

**Bautechnische Maßnahmen zur Schadens-
minderung bei Staubexplosionen
Ergänzende Untersuchungen**

T 2899

T 2899

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2000, ISBN 3-8167-5709-X

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

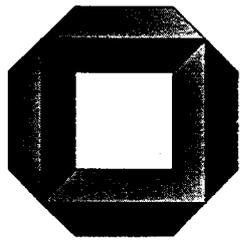
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

e-mail irb@irb.fhg.de

URL <http://www.irb.fhg.de>



Massivbau
Baustofftechnologie
Karlsruhe

Abschlußbericht

**Bautechnische Maßnahmen zur Schadensminderung
bei Staubexplosionen**

Aktenzeichen: IV 1-5-856/97

(Ergänzende Untersuchungen zum Vorhaben IV 1-5-605/90)

Josef Eibl

Wolfgang Leuckel

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Abteilung Massivbau
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. techn. h. c. J. Eibl a. D.

Engler-Bunte-Institut
Bereich Feuerungstechnik
Prof. Dr.-Ing. W. Leuckel a. D.

Universität Karlsruhe
1999

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 1-5-856/97 vom Deutschen Institut für Bautechnik, Berlin gefördert, dessen Vertretern hierfür Dank gebührt.

An der Diskussion über die Richtlinie waren als Projektbegleiter die Herren Dr.-Ing. Bossenmayer und Dr.-Ing. Nieser vom Deutschen Institut für Bautechnik, Berlin, und Herr Oberbaurat Schickanz vom Innenministerium Baden-Württemberg, Stuttgart, beteiligt. Letzterem gebührt besonderer Dank für die textliche Überarbeitung der Richtlinie. Zu danken ist weiter Herrn Dr.-Ing. Radandt von der Berufsgenossenschaft für Nahrungsmittel und Gaststätten, Mannheim, für seine aktive Mitarbeit und seine Hinweise aus der Praxis

Die in den Anhängen A und B abgedruckte Richtlinie stellt nun den Stand dar, wie er von den Autoren und den oben angeführten Projektbegleitern der Fachkommission Bauordnung zur Entscheidung vorgelegt wurde. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Erkenntnisse	1
3	Durchgeführte Untersuchungen	4
3.1	Theoretische Untersuchungen - Erstellen von Bemessungsdiagrammen	4
3.2	Parameterstudien – Vergleiche mit bestehenden Ansätzen.....	10
3.3	Bautechnische Überlegungen.....	12
4	Literaturverzeichnis.....	17
	Anhang A: Richtlinie zur Auslegung von Siloanlagen gegen Staubexplosionen	A1
	Anhang B: Beispiele zur Anwendung der Richtlinie	B1

1 Einleitung

In Siloanlagen entstehen fast unvermeidlich Staub/Luft-Gemische, die die Sicherheit solcher Bauwerke gefährden. Durch Zündquellen, wie z. B. Funken, können diese nämlich zur Explosion gebracht werden und führen dann bei geschlossenen Silos zu sehr hohen Drücken, die von den Behälterstrukturen nicht mehr aufgenommen werden können. Zur Beherrschung von Staubexplosionen müssen Silos daher gezielt mit Entlastungsöffnungen versehen werden ([42]). Zur Ermittlung von Gestaltungs- und Dimensionierungsregeln für solche Vorrichtungen wurden Staubexplosionen und deren Interaktion mit Silos bzw. Entlastungselementen experimentell untersucht. Gestützt durch theoretische Überlegungen wurde ein Bemessungskonzept für den Lastfall Staubexplosion entwickelt.

2 Stand der Erkenntnisse

Die Auswirkungen von Staubexplosionen sind seit ca. 200 Jahren bekannt, und zwar seitdem Getreide in windangetriebenen Mühlen gemahlen wurde ([5]). Daß diese Explosionen durch das Verbrennen des Staubes selber ausgelöst werden, ist jedoch erst seit ca. 100 Jahren bekannt.

Mit zunehmender industrieller Produktion von Getreide und anderen zu mahlenden Gütern nahmen auch die materiellen Schäden durch Staubexplosionen zu, oftmals verbunden mit einer großen Anzahl an Verletzten und Todesfällen ([5], [6], [7], [8], [13], [49]). Eine entsprechende Statistik der Bundesrepublik ist in [6], [7] und [8] enthalten. Erst jüngst ereignete sich wieder eine Staubexplosion in Blaye / Frankreich im August 1997. In der dortigen Siloanlage mit einer Getreide-Kapazität von 350 000 Tonnen wurde, vermutlich durch eine elektrostatische Entladung, eine Staubexplosion ausgelöst. Die Anlage wurde völlig zerstört, 12 Tote und mehrere Verletzte waren zu beklagen.

Notwendige Entlastungsvorrichtungen im Falle einer nie völlig auszuschließenden Staubexplosion lassen sich noch immer nicht auf einer ausschließlich theoretischen Grundlage entwickeln. Notwendig sind experimentelle Studien ([21], [51]), verbunden mit einer theoriebasierten Auswertung.

Solche Untersuchungen werden seit mehr als 40 Jahren durchgeführt jedoch meist mit trägheitslosen Entlastungsvorrichtungen ([3], [4], [16], [17], [18], [20], [30], [33], [40]). Maßgebende Arbeiten stammen von Bartknecht für die Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie ([3], [4]) und von Eckhoff ([20], [21]), der auch sehr große Silos mit bis zu 500 m³ Innenraumvolumen untersuchte. Radant studierte Explosionsabläufe in Rohrleitungen ([44]), die in vielen Fällen als Ursache für die Weiterleitung von Explosionen in andere explosionsgefährdete Räume erkannt wurden.

In einem Forschungsvorhaben der DFG untersuchten die beiden Autoren dieses Berichts Staubexplosionen in einem 50 m³ großen Versuchssilo, wobei ca. 400 Explosionsversuche durchgeführt wurden. Als Einflußparameter wurden in diesem Projekt Staubkonzentration, Zündort, Zündverzugszeit zwischen Einblasen des Staubes und Zündung des Gemisches, Turbulenz, Größe der Entlastungsfläche, Ansprechdruck und Masse der Entlastungsvorrichtung, das Volumen des Explosionsraumes und die Art und Gestaltung der Entlastungselemente (Folie, Deckel, Klappe und Umlenkvorrichtung für eine seitliche Explosionsgasabführung) studiert. Tabelle 2.1 gibt eine Übersicht über die in die eigenen Studien einbezogenen Versuchsreihen.

Versuchsreihe	Versuchsleiter	Literatur	Behältervolumen V [m ³]
A	Heinrich	[33]	5
B	Bartknecht	[1]	1 / 10 / 30 / 60
C	Bartknecht	[4]	2,4 / 10 / 25 / 250
D	Eckhoff	[16], [18]	500
E	Bartknecht / Radant	[2]	20
F	Eckhoff	[19]	236
G	Eibl / Block	[22]	20
H	Eibl / Leuckel	[23], [24], [27]	50
I	Matusêk / Stroch	[40]	500
J	Gerold	[30]	45 / 85 / 110

Tabelle 2.1: Versuchsreihen

Die in diesen Versuchsreihen untersuchten Parameter sind in Tabelle 2.2 angegeben. Wie aus den beiden Tabellen zu erkennen ist, wurde in den letzten Jahren eine große Anzahl von Versuchen durchgeführt. Dabei handelt es sich meist um Versuche in sehr kleinen Volumina. Es liegen nur sehr wenige Versuche in größeren Silos bis 500 m³ vor. Eine Extrapolation auf größere Silovolumina ist deshalb nur mit Einschränkungen möglich, und die meisten Bemessungsvorschläge werden auf ein Silovolumen von 10 000 m³ begrenzt.

Untersuchte Parameter	Versuchsreihen
Ansprechdruck	D, G, H, I, J
Turbulenz	D, H, I,
Zündquellenverlagerung	E, F, H, I, J
Behältervolumen	B, C, H, J
H/D-Verhältnis	J, H
Größe der Entlastungsfläche	A, B, C, D, F, G, H, I, J
seitliche Entlastung	F, H
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 unterschiedlicher Höhe	G, H, I

Tabelle 2.2: In den Versuchsreihen untersuchte Parameter

An Hand von solchen Versuchen wurden seit ca. 30 Jahren auch Bemessungsvorschläge zur Druckentlastung von Behältern entwickelt ([15], [29], [34], [43], [45], [46], [47], [50], [51]). Diese beruhen meist auf empirischen Ansätzen und sind an diesen Versuchen überprüft bzw. kalibriert. Entsprechend zeigen sich Schwierigkeiten bei der Anwendung auf andere Parameterkombinationen. Als gut geeignet für die Dimensionierung von trägheitsfreien Druckentlastungssystemen darf die VDI-Richtlinie 3673 ([51]) und der NEPA-Code 68 ([43]), der auf dieser beruht, bezeichnet werden.

Letztere werden durch die hier vorgestellte (vgl. Anhang A) Richtlinie zur Auslegung von Silobauwerken gegen Staubexplosionen, die Eingang in den neuen Entwurf der DIN 1055 gefunden hat, für den hier in Frage stehenden Zweck ergänzt. Hier wird nun u. a. auch die Trägheit der Entlastungselemente berücksichtigt.

3 Durchgeführte Untersuchungen

3.1 Theoretische Untersuchungen

- Erstellen von Bemessungsdiagrammen -

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

Der zeitliche Druckverlauf während einer (entlasteten) Explosion kann mit Hilfe eines Systems gewöhnlicher Differentialgleichungen näherungsweise beschrieben werden. Diese Gleichungen beschreiben einerseits den Reaktionsumsatz durch die Verbrennung, die Kontinuitätsbedingung, den Zustand sowie die Energieerhaltung des Frischgemisches, und andererseits den instationären Ausströmvorgang aus dem Silo und die Bewegung der Entlastungselemente (Deckel, Klappen). Den Berechnungen für die Bemessungsdiagramme liegen mehrere Gleichungen zugrunde, die folgende Teilvorgänge bzw. Gesetze beschreiben:

- die zeitliche Änderung der Rauchgas- bzw. Frischgasmasse infolge der Verbrennung.

$$dM_{Rg} = -dM_{Fg} \quad dM_{Fg} = -\Lambda \cdot A_{FF} \cdot \rho_{Fg} \cdot dt \quad (3.1)$$

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

$$-\frac{M_{Rg}}{\rho_{Rg}^2} d\rho_{Rg} + \frac{dM_{Rg}}{\rho_{Rg}} - \frac{M_{Fg}}{\rho_{Fg}^2} d\rho_{Fg} + \frac{dM_{Fg}}{\rho_{Fg}} = 0 \quad (3.2)$$

- die Zustandsänderungen des Rauch- bzw. Frischgases.

$$dp = R_{Rg} \cdot (\rho_{Rg} \cdot dT_{Rg} + T_{Rg} \cdot d\rho_{Rg}); \quad dp = R_{Fg} \cdot (\rho_{Fg} dT_{Fg} + T_{Fg} \cdot d\rho_{Fg}) \quad (3.3)$$

- die Energieerhaltung für das Rauchgas

$$M_{Rg} \cdot c_{Rg} \cdot dT_{Rg} = dM_{St} \cdot H_u + c_{v,Fg} \cdot T_{Fg} \cdot dM_{Fg} - c_{v,Rg} \cdot T_{Rg} \cdot dM_{Rg} + p \cdot \left(\frac{d\rho_{Rg}}{\rho_{Rg}^2} M_{Rg} - \frac{dM_{Rg}}{\rho_{Rg}} - \frac{dM_{Fg}}{\rho_{Fg}} \right) \quad (3.4)$$

- und die Energieerhaltung für das Frischgas.

$$c_{v, \text{Fg}} \cdot dT_{\text{Fg}} = p \frac{d\rho_{\text{Fg}}}{\rho_{\text{Fg}}^2} \quad (3.5)$$

Hinzu kommen die Bewegungsgleichungen für das Entlastungselement. Betrachtet wurde die Entlastung mit Deckel oder Klappen (s. Bild 3.1 und Bild 3.2). Aus einem Kräftegleichgewicht ergibt sich für den Deckel:

$$M_E \frac{d^2 y}{dt^2} = (\bar{p}_{\text{in}} - p_{\text{aus}}) \cdot \frac{\pi}{4} d_E^2 - M_E \cdot g \quad (3.6)$$

und aus einem Momentengleichgewicht für die Klappe:

$$M_E \frac{b^2}{3} \ddot{\theta} = (\bar{p}_{\text{in}} - p_{\text{aus}}) \cdot l \cdot b \frac{b}{3} - M_E \cdot g \frac{b}{2} \cos \theta = 0 \quad (3.7)$$

Die Entlastung führt zu einem Druckabfall im Silo infolge des Ausströmens von Frisch- bzw. Rauchgas.

$$\frac{dp}{dt} = -\kappa \frac{RT}{V} \cdot \frac{dM}{dt} \quad \text{mit:} \quad \frac{dM}{dt} = \alpha \cdot A_E \cdot u_E \cdot \rho_E \quad (3.8)$$

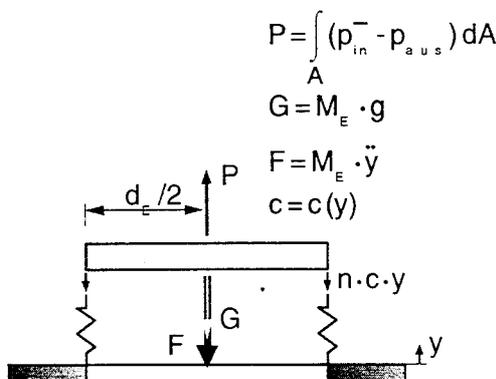


Bild 3.1: Modell der Deckelentlastung

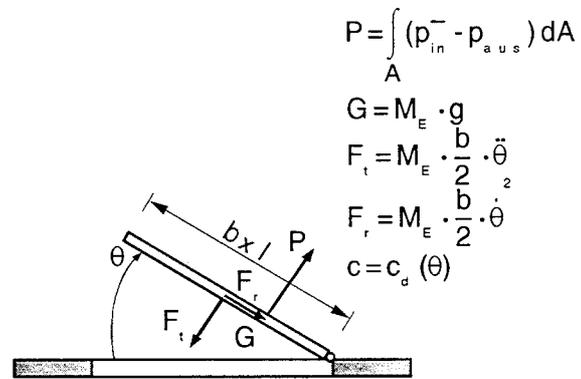


Bild 3.2: Modell der Klappenentlastung

Zur Beschreibung des Explosionsablaufs und der Entlastungsströmung werden in der Literatur ähnliche Ansätze vorgeschlagen ([9], [10], [11], [12], [16], [31], [35], [41], [46]). Behandelt wird allerdings nur die trägheitsfreie Entlastung. In [32] wird eine träge Entlastung mit Deckel angesprochen. Druckschwingungen und akustische Wellen, die bei entlasteten Explosionen in Erscheinung treten können (wie z. B. in [14] beschrieben), werden mit diesem Modell nicht erfaßt. Die Ansätze unterscheiden sich im wesentlichen durch die Wahl eines geeigneten Brenngeschwindigkeitgesetzes zur Beschreibung der Reaktionskinetik. Hierbei muß

von einer starken Kopplung zwischen den lokal vorliegenden Strömungsbedingungen und dem Reaktionsfortschritt im Silobehälter ausgegangen werden. Wie Untersuchungen an geschlossenen Explosionsbehältern zeigen ([38], [39], [48], [52]), kommt es während der instationären Flammenfrontausbreitung zu einer flammenerzeugten Turbulenzgenerierung. Aus einer Reihe von Explosionsversuchen an unterschiedlichen sphärischen Explosionsbehältern konnte in [39] eine Funktion ermittelt werden, mit der sich die Steigung der Brenngeschwindigkeit aufgrund der zum Zündzeitpunkt vorliegenden Turbulenzbedingungen und der flammenerzeugten Turbulenz vorhersagen läßt. Diese Funktion wurde durch einen Term erweitert, der die Turbulenzsteigerung durch hinderniserzeugte Turbulenzen an der Entlastungsöffnung während des Ausströmvorgangs berücksichtigt. Der so erhaltene reaktionskinetische Ansatz wurde für die im Rahmen der erforderlichen Parametervariationen nötigen Modellrechnungen zugrunde gelegt.

Unter Berücksichtigung der Massenträgheit der Entlastungseinrichtungen hängen die absoluten Druck/Zeit-Verläufe der ablaufenden Explosionen im wesentlichen von folgenden primären Einflußgrößen ab:

- Behältervolumen und -gestalt (V , H/D -Verhältnis);
- Art der explosionsfähigen Substanz (gasförmig oder staubförmig) und deren Mischungsverhältnis mit Luft (Stöchiometrie) (\rightarrow laminare Brenngeschwindigkeit);
- Strömungs- bzw. Turbulenzzustand des Gemisches zum Zündzeitpunkt;
- Zündort im Behältervolumen;
- Entlastungsquerschnitt A_E ;
- Ansprechdruck $p_{a,ges}$ für die Freigabe des Entlastungsquerschnittes;
- maximale, konstruktiv begrenzte Abhebehöhe h des Entlastungsdeckels bzw. maximaler Öffnungswinkel θ der Entlastungsklappe;
- Entlastungselementmasse M_E oder auf die Entlastungsfläche A_E bezogene Masse $m_E = M_E/A_E$;
- Anzahl der Entlastungsöffnungen n ; und (äquivalentes) Durchmessermaß

$$d_E = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{A_E}{n}} \quad (3.9)$$

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 den jeweiligen Behältern, z.B. auf der Behälterachse in $H/4$ vom Boden o. dgl.;
- (3) zumindest näherungsweise gleiche maximale Enddrücke p_{\max} (wesentlich im Bereich 9 - 11 bar) der adiabaten Gemischexplosionen in geschlossenen Systemen (ohne Entlastung);
- (4) Existenz einer Flammenfront mit reaktionskinetik- und turbulenzabhängiger Brenngeschwindigkeit;
- (5) näherungsweise gleiche Druck- und Temperaturabhängigkeit der Brenngeschwindigkeit der Gemische;
- (6) identischer Verlauf des Turbulenzfaktors der Brenngeschwindigkeit über der reduzierten Zeit;
- (7) gleicher vorgegebener Entlastungs-Ansprechdruck p_a ;
- (8) gleicher Zeitverhältnisparameter $t_{\text{Aus}}/t_{\text{Reak}}$;
- (9) gleiche relative maximale Platten-Abhebehöhe h/d_E bzw. gleicher maximaler Klappenöffnungswinkel θ ;
- (10) gleicher Zeitverhältnisparameter t_E/t_{Aus} .

Die o. g. charakteristischen Zeitmaße t_E , t_{Aus} und t_{Reak} sind auf Grund theoretischer dimensionsanalytischer Ansätze wie folgt definiert:

$$t_{\text{Reak}} = C_1 \cdot \frac{V^{1/3}}{\Lambda_{\text{eff}}} \quad \text{mit:} \quad \bar{\Lambda}_{\text{eff}} \sim K_{G/\text{St}} (1 \text{ m}^3) \cdot V^{1/6} \quad (3.10)$$

t_{Reak} ist die charakteristische Reaktionszeit, die bis zum vollständigen Umsatz des im Behälter vorhandenen Frischgemisches benötigt wird, 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.

$$t_{\text{Aus}} = C_2 \cdot \frac{\rho_0 V}{A_E \rho_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p_{\text{red}}}{\rho_0}}} = C_2 \cdot \frac{V}{A_E} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{2 \cdot p_{\text{red}}}} = C_2^* \cdot \frac{V}{A_E} \quad (3.11)$$

t_{Aus} ist die charakteristische Ausströmzeit für den Entlastungsvorgang.

$$t_E = \sqrt{\frac{m_E \cdot h}{C_3 \cdot p_{\text{red}}}} = \sqrt{\frac{m_E \cdot \frac{h}{d_E} \cdot d_E}{C_3 \cdot p_{\text{red}}}} = \sqrt{\frac{m_E \cdot \frac{h}{d_E} \cdot \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{A_E}{n}}}{C_3 \cdot p_{\text{red}}}} = C_3^* \cdot m_E^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{A_E}{n}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.12)$$

t_E ist die charakteristische Öffnungszeit des Entlastungselementes (hier: Deckel) bis zum Erreichen der Höhe h .

Unter den Ähnlichkeitsbedingungen (1) bis (10) werden ähnliche, d. h. nur im Druckverlaufs-Zeitmaßstab unterschiedliche Druck/Zeit-Verläufe träge entlasteter Explosionen erhalten. Hält man die Bedingungen (1) bis (6) und (9) ein, variiert jedoch die Zeitverhältnisparameter $t_{\text{Aus}}/t_{\text{Reak}}$ und t_E/t_{Aus} unabhängig voneinander, so erhält man im Prinzip eine zweidimensionale Schar normierter Druck/Zeit-Verläufe. Der normierte maximale Explosionsüberdruck 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 Variation von V , A_E , $K_{\text{G/St}}$, m_E , n angelegt sind, konstruieren. Es gilt für einen konstanten H/D -Wert und konstante Turbulenzanfangsbedingung sowie jeweils ähnlich gelegene Zündorte im Silobehälter.

Da anwendungsmethodisch letztlich der Betrag der Entlastungsfläche A_E bestimmt werden soll, ist es allerdings ungeschickt, daß A_E in den beiden Kennzahlen enthalten ist. Daher erfolgt eine Transformation der Kurve $p_{\text{red}} = \text{konst.}$ in eine Diagrammdarstellung mit der Abszisse (welche A_E enthält):

$$\frac{t_{\text{Aus}}}{t_{\text{Reak}}} = \frac{V^{\frac{5}{6}} \cdot K_{\text{G/St}} (1 \text{ m}^3)}{A_E} = K_p \quad (3.13)$$

und der Ordinate (in der A_E nicht auftritt);

$$\frac{t_E}{t_{Aus}} \cdot \left(\frac{t_{Aus}}{t_{Reak}} \right)^{\frac{5}{4}} = \frac{m_E^{\frac{1}{2}} \cdot K_{G/St}^{\frac{5}{4}} (1 \text{ m}^3) \cdot V^{\frac{1}{24}}}{n^{\frac{1}{4}}} = K_m \quad (3.14)$$

Um eine Auffangvorrichtung für ein im Fall einer Explosion sich bewegendes Entlastungselement zu konstruieren, muß dessen Geschwindigkeit, sein Impuls oder seine kinetische Energie bekannt sein. Vorstellbar ist das Auffangen des Deckels in einer Höhe $h/d_E = 0,25$, $h/d_E = 0,5$ oder $h/d_E = 1,0$ bzw. der Klappe bei einem Winkel $\theta = 90^\circ$. Aus einer Energieerhaltungsbetrachtung des sich bewegenden Entlastungselementes werden die zur Deckelgeschwindigkeit v bzw. zur Winkelgeschwindigkeit $\omega = \dot{\theta}$ der Klappe proportionalen Parameter

$$K_v = v \cdot \left(\frac{m_E}{p_{red}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{n}{A_E} \right)^{\frac{1}{4}} \quad \text{bzw.} \quad K_\omega = \omega \cdot \left(\frac{m_E}{p_{red}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{A_E}{n} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.15)$$

hergeleitet. Für praktische Anwendungen bedeutet dies, daß aus einem zweiten Diagramm der Parameter K_v bzw. K_ω und aus diesen die gesuchte Deckel- bzw. Klappengeschwindigkeit ermittelt werden kann.

3.2 Parameterstudien – Vergleiche mit bestehenden Ansätzen

Das in Abschnitt 3.1 vorgestellte Verfahren, das gleichzeitig im Anhang A: "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. Tabelle 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 entsprechen Entlastungsvorgaben, die auf der sicheren Seite liegen. Daraus folgt, daß die Bemessungsdiagramme nicht noch einmal zusätzliche Sicherheitsfaktoren enthalten 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 Masivbau und Baustofftechnologie durchgeführt wurde (vgl. [28]). Es zeigte sich, daß einzig die VDI-Richtlinie 3673, der NFPA-Code 68 und die Richtlinie selbst in den meisten Fällen zutreffende Ergebnisse lieferten. Weitere Vergleiche sind im Anhang B aufgestellt.

