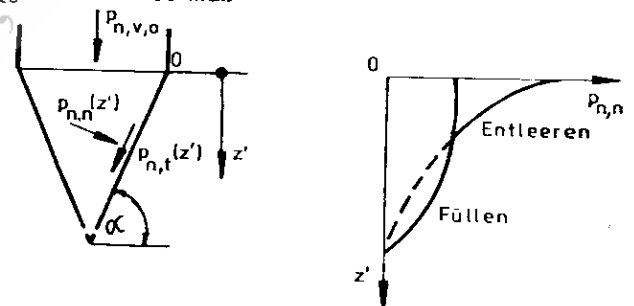


Bild 6 Prinzipieller Verlauf der Normlasten im Trichter

Tabelle 9 Normlasten in Trichtern

| Benennung  | Normlast bei   |  |
|--|--|--|
|  | Materialbruch/Kernfluß   | Gleitbruch/Massenfluß  |
| vertikale Normlast<br>(für $M, \bar{M} \neq 1$ ) | $p_{n,v}(z') = \frac{2A \cdot \tan \alpha}{U} \cdot \frac{\gamma}{M-1} [B - B^M] + p_{n,v,o} \cdot B^M \quad (16)$ | $p_{n,v}(z') = \frac{2A \cdot \tan \alpha}{U} \cdot \frac{\gamma}{\bar{M}-1} [B - B^{\bar{M}}] + p_{n,v,o} \cdot B^{\bar{M}} \quad (17)$ |
| vertikale Normlast<br>(für $M, \bar{M} = 1$ )    | $p_{n,v}(z') = B \left[ p_{n,v,o} - \frac{2A \cdot \tan \alpha}{U} \cdot \gamma \cdot \ln B \right] \quad (18)$    |  |
| Normlast senkrecht zur geneigten Fläche          | $p_{n,n}(z') = M_1 \cdot p_{n,v}(z') \quad (19)$   | $p_{n,n}(z') = \bar{M}_1 \cdot p_{n,v}(z') \quad (20)$   |
| Normlast parallel zur geneigten Fläche           | $p_{n,t}(z') = M_2 \cdot p_{n,v}(z') \quad (21)$   | $p_{n,t}(z') = \bar{M}_2 \cdot p_{n,v}(z') \quad (22)$   |

Für Tabelle 9 gilt:

- Berechnungswerte  $M; M_1; M_2; \bar{M}; \bar{M}_1; \bar{M}_2$ ; nach Tabelle 10

-  $B$  nach Formel  $B = \left( 1 - \frac{U}{2A \cdot \tan \alpha} \cdot z' \right)$  (23)

-  $p_{n,v,o}$  nach Abschnitt 3.3.2.1. analog  $p_{n,b}$ . In Formel (24) von Bild 7 entspricht  $f_i = f_1; f_2; f_3$  nach Tabelle 5.

Tabelle 10 Berechnungswerte für Normlasten im Trichter

| Benennung                  | Betriebszustand Füllen |                                 | Betriebszustand Entleeren |                                 |
|----------------------------|------------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
|                            | Materialbruch          | Gleitbruch                      | Kernfluß                  | Massenfluß                      |
| Horizontal-druckverhältnis | $k_f$                  | $\bar{k}_f$                     | $k_e$                     | $\bar{k}_e$                     |
| Ermittlung                 | nach Tabelle 12        |                                 | nach Tabelle 13           |                                 |
| Berechnungswerte.          | $M; M_1; M_2$          | $\bar{M}; \bar{M}_1; \bar{M}_2$ | $M; M_1; M_2$             | $\bar{M}; \bar{M}_1; \bar{M}_2$ |
| Wandreibungswinkel         | $\delta_f$             | $\bar{\delta}_f$                | $\varphi$                 | $\bar{\delta}_e$                |
| Ermittlung                 | nach Bild 10 bis 13    |                                 |                           |                                 |

Die Wandreibungswinkel  $\delta_f$  und  $\bar{\delta}_e$  in Tabelle 12 und 13 sind für die Betriebszustände Füllen und Entleeren wie folgt zu ermitteln:

-  $\delta_e = 0,8 \cdot \delta_f$  mit  $\delta_f = \delta_1; \delta_2; \delta_3$ ; nach Tabelle 5. In Abhängigkeit von der Rauigkeit der Zellenwand ist

dabei der zutreffende Wandreibungswinkel einzusetzen.

Die Berechnung der Normlasten ist entsprechend Bild 7 durchzuführen.

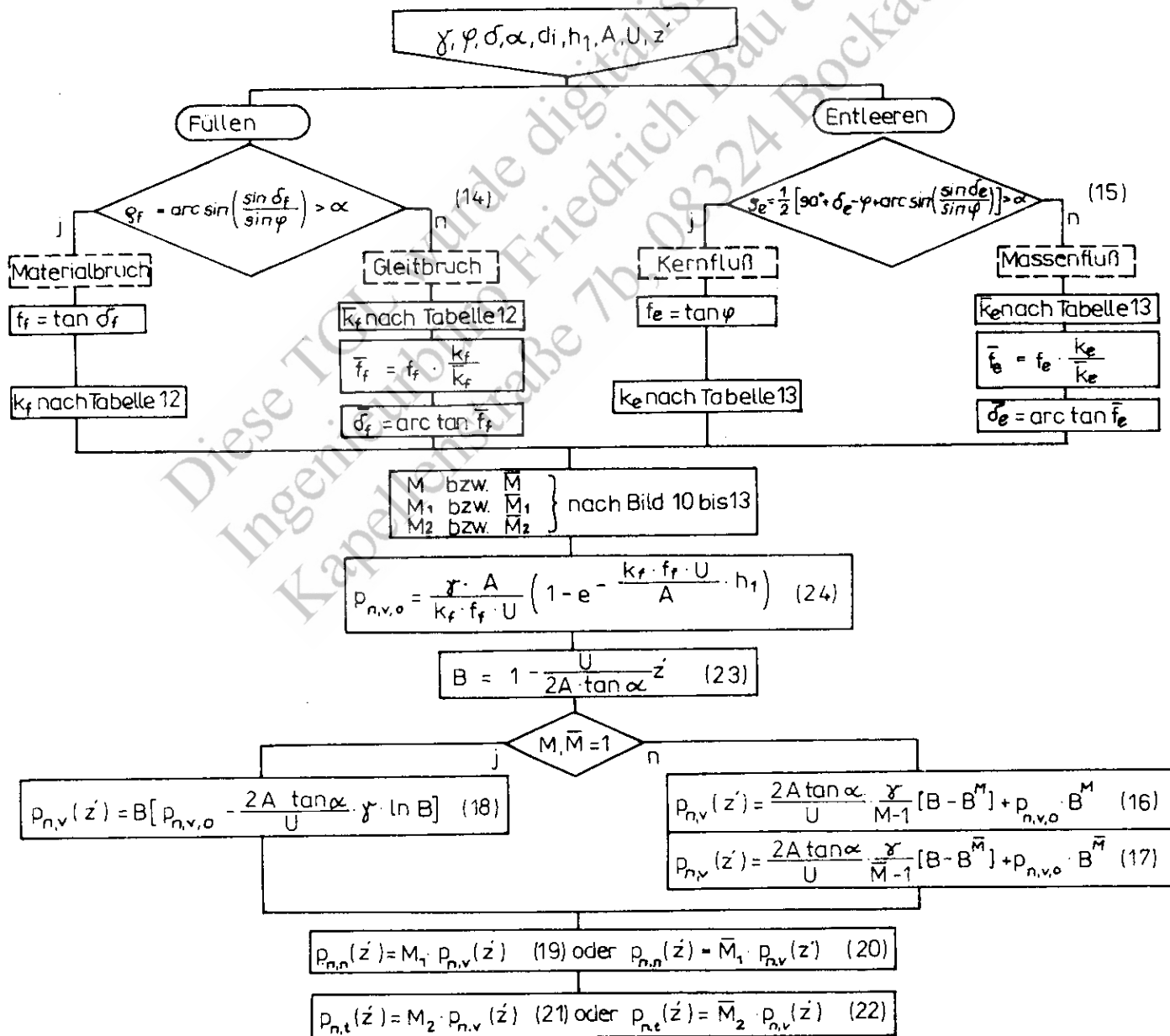


Bild 7 Berechnungsalgorithmus für die Normlasten im Trichter

3.3.2.3. Keilböden

Die Normlasten für ein- und zweiseitig geneigte Keilböden sind in Abhängigkeit von der Lage der einzelnen Keilbodenseiten nach Tabelle 11 zu ermitteln. Für einseitig geneigte Keilböden sind die Normlasten um 10% zu erhöhen. Für die vertikalen Keilbodenseiten ist für  $z = h_2$  anzunehmen.

