



**EXPLOSIVES
AND
BLASTING
TECHNIQUE**

Edited by
Roger Holmberg

PROCEEDINGS OF EFEE SECOND WORLD CONFERENCE ON EXPLOSIVES AND
BLASTING TECHNIQUE, 10–12 SEPTEMBER 2003, PRAGUE, CZECH REPUBLIC

Explosives and Blasting Technique

Edited by

R. Holmberg

*Dyno Nobel R&D Centre for Initiation Systems, Gyttorp, Sweden
Swedish Rock Construction Committee, Stockholm, Sweden*



A.A. BALKEMA PUBLISHERS

LISSE / ABINGDON / EXTON (PA) / TOKYO

Sprengknallreduktion durch verdämmende Materialien

T. Loose & H. Saal

Versuchsanstalt für Stahl Holz und Steine, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Germany

H.U. Freund

Sprengtechnische Beratung, Hofheim, Germany

ÜBERSICHT: Der Sprengknall, eine durch Detonation der Sprengladung ausgelöste Luftstoßwelle, ist eine unerwünschte Begleiterscheinung beim Sprengen, die unter anderem beim Einsatz von Schneidladungen auftritt. Materialien, die die Sprengladung umschließen, dissipieren Energie der Luftstoßwelle und sind somit in der Lage, die schädigenden Einflüsse zu mindern. Dieses Verhalten wird qualitativ anhand von Druckmessungen und anhand von Einwirkungen auf leichte Strukturen deutlich gemacht.

1 EINLEITUNG

Eine frei an der Luft detonierende Sprengladung erzeugt eine Luftstoßwelle, den Sprengknall. Der Verlauf des Knalls wird charakterisiert durch einen plötzlichen Druckanstieg mit einer Steifflanke, einen anschließenden Druckabfall und die nachfolgende Sogwelle. Bei Sprengverfahren mit aufgelegten Ladungen, knäppersprengungen oder Stahlsprengungen mit schneidladungen, ist der Sprengknall eine unerwünschte Begleiterscheinung. Durch ihn wird die Umwelt beeinträchtigt, im Nahbereich kann es zu Schäden kommen.

Das Prinzip, den Sprengknall durch verdämmende Materialien zu reduzieren besteht darin, Energie aus der Detonation zu dissipieren, die dann nicht mehr zum Aufbau der Luftstoßwelle zur Verfügung steht. Dies geschieht durch Beschleunigung, Verformung oder Fragmentierung der Verdämmung und durch Stoßwellenimpedanz-Fehlanpassung (Luft – Festkörper). Das Dämmmaterial wird weggeschleudert, sollte aber in so geartete Fragmente geteilt werden, daß diese durch Luftreibung nach geringer Flugstrecke abgebremst werden.

Im folgenden werden die theoretischen Sachverhalte für unverdämmte Ladungen dargestellt und mit experimentellen Ergebnissen verglichen, bei denen sowohl unverdämmte als auch unterschiedlich verdämmte Ladungen untersucht wurden. Die experimentellen Untersuchungen schließen die Auswirkungen auf leichte Strukturen ein. Sie beziehen sich auf den Nahbereich der Luftstoßwelle.

2 DIE CHARAKTERISTIK DER LUFTSTOßWELLE

Bei der Detonation wird die in chemischer Form im Sprengstoff gespeicherte Energie freigesetzt. Die Detonationswelle breitet sich nach kurzer Anlaufstrecke mit konstanter Geschwindigkeit aus. Bei Durchlaufen der Detonationswelle wird der Sprengstoff vom flüssig/festen Zustand schlagartig in den gasförmigen Zustand überführt. Dieses hochkomprimierte Gas dehnt sich explosionsartig aus. Der frei in der Luft detonierende Sprengstoff setzt seine Energie in potentielle Energie (komprimierte Luft), in kinetische Energie (Expansionsströmung der Schwaden und der umgebenden Luft) und thermische Energie (Aufheizen der Umgebung) um. Beim Übergang vom Sprengstoff zur umgebenden Luft wird in Form eines Stoßvorganges eine Luftstoßwelle mit Anfangsdruck und Anfangsgeschwindigkeit initiiert. Mit zunehmender Entfernung zur Sprengstelle nimmt die Intensität der Luftstoßwelle ab. Einerseits wird durch Reibung in der Luft Energie in Wärme umgewandelt, andererseits nimmt mit wachsendem Radius die Oberfläche der Wellenfront zu. Der Stoßwelle folgt eine flache Sogwelle.

Eine schematische Darstellung des Druck-Zeit-Verlaufs der Luftstoßwelle ist in Abbildung 1 dargestellt:

Kennzeichnend ist die Steifflanke, die entsteht, weil die Anfangsgeschwindigkeit größer als die Schallgeschwindigkeit der Luft ist. Folgende Größen definieren die Luftstoßwelle und sind für die

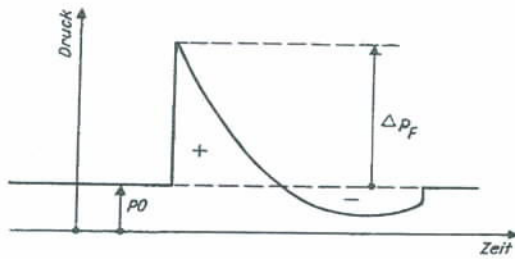


Abbildung 1. Zeitlicher Verlauf der Luftstoßwelle.

