

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 114 (1996)
Heft: 42

Artikel: Druckentlastung bei Raumexplosionen
Autor: Thomann, Urs / Vogt, Simon / Stiefel, Ulrich G.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-79063>

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: 23.02.2026

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

Urs Thomann, Simon Vogt und Ulrich G. Stiefel, Basel

Druckentlastung bei Raumexplosionen

Bei Explosionen in Räumen aller Art werden immer wieder Personen verletzt oder getötet. Die materiellen Schäden erreichen oft Summen in Millionenhöhe. Als bauliche Massnahme zur Reduktion von Explosionsschäden ist die Druckentlastung ein geeignetes Mittel. Deren Funktionsweise und Dimensionierungsgrundlagen werden kurz dargelegt. Ebenfalls werden Möglichkeiten für die Gestaltung und Kombination mit Öffnungen für andere Zwecke vorgestellt. Neben der streng theoretischen ist allerdings auch eine «risikologische» Betrachtungsweise der Situation notwendig, mit der unnötige oder unter Kosten-/Nutzenaspekten nicht gerechtfertigte Massnahmen ausgeschieden werden. Zur Veranschaulichung wird auf die Benzinkatastrophe im Bahnhof Zürich-Affoltern vom März 1994 und die Konsequenzen für die Abwasseranlagen eingegangen.

Immer wieder ereignen sich aus verschiedensten Gründen Explosionen in Gebäuden. Dabei sind im unmittelbaren Nahbereich anwesende Personen stark gefährdet, durch den Druckstoss verletzt oder gar getötet zu werden (Primärschädigungen).

1
Vollständig zerstörtes Regenbecken



Die Gebäude selbst nehmen oft in einem Ausmass Schaden, das kaum Möglichkeiten für eine Instandstellung offenlässt: Tragende Elemente und ganze Wände werden zerstört, nicht zu sprechen von Beeinträchtigungen der Installationen, die zu gravierenden Folgeschäden führen können (Brände, Wasserschäden etc.). Diese massiven Gebäudeschäden verletzen oder töten zusätzlich Menschen. Personen werden verschüttet oder von weggeschleuderten Trümmerstücken getroffen (Sekundärschädigungen).

Ein Ereignis aus der jüngeren Vergangenheit ist die Zerstörung eines Regenbeckens (Bild 1) sowie von Teilen des Kanalisationsnetzes (Bild 2) nach der Freisetzung von Benzin bei einem Eisenbahnunfall in Zürich-Affoltern, auf das weiter hinten eingegangen wird.

Explosion ist nicht gleich Explosion

Die Ursachen von Explosionen sind so unterschiedlich wie deren Art und die Orte ihres Auftretens. Neben Ereignissen, bei denen Gase oder Dämpfe mit der Umgebungsluft ein explosionsgefährliches Gemisch bilden, sind auch Staub- oder Sprengstoffexplosionen relevant. Unfälle bei Produktion, Verarbeitung, Lagerung, Umfüllung oder Transport gefährlicher

Stoffe kommen ebenso als Ursache in Betracht wie Anschläge auf Einrichtungen oder Personen.

Neben der Art des explodierenden Stoffes haben Hindernisse auf dem Ausbreitungsweg des Druckstosses einen erheblichen Einfluss auf den Verlauf einer Explosion. Bei Gas- oder Dampf- bzw. Staubexplosionen in geschlossenen Räumen können Turbulenzen - mit allerdings geringer Wahrscheinlichkeit - dazu führen, dass eine Deflagration in eine Detonation übergeht. Dabei sind wesentlich höhere Drücke und damit grössere Schäden zu erwarten. Das Schadensausmass ist jedoch nicht nur vom Überdruck allein abhängig. Die Phasendauer des Explosionsüberdrucks und diejenige der Eigenschwingung der Bauteile spielen ebenfalls eine wichtige Rolle. Für Deflagrationen gilt: Je besser diese Werte übereinstimmen, desto stärker wird das Bauteil in Schwingung versetzt (Resonanz) und desto wahrscheinlicher ist eine Schädigung oder ein Versagen.