Über den Einfluß der Massenträgheit der Entlastungsvorrichtungen läßt sich hier allerdings keine Aussage treffen, da bei den meisten Versuchsreihen und Bemessungskonzepten dieser Einfluß nicht berücksichtigt wurde. In der Praxis sind jedoch die meisten Entlastungskonstruktionen trägheitsbehaftet, weshalb dieser Einfluß eine wesentliche Rolle bei der Auslegung von Siloanlagen spielt. Darum wurde in [23], [24], [26] der Einfluß der Massenträgheit noch näher untersucht. Dieser Einfluß ist in der VDI-Richtlinie jedoch nur teilweise berücksichtigt, so daß für die Bemessung von trägheitsbehafteten Entlastungskonstruktionen eigentlich nur der Bemessungsvorschlag aus der Richtlinie in Frage kommt.

Ein weiterer Unterschied zur VDI-Richtlinie betrifft die Volumenabhängigkeit. In der VDI-Richtlinie steigt die Entlastungsfläche unter anderem mit $V^{0,767}$ an, hingegen bei der Richtlinie mit $V^{0,833}$. Zu erwähnen ist, daß der Ansatz der VDI-Richtlinie auf experimentellen Ergebnisse zurück geht, während der Ansatz dieser Richtlinie auf theoretischen Überlegungen basiert und über einen wesentlich größeren Variationsbereich des Silovolumens V gilt.

Ursprünglich war in der Richtlinie eine getrennte Bemessung für Lagergebäude und vergleichbare Räume vorhanden. Diese Bemessung wurde vom NFPA-Code 68, Ausgabe 1988 [43] übernommen. Dort werden zwei Bemessungskonzepte für die Dimensionierung von zu entlastenden Räumen vorgestellt. Dabei wird zwischen hoch- und niederfesten Umschließun-

gen 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:

$$A_E = \frac{C \cdot A_i}{\sqrt{p_{red}}} \quad (3.16)$$

mit: A_E = Entlastungsfläche [m²]
 C = Konstante (siehe [43]) [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 stellte sich heraus, daß bei niedrigen Drücken, wie sie bei Lagergebäuden und Betriebsräumen von Siloanlagen vorkommen, keine größere 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, zu überlagern.

Die Untersuchung dieser Einflüsse wurde hier auf zwei wesentliche Lastfälle, die Schüttgutlast und die Last aus Staubexplosion, beschränkt, da diese sich 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 vorliegen. Während des Silobetriebs wird jedoch der Füllungsgrad des Silos ständig schwanken, d. h. es liegen meist Teilfüllungszustände vor, und somit kann nur im restlichen "leeren" Volumen eine Staubexplosion stattfinden. Die Teilfüllungszustände können dann unter Umständen maßgebend für die Bemessung sein und müssen untersucht werden. Außerdem besteht die Gefahr einer Sekundärzündung innerhalb der Silozelle, die zu einer weiteren Druckerhöhung führt. Diese Möglichkeit liegt außerhalb des Anwendungsbereichs der Richtlinie und kann mit einem verbleibenden Restrisiko möglicherweise abgedeckt werden.

Für diese Untersuchung wurde der Ansatz von Janssen [37] so modifiziert, daß solche Teilfüllungszustände betrachtet werden können (vgl. Anhang B).

$$\begin{aligned}
p_v(z) &= \gamma \cdot z_0 \cdot s(z) && ; z \geq 0 \\
&= p_{\text{red}} && ; z < 0 \\
p_h(z) &= \gamma \cdot \lambda \cdot z_0 \cdot s(z) && ; z \geq 0 \\
&= p_{\text{red}} && ; z < 0 \\
p_w(z) &= \gamma \cdot \lambda \cdot \mu_w \cdot z_0 \cdot s(z) && ; z \geq 0 \\
&= 0 && ; z < 0
\end{aligned} \tag{3.17}$$

mit:

$$\begin{aligned}
s(z) &= 1 - \left(1 - \frac{p_{\text{red}}}{\gamma \cdot z_0} \right) \cdot e^{-\frac{z}{z_0}} \\
z_0 &= \frac{A}{\lambda \cdot \mu_w \cdot U}
\end{aligned} \tag{3.18}$$

In dieser Gleichung sind auch die beiden Grenzfälle

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

enthalten. Im Anhang B wird die Untersuchung von Teilfüllungszuständen anhand eines Beispiels 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, raumabschließende Bauteile gegen dem maximalen Explosionsdruck p_{max} von ca. 9 bis 12 bar auszulegen, ist wegen der kaum zu erzielenden Wirtschaftlichkeit und des großen Aufwandes nur in Einzelfällen und bei relativ kleinem Volumen sinnvoll.

Deshalb wird in der 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 Teilzonen der Umgebung Auswirkungen haben, die von Personen wenig frequentiert werden.

Für Entlastungseinrichtungen können 3 mechanische Grundprinzipien angewendet werden (vgl. Anhang B). 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 umzu-

leiten. Die Rohre/Kanäle sollten jedoch möglichst kurz gehalten werden, um einen Druckaufbau zu vermeiden.

Ist die Art der Entlastungskonstruktion festgelegt, so kann der Bemessungsdruck für die raumabschließenden Bauteile und die notwendige Entlastungsfläche mit den Nomogrammen aus der Richtlinie gefunden werden. Das jetzt noch anstehende Problem ist die Dimensionierung der Rückhaltekonstruktion für den Deckel 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 [25] 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 in Beispiel 1 aus Anhang B der Fall ist. In diesem Fall liegt die Lösung auf der sicheren Seite, weil die anderen Systemverformungen die Schnittkräfte noch reduzieren würden. Die Vorgehensweise kann dann analog zu diesem Beispiel erfolgen. Das Beispiel wurde zwar nur an einem Deckelsystem durchgeführt, die Methode ist jedoch auch ohne weiteres auf eine Klappe übertragbar. Zu beachten ist dennoch, daß der Anprallpunkt der Klappe nicht mit deren Massenschwerpunkt identisch sein muß. Auf Grund dieser Exzentrizität werden zusätzlich Biegemomente in der Klappe und Kräfte auf die Klappenangel hervorgerufen.

Im Falle einer seitlichen Entlastung muß ergänzend zu dem Druck p_{red} die Rückstoßkraft F_R nach Gleichung (10) aus der Richtlinie berücksichtigt werden. Sie ist mit Ihrer entsprechenden Wirkungsrichtung (parallel zur Ausströmrichtung) in der Mitte der einzelnen Entlastungsöffnungen anzusetzen.

Erklärung der in diesem Kapitel benutzten Formelzeichen

• Lateinische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Fläche
b	m	Breite der Entlastungsklappe (senkrecht zur Drehachse)
c	kg/s^2	Federkonstante
C	–	Konstante
c_v	$J/(kg \cdot K)$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen
d_E	m	Durchmesser der Entlastungsöffnung
D	m	Durchmesser des Silos
F	N	Trägheitskraft
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
G	N	Gewichtskraft
h	m	Abhebehöhe des Entlastungsdeckels
H	m	Höhe des Silos
H	J/kg	Reaktionsenthalpie
K_G, K_{St}	bar·m/s	Explosionskennwert für Gas (Index G) oder Staub (Index St)
K_p, K_m, K_v, K_ω		Parameter
l	m	Länge der Entlastungsklappe (parallel zur Drehachse)
m	kg/m^2	flächenspezifische Masse
M	kg	Masse
n	–	Anzahl der Entlastungselemente
p	Pa	Druck
p_a	Pa	Ansprechdruck des Entlastungselementes
p_h	kN/m^2	Horizontallast
p_v	kN/m^2	Vertikallast
p_w	kN/m^2	Wandreibungslast
P	N	Druckkraft
R	$J/(kg \cdot K)$	Gaskonstante
t	s	Zeit
T	K	Temperatur
u_E	m/s	Ausströmgeschwindigkeit
U	m	innerer Umfang der Silozelle
v	m/s	Deckelgeschwindigkeit
V	m^3	Volumen
y	m	Lauflänge der Deckelbewegung
z	m	Kartesische Koordinate in Höhenrichtung

• Griechische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
α	–	Durchflußkoeffizient
γ	kN/m ³	Wichte des Siloguts
θ	rad	Winkelgröße
$\dot{\theta}$	rad/s	Winkelgeschwindigkeit
$\ddot{\theta}$	rad/s ²	Winkelbeschleunigung
κ	–	Isentropenexponent
λ	–	Horizontallastverhältnis p_h/p_v
Λ	m/s	Brenngeschwindigkeit
μ_w	–	Wandreibungsbeiwert p_w/p_h
ρ	kg/m ³	Dichte
ω	rad/s	Winkelgeschwindigkeit

Tiefgestellt

aus	außen
A	Ausströmung
d	dämpfend
eff	effektiv
E	Entlastung, Entlastungselement
FF	Flammenfront
Fg	Frischgas
ges	gesamt
G	Gas
in	innen
L	Luft
max	maximal
r	radial
Reak	Reaktion
red	reduzierter
Rg	Rauchgas
St	Staub
t	tangential

Hochgestellt

* modifiziert
- gemittelt

4 Literaturverzeichnis

- [1] **Bartknecht, W.** Bericht über Untersuchungen zur Frage der Explosionsdruckentlastung brennender Stäube. Staub - Reinhaltung der Luft, 1974
- [2] **Bartknecht, W.** Ablauf von Staubexplosionen in einem druckentlasteten Kleinsilo. Ciba Geigy A.G., Fachgruppe Explosionstechnik, Januar 1981
- [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.** Druckentlastung von Staubexplosionen in Großbehältern. Schriftenreihe: Humanisierung des Arbeitslebens, Band 78, VDI-Verlag, 1986
- [5] **Bartknecht, W.** Staubexplosionen Ablauf und Schutzmaßnahmen, Springer-Verlag Berlin, 1987
- [6] **Beck, H., Jeske, A.** Dokumentation Staubexplosion, BIA-Report 4/82, 1982
- [7] **Beck, H., Jeske, A.** Dokumentation Staubexplosion, BIA-Report 2/87, 1987
- [8] **Beck, H., Jeske, A.** Dokumentation Staubexplosion, BIA-Report 11/97, 1997
- [9] **Bradley, D., Mitcheson, A.** The Venting of Gaseous Explosions in Spherical Vessels. I-Theory. Comb. and Flame 32, S. 221-236, 1978

- [10] **Bradley, D., Mitcheson, A.** The Venting of Gaseous Explosions in Spherical Vessels. II-Theory. Comb. and Flame 32, S. 221-236 1978
- [11] **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
- [12] **Canu, P., Rota, R. Carra, S., Morbidelli, M.** Vented Gas Deflagration Modeling: A Simplified Approach. Comb. and Flame 85, S. 319-330, 1991
- [13] **Cashdollar, K L., Hertzberg, M.** Industrial Dust Explosions, Symposium on Industrial Dust Explosions ASTM, Pittsburgh, Pennsylvania, 10-13 June 1986
- [14] **Cooper, G., Fairweather, M. Morbidelli, M,** On the Mechanisms of Pressure Generation in Vented Explosions. Comb. and Flame 65, S 1-14, 1986
- [15] **Donat, C.** Auswahl und Bemessung von Druckentlastungseinrichtungen für Staubexplosionen . Staub-Reinhaltung der Luft 31, 1971
- [16] **Eckhoff, R. K. Fuhre, K. et. al.** Maize Starch Explosion Experiments in a Vented 500 m³ Storage Bin. Report CMI No. 823307-1, Bergen, Norwegen, 1983
- [17] **Eckhoff, R. K.** Relevance of Using $(dP/dt)_{max}$ Data from Laboratory Scale Tests for Predicting Explosion Rates in Practical Industrial Situations. inVDI-Kommission Reinhaltung der Luft: Sichere Handhabung brennbarer Stäube, Kolloquium, Nürnberg, 1983
- [18] **Eckhoff, R. K. Fuhre, K. et. al.** Dust Explosion Experiments in a Vented 500 m³ Silo Cell. Journal of Occupational Accidents 6, pp. 2 229-240,1984

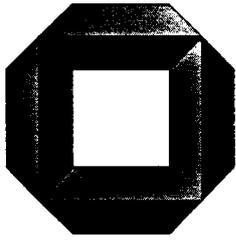
- [19] **Eckhoff, R. K.**
Fuhre, K., Alfert, F.
Pederson, G. H. Sizing Dust Explosion Vents - The Need for an new Approach based on Risk Assessment. Bulk and Solids Handling 6, 1986
- [20] **Eckhoff, R. K.** A Differentiated Approach to Sizing of Dust Explosion Vents: Influence of Ignition Source Location with Particular Reference to Large Slender Silos. in Cashdollar, K. L., Herzberg, M, (ed.), Industrial Dust Explosions, ASTM STP958, Philadelphia, pp. 265-280, 1987
- [21] **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
- [22] **Eibl, J., Block, K.** Staubexplosionen in einem druckentlasteten Silo aus Stahlbeton. Abschlußbericht, Karlsruhe, 1983
- [23] **Eibl, J. , Leuckel, W.** Experimentelle Studien an einer Versuchssiloanlage zur Druckentlastung von Staubexplosionen. Kurzbericht zu Teilprojekt C5, SFB 219, Arbeits- und Ergebnisbericht für die Jahre 1987-1989, Karlsruhe, 1990
- [24] **Eibl, J. , Leuckel, W.** Experimentelle Studien an einer Versuchssiloanlage zur Druckentlastung von Staubexplosionen. Kurzbericht zu Teilprojekt C5, SFB 219, Arbeits- und Ergebnisbericht für die Jahre 1990-1992, Karlsruhe, 1993
- [25] **Eibl, J., Henseleit, O.**
Schlüter, F.-H. Baudynamik. Beton-Kalender 1988, Teil II S. 665-774

- [26] **Eibl, J., Leuckel, W.** Bautechnische Maßnahmen zur Schadensminderung bei Staubexplosionen Abschlußbericht IV 1-5-605/90, Institut für Bautechnik, Berlin, 1993
- [27] **Eibl, J., Nasr, T., Leuckel, W., Höchst, S.** Experimentelle Studien an einer Versuchssiloplanlage zur Druckentlastung von Staubexplosionen, Abschlußbericht des SFB 219 C5, im Druck, Wiley-Verlag
- [28] **Ewen, M.** Analyse der Belastung eines Silos infolge von Explosionsbeanspruchung. Diplomarbeit, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1992
- [29] **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
- [30] **Gerold, E.** Explosionsversuche in Rechteck- und Rundsilozellen. VDI-Berichte 494, S. 199-206, 1984
- [31] **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
- [32] **Harmany, A.** Einfluß der Massenträgheitskräfte auf die Entlastungsfähigkeit von Explosionsklappen. VDI-Berichte Nr. 975, S. 273-284, 1992
- [33] **Heinrich, H. J.** Ergebnisse neuerer Untersuchungen zur Druckentlastung bei Staubexplosionen. Staub-Reinhaltung der Luft 31, 1971

- [34] **Heinrich, H. J.** Bemessung von Druckentlastungsöffnungen zum Schutz explosionsgefährdeter Anlagen in der chemischen Industrie. Chemie Ingenieur 38, S. 1125-1133, 1966
- [35] **Heinrich, H. J.** Über die Dimensionierung von Druckentlastungsöffnungen bei Gas- und Staubexplosionen. Amts- und Mitteilungsblatt der BAM 1, Nr. 5, 1970/71
- [36] **Höchst, S.** Untersuchungen zur Druckentlastung großer Behälter beim deflagrativen Abbrand von Brenngas/Luft- und Brennstaub/Luft-Gemischen, Dissertation Universität Karlsruhe, 1997
- [37] **Janssen, H. A.** Versuche über Getreidedruck in Silozellen. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, Bd. 39, No. 35, S. 1045-1049, 1895
- [38] **Karlovitz, B. , Wells, F. E.,** Investigation of Turbulent Flames, Journal of Chem. **Denniston, D. W.** Physics 19, No. 5, S. 541-547, 1951
- [39] **Leisenheimer, B.** Zum Ausbreitungsverhalten von Deflagrationsfronten in laminaren und turbulenten Brenngas/Luft-Gemischen innerhalb geschlossener Behälter, Dissertation Universität Karlsruhe, 1997
- [40] **Matusêk, Z.** Problematik der Staubexplosionen und Maßnahmen **Stroch, V.** gegen Explosionsgefahren in Großraumbunkern für Schüttgut. Staub-Reinhaltung der Luft 40, S. 503-510, 1980
- [41] **Nagy, J** Development, and Control of Dust Explosions. C **Verakis, H. C.** Chap. 6, Marcel Dekker Inc., New York/Basel, 1983

- [42] **Nasr, T.** Druckentlastung bei Staubexplosionen in Siloanlagen, Dissertation Universität Karlsruhe, in Vorbereitung
- [43] **NFPA** Guide for Venting of Deflagrations. NFPA-Code 68, National Fire Protection Association, 1988 Edition, 1988
- [44] **Radandt, S.**
Vogl, A.
Zockoll, C. Explosionsabläufe in Rohrleitungen in Abhängigkeit von Betriebsparametern. SYMPOSIUM 18, Fachheftreihe der Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten, 1989
- [45] **Radandt, S.** Einfluß von Betriebsparametern auf Explosionsabläufe in Silozellen. VDI-Berichte 701, Band 2, 1988
- [46] **Rust, E. A.** Explosion Venting for low Pressure Equipment. Chem. Eng. 5, 1979
- [47] **Schwab, R. F.**
Othmer, D. F. Dust Explosions. Chemical and Process Engineering, April 1964
- [48] **Scurlock, A. C.,**
Grover, J. H. Propagation of Turbulent Flames, 4. Symp. (Int.) on Combustion, S. 645-658, 1952
- [49] **Speaks, W.**
Wartes, J. A. Zeitbombe Getreidesilo. Schadenspiegel 20, S. 13-18, 1977
- [50] **VDI 2263** Druckentlastung von Staubexplosion, Beuth-Verlag GmbH Berlin/Köln, 1990
- [51] **VDI 3673** Druckentlastung von Staubexplosion, Beuth-Verlag GmbH Berlin/Köln, 1995

- [52] **Zhen, G.** Zum Einfluß strahlinduzierter Turbulenz auf die instationäre Flammenausbreitung bei Gas- und Staubexplosionen in geschlossenen Behältern, Dissertation Universität Karlsruhe, 1998



Massivbau
Baustofftechnologie
Karlsruhe

Arbeitstitel: Anhang A

**Richtlinie zur Auslegung von Siloanlagen gegen
Staubexplosionen**

Stand: November 1999

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Abteilung Massivbau
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. techn. h. c. J. Eibl a. D.

Engler-Bunte-Institut
Bereich Feuerungstechnik
Prof. Dr.-Ing. W. Leuckel a. D.

Universität Karlsruhe
1999

Anhang A: Richtlinie zur Auslegung von Siloanlagen gegen Staubexplosionen

- (1) Dieser Anhang gibt Regelungen für die Bemessung von Silos unter der Einwirkung von Staubexplosionen. Diese Regelungen ergänzen die Vorschriften zur Bestimmung der Einwirkungen aus Staubexplosionen auf Baukonstruktionen in ENV 1991 und können später in ENV 1991-2-4 übernommen werden.
- (2) Dieser Anhang gilt für alle Siloanlagen und vergleichbare Anlagen, bei deren Betrieb brenn- und explosionsfähige, nichttoxische Stäube bearbeitet oder gelagert werden oder als Abfall in größerer Menge anfallen.
- (3) Dieser Anhang gilt nicht für Anlagenteile, in denen durch gezielte Maßnahmen Explosionen ausgeschlossen werden.
- (4) Für die Nachrüstung bestehender Anlagen kann dieser Anhang sinngemäß angewendet werden. Dabei ist der tatsächliche Zustand der Anlage zu berücksichtigen und nicht der Planungszustand. Im Zweifelsfall ist eine sachkundige Beratung einzuholen.
- (5) Dieser Anhang soll die schädlichen Auswirkungen von Staubexplosionen in Siloanlagen durch bauliche Maßnahmen minimieren.

A 1 Mitgeltende Richtlinien und Bestimmungen

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

- ZH1/10 Explosionsschutz-Regeln (EX-RL)
der BG Chemie 1998
- VGB 112 Silos und Bunker
Unfallverhütungsvorschrift
- DIN 1055 Lastannahmen für Bauten
Teil 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
- DIN EN 26184 6/91 Explosionsschutzsysteme
- DIN EN 1127, Explosionsfähige Atmosphären - Explosionsschutz - Teil 1:
Grundlagen und Methodik

- DIN VDE 0165/9.83
Errichten elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen (VDE-Bestimmung)
- DIN VDE 0170/0171, Teil 1/5.78
Vorschriften für schlagwettergeschützte elektrische Betriebsmittel
- ZH1/200, Richtlinien für die Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen, 1989
- DIN EN 50014, Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche: Allgemeine Bestimmungen
- VDE 0170/0171 Teil 13
Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche: Anforderungen für Betriebsmittel in Zone 10
- ElexV, Verordnung über elektrische Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen, 1996
- 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 (12.VO zum BImSchG)
- Explosionsschutzverordnung
11.VO zum GSG: Verordnung über das Inverkehrbringen von Geräten und Schutzsystemen für explosionsgefährdete Bereiche

A 2 Explosionsfähige Stäube und ihre Kennwerte

- (1) 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 eines Staubes exotherm mit Sauerstoff reagieren und damit eine rasch fortschreitende Reaktion ermöglichen.
- (2) Die Kennwerte für das Explosionsverhalten eines Staubes sind
 - der Staubkennwert K_{St} ; dem entspricht die maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit dp/dt , und
 - der maximale Explosionsüberdruck p_{max} .

Beide Kennwerte sind nach genormten Verfahren bestimmt (vergleiche ISO 6184/1 bzw. DIN EN 26184, Teil 1 oder VDI Richtlinie 2263).

- (3) Die **wichtigsten** explosionsfähigen Staubarten und die zugehörigen Bemessungswerte K_{St} und p_{max} sind in Tabelle A.1 angegeben.

Staubart	K_{St} -Wert [bar·m/s]	p_{max} (Überdruck) [bar]
Aluminiumpulver	1100	13.0
Braunkohle ¹	63	4.3
Cellulose	66-229	9.0
Erbsenmehl	107	7.6
Flugasche	35	1.9
Futtermittel, Kraftfutter- gemische	68	4.9
Gerste	83	7.7
Getreidemehl	130	9.0
Gummi	138	8.5
Harz	240	10.0
Holz, Holzmehl	220	10.0
Kaffee	90	9.0
Kartoffelmehl	69	9.1
Kohle (1) ²	85	6.5
Kohle (2) ³	115	8.8
Koks	146	8.2
Maismehl	127	6.7
Maisstärke (getrockn.)	210	10.0
Milchpulver	160	9.0
Papier	60	9.0
Pigmente	290	10.0
Sojaschrot	47	7.2
Sojamehl	120	9.0
Steinkohle	80	8.4
Weizenmehl	100	8.3
Waschmittel	270	9.0
Zucker	150	9.0

Tabelle A.1: Explosionsfähige Stäube – Bemessungswerte

¹ Medianwert = 55 µm

² Medianwert < 10 µm

³ Medianwert = 5 µm

- (4) 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.

A 3 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,
- Selbstzündung durch elektrostatische Entladung.

A 4 Schutzmaßnahmen

- (1) Die Verminderung der Schäden infolge einer Staubexplosion wird durch räumliche Begrenzung der Explosion und durch 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 den größten reduzierten Explosionsüberdruck p_{red} bzw. $p_{red,ges}$
- bemessen werden.
- (2) Der durch eine Entlastungsöffnung austretende Feuerstrahl darf weder zu einer Beeinträchtigung der Umgebung führen noch die Explosion in einen anderen Explosionsabschnitt weiterleiten. Auch dürfen Menschen durch Splitter von Scheiben oder anderen Bauteilen nicht 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.

- (3) 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.
- (4) 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.

A 5 Ermittlung des Bemessungsdruckes $p_{red,ges}$

- (1) Die Größe des Bemessungsdruckes $p_{red,ges}$ 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.
- (2) Sofern kein anderer Nachweis geführt wird, kann der Bemessungsdruck mit Hilfe des Bemessungsverfahrens in Abschnitt A 8 ermittelt werden.

A 6 Bemessung der Bauteile

Die Bemessung der betroffenen Bauteile ist nach den Regeln für Katastrophenlastfälle, d. h. mit einem Lastsicherheitsbeiwert von 1.0 durchzuführen (nach Eurocode, z. B. EC-2, EC-3 oder CEB-FIB Model Code 1990).

A 6.1 Bemessung für den Explosionsüberdruck

- (1) Für den Bemessungsdruck sind alle tragenden und raumabschließenden Bauteile eines Explosionsabschnittes auszulegen.
- (2) Im druckentlasteten Silo tritt der größte reduzierte Explosionsüberdruck p_{red} bzw. $p_{red,ges}$ bei "geleertem" Silo auf.