Bewertung ihrer Schädigungswirkung notwendig:

- der Spitzenüberdruck Δp_F
- der Impuls der positiven Druckphase I_+
- die Dauer der positiven Druckphase t_+
- der Impuls der negativen Druckphase I_-
- die Dauer der negativen Druckphase t_-

Die beiden letztgenannten sind dabei von nachrangiger Bedeutung.

Zur Bewertung der Luftstoßwelle interessiert der Spitzenüberdruck an der Stoßwellenfront. Dieser gehorcht einem Ähnlichkeitsgesetz (Cranz-Schardinsches Ähnlichkeitsgesetz), in das der auf den Radius R_0 der Ladung bezogene Abstand R vom Explosionsort und der auf den Druck p_0 der umgebenden Luft bezogenen Spitzenüberdruck Δp_F eingehen. Des weiteren ist die spezifische Energie des Sprengstoffs ein bestimmender Parameter. Dies wird anschaulich deutlich, wenn man den Druck-Zeitverlauf der Luftstoßwelle unterschiedlicher Sprengstoffe betrachtet.

In Abbildung 2 sind die Druck-Zeitverläufe von zwei bodennah gezündeten unverdämmten Ladungen abgebildet. Der zugehörige Versuchsaufbau ist weiter unten beschrieben. Der Spitzenüberdruck von 100 g PETN mit einer spezifischen Energie von 5800 kJ/kg ist größer als der Spritzenüberdruck von 100 g Eurodyn mit einer spezifischen Energie von 4500 kJ/kg.

M.A. Sadovskij (Pokrovskij 1985) entwickelt aus dem Ähnlichkeitsgesetz folgende Formel zur Berechnung des Spitzenüberdruckes Δp_F der Stoßwelle in Abhängigkeit von der Lademenge L , der Entfernung R zur Sprengstelle, dem Druck p_0 der umgebenden Luft, der spezifischen Energie e_1 des Sprengstoffs und drei weiteren sprengstoffspezifischen Konstanten a_1, a_2, a_3 .

$$\Delta p_F = a_1 e_1 \frac{L}{R^3} + a_2 e_1^{2/3} p_0^{1/3} \frac{L^{2/3}}{R^2} + a_3 e_1^{1/3} p_0^{2/3} \frac{L^{1/3}}{R} \quad (1)$$

Für große Entfernungen vom Sprengort reduziert sich die Formel auf den letzten Term, die ersten beiden

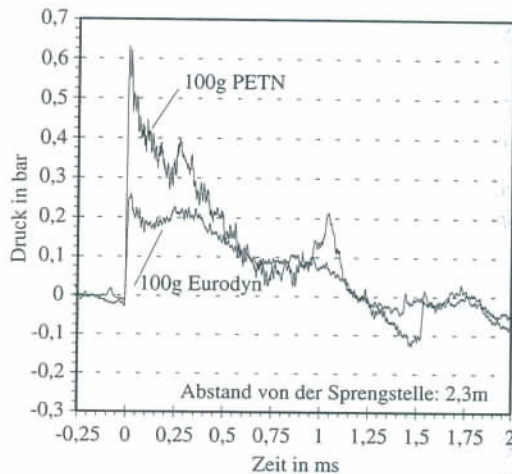


Abbildung 2. Gemessener Druck-Zeitverlauf unverdämmter Ladungen.

Terme konvergieren gegen null. Sadovskij hat für diese nach ihm benannte Formel die Koeffizienten für den Sprengstoff TNT durch Versuche und Computerberechnungen bestimmt:

$$a_1 e_1 = 7 \quad (2)$$

$$a_2 e_1^{2/3} p_0^{1/3} = 2,7 \quad (3)$$

$$a_3 e_1^{1/3} p_0^{2/3} = 0,84 \quad (4)$$

$$\Delta p_F = 7 \frac{L}{R^3} + 2,7 \frac{L^{2/3}}{R^2} + 0,84 \frac{L^{1/3}}{R} (\text{TNT}) \quad (5)$$

In diesen nicht einheitentreu Formeln ist der Spritzenüberdruck Δp_F in bar = 10^5 Pa, die Lademenge L in kg und der Radius R in m einzusetzen.

Gleichung (5) gilt für eine sich in alle Raumrichtungen frei ausbreitende Luftstoßwelle. Eine auf dem Boden gezündete Sprengladung erzeugt eine Luftstoßwelle, die sich halbsphärisch ausbreitet. Sie entspricht im Fernfeld ($R > 1$ m) einer vollsphärischen Luftstoßwelle die mit der doppelten Sprengstoffmasse initiiert wird. Berücksichtigt man diese Massenverdopplung unter Anwendung der den Ladungen L zugehörigen Exponenten so ergibt sich folgende Gleichung:

$$\Delta p_F = 14 \frac{L}{R^3} + 4,3 \frac{L^{2/3}}{R^2} + 1,1 \frac{L^{1/3}}{R} (\text{TNT}) \quad (6)$$

Erfolgt nun den verwendet der spezifische 4520 = 1,283 druck:

$$\Delta p_F = 18 \frac{L}{R^3}$$

Einsetzen de

$$\Delta p_F = 18 \frac{0,1}{2,3^3}$$

$$\Delta p_F = 0,148 +$$

Dieser Spitze 0,63 bar. Für ar Formel entspre sprengstoffspez TNT entsprechen

Im Druckber infachte Absta stanten A eine l

$$\Delta p_F = A \cdot \frac{L^{2/3}}{R}$$

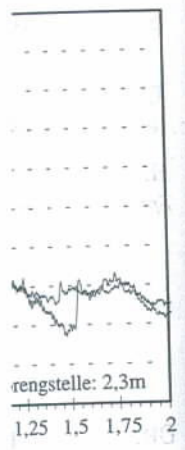
Zur Berechn I+, der das l Druckphase ist Formeln für die Ladung (12) ar Formel von (He

$$I_+ = 40 \frac{L^{2/3}}{R} \sqrt{e_1}$$

$$I_+ = 63 \frac{L^{2/3}}{R} \sqrt{e_1}$$

mit I_+ in (kg·m

Die Größe e_1 in J/kg des verwe che Explosions mit der Wurzel tional zur Ges den Explosions



