

Trümmerflug in der Umgebung von Staubexplosionsherden – Vergleich zwischen Mietberechnung und Explosionsereignissen

Dipl.-Phys. Dirk Lorenz, Mannheim Prof. Dr. Siegfried Radandt, Mannheim

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 Explosionsunglücken 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.

1 Theorie des Trümmerfluges

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

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

aufgefaßt werden, also mit einer Reibungskraft $\propto \dot{r}^2$. In (1) bedeuten A die Querschnittsfläche, $\dot{r}(t)$ die Geschwindigkeit und c_n den Reibungskoeffizienten des Körpers; ρ ist die Dichte des Mediums, also der Luft. Das Problem des schiefen Wurfes mit Newton-Reibung führt auf die Differentialgleichung

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

mit den Anfangsbedingungen (Starthöhe h , Startgeschwindigkeit v_e , Startwinkel α)

$$\vec{r}(0) = (0, h) \quad \dot{\vec{r}}(0) = \vec{v}_e = (v_e \cdot \cos \alpha, v_e \cdot \sin \alpha) \quad (3)$$

Die Bewegungsgleichung (2) ist nicht separabel und zerfällt in

$$\begin{aligned} m \cdot \ddot{x}(t) + \frac{1}{2} \cdot c_n \cdot \rho \cdot A \cdot \sqrt{\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t)} \cdot \dot{x}(t) &= 0 \\ m \cdot \ddot{y}(t) + \frac{1}{2} \cdot c_n \cdot \rho \cdot A \cdot \sqrt{\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t)} \cdot \dot{y}(t) &= -m \cdot g \end{aligned} \quad (4)$$

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

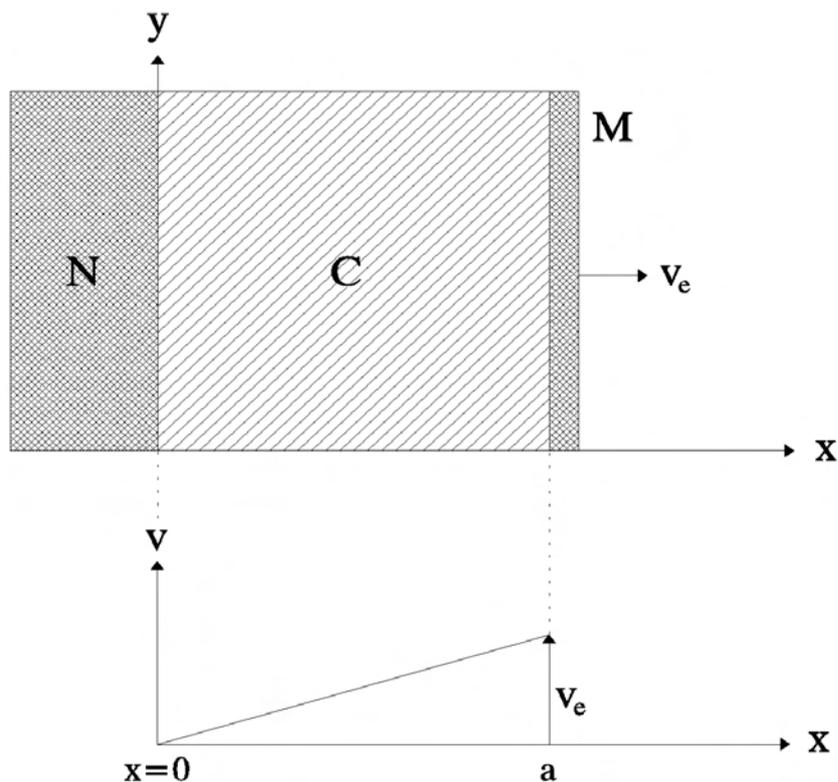


Abbildung 1: Querschnitt eines Explosionsraumes. Die Wand N ist unbeweglich, die Wand M wird durch den Sprengstoff C nach rechts beschleunigt. Die Geschwindigkeitsverteilung des Explosionsgases ist linear und unterhalb der Raumskizze dargestellt.

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.

Das Beispiel aus Abbildung 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

$$L \cdot E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_e^2 + \frac{1}{2} \cdot \int_0^a \rho(x) \cdot v^2(x) \, dx \quad (5)$$

dar. In (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 kon-

stanter Gasdichte

$$\rho(x) = \frac{L}{a} \quad (6)$$

und linearer Geschwindigkeitsverteilung der Gasphase

$$v(x) = v_e \cdot \frac{x}{a} \quad (7)$$

folgt

$$L \cdot E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_e^2 + \frac{L \cdot v_e^2}{2 \cdot a^3} \cdot \int_0^a x^2 dx = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_e^2 + \frac{1}{6} \cdot L \cdot v_e^2 \quad (8)$$

Auflösen nach v_e liefert

$$v_e = \sqrt{2 \cdot E} \cdot \left(\frac{m}{L} + \frac{1}{3} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

