

**OTIF**



**ORGANISATION INTERGOUVERNEMENTALE POUR  
LES TRANSPORTS INTERNATIONAUX FERROVIAIRES**

**ZWISCHENSTAATLICHE ORGANISATION FÜR DEN  
INTERNATIONALEN EISENBAHNVERKEHR**

**INTERGOVERNMENTAL ORGANISATION FOR INTER-  
NATIONAL CARRIAGE BY RAIL**

**INF. 3 D**

13. März 2006

Original: Englisch

### **RID/ADR**

Gemeinsame Tagung des RID-Sicherheitsausschusses und der Arbeitsgruppe für die Beförderung gefährlicher Güter (Bern, 20. bis 23. März 2006)

### **TANKS: Verringerung der Gefahr eines BLEVE TNO-Bericht**

### **übermittelt durch die Niederlande**

#### **1. Einleitung**

Bei der Beförderung von gefährlichen Gütern, dem Be- und Entladen von Tankfahrzeugen und Kesselwagen können Unfälle auftreten. Diese Unfälle können zu Todesfällen bei Personen führen, die sich in gefährdeten Gebäuden, wie Häusern, Bürogebäuden, Schulen, Krankenhäusern, Pflegeheimen usw., aufhalten. Um die Risiken in Verbindung mit der Beförderung, dem Be- und Entladen gefährlicher Güter einzuschränken, hat die niederländische Regierung eine auf einer Wahrscheinlichkeitsrechnung beruhende externe Sicherheitspolitik in ihrem vierten umweltpolitischen Plan von 2002 formuliert. In dieser externen Sicherheitspolitik werden die folgenden Ziele festgelegt:

- Gefährdete Gebäude sind innerhalb der  $10^{-6}$  pro Jahr ortsgebundenen Risikozone (vormals bekannt als Individualrisiko) nicht erlaubt.
- Das gesellschaftliche Risiko (das Risiko, dass eine Gruppe von mindestens 10 Personen gleichzeitig getötet wird) sollte vorzugsweise unter dem Richtwert liegen. Je höher die erwartete Anzahl an Todesfällen ist, desto strenger wird der Richtwert. Bezüglich des Transportrisikos sollte die Häufigkeit für 10 gleichzeitig eintretende Todesfälle weniger als ein Todesfall pro 10'000 Kilometer/Jahr usw. betragen. Als Formel ausgedrückt: für N Opfer sollte die Häufigkeit weniger als  $0.01/N^2$  betragen.

Aus Kostengründen wurde dieses Dokument nur in begrenzter Auflage gedruckt. Die Delegierten werden daher gebeten, die ihnen zugesandten Exemplare zu den Sitzungen mitzubringen. Das Zentralamt verfügt nur über eine sehr geringe Reserve.

- Vermeidung großer Unfälle, die zu gesellschaftlichen Störungen auf Grund der hohen Anzahl an Opfern oder zu schweren Schäden an Gebäuden und der Infrastruktur führen können.

Eine Bewertung der Risiken beim Entladen von Flüssiggas an Tankstellen zeigte, dass bei 25 % der 2200 Flüssiggas-Tankstellen die Richtwerte für das gesellschaftliche Risiko überschritten werden. Bei der Straßen- und Eisenbahnbeförderung von Flüssiggas werden die Richtwerte für das gesellschaftliche Risiko in mehreren niederländischen Städten (u.a. Amsterdam, Rotterdam, Dordrecht, Breda, Tilburg, Eindhoven) überschritten. Eine detaillierte Analyse der Ergebnisse der Risikobewertung zeigte, dass die Überschreitung dieser Richtwerte besonders auf einen Unfalltyp zurückzuführen ist, nämlich eine Dampfexplosion nach Ausdehnung siedender flüssiger Stoffe (BLEVE) auf Grund einer Überhitzung des Tanks bei einem externen Feuer ("heißer" BLEVE).

Es wurden verschiedene technische Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit bei Straßen- und Eisenbahntransporten im Hinblick auf eine Reduzierung des Risikopotentials untersucht. Eine Kosten-Nutzen-Analyse der Maßnahmen ergab, dass eine thermische Isolierung des Straßen- und Eisenbahntanks zur Verhinderung eines "heißen" BLEVE eine kosteneffiziente Lösung zur Verringerung der gesellschaftlichen Risiken darstellen würde. Die Anzahl der Flüssiggas-Tankstellen, die die Richtwerte für die gesellschaftlichen Risiken überschreiten, könnte dadurch um 90 % und die Anzahl der Straßen- und Eisenbahnstrecken, die diese Werte überschreiten, könnte um 70 % reduziert werden.

Im Juni 2005 vereinbarten die niederländische Regierung und der Verband der Flüssiggaskraftstoffunternehmen, dass bis spätestens 2010 sämtliche Tankfahrzeuge zum Transport von Flüssiggas-Kraftstoff über zusätzliche Einrichtungen zur Verhinderung eines thermischen BLEVE des Tanks verfügen sollen. Sämtliche gesellschaftlichen Risiken, die sich aus dem Transport gefährlicher Güter in den Niederlanden ergeben, wären gelöst, wenn nicht nur die Tanks für den nationalen Transport von Flüssiggas-Kraftstoff, sondern auch alle anderen Straßen- und Eisenbahntankfahrzeuge für den nationalen und internationalen Transport von entzündbaren flüssigen Gasen gegen einen thermischen BLEVE geschützt wären.

Andere Länder versuchen ebenfalls einen thermischen BLEVE von Straßen- oder Eisenbahntanks zu vermeiden. Nach einem schweren Unfall mit zwei Kesselwagen im Jahr 2000 schlug die norwegische Regierung vor, die Anforderungen betreffend die Sicherheitsventile und die thermischen Isolierungen für solche Tanks zu ändern. Um den BLEVE eines mit entzündbaren Flüssiggasen gefüllten Kesselwagens zu verhindern, erlauben Kanada und die USA den Transport dieser Gase nur in Kesselwagen, die mit einer thermischen Isolierung und einem Druckentlastungsventil versehen sind. Hongkong erlaubt den Transport von Flüssiggas auf der Straße nur in Tankwagen, die mit einer thermischen Isolierung und einem Druckentlastungsventil ausgestattet sind.