Druckverlauf unverdämmt

Sadovskij hat für die Koeffizienten für die freie und Computer- (2) (3) (4) (5) (TNT) Formeln ist der spezifische Impuls I_+ in $\text{kg} \cdot \text{m/s} / \text{m}^2$, die Lademenge L in kg einsetzen. I_+ in alle Raumrichtungen. Eine auf dem freien Feld erzeugt eine Luftstoßwelle. Sie entspricht einer kugelförmigen Luftstoßwelle aus einer kugelförmigen Sprengstoffmasse initiiert. Die Masse verdoppelt sich in L zugehörige Gleichung: (6) (TNT)

Erfolgt nun eine Anpassung der Koeffizienten für den verwendeten Sprengstoff PETN im Verhältnis der spezifischen Energie von PETN zu TNT $5800/4520 = 1,283$ so lautet die Gleichung für den Überdruck:

$$\Delta p_F = 18 \frac{L}{R^3} + 3,19 \frac{L^{2/3}}{R^2} + 1,15 \frac{L^{1/3}}{R} \text{ (PETN)} \quad (7)$$

Einsetzen der Sprengparameter ergibt

$$\Delta p_F = 18 \frac{0,1}{2,3^3} + 3,19 \frac{0,1^{2/3}}{2,3^2} + 1,15 \frac{0,1^{1/3}}{2,3} \text{ (PETN)} \quad (8)$$

$$\Delta p_F = 0,148 + 0,208 + 0,23 = 0,59 \text{ bar} \quad (9)$$

Dieser Spitzenüberdruck entspricht den gemessenen 0,63 bar. Für andere Sprengstoffe kann die Sadovskij Formel entsprechend umgerechnet werden. Ob die sprengstoffspezifischen Parameter a_1, a_2, a_3 denen des TNT entsprechen, ist zu überprüfen.

Im Druckbereich von ca. 0,1 bis 10 bar ist die vereinfachte Abstandsformel mit der Normierungskonstanten A eine bewährte Näherung (Held 1983a):

$$\Delta p_F = A \cdot \frac{L^{1/3}}{R} \quad (10)$$

Zur Berechnung des positiven spezifischen Impulses I_+ , der das Integral des Druckes der positiven Druckphase ist, sind in (Pokrovskij 1985) folgende Formeln für die freie Ladung (11) und die bodennahe Ladung (12) angegeben, die mit der entsprechenden Formel von (Held 1983a) übereinstimmen:

$$I_+ = 40 \frac{L^{2/3}}{R} \sqrt{\frac{e_1}{e_{TNT}}} \quad (11)$$

$$I_+ = 63 \frac{L^{2/3}}{R} \sqrt{\frac{e_1}{e_{TNT}}} \quad (12)$$

mit I_+ in $(\text{kg} \cdot \text{m/s}) / \text{m}^2$, L in kg und R in m .

Die Größe e_1 ist die spezifische Explosionsenergie in J/kg des verwendeten Sprengstoffs, e_{TNT} die spezifische Explosionsenergie von TNT. Das Verhältnis geht mit der Wurzel ein, da der spezifische Impuls proportional zur Geschwindigkeit der auseinanderfliegenden Explosionsgase ist und diese Geschwindigkeit

wiederum proportional zur Quadratwurzel der spezifischen Explosionsenergie ist.

Die Zeitdauer der positiven Druckphase beträgt nach (Pokrovskij 1985):

$$t_+ = 0,0015 \sqrt{R} \sqrt[3]{L} \quad (13)$$

oder

$$t_+ = \frac{\sqrt{R} \sqrt[3]{L}}{2c} \quad (14)$$

mit t_+ in s , R in m , L in kg und der Schallgeschwindigkeit der Luft c in m/s .

Im Schrifttum sind weitere Formeln zur Berechnung dieser Parameter und zum Teil auch thermodynamischer Kenngrößen von detonierenden Ladungen angegeben: die Sprengstoff-Zustandsgleichungen nach Johns-Wilkinson-Lee (Dobratz 1981) und die Taylor-Gleichung (Taylor 1952). Einfache Gleichungen für die Detonation von militärischen Sprengladungen in freier Atmosphäre sind in (Held 1983a) angegeben. In (Baker 1982) sind Diagramme zur Ermittlung dieser Kenngrößen für TNT veröffentlicht.

Die Intensität der Luftstoßwelle ist von der Energie abhängig, die zu Beginn vorhanden ist. Wird ein Teil der Energie anderweitig dissipiert, so verringert sich die Intensität der Luftstoßwelle. Wird die Ladung von einem verdämmenden Material umgeben, so absorbiert dieses Material Energie, dadurch, daß es fragmentiert, beschleunigt oder verformt wird. Diese Energie geht nun nicht mehr in die Luftstoßwelle über. Der Spitzenüberdruck vermindert sich dadurch. Dies wird durch die nachfolgend beschriebenen Versuche belegt.

