

# Waterstofincidenten in besloten ruimtes



Nederlandse Academie voor  
Crisisbeheersing en Brandweezorg  
Postbus 7010  
6801 HA Arnhem  
Kemperbergerweg 783, Arnhem  
[www.nipv.nl](http://www.nipv.nl)  
[info@nipv.nl](mailto:info@nipv.nl)  
026 355 24 00

## Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2023

Auteur: M.B. Spoelstra

Met dank aan: A. Barreveld (NIPV), H. Brans (NIPV), R. van Herpen FSE, J. Reinders (NIPV), C. Scheffer (ABT) en J. Zevenbergen (TNO)

Datum: 20 september 2023

Wij hechten veel belang aan kennisdeling. Delen uit deze publicatie mogen dan ook worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding

Het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid is bij wet vastgelegd onder de naam Instituut Fysieke Veiligheid.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>5</b>
	<b>Inleiding</b>	<b>9</b>
<b>1</b>	<b>Overdruk</b>	<b>12</b>
1.1	Wat is een explosie?	12
1.2	De effecten van een explosie	12
1.3	Overdruk	13
1.4	Gebouweisen op het gebied van overdruk	15
1.5	Effect van overdruk op gebouwen van gewapend beton	16
1.6	Schadebeeld	17
<b>2</b>	<b>Warmtestraling</b>	<b>19</b>
2.1	Wat is warmtestraling?	19
2.2	Schadebeeld	19
2.3	Gebouweisen op het gebied van warmtestraling	20
2.4	Effect van warmtestraling op constructies van gewapend beton	20
<b>3</b>	<b>Waterstoffakkel</b>	<b>22</b>
3.1	Inleiding	22
3.2	Effecten waterstoffakkel in de open lucht	22
3.3	Effecten waterstoffakkel op constructies	25
3.4	Effecten waterstoffakkel in parkeergarages	26
3.5	Samenvatting	28
<b>4</b>	<b>Explosie waterstoftank</b>	<b>29</b>
4.1	Inleiding	29
4.2	Effecten explosie waterstoftank in de open lucht	29
4.3	Effecten explosie waterstoftank op gebouwen	32
4.4	Effecten explosie waterstoftank in tunnels	33
4.5	Effecten explosie waterstoftank in parkeergarages	37
4.6	Samenvatting	38
<b>5</b>	<b>Vuurbal</b>	<b>40</b>
5.1	Inleiding	40
5.2	Effecten vuurbal in de open lucht	40
5.3	Effecten vuurbal in tunnels	42
5.4	Effecten vuurbal in parkeergarages	43
5.5	Samenvatting	43
<b>6</b>	<b>Brokstukken</b>	<b>45</b>
6.1	Inleiding	45
6.2	Effecten brokstukken in de open lucht	45
6.3	Effecten brokstukken op gebouwen	47
6.4	Effecten brokstukken in parkeergarages	48
6.5	Samenvatting	48

<b>7</b>	<b>Explosie waterstofwolk</b>	<b>49</b>
7.1	Inleiding	49
7.2	Effecten explosie waterstofwolk in de open lucht	49
7.3	Effecten explosie waterstofwolk in gebouwen	50
7.4	Effecten explosies waterstofwolk in tunnels	51
7.5	Effecten explosie waterstofwolk in parkeergarages	56
7.6	Samenvatting	57
<b>8</b>	<b>Beleid rondom LPG</b>	<b>59</b>
8.1	Voertuigeisen	59
8.2	Parkeerverboden en aanvullende eisen parkeergarages	59
8.3	Risico-studies	60
<b>9</b>	<b>Vergelijking effecten LPG en waterstof</b>	<b>62</b>
9.1	LPG-auto's versus waterstofauto's	62
9.2	Effecten van LPG in een parkeergarage	62
9.3	Samenvatting	66
<b>10</b>	<b>Referenties</b>	<b>67</b>

# Samenvatting

Dit rapport beschrijft de resultaten van een literatuuronderzoek dat tot doel heeft om te bepalen in hoeverre dragende constructies van parkeergarages bestand zijn tegen de gevolgen van een incident met een waterstoftank van een waterstofauto. De resultaten worden aan de hand van vijf onderzoeksvragen beschreven.

Een waterstoftank kan op verschillende manieren falen en tot verschillende effecten leiden. Welke effecten optreden en hoe groot deze zijn, is erg afhankelijk van de omstandigheden waaronder een waterstoftank faalt. De volgende scenario's met bijbehorende effecten kunnen optreden:

- > waterstoffakkelt: warmtestraling
- > explosie waterstoftank: overdruk
- > vuurbal (als gevolg van explosie waterstoftank): warmtestraling
- > brokstukken (als gevolg van explosie waterstoftank): impact brokstukken
- > explosie waterstofwolk: overdruk.

Er is weinig bekend over het falen van een waterstoftank van een waterstofauto die in een parkeergarage staat. De literatuur beschrijft wel de effecten van het falen van tanks van waterstofauto's en van losse waterstoftanks in de open lucht of in tunnels. In dit rapport zijn die gegevens zo goed mogelijk vertaald naar de situatie dat een waterstofauto in een parkeergarage staat en daar faalt. De beschrijvingen zijn vooral kwalitatief van aard en gaan in op de grootte van een effect en op de doorwerking van dat effect op de constructieve veiligheid van parkeergarages.

**Onderzoeksvraag 1:** Welke eisen worden gesteld aan de dragende constructie van parkeergarages?

Parkeergarages worden ontworpen om bestand te zijn tegen buitengewone drukbelasting door botsingen, wind en explosies in verwarmingsruimtes. In het ontwerp wordt echter geen rekening gehouden met overdrukeffecten die kunnen ontstaan bij het falen van een waterstoftank in een waterstofauto.

Parkeergarages worden **wel** ontworpen om de warmtestraling van een brand te kunnen weerstaan. Dit moet worden aangetoond met methoden die gebruikmaken van de standaard brandkromme die gebaseerd is op veelgebruikte bouwmaterialen. Parkeergarages worden echter niet ontworpen om de warmtestraling te kunnen weerstaan als een waterstoftank faalt en er een fakkel of vuurbal ontstaat. De warmtestraling van deze effecten is heel anders van duur en aard dan die van bouwmaterialen.

