

Bautechnische Maßnahmen zur Schadensminderung bei Staubexplosionen

T 2574

T 2574

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

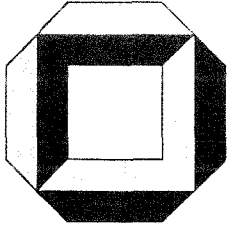
Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



Massivbau
Baustofftechnologie
Karlsruhe

Abschlußbericht

**Bautechnische Maßnahmen zur Schadensminderung
bei Staubexplosionen**

Aktenzeichen: IV 1-5-605/90

Prof. Dr.-Ing. J. Eibl

Prof. Dr.-Ing. W. Leuckel

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Abteilung Massivbau
Leitung: Prof. Dr.-Ing. J. Eibl

Engler-Bunte-Institut
Bereich Feuerungstechnik
Leitung: Prof. Dr.-Ing. W. Leuckel

Universität Karlsruhe
1993

Vorbemerkung

Die Untersuchungen, über die im Folgenden berichtet wird, wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens 'Bautechnische Maßnahmen zur Schadensminderung bei Staubexplosionen' durchgeführt.

Sie wurden unter dem Aktenzeichen IV 1-5-605/90 vom
Institut für Bautechnik, Berlin
gefördert, dessen Vertretern hierfür Dank gebührt.

In die Diskussion über die Richtlinie sind als Projektbegleiter die Herren Dr.-Ing. Nieser vom Institut für Bautechnik und Dr.-Ing. Bossenmayer sowie Oberbaurat Schicktanzen vom Innenministerium Baden-Württemberg eingeschaltet gewesen. Letzterem gebührt besonderer Dank für die textliche Überarbeitung der Richtlinie. Dem weiteren Mitglied der Kommission, Herrn Dr.-Ing. S. Radandt von der Berufsgenossenschaft für Nahrungsmittel und Gaststätten, gebührt ebenfalls besonderer Dank für die Zusammenarbeit sowie die wertvollen Hinweise aus der Praxis.

Die in den Anhängen A bis C abgedruckte Richtlinie stellt den Stand dar, wie er von den Autoren und den oben angeführten Projektbegleitern der Fachkommission Baunormung zur Entscheidung vorgelegt wurde.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Kurzfassung

Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens ist, einen vorlagefähigen Entwurf einer Richtlinie zur Auslegung von Siloanlagen gegen Staubexplosionen zu erarbeiten.

Ausgehend von einer Literaturrecherche wurde der Stand der Erkenntnisse auf diesem Gebiet aufgearbeitet. Es stellte sich heraus, daß der Trägheit von Entlastungsorganen durchaus eine gewisse Bedeutung beigemessen wird, diese aber in den vorliegenden Bemessungsvorschlägen kaum berücksichtigt wird.

In neuerer Zeit zeigte es sich, daß diese Trägheit einen wesentlichen Einfluß hat, was auch durch eigene Experimente bestätigt wurde.

Theoretische Überlegungen führten zu einem Modell trägheitsbehafteter Entlastungen, das mit einem in der Praxis erprobten, auf experimentellen Befunden basierenden Modell für trägheitsfreie Entlastungen gekoppelt wurde. Diese Überlegungen fanden dann Eingang in ein Rechenmodell. Aus einer Vielzahl von Berechnungen wurden Bemessungsdiagramme konstruiert, die einfach und allgemein anwendbar sind. Sie sind mit Erläuterungen versehen im Anhang zur Richtlinie aufgeführt. Anwendungsbeispiele sowie Vorschläge für bautechnische Lösungen von Entlastungskonstruktionen sind im Beiblatt zur Richtlinie zu finden.

Abstract

The aim of this investigation is to submit a draft for a guideline to design silos against dust explosions.

The state of art in this area was worked out starting from an investigation of literature. It was shown, that the inertia of the vent closure influences the vent area, but it was hardly taken into consideration in the proposed design rules.

Recently it has been shown, that the inertia is essential for the design, which was established in own experiments.

Theoretical considerations lead to model of venting design with inertia, that was put together with a model, tested in practice and based on an empirical foundation. Simple and general applicable design charts were created from numerous calculations with the above mentioned model. They could be found with explanations in the appendix of the design rules. Examples and proposals for solutions of the vent construction could be found in the supplements of the design rules.

Résumé

Le but de ce rapport consiste dans l'élaboration d'un projet-directive concernant les silos

soumis aux actions impliquées par les explosions de poussière.

L' état des connaissances sur ce domaine a été mis à jour à partir d' une recherche bibliographique. Il en a résulté qu' il faut accorder une certaine importance à l' inertie des dispositifs de déversement, restée pratiquement non-considerée dans les propositions existantes sur le dimensionnement.

Des considérations théoriques conduisirent à un modèle qui tient compte de l' inertie mentionnée, qui a été accouplé à un modèle sans cette inertie, basé sur des résultats expérimentaux et vérifié par la pratique. Ces considérations servirent à élaborer un modèle de calcul numérique. Sur la base des nombreux calculs qui ont été faits, des diagrammes de dimensionnement furent établis, qui peuvent être mis en oeuvre facilement et de manière générale. Ils sont munis d' explications et se trouvent dans l' appendice de la directive. Des exemples d' application ainsi que des propositions pour des solutions constructives des dispositifs de déversement se trouvent dans le supplément de la directive.

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung	1
2	Stand der Erkenntnisse	3
3	Durchgeführte Untersuchungen	6
3.1	Theoretische Untersuchungen – Erstellen von Bemessungsdiagrammen	6
3.2	Parameterstudien – Vergleiche mit bestehenden Ansätzen	11
3.3	Bautechnische Überlegungen	15
4	Zusammenfassung	17
5	Literatur	18
Anhang A	– Richtlinie zur Auslegung von Siloanlagen gegen Staubexplosionen	
Anhang B	– Anhang zur Richtlinie	
Anhang C	– Beiblatt zur Richtlinie	

1 Veranlassung

Staubexplosionen in Silos und Bunkern finden nach wie vor mit einer in der Öffentlichkeit kaum bekannten Häufigkeit statt, nur einige spektakuläre Ereignisse [8] werden von der Öffentlichkeit registriert. Staubexplosionen sind meist mit großen Sach- und teilweise auch mit Personenschäden verbunden. Der Verband der Sachversicherer bezifferte 1989 [24] die Zahl der jährlich auftretenden Schäden mit 1200 bei einer Schadenssumme von ca. 150 Mio. DM. Dabei wurden nur Ereignisse berücksichtigt, die zweifelsfrei auf Staubexplosionen zurückzuführen sind. Eine aufschlußreiche Statistik über Staubexplosionen in den USA ist in [14] zu finden. Dort werden Staubexplosionen in der getreideverarbeitenden Industrie ab 1860 aufgelistet. Aus dieser Statistik wurde Abb. 1.1 entnommen.

Staubexplosionen in USA
nach U.S. Department of Agriculture

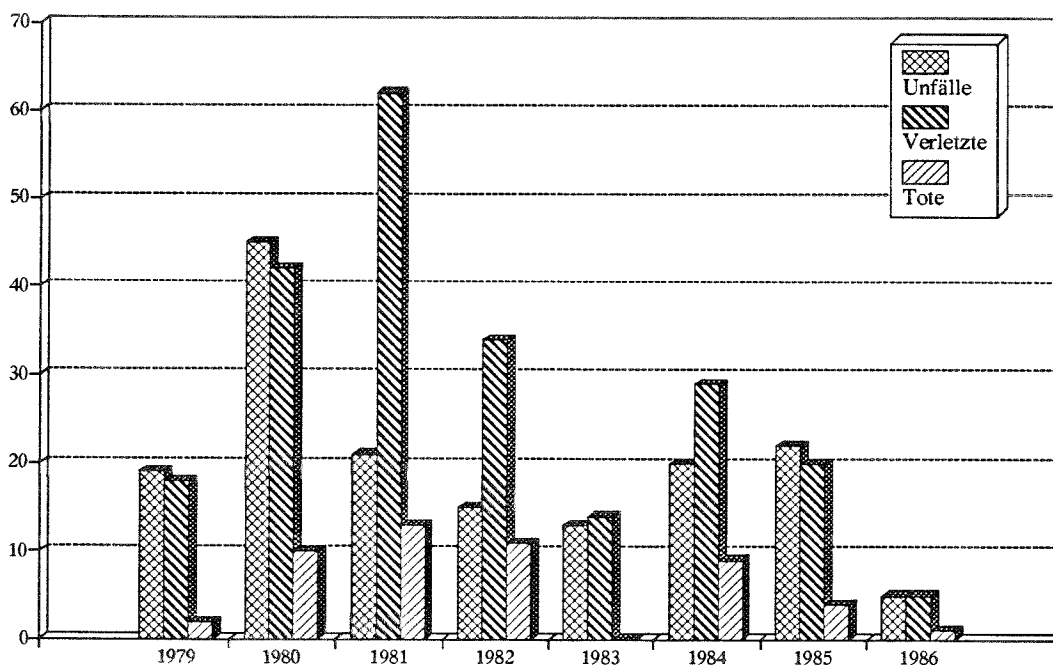


Abb. 1.1: Staubexplosionen in den USA

Aufgrund dieser hohen Gefährdung, auch für Personen, kam man bei der Fachkommission Baunormung überein, eine erste Richtlinie zur Schadensminderung bei Staubexplosionen zu erarbeiten, und beauftragte damit die Antragsteller sowie weitere in diesem Bereich tätige Herren.

Ziel dieses Vorhabens ist es deshalb, eine Richtlinie zu erarbeiten, mit der Staubexplosionen möglichst vermieden oder zumindest die Auswirkungen derselben vermindert werden können.

2 Stand der Erkenntnisse

Die Folgen von Staubexplosionen sind seit ca. 200 Jahren bekannt, und zwar seit damit begonnen wurde, Getreide in windangetriebenen Mühlen zu mahlen [1]. Die Tatsache, daß diese Explosionen durch das Verbrennen des Staubes selber ausgelöst wurden, ist jedoch erst seit ca. 100 Jahren bekannt. Mit zunehmender industrieller Produktion von Getreide und anderen zu mahlenden Gütern nahmen auch die Schäden durch Staubexplosionen zu. Eine umfangreiche Statistik der Bundesrepublik ist in [6], [7] enthalten. Auch heute kommt es immer wieder zu großen Schäden durch Staub- und Gasexplosionen, oft verbunden mit einer großen Anzahl an Verletzten und Todesfällen [1], [6], [7], [14], [45].

Versuchsreihe	Versuchsleiter	Literatur	Behältervolumen V [m ³]
A	Heinrich	[34]	5
B	Bartknecht	[4]	1 / 10 / 30 / 60
C	Bartknecht	[2]	2,4 / 10 / 25 / 250
D	Eckhoff	[18], [19]	500
E	Bartknecht Radandt	[5]	20
F	Eckhoff	[22]	236
G	Eibl Block	[25]	20
H	Eibl Leuckel	[26], [27]	50
I	Matusék Stroch	[38]	500
J	Gerold	[31]	45 / 85 / 110

Tab. 2.1 Versuchsreihen

Da die Erforschung der theoretischen Grundlagen erst am Anfang steht, sind begleitend experimentelle Studien notwendig. Insbesondere die Untersuchung verschiedener neuer Entlastungskonstruktionen ist nur experimentell möglich [17], [46], allerdings in Verbindung mit einer theoriebasierten Versuchsauswertung.

Die Druckentlastung von Behältern infolge von Staubexplosionen wird seit ca. 40 Jahren systematisch untersucht, jedoch meist mit trägheitslosen Entlastungsvorrichtungen ([2], [3],

[18], [19], [20], [21], [31], [34], [38]). Bekannte Arbeiten wurden von Bartknecht für die Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie ([2], [3]) und von Eckhoff ([17]–[21]) durchgeführt, wobei letzterer auch sehr große Silos bis 500 m³ untersuchte. Radandt untersuchte Explosionsabläufe in Rohrleitungen [41], die oft als Ursache für die Weiterleitung von Explosionen in andere explosionsgefährdete Räume erkannt wurden.

In einem Forschungsvorhaben der DFG untersuchen die beiden Antragsteller zur Zeit Staubexplosionen in einem 50 m³ großen Versuchssilo. Dabei wurden bis jetzt mehr als 300 Explosionsversuche durchgeführt. Als Einflußparameter wurden in diesem Projekt bisher Staubkonzentration, Zündort, Zündverzugszeit zwischen Einblasen des Staubes und Zünden des Gemischs, Turbulenz, Größe der Entlastungsfläche, Ansprechdruck der Entlastungsvorrichtung und deren Masse untersucht. Weiter ist noch eine Variation des Volumens und der Entlastungskonstruktion geplant.

Untersuchte Parameter	Versuchsreihen
P_a	D, G, H, I, J
Turbulenz	D, H, I
Zündquellenverlagerung	E, F, H, I, J
Behältervolumen	B, C, J
H/D – Verhältnis	J, (H)
Größe der Entlastungsfläche	A, B, C, D, F, G, H, I, J
seitliche Entlastung	F
Zündenergie	D, F, H, I
Ausblasrohrlänge	E
Art der Entlastungsvorrichtung	G, H, J
Staubart (p_{max} , K_{St})	A, B, C, D, E
Staubkonzentration	D, E, F, G, H
Befüllungsgrad	E
Druckmessung in unterschiedlichen Höhen	G, H, I

Tab. 2.2 In den Versuchsreihen untersuchte Parameter

Wie schon oben angedeutet gibt es bei Staubexplosionen eine Fülle von Einflußfaktoren, die den Ablauf der Explosion maßgebend beeinflussen. Deshalb werden bei Versuchen in der Regel nur einige dieser Parameter variiert, und es ist darum relativ schwierig, die einzelnen

Versuche mit einander zu vergleichen, vor allem weil nicht immer alle zur Auswertung notwendigen Angaben dokumentiert sind. Tabelle 2.1 gibt eine Übersicht über die hier näher untersuchten Versuchsreihen.

Die in diesen Versuchsreihen untersuchten Parameter sind in Tabelle 2.2 angegeben. Wie aus den beiden Tabellen zu erkennen ist, wurden in den letzten Jahren eine große Anzahl von Versuchen durchgeführt. Dabei handelt sich meist um Versuche in sehr kleinen Volumina. Es liegen nur sehr wenige Versuche in größeren Silos bis 500 m^3 vor. Eine Extrapolation auf größere Silovolumina ist deshalb nur mit Einschränkungen möglich und die meisten Bemessungsvorschläge werden auf ein Silovolumen von 10000 m^3 begrenzt.

Parallel zu den Versuchen wurden auch Bemessungsvorschläge zur Druckentlastung von Behältern seit ca. 30 Jahren entwickelt [16], [30], [35], [40], [42], [43], [44], [46], [47]. Diese beruhen jedoch meist auf empirischen Ansätzen und sind hauptsächlich an Versuchen der jeweiligen Autoren geeicht. Entsprechend zeigen sich die Schwierigkeiten erst bei der Anwendung auf andere Versuche. Einzig die VDI-Richtlinie 3673 [46], [47] und der NFPA-Code 68 [40], der auf der VDI-Richtlinie 3673 beruht, sind für die Dimensionierung von trägheitsfreien Druckentlastungssystemen gut geeignet.

Deshalb wurden die Bemessungsgrundlagen im Anhang der Richtlinie zur Auslegung von Silobauwerken gegen Staubexplosionen auf dem Ansatz des Entwurfes der VDI-Richtlinie 3673 [46] aufgebaut. Näheres ist Abschnitt 3.1 zu entnehmen.

3 Durchgeführte Untersuchungen

3.1 Theoretische Untersuchungen – Erstellen von Bemessungsdiagrammen

Betrachtet werden laminare oder turbulente, deflagrative Explosionen homogener Brenngas/Luft- oder Brennstaub/Luft-Gemische in entlasteten Behältern/Silos. Der Druck im Explosionsraum kann zu jeder Zeit als näherungsweise räumlich konstant angesehen werden (langsame Deflagrationen).

Der zeitliche Druckverlauf während einer (entlasteten) Explosion kann mit Hilfe eines Systems gewöhnlicher Differentialgleichungen näherungsweise beschrieben werden. Diese Gleichungen beschreiben einerseits den Umsatz durch die Verbrennung, die Kontinuitätsbedingung, den Zustand sowie die Energieerhaltung des Frischgemisches und andererseits das Ausströmen aus dem Silo und die Bewegung der Entlastungselemente wie Platten oder Klappen. Den Berechnungen für die Bemessungsdiagramme der Richtlinie liegen folgende Gleichungen zugrunde. Sie beschreiben

- die Änderungen der Rauchgas- bzw. Frischgasmenge infolge der Verbrennung; die Masse des Staubes wird auf der Frischgasseite nicht berücksichtigt,

$$dM_v = \Lambda \cdot A_{FF} \cdot (\rho_{Luft} + \rho_{Staub}) \cdot dt \quad dM_u = -\Lambda \cdot A_{FF} \cdot \rho_{Luft} \cdot dt$$

- die Kontinuitätsbedingung, d. h. die Änderung des Rauchgasvolumens ist gleich der Änderung des Frischgasvolumens, da das Silovolumen konstant ist,

$$-\frac{M_v}{\rho_v^2} d\rho_v + \frac{dM_v}{\rho_v} - \frac{M_u}{\rho_u^2} d\rho_u + \frac{dM_u}{\rho_u} = 0$$

- den Zustand des Rauch- bzw. des Frischgases,

$$dp = R_v \cdot (\rho_v dT_v + T_v d\rho_v) \quad dp = R_u \cdot (\rho_u dT_u + T_u d\rho_u)$$

- die Energieerhaltung für das Rauchgas

$$M_v c_v dT_v = dM_v \cdot (H_u + c_v T_u \mu - c_v T_v) + p \cdot \left(\frac{dQ_v}{Q_v^2} M_v - \frac{dM_v}{Q_v} - \frac{dM_u}{Q_u} \right)$$

– und die Energieerhaltung für das Frischgemisch

$$c_v dT_u = p \frac{dQ_u}{Q_u^2} .$$

Hinzu kommen die Bewegungsgleichungen für das Entlastungselement. Betrachtet wurde die Entlastung mit Platten oder Klappen (s. Abb. 3.1 und Abb. 3.2). Aus einem Kräftegleichgewicht ergibt sich für die Platte

$$M_p \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} = (\bar{p}_i - p_a) \cdot \frac{\pi}{4} d^2 - M_p g$$

und aus einem Momentengleichgewicht für die Klappe

$$-M_p g \frac{b}{2} \cos \varphi - M_p \frac{b^2}{3} \ddot{\varphi} + (\bar{p}_i - p_a) \cdot l b \frac{b}{3} - c_d \varphi = 0 .$$

Die Entlastung führt zu einem Druckabfall

$$\frac{dp}{dt} = -\kappa \frac{RT}{V} \cdot \frac{dM}{dt} \quad \text{mit} \quad \frac{dM}{dt} = A_E \cdot v_E \cdot \rho_E = \pi d y v_E \rho_E$$

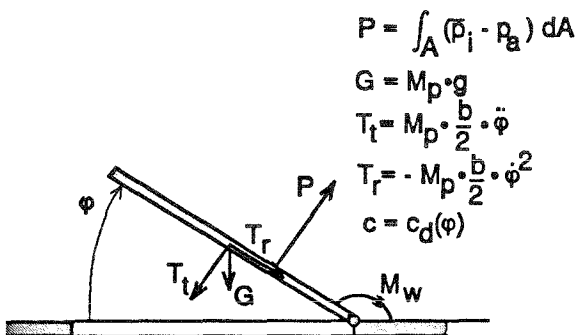


Abb. 3.1 Modell der Klappenentlastung

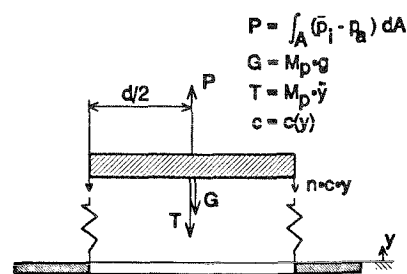


Abb. 3.2 Modell der Plattenentlastung

im Silo infolge des Ausströmens von Frisch- oder Rauchgas. Zur Beschreibung des Explosionsablaufes und der Entlastungsströmung werden ähnliche Ansätze in der Literatur vorgeschlagen [10], [11], [12], [13], [23], [32], [36], [39], [43]. Behandelt wird allerdings nur die trägheitsfreie Entlastung. Angesprochen wird eine träge Entlastung mit Platten in [33]. Druckschwingungen oder akustische Wellen, die bei entlasteten Explosionen in Erscheinung treten können (wie z. B. in [15] beschrieben), werden mit diesem Modell nicht erfaßt. Die Ansätze unterscheiden sich im wesentlichen durch die Wahl einer geeigneten Brenngeschwindigkeit. Für diese Betrachtung wurde die Existenz einer mittleren effektiven Brenngeschwindigkeit $\overline{\Lambda}_{eff}$ vorausgesetzt, die als integrales Maß der Reaktionsgeschwindigkeit innerhalb der betrachteten Explosionsklasse einsetzbar ist. Sie wird iterativ für ein Staub/Luft-Gemisch aus dem experimentell ermittelten K_{St} -Wert [9] im geschlossenen druckfesten Behälter bestimmt. Die Bemessung trägheitsfreier Entlastungen wurde an die VDI-Richtlinie 3673 [46] angelehnt.

Die absoluten Druck/Zeit-Verläufe von unter Berücksichtigung der Massenträgheit der Entlastungseinrichtung ablaufenden Explosionen hängen wesentlich von folgenden primären Einflußgrößen ab:

- Behältervolumen V und Behältergestalt;
- Art der explosionsfähigen (gasförmigen oder staubförmigen) Substanz und deren Mischungsverhältnis mit Luft (Stöchiometrie);
- Strömungs- und Turbulenzbewegung des Gemisches zum Zündzeitpunkt;
- Zündort im Behältervolumen;
- Entlastungsquerschnitt A_E ;
- Ansprechdruck der Freigabe des Entlastungsquerschnittes p_E ;
- maximale Abhebehöhe h der Entlastungsplatte;
- Entlastungsplattenmasse M_p oder auf die Entlastungsöffnungsfläche A_E bezogene Plattenmasse $m_p=M_p/A_E$;
- Anzahl der Entlastungsöffnungen n , entsprechend dem Durchmessermaß

$$d = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{A_E}{n}}$$

- jeder einzelnen Entlastungsöffnung;
- Erdbeschleunigung g .

Aus den vorgenannten Einflußgrößen ergeben sich folgende Ähnlichkeitsbedingungen für durch träge Mechanismen druckentlastete Explosionen:

- (1) ähnliche Druckbehältergeometrie, z.B. zylindrische, stehende Behälter (Durchmesser D, Höhe H) mit gleichem Höhe/Durchmesser (H/D)-Verhältnis;
- (2) Zündung an geometrisch ähnlichen Orten in allen Behältern, z.B. in Behältermitte, auf der Behälterachse in H/4 vom Boden o. dgl.;
- (3) zumindest näherungsweise gleiche Enddrücke p_{\max} (wesentlich im Bereich von 9 bis 11 bar) der adiabaten Gemischexplosionen ohne Entlastung;
- (4) Existenz einer Flammenfront mit reaktionskinetik- und turbulenzabhängiger Brenngeschwindigkeit;
- (5) identische Druck- und Temperaturabhängigkeit der Brenngeschwindigkeit der Gemische;
- (6) identischer Verlauf des Turbulenzfaktors der Brenngeschwindigkeit über der reduzierten Zeit;
- (7) gleicher vorgegebener Entlastungs-Ansprechdruck p_E ;
- (8) gleicher Zeitverhältnisparameter $t_{\text{Aus}}/t_{\text{Reak}}$;
- (9) gleiche relative maximale Plattenabhebehöhe h/d ;
- (10) gleicher Zeitverhältnisparameter t_E/t_{Aus} .

