Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 113 (1995)
Heft: 39

Artikel: Sicherheit bei Explosionsereignissen in unterirdischen Verkehrsanlagen
Autor: Thomann, Urs / Stiefel, Ulrich G.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-78780

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Urs Thomann und Ulrich G. Stiefel, Basel

Sicherheit bei Explosionsereignissen in unterirdischen Verkehrsanlagen

Das im vorliegenden Artikel dargestellte Verfahren zeigt einen in der Praxis bewährten Weg auf, wie Explosionsrisiken bei Unfällen im Zusammenhang mit dem Transport gefährlicher Güter (TGG) durch Sicherheitsmassnamen unter Berücksichtigung von Kosten/Nutzen-Aspekten minimiert werden können. Das Verfahren stellt sicher, dass bei Explosionen in unterirdischen Verkehrsanlagen die Sicherheit, wie sie von der Allgemeinheit erwartet und in der Gesetzgebung vorgeschrieben wird, durch wirtschaftliche Sicherheitsmassnahmen erfüllt werden kann.

Gefährliche Ereignisse in unterirdischen Verkehrsanlagen

Im Zusammenhang mit dem Transport gefährlicher Güter in unterirdischen Verkehrsanlagen stellt sich immer wieder die Aufgabe, zu entscheiden, welche Sicherheitsmassnahmen unter Einbezug von sinnvollen ökonomischen wie sicherheitstechnischen Randbedingungen notwendig und zu realisieren sind.

Sicherheitsmassnahmen zur Verminderung des Risikos von gefährlichen Ereignissen auf ein tragbares Mass werden einerseits durch das Sicherheitsbedürfnis der Allgemeinheit, andererseits auch durch die Gesetzgebung [1], [2] und Normen [3] begründet.

Die Sicherheit von Personen in unterirdischen Verkehrsanlagen wird neben den unmittelbaren Verkehrsunfällen durch folgende Ereignisse beeinträchtigt [4]:

- Freisetzung von toxischen Stoffen,
- Brand (direkte Flammeneinwirkungen, Auftreten von Hitze und toxischen Rauchgasen),
- Explosionen (Auftreten von Überdruck, Trümmerwurf, Versagen von Bauteilen der unterirdischen Verkehrsanlage oder darüberliegender Bauten).

Neben der Beeinträchtigung der Verkehrsteilnehmer und der Bevölkerung werden auch die Notfalldienste durch solche Einwirkungen stark in ihren Rettungsarbeiten eingeschränkt.

Im vorliegenden Artikel wird aufgezeigt, wie die Sicherheit von Personen bei Explosionen in unterirdischen Verkehrsanlagen durch wirtschaftliche Massnahmen gewährleistet wird.

Vorgehen

In der Praxis hat sich für die oben aufgeführte Aufgabenstellung ein Verfahren bewährt, bei dem folgende Schritte bestimmt werden:

- Auswirkungen einer Explosion (Überdruck, Überdruckphasendauer, eventuell Trümmerwurf),
- Exposition von Personen,
- Einwirkungen auf Personen und Bauwerke infolge der Explosion (Druckstoss, Trümmerwurf, Folgeereignisse),
- Ausmass (Schaden),
- Wahrscheinlichkeit einer Explosion,
- Monetarisierung des Risikos,
- Sicherheitsmassnahmen, deren Kosten und Wirkung (Risikoreduktion).

Mit Hilfe dieser Verfahrensschritte und daraus abgeleiteten Kosten/Nutzen-Überlegungen bezüglich veschiedener Sicherheitsmassnahmen kann die wirtschaftlichste Lösung ermittelt werden.

Auswirkungen von Explosionen

Grössere Explosionsereignisse ereignen sich vorwiegend im Zusammenhang mit Unfällen beim Transport gefährlicher Güter, sofern grössere Mengen leichtentzündlicher Stoffe freigesetzt werden. Je nach Freisetzungsmenge und -verlauf, Abmessungen und Gefälle des Verkehrsweges, Art des Strassenbelages, Ausgestaltung der Entwässerung, Lüftungsbedingungen bilden sich verschieden grosse zündfähige Gas-/Dampfwolken. Befindet sich eine Zündquelle, wie beispielsweise ein Fahrzeug oder eine elektrische Installation, in einer solchen zündfähigen Gas-/Dampfwolke, kann es zu einer Explosion kommen (Bild 1). Ebenfalls grundsätzlich nicht ausschliessbare Explosionen mit Sprengstoff werden hier nicht näher erläutert.