Eines der Ziele der niederländischen externen Sicherheitspolitik besteht darin, das gesellschaftliche Risiko sowie die gesellschaftlichen Störungen, die sich aus einem durch den Straßen- und Eisenbahntransport von entzündbaren Flüssiggasen verursachten "heißen" BLEVE ergeben, unter die Richtwerte zu reduzieren. Dieses Ziel kann erreicht werden wenn es gelingt, den "heißen" BLEVE eines Flüssiggas-Tankfahrzeugs oder -Kesselwagens zu vermeiden. Aus diesem Grund besteht das Ziel dieses Dokuments darin:

**Zu bewerten, welche zusätzlichen Maßnahmen ergriffen werden können, um entweder:**

- (i) den BLEVE eines Straßen- oder Eisenbahntanks zu verhindern, wenn dieser der Hitzeausstrahlung eines Feuers infolge eines Unfalls ausgesetzt ist, oder**
- (ii) den Zeitraum bis zum Eintreten eines BLEVE nach dem Beginn der Hitzeaussetzung lange genug zu verzögern, um das Feuer sicher und erfolgreich zu bekämpfen und/oder eine Abkühlung des Tanks durch die Feuerwehr zu ermöglichen.**

## 2. Das BLEVE-Phänomen und dessen Folgen

Das Akronym BLEVE steht für *Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion* (Dampfexplosion nach der Ausdehnung siedender flüssiger Stoffe). Ein BLEVE kann sich nach einem spontanen Aufreißen eines Tanks mit unter Druck stehendem Flüssiggas bilden. Der Ablauf der Ereignisse bei einem BLEVE gestaltet sich wie folgt:

- Aufreißen des Tanks, der zu einem fast sofortigen Freisetzen des Tankinhalts führt (Dauer weniger als 0,1 Sekunden).
- Sofortiges Verdampfen der freigesetzten Flüssigkeit / des freigesetzten Flüssiggases, gefolgt von einer starken Druckwelle (physische Explosion) und Verstreuung von Tankteilen im Umfeld (bis zu 500 Meter vom Unfallort).
- Bildung eines ausgedehnten Feuerballs nach Entzündung der freigesetzten Dampf Wolke.

Es sind zwei Arten von BLEVE zu unterscheiden:

### "Kalter" BLEVE

Auf Grund der einwirkenden Kräfte bei einem Zusammenstoß oder einer Entgleisung kommt es zu einem Aufreißen des Tanks und somit zu einem BLEVE. Ein sofortiges Aufreißen des Tanks kann auch auf Materialfehler zurückzuführen sein, die einen BLEVE zur Folge haben.

### "Heißer" BLEVE

Ein "temperaturverursachter" BLEVE kann eintreten, wenn ein Flüssiggas-Tank einem externen Feuer ausgesetzt ist.

Auf der *Flüssigkeitsseite* (Unterseite) des Tanks wird die Hitze des Feuers über die Stahlwand zur Flüssigkeit übertragen, was zu einer Zunahme der Temperatur dieser Flüssigkeit und demzufolge zu einer Zunahme des Dampfdrucks führt. Die Tankwand in der Nähe des Flüssiggases wird nur eine leicht höhere Temperatur als das Flüssiggas im Tank haben. Der Stahl wird seine ursprüngliche Stärke so lange beibehalten wie er in Kontakt mit der Flüssigkeit im Tank ist. Die Temperatur der Wand auf der *Gasseite* (Oberseite) des Tanks wird jedoch stark zunehmen auf Grund der geringen Hitzeübertragung zum Gas innerhalb des Tanks. Der dem Dampf ausgesetzte Stahl wird seine Stärke bei einer Temperatur von mehr als 450-550 °C verlieren. Der Dampfdruck wird auf Grund der Temperaturerhöhung der Flüssigkeit zunehmen. Bei Propan z.B. wird der Dampfdruck 19 bar bei 55 °C betragen. Der Tank kann diesem Dampfdruck standhalten. Wenn jedoch die Temperatur des Stahls auf der Gasseite des Tanks 450-550 °C übersteigt, wird der Stahl seine Integrität verlieren und der Tank wird reißen. Der Ansprechpunkt des Druckentlastungsventils ist bei niederländischen Tankfahrzeugen in der Regel auf 23 bis 27 bar eingestellt, abhängig von dem für andere Gase oder Gasgemische als Propan vorgeschriebenen Prüfdruck des Tanks.

Die Folgen eines kalten und eines "heißen" BLEVE sind in Tabelle 1 dargestellt. Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, dass die Folgen eines "heißen" BLEVE schwerwiegender als jene eines kalten BLEVE sind. Auf Grund der größeren Entfernungen, in denen Auswirkungen auftreten können, überragt der "heiße" BLEVE die hohen gesellschaftlichen Risiken entlang der Transportwege in den Niederlanden und in der Nähe von Tankstellen. Daher konzentriert sich dieses Dokument auf Maßnahmen zur Verhinderung eines "heißen" BLEVE.

Tabelle 1 Folgen der Hitzeeinstrahlung und der Druckwelle beim BLEVE eines mit Propan gefüllten Straßen- oder Eisenbahntanks

Folgen eines BLEVE	Maximalentfernung für die Auswirkungen in Metern			
	Tankfahrzeug (60 m <sup>3</sup> )		Kesselwagen (110 m <sup>3</sup> )	
	"kalter" BLEVE	"heißer" BLEVE	"kalter" BLEVE	"heißer" BLEVE
Einsturz von Gebäuden	35	50	40	55
schwere Schäden an Gebäuden	50	70	60	85
100 % Todesfälle	90	150	110	190
Gebäudebrände	200	270	250	350
1 % Todesfälle	220	310	310	410
Verbrennungen 1. Grades, Bers- ten von Fenstern	400	500	500	700

### 3. Unfallkasuistik und Tests

#### 3.1 Kasuistik von Straßen- und Eisenbahntransporten von Flüssiggas

TNO hat in Datenbanken über Unfälle mit gefährlichen Stoffen (FACTS, MIDAS und BARPI) nach Unfällen mit Straßen- und Eisenbahntanks für die Beförderung von Flüssiggasen geforscht. Die Unfalldaten dieser Datenbanken stammen aus Unfalluntersuchungen, wissenschaftlichen Zeitschriften, Magazinen und Zeitungen. Schätzungsweise 90 % der größeren Unfälle mit Flüssiggas in Nordamerika und Westeuropa (A, CH, D, DK, E, F, GB, N, NL, S) sind in den Datenbanken aufgenommen. Für andere Teile der Welt ist die Abdeckung nicht so gut. Nur ein geringer Teil der Zwischenfälle mit Tankfahrzeugen und Kesselwagen für die Beförderung von Flüssiggas, bei denen es zu keinem oder nur geringfügigem Austritt von Flüssiggas kommt, sind in den Datenbanken aufgeführt.