A 6.2 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.

A 6.3 Sicherung der Abschlußelemente der Entlastungsöffnungen

- (1) Alle Abschlußelemente sind gegen Wegfliegen infolge des Explosionsdruckes zu sichern, z. B. Klappen durch Gelenke, Deckel durch eine Auffangkonstruktion, Seile o. ä. Befestigungen.
- (2) Die Geschwindigkeiten der bewegten Abschlußelemente zur Ermittlung der Verankerungskräfte können mit dem Berechnungsverfahren in Abschnitt A 8.7 ermittelt werden.

A 6.4 Rückstoßkräfte

Bei der Druckentlastung treten Rückstoßkräfte auf, die gegebenenfalls beim Standsicherheitsnachweis berücksichtigt werden müssen, insbesondere bei leichten Konstruktionen mit horizontalen und unsymmetrisch über den Querschnitt verteilten Entlastungsöffnungen. Die Rückstoßkraft kann nach den Angaben in Abschnitt A 8.6 ermittelt werden.

A 7 Ansätze in besonders gefährdeten Gebieten

Wenn über diese angegebenen Berechnungsverfahren hinausgegangen werden soll oder besondere bauliche Gegebenheiten zu berücksichtigen sind, wie z. B. bezüglich Bauten in Wohngebieten, so sind Sonderüberlegungen in Abstimmung mit den Genehmigungsbehörden durchzuführen.

A 8 Bemessungsverfahren der Staubexplosionen

A 8.1 Gültigkeitsbereich

- (1) Das Bemessungsverfahren für Druckentlastungssysteme bei Staubexplosionen in Siloanlagen gilt:
 - für trägheitsfreie Entlastungen; diese geben sofort bei Erreichen des Ansprechdruckes den Entlastungsquerschnitt frei.
 - für trägheitsbehaftete Deckel; sie heben senkrecht zu ihrer Fläche ab und müssen in einer bestimmten Höhe abgefangen werden.
 - für trägheitsbehaftete Klappenkonstruktionen; sie müssen nach einem bestimmten Rotationswinkel abgefangen werden.
- (2) Unter folgenden Bedingungen ist das Bemessungsverfahren anwendbar:
 - $p_{\max} \leq 10 \text{ bar}$

- 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: $1 \leq H/D \leq 14$
- $p_{a,ges} \leq 0,1 \text{ bar}$ ($m_E \cdot g + \Delta p_{Festh.}$)
- $m_E \leq 500 \text{ kg/m}^2$

(3) Für andere Bedingungen ist eine geeignete fachspezifische Beratung notwendig.

A 8.2 Formeln und Zeichen

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

$$K_p = \frac{V^{\frac{5}{6}} \cdot K_{St}}{A_E} \quad (1)$$

$$K_m = \frac{m_E^{\frac{1}{2}} \cdot K_{St}^{\frac{5}{4}} \cdot V^{\frac{1}{24}}}{n^{\frac{1}{4}}} \quad (2)$$

$$K_v = v \cdot \left(\frac{m_E}{p_{red}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{n}{A_E} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

$$K_\omega = \omega \cdot \left(\frac{m_E}{p_{red}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{A_E}{n} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

$$m_E = \frac{M_E}{A_E} \quad (5)$$

$$A_E = n \cdot A_{E,i} \quad (6)$$

$$p_a = m_E \cdot g \quad (7)$$

$$p_{a,ges} = p_a + \Delta p_{Festh.} \quad (8)$$

$$p_{red,ges} = p_{red} + \Delta p_{Festh.} \quad (9)$$

$$F_R = 0,15 \cdot p_{red} \cdot A_{E,i} \quad (10)$$

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	m ²	Querschnittsfläche einer Silozelle
A _E	m ²	erforderliche Gesamtfläche der Entlastungsöffnungen
A _{E,i}	m ²	Fläche der einzelnen Entlastungsöffnungen
d _E	m	Durchmesser einer kreisförmigen Entlastungsöffnung; bei nicht kreisförmiger Entlastungsöffnung ist der Ersatzdurchmesser d _E [*] zur Bestimmung des h/d _E -Verhältnisses einzusetzen.
d _E [*]	m	Ersatzdurchmesser bei nicht kreisförmiger Entlastungsöffnung, gleich $0,9 \cdot \sqrt{4 \cdot A_{E,i} / \pi}$, wobei A _{E,i} die Querschnittsfläche der nicht kreisförmigen Entlastungsöffnung ist.
D	m	Innendurchmesser einer zylindrischen Zelle; bei nicht zylindrischer Zelle ist der Ersatzdurchmesser D [*] zur Bestimmung des H/D-Verhältnisses einzusetzen.
D [*]	m	Ersatzdurchmesser bei nicht zylindrischer Zelle, gleich $0,9 \cdot \sqrt{4 \cdot A / \pi}$, wobei A die Querschnittsfläche der Silozelle bzw. die Fläche aus den beiden kleineren Abmessungen eines Raumes ist (A = L ₂ · L ₃ , L ₁ ≥ L ₂ ≥ L ₃) mit der Bedingung L ₂ ≤ 3 · L ₃ ; ansonsten D [*] = L ₃
F _R	MN	bei seitlichen Entlastungsvorrichtungen auf Behälter wirkende Rückstoßkraft
h	m	Flughöhe der Platte bzw. des Deckels
H	m	Höhe der zu entlastenden Silozelle bzw. größte Abmessung des zu entlastenden Raumes L ₁
K _m	$\text{kg}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{bar}^{\frac{5}{4}} \cdot \text{m}^{\frac{3}{8}} / \text{s}^{\frac{5}{4}}$	in den Nomogrammen aufgeführter Parameter
K _p	$\text{m}^{\frac{3}{2}} \cdot \text{bar} / \text{s}$	in den Nomogrammen aufgeführter Parameter

K_{St}	bar · m/s	aus einem 1 m ³ -Versuchsbehälter gewonnener Staubkennwert
K_v	$\text{kg}^{\frac{1}{2}} / \left(\text{bar}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s} \right)$	Parameter zur Bestimmung der Deckelgeschwindigkeit
K_{ω}	$\text{kg}^{\frac{1}{2}} / \left(\text{bar}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s} \right)$	Parameter zur Bestimmung der Winkelgeschwindigkeit von Entlastungsklappen
M_E	kg	Masse des Entlastungselements
m_E	kg/m ²	auf Entlastungsfläche bezogene Masse des Entlastungselements
n	-	Anzahl der Entlastungsöffnungen (der lichte Abstand der Entlastungsöffnungen muß mindestens d_E betragen, damit sie als getrennte Entlastungsöffnungen betrachtet werden können)
p_a	bar	Ansprechdruck der Entlastungsvorrichtung aufgrund der Gravitationskräfte ($m_E \cdot g$). Relevanter Ansprechdruck für die in Abschnitt A 9 aufgeführten Nomo-gramme
$p_{a,ges}$	bar	Im Falle von Festhaltekräften am Entlastungselement setzt sich der Ansprechdruck aus den Gravitationskräften der Entlastungsvorrichtung und den Festhaltekräften, wie z. B. Reibungs-, Federkräften ($\Delta p_{Festh.}$) zusammen. Die Festhaltekräfte dürfen nach dem Ansprechen des Entlastungssystems nicht mehr wirken.
$\Delta p_{Festh.}$	bar	Erhöhung des Ansprechdrucks der Festhaltevorrichtung aufgrund von Festhaltekräften
p_{red}	bar	aus den Diagrammen von Abschnitt A 9 entnommener reduzierter Explosionsüberdruck (gleich dem Bemessungsdruck $p_{red,ges}$ bei fehlenden Festhaltekräften)
$p_{red,ges}$	bar	Bemessungsdruck unter Berücksichtigung von Festhaltekräften
v	m/s	Geschwindigkeit der Entlastungselemente (Deckel) in Ausströmrichtung
V	m ³	Volumen der Silozelle bzw. des zu entlastenden Raumes

ω	rad/s	Winkelgeschwindigkeit der Klappe
θ	° (Grad)	Öffnungswinkel der Klappe

A 8.3 Anwendung des Bemessungsverfahrens

- (1) Mit den Formeln aus Abschnitt A 8.2 und den Diagrammen in Abschnitt A 9 können bei der Bemessung von Siloanlagen und Räumen für Explosionsbelastung folgende Werte ermittelt werden:
 - Höhe des Bemessungsdrucks $p_{\text{red,ges}}$ bei bekannter Entlastungsfläche A_E und bekanntem Staubkennwert K_{St} (vgl. Abschnitt A 8.4)
 - Größe der Entlastungsfläche A_E bei vorgegebenem Bemessungsdruck $p_{\text{red,ges}}$ und bekanntem Staubkennwert K_{St} (vgl. Abschnitt A 8.5)
 - Rückstoßkraft F_R auf das Bauwerk (vgl. Abschnitt A 8.6)
 - Geschwindigkeit v und Rotationsgeschwindigkeit ω der Abschlußelemente am Ende der Öffnungsbewegung als Grundlage der Bemessung von Rückhaltekonstruktionen (vgl. Abschnitt A 8.7)
- (2) Bei Anwendung dieses Verfahrens ist insbesondere bei den Parametern, aber auch bei den relevanten Behältergrößen auf die Einheiten zu achten.
- (3) Bei den Nomogrammen in Abschnitt A 9 ist eine lineare Interpolation zwischen zwei Isolinien zulässig.
- (4) Die Flughöhe $h_{\text{min}} = 0,25 \cdot d_E$ beim Deckel und der Öffnungswinkel $\theta_{\text{min}} = 45^\circ$ bei einer Klappe sollten nicht unterschritten werden.

A 8.4 Bemessungsdruck $p_{\text{red,ges}}$ bei bekannter Entlastungsfläche A_E und bekanntem Staubkennwert K_{St}

Mit der gegebenen Entlastungsfläche A_E sowie dem Staubkennwert K_{St} können die beiden Kennwerte K_m und K_p nach den Gleichungen (1) und (2) berechnet werden. Mit diesen Zahlenwerten kann der reduzierte Explosionsüberdruck p_{red} aus den Nomogrammen von Abschnitt A 9 bestimmt werden. Falls beim vorliegenden Entlastungssystem zusätzlich zu den Massenkräften noch weitere Festhaltekräfte wirken sollten, muß der so erhaltene reduzierte Explosionsüberdruck p_{red} mit Gleichung (9) nach oben korrigiert werden.

A 8.5 Größe der Entlastungsfläche A_E bei bekanntem Bemessungsdruck $p_{\text{red,ges}}$ und Staubkennwert K_{St}

Falls der reale Ansprechdruck der Entlastungsvorrichtung nicht den Massen-druckkräften entspricht, muß p_{red} aus dem bekannten Bemessungsdruck $p_{\text{red,ges}}$ zunächst mit Gleichung (9) ermittelt werden. Mit den in Abschnitt A 8.2 erläuterten

Größen Behältervolumen V , Anzahl der Öffnungen n , Staubkennwert K_{St} und der auf die Entlastungsfläche bezogenen Masse der Entlastungsvorrichtung m_E kann der Hilfswert K_m nach Gleichung (2) berechnet werden. Für trägheitsfreie Entlastungsvorgänge ergibt sich dieser Kennwert zu null. Mit Hilfe dieses Zahlenwertes sowie dem nach Gleichung (9) bestimmten zulässigen reduzierten Explosionsüberdruck p_{red} und dem H/D-Verhältnis der Silozelle kann anhand der in Abschnitt A 9 aufgeführten Nomogramme der Kennwert K_p bestimmt werden. Mit diesem Zahlenwert ist die Berechnung der gesuchten Entlastungsfläche A_E möglich.

A 8.6 Rückstoßkraft F_R auf Bauwerk

Bei seitlicher Anordnung der Entlastungselemente muß nach Gleichung (10) die Rückstoßkraft F_R berücksichtigt werden. Sie ist mit ihrer entsprechenden Wirkungsrichtung in der Mitte der einzelnen Entlastungsöffnungen anzusetzen.

A 8.7 Geschwindigkeit v bzw. Rotationsgeschwindigkeit ω der Abschlußelemente zur Bemessung der Rückhaltekonstruktionen

- (1) Die Anprallgeschwindigkeit v von abhebenden Deckeln der Entlastungssysteme folgt aus den entsprechenden Diagrammen in Abschnitt A 9 in Abhängigkeit vom H/D-Verhältnis.
- (2) Mit den Hilfswerten K_p und K_m erhält man aus dem entsprechenden Diagramm des Abschnitts A 9 den Hilfswert K_v , mit dem die Anprallgeschwindigkeit v des Deckels berechnet werden kann.
- (3) Die Anprall-Winkelgeschwindigkeit ω für Klappen ergibt sich in Abhängigkeit vom H/D-Verhältnis mit den entsprechenden Diagrammen in Abschnitt A 9. Mit den Hilfswerten K_p und K_m erhält man aus dem entsprechenden Diagramm des Abschnitts A 9 den Hilfswert K_ω , mit dem man dann die Winkelgeschwindigkeit ω der Klappe berechnen kann.

A 9 Nomogramme

A 9.1 Deckelkonstruktionen

A 9.1.1 H/D = 1

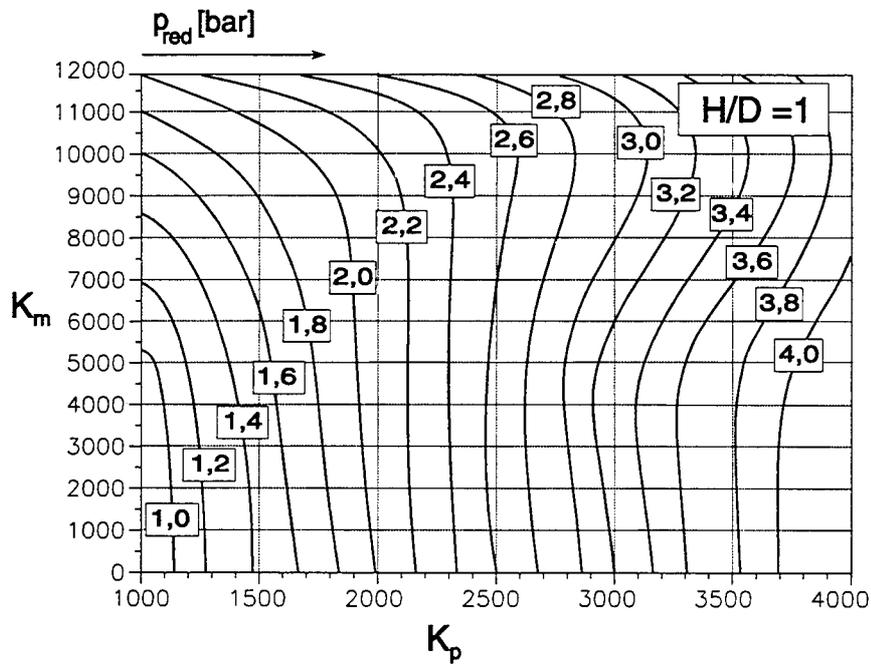


Bild 1: Reduzierter Explosionsüberdruck p_{red} in Abhängigkeit der Parameter K_p und K_m für $H/D = 1$

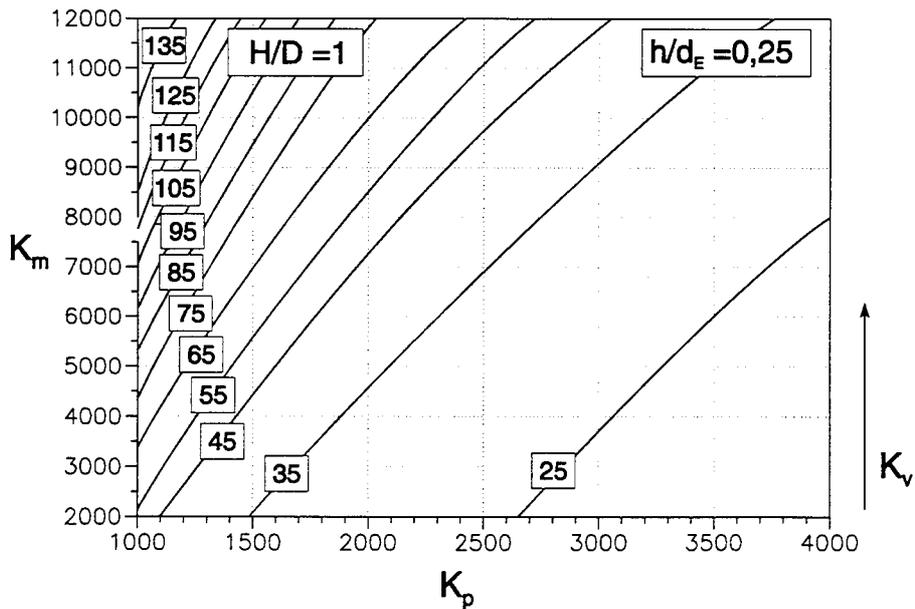


Bild 2: Parameter K_v in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 1$ und $h/d_E = 0,25$

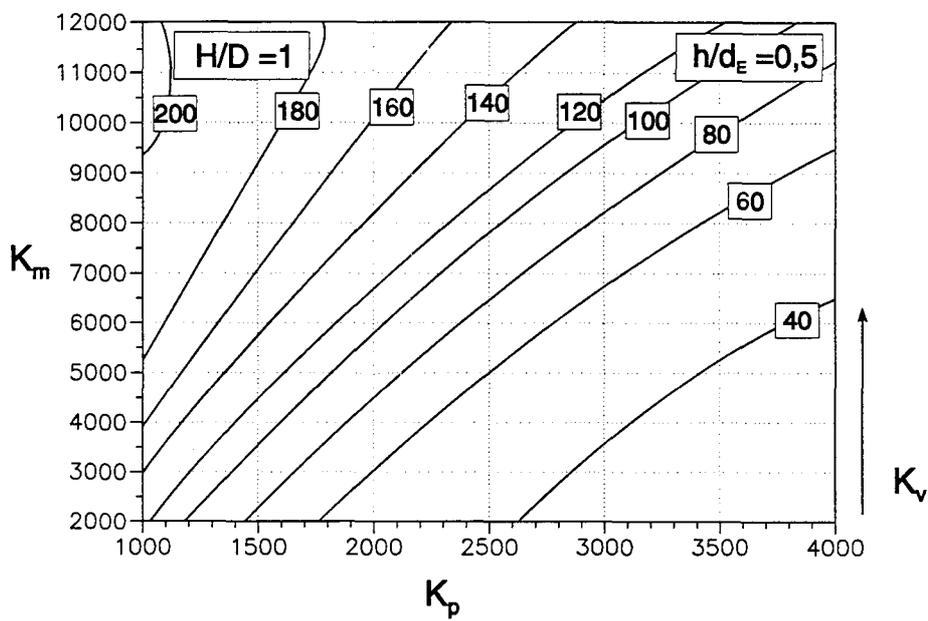


Bild 3: Parameter K_v in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 1$ und $h/d_E = 0,5$

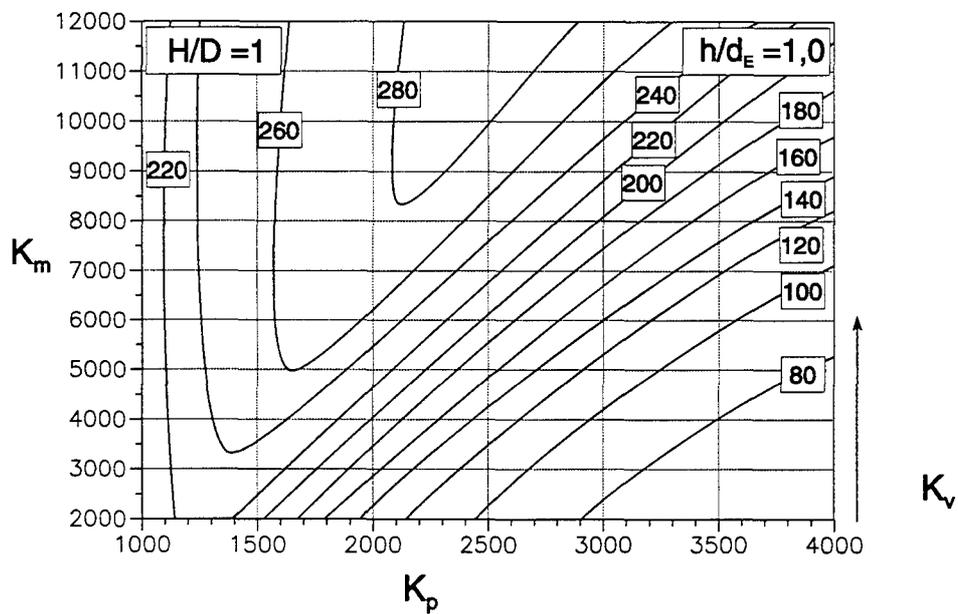


Bild 4: Parameter K_v in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 1$ und $h/d_E = 1,0$

A 9.1.2 H/D = 2

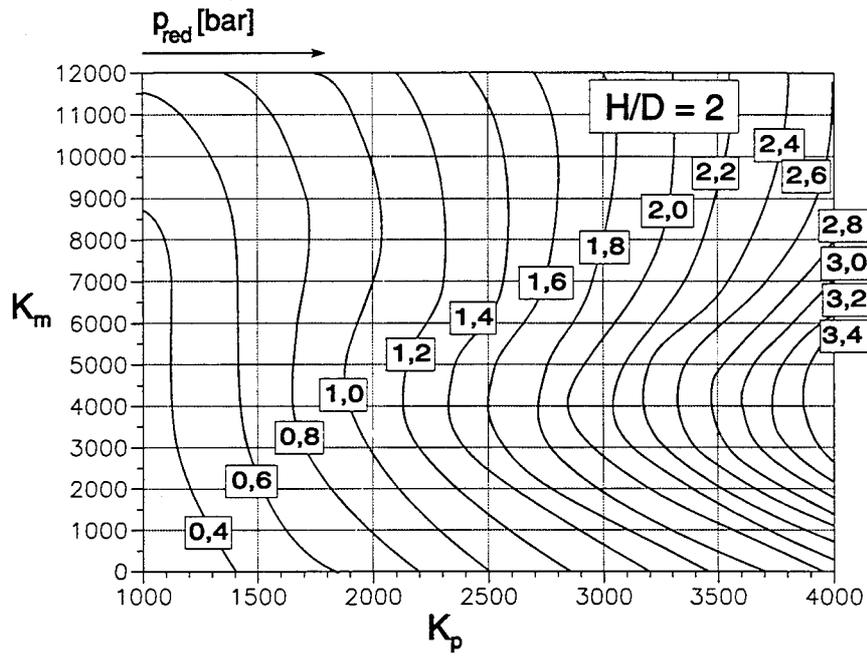


Bild 5: Reduzierter Explosionsüberdruck p_{red} in Abhängigkeit der Parameter K_p und K_m für $H/D = 2$

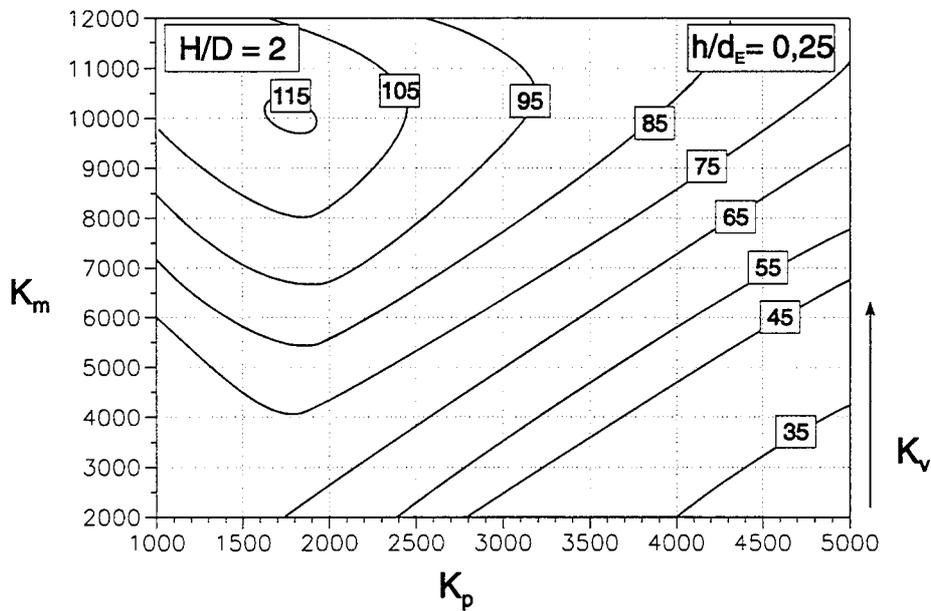


Bild 6: Parameter K_v in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 2$ und $h/d_E = 0,25$

