

ExProtect

Ein Programm zur Beantwortung wichtiger Fragen zum angewandten Explosionsschutz

Dirk Lorenz, Hermann Schiebler

Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten

Mannheim, Germany

Zusammenfassung ExProtect ist ein erweiterbares Programm-Paket unter WINDOWS 9X/NT, welches aus den Programmteilen SIMEK, STS, Vent und Vessel besteht. Durch die numerische Lösung der entsprechenden Bewegungsgleichungen berechnet SIMEK den zeitlichen Kraftverlauf, der bei der Druckentlastung von Silo-Behältern über Druckentlastungsklappen oder -deckel auf deren Halterungsscharniere oder -seile wirkt. Dabei werden Zeit-Druck-Kurven verwendet, die mit Hilfe erweiterter Varianten des kubischen Gesetzes und Formeln aus der VDI-Richtlinie 3673 abgeleitet werden. SIMEK bietet anschließend die Möglichkeit, Scharniere oder Stahlseile der auftretenden Belastung anzupassen. Im Fall zu schwacher Verankerungen der Entlastungselemente (Abriss) können die Flugbahnen dieser Elemente berechnet werden. Außerdem wird die Entlastungsfähigkeit des Entlastungselementes, der auftretende reduzierte Überdruck und die reduzierte Druckanstiegsgeschwindigkeit abgeschätzt. STS berechnet die wahrscheinlichste und die maximal mögliche Flugweite von Trümmern, wenn große Teile von Gebäuden oder Behältern durch die Wirkung von Staubexplosionen in deren Inneren zerstört werden. Dabei wird die Anfangsgeschwindigkeit der Trümmer mit Hilfe der Gleichungen von Gurney bestimmt und die Flugbahn numerisch berechnet. Berechnete und experimentell bestimmte Flugweiten stimmen gut überein. Vent dient der Berechnung von Druckentlastungsflächen oder reduzierten Überdrücken bei explosionsgefährdeten Räumen und Silos. Die dabei angewandten Rechenmethoden basieren auf Formeln, die aus der einschlägigen Literatur bekannt sind. Vessel unterstützt die Dimensionierung von Druckbehältern, wobei ebenfalls auf bekannte Methoden aus der Literatur zurückgegriffen wird.

Abstract ExProtect is an expandable software-package under WINDOWS 9X/NT containing the programs SIMEK, STS, Vent and Vessel. SIMEK was created on the basis of extensive experimental investigations to give answers about the required thickness of fastenings (hinges resp. ropes) and the demanded size of explosion doors and explosion lids for dust-explosion endangered containers and buildings. By using expanded versions of the VDI 3673 guideline-formula for reduced pressure and the cubic law SIMEK estimates the time-pressure curve of a dust explosion in the

considered container. With this **SIMEK** solves the equation of motion for explosion doors or -lids numerically and derives simultaneously the searched values of fastening-thickness. In case of too weak fastenings it can calculate the trajectories of the venting devices. **STS** is used to find out how far the debris of bursting containers or buildings will be flying after a dust-explosion. With a few data about the considered building and burnable dust **STS** finds the start-velocity of a fragment by using the equations of Gurney. The following calculation of the fragments trajectory is done numerically. Computed and in praxis observed distances of flying debris because of dust-explosions are in satisfactory agreement. If vent areas for explosion endangered rooms or containers are searched, then **Vent** will give the answers. The calculations of **Vent** are correct for vent devices without any mass inertia. The computer-code of **Vent** uses formulas of well-known guidelines and publications. Furthermore it contains some additional tools, which are the result of extensive experimental research. **Vessel** is a computer-code to solve questions about the stability of containers standing under pressure. The program uses calculation methods, which are taken from well-known literature.

1 Einleitung

In der Praxis werden teilweise konstruktiv sehr einfache Druckentlastungsvorrichtungen verwendet, die in der Regel zwar den Behälter zu schützen vermögen, nicht jedoch die nähere Umgebung des Behälters. Häufig werden solche Druckentlastungseinrichtungen durch eine oder mehrere Metall- oder Betonplatten verwirklicht, die mit Seilen oder Ketten am Behältnis verankert sind. Weil diese Seile bzw. Ketten bezüglich ihrer Belastbarkeit oft unterdimensioniert sind, besteht im Explosionsfall die Gefahr von reißenen Deckelverankerungen und dadurch fortgeschleuderten Entlastungsdeckeln. Ein schweres Unglück dieser Art aus der jüngeren Vergangenheit war der Anlass dafür, die im Entlastungsfall auftretenden Kräfte an den Verankerungen der Druckentlastungsdeckel experimentell zu untersuchen. Auf dem Versuchsgelände der BGN in Kappelrodeck (Schwarzwald) wurde ein Forschungsprojekt [1] durchgeführt, dessen Gegenstand die Absprengung von Druckentlastungsdeckeln verschiedener Massen von einem 1 m³-Behälter bei unterschiedlichen Explosionsparametern war. Die Entlastungsdeckel wurden dazu mit Stahlseilen über Kraftmessdosen am Silo verankert, so dass die von den Sicherungsseilen auf den Deckel ausgeübte Bremskraft nach der Deckelabsprengung direkt als Funktion der Zeit gemessen werden konnte. Dabei wurden Kräfte bis zu einigen 100 kN gemessen. Später wurde an dieses Projekt angeknüpft und die Fragestellung auf Entlastungsklappen erweitert. An einem 9,4 m³-Silo wurden Entlastungsklappen veränderlicher Masse der Wirkung verschie-

den heftiger Staubexplosionen ausgesetzt und der Öffnungswinkel der Klappen mit Hilfe eines Inkremental-Drehgebers als Funktion der Zeit aufgenommen. Daraus konnten alle interessierenden Größen abgeleitet werden. Abbildung 1 zeigt als Beispiel die erhaltenen maximalen Kräfte auf das Klappenscharnier als Funktion des maximalen reduzierten Überdrucken $p_{\text{red,max}}$ und des Klappenwiderstandes Q . Das Endergebnis war eine umfangreiche Studie [2], die sich theoretisch und experimentell mit der Mechanik von Druckentlastungsklappen und -deckeln auseinandersetzt, wobei auch Messdaten aus Klappenprüfungen mit größeren Versuchsbehältern eingeflossen sind. Klappen sind dabei einseitig durch ein Scharnier, Deckel durch mehrere Seile am zu entlastenden Behälter befestigt (siehe Abbildung 2). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen [1] und [2] wurden im Programm SIMEK¹ umgesetzt, welches dazu in der Lage ist, Befestigungen und Flächen von Druckentlastungsklappen und -deckeln für Behälter, wie sie in der VDI 3673 beschrieben werden, zu dimensionieren. Quasi als Nebenprodukt ergeben sich Näherungswerte für die Entlastungsfähigkeiten der berechneten Entlastungselemente. Darüber hinaus können die

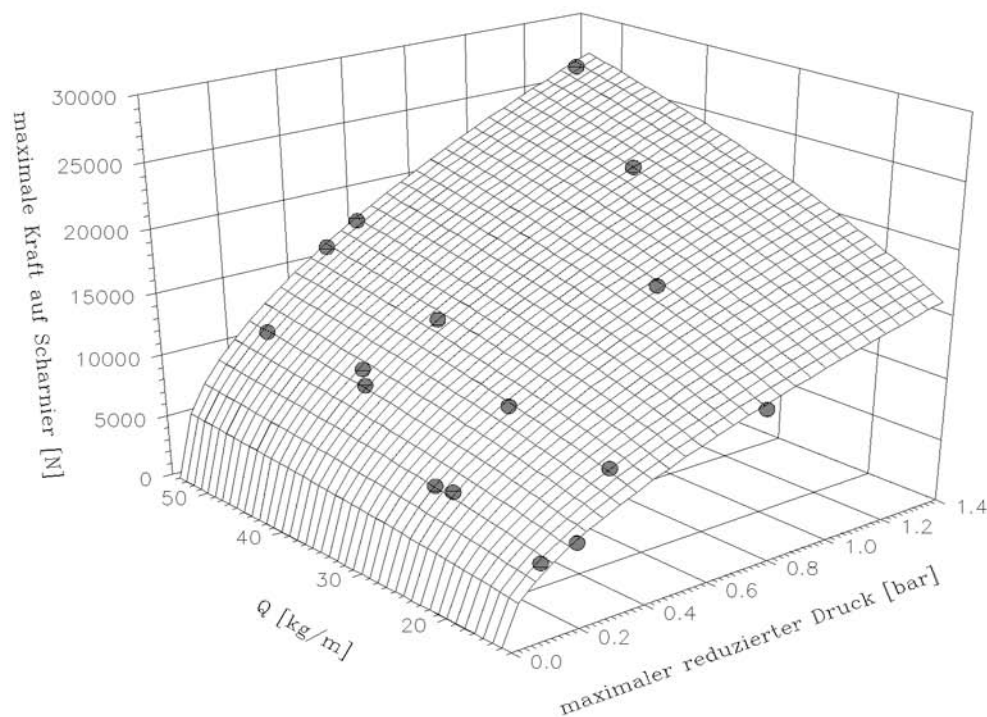


Abbildung 1: Auf das Klappenscharnier wirkende maximale Kraft in Abhängigkeit des maximalen reduzierten Überdruckes und dem Klappenwiderstand Q . Jeder Punkt ist das Mittel aus drei Messungen. Maximum hinge load on the explosion door as a function of maximum reduced pressure and explosion door resistance Q . Every point is the average of three measurements.

¹Simulationsrechnung zur Mechanik von Druckentlastungsklappen

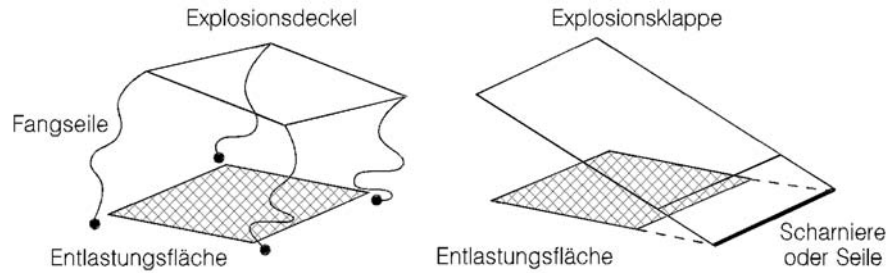


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Druckentlastungsklappe und eines -deckels. An explosion door and an explosion lid shown schematically.