Die o.g. charakteristischen Zeitmaße sind wie folgt definiert:

$$t_{\text{Reak}} = t_{\text{max}} = C_1 \cdot \frac{V^{1/3}}{\Lambda_{\text{eff}}} \quad \text{mit} \quad \Lambda_{\text{eff}} \sim K_{\text{G/St}} (1\text{m}^3) \cdot V^{1/10}$$

die Zeit, die die Reaktion zum vollständigen Umsatz des im Behälter vorhandenen Frischgemisches braucht, d.h. die Zeit, bei der der Enddruck p_{\max} im geschlossenen Behälter auftritt; die Proportionalität zwischen Λ und K_{St} ergibt sich aus dem kubischen Gesetz und turbulenztheoretischen Überlegungen unter Berücksichtigung der empirischen Zusammenhänge aus der VDI-Richtlinie [46];

$$t_{\text{Aus}} = C_2 \cdot \frac{\varrho_0 \cdot V}{A_E \cdot \varrho_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_{\text{red}} - p_0)}{\varrho_0}}} = C_2 \cdot \frac{V}{A_E} \cdot \sqrt{\frac{\varrho_0}{2 \cdot (p_{\text{red}} - p_0)}} = C_2^* \cdot \frac{V}{A_E}$$

die Zeit der für den Entlastungsvorgang verantwortlichen Ausströmung;

$$t_E = \sqrt{\frac{m_p \cdot h}{C_3 \cdot (p_{red} - p_0)}} = \sqrt{\frac{m_p \cdot \frac{h}{d} \cdot d}{C_3 \cdot (p_{red} - p_0)}} = \sqrt{\frac{m_p \cdot \frac{h}{d} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot A_E}{\pi \cdot n}}}{C_3 \cdot (p_{red} - p_0)}} = C_3^* \cdot m_p^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{A_E}{n}\right)^{\frac{1}{4}}$$

die Öffnungszeit des Entlastungselements (hier der Platte) bis zum Erreichen der Höhe h. Unter den Ähnlichkeitsbedingungen (1) bis (10) werden ähnliche, d.h. nur im Zeitverlaufsmaßstab unterschiedliche Druck/Zeit-Verläufe träge entlasteter Explosionen erhalten. Hält man die Bedingungen (1) bis (6), (7) und (9) ein, variiert jedoch die Zeitverhältnisparameter t_{Aus}/t_{Reak} und t_E/t_{Aus} unabhängig voneinander, so erhält man im Prinzip eine zweidimensionale Schar normierter Druck/Zeit-Verläufe. Der reduzierte maximale Explosionsdruck p_{red} läßt sich dann als Funktion dieser beiden Parameter darstellen. Dieses Diagramm läßt sich aus den Ergebniswerten p_{red} konkreter Modellrechnungen, die als Parameterstudie unter der Variation von V, A, $K_{G/St}$, m_p , n angelegt sind, konstruieren; es gilt für einen konstanten Wert H/D und jeweils ähnlich gelegene Zündorte im Silobehälter. Da anwendungsmethodisch letztlich der Betrag der Entlastungsfläche A bestimmt werden soll, ist es ungeschickt, daß A in den Kennzahlen beider Achsen enthalten ist. Daher erfolgt eine Transformation der Kurve $p_{red}=\text{konst.}$ in zwei hintereinandergeschaltete Diagramme. Im ersten Diagramm mit der Abszisse

$$\frac{t_{Aus}}{t_{Reak}} = \frac{V^{0,767} \cdot K_{G/St} (1m^3)}{A_E} =: K_p$$

wird der Fall trägheitsfreier Entlastung entsprechend der VDI-Richtlinie 3673 behandelt, im zweiten mit der Abszisse

$$\frac{t_E}{t_{Aus}} \left(\frac{t_{Aus}}{t_{Reak}} \right)^{\frac{5}{4}} = \frac{m_p^{\frac{1}{2}} \cdot K_{G/St}^{\frac{5}{4}} (1m^3)}{V^{0,041} \cdot n^{\frac{1}{4}}} =: K_m$$

der Fall mit masseträgen Entlastungselementen. Um eine Auffangkonstruktion für ein im Falle einer Explosion sich bewegendes Entlastungselement zu dimensionieren, muß dessen Geschwindigkeit, sein Impuls oder seine kinetische Energie bekannt sein. Vorstellbar ist das Auffangen der Platte in einer Höhe $h/d=0,25$ oder $0,5$ bzw. der Klappe bei einem Winkel $\varphi=90^\circ$. Aus einer Energieerhaltungsbetrachtung des sich bewegenden Entlastungselements werden die zur Plattengeschwindigkeit v bzw. zur Winkelgeschwindigkeit ω der Klappe

proportionalen Parameter

$$K_v = \frac{v \cdot A_E \cdot m_p}{V \cdot \sqrt{p_{red}}} \quad \text{bzw.} \quad K_\omega = \frac{\omega \cdot A_E^{\frac{3}{2}} \cdot m_p}{V \cdot \sqrt{p_{red}} \cdot n^{\frac{1}{2}}}$$

hergeleitet. Für die praktische Anwendung bedeutet dies, daß aus einem dritten Diagramm der Parameter K_v bzw. K_ω , d. h. die gesuchte Geschwindigkeit ermittelt wird.

Erklärung der in diesem Kapitel benutzten Formelzeichen

• Lateinische Buchstaben

A	[m ²]	Fläche
b	[m]	Breite der Entlastungsklappe
c	[kg/s ²]	Federkonstante
C	[-]	Konstante
c _v	[J/(kg*K)]	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen
D	[m]	Durchmesser des Silos
d	[m]	Durchmesser der Entlastungsplatte/-öffnung
G	[N]	Gewichtskraft
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
H	[m]	Höhe des Silos
h	[m]	Abhebehöhe der Entlastungsplatte
K	[bar*m/s]	Explosionskennwert für Gas (Index G) oder Staub (Index St)
l	[m]	Länge Entlastungsklappe
M	[kg]	Masse
M	[N*m]	Moment
m	[kg/m ²]	flächenspezifische Masse
n	[-]	Anzahl
p	[Pa]	Druck
P	[N]	Druckkraft
R	[J/(kg*K)]	Gaskonstante
t	[s]	Zeit
T	[K]	Temperatur
T	[N]	Trägheitskraft
V	[m ³]	Volumen
v	[m/s]	Geschwindigkeit
y	[m]	Lauflänge der Plattenbewegung

• Griechische Buchstaben

Δ	[-]	Differenz
φ	[-]	Winkelgröße
$\dot{\varphi}$	[1/s]	Winkelgeschwindigkeit
ω	[1/s]	Winkelgeschwindigkeit
τ	[s]	charakteristische Zeit
Λ	[m/s]	Brenngeschwindigkeit
ϱ	[kg/m ³]	Dichte
κ	[-]	Isentropenexponent
μ	[-]	$-1/(1 + \varrho_{\text{Staub}}/\varrho_{\text{Luft}})$

• Indizes

Tiefgestellt

a	außen
Aus	Ausströmung
d	dämpfend
eff	effektiv
E	Entlastung
FF	Flammenfront
G	Gas
i	innen
K	Klappe
max	maximal
P	Platte
r	radial
Reak	Reaktion
red	reduziert
St	Staub
t	tangential
u	unverbrannt
v	verbrannt
W	Widerstand

Hochgestellt

*	modifiziert
—	gemittelt

3.2 Parameterstudien – Vergleiche mit bestehenden Ansätzen

Das in Abschnitt 3.1 vorgestellte Verfahren, das gleichzeitig auch im Anhang der Richtlinie zur Auslegung von Siloanlagen gegen Staubexplosionen – im nachfolgenden nur noch als Richtlinie bezeichnet – zu finden ist, wurde zusammen mit 9 anderen Bemessungskonzepten näher untersucht.

Die einzelnen Bemessungskonzepte wurden dabei an von verschiedenen Autoren durchgeführten Versuchsreihen getestet (vgl. Tab. 2.2). Hier muß jedoch erwähnt werden, daß bei Versuchen meist optimale Bedingungen vorliegen, wie sie in der Praxis fast nie erreicht werden. D.h. die Ergebnisse der Versuche überschätzen meist die Auswirkungen in der Praxis. Deshalb stellen die Versuchsergebnisse unter den angegebenen Bedingungen den schlimmsten Fall dar, und liegen auf der sicheren Seite. Daraus folgt, daß die Bemessungsdiagramme nicht noch einmal auf der sicheren Seite gegenüber den Versuchsergebnissen liegen sollten, da sonst unrealistisch hohe Anforderungen für die Errichtung von Siloanlagen in Bezug auf Staubexplosionen gestellt werden.

Hier soll über die Ergebnisse einer Parameterstudie berichtet werden, die am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie durchgeführt wurde (vgl. [29]). Es zeigte sich, daß einzig die VDI-Richtlinie 3673, der NFPA-Code 68 und die Richtlinie selbst in den meisten Fällen zutreffende Ergebnisse lieferten. Dies liegt daran, daß der NFPA-Code 68 das Bemessungskonzept der VDI-Richtlinie übernommen hat und die Bemessung für trägheitsfreie Bemessung der Richtlinie auch auf der Grundlage der VDI-Richtlinie 3673 basiert.

Über den Einfluß der Massenträgheit läßt keine Aussage treffen, da bei den meisten Versuchsreihen und Bemessungskonzepten dieser Einfluß nicht berücksichtigt wurde. In der Praxis sind jedoch die meisten Entlastungskonstruktionen trägheitsbehafet, weshalb dieser Einfluß eine wesentliche Rolle bei der Auslegung von Siloanlagen spielt. Darum wird in [26], [27] der Einfluß der Massenträgheit noch näher untersucht werden. Dieser Einfluß ist in der VDI-Richtlinie nur teilweise berücksichtigt, so daß für die Bemessung von trägheitsbehafeten Entlastungskonstruktionen eigentlich nur der im Anhang zur Richtlinie angeführte Bemessungsvorschlag in Frage kommt.

Ursprünglich war in der Richtlinie eine getrennte Bemessung für Lagergebäude und vergleichbare Räume vorhanden. Diese Bemessung wurde vom NFPA-Code 68, Ausgabe 1988 [40] übernommen. Dort werden zwei Bemessungskonzepte für die Dimensionierung von zu entlastenden Räumen vorgestellt. Dabei wird zwischen hoch- und niederfesten Umschließungen unterschieden. Sind die Umschließungen für einen Innendruck von mehr als 0,1 bar Überdruck ausgelegt, so ist dort das Verfahren der VDI-Richtlinie 3673 zu verwenden. Sind

diese Umschließungen für weniger als 0,1 bar ausgelegt so wurde dort ein einfacheres Verfahren angeboten:

$$A_E = \frac{C \cdot A_i}{\sqrt{p_{red}}} \quad (3.1)$$

mit A_E = Entlastungsfläche [m²]
 C = Konstante (siehe [40]) [kPa^{0,5}]
 A_i = innere Oberfläche des zu entlastenden Raumes [m²]

Dieses Konzept wurde zuerst in die Richtlinie aufgenommen und auch für höherfeste Umschließungen angeboten. In einer weiteren Parameterstudie die am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie durchgeführt wurde, wurde das Standardverfahren mit diesem Konzept verglichen. Dabei zeigte es sich, daß bei niedrigen Drücken, wie sie bei Lagergebäuden und Betriebsräumen von Siloanlagen vorkommen, keine größeren Unterschiede zwischen beiden Bemessungskonzepten vorhanden waren. Deshalb wurde in der endgültigen Version der Richtlinie vereinfacht nur das Standardverfahren angegeben.

Ein weiteres Problem stellt die Einbindung der Richtlinie in die bestehenden Bemessungskonzepte dar. Nach Eurocode 2 ist der Lastfall Staubexplosion für die außergewöhnliche Lastkombination noch mit anderen beim Betrieb einer Siloanlage auftretenden Lastfällen, wie z.B. Lasten aus Eigengewicht, Wind, Schnee, Schüttgut, überlagert werden.

Die Untersuchung dieser Einflüsse wurde hier auf die zwei wesentlichen Lastfälle, die Schüttgutlast und die Last aus Staubexplosion beschränkt, da sie sich außerdem noch gegenseitig beeinflussen. Auf der sicheren Seite liegend können die beiden Lastfälle überlagert werden. Es ist jedoch nicht möglich, daß gleichzeitig eine Staubexplosion in einem 'leeren' Volumen, das nur mit einem Staub-Luft-Gemisch gefüllt ist, und ein vollständig mit Schüttgut gefülltes Volumen vorliegt. Während des Silobetriebs wird jedoch der Füllungsgrad des Silos ständig schwanken, d.h. es liegen meist Teilfüllungsgrade vor, und hier kann im restlichen 'leeren' Volumen eine Staubexplosion stattfinden. Die Teilfüllungszustände können dann unter Umständen maßgebend für die Bemessung sein und müssen untersucht werden, wenn nicht die beiden Lastfälle überlagert werden.

Für diese Untersuchungen wurde der Ansatz von Janssen [37] so modifiziert, daß solche Teilfüllungszustände betrachtet werden können (vgl. Anhang C – Beiblatt zur Richtlinie)

$$\begin{aligned}
p_v(z) &= \gamma \cdot z_0 \cdot s(z) && ; z \geq 0 \\
&= p_{red} && ; z < 0 \\
p_h(z) &= \gamma \cdot \lambda \cdot z_0 \cdot s(z) && ; z \geq 0 \\
&= p_{red} && ; z < 0 \\
p_w(z) &= \gamma \cdot \lambda \cdot \mu \cdot z_0 \cdot s(z) && ; z \geq 0 \\
&= 0 && ; z < 0
\end{aligned}
\tag{3.2}$$

mit

$$\begin{aligned}
s(z) &= 1 - \left(1 - \frac{p_{red}}{\gamma \cdot z_0}\right) \cdot e^{-\frac{z}{z_0}} \\
z_0 &= \frac{A}{\lambda \cdot \mu \cdot u}
\end{aligned}
\tag{3.3}$$

In dieser Gleichung sind auch die beiden Grenzfälle

- 'leeres' Silo Belastung aus Staubexplosion
- volles Silo Schüttgutlast im gefüllten Silo

enthalten. Im Beiblatt zur Richtlinie (vgl. Anhang C) wird die Untersuchung von Teilfüllungszuständen an einem Beispiel vorgeführt.

3.3 Bautechnische Überlegungen

Maßnahmen, die das Entstehen von Staubexplosionen verhindern, sind im Prinzip der Minimierung des Schadens beim Auftreten einer Staubexplosion vorzuziehen. Solche Maßnahmen sind in der Praxis jedoch nicht oder nur unter großem Aufwand zu realisieren. Die andere Möglichkeit, die raumabschließenden Bauteile gegen p_{max} von ca. 9 bis 12 bar auszulegen, ist wegen des großen Aufwandes nur in Einzelfällen und bei relativ kleinem Volumen sinnvoll.

Deshalb wird im Beiblatt zur Richtlinie im wesentlichen nur auf die Ermittlung der Schnittkräfte bei druckentlasteten Staubexplosionen eingegangen. Hier ist im Gegensatz zu den beiden oben genannten Methoden eine Gefährdung der Umgebung durch austretende Druckwellen oder Flammenfronten nicht gänzlich auszuschließen. Entsprechend sollten Entlastungseinrichtungen nur in Teilen der Umgebung wirksam werden, die von Personen wenig frequentiert werden.

Für Entlastungseinrichtungen können 3 mechanische Grundprinzipien angewandt werden (vgl. Beiblatt zur Richtlinie). Diese 3 Prinzipien können außerdem beliebig kombiniert werden.

Ferner ist es auch möglich, an Entlastungseinrichtungen Rohre oder Umlenkkonstruktionen anzuschließen, um die oben beschriebenen Auswirkungen einer solchen Entlastung weiter- oder umzuleiten.

Ist die Art der Entlastungskonstruktion festgelegt, so kann der Bemessungsdruck für die raumabschließenden Bauteile und die notwendige Entlastungsfläche mit dem Anhang der Richtlinie gefunden werden. Das jetzt noch anstehende Problem ist die Dimensionierung der Rückhaltekonstruktion bei Deckeln bzw. die Ermittlung der Stoßlast beim Klappenmechanismus. Dafür und für die Dimensionierung der zur Kraftübertragung notwendigen Bauteile läßt sich kein allgemeingültiges Konzept angeben. Dies liegt daran, daß es sich hier meist um ein komplexes dynamisches System mit mehreren Freiheitsgraden handelt. Ein solches System ist nur im Einzelfall lösbar, da die Lösung von der Geometrie und den eingesetzten Mechanismen abhängig ist. Die genaue Lösung kann bei einem System mit mehreren Freiheitsgraden nur auf numerischem Wege gefunden werden. Angaben hierzu sind den Standardwerken der Baudynamik oder [28] zu entnehmen.

In vielen Fällen ist es jedoch möglich das komplexe System näherungsweise mit einem Einmassenschwinger abzubilden. Dies ist dann sehr einfach möglich, wenn ein Bauteil die überwiegende Verformung erfährt, wie es im Beispiel 1 des Beiblattes zur Richtlinie der Fall ist. In diesem Fall liegt die Lösung auf der sicheren Seite, da die anderen Systemverformungen die Schnittkräfte noch reduzieren würden. Die Vorgehensweise kann dann analog zu dem im Beiblatt der Richtlinie angegebenen Beispiel erfolgen. Das Beispiel wurde zwar nur an einem Deckelsystem durchgeführt, die Methode ist jedoch auch ohne weiteres auf eine Klappe übertragbar.

4 Zusammenfassung

Staubexplosionen werden erst in neuerer Zeit wissenschaftlich ausgewertet. Deshalb wurden in einer Literaturstudie bisher durchgeführte Versuche und Bemessungsvorschläge zusammengestellt.

Die bisher vorgestellten Bemessungsvorschläge beruhen überwiegend auf rein empirischen Ansätzen und gehen zumeist nur auf eine trägheitsfreie Bemessung ein. Unter diesen Vorschlägen hat sich in letzter Zeit die VDI-Richtlinie 3673 [47] als am besten zutreffend für eine trägheitsfreie Entlastung erwiesen und fand deshalb auch Eingang in das Regelwerk der USA [40].

In der hier vorgestellten Richtlinie wird deshalb von diesem, in der Praxis erprobten, empirischen Ansatz für trägheitsfreie Entlastung ausgegangen. Dieser Ansatz wurde modifiziert und mit Hilfe von theoretischen Grundlagen auf eine trägheitsbehaftete Entlastung erweitert.

Weiter wurde dieser Ansatz in Parameterstudien mit anderen Bemessungsvorschlägen verglichen. Als Grundlage dieser Parameterstudie dienten dazu verschiedene in der Literatur gefundene Staubexplosionsversuche und auch eigene durchgeführte Versuche. Ferner wurden noch bautechnische Lösungen für Entlastungskonstruktionen im Beiblatt zu dieser Richtlinie erarbeitet.

5 Literatur

- [1] Bartknecht, W. *Staubexplosionen, Ablauf und Schutzmaßnahmen*. Berlin, Springer Verlag, 1987
- [2] Bartknecht, W. Druckentlastung von Staubexplosionen in Großbehältern. *Schriftenreihe: Humanisierung des Arbeitslebens*, Band 78, VDI-Verlag, 1986
- [3] Bartknecht, W. Untersuchung des Explosions- und Zündverhaltens brennbarer Stäube und hybrider Gemische. *Schriftenreihe: Humanisierung des Arbeitslebens*, Band 64, VDI-Verlag, 1985
- [4] Bartknecht, W. Bericht über Untersuchungen zur Frage der Explosionsdruckentlastung brennender Stäube. *Staub – Reinhaltung der Luft*, 1974
- [5] Bartknecht, W. *Ablauf von Staubexplosionen in einem druckentlasteten Kleinsilo*. Ciba Geigy A.G., Fachgruppe Explosionstechnik, Januar 1981
- [6] Beck, H.
Jeske, A. *Dokumentation Staubexplosionen*. BIA-Report 4/82, 1982
- [7] Beck, H.
Jeske, A. *Dokumentation Staubexplosionen*. BIA-Report 2/87, 1987
- [8] BNN *Schwerverletzte bei heftiger Staubexplosion*. Badische Neueste Nachrichten vom 3.9.1991
- [9] BIA *Brenn- und Explosionskenngrößen von Stäuben*. Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit, Bergbau-Versuchsstrecke, Institut für Explosionsschutz und Sprengtechnik, Erich Schmidt Verlag GmbH&Co, Bielefeld, 1987

- [10] Bradley, D.
Mitcheson, A. The Venting of Gaseous Explosions in Spherical Vessels. I – Theory. *Comb. and Flame* 32, S. 221-236, 1978
- [11] Bradley, D.
Mitcheson, A. The Venting of Gaseous Explosions in Spherical Vessels. II – Theory and Experiment. *Comb. and Flame* 32, S. 237-255, 1978
- [12] Canu, P.
Rota, R.
Carra, S.
Morbidelli, M. Vented Gas Deflagrations: A Detailed Mathematical Model Tuned on a Large Set of Experimental Data. *Comb. and Flame* 80, S. 49-64, 1990
- [13] Canu, P.
Rota, R.
Carra, S.
Morbidelli, M. Vented Gas Deflagration Modeling: A Simplified Approach. *Comb. and Flame* 85, S. 319-330, 1991
- [14] Cashdollar, K. L.
Hertzberg, M. (ed.) *Industrial Dust Explosions*. Symposium on Industrial Dust Explosions, Pittsburgh, Pennsylvania, 10 - 13 June 1986, ASTM STP958, Philadelphia, 1987
- [15] Cooper, G.
Fairweather, M.
Tite, J. P. On the Mechanisms of Pressure Generation in Vented Explosions. *Comb. and Flame* 65, S. 1-14, 1986
- [16] Donat, C. Auswahl und Bemessung von Druckentlastungseinrichtungen für Staubexplosionen. *Staub – Reinhaltung der Luft* 31, 1971
- [17] Eckhoff, R. K.
Alfert, F.
Fuhre, K. Venting of Dust Explosions in a 5,8 m³ Bag Filter under Realistic Conditions of Dust Cloud Generations. in VDI-Kommission Reinhaltung der Luft: *Sichere Handhabung brennbarer Stäube*, Kolloquium, Nürnberg, 1988

- [18] Eckhoff, R. K. *Maize Starch Explosion Experiments in a Vented 500 m³ Storage Bin*. Report CMI No. 823307-1, Bergen, Norwegen, 1983
Fuhre, K.
et. al.
- [19] Eckhoff, R. K. Dust Explosion Experiments in a Vented 500 m³ Silo Cell. *Journal of Occupational Accidents* 6, pp. 229 - 240, 1984
Fuhre, K.
et. al.
- [20] Eckhoff, R. K. Relevance of Using $(dP/dt)_{max}$ Data from Laboratory Scale Tests for Predicting Explosion Rates in Practical Industrial Situations. in VDI-Kommission Reinhaltung der Luft: *Sichere Handhabung brennbarer Stäube*, Kolloquium, Nürnberg, 1983
- [21] Eckhoff, R. K. A Differentiated Approach to Sizing of Dust Explosion Vents: Influence of Ignition Source Location with Particular Reference to Large Slender Silos. in Cashdollar, K. L., Herzberg, M. (ed.), *Industrial Dust Explosions*, ASTM STP958, Philadelphia, pp. 265 - 280, 1987
- [22] Eckhoff, R. K. Sizing Dust Explosion Vents – The Need for a new Approach based on Risk Assessment. *Bulk and Solids Handling* 6, 1986
Fuhre, K.
Alfert, F.
Pederson, G. H.
- [23] Eckhoff, R. K. *Dust Explosions in the Process Industries*. Butterworth-Heinemann, 1991
- [24] Eibl, J. *Bautechnische Maßnahmen zur Schadensminderung bei Staubexplosionen*. Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe, Arbeitsbericht, Ak. IV 1-5-605/90, 1990
- [25] Eibl, J. *Staubexplosionen in einem druckentlasteten Silo aus Stahlbeton*. Abschlußbericht, Karlsruhe, 1983
Block, K.