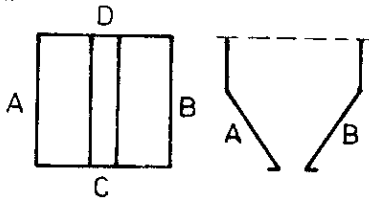


Bild 8 Zweiseitig geneigter Keilboden

Hierbei bedeutet:

A, B = geneigte Auslaufseite C, D = vertikale Stirnseite

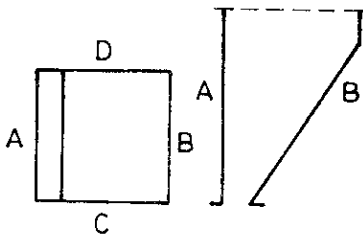


Bild 9 Einseitig geneigter Keilboden

Hierbei bedeutet:

A = vertikale Auslaufseite B = geneigte Auslaufseite  
C, D = vertikale Stirnseite

Tabelle 11 Normlasten in ein- und zweiseitigen Keilböden

| Keilboden         | Berechnung nach  |
|-------------------|--|
| <b>zweiseitig</b> |  |
| Seite A, B        | Abschnitt 3.3.2.2. für $p_{n,v}(z')$ , $p_{n,n}(z')$ und $p_{n,t}(z')$   |
| Seite C, D        | Abschnitt 4.2.1. für $p_{n,h}^e$ und $p_{n,w}^e$ . Bei exzentrischem Füllen ist Abschnitt 4.1.2. zu berücksichtigen.   |
| <b>einseitig</b>  |  |
| Seite B           | wie Keilboden zweiseitig, aber mit 10% Lasterhöhung  |
| Seite C, D        | wie Keilboden zweiseitig, aber mit 10% Lasterhöhung  |
| Seite A           | wie Keilboden zweiseitig Seite C, D zusätzlich Abschnitt 4.2.2.2., $\Delta p_{n,n}^e$ ist bei $0,5 h_2$ anzusetzen. Die ermittelten Normlasten sind um 10% zu erhöhen. |

3.3.2.4. Berechnungswerte für die Trichterberechnung

Tabelle 12 Berechnungswerte für  $k_f$  und  $\bar{k}_f$

| $\alpha$             | $\varphi$ | $k_f$ für Materialbruch |       |      |       |      |   |   |       |      |       |     |       |      |      |      |      |
|----------------------|-----------|-------------------------|-------|------|-------|------|---|---|-------|------|-------|-----|-------|------|------|------|------|
|                      |           | $\delta_f$              |       |      |       |      |   |   |       |      |       |     |       |      |      |      |      |
|                      |           | 10°                     | 12,5° | 15°  | 17,5° | 20°  | 22,5°   | 25°   | 27,5° | 30°  | 32,5° | 35° | 37,5° |      |      |      |      |
|                      | 25°       | 0,42                    | 0,43  | 0,44 | 0,45  | 0,48 | 0,52  | Für Zwischenwerte von $\varphi$ und $\delta_f = \delta_1; \delta_2; \delta_3$ ; nach Tabelle 5 ist linear zu interpolieren. |       |      |       |     |       |      |      |      |      |
|                      | 30°       | 0,34                    | 0,35  | 0,35 | 0,36  | 0,37 | 0,39  |   |       |      |       |     |       | 0,41 |      |      |      |
|                      | 35°       | 0,28                    | 0,28  | 0,28 | 0,29  | 0,29 | 0,30  |   |       |      |       |     |       | 0,31 | 0,32 | 0,34 | 0,37 |
|                      | 40°       | 0,22                    | 0,22  | 0,22 | 0,23  | 0,23 | 0,23  |   |       |      |       |     |       | 0,24 | 0,24 | 0,25 | 0,26 |
| $k_f$ für Gleitbruch |           |                         |       |      |       |      |   |   |       |      |       |     |       |      |      |      |      |
| 45°                  | 20°       | 0,67                    | 0,59  | 0,51 | 0,43  | 0,31 | Für Zwischenwerte von $\varphi$ und $\delta_f = \delta_1; \delta_2; \delta_3$ nach Tabelle 5 ist linear zu interpolieren. |   |       |      |       |     |       |      |      |      |      |
| 60°                  |           | 0,74                    | 0,69  | 0,56 | 0,59  | 0,56 |   |   |       |      |       |     |       |      |      |      |      |
| 75°                  |           | 0,75                    | 0,71  | 0,58 | 0,67  | 0,72 |   |   |       |      |       |     |       |      |      |      |      |
| 45°                  | 25°       | 0,68                    | 0,60  | 0,53 | 0,45  | 0,37 | 0,29  | 0,16  |       |      |       |     |       |      |      |      |      |
| 60°                  |           | 0,73                    | 0,68  | 0,63 | 0,58  | 0,53 | 0,48  | 0,44  |       |      |       |     |       |      |      |      |      |
| 75°                  |           | 0,71                    | 0,67  | 0,64 | 0,61  | 0,59 | 0,57  | 0,62  |       |      |       |     |       |      |      |      |      |
| 45°                  | 30°       | 0,68                    | 0,61  | 0,54 | 0,47  | 0,39 | 0,32  | 0,24  | 0,16  | 0,01 |       |     |       |      |      |      |      |
| 60°                  |           | 0,73                    | 0,67  | 0,62 | 0,57  | 0,52 | 0,47  | 0,43  | 0,38  | 0,33 |       |     |       |      |      |      |      |
| 75°                  |           | 0,69                    | 0,61  | 0,60 | 0,57  | 0,54 | 0,51  | 0,50  | 0,48  | 0,52 |       |     |       |      |      |      |      |
| 45°                  | 35°       | 0,69                    | 0,62  | 0,55 | 0,48  | 0,41 | 0,34  | 0,27  | 0,20  | 0,13 | 0,04  |     |       |      |      |      |      |
| 60°                  |           | 0,72                    | 0,66  | 0,61 | 0,56  | 0,51 | 0,47  | 0,42  | 0,38  | 0,33 | 0,29  |     |       | 0,23 |      |      |      |
| 75°                  |           | 0,67                    | 0,62  | 0,57 | 0,54  | 0,50 | 0,48  | 0,45  | 0,43  | 0,41 | 0,40  |     |       | 0,43 |      |      |      |
| 45°                  | 40°       | 0,69                    | 0,62  | 0,55 | 0,49  | 0,42 | 0,36  | 0,29  | 0,23  | 0,16 | 0,09  |     |       |      |      |      |      |
| 60°                  |           | 0,71                    | 0,66  | 0,60 | 0,55  | 0,51 | 0,46  | 0,42  | 0,38  | 0,33 | 0,29  |     |       | 0,25 | 0,20 |      |      |
| 75°                  |           | 0,65                    | 0,60  | 0,55 | 0,51  | 0,48 | 0,45  | 0,42  | 0,40  | 0,37 | 0,35  |     |       | 0,34 | 0,32 |      |      |

Tabelle 13 Berechnungswerte für  $k_e$  und  $\bar{k}_e$

| $k_e$<br>für Kernfluß | $\varphi$ | $\alpha$ | $\bar{k}_e$ für Massenfluß bei |       |      |       |      |   |      |       |      |       |     |       |      |      |      |      |
|-----------------------|-----------|----------|--------------------------------|-------|------|-------|------|---|------|-------|------|-------|-----|-------|------|------|------|------|
|                       |           |          | $\delta_e$                     |       |      |       |      |   |      |       |      |       |     |       |      |      |      |      |
|                       |           |          | 10°                            | 12,5° | 15°  | 17,5° | 20°  | 22,5°   | 25°  | 27,5° | 30°  | 32,5° | 35° | 37,5° |      |      |      |      |
| 0,79                  | 20°       | 45°      | 0,61                           | 0,53  | 0,46 | 0,38  | 0,31 | Für Zwischenwerte von $\varphi$ und $\delta_e = 0,8 \delta_i$ mit $\delta_i = \delta_1; \delta_2; \delta_3$ ; nach Tabelle 5 ist linear zu interpolieren. |      |       |      |       |     |       |      |      |      |      |
|                       |           | 60°      | 0,86                           | 0,78  | 0,70 | 0,63  | 0,56 |   |      |       |      |       |     |       |      |      |      |      |
|                       |           | 75°      | 1,11                           | 0,99  | 0,89 | 0,80  | 0,72 |   |      |       |      |       |     |       |      |      |      |      |
| 0,70                  | 25°       | 45°      | 0,60                           | 0,52  | 0,44 | 0,36  | 0,29 | 0,22  | 0,16 |       |      |       |     |       |      |      |      |      |
|                       |           | 60°      | 0,89                           | 0,80  | 0,71 | 0,64  | 0,57 | 0,50  | 0,44 |       |      |       |     |       |      |      |      |      |
|                       |           | 75°      | 1,18                           | 1,05  | 0,94 | 0,84  | 0,76 | 0,69  | 0,62 |       |      |       |     |       |      |      |      |      |
| 0,60                  | 30°       | 45°      | 0,60                           | 0,51  | 0,43 | 0,35  | 0,28 | 0,21  | 0,14 | 0,08  | 0,01 |       |     |       |      |      |      |      |
|                       |           | 60°      | 0,90                           | 0,81  | 0,72 | 0,65  | 0,58 | 0,51  | 0,45 | 0,39  | 0,33 |       |     |       |      |      |      |      |
|                       |           | 75°      | 1,22                           | 1,09  | 0,97 | 0,87  | 0,78 | 0,71  | 0,64 | 0,58  | 0,52 |       |     |       |      |      |      |      |
| 0,50                  | 35°       | 45°      | 0,59                           | 0,51  | 0,43 | 0,35  | 0,28 | 0,21  | 0,14 | 0,07  |      |       |     |       |      |      |      |      |
|                       |           | 60°      | 0,91                           | 0,81  | 0,73 | 0,65  | 0,58 | 0,51  | 0,45 | 0,39  |      |       |     |       | 0,33 | 0,28 | 0,23 |      |
|                       |           | 75°      | 1,24                           | 1,10  | 0,98 | 0,88  | 0,79 | 0,72  | 0,65 | 0,58  |      |       |     |       | 0,53 | 0,47 | 0,43 |      |
| 0,42                  | 40°       | 45°      | 0,60                           | 0,51  | 0,43 | 0,35  | 0,28 | 0,21  | 0,14 | 0,08  | 0,01 |       |     |       |      |      |      |      |
|                       |           | 60°      | 0,90                           | 0,81  | 0,72 | 0,65  | 0,58 | 0,51  | 0,45 | 0,39  | 0,33 |       |     |       |      | 0,28 | 0,23 | 0,18 |
|                       |           | 75°      | 1,23                           | 1,09  | 0,97 | 0,87  | 0,79 | 0,71  | 0,64 | 0,58  | 0,52 |       |     |       |      | 0,47 | 0,42 | 0,38 |

4. NORMLASTEN AUS DEM SILOBETRIEB

4.1. Füllen und Lagern

4.1.1. Zentrisches Füllen

Für die Lastannahmen gilt:

- $p_{n,v}^f \triangleq p_{n,v}; p_{n,h}^f \triangleq p_{n,h}; p_{n,w}^f \triangleq p_{n,w}$  nach Tabelle 7
- $P_{n,w}^f(z) \triangleq P_{n,w}(z)$  nach Formel (12)
- $p_{n,b}$  nach Formel (13).

