

De effectiviteit van explosie- werend glas bij incidenten met gevaarlijke stoffen



Instituut Fysieke Veiligheid
Kennisonwikkeling en onderwijs
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
Kemperbergerweg 783, Arnhem
www.ifv.nl
info@ifv.nl
026 355 24 00

Colofon

Instituut Fysieke Veiligheid (2021). *De effectiviteit van explosiewerend glas bij incidenten met gevaarlijke stoffen*. Arnhem: IFV.

Titel: *De effectiviteit van explosiewerend glas bij incidenten met gevaarlijke stoffen*
Datum: 2 juli 2021
Status: Definitief
Versie: 1.0
Auteurs: Ir. drs. I.J.M. Trijssenaar MTD, Dr. M.B. Spoelstra, Dr. Ir J.E.A. Reinders
Projectleider: Ir. drs. I.J.M. Trijssenaar MTD.
Review en eindverantwoordelijk: Dr. ir. N. Rosmuller

Samenvatting

Vanuit het lectoraat Energie- en transportveiligheid van het IFV is het initiatief gekomen om de effectiviteit te onderzoeken van explosiewerend glas in het beperken van de gevolgen van een explosie van een gevaarlijke stof die bij een incident is vrijgekomen. Dit rapport beschrijft de resultaten van dat onderzoek. De onderzoeksvragen die centraal staan, zijn de volgende:

1. Onder welke voorwaarden is het gebruik van explosiewerend glas zinvol bij een explosie van een gevaarlijke stof?
2. Wat is de effectiviteit van explosiewerend glas voor wat betreft het verminderen van het aantal dodelijke slachtoffers?

Hiertoe zijn twee types incidenten beschouwd, te weten een explosie van een tubetrailer met waterstof en een warme BLEVE van een LPG-spoorwagon. Geconcludeerd kan worden dat in beide gevallen explosiewerend glas een effectieve maatregel kan zijn om het aantal slachtoffers in gebouwen te beperken.

Bij een explosie van een waterstofcilinder van een tubetrailer zullen tot op 20 m personen binnen komen te overlijden door instortende gebouwen. Tussen 20 en 40 m kunnen in gebouwen slachtoffers vallen door rondvliegende glasscherven. Met ER1-glas kan het schade- en slachtoffergebied worden teruggebracht van 40 tot 25 m waarbij de afstand waarover slachtoffers vallen als gevolg van glasscherven dus met 75% wordt verkleind. Met ER2-, ER3- of ER4-glas zal deze afstand met 100 % (20 m) worden teruggebracht tot de afstand waarop slachtoffers een gevolg zijn van instortende gebouwen.

Bij een warme BLEVE van een LPG-wagon zal tot op 65 m afstand alle glas breken als gevolg van de hitte en zal explosiewerend glas geen effect hebben. Ter reductie van het aantal slachtoffers kan ER1-glas effectief worden ingezet tussen 65 en 325 m van het incident. Vanaf 325 m zal dubbel glas niet meer breken en is inzet van explosiewerend glas overbodig. Vanaf 590 m zal de BLEVE helemaal geen schade of slachtoffers meer veroorzaken.

Inhoud

	Samenvatting	3
	Inleiding	5
1	Effecten van explosies	8
1.1	Overdruk	8
1.2	Warmtestraling	9
2	Explosiewerend glas	10
2.1	De invloed van overdruk en hittestraling op explosiewerend glas	10
2.2	Soorten explosiewerend glas	10
3	Scenario's	12
3.1	Explosie van tubetrailer met waterstof	12
3.2	Warme BLEVE van spookketelwagen met LPG	15
4	Conclusies en aanbevelingen	20
4.1	Conclusies	20
4.2	Aanbevelingen	20
	Literatuur en overige referenties	21

Inleiding

Achtergrond

Met de komst van de Omgevingswet worden twee soorten gebieden geïntroduceerd, te weten aandachtsgebieden en voorschriftgebieden. Aandachtsgebieden zijn gebieden waar mensen binnenshuis, zonder aanvullende maatregelen, onvoldoende beschermd zijn tegen de gevolgen van ongevallen met gevaarlijke stoffen. Aandachtsgebieden worden van rijkswege aangewezen en vastgelegd in het Register Externe Veiligheid (REV). Er zijn brandaandachtsgebieden, explosieaandachtsgebieden en gifwolkaandachtsgebieden.

Een aandachtsgebied wordt een voorschriftgebied, tenzij het gemeentelijke bevoegd gezag anders beslist. Voorschriftgebieden zijn gebieden waar verplichte bouwkundige maatregelen gelden voor nieuwbouw en voor vervangende nieuwbouw. Voorschriftgebieden kunnen een deel van het aandachtsgebied zijn, of zelfs slechts een individueel gebouw betreffen. Een voorbeeld van een verplichte bouwkundige maatregel is het toepassen van explosiewerend glas (ook wel scherfvrij glas genoemd). De verplichte bouwkundige maatregelen staan beschreven in artikelen 4.91 - 4.96 van het Besluit bouwwerken leefomgeving (Bbl). Voorschriftgebieden worden door het gemeentelijk bevoegd gezag aangewezen en opgenomen in het omgevingsplan van de gemeente.

Door het nemen van maatregelen kunnen mensen binnenshuis beschermd worden tegen de gevolgen van brand, overdruk en inademing van giftige gassen. Het Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl) verplicht het gemeentelijk bevoegd gezag rekening te houden met de kans op overlijden door een ongeval met een gevaarlijke stof en om het treffen van beschermende maatregelen te overwegen (art. 5.15).