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

$$v_e = \sqrt{2 \cdot E} \cdot \left(\frac{m}{L} + \frac{3}{5} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Bei zylindrischer Geometrie folgt aus den Gleichungen (5) bis (7)

$$v_e = \sqrt{2 \cdot E} \cdot \left(\frac{m}{L} + \frac{1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Die Formeln (9) bis (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 (9) bis (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

$$T_b \approx \frac{p_b}{p_0} \cdot T_0 \quad (12)$$

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

$$\Delta Q = c_v \cdot m_g \cdot (T_b - T_0) \quad (13)$$

abgeschätzt werden. Da sich die innere Energie E in der Gurney-Konstanten auf die Masseneinheit bezieht, muß (13) lediglich durch die Masse des Brennstoffgemisches im Behälter m_g dividiert werden und man erhält

$$E = c_v \cdot (T_b - T_0) \approx 715 \cdot \left(\frac{p_b}{101300} \cdot 273 - 273 \right) = 1,952 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{p_b}{101300} - 1 \right) \quad (14)$$

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

$$L \approx \frac{p_b - p_0}{p_{\max}} \cdot \rho_s \cdot V = \frac{p_b - 101300}{450000} \cdot V \quad (15)$$

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 (12), (14) und (15) einzusetzen.

1.2 Startwinkel der Trümmer

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

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\sqrt{2 \cdot (v_e^4 + 3 \cdot v_e^2 \cdot h \cdot g + 2 \cdot h^2 \cdot g^2)}}{2 \cdot (v_e^2 + h \cdot g)} \right) \quad (16)$$

Gleichung (16) ergibt sich durch Optimierungsrechnung bei der nach der Flugweite umgeformten Gleichung für die Trümmerflugbahn ohne Luftreibung. Dieser Startwinkel α 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 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 ρ_w bekannt sein. Zusammen mit den oben abgeleiteten Abmessungen eines Fragments folgt für dessen Masse

$$m = m_w \cdot \frac{a_s \cdot b_s}{A_w} = \rho_w \cdot a_s \cdot b_s \cdot c_s \quad (17)$$

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 2 entnimmt. Das Reibungsgesetz (1) kann in einem solchen Fall gut durch

$$\vec{F}_R \approx \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \hat{N} \cdot \dot{r}(t) \cdot \dot{\vec{r}}(t) \quad (18)$$

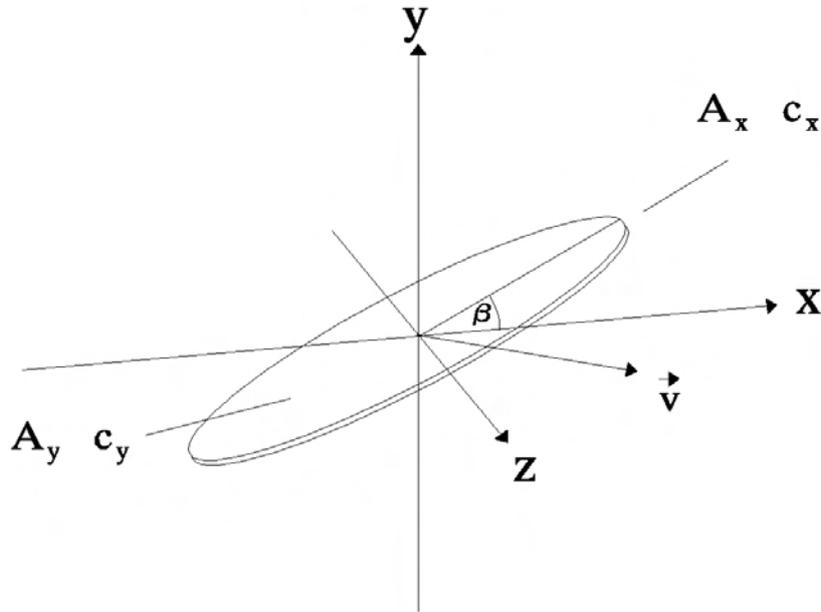


Abbildung 2: Skizze einer, mit der Geschwindigkeit \vec{v} durch die Luft fliegenden Platte mit der Neigung β zur Horizontalen.

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

$$\hat{N} = \begin{pmatrix} c_x \cdot A_x \cdot \cos^2 \beta + c_y \cdot A_y \cdot \sin^2 \beta & 0 \\ 0 & c_x \cdot A_x \cdot \sin^2 \beta + c_y \cdot A_y \cdot \cos^2 \beta \end{pmatrix} \quad (19)$$

($c_x = 2, c_y = 1, 17$) steht. Die Bewegungsgleichungen (4) verändern sich damit zu

$$\begin{aligned} m \cdot \ddot{y}(t) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (c_x \cdot A_x \cdot \sin^2 \beta + c_y \cdot A_y \cdot \cos^2 \beta) \cdot \sqrt{\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t)} \cdot \dot{y}(t) &= -m \cdot g \\ m \cdot \ddot{x}(t) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (c_x \cdot A_x \cdot \cos^2 \beta + c_y \cdot A_y \cdot \sin^2 \beta) \cdot \sqrt{\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t)} \cdot \dot{x}(t) &= 0 \end{aligned} \quad (20)$$

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 β 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.

2 Vergleich zwischen Mietberechnung und Explosionsereignissen

Die Lösung von Gleichung (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 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 (14) und (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 (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 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 (16)), $\beta = 0^\circ$, $\dot{\beta} = 0 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ und $h = 6 \text{ m}$ (höchstmögliche Startposition) annehmen. Die numerische Lösung von (20) mit diesen Randbedingungen ergibt die lange Flugbahn aus Abbildung 3 mit einer Trümmerreichweite von $58,6 \text{ m}$. Im Experiment flogen lediglich rund 2% der Trümmer weiter als 54 m und wurden in einem in dieser Entfernung von der Entlastungsfläche beginnenden Waldstück gefunden.