Die Tabelle 2 liefert einen Überblick über die aufgenommenen Unfälle in den Jahren von 1950 bis 2004. Auf Grund der unvollständigen Abdeckung und der unbekanntenen Anzahl an transportierten Tonnen-Kilometern sind die in Tabelle 2 aufgeführten Daten nicht dazu geeignet, eine BLEVE-Häufigkeit abzuleiten.

Tabelle 2: Überblick über BLEVE und sonstige Zwischenfälle mit Flüssiggas (ohne oder mit geringfügigem Austritt von Flüssiggas) während des Transports, dem Be- oder Entladen im Zeitraum zwischen 1950 und 2004. Die Tabelle zeigt für Eisenbahnwagen die Anzahl von Unfällen mit einem BLEVE, wobei bei den meisten dieser Unfälle mehrere BLEVE benachbarter Eisenbahnwagen folgten.

	Europa		Rest der Welt (hauptsächlich USA / Kanada)	
	# Unfälle	# Todesfälle / #Verletzte	# Unfälle	# Todesfälle / #Verletzte
Schiene	1 BLEVE 29 sonstige Zwischenfälle	13/185	20 BLEVE 22 sonstige Zwischenfälle	105/2155
Straße	8 BLEVE 38 sonstige Zwischenfälle	286/283	5 BLEVE 23 sonstige Zwischenfälle	156/621

Die Anzahl an BLEVE bei Eisenbahntransporten in Kanada und den USA scheint im Vergleich zu Europa hoch zu sein. Im Gegensatz zu Europa verfügen die Flüssiggas-Kesselwagen in Kanada und den USA nicht über einen Tragrahmen. Die Mehrzahl der Flüssiggas-BLEVE bei Eisenbahntransporten in den USA und Kanada ereigneten sich zwischen 1965 und 1980. Seit 1980 wurde der Wagenbau verbessert und die Kesselwagen mit einer hitzeresistenten Isolierung versehen.

### **Untersuchung von BLEVE-Unfällen**

Die Untersuchung der gemeldeten BLEVE ergibt Folgendes:

- Bei Straßentransporten sind 50 % der Fälle "kalte" BLEVE und 50 % "heiße" BLEVE.
- Eine Untersuchung der sonstigen Zwischenfälle (jene mit keinem oder geringfügigem Austritt von Flüssiggas) zeigt, dass auch 50 % der sonstigen Zwischenfälle unter ungünstigeren Bedingungen zu einem "kalten" BLEVE und 50 % zu einem "heißen" BLEVE hätten führen können.
- Bezüglich der Eisenbahntransporte ist festzustellen, dass ungefähr 70-80 % der BLEVE (hauptsächlich in Nordamerika) "heiße" BLEVE waren. Eine beträchtliche Anzahl der BLEVE ereignete sich mit Tanks, die mit einem Druckentlastungsventil (in Nordamerika vorgeschrieben) ausgerüstet waren.
- In einigen Fällen ist es der Feuerwehr gelungen, einen BLEVE zu verhindern, indem der Tank gekühlt und das Feuer gelöscht wurde.

### **Größere und kleinere Brandtests mit Flüssiggas-Tanks**

Um das BLEVE-Phänomen zu ergründen und um festzustellen, ob die Tanks vor einem "heißen" BLEVE geschützt werden können, haben die BAM, die Queens University und TNO Brandtests mit Tanks durchgeführt, die mit Flüssiggas gefüllt waren (Füllhöhe von 20 bis 90 %). Diese Tests erfolgten sowohl auf kleiner Ebene (Flaschenvolumen 0,06-1 m<sup>3</sup>) als auch auf großer Ebene (Tankvolumen 4-120 m<sup>3</sup>). Aus diesen Tests ergaben sich die folgenden Schlussfolgerungen:

- Die begrenzte Hitzeübertragung an der Tankwand in der Dampfphase führt zu einer starken Zunahme der Wandtemperatur. Bei einer Temperatur von mehr als 500 °C nimmt die Stahlfestigkeit rapide ab. Starke Temperaturerhöhungen führen zu einer zusätzlichen Belastung. Sämtliche Tests zeigen Wandtemperaturen von ca. 550 °C zum Zeitpunkt des BLEVE. Der Tankdruck zum Zeitpunkt des Aufreißens beträgt 15-30 bar.
- Ein Druckentlastungsventil verhindert nicht immer einen BLEVE. Auf Grund der Temperaturerhöhung des Stahls bis zu 550 °C auf der Dampfseite des Tanks verliert der Stahl seine Integrität und kann dem eingestellten Druck des Druckentlastungsventils (15-25 bar) nicht länger standhalten.
- BLEVE ereignen sich bei Tanks mit unterschiedlichen Füllungsgraden (22 % - 100 %).
- Die Zeit bis zum Eintreten BLEVE (Zeit vom Ausbruch des Feuers bis zum Eintreten des BLEVE) ist sehr unterschiedlich. Der BLEVE kann sich innerhalb einer Zeit von 5 Minuten (Flasche mit einem Fassungsraum von 60 l) bis 25 Minuten (Tank mit einem Fassungsraum von 45 m<sup>3</sup>) nach Ausbruch des Feuers ereignen.

