

Simulationsrechnung  
zum Trümmerflug bei  
Staubexplosionen

F-05-9305

Projekt Nr. F-05-9305

# Simulationsrechnung zum Trümmerflug bei Staubexplosionen

Dirk Lorenz  
Diplom-Physiker

Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten  
Bereich Prävention, Zentrallabor

Mannheim, September 1996

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>1 Theorie des Trümmerfluges</b>	<b>3</b>
1.1 Anfangsgeschwindigkeit der Trümmer . . . . .	3
1.2 Startwinkel der Trümmer . . . . .	6
1.3 Starthöhe der Trümmer . . . . .	6
1.4 Form und Masse der Trümmer . . . . .	6
1.5 Luftwiderstand beim Trümmerflug . . . . .	7
<b>2 Vergleich zwischen Modell und Unglück</b>	<b>9</b>
2.1 Versuchsreihe der IBExU . . . . .	9
2.2 Trümmerflug bei Explosionsunglücken . . . . .	10
2.2.1 Staubexplosion in einem Silokomplex . . . . .	11
2.2.2 Staubexplosion in einem Getreideumschlagbetrieb . . . . .	12
2.2.3 Staubexplosion in einer Mälzerei . . . . .	14
<b>3 Programme</b>	<b>17</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>30</b>

# Liste der Symbole

$a$	Abstand
$a_s$	Seitenlänge eines Trümmerfragments
$A$	Fläche bzw. Querschnittsfläche
$A_x$	Kleinste Querschnittsfläche eines flachen Körpers mit zwei Symmetrieachsen
$A_y$	Größte Querschnittsfläche eines flachen Körpers mit zwei Symmetrieachsen
$A_w$	Fläche einer berstenden Wand
$b_s$	Seitenlänge eines Trümmerfragments
$c_v$	Spezifische Wärmekapazität (der Luft)
$c_n$	Reibungskoeffizient bei der Newton-Reibung
$c_s$	Wandstärke bzw. Seitenlänge eines Trümmerfragments oder Staubkonzentration
$c_x$	Reibungskoeffizient der kleinsten Querschnittsfläche eines flachen Körpers mit zwei Symmetrieachsen
$c_y$	Reibungskoeffizient der größten Querschnittsfläche eines flachen Körpers mit zwei Symmetrieachsen
$\vec{e}_y$	Einheitsvektor in Richtung der Vertikalen
$E$	Innere Energie pro Masseneinheit eines Sprengstoffes
$\vec{F}_R, F_R$	Vektor und Betrag einer Reibungskraft
$g$	Beschleunigung des Erdgravitationsfeldes
$h$	Starthöhe eines Trümmerfragments
$H$	Behälterhöhe
$H_M$	Höhe eines Schüttkegels
$L$	Masse pro Flächeneinheit eines Sprengstoffes
$m$	Masse
$m_g$	Masse eines Brennstoff/Luft-Gemisches
$m_w$	Masse einer berstenden Wand
$\hat{N}$	Tensor zur Beschreibung von Querschnittsflächen und Reibungskoeffizienten in Richtung der Koordinatenachsen bei einem frei fliegenden Körper
$p_b$	Berstdruck eines Behälters
$p_{\max}$	Maximaler Überdruck einer Staubexplosion im geschlossenen Behälter
$p_{\text{pred}}$	Maximaler Überdruck bei einer berstfolientlasteten Staubexplosion
$p_0$	Normdruck
$Q$	Innere Energie
$\vec{r}, r$	Ortsvektors und dessen Betrag
$\dot{\vec{r}}, \dot{r}$	Erste zeitliche Ableitung des Ortsvektors und dessen Betrag
$\ddot{\vec{r}}, \ddot{r}$	Zweite zeitliche Ableitung des Ortsvektors und dessen Betrag
$R_M$	Radius eines Schüttkegels
$t$	Zeit

$T_b$	Temperatur eines Behälterinhaltes zum Berstzeitpunkt
$T_0$	Normtemperatur
$\vec{v}, v$	Vektor und Betrag der Geschwindigkeit
$v_e$	Anfangsgeschwindigkeit eines Trümmerfragments
$V$	Volumen
$x, \dot{x}, \ddot{x}$	$x$ -Komponente des Ortsvektors, der Geschwindigkeit und der Beschleunigung
$y, \dot{y}, \ddot{y}$	$y$ -Komponente des Ortsvektors, der Geschwindigkeit und der Beschleunigung
$\alpha$	Startwinkel eines Trümmerfragments
$\beta, \dot{\beta}$	Rotationswinkel bzw. Rotationswinkelgeschwindigkeit eines Trümmerfragments
$\pi$	Die Zahl 3,141592...
$\rho$	Dichte
$\rho_s$	Dichte eines Staub/Luft-Gemisches
$\rho_w$	Dichte eines Trümmerfragments bzw. einer berstenden Behälterwand

# Zusammenfassung

Eine Methode zur Berechnung der Flugweiten bzw. -bahnen von Trümmern berstender Behälter, Silos oder Gebäuden wird hergeleitet. Das Bersten ist dabei die Folge einer Staubexplosion im Inneren dieser Volumina. Mit Hilfe der Gurney- und Gasgleichung wird die Anfangsgeschwindigkeit der Trümmer über den Berstdruck bzw. den reduzierten Druck im Behälter abgeschätzt. Anschließend wird die Bewegungsgleichung eines Trümmers numerisch für zwei mögliche Trümmerflugbahnen gelöst. Die bahnbestimmenden Parameter werden dabei so gewählt, dass erstens die Flugbahn mit der maximal möglichen Flugweite und zweitens die Flugbahn mit der wahrscheinlichsten Flugweite berechnet wird. Anschließend werden diese beiden Trümmerflugbahnen mit den bei realen Explosionsunfällen bzw. bei Trümmerflugexperimenten vorliegenden Randbedingungen errechnet und mit den tatsächlich aufgetretenen Flugweiten verglichen.

# Einleitung

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 wurde hier der Versuch unternommen, eine entsprechende Berechnungsmethode aufzustellen. Zur genauen Berechnung einer Trümmerflugbahn ist die Kenntnis von Startgeschwindigkeit, Startwinkel, Rotationsverhalten, Form und Masse des Fragments notwendig. Wie man sich diese Größen im Einzelfall beschaffen kann und wie genau die daraus resultierende Simulationsrechnung des Trümmerfluges ist, wird im vorliegenden Artikel aufgezeigt.

# Kapitel 1

## Theorie des Trümmerfluges

Das Problem des schnellen Fluges beliebiger Körper durch das Medium Luft kann allgemein als schiefer Wurf mit Newton-Reibung

$$\vec{F}_R = \frac{1}{2} \cdot c_n \cdot \rho \cdot A \cdot \dot{r}(t) \cdot \dot{\vec{r}}(t) \quad (1.1)$$

aufgefasst werden, also mit einer Reibungskraft  $\propto \dot{r}^2$ . In (1.1) bedeuten  $A$  die Querschnittsfläche,  $\dot{r}(t)$  die Geschwindigkeit und  $c_n$  den Reibungskoeffizienten des Körpers;  $\rho$  ist die Dichte des Mediums, also der Luft. Das Problem des schiefen Wurfs mit Newton-Reibung führt auf die Differentialgleichung

$$m \cdot \ddot{\vec{r}}(t) = -\frac{1}{2} \cdot c_n \cdot \rho \cdot A \cdot \dot{r}(t) \cdot \dot{\vec{r}}(t) - m \cdot g \cdot \vec{e}_y \quad (1.2)$$

mit den Anfangsbedingungen (Starthöhe  $h$ , Startgeschwindigkeit  $v_e$ , Startwinkel  $\alpha$ )

$$\vec{r}(0) = (0, h) \quad \dot{\vec{r}}(0) = \vec{v}_e = (v_e \cdot \cos \alpha, v_e \cdot \sin \alpha) \quad (1.3)$$

Die Bewegungsgleichung (1.2) ist nicht separabel und zerfällt in

$$\begin{aligned} m \cdot \ddot{x}(t) + \frac{1}{2} \cdot c_n \cdot \rho \cdot A \cdot \sqrt{\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t)} \cdot \dot{x}(t) &= 0 \\ m \cdot \ddot{y}(t) + \frac{1}{2} \cdot c_n \cdot \rho \cdot A \cdot \sqrt{\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t)} \cdot \dot{y}(t) &= -m \cdot g \end{aligned} \quad (1.4)$$

also in ein System von gekoppelten, nichtlinearen Differentialgleichungen. Solche sind in den allermeisten Fällen nicht analytisch lösbar und man ist auf numerische Näherungsverfahren angewiesen, wie z. B. das Verfahren von Runge und Kutta. Eine sehr gute Darstellung dieser Lösungsmethode findet sich in [4], weshalb hier auf eine weitere Beschreibung verzichtet wird. Für den Einsatz des Näherungsverfahrens ist die Kenntnis obiger Anfangsbedingungen sowie der Masse und des Reibungskoeffizienten des Fragments zwingend erforderlich. Diese Größen werden in den folgenden Abschnitten hergeleitet.

### 1.1 Anfangsgeschwindigkeit der Trümmer

Um die Anfangsgeschwindigkeit von Trümmern  $v_e$  bei Explosionsunglücken zu bestimmen, wird auf eine Berechnungsmethode zurückgegriffen, die Ronald W. Gurney [2] Anfang der



vierziger Jahre entwickelt hat. Gurney geht dabei von der Überlegung aus, dass die potentielle Energie eines Sprengstoffes vor der Explosion gleich den kinetischen Energien der Trümmer und der gasförmigen Reaktionsprodukte nach der Explosion sein muss. Weiterhin nimmt er an, dass die Gasdichte räumlich homogen und während des Beschleunigungsvorganges der Trümmer konstant ist. Die Geschwindigkeitsverteilung des expandierenden Gases wird als linear vorausgesetzt.

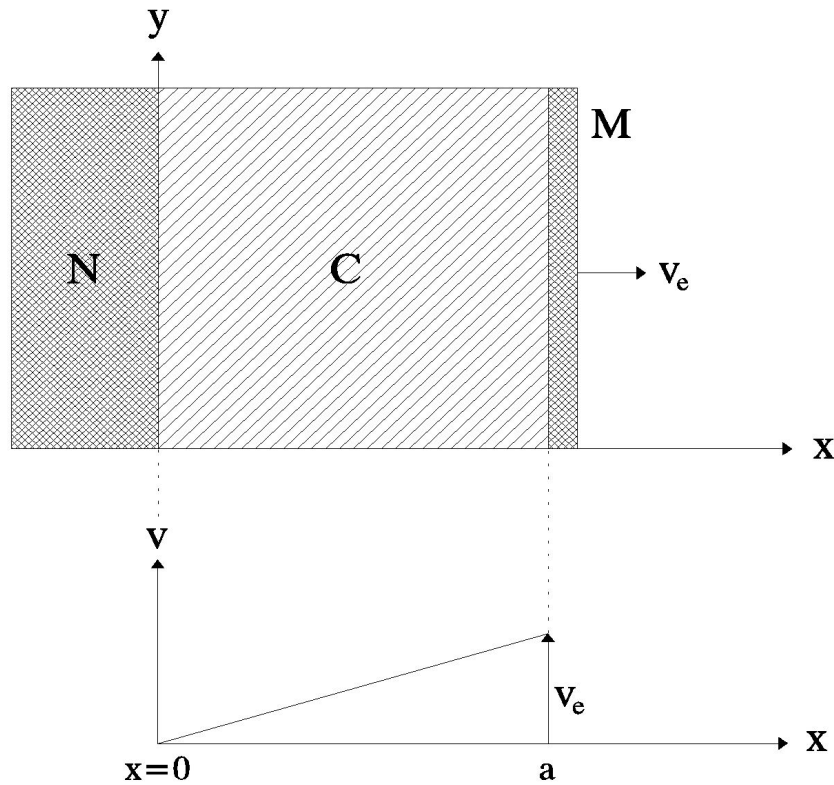


Abbildung 1.1: Querschnitt eines Explosionsraumes. Die Wand N ist unbeweglich, die Wand M wird durch den Sprengstoff C nach rechts beschleunigt. Die Geschwindigkeitsverteilung des Explosionsgases ist linear und unterhalb der Raumskizze dargestellt.