Bei der Planung oder Begutachtung von Industrieanlagen stellt sich häufig die Frage, wie groß der Sicherheitsabstand zu benachbarten Gebäuden sein muss, damit diese bei Explosionsunglücken keinen Schaden nehmen. Ein Aspekt ist dabei die Abschätzung der Flugweiten und kinetischen Energien von Explosionstrümmern. Eine allgemein anerkannte Lösung für diese Problemstellung gibt es bisher nicht. Deshalb wurden die Erfahrungen aus [1] und [2] zusammen mit dem Know How aus [14] als Grundlage dazu benutzt, um eine entsprechende Berechnungsmethode aufzustellen. Das Ergebnis dieser Anstrengungen war das Programm STS², welches auf der Grundlage gängiger Daten über das betrachtete Gebäude und den bekannten Staubkennzahlen die wahrscheinliche und die maximal mögliche Flugweite von Explosionstrümmern errechnen kann. Vergleiche mit Experimenten zu diesem Themenkreis [13] und die Analyse von Explosionsunglücken haben gezeigt, dass die mit STS erhaltenen Trümmerflugweiten gut bis befriedigend mit den Beobachtungen übereinstimmen [12]. Diese Aussage gilt jedoch nur für die Fälle, bei denen relativ große Bereiche der Gebäudewand zerstört bzw. fortgeschleudert werden. Beide Programme sollten potentiellen Anwendern in einer benutzerfreundlichen Oberfläche zur Verfügung gestellt werden, weshalb eine solche Programmierung in Angriff genommen wurde. Diese Oberfläche wurde so konzipiert, dass weitere Programme ganz einfach in sie implementiert werden können. Weitere Programme kamen dann auch bald hinzu in Form von Vent und Vessel. Vent kann sowohl zur Berechnung von Druckentlastungsflächen als auch zur Berechnung des maximalen reduzierten Überdruckes in explosionsgefährdeten Behältnissen verwendet werden. In der Regel kommen dabei massenträgheitslose Entlastungselemente zum Einsatz. In Vent finden diverse Formeln aus der einschlägigen Literatur Anwendung [10], [11], [20], [21], [22]. Hinter dem Programm Vessel verbergen sich Formeln zur Dimensionierung von Druckbehältern, wie sie z. B. in [23] abgedruckt sind. Vessel ist als Tool dafür gedacht, die oft aufwendige Berechnung von Druckbehältern durch die Automatisierung der eigentlichen Rechnung zu erleichtern.

²Simulationsrechnung zum Trümmerflug bei Staubexplosionen

2 Mathematische Methoden hinter ExProtect

2.1 SIMEK

Aus den eingegebenen Daten wie Behältervolumen V , Entlastungsfläche A_E , K_{St} -Wert, Masse des Entlastungselementes m_E etc. schätzt SIMEK zunächst den zeitlichen Druckverlauf im Behälter ab, wobei dies nach der modifizierten Gaußfunktion

$$p(t) = p_{\text{red,max}} \cdot \exp \left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{|t - a|}{0,637 \cdot p_{\text{red,max}} \cdot \left(\frac{dp}{dt} \Big|_{\text{red,max}} \right)^{-1}} \right)^2 \right) \quad (1)$$

geschieht. Mit (1) lassen sich zumindest die aufsteigenden Druckflanken, und diese sind letztendlich wichtig für die Berechnung des Öffnungsvorganges des Entlastungselementes, bei druckentlasteten Behältern, in denen Staubexplosionen stattfinden, in guter Näherung beschreiben. Das zeigen umfangreiche Experimente auf unserem Versuchsgelände mit Silo-Behältern zwischen 1 m^3 und 60 m^3 Volumen [1], [2], [5], [6], [7]. Die Variable a in (1) kennzeichnet die Lage des Druckmaximums auf der Zeitachse und ist deshalb hier nicht von Bedeutung. Für $p_{\text{red,max}}$ ist in (1) einzusetzen:

$$p_{\text{red,max}} \approx \left[\left(3,264 \cdot 10^{-5} \cdot p_{\text{max}} \cdot K_{St} + \frac{1}{4} \cdot (p_{\text{stat}} - 0,1) \right) \cdot \frac{\sqrt[4]{V^3}}{A_E} \right]^{\frac{7}{4}} \cdot \exp \left(2,35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{K_{St}}{V^{\frac{3}{5}}} \cdot \sqrt{Q} \right) \quad Q = \frac{\Theta_K}{A_E \cdot h} \quad (2)$$

Q ist dabei der Klappenwiderstand und setzt sich aus dem Trägheitsmoment Θ_K bezüglich der Rotationsachse der (runden oder rechteckigen) Klappe, der Klappenfläche A_E und dem wirksamen Hebel h zusammen. Wie man sieht, ist (2) eine Variante der Formel zur Berechnung von Druckentlastungsflächen aus der VDI Richtlinie 3673. Mit Hilfe des angehängte Exponentialfaktors ist es möglich, alle Versuchsergebnisse bezüglich des $p_{\text{red,max}}$ aus [1], [2], [5], [6], [7] zu beschreiben (siehe hierzu auch Abbildung 3). Bei der Berechnung von $p_{\text{red,max}}$ gemäß (2) nimmt das V im Exponentialfaktor nie einen Wert über 60 m^3 an, da dies experimentell nicht abgesichert ist. Da die Trägheit von massenbehafteten Entlastungselementen aber mit zunehmendem Behältervolumen an Einfluss verliert, sind die Berechnungsergebnisse in jedem Fall für die Praxis anwendbar. Außerdem hat der Exponentialfaktor die Eigenschaft, für gegen Null gehende Masse des Entlastungselementes erwartungsgemäß zu verschwinden.

Für den zeitlichen Druckanstieg wird näherungsweise angesetzt:

$$\left. \frac{dp}{dt} \right|_{\text{red,max}} \approx 1,72 \cdot \frac{K_{St}}{\sqrt[3]{V}} \cdot \frac{p_{\text{red,max}}}{p_{\text{max}}} \quad (3)$$

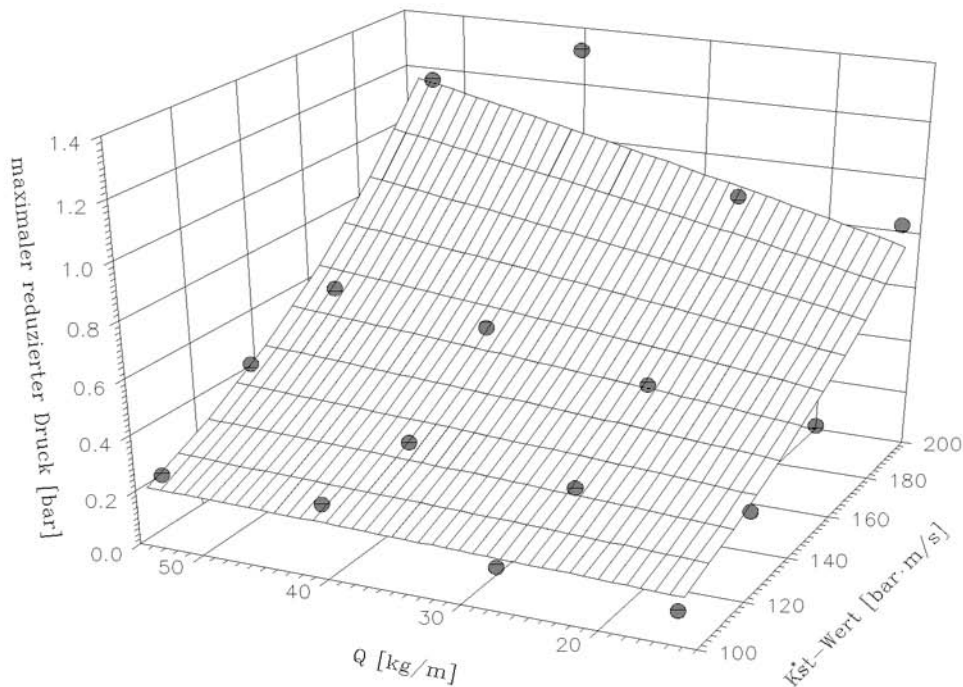


Abbildung 3: Beobachteter maximaler reduzierter Überdruck als Funktion von K_{St} -Wert und Klappenwiderstand Q . Jeder Punkt ist das Mittel dreier Versuchsergebnisse am $9,4 \text{ m}^3$ -Behälter. Die in die Punkte eingepasste Fläche wird durch (2) beschrieben ($R^2 \approx 0,9$). Observed maximum reduced pressure as a function of K_{St} -value and the explosion door resistance Q . Every point is the average of three measurements in a 9.4 m^3 -vessel. The fitted surface is described by (2) ($R^2 \approx 0.9$).

Auch Gleichung 3 ergab sich durch anpassen an oben erwähnte Versuchsergebnisse, wie man demonstrativ aus Abbildung 4 entnimmt.

Handelt es sich bei dem Entlastungselement um einen Deckel, so wird dieser zur Berechnung von $p_{red,max}$ und $\left. \frac{dp}{dt} \right|_{red,max}$ wie eine Klappe behandelt.