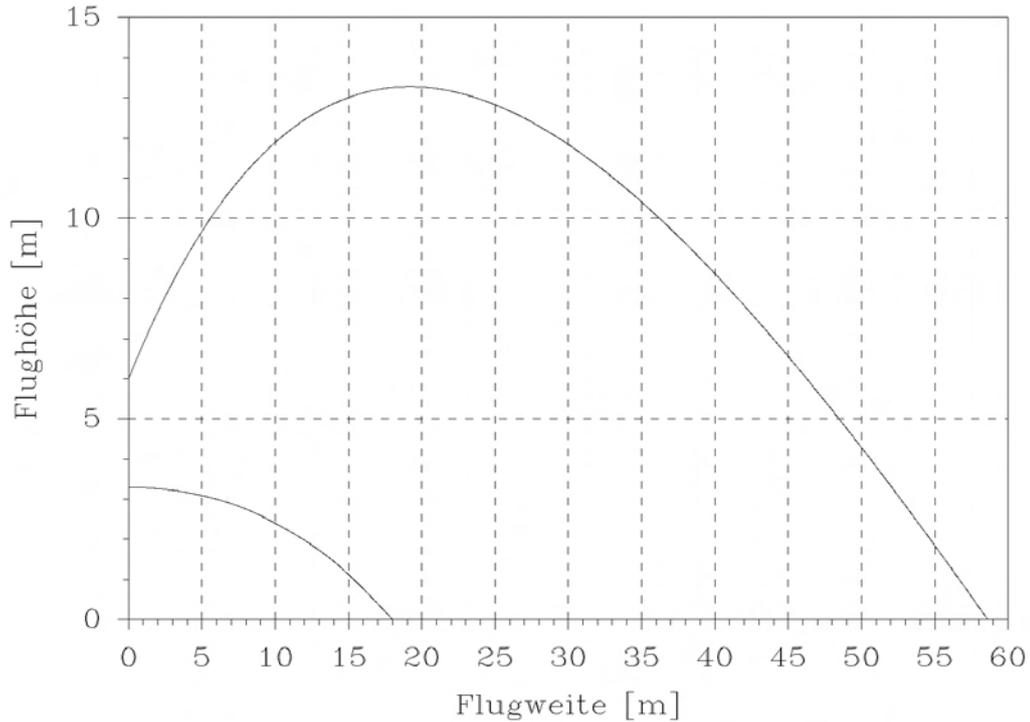


Abbildung 3: Berechnete maximale und wahrscheinlichste Trümmerflugbahn für die Bedingungen des Experiments Nr. 11 der IBExU-Versuchsreihe zum CREDIT-Projekt.

Die kurze Flugbahn in Abbildung 3 ergibt sich aus der Lösung von (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 Entfernungintervall 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.