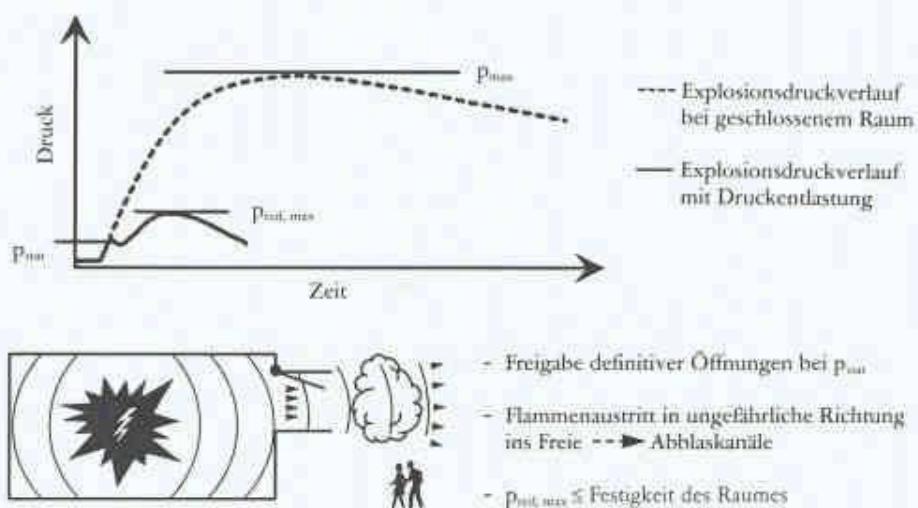
Wird Sprengstoff gezündet, so erfolgt in der Regel eine Detonation. Diese Explosionen charakterisieren sich durch sehr hohe Überdrücke in Verbindung mit äusserst kurzen Überdruckphasen. Bei Detonationen ist hauptsächlich der Überdruck für das Ausmass der Zerstörung verantwortlich. Gemeinsam ist diesen Ereignissen, dass die Vorwarn- und Reaktionszeit äusserst kurz ist oder völlig fehlt.

Druckentlastung

Aus diesem Grund konzentrieren sich aktive Sicherheitsmassnahmen hauptsäch-

2
Durch Explosionswirkungen erheblich beschädigter Zulaufkanal, durch Bagger freigelegt





3
Druckentlastung bei Raumexplosionen

lich auf die Verhinderung von Explosionen (Sicherung von Produktionsabläufen, Überwachungsanlagen zur sofortigen Erkennung von Stoffaustritten, Zutrittskontrollen zur Verhinderung von Sabotage etc.). Für die Schadenbegrenzung bei einem Ereignis sind dagegen vor allem passive Schutzeinrichtungen von grosser Bedeutung. Dazu gehören insbesondere Druckentlastungen, deren Relevanz auch aus der SIA-Norm 160 ersichtlich wird. In der Norm wird aufgeführt, dass für Bauwerke, bei denen die Nutzung mit besonderen Explosionsgefahren verbunden ist (z.B. chemische Fabriken und Labors, Sprengstofffabriken, Gaswerke usw.) als besondere bauliche Massnahmen beispielsweise Druckausgleichsöffnungen oder Leichtbauaußenwände anzuordnen sind. Mittels Einbau von Öffnungen, durch welche der Explosionsüberdruck entweichen kann, werden das Gebäude vor dem Einsturz und Personen vor Sekundärschädigungen bewahrt (Bild 3). Sekundärwirkungen können je nach Verteilung der Personen in einem Gebäude einen massgeblichen Anteil der Opfer ausmachen. Beim Totaleinsturz eines Gebäudes ist mit dem Tod von 20 bis 50% der sich darin aufhaltenden Menschen zu rechnen. Die übrigen Personen werden grösstenteils verletzt [1].