4.1.2. Exzentrisches Füllen

Exzentrisches Füllen führt zu umfangsveränderlichen Lasten. Die daraus resultierenden höheren horizontalen Normlasten dürfen näherungsweise nach Formel (25) unter Berücksichtigung der Exzentrizität  $a$  des Einlaufes ermittelt werden. Es gilt:

- bei  $a = r: \bar{p}_{n,h}^f = 1,1 \cdot p_{n,h}^f$  (25)
- bei  $a < r$  ist zwischen 1,0 und 1,1 linear zu interpolieren.

Erfolgt das Füllen eines Silos mit Schüttgut strahlenförmig gegen die Zellenwand oder in der Nähe der Zellenwand, sollen die daraus entstehenden zusätzlichen umfangsveränderlichen Lasten qualitativ untersucht und hinsichtlich ihrer Biegewirkung in Umfangs- und Meridianrichtung entsprechend berücksichtigt werden.

4.1.3. Lagern

Das Lagern ist bei den Lastannahmen dem Füllen nach Abschnitt 4.1.1. und 4.1.2. gleichzusetzen, wenn lasterhöhende Einflüsse ausgeschlossen sind. Falls lasterhöhende Einflüsse, z. B. Zeitverfestigung, Erwärmung, Feuchtigkeitsschwankungen des Schüttgutes, nicht aus-

geschlossen werden können, ist durch qualitative Untersuchungen die Lasterhöhung abzuschätzen und zu berücksichtigen, z. B. durch die Festlegung des Lastfaktors  $n$  nach Abschnitt 7.

4.2. Entleeren und Umlagern

4.2.1. Zentrisches Entleeren

Die Normlasten für das zentrische Entleeren sind nach den Formeln der Tabelle 14 unter Berücksichtigung von Abschnitt 3.3.1. und 4.1.2. zu ermitteln. Abschnitt 4.1.2. ist nicht zu berücksichtigen, wenn exzentrische Einflüsse aus dem Füllvorgang ausgeschlossen sind. Der Lastbeiwert  $c_1$  in Tabelle 14 ist nach Tabelle 5 schüttgutspezifisch festgelegt.

Bei den Normlasten für das Entleeren sind die Einflüsse aus Kern- oder Massenfluß nach Abschnitt 4.2.3.1. oder 4.2.3.2., schüttgutspezifischen dynamischen Wirkungen nach Abschnitt 4.2.4. und Umlagern nach Abschnitt 4.2.5. zusätzlich zu berücksichtigen.

Tabelle 14 Normlasten für zentrisches Entleeren

| bei Berücksichtigung                   |  |
|--|--|
| zentrisches Füllen                     | exzentrisches Füllen                               |
|  | $p_{n,v}^e = p_{n,v}$ (26)                         |
| $p_{n,h}^e = c_1 \cdot p_{n,h}^f$ (27) | $\bar{p}_{n,h}^e = c_1 \cdot \bar{p}_{n,h}^f$ (28) |
|  | $p_{n,w}^e = 1,1 \cdot p_{n,w}^f$ (29)             |