### **Schlussfolgerungen aus der Kasuistik und den Brandtests**

"Heiße" BLEVE ereigneten sich während des Straßen- oder Eisenbahntransports von Flüssiggas. Die Kasuistik und Tests zeigen, dass ein Druckentlastungsventil einen BLEVE nicht immer verhindert. Die Kasuistik und die Brandtests zeigen, dass bei einem Tank, der einem Feuer ausgesetzt ist, der BLEVE nach 5 bis 25 Minuten eintritt.

#### 4. BLEVE-Verzögerungszeit für eine sichere Brandbekämpfung

Ziel dieses Dokumentes ist es zu prüfen, ob zusätzliche Maßnahmen den BLEVE eines Straßen- oder Eisenbahntanks verhindern oder verzögern können, wenn dieser der Hitzeausstrahlung eines Feuers infolge eines Unfalls ausgesetzt ist. In diesem Kapitel wird untersucht, wie viel Zeit die Feuerwehr benötigt wird, um einen BLEVE durch eine sichere Abkühlung des Tanks mit Wasser zu verzögern. Die Kasuistik und die Tests zeigen, dass sich bei einem ungeschützten Tank ein "heißer" BLEVE innerhalb von 25 Minuten ereignet. In den meisten Fällen wird die Feuerwehr mehr Zeit benötigen, um den Unfallort zu erreichen und mit der Tankabkühlung mit Wasser zu beginnen.

Um den BLEVE eines Straßen- oder Eisenbahntanks zu verhindern, ist eine Wassermenge von 10 Litern pro Quadratmeter abzukühlender Fläche erforderlich. Daraus ergeben sich die folgenden erforderlichen Wassermengen zur Abkühlung und zum Löschen:

*Tabelle 3 Erforderliche Wassermenge und Löschfahrzeuge zur Brandbekämpfung und Abkühlung sowie erforderliche Unterstützungsfahrzeuge zur Wasserbereitstellung, wenn dieses am Unfallort nicht verfügbar ist*

Transport	Kühlfläche [m <sup>2</sup> ]	Wassermenge [m <sup>3</sup> /Minute]	Anzahl erforderlicher Fahrzeuge	
			Brandbekämpfung + Abkühlung	Einheiten zur Wasserversorgung
Tankfahrzeug	100	1	1-2	4-8
Kesselwagen	600 <sup>1</sup>	6	3-4	8-24

Eine Bekämpfung des Feuers durch die Feuerwehr ist nur dann möglich, wenn diese über ausreichend Zeit verfügt, um den Unfallort zu erreichen, und danach sicher arbeiten kann, d.h., dass sie während ihres Einsatzes nicht der Gefahr eines BLEVE ausgesetzt ist. Aus diesem Grunde wurde die Reaktionszeit (Zeit zwischen dem Ausbruch des Feuers und dem Beginn der Brandbekämpfung und der Tankabkühlung) festgelegt.

Bei der Brandbekämpfung können folgende Schritte unterschieden werden:

1. Alarmierung der Feuerwehr
2. Zeit bis zum Erreichen des Unfallortes
3. Zeit bis zum Beginn der Brandbekämpfung und der Tankabkühlung, einschließlich der erforderlichen Zeit zur Bereitstellung des Wasserflusses (Tabelle 3), wenn in einem Umkreis von 160 m um den Unfallort nicht genügend Wasser verfügbar ist.

Die für Schritt 2 benötigte Zeit hängt von der Entfernung zwischen dem Feuerwehrstützpunkt und dem Unfallort ab. Aus diesem Grund wurden verschiedene Unfallorte untersucht. Die für Schritt 3 benötigte Zeit hängt davon ab, ob genügend Wasser in einem Umkreis von 160 m um den Unfallort verfügbar ist. Die Reaktionszeiten, einschließlich der für eine Wasserversorgung aus einer Entfernung von 2,5 km erforderlichen Zeit, sind in Tabelle 4 dargestellt.

*Tabelle 4 Reaktionszeit der Feuerwehr für eine erfolgreiche Verhinderung eines BLEVE, einschließlich der für eine Wasserversorgung aus einer Entfernung von 2,5 km erforderlichen Zeit*

Unfallort	Reaktionszeit der Feuerwehr in Minuten	
	Tankfahrzeug	Kesselwagen
Stadtmitte, Stadtgebiet, Industriegebiet	45	105
Ländliches Gebiet	75	105
Autobahn mit Mehrfachunfall und versperrtem Zugang für die Feuerwehr	75	-

<sup>1</sup> Es können auch mehrere Wagen dem Feuer ausgesetzt sein.

## Schlussfolgerung

Um einen BLEVE endgültig zu verhindern, müssen die zusätzlichen Maßnahmen am Tankfahrzeug die Zeit bis zum BLEVE um 75 und am Kesselwagen um 105 Minuten verzögern.

## 5. Verhinderung eines BLEVE

Dieses Kapitel beschreibt die Ergebnisse einer Literaturrecherche und zusätzlicher Befragungen, um dem Stand der Technik entsprechende Maßnahmen zur Verhinderung eines "heißen" BLEVE zu bestimmen und zu bewerten.

### 5.1 Druckentlastungsventile

Die Erhitzung des verflüssigten Gases durch das Feuer führt zu einer Zunahme des Dampfdrucks. Theoretisch kann der Dampfdruck den höchstzulässigen Betriebsdruck des Tanks übersteigen. Ein Druckentlastungsventil kann dies verhindern, indem es den Dampf in die Atmosphäre ablässt. Auf Grund des Dampfablassens und der Verdunstung der Flüssigkeit nimmt die Temperatur im Tank ab.

Die Kapazität eines Druckentlastungsventils sollte auf der maximalen Dampfentstehung bei einem Beckenfeuer basieren. Thermisch geschützte UN-Tanks dürfen über ein Druckentlastungsventil mit einer Kapazität von 25 % der für ungeschützte Tanks geforderten Kapazität verfügen (siehe Absatz 6.7.3.8.1.1 RID/ADR).