Das Beispiel aus Abbildung 1.1 soll die Berechnungsmethode demonstrieren. Dabei wird die Platte M mit der Masse  $m$  pro Flächeneinheit durch die Explosion des Sprengstoffes C mit der Masse  $L$  pro Flächeneinheit nach rechts beschleunigt. Die Wand N soll unbeweglich sein und Randeffekte werden vernachlässigt, d. h. das Gas strömt nicht um die Wand M herum. Das Gas bewegt sich also maximal mit der Geschwindigkeit der Wand M. Wenn  $E$  die Energie pro Masseneinheit des Sprengstoffes und  $v_e$  die Endgeschwindigkeit der Wand M ist, dann stellt sich die Bedingung der Energieerhaltung als

$$L \cdot E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_e^2 + \frac{1}{2} \cdot \int_0^a \rho(x) \cdot v^2(x) \, dx \quad (1.5)$$

dar. In (1.5) ist  $\rho(x)$  die Massendichte der gasförmigen Explosionsprodukte nach der Explosion.  $v(x)$  ist die Geschwindigkeit der Explosionsgase entlang der x-Achse und schließlich ist  $a$  der Abstand beider Wände voneinander. Mit der Annahme homogener und konstanter

Gasdichte

$$\rho(x) = \frac{L}{a} \quad (1.6)$$

und linearer Geschwindigkeitsverteilung der Gasphase

$$v(x) = v_e \cdot \frac{x}{a} \quad (1.7)$$

folgt

$$L \cdot E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_e^2 + \frac{L \cdot v_e^2}{2 \cdot a^3} \cdot \int_0^a x^2 dx = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_e^2 + \frac{1}{6} \cdot L \cdot v_e^2 \quad (1.8)$$

Auflösen nach  $v_e$  liefert

$$v_e = \sqrt{2 \cdot E} \cdot \left( \frac{m}{L} + \frac{1}{3} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1.9)$$

Der gleiche Ausdruck ergibt sich, wenn ein Würfel mit gleichen Seitenmassen allseitig zerplatzt, d. h. alle sechs Flächen werden entlang der Koordinatenachsen beschleunigt. Für eine explodierende Kugel ergibt sich für die Trümmersgeschwindigkeit

$$v_e = \sqrt{2 \cdot E} \cdot \left( \frac{m}{L} + \frac{3}{5} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1.10)$$

Bei zylindrischer Geometrie folgt aus den Gleichungen (1.5) bis (1.7)

$$v_e = \sqrt{2 \cdot E} \cdot \left( \frac{m}{L} + \frac{1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1.11)$$

Die Formeln (1.9) bis (1.11) bleiben auch dann richtig, wenn die Sprengstoffmasse  $L$  und die Wandmasse  $m$  nicht auf die Einheitsfläche bezogen, sondern als Gesamtbetrag eingesetzt werden. Zur Berechnung der Trümmeranfangsgeschwindigkeit gemäß (1.9) bis (1.11) benötigt man die innere Energie  $E$  des Sprengstoffes pro Masseneinheit. Die sogenannte Gurney-Konstante  $\sqrt{2 \cdot E}$  ist nur für gebräuchliche Sprengstoffe tabelliert, so dass man im Falle von Staub- oder Gasexplosionen andere Wege beschreiten muss. Der Zugang zu  $E$  für Staub/Luft-Gemische erfolgt über den Berstdruck des betreffenden Gebäudes, in dessen Inneren die Explosion stattfindet. Besitzt ein kleiner Teil der Außenwand eines solchen Gebäudes einen (verglichen mit der Restwand) relativ geringen Berstdruck, so entsteht beim Bersten dieses Wandteiles im Inneren des Gebäudes ein reduzierter Explosionsüberdruck, der wesentlich über dem Ansprechdruck der berstenden Wand liegt. Ist das der Fall, so ist dieser reduzierte Druck zur Abschätzung von  $E$  heranzuziehen. Im Moment des Erreichens des Behälterberstdruckes bzw. des reduzierten Druckes  $p_b$  (absolut) herrscht in diesem ungefähr die Temperatur

$$T_b \approx \frac{p_b}{p_0} \cdot T_0 \quad (1.12)$$

$p_0$  und  $T_0$  sind der Normdruck und die Normtemperatur. Mit  $T_b$  kann der Zuwachs der inneren Energie des Behälterinhaltes  $\Delta Q$  zum Zeitpunkt des Berstens durch

$$\Delta Q = c_v \cdot m_g \cdot (T_b - T_0) \quad (1.13)$$

abgeschätzt werden. Da sich die innere Energie  $E$  in der Gurney-Konstanten auf die Masseneinheit bezieht, muss (1.13) lediglich durch die Masse des Brennstoffgemisches im Behälter  $m_g$  dividiert werden und man erhält

$$E = c_v \cdot (T_b - T_0) \approx 715 \cdot \left( \frac{p_b}{101300} \cdot 273 - 273 \right) = 1,952 \cdot 10^5 \cdot \left( \frac{p_b}{101300} - 1 \right) \quad (1.14)$$

wobei als spezifische Wärmekapazität die der Luft bei Normbedingungen  $c_v = 715 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{kg}}$  angesetzt wurde.

Schließlich stellt sich die Frage, wie groß die Sprengstoffmasse  $L$  im Einzelfall ist. Nimmt man homogene Staubverteilung im Behälter an und betrachtet Staub plus Luft als Sprengstoff, so ergibt sich die Dichte des Sprengstoffes zu rund  $\rho_s \approx 2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ , wenn man als Staubkonzentration  $0,75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  ansetzt. Nimmt man weiterhin an, dass der Behälterinnendruck linear mit der Masse des verbrannten Staub/Luft-Gemisches wächst, so folgt  $L$  über den Behälterberstdruck bzw. den reduzierten Überdruck aus

$$L \approx \frac{p_b - p_0}{p_{\max}} \cdot \rho_s \cdot V = \frac{p_b - 101300}{450000} \cdot V \quad (1.15)$$

$V$  steht hier für das Behältervolumen und der maximal erreichbare Explosionsüberdruck  $p_{\max}$  ist mit  $9 \cdot 10^5$  Pa (9 bar) angesetzt.  $p_b$  ist als Absolutwert in der Einheit Pascal in die Formeln (1.12), (1.14) und (1.15) einzusetzen.

## 1.2 Startwinkel der Trümmer

Bei Vernachlässigung der Luftreibung hängt die Flugweite eines Fragments lediglich von der Anfangsgeschwindigkeit  $v_e$ , dem Startwinkel  $\alpha$  bezüglich der Horizontalen und der Starthöhe  $h$  ab. Bei gegebener Anfangsgeschwindigkeit errechnet sich der optimale Startwinkel aus

$$\alpha = \arccos \left( \frac{\sqrt{2 \cdot (v_e^4 + 3 \cdot v_e^2 \cdot h \cdot g + 2 \cdot h^2 \cdot g^2)}}{2 \cdot (v_e^2 + h \cdot g)} \right) \quad (1.16)$$

Gleichung (1.16) ergibt sich durch Optimierungsrechnung bei der nach der Flugweite umgeformten Gleichung für die Trümmerflugbahn ohne Luftreibung. Dieser Startwinkel  $\alpha$  wird zur Berechnung der Trümmerflugbahn mit maximal möglicher Flugweite herangezogen. Zur Berechnung der am häufigsten auftretenden Flugbahn eines Fragments wird der Startwinkel  $\alpha = 0$  rad gesetzt, d. h. der Start erfolgt parallel zur Horizontalen.

## 1.3 Starthöhe der Trümmer

Bei der Berechnung der Trümmerflugbahn mit maximal möglicher Flugweite wird als Starthöhe  $h$  der höchste Punkt der berstenden Wandfläche über dem Erdboden angesetzt. Die Hälfte der Vertikalhöhe dieser Wandfläche plus dem Abstand zwischen der Unterkante der Wandfläche und dem Erdboden wird als Starthöhe für die Berechnung der wahrscheinlichsten Flugbahn herangezogen.

## 1.4 Form und Masse der Trümmer

Handelt es sich bei der berstenden Wand um ein Mauerwerk im weitesten Sinne, so wird die häufigste Form eines Trümmers ein Quader sein. Die Kantenlängen eines solchen Quaders sind die Wandstärke  $c_s$  und die beiden Seiten  $a_s$  und  $b_s$  der nach außen und innen zeigenden zwei großen Steinflächen  $A_y$ .

Wird eine homogene Wand (z. B. Glas oder Beton) durch Druckwirkung zerstört, so ist völlig unklar, wie groß  $A_y$  hier ist. Bei Experimenten zum Trümmerflugproblem [1] ergab sich unter

anderem, dass die beim Bersten homogener Wände entstehenden größeren Fragmente eine Fläche von  $A_y \approx 0,5 \text{ m}^2$  besitzen. Dieser Wert wird für die weiteren Berechnungen zugrunde gelegt, wenn keine genaueren Angaben über die Trümmerabmessungen gemacht werden können.

Zur Vereinfachung der Rechnung werden die Trümmer im folgenden als runde Scheiben betrachtet (siehe Abbildung 1.2), deren große Flächen  $A_y$  denen der oben erwähnten Quader entsprechen.

Zur Berechnung der Trümmermasse müssen Fläche  $A_w$  und Masse  $m_w$  der berstenden Wand oder deren Dichte  $\rho_w$  bekannt sein. Zusammen mit den oben abgeleiteten Abmessungen eines Fragments folgt für dessen Masse

$$m = m_w \cdot \frac{a_s \cdot b_s}{A_w} = \rho_w \cdot a_s \cdot b_s \cdot c_s \quad (1.17)$$

## 1.5 Luftwiderstand beim Trümmerflug

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 1.2 entnimmt. Das Reibungsgesetz (1.1) kann in einem solchen Fall gut durch

$$\vec{F}_R \approx \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \hat{N} \cdot \dot{r}(t) \cdot \dot{r}(t) \quad (1.18)$$

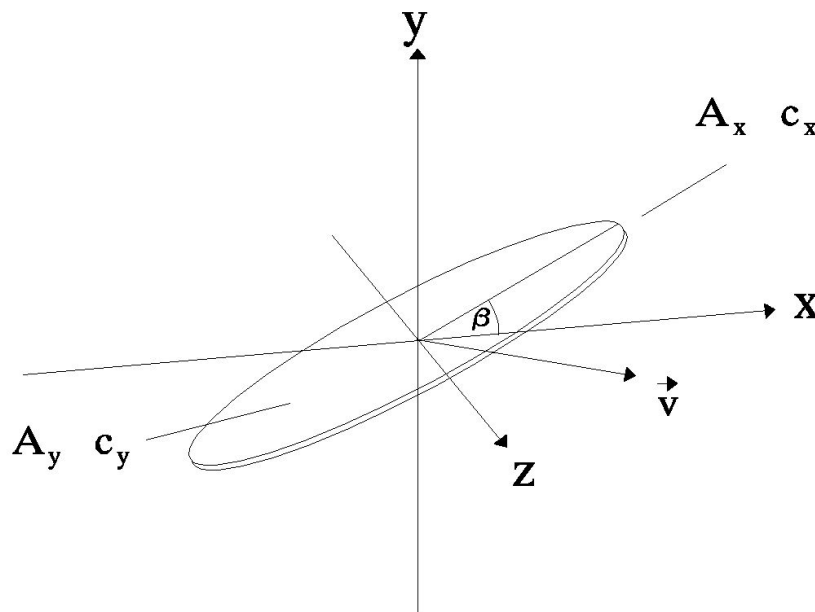


Abbildung 1.2: Skizze einer, mit der Geschwindigkeit  $\vec{v}$  durch die Luft fliegenden Platte mit der Neigung  $\beta$  zur Horizontalen.

angenähert werden, wobei  $\hat{N}$  für den Tensor

$$\hat{N} = \begin{pmatrix} c_x \cdot A_x \cdot \cos^2 \beta + c_y \cdot A_y \cdot \sin^2 \beta & 0 \\ 0 & c_x \cdot A_x \cdot \sin^2 \beta + c_y \cdot A_y \cdot \cos^2 \beta \end{pmatrix} \quad (1.19)$$

( $c_x = 2$ ,  $c_y = 1$ , 17) steht. Die Bewegungsgleichungen (1.4) verändern sich damit zu

$$\begin{aligned} m \cdot \ddot{y}(t) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (c_x \cdot A_x \cdot \sin^2 \beta + c_y \cdot A_y \cdot \cos^2 \beta) \cdot \sqrt{\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t)} \cdot \dot{y}(t) &= -m \cdot g \\ m \cdot \ddot{x}(t) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (c_x \cdot A_x \cdot \cos^2 \beta + c_y \cdot A_y \cdot \sin^2 \beta) \cdot \sqrt{\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t)} \cdot \dot{x}(t) &= 0 \end{aligned} \quad (1.20)$$

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  $\beta$  in  $\hat{N}$  bringen die Orientierung des Körpers 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. Rotiert der Körper während seines Fluges, so wird  $\beta = \beta(t) = \dot{\beta} \cdot t$  zeitabhängig. Zur Berechnung der Trümmerflugbahn mit maximaler Reichweite wird  $\beta = 0$  rad und  $\dot{\beta} = 0 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$  gesetzt. Dieses „Gleiten“ der Trümmerplatte im Medium Luft kann die Flugweite erheblich erhöhen. Zur Berechnung der wahrscheinlichsten Flugweite wird  $\dot{\beta} = 10 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$  gesetzt.

## Kapitel 2

# Vergleich zwischen Modellrechnung und Explosionsereignissen

Die Lösung von Gleichung (1.20) mit Hilfe des Runge-Kutta Näherungsverfahrens sowie die Berechnungsmethoden für die Anfangsbedingungen und physikalischen Eigenschaften der Trümmer wurden in einem Rechner-Programm namens STS (Simulation des Trümmerfluges bei Staubexplosionen) umgesetzt. Aus einfach zugänglichen Daten über das explosionsgefährdete Gebäude können damit die maximal mögliche und die wahrscheinlichste Flugbahn eines Fragments berechnet werden. Die Güte der Simulationsrechnung wird in den folgenden Abschnitten durch Vergleiche mit Experimenten und Explosionsunglücken geprüft.

### 2.1 Versuchsreihe der IBExU

Im Rahmen des CREDIT-Projektes [1] haben Mitarbeiter der IBExU Institut für Sicherheitstechnik GmbH auf dem institutseigenen Versuchsgelände Experimente durchgeführt, in denen unter anderem die Frage nach Trümmerflugweiten gestellt und für die dort gegebenen Randbedingungen beantwortet wurde.