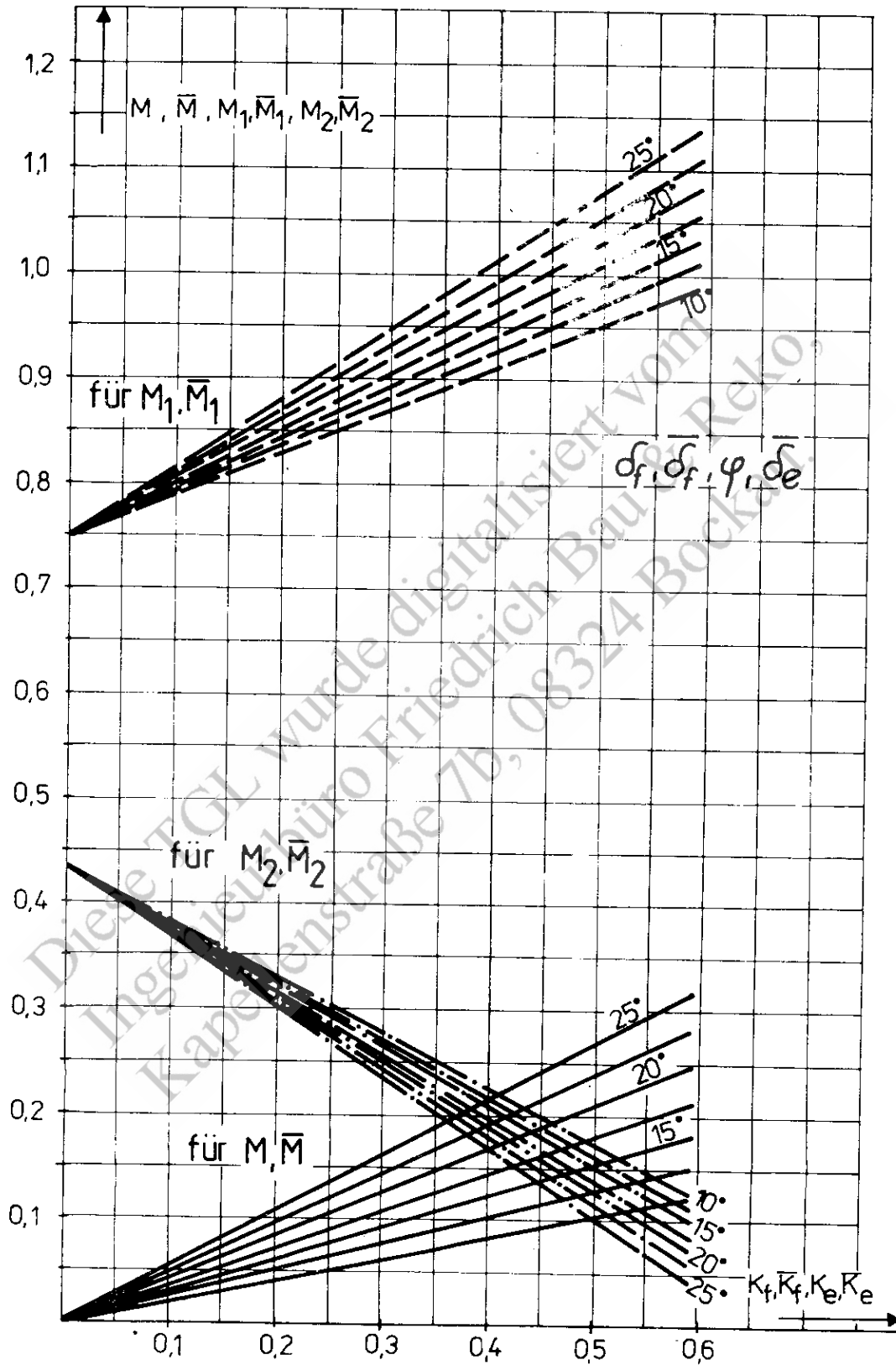


Bild 10 Berechnungswerte  $M$  für  $\alpha = 30^\circ$

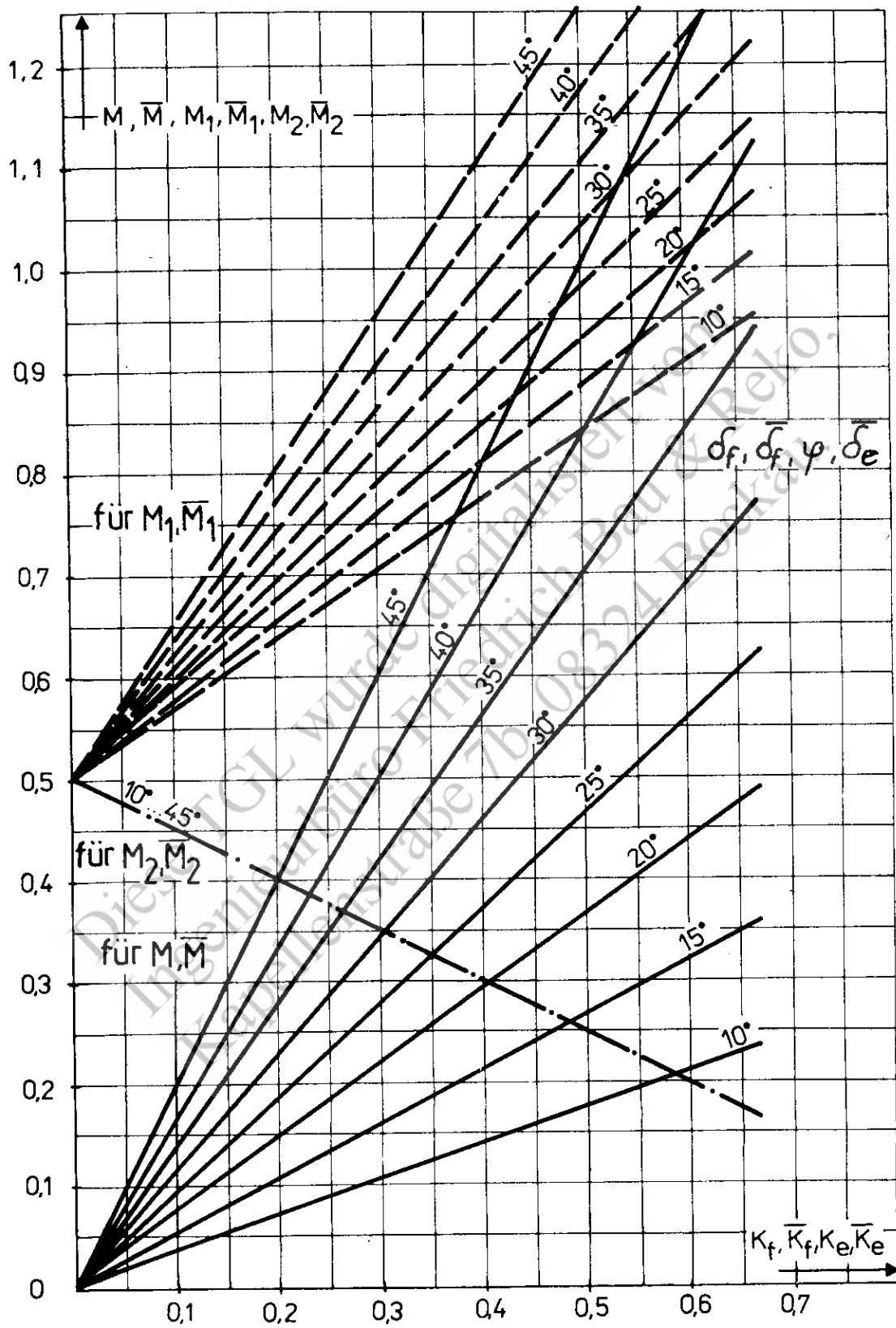


Bild 11 Berechnungswerte  $M$  für  $\alpha = 45^\circ$

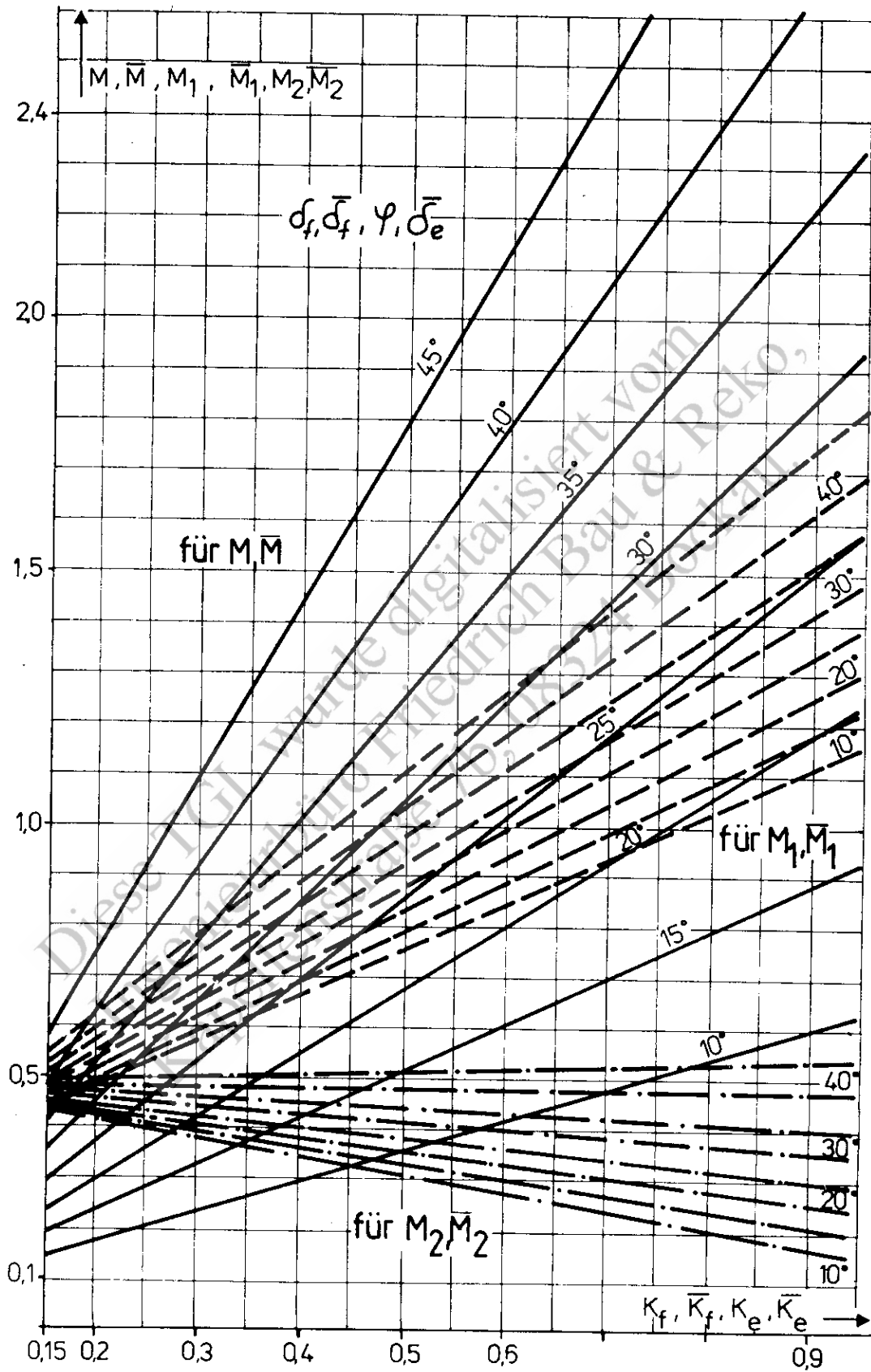


Bild 12 Berechnungswerte M für  $\alpha = 60^\circ$

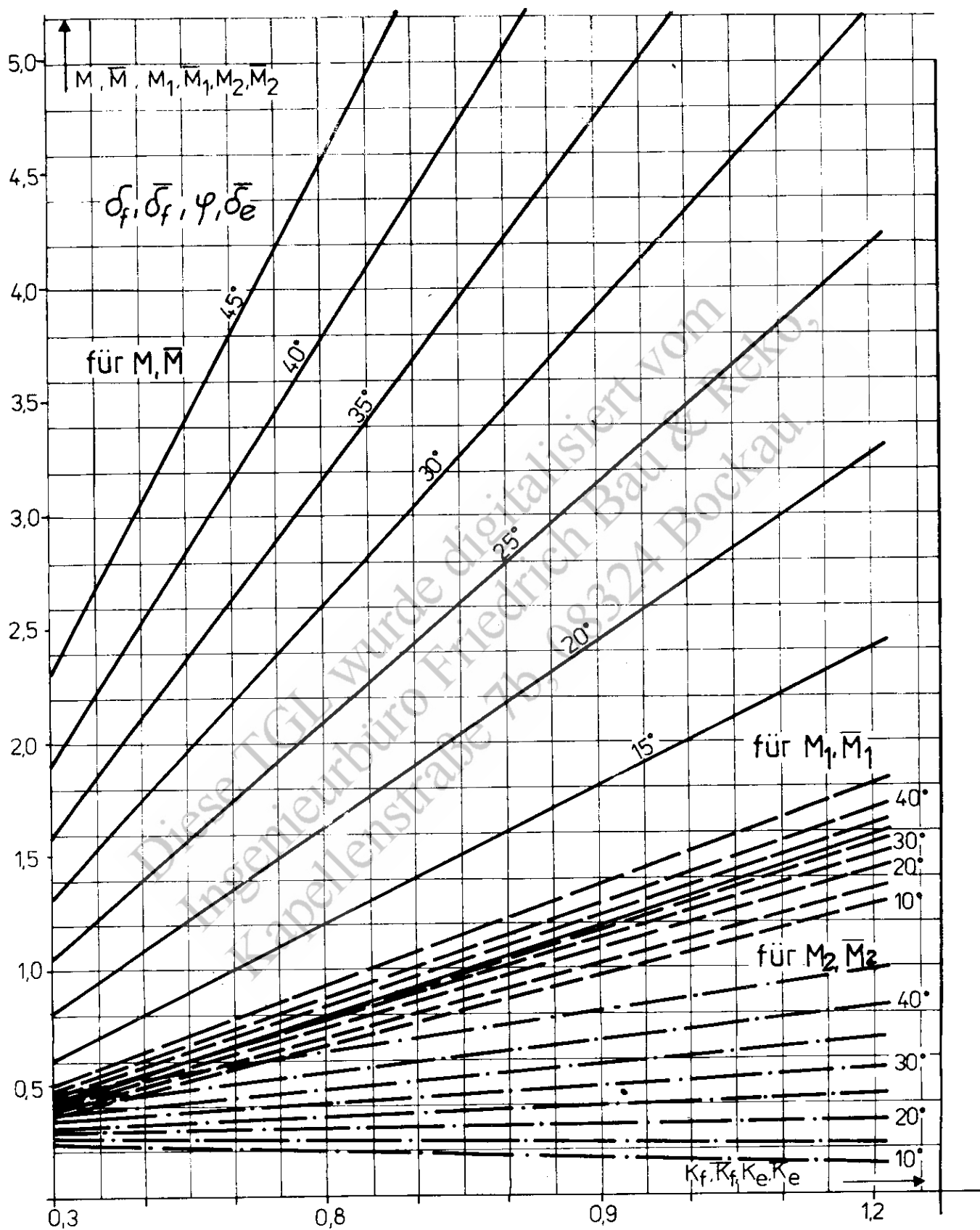


Bild 13 Berechnungswerte M für  $\alpha = 75^\circ$



4.2.2. Exzentrisches Entleeren

4.2.2.1. Exzentrisches Entleeren zylindrischer Silozellen  
 Die zusätzlichen horizontalen Normlasten bei Silos mit Kernfluß sind als nichtrotationssymmetrische Teilflächenlast nach Bild 14 und Formel (30) oder (31) zu be-

rechnen. Diese Teilflächenlast ist hinsichtlich ihrer Biege-  
 wirkung in Ring- und Meridianrichtung bei der Bemessung  
 zu berücksichtigen. Die zusätzlichen Stützkkräfte aus dem  
 exzentrischen Entleeren können jedoch bei der Berech-  
 nung vernachlässigt werden, wenn keine außergewöhn-  
 lichen Bedingungen nach Abschnitt 1.1. vorliegen.

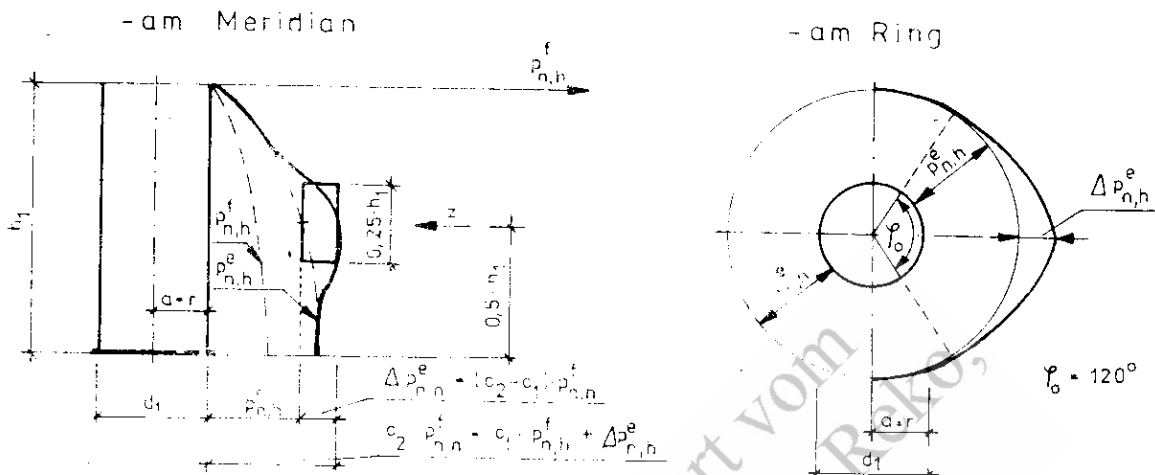


Bild 14 Lastverteilung exzentrisches Entleeren

Für die Berechnung der zusätzlichen horizontalen Norm-  
 last gilt:

- bei Berücksichtigung des zentrischen Füllens
- $\Delta p_{n,h}^e = (c_2 - c_1) \cdot p_{n,h}^f$  (30)
- bei Berücksichtigung des exzentrischen Füllens
- $\Delta p_{n,h}^e = (c_2 - c_1) \cdot \bar{p}_{n,h}^f$  (31)

flächenlasten zu berechnen. Die Formel (30) oder (31)  
 sowie der Lastbeiwert  $c_2$  gelten für rechteckige Silozellen,  
 wenn die Lastverteilung am Meridian nach Bild 14 und die  
 horizontale Lastverteilung nach Tabelle 15 erfolgt. Für die  
 zusätzliche Stützkraft aus dem exzentrischen Entleeren  
 gilt analog Abschnitt 4.2.2.1.

Für  $c_1$  und  $c_2$  gilt die Tabelle 5, dabei gelten die angegebe-  
 nen Lastbeiwerte  $c_2$  für die Exzentrizität  $a = r$ . Für Exzen-  
 trizitäten  $0 < a < r$  ist linear zwischen  $c_1$  und  $c_2$  zu interpo-  
 lieren.

Für die Anwendung des Lastbeiwertes  $c_2$  gilt Abschnitt  