3 VERSUCHSAUFBAU

Bei den in (Saal et al. 2002) ausführlich beschriebenen Versuchen werden die Sprengladungen auf eine Stahlplatte gelegt. Im Abstand von $R = 2,30 \text{ m}$ wird der Druckaufnehmer angebracht. Es wird der Druck im Nahfeld gemessen. Die Druckwelle wird Seiten-, also rechtwinklig zur Stoßwellenausbreitung, gemessen. Im Abstand $R = 0,95 \text{ m}$ wird bei einigen Versuchen ein einseitig eingespannter Aluminiumblechstreifen mit der Abmessung $250 \times 26 \times 1,18 \text{ mm}$ aufgestellt, dessen Verformung ein Maß für die Intensität der Luftstoßwelle und ein Maß für Schäden an leichten Strukturen ist. Zur Aufnahme des zu untersuchenden Dämmmaterials werden Blechkragen mit den Abmessungen $450 \times 450 \times 200 \text{ mm}$ und der Blechdicke $t = 0,63 \text{ mm}$ um die Ladung gelegt.

Die Druckmessung erfolgt mit einem Quarz-Hochdrucksensor Typ 701 A der Firma Kistler. Das

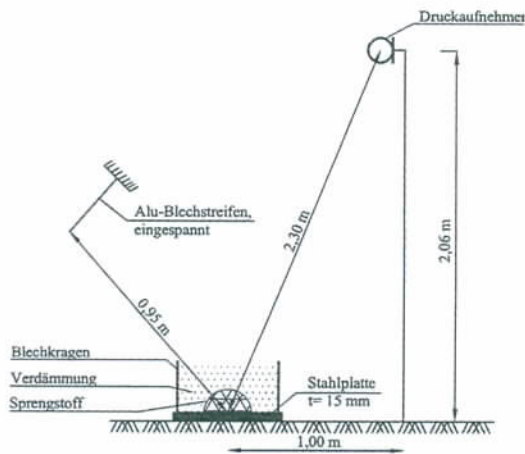


Abbildung 3. Skizze des Versuchsaufbaus, Ansicht.

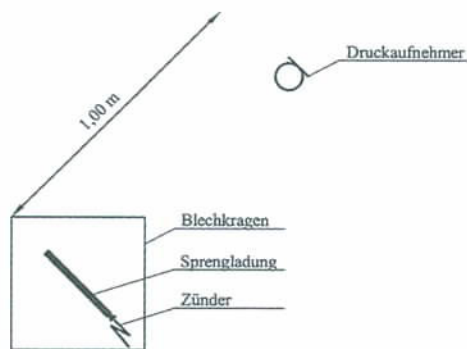


Abbildung 4. Skizze des Versuchsaufbaus, Draufsicht.

Meßsignal wird mit einem Ladungsmeter Typ 5015A der Firma Kistler auf 0,2 bar/V verstärkt. Die Analog-Digital Umwandlung erfolgt mit der Transientenkarte TR-1202 der Firma FAST Comtech. Die Abtastrate beträgt 1 MHz. Die Triggerung erfolgt über das gemessene Drucksignal bei Überschreiten des eingestellten Schwellwertes. Die Länge des Meßkabels beträgt 300 m.

4 EINFLUß DER VERDÄMMUNG DARGESTELLT DURCH DEN DRUCK-ZEIT-VERLAUF

Bei jedem Versuch werden 100 g PETN in Form einer 100 g/m Sprengschnur verwendet. Diese wird bei Versuch 1 nicht verdämmt, bei Versuch 2 mit 20 cm Wasser verdämmt (Abbildung 5) und bei Versuch 3 mit 7 cm Lehm ($\rho = 1,38 \text{ g/cm}^3$) verdämmt. Die Druck-Zeit-Verläufe sind in Abbildung 6 dargestellt.

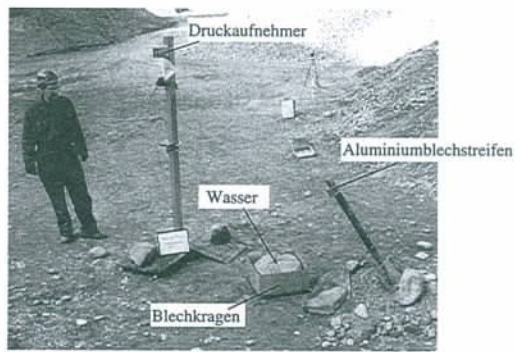


Abbildung 5. Foto eines Versuchsaufbaus.

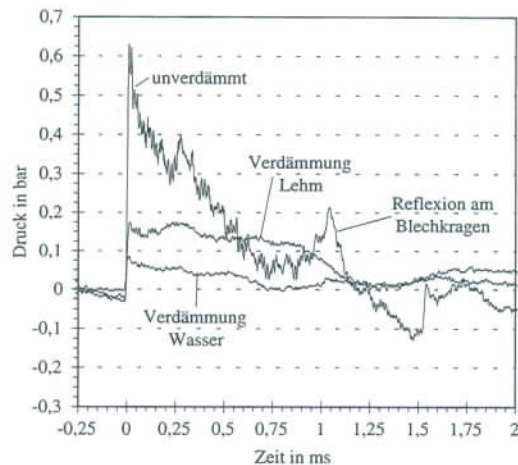


Abbildung 6. Druck-Zeitverläufe verdämmer Ladungen gegenüber unverdämmer Ladungen (Sprengstoff 100 g PETN).

Bei der unverdämmer Ladung ist ein erneuter Druckanstieg nach 1 ms zu beobachten. Dies ist die Reflexion der Luftstoßwelle am Blechkragen, der kein Verdämmmaterial enthält.

