



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Effecten van **waterstofexplosies**

Effecten van waterstofexplosies

RIVM-briefrapport 2024-0032

Colofon

© RIVM 2024

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

DOI 10.21945/RIVM-2024-0032

M. van der Linden (auteur), RIVM
A.G. Wolting (auteur), RIVM

De auteurs hebben een gelijkwaardige bijdrage geleverd aan de totstandkoming van dit onderzoek en onderzoeksrapport.

Contact:
Bert Wolting
Omgevingsveiligheid
bert.wolting@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van Omgevingsdienst NL in het kader van de Meerjarenagenda Versterking Omgevingsveiligheid, cluster 6.

Dit is een uitgave van:
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland
www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Effecten van waterstofexplosies

Gevaarlijke stoffen, zoals waterstof, kunnen branden of ontploffen. Voor de veiligheid van omwonenden kunnen gemeenten eisen stellen aan nieuwbouw als er in de buurt bedrijven liggen die met gevaarlijke stoffen werken. Dat geldt ook voor transportroutes van dit soort stoffen.

Het RIVM beschrijft welke effecten te verwachten zijn bij een explosie van tanks waar waterstof in zit. De effecten zijn beschreven bij tanks van verschillende groottes. Op basis daarvan is berekend tot welke afstanden de opslag van waterstof en het transport ervan veilig zijn. Gemeenten en omgevingsdiensten hebben deze informatie nodig om veiligheidsmaatregelen te kunnen bedenken en kiezen. Zij beoordelen of extra veiligheidsmaatregelen nodig zijn, bijvoorbeeld door gebouwen sterker te maken of er een andere plek voor te kiezen. Ook kunnen gebouwen worden afgeschermd van branden of ontploffingen (explosies) door wallen of muren aan te leggen.

Voor een goed advies is het nodig om te weten waartegen een maatregel moet beschermen. Het onderzoek beschrijft daarom wat explosies zijn, hoe een explosie van waterstof verloopt en welke schade explosies kunnen veroorzaken. De effecten zijn berekend met een internationaal model dat ook in Nederland wordt gebruikt. De rekenresultaten komen grofweg overeen met ervaringen met ongevallen met waterstof en veldproeven in de praktijk.

In vergelijking met explosies van LNG (aardgas) en LPG (propan) zijn de effecten van een waterstofexplosie zijn per kilo waterstof krachtiger. Toch is een ontploffing van een LNG of LPG-opslagtank krachtiger dan een explosie van een even grote tank waterstof. Dat komt omdat waterstof moeilijker is samen te persen. Daarom zit er in opslagtanks die even groot zijn minder kilo waterstof dan kilo LNG of LPG.

Dit onderzoek is gedaan omdat het gebruik van waterstof relatief nieuw is en belangrijk is om de overgang van fossiele naar duurzame brandstof mogelijk te maken. Het RIVM heeft de inzichten uit dit onderzoek gebruikt voor een brochure over de effectiviteit van explosiebarrières zoals muren en wallen.

Kernwoorden: waterstof, explosiescenario's, overdruk, impuls, schade

Synopsis

Effects of hydrogen explosions

Hazardous substances, like hydrogen, have the potential to ignite or explode. In consideration of residents' safety, municipalities may impose specific requirements on new construction projects in areas with nearby businesses handling such substances. This also extends to transportation routes used for these substances.

RIVM outlines the expected effects of explosions involving tanks containing hydrogen, considering various tank sizes. Based on this, calculations have been used to determine safe distances for both storing and transporting hydrogen. Municipalities and environmental services rely on this data to develop and select suitable safety measures. They assess whether additional precautions, such as reinforcing buildings or choosing alternative locations, are necessary. Additionally, structures can be protected from fires or explosions by constructing barriers such as embankments or walls.

To provide effective guidance, it is crucial to understand the potential threats that measures aim to mitigate. Therefore, the research explains the nature of explosions, the process of a hydrogen explosion and the resulting damages. Calculations are conducted using an international model that is also utilised in the Netherlands, offering results that align closely with hydrogen accident experiences and practical field trials.

Comparatively, hydrogen explosions yield more powerful effects per kilogramme than those of LNG (natural gas) or LPG (propane). However, despite this, explosions from LNG or LPG storage tanks are more forceful than those from equally sized hydrogen tanks. This discrepancy arises from the difficulty in compressing hydrogen, resulting in fewer kilogrammes stored in hydrogen tanks compared to LNG or LPG tanks.

This research serves to address the relatively new use of hydrogen, which is crucial for facilitating the transition from fossil fuels to sustainable alternatives. The insights gleaned from this study have been used by RIVM to produce a brochure focusing on the effectiveness of explosion barriers, such as walls and embankments.

Keywords: hydrogen, explosion scenarios, overpressure, impulse, damage

Inhoudsopgave

Samenvatting — 9

1 Inleiding — 11

- 1.1 Over dit rapport — 11
- 1.2 Afbakening — 11
- 1.3 Achtergrond: aandachtsgebieden — 12
- 1.4 Leeswijzer — 12

2 Toelichting explosies — 13

- 2.1 Wat is een explosie? — 13
- 2.2 Effecten van explosies — 13
- 2.3 Schadecriteria — 14

3 Ongevalsscenario's — 17

- 3.1 Hoeveelheid waterstof — 17
- 3.2 Vrijkomen waterstof — 17

4 Effecten van explosies — 19

- 4.1 Aanpak — 19
- 4.2 Resultaten — 19
- 4.3 Vergelijking met andere explosies — 21
 - 4.3.1 Fysische explosies van waterstoftanks — 21
 - 4.3.2 Gaswolkexplosies van andere stoffen — 21

5 Kennisleemtes en mogelijk toekomstige ontwikkelingen — 23

6 Conclusies — 25

7 Literatuur — 27

8 Bijlage 1 Schadecriteria voor mensen binnens- en buitenshuis — 31

- 8.1 Binnenshuis — 31
- 8.2 Buitenshuis — 34

9 Bijlage 2 Effecten van waterstofexplosies — 35

- 9.1 Gaswolkexplosie — 35
 - 9.1.1 Achtergrond — 35
 - 9.1.2 Resultaten — 37
 - 9.1.3 Vergelijking met model van Dorofeev — 38
 - 9.1.4 Complexe modellen — 39
 - 9.1.5 Vergelijking met incidenten en experimenten — 39
- 9.2 Fysische explosie — 40
 - 9.2.1 Achtergrond — 40
 - 9.2.2 Resultaten — 41
 - 9.2.3 Vergelijking met incidenten en experimenten — 42

10 Bijlage 3 Explosies van andere stoffen — 43

- 10.1 Scenario's — 43
- 10.2 Resultaten — 43

Samenvatting

(Explosie)aandachtsgebieden zijn gebieden rond activiteiten met gevaarlijke stoffen die zichtbaar maken waar mensen binnenshuis, zonder aanvullende maatregelen, onvoldoende beschermd kunnen zijn tegen de gevolgen van een ongeval. Gemeentes houden hier in hun omgevingsplan rekening mee en bepalen wat voldoende bescherming is, beoordelen de bescherming die al aanwezig is en besluiten over het vereisen van (aanvullende) beschermende maatregelen.

De beschikbare kennis over de mate van bescherming die maatregelen bieden en de voorwaarden waaronder ze bescherming bieden wordt als onvoldoende ervaren. In het bijzonder geldt dit tegen explosies als gevolg van ongevallen met waterstof. De verwachting is dat waterstof vanwege de energietransitie steeds meer gebruikt gaat worden. Dit zal leiden tot meer opslagvoorzieningen en transporten voor waterstof, en ook meer vragen over de veiligheid van deze voorzieningen. Daarom hebben NIPV, RIVM en Antea Group gewerkt aan de ontsluiting van kennis hierover en er een brochure over opgesteld: de effectiviteit van een fysieke barrière in een explosieaandachtsgebied. Deze brochure kan gebruikt worden bij afwegingen over het gebruik van fysieke barrières.

Dit RIVM-rapport geeft achtergrond bij het deel over waterstofexplosies. Het gaat in op wat explosies zijn, welke ongevalsscenario's mogelijk zijn en welke schade ze kunnen veroorzaken. De veroorzaakte schade is afhankelijk van de overdruk en de impuls van de explosie. Deze nemen af met toenemende afstand van de explosie, en zijn hoger wanneer er meer waterstof betrokken is bij de explosie.

Bij 500 kg waterstof (de inhoud van een grote opslagtank bij een waterstoftankstation) is lichte schade mogelijk tot ongeveer 500 meter. De afstand tot de grens van het explosie-aandachtsgebied is circa 120 meter. Voor kleinere hoeveelheden, tot 200 kg, geeft het Handboek Omgevingsveiligheid grotere afstanden, omdat daar alleen wordt gekeken naar het schadecriterium voor overdruk.

Ook zijn de berekende overdruk en impuls vergeleken met de effecten van fysische explosies van waterstoftanks en gaswolkexplosies van LNG en LPG. Hiervoor is uitgegaan van de voor omgevingsveiligheid geldende rekenmethoden en invoerparameters. De rekenresultaten komen goed overeen met de informatie uit incidenten en experimenten.

De informatie uit dit rapport is gebruikt bij het opstellen van de brochure.

1 Inleiding

Waterstof zal naar verwachting een belangrijke bijdrage leveren aan de energietransitie. Het aantal opslagvoorzieningen en transporten met waterstof zal daarom toenemen. Daarom is er kennis nodig over de risico's van waterstof en de wijze waarop de omgeving beschermd kan worden tegen de gevolgen van ongevallen met waterstof.

Met de invoering van de Omgevingswet moeten lokale overheden afwegingen maken over beschermende maatregelen in aandachtsgebieden.

1.1 Over dit rapport

Dit rapport geeft onderbouwing bij de brochure '[De effectiviteit van een fysieke barrière in een explosieaandachtsgebied](#)' die is geschreven in het kader van de Meerjarenagenda Versterking Omgevingsveiligheid. De brochure is geschreven door het NIPV, het RIVM en Antea Group, en heeft als doel inzicht te bieden in de effectiviteit van barrières om mensen en gebouwen te beschermen tegen de effecten van een explosie.

Dit rapport richt zich op de volgende onderzoeksvraag: Welke effecten kunnen verwacht worden bij een explosie van waterstof?

1.2 Afbakening

De brochure richt zich op de effecten van waterstofexplosies en de effectiviteit van afscherming om de explosie-effecten te beperken. Hierbij geldt de volgende afbakening:

- Er wordt niet gekeken naar de kans op een explosie (en dus ook niet naar het risico). De kans hoort bij de afweging over de effectiviteit van de afscherming.
- Alleen de explosie-effecten (overdruk en impuls) zijn relevant. De effecten van brand (warmtestraling) vallen buiten de scope¹.

Het voorliggende rapport beperkt zich tot explosies van gasvormig waterstof in de buitenlucht. Ook wordt enkel gekeken naar de transport of opslag van waterstof in cilinders of opslagtanks. De volgende situaties vallen daarmee buiten de scope:

- Explosies binnen in gebouwen of in tunnels.
- Waterstofdragers.
- Vloeibaar waterstof.
- Waterstof in buisleidingen.

De resultaten uit dit rapport kunnen niet zonder meer gebruikt worden voor deze situaties, omdat sprake kan zijn van andere hoeveelheden en ongevalsscenario's.

¹ Voor de beschouwde scenario's zijn de explosie-effecten belangrijker dan warmtestraling bij een volkbrand of vuurbal.

In dit rapport wordt aangesloten bij modeluitgangspunten zoals beschreven in het Handboek Omgevingsveiligheid [1]. Het onderzoeken van de achterliggende aannames van deze uitgangspunten valt buiten de scope.