Het treffen van maatregelen is uiteraard alleen zinvol als ze effectief zijn. Van veel maatregelen is te verwachten dat ze wel effectief zijn, maar de mate waarin is vaak moeilijk vast te stellen, omdat meerdere factoren hierop van invloed zijn. Voorbeelden van dergelijke factoren zijn de afstand van het gebouw tot de risicobron, de vorm van het gebouw, de ruimtelijke indeling van het gebied tussen het gebouw en de risicobron, alsook de duur en de intensiteit van het ongeval. De verwachte effectiviteit van een maatregel moet dus eigenlijk per situatie bepaald worden, wat niet alleen veel tijd en middelen vraagt, maar ook specialistische kennis.

Vanuit het lectoraat Energie- en transportveiligheid van het IFV is het initiatief gekomen om de effectiviteit van bouwkundige maatregelen te onderzoeken. Aan de hand van de resultaten van een behoeftebepaling bij de veiligheidsregio's is ervoor gekozen te onderzoeken in welke mate explosiewerend glas de gevolgen kan beperken van een explosie van een gevaarlijke stof die bij een incident is vrijgekomen. Dit rapport beschrijft de resultaten van dat onderzoek.

Doel en doelgroep

Het doel van dit onderzoek is het bepalen van de effectiviteit van explosiewerend glas bij een explosie van een gevaarlijke stof die bij een incident is vrijgekomen. De opgedane kennis is relevant voor adviseurs van veiligheidsregio's die veiligheidsrisico's beoordelen en er over adviseren. Zij vormen de primaire doelgroep van dit document, omdat zij het bevoegd gezag adviseren over bevordering van de fysieke veiligheid en gezondheid in de fysieke omgeving en de borging hiervan. Dit rapport kan echter ook gebruikt worden door omgevingsdiensten, bevoegde gezagen en andere belanghebbenden, zoals projectontwikkelaars en gebouweigenaren.

Onderzoeksvragen

De onderzoeksvragen die in dit onderzoek centraal staan zijn:

1. Onder welke voorwaarden is het gebruik van explosiewerend glas zinvol bij een explosie van een gevaarlijke stof?
2. Wat is de effectiviteit van explosiewerend glas voor wat betreft het verminderen van het aantal dodelijke slachtoffers?

Afbakening

Het onderzoek richt zich op de gevolgen van explosies van gevaarlijke stoffen. Explosies van munitie vormen geen onderdeel van het onderzoek. Evenmin wordt rekening gehouden met de effecten van windbelasting op het glas. Verder zijn alleen de eigenschappen van explosiewerend glas zelf beschouwd in dit onderzoek en niet de wijze waarop het glas is aangebracht, alhoewel de wijze waarop het glas in het kozijn is bevestigd en de wijze waarop het kozijn in de gevel van een gebouw is aangebracht ook van invloed zijn op de effectiviteit van explosiewerend glas (AnteaGroep en IFV, 2021).

In het onderzoek zijn twee situaties beschouwd:

- > een explosie van een tubetrailer met waterstof;
- > een warme BLEVE van een LPG-spoorwagon.

Onderzoeksmethode

Om de effectiviteit van de maatregelen te bepalen, zijn de effecten van twee scenario's geanalyseerd. Deze zijn ontleend aan het Scenarioboek Externe Veiligheid. Bij het eerste scenario is uitsluitend overdruk van belang. Hierbij is gekozen voor een explosie van een tubetrailer met waterstof op de weg (SEV, 2020a). Bij het tweede scenario is behalve overdruk ook warmtestraling van belang. Bij dit scenario is gekozen voor een warme BLEVE van een LPG-tankwagon op het spoor (SEV 2020b).

Het onderzoek is uitgevoerd aan de hand van een literatuurstudie en berekeningen om effectafstanden te bepalen. Voor het literatuuronderzoek is gebruik gemaakt van diverse zoektermen waarmee de kennisdatabank van ScienceDirect is doorzocht. De zoektermen bestonden uit combinaties van twee of meer woorden die in de titel of in het abstract van een publicatie moesten voorkomen.

Voorbeelden van gebruikte zoektermen zijn BLAST, EXPLOSION, OVERPRESSURE, GLASS, EFFECT, PROTECTION, BUILDING en WINDOW. Ook variaties op deze woorden zijn gebruikt. Op basis van de titel en/of de abstracts, zijn per onderwerp één of meerdere publicaties geselecteerd om nader bestudeerd te worden.

Omdat de relevantie van veel publicaties die op deze manier werden gevonden vaak beperkt was, is ook met behulp van de 'sneeuwbalmethode' naar publicaties en documenten gezocht. Hierbij zijn bronnen uit relevante artikelen gebruikt om aan nieuwe informatie te komen. Ten slotte zijn publicaties, artikelen en documenten in dit onderzoek meegenomen, die zijn verkregen via contacten en via zoeken op internet met Google Search.

Voor het bepalen van de effectafstanden voor schade en ruitbreuk van diverse soorten glas is gebruikgemaakt van de berekeningen die zijn uitgevoerd voor het *Scenarioboek* en van de modellen die daaraan ten grondslag liggen (SEV 2020a, SEV 2020b, Trijssenaar 2020, IOV 2017).

Leeswijzer

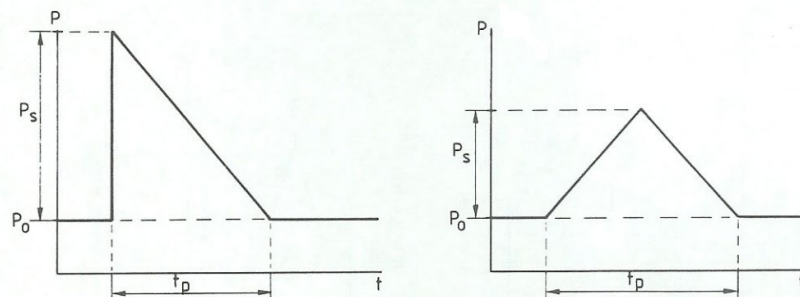
Hoofdstuk 1 beschrijft enkele basisprincipes van explosies en hoofdstuk 2 de eigenschappen van explosiewerend glas en de wijze waarop deze worden bepaald. In hoofdstuk 3 worden de ongevalscenario's behandeld. Hierin wordt ook de invloed die explosiewerend glas heeft op de gevolgen van deze scenario's beschouwd. Hoofdstuk 4 bevat de conclusies en aanbevelingen.