Mit dem so gewonnenen zeitlichen Druckverlauf wird die Kraft F_{Ex} bestimmt, die aufgrund der Explosionswirkung auf das Entlastungselement wirkt. Dabei ergibt sich in der Anfangsphase der Entlastung diese Kraft einfach aus dem Druck auf die Fläche gemäß $F_{Ex} = p(t) \cdot A_E$. Zu späteren Zeitpunkten wird diese Kraft durch einen veränderlichen Faktor ausgeblendet und langsam durch eine Reibungskraft (Newton-Reibung) ersetzt, die durch das Anströmen des abgeblasenen Siloinhaltes gegen das Entlastungselement erzeugt wird. Die Ausströmgeschwindigkeit des Siloinhaltes wird dabei mit Hilfe des zeitlichen Druckverlaufes berechnet. Schließlich ergibt sich der Öffnungswinkel $\varphi(t)$ der Entlastungskappen über der Zeit bzw. die Steighöhe des Entlastungsdeckels $y(t)$ über der Zeit als Lösung der Differentialgleichungen

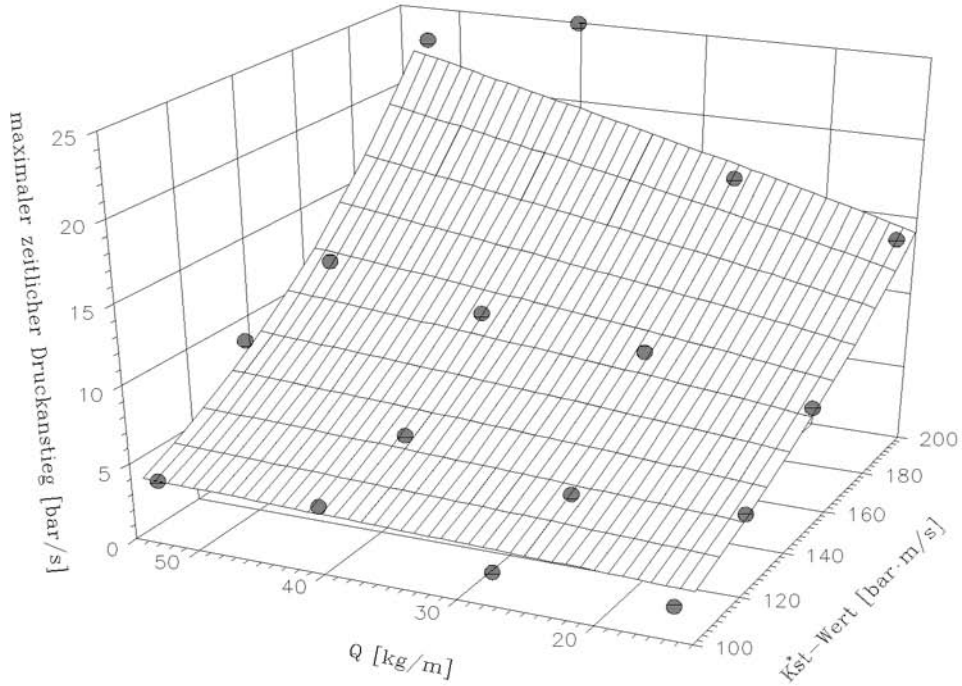


Abbildung 4: Beobachtete maximale reduzierte Druckanstiegsgeschwindigkeit als Funktion von K_{St} -Wert und Klappenwiderstand Q . Jeder Punkt ist das Mittel dreier Versuchsergebnisse am $9,4 \text{ m}^3$ -Behälter. Die in die Punkte eingepasste Fläche wird durch (3) beschrieben ($R^2 \approx 0,9$). Observed maximum reduced rate of pressure rise as a function of K_{St} -value and the explosion door resistance Q . Every point is the average of three measurements in a 9.4 m^3 -vessel. The fitted surface is described by (3) ($R^2 \approx 0.9$).

$$\ddot{\varphi}(t) = \frac{S}{\Theta_K} \cdot \left((F_{Ex}(t) + F_{Gr}) \cdot \cos \varphi(t) + F_{LR}(t) + F_{SR} \right) \quad (\text{Klappe}) \quad (4)$$

$$\ddot{y}(t) = \frac{1}{m(t)} \cdot \left(F_{Ex}(t) + F_{Gr} + F_{LR}(t) \right) \quad (\text{Deckel}) \quad (5)$$

mit Θ_K als auf die Drehachse bezogenes Trägheitsmoment der Klappe, S als Abstand Klappenschwerpunkt – Drehachse und $m(t)$ als Deckel- plus Fangseilmasse. Die wirkende Kräfte F sind durch Indizes gekennzeichnet: Ex=Kraft aufgrund der Explosionswirkung, Gr=Gravitation, LR=Luftwiderstand und SR=Scharnierreibung. Die zuletzt erwähnten Kräfte werden aus den Angaben über die Entlastungselemente (Masse, Vermaßung) berechnet.

Die Lösung von (4) bzw. (5) wird mit Hilfe des bekannten Runge-Kutta Verfahrens [15] numerisch durchgeführt, wobei die physikalischen Größen innerhalb des Silos wie z. B. die Dichte stets angeglichen werden. Aus dem errechneten Klappenöffnungswinkel bzw. der Deckelsteighöhe in Abhängigkeit der Zeit können auf einfache Weise die gesuchten Scharnier- oder Seilbelastungen

$F_K(t)$ bei Klappen oder die Seilbelastungen $F_D(t)$ bei Deckeln berechnet werden:

$$F_K(t) = \sqrt{\left(m \cdot S \cdot \dot{\varphi}^2(t)\right)^2 + \left(\frac{\Theta_S}{S} \cdot \ddot{\varphi}^2(t)\right)^2} \quad (\text{Klappe}) \quad (6)$$

$$F_D(t) = n \cdot E \cdot A_S \cdot \frac{\Delta l(t)}{l} \quad (\text{Deckel}) \quad (7)$$

In (6) steht m für die Masse und Θ_S für das Trägheitsmoment der Entlastungsklappe, wobei sich letzteres auf die Rotationsachse durch den Schwerpunkt der Klappe bezieht. $\dot{\varphi}$ und $\ddot{\varphi}$ sind die zeitabhängige Winkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung der Entlastungsklappe. In (7) steht n für die Anzahl, E für das Elastizitätsmodul, A_S für die Querschnittsfläche und l für die Länge der Deckelfangseile. $\Delta l(t)$ ist die Seildehnung während des Abfangvorganges.

Aus der Lösung von (4) oder (5) werden die Anfangsbedingungen für den Fall abgeleitet werden, dass die Befestigung der Entlastungselemente unterdimensioniert sind und es zu einem Abriss kommt. Mit den Bedingungen Startgeschwindigkeit, Starthöhe und Startwinkel kann die Bewegungsgleichung für den schiefen Wurf mit Newton-Reibung

$$m \cdot \ddot{\vec{r}}(t) = -\frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot \hat{N}(t) \cdot \dot{\vec{r}}(t) \cdot \dot{\vec{r}}(t) - m \cdot g \cdot \vec{e}_3 \quad (8)$$

durch numerische Integration gelöst und damit die Flugbahn abreißender Entlastungselemente berechnet werden. Es steht ρ_L für die Dichte der Luft, $\vec{r}(t)$, $\dot{\vec{r}}(t)$ und $\ddot{\vec{r}}(t)$ für den zeitabhängigen Ortsvektor und dessen zeitliche Ableitungen, m für die Masse des abgerissenen Entlastungselementes und g für die Erdbeschleunigung. Das fliegende Entlastungselement wird stets als rotierende runde Platte betrachtet. Diese Annahme wird in (8) durch den veränderlichen Tensors $\hat{N}(t)$ berücksichtigt wie im folgenden erläutert wird. Im Newton'schen Reibungsgesetz treten neben den oben genannten Größen noch ein körpercharakteristischer Widerstandsbeiwert c_w und die Körperquerschnittsfläche auf. Eine durch die Luft fliegende Platte mit kreisförmigem Querschnitt besitzt zwei sich wesentlich unterscheidende Querschnittsflächen A_x, A_y bzw. Reibungskoeffizienten c_x, c_y , wie man leicht Abbildung 5 entnimmt. Dieser Umstand kann in guter Näherung durch den Tensor

$$\hat{N}(t) = \begin{pmatrix} c_x \cdot A_x \cdot \cos^2 \beta(t) + & & 0 \\ c_y \cdot A_y \cdot \sin^2 \beta(t) & & \\ & c_x \cdot A_x \cdot \sin^2 \beta(t) + & \\ 0 & c_y \cdot A_y \cdot \cos^2 \beta(t) & \end{pmatrix} \quad (9)$$

beschrieben werden. Dieser Betrachtungsweise liegt die legitime Annahme zugrunde, dass die Platte starr um die horizontale z -Achse rotiert und dass der Geschwindigkeitsvektor $\vec{v}(t) = \dot{\vec{r}}(t)$ stets in der xy -Ebene liegt. Die Sinus- und Cosinusfunktionen des Winkels $\beta(t)$ in $\hat{N}(t)$

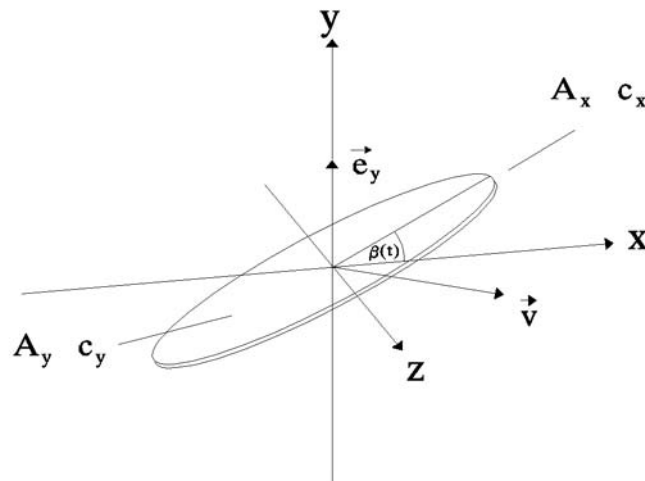


Abbildung 5: Skizze einer mit der Geschwindigkeit \vec{v} durch die Luft fliegenden Platte mit der momentanen Neigung $\beta(t)$ zur Horizontalen. Sketch of a round disk flying through the air at a velocity of \vec{v} and a momentary inclination $\beta(t)$ towards the horizontal line.

bringen die zeitabhängige Orientierung des Körpers³ in Bezug auf die ebenfalls horizontale x-Achse zum Ausdruck. Sie stellen die Berechnung der effektiven Querschnittsflächen in Richtung der Koordinatenachsen und näherungsweise die Veränderung des Reibungskoeffizienten durch die schräge Anströmung der Körperflächen dar. Im Gegensatz zu STS, das der Berechnung von Trümmerflugbahnen bei großflächiger Wandabsprengung dient, erlaubt also SIMEK eine Abschätzung der Flugweite bei Absprengung kleiner Wandflächen.