1.3 Achtergrond: aandachtsgebieden

Voor activiteiten met waterstof kunnen aandachtsgebieden gelden. Aandachtsgebieden zijn gebieden waar het bevoegd gezag rekening dient te houden met mogelijke gevolgen van gevaren van activiteiten met gevaarlijke stoffen. Het bevoegd gezag bepaalt hierbij of aanvullende bescherming nodig is voor het waarborgen van een voldoende veilige en gezonde leefomgeving. Hoe invulling gegeven wordt aan de bescherming binnen aandachtsgebieden is een bestuurlijke keuze. Het bevoegde gezag maakt en motiveert in de omgevingsvisie en het omgevingsplan een keuze over wat voldoende veilig is en hoe gezondheid en milieu worden beschermd. Afhankelijk van het type activiteit met gevaarlijke stoffen zijn voor het aandachtsgebied in de regelgeving vaste afstanden vastgesteld of zijn deze afstanden te berekenen met de daarvoor aangewezen stappenplannen in het Handboek Omgevingsveiligheid en de bijbehorende rekenvoorschriften. De inzichten in dit rapport en de brochure kunnen worden gebruikt bij het afwegen van aanvullende beschermende maatregelen in aandachtsgebieden of eventueel daarbuiten.

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 bevat een toelichting op explosies en hoofdstuk 3 de relevante ongevalsscenario's voor het transport en opslag van waterstof. De belangrijkste modelkeuzes en resultaten staan in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 worden kort de belangrijkste kennisleemtes besproken. Nadere informatie over de gebruikte modellen, aannames en parameters en de effecten van explosies van waterstof en andere stoffen staat in de bijlagen.

2 Toelichting explosies

In dit hoofdstuk wordt achtergrondinformatie gegeven over explosies en de effecten daarvan op mensen binnenshuis en buitenshuis.

2.1 Wat is een explosie?

Een explosie is een gebeurtenis waarbij in zeer korte tijd een grote hoeveelheid energie vrijkomt; dit veroorzaakt een drukgolf die zich in de omgeving zal verplaatsen en daarbij schade kan aanrichten. Er zijn verschillende soorten explosies. De voor dit rapport belangrijkste explosies worden hieronder kort toegelicht.

Een *fysische explosie* is het instantaan vrijkomen en de expansie van een (al dan niet tot vloeistof verdicht) gas onder druk, bijvoorbeeld wanneer een opslagtank ineens bezwijkt. Hiervoor is ontsteking van het gas niet noodzakelijk.

Bij een *chemische explosie* wordt de druk veroorzaakt door een chemische reactie. Een voorbeeld hiervan is een gaswolkexplosie, waarbij een wolk van brandbaar gas ontsteekt. De vlam verspreidt zich vanaf het ontstekingspunt door de wolk. De effecten van de explosie zijn afhankelijk van de omvang en samenstelling van de wolk, die op hun beurt afhangen van de wijze waarop het gas vrijkomt en zich in de omgeving kan verspreiden. Een relevante factor is bijvoorbeeld turbulentie die ontstaat door aanwezigheid van obstakels en de (gedeeltelijke) opsluiting van de wolk in gesloten ruimtes of door hoge gebouwen, tunnels, overkappingen en dergelijke.

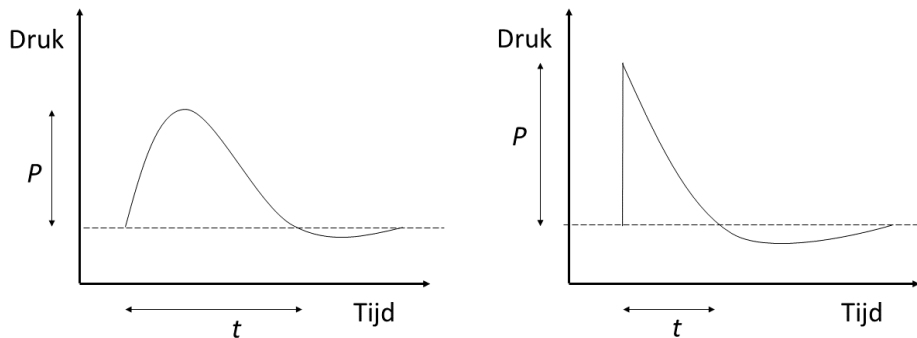
Een gaswolkexplosie wordt een *deflagratie* genoemd wanneer de vlamsnelheid lager is dan de geluidssnelheid in het medium. Is de vlamsnelheid hoger dan de geluidssnelheid, dan is sprake van een *detonatie*. De drukgolf wordt in dat geval een schokgolf genoemd. Bij een detonatie is de overdruk (zie paragraaf hieronder) hoger dan bij een deflagratie. Voor een detonatie is een hogere ontstekingsenergie nodig dan voor een deflagratie [2, 3]. Wel kan een deflagratie overgaan in een detonatie (deflagration-to-detonation transition, DDT): dit gebeurt bij een sterke versnelling van het vlamfront. De snelheid van het vlamfront kan toenemen door de aanwezigheid van obstakels (congestie). De snelheid van het vlamfront kan ook afnemen wanneer de omgeving meer open wordt. De omgeving heeft daarmee invloed op het verbrandingsproces.

Gaswolkexplosies die buiten optreden (niet in een gesloten ruimte) zijn in de meeste gevallen deflagraties, niet detonaties [3]. Een detonatie van een gaswolk in zijn geheel komt weinig voor. Hiervoor moet het ontvlambare deel van de wolk namelijk (vrij) homogeen zijn, wat in de praktijk onwaarschijnlijk is [2].

2.2 Effecten van explosies

De drukgolf bij een explosie wordt beschreven door de overdruk en de impuls. De *overdruk* P is het drukverschil ten opzichte van de

omgevingsdruk. Deze wordt uitgedrukt in bar of pascal (de omgevingsdruk is ongeveer 1 bar, wat gelijk is aan 100.000 Pa). In Figuur 2.1 is het verloop van een drukgolf en schokgolf gegeven.



Figuur 2.1 Schematische weergave van het druk-tijd-verloop van een drukgolf (links) en een schokgolf (rechts). In de positieve fase neemt de druk eerst snel toe en vervolgens geleidelijk af. Daarna volgt de negatieve fase, met druk lager dan de omgevingsdruk (weergegeven met horizontale stippellijn).

De (positieve) impuls is een maat voor de overdruk en de tijdsduur van (de positieve fase van) de drukgolf en dus het oppervlak onder de druk-tijd curve. De impuls I is bij benadering gelijk aan de helft van het product van de overdruk P en de tijdsduur t van de positieve fase van de drukgolf:

$$I \approx \frac{1}{2} \times P \times t$$

De eenheid van impuls is pascalseconde (Pa·s).

Of een explosie schade aanricht hangt af van zowel de overdruk als de impuls. Hoe hoger de overdruk, hoe groter de schade. Een langdurige drukgolf zal meer schade aanrichten dan een kortdurende drukgolf met dezelfde overdruk, omdat de impuls hoger is (zie bijvoorbeeld de druk-impulsdiagrammen in PGS 1 [4, 5]). De negatieve fase kan ook voor schade zorgen maar is over het algemeen minder belangrijk dan de positieve fase [5].

Als gevolg van explosies kunnen ruiten breken en gebouwen instorten, waarbij mensen kunnen worden geraakt door glasscherven of bedolven worden onder puin en brokstukken. Ook kan er bij explosies sprake zijn van fragmenten, brokstukken of scherven. Denk hierbij aan delen van de opslagtank in het geval van een fysische explosie, of voorwerpen uit de omgeving die kunnen worden meegevoerd door de drukgolf. Deze vormen een gevaar voor mensen in de buurt.

2.3 Schadecriteria

De effecten van een explosie kunnen schadelijk of dodelijk zijn voor mensen. Voor het bepalen van de gevolgen wordt onderscheid gemaakt tussen mensen die zich binnen in een gebouw bevinden en mensen die zich buiten bevinden. Bij een explosie is de overlijdenskans binnenshuis hoger dan buitenshuis (bij gelijke afstand van de bron), vanwege het

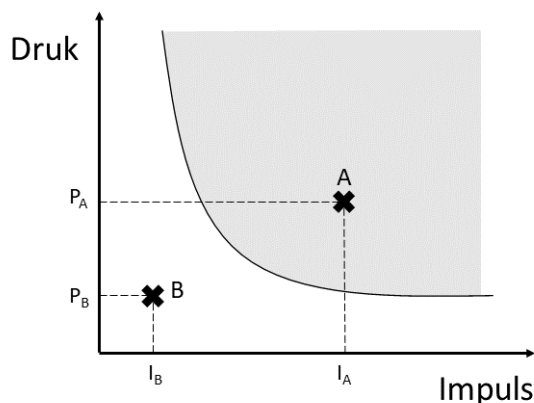
gevaar van instorting. Om deze reden worden in dit rapport schadecriteria gebruikt voor gebouwen. Tabel 2.1 geeft de conservatieve schadecriteria die in dit rapport worden gebruikt. De kans op schade is sterk afhankelijk van de constructie. Schadecriteria zijn dus indicatief. In de bijlage (paragraaf 8.1 en paragraaf 8.2) is een aanvullend overzicht opgenomen van schadecriteria. Daar wordt ook gekeken naar schadecriteria voor mensen buitenshuis.

De wetenschappelijke literatuur geeft probitfuncties [21] die informatie geven over de letaliteit in verschillende situaties (binnenshuis en buitenshuis), en schadecriteria voor de kans op een soort gebouwschade. Schadecriteria zijn in de literatuur soms weergegeven in de vorm van druk-impulsdigrammen, zoals het voorbeeld in Figuur 2.2.

Tabel 2.1 De schadecriteria gebruikt in dit rapport.

Soort schade	Overdruk (bar)	Impuls (Pa·s)
Lichte schade, ondergrens voor effecten (voor overdruk: ondergrens ruitbreuk dubbelglas [5]; voor impuls: 50% ruitbreuk van grote ruiten [6])	0,02	20
Significante schade (voor overdruk: begrenzing van aandachtsgebied, 2,5% letaliteit [7], 100% ruitbreuk [5]; voor impuls: lichte, herstelbare schade aan constructies [5])	0,1	200
Gedeeltelijke verwoesting (50-75% van muren bezwijken) (zie opmerking)	0,3	550
Verwoesting van gebouwen (zie opmerking)	0,6	850

Opmerking: voor deze criteria is het gemiddelde uit [5] en [8] genomen, beide zijn gebaseerd op [9]. Zie de bijlage (paragraaf 8.1) voor meer informatie.



Figuur 2.2 Schematische weergave van een druk-impulsdigram. De curve geeft de schadecriteria aan voor een bepaald soort schade (waarde voor druk en impuls). Indien als gevolg van een explosie de druk en impuls in het grijze gebied van het diagram vallen, treedt de schade op. Dit is het geval in situatie A (druk: P_A , impuls: I_A). In situatie B (druk: P_B , impuls: I_B) treedt de schade in kwestie niet op.

3 Ongevalsscenario's

In dit hoofdstuk worden de beschouwde ongevalsscenario's beschreven.

3.1 Hoeveelheid waterstof

In Tabel 3.1 wordt informatie gegeven over hoeveelheden waterstof die betrokken kunnen zijn bij een ongeval. Dit zijn hoeveelheden van typische drukhouders. Welke hoeveelheden veel voorkomen kan in de toekomst veranderen. Op dit moment vindt transport van gasvormig waterstof voornamelijk plaats met tubetrailers. Dit zijn trailers met een horizontaal pakket van grote stalen cilinders met elk een afsluiter. Naar verwachting zal in de toekomst meer gebruik worden gemaakt van composietcilinders, omdat deze lichter zijn [10].