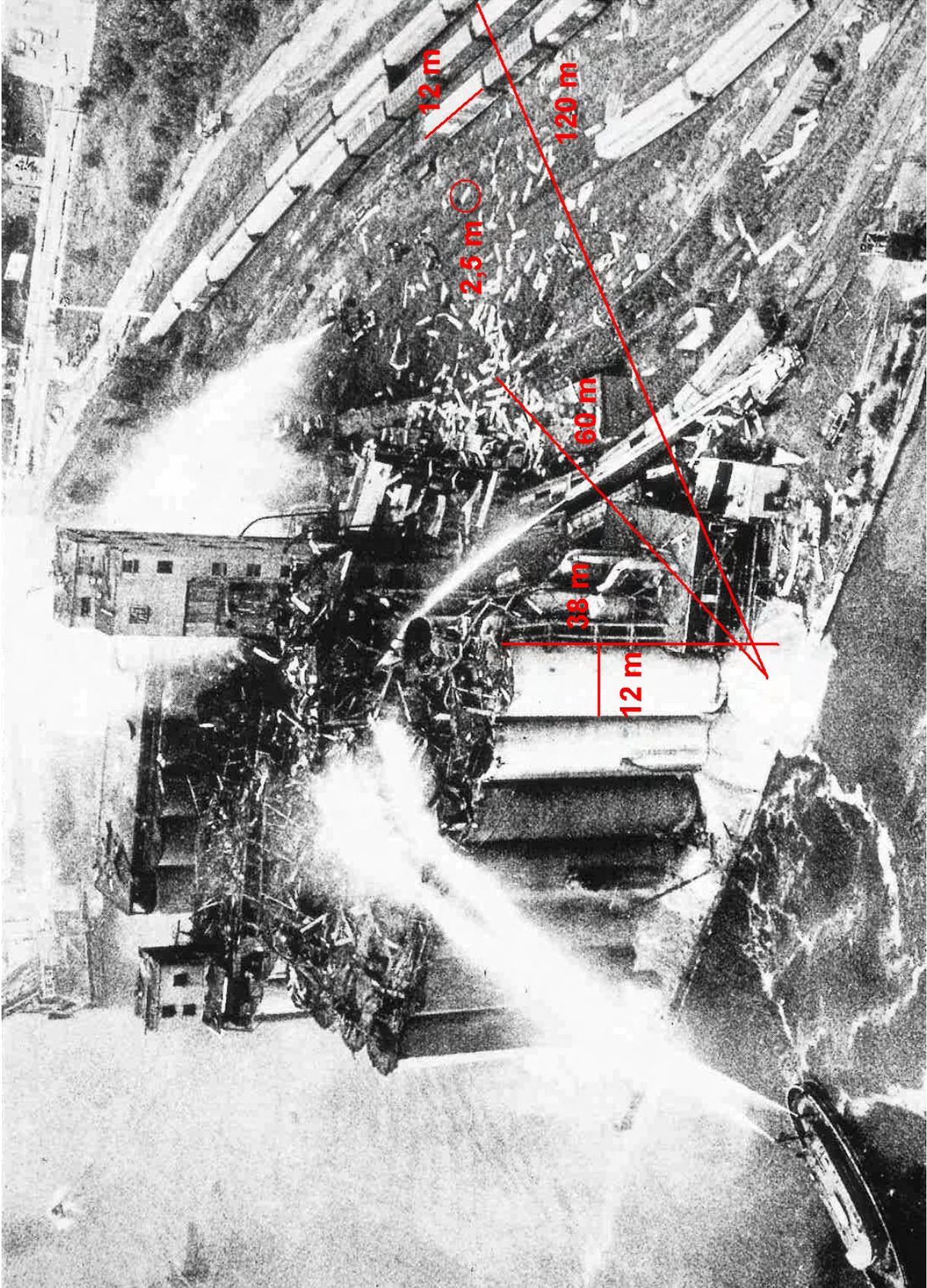


Abbildung 4: Luftaufnahme eines Silokomplexes nach einer Staubexplosion.

2.2.1 Staubexplosion in einem Silokomplex

Aus den in Abbildung 4 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

$$V = A_w \cdot H - \frac{\pi \cdot R_M^2 \cdot H_M}{6} \approx 3000 \quad [\text{m}^3] \quad (21)$$

ableiten, wobei der Bruch in (21) das Volumen des ausgelaufenen Halbkugels aus Mais ist. Das A_w ist die Fläche der fortgeschleuderten Wand, die mit etwa 113 m^2 abgeschätzt wird. H , H_M und R_M ist die Höhe des Silos bzw. Höhe und Radius des Maiskegels.

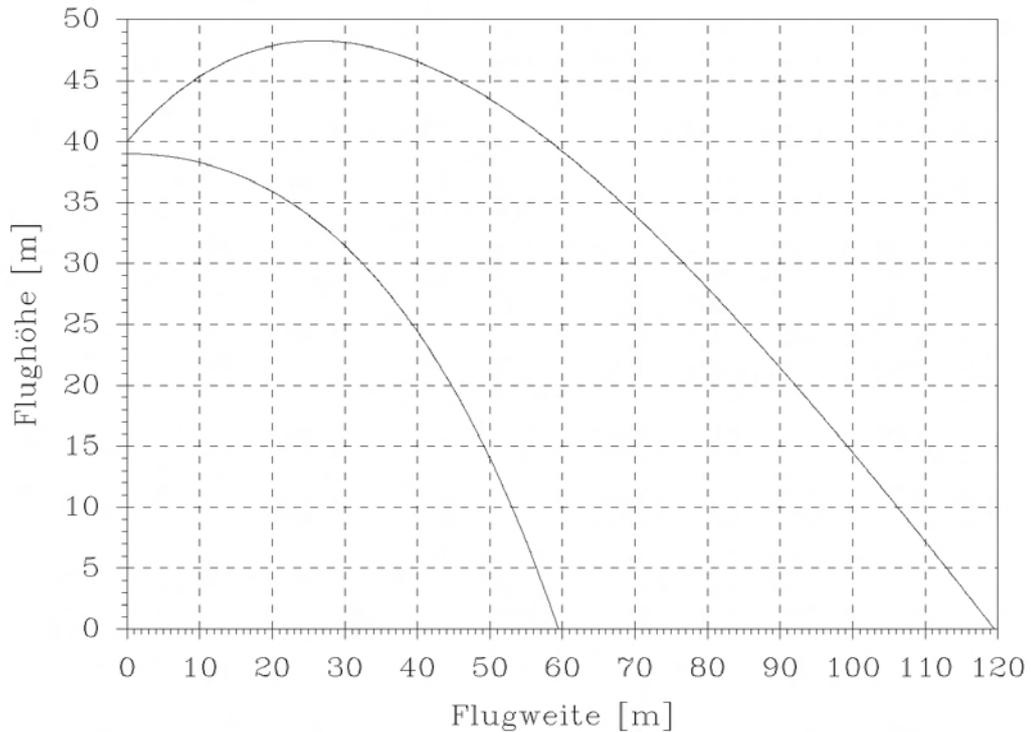


Abbildung 5: Berechnete maximale und wahrscheinlichste Trümmerflugbahn für die Randbedingungen aus Abbildung 4: $v_e = 27,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bzw. $27,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $m = 88,5 \text{ kg}$, $\alpha = 35^\circ$ bzw. $= 0^\circ$, $h = 40 \text{ m}$ bzw. $= 39 \text{ m}$, $A_y = 2,5 \text{ m}^2$, $A_x = 0,0268 \text{ m}^2$.