Die Queens University hat 136 Druckentlastungsventile unter verschiedenen Bedingungen getestet. Diese Tests haben Folgendes ergeben:

- Die Merkmale der Druckentlastungsventile weisen bedeutende Unterschiede auf. Viele Druckentlastungsventile erfüllen ihre Anforderungen nicht einmal während des Tests.
- Ein breiter Austritt über das Druckentlastungsventil verzögerte das Versagen des Tanks und führt zu einer geringeren Masse und Energie im Tank zum Zeitpunkt des Versagens.
- Heiße Austrittsdämpfe und hohe Umgebungstemperaturen erhitzen das Druckentlastungsventil selbst und führen zu einem "Weichwerden der Federn"; der Öffnungsdruck nimmt ab und der Zyklus geht zu niedrigeren Drücken über (15-20 bar gegenüber 20-25 bar).

Ein aktiviertes Druckentlastungsventil lässt den Flüssiggasdampf mit Gewalt ab. Obwohl das umgebende Feuer zu einer Entzündung des abgelassenen Dampfes führt und sofort eine Fackel bildet, ist die zusätzliche Hitzeausstrahlung auf die Tankwand sehr begrenzt. Videoaufnahmen der deutschen BAM zeigen, dass der durch das Druckentlastungsventil freigesetzte Gasstrom in einer Entfernung von 3-5 Metern vom Tank entzündet wird. Dies lässt sich durch die Tatsache erklären, dass der konzentrierte Flüssiggasdampf zuerst verdünnt werden muss, um eine Konzentration zu erreichen, die über dem oberen Explosionsgrenzwert liegt.

TNO-Feldversuche mit automatischen Flüssiggas-Druckfässern zeigen, dass nach der Aktivierung des Druckentlastungsventils die Temperatur der Tankwand (auf der Seite der Dampfphase) stark verringert wird. Der Kühleffekt ist in der Nähe des Druckentlastungsventils am stärksten. Dies ist der Grund, warum zahlreiche Tanks auf der dem Druckentlastungsventil gegenüberliegenden Seite versagen.

### Schlussfolgerung zu den Druckentlastungsventilen

- Das Flüssiggas im Tank und die Tankwand werden gekühlt, indem oberhalb des Ansprechdrucks des Druckentlastungsventils Flüssiggasdampf freigesetzt wird. In einigen Fällen wird ein BLEVE dadurch verhindert, dass das gesamte Flüssiggas freigesetzt wird, bevor die Temperatur der Stahlwand den kritischen Wert überschreitet.

- Die Kasuistik und die Tests zeigen, dass in vielen Fällen die Druckentlastungsventile einen "heißen" BLEVE nicht verhindern, da das gesamte Flüssiggas nicht vor dem Erreichen des für die Tankwand kritischen Wertes freigesetzt wird.
- In den Fällen, in denen ein Druckentlastungsventil einen BLEVE nicht verhindern kann, wird der Zeitraum bis zum BLEVE hinausgezögert. Dieser Zeitgewinn ist jedoch weitaus geringer als die für das sichere Abkühlen und das Löschen des Feuers benötigte Zeit (Tabelle 4).

## 5.2 Thermischer Schutz

Die Hauptursache für einen "heißen" BLEVE besteht in der Erhitzung der Stahlwand auf der Seite der Dampfphase des Tanks auf Temperaturen von mehr als 550 °C. Eine thermische Isolierung des Tanks kann eine zu starke Erhitzung der Tankwand bei einem Feuer hinauszögern. Dadurch erhält die Feuerwehr genügend Zeit, um den Unfallort zu erreichen und den Flüssiggas-Tank zu kühlen und somit einen BLEVE zu verhindern, das Feuer zu löschen oder die Menschen in der Nähe des Unfallortes zu evakuieren.

Nach einer Reihe schwerer BLEVE-Unfälle haben die Unfallbehörden in Kanada und den USA beschlossen, die Eisenbahntanks für die Beförderung von Flüssiggas zu isolieren. Diese Kesselwagen müssen auch mit einem Druckentlastungsventil ausgerüstet sein. In Kanada und den USA soll die thermische Isolierung eine Erhitzung der Stahl-Tankwand auf Temperaturen von mehr als 427 °C für eine Dauer von 100 Minuten bei einem Beckenfeuer und für eine Dauer von 30 Minuten bei einem Fackelfeuer verhindern. Das Druckentlastungsventil soll verhindern, dass der Druck im Tank auf über 17 bar ansteigt. Wenn der Dampfdruck darüber hinaus ansteigt, lässt das Druckentlastungsventil Flüssiggasdampf frei. Die Temperatur des Flüssiggases wird auf Grund der Verdunstung sinken. Die Kombination von thermischer Isolierung und einem Druckentlastungsventil erhöht den Schutz vor einem "heißen" BLEVE. Eine Kombination aus thermischer Isolierung und Druckentlastungsventil ist jedoch nicht zwingend erforderlich. Eine thermische Isolierung ist ausreichend, wenn sie eine übermäßige Hitzeentwicklung des Tanks für eine ausreichend lange Zeit verhindert, die es der Feuerwehr ermöglicht, den Tank abzukühlen und das Feuer zu löschen.

In Kanada wurde ein Forschungsprogramm über Hitzeschutzsysteme (hauptsächlich 13 mm Mineralwolle-Isolierung unter einer 3 mm dicken Stahlwand) an Kesselwagen durchgeführt.

Folgende Schlussfolgerungen ergeben sich aus diesem Forschungsprogramm:

- Die üblichen Hitzeschutzsysteme sind mehr als ausreichend, um einen Tank für eine Dauer von 100 Minuten bei einem Beckenfeuer und für eine Dauer von 30 Minuten bei einem Fackelfeuer zu schützen.
- Nach einem 100-minütigen Beckenfeuer liegt der maximale Tankdruck (17 bar mit Druckentlastungsventil und 100 % thermischen Schutz) deutlich unter dem theoretischen Berstdruck von 52 bar.
- Die thermische Isolierung muss 100 % des Tanks und seiner Verbindungen abdecken; eine Isolierungslücke von nur 40 x 40 cm wird einen Großteil der Schutzwirkung des Systems als Ganzes zerstören.

Das Verkehrsministerium der USA unterhält eine Liste mit zugelassenen thermischen Schutzsystemen. Die Zulassung erfolgt gemäß einem vorgeschriebenen Protokoll. Der Test sieht die Simulation eines 100-minütigen Beckenfeuers / 30-minütigen Fackelfeuers vor. Gegenwärtig befinden sich ca. 10 Hersteller mit insgesamt 20-30 verschiedenen Anwendungen auf der Liste. Eine Methode zur Prüfung der Qualität der thermischen Isolierung wurde veröffentlicht.