1 Effecten van explosies

Er kunnen twee types explosies worden onderscheiden, te weten fysische explosies en chemische explosies. Bij een fysische explosie bezwijkt een omhulsel als gevolg van de aanwezige inwendige druk. Een voorbeeld hiervan is het knappen van een ballon. Bij een chemische explosie wordt de druk veroorzaakt door een chemische reactie die in zeer korte tijd zeer veel energie genereert (PGS, 2005a). Op de effecten van chemische explosies zal hieronder kort worden ingegaan.

1.1 Overdruk

Een chemische explosie kan omschreven worden als een plotselinge stijging van druk en temperatuur als gevolg van een chemische reactie waarbij warmte wordt gegenereerd (Keller et al, 2013). Door de snelle verbranding ontstaan hete verbrandingsproducten die uitzetten. Deze expansie veroorzaakt overdruk en heeft een impuls. De overdruk P_s is het drukverschil ten opzichte van atmosferische druk P_0 , terwijl de impuls (eenvoudig gesteld) het product is van de overdruk P_s en tijdsduur t_p waarin drukverhoging optreedt¹. Bij een instantane drukverhoging is sprake van een schokgolf. Bij een meer geleidelijke druktoename spreekt men van een drukgolf, zie Figuur 1.1.



Figuur 1.1 Schematische weergave van het druk-tijd verloop voor een schokgolf (links) en een drukgolf (rechts) (bron: PGS, 2005b)²

Chemische explosies zijn te verdelen in deflagraties en detonaties. Een belangrijk verschil tussen een deflagratie en een detonatie is de snelheid waarmee de blast ('overdruk'golf) zich verspreidt. Bij een detonatie is de tijdsduur van de impuls korter dan bij een deflagratie. Deflagraties gaan gepaard met een drukgolf en detonaties met een schokgolf.

Wanneer de blast een obstakel raakt, zal de golf reflecteren tegen het obstakel. Het obstakel wordt daarbij belast met de overdruk van de gereflecteerde golf die hoger is dan de overdruk van de inkomende golf. Voor drukgolven is dit een factor 2 á 3 (PGS, 2005c).

¹ Hoewel de impuls ook van belang is, worden in de literatuur vaak alleen piekoverdrukken vermeld die tot een bepaalde schade leiden (PGS, 2005c). Daarom zal in deze studie ook alleen van piekoverdrukken worden uitgegaan.

² Bij een schokgolf kan na de periode van overdruk sprake zijn van onderdruk ('negatieve druk'). Deze onderdruk is volgens PGS (PGS, 2005c) veelal verwaarloosbaar.

In Tabel 1.1 is weergegeven welke schade en welk letsel binnen een gebouw kunnen ontstaan als gevolg van overdruk.

Tabel 1.1 Grenswaarden voor materiële schade en letsel in een gebouw door overdruk

Schade (PGS, 2005c)	Letsel binnen (RIVM, 2021)	Grenswaarde
(Delen van) gebouwen storten in	100 % letaliteit	> 0,3 bar
Glasscherven, brokstukken	2,5 % letaliteit	0,1 – 0,3 bar
Ruitbreuk dubbel glas	0 % letaliteit	0,02 – 0,1 bar
Ruitbreuk enkel glas	0 % letaliteit	0,01 – 0,1bar

Voor personen in gebouwen kan overdruk op de volgende manieren tot letsel leiden:

- > door het (gedeeltelijk) instorten van het gebouw;
- > door rondvliegende (glas)scherven van ruiten in het gebouw die door de overdruk van de explosie naar binnen worden geblazen;
- > door rondvliegende brokstukken die van buiten naar binnen komen of afkomstig zijn van delen van het gebouw.

In dit rapport wordt met het oog op de maatregel 'explosiewerend glas' alleen gekeken naar letsel als gevolg van ruitbreuk door overdruk en niet door naar binnen geslingerde brokstukken³. Door ruitbreuk ontstaan scherven en kunnen, afhankelijk van de snelheid en de grootte van deze scherven, personen gewond raken of zelfs dodelijk getroffen worden.

1.2 Warmtestraling

Een bijzonder type explosie is de warme BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion). Een warme BLEVE is een fysische explosie van een tank met een tot vloeistof verdicht gas (bijvoorbeeld LPG) als deze aan hitte (brand) wordt blootgesteld. Door de hitte loopt de druk in de tank op en wordt de tank mechanisch verzwakt. Hierdoor kan de tank uiteindelijk bezwijken, met een explosie als gevolg. Door het wegvallen van de druk zal de vloeistof meteen overgaan in de gasfase en daarbij zeer sterk expanderen. De brand doet de expanderende gaswolk ontsteken waardoor een grote wolkbrand ontstaat. Binnenshuis kunnen personen dan letsel oplopen als gevolg van de volgende effecten:

- > hittestraling door (intacte of gesprongen) ruiten;
- > brandoverslag van buiten naar binnen;
- > het bezwijken van gebouwen of constructies.

De (letale) effecten van de warmtestraling van een warme BLEVE reiken verder dan die van de overdruk van de fysische explosie (RIVM, 2017).

³ Brokstukken van buitenaf spelen meestal geen een rol bij het instantaan falen van een druktank. Dit leidt meestal maar tot een paar stukken (twee of drie), in tegenstelling tot een gebouw dat wordt opgeblazen en vanwaar veel stukken puin wegvliegen.