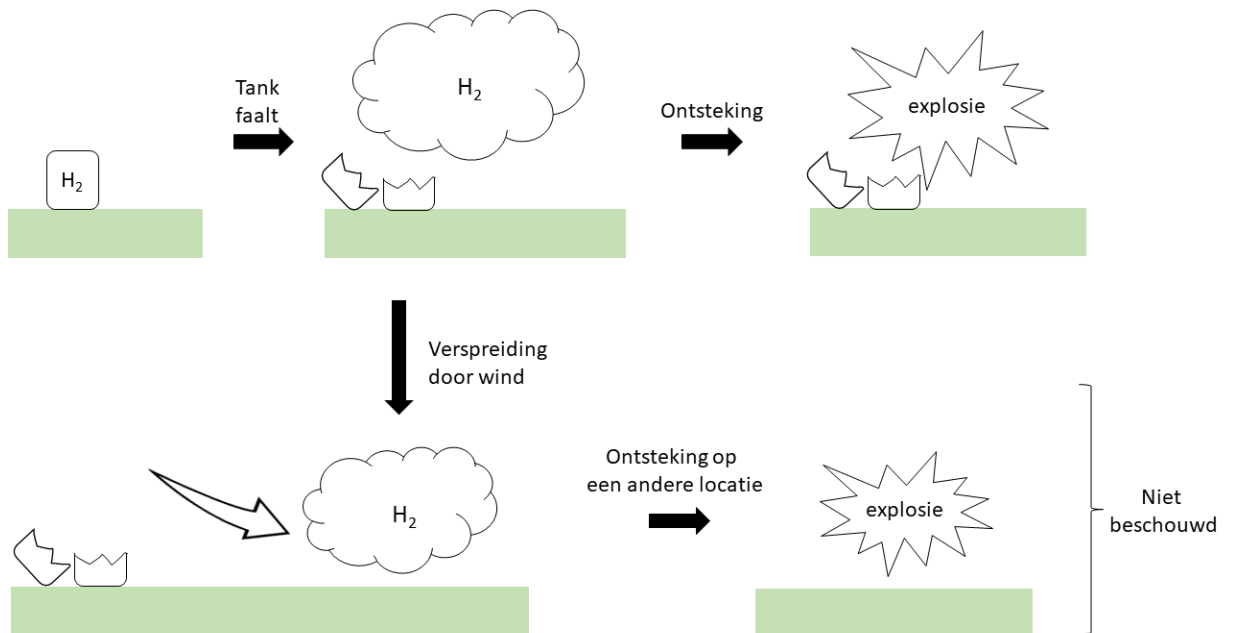
Tabel 3.1 Hoeveelheden waterstof die betrokken kunnen zijn bij een ongeval.

Massa (kg)	Omschrijving (inhoud komt ongeveer overeen met ...)	Bron
1	1 drukhouder van een batterijwagen (50 L bij 200 bar)	[10]
5	Totale inhoud van een waterstofauto (142 L bij 700 bar)	[11, 12]
10	1 drukhouder van een composiet-batterijwagen (350 L bij 500 bar)	[10]
35	1 drukhouder van een tubetrailer (2.300 L bij 200 bar)	[10]
60	Maximale toegestane inhoud van 1 drukhouder van een tubetrailer of batterijwagen (3.000 L bij 300 bar)	[13]
200	Maximale toegestane inhoud van een groep drukhouders (5.000 L bij 700 bar)	[10]
500	Grote opslagtank (10.000 L) bij een waterstoftankstation, bij hoge druk (1000 bar)	[14]

3.2 Vrijkomen waterstof

In dit onderzoek wordt uitgegaan van het ongevalsscenario instantaan falen², dat wil zeggen: het in één keer vrijkomen van de inhoud uit een drukhouder. Vervolgens nemen we aan dat de ontstane gaswolk, na opmenging in de lucht, direct ontsteekt. De gaswolk verplaatst zich dus niet (zie ook Figuur 3.1).

² Andere mogelijke ongevalsscenario's (klein lek, uitstroom in 10 minuten, etc.) zijn in het rapport niet beschouwd.



Figuur 3.1 Schematische weergave van het verloop van een gaswolkexplosie. De bovenste route wordt beschouwd in dit onderzoek: een drukhouder met waterstofgas (linksboven) faalt, waardoor een gaswolk van waterstof ontstaat (midden, boven). Deze ontsteekt op de locatie van de drukhouder met als gevolg een explosie (rechtsboven). De onderste route wordt niet meegenomen in dit onderzoek: de wind voert de waterstofgaswolk mee (linksonder), waarna deze ontsteekt, met als gevolg een explosie op een locatie benedenwinds van de drukhouder (rechtsonder).

In een werkelijk ongeval kan een gaswolk wel worden meegevoerd door de wind en zich daarmee in de omgeving verspreiden. Deze verspreiding vindt niet alleen plaats in horizontale maar ook in verticale richting. De explosie kan dus plaatsvinden op een andere locatie dan het oorspronkelijke ongeval (het falen van de drukhouder). De overdruk op een bepaalde afstand benedenwinds van het ongeval kan daarmee anders worden. Hier zijn twee redenen voor:

- de wolk – en dus de explosie – komt dichterbij;
- tijdens de verspreiding zal de hoeveelheid waterstof in een concentratie boven de onderste explosiegrens afnemen door verdunning.

Het eerste punt (dichterbij komen) zal de explosie-effecten op de locatie vergroten, terwijl het tweede punt (verdunning) leidt tot kleinere effecten. Zonder nadere informatie en verdere modellering is het niet mogelijk om te zeggen wat de gevolgen van verspreiding in de omgeving zijn op de explosie-effecten.

Het falen van één drukhouder kan leiden tot het falen van andere drukhouders in de buurt (domino-effecten) maar dit zal naar verwachting voor het scenario instantaan falen niet leiden tot grotere effectafstanden dan het falen van één drukhouder [10].

4 Effecten van explosies

In dit hoofdstuk worden de berekende overdruk en impuls gegeven voor waterstofexplosies van verschillende hoeveelheden waterstof (zoals vermeld in hoofdstuk 3). Dit hoofdstuk beschrijft kort de aanpak en de belangrijkste aannames (paragraaf 4.1) en geeft de belangrijkste resultaten (paragraaf 4.2). Details zijn te vinden in de bijlagen. In paragraaf 4.3 worden de effecten van gaswolkexplosies van waterstof op hoofdlijnen vergeleken met de effecten van fysische explosies van waterstoftanks en met de effecten van gaswolkexplosies van andere stoffen (LPG en LNG). Details over de modellering en resultaten van deze ander explosies zijn te vinden in de bijlagen.

4.1 Aanpak

De effecten van gaswolkexplosies van waterstof zijn bepaald met het TNO Multi Energy model (TNO ME) [15]. Dit model wordt gebruikt in Nederlandse QRA berekeningen. Het is gevalideerd en geïmplementeerd in Safeti-NL [16]. Dit rekenprogramma is aangewezen onder de Omgevingsregeling. Voor dit rapport zijn de berekeningen overigens niet met Safeti-NL gedaan, omdat de impuls van gaswolkexplosies daar niet als uitvoer wordt gegeven. De berekeningen zijn gedaan met (fits van) TNO ME curves³.

Het model TNO ME geldt voor uniforme gaswolken met een stoichiometrisch mengsel van het brandbare gas en lucht. Dit is een conservatief uitgangspunt.

Bij het gebruik van TNO ME zijn de volgende keuzes gemaakt:

- Het deel van de vrijgekomen massa waterstof dat betrokken is bij de explosie. Dit deel bevindt zich in een gebied met congestie (objecten in de omgeving) of opsluiting, waar een explosie kan worden onderhouden. Wij gaan uit van 12,5%, om aan te sluiten bij de modellering in Safeti-NL.
- De sterkte van de explosie: het model biedt hiervoor 10 opties (curves). Wij gaan uit van curve 10, om aan te sluiten bij de modellering van gaswolkexplosies in Safeti-NL. In de bijlage (paragraaf 9.1.1) is meer informatie te vinden over de keuze van de curve.

4.2 Resultaten

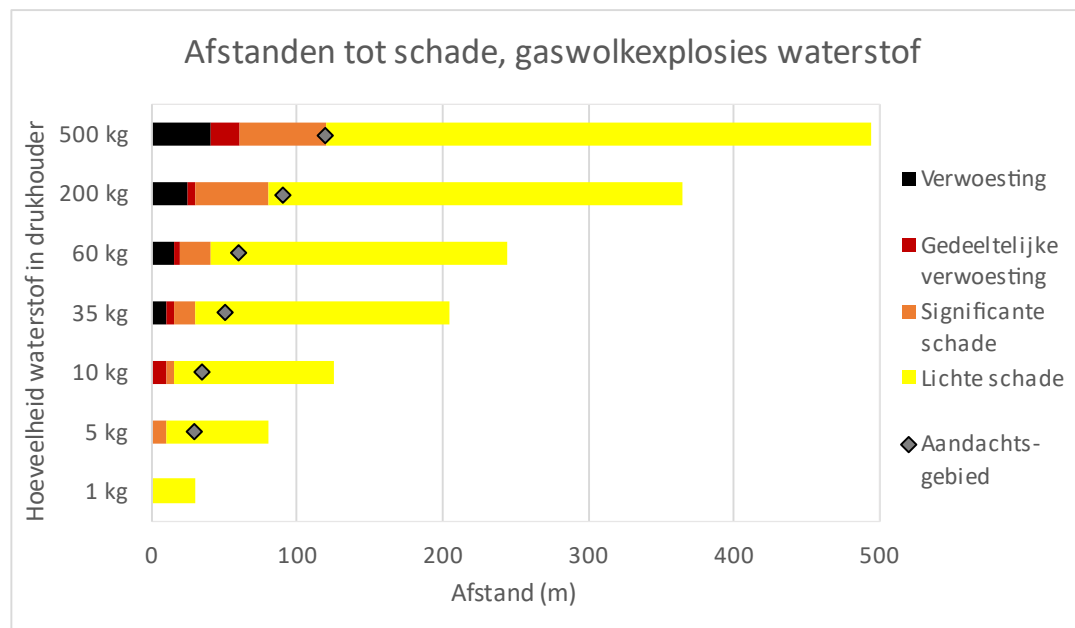
De resultaten van de berekeningen aan gaswolkexplosies van waterstof zijn samengevat in Figuur 4.1. De schadecriteria voor en een beschrijving van de soort schade zijn gegeven in Tabel 2.1. Merk op dat in deze figuur een bepaald effect pas optreedt wanneer zowel de schadecriteria voor impuls als die voor overdruk worden overschreden. Voor 'significante schade' moet de overdruk dus hoger zijn dan 0,1 bar én de impuls hoger zijn dan 200 Pa·s (zie Tabel 2.1). Dit is anders dan in het Stappenplan bepalen explosieaandachtsgebied uit het Handboek

³ De op deze manier berekende overdruk is vergeleken met de overdruk berekend met Safeti-NL. Bij grafische weergave van de resultaten zijn er met het oog geen verschillen zichtbaar. De spreadsheet waarmee de berekeningen zijn gedaan is op aanvraag beschikbaar