 4.2.2.1. Bei der Lastverteilung von Nr. 4 ist der Lastbeiwert  
 $c_2$  um 10% zu erhöhen. Sind nach Nr. 3 die punktförmigen  
 Auslauföffnungen auf dem gesamten Siloboden gleich-  
 mäßig verteilt, so sind die zusätzlichen horizontalen Norm-  
 lasten nach Abschnitt 4.2.3.2. zu berechnen.

4.2.2.2. Exzentrisches Entleeren rechteckiger Silozellen  
 Die zusätzlichen horizontalen Normlasten sind als Teil-

Tabelle 15 Horizontale Lastverteilung für exzentrisches Entleeren rechteckiger Silozellen

| Lastverteilung nach der Lage der Auslauföffnungen |   |   |               |   |   |
|---|---|---|---------------|---|---|
| punktförmig                                       |   |   | schlitzförmig |   |   |
| 1   | 2 | 3 | 4             | 5 | 6 |
|   |   |   |               |   |   |

4.2.3. Fließprofil  
 4.2.3.1. Kernfluß

Durch Kernfluß entstehen beim Entleeren in der Silozelle  
 Fließtrichter im Schüttgut. Oberhalb dieser Fließtrichter  
 ergeben sich Übergänge zwischen Kern- und Massenfluß,  
 die zu örtlichen Lasterhöhungen führen. Diese zusätz-  
 lichen horizontalen Normlasten können nach Bild 15 durch  
 eine Teilflächenlast  $\Delta p_{n,h}^e$  näherungsweise nach Formel  
 (32) oder (33) berücksichtigt werden.

Kernfluß ist vorhanden, wenn die Bedingung nach Formel  
 (15)  $\sigma_0 > n$  erfüllt ist.

Für die Berechnung der zusätzlichen horizontalen Norm-  
 last gilt:

- bei Berücksichtigung des zentrischen Füllens
- $\Delta p_{n,h}^e = (c_2 - c_1) \cdot p_{n,h}^f$  (32)

- bei Berücksichtigung des exzentrischen Füllens
  - $\Delta p_{n,h}^e = (c_2 - c_1) \cdot \bar{p}_{n,h}^f$  (33)
- Für  $c_1$  und  $c_2$  gilt Tabelle 5.

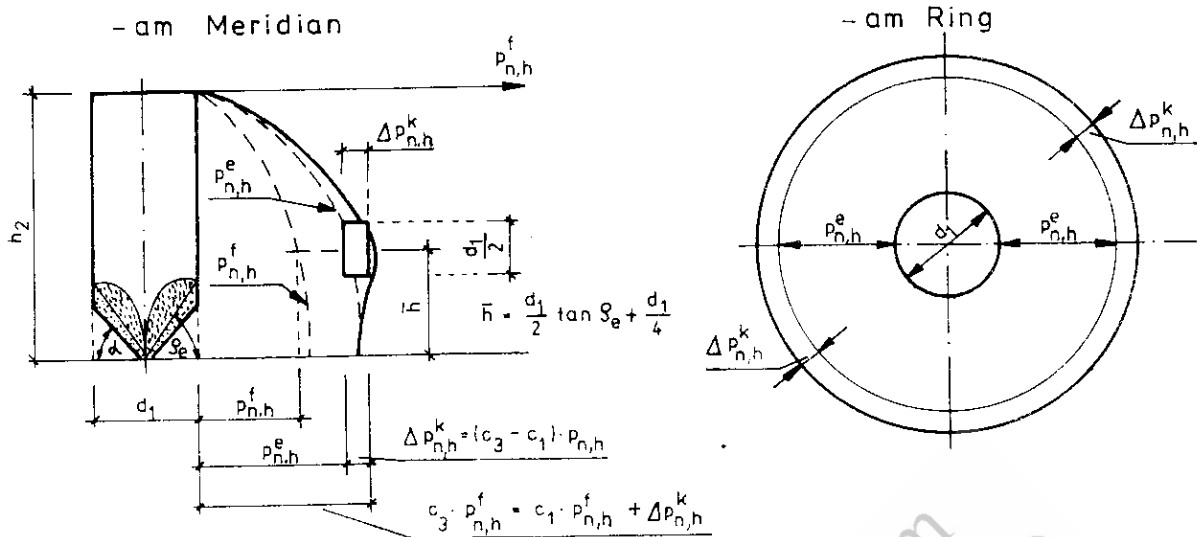


Bild 15 Lastverteilung Kernfluß

4.2.3.2. Massenfluß

Durch Massenfluß treten am Übergang von der Silozelle zum Zellentrichter Lastspitzen (switch) auf. Diese zusätz-

lichen horizontalen Normlasten können nach Bild 16 durch eine Teilflächenlast  $\Delta p_{n,h}^m$  näherungsweise nach Formel (34) oder (35) berücksichtigt werden.