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 $0,11 \text{ bar}$. Zusammen mit der Masse der fortgeschleuderten Wand von

$$m_w = A_w \cdot c_s \cdot \rho_w \approx 113 \cdot 0,015 \cdot 2360 = 4000 \quad [\text{kg}] \quad (22)$$

ergibt sich als Anfangsgeschwindigkeit der Trümmer $27,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bzw. $27,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. In (22) ist c_s die Wandstärke und ρ_w die Waddichte, 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 $88,5 \text{ kg}$.

Formel (16) liefert als optimalen Startwinkel 35° bezüglich der Horizontalen, womit sich für die hier geschilderte Situation die lange Flugbahn aus Abbildung 5 als Lösung von (20) ergibt. Die maximal erreichbare Flugweite beträgt $119,6 \text{ m}$ und deckt sich gut mit der Abschätzung aus der Abbildung 4.

Als wahrscheinlichste Flugweite resultiert aus der Simulationsrechnung der Wert $59,5 \text{ m}$. Auch dieser Wert stimmt in etwa mit dem aus Abbildung 4 abgeleiteten Abstand zwischen Silozelle und dem Ort der größten Trümmerdichte überein.

Die kinetische Energie eines Fragments beim Aufprall betrug rund 32 kJ bzw. $27,7 \text{ kJ}$! 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 $0,01 \text{ bar}$ 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 (22) $m_w \approx 40 \text{ t}$. Mit dem Volumen des Gebäudes von $V \approx 38000 \text{ m}^3$ 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 $A_y = 0,3 \text{ m}^2$ angesetzt, so folgt als Fragmentmasse $m_s = 7 \text{ kg}$.

Mit einem optimalen Startwinkel von $5,4^\circ$ errechnet sich als maximal mögliche Flugweite eines Ziegels $10,7 \text{ m}$. 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 7 dargestellt. Ein Vergleich dieser Wurfweiten mit den in Abbildung 6 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 .

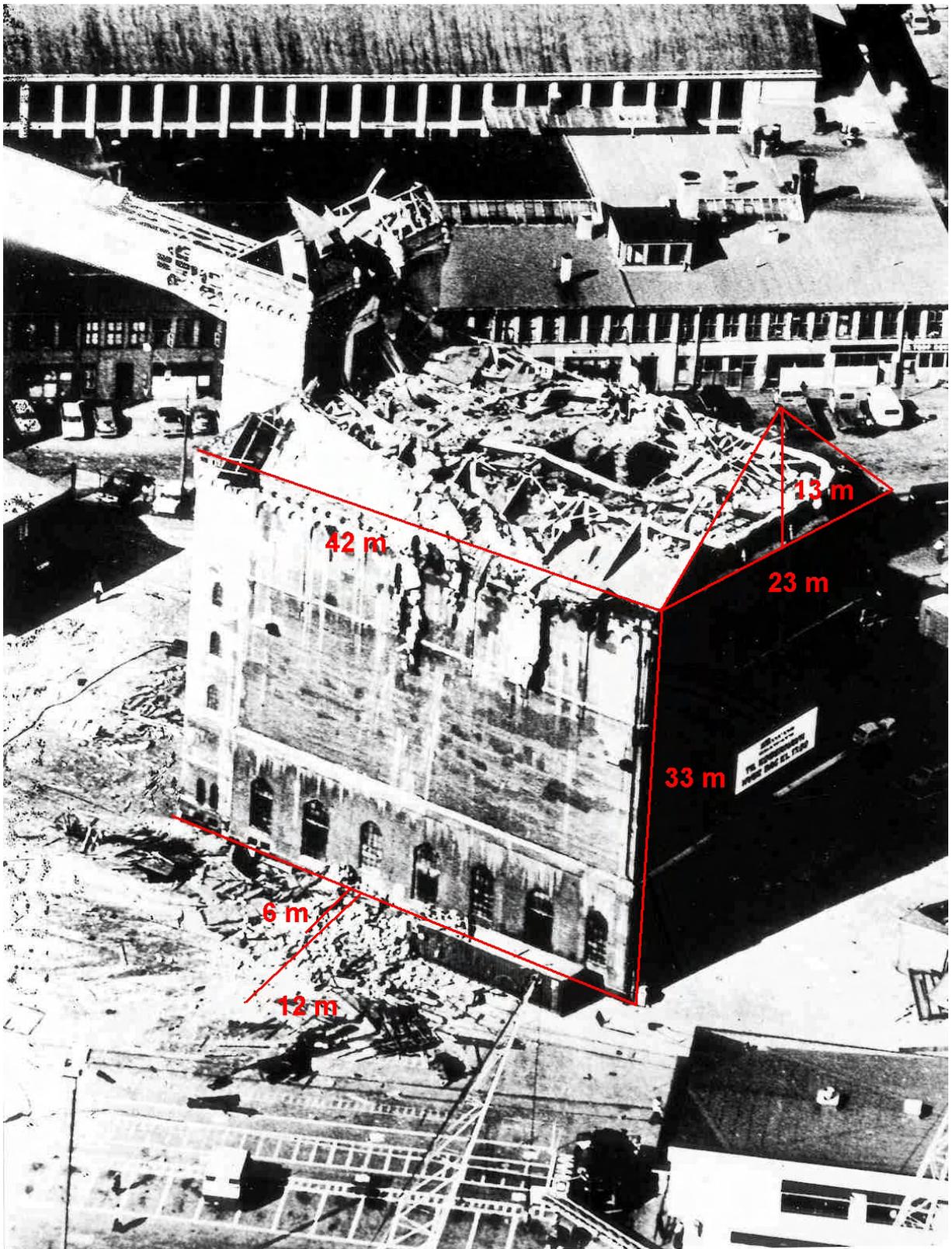


Abbildung 6: Luftaufnahme eines Getreideumschlagbetriebes nach einer Staubexplosion.