**Onderzoeksvraag 2:** Wat zijn de kenmerken van een waterstoffakkel afkomstig van de waterstoftank van een waterstofauto?

Een waterstoffakkel ontstaat meestal wanneer het thermisch geactiveerde ventiel (TPRD) geopend wordt en de vrijkomende waterstof ontstoken wordt. Een waterstoffakkel is zeer heet (max. 1700 °) en heeft bij onbelemmerde uitstroom een lengte van maximaal zo'n 7 m. Bij een waterstofauto is de fakkellengte echter korter, omdat de uitstroom belemmerd wordt doordat waterstof tegen de vloer botst. Een waterstoffakkel duurt ongeveer 2 à 3 minuten.

**Onderzoeksvraag 3:** Wat zijn de kenmerken van de fysische explosie van de waterstoftank van een waterstofauto?

#### *Fysische explosie*

Bij het exploderen van een waterstoftank ontstaat een drukgolf. In de open lucht neemt het oppervlak van de drukgolf toe, waardoor de overdruk van de explosie exponentieel afneemt als functie van de afgelegde afstand. In een tunnel blijft de overdruk van een explosie echter lang gehandhaafd, omdat het oppervlak van de drukgolf niet groter wordt, maar constant blijft. In een parkeergarage kan het oppervlak van een drukgolf wel toenemen, bijvoorbeeld via openingen in gevels of via hoger- of lagergelegen verdiepingen waardoor de overdruk af kan nemen.

Initieel zal de kracht van een explosie in een parkeergarage hoger kunnen zijn dan in een tunnel, omdat plafonds in parkeergarages lager zijn dan in tunnels. Als in een parkeergarage grote openingen en andere verdiepingen aanwezig zijn, zal het oppervlak van de drukgolf snel toenemen, waardoor de kracht van de explosie sneller afneemt ten opzichte van een tunnel.

#### *Vuurbal*

Na het exploderen van een waterstoftank ontstaat een vuurbal; deze heeft in de open lucht een levensduur van enkele seconden. In een besloten omgeving als een parkeergarage houdt een vuurbal langer aan, omdat het verbrandingsproces langer duurt. Een vuurbal verspreidt zich in een besloten omgeving onder het plafond over een grotere afstand. Hoe groot deze afstand is, hangt af van de dimensies van de besloten omgeving en de vulgraad van de waterstoftank.

Parkeergarages zijn in vergelijking met tunnels korter, breder en lager en kunnen meerlaags zijn. De geometrie van een parkeergarage werkt op diverse manieren door op de omvang van de vuurbal. De dimensies van een vuurbal in een parkeergarage blijven naar verwachting beperkt tot de etage waar de explosie plaatsvindt, mogelijk aangevuld met de etages die erboven en eronder liggen en de ruimte buiten gevelopeningen.

#### *Brokstukken*

Bij het exploderen van een waterstoftank ontstaat een beperkt aantal grote brokstukken en veel kleine brokstukken. Bij een waterstoftank in een waterstofauto zijn meer brokstukken te verwachten. Een explosie van een waterstoftank van 350 bar in een waterstofauto geeft brokstukken tot 50 m. Voor waterstoftanks van 700 bar zal die afstand groter zijn omdat er meer energie vrijkomt, maar het is niet bekend hoe groot de afstand dan is waar brokstukken kunnen terechtkomen.

**Onderzoeksvraag 4:** Wat zijn de kenmerken van een chemische explosie van de waterstofwolk die is ontstaan na het lek raken van de waterstoftank van een waterstofauto?

In besloten ruimtes als tunnels en parkeergarages zijn hoge overdrukken van het exploderen van waterstofwolken alleen te verwachten als de waterstofconcentratie in de wolk hoger is dan 15 vol.%. In tunnels kunnen overdrukken van meer dan 0,3 bar worden bereikt, maar **dat** is afhankelijk van onder andere de omvang van de gaswolk, de waterstofconcentratie in de wolk en de aanwezigheid van ventilatie.

In parkeergarages is de kracht van een explosie en daarmee van de gegenereerde overdrukken naar verwachting kleiner dan in tunnels, omdat de drukgolf zich in meerdere richtingen kan verspreiden.

**Onderzoeksvraag 5:** Is de draagconstructie van een parkeergarage bestand tegen de effecten die gepaard kunnen gaan met het falen van een waterstoftank?<sup>1</sup>

- > *Fakkel:* Als een waterstoffakkel contact maakt met de constructie, kan lokaal betonafspat ontstaan of kan de temperatuur van stalen elementen worden verhoogd. De constructie zal ter plaatse echter niet falen, omdat de blootstellingsduur aan de waterstoffakkel daarvoor te kort is. Schade door warmtestraling – dus zonder rechtstreeks contact – is niet te verwachten vanwege.
- > *Explosie waterstoftank:* Het exploderen van een volle waterstoftank in een parkeergarage zal naar verwachting ter plaatse leiden tot het falen van constructiedelen als kolommen, muren, vloeren en plafonds. Gezien het lokale karakter van de explosie, zal het lokaal falen van de constructie van een parkeergarage niet leiden tot een voortschrijdend instorten van de parkeergarage.
- > *Vuurbal:* Naar verwachting zal de warmtestraling van de vuurbal niet leiden tot het falen van de constructie van een parkeergarage, omdat de blootstellingsduur daarvoor te kort is. De constructie van een parkeergarage kan aangetast worden door de overdruk van het exploderen van de waterstoftank, en de vuurbal kan dit verergeren doordat secundaire branden kunnen ontstaan.
- > *Brokstukken:* Brokstukken van de waterstoftank en van de waterstofauto kunnen betonnen constructies beschadigen en stukken daarvan doen afbreken of zelfs doorboren. Het is echter niet te verwachten dat een betonnen constructie faalt wanneer ze geraakt wordt door brokstukken, omdat maar een gering deel van de constructie beschadigd kan raken.
- > *Explosie waterstofwolk:* De overdruk die ontstaat als in een parkeergarage een vrijgekomen waterstofwolk ontsteekt, zal groot genoeg zijn om muren, plafonds, vloeren en kolommen te doen falen. Het voortschrijdend instorten van een parkeergarage is daarbij niet uit te sluiten, omdat de explosie van de waterstofwolk geen lokaal karakter heeft.