2 Explosiewerend glas

2.1 De invloed van overdruk en hittestraling op explosiewerend glas

De komst van de Omgevingswet brengt een aantal nieuwe regels met zich mee. Eén van die regels betreft artikel 4.96 van het Besluit bouwwerken leefomgeving (Bbl) dat stelt dat “in een explosievoorschriftengebied gelegen beglazing zodanig is, dat bij een explosie letsel door scherfwerking wordt voorkomen”. Het toepassen van explosiewerend glas is dus een maatregel die verplicht wordt gesteld voor nieuwbouw in een explosieaandachtsgebied. Explosiewerend glas kan hogere drukken weerstaan dan dubbel glas. Het toepassen van explosiewerend glas kan derhalve een effectieve maatregel zijn om slachtoffers binnen te voorkomen. Als explosiewerend glas breekt, blijven de scherven of splinters die ontstaan op hun plek door het folie dat zich tussen de glaslagen bevindt.

Naast overdruk kan ook hittestraling een oorzaak zijn voor het breken van glas. Hoewel explosiewerend glas door de opbouw van glascomponenten mogelijk beter bestand is tegen hittestraling, wordt explosiewerend glas hier niet op getest. In dit onderzoek zal er dan ook van worden uitgegaan dat explosiewerend glas dezelfde weerstand heeft tegen hittestraling als dubbel glas.

2.2 Soorten explosiewerend glas

Explosiewerend glas wordt in het algemeen gebruikt om personen in gebouwen te beschermen tegen de effecten van terroristische aanslagen. Explosiewerend glas wordt ingedeeld op basis van de weerstand van het glas tegen de overdruk van een explosie.⁴ De indeling is gebaseerd op detonaties waarbij 1 m² glas in een specifieke setting wordt getest (NEN, 2012). Een ruit valt in classificatie ER1 als deze een gereflecteerde overdruk tussen 0,5 en 1 bar kan weerstaan en in classificatie ER2 als de ruit een gereflecteerde overdruk tussen 1 en 1,5 bar kan weerstaan. De weerstand tegen de maximale overdruk van enkele types explosiewerend glas is weergegeven in de meest rechter kolom van Tabel 2.1. Deze getallen moeten gezien worden als richtwaarden, omdat bij andere afmetingen van het glas en onder andere omstandigheden de explosiewerendheid van het glas anders zal zijn.

Eén van die omstandigheden betreft het type explosie. Explosiewerend glas is bedoeld om detonaties te kunnen weerstaan, maar op basis van artikel 4.96 kan worden vastgesteld dat explosiewerend glas (ook) gebruikt moet kunnen worden om deflagraties te kunnen weerstaan. De impuls van een deflagratie is langer dan de impuls van een detonatie, waardoor de explosiewerendheid van het glas anders kan zijn. Hier is, voor zover bekend, geen onderzoek naar gedaan (AnteaGroup en IFV 2021). In dit rapport zal daarom worden uitgegaan van de informatie met betrekking tot detonaties.

⁴ In NEN-ISO 16933:2007 wordt een tweede gevarenclassificatie voor glas gegeven. Deze classificatie is gebaseerd op het aantal en de grootte van glasfragmenten die ontstaan bij een druktest. Ook de effecten en de locatie van de aangetroffen fragmenten spelen een rol bij de classificatie.

Tabel 2.1 Karakteristieken van enkele types explosiewerend glas (bron: NEN, 2012)

Classificatie ⁵	Maximale inkomende overdruk explosie (bar) ⁶	Maximale overdruk gereflecteerde explosie (bar)
ER1	0,2	0,5 - 1
ER2	0,4	1 - 1,5
ER3	0,6	1,5 - 2
ER4	0,8	2 - 2,5

Bij het doorrekenen van explosies van gevaarlijke stoffen als waterstof en LPG, geven rekenprogramma's als eindresultaat de maximale *inkomende* overdrukken. Explosiewerend glas wordt echter niet ingedeeld aan de hand van inkomende overdrukken, maar aan de hand van *gereflecteerde* overdrukken, zoals hierboven beschreven. Door reflectie neemt namelijk de overdruk op explosiewerend glas toe en deze gereflecteerde druk is zo'n factor 2 à 3 groter dan de inkomende overdruk (PGS, 2005c). In de tweede kolom van Tabel 2.1 is de maximale inkomende overdruk weergegeven, berekend op basis van de gereflecteerde overdrukken in kolom 3.

⁵ ER staat voor Explosion Resistance.

⁶ De maximale inkomende overdruk is bepaald door de minimale waarde van de testrange te delen door de reflectiefactor van 2,5. In dit rapport is ervan uitgegaan dat vanaf deze drukken scherfwerking met potentieel letaal letsel kan optreden.

3 Scenario's

De effectiviteit van explosiewerend glas wordt in deze studie bepaald aan de hand van twee scenario's ontleend aan het *Scenarioboek Externe Veiligheid*, te weten een explosie van een tubetrailer met waterstof (SEV, 2020a) en een warme BLEVE van een spoorketelwagen met LPG (SEV, 2020b). De scenario's geven een beeld van de omvang van de effecten op de weg (tubetrailer waterstof) en op het spoor (spoorketelwagen met LPG) waarvan sprake kan zijn.