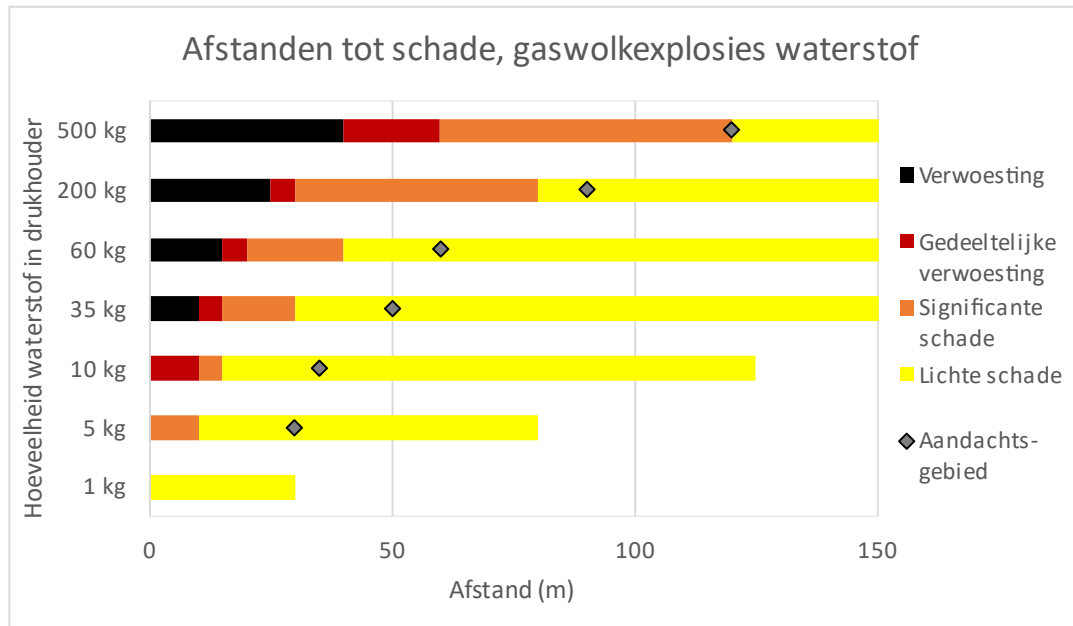
Omgevingsveiligheid [1], waar alleen gerekend hoeft te worden met de overdruk. Het explosieaandachtsgebied wordt begrensd door de afstand waar de overdruk 0,1 bar is. Als enkel was gekeken naar de overdruk, waren de effectafstanden in Figuur 4.1 groter geweest (met typisch een factor 1,5) voor de hoeveelheden 1 tot 60 kg waterstof. Voor deze hoeveelheden zijn de effectafstanden voor overschrijding van het schadecriterium voor overdruk hoger dan die voor overschrijding van het schadecriterium voor impuls.

Het falen van een drukhouder van een tubetrailer (inhoud 35 kg) met daaropvolgende gaswolkexplosie resulteert bijvoorbeeld in significante schade tussen 15 en 30 meter vanaf de explosie. Significante schade is volgens Tabel 2.1 lichte, herstelbare schade aan constructies, waaronder ruitbreuk (100%). Ook is de letaliteit binnenshuis geschat op 2,5%. In de regio met significante schade is de overdruk hoger dan 0,1 bar én de impuls hoger dan 200 Pa·s.

In de bijlage (paragraaf 9.1.2) is een overzicht opgenomen van de verwachte overdruk (Tabel 9.1) en impuls (Tabel 9.2) bij deze gaswolkexplosies.



Figuur 4.1 De figuur geeft aan welk soort schade kan optreden op welke afstanden van de explosie, voor verschillende hoeveelheden waterstof. Ook gegeven is de begrenzing van het explosieaandachtsgebied (overdruk = 0,1 bar). Zie Figuur 4.2 voor het gebied tussen 0 en 150 m van de ongevalslocatie.



Figuur 4.2 Dezelfde figuur als Figuur 4.1, met enkel het gebied tussen 0 en 150 m van de ongevalslocatie.

De resultaten van het TNO ME model zijn vergeleken met incidenten, en zijn in overeenstemming met bijvoorbeeld een gaswolkexplosie die plaatsvond in Stockholm in 1983. Informatie over enkele incidenten is opgenomen in de bijlage, paragraaf 9.1.5.

4.3 Vergelijking met andere explosies

In deze paragraaf worden de effecten van de gaswolkexplosies van waterstof vergeleken met de effecten van fysische explosies van waterstoftanks en met de effecten van gaswolkexplosies van LNG (methaan) en LPG (propan). Het doel van deze vergelijking is om te laten zien hoe deze verschillende explosies zich tot elkaar verhouden.

4.3.1 Fysische explosies van waterstoftanks

De effecten van gaswolkexplosies van waterstof zijn op hoofdlijnen vergeleken met effecten van fysische explosies van waterstoftanks. Hierbij is uitgegaan van een typisch transportsценario (35 kg waterstof) en opslagscenario (500 kg waterstof).

Uit de vergelijking blijkt dat de overdrukeffecten van de fysische explosie en de gaswolkexplosie vergelijkbaar zijn. De impuls is bij de gaswolkexplosies een factor 2-3 hoger. Tot slot blijkt uit experimenten met fysische explosies van waterstoftanks dat fragmenten van de tank (en eventueel het voertuig) tientallen meters ver kunnen komen [17].

Zie de bijlage (paragraaf 9.2.2) voor meer informatie.

4.3.2 Gaswolkexplosies van andere stoffen

De effecten van waterstofexplosies zijn op hoofdlijnen vergeleken met de effecten van explosies van LNG en LPG (zie bijlage 10 voor meer informatie). Hierbij is uitgegaan van een typisch transportsценario en een typisch opslagscenario voor de drie stoffen.

Uit deze vergelijking volgen twee belangrijke observaties:

1. De effecten van een waterstofexplosie zijn krachtiger dan die van een explosie van LNG of LPG, wanneer gekeken wordt naar explosies met dezelfde hoeveelheid gas (in kg).
2. Echter, een typische drukhouder voor transport of opslag van waterstof heeft een veel lagere capaciteit dan een typische drukhouder voor transport of opslag van LNG of LPG. Het gaat om enkele tientallen tot honderden kilogrammen voor waterstof, en enkele tienduizenden voor LNG of LPG. Wanneer wordt gekeken naar explosies van deze typische hoeveelheden, zijn juist LNG en LPG-explosies krachtiger dan waterstofexplosies.

5 Kennisleemtes en mogelijk toekomstige ontwikkelingen

In dit hoofdstuk worden een aantal kennisleemtes besproken. De belangrijkste hiervan zijn:

- De beperkingen van het TNO ME model. Het uitgangspunt van een stoichiometrische wolk van waterstof en lucht is volgens Dorofeev [18] onrealistisch en overconservatief. Al met al zijn de resultaten van TNO ME toch redelijk in overeenstemming met experimenten en incidenten, en andere modellen (Dorofeev [8]). Daarbij wel de kanttekening dat incidenten en experimenten vooral worden gedaan met relatief kleine hoeveelheden. In dit rapport is vergeleken met experimenten tot 7,6 kg waterstof, terwijl in de praktijk grotere hoeveelheden kunnen vrijkomen. Het is niet bekend in hoeverre dit model geschikt is voor grote hoeveelheden waterstof.
- Het is onbekend welke massafractie naar verwachting betrokken is in een explosie. Nu is, in lijn met Safeti-NL, 12,5% gebruikt. Daarvan is de onderbouwing echter beperkt. Deze waarde zal per situatie verschillen (vanwege het aantal obstakels in de buurt).
- De gekozen schadecriteria zijn beperkt onderbouwd. De schade aan gebouwen is sterk afhankelijk van de constructie.

Mogelijk voorziene modelontwikkelingen zijn het ontwikkelen van specifieke parameters voor waterstofexplosies en onderzoek van de invloed van de effecten van grootte en heterogeniteit van de waterstofwolk bij opschaling van lab naar praktijk [19]. Experimenten kunnen nieuwe inzichten leveren. Daarnaast kan CFD-modellering breder beschikbaar komen en tot nieuwe inzichten leiden (zie de bijlage, paragraaf 9.1.4).

Bij wijzigingen in de manier waarop waterstof wordt getransporteerd of opgeslagen kunnen andere scenario's relevant worden. Te denken valt hier aan andere hoeveelheden of drukken, maar ook aan transport via buisleidingen (buisleidingen kunnen ook als opslagvoorziening gebruikt worden). Lekkages en ontsteking van waterstof uit buisleidingen zijn niet meegenomen in het huidige onderzoek.

6 Conclusies

In dit rapport zijn de effecten van gaswolkexplosies van waterstof onderzocht. Voor hoeveelheden van 1 tot 500 kg waterstof zijn de overdruk en impuls bepaald met het TNO Multi Energy model. Hierbij is geen rekening gehouden met de verspreiding van de gaswolk in de omgeving.

De berekende overdruk en impuls zijn vervolgens vergeleken met schadecriteria voor gebouwen uit de literatuur, om te bepalen welke soort schade naar verwachting kan optreden op verschillende afstanden vanaf de ongevalslocatie. Bij de grootste hoeveelheid (500 kg) is lichte schade tot 500 m mogelijk. De afstand tot het explosieaandachtsgebied is circa 120 meter. Voor hoeveelheden tot 200 kg waterstof geeft het Handboek Omgevingsveiligheid grotere afstanden, omdat daar alleen wordt gekeken naar het schadecriterium voor overdruk.

De informatie uit dit rapport is gebruikt bij het opstellen van de brochure '[De effectiviteit van een fysieke barrière in een explosieaandachtsgebied](#)'. Deze brochure geeft informatie over de effectiviteit van barrières om mensen en gebouwen te beschermen tegen de effecten van een explosie.

De berekende overdruk en impuls zijn ook vergeleken met de effecten van fysische explosies van waterstoftanks en gaswolkexplosies van LNG en LPG.

De in dit rapport gebruikte modellen bevatten een aantal aannames. De aanbeveling aan RIVM is om de modellering te herzien bij nieuwe modelinzichten en als nieuwe experimentele data beschikbaar komt.

7 Literatuur

1. RIVM. *Handboek Omgevingsveiligheid: stappenplan bepalen explosieaandachtsgebied*. Beschikbaar via <https://www.rivm.nl/omgevingsveiligheid/handboek/stappenplan/bepalen-afstanden-en-gebieden/explosieaandachtsgebied>. (Geraadpleegd 12 oktober 2023).
2. VROM, *PGS-2 Methods for the calculation of physical effects (Yellow Book)*, Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen 2, 2005 (3e editie).
3. HyFacts, *Hydrogen Deflagrations and Detonations and Prevention and Mitigation: Venting of Deflagrations*, HyFacts training material: chapter DM (beschikbaar via: <https://www.h2euro.org/hyfacts/2014/06/26/training-material/>, geraadpleegd 7 februari 2023), 2013.
4. VROM, *PGS- 1 Effecten van explosie op personen*. 2005.
5. VROM, *PGS-1 Effecten van explosie op constructies*. 2005.
6. National Fire Protection Association (NFPA), *NFPA 2. Hydrogen technologies code*, 2023.
7. RIVM, *Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid. Toelichting*, maart 2022.
8. S.B. Dorofeev, *Evaluation of safety distances related to unconfined hydrogen explosions*. International Journal of Hydrogen Energy, 2007. **32**(13): p. 2118-2124.
9. D.E. Jarrett, *Derivation of the British explosives safety distances*. Annals of the New York Academy of Sciences, 1968. **152**(1): p. 18-35.
10. P.G.J. Timmers, P.A.M. Uijt de Haag, en S.P. Verkleij, *Rekenmethode om de risico's te berekenen van het vervoer van samengeperste gassen en tot vloeistof gekoelde gassen*, RIVM-briefrapport 2022-0116, 2023.
11. Toyota, *The Toyota Mirai*, January 2023.
12. H2.LIVE. *Toyota MIRAI*. Beschikbaar via <https://h2.live/en/fuelcell-cars/toyota-mirai/>. (Geraadpleegd 26 oktober 2023).
13. Verenigde Naties - Economische Commissie voor Europa en Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, *Overeenkomst voor het internationale vervoer van gevaarlijke goederen over de weg (ADR). Bijlagen A en B*, 2021.
14. PGS 35. *Waterstofinstallaties voor het afleveren van waterstof aan voertuigen en werktuigen (versie 1.0)*. Beschikbaar via <https://publicatiereeksgevaarlijkestoffen.nl/publicaties/online/pgs-35/2021/1-0-augustus-2021#top>. (Geraadpleegd 4 mei 2023).
15. A.C. van den Berg, *The multi-energy method: A framework for vapour cloud explosion blast prediction*. Journal of Hazardous Materials, 1985. **12**(1): p. 1-10.
16. H.W.M. Witlox en A. Oke, *Verification and validation of consequence and risk models for accidental releases of hazardous chemicals to the atmosphere*, DNV Software, London, UK. Process Safety Technical Exchange Meeting, 2007.