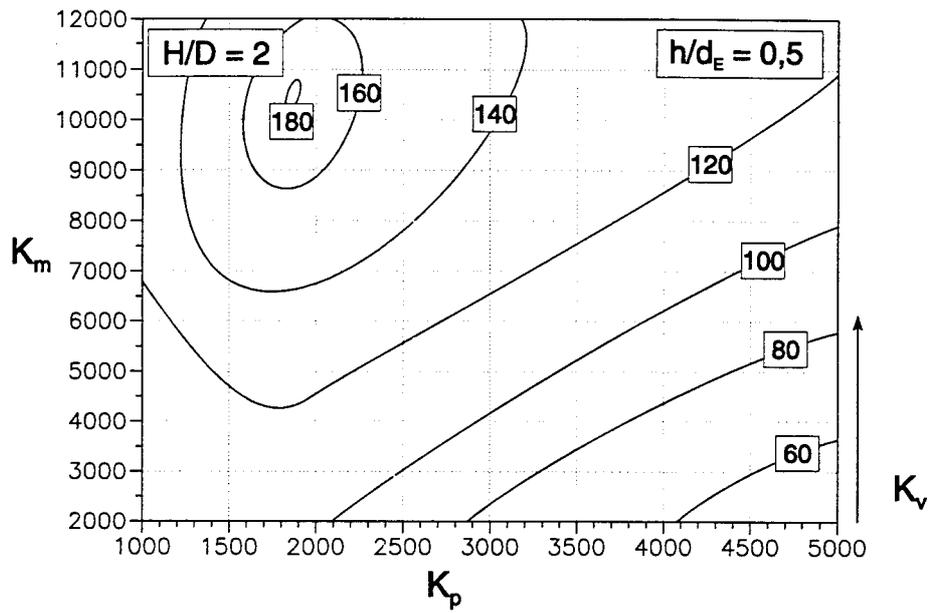


Bild 7: Parameter K_v in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 2$ und $h/d_E = 0,5$

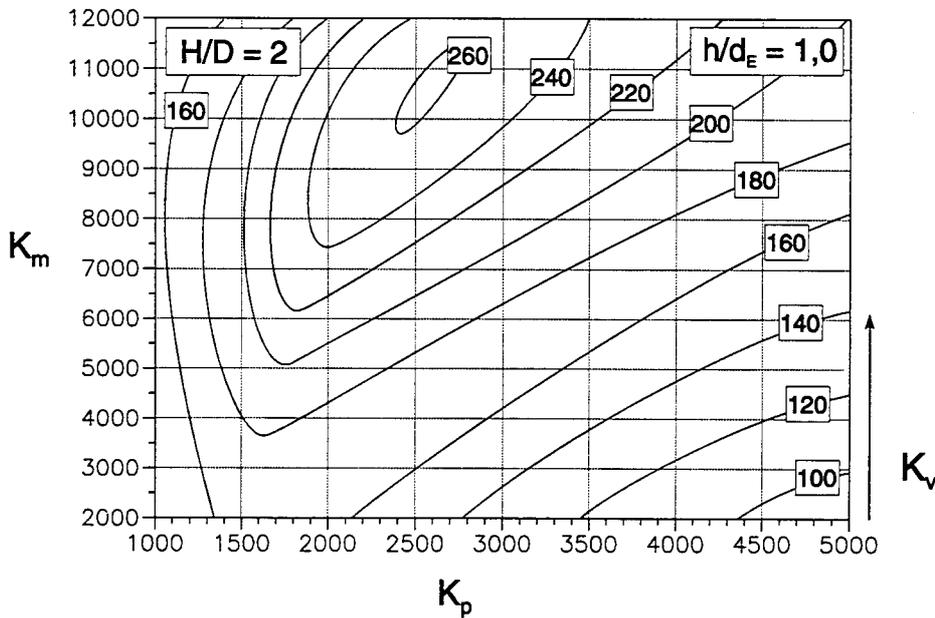


Bild 8: Parameter K_v in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 2$ und $h/d_E = 1,0$

A 9.1.3 H/D = 4

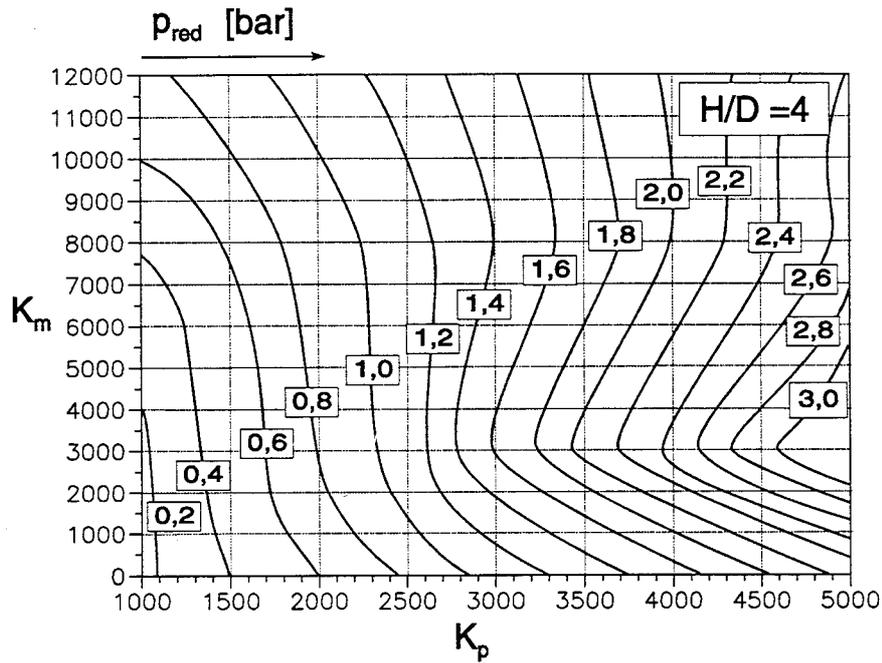


Bild 9: Reduzierter Explosionsüberdruck p_{red} in Abhängigkeit der Parameter K_p und K_m für $H/D = 4$

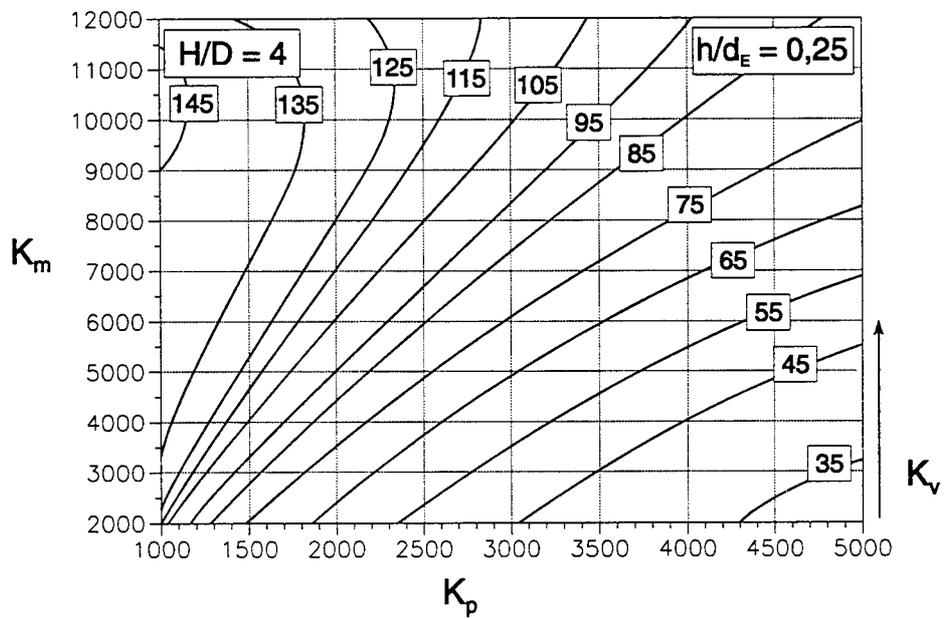


Bild 10: Parameter K_v in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 4$ und $h/d_E = 0,25$

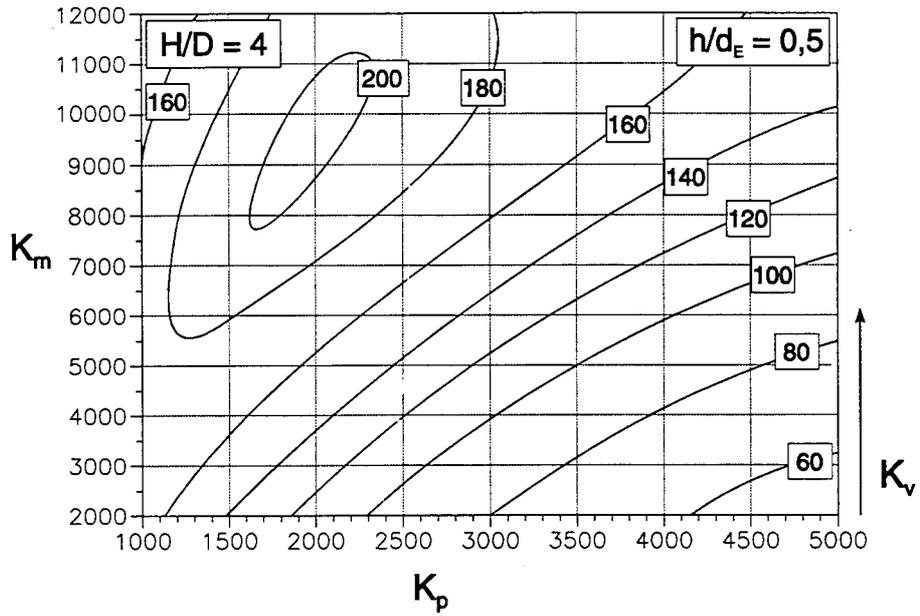


Bild 11: Parameter K_v in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 4$ und $h/d_E = 0,5$

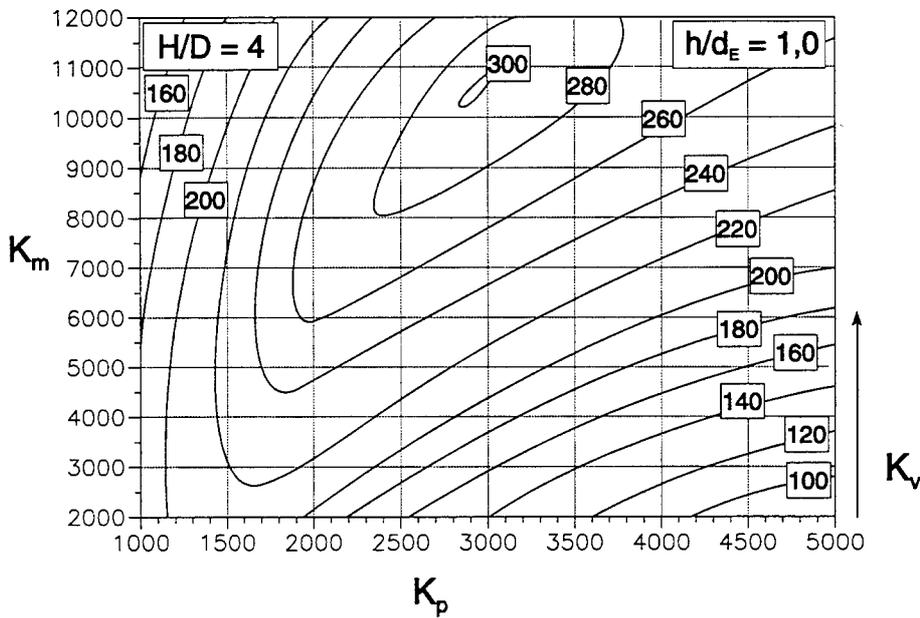


Bild 12: Parameter K_v in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 4$ und $h/d_E = 1,0$

A 9.1.4 H/D = 6

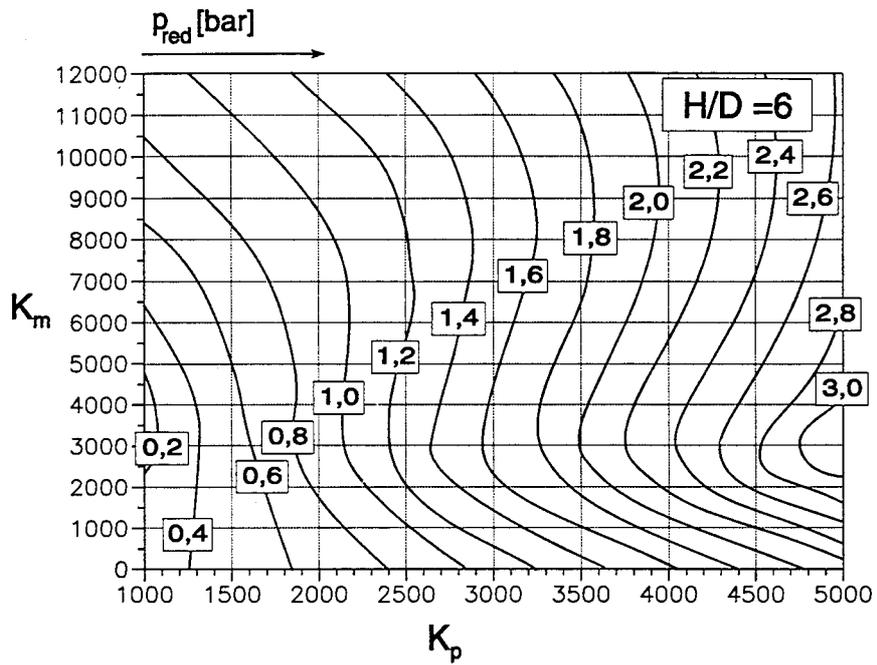


Bild 13: Reduzierter Explosionsüberdruck p_{red} in Abhängigkeit der Parameter K_p und K_m für $H/D = 6$

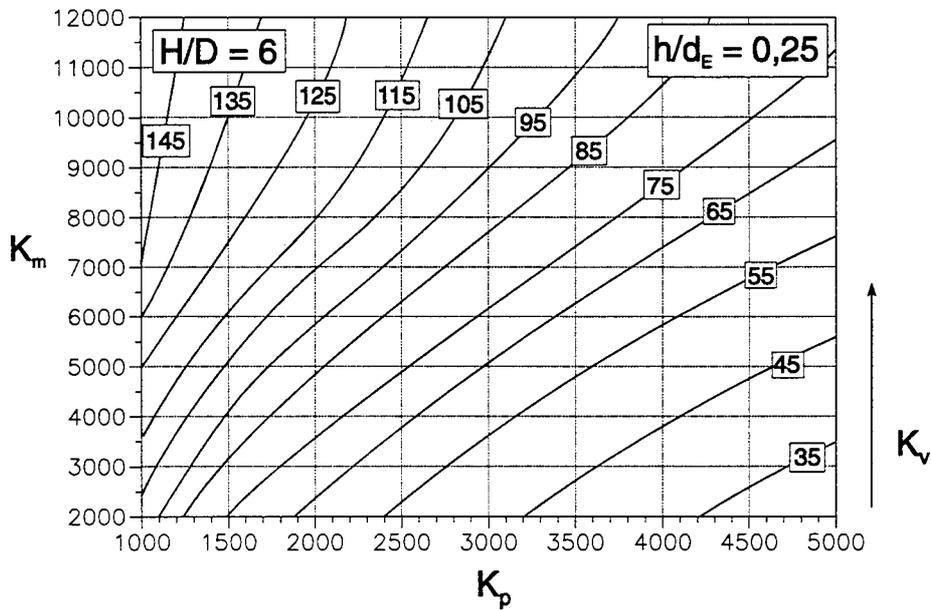


Bild 14: Parameter K_v in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 6$ und $h/d_E = 0,25$

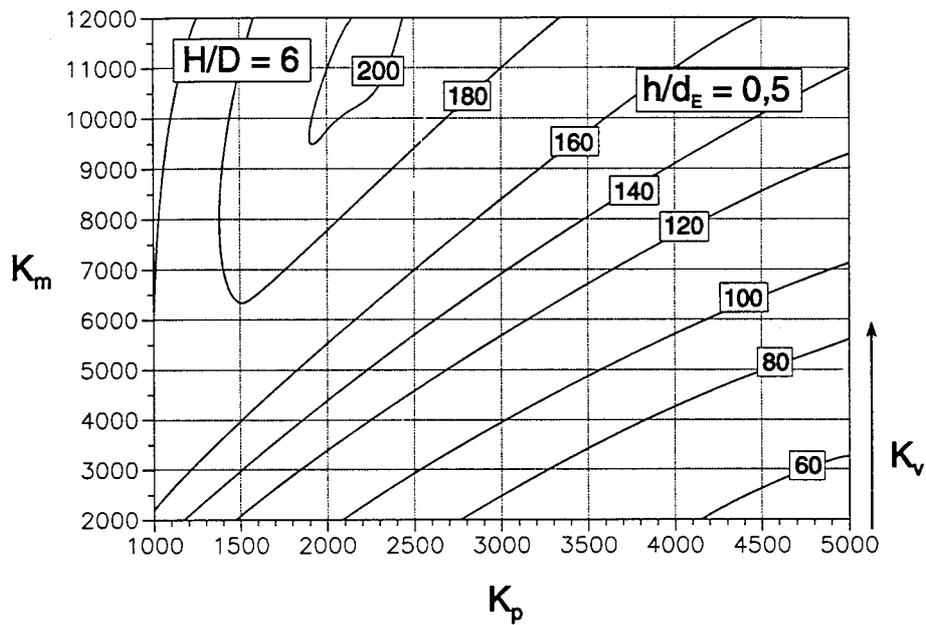


Bild 15: Parameter K_v in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 6$ und $h/d_E = 0,5$

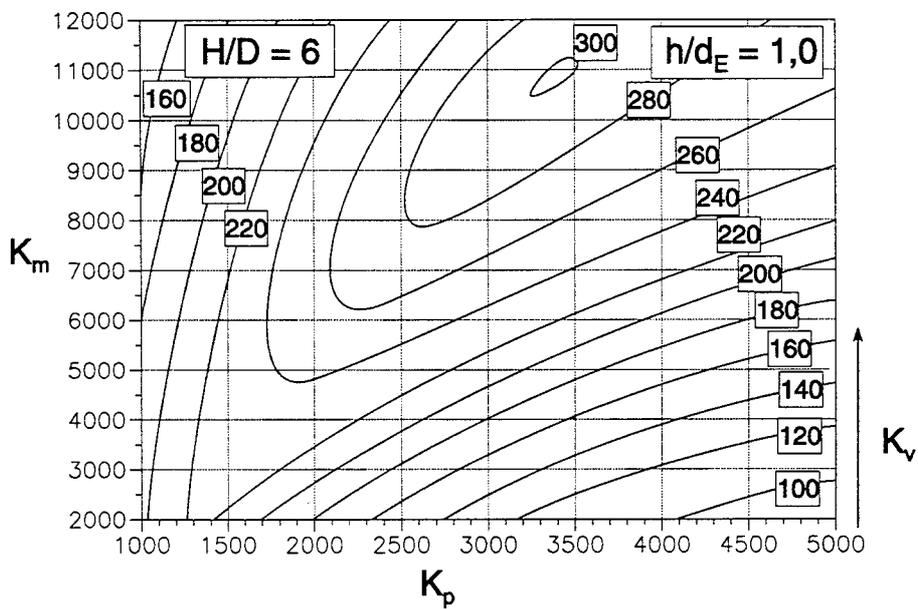


Bild 16: Parameter K_v in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 6$ und $h/d_E = 1,0$

A 9.1.5 H/D = 8

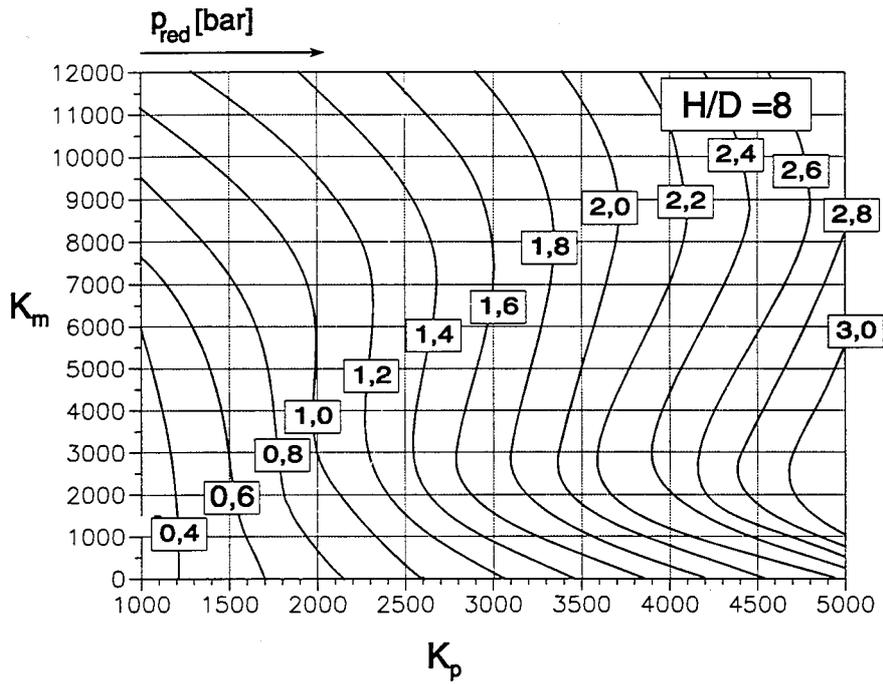


Bild 17: Reduzierter Explosionsüberdruck p_{red} in Abhängigkeit der Parameter K_p und K_m für $H/D = 8$

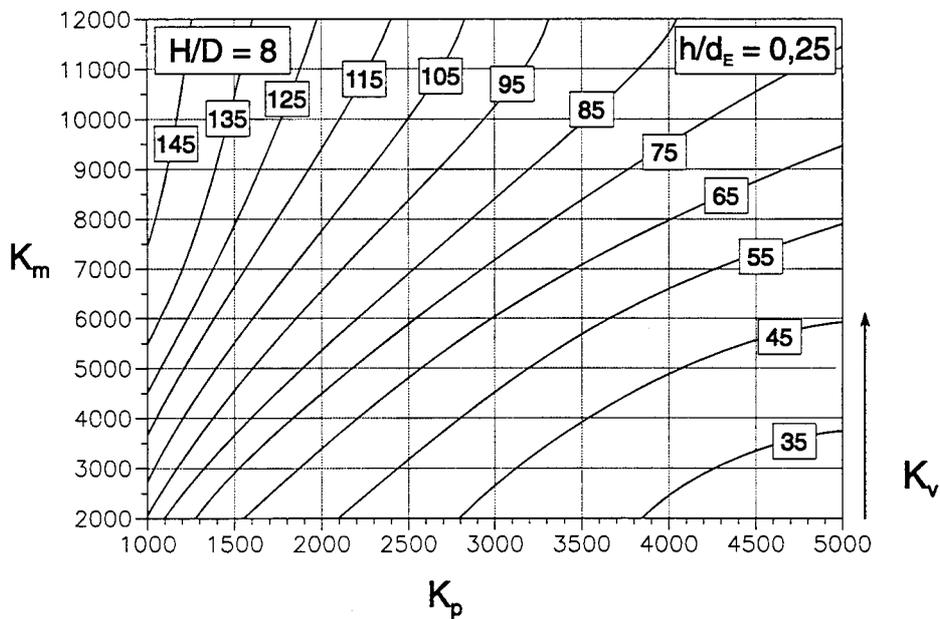


Bild 18: Parameter K_v in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 8$ und $h/d_E = 0,25$