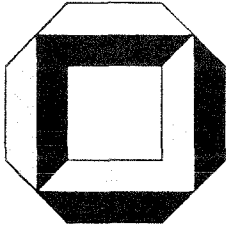
- [26] Eibl, J.
Leuckel, W. *Experimentelle Studien an einer Versuchs-Siloanlage zur Druckentlastung von Staubexplosionen. Kurzbericht zu Teilprojekt C5, SFB 219, Arbeits- und Ergebnisbericht für die Jahre 1987 - 1989, Karlsruhe, 1990*
- [27] Eibl, J.
Leuckel, W. *Experimentelle Studien an einer Versuchs-Siloanlage zur Druckentlastung von Staubexplosionen. Kurzbericht zu Teilprojekt C5, SFB 219, Arbeits- und Ergebnisbericht für die Jahre 1990 - 1992, Karlsruhe, 1993*
- [28] Eibl, J.
Henseleit, O.
Schlüter, F.-H. *Baudynamik. Beton-Kalender 1988, Teil II, S. 665 - 774*
- [29] Ewen, M. *Analyse der Belastung eines Silos infolge von Explosionsbeanspruchung. Diplomarbeit, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1992*
- [30] Field, P. *Dust Explosion Protection – A comparative Study of selected Methods for sizing Explosion Relief Vents. Journal of Hazardous Materials 8, pp. 228 - 238, 1984*
- [31] Gerold, E. *Explosionsversuche in Rechteck- und Rundsilozellen. VDI-Berichte 494, S. 199 - 206, 1984*
- [32] Gruber, U.
Puppich, P.
Noll, E.
Mewes, D. *Zeitlicher Druckverlauf bei Explosionen als Grundlage zur Auslegung von Behältern und Apparaten. Chem.-Ing.-Technik 59, Nr.12, S. 917-926, 1987*
- [33] Harmanny, A. *Einfluß der Massenträgheitskräfte auf die Entlastungsfähigkeit von Explosionsklappen. VDI-Berichte Nr. 975, S. 273-284, 1992*

- [34] Heinrich, H. J. Ergebnisse neuerer Untersuchungen zur Druckentlastung bei Staubexplosionen. *Staub – Reinhaltung der Luft* 31, 1971
- [35] Heinrich, H. J. Bemessung von Druckentlastungsöffnungen zum Schutz explosionsgefährdeter Anlagen in der chemischen Industrie. *Chemie Ingenieur Technik* 38, S. 1125 - 1133, 1966
- [36] Heinrich, H. J. Über die Dimensionierung von Druckentlastungsöffnungen bei Gas- und Staubexplosionen. *Amts- und Mitteilungsblatt der BAM 1*, Nr.5, 1970/71
- [37] Janssen, H. A. Versuche über Getreidedruck in Silozellen. *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, Bd. 39, No. 35, S. 1045 - 1049, 1895
- [38] Matusêk, Z.
Stroch, V. Problematik der Staubexplosionen und Maßnahmen gegen Explosionsgefahren in Großraumbunkern für Schüttgut. *Staub – Reinhaltung der Luft* 40, S. 503 - 510, 1980
- [39] Nagy, J.
Verakis, H. C. *Development and Control of Dust Explosions*. Chap. 6, Marcel Dekker Inc., New York/Basel, 1983
- [40] NFPA Guide for Venting of Deflagrations. *NFPA-Code 68*, National Fire Protection Association, 1988 Edition, 1988
- [41] Radandt, S.
Vogl, A.
Zockoll, C. Explosionsabläufe in Rohrleitungen in Abhängigkeit von Betriebsparametern. *SYMPOSIUM 18*, Fachheftreihe der Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten, 1989
- [42] Radandt, S. Einfluß von Betriebsparametern auf Explosionsabläufe in Silozellen. *VDI-Berichte 701*, Band 2, 1988

- [43] Rust, E. A. Explosion Venting for low Pressure Equipment. *Chem. Eng. 5*, 1979
- [44] Schwab, R. F. Dust Explosions. *Chemical and Process Engineering*, Othmer, D. F. April 1964
- [45] Speaks, W. Zeitbombe Getreidesilo. *Schadenspiegel 20*, S. 13-18, Wartes, J. A. 1977
- [46] VDI Kommission Reinhaltung der Luft. *Entwurf 1/92 zur VDI-Richtlinie 3673*, 1992
- [47] VDI Kommission Reinhaltung der Luft. *VDI-Richtlinie 3673*, 1979

Anhang A:

Richtlinie zur Auslegung von Siloanlagen gegen Staubexplosionen



Massivbau
Baustofftechnologie
Karlsruhe

ARBEITSTITEL

**Richtlinie zur Auslegung von Siloanlagen
gegen Staubexplosionen**

Stand: 27.09.1993

Universität Karlsruhe
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Abteilung Massivbau
Leitung: Prof. Dr.-Ing. J. Eibl
1993

1. Geltungsbereich

Diese Richtlinie gilt für alle Siloanlagen und vergleichbare Anlagen, bei deren Betrieb brenn- und explosionsfähige, nicht toxische Stäube bearbeitet oder gelagert werden oder als Abfall in größerer Menge anfallen.

Diese Richtlinie gilt nicht für Anlagenteile, in denen durch gezielte Maßnahmen Explosionen ausgeschlossen werden.

Für die Nachrüstung bestehender Anlagen kann diese Richtlinie sinngemäß angewendet werden. Dabei ist der tatsächliche Zustand der Anlage zu berücksichtigen und nicht der Planungszustand. Im Zweifelsfall ist eine sachkundige Beratung einzuholen.

2. Zweck

Diese Richtlinie soll die schädlichen Auswirkungen von Staubexplosionen in Siloanlagen durch bauliche Maßnahmen minimieren.

Die Richtlinie ergänzt DIN 1055 Blatt 6 Lasten in Silozellen.

3. Mitgeltende Richtlinien und Bestimmungen

Nachfolgend werden die mitgeltenden Richtlinien und Bestimmungen aufgeführt, die für die Planung und für den Betrieb einer Siloanlage zu beachten sind.

- Explosionsschutzrichtlinie (Ex-R1) 1986
Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften
- UVV Silos und Bunker VGB 112
Unfallverhütungsvorschrift

- DIN 1055 Blatt 6 / 5.87
Lasten in Silozellen
- DIN VDE 0185 / 11.82 Blitzschutzanlagen
Teil 1 / 11.82 Allgemeines für das Errichten
Teil 2 / 11.82 Errichten besonderer Anlagen
- VDE 0165 / 9.83
Errichten elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten
Bereichen (VDE - Bestimmung)
- VDE 0170 / 0171, Teil 1 / 5.78
Vorschriften für schlagwettergeschützte elektrische Be-
triebsmittel
- VDI Richtlinie 2263
Staubbrände und Staubexplosionen
- VDI Richtlinie 3673
Druckentlastung von Staubexplosionen
- ISO 6184/1: Explosion Protection Systems - Part 1
Determination of Explosion Indices of Combustible Dusts
in Air
- Bundesimmissionsschutzgesetz
- Störfallverordnung vom 20. September 1991
- Vorschlag für eine Richtlinie des Rates zur Angleichung
der Rechtsvorschriften der Mitgliederstaaten für Geräte
und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwen-
dung in explosionsgefährdeten Bereichen

4. Explosionsfähige Stäube und ihre Kennwerte

Die Stäube vieler Schüttgüter, die üblicherweise in Siloanlagen gelagert werden, sind explosionsfähig.

Explosionen treten auf, wenn vorhandene organische oder anorganische Stäube mit hinreichend kleiner Partikelgröße exotherm mit Sauerstoff reagieren und damit eine rasch fortschreitende Reaktion ermöglichen.

Die charakteristischen Werte für das Explosionsverhalten eines Staubes sind

- der Staubkennwert K_{St} ; das ist die maximale Druckerhöhungsgeschwindigkeit dp/dt , und
- der maximale Explosionsüberdruck p_{max} .

Beide Werte sind nach genormten Verfahren bestimmt (vergleiche VDI Richtlinie 2263 oder ISO 6184/1).

Die wichtigsten explosionsfähigen Staubarten und die zugehörigen Bemessungswerte K_{St} und p_{max} sind in Tabelle 1 angegeben.

Kleinere Werte für K_{St} und p_{max} sind anwendbar, wenn sie für besondere betriebliche Bedingungen nachgewiesen werden, z.B. für höhere Feuchtigkeit oder günstigere Korngrößenverteilung im Staub. Höhere Werte können bei Gemischen aus Staub und Gasen – sogenannten hybriden Gemischen – auftreten.

5. Zündquellen

Für die Zündung dieser Stäube reichen im allgemeinen kleine Energiemengen aus. Insbesondere kommen in Silozellen und Nebenräumen wie z.B. Silokellern, Verbindungsgängen und Treppenhäusern folgende Zündquellen in Betracht:

- heiße Oberflächen, die z.B. durch Reibung schadhafter Anlagenteile entstehen, oder Funken z.B. durch Fremdkörper in Fördereinrichtungen,
- Funken beim Schweißen, Schleifen und Schneiden während Reparaturarbeiten,
- Glimmnester, die auch von außen mit dem Schüttgut in die Silozelle eingetragen werden können,
- ungeeignete oder schadhafte elektrische Betriebsmittel (z.B. Glühlampen),
- Hitzeentwicklung von Trocknern.

6. Schutzmaßnahmen

Die Verminderung der Schäden infolge einer Staubexplosion wird durch die räumliche Begrenzung der Explosion und durch eine Verringerung des Explosionsüberdruckes erreicht.

Hierzu müssen **Explosionsabschnitte** ausgebildet werden, die entweder

- druckstoßfest ohne Druckentlastung für den maximalen Explosionsüberdruck p_{\max} nach Tabelle 1 oder
- mit Druckentlastung über planmäßige Entlastungsöffnungen für einen reduzierten maximalen Explosionsüberdruck p_{red}

bemessen werden.

Tabelle 1 *Explosionsfähige Stäube - Bemessungswerte¹*

	K_{St} [bar*m/s]	p_{max} [bar]
Braunkohle	180	10.0
Cellulose	270	10.0
Erbsenmehl	140	8.0
Gummi	140	9.0
Getreide	130	9.0
Holz, Holzmehl	220	10.0
Kaffee	90	9.0
Mais, Maisschrot	120	9.0
Maisstärke	210	10.0
Roggen-, Weizenmehl	100	9.0
Milchpulver	160	9.0
Mischfutter	40	8.0
Papier	60	9.0
Pigmente	290	10.0
Sojamehl	120	9.0
Steinkohle	130	9.0
Waschmittel	270	9.0
Zucker	150	9.0

¹) Weitere Informationen: Sicherheitstechnische Informations- und Arbeitsblätter 140260 - 140279 des BIA-Handbuches, Verlag Erich Schmidt, Bielefeld

Der durch eine **Entlastungsöffnung** austretende Feuerstrahl darf weder zu einer Beeinträchtigung der Umgebung führen noch die Explosion in einen anderen Explosionsabschnitt weiterleiten. Auch sollen Menschen durch Splitter von Scheiben oder anderen Bauteilen möglichst wenig gefährdet werden. Druckentlastungsöffnungen sollen deshalb direkt ins Freie führen, bei Silozellen vor allem über Dachflächen und bei anderen Räumen, wie z.B. Silokellern, Verbindungsgängen und Treppenhäusern, über hochliegende Fensterflächen.

Das Entlastungssystem soll einen möglichst geringen Ansprechdruck und eine

niedrige Massenträgheit haben. Dabei ist zu berücksichtigen, daß bei frühem Ansprechen eines Entlastungssystems eine wesentlich größere Menge des brennbaren Staub-Luft-Gemisches weitergeleitet wird als bei trägeren Systemen.

Als **Abschlußelemente** bieten sich u.a. folgende Bauelemente an:

- Stahl- und Spannbetonplatten mit geringem Gewicht,
- Bims- oder Gasbetonplatten,
- Stahlgitterroste, gegebenenfalls mit Folie, Holz oder Hartfaserplatten abgedeckt,
- Blechkonstruktionen,
- einfache, leichte Verglasung (Sicherheitsglas),
- Pappe mit entsprechender Isolierung.

7. Ermittlung des Bemessungsdruckes p_{red}

Die Größe des Bemessungsdruckes p_{red} - reduzierter maximaler Explosionsüberdruck - ist u.a. abhängig von der Staubart, von den Abmessungen des zu entlastenden Raumes, von der Entlastungsfläche, vom Ansprechdruck p_a und der Massenträgheit der Entlastungseinrichtung.

Der Bemessungsdruck kann, sofern kein anderer Nachweis geführt wird, mit Hilfe des Bemessungsverfahrens im Anhang zu dieser Richtlinie ermittelt werden.

8. Bemessung der Bauteile

Die Bemessung der betroffenen Bauteile ist nach den Regeln für Katastrophenlastfälle durchzuführen (nach Eurocode, z.B. EC-2, EC-3 oder CEB-FIP Model

Code 1990).

8.1 Bemessung für den Explosionsüberdruck

Für den **Bemessungsdruck** sind **alle tragenden und raumabschließenden Bauteile** eines Explosionsabschnittes auszulegen.

Im Silo treten die reduzierten maximalen Explosionsüberdrücke bei geleertem Silo auf. Für die Bemessung können auch Teilfüllungszustände mit entsprechend kleineren Explosionsüberdrücken und dazugehöriger Schüttgutbelastung maßgebend sein.

8.2 Bemessung für den Unterdruck

Nach einer Druckentlastung kann sich infolge der Massenträgheitskräfte bei schneller Gasausströmung und nachfolgender Abkühlung der heißen Rauchgase im Explosionsraum ein Unterdruck einstellen, der bei der **Bemessung der umschließenden Bauteile** und der Bauteile, die im Strömungsquerschnitt liegen, zu berücksichtigen ist (siehe auch VDI-Richtlinie 3673).

8.3 Sicherung der Abschlußelemente der Entlastungsöffnungen

Alle Abschlußelemente sind gegen Wegfliegen infolge der Druckwelle zu sichern, z.B. Klappen durch Gelenke, Deckel durch Seile o.ä. Befestigungen.

Die Geschwindigkeiten der bewegten Abschlußelemente zur Ermittlung der Verankerungskräfte können mit dem Berechnungsverfahren im Anhang ermittelt werden.

8.4 Rückstoßkräfte

Bei der Druckentlastung treten Rückstoßkräfte auf, die gegebenenfalls beim **Stand sicherheitsnachweis** berücksichtigt werden müssen, insbesondere bei leichten Konstruktionen mit horizontalen und unsymmetrisch über den Querschnitt verteilten Entlastungsöffnungen.

Die Rückstoßkraft kann nach den Angaben im Anhang ermittelt werden.

9. Fachspezifische Beratung

Eine fachspezifische Beratung kann bei Anlagen, die den Rahmen des Berechnungsverfahrens im Anhang übersteigen, oder für weitergehende Maßnahmen erforderlich werden, insbesondere bei größeren Anlagen in dicht bebauten Gebieten.

————— Ende der Richtlinie —————

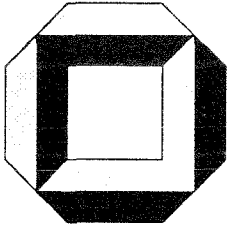
10. Stichworte zum Einführungserlaß

In Siloanlagen ereignen sich alljährlich Staubexplosionen, die fast in jedem Falle zu beträchtlichen Sachschäden, des öfteren auch zu Personenschäden führen. Gefährdet werden davon Personen sowohl innerhalb der betreffenden Anlage als auch außerhalb; dies insbesondere deshalb, weil Siloanlagen mehr und mehr in dichtbebauten Gebieten errichtet werden. Derzeit können Staubexplosionen in baulichen Anlagen, in denen brenn- und explosionsfähige Stäube gelagert werden, noch nicht mit Sicherheit verhindert werden. Mit Rücksicht darauf führen die obersten Bauaufsichtsbehörden der Länder nachfolgende Richtlinie für die Errichtung von Siloanlagen, für deren Nachrüstung sowie als Hinweis zur Vermeidung von Gefahren ein.

Anhang B:

**Richtlinie zur Auslegung von Siloanlagen
gegen Staubexplosionen**

- Anhang -



Massivbau
Baustofftechnologie
Karlsruhe

ARBEITSTITEL

**Richtlinie zur Auslegung von Siloanlagen
gegen Staubexplosionen**

- Anhang -

- Bemessungsverfahren -

Stand: 27.09.1993

Universität Karlsruhe
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Abteilung Massivbau
Leitung: Prof. Dr.-Ing. J. Eibl
1993

1. Geltungsbereich

Das Bemessungsverfahren für Druckentlastungssysteme bei Staubexplosionen in Siloanlagen gilt:

1. für trägheitsfreie Entlastung; hierfür wurde das Verfahren für homogene Staubverteilung des Entwurfes der VDI-Richtlinie 3673 vom Jan. 1992 modifiziert und bis $H/D = 12$ erweitert,
2. für trägheitsbehaftete Deckel; sie heben senkrecht zu ihrer Fläche ab und müssen in einer bestimmten Höhe abgefangen werden,
3. für trägheitsbehaftete Klappenkonstruktionen; sie müssen nach einem bestimmten Rotationswinkel abgefangen werden.

Das Bemessungsverfahren gilt unter folgenden Bedingungen:

- $p_{\max} \leq 10$ bar
- statischer Ansprechdruck der Entlastungssysteme $p_a \leq$ äquivalent 0,1 bar (bzw. 10 kN/m^2) aus Massenkräften und Festhaltekräften, wie z.B. Reibung, Federkräfte. Die Festhaltekräfte dürfen nach dem Ansprechen des Entlastungssystems nicht mehr wirken.
- Die Bemessungshilfen gelten nur für Deflagrationen und nicht für Detonationen (Bei Staubexplosionen in Siloanlagen treten im allgemeinen keine Detonationen auf).
- Im zu entlastenden Raum herrscht kein wesentlicher Überdruck.
- H/D - Verhältnis ≤ 12

Für andere Bedingungen ist eine geeignete fachspezifische Beratung notwendig.

2. Formeln und Zeichen

Für die in den folgenden Abschnitten verwendeten Bezeichnungen gelten folgende Beziehungen und Einheiten:

$$K_p = \frac{V^{0.767} \cdot K_{St}}{A} \quad (1)$$

$$K_m = \frac{\sqrt{m_p} \cdot K_{St}^{\frac{5}{4}}}{n^{\frac{1}{4}} \cdot V^{0.041}} \quad (2)$$

$$K_v = \frac{v \cdot A_E^v \cdot m_p}{V \cdot \sqrt{p_{red}}} \quad (3)$$

$$K_\omega = \frac{\omega \cdot (A_E^v)^{\frac{3}{2}} \cdot m_p}{V \cdot \sqrt{p_{red}} \cdot n^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

$$m_p = \rho \cdot t \quad (5)$$

$$A_E^T = f \cdot A_E \quad (6)$$

$$F_R = 15 \cdot A_E^i \cdot p_{red} \quad (7)$$

Zeichen	Einheit	Bedeutung
H	m	Höhe der zu entlastenden Silozelle bzw. größte Abmessung des zu entlastenden Raumes
D	m	Durchmesser bei zylindrischen Zellen bzw. fiktiver Durchmesser D^* eines flächengleichen Kreises
h	m	Flughöhe des Deckels
d	m	Durchmesser des Deckels bzw. fiktiver Durchmesser d^* eines flächengleichen Kreises

Zeichen	Einheit	Bedeutung
D^*	m	$\sqrt{4 \cdot A / \pi}$, wobei A die Fläche der Silozelle bzw. die Fläche aus den beiden kleineren Abmessungen eines Raumes ist ($A = L_2 \cdot L_3$, $L_1 \geq L_2 \geq L_3$)
K_{St}	$bar \cdot \frac{m}{s}$	Staubkennwert
p_{red}	bar	Bemessungsdruck (reduzierter maximaler Explosionsüberdruck)
V	m^3	Volumen der Silozelle bzw. des Raumes
A	m^2	ist gleich A_E bei Verwendung von Abb. 1 und gleich A_E^V sonst
A_E	m^2	erforderliche Gesamtfläche der Entlastungsöffnungen ohne Berücksichtigung der Massenträgheit
A_E^T	m^2	erforderliche Gesamtfläche der Entlastungsöffnungen mit Berücksichtigung der Massenträgheit
A_E^V	m^2	Gesamtfläche der vorhandenen Entlastungsöffnungen
A_E^i	m^2	Fläche der einzelnen Entlastungsöffnung
m_p	kg/m^2	flächenbezogene Masse der Abschlußelemente
ρ	kg/m^3	mittlere Dichte des Abschlußelementes
t	m	mittlere Dicke des Abschlußelementes
n	-	Anzahl der Entlastungsöffnungen (der lichte Abstand der Entlastungsöffnungen muß mindestens $d/2$ betragen, damit sie als getrennte Entlastungsöffnungen betrachtet werden können)
f	-	Flächenerhöhungsfaktor
v	m/s	Geschwindigkeit der Abschlußelemente
ω	rad/s	Winkelgeschwindigkeit der Klappen
F_R	MN	vereinfachter Ansatz für die kurzzeitig wirkende Rückstoßkraft. Sie ist in der Mitte der einzelnen Entlastungsöffnung anzusetzen. Dabei ist die Wirkungsrichtung der Rückstoßkraft zu berücksichtigen (Bei gegenüberliegenden Öffnungen können diese sich zum Teil gegenseitig aufheben).

3. Anwendung des Bemessungsverfahrens

Mit den Formeln aus Abschnitt 2 und den Diagrammen in Abschnitt 4 können bei der Bemessung von Siloanlagen und Räumen für Explosionsbelastung folgende Werte ermittelt werden.

- Größe der Entlastungsfläche bei bekanntem Bemessungsdruck p_{red} und Staubkennwert K_{St} (vgl. Abschnitt 3.1).
- Größe des Bemessungsdruckes p_{red} bei bekannter Entlastungsfläche A_E^V und bekanntem Staubkennwert K_{St} (vgl. Abschnitt 3.2).
- Zulässige Staubkennwerte - K_{St}^{max} - je nach aufnehmbarem Bemessungsdruck p_{red} und vorhandener Entlastungsfläche A_E^V (vgl. Abschnitt 3.3).
- Geschwindigkeit v bzw. Rotationsgeschwindigkeit ω der Abschlußelemente als Grundlage der Bemessung von Rückhaltekonstruktionen (vgl. Abschnitt 3.4).

Beispiele zur Anwendung der Diagramme sowie zur Bemessung und Auslegung von Silos und ihrer Entlastungskonstruktionen sind im Beiblatt zur Richtlinie enthalten.

3.1 Größe der Entlastungsfläche bei bekanntem Bemessungsdruck p_{red} und Staubkennwert K_{St}

Mit dem H/D - Verhältnis der Silozelle bzw. des zu entlastenden Raumes sowie dem angestrebten Bemessungsdruck p_{red} erhält man aus dem Diagramm für trägheitsfreie Entlastung (Abb. 1) den Hilfwert K_p . Nach Gleichung (1) kann damit die notwendige Entlastungsfläche A_E für trägheitsfreie Entlastung ermittelt

werden.

Für trägheitsbehaftete Entlastungskonstruktionen kann mit Gleichung (5) die flächenbezogene Masse m_p der Abschlußelemente und mit Gleichung (2) der Hilfwert K_m errechnet werden. Aus den Diagrammen für trägheitsbehaftete Entlastung (s. Abschnitt 4) erhält man mit K_m und p_{red} den Flächenerhöhungsfaktor f und anschließend mit Gleichung (6) die Entlastungsfläche A_E^T für trägheitsbehaftete Entlastungssysteme.

3.2 Bemessungsdruck p_{red} bei bekannter Entlastungsfläche A_E^V und bekanntem Staubkennwert K_{St}

Mit dem H/D - Verhältnis und dem Hilfwert K_p kann für trägheitsfreie Entlastung der Bemessungsdruck p_{red} direkt aus dem Diagramm in Abb. 1 entnommen werden.

Für trägheitsbehaftete Entlastung hingegen kann p_{red} nur iterativ nach dem Iterationsschema in Bild 1 gefunden werden.

3.3 Zulässiger Staubkennwert K_{St}^{max} bei vorhandenem Silo (p_{red} und A_E^V bekannt)

Mit dem H/D - Verhältnis und dem Bemessungsdruck p_{red} kann für trägheitsfreie Entlastung der Hilfwert K_p direkt aus der Abb. 1 entnommen werden und damit der maximale K_{St} -Wert aus Gleichung (1) bestimmt werden.

Für trägheitsbehaftete Entlastung ist eine Ermittlung von K_{St}^{max} wiederum nur iterativ nach dem Iterationsschema in Bild 2 möglich.