17. V. Molkov en S. Kashkarov, *Blast wave from a high-pressure gas tank rupture in a fire: Stand-alone and under-vehicle hydrogen tanks*. International Journal of Hydrogen Energy, 2015. **40**(36): p. 12581-12603.
18. S.B. Dorofeev, *A flame speed correlation for unconfined gaseous explosions*. Process Safety Progress, 2007. **26**(2): p. 140-149.
19. Q. Hu, X. Zhang, en H. Hao, *A review of hydrogen-air cloud explosions: The fundamentals, overpressure prediction methods, and influencing factors*. International Journal of Hydrogen Energy, 2023. **48**(36): p. 13705-13730.
20. American Petroleum Institute (API), *Management of Hazards Associated with Location of Process Plant Buildings*, API Recommend Practice 752, Second Edition, november 2003.
21. Protec Engineering cvba (voor Departement Omgeving, Vlaamse Overheid), *TWOL prohibit overdruk: onderzoek naar een prohibitfunctie voor letaliteit door overdruk*, 2018.
22. S. Kashkarov, Z. Li, en V. Molkov, *Blast wave from a hydrogen tank rupture in a fire in the open: Hazard distance nomograms*. International Journal of Hydrogen Energy, 2020. **45**(3): p. 2429-2446.
23. Antea Group en Instituut Fysieke Veiligheid (IFV), *Glas en gevel. Bouwen in een explosievoorschriftengebied. Praktijktoeepassing van nieuwe wetgeving.* , 23 maart 2021.
24. J. Eskens, et al., *Beglazing in explosieaandachtsgebieden. Toepassing scherfvrij glas. Informatiebundel omgevingsveiligheid*, Antea group projectnummer 01.0456797.100, 8 april 2020.
25. K.B. Holm, *Beregning av dødelighet fra luftsjokk*, FFI-rapport 2007/01896, 2007.
26. N.A. Eisenberg, C.J. Lynch, en R.J. Breeding, *Vulnerability model: A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills*, NTIS AD-A015 245, 1975.
27. DNV, *Safeti-NL 8.5*. 2022.
28. L. Mélani, I. Sochet, X. Rocourt, en S. Jallais. *Review of methods for estimating the overpressure and impulse resulting from a hydrogen explosion in a confined/obstructed volume*, International Conference on Hydrogen Safety (ICHS). Ajaccio, Corsica, France, pp. 2009.
29. J.B.M.M. Eggen, *GAME: development of guidance for the application of the multi-energy method*, Prepared by TNO Prins Maurits Laboratory for the Health and Safety Executive (HSE). Contract research report 202/1998, 1998.
30. W.P.M. Mercx, A.C.v.d. Berg, en D.v. Leeuwen, *Application of correlations to quantify the source strength of vapour cloud explosions in realistic situations. Final report for the project: 'GAMES'*, Prepared by TNO Prins Maurits Laboratory for the Health and Safety Executive (HSE). Contract research report 318/2001, 2001.
31. E.D. Mukhim, T. Abbasi, S.M. Tauseef, en S.A. Abbasi, *A method for the estimation of overpressure generated by open air hydrogen explosions*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018. **52**: p. 99-107.

32. X. Rocourt, I. Sochet, en B. Pellegrinelli, *Application of the TNO multi-energy and Baker-Strehlow-Tang methods to predict hydrogen explosion effects from small-scale experiments*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2023. **81**: p. 104976.
33. C.R.L. Bauwens en S.B. Dorofeev, *Modeling detonation limits for arbitrary non-uniform concentration distributions in fuel-air mixtures*. Combustion and Flame, 2020. **221**: p. 338-345.
34. C.R.L. Bauwens en S.B. Dorofeev. *Quantifying the potential consequences of a detonation in a hydrogen jet release*, International Conference on Hydrogen Safety (ICHS 2019), . Adelaide (Australia), pp. pp. 612–623. 2019.
35. B.D. Ehrhart en E.S. Hecht, *Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models (HyRAM+) Version 5.0: Technical Reference Manual*, Sandia Report SAND2022-16425, 2022.
36. S.E. Gant en H. Tucker, *Computational Fluid Dynamics (CFD) modelling of atmospheric dispersion for land-use planning around major hazards sites in Great Britain*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018. **54**: p. 340-345.
37. J.K. Thomas, C. Eastwood, en M. Goodrich, *Are unconfined hydrogen vapor cloud explosions credible?* Process Safety Progress, 2015. **34**(1): p. 36-43.
38. O.R. Hansen, *Hydrogen infrastructure—Efficient risk assessment and design optimization approach to ensure safe and practical solutions*. Process Safety and Environmental Protection, 2020. **143**: p. 164-176.
39. A.G. Venetsanos, T. Huld, P. Adams, en J.G. Bartzis, *Source, dispersion and combustion modelling of an accidental release of hydrogen in an urban environment*. Journal of Hazardous Materials, 2003. **105**(1): p. 1-25.
40. Nel Hydrogen. *Status and Q&A regarding the Kjørbo incident*. Beschikbaar via <https://nelhydrogen.com/status-and-ga-regarding-the-kjorbo-incident/>. (Geraadpleegd 3 mei 2023).
41. A. Klevstrand, *'Explosion after explosion': Three injured after truck towing 420kg of hydrogen crashes and explodes in Ohio*. 7 februari 2023: Hydrogen Insight.
42. OneH2. *Information regarding the February 6th incident in Ohio*. Beschikbaar via <https://oneh2.com/ohio-incident/>. (Geraadpleegd 3 mei 2023).
43. R. Wingrove. *Behind the headlines: what really happened in the Ohio hydrogen trailer explosion*. Beschikbaar via <https://cleanairity.com/2023/03/03/behind-the-headlines-what-really-happened-in-the-ohio-hydrogen-trailer-explosion/>. (Geraadpleegd 3 mei 2023).
44. FCH2EDU. *FCH2EDU (The European Educational platform for Fuel cells and Hydrogen), e-Laboratory*. Beschikbaar via <https://fch2edu.eu/home/e-laboratory/>. (Geraadpleegd 26 mei 2023).
45. S. Kim, T. Jang, T. Oli, en C. Park, *Behavior of Barrier Wall under Hydrogen Storage Tank Explosion with Simulation and TNT Equivalent Weight Method*. Applied Sciences, 2023. **13**(6): p. 3744.

46. S.I. Kim en Y. Kim. *Review: Hydrogen Tank Explosion in Gangneung, South Korea. Abstract voor 2019 Center for Hydrogen Safety Conference*. Beschikbaar via <https://www.aiche.org/chs/conferences/international-center-hydrogen-safety-conference/2019/proceeding/paper/review-hydrogen-tank-explosion-gangneung-south-korea>. (Geraadpleegd 07-02-2024).
47. RIVM, *Rekenmethodiek LNG-tankstations. Versie 1.0.2*, 2017.
48. M. van der Linden en G. Stam, *Effect van risicoreducerende maatregelen op het plaatsgebonden risico van LPG-tankstations*, RIVM-briefrapport 2021-0184, 2022.

8 Bijlage 1 Schadecriteria voor mensen binnens- en buitenshuis

Deze bijlage bevat een toelichting op de schadecriteria. Meer informatie is te vinden in bijvoorbeeld de PGS-richtlijnen [4, 5], de Amerikaanse richtlijn API-RP-752 (2^e editie⁴) [20], Vlaams onderzoek naar de probitrelatie voor overdruk [21], en het werk van Kashkarov et al. (2020) [22].

8.1 Binnenshuis

Personen die zich binnenshuis bevinden kunnen overlijden door indirecte gevolgen van een explosie, wanneer het gebouw (geheel of gedeeltelijk) instort of wanneer zij worden getroffen door glasscherven van gebroken ruiten.

In PGS 1 wordt aangenomen dat de kans op overlijden 20 tot 50% is wanneer een gebouw instort [4]. De kans op overlijden als gevolg van een explosie wordt daarmee bepaald door de explosiebestendigheid van het gebouw. Dit is sterk afhankelijk van de constructie. Ook de explosiebestendigheid van ramen is sterk afhankelijk van de constructie: het type glas, de wijze waarop het glas in het kozijn zit, en de wijze waarop het kozijn in het gebouw is bevestigd [23, 24]. PGS 1 bevat veel informatie over effecten van explosies op constructies, inclusief druk-impulsdiagrammen voor verschillende constructies [5].

In Tabel 8.1 zijn enkele schadecriteria voor gebouwen opgenomen. Hierbij merken we op dat veel van deze criteria uit PGS 1 [5] en het werk van Dorofeev [8] gebaseerd zijn op een studie van Jarrett in 1968 [9]. Deze studie is voornamelijk gebaseerd op waargenomen schade na bombardementen tijdens de Tweede Wereldoorlog. De criteria gelden dus voor huizen uit de periode 1900-1940. Dit zijn bakstenen woningen van twee tot vier verdiepingen met enkele muren en houten vloeren en daken. In PGS 1 [5] zijn enkele experimenten beschreven met verschillende soorten huizen die goede overeenkomst vertoonden met de schadecriteria afgeleid uit de studie van Jarrett. Hierbij zijn stenen en houten huizen getest maar geen typisch hedendaagse Nederlandse huizen met spouwmuren, waardoor de criteria conservatief zijn. De schadecriteria voor onherstelbare schade en verwoesting zijn volgens PGS 1 niet toepasbaar op gebouwen hoger dan vier verdiepingen.

In Tabel 8.2 is informatie opgenomen over de letaliteit binnenshuis.

⁴ De data is niet opgenomen in de meest recente versie (3^e editie).

Tabel 8.1 Enkele schadecriteria voor gebouwen, het effect vindt plaats vanaf de gegeven overdruk en impuls. Merk op dat de explosiebestendigheid van gebouwen sterk afhankelijk is van de constructie. Onderstaande getallen zijn voorbeelden.