Dabei wurde in einer Wand eines nahezu kubischen Versuchsraumes mit  $324 \text{ m}^3$  Volumen eine Entlastungsfläche von  $17,6 \text{ m}^2$ , bestehend aus  $0,007 \text{ m}$  starken Glasplatten, integriert. Die Explosion des Versuchsstaubes mit einem  $K_{St}$ -Wert von  $186 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$  und einem maximalen Überdruck von  $8,8 \text{ bar}$  verursachte einen reduzierten Überdruck von  $0,082 \text{ bar}$ . Weil der statische Ansprechdruck der Glasplatten bei lediglich  $0,015 \text{ bar}$  liegt, wird zur Berechnung der Trümmerstartgeschwindigkeit gemäß Abschnitt 1.1 der reduzierte Überdruck herangezogen. Damit folgen aus (1.14) und (1.15) die Werte  $E = 15800 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$  und  $L = 5,9 \text{ kg}$ . Mit der Dichte der Glaswand von etwa  $2300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  ergibt sich deren Masse zu rund  $m = 280 \text{ kg}$ . Aus diesen Daten errechnet sich nach (1.9) eine Trümmeranfangsgeschwindigkeit von  $25,7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Aufgrund der mit  $0,5 \text{ m}^2$  angesetzten Trümmerfläche  $A_y$  folgt als Trümmermasse etwa  $8 \text{ kg}$ . Die Trümmerflugbahn wird nun maximal, wenn alle weiteren Parameter entsprechend den Abschnitten 1.2 bis 1.5 die Werte  $\alpha = 42,6^\circ$  (Formel (1.16)),  $\beta = 0^\circ$ ,  $\dot{\beta} = 0 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$  und  $h = 6 \text{ m}$  (höchstmögliche Startposition) annehmen. Die numerische Lösung von (1.20) mit diesen Randbedingungen ergibt die lange Flugbahn aus Abbildung 2.1 mit einer Trümmerreichweite von  $58,6 \text{ m}$ . Im Experiment flogen lediglich rund  $2\%$  der Trümmer weiter als  $54 \text{ m}$  und wurden in einem in dieser Entfernung von der Entlastungsfläche beginnenden Waldstück gefunden.

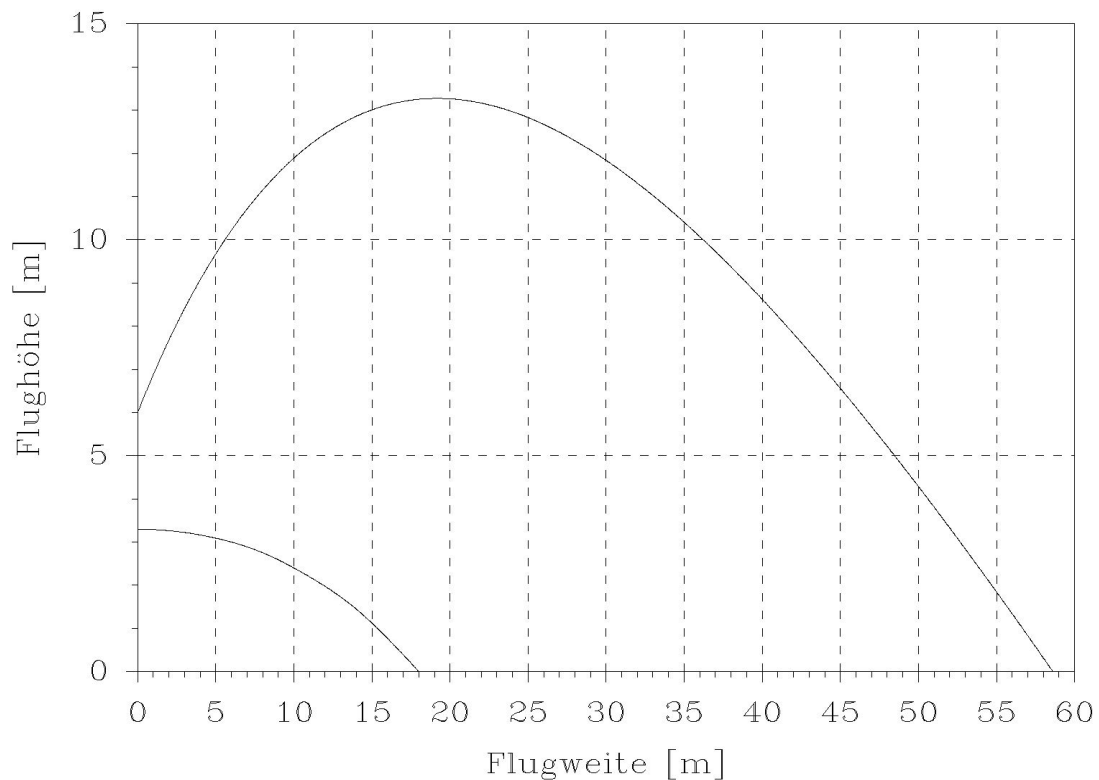


Abbildung 2.1: Berechnete maximale und wahrscheinlichste Trümmerflugbahn für die Bedingungen des Experiments Nr. 11 der IBExU-Versuchsreihe zum CREDIT-Projekt.

Die kurze Flugbahn in Abbildung 2.1 ergibt sich aus der Lösung von (1.20) mit den Parametern  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\beta = 90^\circ$ ,  $\dot{\beta} = 10 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$  und  $h = 3,3 \text{ m}$  für die wahrscheinlichste Flugbahn. Die Anfangsgeschwindigkeit ist in diesem Fall um  $0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  geringer als bei der Flugbahn mit maximaler Reichweite, da etwas Translationsenergie in Rotationsenergie des Trümmers umgewandelt wird. Wie man der Abbildung entnimmt, errechnet sich als wahrscheinlichste Flugweite ein Wert von 18 m. Im Experiment wurden 52,8 % aller Trümmer in einem Abstand zwischen 10 m und 20 m von der Entlastungsfläche gefunden. Diese 52,8 % stellen mit Abstand die höchste Trümmeranzahl pro Entfernungsintervall dar. Das experimentelle Ergebnis der IBExU-Versuche hinsichtlich Trümmerflug kann mit den gemachten Annahmen bzw. dem STS-Simulationsprogramm gut wiedergegeben werden. Die kinetische Energie eines Fragments beim Aufschlag beträgt 1610 J bzw. 1330 J.

## 2.2 Trümmerflug bei Explosionsunglücken

Im folgenden werden Luftaufnahmen von drei verschiedenen Explosionsunglücken gezeigt, aus denen die Trümmerflugweiten und die Randbedingungen der Explosionen grob abgeschätzt werden können. Mit Hilfe dieser Randbedingungen wurde die Simulation des Trümmerfluges durch das STS-Programm möglich.

### 2.2.1 Staubexplosion in einem Silokomplex

Aus den in Abbildung 2.2 eingezeichneten Abmessungen ergeben sich – bezogen auf die linke der beiden Silozellen im Vordergrund – als maximale Flugweite eines Fragments etwa 120 m und als wahrscheinlichste Trümmerflugweite rund 60 m. Für das Volumen einer Silozelle lässt sich der Wert

$$V = A_w \cdot H - \frac{\pi \cdot R_M^2 \cdot H_M}{6} \approx 3000 \quad [\text{m}^3] \quad (2.1)$$

ableiten, wobei der Bruch in (2.1) das Volumen des ausgelaufenen Halbkegels aus Mais ist. Das  $A_w$  ist die Fläche der fortgeschleuderten Wand, die mit etwa  $113 \text{ m}^2$  abgeschätzt wird.  $H$ ,  $H_M$  und  $R_M$  ist die Höhe des Silos bzw. Höhe und Radius des Maiskegels.

Aus dem Wert für das Silovolumen folgt für das Verhältnis Höhe zu Durchmesser rund 2,2. Mit einem  $K_{St}$ -Wert von  $100 \frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}}$  und einem maximalen Überdruck von  $p_{\text{max}} = 9 \text{ bar}$  ergibt sich als reduzierter Überdruck 0,11 bar. Zusammen mit der Masse der fortgeschleuderten Wand von

$$m_w = A_w \cdot c_s \cdot \rho_w \approx 113 \cdot 0,015 \cdot 2360 = 4000 \quad [\text{kg}] \quad (2.2)$$

ergibt sich als Anfangsgeschwindigkeit der Trümmer  $27,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  bzw.  $27,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . In (2.2) ist  $c_s$  die Wandstärke und  $\rho_w$  die Wanddichte, welche hier mit der Dichte von Beton identifiziert wurde. Wird die große Trümmerfläche  $A_y$  mit  $2,5 \text{ m}^2$  abgeschätzt, so folgt als Masse eines Fragments 88,5 kg.

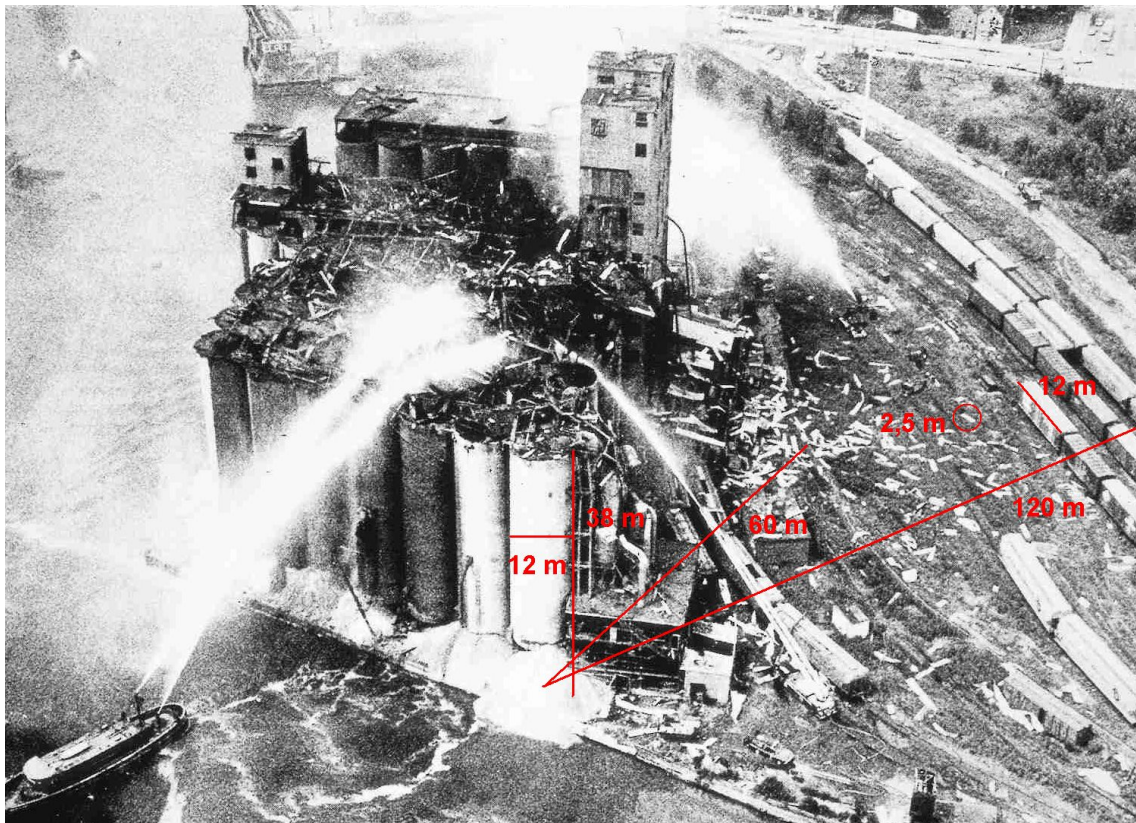


Abbildung 2.2: Luftaufnahme eines Silokomplexes nach einer Staubexplosion.



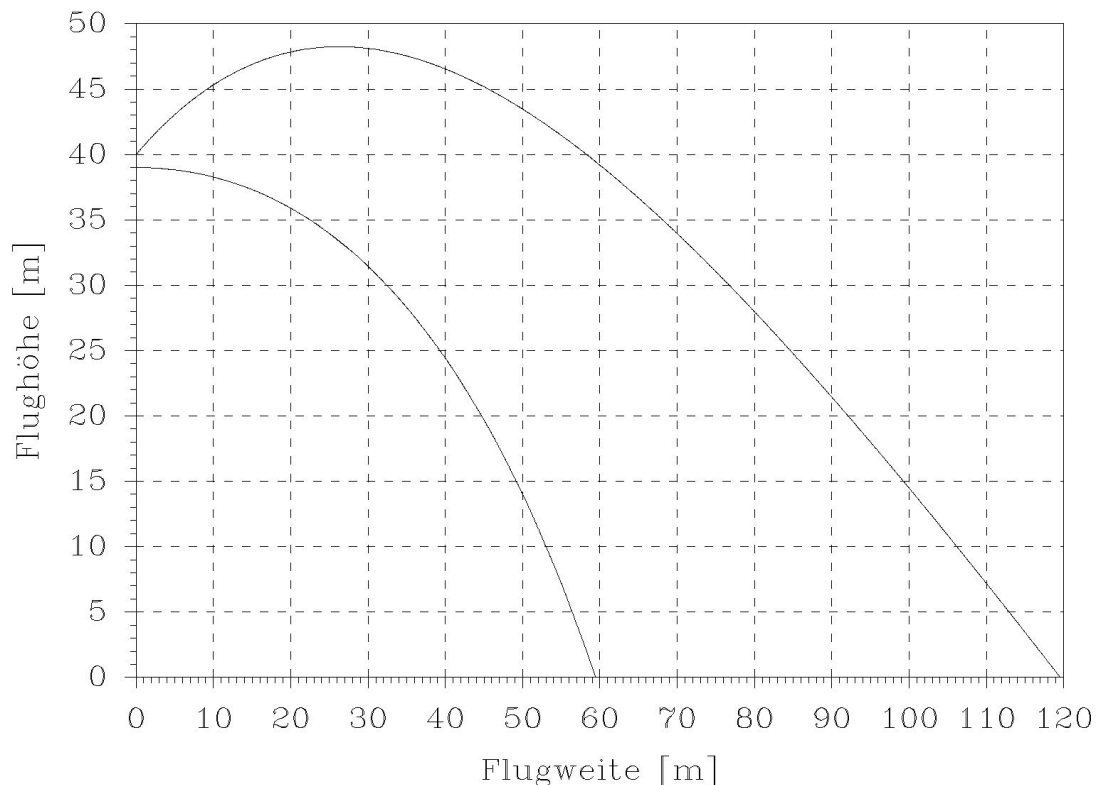


Abbildung 2.3: Berechnete maximale und wahrscheinlichste Trümmerflugbahn für die Randbedingungen aus Abbildung 2.2:  $v_e = 27,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  bzw.  $27,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $m = 88,5 \text{ kg}$ ,  $\alpha = 35^\circ$  bzw.  $= 0^\circ$ ,  $h = 40 \text{ m}$  bzw.  $= 39 \text{ m}$ ,  $A_y = 2,5 \text{ m}^2$ ,  $A_x = 0,0268 \text{ m}^2$ .