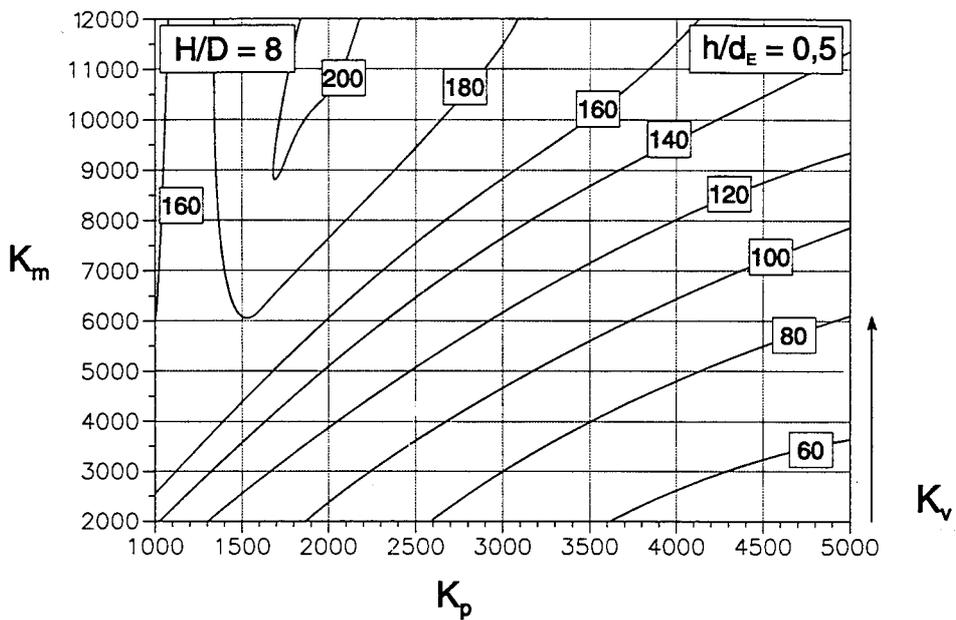


Bild 19: Parameter K_v in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 8$ und $h/d_E = 0,5$

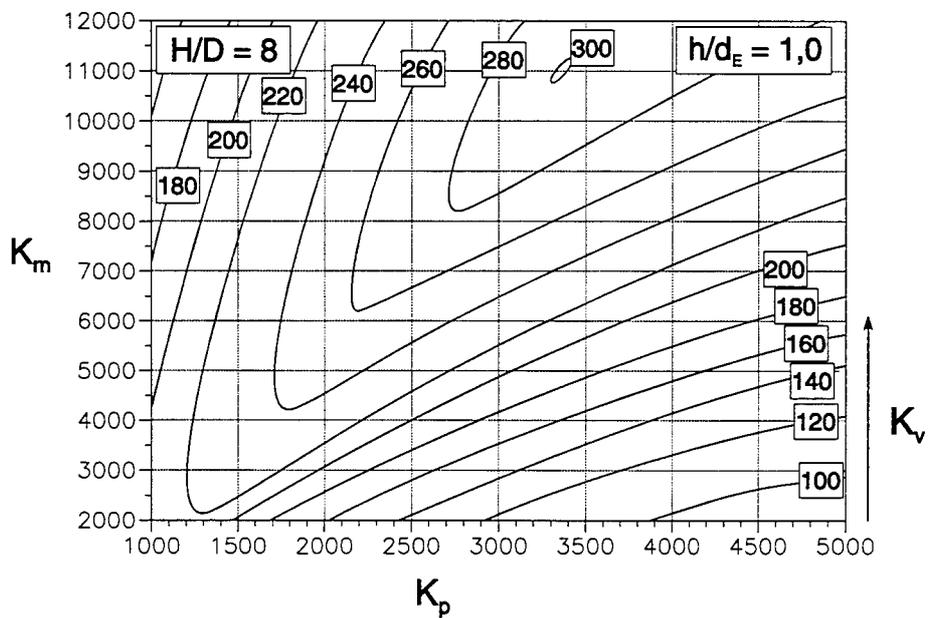


Bild 20: Parameter K_v in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 8$ und $h/d_E = 1,0$

A 9.1.6 H/D = 10

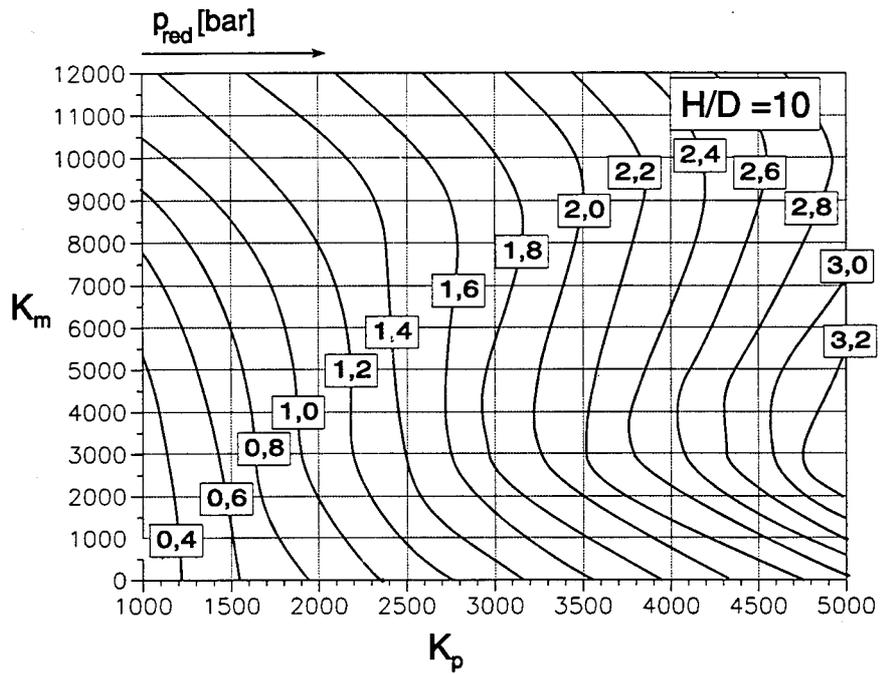


Bild 21: Reduzierter Explosionsüberdruck p_{red} in Abhängigkeit der Parameter K_p und K_m für $H/D = 10$

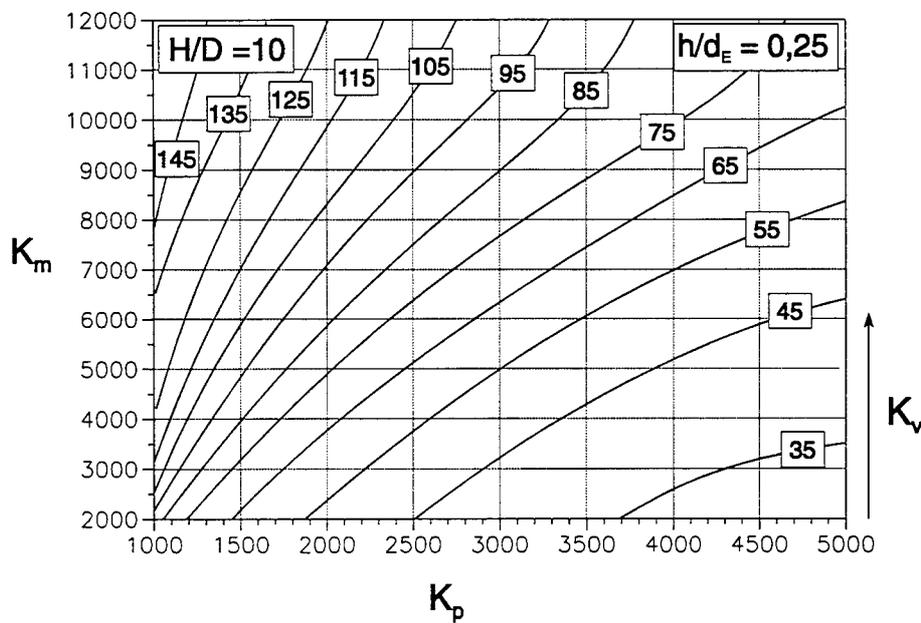


Bild 22: Parameter K_v in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 10$ und $h/d_E = 0,25$

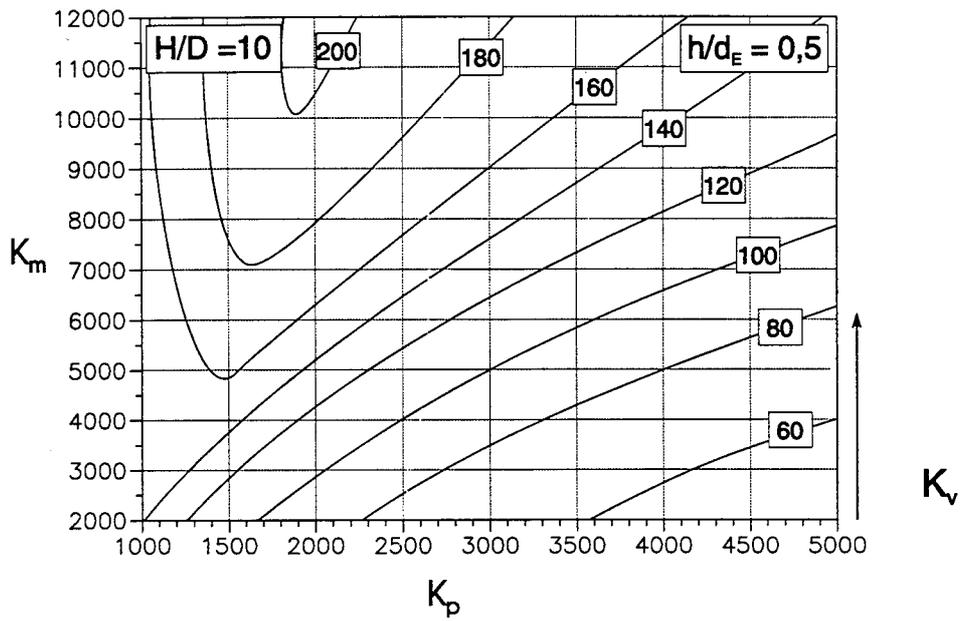


Bild 23: Parameter K_v in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 10$ und $h/d_E = 0,5$

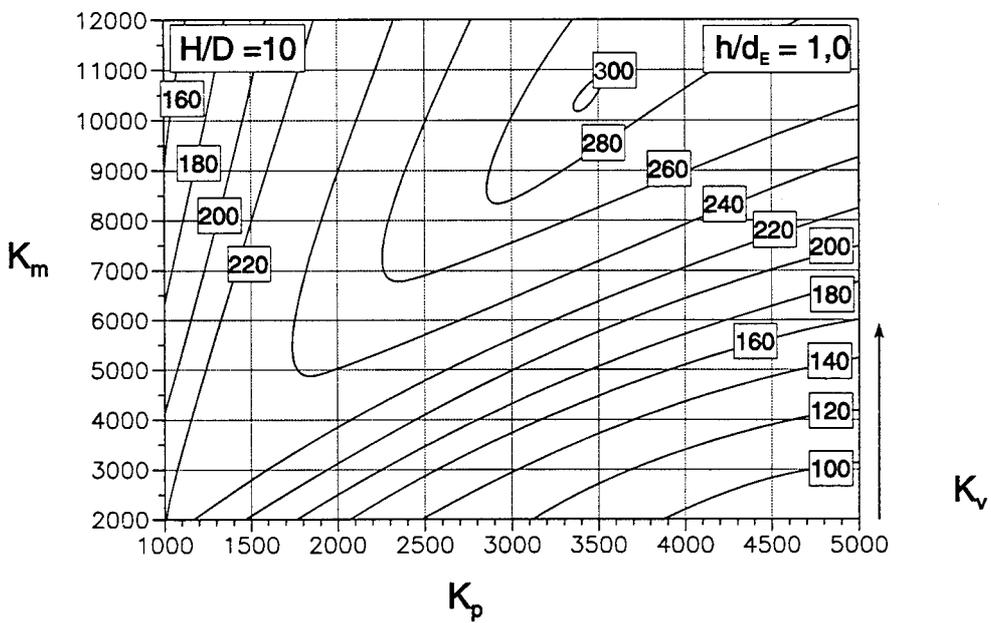


Bild 24: Parameter K_v in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 10$ und $h/d_E = 1,0$

A 9.1.7 H/D = 14

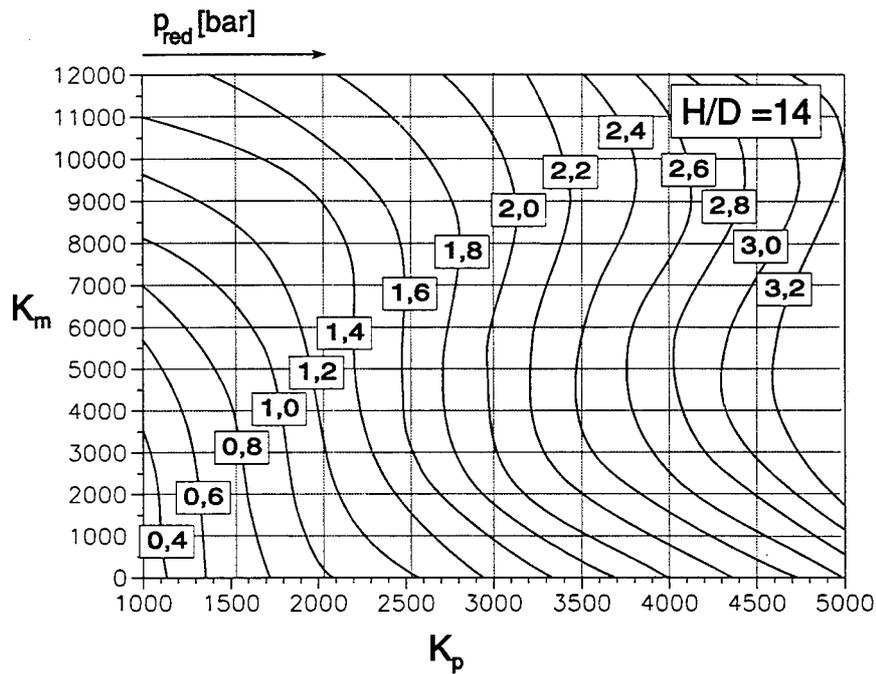


Bild 25: Reduzierter Explosionsüberdruck p_{red} in Abhängigkeit der Parameter K_p und K_m für $H/D = 14$

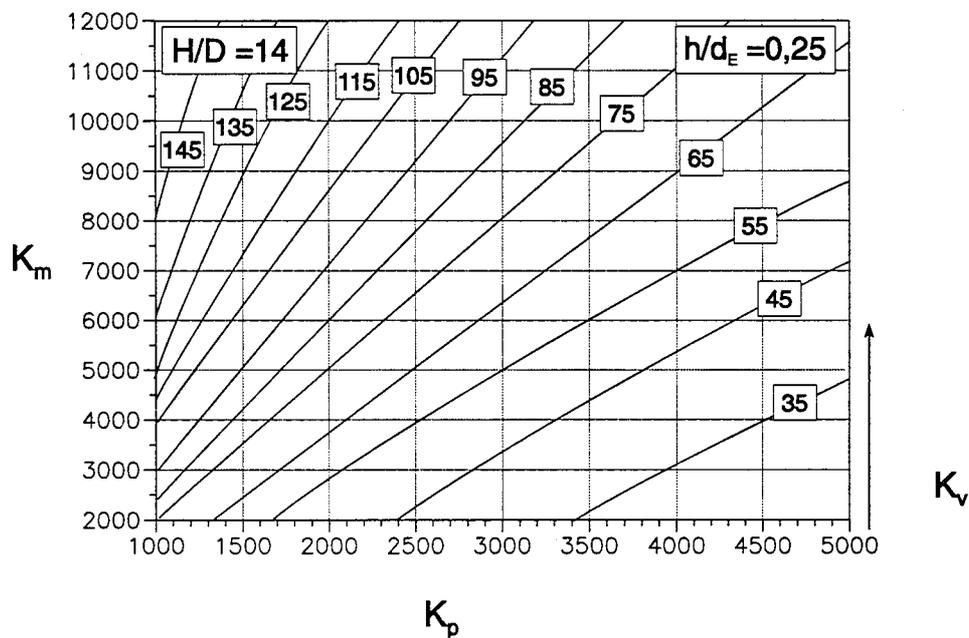


Bild 26: Parameter K_v in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 14$ und $h/d_E = 0,25$

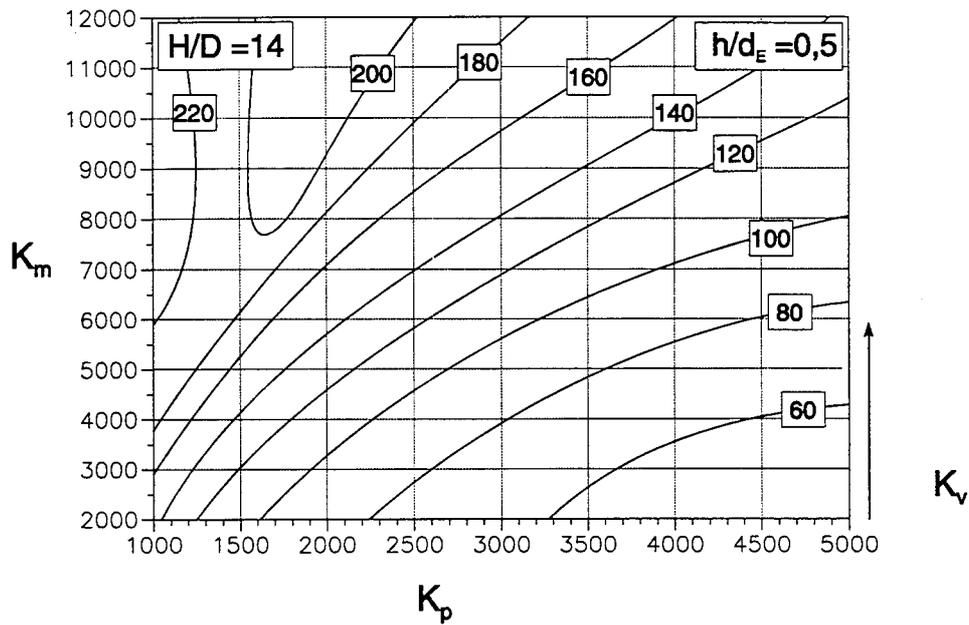


Bild 27: Parameter K_v in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 14$ und $h/d_E = 0,5$

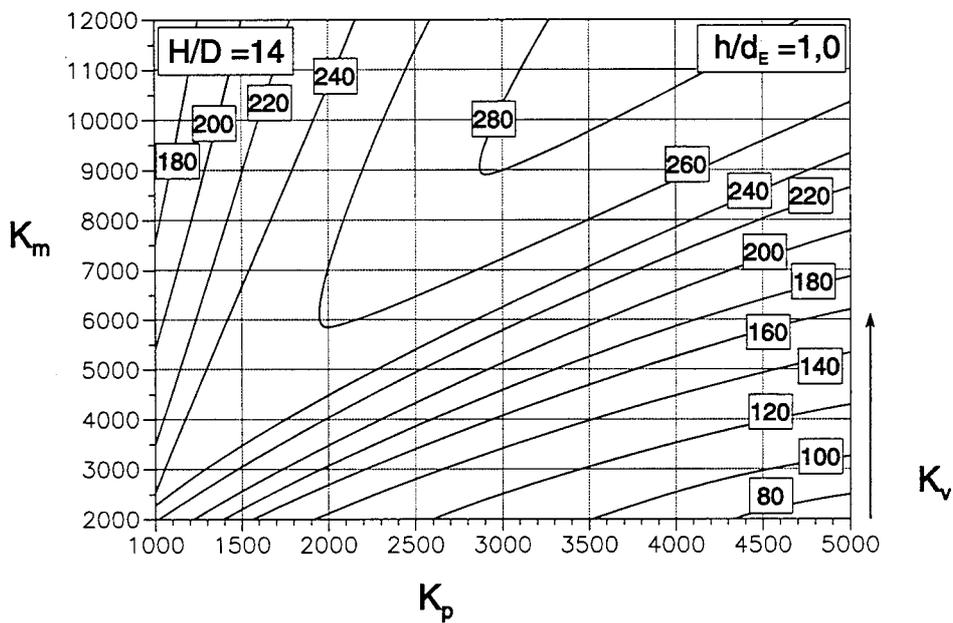


Bild 28: Parameter K_v in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 14$ und $h/d_E = 1,0$

A 9.2

A 9.3

A 9.4 Klappenkonstruktion

A 9.4.1 H/D = 1

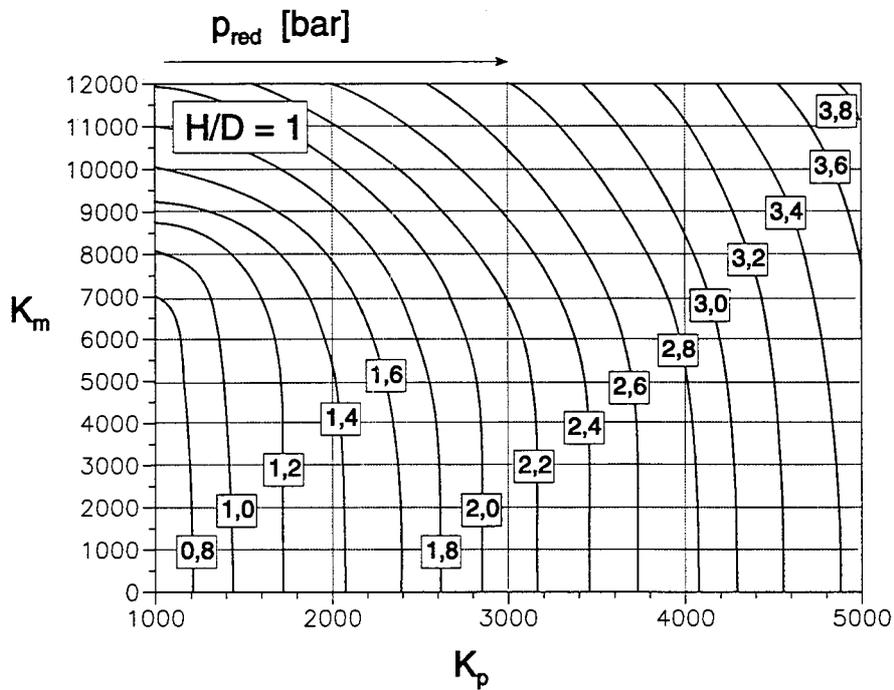


Bild 29: Reduzierter Explosionsüberdruck p_{red} in Abhängigkeit der Parameter K_p und K_m für $H/D = 1$

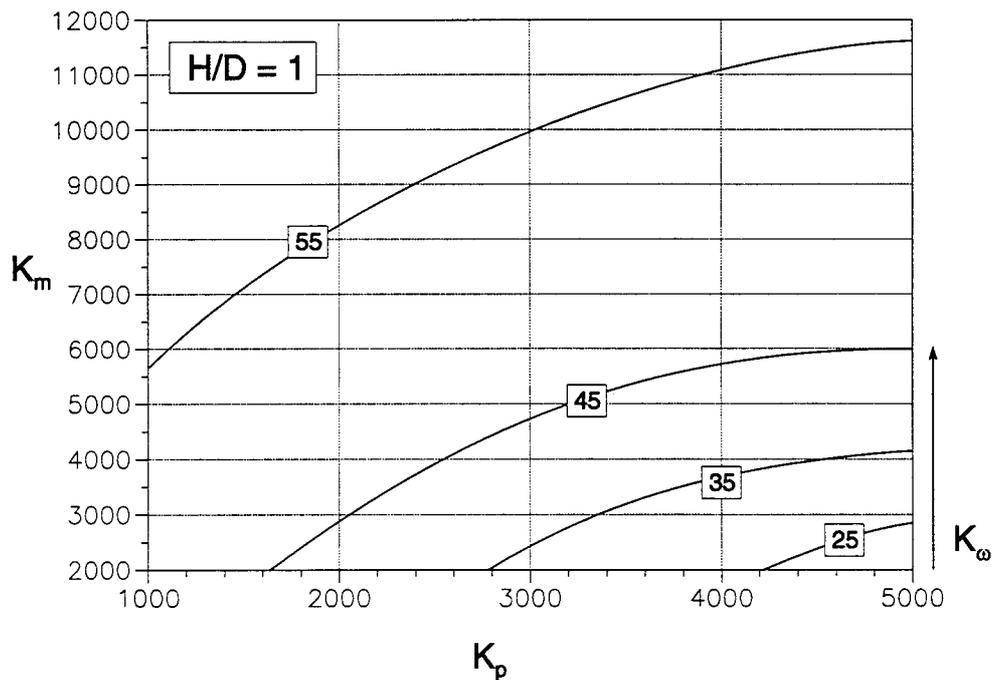


Bild 30: Parameter K_ω in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 1$ und $\theta = 90^\circ$