3.1 Explosie van tubetrailer met waterstof

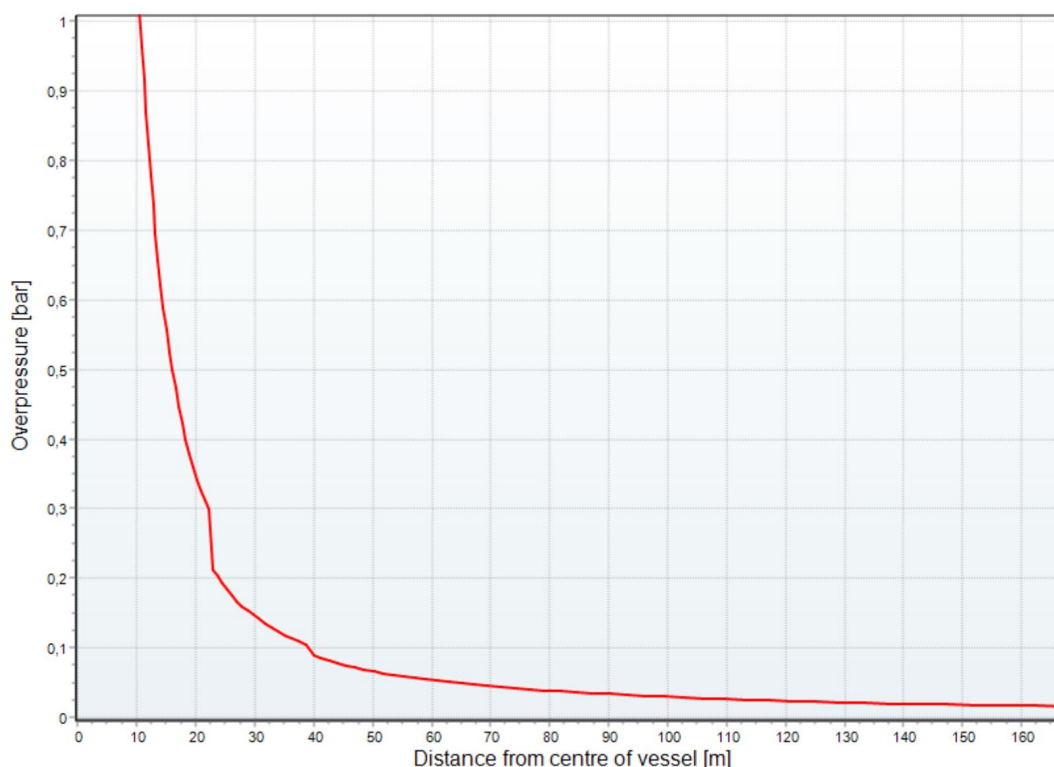
Waterstof kan worden vervoerd in een tubetrailer. Dit is een oplegger waarmee grote cilinders met (gasvormig) waterstof liggend vervoerd worden (zie Figuur 3.1). Kleinere waterstofcilinders worden staand vervoerd. De cilinders kunnen aan elkaar gekoppeld zijn. In dat geval is er sprake van een cilinderpakket. Bij een lek in één van de cilinders zal dan de inhoud van alle cilinders weglekken (RIVM, 2021). In dit rapport wordt uitgegaan van een tubetrailer met waterstofcilinders die niet gekoppeld zijn.



Figuur 3.1 Tubetrailer met waterstof

Het scenario van het falen van een cilinder met waterstof op een tubetrailer verloopt als volgt: door een externe beschadiging, bijvoorbeeld een botsing, bezwijkt een tube instantaan. Waterstof komt explosief vrij, ontsteekt direct en vormt een vuurbal. De explosie van de waterstofcilinder leidt tot overdrukeffecten; daarnaast is er sprake van weggeslingerde stukken van de cilinder. Er is ook sprake van warmtestraling, maar de overdrukeffecten domineren het schade- en slachtofferbeeld.

Het Scenarioboek gaat uit van een cilinder met 1500 liter waterstof bij een druk van 200 bar. Als gevolg van de vuurbal kunnen letale verwondingen optreden tot 6 m (de straal van de vuurbal). In Figuur 3.2 wordt de overdruk als functie van de afstand gegeven en in Tabel 3.1 staan de effectafstanden voor de relevante schadecriteria.



Figuur 3.2 De overdruk van een explosie van een waterstofcilinder als functie van de afstand tot de tubetrailer (SEV, 2020a)

Tabel 3.1 Grenswaarden en bijbehorende effectafstanden van een explosie van een 1500 liter waterstofcilinder (200 bar). De letaliteit geldt voor binnen (SEV, 2020a)

Beschrijving ⁷	druk (bar)	Afstand (m)
100 % letaliteit door instorten van gebouwen	> 0,3	0-20
2,5 % letaliteit door scherfwerking	0,3 - 0,1	20-40
Ruitbreuk dubbel glas (0% letaliteit)	0,1 - 0,02	40-140
Ruitbreuk enkel glas (0% letaliteit)	0,02 - 0,01	140 – (meer dan) 170

⁷ De vuurbal van deze explosie heeft een doorsnede van 12 m, dus de afstand tot de tubetrailer is 6 m.

Een explosie van een waterstofcilinder op een tubetrailer zal tot op 20 m afstand van het ongeval tot 100% letaliteit binnen gebouwen leiden, omdat de druk dan groter is dan 0,3 bar en de gebouwen instorten. Glasscherven zullen in het gebied van 20 tot 40 m tot maximaal 2,5 % letaliteit leiden wanneer personen geraakt worden door glasscherven. Op afstanden groter dan 40 m kunnen nog ruiten breken, maar dit zal niet leiden tot letale slachtoffers.

Effectiviteit van explosiewerend glas

In Tabel 3.2 is aangegeven vanaf welke afstand de verschillende types explosiewerend glas effectief zijn. Deze afstanden zijn bepaald aan de hand van Figuur 3.2.