Seit der Anwendung einer thermischen Isolierung in den frühen 1980er Jahren ist die Anzahl der BLEVE in Nordamerika praktisch bis auf Null zurückgegangen. Vor kurzem haben sich jedoch einige BLEVE mit Eisenbahnkesselwagen ereignet. 1999 ereignete sich ein Kesselwagen-BLEVE in Britt, Ontario, und 2003 ein Unfall mit einem mehrfachen BLEVE (vier Kesselwagen) in Melrose, Ontario. Bei dem Unfall in Britt führte die Entgleisung eines mit einer thermischen Isolierung versehenen Kesselwagens zu einem Feuer und nach 37 Minuten zu einem BLEVE. Nachfolgende



Untersuchungen ergaben, dass sich das spezifische thermische Isolierungssystem mit der Zeit verschlechtern kann.

In Hongkong sind Flüssiggas-Tankfahrzeuge mit einem 7 mm dicken Epoxy-Mantel ausgestattet, um einem 60-minütigen Beckenfeuer oder einem 30-minütigen Fackelfeuer standzuhalten. Die Kosten für einen hitzebeständigen Epoxy-Mantel belaufen sich auf ca. 30'000 Euro für ein Tankfahrzeug mit einem Fassungsraum von 60 m<sup>3</sup>.

### **Schlussfolgerungen:**

- In den USA, Kanada und Hongkong werden seit Jahren thermische Isolierungssysteme in Verbindung mit einem Druckentlastungsventil für Flüssiggas-Tanks verwendet. Die thermische Isolierung ist eine erwiesene Technologie zur Vermeidung von hohen Wandtemperaturen auf der Seite der Dampfphase des Tanks, wodurch die Zeit bis zum Eintreten des BLEVE so verlängert wird, dass die Feuerwehr den Tank abkühlen oder das Feuer löschen kann.
- Die Kombination von thermischer Isolierung mit einem Druckentlastungsventil bietet einen ausreichenden Schutz vor einem "heißen" BLEVE.
- Eine Kombination aus thermischer Isolierung und Druckentlastungsventil ist nicht zwingend erforderlich. Eine thermische Isolierung des Tanks ist ausreichend. Diese kann zu einer Verzögerung des BLEVE gemäß Tabelle führen.
- Die Kosten eines Epoxy-Mantels für ein Tankfahrzeug mit einem Fassungsraum von 60 m<sup>3</sup> werden auf 30'000 Euro geschätzt. Für einen Kesselwagen mit einem Fassungsraum von 110 m<sup>3</sup> werden die Kosten um etwa 50 % höher veranschlagt.
- Die höchstzulässigen Fahrzeugmaße können die Anwendung von thermischen Isolierungen auf bestehende Tanks einschränken, da die Isolierungsschicht den Tankdurchmesser erhöht. Die Isolierung verringert auch die Nutzlast um 1 bis 5 %.
- Es sollten regelmäßige Prüfungen durchgeführt werden, um Mängel in der thermischen Isolierungsschicht festzustellen. Eine vor dem Feuer erfolgte Entgleisung oder Zusammenstoß kann zu Mängeln in der thermischen Isolierungsschicht führen.

### **5.3 Leitungskühlung**

Eine zusätzliche Leitungskühlung der Tankwand auf der Dampfseite durch einen Hitzetransfer von der Tankwand zum Flüssiggas kann vorgenommen werden, um eine Temperaturzunahme der Tankwand über die kritische Temperatur hinaus zu vermeiden. Dies kann erfolgen durch:

- ein Netz aus Metalllegierung, das im gesamten Tankvolumen ausgelegt wird und die Hitze gleichmäßig verteilt und somit eine Überhitzung der Tankwände und Temperaturunterschiede verhindert;
- eine vollständige Füllung des Tanks mit durchlässigen Kugeln aus Metalllegierung.

Diese Maßnahme ist nur wirksam, wenn das Netz oder die Kugeln aus Metalllegierung in engem Kontakt mit der Wand und dem Flüssiggas sind, so dass sie als hitzeleitendes Medium wirken können. Eine Grundbedingung ist jedoch, dass Transportvibrationen, Zusammenstöße, ein Umkippen oder eine Entgleisung den Kontaktbereich zwischen der Tankwand und den hitzeleitenden Kugeln oder Netzen nicht verringern. Eine ausreichende zusätzliche Leitungskühlung in Kombination mit einem Druckentlastungsventil verhindert theoretisch einen "heißen" BLEVE.

Produkte zur Herstellung des erforderlichen Hitzetransfers von der Tankwand zum Flüssiggas sind im Handel erhältlich. Auf Grund des Gewichtes der Netze oder Kugeln verringert sich die Nutzlast um 2 %. Die kommerziellen Produkte wurden in Feuer tests geprüft. Die meisten Tests erfolgten an Kesselwagen für die Beförderung entzündbarer flüssiger Stoffe (Benzin, Kerosin). Videoaufnahmen dieser Tests mit Haushaltspropanflaschen zeigen, dass bei Flaschen, die mit durchlässigen Kugeln aus Metalllegierung gefüllt sind, kein BLEVE eintritt. Es wurde über Feuer tests mit Flüssig-

gas-Druckfässern berichtet<sup>2</sup>, die mit einem Druckentlastungsventil ausgerüstet und auf unterschiedliche Weise mit Netzen aus Metalllegierungen gefüllt waren. Bei diesen Feuer tests kam es bei den Druckgefäßen zu keinem BLEVE, da das Flüssiggas freigesetzt wurde, bevor die Druckgefäßwand die kritische Temperatur erreichte. Bei diesen Tests war die Branddauer relativ kurz (15 Minuten). TNO ist der Meinung, dass diese Tests für einen Nachweis nicht ausreichen, dass es bei einem Tank mit einem Fassungsraum von 60 m<sup>3</sup> oder 110 m<sup>3</sup> zu keinem BLEVE kommen kann.

Es wurden keine Tests im Maßstab 1:1 durchgeführt, aus denen hervorgeht, dass eine Leitungskühlung durch Vibrationen beim Transport nicht beeinträchtigt wird.