Der Spitzenüberdruck beträgt:

$\Delta p_F = 0,63 \text{ bar}$ bei der unverdämmer Ladung
 $\Delta p_F = 0,18 \text{ bar}$ (29%) bei der Verdämmung mit 7,5 cm Lehm
 $\Delta p_F = 0,09 \text{ bar}$ (14%) bei der Verdämmung mit 20 cm Wasser

Der Impuls I_+ ergibt sich aus dem Integral unter dem positiven Druckverlauf von $t = 0$ bis $t = 1,195 \text{ ms}$ und beträgt:

$I_+ = 234 \cdot 10^{-6} \text{ bar}\cdot\text{s}$ bei der unverdämmer Ladung
 $I_+ = 143 \cdot 10^{-6} \text{ bar}\cdot\text{s}$ (61%) bei der Verdämmung mit 7,5 cm Lehm



Abbildung 7. Ein Impulsänderung.

$$I_+ = 37 \cdot 10^{-6} \text{ bar}\cdot\text{s}$$

20 cm Wasser

Das Flächeneinheit) der Verdämmung 10,4 g/cm². Im Duzentuale Impuls und die prozent $\Delta p_{\text{unverdämmt}}$ Verdämmung au

Es ist in Abbil bei der unverd der verdämmer gedämmer. Die daß bei akustisc wesentlich stär Frequenzen. Di ändert sich nur

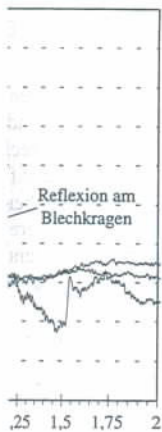
Bei der Wass Lehmverdämmer daß nach 1,7 ms erfolgt, der von erzeugt wird. I Luftstoßwelle.

Bei der Verdäm minderung muf Dämmmaterial k großer Geschwi Luftdrucks die l erdfuchte Lehr aus und erwei (Abbildung 8).

Abbildung 9 Wassernebels, c Wassernebel be



us.



Reflexion am Blechkragen

ämmtter Ladungen Sprengstoff 100 g

ist ein erneuter ten. Dies ist die kragen, der kein

n Ladung

rdämmung mit

rdämmung mit

n Integral unter bis t = 1,195 ms

imtmten Ladung er-Verdämmung

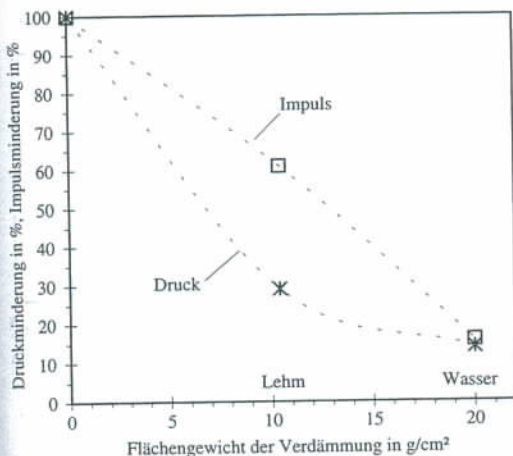


Abbildung 7. Einfluß der Verdämmung auf Druck- und Impulsmindeung.

$I_+ = 37 \cdot 10^{-6}$ bar·s (16%) bei der Verdämmung mit 20 cm Wasser

Das Flächengewicht (Massenbelegung pro Flächeneinheit) der Verdämmung beträgt bei der Lehmverdämmung $10,4 \text{ g/cm}^2$ und bei der Wasserverdämmung 20 g/cm^2 . Im Diagramm (Abbildung 7) sind die prozentuale Impulsmindeung ($I_{+, \text{verdämmt}}/I_{+, \text{unverdämmt}}$) und die prozentuale Druckminderung ($\Delta p_{F, \text{verdämmt}}/\Delta p_{F, \text{unverdämmt}}$) über dem Flächengewicht der Verdämmung aufgetragen.

Es ist in Abbildung 6 zu beobachten, daß der Druck bei der unverdämmten Ladung steil abfällt, bei der verdämmten Ladung erfolgt dies wesentlich gedämpfter. Dies entspricht der bekannten Tatsache, daß bei akustischer Dämpfung die hohen Frequenzen wesentlich stärker abgebaut werden als niedrige Frequenzen. Die Dauer der positiven Druckphase ändert sich nur geringfügig.

Bei der Wasserverdämmung ist im Gegensatz zur Lehmverdämmung in Abbildung 6 zu beobachten, daß nach 1,7 ms ein schwacher zweiter Druckerhöhung erfolgt, der von der expandierenden Wassernebelwolke erzeugt wird. Diese ist etwas langsamer als die Luftstoßwelle.

Bei der Verdämmung der Ladung zur Sprengknallminderung muß dafür gesorgt werden, daß aus dem Dämmmaterial keine Partikel mit großer Masse und großer Geschwindigkeit hervortreten, die anstelle des Luftdrucks die Umgebung gefährden. Der verwendete erdfeuchte Lehm fällt in kleinen gesinterten Krümeln aus und erweist sich diesbezüglich als geeignet (Abbildung 8).

Abbildung 9 zeigt das Auseinanderschließen des Wassernebels, der aus der Verdämmung entsteht. Der Wassernebel besteht aus Feinsttröpfchen, die in der



Abbildung 8. Lehmflocken aus der Verdämmung.