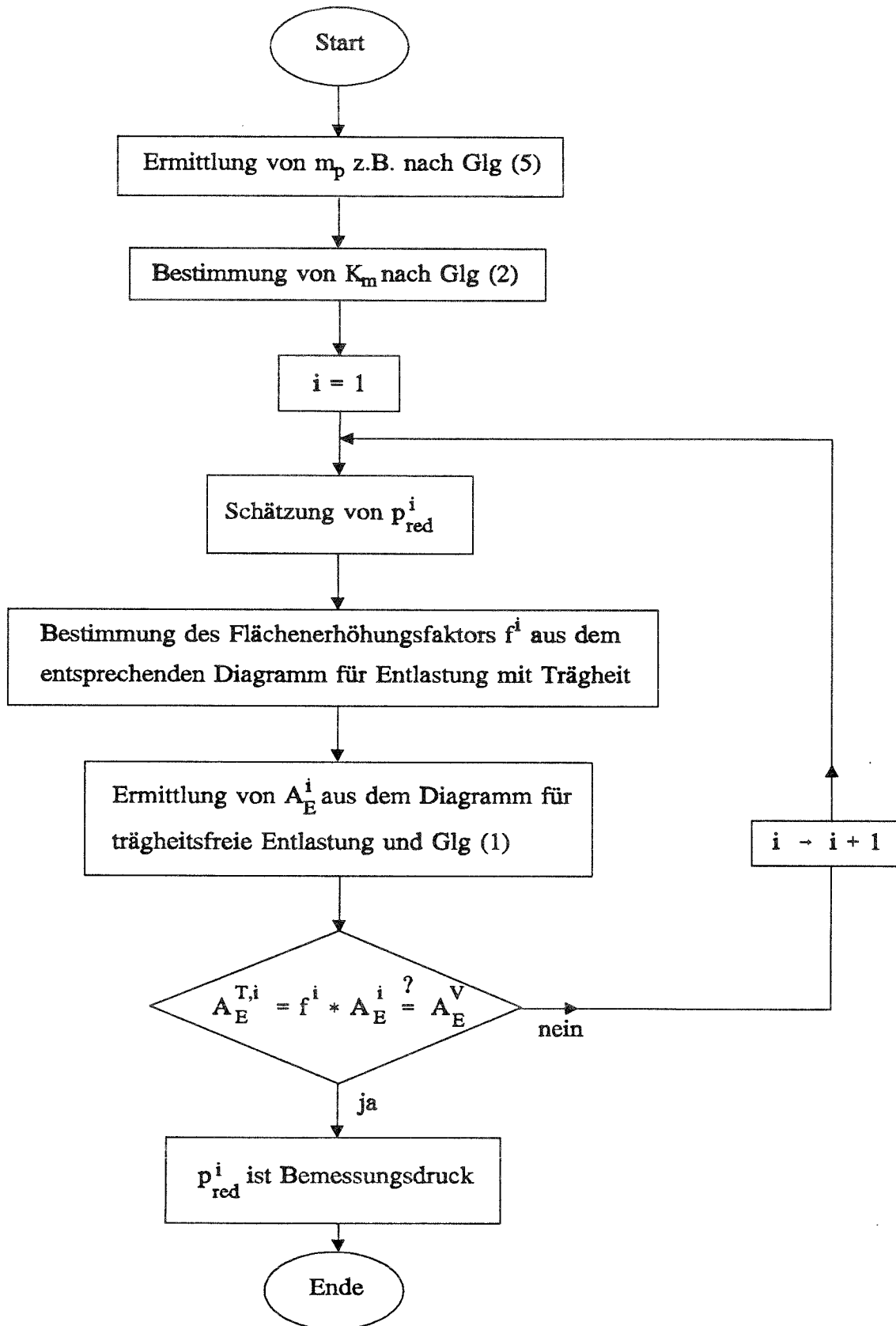


Bild 1 Ermittlung von p_{red} für trägheitsbehaftete Entlastung (Abschn. 3.2)

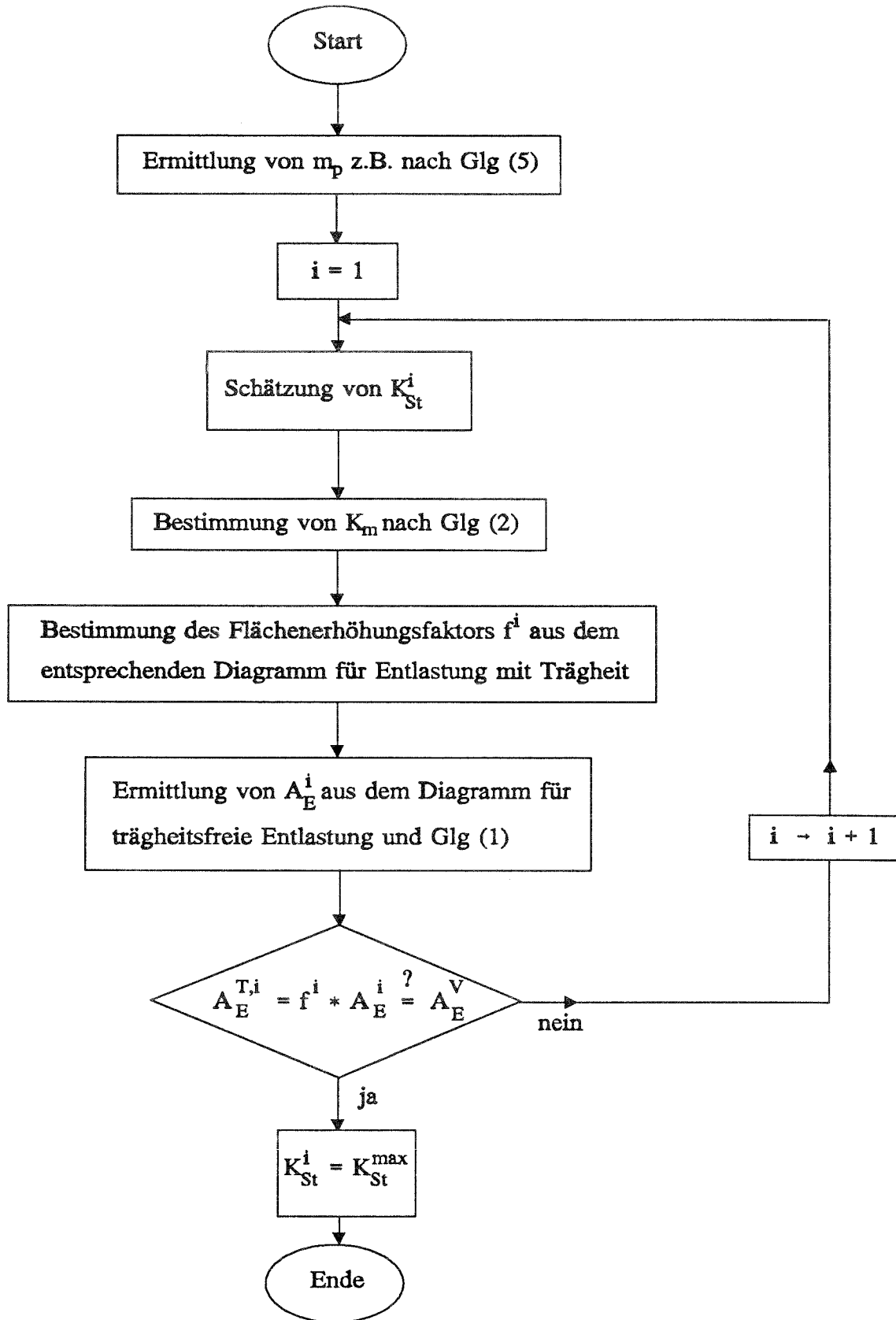


Bild 2 *Ermittlung von K_{St}^{max} für trägheitsbehaftete Entlastung (Abschn. 3.3)*

3.4 Geschwindigkeit v oder Rotationsgeschwindigkeit ω der Abschlußelemente zur Bemessung der Rückhaltekonstruktionen

Die Ermittlung der Geschwindigkeit v von abhebenden Deckeln der Entlastungssysteme erfolgt für $h/d = 0,25$ und $h/d = 0,50$ mit den entsprechenden Diagrammen in Abschnitt 4.2 in Abhängigkeit vom H/D - Verhältnis.

Bei $h/d = 0,25$ entspricht die geöffnete Fläche - Mantelfläche - gerade der Querschnittsfläche der Entlastungsöffnung für die die Bemessung für trägheitsfreie Entlastung durchgeführt wurde.

Mit den Hilfswerten K_p , vgl. Gl. (1), und K_m , vgl. Gl. (2), erhält man aus dem entsprechenden Diagramm des Abschnittes 4.2 den Hilfswert K_v , aus dem sich dann die Geschwindigkeit v des Deckels ergibt.

Die Winkelgeschwindigkeit ω bei Klappen ergibt sich in Abhängigkeit vom H/D -Verhältnis mit den entsprechenden Diagrammen in Abschnitt 4.3.

Mit den Hilfswerten K_p , vgl. Gl. (1), und K_m , vgl. Gl. (2), erhält man aus dem entsprechenden Diagramm des Abschnittes 4.3 den Hilfswert K_ω , aus dem sich dann die Winkelgeschwindigkeit ω der Klappe ergibt.

Mit v bzw. ω und m_p können die auf die Abfangkonstruktion und auf die Anschlüsse wirkenden Kräfte bestimmt und diese dann bemessen werden.

4. Bemessungsdiagramme

4.1 Trägheitsfreie Entlastung

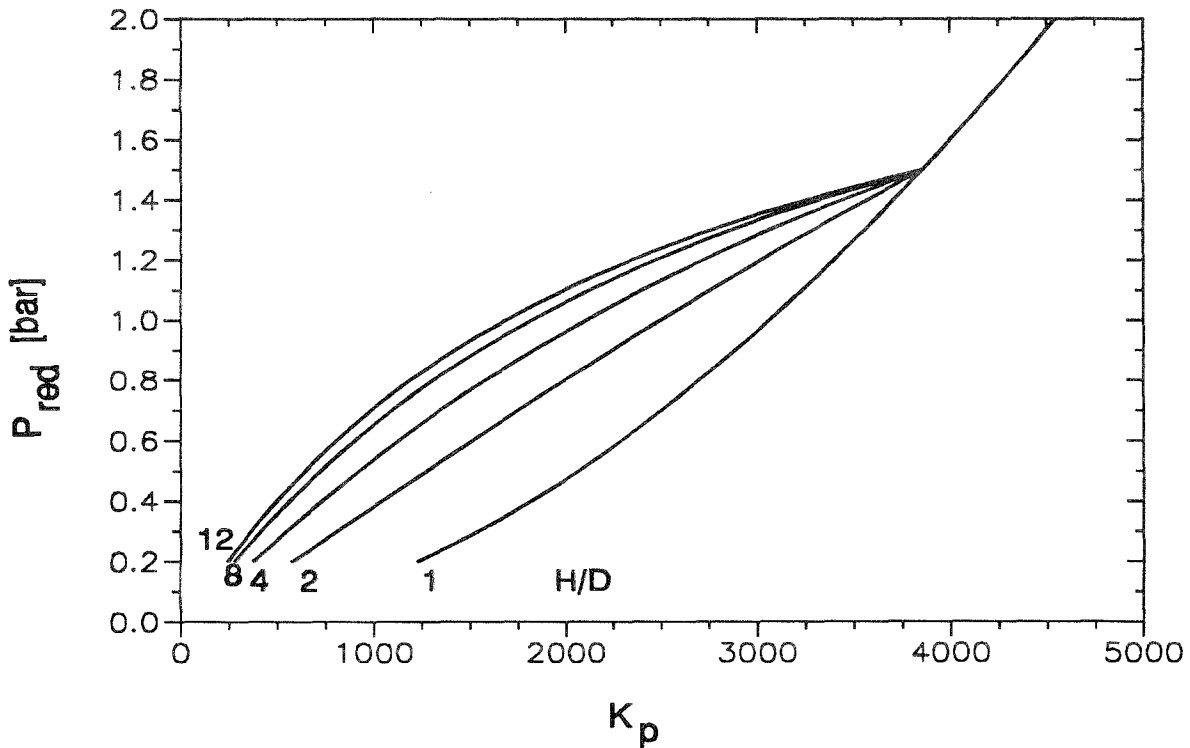


Abb. 1 Bestimmung der Entlastungsfläche für trägheitsfreie Entlastung

Alternativ zu Abb. 1 kann auch die nachstehend aufgeführte Gleichung (8) verwendet werden, die aus der VDI-Richtlinie 3673 für homogene Staubverteilung entnommen und entsprechend modifiziert wurde.

$$A_E = 3,264 \cdot 10^{-4} \cdot K_{St} \cdot V^{0,767} \cdot p_{red}^{-0,569} \cdot K_{H/D}$$

$$K_{H/D} = 1 + \log_{10} \left(\frac{H}{D} \right) \cdot [0,758 - 4,305 \cdot \log_{10}(p_{red})] \quad ; 0,2 \text{ bar} \leq p_{red} \leq 1,5 \text{ bar} \quad (8)$$

$$K_{H/D} = 1 \quad ; 1,5 \text{ bar} < p_{red} \leq 2,0 \text{ bar}$$

Der Hilfswert K_p kann dann nach Gleichung (1) errechnet werden.