2.2 STS

STS dient der Flugbahnberechnung von Bruchstücken, die als Folge einer Staubexplosion in einem Behälter fortgeschleudert werden. Damit STS anwendbar ist, muss ein größerer Teil der Behälterwand zerstört werden. Als Berechnungsergebnis erhält man dann die Flugbahn mit der wahrscheinlichsten und mit der maximal möglichen Flugweite zusammen mit den jeweiligen kinetischen Einschlagenergien der betrachteten Trümmer. Die Grundlage für die Berechnung von Trümmerflugbahnen bei berstenden Gebäuden infolge von Staubexplosionen beruht - wie bei SIMEK - auf der numerischen Lösung der Gleichung (8). Allerdings besteht im Fall von STS die Schwierigkeit, die zur Bahnberechnung notwendigen Anfangsbedingungen wie Startgeschwindigkeit, Startwinkel, Starthöhe etc. der Trümmer zu bestimmen. Im folgenden werden die Formeln für die Bestimmung der Anfangsbedingungen kurz aufgezeigt. Die Ableitung dieser Formeln ist in [12] detailliert beschrieben.

³In der Regel bekommt ein abgerissenes Entlastungselement einen Drehimpuls mit.

Die Berechnung der Startgeschwindigkeit v_0 der Trümmer erfolgt mit Hilfe einer Kombination der Gurney- und Gasgleichung sowie dem ersten Hauptsatz der Wärmelehre:

$$v_0 \approx \sqrt{2 \cdot c_v \cdot T_0 \cdot \left(\frac{p_b}{p_0} - 1\right)} \cdot \left(\frac{m}{((p_b - p_0) \cdot p_{\max}^{-1} \cdot \rho_s \cdot V + \frac{1}{2})}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Hier ist p_b der Druck im Gebäude zum Berstzeitpunkt, T_0 bzw. p_0 die Normtemperatur bzw. der Normdruck, c_v die spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Volumen, ρ_s die Dichte des Staub/Luft-Gemisches, V das mit Brennstoff ausgefüllte Volumen, m die abgesprengte Masse und p_{\max} die staubspezifische Kenngröße des maximalen Überdruckes. Ist $p_{\text{red,max}} > p_b$, so wird ersterer in (10) anstelle von p_b eingesetzt. ρ_s wird im Programm näherungsweise mit $2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ angesetzt. Alle weiteren Größen können für ein gegebenes Gebäude ohne größere Schwierigkeiten angegeben werden. Die Formel (10) gilt für zylindrische Gebäude. Ist das betreffende Gebäude von quaderförmiger Geometrie, so ist der Bruch $\frac{1}{2}$ innerhalb der Klammer von (10) durch den Bruch $\frac{3}{5}$ zu ersetzen.

Für die Flugbahn mit maximaler Reichweite wird der Startwinkel α (bezogen auf die Horizontale) der Trümmer durch

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\sqrt{2 \cdot (v_0^4 + 3 \cdot v_0^2 \cdot h \cdot g + 2 \cdot h^2 \cdot g^2)}}{2 \cdot (v_0^2 + h \cdot g)} \right) \quad (11)$$

beschrieben. Darin ist h die Starthöhe, g die Erdbeschleunigung und v_0 die Startgeschwindigkeit der Trümmer. Zur Berechnung der am wahrscheinlichsten auftretenden Trümmerflugbahn wird $\alpha = 0$ rad gesetzt (Absprengung senkrecht zur Behälterwand).

Die Starthöhe h ergibt sich aus der Lage der Oberkante der Berstfläche (maximale Reichweite) bzw. aus der Lage des Zentrums der Berstfläche (wahrscheinlichste Reichweite).

Mit der bekannten Dichte ρ_s und Stärke des Wandmaterials c_s des Gebäudes und mit der Fläche eines Trümmerstückes $a_s \cdot b_s$ ergibt sich dessen Masse aus

$$m = \rho_w \cdot a_s \cdot b_s \cdot c_s \quad (12)$$

Für den Flug durch die Luft werden die Trümmer – wie bei SIMEK als runde, rotierende Scheiben betrachtet. Die Berechnung der Flugbahnen und der kinetischen Einschlagenergien erfolgt dann wie unter Abschnitt 2.1 beschrieben durch numerische Integration der Gleichung (8).

Um die Leistungsfähigkeit dieser Berechnungsmethode zu demonstrieren, sei hier ein Vergleich zwischen experimentellen Ergebnissen aus [13] und dazu durchgeführten Berechnungen mit STS gezeigt. Bei den Versuchen in [13] wurde ein $17,6 \text{ m}^2$ großer und 7 mm starker Bereich aus Glas aus der Wand eines kubischen Raumes mit einem Volumen von 324 m^3 durch Staubexplosion herausgesprengt. Mit $p_{\max} = 8,8 \text{ bar}$, $m = 280 \text{ kg}$ und dem gemessenen $p_{\text{red,max}} = 0,082 \text{ bar}$

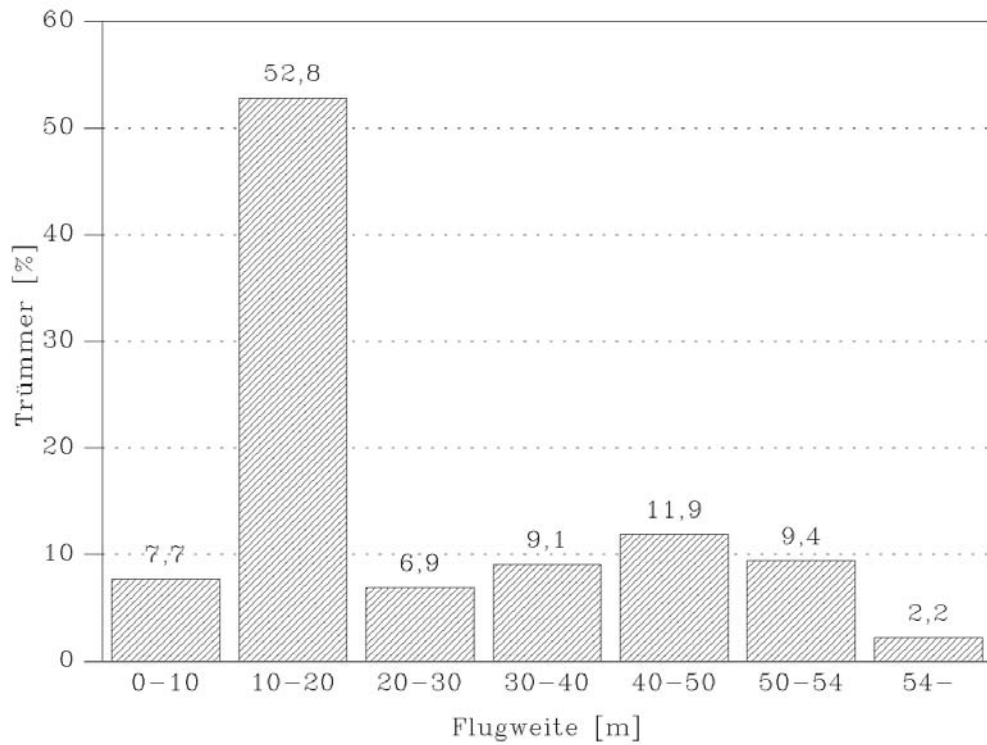


Abbildung 6: Ergebnis einer experimentellen Untersuchung über Glastrümmer-Flugweiten [13].
Results of the experimental research about the flight distances of glas-debris [13].

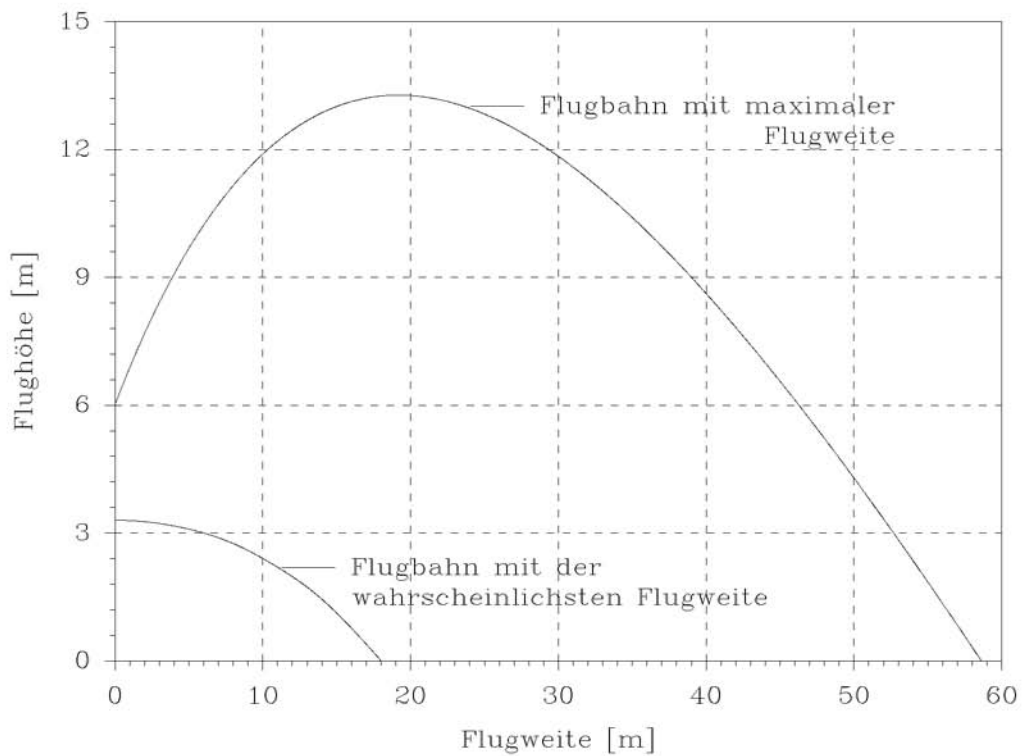


Abbildung 7: Mit STS berechnete Glastrümmer-Flugbahnen für die Versuchsbedingungen aus [13]. With STS calculated trajectories of glas-debris for the parameters described in [13].

errechnete STS die Flugbahnen aus Abbildung 7. Die bei den Experimenten beobachtete Trümmerverteilung ist in Abbildung 6 dargestellt. Ein Vergleich beider Abbildungen macht die gute Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Rechnung deutlich (siehe [12]).