Bei der Beurteilung der Aus-/Einwirkungen werden hinsichtlich des Explosionsablaufes zwei Arten unterschieden [5]:

- Deflagration:

Ereignet sich in einer unterirdischen

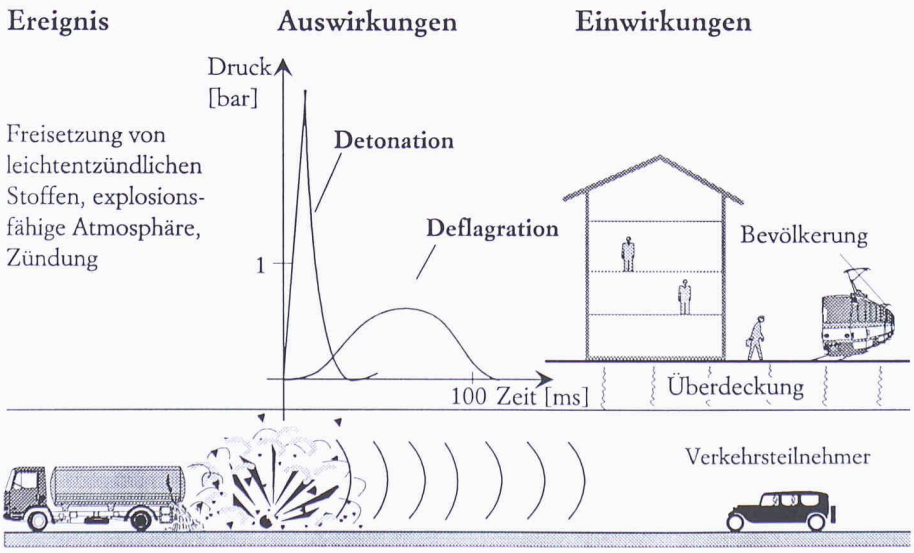

Bild 1.
Aus-/ Einwirkungen in unterirdischen Verkehrsanlagen

Verkehrsanlage eine Deflagration, treten infolge der Druckwelle Überdrücke von meist unter 1 bar (100 kN/m²) auf. Die Überdruckphasen dauern einige 100 ms. Die Druckfront bewegt sich in unterirdischen Verkehrsanlagen mit einer Geschwindigkeit von wenigen m/s fort. Die Druck/Zeit-Kurve entspricht grob angenähert einer halben Sinus-Kurve. Im Zusammenhang mit der ereignisbedingten Freisetzung von grösseren Mengen an leichtentzündlichen Stoffen sind Deflagrationen in unterirdischen Verkehrsanlagen selten, dürfen aber nicht vernachlässigt werden.

- Detonation:

Ereignet sich in einer unterirdischen Verkehrsanlage nach der Freisetzung von leichtentzündlichen Stoffen eine Detonation, treten Überdrücke von einigen bar auf. Die Überdruckphasen dauern wenige 10 ms. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Druckfront beträgt einige 100 m/s bis zu km/s. Die Druck/Zeit-Kurve entspricht annäherungsweise einem Dreieck. Im Zusammenhang mit der Freisetzung von leichtentzündlichen Stoffen, wie beispielsweise Kohlenwasserstoffdämpfe oder -gase, sind Detonationen in unterirdischen Verkehrsanlagen äusserst selten.

In Wirklichkeit ist bei der Zündung explosionsfähiger Gas/Dampf-Gemischen ein fliessender Übergang zwischen Brand, Deflagration und Detonation zu beobachten. In langen, geschlossenen, nicht druckentlasteten Rohren oder kanalähnlichen Bauwerken können Deflagrationen während der Fortpflanzung unter Umständen in Detonationen übergehen. In Räumen treten bei der Zündung von explosionsfähigen Gas/Dampf-Gemischen nur in wenigen Fällen Detonationen auf. In praktischen Versuchen konnten im Zusammenhang mit äusserst starken Turbulenzerscheinungen im explosionsfähigen Gas/Dampf-Gemisch detonationsähnliche Explosionsabläufe ermittelt werden.