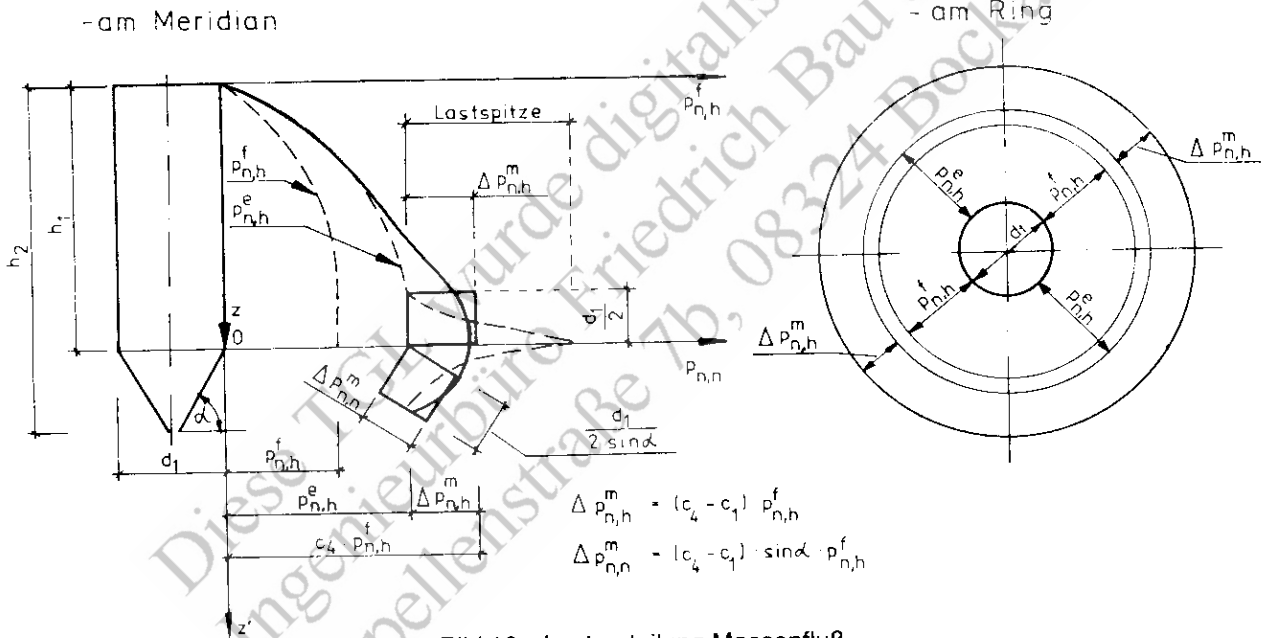


Bild 16 Lastverteilung Massenfluß

Massenfluß ist vorhanden, wenn die Bedingung nach Formel (15)  $\varrho_e < \alpha$  erfüllt ist. Für die Berechnung der zusätzlichen horizontalen Normlast gilt Tabelle 16. Für  $c_1$  und  $c_4$  gilt Tabelle 5. Die zusätzlichen horizontalen Normlasten können nach Bild 16 oberhalb und unterhalb

der Oberkante des Trichters auftreten und sind bei den Lastannahmen für Querschnittsformen nach Tabelle 3 zu berücksichtigen. Exzentrisches Entleeren ist bei Massenfluß zu vernachlässigen.

Tabelle 16 zusätzliche Normlast bei Massenfluß

| zusätzliche Normlast | bei Berücksichtigung  |   |
|----------------------|---|---|
|                      | zentrisches Füllen  | exzentrisches Füllen  |
| in der Silozelle     | $\Delta p_{n,h}^m = (c_4 - c_1) \cdot p_{n,h}^f$ (34)                   | $\Delta p_{n,h}^m = (c_4 - c_1) \cdot \bar{p}_{n,h}^f$ (35)                   |
| im Trichter          | $\Delta p_{n,n}^m = (c_4 - c_1) \cdot p_{n,h}^f \cdot \sin \alpha$ (36) | $\Delta p_{n,n}^m = (c_4 - c_1) \cdot \bar{p}_{n,h}^f \cdot \sin \alpha$ (37) |

4.2.4. Schüttgutspezifische dynamische Wirkungen

Die dynamischen Wirkungen des Entleerungsvorganges ergeben sich aus:

- dem Aufbau und Zusammenbrechen von Gewölben mit unterschiedlicher Frequenz

- Lastpulsation gleichmäßiger Frequenz
  - Stoßwirkungen geringer Energie (Pumpen) sowie
  - Stoßwirkungen mit großer dynamischer Energie (Schlagen).
- Die hierbei auftretenden Stöße sind primär vertikal gerichtet, jedoch sind horizontale Wirkungen zu beachten. Der

Einfluß der schüttgutspezifischen dynamischen Wirkungen auf zusätzliche horizontale Lasten ist vorrangig für stückige Schüttgüter, z. B. für Kohle, Eisenerz, qualitativ zu untersuchen und entsprechend zu berücksichtigen. Das gilt besonders für Silos mit Kernfluß bei  $h_2/d > 4$ .

Für die Schüttgüter Mais und Zementklinker sind die horizontalen Normlasten mit Berücksichtigung der schüttgutspezifischen dynamischen Wirkungen näherungsweise durch eine statische Ersatzlast nach Formel (38) zu berechnen.

$$p_{n,h,d} = c_5 \cdot p_{n,h}^f \quad (38)$$

Der Lastbeiwert  $c_5$  ist vom Abstand des Stoßzentrums  $\bar{a}$  zur Zellenwand abhängig und in Tabelle 17 angegeben. Für  $c_5$  ist bei  $2 < \bar{a} < 20$  linear zu interpolieren.

Tabelle 17 Lastbeiwert  $c_5$  schüttgutspezifische dynamische Wirkungen

| Schüttgut     | Lastbeiwert $c_5$ bei   |                          |
|---------------|-------------------------|--------------------------|
|               | $\bar{a} = 2 \text{ m}$ | $\bar{a} = 20 \text{ m}$ |
| Mais          | 2,1                     | 1,6                      |
| Zementklinker | 2,0                     | 1,4                      |

#### 4.2.5. Umlagern

Für das Umlagern (gleichzeitiges Füllen und Entleeren) gilt:

- Ändert sich die Füllhöhe bei voller oder annähernd voller Füllung beim Umlagern nicht wesentlich, sind die maßgeblichen horizontalen Normlasten aus dem Entleeren bei Kernfluß für die Lastannahmen um 10% zu erhöhen. Erfolgt das Umlagern nur bei teilweiser Füllung des Silos oder Bunkers, so sind Lasterhöhungen bei den Lastannahmen nicht zu berücksichtigen.
- Bei Massenfluß und bei der Berechnung der horizontalen Normlasten aus dem Entleeren nach Abschnitt 4.2.4. ist das Umlagern nicht zu berücksichtigen.

### 4.3. Technologische Bedingungen

#### 4.3.1. Luftzuführung zur Belüftung, Trocknung oder Begasung

Der Einblasüberdruck  $p_n^l$  ist von der Einblasstelle bis zur Schüttgutoberfläche linear auf Null abzumindern und mit den Fülldrücken nach Abschnitt 4.1.1. oder 4.1.2. zu überlagern.

An der Einblasstelle von  $p_n^l$  sind die Normlasten nach den Formeln der Tabelle 18 zu ermitteln.

Tabelle 18 Normlast zur Belüftung, Trocknung oder Begasung

| bei Berücksichtigung                       |  |
|--|--|
| zentrisches Füllen                         | exzentrisches Füllen                             |
| $p_{n,h}^l = p_{n,h}^f + p_n^l \quad (39)$ | $p_{n,h}^l = \bar{p}_{n,h}^f + p_n^l \quad (40)$ |
| $p_{n,v}^l = p_{n,v}^f + p_n^l \quad (41)$ |  |
| $p_{n,b}^l = p_{n,b}^f + p_n^l \quad (42)$ |  |

#### 4.3.2. Luftenblasen als Entleerungshilfe

Durch die Entleerung von Flachsilos und Silos mit Luftunterstützung entstehen vorwiegend bei staubförmigen Schüttgütern zusätzliche Normlasten. Diese Normlasten aus dem Einblasüberdruck sind nach Bild 17 wie folgt zu berücksichtigen:

- Der Einblasüberdruck  $p_n^l$  darf bis zur Höhe  $\Delta h$  mit

$$\Delta h = 1,4 \frac{p_n^l}{\gamma} \quad (43)$$

linear auf Null abgemindert werden und ist den Normlasten  $p_{n,h}^e$  und  $p_{n,b}$  gegenüberzustellen. Für die Lastannahmen ist horizontal und vertikal jeweils der größere Wert maßgebend.

- Außermittig wirkendes Einblasen von Luft ist zu vermeiden oder ist bei den Lastannahmen entsprechend zu berücksichtigen.