A 9.4.2 H/D = 2

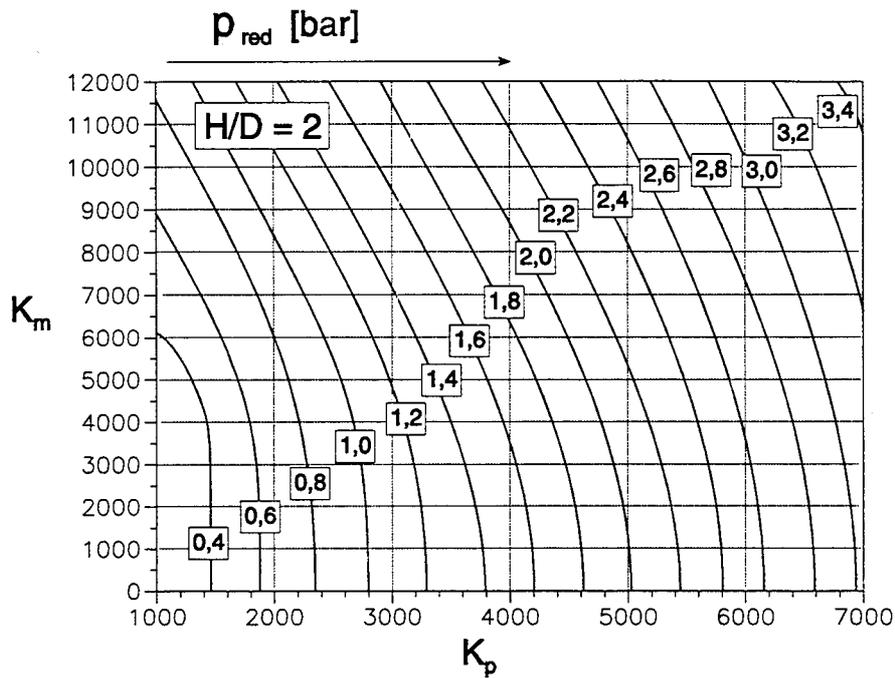


Bild 31: Reduzierter Explosionsüberdruck p_{red} in Abhängigkeit der Parameter K_p und K_m für $H/D = 2$

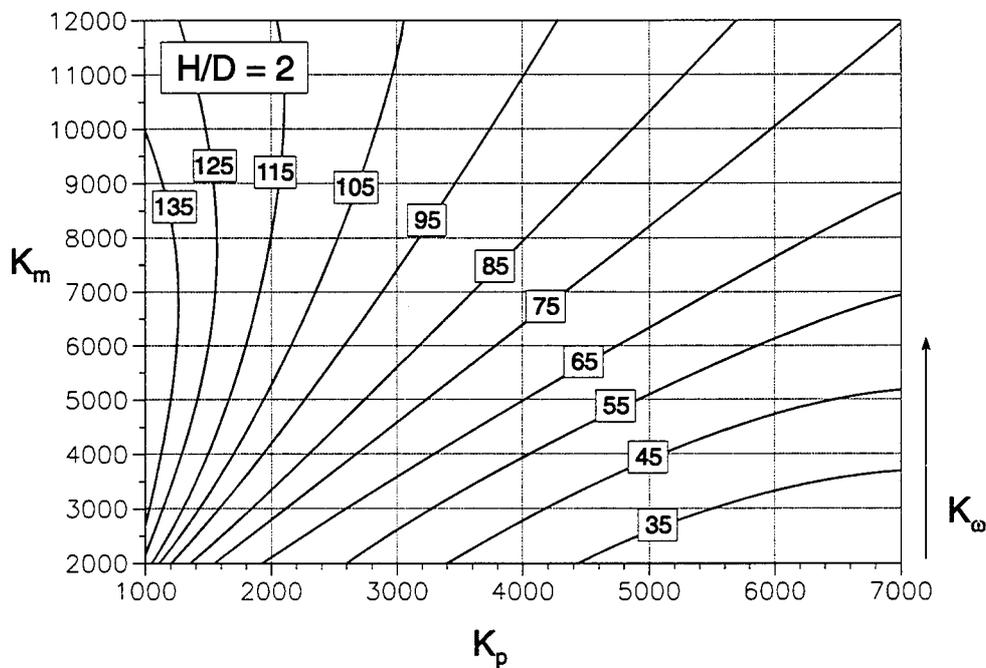


Bild 32: Parameter K_ω in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 2$ und $\theta = 90^\circ$

A 9.4.3 H/D = 4

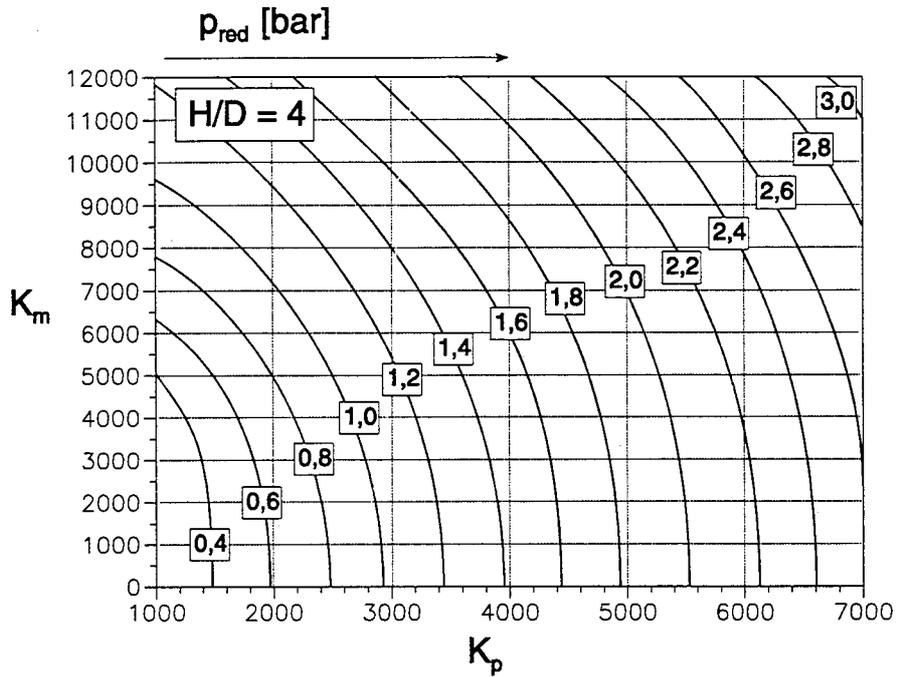


Bild 33: Reduzierter Explosionsüberdruck p_{red} in Abhängigkeit der Parameter K_p und K_m für $H/D = 4$

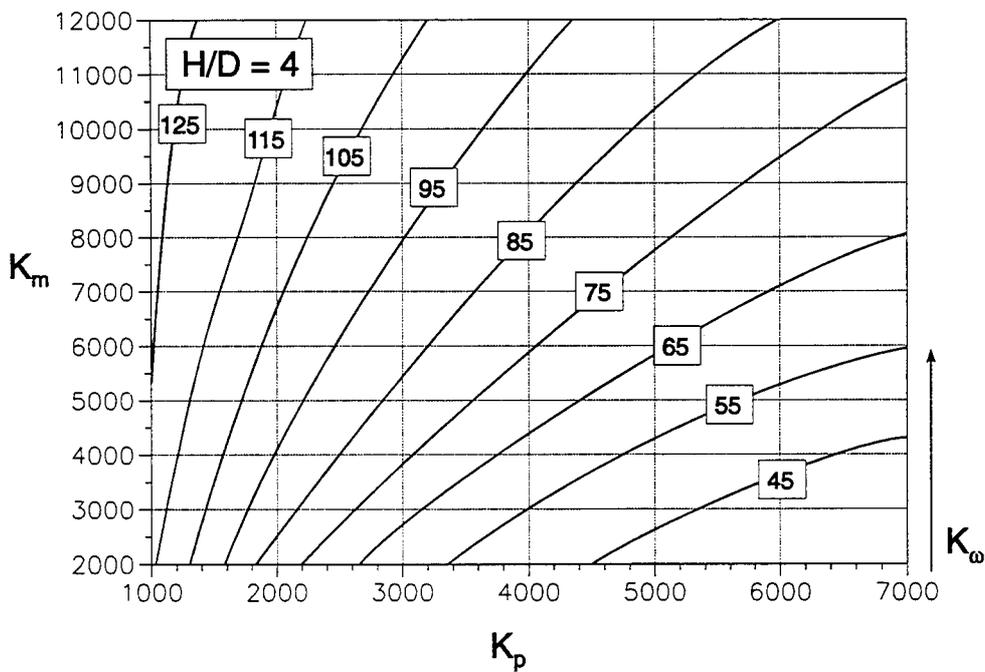


Bild 34: Parameter K_ω in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 4$ und $\theta = 90^\circ$

A 9.4.4 H/D = 6

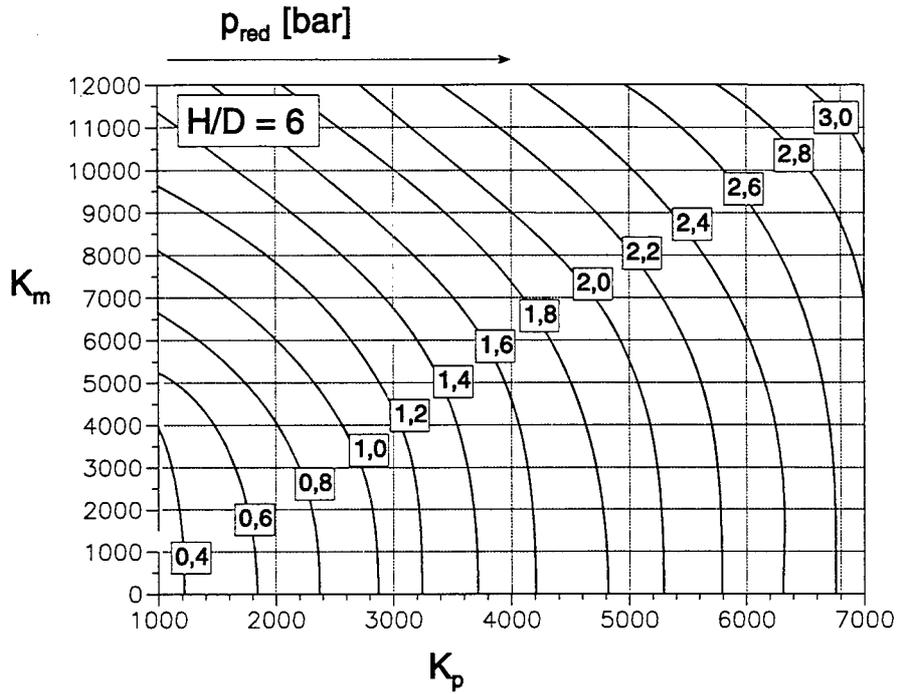


Bild 35: Reduzierter Explosionsüberdruck p_{red} in Abhängigkeit der Parameter K_p und K_m für $H/D = 6$

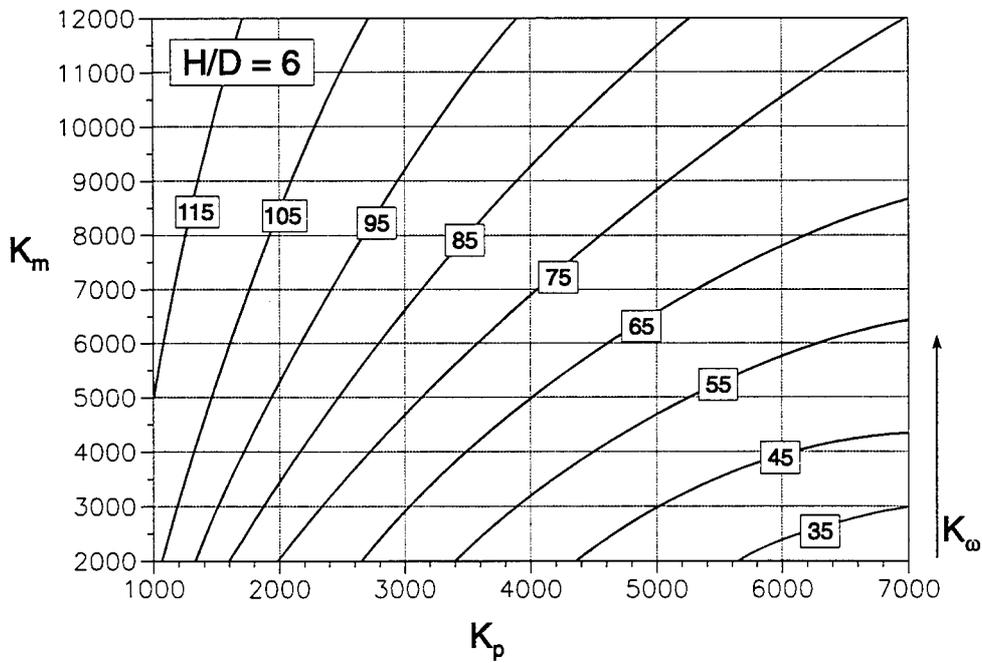


Bild 36: Parameter K_ω in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 6$ und $\theta = 90^\circ$

A 9.4.5 H/D = 8

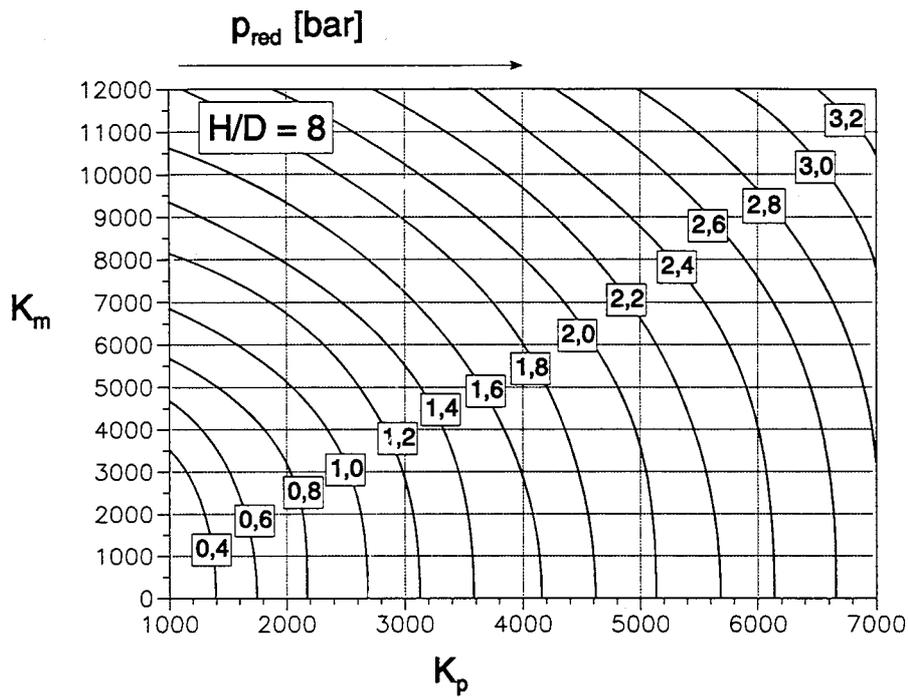


Bild 37: Reduzierter Explosionsüberdruck p_{red} in Abhängigkeit der Parameter K_p und K_m für $H/D = 8$

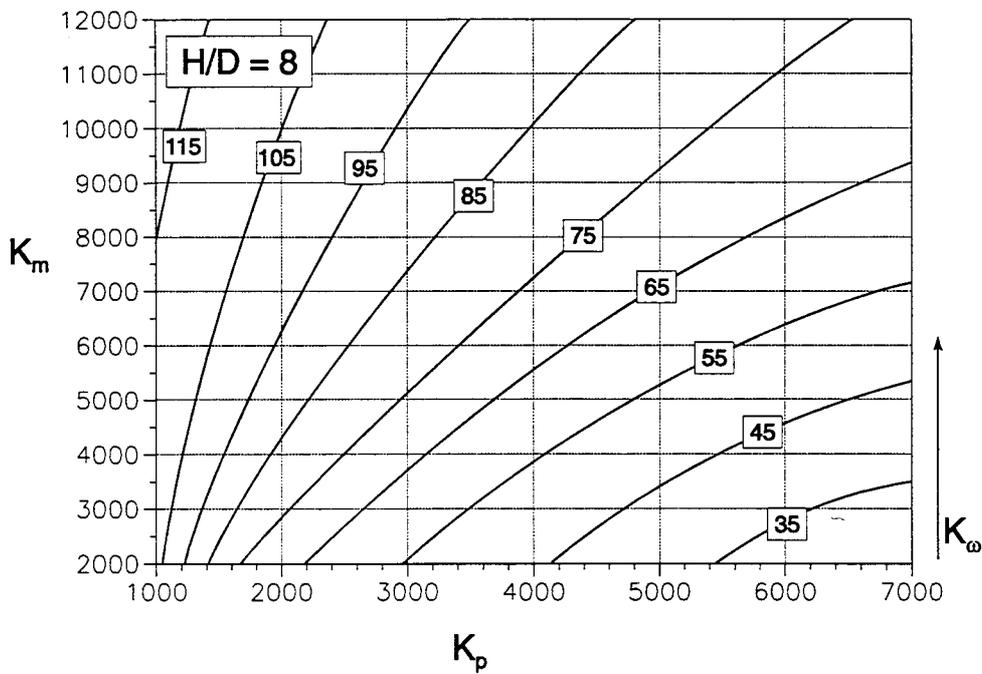


Bild 38: Parameter K_{ω} in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 8$ und $\theta = 90^\circ$

A 9.4.6 H/D = 10

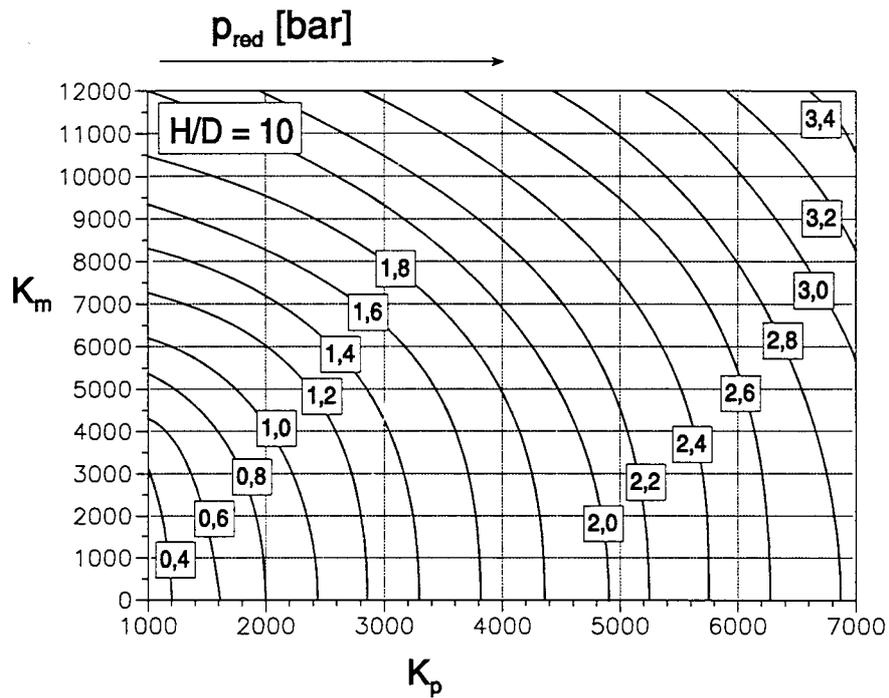


Bild 39: Reduzierter Explosionsüberdruck p_{red} in Abhängigkeit der Parameter K_p und K_m für $H/D = 10$

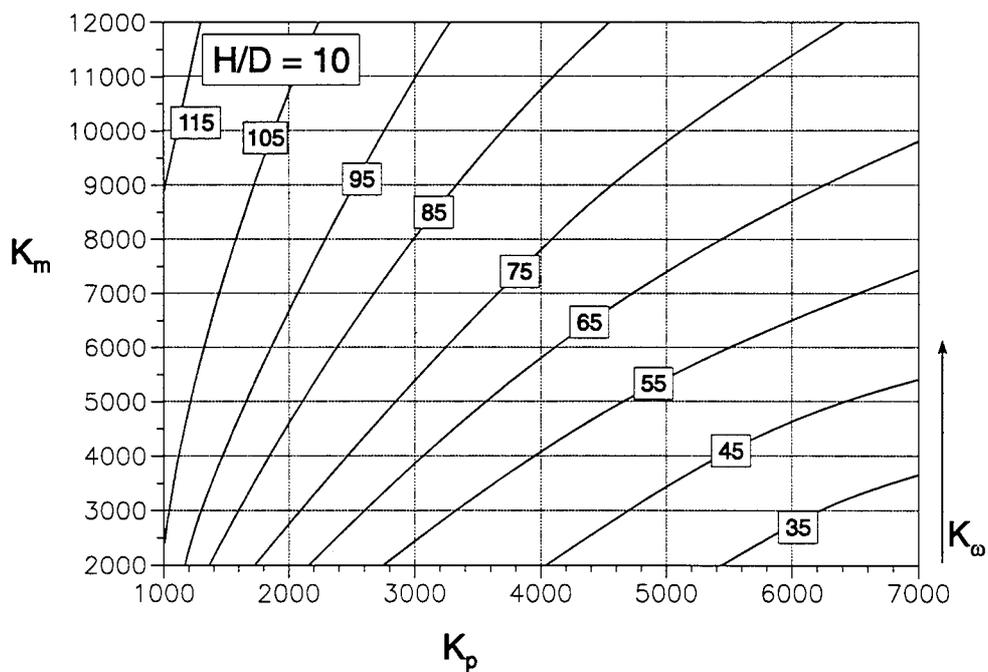


Bild 40: Parameter K_ω in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 10$ und $\theta = 90^\circ$

A 9.4.7 H/D = 14

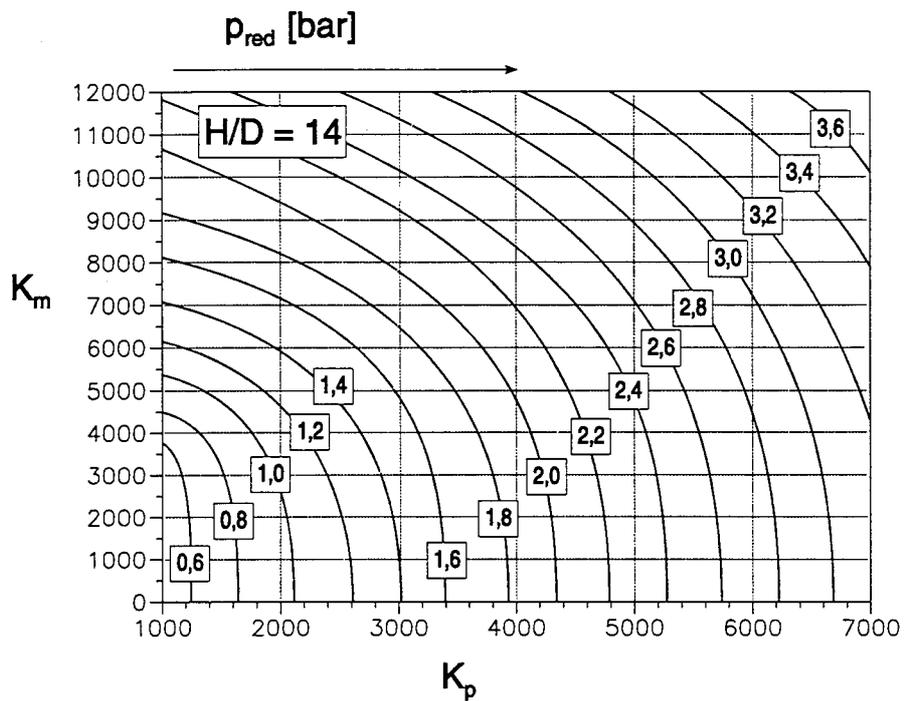


Bild 41: Reduzierter Explosionsüberdruck p_{red} in Abhängigkeit der Parameter K_p und K_m für $H/D = 14$

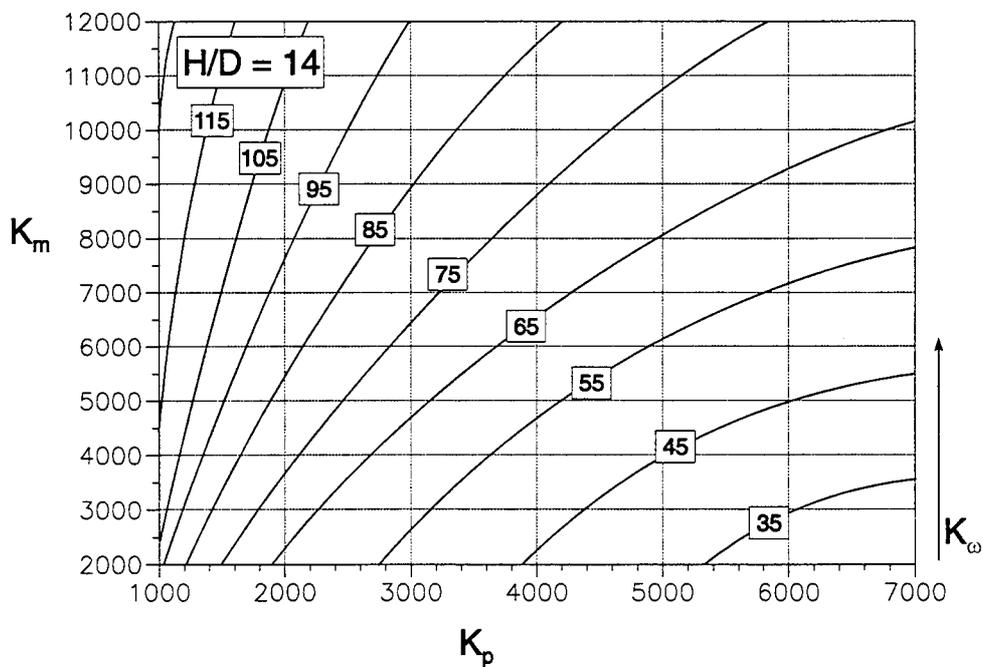
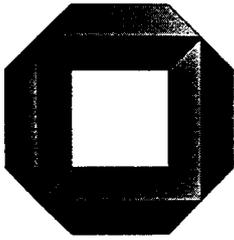


Bild 42: Parameter K_{ω} in Abhängigkeit von K_p und K_m für $H/D = 14$ und $\theta = 90^\circ$



Massivbau
Baustofftechnologie
Karlsruhe

Arbeitstitel: Anhang B

**Richtlinie zur Auslegung von Siloanlagen gegen
Staubexplosionen**

– Beiblatt –

– Beispiele –

Stand: Juli 1999

Universität Karlsruhe
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Abteilung Massivbau
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. techn. h. c. J. Eibl a. D.