Die infolge einer Explosion auftretende Druckstosswelle läuft in beiden Richtungen gegen die Tunnelportale. Infolge des Reibungswiderstandes der Tunneloberflächen, der Tunnelinstallationen und der sich im Tunnel befindenden Fahrzeuge, nimmt der Überdruck des Druckstosses mit der Entfernung vom Explosionsort kontinuierlich ab und die Überdruckphasendauer zu. Die Abnahme des Überdruckes über die Länge des Tunnels ist bei üblichen Tunnels relativ klein. Ähnliche Auswirkungen wie beim Explosionsort müssen demzufolge über einen grossen Bereich des gesamten Tunnels erwartet werden.

Für die Berechnung der Druckstosswerte werden je nach Explosionsmaterial, Stoffart und geometrischen Abmessung der Bauwerke unterschiedliche Modelle [6], [7], [8] verwendet. Die Auswahl und Anwendung der Modelle sowie die Interpretation und Weiterverwendung der erhaltenen Werte setzt profunde Kenntnisse über Explosionsabläufe voraus.

Wahrscheinlichkeit (W) x Ausmass (A) = Risiko (R)

beeinflussende Parameter:

- Art des brennbaren Stoffes
- Freisetzungsmengen
- Art der Explosion
- Lüftungszustand usw.
- Verkehrsteilnehmer, Bevölkerung
- statische Bemessung der Bauteile
- Lachengrösse usw.

W/A - Diagramm:

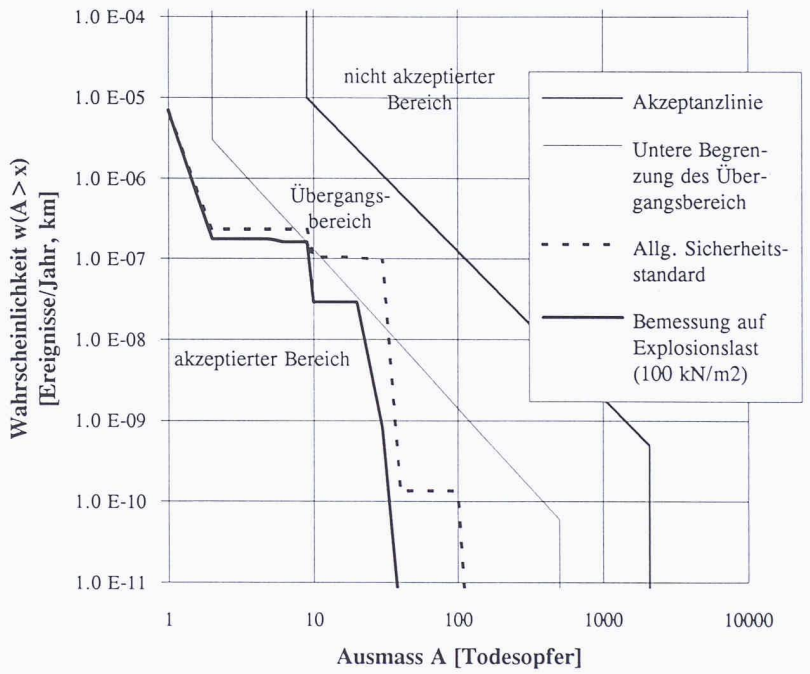

Bild 2.
Bestimmung und Beurteilung des Risikos

Einwirkungen von Explosionen

Der Druckstoss wirkt auf Personen im Freien wie folgt [9]:

- primäre Einwirkungen: Lungen-, Gehörschäden

In unmittelbarer Nähe der Explosion können insbesondere Lungenverletzungen zu irreversiblen Schäden führen. Gehörschäden werden im folgenden, da nicht von letaler Bedeutung, nicht weiter miteinbezogen.

- sekundäre Einwirkungen: Trümmerwurf

Sofern die Explosion im Innern eines Behälters oder eines Gebäudes stattfindet, oder der Druckstoss Installationen oder sonstige Teile ab- und mitreissen kann, ist mit Trümmerwurf zu rechnen. In unterirdischen Verkehrsanlagen ist der Trümmerwurf von untergeordneter Bedeutung. Entsprechend wird im Folgenden nicht weiter darauf eingegangen.

- tertiäre Einwirkungen: Umwerfen von Personen

Ausserhalb von Fahrzeugen (im Freien) sich befindende Personen werden durch das Umwerfen und den Aufprall auf die Fahrbahn verletzt.