Effect	Overdruk (bar)	Impuls (Pa·s)	Bron
Ruitbreuk, ondergrens	0,01	-	[5]
Ruitbreuk (dubbelglas), ondergrens	0,02	-	[5]
Lichte schade, huizen bewoonbaar (schade aan dakbedekking, plafonds ruiten)	0,022	118	[5] gebaseerd op [9]
Ruitbreuk, 50%	0,03	21 (grootte raam: 1,5-2,3 m ²) 55 (grootte raam: 0,12-0,56 m ²)	[5, 6]
Kleinschalige structurele schade, drempelwaarde	0,036	100	[8] gebaseerd op [9]
Ruitbreuk (dubbelglas), gemiddeld	0,05		[5]
Lichte schade aan constructies, huizen onbewoonbaar maar snel herstelbaar	0,056	221	[5] gebaseerd op [9]
Ruitbreuk, 100%	0,1	-	[5]
Muren buigen door (gebouw met stalen/betonnen frame, ongewapend metselwerk/bekleding)	0,10	-	[20]
Ernstige schade, huizen onbewoonbaar (instorting van dak, dragende elementen)	0,112	350	[5] gebaseerd op [9]
Dakplaat stort in (gebouw met stalen/betonnen frame, ongewapend metselwerk/bekleding)	0,14		[20]
Grootschalige structurele schade (bezwijken van dragende muren)	0,146	300	[8] gebaseerd op [9]
Bezwijken van muur van betonblokken	< 0,15-0,20	-	[5]
Onherstelbare schade aan huizen, 50-75% van buitenmuren ingestort of onveilig	0,243	588	[5] gebaseerd op [9]
Dak en muur buigen door, binnenmuren beschadigd (gebouw van gewapend beton of metselwerk)	0,28	-	[20]

Effect	Overdruk (bar)	Impuls (Pa·s)	Bron
Volledige verwoesting (gebouw met stalen/betonnen frame, ongewapend metselwerk/bekleding)	0,34		[20]
Gedeeltelijke verwoesting, 50-75% van muren bezwijken	0,345	520	[8] gebaseerd op [9]
Grootschalige schade, instorting (gebouw van gewapend beton of metselwerk)	0,41	-	[20]
Huizen volledig verwoest (>75% van buitenmuren ingestort)	0,465	906	[5] gebaseerd op [9]
Bezwijken van 20-30 cm stenen muur	< 0,50	-	[5]
Verwoesting van gebouwen	0,701	770	[8] gebaseerd op [9]
Volledige verwoesting (gebouw van gewapend beton of metselwerk)	0,83	-	[20]

Tabel 8.2 Letaliteit voor mensen binnenshuis. Merk op dat de kans op overlijden binnenshuis sterk samenhangt met de explosiebestendigheid, die weer afhankelijk is van de constructie.

Effect	Overdruk (bar)	Bron
Kans op overlijden binnenshuis 1%	0,056	[21]
Kans op overlijden of zwaar letsel binnenshuis 10%, gebouw met stalen of betonnen frame en versterkt metselwerk of bekleding	0,068	[20]
Kans op overlijden binnenshuis 2,5% (groepsrisico). Begrenzing van het explosieaandachtsgebied onder de Omgevingswet.	0,1	[7]
Kans op overlijden binnenshuis 1%, constructies van lichte materialen met veel ramen	0,12	[25]
Kans op overlijden of zwaar letsel binnenshuis 50%, gebouw met stalen of betonnen frame en versterkt metselwerk of bekleding	0,17	[20]
Kans op overlijden binnenshuis 10%	0,175	[21]
Kans op overlijden binnenshuis 1%, constructies met gewapend beton	0,25	[25]
Kans op overlijden of zwaar letsel binnenshuis 10%, gebouw uit gewapend beton	0,28	[20]
Kans op overlijden of zwaar letsel binnenshuis 50%, gebouw uit gewapend beton	0,48	[20]
Kans op overlijden binnenshuis 100%	0,55	[21]

8.2 Buitenshuis

Buitenshuis staan mensen direct bloot aan de drukgolf. Een overzicht van schadecriteria is gegeven in Tabel 8.3.

Als direct gevolg van de effecten van de drukgolf kunnen longen en oren beschadigd raken [4]. De kans op overlijden als gevolg van deze directe beschadiging van de longen is meestal klein vergeleken met de kans op overlijden door andere explosie-effecten [4]. De overdruk waar een mens aan wordt blootgesteld wordt bepaald door de piekoverdruk van de explosie en de oriëntatie van de persoon. In PGS 1 [4] wordt dit verder uitgelegd en zijn druk-impulsiagrammen gegeven waarmee de overlijdenskansen kan worden bepaald.

Daarnaast kunnen mensen buitenshuis worden meegesleurd door de drukgolf, of worden getroffen door fragmenten en brokstukken die ontstaan bij de explosie. De letaliteit is afhankelijk van de massa en snelheid van de scherven. In PGS 1 is hier meer informatie over gegeven.

Tabel 8.3 Enkele schadecriteria voor mensen buitenshuis.

Effect	Overdruk (bar)	Impuls (Pa·s)	Bron
Trommelvliesbreuk, drempel (1%)	0,165	23,5	[6, 26]
Longschade, drempel	0,3 - 0,8	-	[4]
100% letaliteit (groepsrisico, buiten)	0,3		[7]
Trommelvliesbreuk, ~50%	0,435 - 1	110	[4, 6, 26]
Longschade, drempel	-	180	[6]
Longschade, drempel (1% letaal)	1	-	[26]
Longschade, ~50% letaal	1,4	-	[26]
1% letaliteit	-	590	[6]
50% letaliteit	-	900	[6]

9 Bijlage 2 Effecten van waterstofexplosies

In paragraaf 9.1 worden de verwachte druk en impuls voor gaswolkexplosies gegeven. De effecten van fysische (tank)explosies zijn beschreven in paragraaf 9.2. Voor beide explosies worden de uitkomsten vergeleken met incidenten en experimenten met waterstof.

9.1 Gaswolkexplosie

Een gaswolkexplosie vindt plaats wanneer een wolk van ontvlambaar gas vrijkomt en vervolgens ontsteekt. Zoals besproken in hoofdstuk 3 wordt geen rekening gehouden met afdrijven van de gaswolk in de omgeving. De gaswolk is dus gecentreerd op de ongevalslocatie en ontsteekt daar.

9.1.1 *Achtergrond*

Er zijn verschillende wetenschappelijke modellen beschikbaar om de effecten van (gaswolk)explosies te berekenen. Deze variëren sterk in complexiteit en achterliggende aannames. De gepresenteerde resultaten zijn gebaseerd op modellen die tijdens het onderzoek zijn geïdentificeerd als goed toepasbaar. Dat wil zeggen, dat zij zijn ontwikkeld voor gaswolkexplosies⁵ en te gebruiken zijn zonder specifieke, gedetailleerde informatie over de omgeving. Dit is namelijk niet beschikbaar in dit onderzoek. Een uitgebreide beschrijving van modellen, of vergelijking van modellen onderling, valt buiten de scope van dit onderzoek.

Voor de beschrijving van de effecten van gaswolkexplosies gaan wij uit van het TNO Multi Energy model (TNO ME) [15]. Een beschrijving van het model is te vinden in Gele Boek (PGS 2) [2]. Het TNO ME model wordt gebruikt in Nederlandse QRA berekeningen en is geïmplementeerd in Safeti-NL.

In het TNO ME model wordt de overdruk en duur van de gaswolkexplosie berekend op basis van de energie, die wordt bepaald door de omvang van de gaswolk, enkele stofeigenschappen en de sterkte van de explosie. Uitgangspunten bij dit model zijn:

- een uniforme wolk met een stoichiometrisch mengsel van het brandbare gas en lucht;
- vaste vlamsnelheid;
- effecten van luchtverspreiding, afdrijven van wolk, etc. worden niet meegenomen.

De energie in de explosie wordt berekend door middel van de ontbrandingsenergie van waterstof ($1,2 \times 10^8$ J/kg) [27]. Daarnaast brengen wij nog in rekening dat niet al het waterstofgas betrokken zal zijn in de explosie. Slechts een deel van de wolk zal zich bevinden in een gebied met congestie of opsluiting. We gaan ervan uit dat de massafractie betrokken in de explosie 12,5% is. Deze fractie is zo gekozen om aan te sluiten bij de modellering in Safeti-NL. De onderbouwing van de waarde is beperkt dus de parameter is erg onzeker.

⁵ In de praktijk wordt vaak de TNT-equivalentie methode gebruikt. Deze is niet geschikt voor gaswolkexplosies.

De sterkte van de explosie wordt gekozen uit curves voor de *blast strength* variërend van 1 (milde deflagratie) tot 10 (detonatie), waarbij de sterkte toeneemt met toenemende congestie of opsluiting van de gaswolk.

Een aandachtspunt bij het gebruik van TNO ME is de keuze van de *blast strength* [28]. Het Gele Boek (PGS 2) geeft hier enkele richtlijnen voor [2]. Daarnaast is het model verder ontwikkeld in onderzoeksprojecten als GAME [29] en GAMES [30]. In deze projecten is gekeken naar manieren om de methode te verbeteren. In de GAME(S)-rapporten is beschreven hoe rekening kan worden gehouden met obstakels en gebieden waar de wolk (gedeeltelijk) opgesloten is. Het is mogelijk om de omgeving in te delen in verschillende gebieden, elk met een eigen mate van opsluiting en daarmee een eigen *blast strength* (curve) (zie bijvoorbeeld de beschrijving hiervan in het Gele Boek [2]). In het voorliggende rapport wordt uitgegaan van één explosiegebied omdat de resultaten niet bedoeld zijn voor een specifieke situatie, maar een algemeen (conservatief) beeld moeten geven van de effecten van waterstofexplosies. Specifieke omgevingsinformatie is daarom niet beschikbaar en ook niet nodig.

In een aantal studies worden de experimenteel bepaalde druk en impuls vergeleken met de modeluitkomsten, voor verschillende situaties (waterstofdeflagraties en -detonaties, met en zonder obstakels, kleine en grote schaal) [28, 31, 32]. Hieruit blijkt dat grotere effecten worden gemeten dan voorspeld op basis van de typisch gebruikte *blast strength*. In één studie worden daarom suggesties gegeven voor *blast strengths* die kunnen worden gebruikt voor waterstofexplosies [28]: voor verschillende situaties met lage ontstekingsenergie en enige obstructie (tussen 1 en 15% van het volume⁶) worden curves 5 t/m 8 voorgesteld.

Voor dit rapport is gekozen voor curve 10. Dit is gedaan om aan te sluiten bij de rekenmethoden in het Handboek Omgevingsveiligheid [1]. Op grotere afstand maakt het voor het berekenen van de overdruk overigens niet veel uit welke curve groter dan optie 6 wordt gekozen omdat de curves dan samenvloeien.

Curven 7 tot 10 geven alle berekende overdrukken die redelijk in overeenstemming zijn met de experimenteel bepaalde overdrukken in [31]: bij kleinere hoeveelheden (tot 5 kg) geeft het model met curve 7-10 een kleine overschatting van de overdruk, terwijl het bij grotere hoeveelheden (één experiment; 7,6 kg) een kleine onderschatting geeft⁷. Bij het gebruik van een lagere curve is de overeenkomst met experimenten minder. Curve 7, 8, 9 of 10 lijkt daarom een redelijke keuze. Hierbij moet worden opgemerkt dat de experimenten alleen informatie geven over de overdruk. Daarom was een vergelijking met de impuls niet mogelijk.

⁶ Hogere obstructies dan 15% worden niet besproken in de studie. Bij lage obstructie (0 tot 1%) wordt curve 3 voorgesteld.

⁷ Bij de vergelijking is aangenomen dat de massafractie in de betrokken explosie (F) hetzelfde is in het model en experimenten. Voor het experiment met 7,6 kg waterstof is dus aangenomen dat $F \cdot 7,6$ kg daadwerkelijk betrokken was in de explosie, zodat dit kan worden vergeleken met berekeningen van $F \cdot 7,6$ kg. De fractie F in de experimenten was onbekend.