<sup>1</sup> Voor de beantwoording van deze vraag wordt in dit rapport gebruik gemaakt van de termen 'lokaal instorten' en 'voortschrijdend instorten'. Lokaal instorten is het instorten van alleen de constructiedelen die zich dicht bij de waterstofauto bevinden. Voortschrijdend instorten is het lokaal instorten van de constructie, gevolgd door het verder - en mogelijk volledig - instorten van de constructie.

De resultaten van onderzoeksvragen 1 - 5 staan samengevat in onderstaand tabel. Overdrukeffecten leiden tot grotere schade aan een parkeergarage dan warmte-effecten en de impact van brokstukken.

Effect	Lokale schade aan parkeergarage?	Mogelijk lokaal instorten van parkeergarage?	Mogelijk voortschrijdend instorten van parkeergarage?
Fakkels	Ja	Nee	Nee
Fysische explosie	Ja	Ja	Nee
Vuurbal	Ja (secundair)	Nee	Nee
Brokstukken	Ja	Nee	Nee
Chemische explosie	Ja	Ja	Mogelijk

Het onderzoek laat zien dat er nog veel onzekerheden en kennishiaten zijn, omdat er weinig wetenschappelijke onderbouwing is voor de effecten van een falende waterstoftank in parkeergarages. Voor die onderbouwing zijn experimenten en/of computersimulaties nodig.

**Onderzoeksvraag 6:** Hoe is in het verleden omgegaan met veiligheidsvraagstukken en -beleid rondom LPG-voertuigen in parkeergarages?

In veel landen geldt een parkeerverbod voor LPG-auto's in ondergrondse parkeergarages, omdat men vermoedt dat er onder gewone omstandigheden een reëel risico bestaat op het vrijkomen van LPG door lekkage of een ongeluk. In Nederland geldt dat parkeerverbod niet, omdat er eisen gesteld worden op het gebied van LPG-detectie en automatische ventilatie. TNO heeft in 1984 en 1998 onderzoek gedaan naar de risico's van LPG-auto's in parkeergarages. De conclusie was dat de risico's van LPG- en benzineauto's vergelijkbaar zijn.

**Onderzoeksvraag 7:** Zijn voor waterstofauto's en LPG-auto's de effecten in parkeergarages (scenario's, kansen, effecten) vergelijkbaar?

Het vrijkomen en het al dan niet ontsteken van propaan (LPG) geeft dezelfde effecten als het vrijkomen en ontsteken van waterstof (fakkels, fysische explosie van de tank, vuurballen en gaswolkexplosie). De grootte van deze effecten kan verschillen voor propaan en waterstof, maar de doorwerking ervan op een parkeergarage is steeds vergelijkbaar.



# Inleiding

In 2021 heeft NIPV in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) een literatuurstudie uitgevoerd naar de veiligheidsaspecten van waterstofauto's in parkeergarages (NIPV, 2021a). Hierbij zijn de volgende onderzoeksvragen beantwoord:

1. In hoeverre leiden incidentscenario's met waterstofauto's in parkeergarages (inclusief betrokkenheid bij brand) tot het vrijkomen van waterstof en welke effecten vloeien hieruit voort?
2. Welke condities zijn hierbij bepalend voor de aard en omvang van de effecten?
3. Wat is bekend over de kans op het vrijkomen van waterstof in een parkeergarage en over de kans dat het vrijgekomen waterstof ontsteekt?

In een waterstofauto bevindt de meeste waterstof zich in een of meerdere waterstoftanks. Een waterstoftank is een cilinder waar gasvormig waterstof onder hoge druk (maximaal 700 bar) wordt opgeslagen. Bij het vrijkomen en ontsteken van waterstof ontstaat een fakkel en/of een explosie. Zeker in een besloten ruimte als een parkeergarage kunnen deze effecten gevaarlijk zijn, bijvoorbeeld omdat de draagconstructie aangetast kan worden. Figuur 1.1 laat de ligging van een waterstofauto in een parkeergarage zien en geeft indruk van het onderwerp van dit rapport.



**Figuur 1.1 Schematische weergave van een waterstofauto in een parkeergarage met in het geel een waterstoftank. Ook zijn diverse delen van de draagconstructie van een parkeergarage te zien.**

Er is momenteel weinig bekend over de effecten die kunnen optreden als waterstof vrijkomt in een parkeergarage en dit onderwerp wordt dan beschouwd als een kennishiaat.<sup>2</sup> Om dit

<sup>2</sup> Dit wordt zowel in het Waterstof Veiligheid Innovatieprogramma (WVIP) als in het NIPV-rapport 'Brandveiligheid van parkeergarages met elektrisch aangedreven voertuigen' als een kennishiaat beschouwd.

kennishiaat te vullen, is een literatuuronderzoek uitgevoerd. De kennis die hiermee is verkregen, is relevant voor het beoordelen van veiligheidsrisico's van parkeergarages en andere besloten ruimtes door bijvoorbeeld veiligheidsregio's, omgevingsdiensten, overheden, het bedrijfsleven en kenniscentra. Daarnaast kan de verkregen kennis gebruikt worden door hulpdiensten om beter te kunnen bepalen of en eventueel hoe een brandweerinzet uitgevoerd kan worden.

## Doel

Het doel van het onderzoek is om te bepalen in hoeverre dragende constructies van parkeergarages bestand zijn tegen de gevolgen van een incident met een waterstofauto.