Abbildung 9. Ausbreitung des Wassernebels nach der Zündung.

Umgebungsluft rasch abgebremst werden. Der Vorteil einer Wasserverdämmung liegt darin, daß keine Schmutzpartikel verteilt werden und der entstehende Wassernebel in der Lage ist, Staub zu binden.

5 EINFLUß DER VERDÄMMUNG DARGESTELLT DURCH DIE EINWIRKUNG AUF LEICHTE STRUKTUREN

Anhand der Deformation der Blechkragen kann die Dissipation von Energie und Impuls sehr gut dargestellt werden. Die nachfolgend beschriebenen Sprengergebnisse basieren auf Ladungen von jeweils 100 g PETN.

Die Luftstoßwelle der unverdämmten Ladung hat den Blechkragen sehr stark fragmentiert und verformt (Abbildung 10).

Bei der Verdämmung der Ladung mit 20 cm Wasser ist eine deutlich geringere Verformung zu erkennen. Der Blechkragen wird lediglich in die vier Seitenbleche geteilt (Abbildung 10). Der Impuls der Detonation wird durch das Wasser gut an das Blech weitergeleitet.

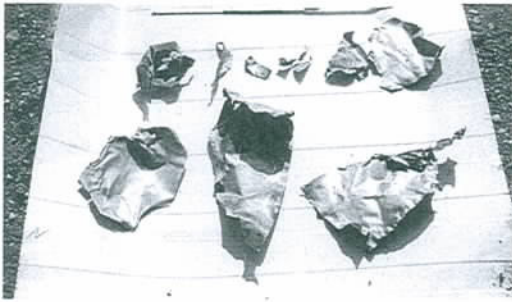


Abbildung 10. Blechkragen unverdämmte Ladung.



Abbildung 11. Blechkragen, Ladung mit 20 cm Wasser verdämmt.



Abbildung 12. Blechkragen, Ladung mit 20 cm Sand verdämmt.

Die Verdämmung mit 20 cm Sand (Abbildung 12) führt dazu, daß die Blechkragen fast keine Deformation aufweisen. Sowohl Energie als auch Impuls der Detonation sind durch die Reibung und Beschleunigung der Sandkörner fast vollständig dissipiert. Der Sand hat eine Rohdichte von ca. $1,5 \text{ g/cm}^3$.

Bei den in 0,95 m Entfernung vom Explosionsort angebrachten Aluminiumblechstreifen (Abbildung 5), die durch die Luftstoßwelle verbogen werden zeigt der Vergleich zwischen der unverdämmten Ladung und einer mit 13 cm nicht ausgehärtetem Polyurethanschäum und darüber 3 cm Sand verdämmten Ladung eine deutliche Minderung der Luftstoßwelle durch die Verdämmung (Abbildung 13).

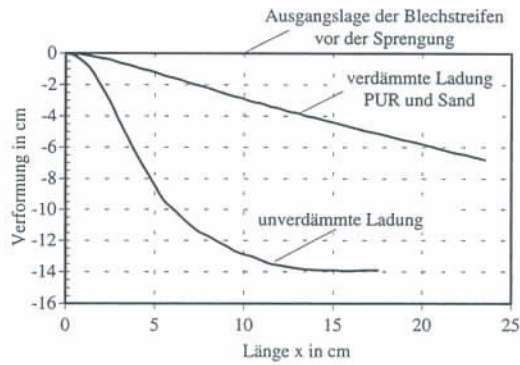


Abbildung 13. Verformung von Aluminiumstreifen.

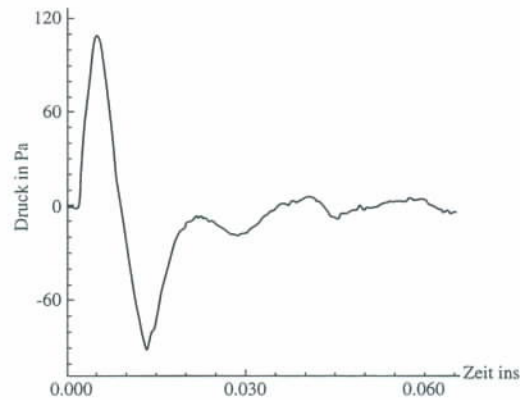


Abbildung 14. Luftdruckwelle in 235 m Entfernung vom Explosionsort (Lichte 1994).

6 PROGNOSEFORMEL FÜR DEN SCHALL IM FERNFELD

Lichte führte 1994 Versuche mit den Schneidladungen RESAFLEX und BLADE durch, die mit Sand und wäßrigen Schäumen verdämmt werden (Lichte 1994). Die Messung der Luftstoßwelle erfolgte in 80 m bis 235 m Entfernung vom Explosionsort. Es handelt sich um eine Untersuchung der Luftstoßwelle im Fernfeld.

Bei den Untersuchungen von Lichte wird sowohl der Spitzenüberdruck Δp_F als auch der Schalldruck, auf den im weiteren nicht eingegangen wird, betrachtet.

Im Fernfeld geht der charakteristische Verlauf der Stoßwelle, die Steilflanke, in eine akustische Luftdruckwelle über. Dies ist in Abbildung 14 gut zu erkennen. Hier wurde der Luftdruck, ausgelöst von einer Detonation von 270 g BLADE (ein auf Hexogenbasis basierender Sekundärsprengstoff), in 235 m Entfernung vom Explosionsort gemessen.

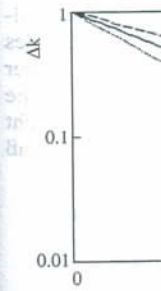


Abbildung 15. Dämmmaterialien (Lichte 1994).