9.1.2

Resultaten

De resultaten van de berekeningen met TNO ME zijn gegeven in Tabel 9.1 en Tabel 9.2. Het falen van een drukhouder van een tubetrailer (inhoud 35 kg) met daaropvolgende gaswolkexplosie resulteert dus bijvoorbeeld in 0,1 bar overdruk en 102 Pa·s impuls op 50 m afstand. Uit de drempelwaarden voor effecten (paragraaf 2.3 en bijlage 8) volgt dat dit ongeval kan leiden tot ruitbreuk en overige schade aan gebouwen. De kans op overlijden voor mensen binnenshuis is enkele procenten.

Tabel 9.1 Overdruk (in bar) bij verschillende afstanden voor explosies van verschillende hoeveelheden waterstof.

Afstand (m)	1 kg	5 kg	10 kg	35 kg	60 kg	200 kg	500 kg
10	0,17	0,40	0,61	1,64	2,58	6,81	13,5
25	0,06	0,10	0,13	0,27	0,35	0,74	1,51
50	0,03	0,05	0,06	0,10	0,12	0,22	0,36
75	-	0,03	0,04	0,06	0,08	0,12	0,19
100	-	0,02	0,03	0,04	0,05	0,09	0,12
125	-	-	0,02	0,03	0,04	0,07	0,09
150	-	-	-	0,03	0,03	0,05	0,08
175	-	-	-	0,02	0,03	0,05	0,06
200	-	-	-	0,02	0,02	0,04	0,06
225	-	-	-	-	0,02	0,03	0,05
250	-	-	-	-	-	0,03	0,04
500	-	-	-	-	-	-	-
1000	-	-	-	-	-	-	-

In de tabel zijn enkele grenswaarden uit paragraaf 2.3 aangegeven:

- "-" betekent dat de druk lager is dan 0,02 bar, een ondergrens voor relevante effecten.
- Cellen zijn grijs gekleurd wanneer de overdruk lager is dan 0,1 bar (de waarde die de begrenzing van het aandachtsgebied aangeeft).

Tabel 9.2 Impuls (in Pa·s) bij verschillende afstanden voor explosies van verschillende hoeveelheden waterstof.

Afstand (m)	1 kg	5 kg	10 kg	35 kg	60 kg	200 kg	500 kg
10	49	138	223	685	1177	5443	13487
25	21	55	85	210	292	697	1570
50	-	31	47	102	142	338	602
75	-	20	33	73	101	211	416
100	-	-	24	57	80	166	291
125	-	-	-	45	65	138	241
150	-	-	-	37	54	119	208
175	-	-	-	32	46	103	182
200	-	-	-	28	40	90	163
225	-	-	-	25	35	80	148
250	-	-	-	22	32	72	133
500	-	-	-	-	-	35	65
1000	-	-	-	-	-	-	32

In de tabel zijn enkele grenswaarden uit paragraaf 2.3 aangegeven:

- "-" betekent dat de impuls lager is dan 20 Pa·s, een ondergrens voor relevante effecten.
- Cellen zijn grijs gekleurd wanneer de impuls lager is dan 200 Pa·s (een waarde die overeenkomt met significante schade aan gebouwen).

9.1.3 *Vergelijking met model van Dorofeev*

De resultaten van TNO ME worden op hoofdlijnen vergeleken met het model van Dorofeev [8]. Dit model is verder ontwikkeld door Bauwens en Dorofeev [33, 34] en bijvoorbeeld geïmplementeerd in het rekenpakket Hiram [35]. Voor deze vergelijking is uitgegaan van de resultaten beschreven in het artikel van Dorofeev [8]. In dit model worden de vlamsnelheid en bijbehorende explosie-effecten berekend op basis van stofafhankelijke parameters, de grootte van de wolk, en de grootte en onderlinge afstand van aanwezige obstakels.

In de publicatie zijn voor verschillende hoeveelheden waterstof afstanden gegeven tot een aantal schadecriteria (waarden voor overdruk en impuls). In het model van Dorofeev is het uitgangspunt een wolk waarbij de waterstofconcentratie varieert: deze is het hoogste in het midden van de wolk. De maximale waterstofconcentratie is zo gekozen dat parameters zoals vlamsnelheid en explosie-energie conservatief zijn. De resultaten van dit model worden vergeleken met die van het TNO ME model voor de situatie *low congestion*, wat overeenkomt met onderlinge afstand 4 m tussen obstakels van 2 m grootte.

Uit deze vergelijking, zie Tabel 9.3, blijkt dat de effectstanden volgens TNO ME en Dorofeev typisch binnen een factor 2 van elkaar liggen. Zeker op korte afstanden geeft TNO ME krachtigere effecten: met het TNO ME model worden bepaalde schadecriteria wel overschreden (combinatie van overdruk en impuls), en met het model van Dorofeev niet. Bij grotere hoeveelheden waterstof (200 kg en meer) geeft het model van Dorofeev grotere effectafstanden.

Tabel 9.3 Effectafstanden (in meters) voor verschillende hoeveelheden waterstof, berekend met het TNO ME model (TNO) en door Dorofeev (Dor.) [8]. Voor deze vergelijking is uitgegaan van de schadecriteria die in het artikel van Dorofeev zijn gegeven [8].

Soort schade	35 kg		100 kg		500 kg	
	TNO	Dor.	TNO	Dor.	TNO	Dor.
<i>Total destruction of buildings (0,701 bar, 770 Pa·s)</i>	15	-	15	-	35	-
<i>Threshold for partial destruction, 50-75% of walls destroyed (0,345 bar, 520 Pa·s)</i>	15	-	20	-	50	64
<i>Threshold for serious structural damage, some load bearing members fall (0,146 bar, 300 Pa·s)</i>	15	-	35	-	85	170
<i>Border of minor structural damage (0,036 bar, 100 Pa·s)</i>	50	33	110	108	290	486

Uit het werk van Dorofeev blijkt ook het volgende: bij kleine hoeveelheden is er een grote invloed van congestie op de effectafstanden (bij toenemende congestie nemen de effectafstanden toe). Bij grotere hoeveelheden is dit effect veel kleiner, en vanaf ca. 500 kg zijn effectafstanden gelijk voor situaties met hoge en lage congestie.

9.1.4 *Complexe modellen*

In bovenstaande houden we geen rekening met de exacte indeling van de omgeving en de verspreiding van de gaswolk in deze omgeving. Zoals besproken in paragraaf 9.1.1 is het wel mogelijk om met TNO ME rekening te houden met een indeling in meerdere explosiegebieden. Daarnaast kunnen berekeningen worden gedaan met *Computational Fluid Dynamics* (CFD). CFD is de studie van de stroming van een fluidum (gas of vloeistof) via het numeriek oplossen van de stromingsvergelijking wat leidt tot nauwkeurigere berekeningen. Dergelijke berekeningen zouden van toegevoegde waarde kunnen zijn wanneer een uitspraak moet worden gedaan over een 'specifieke' omgeving, bijvoorbeeld een omgeving met overkappingen of hoge gebouwen die de verspreiding van het waterstof en/of de explosie beïnvloeden.

Net als alle modellen kent CFD beperkingen [36]. Een belangrijk aandachtspunt is dat CFD behoorlijk complex kan zijn, met veel invoermogelijkheden en -parameters. Hierdoor is een grote mate van expertise nodig bij het gebruik.

9.1.5 *Vergelijking met incidenten en experimenten*

Voor het bepalen van de verwachte overdrukken bij gaswolkexplosies (paragraaf 9.1) hebben we gebruik gemaakt van verzamelde data over explosie-experimenten die zijn gedaan met waterstofgas, zoals samengevat door Mukhim et al. [31]. Deze vergelijking met experimenten is in bovenstaande paragraaf beschreven.

We hebben daarnaast ook gekeken naar enkele incidenten met waterstofgas (zie Tabel 9.4), waarbij we ons beperken tot incidenten die plaatsvinden in de bebouwde kom, buiten industriegebieden. Meer informatie over incidenten met waterstof is bijvoorbeeld te vinden in [37], al vonden veel van de incidenten die daarin worden beschreven plaats in een industriële omgeving.

Onze resultaten zijn in overeenstemming met de effecten van het eerste incident in Tabel 9.4 (Stockholm 1983). Bij een explosie van enkele kg waterstof verwachten wij op basis van Tabel 9.1 en Tabel 8.1 op korte afstand (~10 m) schade aan gebouwen, terwijl op 75-100 m afstand slechts ruitschade (van met name enkel glas) wordt verwacht.

Het tweede incident in Tabel 9.4 (Kjørbo, 2019) veroorzaakte schade tot een grotere afstand dan verwacht voor een deflagratie. Er zijn aanwijzingen dat deze explosie een detonatie was [38].

Tabel 9.4 Beschrijving van enkele incidenten met waterstof (gaswolkexplosies).

Incident	Effecten	Ref.
Stockholm (Zweden), 1983. Gaswolkexplosie in de bebouwde omgeving (straat van 14 m breed, geparkeerde auto's, met gebouwen van 5-6 verdiepingen). De oorzaak was een lekkage van een pakket gascilinders op een voertuig (in totaal ca. 16 kg) gevolgd door ontsteking. In het officiële onderzoeksrapport werd de hoeveelheid waterstof betrokken in de explosie geschat op 10% van het totaal, latere CFD-modellering gaat uit van ~28% (4,5 kg, 600 m3 gaswolk).	De gevel van het gebouw naast het voertuig werd zwaar beschadigd. Lichtere schade (gebroken ruiten) vond plaats tot ca. 90 m afstand. Er vielen 16 gewonden.	[39]
Kjørbo (Noorwegen), 2019. Gaswolkexplosie bij een waterstoftankstation. De oorzaak was een lekkage van een opslagtank onder druk (in totaal 2,5 kg waterstof), waarschijnlijk een langzame kleine lekkage die groter werd, gevolgd door ontsteking. Van deze hoeveelheid was 0,5 kg of minder betrokken in de explosie.	Er was lichte schade (gebroken ruiten) in gebouwen op 65 m afstand. Daarnaast zijn fragmenten van de omliggende muur gevonden op een naastgelegen weg. Er vielen drie lichtgewonden.	[38, 40]
Ohio (Verenigde Staten), 2023. Brand na botsing van een waterstoftrailer met een ander voertuig. In totaal werd 420 kg waterstof vervoerd, verdeeld over 6 cilinders. Door de brand liep de druk in de cilinders op, waardoor waterstof werd afgeblazen via de overdrukbeveiliging. Ontsteking van dit waterstof resulteerde in meerdere (kleine) explosies.	Schade aan infrastructuur in de omgeving, onduidelijk tot welke afstand. Drie lichtgewonden (waarschijnlijk door de botsing).	[41-43]

9.2 Fysische explosie

Een waterstoftank die blootstaat aan bijvoorbeeld brand kan falen met als gevolg een explosie. Dit is een fysische explosie, maar het vrijgekomen waterstof kan ontsteken en levert dan ook een bijdrage aan de drukgolf. De effecten van fysische explosies van waterstoftanks zijn bepaald met een model dat ontwikkeld is bij Ulster University [17]⁸.

9.2.1 Achtergrond

De groep van Molkov (Ulster University) heeft een model ontwikkeld voor dergelijke explosies [17]. In dit model wordt zowel de bijdrage van de fysische explosie als de bijdrage van het ontstoken waterstofgas meegenomen. De door het model voorspelde overdrukken komen goed overeen met gemeten overdrukken tijdens experimenten met waterstoftanks (tot 2 kg). De uitkomsten van dit model zijn gepubliceerd in de vorm van nomogrammen waaruit de verwachte overdruk en impuls kan worden afgelezen voor waterstoftanks met verschillende

⁸ Safeti-NL bevat hiervoor het BLEVE-Blast model op basis van de CCPS 2010 richtlijn wat globaal vergelijkbare afstanden geeft [27].

volumes en drukken tot 10.000 L en 1000 bar (bijna 500 kg) [22]. Het model is ook geïmplementeerd in een online tool ('E-tool Blast') van FCH2EDU [44]. De resultaten in paragraaf 9.2.2 zijn berekend met behulp van deze tool. Hierbij zijn we uitgegaan van een stand-alone tank op de grond, met alle overige parameters default (de fractie van de beschikbare verbrandingsenergie die bijdraagt aan de explosie is 5% [17], de temperatuur van zowel tank als omgeving is 293 K). De achtergrond van het model en de gehanteerde parameters en hun waarden zijn niet nader onderzocht.