2.3 Vent

Vent berechnet parallel nach mehreren Methoden Entlastungsflächen für vorgegebene maximale reduzierte Überdrücke für staubexplosionsgefährdete Behälter und explosionsgefährdete Räume. Gleichzeitig werden Druck-Flächen-Kurven für die eingegebenen Parameter generiert. In der Regel gelten die mit Vent erhaltenen Ergebnisse für massenträgheitslose Entlastungselemente. Zur Berechnung von Entlastungsflächen bei staubexplosionsgefährdeten Behältern benutzt Vent parallel zu den einschlägigen Formeln aus [10] und [11] die Formel von Radandt

$$A_E = \left(a + \frac{b}{p_{\text{red}}} \right) \cdot V^c \quad (13)$$

mit $a = 0,011$, $b = 0,069$ und $c = 0,776$ für die Staubexplosionsklasse 1. Für die Staubexplosionsklasse 2 nehmen diese Koeffizienten die Werte $a = 0,012$, $b = 0,114$ und $c = 0,72$ an [22]. Die Berechnung von Entlastungsflächen A_E für Räume wird neben den allgemein bekannten Formeln aus [10] und [11] durchgeführt mit

$$A_E = \frac{0,75 \cdot A_S}{p_{\text{bem}} \cdot 100} \quad (14)$$

$$A_E = \frac{C \cdot A_S}{\sqrt{p_{\text{bem}} \cdot 100}} \quad (15)$$

A_S ist hier die Fläche der Innenwände des betrachteten Raumes. Der reduzierte Druck p_{bem} ist hier als der Druck definiert, dem die schwächste Struktur innerhalb der Wand des Raumes gerade noch standhält [21], [20]. In (15) ist $C = 0,26 \sqrt{\text{kPa}}$ für $100 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}} < K_{\text{St}} \leq 200 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$, $C = 0,3 \sqrt{\text{kPa}}$ für $200 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}} < K_{\text{St}} \leq 300 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$ und $C = 0,51 \sqrt{\text{kPa}}$ für $200 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}} < K_{\text{St}}$ [20].

2.4 Vessel

Im Programmteil Vessel finden ausschließlich Formeln Verwendung, die in der allgemein bekannten Literatur zum Thema Druckbehälterdimensionierung veröffentlicht wurden. Stellvertretend für die zahlreichen Veröffentlichungen seien hier [23] und [24] genannt.

3 Die Anwendung von ExProtect

Die gegenwärtige Version 3.1.0 von ExProtect ist eine normale Anwendung unter WINDOWS 9X/NT. Die Installation erfolgt wie bei solchen Programmen üblich über eine Installationsroutine, welche Verzeichnisse erstellt, Programmeintragungen vornimmt und Icons erstellt. Ein Mausklick auf das ExProtect-Icon öffnet das Hauptmenü. Die dort befindlichen zwölf zentralen Tasten, von denen die ersten vier durch SIMEK, STS, Vent und Vessel belegt sind, dienen dem Start der implementierten Unterprogramme. Wie allgemein üblich, kann mit der Taste „F1“ eine ausführliche Hilfe aufgerufen werden, in der Anwendungsmöglichkeiten, Programmhandhabung und Berechnungsmethoden erläutert werden.

Mit Hilfe einiger praxisnaher Beispiele wird nun der Umgang mit ExProtect erläutert.

3.1 SIMEK

Ein Silo, in dem brennbarer Staub gelagert wird, wird wegen fehlender Explosionsschutzmaßnahmen bemängelt und es sollen mit möglichst geringem planerischen Aufwand druckentlastende Explosionsklappen in die Silowand eingebaut werden. Für solche und ähnliche Problemstellungen wurde SIMEK konzipiert: Ein Mausklick auf die „SIMEK“-Taste startet das Programm und es erscheint die Maske für die Eingabe der allgemeinen Problem-Parameter (Abbildung 10). Um eine Problemlösung anbieten zu können, benötigt SIMEK mindestens 4 Parameter, nämlich das Behältervolumen V , den K_{St} -Wert, das Verhältnis H/D und den reduzierten Überdruck p_{red} , den es einzuhalten gilt. Die ersten drei dieser Werte müssen hier eingetragen und die Art des Entlastungselementes gewählt werden. Für das im Beispiel betrachtete Silo sollen rechteckige Explosionsklappen benutzt werden und es soll gelten: $V = 100 \text{ m}^3$, $K_{St} = 200 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$, $H/D = 1$ und $p_{red} = 0,5 \text{ bar}$. Durch einen Mausklick auf die Taste „Fläche berechnen“ wird nun ein Fenster geöffnet, in dem der Anpassungsprozess der Entlastungsflächen durchgeführt wird. Nach Eintragung des reduzierten Überdruckes in das dafür vorgesehene Feld, wird die Flächenanpassung automatisch gestartet. Wie man Abbildung 9 entnimmt, errechnet SIMEK für das Silo im Beispiel eine Entlastungsfläche von $3,188 \text{ m}^2$, welche sich auf zwei Entlastungsklappen verteilt. Als Berechnungsgrundlage werden dabei Riffelbleche mit 5 mm Stärke⁴ angenommen. Mit einem Mausklick auf die Taste „übernehmen“ werden die errechneten Werte in den weiteren Programmablauf übernommen und man gelangt in das Fenster, in dem die physikalischen Eigenschaften einer Explosionsklappe eingegeben werden (Abbildung 10). Weil in unserem Beispiel die automatische Flächenanpassung zum Einsatz kam, sind diese Parameter schon alle gesetzt.

⁴Das entspricht einem Flächengewicht von rund $38,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$. Dieser Parameter ist veränderbar.

SIMEK - allgemeine Angaben

weiter
zurück

notwendige Eingaben

Behältervolumen [m³]: 100

KSt-Wert [bar·m/s]: 200

Entlastungsfläche [m²]:

Behälterhöhe/Durchmesser: 1

Anzahl der Entlastungselemente:

Fläche berechnen

Entlastungselement

Klappe
 Deckel

Ausführung

rund
 rechteckig

optionale Eingaben

Staubkonzentration [kg/m³]:

maximaler Überdruck [bar]:

stat. Ansprechdruck [bar]:

Projektname: laden

Neuanfang beenden

Abbildung 8: SIMEK-Fenster zur Eingabe der allgemeinen Problem-Parameter. SIMEK-window for input of general data of the problem.

Flächenanpassung

nach SIMEK-Methode
 nach VDI 3673

übernehmen
zurück

geben Sie predmax ein: 0.5 [bar] Differenz = 0.001

Entlastungsfläche = 3.188 [m²]

Entlastungsfläche pro Element = 1.594 [m²]

Anzahl der Entlastungselemente = 2

abbrechen

Abbildung 9: SIMEK-Fenster zur Berechnung der notwendigen Entlastungsfläche. SIMEK-window to calculate the necessary vent area.

SIMEK - rechteckige Klappe

weiter
zurück

notwendige Eingaben	
Masse	[kg] : 68.40
Ausdehnung	[m] : 1.41
Seite A	[m] : 1.26
Seite B	[m] : 1.26
Rand	[m] : 0
Öffnung	[m] : 1.26

optionale Eingaben	
Schwerpunkt	[m] : 0.77
Trägheitsmoment	[kg·m ²] : 50.66

Standard-Klappe

Scharnier

Seil

Scharnier

Bild

Neuanfang

beenden

Abbildung 10: SIMEK-Fenster zur Eingabe der physikalischen Eigenschaften einer Explosionsklappe. SIMEK-window for input of physical data of an explosion door.

In diesem Fenster kann nun noch ausgewählt werden, ob die Klappen mit Scharnieren oder Seilen am Silo befestigt werden sollen (im Beispiel wurden Scharniere gewählt). Für den Fall, dass die Klappendaten nicht gesetzt sind, kann mit Hilfe der „Bild“-Taste eine Grafik aufgerufen werden, die der Veranschaulichung der gefragten Daten dient.

Durch Anklicken der Taste „weiter“ wird das Fenster zur Anzeige des geschätzten zeitlichen Überdruckverlaufs im Explosionsfall geöffnet (Abbildung 11). Neben dem Druckverlauf im entlasteten Silo wird der erwartete reduzierte Überdruck, die maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit und die Entlastungsfähigkeit der Explosionsklappen angegeben. Durch Klick mit der rechten Maustaste innerhalb des Grafikfeldes wird ein Menü aufgerufen, das zum Ausdrucken, Speichern, Exportieren etc. der Grafik befähigt.

Betätigen der „weiter“-Taste startet die Simulation des Druckentlastungsvorganges und öffnet das entsprechende Fenster (Abbildung 12). Nach Beendigung der Simulationsrechnung erscheint im Grafikfeld dieses Fensters die Belastung über der Zeit, die unsere Explosionsklappe auf ihre Scharniere ausübt. Alternativ kann der Klappenöffnungswinkel oder der Überdruckverlauf als Funktion der Zeit dargestellt werden, wenn die entsprechenden Tasten angeklickt werden.