Formel (1.16) liefert als optimalen Startwinkel  $35^\circ$  bezüglich der Horizontalen, womit sich für die hier geschilderte Situation die lange Flugbahn aus Abbildung 2.3 als Lösung von (1.20) ergibt. Die maximal erreichbare Flugweite beträgt 119,6 m und deckt sich gut mit der Abschätzung aus der Abbildung 2.2.

Als wahrscheinlichste Flugweite resultiert aus der Simulationsrechnung der Wert 59,5 m. Auch dieser Wert stimmt in etwa mit dem aus Abbildung 2.2 abgeleiteten Abstand zwischen Silozelle und dem Ort der größten Trümmerdichte überein.

Die kinetische Energie eines Fragments beim Aufprall betrug rund 32 kJ bzw. 27,7 kJ! Ein Energiebetrag von 32 kJ reicht aus, um einen Körper mit 1 t Masse von  $0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  auf knapp  $29 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  zu beschleunigen!

## 2.2.2 Staubexplosion in einem Getreideumschlagbetrieb

Die Staubexplosion in dem Getreideumschlagbetrieb aus Abbildung 6 schuf hinsichtlich des Trümmerfluges völlig andere Anfangsbedingungen als die in Abschnitt 2.2.1 beschriebene Staubexplosion in einem Silokomplex. Die Ziegel des Dachstuhles, welche hauptsächlich als fortgeschleuderte Fragmente auftraten, wurden durch die Wirkung eines sehr geringen Überdruckes von schätzungsweise 0,01 bar beschleunigt (sehr große Druckentlastungsfläche mit minimalem Ansprechdruck). Setzt man die Fläche des zerstörten Daches mit  $A_w \approx 1700 \text{ m}^2$ , die Ziegelstärke mit  $c_s \approx 0,01 \text{ m}$  und die Steindichte mit  $\rho_w \approx 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  an, so ergibt sich

als fortgeschleuderte Masse gemäß (2.2)  $m_w \approx 40$  t. Mit dem Volumen des Gebäudes von  $V \approx 38000$  m<sup>3</sup> folgt als Anfangsgeschwindigkeit der Trümmer  $v_e = 2,9 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  bzw.  $v_e = 2,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Wird die große Fläche eines Ziegels mit  $A_y = 0,3$  m<sup>2</sup> angesetzt, so folgt als Fragmentmasse  $m_s = 7$  kg.

Mit einem optimalen Startwinkel von  $5,4^\circ$  errechnet sich als maximal mögliche Flugweite eines Ziegels 10,7 m. Als Distanz zwischen der Gebäudeaußenwand und dem Ort mit der höchsten Trümmerdichte resultiert aus der Berechnung der Wert 6 m. Die errechneten Flugbahnen sind in Abbildung 2.5 dargestellt. Ein Vergleich dieser Wurfweiten mit den in Abbildung 2.4 eingezeichneten Flugweiten der Trümmer zeigt erneut eine gute Übereinstimmung zwischen Realität und Simulationsrechnung.

Die kinetische Energie eines Fragments beträgt aufgrund der kleinen Ziegelmasse und der geringen Anfangsgeschwindigkeit lediglich 1600 J bzw. 1100 J.

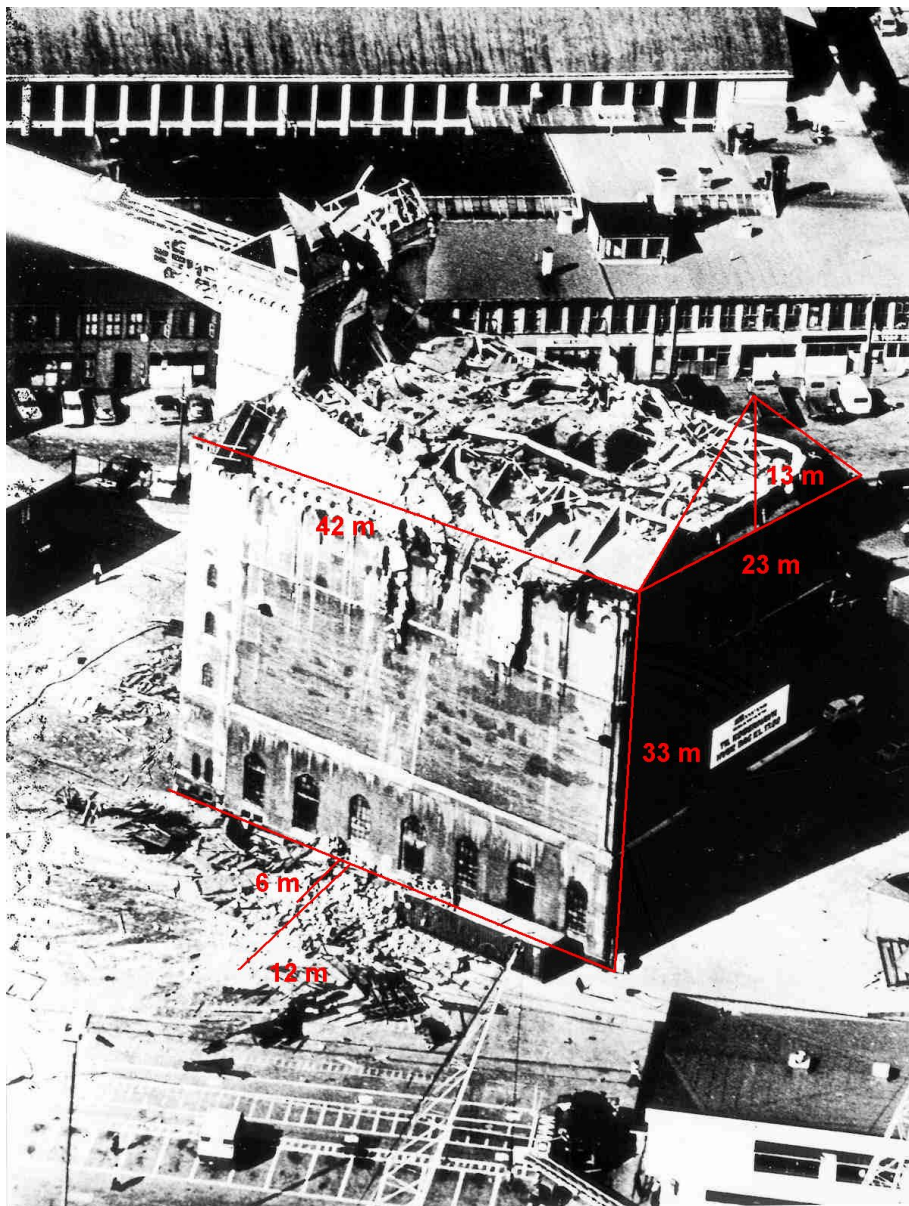


Abbildung 2.4: Luftaufnahme eines Getreideumschlagbetriebes nach einer Staubexplosion.

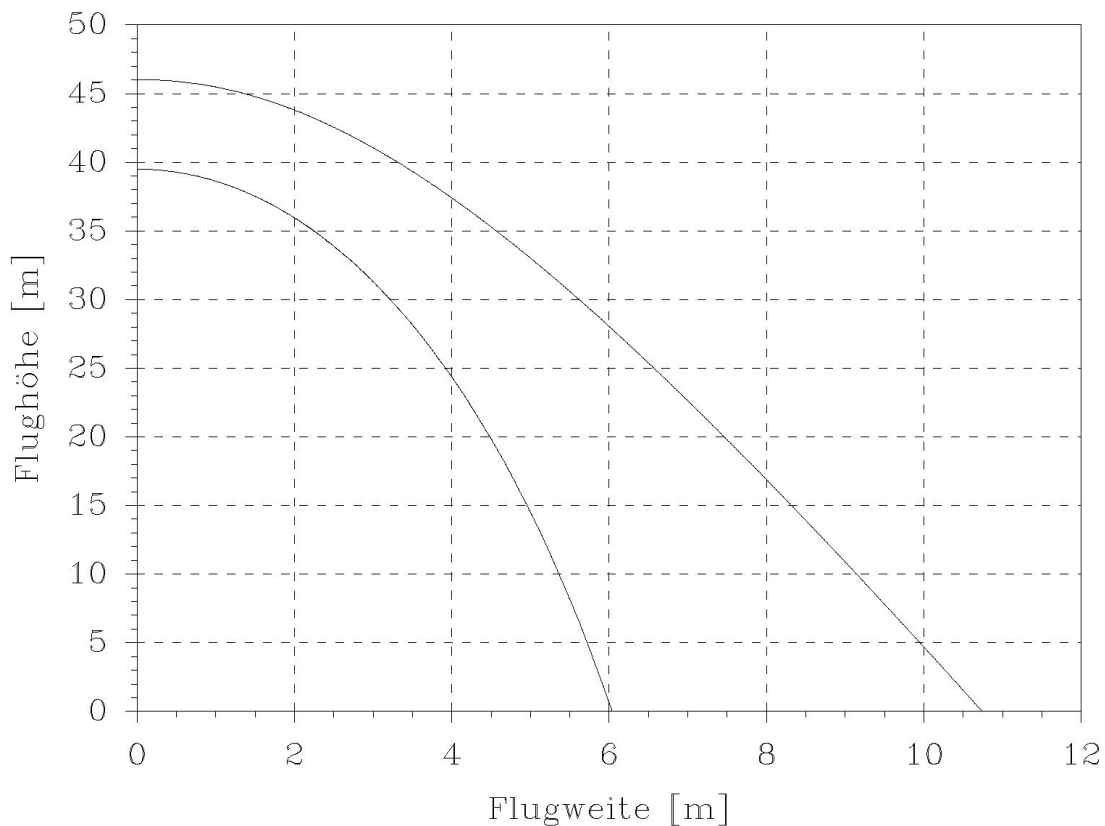


Abbildung 2.5: Berechnete maximale und wahrscheinlichste Trümmerflugbahn für die Randbedingungen aus Abbildung 2.4:  $v_e = 2,9 \frac{m}{s}$  bzw.  $= 2,1 \frac{m}{s}$ ,  $m = 7 \text{ kg}$ ,  $\alpha = 5,4^\circ$  bzw.  $= 0^\circ$ ,  $h = 46 \text{ m}$  bzw.  $= 39,5 \text{ m}$ ,  $A_y = 0,3 \text{ m}^2$ ,  $A_x = 0,0062 \text{ m}^2$ .

### 2.2.3 Staubexplosion in einer Mälzerei

Bei einer verheerenden Staubexplosion in mehreren Silozellen einer Mälzerei hing die Flugweite der Trümmer vom Explosionsablauf in den einzelnen Zellen ab. Dort wo die Wand der Silozelle weitgehend erhalten blieb und lediglich das Silozellendach abgesprengt wurde, war das Verhältnis der Sprengstoffmasse zur fortgeschleuderten Masse vergleichsweise groß. Daraus folgt aus (1.11) eine relativ hohe Anfangsgeschwindigkeit der Fragmente und damit eine große Flugweite. Diese Situation sollte für die äußere Silozelle links aus Abbildung 2.6 zutreffend gewesen sein.

Im Gegensatz dazu ist das Verhältnis von Sprengstoffmasse zur fortgeschleuderten Masse relativ klein bei der fast völlig zerstörten Silozelle aus Abbildung 2.7. Die daraus resultierende geringe Anfangsgeschwindigkeit der Trümmer zieht sehr kleine Flugweiten nach sich, so dass ein großer Teil der Silozellenwand einfach umgefallen ist.

Legt man für den Fall der äußeren Silozelle links aus Abbildung 2.6 einen Berstdruck von  $0,1 \text{ bar}$ , ein Volumen von  $1000 \text{ m}^3$  (Getreidefüllstand berücksichtigt) und ein  $\frac{H}{D}$  von 2 zugrunde, so ergibt sich für die Anfangsgeschwindigkeit eines Fragments der Wert  $24,6 \frac{m}{s}$  bzw.  $24,5 \frac{m}{s}$ , wenn man für die Masse der abgesprengten Wand  $1400 \text{ kg}$  ansetzt.