Mit einer Druckentlastung lassen sich zudem die Explosionsauswirkungen (Druckstoss, Verbrennungsgase, unverbranntes Gemisch sowie Flammenstrahlung) kontrolliert aus dem betroffenen Raum ins Freie führen. Dadurch werden Sekundärschäden an Personen wie auch an benachbarten Bauwerken und Anlagen weitgehend vermieden.

Theoretische Dimensionierung

In der chemischen Industrie stellte sich bereits früh die Frage nach Bemessung

des Explosionsüberdrucks in Abhängigkeit von Druckentlastungen. Insbesondere für Staubexplosionen in Behältern und Räumlichkeiten bis 1000 m^3 Volumen stehen umfangreiche Untersuchungsresultate zur Verfügung, in denen die Zusammenhänge zwischen Druckentlastungen und maximal auftretendem Behälterüberdruck aufgezeigt werden. Auf dem Gebiet der Gas/Dampf-Explosionen in Behältern und Wohnräumen ist vor allem aus dem englischen Sprachraum Literatur vorhanden. Diese gestattet die Berechnung von Deflagrationen in kleinen und mittleren Räumen.

Der notwendige Querschnitt einer Entlastungsöffnung ist von verschiedenen Faktoren abhängig, und eine fallspezifische, sorgfältige Dimensionierung ist unabdingbar. Parameter wie der explodierende Stoff, Stoffmenge und Verteilung im Raum, die Art der Explosion, Raumgrösse und -form, Festigkeit/Belastbarkeit des Bauwerks, Anordnung sowie Nutzung und evtl. Abdeckung von Öffnungen beeinflussen die Auslegung. Führt die Druckentlastung nicht direkt, sondern durch einen Kanal (Abblasrohr) ins Freie oder in einen anderen Raum, so sind zusätzlich Reibungswiderstände und Turbulenzen zu berücksichtigen. Das gleiche gilt für Hindernisse, die sich im betroffenen Raum selber befinden.

Für kleine und mittlere Raumvolumen bis 1000 m^3 lässt sich in Funktion der Druckentlastung der maximale Explosionsüberdruck mit verschiedenen, meist empirischen Methoden bestimmen [2,3,4]. Ist ein Abblasrohr vorhanden, wird die erforderliche Druckentlastungsfläche F in Abhängigkeit der Bauwerksfestigkeit vergrössert. Bei kurzen Rohren beträgt die Vergrösserung gegenüber der direkten Entlastung 10 bis 50%, bei Längen über

3 m kann sich die Fläche verdoppeln bis mehr als verzehnfachen.

Für grosse Raumvolumen ($> 1000 \text{ m}^3$) finden sich nur wenige, teils empirisch bestimmte, teils auf grosse Volumen angepasste Formeln für kleine bis mittlere Räume [3,5]. Diese Formeln werden z.B. bei der Dimensionierung der Druckentlastung von Labors mit Lösungsmitteln oder gedeckten Becken von Kläranlagen angewendet. Gerade grössere Bauwerke wie Regenbecken, Klärbecken von Abwasserreinigungsanlagen oder Lagerräume mit Lösungsmitteltanks sind besonders gefährdet. Die Eigenschwingungsdauer der Bauteile (insbesondere Deckenplatten) liegt oft im Bereich der Überdruckphasendauer einer Deflagration (100–300 Millisekunden [2]). Die auf das Bauwerk anzusetzenden statischen Ersatzlasten können in solchen Fällen bis zum 1,8fachen des maximalen dynamischen Explosionsüberdrucks betragen.