4.2 Deckelkonstruktionen

4.2.1 $H/D = 2$

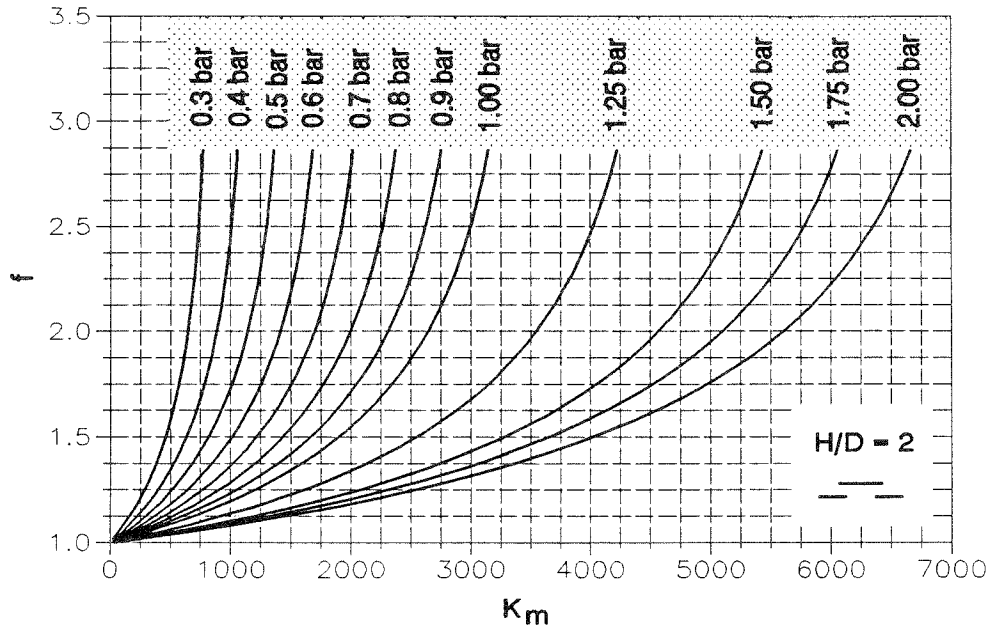


Abb. 2 Flächenerhöhungsfaktor f für $H/D = 2$

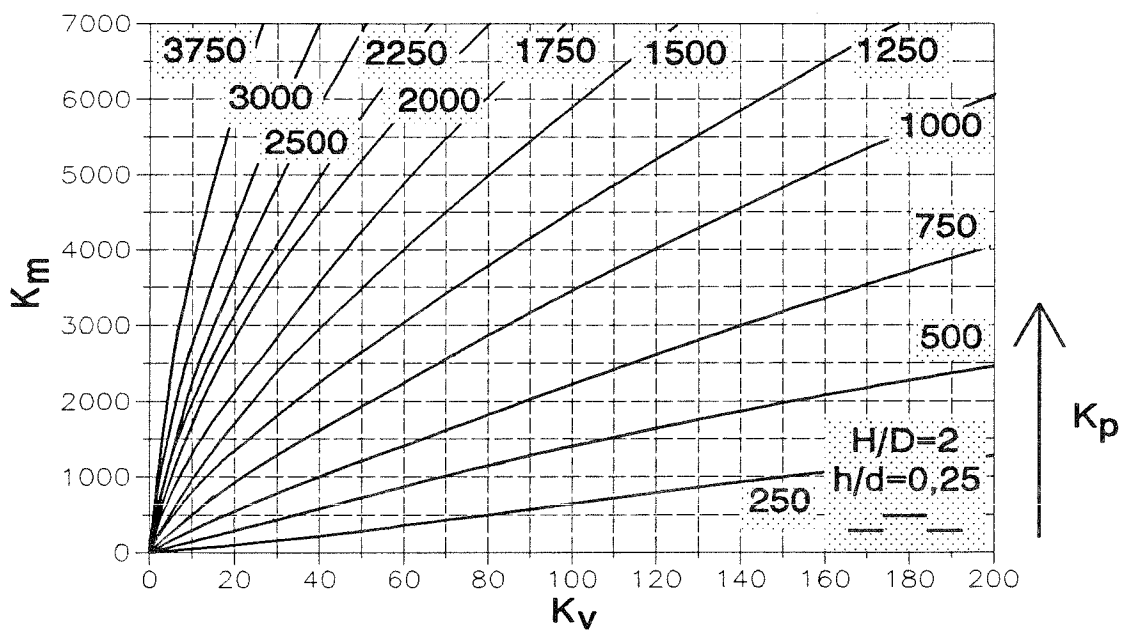


Abb. 3 Deckelgeschwindigkeit v für $H/D = 2$ und $h/d = 0,25$

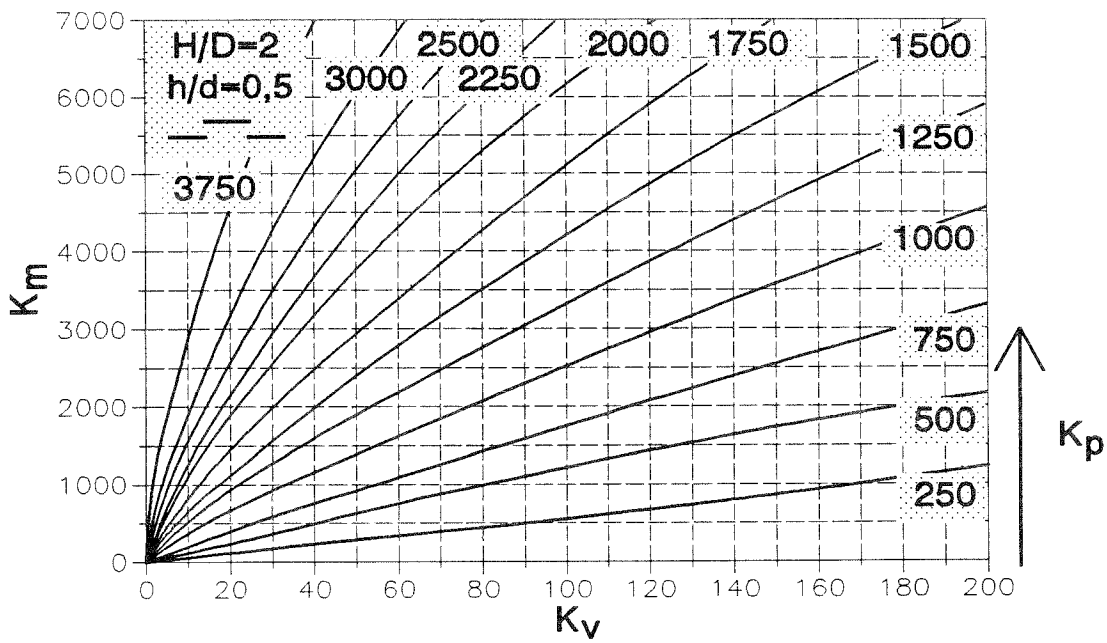


Abb. 4 Deckelgeschwindigkeit v für $H/D = 2$ und $h/d = 0,50$

4.2.2 $H/D = 4$

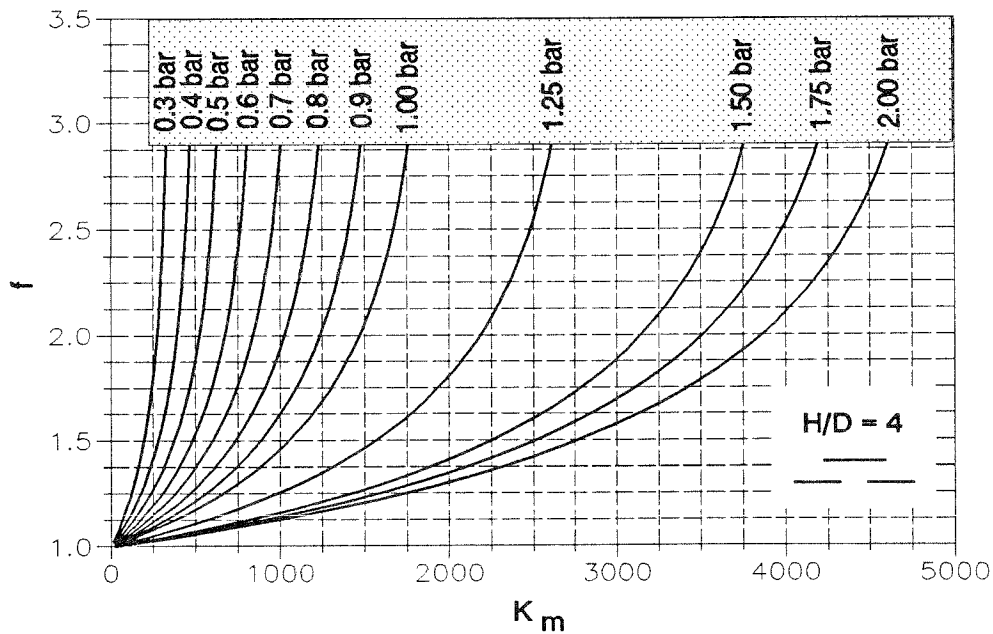


Abb. 5 Flächenerhöhungsfaktor f für $H/D = 4$

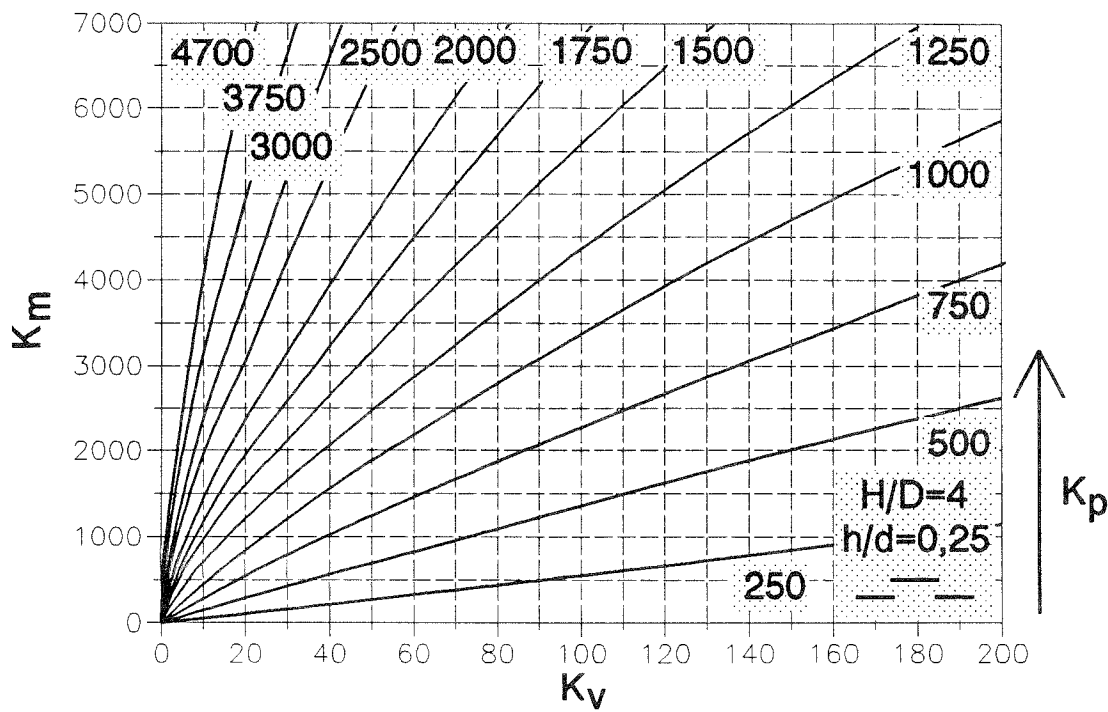


Abb. 6 Deckelgeschwindigkeit v für $H/D = 4$ und $h/d = 0,25$

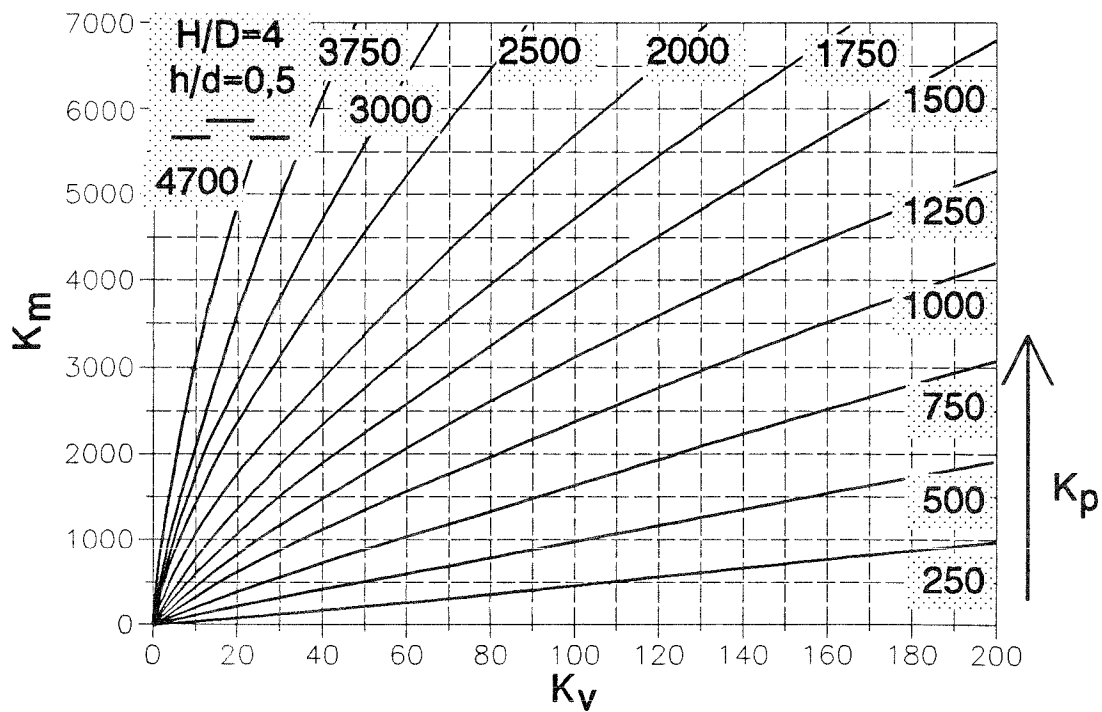


Abb. 7 Deckelgeschwindigkeit v für $H/D = 4$ und $h/d = 0,50$

4.2.3 $H/D = 8$

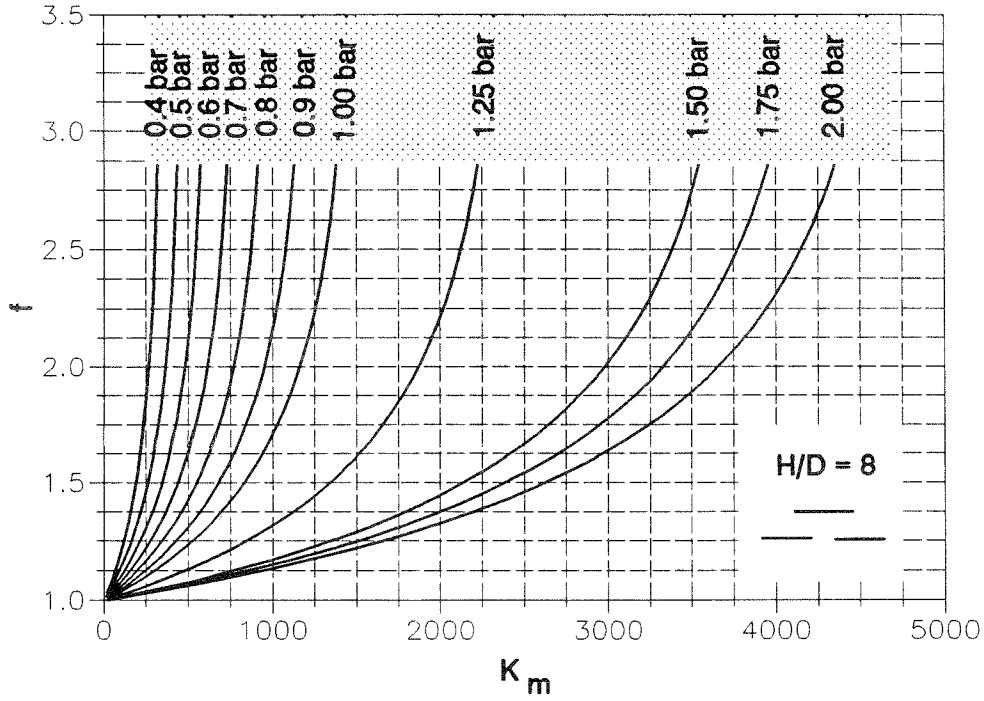


Abb. 8 Flächenerhöhungsfaktor f für $H/D = 8$

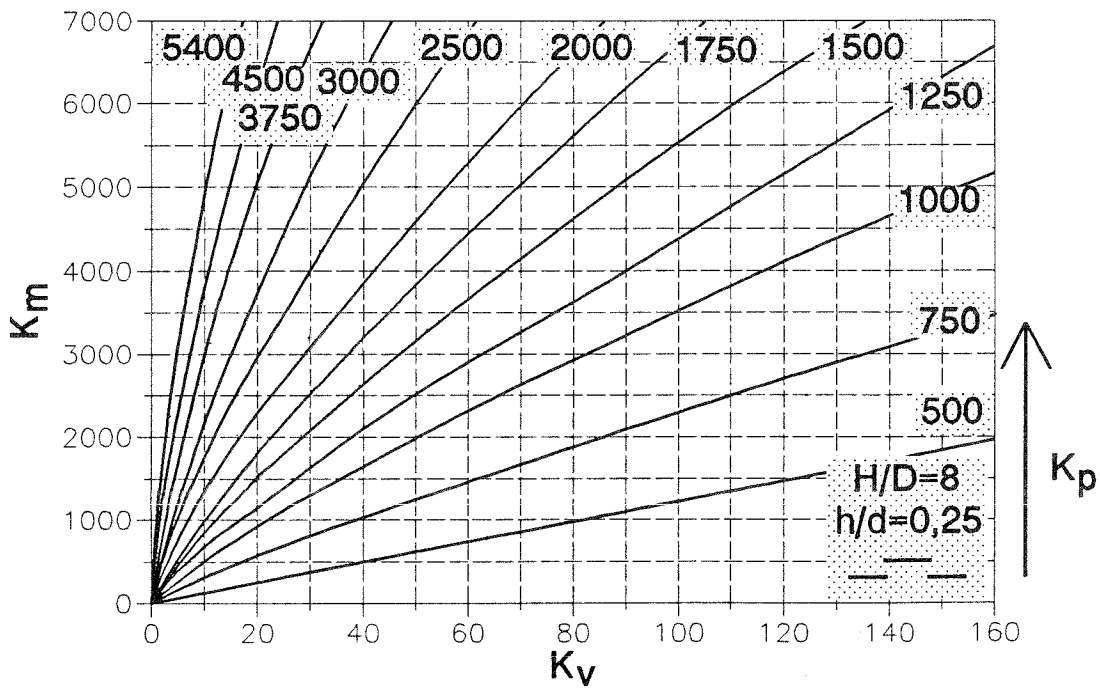


Abb. 9 Deckelgeschwindigkeit v für $H/D = 8$ und $h/d = 0,25$

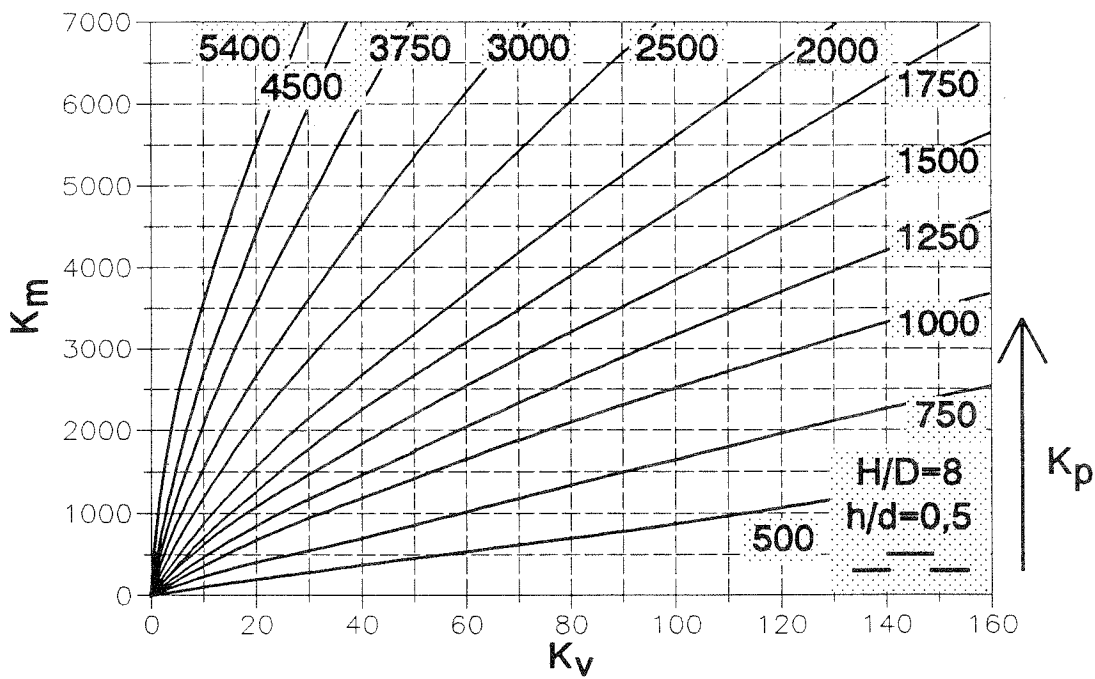


Abb. 10 Deckelgeschwindigkeit v für $H/D = 8$ und $h/d = 0,50$

4.2.4 $H/D = 12$

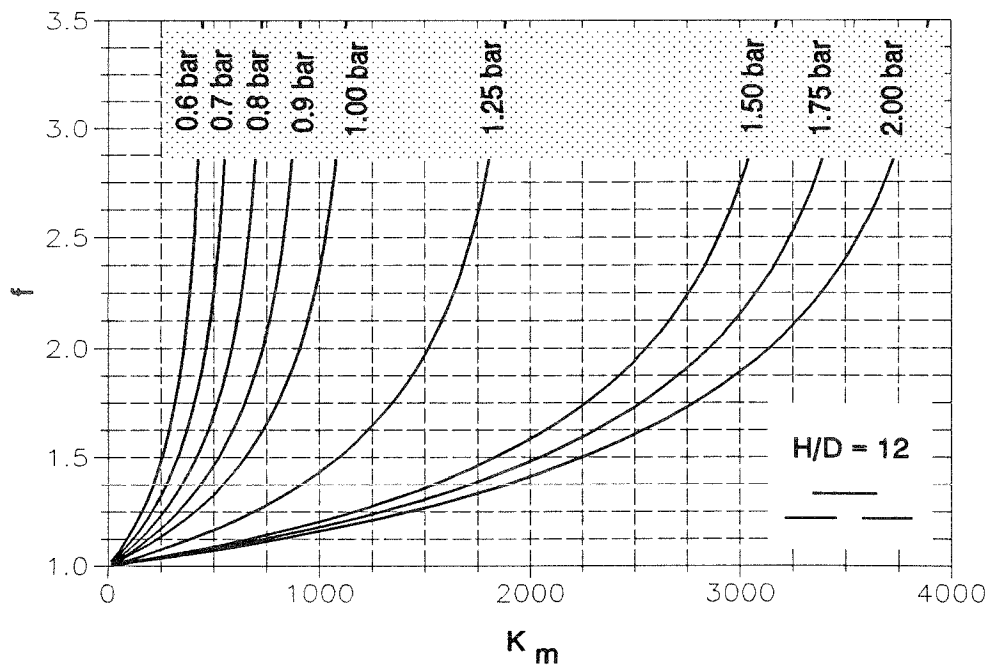


Abb. 11 Flächenerhöhungsfaktor f für $H/D = 12$

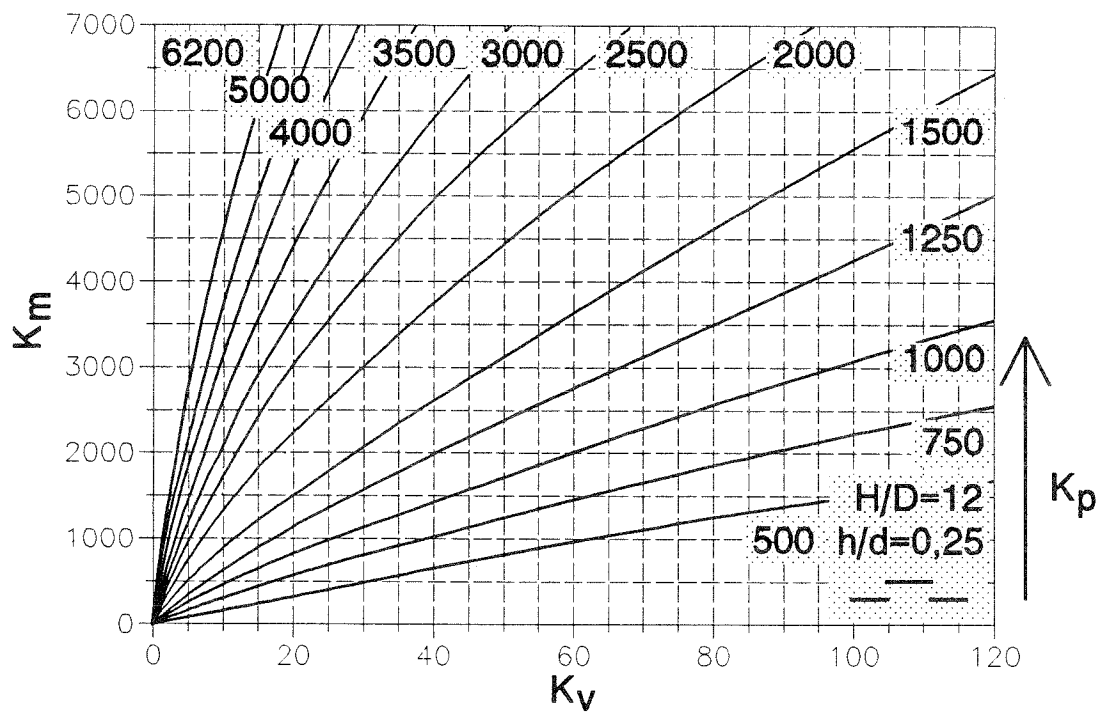


Abb. 12 Deckelgeschwindigkeit v für $H/D = 12$ und $h/d = 0,25$

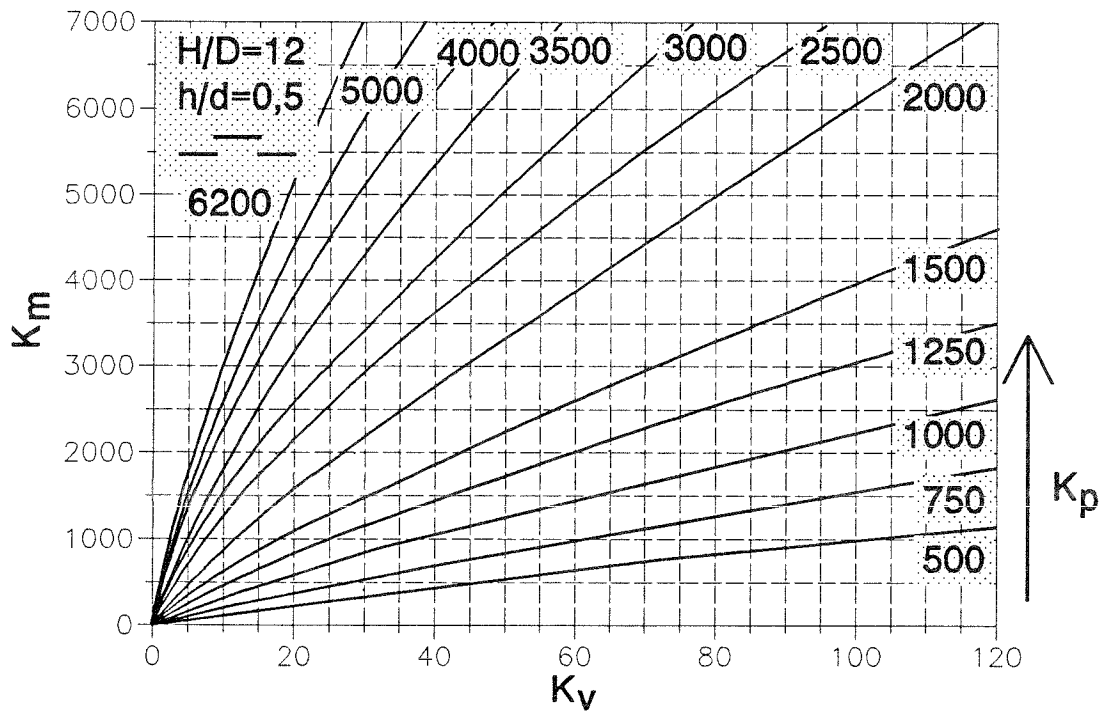


Abb. 13 Deckelgeschwindigkeit v für $H/D = 12$ und $h/d = 0,50$

4.3 Klappenkonstruktionen

4.3.1 $H/D = 2$

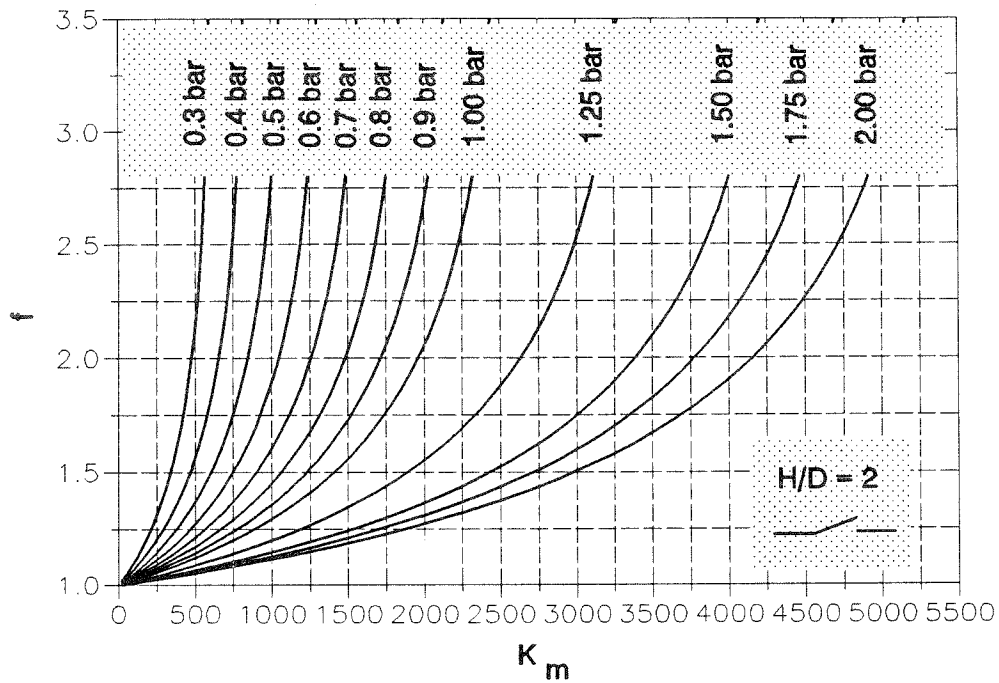


Abb. 14 Flächenerhöhungsfaktor f für $H/D = 2$

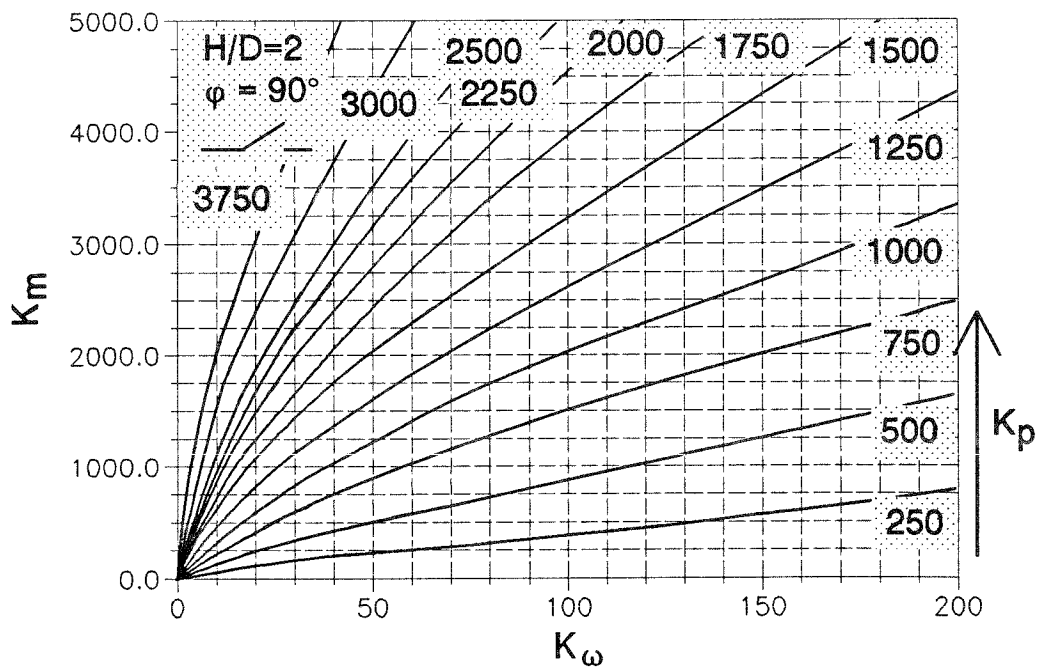


Abb. 15 Winkelgeschwindigkeit ω für $H/D = 2$ und $\phi = 90^\circ$

4.3.2 $H/D = 4$

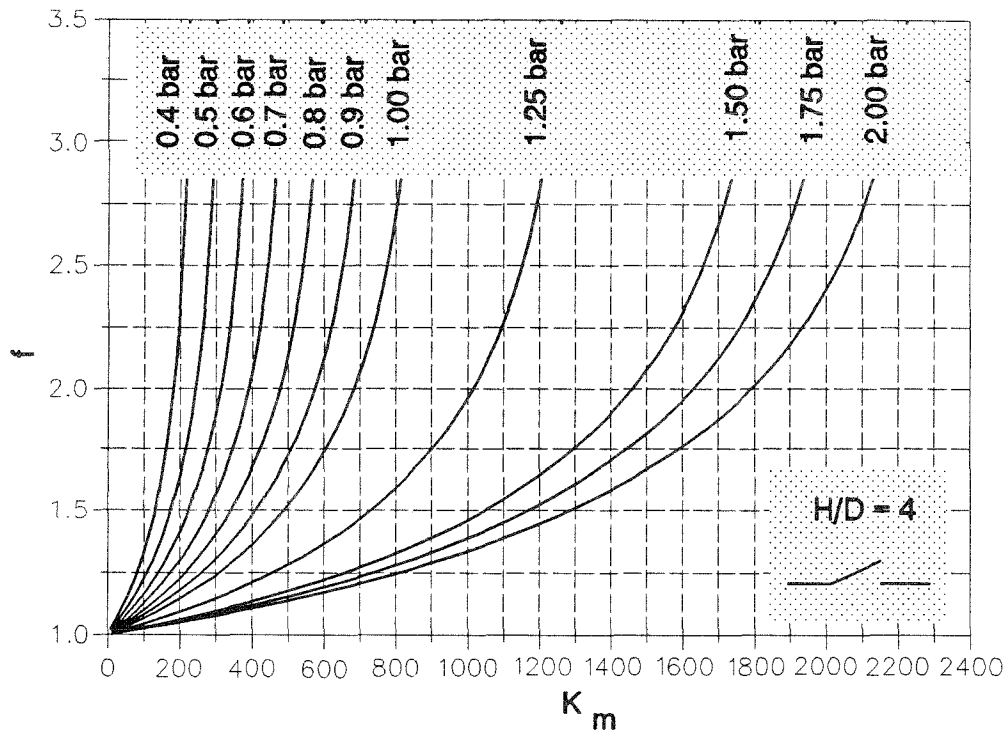


Abb. 16 Flächenerhöhungsfaktor f für $H/D = 4$

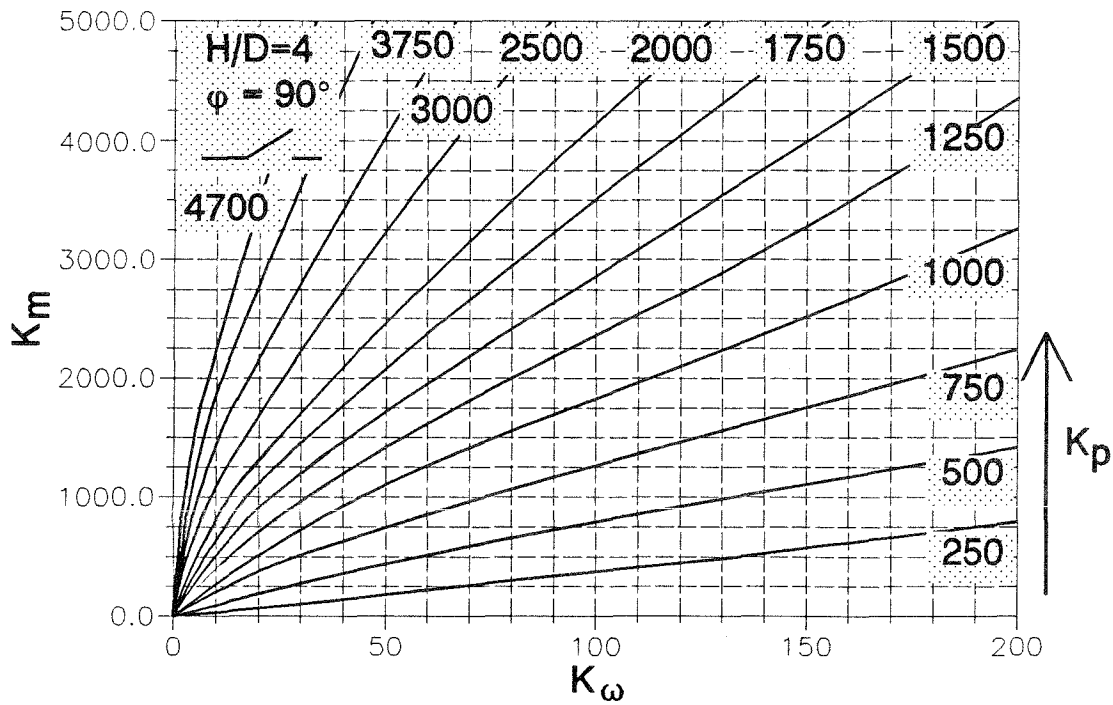


Abb. 17 Winkelgeschwindigkeit ω für $H/D = 4$ und $\phi = 90^\circ$

4.3.3 $H/D = 8$

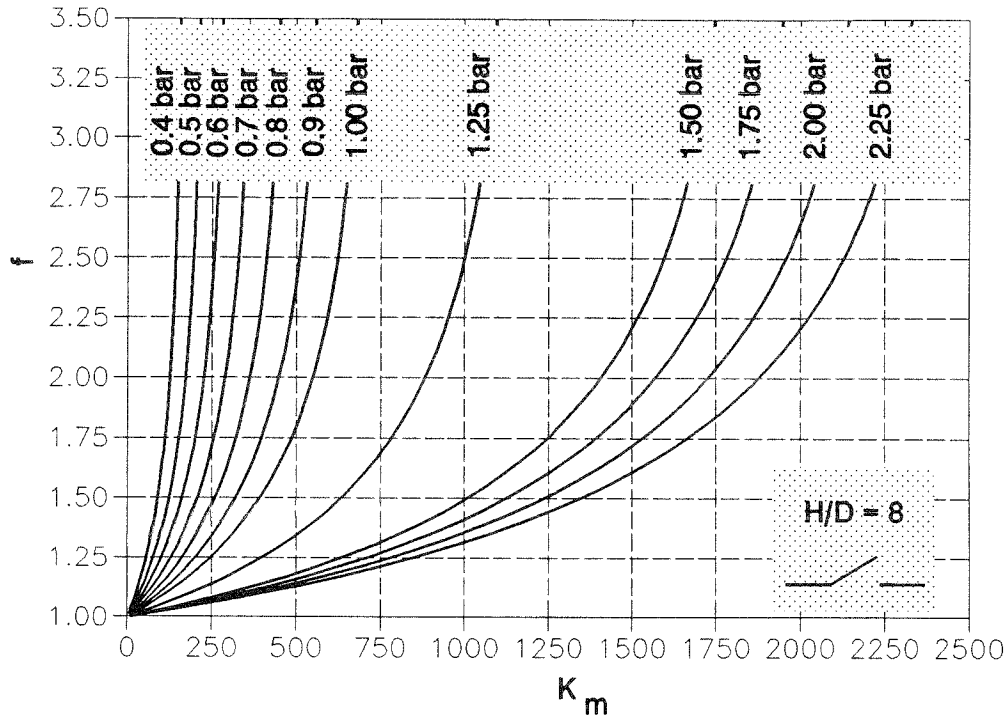


Abb. 18 Flächenerhöhungsfaktor f für $H/D = 8$

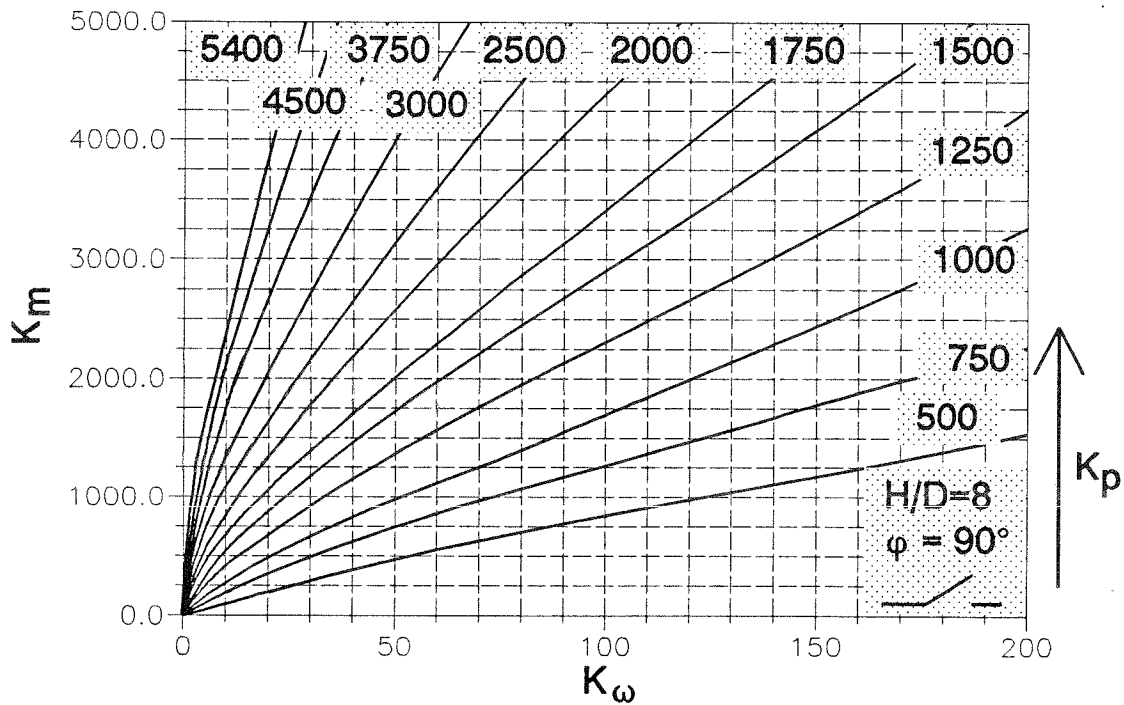


Abb. 19 Winkelgeschwindigkeit ω für $H/D = 8$ und $\phi = 90^\circ$

4.3.4 $H/D = 12$

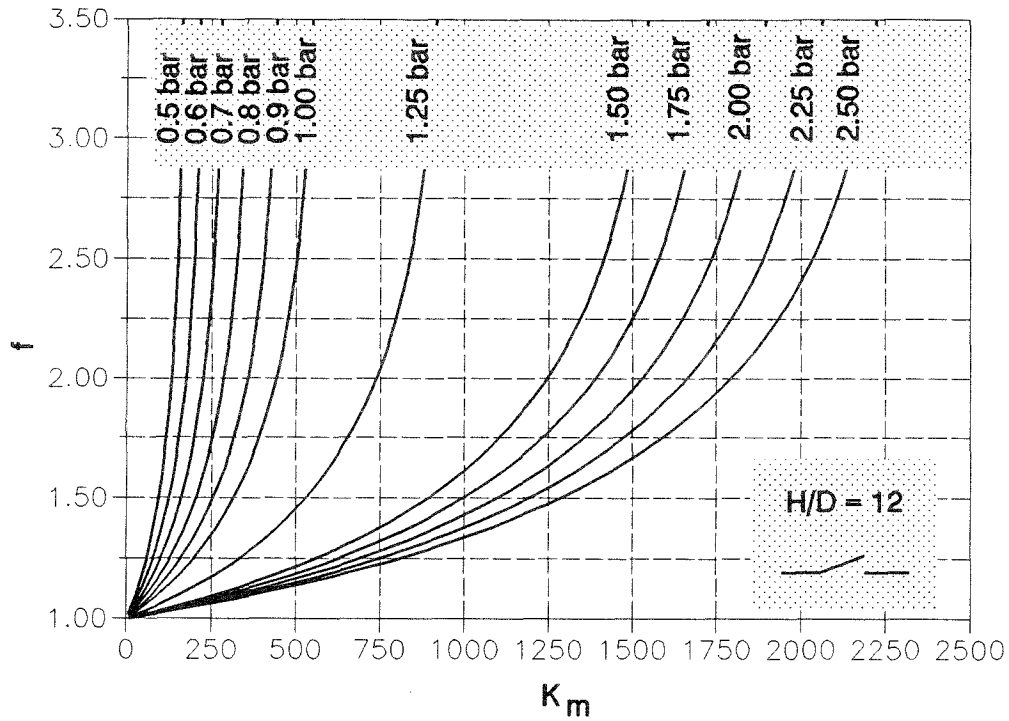


Abb. 20 Flächenerhöhungsfaktor f für $H/D = 12$

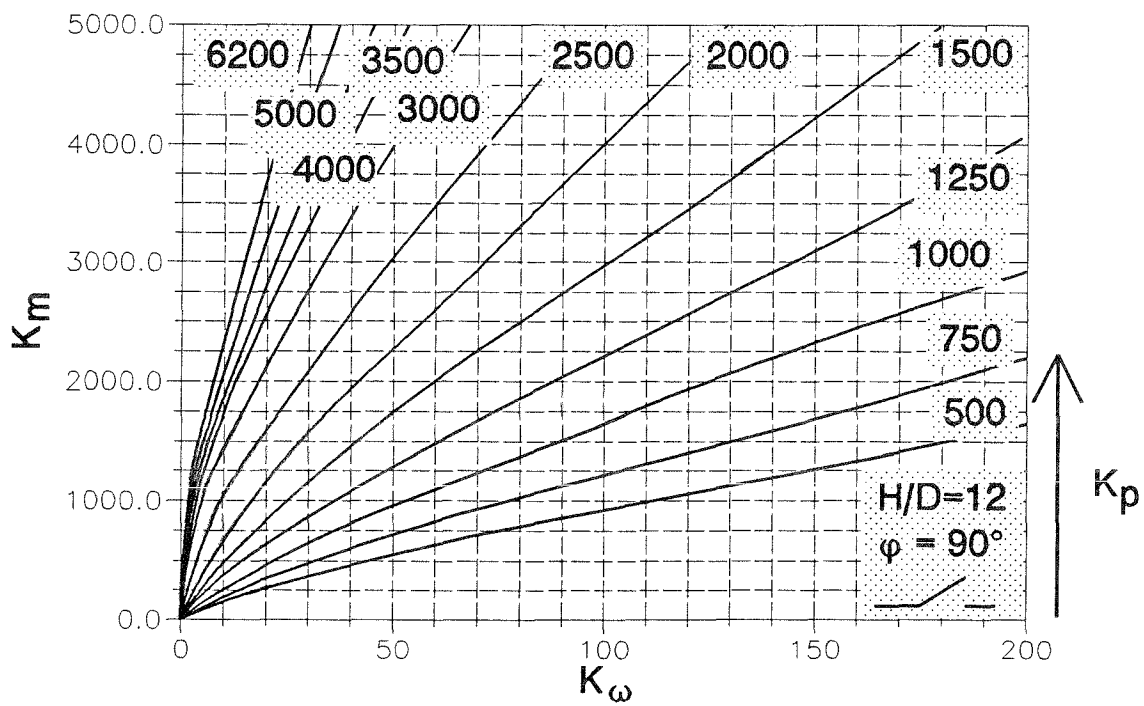
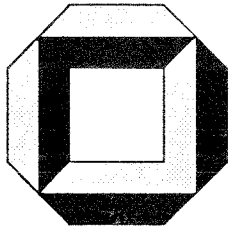


Abb. 21 Winkelgeschwindigkeit ω für $H/D = 12$ und $\phi = 90^\circ$

Anhang C:

Richtlinie zur Auslegung von Siloanlagen gegen Staubexplosionen

- Beiblatt -



Massivbau
Baustofftechnologie
Karlsruhe

ARBEITSTITEL

**Richtlinie zur Auslegung von Siloanlagen
gegen Staubexplosionen**

- Beiblatt -

- Beispiele -

Stand: 13.12.1993

Universität Karlsruhe
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Abteilung Massivbau
Leitung: Prof. Dr.-Ing. J. Eibl
1993

Beispiele

zur Anwendung der "Richtlinie zur Auslegung von Siloanlagen gegen Staubexplosionen"

Nachfolgend wird beispielhaft für eine Getreidesiloanlage und ein Getreidelager aufgezeigt, wie im Sinne der "Richtlinie zur Auslegung von Siloanlagen gegen Staubexplosionen" solche vermieden werden können, bzw. wie deren schädliche Auswirkungen minimiert werden können. Die Ausführlichkeit der Darlegungen versucht dem für Bauingenieure ungewohnten Umgang mit explosionsgefährdeten Betonstrukturen Rechnung zu tragen.

1. Beispiel: Siloanlage

1.1 Übersicht

Die Abb. 1 gibt einen Überblick über die auszulegende Siloanlage mit den nachfolgend aufgeführten relevanten Daten.

Volumen	$V = 4,5 * 4,5 * 48,06$	= 973,2 m ³
Dach- bzw. Grundfläche der Siloz.	$A = 4,5 * 4,5$	= 20,25 m ²
fiktiver Durchmesser	$D^* = \sqrt{4 \cdot 20,25 / \pi}$	= 5,08 m
H/D*	= 48,06/5,08	= 9,46
Getreide, Mischstaub, abgelagert ¹	$K_{St} =$	= 79 bar*m/s
Umfang der Silozelle	$u = 4 * 4,5$	= 18,0 m
A/u	= 20,25/18,0	= 1,125 m

¹ aus: Sicherheitstechnische Informations- und Arbeitsblätter 140260 - 140279 des BIA-Handbuches, Verlag Erich Schmidt, Bielefeld

Wichte von Weizen	$\gamma =$	$= 9,0 \text{ kN/m}^3$
Horizontallastverhältnis	$\lambda =$	$= 0,60$
Wandreibung für Beton und Weizen	$\mu =$	$= 0,40$

1.2 Allgemeine Vorsorgemaßnahmen

In Silogebäuden mit integrierten Silozellen besteht bei Staubexplosionen in den Zellen die Gefahr, daß Sekundärexplosionen in Nachbarräumen induziert werden, weil aus meist notwendigen Entlastungsöffnungen ausgetriebener Staub gezündet wird. Explosionen können sich dann über Förder- und Aspirationssysteme ausbreiten. Besonders in langgestreckten Räumen wie z.B. im Beschickungsgeschoß oberhalb der Siloabschlüsse, im Entleerungsgeschoß unterhalb der Zellen oder Treppenhäusern und Elevatorschächten kommt es dabei zu hohen Flammengeschwindigkeiten und hohen Drücken. Wirksame bauliche Abtrennungen von Explosionsabschnitten und Entlastungsöffnungen zum Abbau des Explosionsdruckes können den Schaden signifikant reduzieren.