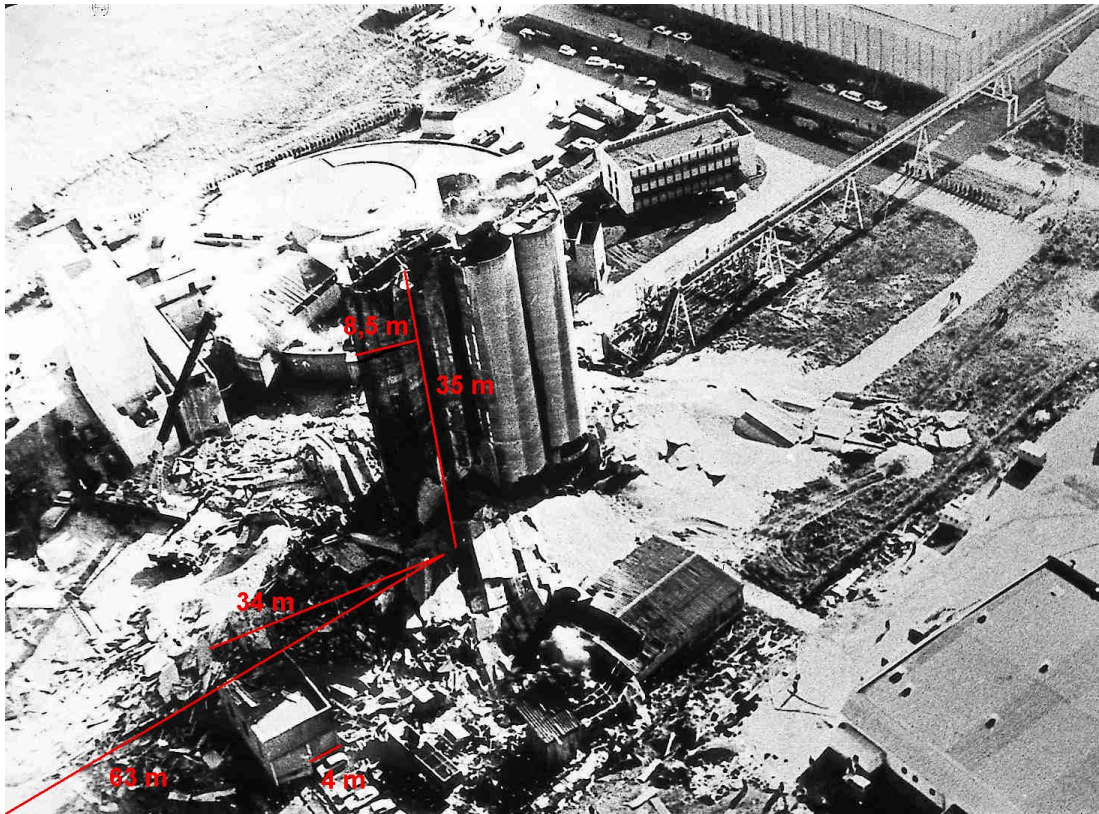


Abbildung 2.6: Luftaufnahme einer Mälzerei nach einer Staubexplosion.

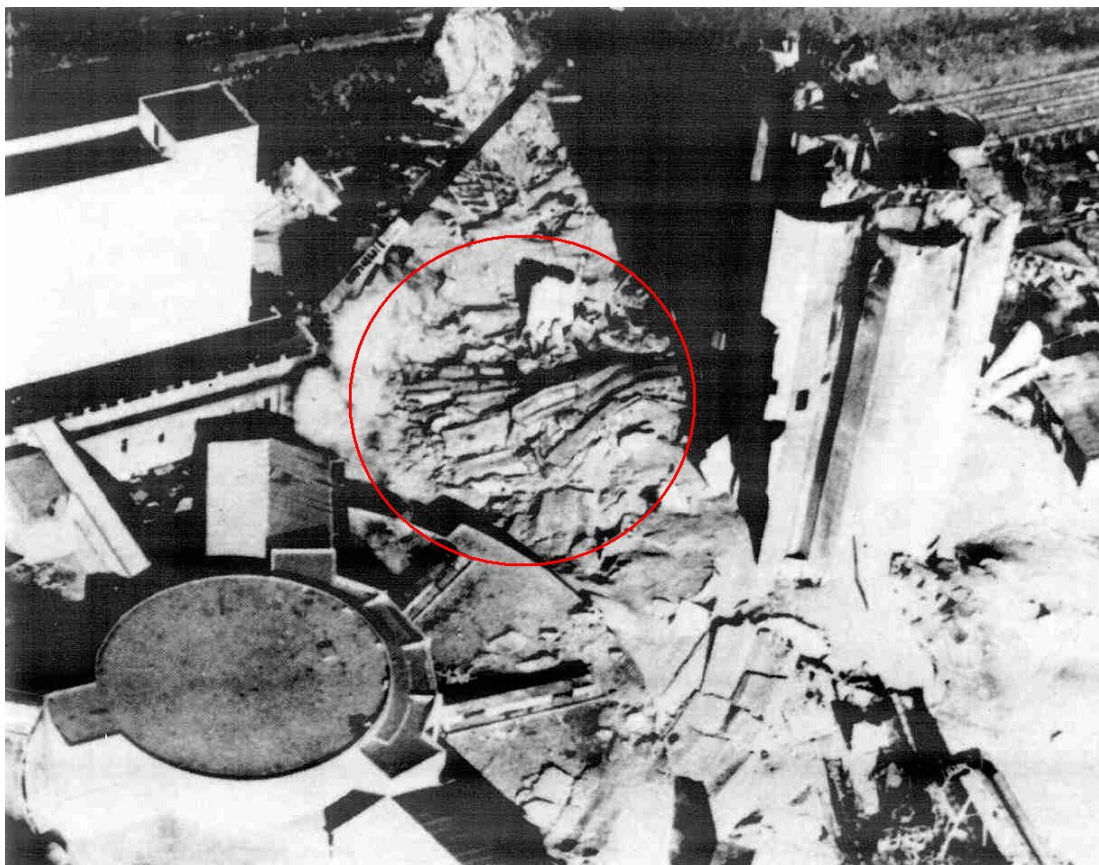


Abbildung 2.7: Luftaufnahme einer Mälzerei nach einer Staubexplosion.

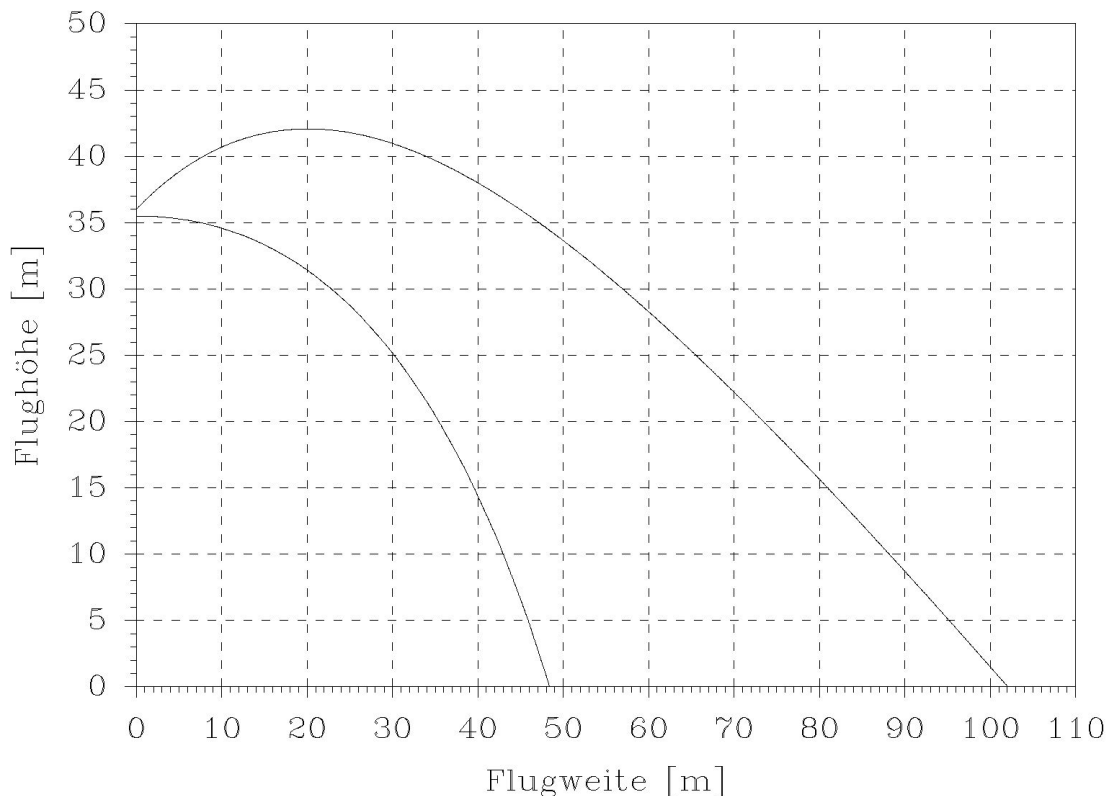


Abbildung 2.8: Berechnete maximale und wahrscheinlichste Trümmerflugbahn für die Randbedingungen aus Abbildung 2.6:  $v_e = 24,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  bzw.  $= 24,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $m = 12,3 \text{ kg}$ ,  $\alpha = 34,2^\circ$  bzw.  $= 0^\circ$ ,  $h = 36 \text{ m}$  bzw.  $= 35,5 \text{ m}$ ,  $A_y = 0,5 \text{ m}^2$ ,  $A_x = 0,008 \text{ m}^2$ ,  $E_{\text{kin}} = 3260 \text{ J}$  bzw.  $= 2850 \text{ J}$  ( $E_{\text{kin}}$  ist die kinetische Energie eines Fragments beim Aufschlag).

Dieser Massewert folgt mit Hilfe von (2.2) aus der Fläche  $A_w \approx 57 \text{ m}^2$  der fortgeschleuderten Wand, wenn deren Stärke  $c_s \approx 0,01 \text{ m}$  und deren Dichte  $\rho_w \approx 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  beträgt. Wird weiterhin die Trümmerfläche  $A_y = 0,5 \text{ m}^2$  gesetzt, so ergibt sich als Masse eines Fragments  $m_s \approx 12,3 \text{ kg}$ . Mit dem optimalen Startwinkel von  $\alpha = 34,2^\circ$  liefert die Lösung von (1.20) schließlich die lange Flugbahn aus Abbildung 2.8. Aus der Grafik entnimmt man eine zugehörige Flugweite von rund 102 m. Dieser Wert kann auf der Grundlage von Abbildung 2.6 nicht verifiziert werden, da der aufgenommene Geländeausschnitt nicht groß genug ist. Die Luftaufnahme zeigt aber, dass die Flugweite von Trümmern größer als 60 m war. Bei der Bestimmung der wahrscheinlichsten Trümmerflugweite besteht dieses Problem nicht und man leitet aus Abbildung 2.6 eine Weite von etwa 34 m ab. Die Rechnung ergibt einen Wert von rund 48 m, d. h. es erscheint eine Diskrepanz von 14 m zwischen Rechnung und Realität. Dieser Umstand ist durchaus verständlich in Anbetracht der groben Abschätzung der zur Berechnung notwendigen Daten. Denn eine kleine Variation des Berstdruckes oder der Masse der fortgeschleuderten Wand zieht eine wesentliche Veränderung der Anfangsgeschwindigkeit der Fragmente nach sich, wovon man sich durch probeweises Einsetzen diverser Werte in die Formeln (1.9) bis (1.11) überzeugen kann. Die Güte der Flugbahnberechnung steht und fällt dementsprechend mit der Genauigkeit der Eingangsdaten zur Abschätzung der Trümmeranfangsgeschwindigkeit, welche als Fehlerquelle alle anderen dominiert.