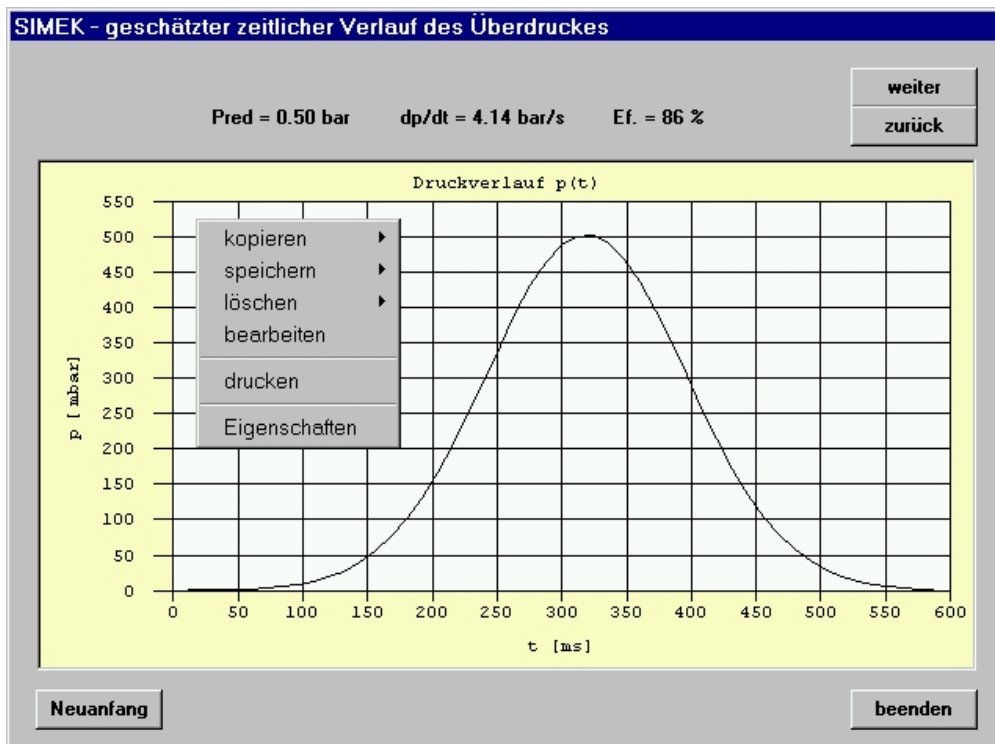


Abbildung 11: SIMEK-Fenster zur Anzeige des geschätzten zeitlichen Verlaufs des Überdruckes. SIMEK-window for showing the estimated temporal evolution of overpressure.

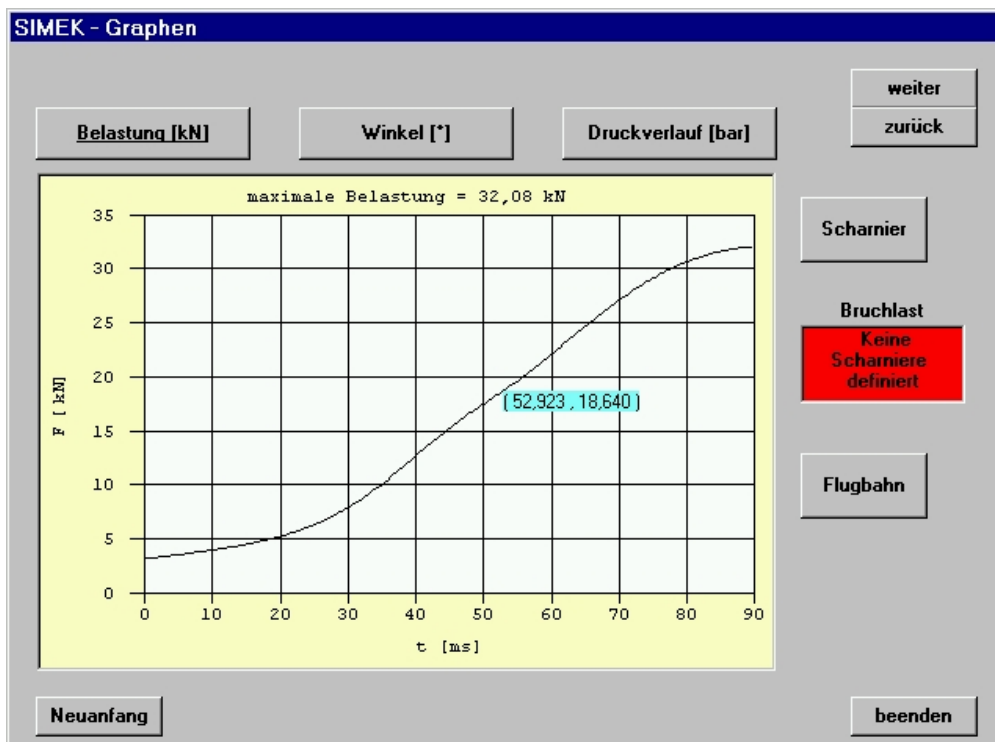
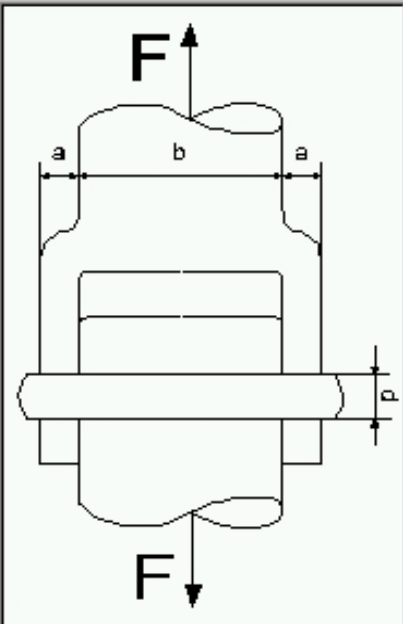


Abbildung 12: SIMEK-Fenster zur Anzeige der Berechnungsergebnisse. SIMEK-window for showing the results of calculations.

Scharnierfestigkeit



Gerechnet wird für eine schwellende Belastung und Gleitsitz glatter Bolzen.

$a =$ mm
 $b =$ mm
 $d =$ mm
 $F =$ kN

übernehmen

zurück

Anzahl der Scharniere :

Belastung = **32.08 kN**

Bruchlast = **69.12 kN**

Siehe: Decker "Maschinenelemente", Seite 238, Carl Hanser Verlag München Wien, 10. Auflage

Abbildung 13: SIMEK-Fenster zur Dimensionierung von Scharnieren für Explosionsklappen. SIMEK-window to design hinges for explosion doors.

Ein Mausklick in das Grafikfeld zeigt das Wertepaar für die Koordinate des Mauszeigers an (blaues Feld). Oberhalb der Grafik wird die maximal auftretende Scharnierbelastung angezeigt, welcher die noch zu dimensionierenden Scharniere standhalten müssen. Zur Planung von ausreichend stabilen Scharnieren für die verwendeten Explosionsklappen kann die Taste „Scharnier“ angeklickt werden, woraufhin das Fenster aus Abbildung 13 erscheint. Hier ist die Eingabe der Stärke des Scharnierbolzens d sowie die Anzahl der Scharniere pro Klappe erforderlich. In unserem Beispiel ist eine Bolzenstärke von $d = 30$ mm ausreichend bei Verwendung von jeweils zwei Scharnieren, wie die grüne Hintergrundfarbe des Feldes „Bruchlast“ anzeigt, wobei mit zweifacher Sicherheit gerechnet wird. Ein Mausklick auf die Taste „übernehmen“ implementiert die konstruierten Scharniere in den Programmverlauf und führt zurück zum Fenster aus Abbildung 12. Hier besteht nun noch die Möglichkeit, die Flugweite abreißender Entlastungselemente zu bestimmen. Dies geschieht durch einen Mausklick auf die Taste „Flugbahn“, der die Öffnung des Fenster aus Abbildung 14 zur Folge hat. Die Eingabe der Starthöhe (Position des Entlastungselementes über dem Erdboden), die optionale Eingabe einer Luftbewegung und ein Mausklick auf die „rechnen“-Taste starten die Flugbahnberechnung. Im Beispiel simulieren wir den Abriss einer der beiden Explosionsklappen die mit $5 \frac{m}{s}$ Windgeschwindigkeit in Flugrichtung und bei

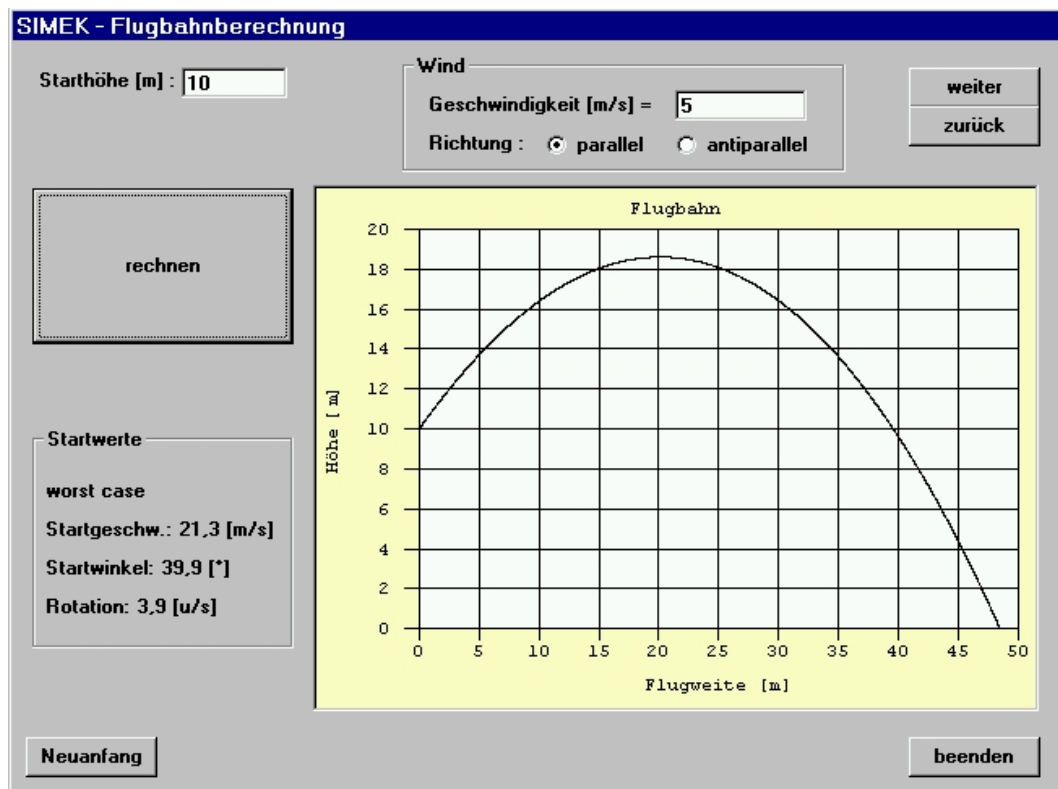


Abbildung 14: SIMEK-Fenster zur Flugbahnberechnung abreißender Entlastungselemente. SIMEK-window to simulate the trajectory of a pressure relief device as consequence of a hinge or rope breakage.

einer Starthöhe von 10 m eine Flugweite von knapp 50 m erreicht. Ein Mausklick auf die „weiter“-Taste öffnet das Protokoll-Fenster, in dem alle Daten und Ergebnisse tabellarisch zusammengefasst sind. Aus diesem Fenster heraus können z. B. die Daten gedruckt oder das Projekt gespeichert werden. Dieses Protokoll-Fenster wird nicht nur von SIMEK, sondern auch von STS, Vent und Vessel benutzt.