## Schlussfolgerung

Eine ausreichende zusätzliche Leitungskühlung in Verbindung mit einem Druckentlastungsventil verhindert theoretisch einen "heißen" BLEVE. Es handelt sich jedoch nicht um eine nachgewiesene Technologie zur Verhinderung eines "heißen" BLEVE bei einem Flüssiggas-Tankfahrzeug oder -Kesselwagen, da bisher noch keine Feuer tests im Maßstab 1:1 durchgeführt wurden. Es wurde auch noch nicht nachgewiesen, dass Vibrationen beim Transport die Leitungskühlung nicht beeinträchtigen.

## 5.4 Flüssigkeitskühlung

Ein System zur Kühlung von Flüssiggas-Tanks wurde patentiert. Die Idee besteht darin, die Energie eines abblasenden Druckentlastungsventils für den Antrieb einer Turbopumpe zu verwenden, die Flüssigkeit auf die innere Oberseite des Tanks sprüht. Das gesamte System ist auf der Innenseite des Flüssiggas-Tanks angebracht. Lediglich die Entlüftungsleitung verfügt über einen Außenanschluss. Um in einem frühen Stadium der Brandbelastung eine Strömung für den Antrieb der Turbopumpe und die nachfolgende Kühlung der oberen Tankwand zu erzeugen, muss der Ansprechpunkt des Druckentlastungsventils auf einen sehr niedrigen Druck eingestellt sein.

Für TNO ist diese Technologie technisch machbar, jedoch noch nicht in Feldversuchen nachgewiesen. Ein Nachteil besteht darin, dass das System nur dann funktioniert, wenn sich der Tank in aufrechter Position befindet. Darüber hinaus kann sie nicht als bewährte oder dem Stand der Technik entsprechende Technologie bezeichnet werden. Außerdem ist es eine kostspielige Lösung. Mängel im Sprühsystem können auch die Funktionsfähigkeit des Systems beeinträchtigen.

## 5.5 Einordnung der Maßnahmen zum Schutz vor einem "heißen" BLEVE

Die Maßnahmen zur Verhinderung eines BLEVE wurden nach verschiedenen Kriterien eingeordnet. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

### Einordnung der Maßnahmen zur Verhinderung eines BLEVE

	<b>bewährte Technologie</b>	<b>Wirksamkeit um einen BLEVE zu vermeiden / hinauszuzögern</b>	<b>Zuverlässigkeit</b>	<b>Nutzlast</b>	<b>Prüfbarkeit</b>	<b>Kosten</b>
Druckentlastungsventil	ja	gering	gering	0	schwierig	geringe
thermische Isolierung	ja	hoch	hoch	-2 %	gut	beträchtlich
thermische Isolierung und Druckentlastungsventil	ja	sehr hoch	hoch	-2 %	gut	beträchtlich

<sup>2</sup> Der Name des Verfassers (der Verfasser), des Testinstituts sowie das Datum dieser Tests sind im Bericht nicht angegeben.

	<b>bewährte Technologie</b>	<b>Wirksamkeit um einen BLEVE zu vermeiden / hinauszuögern</b>	<b>Zuverlässigkeit</b>	<b>Nutzlast</b>	<b>Prüfbarkeit</b>	<b>Kosten</b>
Leitungskühlung und Druckentlastungsventil	nein	?	?	-2 %	schwierig	beträchtlich
Flüssigkeitskühlung	nein	?	?	?	?	beträchtlich

Aus Tabelle 5 kann geschlossen werden, dass nur eine thermische Isolierung sowie eine thermische Isolierung in Kombination mit einem Druckentlastungsventil nachgewiesene Maßnahmen darstellen, die einen "heißen" BLEVE zuverlässig verhindern oder die Zeit bis zum Eintreten des BLEVE bedeutend hinauszögern. Die Feuerwehr sollte den Tank abkühlen und das Feuer löschen, um einen "heißen" BLEVE definitiv zu vermeiden. Bestehende Tankfahrzeuge und Kesselwagen können mit Druckentlastungsventilen und einer thermischen Isolierung nachgerüstet werden, wobei die Nutzlast um höchstens 2 % verringert wird.

Ein an einem Flüssiggas-Tankfahrzeug oder -Kesselwagen angebrachtes Druckentlastungsventil stellt alleine keine zuverlässige Schutzmaßnahme vor einem "heißen" BLEVE dar.

## **6. Vorschriften**

### **6.1 Europa**

#### **Eisenbahntransporte**

In den frühen 80er Jahren hat die RID/ADR-Arbeitsgruppe für Druckentlastungsventile über die Notwendigkeit beraten, Flüssiggas-Kesselwagen mit einem Druckentlastungsventil auszurüsten. In den Niederlanden wurde ebenfalls ein entsprechendes Forschungsvorhaben durchgeführt. Da zu dieser Zeit keine Forschungsergebnisse verfügbar waren, wurde beschlossen, die Verwendung von Druckentlastungsventilen bei Kesselwagen nicht zwingend vorzuschreiben. Gegenwärtig stellt sich die Situation betreffend die Verwendung von Druckentlastungsventilen in Europa wie folgt dar:

- In GB müssen Flüssiggas-Kesselwagen seit 1985 mit einem Druckentlastungsventil ausgerüstet sein.
- Im Rahmen des RID/ADR beantragte Norwegen im September 2005, Kesselwagen für die Beförderung von flüssigen entzündlichen Gasen mit "Sicherheitsventilen" auszurüsten.
- Weder in der EU noch in den USA/Kanada sind Druckentlastungsventile bei Tanks für die Beförderung verflüssigter giftiger Gase zugelassen.
- Druckentlastungsventile sind für UN-Tanks für die Beförderung von Flüssiggas vorgeschrieben (siehe Absatz 6.7.3.7.1 RID/ADR).
- Für Flüssiggas-Transporte auf See sind Druckentlastungsventile vorgeschrieben.