## Kapitel 3

# Programme



```

neustart: '
CLS 0
intervall = 0
zaehler = 0

REM * Konstanten *
LET luftdichte = 1.25
LET pi = 3.1415
LET pnorm = 101300
LET tnorm = 273.15
LET vnorm = .0224
LET g = 9.81
LET h = .0025

REM * Eingabetafel eins: Allgemeine Angaben *
LINE (145, 7)-(486, 34), 15, BF
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15
COLOR , 8
LOCATE 2, 20: COLOR 14: PRINT " EINGABETAFEL EINS: ANGABEN ZUM BEHÄLTER "
LOCATE 9, 8: COLOR 9: PRINT "BEHÄLTERVOLUMEN (m^3) ="
LOCATE 9, 45: COLOR 10: PRINT "KST-WERT (bar*m/s) ="
LOCATE 14, 8: COLOR 11: PRINT "MAXIMALER ÜBERDRUCK (bar) ="
LOCATE 14, 45: COLOR 12: PRINT "BERSTDRUCK (bar) ="
LOCATE 19, 8: COLOR 13: PRINT "BERSTFLÄCHE (m^2) ="
LOCATE 19, 45: COLOR 14: PRINT "HÖHE/DURCHMESSER ="
COLOR 10
LOCATE 9, 32: COLOR 9: INPUT "", v: LOCATE 9, 66: COLOR 10: INPUT "", kst
LOCATE 14, 36: COLOR 11: INPUT "", pmax
LOCATE 14, 64: COLOR 12: INPUT "", berstdruck
LOCATE 19, 28: COLOR 13: INPUT "", berstflaeche
LOCATE 19, 64: COLOR 14: INPUT "", hzud

CLS 0
REM * Eingabetafel zwei: Angaben zur Wand *
LINE (130, 7)-(500, 34), 15, BF
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15
COLOR , 8
LOCATE 2, 18: COLOR 14: PRINT " EINGABETAFEL ZWEI: ANGABEN ZUR BEHÄLTERWAND "
LOCATE 6, 10: COLOR 10: PRINT "HÖHE DER BERSTFLÄCHE (m) ="
LOCATE 10, 15: COLOR 11: PRINT "MASSE DER GEBORSTENEN WAND (kg) ="
LOCATE 14, 20: COLOR 12: PRINT "STÄRKE DER GEBORSTENEN WAND (m) ="
LOCATE 18, 25: COLOR 13: PRINT "FLÄCHE DER WANDBAUSTEINE (m^2) ="
LOCATE 22, 30: COLOR 14: PRINT "HÖHE DES ZENTRUMS DER BERSTFLÄCHE (m) ="
COLOR 10
LOCATE 6, 37: COLOR 10: INPUT "", flaechenhoehe
LOCATE 10, 49: COLOR 11: INPUT "", wandmasse
LOCATE 14, 54: COLOR 12: INPUT "", wandstaerke
LOCATE 18, 58: COLOR 13: INPUT "", steinflaeche
LOCATE 22, 70: COLOR 14: INPUT "", starthoehe
IF steinflaeche = 0 THEN LET steinflaeche = .5

SCREEN 12
REM * Druckverlauf *

```



```

IF berstdruck < .1 THEN LET ansprechdruck = .1 ELSE LET ansprechdruck = berstdruck
pred = ((.00003264# * pmax * kst + .25 * (ansprechdruck - .1)) * v ^ (3 / 4) / berstflaeche) ^ (7 / 4)
IF hzud > 2 AND pred < 1.5 THEN
COLOR 11: LOCATE 15, 20: PRINT "BERECHNUNG DER FLUGBAHNPARAMETER LÄUFT..."
FOR pred = berstdruck TO 1.5 STEP .00005
akubisch = (3.264E-05 * kst * pmax + 1 / 4 * (ansprechdruck - .1)) * v ^ (3 / 4) / pred ^ (4 / 7)
testflaeche = akubisch * (1 + (-4.305 * LOG(pred) / LOG(10) + .758) * LOG(hzud) / LOG(10))
IF testflaeche > berstflaeche - .1 AND testflaeche < berstflaeche + .1 THEN GOTO predermittelt
NEXT pred
LET pred = berstdruck
END IF

predermittelt: '
CLS 0

REM * Anfangsgeschwindigkeit *
IF pred < berstdruck THEN LET druck = berstdruck ELSE LET druck = pred

sprengstoffmasse = druck / pmax * (.75 + luftdichte) * v
energie = 195200! * ((druck + 1.013) * 100000! / 101300 - 1)
vnull = SQR(2 * energie) * (wandmasse / sprengstoffmasse + 3 / 5) ^ (-1 / 2)

REM * Trümmerzahl und Trümmermasse *
steinzahl = berstflaeche / steinflaeche
steinmasse = wandmasse / steinzahl

REM * starthöhe und startwinkel *
kantenlaenge = SQR(berstflaeche)
starthoehemax = starthoehe + flaechenhoehe / 2
xsw = 1 / 2 * SQR(2) * SQR(vnull ^ 4 + 3 * vnull ^ 2 * starthoehemax * g + 2 * starthoehemax ^ 2 * g ^ 2) /
(vnull ^ 2 + starthoehemax * g)
startwinkelmax = (pi / 2 - ATN(xsw / SQR(1 - xsw ^ 2))) * 57.29578

SCREEN 12
WINDOW (-50, -40)-(50, 40)

REM * Trümmerflug mit maximaler Reichweite *
t = 0
n = 0
x = 0
m = steinmasse
steindurchmesser = SQR(4 * steinflaeche / pi)
Ax = steindurchmesser * wandstaerke
Ay = steinflaeche
chi = steindurchmesser / wandstaerke
cx = 1.1549 + .01389 * chi - .06857 / chi
cy = 1.17
IF cx > 2 THEN LET cx = 2
alpha = startwinkelmax
beta = 0
omega = 0
y = starthoehemax

xpunkt = vnull * COS(alpha * .01745)
ypunkt = vnull * SIN(alpha * .01745)

COLOR 15: LOCATE 15, 24: PRINT "DATENFELDER WERDEN BERECHNET..."

```

```

DO
t = n * h
rx = .5 * luftdichte * (cx * Ax * (COS(beta * .01745 + omega * t)) ^ 2 + cy * Ay *
(SIN(beta * .01745 + omega * t)) ^ 2) / m
ry = .5 * luftdichte * (cx * Ax * (SIN(beta * .01745 + omega * t)) ^ 2 + cy * Ay *
(COS(beta * .01745 + omega * t)) ^ 2) / m
kx1 = (-rx * SQR((xpunkt) ^ 2 + ypunkt ^ 2) * (xpunkt)) * (h ^ 2 / 2)
ky1 = (-ry * SQR((xpunkt) ^ 2 + ypunkt ^ 2) * ypunkt - g) * (h ^ 2 / 2)
kx2 = (-rx * SQR((xpunkt + kx1 / h) ^ 2 + (ypunkt + ky1 / h) ^ 2) *
(xpunkt + kx1 / h)) * (h ^ 2 / 2)
ky2 = (-ry * SQR((xpunkt + kx1 / h) ^ 2 + (ypunkt + ky1 / h) ^ 2) *
(ypunkt + ky1 / h) - g) * (h ^ 2 / 2)
kx3 = (-rx * SQR((xpunkt + kx2 / h) ^ 2 + (ypunkt + ky2 / h) ^ 2) *
(xpunkt + kx2 / h)) * (h ^ 2 / 2)
ky3 = (-ry * SQR((xpunkt + kx2 / h) ^ 2 + (ypunkt + ky2 / h) ^ 2) *
(ypunkt + ky2 / h) - g) * (h ^ 2 / 2)
kx4 = (-rx * SQR((xpunkt + 2 * kx3 / h) ^ 2 + (ypunkt + 2 * ky3 / h) ^ 2) *
(xpunkt + 2 * kx3 / h)) * (h ^ 2 / 2)
ky4 = (-ry * SQR((xpunkt + 2 * kx3 / h) ^ 2 + (ypunkt + 2 * ky3 / h) ^ 2) *
(ypunkt + 2 * ky3 / h) - g) * (h ^ 2 / 2)
kx = (1 / 3) * (kx1 + kx2 + kx3)
ky = (1 / 3) * (ky1 + ky2 + ky3)
kxstrich = (1 / 6) * (kx1 + 2 * kx2 + 2 * kx3 + kx4)
kystrich = (1 / 6) * (ky1 + 2 * ky2 + 2 * ky3 + ky4)
xpunkt = xpunkt + 2 * kxstrich / h
ypunkt = ypunkt + 2 * kystrich / h
x = x + xpunkt * h + kx
y = y + ypunkt * h + ky
xm(n) = x
ym(n) = y
energiem = 1 / 2 * m * (xpunkt ^ 2 + ypunkt ^ 2)
endem = n

IF n < 1 THEN GOTO sprung1
IF ym(n) - ym(n - 1) > 0 THEN LET ymax = ym(n)
xmax = xm(n)
xmaximal = xmax
ymaximal = ymax
IF ym(n) < 0 THEN GOTO wahrscheinlich

sprung1: '
n = n + 1

sec$ = MID$(TIME$, 7, 2)
sekunden = VAL(sec$)
IF sekunden <> zaehltest THEN
LET zaehler = zaehler + 1
LET zeit = zaehler - 1
LET zaehltest = sekunden
SOUND 50, .1
END IF
LOCATE 17, 27: PRINT "RECHENZEIT:"; zeit; "SEKUNDEN"

LOOP

wahrscheinlich: '

```

```

REM * Trümmerflug mit wahrscheinlichster Reichweite *
t = 0
n = 0
x = 0
alpha = 0
beta = 0
omega = 10
y = starthoehe
rotationsenergie = m * steinflaeche / (8 * pi) * 100
vwahr = SQR(vnull ^ 2 - 2 * rotationsenergie / m)

xpunkt = vwahr * COS(alpha * .01745)
ypunkt = vwahr * SIN(alpha * .01745)

DO
t = n * h
rx = .5 * luftdichte * (cx * Ax * (COS(beta * .01745 + omega * t)) ^ 2 + cy * Ay *
(SIN(beta * .01745 + omega * t)) ^ 2) / m
ry = .5 * luftdichte * (cx * Ax * (SIN(beta * .01745 + omega * t)) ^ 2 + cy * Ay *
(COS(beta * .01745 + omega * t)) ^ 2) / m
kx1 = (-rx * SQR((xpunkt) ^ 2 + ypunkt ^ 2) * (xpunkt)) * (h ^ 2 / 2)
ky1 = (-ry * SQR((xpunkt) ^ 2 + ypunkt ^ 2) * ypunkt - g) * (h ^ 2 / 2)
kx2 = (-rx * SQR((xpunkt + kx1 / h) ^ 2 + (ypunkt + ky1 / h) ^ 2) *
(xpunkt + kx1 / h)) * (h ^ 2 / 2)
ky2 = (-ry * SQR((xpunkt + kx1 / h) ^ 2 + (ypunkt + ky1 / h) ^ 2) *
(ypunkt + ky1 / h) - g) * (h ^ 2 / 2)
kx3 = (-rx * SQR((xpunkt + kx2 / h) ^ 2 + (ypunkt + ky2 / h) ^ 2) *
(xpunkt + kx2 / h)) * (h ^ 2 / 2)
ky3 = (-ry * SQR((xpunkt + kx2 / h) ^ 2 + (ypunkt + ky2 / h) ^ 2) *
(ypunkt + ky2 / h) - g) * (h ^ 2 / 2)
kx4 = (-rx * SQR((xpunkt + 2 * kx3 / h) ^ 2 + (ypunkt + 2 * ky3 / h) ^ 2) *
(xpunkt + 2 * kx3 / h)) * (h ^ 2 / 2)
ky4 = (-ry * SQR((xpunkt + 2 * kx3 / h) ^ 2 + (ypunkt + 2 * ky3 / h) ^ 2) *
(ypunkt + 2 * ky3 / h) - g) * (h ^ 2 / 2)
kx = (1 / 3) * (kx1 + kx2 + kx3)
ky = (1 / 3) * (ky1 + ky2 + ky3)
kxstrich = (1 / 6) * (kx1 + 2 * kx2 + 2 * kx3 + kx4)
kystrich = (1 / 6) * (ky1 + 2 * ky2 + 2 * ky3 + ky4)
xpunkt = xpunkt + 2 * kxstrich / h
ypunkt = ypunkt + 2 * kystrich / h
x = x + xpunkt * h + kx
y = y + ypunkt * h + ky
xw(n) = x
yw(n) = y
energie = 1 / 2 * m * (xpunkt ^ 2 + ypunkt ^ 2)
endew = n

xwahr = xw(n)
ywahr = yw(n)

IF n < 1 THEN GOTO sprung2
IF yw(n) - yw(n - 1) > 0 THEN LET ywahrmax = yw(n)
ywahrmax = ywahrmax

IF yw(n) < 0 THEN GOTO flugstart

sprung2: '
n = n + 1

```

```

sec$ = MID$(TIME$, 7, 2)
sekunden = VAL(sec$)
IF sekunden <> zaehltest THEN
LET zaehler = zaehler + 1
LET zeit = zaehler - 1
LET zaehltest = sekunden
SOUND 50, .1
END IF
LOCATE 17, 27: PRINT "RECHENZEIT:"; zeit; "SEKUNDEN"

```

```

LOOP

```

```

flugstart: '

```

```

CLS 0

```

```

IF ymax < 5 THEN LET ymax = 5
IF ymax > 5 AND ymax < 10 THEN LET ymax = 10
IF ymax > 10 AND ymax < 15 THEN LET ymax = 15
IF ymax > 15 AND ymax < 20 THEN LET ymax = 20
IF ymax > 20 AND ymax < 25 THEN LET ymax = 25
IF ymax > 25 AND ymax < 30 THEN LET ymax = 30
IF ymax > 30 AND ymax < 35 THEN LET ymax = 35
IF ymax > 35 AND ymax < 40 THEN LET ymax = 40
IF ymax > 40 AND ymax < 45 THEN LET ymax = 45
IF ymax > 45 AND ymax < 50 THEN LET ymax = 50
IF ymax > 50 AND ymax < 55 THEN LET ymax = 55
IF ymax > 55 AND ymax < 60 THEN LET ymax = 60
IF ymax > 60 AND ymax < 65 THEN LET ymax = 65
IF ymax > 65 AND ymax < 70 THEN LET ymax = 70
IF ymax > 70 AND ymax < 75 THEN LET ymax = 75
IF ymax > 75 AND ymax < 80 THEN LET ymax = 80
IF ymax > 80 AND ymax < 85 THEN LET ymax = 85
IF ymax > 85 AND ymax < 90 THEN LET ymax = 90
IF ymax > 90 AND ymax < 95 THEN LET ymax = 95
IF ymax > 95 AND ymax < 100 THEN LET ymax = 100
IF ymax > 100 AND ymax < 110 THEN LET ymax = 110
IF ymax > 110 AND ymax < 120 THEN LET ymax = 120
IF ymax > 120 AND ymax < 130 THEN LET ymax = 130
IF ymax > 130 AND ymax < 140 THEN LET ymax = 140
IF ymax > 140 AND ymax < 150 THEN LET ymax = 150
IF ymax > 150 THEN LET ymax = 200
IF ywahrmax < 5 THEN LET ywahrmax = 5
IF ywahrmax > 5 AND ywahrmax < 10 THEN LET ywahrmax = 10
IF ywahrmax > 10 AND ywahrmax < 15 THEN LET ywahrmax = 15
IF ywahrmax > 15 AND ywahrmax < 20 THEN LET ywahrmax = 20
IF ywahrmax > 20 AND ywahrmax < 25 THEN LET ywahrmax = 25
IF ywahrmax > 25 AND ywahrmax < 30 THEN LET ywahrmax = 30
IF ywahrmax > 30 AND ywahrmax < 35 THEN LET ywahrmax = 35
IF ywahrmax > 35 AND ywahrmax < 40 THEN LET ywahrmax = 40
IF ywahrmax > 40 AND ywahrmax < 45 THEN LET ywahrmax = 45
IF ywahrmax > 45 AND ywahrmax < 50 THEN LET ywahrmax = 50
IF ywahrmax > 50 AND ywahrmax < 55 THEN LET ywahrmax = 55
IF ywahrmax > 55 AND ywahrmax < 60 THEN LET ywahrmax = 60
IF ywahrmax > 60 AND ywahrmax < 65 THEN LET ywahrmax = 65
IF ywahrmax > 65 AND ywahrmax < 70 THEN LET ywahrmax = 70
IF ywahrmax > 70 AND ywahrmax < 75 THEN LET ywahrmax = 75
IF ywahrmax > 75 AND ywahrmax < 80 THEN LET ywahrmax = 80