3.2 STS

Der Betreiber des Silos aus unserem ersten Beispiel (siehe Abschnitt 3.1) soll nun nachweisen, dass an das Silo angrenzende Bauten nicht durch Trümmerflug gefährdet sind, wenn es trotz aller Schutzmaßnahmen zu einer verheerenden Explosion im Silo kommt. Zur Beantwortung solcher Fragestellungen dient STS. Ein Mausklick auf die STS-Taste im Hauptmenü von Ex-Protect startet das Programm und es erscheint das zugehörige Eingabe-Fenster, so wie es in Abbildung 15 gezeigt ist. Um die gewünschte Berechnung durchführen zu können, muss STS neben der Behälterform (Quader oder Zylinder) die Werte für das Behältervolumen V , das

STS - allgemeine Angaben

Behälter und Staub

Behältervolumen [m³]:

Behälterhöhe/Durchmesser :

KSt-Wert [bar·m/s]:

maximaler Überdruck [bar]:

Berstdruck [bar]:

Behälterform

Quader

Zylinder

Berstfläche

Berstfläche BF [m²]:

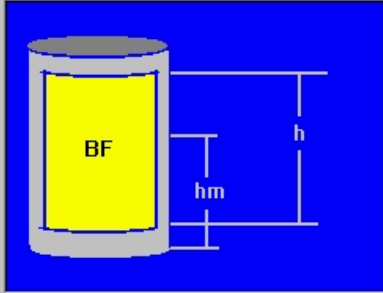
Berstflächenhöhe h [m]:

Stärke der Berstfläche [mm]:

Material :

Fläche der Trümmer [m²]:

Berstflächenlage hm [m]:



Projektname :

Abbildung 15: STS-Fenster zur Eingabe der Problem-Parameter. STS-window for input of the data of the problem dealt with.

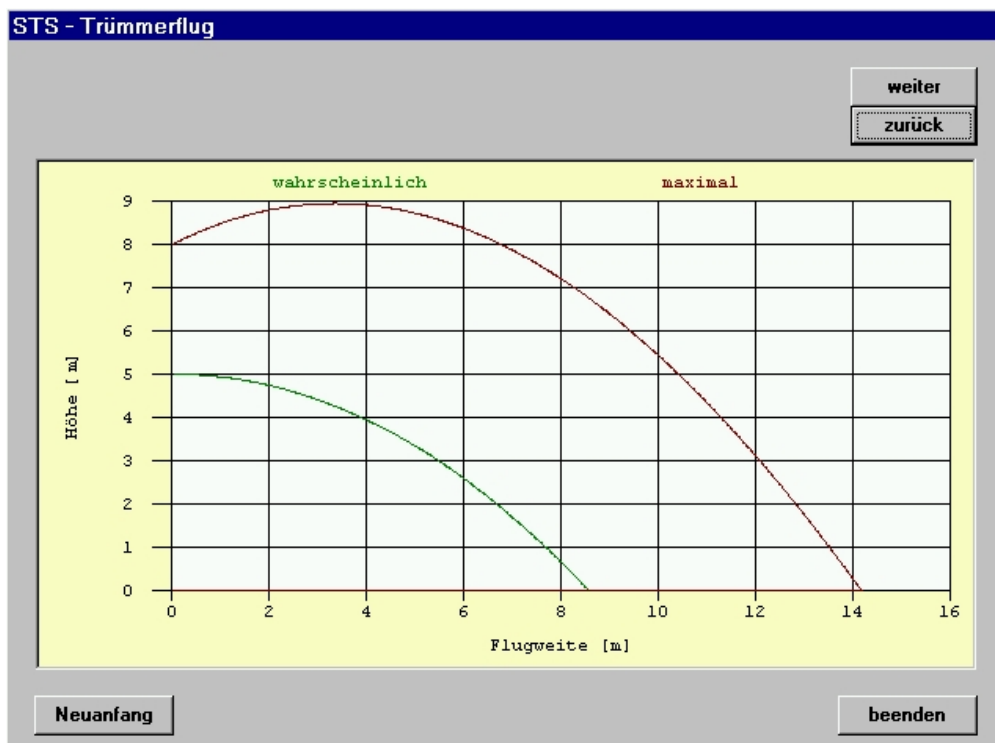


Abbildung 16: STS-Fenster zur Anzeige der Berechnungsergebnisse. STS-window for showing the calculation results.

Höhe/Durchmesser-Verhältnis H/D des Behälters, den K_{St} -Wert, den maximalen Überdruck p_{max} , sowie den Druck p_b , bei dem das Bersten des Behälters zu erwarten ist, kennen. Im Beispiel sind das $V = 100 \text{ m}^3$, $H/D = 1$, $K_{St} = 200 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$, $p_{max} = 9 \text{ bar}$ und $p_b = 0,1 \text{ bar}$. Außerdem müssen noch Angaben über die Größe BF und die Höhe h der abgesprengten Fläche, die Stärke und das Material der Behälterwand, die (mittlere) Fläche eines Fragments und die Lage der Berstfläche hm gemacht werden (siehe Abbildung 15). Ein Mausklick auf die Taste „weiter“ startet die Simulationsrechnung und öffnet ein Fenster zur grafischen Darstellung der Berechnungsergebnisse (Abbildung 16). Die grüne Kurve stellt die wahrscheinlichste Flugbahn der Trümmer dar, d. h. das Gros der Fragmente wird die hier errechnete Flugweite (mit einer gewissen Schwankungsbreite) erreichen. Die Trümmerflugbahn mit der maximal möglichen Flugweite ist in roter Farbe dargestellt. In unserem Beispiel werden als maximal mögliche Flugweite gut 14 m erreicht. Ein Mausklick auf die „weiter“-Taste öffnet das Protokoll-Fenster, in dem neben den eingegebenen Daten und berechneten Trümmerflugweiten auch die kinetische Einschlagenergie des betrachteten Fragments aufgelistet ist.

3.3 Vent

Der Silobetreiber aus unserem Beispiel möchte nun wissen, ob er sein Silo mit Hilfe von Berstscheiben gegenüber Explosionsklappen nicht vorteilhafter, d. h. mit kleineren Entlastungsflächen, Druckentlasten kann. Diese Art von Fragestellung kann mit **Vent** ohne großen Aufwand beantwortet werden. Das Programm wird durch einen Mausklick auf die entsprechende Taste im ExProtect-Hauptmenü gestartet. Das erscheinende Fenster enthält sechs Karteikarten, von denen eine der Eingabe der notwendigen Problem-Parameter dient; diese liegt oben auf. Die anderen fünf Karteikarten stehen für jeweils eine Berechnungsmethode und zeigen später die Berechnungsergebnisse an. In die Eingabe-Karteikarte (Abbildung 17) müssen nun die inzwischen altbekannten Daten wie das Behältervolumen V , das Höhe/Durchmesser-Verhältnis H/D des Behälters, der K_{St} -Wert, der reduzierte Überdruck p_{red} etc. eingegeben werden (vergleiche auch Abschnitt 3.1, Abbildung 8). Ein Mausklick auf die Taste „rechnen“ startet den Lösungsprozess. Nach dessen Beendigung färbt sich die Beschriftung der Karteikarten von grau nach schwarz, deren zugehöriger Algorithmus eine Lösung für das gestellte Problem gefunden hat. Für die Fragestellung aus unserem Beispiel wurden Lösungen nach den Methoden „VDI 3673 (2000)“, „VDI 3673 (1995)“ und „Radandt“ gefunden. Ein Mausklick auf die entsprechende Karteikarte zeigt das Berechnungsergebnis an, wie man das aus Abbildung 18 ersieht. In unserem Beispiel bringt das Resultat der Berechnungsmethode „VDI 3673 (2000)“ mit einer Entlastungsfläche

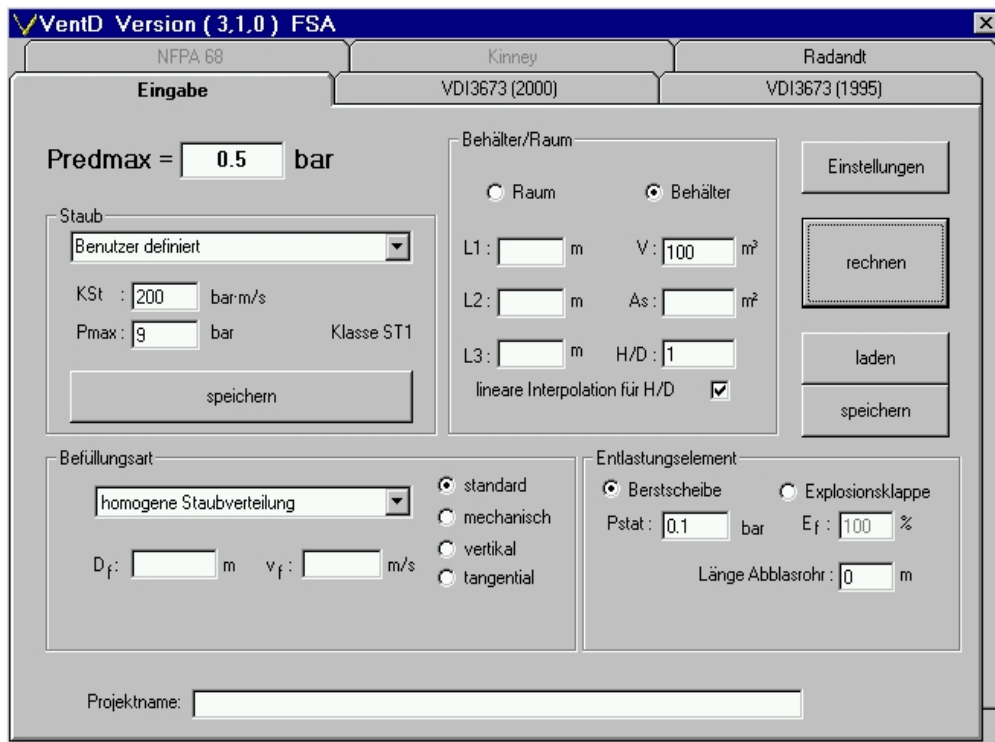


Abbildung 17: Vent-Fenster zur Eingabe der Problem-Parameter. Vent-window for input of the data of the problem.