## Onderzoeksvragen

Op basis van de doelstelling zijn de volgende onderzoeksvragen opgesteld:

1. Welke eisen worden gesteld aan de dragende constructie van parkeergarages?
2. Wat zijn de kenmerken van een waterstoffakkel afkomstig van de waterstoftank van een waterstofauto?
3. Wat zijn de kenmerken van de fysische explosie van de waterstoftank van een waterstofauto?
4. Wat zijn de kenmerken van een chemische explosie van de waterstofwolk die is ontstaan na het lek raken van de waterstoftank van een waterstofauto?
5. Is de draagconstructie van een parkeergarage bestand tegen de effecten die gepaard kunnen gaan met het falen van een waterstoftank?

In het verleden zijn onderzoeken gedaan naar de risico's van LPG-auto's in parkeergarages om op basis daarvan landelijk beleid te kunnen formuleren.<sup>3</sup> Die studies hebben enige overeenkomsten met dit onderzoek en geven context; daarom zijn de volgende onderzoeksvragen toegevoegd:

6. Hoe is in het verleden omgegaan met veiligheidsvraagstukken en -beleid rondom LPG-voertuigen in parkeergarages?
7. Zijn voor waterstofauto's en LPG-auto's de effecten in parkeergarages (scenario's, kansen, effecten) vergelijkbaar?

## Onderzoeksmethode

Onderzoeksvragen 1 tot en met 5 zijn beantwoord door middel van literatuuronderzoek. Op verschillende manieren is literatuur verkregen:

- > Door te zoeken binnen ScienceDirect met behulp van de zoektermen HYDROGEN en PARKING GARAGE. Van de 499 artikelen zijn er 309 geselecteerd; na lezen van de abstracts van de artikelen bleven 33 artikelen over.

---

<sup>3</sup> LPG staat voor Liquid Petroleum Gas.

- > Door te zoeken binnen ScienceDirect met behulp van zoektermen die specifiek zijn voor een deelonderwerp, bijvoorbeeld PARKING GARAGE EXPLOSION HYDROGEN TANK voor informatie over het exploderen van een waterstoftank in een parkeergarage.
- > Door het screenen van artikelen op de website van het Europees HyTunnel-project en op de website van Kennisplatform Tunnelveiligheid.
- > Door het screenen van artikelen in het *International Journal of Hydrogen Energy* over het jaar 2022 op het gebied van veiligheid.
- > Diverse artikelen zijn verkregen doordat ze als bron in andere artikelen vermeld werden ('sneeuwbalmethode') of doordat ze tijdens andere onderzoeksactiviteiten op het gebied van waterstofveiligheid naar voren kwamen.

Onderzoeksvragen 6 en 7 zijn ook beantwoord door middel van literatuuronderzoek. Een aantal bronnen is online of in hardcopy niet meer beschikbaar, maar is via het netwerk van de onderzoekers verkregen.

De resultaten van het onderzoek zijn ter review voorgelegd aan enkele experts, bijvoorbeeld op het gebied van gasexplosies en op het gebied van bouwkundige constructies.

## Afbakening

Bij een incident met een waterstofauto spelen veel factoren een rol. Dit rapport beschrijft de effecten die kunnen optreden met een waterstoftank van 700 bar van een door waterstof aangedreven personenauto in een parkeergarage. De nadruk ligt hierbij op de constructieve veiligheid van een parkeergarage die uit gewapend beton is opgetrokken. Er wordt van uitgegaan dat tijdens het vrijkomen van waterstof de waterstofauto normaal geparkeerd staat en niet op de zijkant of ondersteboven ligt als gevolg van een ongeluk.

Dit rapport gaat niet in op:

- > de waarschijnlijkheid van een incident waarbij waterstof vrijkomt uit een auto in een parkeergarage
- > aantallen slachtoffers of de aard van verwondingen
- > rookontwikkeling en -verspreiding
- > bronmaatregelen en mitigerende maatregelen
- > de inzet van de brandweer
- > heavy-duty voertuigen die op waterstof rijden (bijvoorbeeld vorkheftrucks).

## Leeswijzer

Om de resultaten van het onderzoek te begrijpen, is uitleg over overdruk en warmtestraling nodig. Dit wordt gedaan in hoofdstukken 1 en 2. De daaropvolgende hoofdstukken beschrijven de diverse scenario's die mogelijk zijn: een fakkel (hoofdstuk 3), een fysische explosie (hoofdstuk 4), een vuurbal (hoofdstuk 5), brokstukken (hoofdstuk 6) en een chemische explosie (hoofdstuk 7). De hoofdstukken 3 tot en met 7 eindigen elk met een samenvatting van de belangrijkste aspecten van het betreffende hoofdstuk.

De uitwerking van onderzoeksvragen 6 en 7 is opgenomen in respectievelijk hoofdstuk 8 en hoofdstuk 9.

# 1 Overdruk

Overdruk is het fenomeen waarbij lucht zeer snel verplaatst wordt ('blast') als gevolg van de grote hoeveelheid energie die vrijkomt bij een explosie (PHOV, 2022). De term overdruk geeft aan dat de druk die ontstaat bij de explosie groter is dan de druk die onder normale omstandigheden heerst in de atmosfeer. De overdruk van de explosie en de snelheid waarmee de blast zich verplaatst, kunnen gebouwen beschadigen en mensen verwonden. Om de gevolgen van overdruk en de bevindingen van deze literatuurstudie te kunnen begrijpen, wordt in dit hoofdstuk uitgelegd wat een explosie is en welke factoren de kracht van een explosie bepalen.

## 1.1 Wat is een explosie?

Bij een explosie komt in zeer korte tijd een grote hoeveelheid energie vrij; dit gaat gepaard met een snelle drukverhoging. Voor het veiligheidsvraagstuk dat centraal staat in deze studie zijn twee typen explosies van belang:

- > Fysische explosie: bij een fysische explosie komt energie vrij zonder dat er sprake is van een chemische reactie (Kashkarov et al, 2015). Een bekend voorbeeld is het knappen van een opgeblazen ballon. In dit rapport is het exploderen van de waterstoftank een fysische explosie. De waterstoftank in waterstofauto's is gemaakt van vezelversterkt composiet, te weten koolstofvezels in epoxyhars. Als de waterstoftank aangestraald wordt door een brand, degradeert het polymeer en verzwakt de tankwand. De waterstoftank bezwijkt explosief op het moment dat deze mechanisch gezien te zwak is geworden om de hoge druk in de tank te kunnen weerstaan. Om dit scenario te voorkomen, worden waterstoftanks in voertuigen voorzien van een 'thermally activated pressure relief device' (TPRD) (NIPV, 2021a).<sup>4</sup>
- > Chemische explosie: bij een chemische explosie vindt een zeer snelle chemische reactie plaats en is er sprake van een chemische omzetting van moleculen. De chemische reactie betreft het verbranden van brandbaar gas; dit vindt plaats aan het vlamfront. Het vlamfront is dus de reactiezone. Een voorbeeld van een chemische explosie is het ontbranden van aardgas dat zich opgehoopt heeft in een besloten ruimte.