1999

Anhang B: Beispiele zur Anwendung der Richtlinie

Nachfolgend wird beispielhaft für eine Zuckersiloanlage 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 Darstellungen versucht dem für Bauingenieure ungewohnten Umgang mit explosionsgefährdeten Betonstrukturen Rechnung zu tragen.

B 1 Beispiel 1: Siloanlage

B 1.1 Übersicht

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

Höhe der Silozellen	$H =$	$= 40,62 \text{ m}$
Volumen	$V = 4,5 \cdot 4,5 \cdot 40,62$	$= 822,59 \text{ m}^3$
Dach- bzw. Grundfläche der Siloz.	$A = 4,5 \cdot 4,5$	$= 20,25 \text{ m}^2$
Fiktiver Durchmesser	$D^* = \sqrt{4 \cdot 20,25 / \pi}$	$= 5,08 \text{ m}$
H/D^*	$= 40,62/5,08$	$= 8$
Weißzucker ¹	$K_{St} =$	$= 150 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$
Umfang der Silozelle	$U = 4 \cdot 4,5$	$= 18,0 \text{ m}$
A/U	$= 20,25/18,0$	$= 1,125$
Wichte von Zucker ²	$\gamma =$	$= 9,5 \text{ kN/m}^3$
Horizontallastverhältnisse ²	$\lambda =$	$= 0,60$
Wandreibung für Beton und Zucker ²	$\mu_2 = \mu_w =$	$= 0,50$

¹ aus: Sicherheitstechnische Informations- und Arbeitsblätter 140260 – 140279 des BIA-Handbuches, Verlag Erich Schmidt, Bielefeld, bzw. aus Tabelle A.1 der Richtlinie

² aus: DIN 1055, Teil 6, Tabelle 1

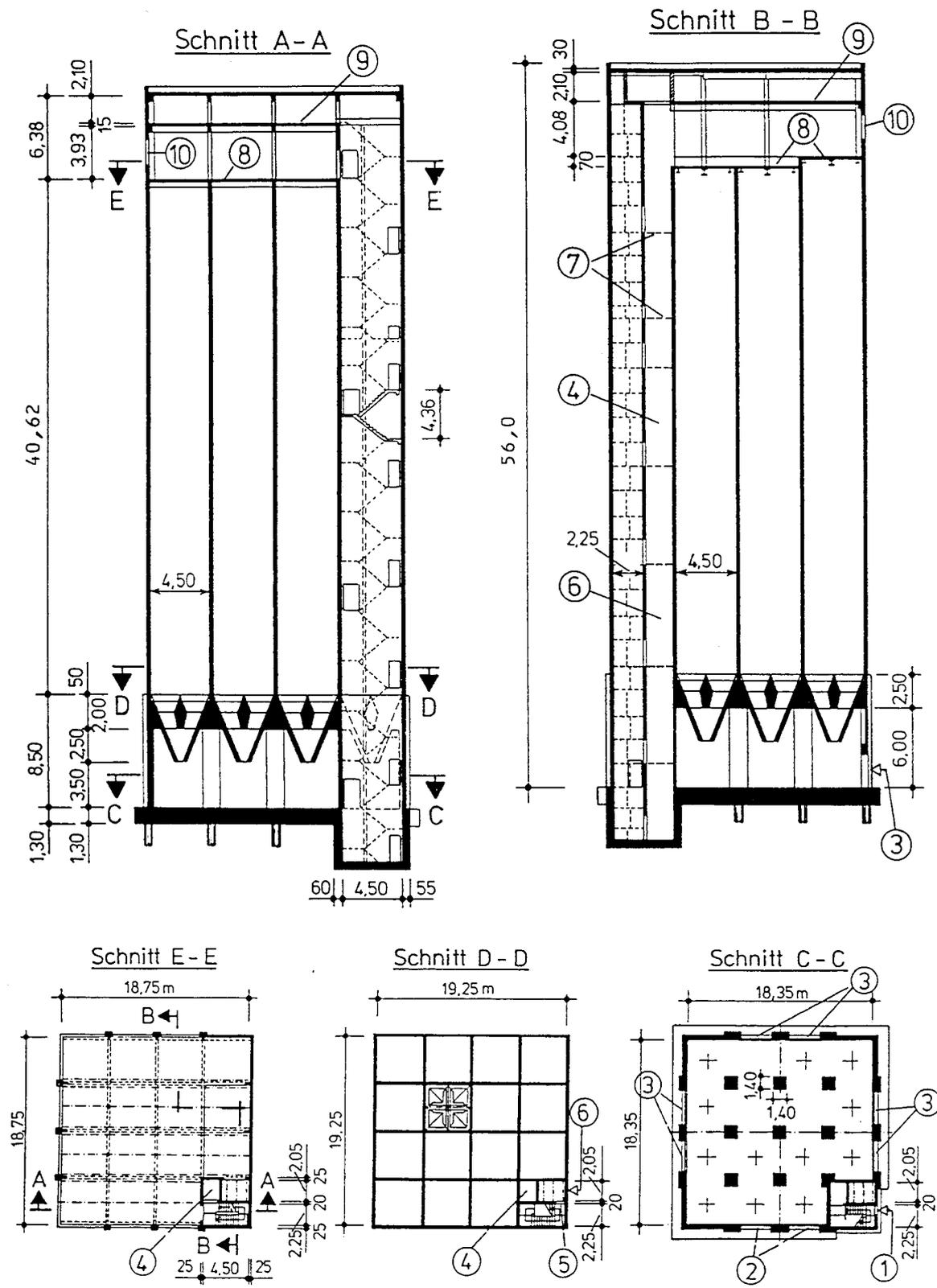


Bild B. 1: Beispiel Explosionsschutzmaßnahmen in einer Siloanlage

B 1.1 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. Auch die Büroräume (Bürogebäude) sollten von den Silozellen weit entfernt gebaut werden.

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

B 1.2 Generelle Hinweise zur Ausbildung von Entlastungsflächen

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

- 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 Bewegungen zu beschränken. In Bereichen, in denen sich häufig Personen aufhalten, müssen Splitter z. B. durch versagende Berstmembran 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.
- Die Entlastungskonstruktion muß gewartet werden, um eine Erhöhung des Ansprechdrucks p_a , z. B. durch Schneelast oder Korrosion von Lagern zu vermeiden.

Als Entlastungsmechanismen bieten sich zunächst die in Bild B.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 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 begehbar sein können.

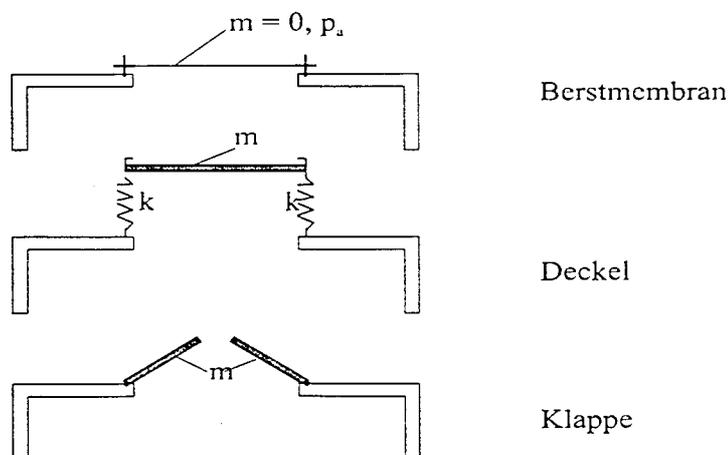


Bild B.2: Mögliche Entlastungskonstruktionen

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

B 1.3 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 $t = 3$ cm und einem Rechenwert der Eigenlast nach DIN 1055 T 1 zwischen $4,5$ und 8 kN/m³ gewählt. Dies entspricht einer Rohdichte von 450 bis 800 kg/m³. Hier wurde ein mittlerer Wert von 650 kg/m³ angesetzt. Daraus folgt eine Gesamtmasse $M_{\text{gesamt}} = 650 \cdot 20,25 \cdot 0,03 = 394,88$ kg.

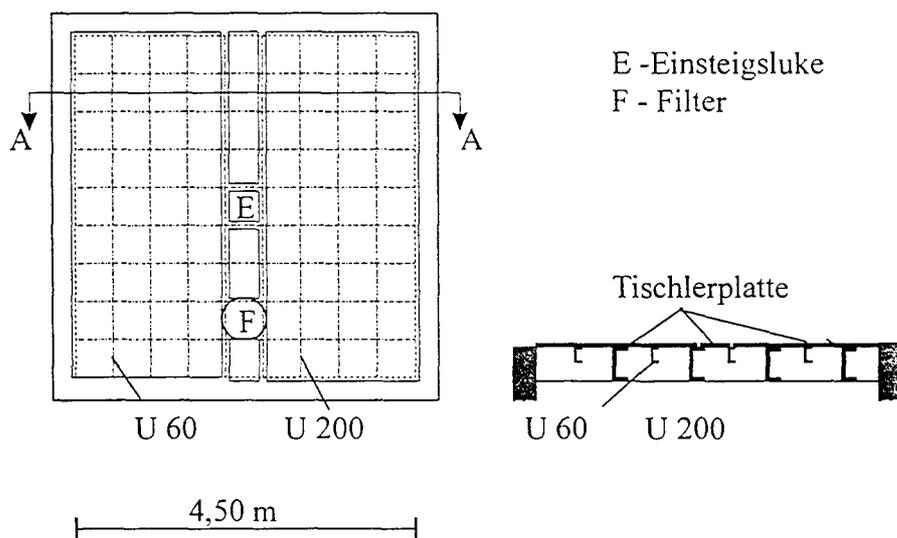


Bild B.3: Abdeckung der Silozellen

Die Tischlerplatten werden mit einem Verbindungsmittel geringer Festigkeit, z. B. Plastikschrauben, auf einen Stahlträgerrost montiert (vgl. Bild B.3). Die gesamte Versagenslast der Verbindungsmittel zusammen mit dem Eigengewicht der Tischlerplatten sollte entsprechend den Empfehlungen des Bemessungsverfahrens kleiner als $0,1$ bar bzw. 10 kN/m² 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 beträgt nach Abzug der Trägerflächen und der Filterfläche noch etwa $16,4 \text{ m}^2$. Daraus folgt eine auf die Entlastungsfläche bezogene Masse $m_E = 394,88/16,4 = 24,08 \text{ kg/m}^2$.

B 1.4 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:

1. der Grundkombination mit normalen Lasteinwirkungen

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

maßgebend für den Fall "Silo gefüllt" als

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

und

2. der außergewöhnlichen Kombination

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

im vorliegenden Fall mit

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

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

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

mit:

$$s(z) = 1 - \left(1 - \frac{p_{\text{red}}}{\gamma \cdot z_0}\right) \cdot e^{-\frac{z}{z_0}} \quad (\text{B. 4})$$

$$z_0 = \frac{A}{\lambda \cdot \mu_w \cdot U}$$

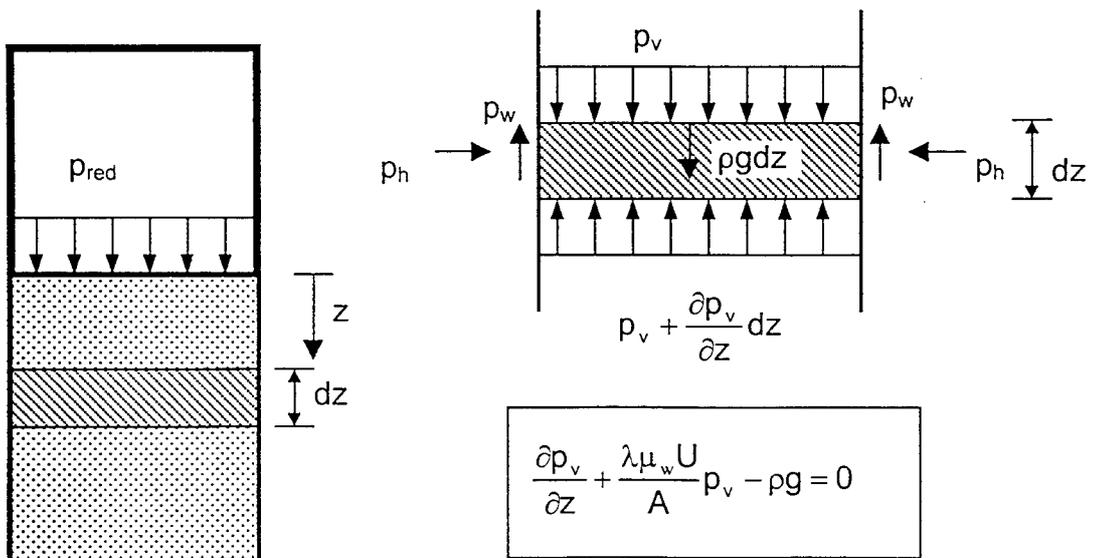


Bild B.4: Erweiterter Ansatz von Janssen

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

$$F_w(z) = \int p_w(z) dA = U \cdot \int p_w(z) dz$$

$$F_w(z_{\max}) = U \cdot \gamma \cdot \lambda \cdot \mu_w \cdot z_0 \cdot \left[z + \left(z_0 - \frac{p_{\text{rcd}}}{\gamma} \right) \cdot e^{-\frac{z}{z_0}} \right]_0^{z_{\max}} \quad (\text{B. 5})$$

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

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

B 1.5 Silobeanspruchung

B 1.5.1 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 ist in der Gleichung B. 3 mit enthalten.

Aus Gleichung B. 4 findet man für $z = H = 40,62 \text{ m}$

$$z_0 = \frac{20,25}{0,60 \cdot 0,50 \cdot 18,0} = 3,75 \text{ m}$$

$$s(40,62) = 1 - \left(1 - \frac{0}{9,5 \cdot 3,75} \right) \cdot e^{-\frac{40,62}{3,75}} = 0,99998$$

und damit:

$$\begin{aligned} P_v(40,62) &= 9,5 \cdot 3,75 \cdot 0,99998 &&= 35,62 \text{ kN/m}^2 \\ P_h(40,62) &= 0,60 \cdot 9,5 \cdot 3,75 \cdot 0,99998 &&= 21,37 \text{ kN/m}^2 \\ P_w(40,62) &= 0,5 \cdot 0,60 \cdot 9,5 \cdot 3,75 \cdot 0,99998 &&= 10,69 \text{ kN/m}^2 \\ F_w(40,62) &= 20,25 \cdot (0 + 9,5 \cdot 40,62 - 35,62) &&= 7093,0 \text{ kN} \end{aligned}$$

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

$$P_v(40,62) = 50,44 \text{ kN/m}^2$$

$$P_h(40,62) = 32,06 \text{ kN/m}^2$$

$$p_w(40,62) = 16,03 \text{ kN/m}^2$$

$$F_w(40,62) = 10639,5 \text{ kN}$$

B 1.5.2 Lastfall Staubexplosion im "leeren Silo"

Die vorhandene Entlastungsfläche und der Staubkennwert K_{St} (vgl. Abschnitt B 1.1) sind bekannt.

Der Bemessungsdruck p_{red} kann infolge der trägheitsbehafteten Entlastung nach Abschnitt A 8 der "Richtlinie zur Auslegung von Siloanlagen gegen Staubexplosionen" direkt ermittelt werden.

Die Ermittlung der Bemessungslast erfolgt analog zu Abschnitt A 8.4 der Richtlinie.

Für

$$H_{100\%} = 40,62 \text{ m}$$

$$H_{100\%}/D^* = 8$$

$$V_{100\%} = 4,5 \cdot 4,5 \cdot 40,62 = 822,56 \text{ m}^3$$

ergeben sich die Werte K_p und K_m aus Gleichungen (1) und (2) der Richtlinie

$$K_p = \frac{V^{\frac{5}{6}} \cdot K_{St}}{A_E} = \frac{822,56^{\frac{5}{6}} \cdot 150}{16,40} = 2457,8 \frac{\sqrt{\text{m}^3 \text{bar}}}{\text{s}}$$

und

$$K_m = \frac{m_E^{\frac{1}{2}} \cdot K_{St}^{\frac{5}{4}} \cdot V^{\frac{1}{24}}}{n^{\frac{1}{4}}} = \frac{24,08^{\frac{1}{2}} \cdot 150^{\frac{5}{4}} \cdot 822,56^{\frac{1}{24}}}{1^{\frac{1}{4}}} = 3407,3 \sqrt{\text{kg}} \left(\frac{\text{bar}}{\text{s}} \right)^{\frac{5}{4}} \text{m}^{\frac{3}{8}}$$

Aus den Bemessungsdiagrammen der Richtlinie für $H/D = 8$, Deckel (s. Abschnitt A 9.1.5) folgt:

$$p_{red} = 1,3 \text{ bar}$$

Für den Lastfall Staubexplosionen im "leeren" Silo findet man mit einem Sicherheitsbeiwert $\gamma_Q = 1,0$ (Katastrophenlastfall) folgende Beanspruchungen:

$$\begin{aligned} p_v(40,62) &= p_{red} && = 130,0 \text{ kN/m}^2 \\ p_h(40,62) &= p_{red} && = 130,0 \text{ kN/m}^2 \\ p_w(40,62) &= && = 0 \\ F_w(40,62) &= && = 0 \end{aligned}$$

B 1.5.3 Lastfall "Teilfüllung und Explosion"

Hier wird in einem ersten Schritt davon ausgegangen, daß das Silo zu 25 % mit Schüttgut gefüllt ist (vgl. Bild B. 5), so daß im restlichen Volumen eine Staubexplosion stattfinden kann.

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

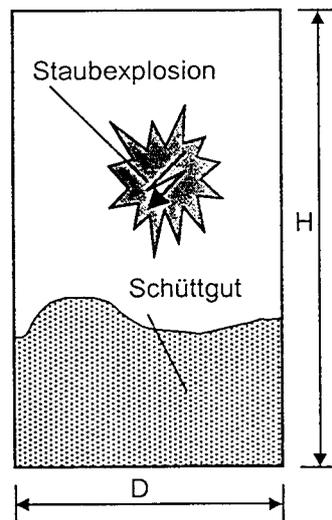


Bild B. 5: Teilweise gefüllte Silozelle

Für das verbliebene Volumen ergeben sich folgende Daten:

$$\begin{aligned} D^* &= 5,08 \text{ m} \\ m_E &= 24,08 \text{ kg/m}^3 \\ H_{75\%} &= 0,75 \cdot 40,62 && = 30,47 \text{ m} \\ H_{75\%}/D^* &= && = 6,0 \\ V_{75\%} &= 4,5 \cdot 4,5 \cdot 30,47 && = 617,0 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Alle übrigen Angaben, wie die Entlastungsfläche A_E , die Masse der Entlastungsöffnung m_E , etc., können dem Lastfall Staubexplosion im "leeren" Silo entnommen werden.

Mit Gleichungen (1) und (2) der Richtlinie findet man damit die Werte K_p und K_m :

$$K_p = \frac{V^{\frac{5}{6}} \cdot K_{St}}{A_E} = \frac{617,0^{\frac{5}{6}} \cdot 150}{16,4} = 1934,2 \frac{\sqrt{\text{m}^3 \text{bar}}}{\text{s}}$$

und

$$K_m = \frac{m_E^{\frac{1}{2}} \cdot K_{St}^{\frac{5}{4}} \cdot V^{\frac{1}{24}}}{n^{\frac{1}{4}}} = \frac{24,08^{\frac{1}{2}} \cdot 150^{\frac{5}{4}} \cdot 617,0^{\frac{1}{24}}}{1^{\frac{1}{4}}} = 3366,7 \sqrt{\text{kg}} \left(\frac{\text{bar}}{\text{s}} \right)^{\frac{5}{4}} \text{m}^{\frac{3}{8}}$$

Aus den Diagrammen der Richtlinie für $H/D = 6$, Deckel (s. Abschnitt A 9.1.4) ergibt sich somit:

$$p_{\text{red}} = 0,9 \text{ bar} = 90 \text{ kN/m}^2$$

Bei diesem Lastfall ist $z_{\text{max}} = 10,16 \text{ m}$. Aus Gleichung B. 3 resultieren damit folgende Belastungen für den Lastfall "25 % Teilfüllung".

$$\begin{aligned} p_v(10,16) &= 39,25 \text{ kN/m}^2 \\ p_h(10,16) &= 23,55 \text{ kN/m}^2 \\ p_w(10,16) &= 11,77 \text{ kN/m}^2 \\ F_w(10,16) &= 2982,22 \text{ kN} \end{aligned}$$

Die Analyse für alle weiteren Teillastfälle 50 % und 75 % erfolgt hierzu analog. Die Ergebnisse von 5 Füllungsgraden sind in Bild B. 6 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.