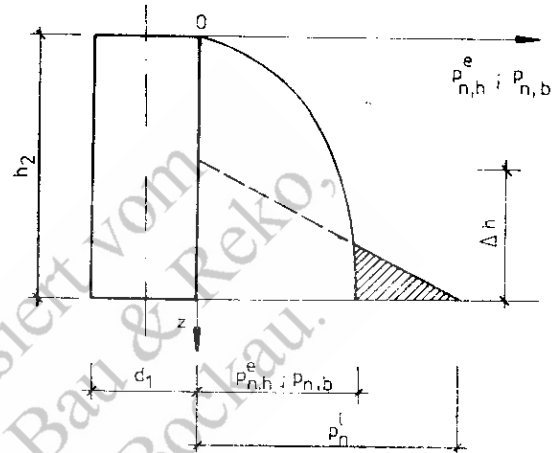


Bild 17 Lastverteilung bei Luftenblasen für Entleerungshilfen

#### 4.3.3. Homogenisierung

Das Staub-Luftgemisch ist – falls keine genauen Messungen für die Schüttgüter vorliegen – als Flüssigkeit anzunehmen.

Für die Berechnung gilt:  $p_{n,v}^H = p_{n,h}^H = 0,6 \cdot \gamma \cdot z \quad (44)$

#### 4.3.4. Schnelles Füllen von staubförmigen Schüttgütern

Beim schnellen Füllen von staubförmigen Schüttgütern können zusätzliche horizontale Normlasten entstehen, wenn die Steiggeschwindigkeit des Schüttgutes größer als die schüttgutspezifische Grenzsteiggeschwindigkeit wird. Diese zusätzliche horizontale Normlast ist nach Bild 18 und mit den Formeln (45) und (46) zu ermitteln. Dabei sind die Berechnungswerte nach Tabelle 19 und Bild 19 zu verwenden.

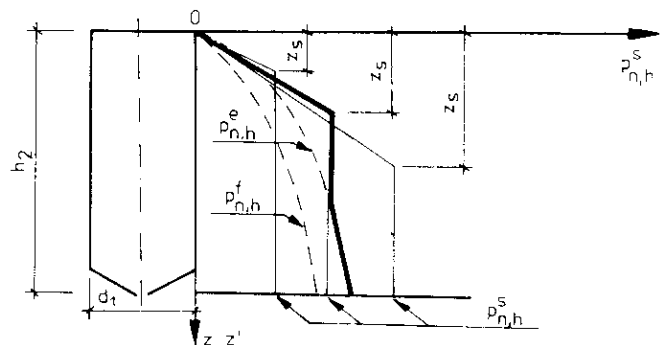


Bild 18 Prinzipieller Lastverlauf für schnelles Füllen

Für die Berechnung gilt:

$$p_{n,h}^s = \frac{\gamma \min \cdot A}{f_s \cdot U} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{k_s \cdot f_s \cdot U \cdot z_s}{A}} \right) \quad (45)$$

$$z_s = 2 \cdot v_s \cdot t_a \quad (46)$$

Hierbei bedeutet:

$\gamma_{\min} = 0,75 \cdot \gamma$  nach Tabelle 5.

$A/U =$  nach Tabelle 3.

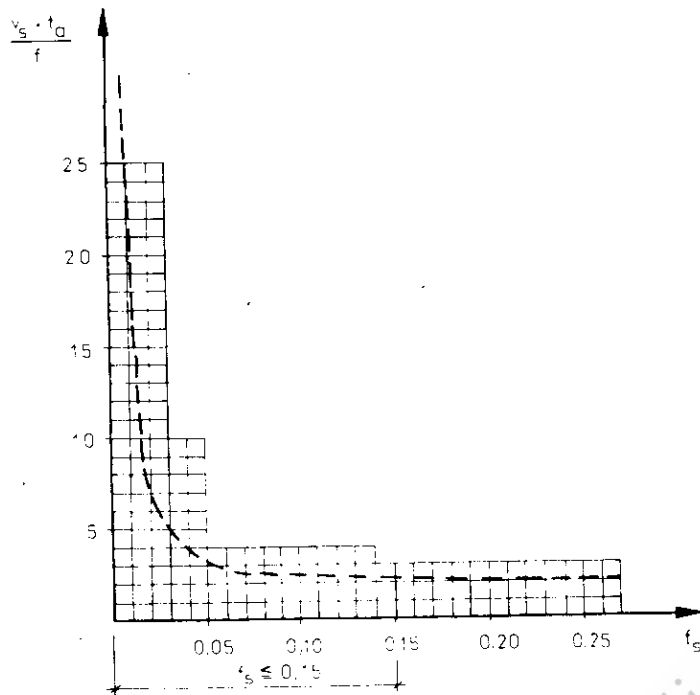


Bild 19 Wandreibungsbeiwert  $f_s$

$f_s =$  nach Bild 19;  $k_s = 1$

$v_s =$  Steiggeschwindigkeit des Schüttgutes in m/h

In Tabelle 19:

$f =$  Wandreibungsbeiwert nach Tabelle 5

$t_a =$  Absetzzeit des Schüttgutes

$v_{sGr} =$  Grenzsteiggeschwindigkeit des Schüttgutes in m/h

Die nach Formel (45) ermittelten Normlasten sind den horizontalen Entleerungslasten nach Abschnitt 4.2. gegenüberzustellen. Die größten Werte aus der umhüllenden Lastkurve sind nach Bild 18 über die Schüttguttiefe  $z$  für die Lastannahme maßgebend.

Tabelle 19 Berechnungswerte

| Schüttgutart   | Zellenwand | $f$  | $t_a$ | $v_{sGr}$              |
|----------------|------------|------|-------|------------------------|
| Kalksteinmehl  | glatt      | 0,35 | 0,18  | $\frac{A}{U} \cdot 6$  |
|                | rauh       | 0,50 | 0,18  |                        |
| Zement         | glatt      | 0,35 | 0,10  | $\frac{A}{U} \cdot 10$ |
|                | rauh       | 0,50 | 0,10  |                        |
| Getreidemehl   | glatt      | 0,30 | 0,04  | $\frac{A}{U} \cdot 25$ |
|                | rauh       | 0,55 | 0,04  |                        |
| Thomasphosphat | glatt      | 0,40 | 0,065 | $\frac{A}{U} \cdot 27$ |
|                | rauh       | 0,55 | 0,065 |                        |

### 5. TEMPERATUREINWIRKUNGEN

Klimatisch bedingte Temperatureinwirkungen sind grundsätzlich nach TGL 35424/01 bis /07 zu berücksichtigen. Bei Bunkern, Flachsilos und Silos sind zusätzlich folgende Temperatureinflüsse besonders zu berücksichtigen:

Einflüsse aus der Selbsterwärmung von Schüttgut während der Lagerung z. B. Getreide, Getreideprodukte.  
Einflüsse aus heiß eingefülltem Schüttgut, z. B. Zement, Zementklinker.

Einflüsse aus klimabedingtem Temperaturwechsel auf das gelagerte Schüttgut, z. B. Schwankungen der Tages- und Jahrestemperatur, plötzlicher Temperaturabfall und -anstieg, einseitige Erwärmung der Zellenwände durch Sonneneinstrahlung.

Die Einflüsse aus Selbsterwärmung und aus heiß eingefülltem Schüttgut sind mit den Angaben des technologischen Projektes in die Berechnung der Lastannahmen einzubeziehen.

Die Einflüsse, die sich aus dem klimabedingten Temperaturwechsel ergeben, wirken sich direkt auf das gelagerte Schüttgut aus. Durch die wechselseitige Ausdehnung bzw. Verkürzung der Bunker-, Flachsilo- und Silowände entstehen Querschnittsvergrößerungen bzw. -verkleinerungen, die zu zusätzlichen Setzungen und Verdichtungen bis zu einer dichteren Lagerung des Schüttgutes führen. Durch diese klimabedingten Temperaturwechsel und durch plötzlichen Temperaturabfall entstehen somit horizontale Lasten aus dem verdichteten Schüttgut auf die Zellenwände. Diese zusätzliche Normlast ist näherungsweise nach Formel (47) zu berechnen. Für Außenwände von Bunkern, Flachsilos und Silos ist diese Normlast zusätzlich zu den Normlasten aus dem Füllen und Lagern nach Abschnitt 4.1. bei den Lastannahmen zu berücksichtigen und über den Umfang und die Höhe der Zelle als gleichmäßig verteilt anzunehmen. Bei Bunkern, Flachsilos und Silos aus Stahlbeton ist eine Abminderung der Zwängungsspannungen aus Temperatur durch Steifigkeitsreduzierung bei Ribbildung zulässig.

$$p_{n,h} = \frac{\alpha_t \cdot \Delta t \cdot E_s}{\frac{d}{2t} \cdot \frac{E_s}{E_w} + (1 - \mu)} \quad (47)$$

Hierbei bedeuten:

$\Delta t =$  Temperaturdifferenz nach TGL 35424/01 in K

$d =$  Durchmesser der zylindrischen Zelle oder Seitenlänge der quadratischen Zelle oder der längeren Seite einer rechteckigen Zelle in m

$t =$  Wanddicke in m

$E_s =$  Elastizitätsmodul des verdichteten Schüttgutes in  $\text{kN/m}^2$

$E_w =$  Elastizitätsmodul des Wandbaustoffes in  $\text{kN/m}^2$

$\mu =$  Querdehnzahl des verdichteten Schüttgutes

$\alpha_t =$  Längen-Temperatureausdehnungskoeffizient nach TGL 31 549/04 in  $\text{K}^{-1}$

Angaben für Getreide:

Für Getreide kann für  $\mu = 0,4$  eingesetzt werden.