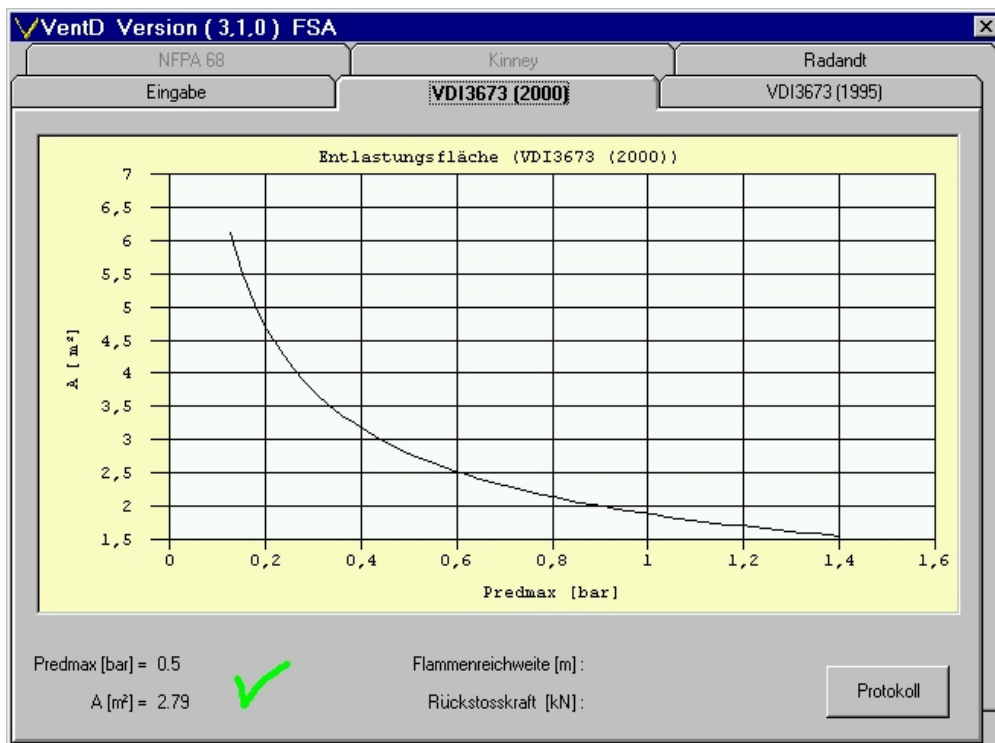


Abbildung 18: Vent-Ergebnisanzeige nach Berechnungsmethode „VDI 3673 (2000)“. Vent-diagram containing calculation results according to „VDI 3673 (2000)“.

von 2,79 m² kaum Vorteile gegenüber der Benutzung von Explosionsklappen (3,19 m², siehe Abschnitt 3.1). Neben der Ausgabe der Entlastungsfläche ist die Abhängigkeit der Druckentlastungsfläche vom reduzierten Überdruck grafisch dargestellt. Ein Mausklick auf die Taste „Protokoll“ öffnet das gleichnamige Fenster, in dem alle interessierenden Werte zusammenfassend aufgelistet sind.

3.4 Vessel

Der vierte Programmteil von ExProtect, genannt Vessel, dient der Berechnung von Druckbehältern nach allgemein bekannten Methoden. Zur Demonstration der Programmhandhabung soll nun ein kugelförmiger Behälter unter innerem Überdruck berechnet werden. Ein Mausklick auf die Taste „Vessel“ im ExProtect-Hauptmenü startet das Programm und es erscheint das Menü von Vessel. Letzteres enthält zehn verschiedene Berechnungsmethoden für gebräuchliche Druckbehälterteile (z. B. Kegelmäntel oder ebene Böden), die über entsprechende Tasten ausgewählt werden können. Wir wählen den Menüpunkt „Zylinder- und Kugelschalen unter

Vessel - Zylinderschale, Kugelschale

Außendurchmesser Da : [mm]

Überdruck p : [bar]

Festigkeit K : [N/mm²]

Verschwächung v :

Sicherheitsbeiwert S :

Wanddickenunterschreitungserschlag c1 : [mm]

Abnutzungszuschlag c2 : [mm]

Berechnung

Zylinderschale

Kugelschale

$$s = \frac{Da \cdot p}{40 \cdot K / S \cdot v + p} + c1 + c2$$

s = 5,48 mm

Die Mindestwandstärke beträgt 2 mm bzw. 3 mm für Aluminium und dessen Legierungen.

rechnen

Protokoll

zurück

Abbildung 19: Vessel-Fenster zur Dateneingabe für die Berechnung von Zylinder- und Kugelschalen unter innerem Überdruck. Vessel-window for data input and calculation of cylindrical or spherical shells standing under inner overpressure.

innerem Überdruck“ per Mausklick und es erscheint das zugehörige Fenster aus Abbildung 19. In die dafür vorgesehenen Felder müssen nun die entsprechenden Daten eingetragen werden, wie z. B. der Außendurchmesser des kugelförmigen Behälters, der im Beispiel mit $D_a = 1000$ mm angesetzt wurde. Zu jedem Eingabefeld existiert ein kleiner Hilfe-Text, der bei Verweilen des Mauszeigers auf dem Feld erscheint. Mit einem Mausklick auf die Taste „rechnen“ wird der Lösungsvorgang gestartet und es erscheint die gesuchte Wandstärke des Druckbehälters in dem dafür vorgesehenen roten Ergebnis-Ausgabefeld. Für den in unserem Beispiel spezifizierten kugelförmigen Druckbehälter wird eine Wandstärke von 5,5 mm errechnet.

Literatur

- [1] M. SEITHEL: *Deckelabsprengung am liegenden und stehenden 1 m³-Behälter mit unterschiedlichen Deckelmassen*, Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten, 1993.
- [2] D. LORENZ, H. OTT, M. SEITHEL: *Untersuchung zur Mechanik von Druckentlastungsklappen und -deckeln beim Entlastungsvorgang*, Bericht Nr. F-05-9304/05 der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin, 1996.
- [3] D. LORENZ: *ExProtect - A software response to important questions on safety in dust and gas explosions*, Proceedings of the 3rd worldwide seminar on the explosion phenomenon and on the application of explosion protection techniques in practice, Ghent, Belgium, 1999.
- [4] F. KOSSEBAU: *9 m³-Behälter: Erforderliche Zündverzögerungszeiten für ungetrocknete Maisstärke zur Anpassung an die Gleichung zur Berechnung von Druckentlastungsflächen in der Richtlinie VDI 3673*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin, 1993.
- [5] F. KOSSEBAU: *Funktionsprüfung einer Explosionsentlastungsklappe, Typenbezeichnung RLE-S 0.5*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin, 1994.
- [6] F. KOSSEBAU: *Funktionsprüfung einer Explosionsentlastungsklappe, Typenbezeichnung RLE-S 1.0*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin, 1993.
- [7] F. KOSSEBAU: *Funktionsprüfung einer Explosionsentlastungsklappe, Typenbezeichnung RLE-S 1.5*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin, 1993.

- [8] R. SIWEK; O. SKOV: *Modellberechnung zur Dimensionierung von Explosionsklappen auf der Basis von praxisnahen Explosionsversuchen*, VDI Berichte, **701**, 569-616, VDI Verlag, 1988.
- [9] A. HARMANNY: *Einfluss der Massenträgheitskräfte auf die Entlastungsfähigkeit von Explosionsklappen*, VDI Berichte, **975**, 273-284, VDI Verlag, 1992.
- [10] VDI 3673: *Druckentlastung von Staubexplosionen*, VDI Verlag, 1995.
- [11] VDI 3673: *Druckentlastung von Staubexplosionen*, Entwurf, VDI Verlag, 2000.
- [12] D. LORENZ, S. RADANDT: *Trümmerflug in der Umgebung von Staubexplosionsherden – Vergleich zwischen Modellrechnung und Explosionsereignissen*, VDI Berichte, **1272**, 347-364, VDI Verlag, 1996.
- [13] K. HÖPPNER: *Measurement of pressure blast effects and fireball sizes from vented dust explosions in rooms*, CREDIT-Project of the European Commission Final Report, 293-354, 1995.
- [14] G. E. JONES, J. E. KENNEDY, L. D. BERTHOLF: *Ballistics calculations of R. W. Gurney*, Am. J. Phys., **48**, 264-269, 1980.
- [15] R. ZURMÜHL: *Praktische Mathematik für Ingenieure und Physiker*, Springer Verlag, 5. Auflage, 1965.
- [16] K. H. DECKER: *Maschinenelemente*, Carl Hanser Verlag, 10. Auflage, 1990.
- [17] F. HAUERT, A. VOGL: *Measurements of dust cloud characteristics in industrial plants*, Proceedings of the Dust Explosion Conference, London, CREDIT-Project of the European Commission, 1995.
- [18] F. HAUERT, A. VOGL, S. RADANDT: *Measurement of turbulence and dust concentration in silos and vessels*, Proceedings of the 6th International Colloquium on Dust Explosions, Shenyang, China, 71-80, X. Deng and P. Wolański editors, 1994.
- [19] F. HAUERT, A. VOGL, S. RADANDT: *Dust cloud characterization and its influence on the pressure-time-history in silos*, Process Safety Progress, **15**, No. 3, 178-184, 1996.
- [20] NFPA 68: *Venting of deflagrations*, 1988.
- [21] G F. KINNEY, K. J. GRAHAM: *Explosive shocks in air*, Springer Verlag, 1985.
- [22] W. BARTKNECHT: *Explosionsschutz*, Springer Verlag, 1993.
- [23] TRD 303: *Kugelschalen und gewölbte Böden unter innerem und äußerem Überdruck*, 1991.
- [24] TÜV: *AD-Merkblätter*, Carl Heymanns und Beuth Verlag, 1995.