## 1.2 De effecten van een explosie

De gevolgen die een fysische of een chemische explosie kunnen hebben, zijn divers:

- > *Overdruk*: bij een fysische en een chemische explosie komen zeer snel grote hoeveelheden energie vrij; dit zorgt voor overdruk. Hierdoor kunnen mensen in de omgeving vallen en gewond raken en kunnen (delen van) gebouwen instorten. Zie verder de hoofdstukken 4 en 7.
- > *Vuurbal*: bij het fysisch exploderen van een waterstoftank kan het vrijgekomen waterstof snel verbranden, waardoor een vuurbal ontstaat die omhoog gaat. Mensen kunnen letsel

<sup>4</sup> Polymeren geleiden warmte slecht. Dat is de reden dat de inhoud van de waterstoftank weinig opwarmt als deze aangestraald wordt. Hierdoor neemt de druk in de waterstoftank ook weinig toe.

oplopen door direct vlamcontact en door de warmtestraling van de vuurbal. Zie verder hoofdstuk 5.

- > *Scherfwerking*: scherven van de waterstoftank die ontstaan bij een fysische explosie worden met grote kracht de omgeving in geslingerd en kunnen mensen en gebouwen treffen, met verwondingen en schade tot gevolg. Zie verder hoofdstuk 6.
- > *Secundaire effecten*: de hierboven genoemde effecten kunnen leiden tot effecten elders, bijvoorbeeld het in brand raken van het gebouw waar de explosie plaatsvindt of het breken van glas in nabijgelegen gebouwen.

Bij explosies speelt naast de overdruk ook de impuls een rol. De impuls van een explosie is het product van de overdruk en de tijdsduur waarin drukverhoging optreedt. In de literatuur wordt weinig geschreven over de impuls van een explosie als het gaat om het bepalen van het schadebeeld van gebouwen. De focus ligt op de overdruk, veelal omdat dit de bepaling van het schadebeeld aanzienlijk vereenvoudigt (Russo, 2022). In de volgende paragrafen en hoofdstukken wordt daarom alleen ingegaan op overdruk.

## 1.3 Overdruk

### 1.3.1 De invloed van de omgeving

Bij de fysische explosie van een waterstoftank komt instantaan veel energie vrij, wat zich vertaalt in overdruk. Dicht bij de explosie is de overdruk groot en in de open lucht verspreidt de drukgolf zich in alle richtingen, waardoor het oppervlak van de drukgolf snel toeneemt. De overdruk wordt snel kleiner naarmate de afstand tot de explosielocatie groter wordt.<sup>5</sup> Binnen kan de drukgolf zich niet alle richtingen verspreiden door de aanwezigheid van muren, plafonds of door obstakels. Hierdoor neemt het oppervlak van de drukgolf minder toe dan in de open lucht. In binnensituaties is ook sprake van reflectie van de drukgolf; beide factoren leiden ertoe dat de druk in een besloten ruimte minder snel afneemt en de kracht van de drukgolf dus groter zal zijn dan in de open lucht.

Ook bij een chemische explosie zijn overdrukken in besloten ruimtes groter dan in de open lucht: bij de verbranding van waterstofgas ontstaan hete verbrandingsgassen, en in de open lucht kunnen deze gassen zich in alle richtingen verspreiden waardoor drukopbouw vóór het vlamfront beperkt is. Er is dan sprake van een wolkbrand en niet zozeer van een chemische explosie. Als de ontbranding echter in een besloten ruimte plaatsvindt, kunnen de expanderende gassen veel minder goed weg, waardoor er drukopbouw plaatsvindt vóór het vlamfront uit en er wel sprake is van een chemische explosie. Als een besloten ruimte groot is, kan het vlamfront meer snelheid en daarmee grotere overdrukken ontwikkelen dan in een kleinere ruimte (Nolan, 2019).

### 1.3.2 De kracht van de explosie

De kracht van een explosie is van veel factoren afhankelijk. Dat maakt dat explosies vaak uniek en niet eenvoudig met elkaar te vergelijken zijn. Factoren die bepalend zijn voor de gevolgen van een explosie zijn:

- > de omgeving van de explosie (de mate van opsluiting (binnen, buiten), zie paragraaf 1.3.1)
- > de grootte, geometrie en indeling van de ruimte waarin de explosie plaatsvindt

<sup>5</sup> De overdruk van een explosie neemt exponentieel af met de afstand.

- > de aanwezigheid van obstakels
- > de afstand tot de explosie.

Bovenstaande factoren gelden zowel voor een fysische explosie als voor een chemische explosie. Voor een chemische explosie komen daar nog de volgende factoren bij:

- > de fysische en chemische eigenschappen van de ontbrandbare stof
- > de concentratie van de ontbrandbare stof
- > de sterkte van de ontstekingsbron (ontstekingsenergie)
- > de aanwezigheid van ventilatie.

Om de kracht van een chemische explosie te bepalen, wordt gebruikgemaakt van modellen. Eén van deze modellen is de Multi-energy methode van TNO. Dit model gaat ervan uit dat de kracht van een explosie afhangt van de mate van opsluiting en minder van de hoeveelheid brandbaar gas in een wolk (Mukhim et al, 2018). Het model van TNO bevat tien curves waarin de kracht van de explosie wordt weergegeven als functie van de ontstekingsenergie, de mate van opsluiting en de dichtheid van obstakels (Tabel 1.1). Curve 10 staat voor de sterkste explosie en curve 1 voor de zwakste explosie.