Personen in Fahrzeugen können im unmittelbaren Nahbereich der Explosion insbesondere Lungenverletzungen erleiden. Ausserhalb des Nahbereichs bietet das Fahrzeug einen gewissen Schutz vor schwe-

ren Verletzungen infolge der direkten Einwirkungen des Druckstosses.

Im weiteren muss als Schadenereignis mit sehr schlimmen und weitreichenden Folgen ein mögliches Strukturversagen einzelner oder mehrerer Bauteile untersucht werden.

Zwecks einfacher Berechnung der Tragwerke auf Explosionseinwirkungen wird die infolge des Druckstosses auf das Bauwerk einwirkende dynamische Last in eine statische Ersatzlast umgewandelt. Dazu müssen vereinfachende Annahmen getroffen werden. Die einzelnen Bauteile des Tragwerkes werden als Einmassenschwinger und als gleichmässig steif ausgebildet betrachtet. Das statische System wird auf aufliegende oder eingespannte Bauteile reduziert. Die einwirkende dynamische Last des Druckstosses wird für eine Deflagration als halbe Sinusschwingung und für eine Detonation als Dreieckstoss vereinfacht. Aufgrund des Verhältnisses der Einwirkungszeit des Druckstosses zur Eigenschwingungszeit des betrachteten Bauteiles kann die statische Ersatzlast errechnet werden. Diese kann nun mit der maximal vom Bauwerk aufzunehmenden Last verglichen werden, unter Einbezug fallweise zu bestimmender Lastfaktoren und Widerstandsbeiwerte, abgestützt auf die gewählten Gefährdungsbilder. Kommt es zu einem Strukturversagen, wie beispielsweise Einsturz der Deckenplatte, werden unter Umständen nicht nur die sich im betroffenen Tunnelbereich aufhaltenden Personen verletzt. Sofern der Tunnel eine geringe Überdeckung aufweist, können auch Personen, die sich über dem Tunnel im Freien, in Gebäuden oder in Fahrzeugen befinden, geschädigt werden.

Die Einwirkungen von Explosionen auf Personen werden mit verschiedenen Modellen (meist Probitfunktionen) ermittelt.

Bestimmung des Risikos

Multipliziert man die Eintretenswahrscheinlichkeit eines Störfallszenarios mit dessen Ausmass, ermittelt man das Risiko dieses Szenarios.

$$R = W \cdot A$$

Die Szenarios unterscheiden sich beispielsweise nach der Art der brennbaren Stoffe, der Freisetzungsmenge der Stoffe, des Explosionsverlaufes, der Lüftungszustände im Tunnel, der Verkehrsdichte. Die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit eines Störfallszenarios setzt sich somit aus mehreren, das betrachtete Szenario definierenden Einzelwahrscheinlichkeiten zusammen.