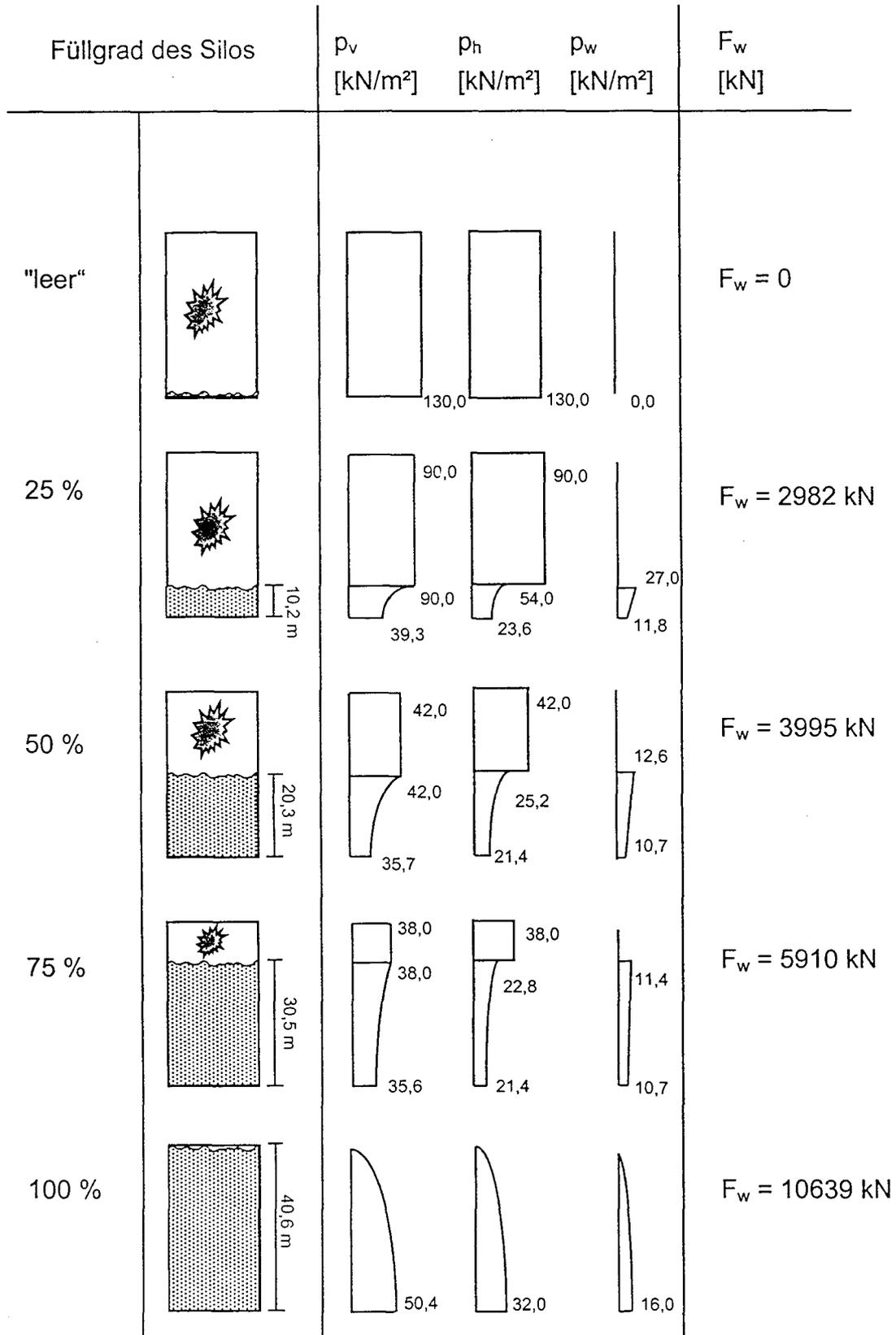


Bild B. 6: Zusammenstellung von 5 verschiedenen Füllungsgraden

B 1.2 Abschlußelemente und Rückhaltekonstruktionen

Maßgebend für die Bemessung der Abschlußelemente ist der Lastfall "Silo leer". Geht man davon aus, daß wie in Abschnitt B 1.3 vorgeschlagen, als Abschlußelemente Tischlerplatten (vgl. Bild B.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 A 8.7 der 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 m.

Mit $d_E^* = D^* = 5,08$ m folgt:

$$\frac{h}{d_E} = \frac{3,93}{5,08} = 0,77 \quad \begin{cases} > 0,5 \\ < 1,0 \end{cases}$$

Deshalb wird zur Bestimmung der Geschwindigkeit des Abschlußelementes zwischen den Diagrammen mit $h/d_E = 0,50$ und $h/d_E = 1,0$ interpoliert. Damit ergibt sich näherungsweise für K_v :

$$K_v = \frac{100 + 190}{2} = 145$$

bei $K_p = 2457,8 \frac{\sqrt{\text{m}^3 \text{bar}}}{\text{s}}$ und $K_m = 3407,3 \sqrt{\text{kg} \left(\frac{\text{bar}}{\text{s}} \right)^{\frac{5}{4}} \text{m}^{\frac{3}{8}}}$ ("Silo leer")

Daraus wird die Fluggeschwindigkeit des Abschlußelements aus Gleichung (3) der Richtlinie ermittelt:

$$145 = K_v = v \cdot \left(\frac{m_E}{p_{\text{red}}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{A_E}{n} \right)^{\frac{1}{4}} = v \cdot \left(\frac{24,08}{1,3} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{16,1}{1} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$\Rightarrow v = 16,82 \text{ m/s}$$

Diese Geschwindigkeit in Verbindung mit der Masse der Abschlußelemente 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 IPB1 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. Bild B.3).

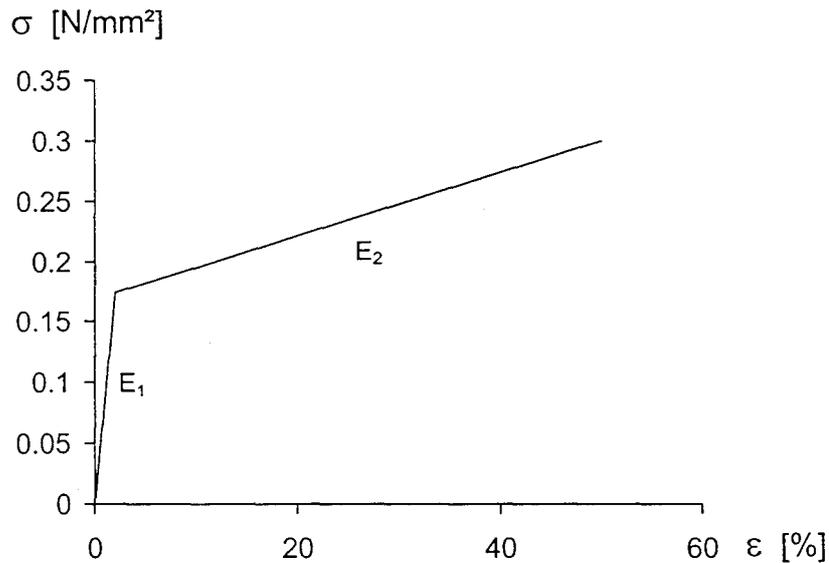


Bild B. 7: Idealisierte Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Polystyrol

Zur Energieabsorption 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 Bild B. 7.

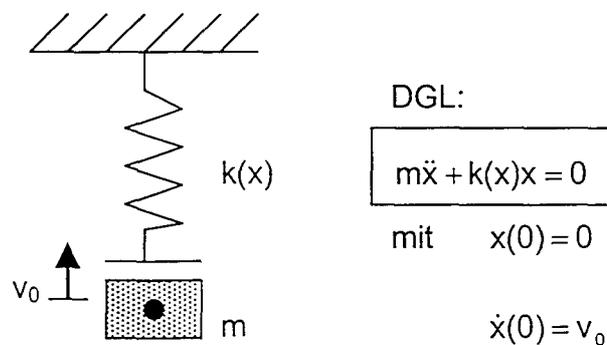


Bild B. 8: Einmassenschwinger mit nichtlinearer Federsteifigkeit

Das entsprechende Ersatz-System eines Einmassenschwingers ist in Bild B. 8 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:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (\text{B.7})$$

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

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

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:

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

solange diese größer sind als die elastischen Verformungen.

Für die nachstehenden relevanten Parameter:

m	Gesamtmasse der Abschlußelemente	= 16,4 · 24,08	= 394,9 kg
v	Geschwindigkeit der Abschlußelemente		= 16,82 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:

$$x_{\text{max}} = \sqrt{\frac{\frac{394,9 \cdot 0,30 \cdot 16,82^2}{2 \cdot 1,44} - \frac{9,0 \cdot 10^6 \cdot 0,006^2}{2}}{9,0 \cdot 10^6 + \frac{1}{2} \cdot 0,25 \cdot 10^6}} + 0,006 = 0,041 \text{ m}$$

und daraus

$$\varepsilon = \frac{x_{\max}}{h} = 0,138$$

Aus Bild B. 7 läßt sich dann die dazugehörige Spannung im Polystyrol ermitteln.

$$\sigma = 0,19 \text{ MN/m}^2$$

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

$$q = \sigma \cdot b = 0,19 \cdot 0,16 \cdot 10^3 = 30,4 \text{ kN/m}$$

Für einen Träger mit 4 Feldern und einem belasteten Feld folgt:

$$\max|M| = 0,054 \cdot q \cdot l^2 = 0,054 \cdot 30,4 \cdot 4,75^2 = 37,0 \text{ kNm}$$

$$\max \sigma = \frac{\max|M|}{\text{vorhW}} = \frac{37,0 \cdot 10^{-3}}{220,0 \cdot 10^{-6}} = 168,4 \text{ N/mm}^2 < \beta_r = 370 \text{ N/mm}^2$$

B 1.6 Entleerungsgeschoß

Die Abmessungen sind im einzelnen Bild B. 1 zu entnehmen.

Volumen	$V = (18,35 \cdot 18,35 - 5,0 \cdot 5,0) \cdot 6,0$	= 1870,3 m ³
fiktive Höhe ³	$H =$	= 18,35 m
fiktive Grundfläche	$A = 6,0 \cdot 18,35$	= 110,1 m ²
fiktive Durchmesser	$D^* = \sqrt{4 \cdot 110,1 / \pi}$	= 11,84 m
H/D^*		= 2
K_{St} -Wert ⁴	=	= 150 bar·m/s
p_{red} gewählt	=	= 0,3 bar

³ Es muß die größte Abmessung als Höhe zur Ermittlung des H/D-Wertes gewählt werden, weshalb diese Höhe als fiktive Höhe bezeichnet wurde.

⁴ aus: Sicherheitstechnische Informations- und Arbeitsblätter 140260 – 140279 des BIA – Handbuches, Verlag Erich Schmidt, Bielefeld, bzw. aus Tabelle A.1 der Richtlinie

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 trägfähig versagen, d. h. in Gleichung (2) aus der Richtlinie ist $K_m = 0$ zu setzen.

Aus dem Bemessungsdiagramm für $H/D = 2$ der Richtlinie erhält man:

$$K_p = 1125 \frac{\sqrt{\text{m}^3 \text{bar}}}{\text{s}}$$

$$K_m = 0$$

Und unter Verwendung von Gleichung (1) der Richtlinie ist die erforderliche Entlastungsfläche:

$$A_E = 71,0 \text{ m}^2$$

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.

B 2 Beispiel 2: 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 NEPA 68-1988 entnommen.

B 2.1 Ausgangssituation

Für das Lagergebäude nach Bild B. 9 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 0,4 bar. Die Entlastung erfolgt trägheitsfrei.

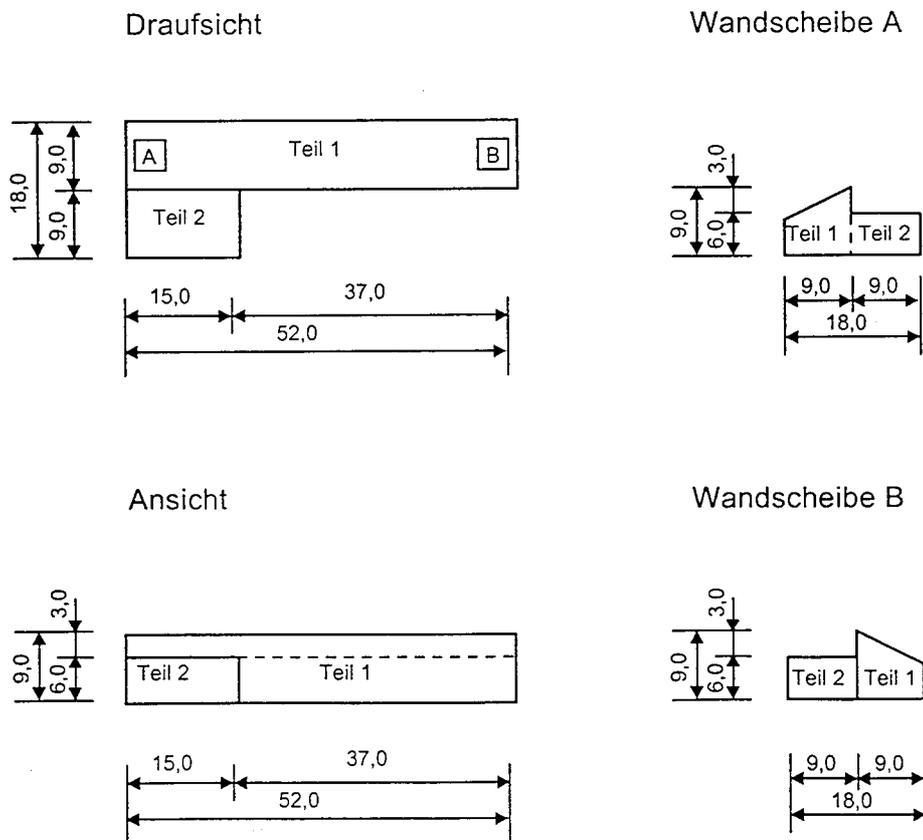


Bild B. 9: Abmessungen des Lagergebäudes

B 2.2 Gebäudeteil 1

Die Abmessungen sind wiederum im einzelnen Bild B. 9 zu entnehmen.

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

Als Entlastungsfläche sind in der Dachfläche und an der höheren Gebäudeseite Oberlichter bzw. hochliegende Fensterflächen vorgesehen. Insgesamt stehen $156,0 \text{ m}^2$ zur Verfügung. Die Entlastung erfolgt somit trägheitsfrei und folgt somit aus der Richtlinie:

$$K_p = 1300 \frac{\sqrt{\text{m}^3 \text{bar}}}{\text{s}}$$
$$K_m = 0$$

und mit Gleichung (1) der Richtlinie $K_{\text{St}}^{\text{max}} = 225 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$

B 2.3 Gebäudeteil 2

Die Abmessungen sind wiederum im einzelnen Bild B. 9 zu entnehmen.

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

Als Entlastungsfläche sind in der Dachfläche und an der höheren Gebäudeseite Oberlichter bzw. hochliegende Fensterflächen vorgesehen. Insgesamt stehen $45,0 \text{ m}^2$ zur Verfügung. Die Entlastung erfolgt somit trägheitsfrei und ergibt sich aus der Richtlinie für $K_m = 0$:

$$K_p = 1125 \frac{\sqrt{\text{m}^3 \text{bar}}}{\text{s}}$$

und mit Gleichung (1) der Richtlinie $K_{\text{St}}^{\text{max}} = 191,0 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$

B 2.4 Verteilung der Entlastungsflächen

In beiden Fällen reicht die vorgesehene Entlastungsfläche für Stäube mit einem maximalen Staubkennwert $K_{St}^{max}=191,0 \text{ bar}\cdot\text{m/s}$ 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.

B 3 Beispiel 3: Silozelle mit verschiedenen Lagerstoffen

Es wird eine Silozelle untersucht, die mit verschiedenen Lagerstoffen gefüllt werden kann.

Die Abmessungen sind folgendermaßen:

$$\begin{aligned} H &= 40 \text{ m} \\ D &= 10 \text{ m} \\ H/D &= 4 \end{aligned}$$

Daraus errechnet sich dann das Volumen:

$$V = \frac{\pi \cdot 10^2}{4} \cdot 40 = 3141,6 \text{ m}^3$$

Die Entlastungsfläche soll zunächst 30 % des Siloquerschnitts betragen.

$$\begin{aligned} A_E &= 30 \% \cdot A_{\text{Silo}} \\ A_{E,1} &= 0,3 \cdot \frac{\pi \cdot 10^2}{4} = 23,56 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Es wird eine Entlastungsöffnung gewählt

$$n = 1$$

Die Flächenlast des Entlastungsdeckels wird wie folgt angenommen:

$$m_E = 100 \text{ kg/m}^2$$

Nach Gleichungen (1) und (2) lassen sich die Werte K_p und K_m berechnen:

$$K_p = \frac{V^{\frac{5}{6}} \cdot K_{St}}{A_E} = \frac{3141,6^{\frac{5}{6}} \cdot K_{St}}{23,56} = 34,84 \cdot K_{St} \frac{\sqrt{\text{m}^3 \text{bar}}}{\text{s}}$$

$$K_m = \frac{\sqrt{m_E} \cdot K_{St}^{\frac{5}{4}} \cdot V^{\frac{1}{24}}}{n^{\frac{1}{4}}} = \frac{\sqrt{100} \cdot K_{St}^{\frac{5}{4}} \cdot 3141,6^{\frac{1}{24}}}{1} = 13,99 \cdot K_{St}^{1,25} \sqrt{\text{kg}} \left(\frac{\text{bar}}{\text{s}} \right)^{\frac{5}{4}} \text{m}^{\frac{3}{8}},$$

wobei K_{St} in $\frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}}$ ist.

Die Ermittlung von p_{red} für die verschiedenen Stoffe erfolgt aus dem Diagramm nach der Richtlinie für $H/D = 4$ und ist in der nachfolgenden Tabelle B. 1 aufgestellt:

Lagermaterial	K_{St} [$\frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}}$]	K_p [$\frac{\sqrt{\text{m}^3 \text{bar}}}{\text{s}}$]	K_m [$\sqrt{\text{kg}} \left(\frac{\text{bar}}{\text{s}} \right)^{\frac{5}{4}} \text{m}^{\frac{3}{8}}$]	p_{red} [mbar] Deckel	p_{red} [mbar] Klappen
Kaffee	90	3135,9	3877,2	1600	1150
Getreide	130	4529,6	6139,7	2550	1800
Milchpulver	160	5574,9	7959,1	3000	2300
Maisstärke	210	7317,0	11181,2	3800	3100
Cellulose	270	9407,6	15308,0	4500	4000

Tabelle B. 1: Zusammenfassung der Ergebnisse für $A_E = 30 \% A_{\text{Silo}}$

Der direkte Einfluß vom K_{St} -Wert auf den reduzierten Explosionsdruck p_{red} ist deutlich zu erkennen. Je höher der K_{St} -Wert, desto höher ist auch p_{red} . Hingegen hat der K_{St} -Wert keinen direkten Einfluß auf den maximalen Explosionsdruck p_{max} im geschlossenen Behälter (siehe Tabelle A.1)

Erhöht man die Entlastungsfläche auf nur 40 % der Siloquerschnittsfläche, so reduziert sich p_{red} , wie aus der nachstehenden Tabelle ersichtlich ist, deutlich im Vergleich zu p_{red} bei einer Entlastungsfläche gleich 30 % der Siloquerschnittsfläche (eine Reduktion bis zu 37 %).

$$A_{E,2} = 40\% \cdot A = 0,4 \cdot \frac{\pi \cdot 10^2}{4} = 31,4 \text{ m}^2$$

Damit ändert sich auch der Wert von K_p :

$$K_p = \frac{V^{\frac{5}{6}} \cdot K_{St}}{A_{E,2}} = \frac{311,6^{\frac{5}{6}} \cdot K_{St}}{31,4} = 26,1 \cdot K_{St}$$

Die übrigen Angaben können aus der obigen Berechnung übernommen werden.

Somit ergibt sich die nun nachfolgende Tabelle B. 2:

Lagermaterial	K_{St} $\left[\frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}} \right]$	K_p $\left[\frac{\sqrt{\text{m}^3 \text{bar}}}{\text{s}} \right]$	K_m $\left[\sqrt{\text{kg}} \left(\frac{\text{bar}}{\text{s}} \right)^{\frac{5}{4}} \text{m}^{\frac{3}{8}} \right]$	p_{Pred} [mbar] Deckel	Reduktion von p_{Pred} Deckel	p_{Pred} [mbar] Klappen	Reduktion von p_{Pred} Klappen
Kaffee	90	2352,5	3877,2	1000	37,5 %	850	26,1 %
Getreide	130	3398,1	6139,7	1700	33,3 %	1400	22,2 %
Milchpulver	160	4183,0	7959,1	2350	21,7 %	1800	21,7 %
Maisstärke	210	5490,1	11181,2	~3100	~	2500	19,4 %
Cellulose	270	7058,7	15308,0	~3700	~	3400	15,0 %

Tabelle B. 2: Zusammenfassung der Ergebnisse für $A_E = 40 \% A_{\text{Silo}}$

Auffallend ist, daß die Erhöhung der Entlastungsfläche sich stärker auf p_{Pred} , der aus der Explosion von Stoffen mit einem niedrigen K_{St} -Wert entsteht, auswirkt.

B 4 Beispiel 4: Silo mit verschiedenen H/D – Verhältnissen

Für ein zylindrisches Silo mit unterschiedlichen H/D – Verhältnissen wird der Lastfall Staubexplosion dem Lastfall Entleeren und Füllen nach DIN 1055, Teil 6 gegenübergestellt. Der Lastfall Staubexplosion wurde auf 3 verschiedene Arten berechnet, nämlich nach der VDI-Richtlinie 3673 (Juli 1995), der "alten" (1993) und der "neuen" Staubrichtlinie (1999).

Das Volumen V , der K_{St} -Wert, die Entlastungsfläche A_E und die bezogene Masse m_E bleiben konstant. Ein Deckel wurde als Entlastungsvorrichtung vorgesehen. Als Lagerstoff wurde Weizenmehl verwendet.

Folgende Angaben werden gemacht:

$$\begin{aligned} V &= 1570 \text{ m}^3 \\ K_{St} &= 100 \text{ bar}\cdot\text{m/s} \\ A_E &= 31,4 \text{ m}^2 \\ m_E &= 100 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

Die Ergebnisse dieser 5 Berechnungen werden im folgenden Bild B. 10 miteinander verglichen. Für die Lastfälle nach DIN 1055, Teil 6 wurden die Sicherheitsbeiwerte berücksichtigt. Für den Katastrophenlastfall Staubexplosion betragen diese den Wert 1,0.

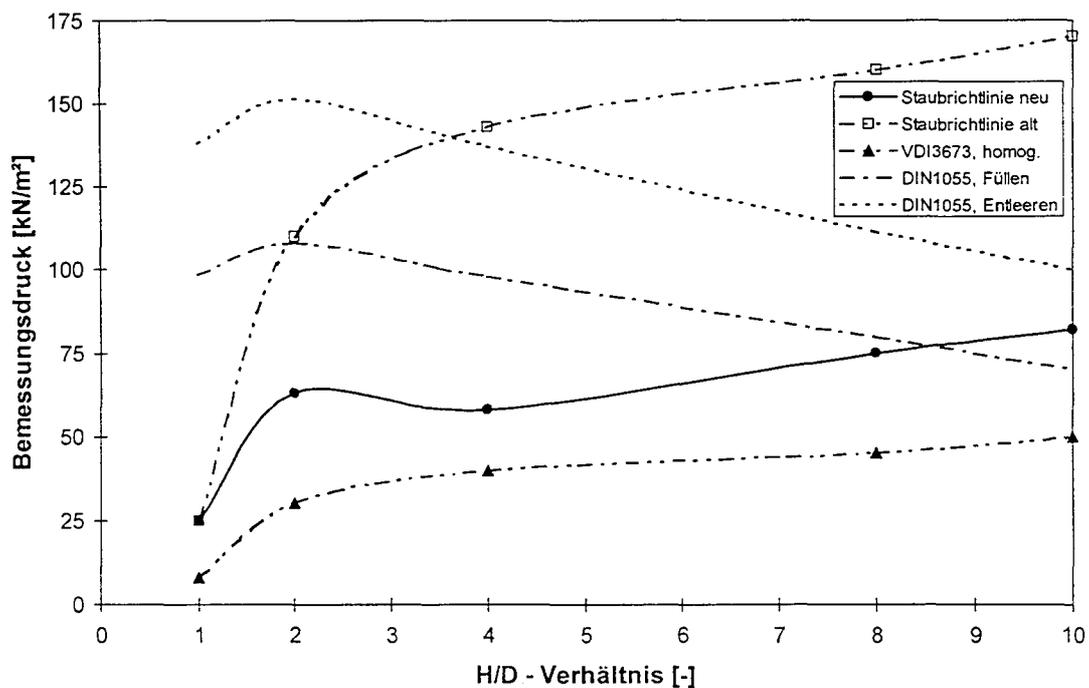


Bild B. 10: Vergleich der Horizontalbelastung

Der Unterschied zwischen der "alten" und der "neuen" Staubrichtlinie liegt u. a. an dem verbesserten Ansatz der effektiven Brenngeschwindigkeit und der flammenerzeugten Turbulenzgenerierung während des Explosionsvorganges.

Der Unterschied zwischen der "neuen" Staubrichtlinie und der VDI-Richtlinie liegt hauptsächlich an der Berücksichtigung der Massenträgheit und Strömungsbehinderung des Abschlußelementes, wonach es zu einer Erhöhung des Bemessungsdrucks führt.

In diesem Beispiel zeigt sich, daß erst ab ca. $H/D = 8$ der Bemessungsdruck aus der "neuen" Staubrichtlinie (1999) den Lastfall Füllen nach DIN 1055, Teil 6 übersteigt. Dementsprechend ist bei diesem Fall der Katastrophenlastfall Staubexplosion erst bei höheren H/D-Verhältnissen maßgebend. Zu beachten ist dennoch, daß eine Staffelung der Bewehrung bei einer Staubexplosion nicht möglich ist, weil der Explosionsdruck sich gleichmäßig über die Höhe verteilt.