#### **Straßentransport**

In den Niederlanden wurde vereinbart, dass Tankfahrzeuge, mit denen Flüssiggas-Tankstellen beliefert werden, mit einem Druckentlastungsventil ausgerüstet sein sollten. Im Juni 2005 wurde vereinbart, dass diese Tankfahrzeuge ab 1. Januar 2010 über einen zusätzlichen Schutz zur Verhinderung eines BLEVE verfügen sollten.

## 6.2 Kanada und USA

### Eisenbahntransport

Seit Mitte der 1970er Jahre sind in Kanada und den USA Kesselwagen, die verflüssigte entzündbare Gase befördern, mit einem Druckentlastungsventil ausgerüstet. Ein thermisches Schutzsystem ist ebenfalls vorgeschrieben. Die Anforderungen und Kriterien für die Anbringung einer thermischen Isolierung an Kesselwagen für die Beförderung von verflüssigten entzündbaren Gasen wurden in Kanada (Canadian General Standards Board CAN/CGSB-43.147-2005) und in den USA (CFR 49 Part 179 "Specifications for Tank Wagons") gesetzlich geregelt.

Die gleiche Norm (Teil II, Abschnitt B, Abschnitt 73.31) schreibt vor, dass thermische Isolierungssysteme über einen ausreichenden thermischen Widerstand verfügen müssen, um einem Beckenfeuer für eine Dauer von 100 Minuten und einem Fackelfeuer für eine Dauer von 30 Minuten standzuhalten. Schutzsysteme mit einer gesamten thermischen Leitfähigkeit von höchstens  $0,613 \text{ kJ/h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$  werden ohne Validierungstest zugelassen.

### Straßentransport

CFR 49 178.337 verweist auf die Norm MC 331 für Tankfahrzeuge hauptsächlich für die Beförderung von verdichteten Gasen. Ein Druckentlastungsventil, nicht jedoch eine thermische Isolierung ist vorgeschrieben.

## 6.3 Hongkong

### Straßentransport

In Hongkong sind für Flüssiggas-Tankfahrzeuge ein thermische Isolierungssystem sowie ein Druckentlastungsventil vorgeschrieben. Die Anforderungen sehen vor, dass das Tankfahrzeug einem Beckenfeuer für eine Dauer von 100 Minuten und einem Fackelfeuer für eine Dauer von 30 Minuten standhält.

## 7. Schlussfolgerungen

Ein "heißer" BLEVE entsteht durch eine geschwächte Tankwand auf Grund einer örtlichen Überhitzung auf der Seite der Dampfphase (über  $500^\circ\text{C}$ ) durch Hitze- oder Feuereinwirkung. Die Hitzeausstrahlung und die Explosion bei einem BLEVE können schwerwiegende Folgen für die Menschen im Umkreis von 500 Metern (Tankfahrzeug) und 700 Metern (Kesselwagen) um den Unfallort haben. Ein BLEVE kann innerhalb von 25 Minuten, nachdem der Tank dem Feuer ausgesetzt wurde, eintreten. "Heiße" BLEVE während des Transports oder des Entladens eines Tankfahrzeugs führen dazu, dass die Richtwerte für die gesellschaftlichen Risiken bei 25 % aller niederländischen Flüssiggas-Tankstellen und in zahlreichen Städten der Niederlande überschritten werden. Ein Abkühlen des Tanks oder ein Löschen des Feuers ist unmöglich, da sich die Feuerwehr dem Unfallort bis auf etwa 40 Meter annähern muss. Diese Entfernung liegt innerhalb der Zone, in der ein BLEVE 100 % Todesfälle verursacht. Aus diesem Grund zielt die Politik der Niederlande darauf ab, die Risiken eines "heißen" BLEVE zu reduzieren. Kanada und die USA schreiben für Kesselwagen für die Beförderung von verflüssigten entzündbaren Gasen bereits eine vollständige thermische Isolierung sowie Druckentlastungsventile vor. Hongkong schreibt für Flüssiggas-Tankfahrzeuge eine thermische Isolierung sowie ein Druckentlastungsventil vor. Norwegen schlägt ebenfalls vor, zusätzliche Schutzmaßnahmen für Tankfahrzeuge und Kesselwagen vorzuschreiben.

Aus der durchgeführten Untersuchung lässt sich Folgendes schließen:

- Die von der Feuerwehr zur Kühlung des Tanks und Verhinderung eines BLEVE sowie zur Brandbekämpfung benötigte Zeit kann sich bei Tankfahrzeugen bis auf 75 Minuten und bei Kesselwagen bis auf 105 Minuten belaufen.
- Mit einem Druckentlastungsventil kann die Verzögerung eines BLEVE um 75 Minuten nicht erreicht werden.
- Eine thermische Isolierung kann einen BLEVE um mindestens 100 Minuten bei einem Beckenfeuer und um mindestens 30 Minuten bei einem Fackelfeuer hinauszögern. Eine thermische Isolierung stellt ein sehr zuverlässiges Mittel zur Verzögerung eines BLEVE dar. Lediglich Lücken von 0,4 m x 0,4 m oder mehr machen die Isolierung wirkungslos.
- Die Kombination eines Druckentlastungsventils und einer thermischen Isolierung erhöht die Verzögerung eines BLEVE.
- Sowohl beim Druckentlastungsventil als auch bei der thermischen Isolierung ist eine zusätzliche Bekämpfung des Feuers und eine Kühlung des Tanks erforderlich, um einen BLEVE endgültig zu verhindern.
- Neue Maßnahmen wie eine verbesserte interne Leitungskühlung des Tanks durch Netze oder Kugeln aus Metalllegierung oder eine verbesserte interne Zirkulation des Flüssiggases sind noch nicht nachgewiesen.

Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse wird empfohlen, für Flüssiggas-Tankfahrzeuge und –Kesselwagen zusätzliche Maßnahmen vorzusehen, um den BLEVE bei einem Tankfahrzeug um 75 Minuten und bei einem Kesselwagen um 105 Minuten hinauszuzögern. Dadurch wird eine sichere Brandbekämpfung und eine Kühlung des Tanks möglich.

Die gegenwärtigen Erfahrungen zeigen, dass eine thermische Isolierung des Tanks den erforderlichen Schutz bieten kann. Die Kombination einer thermischen Isolierung mit einem Druckentlastungsventil bietet jedoch eine höhere Zuverlässigkeit.

---