Die Dicke der bezogen. Diese beträgt:

$$\tau_{Dä-n} = \tau_{Dä} \left(\frac{10}{L} \right)$$

Der Abminderungsgrad ist das Verhältnis des Luftdruckes der unverdämmten Ladung Δp_F zum Luftdruck der verdämmten Ladung $\Delta p_{F-Dä}$.

$$\Delta k = \frac{\Delta p_F - \Delta p_{F-Dä}}{\Delta p_F}$$

Für die Dämmmaterialien Finiflam-Schaum, Resaflex, Blade, und Sand sind die Dämmkoeffizienten Δk in der Abbildung 15 dargestellt.

Finiflam-Schaum

Proteinschaum:

Sand: $\Delta k = 1,1$

Diese Funktion ist in der Abbildung 15 dargestellt.

Volumenbezogene Dämmkoeffizienten Δk sind in der Abbildung 15 dargestellt, wobei Δk das Dämmvermögen der Dämmmaterialien darstellt.

7 EINWIRKUNG

Für die Schadeffekte durch die Belastungsbereiche...

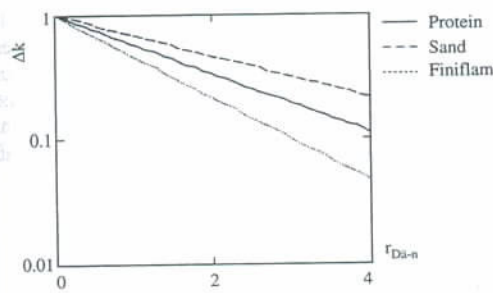
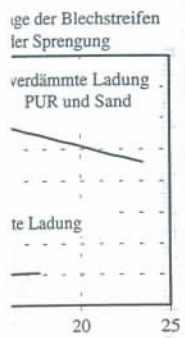


Abbildung 15. Abminderungsfaktor für verschiedene Dämmmaterialien (Lichte 1994).

Die Dicke der Verdämmung wird auf die Lademenge bezogen. Diese spezifische Dämmstoffdicke $r_{Dä-n}$ beträgt:

$$r_{Dä-n} = r_{Dä} \left(\frac{100}{L} \right)^{1/3} \quad (15)$$

Der Abminderungsfaktor Δk des Spitzendruckes ist das Verhältnis des Spitzenüberdruckes der verdämmten Ladung $\Delta p_{F-Dä}$ zum Spitzenüberdruck der unverdämmten Ladung Δp_F :

$$\Delta k = \frac{\Delta p_{F-Dä}}{\Delta p_F} \quad (16)$$

Für die Dämmstoffe Sand, Proteinschaum und Finiflam-Schaum hat Lichte aus den durchgeführten Sprengversuchen Formeln angegeben, die den Abminderungsfaktor Δk des Spitzenüberdrucks als Funktion der spezifischen Dämmstoffdicke darstellen:

$$\text{Finiflam-Schaum: } \Delta k = 1,24 \cdot \exp(-0,35 \cdot r_{Dä-n}) \quad (17)$$

$$\text{Proteinschaum: } \Delta k = 1,39 \cdot \exp(-0,5 \cdot r_{Dä-n}) \quad (18)$$

$$\text{Sand: } \Delta k = 1,19 \cdot \exp(-0,7 r_{Dä-n}) \quad (19)$$

Diese Funktionen sind im folgenden Diagramm (Abbildung 15) dargestellt.

Volumenbezogen (Abbildung 15) besitzt Sand das größte Dämmvermögen. Massenbezogen, hier nicht dargestellt, besitzt Proteinschaum das größte Dämmvermögen.

7 EINWIRKUNG AUF FENSTERSCHEIBEN

Für die Schadenswirkung der Luftstoßwelle sind drei Belastungsbereiche zu unterscheiden:

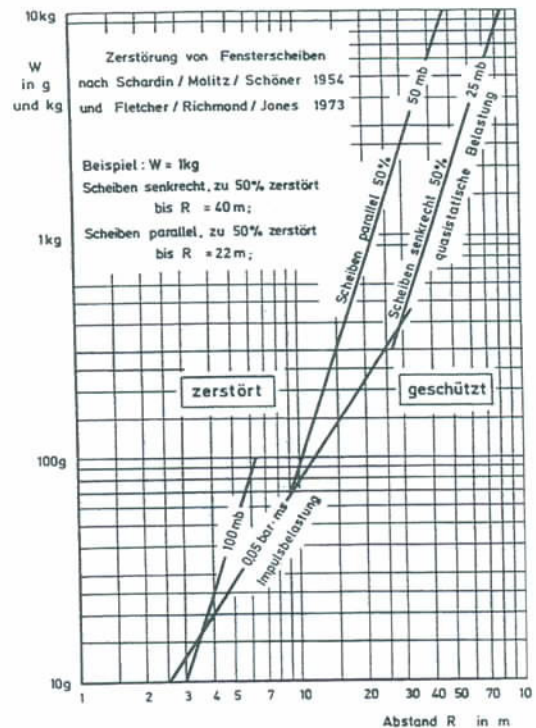


Abbildung 16. Schadensdiagramm für Fensterscheiben (Schardin et al. 1954) und (Fletcher et al. 1973).