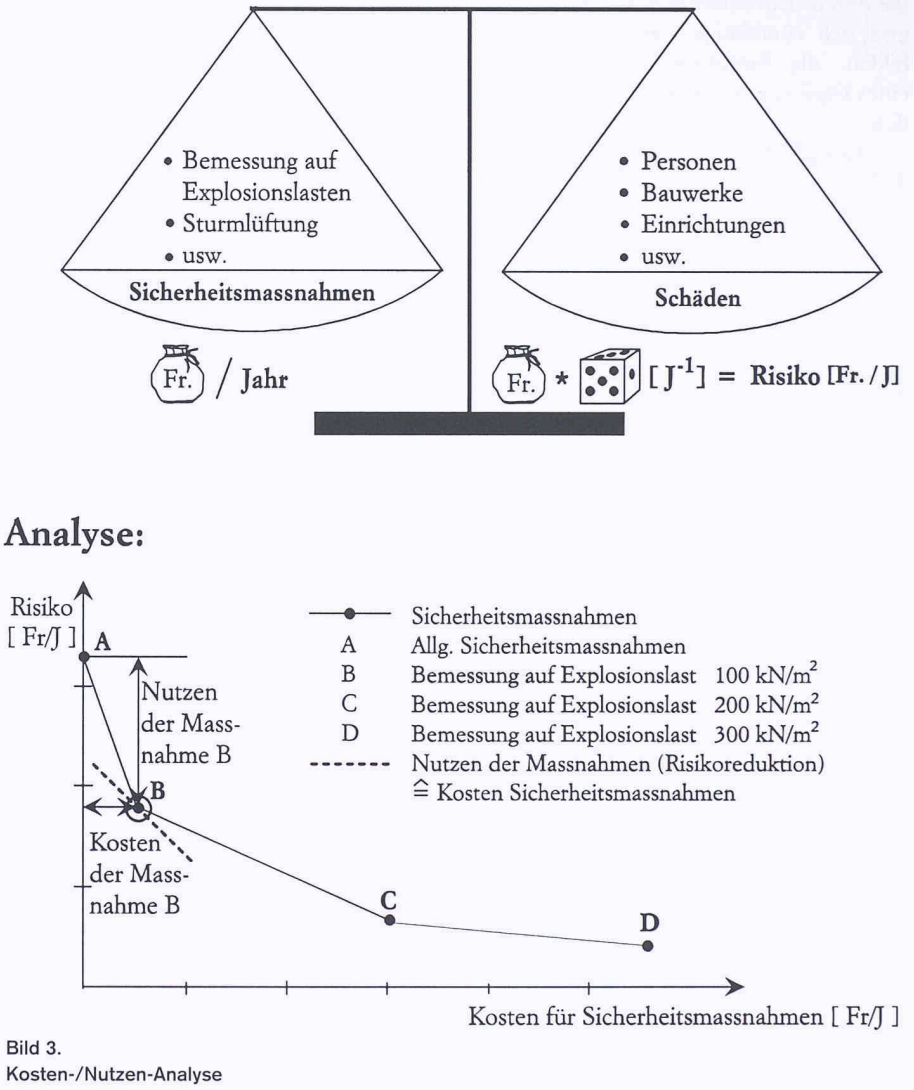

Bild 3.
Kosten-/Nutzen-Analyse

Die Schäden (Ausmass), die bei einem Explosionsereignis entstehen, errechnen sich, in dem abschnittsweise Bereiche mit ähnlichen Einwirkungen (Letalitäten) ausgeschieden werden und die in diesen Bereichen als gedacht sich befindenden Personen diesen Einwirkungen ausgesetzt werden.

Werden alle möglichen Störfallszenarios oder eine repräsentative Anzahl in einem Wahrscheinlichkeits/Ausmass-Diagramm eingetragen, erhält man eine W/A-Kurve [10], wie sie auch für Risikoermittlungen verwendet wird (Bild 2). Das Risiko wird beurteilt, indem diese W/A-Kurve mit einem im W/A-Diagramm ausgeschiedenen Bereich mit akzeptiertem Risiko (Akzeptanzlinie) verglichen wird. Das akzeptierte Risiko ist basierend auf einer Abwägung zwischen Nutzen und Gefahr von Anlage und Einrichung mit Gefährdungspotential und unter Einbezug der Anliegen der Gesellschaft nach Sicherheit bestimmt worden. Die Gesellschaft akzeptiert Risiken bei genügend kleiner Eintretenswahrscheinlichkeit eines Störfalls, wobei Störfälle mit grossem Ausmass nur mit überproportional kleinerer Wahrscheinlichkeit (Aversion) toleriert werden. Die Summe der Risiken aller Störfallszenarios der W/A-Kurve wird in einem Risikowert erfasst, der für Kosten/Nutzen-Analysen von Bedeutung ist.

Massnahmenplanung

Durch unterschiedliche Sicherheitsmassnahmen können die Risiken der Störfallszenarios beeinflusst werden. Einerseits kann beispielsweise durch verstärkte Bauteile, die einer höheren Explosionslast

standhalten, das Schaden-Ausmass begrenzt werden. Andererseits kann aber auch beispielsweise durch eine künstliche Lüftung, die bei einer Freisetzung von leichtbrennbaren Stoffen verhindert, dass die untere Explosionsgrenze erreicht wird und sich zündfähige Gas-/Dampfwolken bilden, die Eintretenswahrscheinlichkeit eines Explosionsszenarios verkleinert werden.

Der Einfluss einer oder mehrerer Sicherheitsmassnahmen auf das Gesamtrisiko wird aus der Veränderung der W/A-Kurve im Wahrscheinlichkeits/Ausmass-Diagramm ersichtlich. Anhand der W/A-Kurve kann der Nutzen einer oder mehrerer Sicherheitsmassnahmen visualisiert und das verbleibende Restrisiko bewertet werden.