**Tabel 1.1 Globale indeling van de kracht van gasexplosies in verschillende omstandigheden (bron: (PGS2, 2005))**

Ontstekingsenergie		Dichtheid obstakels			Besloten omgeving		Kracht explosie (curvenummer)
Laag	Hoog	Hoog	Laag	Afwezig	Ja	Nee	
	X	X			X		7 -10
	X	X				X	7 - 10
X		X			X		5 -7
	X		X		X		5 -7
	X		X			X	4-6
	X			X	X		4-6
X		X				X	4-5
	X			X		X	4-5
X			X		X		3-5
X			X			X	2-3
X				X	X		1-2
X				X		X	1

### 1.3.3 Deflagratie versus detonatie

Voor waterstof geldt dat de meeste explosies deflagraties zijn, dat wil zeggen dat de snelheid waarmee het vlamfront van de explosie zich voortplant, lager is dan de snelheid

van het geluid. Een deflagratie kan overgaan in een detonatie als waterstof dermate snel verbrandt, dat de snelheid van het vlamfront groter is dan de snelheid van geluid in het waterstof-luchtmengsel. Een detonatie plant zich veel sneller voort dan een deflagratie en leidt tot overdrukken die tot een factor 20 groter kunnen zijn dan de omgevingsdruk (HyResponse, 2013).

Om een detonatie te krijgen, moet de waterstofconcentratie in de wolk minstens 18,5 vol.% zijn. Onder deze concentratie kan geen overgang plaatsvinden van deflagratie naar detonatie, omdat de detonatie zichzelf niet in stand kan houden (Hy4Heat, 2021). Dergelijke hoge concentraties zijn in de open lucht niet te verwachten, maar kunnen in een besloten omgeving wel bereikt worden.<sup>6</sup>

## 1.4 Gebouweisen op het gebied van overdruk

NEN-EN 1991-1-7 en de daarbij behorende nationale bijlage beschrijven de eisen die in Nederland aan een betonnen gebouw gesteld worden om buitengewone drukbelastingen te weerstaan. Een gebouw moet bestand zijn tegen bekende buitengewone belastingen die zijwaarts (botsingen) of alzijdig (explosies) plaatsvinden (NEN, 2015) (NEN, 2019). Paragraaf 3.3. van NEN-EN 1991-1-7 geeft echter ook aan dat “bij het ontwerp de mogelijkheid van bezwijken van de constructie die ontstaat door een onbekende oorzaak, moet zijn beperkt”. Normaal gesproken zal een gebouw zó ontworpen zijn, dat als een deel van een constructie faalt, andere constructiedelen de krachten kunnen opvangen om voortschrijdend falen te voorkomen. Als dit niet kan, is een alternatief om een constructie-deel te ontwerpen op een zijdelingse belasting van 34 kN/m<sup>2</sup>. Deze strategie is conform het Bouwbesluit 2012 niet vereist en wordt in de praktijk alleen toegepast bij staande elementen (kolommen of wanden) van gebouwen van gevolgklasse 3.<sup>7</sup> Een explosie werkt echter alzijdig en zal ook liggende elementen belasten (balken en vloeren), maar die elementen worden vrijwel nooit op deze belasting ontworpen (Scheffer, 2022).

Paragraaf 5.1 van NEN-EN 1991-1-7 geeft aan dat “ontploffingen in rekening moeten zijn gebracht bij het ontwerp en de berekening van alle delen van het gebouw en andere civieltechnische werken waar gas wordt verbrand of gereguleerd, of waar explosief materiaal zoals explosieve gassen, of vloeistoffen die explosieve damp of gas vormen, is opgeslagen of wordt getransporteerd” (NEN, 2015). Uit Bijlage D van de nationale bijlage blijkt dat het in de praktijk vooral zal gaan om verwarmingsruimtes. In zo'n ruimte moet rekening worden gehouden met een statische belasting van maximaal 50 kN/m<sup>2</sup>, afhankelijk van onder andere de hoeveelheid aardgas en de dimensies van de ruimte (NEN, 2019). Door de statische belasting conservatief in te schatten, hoeft als het ware geen rekening te worden gehouden met het dynamische karakter van een explosie (de impuls van een gasexplosie). Het is aan de ontwerper om te bepalen hoe groot de krachten zijn, en omdat dit geen eenvoudige berekeningen zijn, wordt assistentie door specialisten aanbevolen (Scheffer, 2022).

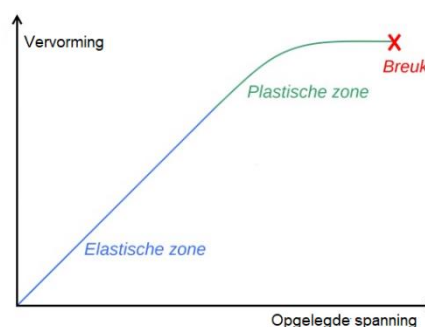
<sup>6</sup> Bij waterstof is een detonatie alleen te verwachten als er sprake is van een overgang van deflagratie naar detonatie (DDT). Een 'directe' detonatie is onwaarschijnlijk, omdat de ontstekingsenergie die daarvoor nodig is in de orde 10<sup>4</sup> J ligt (Zhang, 2014).

<sup>7</sup> Een gevolgklasse is een klasse waarin een constructie wordt ingedeeld volgens NEN-EN 1990, waarbij de ernst van de gevolgen van bezwijken van de constructie maatgevend is voor de bepaling van de klasse. Het bezwijken van een gebouw met gevolgklasse 3 leidt tot het verlies van tientallen mensenlevens en/of heeft zeer grote economische of sociale gevolgen (KPCV, z.d.)

NEN-EN 1991-1-7 gaat uit van een mogelijke chemische explosie in een verwarmingsruimte van een gebouw. Op basis van paragraaf 5.1 van deze norm zal de opslag van waterstof in waterstoftanks van auto's niet gezien worden als opslag van explosief gas. In het ontwerp van een parkeergarage zal dus geen rekening worden gehouden met een fysieke explosie van een waterstoftank, net zomin als dat met LPG-tanks wordt gedaan.