Uit het onderzoek van Molkov volgt dat de overdruk en de impuls van de explosie toenemen wanneer de tankdruk toeneemt (bij gelijk tankvolume). Daarnaast maakt het voor de effecten uit of sprake is van een losstaande tank of een brandstoftank die in/onder een voertuig is bevestigd. Bij een brandstoftank wordt een deel van de vrijgekomen energie geabsorbeerd door het voertuig, dat kan vervormen of fragmenteren. In bepaalde gevallen kan een brandstoftank toch worden beschreven als een losstaande tank, bijvoorbeeld omdat het voertuig zodanig is beschadigd dat de tank bijna vrij komt te liggen [22].

9.2.2

Resultaten

De resultaten van de E-tool Blast (voor fysische explosies) zijn vergeleken met de resultaten van het model voor gaswolkexplosies (TNO ME). Deze vergelijking is gedaan voor twee tanks met verschillende omvang: een tank die overeenkomt met een drukhouder van een tubetrailer (35 kg, 2,4 m³ bij 200 bar, Tabel 9.5) en een tank die overeenkomt met een grote opslagtank bij een waterstoftankstation (500 kg, 10 m³ bij 1000 bar, Tabel 9.6).

Samengevat volgt uit de vergelijking dat de berekende overdruk voor een gaswolkexplosie vergelijkbaar of iets hoger is dan de overdruk van een fysische explosie. Op grote afstanden neemt het verschil toe tot een factor 5. De impuls is bij gaswolkexplosies tot een factor 3 hoger dan voor fysische explosies⁹.

Tabel 9.5 Vergelijking overdruk (in bar) en impuls (Pa·s) bij verschillende afstanden voor gaswolkexplosies en fysische explosies, voor een tubetrailer (35 kg waterstof, tank van 2.400 liter bij 200 bar).

Afstand (m)	Overdruk (bar)			Impuls (Pa·s)		
	Gaswolk	Fysisch	Gaswolk /fysisch	Gaswolk	Fysisch	Gaswolk /fysisch
10	1,64	0,83	2,0	685	217	3,2
25	0,27	0,22	1,2	210	97	2,2
50	0,10	0,08	1,3	102	49	2,1
75	0,06	0,01	4,6	73	36	2,0

⁹ Bij grote hoeveelheden (500 kg) is de impuls op zeer korte afstand (10 m) voor de gaswolkexplosie een orde van grootte hoger dan voor de fysische explosie. Dit verschil is verder niet relevant, omdat het in het geval van de gaswolkexplosie gaat om een punt dat zich waarschijnlijk in de gaswolk bevindt.

Tabel 9.6 Vergelijking overdruk (in bar) en impuls (Pa·s) bij verschillende afstanden voor gaswolkexplosies en fysische explosies, voor een grote opslagtank bij een waterstoftankstation (500 kg waterstof, tank van 10.000 liter bij 1000 bar).

Afstand (m)	Overdruk (bar)			Impuls (Pa·s)		
	Gaswolk	Fysisch	Gaswolk /fysisch	Gaswolk	Fysisch	Gaswolk /fysisch
10	13,5	5,5	2,5	13487	1198	11,3
25	1,5	0,82	1,9	1570	519	3,0
50	0,36	0,30	1,2	602	272	2,2
75	0,19	0,16	1,2	416	189	2,2
100	0,12	0,11	1,1	291	146	2,0

9.2.3

Vergelijking met incidenten en experimenten

Zoals beschreven hierboven is het model van Molkov voor explosies van waterstoftanks gevalideerd aan de hand van experimenten met tanks tot 2 kg (en druk rond 320 bar) [17]. Uit deze experimenten bleek ook dat de fragmenten (van de tank en eventueel het voertuig) worden meegevoerd door de drukgolf en tot op grote afstand kunnen komen:

- Voor het experiment met de losstaande tank werd een fragment van 14 kg gevonden op 82 m afstand van de explosie.
- Voor het experiment met de tank bevestigd onder een voertuig werden fragmenten gevonden tot 107 m afstand. Het voertuig zelf werd 22 m verplaatst.

In 2019 vond in Gangneung, Zuid-Korea een explosie plaats van een waterstoftank [45, 46]. Hierbij vielen zes doden en werden gebouwen op 15 m afstand zwaar beschadigd (schade aan dragende elementen). Bij een ander gebouw, op 100 m afstand, brak het grootste deel van de ruiten. Op de locatie waren drie waterstoftanks met een capaciteit van 40.000 L bij 1000 bar (ongeveer 2000 kg per tank; het is niet duidelijk wat de vulgraad van de tank was). De berekende effecten van een fysische explosie van een grote tank (Tabel 9.6) zijn wat krachtiger dan de waargenomen schade.

10 Bijlage 3 Explosies van andere stoffen

Om de effecten van waterstofexplosies op hoofdlijnen te vergelijken met explosies van andere stoffen geeft deze bijlage informatie over de effecten van explosies van LNG (methaan) en LPG (propaan). Er wordt enkel gekeken naar gaswolkexplosies.

Het gebruikte model (TNO Multi Energy) en de overige gebruikte parameters (curve 10, 12,5% van de massa betrokken in de explosie) zijn gelijk aan die in paragraaf 9.1.

10.1 Scenario's

Voor elke stof worden twee scenario's meegenomen: een typisch transport- en een typisch opslagscenario:

- Voor LNG is gekozen voor een tankauto met inhoud van 20 ton [10] en een opslagtank van 15,4 ton [47].
- Voor LPG is gerekend met een tankauto met een inhoud van 26,7 ton en een opslagtank van 9,2 ton [48].

De verbrandingsenergieën zijn $5,0 \times 10^7$ J/kg (LNG) en $4,6 \times 10^7$ J/kg (LPG) [27]. De resultaten hiervan worden vergeleken met die van het typische transport- en opslagscenario voor waterstof (35 kg en 500 kg).

10.2 Resultaten

In Tabel 10.1 en Tabel 10.2 zijn de overdruk en impuls gegeven voor gaswolkexplosies van verschillende hoeveelheden waterstof, LNG en LPG. Uit de resultaten blijkt dat bij de typische transport- en opslaghoeveelheden de explosies van LNG of LPG veel krachtiger zullen zijn dan explosies van waterstof. Dit komt omdat de hoeveelheden LNG en LPG veel groter zijn.

Wanneer wordt gekeken naar gelijke hoeveelheden, geeft juist waterstof krachtigere explosies (zie Tabel 10.3, en het werk van Dorofeev [18]). Dit heeft te maken met de hogere verbrandingsenergie van waterstof. Uit het model van Dorofeev [18] volgt ook dat de vlamsnelheid hoger is voor explosies van waterstof dan bij explosies van LNG of LPG, bij gelijke hoeveelheden. Hierdoor zijn de waterstofexplosies krachtiger.

Tabel 10.1 Overdruk (in bar) bij verschillende afstanden voor explosies van verschillende (typische) hoeveelheden waterstof, LNG en LPG.

Afstand (m)	Waterstof		LNG		LPG	
	35 kg	500 kg	20 ton	15,4 ton	26,7 ton	9,2 ton
10	1,64	13,5	*	*	*	*
25	0,27	1,51	14,98	12,28	*	7,34
50	0,10	0,36	2,72	2,23	3,36	1,40
75	0,06	0,19	1,05	0,86	1,25	0,53
100	0,04	0,12	0,53	0,46	0,62	0,34
125	0,03	0,09	0,37	0,32	0,41	0,24
150	0,03	0,08	0,28	0,24	0,31	0,18
175	0,02	0,06	0,22	0,19	0,24	0,13
200	0,02	0,06	0,18	0,14	0,20	0,12
225	-	0,05	0,14	0,13	0,16	0,10
250	-	0,04	0,12	0,11	0,13	0,09
500	-	-	0,06	0,05	0,06	0,04
1000	-	-	0,03	0,02	0,03	-

Voor elke stof komt de hoeveelheid in de linkerkolom overeen met het transportsценario en de rechterkolom met het opslagscenario.

"*" betekent dat bij deze energie en afstand de overdruk niet kan worden berekend met het TNO ME-model.

"-" betekent dat de druk lager is dan 0,02 bar, een ondergrens voor relevante effecten. Cellen zijn grijs gekleurd wanneer de overdruk lager is dan 0,1 bar (de waarde die de begrenzing van het aandachtsgebied aangeeft).

Tabel 10.2 Impuls (in Pa·s) bij verschillende afstanden voor explosies van verschillende (typische) hoeveelheden waterstof, LNG en LPG.

Afstand (m)	Waterstof		LNG		LPG	
	35 kg	500 kg	20 ton	15,4 ton	26,7 ton	9,2 ton
10	685	13487	*	*	*	*
25	210	1570	37182	29355	-	15421
50	102	602	6487	4838	9046	2855
75	73	416	3091	2465	3760	1439
100	57	291	1912	1613	2298	1116
125	45	241	1560	1330	1782	917
150	37	208	1332	1129	1526	761
175	32	182	1165	981	1330	603
200	28	163	1012	776	1183	540
225	25	148	824	703	1022	490
250	22	133	756	645	860	449
500	-	65	425	366	484	246
1000	-	32	214	179	247	120

Voor elke stof komt de hoeveelheid in de linkerkolom overeen met het transportscenario en de rechterkolom met het opslagscenario.

"*" betekent dat bij deze energie en afstand de impuls niet kan worden berekend met het TNO ME-model.

"-" betekent dat de impuls lager is dan 20 Pa·s, een ondergrens voor relevante effecten. Cellen zijn grijs gekleurd wanneer de impuls lager is dan 200 Pa·s (een waarde die overeenkomt met significante schade aan gebouwen).

Tabel 10.3 Overdruk en impuls bij verschillende afstanden voor explosies van dezelfde hoeveelheid H₂, LNG en LPG. De berekeningen zijn gedaan voor 35 kg.

Afstand (m)	Overdruk (bar)			Impuls (Pa·s)		
	H ₂	LNG	LPG	H ₂	LNG	LPG
10	1,64	0,83	0,78	685	317	296
25	0,27	0,17	0,16	210	116	110
50	0,10	0,07	0,07	102	60	57
75	0,06	0,04	0,04	73	42	40
100	0,04	0,03	0,03	57	31	30
125	0,03	0,02	0,02	45	25	24
150	0,03	0,02	-	37	21	-
175	0,02	-	-	32	-	-
200	0,02	-	-	28	-	-
225	-	-	-	25	-	-
250	-	-	-	22	-	-
500	-	-	-	-	-	-
1000	-	-	-	-	-	-

"-" betekent dat overdruk lager is dan 0,02 bar, of de impuls lager dan 20 Pa·s, een ondergrens voor relevante effecten.

Cellen zijn grijs gekleurd wanneer de overdruk lager is dan 0,1 bar (de waarde die de begrenzing van het aandachtsgebied aangeeft) of de impuls lager is dan 200 Pa·s (een waarde die overeenkomt met significante schade aan gebouwen).

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven

Nederland

www.rivm.nl

maart 2024

De zorg voor morgen
begint vandaag