```

```

IF ywahrmax > 80 AND ywahrmax < 85 THEN LET ywahrmax = 85
IF ywahrmax > 85 AND ywahrmax < 90 THEN LET ywahrmax = 90
IF ywahrmax > 90 AND ywahrmax < 95 THEN LET ywahrmax = 95
IF ywahrmax > 95 AND ywahrmax < 100 THEN LET ywahrmax = 100
IF ywahrmax > 100 AND ywahrmax < 110 THEN LET ywahrmax = 110
IF ywahrmax > 110 AND ywahrmax < 120 THEN LET ywahrmax = 120
IF ywahrmax > 120 AND ywahrmax < 130 THEN LET ywahrmax = 130
IF ywahrmax > 130 AND ywahrmax < 140 THEN LET ywahrmax = 140
IF ywahrmax > 140 AND ywahrmax < 150 THEN LET ywahrmax = 150
IF ywahrmax > 150 THEN LET ywahrmax = 200
IF ywahrmax > ymax THEN LET ymax = ywahrmax
IF xmax < 5 THEN LET xmax = 5
IF xmax > 5 AND xmax < 10 THEN LET xmax = 10
IF xmax > 10 AND xmax < 15 THEN LET xmax = 15
IF xmax > 15 AND xmax < 20 THEN LET xmax = 20
IF xmax > 20 AND xmax < 25 THEN LET xmax = 25
IF xmax > 25 AND xmax < 30 THEN LET xmax = 30
IF xmax > 30 AND xmax < 35 THEN LET xmax = 35
IF xmax > 35 AND xmax < 40 THEN LET xmax = 40
IF xmax > 40 AND xmax < 45 THEN LET xmax = 45
IF xmax > 45 AND xmax < 50 THEN LET xmax = 50
IF xmax > 50 AND xmax < 55 THEN LET xmax = 55
IF xmax > 55 AND xmax < 60 THEN LET xmax = 60
IF xmax > 60 AND xmax < 65 THEN LET xmax = 65
IF xmax > 65 AND xmax < 70 THEN LET xmax = 70
IF xmax > 70 AND xmax < 75 THEN LET xmax = 75
IF xmax > 75 AND xmax < 80 THEN LET xmax = 80
IF xmax > 80 AND xmax < 85 THEN LET xmax = 85
IF xmax > 85 AND xmax < 90 THEN LET xmax = 90
IF xmax > 90 AND xmax < 95 THEN LET xmax = 95
IF xmax > 95 AND xmax < 100 THEN LET xmax = 100
IF xmax > 100 AND xmax < 105 THEN LET xmax = 105
IF xmax > 105 AND xmax < 110 THEN LET xmax = 110
IF xmax > 110 AND xmax < 150 THEN LET xmax = 150
IF xmax > 150 AND xmax < 200 THEN LET xmax = 200
IF xmax > 200 AND xmax < 250 THEN LET xmax = 250
IF xmax > 250 AND xmax < 300 THEN LET xmax = 300
IF xmax > 300 AND xmax < 350 THEN LET xmax = 350
IF xmax > 350 AND xmax < 400 THEN LET xmax = 400
IF xmax > 400 AND xmax < 450 THEN LET xmax = 450
IF xmax > 450 AND xmax < 500 THEN LET xmax = 500
IF xmax > 500 AND xmax < 600 THEN LET xmax = 600
IF xmax > 600 AND xmax < 700 THEN LET xmax = 700
IF xmax > 700 AND xmax < 800 THEN LET xmax = 800
IF xmax > 800 AND xmax < 900 THEN LET xmax = 900
IF xmax > 900 AND xmax < 1000 THEN LET xmax = 1000

REM * Grafikaufbau *
COLOR 11: LOCATE 30, 34: PRINT "Flugweite in Metern"
LOCATE 30, 6: PRINT "0": LOCATE 30, 76: PRINT xmax
LOCATE 30, 3: PRINT "0": LOCATE 3, 1: PRINT ymax
LOCATE 8, 3: PRINT "F": LOCATE 9, 3: PRINT "l": LOCATE 10, 3: PRINT "u"
LOCATE 11, 3: PRINT "g": LOCATE 12, 3: PRINT "h": LOCATE 13, 3: PRINT "ö"
LOCATE 14, 3: PRINT "h": LOCATE 15, 3: PRINT "e": LOCATE 17, 3: PRINT "i"
LOCATE 18, 3: PRINT "n": LOCATE 20, 3: PRINT "M": LOCATE 21, 3: PRINT "e"
LOCATE 22, 3: PRINT "t": LOCATE 23, 3: PRINT "e": LOCATE 24, 3: PRINT "r"

```

```

LOCATE 25, 3: PRINT "n"
VIEW (40, 40)-(625, 458), 8, 15
WINDOW (0, 0)-(xmax, ymax)
COLOR 10
FOR vg = 1 TO xmax - 1 STEP 1
LINE (vg, 0)-(vg, ymax), 7
NEXT vg
FOR hg = 1 TO ymax - 1 STEP 1
LINE (0, hg)-(xmax, hg), 7
NEXT hg
FOR vg = 5 TO xmax - 5 STEP 5
LINE (vg, 0)-(vg, ymax), 15
NEXT vg
FOR hg = 5 TO ymax - 5 STEP 5
LINE (0, hg)-(xmax, hg), 15
NEXT hg
IF xmaximal < 10 THEN COLOR 12: LOCATE 2, 6: PRINT USING "Maximal erreichbare Flugweite = #.# m";
CLNG(xmaximal * 10) / 10
IF xmaximal < 100 THEN COLOR 12: LOCATE 2, 6: PRINT USING "Maximal erreichbare Flugweite = ##.# m";
CLNG(xmaximal * 10) / 10
IF xmaximal >= 100 THEN COLOR 12: LOCATE 2, 6: PRINT USING "Maximal erreichbare Flugweite = ###.# m";
CLNG(xmaximal * 10) / 10
IF xwahr < 10 THEN COLOR 10: LOCATE 1, 6: PRINT USING "Wahrscheinlichste Flugweite = #.# m";
CLNG(xwahr * 10) / 10
IF xwahr < 100 AND xwahr >= 10 THEN COLOR 10: LOCATE 1, 6: PRINT USING
"Wahrscheinlichste Flugweite = ##.# m"; CLNG(xwahr * 10) / 10
IF xwahr >= 100 THEN COLOR 10: LOCATE 1, 6: PRINT USING "Wahrscheinlichste Flugweite = ###.# m";
CLNG(xwahr * 10) / 10
IF ymaximal <= ywmax THEN LET flughoehe = ywmax
IF ymaximal >= ywmax THEN LET flughoehe = ymaximal
IF flughoehe < 10 THEN COLOR 14: LOCATE 2, 63: PRINT USING "Flughöhe = #.# m";
CLNG(flughoehe * 10) / 10
IF flughoehe < 100 AND flughoehe >= 10 THEN COLOR 14: LOCATE 2, 62: PRINT USING
"Flughöhe = ##.# m";
CLNG(flughoehe * 10) / 10
IF flughoehe >= 100 THEN COLOR 14: LOCATE 2, 61: PRINT USING "Flughöhe = ###.# m";
CLNG(flughoehe * 10) / 10
COLOR 15: LOCATE 1, 64: PRINT "weiter mit ←┘"

FOR n = 1 TO endem
LINE (xm(n), ym(n))-(xm(n - 1), ym(n - 1)), 12, BF
NEXT n
FOR n = 1 TO endew
LINE (xw(n), yw(n))-(xw(n - 1), yw(n - 1)), 10, BF
NEXT n

lied$ = "164 o3 c d e f g a b o4 c"
PLAY lied$

halt3$ = INPUT$(1)
CLS 0

SCREEN 9
LINE (164, 7)-(470, 34), 15, BF
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15

```

```

COLOR , 8
LOCATE 2, 27: COLOR 14: PRINT " ZUSAMMENFASSUNG DER DATEN "
COLOR 10
LOCATE 5, 5: PRINT "BEHÄLTER:": LINE (32, 68)-(100, 68)
LOCATE 5, 29: PRINT "VOLUMEN ="; v; "m^3"
LOCATE 5, 62: PRINT "H/D ="; hzud
LOCATE 6, 25: PRINT "BERSTFLÄCHE ="; berstflaeche; "m^2"
LOCATE 6, 55: PRINT USING "INNENDRUCK = ### bar"; druck
COLOR 11
LOCATE 8, 5: PRINT "STAUB:": LINE (32, 110)-(76, 110)
LOCATE 8, 28: PRINT "KST-WERT ="; kst; "bar*m/s"
LOCATE 8, 61: PRINT USING "PMAX = ## bar"; pmax
COLOR 12
LOCATE 10, 5: PRINT "TRÜMMER:": LINE (32, 138)-(92, 138)
LOCATE 10, 31
IF m < 10 THEN PRINT USING "MASSE = ### kg"; m
IF m >= 10 AND m < 100 THEN PRINT USING "MASSE = ##.## kg"; m
IF m >= 100 THEN PRINT USING "MASSE = ###.## kg"; m
LOCATE 10, 59
IF steinflaeche < 10 THEN PRINT USING "FLÄCHE = ## m^2"; steinflaeche
IF steinflaeche >= 10 THEN PRINT USING "FLÄCHE = ##.## m^2"; steinflaeche
COLOR 14
LOCATE 12, 5: PRINT "FLUG MAXIMAL:": LINE (32, 166)-(132, 166)
LOCATE 12, 27
IF xmaximal < 10 THEN PRINT USING "FLUGWEITE = ## m"; CLNG(xmaximal * 10) / 10
IF xmaximal >= 10 AND xmaximal < 100 THEN PRINT USING "FLUGWEITE = ##.## m";
CLNG(xmaximal * 10) / 10
IF xmaximal >= 100 AND xmaximal < 1000 THEN PRINT USING "FLUGWEITE = ###.## m";
CLNG(xmaximal * 10) / 10
IF xmaximal >= 1000 THEN PRINT USING "FLUGWEITE = ####.## m"; CLNG(xmaximal * 10) / 10
LOCATE 12, 57
IF ymaximal < 10 THEN PRINT USING "FLUGHÖHE = ## m"; CLNG(ymaximal * 10) / 10
IF ymaximal >= 10 AND ymaximal < 100 THEN PRINT USING "FLUGHÖHE = ##.## m";
CLNG(ymaximal * 10) / 10
IF ymaximal >= 100 THEN PRINT USING "FLUGHÖHE = ###.## m"; CLNG(ymaximal * 10) / 10
LOCATE 13, 27: PRINT "STARTHÖHE ="; CLNG(starthoehemax * 10) / 10; "m"
LOCATE 13, 54
IF startwinkelmax < 10 THEN PRINT USING "STARTWINKEL = ## °"; CLNG(startwinkelmax * 10) / 10
IF startwinkelmax >= 10 THEN PRINT USING "STARTWINKEL = ##.## °"; CLNG(startwinkelmax * 10) / 10
LOCATE 14, 16
IF vnull < 10 THEN PRINT USING "STARTGESCHWINDIGKEIT = ## m/s"; CLNG(vnull * 10) / 10
IF vnull >= 10 AND vnull < 100 THEN PRINT USING "STARTGESCHWINDIGKEIT = ##.## m/s";
CLNG(vnull * 10) / 10
IF vnull >= 100 THEN PRINT USING "STARTGESCHWINDIGKEIT = ###.## m/s"; CLNG(vnull * 10) / 10
LOCATE 14, 50: PRINT "TRÜMMERROTATION ="; 0; "rad/s"
LOCATE 15, 12: PRINT "TRÜMMERSTARTORIENTIERUNG ="; 0; "°"
LOCATE 15, 50
IF energiem < 10 THEN PRINT USING "AUFPRALLENERGIE = ## J"; CLNG(energiem * 10) / 10
IF energiem >= 10 AND energiem < 100 THEN PRINT USING "AUFPRALLENERGIE = ##.## J";
CLNG(energiem * 10) / 10
IF energiem >= 100 AND energiem < 1000 THEN PRINT USING "AUFPRALLENERGIE = ###.## J";
CLNG(energiem * 10) / 10
IF energiem >= 1000 AND energiem < 10000 THEN PRINT USING "AUFPRALLENERGIE = ####.## J";
CLNG(energiem * 10) / 10
IF energiem >= 10000 THEN PRINT USING "AUFPRALLENERGIE = #####.## J"; CLNG(energiem * 10) / 10
LOCATE 17, 5: PRINT "FLUG WAHRSCHEINLICH:": LINE (32, 236)-(188, 236)
LOCATE 17, 27