Die Verbindungstüren zwischen Explosionsabschnitten sind stets druckstoßfest auszuführen.

Das *Entleerungsgeschoß* sollte von den übrigen Räumen, auch vom Treppenhaus, getrennt werden und nach Möglichkeit einen eigenen abschirmenden Eingang erhalten.

Wenn Elevatoren nicht explosionsfest ausgeführt sind oder eine unmittelbare Druckentlastung nach außen nicht möglich ist, sollten solche Fördereinrichtungen in einem speziellen, druckentlasteten Elevatorschacht installiert werden.

Die Druckentlastung der Silozellen kann meist nur über das Beschickungsgeschoß über den Silozellen und von dort ins Freie erfolgen. Wegen der zu erwartenden Sekundärexplosion muß der Raum über den Silozellen dann besonders hinsichtlich seiner Druckentlastung untersucht werden.

1.3 Generelle Hinweise zur Ausbildung von Entlastungsflächen

Die einfachste Möglichkeit die Belastung aus Staubexplosion zu verringern bietet die erwähnte Druckentlastung mit u.a. nachfolgenden Anforderungen an die entsprechende Entlastungskonstruktion:

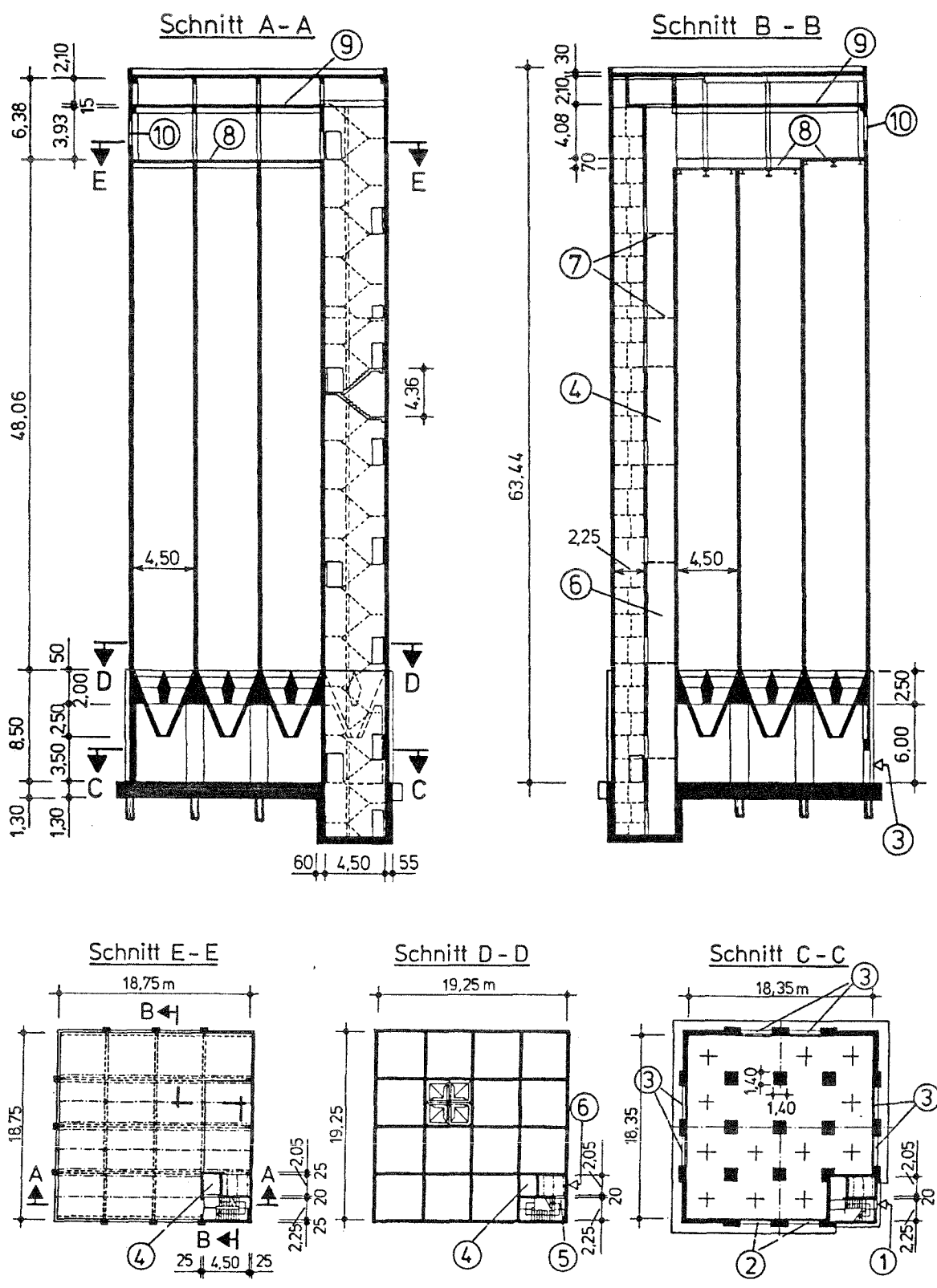


Abb. 1 Beispiel Explosionsschutzmaßnahmen in einer Mehlsiloanlage

- Das Abschlußelement sollte ein möglichst geringes Gewicht aufweisen. Eine Vergrößerung des Gewichts steigert die erforderliche Entlastungsfläche oder den Bemessungsdruck.
- Das Abschlußelement muß i.a. dicht sein, insbesondere bei der hygienischen Lagerung von Nahrungsmitteln. Dies gilt auch bei pneumatischer Beschickung mit zeitweilig vorkommenden geringen Überdrücken in den Silozellen.
- Eine Beeinträchtigung der Umgebung durch fliegende Teile, Druckwelle oder Flammenaustritt muß vermieden werden. Die Entlastung sollte deshalb vorzugsweise über hochliegende Fensterflächen oder nach oben stattfinden. Massebehaftete Abschlußelemente sind durch geeignete Maßnahmen in ihrer Bewegung zu beschränken. In Bereichen, in denen sich häufig Personen aufhalten, müssen Splitter z.B. durch versagende Berstmembrane vermieden werden.
- Die Masse der Entlastungskonstruktion und die auf die Entlastungskonstruktion wirkenden Festhaltekräfte, d.h. p_a , sollten gering sein. Eine Vergrößerung des Ansprechdrucks p_a bewirkt eine Vergrößerung der erforderlichen Entlastungsfläche oder des Bemessungsdrucks. Dieser Einfluß wurde im Bemessungsverfahren im Anhang zur Richtlinie nicht berücksichtigt. Der Ansprechdruck wurde dort auf 0,1 bar beschränkt.
- Die Entlastungskonstruktion muß gewartet werden, um eine Erhöhung des Ansprechdrucks p_a , z.B. durch Schneelast, Korrosion von Lagern, zu vermeiden.

Als Entlastungsmechanismen bieten sich zunächst die in Abb. 2 skizzierten Möglichkeiten an:

– Berstmembran –

Hier versagt das Abschlußelement selbst trägheitsfrei bei einem bestimmten Ansprechdruck p_a . Mit diesem Prinzip lassen sich geringere Bemessungsdrücke erzeugen als mit massebehafteten Abschlußelementen. Zu beachten ist hier, wie oben bereits erwähnt, daß die Umgebung nicht durch Splitter beeinträchtigt werden darf.

– Klappen oder Deckel –

Dies sind in der Regel massebehaftete Abschlußelemente. Sie müssen zur Vermeidung von

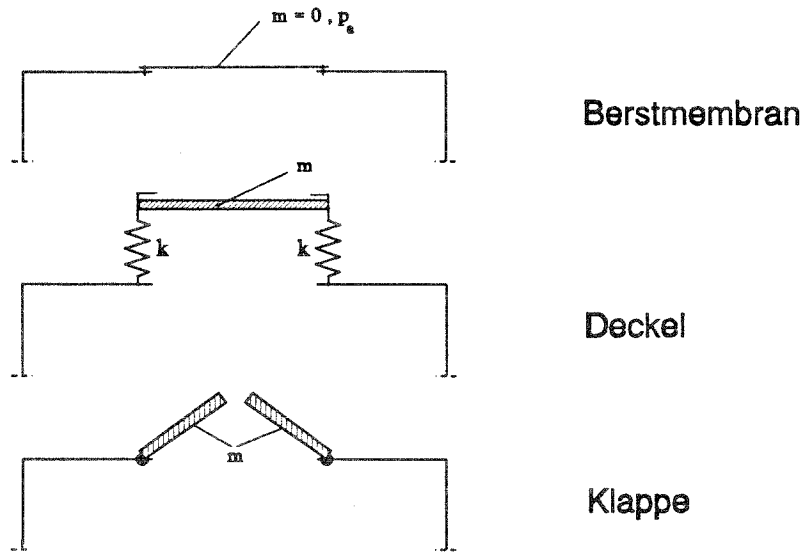


Abb. 2 mögliche Entlastungskonstruktionen

Schäden in der Umgebung nach einem bestimmten zurückgelegten Weg wieder abgefangen werden, woraus sehr große Kräfte für Rückhaltekonstruktionen wirken. Der Vorteil dieser Lösung ist, daß die Abschlußelemente begebar bzw. befahrbar sein können.

Zu verfolgen sind alle Beanspruchungen, wie z.B. große Zugkräfte, die solche Entlastungskonstruktionen u.a. an die Silozellen abgeben können.

1.4 Ausbildung der Silozellen im vorliegenden Fall

Hier ist zunächst anzuführen, daß derzeit kaum Erfahrungen mit den in Frage kommenden Entlastungsabschlüssen existieren, so daß es sich bei den nachfolgenden Angaben nur um erste, vorläufige Vorschläge handeln kann, die der weiteren Erörterung und insbesondere der Erprobung bedürfen.

Im vorliegenden Fall soll die Entlastung der Silozellen nach oben erfolgen. Die maximal vorhandene Entlastungsfläche entspricht der Grundrißfläche. Als Abdeckung wurden Tischlerplatten nach DIN 68705 mit einer Dicke $t = 3 \text{ cm}$ und einem Rechenwert der Eigenlast nach DIN 1055 T 1 zwischen $4,5$ und 8 kN/m^3 gewählt. Dies entspricht einer Rohdichte von 450 bis 800 kg/m^3 . Hier wurde ein mittlerer Wert von 650 kg/m^3 angesetzt. Daraus folgt eine

flächenbezogene Masse $m_p = 19,5 \text{ kg/m}^2$.