## 1.5 Effect van overdruk op gebouwen van gewapend beton

Gebouwen worden ontworpen om permanente belastingen te kunnen dragen (het eigen gewicht en de rustende belasting<sup>8</sup>) en veranderlijke belastingen (wind, sneeuw). Materialen zullen daarbij altijd wat vervormen en uitrekken, maar zolang deze vervorming in het elastisch gebied ligt, is er weinig aan de hand. De vervorming zal dan verdwijnen op het moment dat de belasting verdwijnt. Is de belasting echter groter dan waar het gebouw voor ontworpen is, dan kan het gebouw permanent (plastisch) vervormd worden. Deze vervorming blijft in stand op het moment dat de belasting weggenomen wordt. Is de belasting te groot, dan kan een gebouw falen. De manier waarop een materiaal vervormt en uitrekt, wordt weergegeven in een spanning-rek diagram, zie Figuur 1.1 (Callister, 1997).

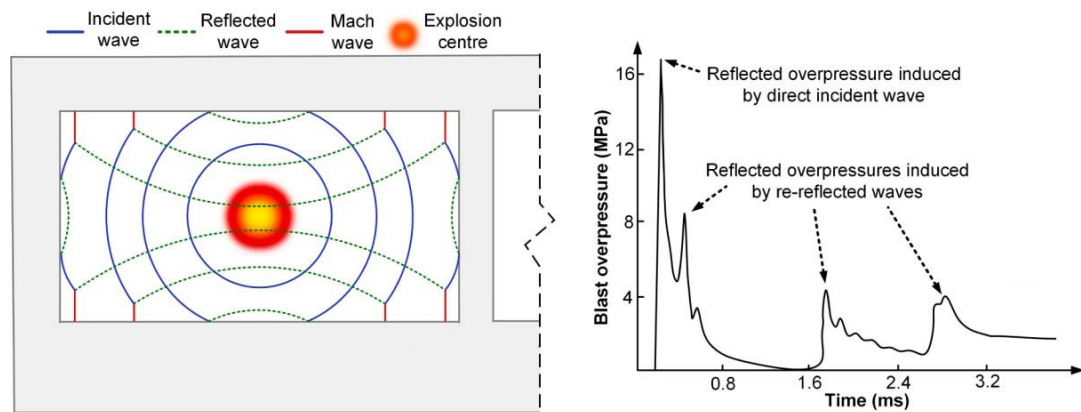


**Figuur 1.1 Spanning-rek diagram van een materiaal (bron: (Callister, 1997))**

Een gebouw bestaat uit een stelsel van staande elementen (kolommen en wanden) en liggende elementen (balken en vloeren). Bij een explosie wordt een gebouw gedurende zeer korte tijd belast op een manier waarvoor het niet ontworpen is. Het gewicht en de stijfheid van de constructie spelen dan een grote rol in het al dan niet falen van het gebouw. De manier waarop vervorming optreedt en de omvang van de vervorming hangen niet alleen af van de overdruk, maar ook van de eigenschappen van de staande en liggende elementen en de manier waarop deze elementen tot een constructie zijn samengesteld (Kotchourko et al., 2022).

<sup>8</sup> De rustende belasting bestaat uit het gewicht van een constructieonderdeel en het gewicht van constructieonderdelen en afwerkingslagen die hieraan verbonden zijn.

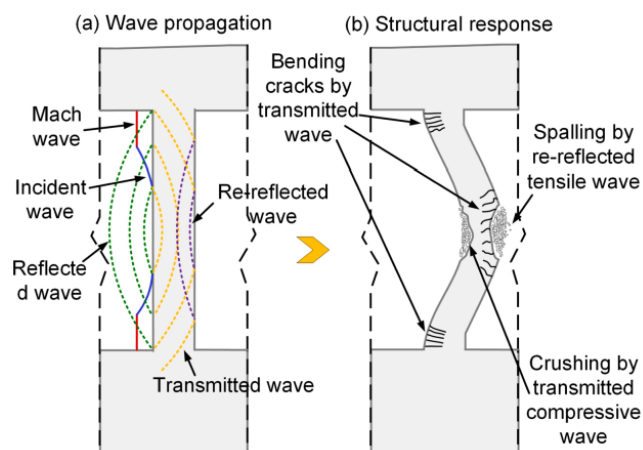




**Figuur 1.2** Links: schematische weergave van inkomende en gereflecteerde overdrukgolven in een besloten ruimte.<sup>9</sup> Rechts: voorbeeld van meting die de sterkte van inkomende en gereflecteerde drukgolven laat zien (bron: (Cheng et al, 2022))

De drukgolf van een explosie wordt door de staande en liggende elementen van een bouwwerk gereflecteerd (Figuur 1.2 links). De zich herhalende reflecties leiden tot meerdere pieken in overdruk en de intensiteit van deze pieken neemt in de tijd af (Figuur 1.2 rechts).

De drukgolf die een staand of liggend element van een gebouw raakt, zorgt voor een spanningsgolf in dat element. De spanningsgolf plant zich hierin voort en wordt aan de andere kant van het element weerkaatst. Dit proces kan zich herhalen. Afhankelijk van de grootte van de spanningsgolf ontstaan druk- en trekspanningen in de elementen die kunnen leiden tot het scheuren en het afbrokkelen van de elementen. Hierdoor verzwakt de constructie van het element of – in het slechtste geval – bezwijkt (Cheng et al, 2022). Dit is weergegeven in Figuur 1.3.