Tabel 3.2 Effectafstanden voor dodelijk letsel voor het scenario ‘explosie van een tubetrailer met waterstof’

Grens	Inkomende overdruk (bar)	afstand (m)
Breuk explosiewerend glas ER1	0,2	25
Breuk explosiewerend glas ER2	0,4	18
Breuk explosiewerend glas ER3	0,6	14
Breuk explosiewerend glas ER4	0,8	12

Slachtoffers als gevolg van glasscherven kunnen vallen in het gebied tussen 20 en 40 m van het ongeval (zie Tabel 3.1). Door het toepassen van ER1-glas zullen er vanaf 25 m (zie Tabel 3.2) geen slachtoffers meer vallen door glasscherven. ER2-, ER3- en ER4-glas brengen de afstand tot waarop letale slachtoffers vallen als gevolg van scherfwerking nog verder terug, namelijk tot beneden de 20 m (zie Tabel 3.2). Dit betekent dat ER2-, ER3- en ER4-glas het aantal slachtoffers als gevolg van glasscherven tot 0 weet terug te brengen en dus 100% effectief is in vergelijking met dubbel of enkel glas. De resultaten zijn samengevat in Tabel 3.5.

Tabel 3.3 Samenvatting van de gevolgen binnen gebouwen van het scenario ‘explosie van een tubetrailer met waterstof’

Afstand (m)	Enkel glas	Dubbel glas	ER1	ER2-ER4
0 - 20	100% letaliteit t.g.v. instorten gebouwen			
20 - 25	2,5 % letaliteit t.g.v. glasscherven	2,5 % letaliteit t.g.v. glasscherven	2,5 % letaliteit t.g.v. glasscherven	Geen letale slachtoffers
25 - 40			Geen letale slachtoffers	
> 40	Geen letale slachtoffers			

Uitgedrukt in effectafstand brengt ER1-glas de afstand terug van 40 naar 25 m, dus met 37,5%. ER2-, ER3- en ER4-glas brengen de afstand met 50% terug van 40 naar 20 m, wat overeenkomt met de afstand waarop eenieder binnen komt te overlijden als gevolg van instorting van het gebouw.

Dit geldt uiteraard alleen als de condities geldig zijn waaronder het scherfwerend glas werd getest. Als bijvoorbeeld grotere panelen dan 1 m² worden toegepast, zal de effectiviteit kleiner zijn en kan het wenselijk zijn om niet ER2-glas toe te passen, maar ER3- of ER4-glas. Hiervoor zijn mogelijk andere of aanvullende tests noodzakelijk.

3.2 Warme BLEVE van spookketelwagen met LPG

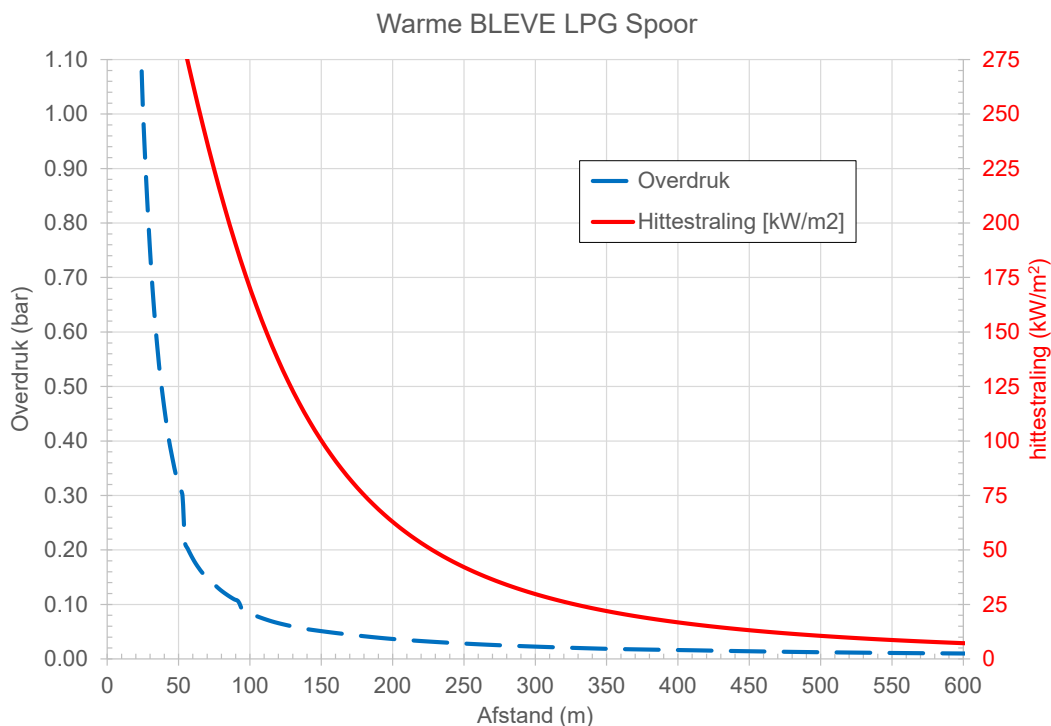
Ook een warme BLEVE van een LPG-tank geeft overdrukeffecten en de vuurbal die ontstaat zal warmtestraling genereren. Daarnaast is er sprake van weggeslingerde stukken van de spookketelwagen. Warmtestraling zal echter het schade- en slachtofferbeeld domineren (SEV, 2020b).

Het Scenarioboek gaat uit van een spookketelwagen met 50 ton LPG. Door aanstralen neemt de druk in de spookketelwagen toe, die uiteindelijk bij 24,5 bar zal falen.



Figuur 3.3 Spookketelwagen voor LPG

In Figuur 3.4 zijn de hittestraling en overdruk als functie van de afstand weergegeven.



Figuur 3.4 Effectafstanden van overdruk en hittestraling door een warme BLEVE van een LPG-ketelwagen (SEV 2020b)

Het schadebeeld voor personen binnen als gevolg van *hittestraling* is weergegeven in Tabel 3.4. Door de (13 seconden durende) BLEVE zullen tot op 140 m gebouwen vlam vatten (bij een hittestraling van meer dan 110 kW/m²). Volgens het Scenarioboek zal hierdoor 32% van de personen binnen komen te overlijden.⁸ De 1% letaliteitswaarde ligt op 325 m. De ontstane vuurbal heeft een straal van ruim 100 m.