- Impulsbereich: Die Zeitdauer der Einwirkung t_+ ist klein gegenüber der Eigenschwingdauer $1/\omega$. Schadenskenngröße ist I_+ .
- Quasistatischer Bereich: Die Zeitdauer der Einwirkung t_+ ist groß gegenüber der Eigenschwingdauer $1/\omega$. Schadenskenngröße ist Δp_F .
- Übergangsbereich

In Abbildung 16 ist die Schadenskurve für die Zerstörung von Fensterscheiben (Glasbruch) abhängig von Sprengstoffmenge (unverdämmt) und Abstand zur Sprengladung dargestellt. Bei diesem Diagramm wird davon ausgegangen, daß im Bereich großer Abstände, also bei quasi statischer Belastung, Glasbruch bei Auftreffen der Luftstoßwelle senkrecht zur Scheibe bei einem Druck von $\Delta p_F = 25 \text{ mbar}$ in 50% der Fälle auftritt und daß bei schrägem Einfall der Glasbruch durch Sogwirkung bei $\Delta p_F = 50 \text{ mbar}$ in 50% der Fälle auftritt.

In diesem Diagramm wird die Glasabmessung, die Art der Lagerung, die Glasdicke und die Glasart (Spiegelglas, Teilvorgespanntes Glas, Einscheibensicherheitsglas oder Verbundsicherheitsglas) nicht berücksichtigt. Es ist anzunehmen, das es sich um einfaches 4 mm dickes Spiegelglas in für damalige Zeit üblichen Fensterabmessungen handelt.

Für die Anwendung in heutiger Zeit ist es notwendig Nomogramme unter Einbeziehung der oben genannten Glasparameter zu erstellen. Nur so kann eine zuverlässige Aussage über Glasbruch durch Sprengknall bei der heute üblichen Vielfalt von Glasfenstern und Glaskonstruktionen getroffen werden.

Ähnliche Nomogramme können dann auch für andere Fassadenkonstruktionen aufgestellt werden.

Die Verdämmung der Sprengladung grenzt den Schadensbereich erheblich ein. Für die oben angegebenen Verdämmungsgrade (14%, 29% Druck, 16%, 61% Impuls) können bei gleicher Ladungsmenge die Schadensgrenzabstände auf 1/3 bis 1/6 (quasi statischer Druckbereich) oder auf 2/3 bis 1/6 (Impulsbereich) verringert werden.

Für verdämmte Ladungen gilt das gleiche Abstandsgesetz wie für unverdämmte Ladungen (Du Pont 1977). Nach (Held 1983b) ist jedoch die Verdämmungswirkung im Nahfeld größer als im Fernfeld.

8 ZUSAMMENFASSUNG

Der Druckverlauf in Luft bei der Detonation verdämmter und unverdämmter Ladungen wurde im Nahbereich der Sprengung gemessen. Als Verdämmungsmaterialien, die sich feinpartikulär zerlegen, wurden Wasser, Sand, Lehm und PUR-Schaum verwendet.

Es wurde festgestellt, daß mit Lehmverdämmung bei einer Flächenbelegung von 10,4 g/cm² eine Reduktion des Spitzenüberdruckes auf 29% und des Impulses auf 61% erreicht wurde und daß bei einer Verdämmung mit Wasser bei einer Flächenbelegung von 20 g/cm² eine Reduktion des Spitzenüberdruckes auf 14% und des Impulses auf 15% erreicht wurde.

Diese Minderung konnte auch durch die Einwirkung auf leichte Strukturen (Bleche) nachgewiesen werden. Als qualitative Meßgröße dienten dabei der Grad der Fragmentierung und der Grad der Verformung der Bleche.

Die Luftstoßwelle geht im Fernfeld in eine Schallwelle über. Ergebnisse von Untersuchungen des Fernfeldes (Lichte 1994) zeigten, daß mit einer Verdämmung aus Sand und wäßrigen Schäumen eine signifikante Minderung des Sprengknalls erreicht wurde. Bezogen auf die Masse der Verdämmung besaß Proteinschaum das größte Dämmvermögen.

SCHRIFTTUM

- Baker, W.E., Cox, P.A., Westine, P.S., Kulesz, J.J. & Strechlow, R.A. 1982. Explosion hazards and evaluation, *Fundamentals Studies in engineering 5*, Elsevier scientific Publishing Company.
- Du Pont 1977. Blasters' Handbook, 175th Edition, Firmenpublikation.
- Dobratz, B.M. 1981. Properties of Chemical Explosives and Simulants, *LLNL Explosives Handbook*, Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-52997.
- Fletcher, E.R., Richmond, D.R. & Jones, R.K. 1973. Airblast Effects on Windows in Buildings and Automobiles on the Eskimo II Event, *Minutes of the 15th Explosives Safety Seminar, 1*.
- Held, M. 1983a. Blast Waves in Free Air, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics 8*, Seite 1-7.
- Held, M. 1983b. TNT-Equivalent, *Propellants Explosives, Pyrotechnics 8*, Seite 158ff.
- Lichte, P. 1994. Luftdruckwellen bei Sprengungen mit Schneidladungen und Blade Schießplatzu Nochten, Forschungsbericht für die Sprengschule Dresden.
- Pokrovskij, G.J. *Explosion und Sprengung*, BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1985.
- Saal, H., Loose, T., & Freund, H.-U. 2002. Reduktion des Sprengknalls durch verdämmende Materialien, Bericht 011505-01, Versuchsanstalt für Stahl Holz und Steine der Universität Karlsruhe.
- Schardin, H. Molitz, H. & Schöner, G. 1954. Ziviler Luftschutz Heft 18, Seite 283ff.
- Taylor, J. 1952. *Detonation in condensed explosives*, Oxford, Clarendon Press.