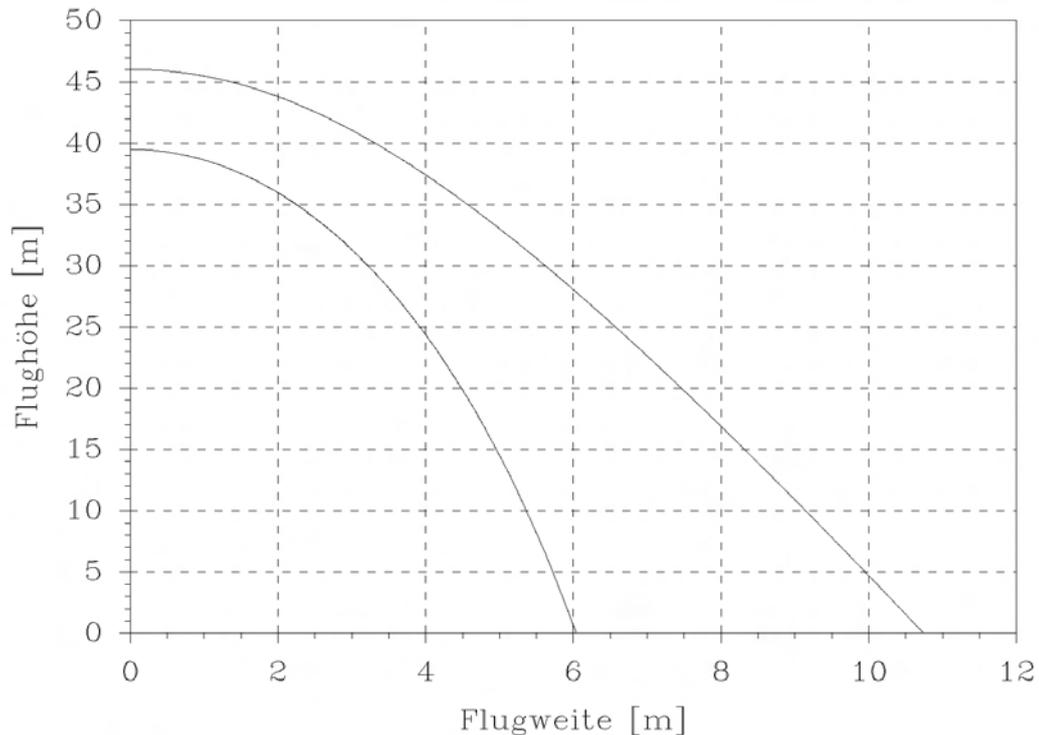


Abbildung 7: Berechnete maximale und wahrscheinlichste Trümmerflugbahn für die Randbedingungen aus Abbildung 6: $v_e = 2,9 \frac{m}{s}$ bzw. $= 2,1 \frac{m}{s}$, $m = 7 \text{ kg}$, $\alpha = 5,4^\circ$ bzw. $= 0^\circ$, $h = 46 \text{ m}$ bzw. $= 39,5 \text{ m}$, $A_y = 0,3 \text{ m}^2$, $A_x = 0,0062 \text{ m}^2$.

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 (11) eine relativ hohe Anfangsgeschwindigkeit der Fragmente und damit eine große Flugweite. Diese Situation sollte für die äußere Silozelle links aus Abbildung 8 zutreffend gewesen sein.

Im Gegensatz dazu ist das Verhältnis von Sprengstoffmasse zur fortgeschleuderten Masse relativ klein bei der fast völlig zerstörten Silozelle aus Abbildung 9. 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 8 einen Berstdruck von 0,1 bar, ein Volumen von 1000 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 kg ansetzt.