In Bild 2 wird der Einfluss einer verstärkten Bauweise einer unterirdischen Verkehrsanlage (statische Ersatzlast von 100 kN/m^2) auf das Risiko einer Explosion aufgezeigt.

Kosten/Nutzen-Analyse

Die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Sicherheitsmassnahmen lässt sich mit Hilfe einer Kosten/Nutzen-Analyse überprüfen (Bild 3).

In der Kosten/Nutzen-Analyse werden die entsprechenden Kosten der verschiedenen Sicherheitsmassnahmen mit dem Nutzen der Massnahmen in Form von vermiedenen Kosten für die Beseitigung von Schäden (verkleinertem Risikowert) verglichen. Dazu muss das Risiko monetarisiert werden, das heisst, das Schadenausmass ohne und mit den verschiedenen Sicherheitsmassnahmen wird mit Hilfe der Rettungskosten [11] in Franken umgerechnet. Die entsprechenden Risikowerte werden in Franken/Jahr angegeben. Die Kosten für die vorsorglich getroffenen Sicherheitsmassnahmen müssen zumindest in der Grössenordnung mit den Kosten für die Beseitigung der Schäden (ohne diese Massnahmen) im Gleichgewicht gehalten werden. Sicherheitsmassnahmen, die bei grossen Aufwendungen (Kosten) nur einen geringen Nutzen (Risikoverminderung) aufweisen sind nicht wirtschaftlich und damit abzulehnen.

In Bild 3 werden die Kosten/Nutzen-Verhältnisse verschiedener Auslegungen des Tunneltragwerkes verglichen. Für das dargestellte Beispiel ist die Sicherheitsmassnahme «Bemessung des Tunneltragwerkes auf eine Ersatzlast von 100 kN/m^2» die aus Kosten/Nutzen-Überlegungen gerechtfertigste Massnahme und wird darum zur Ausführung empfohlen.

Folgerungen

Auch wenn die Aufforderung, Explosionsereignisse in die Projektierung von unterirdischen Verkehrsanlagen einzubeziehen, teilweise als noch ungewohnt empfunden wird, ist dies durch die Norm SIA 160 vorgeschrieben und im Rahmen des Vollzugs der Störfallverordnung unabdingbar. Gerade Vorfälle wie neben anderen Zürich-Affoltern, wo im Frühling 1994 ein Benzin-Güterzug entgleiste und sich ein Grossbrand und mehrere Explosionen ereigneten, stützen obige Forderung auch in der Praxis. Bei der Projektierung von unterirdischen Verkehrsanlagen mit Transport gefährlicher Güter sind bauliche und aufgrund von Kosten/Nutzen-Analysen ökonomisch sinnvolle Massnahmen zu berücksichtigen. Damit wird der notwendige Schutz von Menschen und auch des Bauwerkes hinsichtlich der Gefahren eines Explosionsereignisses gewährleistet.

Literatur

[1]
Umweltschutzgesetz USG, 1983.

[2]
Störfallverordnung StFV, 1991.

[3]
Schweizer Ingenieur- und Architekten-Verein: Norm SIA 160, Einwirkungen auf Tragwerke; 1989.

[4]
BUWAL: Handbuch III zur Störfallverordnung StFV, Richtlinen für Verkehrswege, 1992.

[5]
Baker et al.: Explosion hazards and evaluation, fundamental studies in engineering, 5, Elsevier scientific publishing company, 1983.

[6]
Bartknecht W.: Explosionsschutz, Grundlagen und Anwendung, Springer-Verlag, 1993.

[7]
Harris R.J.: Gas explosions in buildings and heating plant; British Gas, 1983.

[8]
TNO: Methods for the calculation of the physical effects of the escape of dangerous material; First edition, 1979.

[9]
TNO: Methods for the determination of possible damage, CPR 16E, First edition, 1992.

[10]
BUWAL: Handbuch I zur Störfallverordnung StFV, Richtlinien für Betriebe mit Stoffen, Erzeugnissen oder Sonderabfällen, 1991.

[11]
Stiefel U., Schneider J.: Was kostet Sicherheit?, SI+A Heft 47/1985.

Adresse der Verfasser:
Urs Thomann, Dipl. Masch. Ing. HTL, *Ulrich G. Stiefel,* Dipl. Ing. ETH/SIA, Leiter der Abteilung Sicherheits- und Umwelttechnik, Gruner AG, Ingenieurunternehmung, 4020 Basel.