Das Schwingverhalten von Bauteilen bei einer Deflagration ist abhängig von der Geometrie der Bauteile (Grösse, Form, Gewicht), den Öffnungen, der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Druckstosses, örtlichen Turbulenzbildungen etc. Aufgrund der zahlreichen, teilweise stark variierenden Einflüsse lässt sich die Belastungsdauer zum heutigen Zeitpunkt nicht exakt berechnen. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit ist es auch nicht sinnvoll, für die statische Bemessung generell den doppelten dynamischen Überdruck als Ersatzlast einzusetzen. Mit fallbezogenen Abklärungen lassen sich die für eine wirtschaftliche Bemessung benötigten Angaben bestimmen.

Die Unsicherheit der mit den erwähnten Methoden ermittelten Werte für Druckentlastungsflächen ist gross, schwanken sie doch für die einzelnen Modelle bei gleichen Randbedingungen bereits beträchtlich. Im weiteren ist zu beachten, dass die Methoden nur begrenzt, d.h. innerhalb definierter Grenzen, angewendet werden dürfen. Generell muss auch festgehalten werden, dass in der Literatur kaum Angaben über den Einfluss von Turbulenzen auf den Übergang von Deflagrationen zu Detonationen in grossen Räumen zu finden sind. Auf diesen Gebieten besteht ein ausgewiesener Forschungsbedarf.

«Risikologische» Dimensionierung

Für die Dimensionierung von Druckentlastungsöffnungen ist grundsätzlich dasjenige mögliche Ereignis zu berücksichtigen, das bei der Berechnung zur grössten Entlastungsfläche führt. Allerdings sollte neben diesem theoretischen Ansatz auch eine umfassendere Betrachtungswei-

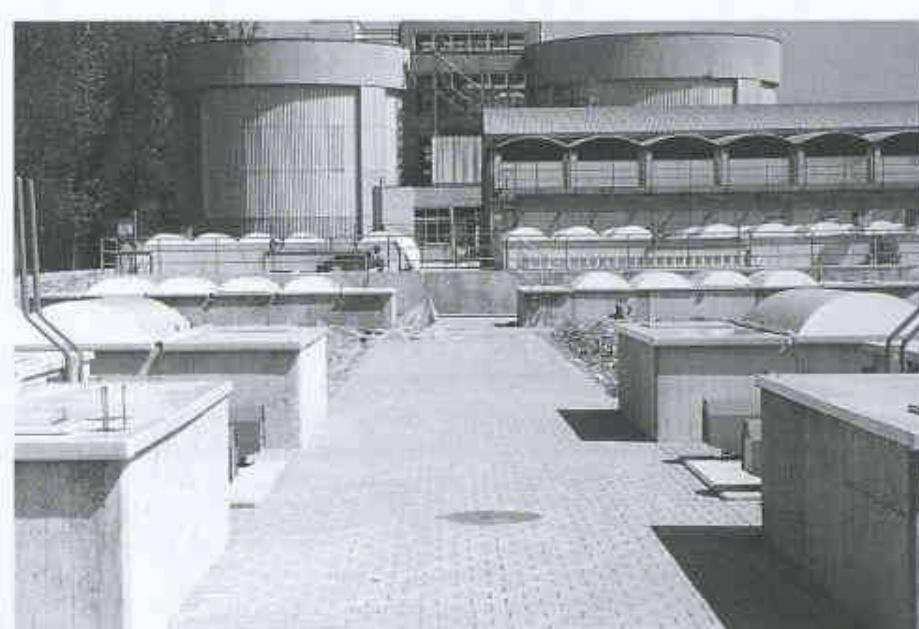
se zur Anwendung gelangen, die erst eine Massnahmenplanung, bei welcher die zur Verfügung stehenden Mittel optimal eingesetzt werden, ermöglicht. Dabei werden die Eintretenswahrscheinlichkeiten und Schadenausmasse verschiedener, theoretisch möglicher Explosionsereignisse abgeschätzt. Die Risiken werden monetarisiert, indem die Schadenausmasse in Frankenbeträgen mit den Wahrscheinlichkeiten multipliziert werden. Die Druckentlastung wird nicht als Einzelmaßnahme betrachtet, sondern es werden auch Massnahmen zur Verhinderung von Explosions- oder Freisetzungsmöglichkeiten einbezogen. Dadurch kann möglicherweise die Eintretenswahrscheinlichkeit einer Explosionsart wesentlich reduziert werden, so dass auch die erforderliche Druckentlastungsfläche kleiner wird. Die risikologisch-optimale Lösung legt ein Massnahmenpaket fest, das die Schutzziele erfüllt und ein ausgeglichenes Verhältnis von Wirkung und Kosten der Massnahmen aufweist.