Tabel 3.4 Grenswaarden als gevolg van hittestraling en bijbehorende effectafstanden van een warme BLEVE van een LPG-spooketelwagen (SEV, 2020b)

Beschrijving	Grenswaarde (kW/m ²)	Afstand (m)
32 % letaliteit binnen door vlam vatten van gebouwen	110	0 - 140
1 % letaliteit binnen (brandhaarden, ruitbreuk, vervorming van hout en kunststof)	25	325
Geen letale verwondingen; lichte schade	10	590

Het schadebeeld voor personen binnen als gevolg van *overdruk* is in Tabel 3.5 weergegeven. Hierbij zijn de afstanden voor de grenswaarden voor druk afgelezen uit Figuur 3.4.

⁸ Bij het bepalen van het (dodelijk) letsel binnenshuis wordt rekening gehouden met hittestraling door de ruiten, met brandoverslag, met het bezwijken van stalen constructies en met de mogelijkheid om te vluchten / ontruimen.

Tabel 3.5 Grenswaarden als gevolg van overdruk en bijbehorende effectafstanden van een warme BLEVE van een LPG-spoorketelwagen (SEV, 2020b)

Beschrijving	Grenswaarde (bar)	Afstand (m)
100 % letaliteit binnen door instorten van gebouwen	0,3	Tot 50
2,5 % letaliteit door scherfwerking	0,1	50-95
Ruitbreuk dubbel glas	0,02	< 325
Ruitbreuk enkel glas	0,01	< 590

Effectiviteit van explosiewerend glas

In Tabel 3.6 zijn de effectafstanden bij een ruitbreuk als gevolg van warmtestraling weergegeven voor verschillende soorten glas (PGS, 2005d). Zoals hiervoor vermeld, is aangenomen dat de hittewerende eigenschappen van explosiewerend glas gelijk zijn aan die van dubbel glas.

Tabel 3.6 Effectafstanden voor ruitbreuk en schade als gevolg van warmtestraling voor het scenario 'warme BLEVE LPG-ketelwagen' (PGS, 2005d)⁹

Grens	Stralingsniveau (kW/m ²)	Effectafstand (m)
Breuk explosiewerend glas	256	65
Breuk dubbel glas	256	65
Breuk enkel glas	172	100

Tabel 3.7 bevat effectafstanden van overdruk. Hierbij zijn de afstanden voor de inkomende overdruk afgelezen uit Figuur 3.4.

⁹ 5 mm dik glas; kritische temperatuur: 120 °C.

Tabel 3.7 Effectafstanden voor ruitbreuk en schade als gevolg van overdruk voor het scenario ‘warme BLEVE LPG-ketelwagen’

Grens	Inkomende overdruk (bar)	Effectafstand (m)
Breuk explosiewerend glas ER4	> 0,8	29
Breuk explosiewerend glas ER3	> 0,6	34
Breuk explosiewerend glas ER2	> 0,4	44
Zware schade aan het gebouw	> 0,3	50
Breuk explosiewerend glas ER1	> 0,2	57
Breuk dubbel glas	> 0,02	325
Breuk enkel glas	> 0.01	590

Tot 50 m vanaf de warme BLEVE zal iedereen binnen komen te overlijden als gevolg van het instorten van gebouwen (zie Tabel 3.5). Tussen 50 en 65 m breekt alle glas door hittestraling (enkel glas tot op 100 m, zie Tabel 3.6) en/of overdruk. In geval van explosiewerend glas is er weliswaar geen (ER-2, ER-3, ER-4) of minder (ER-1) scherfwerking, maar dit voordeel zal door de hoge hittestraling door het gebroken glas teniet worden gedaan. Explosiewerend glas biedt hier dan ook geen voordelen ten opzichte van niet-explosiewerend (“gewoon”) glas. In dit gebied zal het aantal slachtoffers dus niet afnemen indien explosiewerend glas wordt toegepast. Tussen 65 en 95 m zullen bij niet-explosiewerend glas slachtoffers ontstaan als gevolg van scherfwerking en verhoogde hittestraling door het gebroken glas (zie Tabel 3.5). In dit gebied breekt explosiewerend glas niet, waardoor deze beide effecten dus niet zullen optreden en het aantal slachtoffers geringer zal zijn. Tussen 95 en 325 m zal ook dubbel glas geen scherfwerking meer veroorzaken, maar nog wel breken (voor enkel glas is dit tot 590 m), met als gevolg een verhoogde hittestraling, die dus door het aanbrengen van explosiewerend glas kan worden voorkomen. In Tabel 3.8 zijn de gevolgen van dit scenario samengevat.

Tabel 3.8 Samenvatting van de gevolgen binnen gebouwen van het scenario ‘warme BLEVE LPG-ketelwagen’.