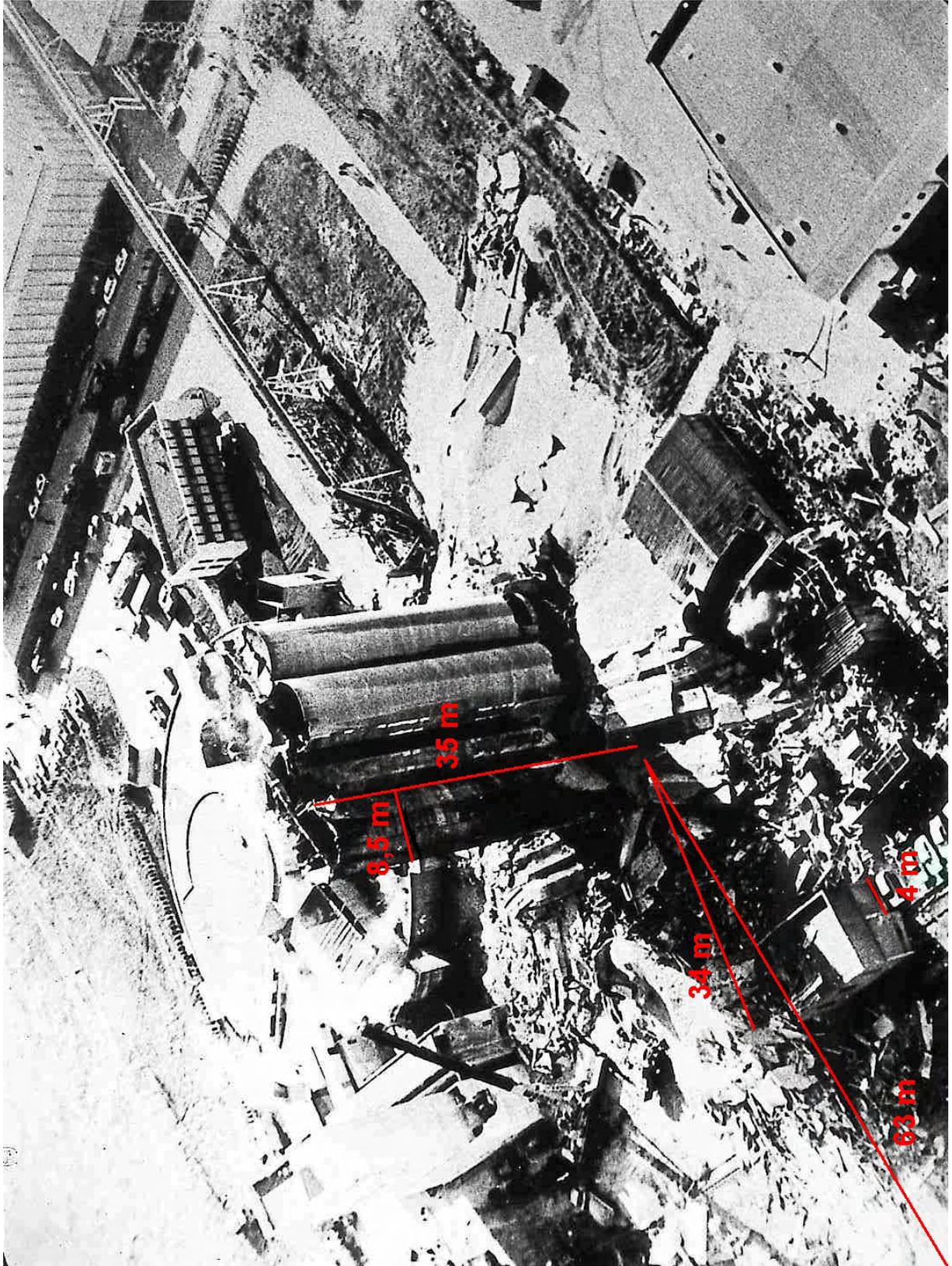


Abbildung 8: Luftaufnahme einer Mälzerei nach einer Staubexplosion.