Es ist allerdings festzuhalten, dass eine ausreichend dimensionierte Druckentlastung als passive Sicherheitsmaßnahme gegenüber aktiven Sicherheitsmaßnahmen mit entsprechenden Ausfallwahrscheinlichkeiten in den meisten Fällen vorzuziehen ist. Dies wird auch bei Kurzberichten gemäß Störfallverordnung berücksichtigt. Bei der Störfallbetrachtung werden im allgemeinen nur passive Sicherheitsmaßnahmen als das Schadenausmaß mindernd einbezogen.

Die Durchführung einer solchen umfassenden «risikologischen» Massnahmenplanung setzt detaillierte Kenntnisse der Betriebsabläufe und der möglichen Szenarien (inkl. Eintretenswahrscheinlichkeit) voraus. Erfahrung bei der Planung von Massnahmenpaketen in multidisziplinärer Zusammenarbeit mit anderen Fachkräften ist unabdingbar.

Gestaltung

Die Gestaltung von Druckentlastungsöffnungen ist oft problematisch, da Zielkonflikte auftreten. Eine grösse Wandöffnung ist unerwünscht, wenn ein Raum beispielsweise aus Sicherheitsgründen geschlossen sein muss. Auch Platz- oder konstruktive Probleme sind nicht immer einfach zu lösen. Andererseits bieten sich häufig ohnehin geplante Öffnungen, evtl. mit kleinen Anpassungen, als Entlastungsmöglichkeiten an. Die Phantasie der involvierten Ingenieure und Architekten ist hier besonders gefragt. Auch der Gestaltung von Abdeckungen sind kaum Grenzen gesetzt. Allerdings dürfen solche Elemente die Funktion der Entlastung nicht beeinträchtigen oder sie müssen bei der Bemessung berücksichtigt werden.



4

Abdeckungen der Druckentlastungsöffnungen grossvolumiger unterirdischer Klärbecken einer

ARA in Form von glasfaserverstärkten Kunststoffkuppeln

Einige Beispiele von ausgeführten Druckentlastungsöffnungen für unterschiedliche Arten von Bauwerken und Nutzungen sind aus (Bild 4) und (Bild 5) ersichtlich.

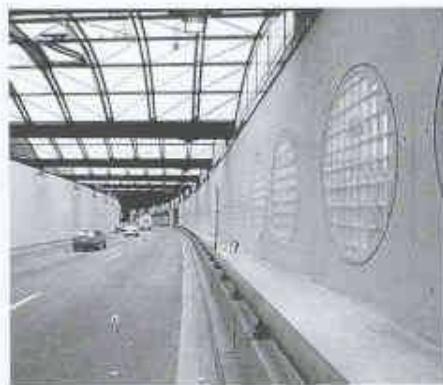
Bei der Materialauswahl, insbesondere bei der Verwendung von Glas für die Abdeckungen von Druckentlastungsöffnungen muss der Splitterwirkung Rechnung getragen werden. So zeigen Erkenntnisse aus dem Bombenanschlag vom April 1995 in Oklahoma City, dass rund 80% der Verletzungen auf weggeschleuderte, scharfkantige Glassplitter zurückzuführen sind. Abdeckungen aus scharfkantigem Material sollten deshalb nur in Bereichen ohne Personengefährdung verwendet werden. Im weiteren muss gewährleistet sein, dass die Abdeckung nicht als Ganzes weggeschleudert wird und Menschen gefährdet (Scharnier, Ankettung usw.). In Bereichen mit Personen werden die Materialien sowie die Art der Befestigung der Abdeckungen fallweise ermittelt.