```

```

IF xwahr < 10 THEN PRINT USING "FLUGWEITE = #.# m"; CLNG(xwahr * 10) / 10
IF xwahr >= 10 AND xwahr < 100 THEN PRINT USING "FLUGWEITE = ##.# m"; CLNG(xwahr * 10) / 10
IF xwahr >= 100 AND xwahr < 1000 THEN PRINT USING "FLUGWEITE = ###.# m"; CLNG(xwahr * 10) / 10
IF xwahr >= 1000 THEN PRINT USING "FLUGWEITE = ####.# m"; CLNG(xwahr * 10) / 10
LOCATE 17, 57
IF ywmax < 10 THEN PRINT USING "FLUGHÖHE = #.# m"; CLNG(ywmax * 10) / 10
IF ywmax >= 10 AND ywmax < 100 THEN PRINT USING "FLUGHÖHE = ##.# m"; CLNG(ywmax * 10) / 10
IF ywmax >= 100 THEN PRINT USING "FLUGHÖHE = ###.# m"; CLNG(ywmax * 10) / 10
LOCATE 18, 27: PRINT "STARTHÖHE ="; starthoehe; "m/s"
LOCATE 18, 54: PRINT "STARTWINKEL ="; 0; "°"
LOCATE 19, 16
IF vwahr < 10 THEN PRINT USING "STARTGESCHWINDIGKEIT = #.# m/s"; CLNG(vwahr * 10) / 10
IF vwahr >= 10 AND vnull < 100 THEN PRINT USING "STARTGESCHWINDIGKEIT = ##.# m/s";
CLNG(vwahr * 10) / 10
IF vwahr >= 100 THEN PRINT USING "STARTGESCHWINDIGKEIT = ###.# m/s"; CLNG(vwahr * 10) / 10
LOCATE 19, 50: PRINT "TRÜMMERROTATION ="; 10; "rad/s"
LOCATE 20, 12: PRINT "TRÜMMERSTARTORIENTIERUNG ="; 90; "°"
LOCATE 20, 50
IF energiew < 10 THEN PRINT USING "AUFPRALLENERGIE = #.# J"; CLNG(energiew * 10) / 10
IF energiew >= 10 AND energiew < 100 THEN PRINT USING "AUFPRALLENERGIE = ##.# J";
CLNG(energiew * 10) / 10
IF energiew >= 100 AND energiew < 1000 THEN PRINT USING "AUFPRALLENERGIE = ###.# J";
CLNG(energiew * 10) / 10
IF energiew >= 1000 AND energiew < 10000 THEN PRINT USING "AUFPRALLENERGIE = ####.# J";
CLNG(energiew * 10) / 10
IF energiew >= 10000 THEN PRINT USING "AUFPRALLENERGIE = #####.# J"; CLNG(energiew * 10) / 10
COLOR 15
LOCATE 22, 9: INPUT "MÖCHTEN SIE DIE HIER AUFGELISTETEN DATEN AUSDRUCKEN (j/n)"; drucken$
IF drucken$ = "j" THEN GOTO drucken ELSE GOTO neustartfrage

drucken: '
LPRINT : LPRINT
LPRINT " DATEN AUS DER SIMULATIONSRECHNUNG ZUM TRÜMMERFLUG BEI STAUBEXPLOSIONEN"
LPRINT " ====="
LPRINT : LPRINT : LPRINT
LPRINT " BEHAELTERDATEN: VOLUMEN ="; v; "m^3"
LPRINT " ----- H/D ="; hzd
LPRINT " BERSTFLAECHE ="; berstflaeche; "m^2"
LPRINT USING " INNENDRUCK = #.# bar"; druck
LPRINT USING " WANDSTAERKE = #.## m"; wandstaerke
LPRINT : LPRINT : LPRINT
LPRINT " STAUBDATEN: KST-WERT ="; kst; "bar*m/s"
LPRINT USING " ----- PMAX = #.# bar"; pmax
LPRINT : LPRINT : LPRINT
LPRINT " TRÜMMERDATEN: MASSE ="; CLNG(m * 100) / 100; "kg"
IF steinflaeche < 10 THEN LPRINT USING " ----- FLAECHE = #.# m^2";
steinflaeche
IF steinflaeche >= 10 THEN LPRINT USING " ----- FLAECHE = ##.# m^2";
steinflaeche
LPRINT : LPRINT : LPRINT
IF xmaximal < 10 THEN LPRINT USING " FLUGBAHNDATEN MAXIMAL: FLUGWEITE = #.# m";
CLNG(xmaximal * 10) / 10
IF xmaximal >= 10 AND xmaximal < 100 THEN LPRINT USING " FLUGBAHNDATEN MAXIMAL:
FLUGWEITE = ##.# m"; CLNG(xmaximal * 10) / 10
IF xmaximal >= 100 THEN LPRINT USING " FLUGBAHNDATEN MAXIMAL:
FLUGWEITE = ###.# m";
CLNG(xmaximal * 10) / 10

```



```

IF ymaximal < 10 THEN LPRINT USING " ----- FLUGHOEHE = ##.# m";
CLNG(ymaximal * 10) / 10
IF ymaximal >= 10 AND ymaximal < 100 THEN LPRINT USING " -----
FLUGHOEHE = ##.# m"; CLNG(ymaximal * 10) / 10
IF ymaximal >= 100 THEN LPRINT USING " ----- FLUGHOEHE = ###.## m";
CLNG(ymaximal * 10) / 10
IF starthoehemax < 10 THEN LPRINT USING " STARTHOEHE = ##.## m";
starthoehemax
IF starthoehemax >= 10 THEN LPRINT USING " STARTHOEHE = ###.## m";
starthoehemax
IF starthoehemax >= 100 THEN LPRINT USING " STARTHOEHE = ###.## m";
starthoehemax
IF startwinkelmax < 10 THEN LPRINT USING " STARTWINKEL = ##.## |";
CLNG(startwinkelmax * 10) / 10
IF startwinkelmax >= 10 THEN LPRINT USING " STARTWINKEL = ##.## |";
CLNG(startwinkelmax * 10) / 10
IF vnull < 10 THEN LPRINT USING " STARTGESCHWINDIGKEIT = ##.## m/s";
CLNG(vnull * 10) / 10
IF vnull >= 10 AND vnull < 100 THEN LPRINT USING "
STARTGESCHWINDIGKEIT = ##.## m/s"; CLNG(vnull * 10) / 10
IF vnull >= 100 THEN LPRINT USING " STARTGESCHWINDIGKEIT = ###.## m/s";
CLNG(vnull * 10) / 10
LPRINT " TRUEMMERROTATION ="; 0; "rad/s"
LPRINT " ORIENTIERUNG DER TRUEMMER BEIM"
LPRINT " START BEZUEGLICH DER HORIZONTALEN ="; 0; " |"
LPRINT " KINETISCHE ENERGIE DER TRUEMMER"
IF energiem < 10 THEN LPRINT USING " BEIM AUFPRALL AUF DEN BODEN = ##.## J";
CLNG(energiem * 10) / 10
IF energiem >= 10 AND energiem < 100 THEN LPRINT USING "
BEIM AUFPRALL AUF DEN BODEN = ##.## J"; CLNG(energiem * 10) / 10
IF energiem >= 100 AND energiem < 1000 THEN LPRINT USING "
BEIM AUFPRALL AUF DEN BODEN = ###.## J"; CLNG(energiem * 10) / 10
IF energiem >= 1000 AND energiem < 10000 THEN LPRINT USING "
BEIM AUFPRALL AUF DEN BODEN = ####.## J"; CLNG(energiem * 10) / 10
IF energiem >= 10000 THEN LPRINT USING " BEIM AUFPRALL AUF DEN BODEN = #####.## J";
CLNG(energiem * 10) / 10
LPRINT : LPRINT : LPRINT
IF xwahr < 10 THEN LPRINT USING " FLUGBAHNDATEN WAHRSCHEINLICH:
FLUGWEITE = ##.## m"; CLNG(xwahr * 10) / 10
IF xwahr >= 10 AND xwahr < 100 THEN LPRINT USING " FLUGBAHNDATEN WAHRSCHEINLICH:
FLUGWEITE = ##.## m"; CLNG(xwahr * 10) / 10
IF xwahr >= 100 THEN LPRINT USING " FLUGBAHNDATEN WAHRSCHEINLICH:
FLUGWEITE = ###.## m"; CLNG(xwahr * 10) / 10
IF ywmax < 10 THEN LPRINT USING " -----
FLUGHOEHE = ##.## m"; CLNG(ywmax * 10) / 10
IF ywmax >= 10 AND ywmax < 100 THEN LPRINT USING " -----
FLUGHOEHE = ##.## m"; CLNG(ywmax * 10) / 10
IF ywmax >= 100 AND ywmax < 1000 THEN LPRINT USING " -----
FLUGHOEHE = ###.## m"; CLNG(ywmax * 10) / 10
IF ywmax >= 1000 THEN LPRINT USING " -----
FLUGHOEHE = ###.## m"; CLNG(ywmax * 10) / 10
LPRINT " STARTHOEHE ="; starthoehe; "m"
LPRINT " STARTWINKEL ="; alpha; " |"
IF vwahr < 10 THEN LPRINT USING " STARTGESCHWINDIGKEIT = ##.## m/s";
CLNG(vwahr * 10) / 10
IF vwahr >= 10 AND vnull < 100 THEN LPRINT USING "
STARTGESCHWINDIGKEIT = ##.## m/s"; CLNG(vwahr * 10) / 10

```

```

IF vwahr >= 100 THEN LPRINT USING "                STARTGESCHWINDIGKEIT = ###.# m/s";
CLNG(vwahr * 10) / 10
LPRINT "                TRUEMMERROTATION ="; 10; "rad/s"
LPRINT "                ORIENTIERUNG DER TRUEMMER BEIM"
LPRINT "                START BEZUEGLICH DER HORIZONTALLEN ="; beta; "|"
LPRINT "                KINETISCHE ENERGIE DER TRUEMMER"
IF energiew < 10 THEN LPRINT USING "                BEIM AUFPRALL AUF DEN BODEN = #.# J";
CLNG(energiew * 10) / 10
IF energiew >= 10 AND energiew < 100 THEN LPRINT USING "
BEIM AUFPRALL AUF DEN BODEN = ##.# J"; CLNG(energiew * 10) / 10
IF energiew >= 100 AND energiew < 1000 THEN LPRINT USING "
BEIM AUFPRALL AUF DEN BODEN = ###.# J"; CLNG(energiew * 10) / 10
IF energiew >= 1000 AND energiew < 10000 THEN LPRINT USING "
BEIM AUFPRALL AUF DEN BODEN = ####.# J"; CLNG(energiew * 10) / 10
IF energiew >= 10000 THEN LPRINT USING " BEIM AUFPRALL AUF DEN BODEN = #####.# J";
CLNG(energiew * 10) / 10

neustartfrage: '
LOCATE 24, 13
INPUT "MÖCHTEN SIE EINE NEUE BERECHNUNG DURCHFÜHREN (j/n)"; neu$
IF neu$ = "j" THEN
GOTO neustart
END IF

CLS 0
COLOR 11
PRINT : PRINT : PRINT : PRINT
PRINT "
PRINT "
PRINT "
PRINT "
PRINT "
PRINT "
PRINT "
PRINT "
PRINT "
PRINT "
PRINT "
PRINT "
PRINT "
PRINT "
PRINT "
PRINT "
PRINT "
PRINT "
PRINT "
PRINT "
SLEEP 1.5
END

```

```

E N D E   V O N   S T S

```

# Literaturverzeichnis

- [1] K. HÖPPNER: Measurement of pressure blast effects and fireball sizes from vented dust explosions in rooms, *Cooperative Research of Exploding Dusts on Industrial Terrains (CREDIT): Protecting people, equipment, buildings and environment against dust explosions, a multinational projekt supported by CEC third framework programme for research and technological development on major industrial hazards, Final Report*, 293-354 (1995)
- [2] G. E. JONES, J. E. KENNEDY, L. D. BERTHOLF: Ballistics calculations of R. W. Gurney, *Am. J. Phys.*, **48**, 264-269 (1980).
- [3] 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 e. V.* (1996).
- [4] R. ZURMÜHL: Praktische Mathematik für Ingenieure und Physiker, *Springer Verlag Berlin/Heidelberg/New York*, 5. Auflage (1965).
- [5] C. GERTHSEN, H. O. KNESER, H. VOGEL: Physik, *Springer Verlag Berlin/Heidelberg/New York*, 14. Auflage (1982)
- [6] W. GREINER: Mechanik, Teil 1, *Verlag Harry Deutsch*, 6. Auflage (1993)
- [7] W. GREINER: Mechanik, Teil 2, *Verlag Harry Deutsch*, 6. Auflage (1989)
- [8] VDI 3673: Druckentlastung von Staubexplosionen (1992)