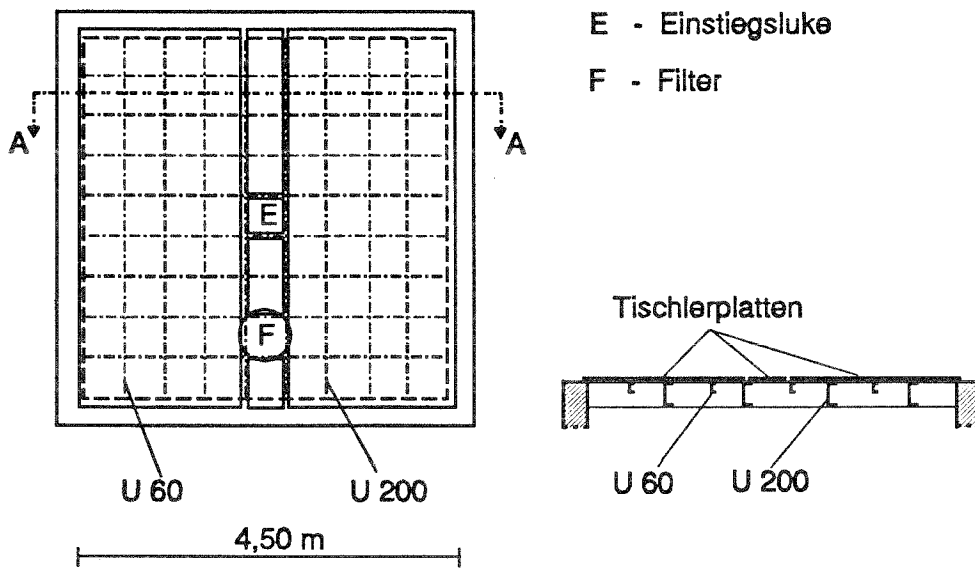


Abb. 3 Abdeckung der Silozellen

Die Tischlerplatten werden mit einem Verbindungsmittel geringer Festigkeit, z.B. Plastikschrauben, auf einen Stahlträgerrost montiert (vgl. Abb. 3). Die gesamte Versagenslast der Verbindungsmittel zusammen mit dem Eigengewicht der Tischlerplatten muß entsprechend den Vorgaben des Bemessungsverfahrens kleiner als 0,1 bar bzw. 10 kN/m^2 sein.

Der Trägerrost wurde so bemessen, daß im Falle einer Staubexplosion im Beschickungsgeschoß mit einem Bemessungsdruck p_{red} von 0,4 bar die Tischlerplatten und der Trägerrost noch nicht versagen. Dadurch wird eine Sekundärexplosion in den Silozellen infolge einer Staubexplosion im Beschickungsgeschoß vermieden.

Die vorhandene Entlastungsfläche A_E^v beträgt nach Abzug der Trägerflächen und der Filterfläche noch etwa $16,4 \text{ m}^2$.

1.5 Lastfallkombinationen

Nachfolgend werden die Zustände

- Silo gefüllt
- Silo leer - Staubexplosion - und

– Silo teilgefüllt und Staubexplosion

untersucht, wofür die notwendigen Sicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen in Anlehnung an EC2 – Deutsche Fassung DIN V ENV 1992-1-1, Ausgabe 06.1992 – sinngemäß angewendet werden. Für die Teilsicherheitsbeiwerte auf der Materialseite wird auf EC2 resp. EC3 verwiesen.

In aller Regel wird ein Bauteil nicht nur durch einen Lastfall belastet, sondern durch eine Kombination von mehreren Lastfällen.

Unterschieden wird dabei zwischen

Grundkombination mit normalen Lasteinwirkungen

$$S_d \left[\sum (\gamma_{G,i} \cdot G_{k,i}) + \gamma_Q \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\gamma_Q \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}) + \gamma_P \cdot P_k \right] \leq R_d \left[\frac{f_{ck}}{\gamma_c}; \frac{f_{yk}}{\gamma_s}; \frac{0,9f_{Pk}}{\gamma_s} \right] \quad (\text{B.1})$$

maßgebend für den Fall "Silo gefüllt" als

$$S_D = S_D [\gamma_Q \cdot Q_{\text{Füllung}}]$$

und der außergewöhnliche Kombination

$$S_{d,A} = S_d \left[\sum (\gamma_{GA,i} \cdot G_{k,i}) + A_d + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}) + \gamma_P \cdot P_k \right] \leq R_d \left[\frac{f_{ck}}{\gamma_c}; \frac{f_{yk}}{\gamma_s}; \frac{0,9f_{Pk}}{\gamma_s} \right] \quad (\text{B.2})$$

im vorliegenden Fall mit

$$S_D = S_D [1 \cdot A_{\text{Explosion}} + 1 \cdot Q_{\text{Füllung}}]$$

Für den erstgenannten Lastfall wurde der Ansatz von Janssen modifiziert, indem die obere Randbedingung von $p=0$ auf p_{red} geändert wurde (vgl. Abb. 4). Damit ergibt sich folgende Lösung für die Vertikal-, Horizontal- und Wandreibungsbelastung im Silo:

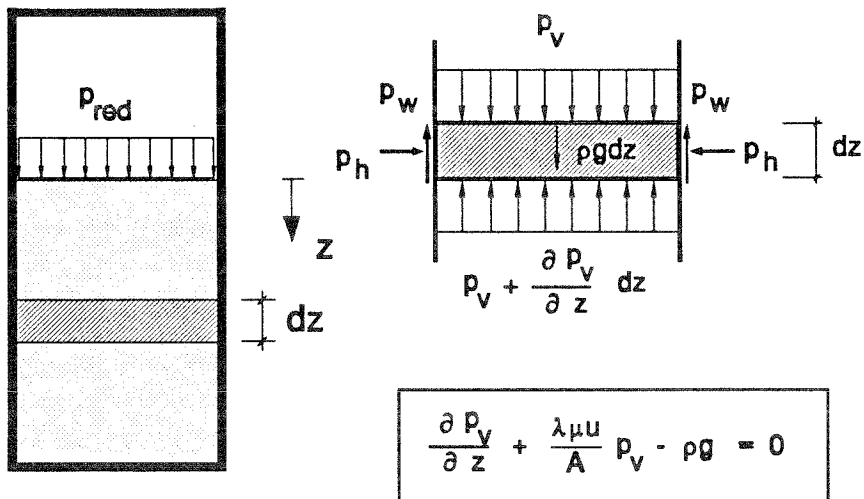


Abb. 4 erweiterter Ansatz von Janssen

$$\begin{aligned}
 p_v(z) &= \gamma \cdot z_0 \cdot s(z) && ; z \geq 0 \\
 &= p_{red} && ; z < 0 \\
 p_h(z) &= \gamma \cdot \lambda \cdot z_0 \cdot s(z) && ; z \geq 0 \\
 &= p_{red} && ; z < 0 \\
 p_w(z) &= \gamma \cdot \lambda \cdot \mu \cdot z_0 \cdot s(z) && ; z \geq 0 \\
 &= 0 && ; z < 0
 \end{aligned}
 \tag{B.3}$$

mit

$$\begin{aligned}
 s(z) &= 1 - \left(1 - \frac{p_{red}}{\gamma \cdot z_0}\right) \cdot e^{-\frac{z}{z_0}} \\
 z_0 &= \frac{A}{\lambda \cdot \mu \cdot u}
 \end{aligned}
 \tag{B.4}$$

Wird die Wandreibung bei der Bemessung in ihrem Verlauf über die Höhe vernachlässigt, so erhält man für die resultierende Gesamtkraft:

$$\begin{aligned}
 F_w(z) &= \int p_w(z) dA = u \cdot \int p_w(z) dz \\
 F_w(z_{max}) &= u \cdot \gamma \cdot \lambda \cdot \mu \cdot z_0 \cdot \left[z + \left(z_0 - \frac{p_{red}}{\gamma} \right) \cdot e^{-\frac{z}{z_0}} \right]_0^{z_{max}}
 \end{aligned}
 \tag{B.5}$$

bzw. bei bekannter resultierender Bodenbelastung F_v , wie sie über p_v bestimmt wird,

$$\begin{aligned}
\sum V = 0 &= F_{\text{Expl.}} + F_{\text{Gew. Schü.}} - F_v - F_w \\
&= p_{\text{red}} \cdot A + \gamma \cdot z_{\text{max}} \cdot A - p_v(z_{\text{max}}) \cdot A - F_w \\
F_w &= A \cdot [p_{\text{red}} + \gamma \cdot z_{\text{max}} - p_v(z_{\text{max}})]
\end{aligned} \tag{B.6}$$

1.6 Silobeanspruchung

1.6.1 Lastfall "Silo gefüllt"

Die Lasten aus Schüttgutlast werden nach DIN 1055 Teil 6, Ausgabe 05.87 ermittelt. Die Ermittlung der Lasten beruht auf dem Ansatz von Janssen. Dieser Ansatz in der Gleichung B.3 mit enthalten.

Aus Gleichung B.4 findet man für $z = H = 48,06$ m:

$$\begin{aligned}
z_0 &= \frac{20,25}{0,60 \cdot 0,40 \cdot 18,0} = 4,6875 \\
s(48,06) &= 1 - \left(1 - \frac{0}{9,0 \cdot 4,6875}\right) \cdot e^{-\frac{48,06}{4,6875}} = 0,999965
\end{aligned}$$

und damit:

$$\begin{aligned}
p_v(48,06) &= 9,0 \cdot 4,6875 \cdot 0,999965 &= 42,19 \text{ kN/m}^2 \\
p_h(48,06) &= 0,60 \cdot 9,0 \cdot 4,6875 \cdot 0,999965 &= 25,31 \text{ kN/m}^2 \\
p_w(48,06) &= 0,40 \cdot 0,60 \cdot 9,0 \cdot 4,6875 \cdot 0,999965 &= 10,13 \text{ kN/m}^2 \\
F_w(48,06) &= 20,25 \cdot (0 + 9,0 \cdot 48,06 - 42,19) &= 7904,7 \text{ kN}
\end{aligned}$$

Da dieser Lastfall der Grundkombination nach EC2 entspricht, sind die Ergebnisse mit $\gamma_Q = 1,5$ zu multiplizieren:

$$\begin{aligned}
p_v(48,06) &= 63,28 \text{ kN/m}^2 \\
p_h(48,06) &= 37,97 \text{ kN/m}^2 \\
p_w(48,06) &= 15,19 \text{ kN/m}^2 \\
F_w(48,06) &= 11857 \text{ kN}
\end{aligned}$$

1.6.2 Lastfall Staubexplosion im "leeren Silo"

Die vorhandene Enlastungsfläche und der Staubkennwert K_{St} (vgl. Abschn. 1.1) sind bekannt. Der Bemessungsdruck p_{red} kann infolge der trägheitsbehafteten Entlastung nach Abschnitt 3 des Anhangs zur 'Richtlinie zur Auslegung von Siloanlagen gegen Staubexplosionen' nur iterativ gefunden werden.

Die Ermittlung der Bemessungslast erfolgt analog zu Abschnitt 3.2 des Anhangs der Richtlinie.

Für den Wert K_m nach Gleichung (2) des Anhangs zur Richtlinie findet man zunächst:

$$K_m = \frac{\sqrt{m_p} \cdot K_{St}^5}{n^7 \cdot V^{0,041}} = \frac{\sqrt{19,5} \cdot 79^5}{1^7 \cdot 973,22^{0,041}} = 784,4$$

Da für $H/D = 9,46$ keine Bemessungsdiagramme vorliegen wird p_{red} für $H/D = 8$ und für $H/D = 12$ aus den vorliegenden Diagrammen bestimmt und anschließend linear auf $H/D = 9,46$ interpoliert.

- $H/D = 8$:

Für die erste Iteration wird $p_{red}^1 = 0,90$ bar gewählt.

Man erhält aus Abb. 8 des Anhangs zur Richtlinie (vgl. Abb. 5)

$$f^1 = 1,62$$

Mit Abb. 1 und Gleichung (1) des Anhangs der Richtlinie (vgl. Abb. 6) ergibt sich dann

$$A_E^{T,1} = f^1 \cdot A_E^1 = 1,62 \cdot 9,99 \text{ m}^2 = 16,18 \text{ m}^2 \leq A_E^V = 16,40 \text{ m}^2$$

- $H/D = 12$:

gewählt: $p_{red}^1 = 1,0$ bar

Es folgt aus Abb. 11 des Anhangs zur Richtlinie

$$f^1 = 1,71$$

Unter Verwendung von Abb. 1 zusammen mit Gleichung (1) bzw. Gleichung (8) des Anhangs zur Richtlinie erhält man

$$A_E^{T,1} = f^1 \cdot A_E^1 = 1,71 \cdot 9,18 \text{ m}^2 = 15,70 \text{ m}^2 < A_E^V = 16,40 \text{ m}^2$$

Wird die Iteration ein zweites Mal durchgeführt, mit

$$p_{red}^2 = 0,99 \text{ bar}$$

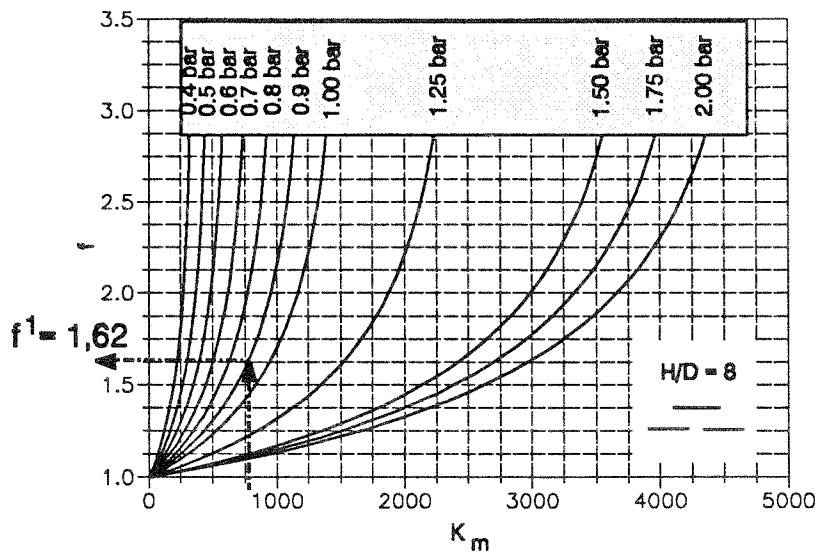


Abb. 5 Ermittlung des Flächenerhöhungsfaktors

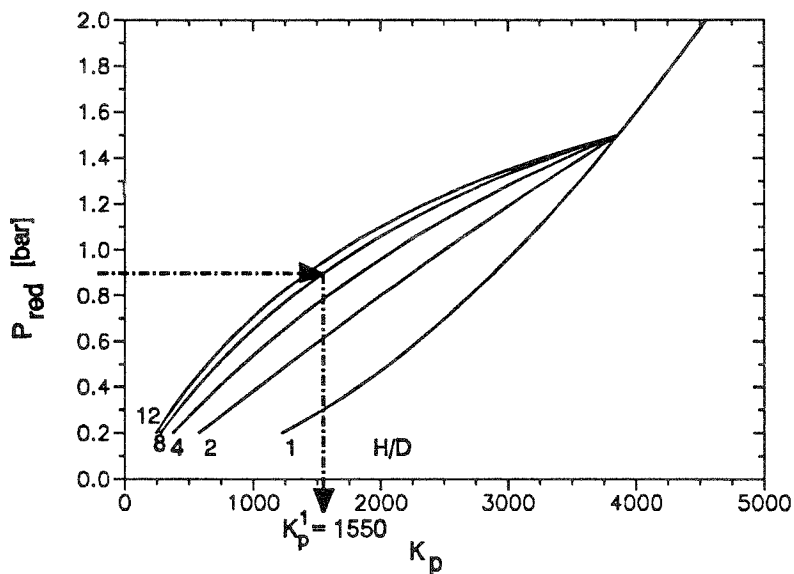


Abb. 6 Ermittlung des Hilfswertes K_p

so folgt aus Abb. 11 des Anhangs zur Richtlinie

$$f^2 = 1,75$$

Unter Verwendung von Abb. 1 bzw. Gleichung (8) des Anhangs zur Richtlinie

folgt

$$A_E^{T,2} = f^2 * A_E^2 = 1,75 * 9,34 \text{ m}^2 = 16,34 \text{ m}^2 \leq A_E^V = 16,40 \text{ m}^2$$

Mit der linearen Interpolation zwischen $H/D = 8$ und $H/D = 12$

$$p_{red} = p_{red}^8 + \frac{9,46 - 8}{12 - 8} \cdot (p_{red}^{12} - p_{red}^8) = 0,90 + \frac{1,46}{4} \cdot (0,99 - 0,90) = 0,93 \text{ bar}$$

findet man für den Lastfall Staubexplosion im "leeren Silo" folgende Beanspruchungen

$$\begin{aligned} p_v(48,06) &= p_{red} = 93,0 \text{ kN/m}^2 \\ p_h(z) &= p_{red} = 93,0 \text{ kN/m}^2 \\ p_w(z) &= 0 \\ F_w(z) &= 0 \end{aligned}$$

1.6.3 Lastfall "Teilfüllung und Explosion"

Hier wird in einem ersten Schritt davon ausgegangen, daß das Silo zu 25 % mit Schüttgut gefüllt ist (vgl. Abb. 7), so daß im restlichen Volumen eine Staubexplosion stattfinden kann.

Wie aus Gleichung B.3 zu erkennen ist, muß zuerst der Lastfall Staubexplosion untersucht werden.

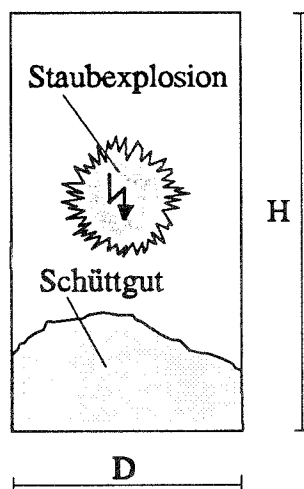


Abb. 7 teilweise gefüllte Silozelle

Für das verbliebene Volumen ergeben sich folgende Daten

$$\begin{aligned} H_{75\%} &= 0,75 \cdot 48,06 &= 36,05 \text{ m} \\ H_{75\%}/D &= &= 7,10 \\ V_{75\%} &= 36,05 \cdot 20,25 &= 730,01 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Alle übrigen Angaben, wie die Entlastungsfläche A_E^V , die Masse der Entlastungsöffnung m_p ,

etc., können dem Lastfall Staubexplosion im 'leeren' Silo entnommen werden.

Mit Gleichung (2) des Anhangs zur Richtlinie findet man damit den Hilfwert K_m :

$$K_m = \frac{\sqrt{m_p} \cdot K_{St}^5}{n^7 \cdot V^{0,041}} = \frac{\sqrt{19,5} \cdot 79^5}{1^7 \cdot 730,01^{0,041}} = 793,74$$

Für $H/D = 7,10$ liegen wie vorher keine Bemessungsdiagramme vor. Jedoch für $H/D = 4$ und für $H/D = 8$, so daß wieder für $H/D = 7,10$ interpoliert werden kann.

• $H/D = 4$:

geschätzt: $p_{red}^1 = 0,60$ bar

Aus Abb. 8 des Anhangs zur Richtlinie ergibt sich

$$f^1 = 2,71$$

Mit Gleichung (8) des Anhangs zur Richtlinie folgt dann

$$A_E^{T,1} = f^1 \cdot A_E^1 = 2,71 \cdot 11,0 \text{ m}^2 = 29,82 \text{ m}^2 > A_E^V = 16,40 \text{ m}^2$$

Die Iteration muß fortgesetzt werden

gewählt: $p_{red}^2 = 0,71$ bar

Es folgt aus Abb. 5 des Anhangs zur Richtlinie

$$f^2 = 1,80$$

und damit mit Gleichung (8) des Anhangs zur Richtlinie

$$A_E^{T,2} = f^2 \cdot A_E^2 = 1,80 \cdot 9,07 \text{ m}^2 = 16,32 \text{ m}^2 \approx A_E^V = 16,40 \text{ m}^2$$

• $H/D = 8$:

gewählt: $p_{red}^1 = 0,90$ bar

Es folgt aus Abb. 8 des Anhangs zur Richtlinie

$$f^1 = 1,66$$

Unter Verwendung von Gleichung (8) des Anhangs zur Richtlinie ergibt sich

$$A_E^{T,1} = f^1 \cdot A_E^1 = 1,66 \cdot 8,01 \text{ m}^2 = 13,30 \text{ m}^2 < A_E^V = 16,40 \text{ m}^2$$

Die Iteration wird ein zweites Mal durchgeführt

gewählt: $p_{red}^2 = 0,85$ bar

und so aus Abb. 8 des Anhangs zur Richtlinie

$$f^2 = 1,85$$

und entsprechend mit Gleichung (8) des Anhangs zur Richtlinie

$$A_E^{T,2} = f^2 \cdot A_E^2 = 1,85 \cdot 8,70 \text{ m}^2 = 16,10 \text{ m}^2 \leq A_E^V = 16,40 \text{ m}^2$$

Die lineare Interpolation zwischen $H/D = 4$ und $H/D = 8$ ergibt

$$p_{red} = p_{red}^4 + \frac{7,10 - 4}{8 - 4} \cdot (p_{red}^8 - p_{red}^4) = 0,71 + \frac{3,10}{4} \cdot (0,85 - 0,71) = 0,82 \text{ bar}$$

Das heißt, der Bemessungsdruck p_{red} beträgt $82,0 \text{ kN/m}^2$

Bei diesen Lastfall ist z_{max} $12,02 \text{ m}$. Aus Gleichung B.3 resultieren damit folgende Belastungen für den Lastfall '25 % Teilfüllung'

$$p_v(12,02) = 45,26 \text{ kN/m}^2$$

$$p_h(12,02) = 27,15 \text{ kN/m}^2$$

$$p_w(12,02) = 10,86 \text{ kN/m}^2$$

$$F_w(12,02) = 2933,8 \text{ kN}$$

Die Analyse für alle weiteren Teillastfälle 50, 75 % erfolgt hierzu analog. Die Ergebnisse von 5 Füllungsgraden sind im Abb. 8 zusammengefaßt. Es zeigt sich, daß für die Vertikal- und Horizontalbelastung der Lastfall Staubexplosion im "leeren Silo" maßgebend wird. Für die Wandreibung hingegen ist der Lastfall "Silo gefüllt" bemessungsbestimmend.

1.7 Abschlußelemente und Rückhaltekonstruktionen

Maßgebend für die Bemessung der Abschlußelemente ist der Lastfall "Silo leer". Geht man davon aus, daß wie im Abschnitt 1.4 vorgeschlagen, als Abschlußelemente Tischlerplatten (vgl. Abb. 3) verwendet werden, so können sich diese im Falle einer Staubexplosion nach dem Versagen der Verbindungsmittel frei bewegen und werden erst durch die als Rückhaltekonstruktion wirkenden Dachträger abgefangen.

Die infolge der Tischlerplatten auf die Dachträger wirkende Stoßlast läßt sich aus der Geschwindigkeit der Abschlußelemente bestimmen. Diese wird nach Abschnitt 3.4 der Anlage zur Richtlinie ermittelt.

Es wird angenommen, daß sich die Tischlerplatten frei bis zu den Dachträgern bewegen können und von diesen erst dann zurückgehalten werden. Die vorhandene Raumhöhe des Beschickungsgeschosses beträgt $3,93 \text{ m}$.