Für eine aus Lärmschutzgründen notwendige Glas-Stahl-Überdeckung eines dichtbefahrenen Autobahnabschnittes durch ein städtisches Wohngebiet wurde

5

Produktionsgebäude der chemischen Industrie mit einer als Druckentlastung ausgebildeten Fassadenkonstruktion





6

Verwendung unterschiedlicher Materialien und Ausführungen der Verglasungen einer Autobahnüberdeckung unter – neben anderem – Einbezug der Splitterwirkungen bei einer Explosion

eine Risikoanalyse erarbeitet. Durch einen Unfall mit Freisetzung von leichtentzündlichen Stoffen kann es in der Überdeckung zu einem Brand oder einer Explosion kommen. Die mit lichttransparenten Abdeckungen versehenen Öffnungen wirken je nach Material und Art der Befestigung als Druckentlastungen. Personen in der unmittelbaren Umgebung können durch wegfliegende Trümmer bzw. Splitter verletzt werden. Dieser Gefahr wurde neben weiteren Kriterien, wie architektonisches Bild, Unterhalt oder Brandsicherheit, bei der Wahl der lichttransparenten Materialien und der Art der Ausführungen der Abdeckungen Rechnung getragen (Bild 6), indem keine scharfkantig splitternden Verglasungen eingesetzt wurden. In der seitlichen Wand wurden Glasbausteinfenster eingesetzt, der obere Teil der Fassade mit sekurisiertem Einscheibenglas ausgebildet und die Dacheindeckung mit dreischichtigem Verbundsicherheitsglas versehen.

Benzinkatastrophe im Bahnhof Zürich-Affoltern

Im März 1994 entgleiste ein Benzinzisternen-Zug im Bereich des Bahnhofs Zürich-Affoltern. Durch lecken geschlagene Kesselwagen konnten rund 400 m³ Benzin auslaufen. Das austretende Benzin führte einerseits zu einem Grossbrand im Gebiet des Bahnhofs, andererseits gelangten grössere Mengen über die Arealentwässerung in die Kanalisation. In der Folge kam es an mehreren Orten im Kanalisationssystem zu Explosionen mit unterschiedlichen Schadensbildern. Anhand der Schadensbilder kann vereinfachend die Wirkung von Druckentlastungsvorrichtungen aufgezeigt werden. Im Gebiet des Bahnhofs ereigneten sich mehrere Deflagrationen. Die

Kontrollsäume wirkten als Druckentlastungen, wobei die schweren Schachtdeckel teilweise 20 bis 30 Meter hochgeschleudert wurden. An den Kanalisationssystemen waren in diesem Gebiet keine Schäden festzustellen. Bei einer Bahnunterführung kam es in einer Pumpstation zu einer Deflagration. Durch die Abgänge der Pumpstation zur Unterführung wurde der Überdruck entlastet. Auch hier traten am Bauwerk keine Schäden auf. Lediglich die elektromechanische Einrichtung der Pumpstation wurde zerstört.

Über die Kanalisation gelangte Benzin in die Zulaufkanäle des Regenbeckens Reckenholz und teilweise in einen Vorfluter. Die Zulaufkanäle weisen grosse Querschnitte und damit auch grosse zu entlastende Raumvolumen auf. Gleichzeitig sind die Abstände zwischen den Schächten, die im Explosionsfall als Druckentlastungen wirken, bedeutend grösser als bei der Kanalisation im Bereich des Bahnhofs. Das Regenbecken Reckenholz umfasst ein Raumvolumen von über 2000 m³. Die sechs Einstiegschächte erbringen kleine Druckentlastungsflächen und geben die Öffnung erst bei einem bereits erheblichen Überdruck frei. Im Regenbecken bildeten sich Benzindämpfe, deren Konzentration zumindest teilweise innerhalb der Explosionsgrenzen von 1,4 bis 7,6% v/v lagen. Es kann angenommen werden, dass die explosionsfähigen Gemische im Regenbecken durch brennende Flüssigkeit und glühende Partikel entzündet wurden [6]. In der Folge ereignete sich eine gewaltige Deflagration im Regenbecken, welche dieses (Bild 1) vollständig zerstörte sowie rund 800 m der Zulaufkanäle (Bild 2) so erheblich beschädigt, dass sie ersetzt werden mussten.