Für den Elastizitätsmodul von verdichtetem Getreide können die genäherten Werte der Tabelle 20 verwendet werden. Für Zwischenwerte ist dabei linear zu interpolieren.

Tabelle 20 Elastizitätsmodul für Getreide

| Durchmesser oder Seitenlänge des Silos | Höhe des Silos |       |
|--|----------------|-------|
|  | 15 m           | 30 m  |
| $E_s$ in $\text{kN/m}^2$               |                |       |
| bis 3 m                                | 7000           | 7000  |
| 6 bis 12 m                             | 10000          | 20000 |
| 18 bis 24 m                            | 20000          | 40000 |

## 6. BESONDERE EINFLÜSSE

### 6.1. Besonderheiten der Bauwerksgeometrie sowie des Bunker-, Flachsilo- und Silobetriebes

Folgende Auswirkungen sind bei den Lastannahmen zu berücksichtigen: Querschnittsverengungen wie einseitige und umlaufende Konsolen, Nasen, Wandvorsprünge, horizontale Anker, Hängependel, Gehänge, Entlastungs- und Kreuzbalken führen im Bunker, Flachsilo oder Silo im allgemeinen zu Störungen im Fließprofil beim Entleeren und damit zu unsymmetrischen und zusätzlichen Lasten. Die Reduzierung der horizontalen Normlasten nach Abschnitt 4.2. ist für das Entleeren von Silozellen möglich, wenn die Entnahme des Schüttgutes über vertikale Entleerungsrohre in der Silozelle oder Entleerungsöffnungen in der Zellenwand bei Silobatterien erfolgt. Nach Bild 20 muß bei Entleerung durch ein Entleerungsrohr oder durch die Zellenwand gesichert sein, daß das Schüttgut von oben in aufeinanderfolgenden Lagen abfließt und das darunterliegende Schüttgut im Lagerzustand verbleibt. Wenn über den Bodenauslauf direkt nur die Restentleerung erfolgt, kann die horizontale Normlast nach Abschnitt 4.1. als maßgebend angenommen werden.

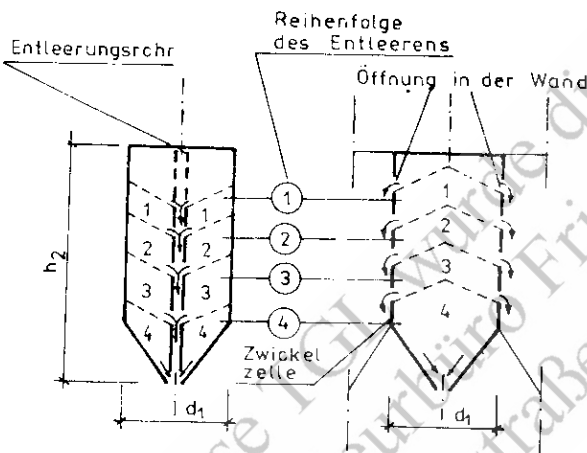


Bild 20 Entleerung über Entleerungsrohr und Öffnungen in der Zellenwand

Werden für das Entleeren Vibratoren eingesetzt, so sind Veränderungen der Lasten aus dem Schüttgut möglich. Innenvibratoren verändern die Dichte und Festigkeit,

Außenvibratoren die Gleitfähigkeit des Schüttgutes an der Zellenwand. Diese unterschiedlichen Einflüsse sind bei den Lastannahmen zu untersuchen und zu berücksichtigen.

Durch den Einsatz von „jets“ (Luftkanonenprinzip) beim Entleeren sind keine Lasterhöhungen anzunehmen, da durch kurzzeitige und punktuelle Luftstöße mit geringer Energie nur örtlich begrenzte Auflockerungen im Schüttgut entstehen, die das Auslaufen des Schüttgutes verbessern. Bei gleichzeitiger Entnahme von Schüttgut und Luftabsaugung aus einem Flachsilo oder Silo können Unterdrücke entstehen, die nach den Angaben des technologischen Projektes zu berücksichtigen sind.

### 6.2. Knicken und Beulen

Bei dünnwandigen Silos, insbesondere in Blechbauweise, ist die Beanspruchung der Zellenwand auf Knicken und Beulen zu untersuchen.

### 6.3. Staubexplosionen

Für Bunker, Flachsilos und Silos sind objektbezogene technologische Schutzmaßnahmen und Maßnahmen des bautechnischen Explosionsschutzes zu berücksichtigen. Das gilt besonders, wenn Schüttgüter, wie z. B. Getreide, Getreidemehl, Staubzucker, Kohlenstaub zur Einlagerung vorgesehen sind.

## 7. RECHENLASTEN

Bei der Berechnung nach der Methode der Grenzzustände sind Rechenlasten anzuwenden, die durch Multiplikation der Normlasten nach Abschnitt 3. und 4. mit dem Lastfaktor  $n$  sowie mit dem Wertigkeitsfaktor berechnet werden.

### 7.1. Lastfaktor

Der Lastfaktor  $n$  für Normlasten aus Schüttgütern berücksichtigt differenziert zufallsabhängige Abweichungen der Schüttguteigenschaften, der Bauwerksgeometrie sowie der Betriebszustände aus dem Bunker-, Flachsilo- und Silobetrieb und ist der Tabelle 22 zu entnehmen. Beispiele für die qualitative Wertung der zufallsabhängigen Abweichungen sind zur Bestimmung des Lastfaktors in Tabelle 21 angegeben.

Tabelle 21 Beispiele für die qualitative Wertung der zufallsabhängigen Abweichungen

| Benennung                 | Wertigkeit | Zufallsabhängige Abweichung  |
|---------------------------|------------|--|
|                           |            | Beispiel   |
| 1. Schüttguteigenschaften | 1.1.       | relativ geringe Streuung der Kennwerte der Schüttgüter bzw. geringe qualitative Veränderung der Schüttguteigenschaften, z. B. Kies, Quarzsand, Sand, Zement, Zementklinker, Gesteinsmehl, Getreide (ohne Mais)   |
|                           | 1.2.       | relativ große Streuung der Kennwerte der Schüttgüter bzw. qualitative Veränderung der Schüttguteigenschaften, z. B. Kohle, Flugasche, Kohlenstaub, Mais, Getreidemehl, Sojabohnen, Sojaschrot, kohäsive Schüttgüter  |
| 2. Bauwerksgeometrie      | 2.1.       | relativ geringe Abweichungen von der im Entwurf und in der Berechnung festgelegten Bauwerksgeometrie, z. B. Silos und Bunker in Metallbauweise   |
|                           | 2.2.       | relativ große Abweichungen von der im Entwurf und in der Berechnung festgelegten Bauwerksgeometrie, z. B. Stahlbetonfertigteilebauweise mit kleinformatigen Elementen, monolithische Stahlbetonbauweise  |
| 3. Betriebszustände       | 3.1.       | relativ geringe Abweichungen zur wirklichkeitsnahen und sicheren Erfassung der Betriebszustände, z. B. zentrisches Füllen und Entleeren sowie Ruhedruck  |
|                           | 3.2.       | relativ große Abweichungen in den Annahmen zu Erfassung der Betriebszustände oder in den technologischen Bedingungen, z. B. exzentrisches Füllen und Entleeren besonders an der Zellenwand, schüttgutspezifische dynamische Wirkungen beim Entleeren, schnelles Füllen |

Tabelle 22 Werte für den Lastfaktor n

| Benennung                 | Wertigkeit der zufallsabhängigen Abweichung nach Tabelle 21 |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|
|                           | 1.1.  | 1.1. | 1.1. | 1.1. | 1.2. | 1.2. | 1.2. | 1.2. |
| 1. Schüttguteigenschaften | 1.1.  | 1.1. | 1.1. | 1.1. | 1.2. | 1.2. | 1.2. | 1.2. |
| 2. Bauwerksgeometrie      | 2.1.  | 2.1. | 2.2. | 2.2. | 2.1. | 2.1. | 2.2. | 2.2. |
| 3. Betriebszustände       | 3.1.  | 3.2. | 3.1. | 3.2. | 3.1. | 3.2. | 3.1. | 3.2. |
| Lastfaktor n              | 1.10  | 1.15 | 1.15 | 1.20 | 1.20 | 1.25 | 1.25 | 1.30 |

## 7.2. Wertigkeitsfaktor

Der Wertigkeitsfaktor berücksichtigt durch Erhöhung oder Reduzierung der Lasten das Risikoniveau des Bunker-, Flachsilo- oder Silobauwerkes. Wenn keine außergewöhnlichen Bedingungen vorliegen, kann der Wertigkeitsfaktor mit 1,0 angenommen werden.

## 7.3. Kombinationsfaktor

Der Kombinationsfaktor nach TGL 32274/01 berücksichtigt die Summe aller gleichzeitig wirkenden kurzzeitigen Lasten aus dem Schüttgut und ist grundsätzlich mit 1,0 anzunehmen.

## Hinweise

Im vorliegenden Standard ist auf folgende Standards Bezug genommen:

TGL 11 464/03; TGL 35 424/01 bis /07; TGL 31 549/04; TGL 32 274/01

Themenbearbeiter: Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar

Wissenschaftszentrum Industrie- und Spezialbau  
Geschwister-Scholl-Str. 8,  
5300 Weimar