Afstand (m)	Enkel glas	Dubbel glas	ER1-ER4
0-50	100% letaliteit t.g.v. instorten gebouwen		
50-65	Slachtoffers t.g.v. hittestraling door gebroken glas (en scherfwerking)		Slachtoffers t.g.v. hittestraling door gebroken glas
65-95			geen slachtoffers t.g.v. glasschade
95-325	Slachtoffers t.g.v. hittestraling door gebroken glas		
>325	Geen letale slachtoffers		
>590	Geen schade		

Op basis van deze analyse kan het volgende worden geconcludeerd:

- > Explosiewerend glas is ten opzichte van dubbel glas een effectieve maatregel ter reductie van het aantal slachtoffers in het gebied tussen 65 en 325 meter vanaf de warme BLEVE.
- > Explosiewerend glas is ten opzichte van enkel glas een effectieve maatregel in het gebied tussen 65 en 590 m vanaf de warme BLEVE. Maar omdat dubbel glas ten opzichte van enkel glas effectief is vanaf 325 m, biedt het toepassen van explosiewerend glas in het gebied tussen 325 en 590 m geen extra voordelen ten opzichte van dubbel glas.
- > Explosiewerend glas brengt ten opzichte van “gewoon” glas de afstand tot waarop slachtoffers vallen als gevolg van *glasschade* terug van 325 m naar 65 m. Tussen 65 en 325 m kunnen echter nog wel slachtoffers vallen als gevolg van brandoverslag en hittestraling door (intacte) ruiten. Hierdoor zal de maximale effectafstand niet tot 65 m worden gereduceerd, maar ergens tussen de 65 en 325 m liggen.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

Bij zowel een explosie van een tubetrailer met waterstof als bij een warme BLEVE van een LPG-spoorwagon kan explosiewerend glas een effectieve maatregel zijn om het aantal slachtoffers in gebouwen te beperken.

Bij een explosie van een waterstofcilinder van een tubetrailer zullen tot op 20 m personen binnen komen te overlijden door instortende gebouwen. Tussen 20 en 40 m kunnen in gebouwen slachtoffers vallen door rondvliegende glasscherven. Met ER1-glas kan het schade- en slachtoffergebied worden teruggebracht van 40 tot 25 m waarbij de afstand waarover slachtoffers vallen als gevolg van glasscherven dus met 75% wordt verkleind. Met ER2-, ER3- of ER4-glas zal deze afstand met 100 % (20 m) worden teruggebracht tot de afstand waarop slachtoffers een gevolg zijn van instortende gebouwen.

Bij een warme BLEVE van een LPG-wagon zal tot op 65 m afstand alle glas breken als gevolg van de hitte en zal explosiewerend glas geen effect hebben. Ter reductie van het aantal slachtoffers kan ER1-glas effectief worden ingezet tussen 65 en 325 m van het incident. Vanaf 325 m zal dubbel glas niet meer breken en is inzet van explosiewerend glas overbodig. Vanaf 590 m zal de BLEVE helemaal geen schade of slachtoffers meer veroorzaken.

4.2 Aanbevelingen

Bij deze berekeningen is uitgegaan van gegevens die zijn verkregen met het oog op de inzet van explosiewerend glas als bescherming tegen terroristische aanslagen. Deze data zijn bepaald voor detonaties en een glasoppervlak van 1 m². Specifieke data voor weerstand tegen hittestraling zijn in het geheel niet bepaald en ook met andere relevante factoren, zoals wijze van bevestiging, is geen rekening gehouden.

Om explosiewerend glas doelmatig te kunnen inzetten als beschermingsmaatregel tegen overdruk, is het derhalve noodzakelijk om de effectiviteit hiervan nader te onderzoeken onder meer realistische omstandigheden. Hierbij moet in ieder geval rekening worden gehouden met grotere glasoppervlakken, met de wijze van bevestiging, met drukopbouw als gevolg van fysische of chemische explosies en met de weerstand van glas tegen hittestraling.

Het gebrek aan relevante gegevens, normen en richtlijnen, alsook de afwezigheid van methoden om deze te verkrijgen werd al in een eerder uitgevoerd onderzoek geconstateerd (AnteaGroup en IFV 2021).

Literatuur en overige referenties

AnteaGroup en IFV (2021): [Glas en gevel. Bouwen in een explosievoorschriftengebied. Praktijktoeepassing van nieuwe wetgeving](#). Oosterhout: AnteaGroup.

[Besluit bouwwerken leefomgeving](#) (Bbl, 2018). "Besluit van 3 juli 2018, houdende regels over bouwwerken in de fysieke leefomgeving", staatsblad 2018, 291. Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties, 2018.

EFFECTS (2020). Software-uitwerking van (onder meer) de PGS 1 en PGS 2 voor het berekenen van effecten en schade door het vrijkomen van gevaarlijke stoffen; <https://www.gexcon.com/products-services/effects/>

[EN 13541](#): 2012: *Glass in building - Security glazing - Testing and classification of resistance against explosion pressure*. Norm.

Keller, J.O. et al. (2013): [What is an explosion?](#) Presentation at the International Conference on Hydrogen Safety, Brussels, September 9-11 2013.

Nederlandse normalisatie instituut (NEN, 2007). NEN-ISO 16933:2007 en - [Glas voor gebouwen - Beglazing bestand tegen ontploffingen - Beproeving en classificatie door luchrukwindbelasting](#).

Nederlandse normalisatie instituut (NEN, 2012). NEN-EN 13541:2012 en - [Glas voor gebouwen - Veiligheidsglas - Beproeving en classificatie van de weerstand tegen ontploffingsdruk](#).

Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (PGS, 2005a). [PGS 2: 1997/2005 Methods for the calculation of physical effects](#).

Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (PGS, 2005b). [PGS 1: 2005 deel 2A: Effecten van explosie op personen](#).

Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (PGS, 2005c). [PGS 1: 2005 deel 2B: Effecten van explosies op constructies](#).

Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (PGS, 2005d). [PGS 1: 2005 deel 1B: Effecten van brand op constructies](#).

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM, 2017). [Handleiding Risicoanalyse Transport, versie 1.2](#).

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM, 2021). [Handleiding Risicoberekening Bevi](#). Versie 4.3

Scenarioboek Externe Veiligheid (SEV 2020a) [Tubetrailer Waterstof – Explosie](#).

Scenarioboek Externe Veiligheid (SEV 2020b). [Ketelwagen LPG – Warme BLEVE](#).

Trijssenaar (2020): Onderbouwing van de slachtofferinschatting van www.scenarioboekev.nl, versie 1.0, Inge Trijssenaar, IFV.