Die höchste Energiefreisetzung mit den entsprechend grössten Schäden war im Bereich des Regenbeckens festzustellen, wobei der Zerstörungsgrad in den Zuleitungskanälen mit zunehmender Distanz deutlich abnahm. Die druckentlastende Wirkung der wenigen Schachtoffnungen geht eindeutig aus den Schadensbildern hervor.

Die physikalischen Zusammenhänge der Luftstossentstehung in teilweise entlüfteten Räumen sind näherungsweise bekannt (vgl. oben). Ebenso die Luftstossausbreitung in länglichen Bauwerken, wobei hier eine Reduktion des Überdrucks und eine Verlängerung der Belastungsdauer zu berücksichtigen sind. Auf dieser Basis kann zusammen mit einer detaillierten Analyse der aufgetretenen Schäden der beschriebene Explosionsverlauf begründet werden.

Literatur

- [1] TNO, Methods for the determination of possible damage, 1992
- [2] Harris, R.J.: The investigation and control of gas explosions in buildings and heating plant, E&FN Spon/British Gas Corp. (1983)
- [3] Rashash, D.J., Drysdale, D.D. and Kemp, N.: Design of an Explosion Relief System for a Building Handling Liquefied Fuel Gases, I. Chem. E Symposium Series No. 47 (1976)
- [4] Bartknecht, W.: Explosionsschutz, Grundlagen und Anwendung, Springer-Verlag (1993)
- [5] Det norske Veritas Technical Note: Fixed Offshore Installations TNA 101: Design Against Accidental Loads (1981)
- [6] Weimann, J.: Die Benzinkatastrophe vom 8. März 1994 im Bahnhof Zürich-Affoltern und die Konsequenzen auf die Abwasseranlagen, Korrespondenz Abwasser, Heft 3/1995

Schlussbetrachtung

Aus den gemachten Ausführungen geht hervor, dass Ansätze bestehen, die aufgrund vorhandener Literatur eine entsprechende Bemessung von Druckentlastungsöffnungen unter Berücksichtigung von Wirtschaftlichkeitsüberlegungen erlauben. Durch entsprechend dimensionierte Druckentlastungsöffnungen insbesondere bei Neubauten können Bauwerksschäden von teilweise mehreren Millionen Franken, aber auch Personenschäden, mit verhältnismässigen Mitteln vermieden werden. Technische Forschung wäre im Bereich grosser Raumvolumen sinnvoll. Explosionsverläufe in Räumen über 1000 m³ sind zum heutigen Zeitpunkt fallweise für einzelne Fragestellungen bekannt. Eine Bemessungsgrundlage für die Ausführung druckentlasteter Bauwerke existiert noch nicht. Die Auswertung von Ereignissen, deren entsprechende Daten vorhanden und zugänglich sind, wie auch speziell angelegte Versuche könnten weitergehenden Aufschluss über die Dimensionierung von Druckentlastungen bei Bauwerken geben, in denen Gas-/Dampfexplosionen nicht auszuschliessen sind.

Adresse der Verfasser:

Urs Thomann, dipl. Masch. Ing. HTL, Simon Bögl, dipl. Ing. ETH, Ulrich G. Stiefel, dipl. Ing. ETH SIA, Gruner AG, Ingenieurunternehmung, 4020 Basel