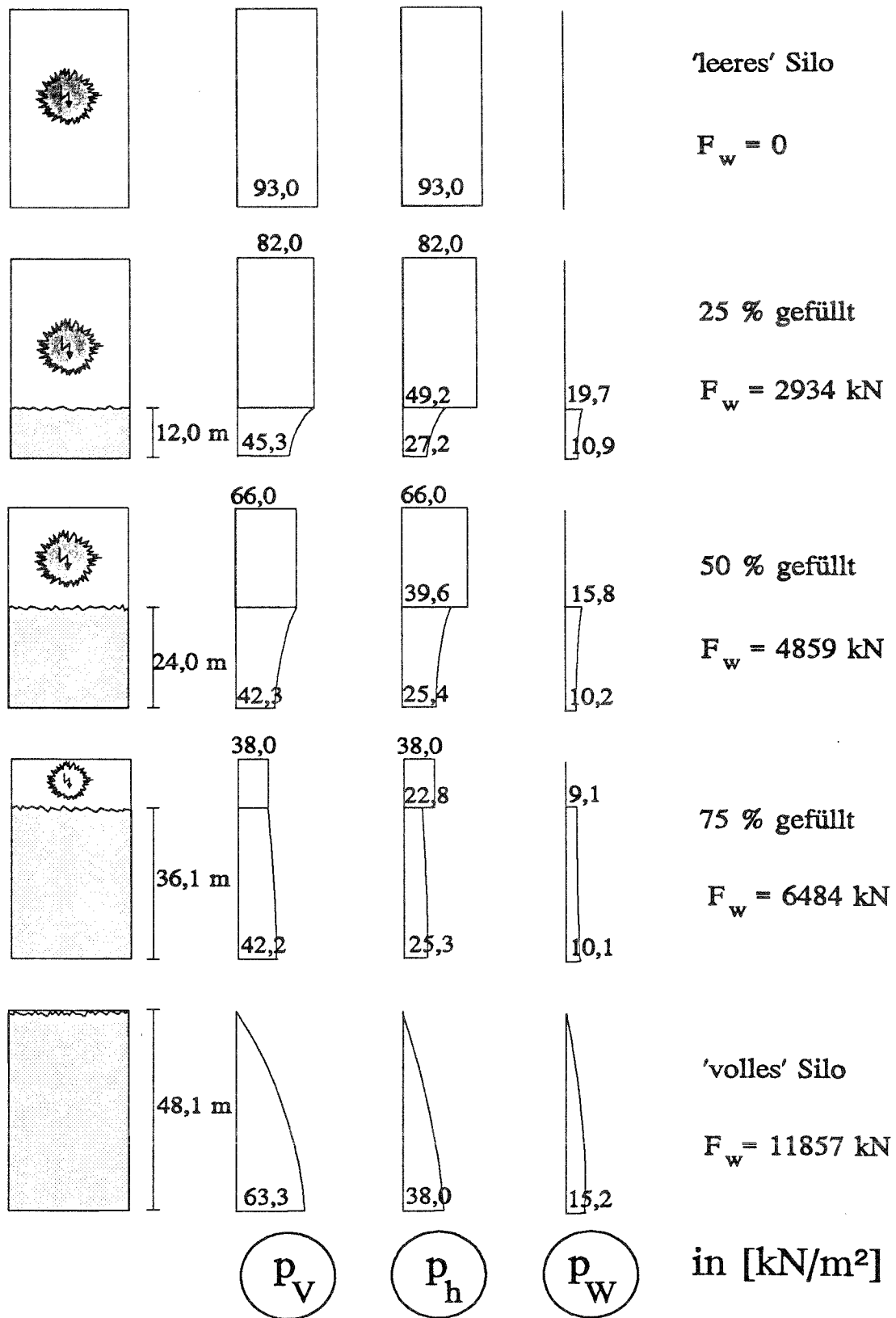


Abb. 8 Zusammenstellung von 5 verschiedenen Füllungsgraden

Mit $d^* = D^* = 5,08$ m folgt

$$\frac{h}{d} = \frac{3,93}{5,08} = 0,77 > 0,50$$

Zur Bestimmung der Geschwindigkeit des Abschlußelementes können die Diagramme mit $h/d = 0,50$ verwendet werden. Dies ist möglich, da sich die Geschwindigkeit in diesem Bereich nicht so stark ändert.

Wird nun wieder, wie beim Lastfall Staubexplosion im 'leeren' Silo eine Iteration zwischen $H/D = 8$ und $H/D = 12$ durchgeführt, so erhält man für den Lastfall "Staubexplosion" folgende Ausgangswerte

$$\begin{aligned} K_m &= 784,4 & p_{red} &= 0,93 \text{ bar} \\ A_E^V &= 16,40 \text{ m}^2 & V &= 973,22 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$K_p = \frac{V^{0,767} \cdot K_{St}}{A_E^V} = \frac{973,22^{0,767} \cdot 79}{16,40} = 943,5$$

Damit ergibt sich für

- $H/D = 8$ aus Abb. 10 des Anhangs (vgl. Abb. 9) $K_v = 24,1$
- $H/D = 12$ aus Abb. 13 des Anhangs $K_v = 30,4$

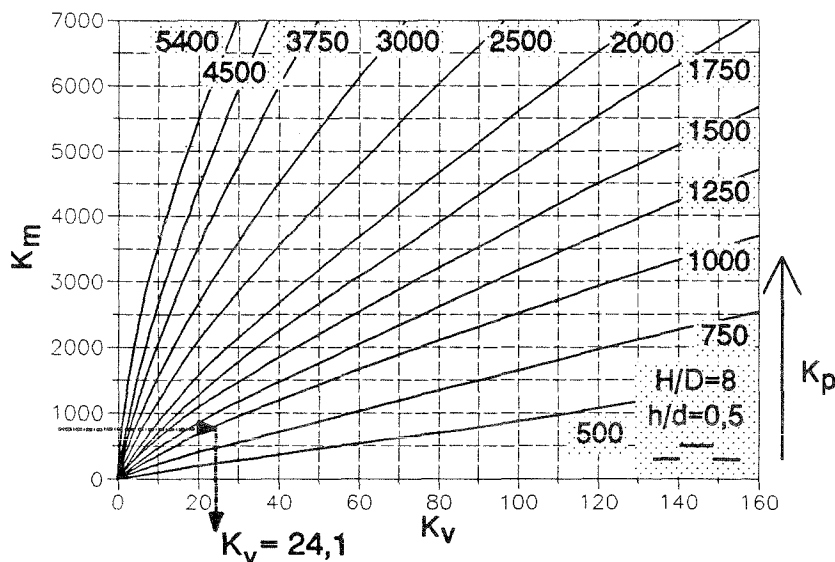


Abb. 9 Ermittlung des Hilfswertes K_v

Mit einer linearen Interpolation zwischen $H/D = 8$ und $H/D = 12$ folgt

$$K_v^{9,46} = K_v^8 + \frac{9,46 - 8}{12 - 8} \cdot (K_v^{12} - K_v^8) = 24,1 + \frac{1,46}{4} \cdot (30,4 - 24,1) = 26,4$$

und anschließend mit Gleichung (3) des Anhangs zur Richtlinie die Geschwindigkeit der Abschlüsselemente zu

$$v = \frac{K_v \cdot V \cdot \sqrt{p_{red}}}{A_E^v \cdot m_p} = \frac{26,4 \cdot 973,22 \cdot \sqrt{0,93}}{16,40 \cdot 19,5} = 77,5 \text{ m/s}$$

Diese Geschwindigkeit in Verbindung mit der Masse der Abschlüsselemente ist maßgebend für die Ermittlung der Stoßkräfte auf die Dachträger.

Es wird hier angenommen, daß die Dacheindeckung aus Stahltrapezprofilen besteht, die auf Stahlträgern aufliegen. Diese Träger sind nur in einer Richtung über den Silozellen gespannt und an ihren Auflagerpunkten zugfest an den Silozellwänden angeschlossen. Mindestens 2 Träger IPBl 160 DIN 1025 St 37-2 pro Silozelle stehen zur Verfügung.

Die Tischlerplatten werden für die nachfolgenden dynamischen Untersuchungen zu einer Einzelmasse abgebildet. Die Verbindung der kleineren Plattenteile, die hier nicht weiter verfolgt wird, ist entsprechend zu gewährleisten (vgl. Abb. 3).

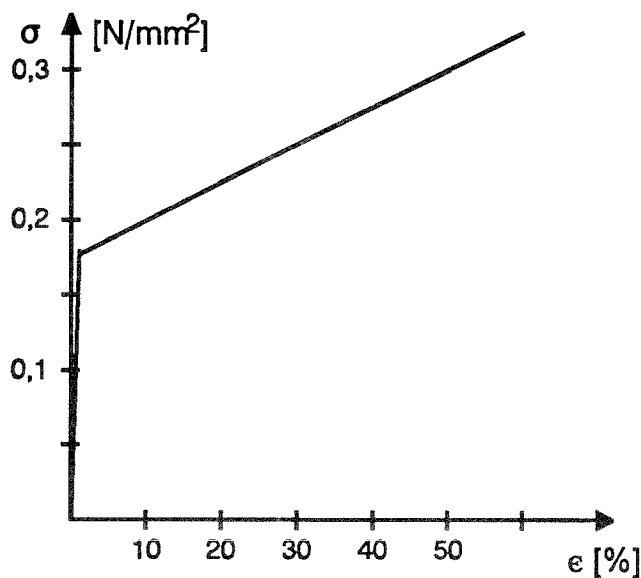


Abb. 10 *idealisierte Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Polystyrol*

Zur Energieadsorption werden unter den Stahlträgern 30 cm dicke Dämmplatten z.B. aus Polystyrol oder einem ähnlichen Material mit einer Rohdichte von 30 kg/m^3 angebracht. Die Breite dieser Dämmplatten entspricht der Trägerbreite von 16 cm. Die idealisierte Spannungs-

Dehnungs-Beziehung für die Zusammendrückung dieser Dämmplatten zeigt Abb. 10.

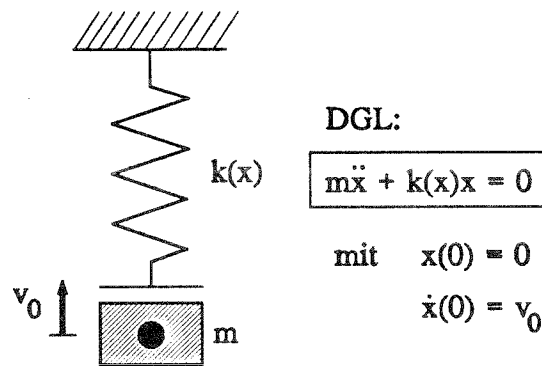


Abb. 11 Einmassenschwinger mit nichtlinearer Federsteifigkeit

Das entsprechende Ersatz-System eines Einmassenschwingers ist in Abb. 11 dargestellt. Die maßgebende Differentialgleichung ist wegen der bilinearen Kennlinie zur Charakterisierung der Dämmplatten nichtlinear. Zur Bestimmung der maximal auftretenden Kraft- und Verformungswerte kann deren Lösung jedoch durch eine Energiebetrachtung umgangen werden.

Es gilt:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$E_{Feder} = \int_0^x F ds = \frac{1}{2} \cdot k_1 \cdot x_1^2 + k_1 \cdot (x - x_1)^2 + \frac{1}{2} \cdot k_2 \cdot (x - x_1)^2 \quad ; \text{ für } x > x_1 \quad (\text{B.7})$$

$$\text{mit } k_i = \frac{E_i \cdot A}{h}$$

Bei der maximalen Federauslenkung wird die kinetische Energie vollständig in potentielle Energie bzw. Energie der Feder umgewandelt, weshalb für die maximale Verformung x_{max} gilt:

$$x_{max} = \sqrt{\frac{\frac{m \cdot h v^2}{2 \cdot A} - \frac{E_1 \cdot x_1^2}{2}}{E_1 + \frac{1}{2} \cdot E_2}} + x_1 \quad (\text{B.8})$$

solange diese größer sind als die elastischen Verformungen.

Für die nachstehenden relevanten Parameter:

m	Gesamtmasse der Abschlußelemente	= 19,5 * 20,25	= 394,88 kg
v	Geschwindigkeit der Abschlußelemente		= 77,5 m/s
h	Höhe der Polystyrolplatten		= 0,3 m
A	Gesamtfläche der Polystyrolplatten	= 2 * 0,16 * 4,5	= 1,44 m ²
x ₁	elastische Grenzverformung		= 0,006 m
E ₁	elastischer E - Modul		= 9,0 MN/m ²
E ₂	Modul nach der Streckgrenze		= 0,25 MN/m ²

findet man:

$$x_{max} = \sqrt{\frac{\frac{394,88 \cdot 0,30 \cdot 77,5^2}{2 \cdot 1,44} - \frac{9,0 \cdot 10^6 \cdot 0,006^2}{2}}{9,0 \cdot 10^6 + \frac{1}{2} \cdot 0,25 \cdot 10^6}} + 0,006 = 0,1705 \text{ m}$$

und daraus

$$\epsilon = \frac{x_{max}}{h} = 0,5683$$

Aus Abb. 10 läßt sich dann die dazugehörige Spannung im Polystyrol ermitteln

$$\sigma = 0,3171 \text{ MN/m}^2$$

Die Belastung des Trägers ergibt sich aus der Spannung im Polystyrol und der Trägerbreite zu:

$$q = \sigma \cdot b = 0,3171 \cdot 0,16 \cdot 10^3 = 50,74 \text{ kN/m}$$

Für ein Träger mit 4 Feldern und einem belasteten Feld folgt

$$\max |M| = 0,054 q \cdot l^2 = 0,054 \cdot 50,74 \cdot 4,75^2 = 61,82 \text{ kNm}$$

$$\max \sigma = \frac{\max |M|}{\text{vorh } W} = \frac{61,82 \cdot 10^{-3}}{220,0 \cdot 10^{-6}} = 281,0 \text{ N/mm}^2 < \beta_f = 370 \text{ N/mm}^2$$

1.8 Entleerungsgeschoß

Die Abmessungen sind im einzelnen Abb. 1 zu entnehmen.

$$\text{Volumen} \quad V = (18,35 \cdot 18,35 - 5,0 \cdot 5,0) \cdot 6,0 = 1870,3 \text{ m}^3$$

fiktive Höhe ²	H =	= 18,35 m
fiktive Grundfläche	A = 6,0 * 18,35	= 110,1 m ²
fiktiver Durchmesser	D* = $\sqrt{4 * 110,1 / \pi}$	= 11,84 m
	H/D* =	= 1,55
K _{St} - Wert ³	=	= 79 bar*m/s
p _{red} gewählt	=	= 0,25 bar

Die Entlastung erfolgt über vorhandene Fensterflächen, die als "Berstmembran" dienen. Der Ansprechdruck muß bei Anwendung des Bemessungsverfahrens wiederum kleiner gleich 0,1 bar sein. Weiter wird davon ausgegangen, daß die Fensterflächen näherungsweise trägheitsfrei versagen, d.h. Abb. 1 bzw. Gleichung (8) des Anhangs zur Richtlinie genügt zur Ermittlung der notwendigen Entlastungsfläche.

aus Abb. 8 des Anhangs zur Richtlinie erhält man: $K_p = 850$

und unter Verwendung von Gleichung (1) des Anhangs zur Richtlinie

$$A_E = 30,0 \text{ m}^2$$

Wenn, wie oftmals gegeben, im unteren Geschoß einer Siloanlage entsprechende Baustrukturen vorhanden sind, kann der Bemessungsdruck p_{red} gegebenenfalls angehoben und damit die erforderliche Gesamtentlastungsfläche verringert werden.

² Es muß die größte Abmessung als Höhe zur Ermittlung des H/D-Wertes gewählt werden, weshalb diese Höhe als fiktive Höhe bezeichnet wurde.

³ aus: Sicherheitstechnische Informations- und Arbeitsblätter 140260 - 140279 des BIA-Handbuches, Verlag Erich Schmidt, Bielefeld

2. Beispiel: Lagergebäude

Für Lagergebäude, wie es sich oftmals in unmittelbarer Nähe einer Siloanlage befindet, wird gezeigt, wie die Auswirkungen von Staubexplosionen minimiert werden können. Für die erforderlichen Entlastungsflächen werden geeignete konstruktive Lösungen vorgeschlagen. Das Beispiel wurde aus dem NFPA-Code 68-1988 entnommen.

2.1 Ausgangssituation

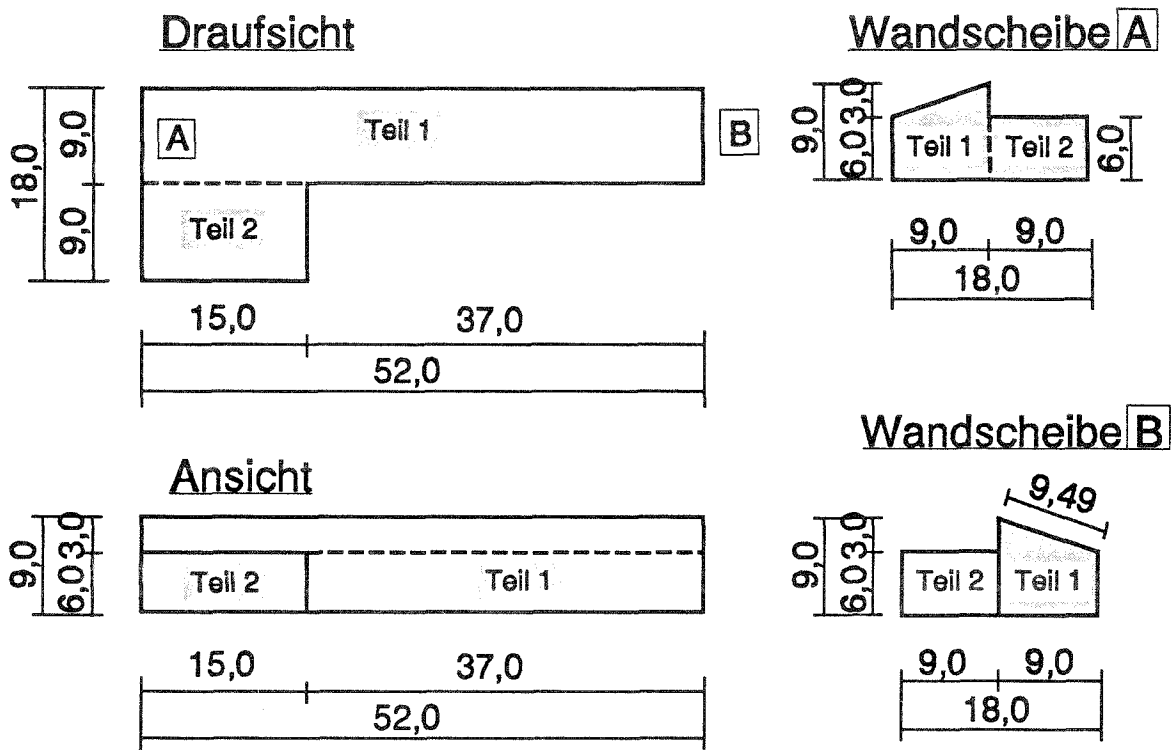


Abb. 12 *Abmessungen des Lagergebäudes*

Für das Lagergebäude nach Abb. 12 ist eine Nutzungsänderung vorgesehen. Es ist zu überprüfen, welche Stäube gelagert werden können, d.h. es soll der maximale Staubkennwert K_{St}^{max} bestimmt werden. Vor der Nutzungsänderung waren als Entlastungsflächen nur im Dach die Oberlichter und in den Wänden hochliegende Fensterflächen berücksichtigt worden. Gegebenenfalls könnten jedoch noch weitere Fensterflächen in den Wänden sowie die Dacheindeckung selbst berücksichtigt werden. Der Bemessungsdruck p_{red} für den das Gebäude ausgelegt ist, beträgt 0,25 bar. Die Entlastung erfolgt trägheitsfrei.

2.2 Gebäudeteil 1

Die Abmessungen sind im einzelnen Abb. 12 zu entnehmen.

Volumen	$V = 0,5 * (6,0 + 9,0) * 9,0 * 52,0$	= 3510 m ³
fiktive Höhe	$H =$	= 52,0 m
fiktive Grundfläche	$A = 0,5 * (6,0 + 9,0) * 9,0$	= 67,5 m ²
fiktiver Durchmesser	$D^* = \sqrt{4 * 67,5 / \pi}$	= 9,27 m
	$H/D^* = 52,0/9,27$	= 5,61
	$p_{red} =$	= 0,25 bar

Als Entlastungsfläche sind in der Dachfläche und an der höheren Gebäudeseite Oberlichter bzw. hochliegende Fensterflächen vorgesehen. Insgesamt stehen 156,0 m² zur Verfügung.

Die Entlastung erfolgt somit trägheitsfrei und es folgt somit aus Abb. 1 des Anhangs zur Richtlinie

$$K_p = 396,0$$

und mit Gleichung (1) des Anhangs zur Richtlinie $K_{St}^{max} = 118 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$

2.3 Gebäudeteil 2

Die Abmessungen sind wiederum im einzelnen Abb. 12 zu entnehmen.

Volumen	$V = 6,0 * 9,0 * 15,0$	= 810 m ³
fiktive Höhe	$H =$	= 15,0 m
fiktive Grundfläche	$A = 6,0 * 9,0$	= 54,0 m ²
fiktiver Durchmesser	$D^* = \sqrt{4 * 54,0 / \pi}$	= 8,29 m
	$H/D^* = 15,0/8,29$	= 1,81
	$p_{red} =$	= 0,25 bar

Als Entlastungsfläche sind in der Dachfläche und an der höheren Gebäudeseite Oberlichter

bzw. hochliegende Fensterflächen vorgesehen. Insgesamt stehen 45,0 m² zur Verfügung.

Die Entlastung erfolgt somit trägheitsfrei und es ergibt sich aus Abb. 1 des Anhangs zur Richtlinie

$$K_p = 745,0$$

und aus Gleichung (1) des Anhangs zur Richtlinie $K_{St}^{max} = 197 \text{ bar*m/s}$

2.4 Verteilung der Entlastungsflächen

In beiden Fällen reicht die vorgesehene Entlastungsfläche für Stäube mit einem maximalen Staubkennwert $K_{St}^{max} = 118 \text{ bar*m/s}$ aus. Wird zusätzlich noch die restliche trägheitsbehaftete Dachfläche mit in die Entlastungsfläche einbezogen, so können Stäube mit einem deutlich höheren Staubkennwert gelagert werden.

Eine weitere Erhöhung ist durch eine Berücksichtigung der restlichen Fensterflächen in den Gebäudewänden möglich.

Sollten Entlastungsflächen in den Wänden angeordnet werden, so ist darauf zu achten, daß gemäß der Richtlinie keine Beeinträchtigung der Umgebung auftritt. Außerdem ist darauf zu achten, daß alle Entlastungsflächen nur in den äußeren Gebäudeabschlüssen untergebracht werden dürfen. Eine Entlastung in einen anderen Explosionsabschnitt kann zu einer Sekundärexplosion führen.

Können Entlastungsöffnungen in Wand- und Dachflächen nicht in ausreichendem Umfang zur Verfügung gestellt werden, müssen die betroffenen Gebäudeteile gegebenenfalls verstärkt werden, um dem dann stärkeren Explosionsüberdruck ohne Schaden standhalten zu können.

T 2574

Summary on the Final Research Report
Structural Measures Reducing Dust Explosion Damages

IV - 1 - 5 - 605/90

Dust explosions occur quite frequently in silos and bunkers, rarely noticed by the general public. The aim of this investigation was to submit a first draft of a guideline to design silos against dust explosions, which should be avoided as far as possible or at least its damage and hazards should be reduced to an insignificant level.

The state of art in this area was worked out starting from an thorough literature revue. It was shown, that the inertia of the vent closure influences the vent area, but it was hardly taken into consideration in the proposed design rules.

Recently it has been shown, that the inertia is essential for the design, which was assessed also by our own experimental results.

Theoretical considerations lead to a model of venting design with inertia, that was combined with a model, tested in practice and based on empirical foundations. Simple and general applicable design charts were evaluated from numerous calculations with the above mentioned model. They could be found with explanations in the appendix of the design rules. Examples and proposals for solutions of the vent construction could be found in the supplements of the design rules.

7 2574

Résumé du rapport final sur le projet de recherche

"Dispositions constructives pour la diminuation des dégâts provoqués par les explosions de poussière" IV - 1 - 5 - 605/92

Les explosions de poussière qui se produisent dans les silos et soutes - eu égard aux publications - sont d'une fréquence relativement peu connue. En conséquence, le but de ce rapport fut d'élaborer un projet de directive concernant les silos soumis aux actions impliquées par les explosions de poussière, tenant compte des connaissances existantes dans ce domaine, de telle manière que ces explosions de poussière puissent être empêchées et dans les circonstances où elles sont plus ou moins inévitables de pouvoir restreindre au minimum les dégâts qu'y apparaissent, à l'aide des mesures constructives appropriées

L'état des connaissances sur ce domaine a été mis à jour à partir d'une recherche bibliographique. Il en a résulté qu'il faut accorder une certaine importance à l'inertie des dispositifs de déversement, restée pratiquement non-considerée dans les propositions existantes sur le dimensionnement. Il fut montré récemment que cette inertie a une grande importance, ce qui put être confirmé par des expériences.

Des considérations théoriques conduisirent à un modèle qui tient compte de l'inertie mentionnée, qui a été accouplé à un modèle sans cette inertie, basé sur des résultats expérimentaux et vérifié par la pratique. Ces considérations servirent à élaborer un modèle de calcul numérique. Sur la base des nombreux calculs, qui ont été faits, des diagrammes de dimensionnement furent établis, qui peuvent être mis en oeuvre facilement et de manière générale. Ils sont munis d'explications et se trouvent dans l'appendice de la directive. Des exemples d'application ainsi que des propositions pour des solutions constructives des dispositifs de déversement se trouvent dans le supplément de la directive.