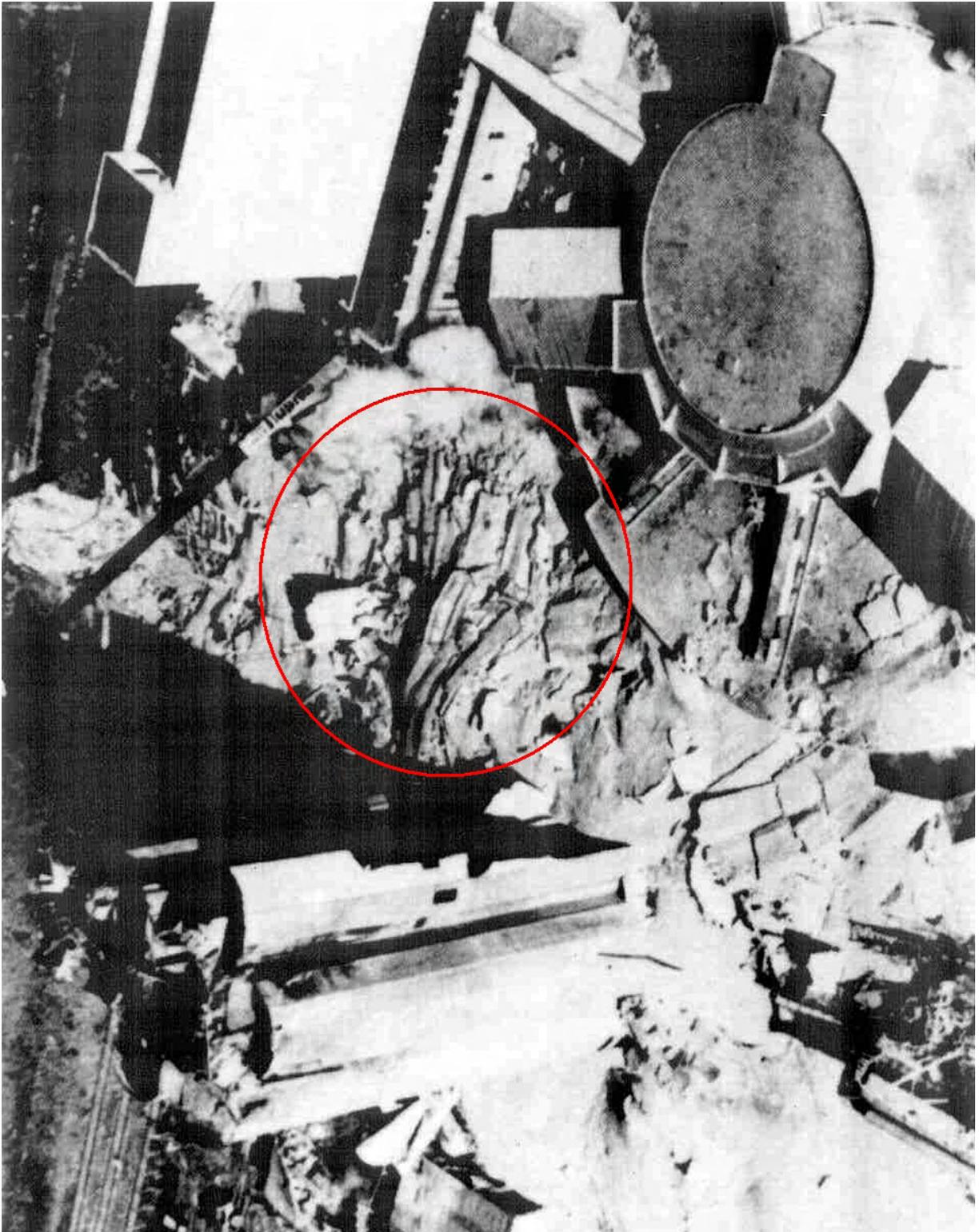


Abbildung 9: Luftaufnahme einer Mälzerei nach einer Staubexplosion.

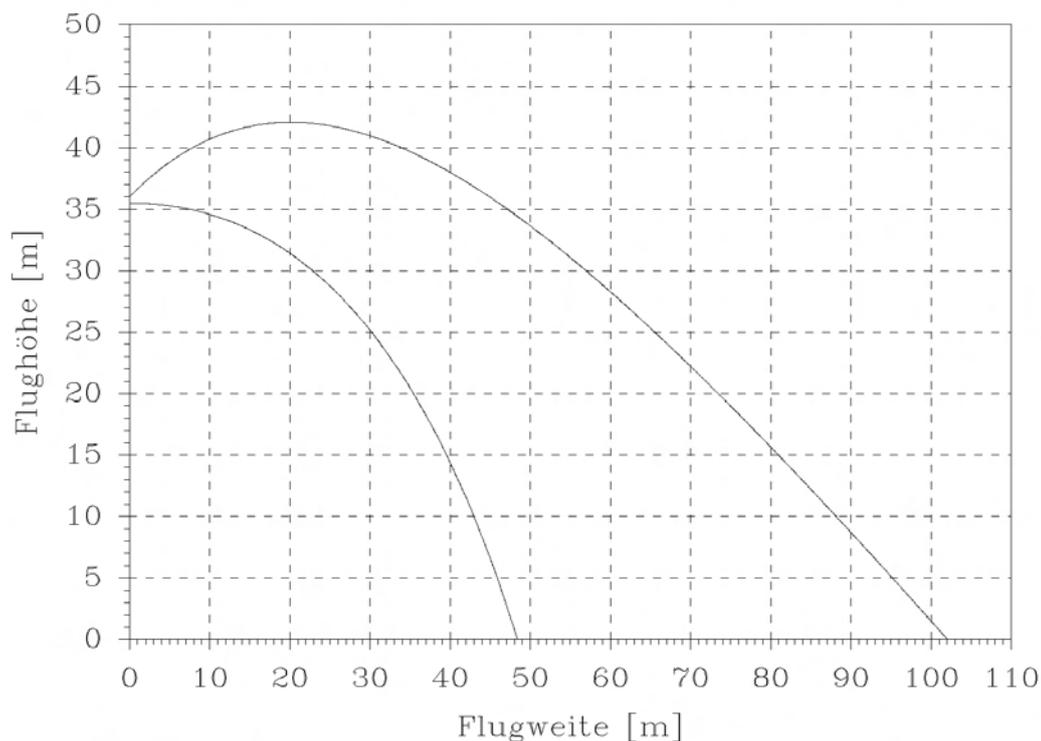


Abbildung 10: Berechnete maximale und wahrscheinlichste Trümmerflugbahn für die Randbedingungen aus Abbildung 8: $v_e = 24,6 \frac{m}{s}$ bzw. $= 24,5 \frac{m}{s}$, $m = 12,3 \text{ kg}$, $\alpha = 34,2^\circ$ bzw. $= 0^\circ$, $h = 36 \text{ m}$ bzw. $= 35,5 \text{ m}$, $A_y = 0,5 \text{ m}^2$, $A_x = 0,008 \text{ m}^2$, $E_{kin} = 3260 \text{ J}$ bzw. $= 2850 \text{ J}$ (E_{kin} ist die kinetische Energie eines Fragments beim Aufschlag).

Dieser Massewert folgt mit Hilfe von (22) 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 (20) schließlich die lange Flugbahn aus Abbildung 10. Aus der Grafik entnimmt man eine zugehörige Flugweite von rund 102 m. Dieser Wert kann auf der Grundlage von Abbildung 8 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 8 einen 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 (9) bis (11) über-

zeugen kann. Die Güte der Flugbahnberechnung steht und fällt dementsprechend mit der Genauigkeit der Eingangsdaten zur Abschätzung der Trümmeranfangsgeschwindigkeit, welche als Fehlerquelle alle anderen dominiert.

Literatur

- [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)