**Figuur 1.3** De doorwerking van drukgolven op een verticaal element van een gebouw (bron: (Cheng et al, 2022))

## 1.6 Schadebeeld

Welke schade een gebouw kan ondervinden door een explosie is niet eenvoudig te bepalen. Experimenten en numerieke methoden (simulaties) zijn het nauwkeurigst, maar zijn erg

<sup>9</sup> Als de inkomende en gereflecteerde drukgolven elkaar tegenkomen, vormen ze samen zogenaamde Mach-golven. Dit wordt in dit rapport verder buiten beschouwing gelaten (Cheng et al, 2022).

kostbaar. Daarom wordt vaak gebruikgemaakt van empirisch bepaalde waarden. In Tabel 1.2 worden diverse waarden voor het schadebeeld gegeven als functie van de overdruk. De gegevens moeten gezien worden als richtinggevend, omdat het schadebeeld door lokale omstandigheden groter of kleiner kan zijn. Voorbeelden van aspecten die van invloed zijn op het schadebeeld zijn de afstand tussen de explosie en het gebouw, de hoek waarmee de drukgolf op het gebouw valt en de aanwezigheid van obstakels tussen de explosie en het gebouw. In dit rapport worden zoveel mogelijk de criteria van het RIVM gevolgd, omdat deze in Nederland gebruikt worden in risicoberekeningen.

**Tabel 1.2 Schadebeeld en -criteria gebouwen voor overdruk**

Overdruk (bar)	Schadebeeld	Bron
0,035	Beperkte schade	PGS 1-2B, 2005
0,17	Matige schade	
0,35	Zware schade	
0,83	Totale verwoesting	
0,048	Beperkte schade: glasbreuk, breuken in verbindingen en het verwijderen van scheidingswanden uit fittingen	Kashkarov, 2015
0,069	Gedeeltelijke instorting: 50 tot 75 % van de buitenmuren is beschadigd	
0,345	Grote schade: dragende constructiedelen zijn ingestort en er is schade aan daken en buitenmuren	
0,02	Ruitbreuk dubbel glas	RIVM, 2021
0,1	1 % letaliteit door glasscherven	
0,3	Instorten gebouwen (100 % letaliteit binnen en buiten)	

## 2 Warmtestraling

Om de gevolgen van warmtestraling en de bevindingen van deze literatuurstudie te kunnen begrijpen, wordt in dit hoofdstuk uitgelegd wat warmtestraling is en welke impact dit kan hebben op constructies van gewapend beton.

### 2.1 Wat is warmtestraling?

Bij het verbranden van een vloeistof of gas komt energie in de vorm van warmte vrij. De hete verbrandingsproducten stralen een deel van hun warmte uit naar de omgeving en dit wordt stralingswarmte genoemd. De hoeveelheid warmte ( $W$ ) die een brand uitstraalt op een oppervlak ( $m^2$ ) in de omgeving wordt uitgedrukt in  $W/m^2$ .

Bij het verbranden van waterstof wordt alleen waterdamp gevormd, terwijl bij het verbranden van koolwaterstoffen ook koolstofdioxide en roetdeeltjes ontstaan. Deze stoffen zijn verantwoordelijk voor de warmtestraling van de vlammen. Roetdeeltjes bestaan vooral uit koolstof en vlammen van koolwaterstoffen zijn door de aanwezigheid van roetdeeltjes zichtbaar en stralen ten opzichte van waterstofvlammen veel meer warmte uit. Waterstofvlammen bevatten geen roetdeeltjes, zijn daardoor slecht zichtbaar en stralen relatief weinig warmte uit (Kotchourko et al, 2022).

### 2.2 Schadebeeld

Tabel 2.1 geeft voor een aantal materialen het schadebeeld bij warmtestraling. De gegevens moeten gezien worden als richtinggevend, omdat het schadebeeld door lokale omstandigheden groter of kleiner kan zijn. Deze omstandigheden kunnen bijvoorbeeld betrekking hebben op de afstand tussen de brand en het object dat aangestraald wordt, op de blootstellingsduur en op de materialen waarvan het object is gemaakt.

**Tabel 2.1 Schadebeeld en -criteria gebouwen voor warmtestraling (bron: (Kotchourko et al, 2022))**

Warmtestraling ( $kW/m^2$ )	Duur aanstraling (minuten)	Schadebeeld
4	30	Ruitbreuk
12,5 - 15	30	Hout ontbrandt, plastics smelten
25 - 32	30	Staal vervormt
35 – 37,5	30	Schade aan installaties
100	30	Staalconstructie faalt

## 2.3 Gebouweisen op het gebied van warmtestraling

Het Besluit bouwwerken leefomgeving (Bbl) geeft prestatie-eisen voor de constructieve veiligheid van gebouwen bij brand. De brandwerendheid van bouwconstructies is afhankelijk van de gebruiksfunctie en de hoogte van een gebouw en varieert van 30 tot 120 minuten. Hiermee wordt bedoeld dat de bouwconstructie niet mag bezwijken (instorten) als die gedurende een bepaalde tijd blootgesteld wordt aan een brand. De eisen voor de brandwerendheid van bouwconstructies staan voor bestaande bouw in art. 3.12 van het Bbl en voor nieuwbouw in art. 4.17. De weerstand tegen bezwijken geldt voor het deel van de bouwconstructie waar de brand niet is: het brandcompartiment waar de brand is, mag in principe bezwijken, zolang dit maar niet leidt tot het 'voortschrijdend' instorten van constructiedelen buiten het brandcompartiment.

Artikel 4.18 van het Bbl verwijst naar normen die gebruikt moeten worden om de brandwerendheid van bouwconstructies aan te tonen. De eisen aan de brandwerendheid van betonconstructies staan beschreven in Eurocode 2. Deze eisen zijn in Nederland verwerkt in NEN-EN 1992-1-2 ('*Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-2: Algemene regels*') (NEN, 2021). Om te bepalen of een constructie brandwerend is, worden delen van de constructie onderworpen aan brandtesten, waarbij de brand een voorgeschreven brandkromme moet volgen. Voor gebouwen en parkeergarages is dat de standaard brandkromme en voor tunnels waar met gevaarlijke stoffen gereden mag worden de brandkromme van Rijkswaterstaat (RWS). Zie Figuur 2.1 verderop.

## 2.4 Effect van warmtestraling op constructies van gewapend beton

Wanneer gewapend beton wordt blootgesteld aan hoge temperaturen, degradeert het op de volgende manieren (HyTunnel, 2019a):

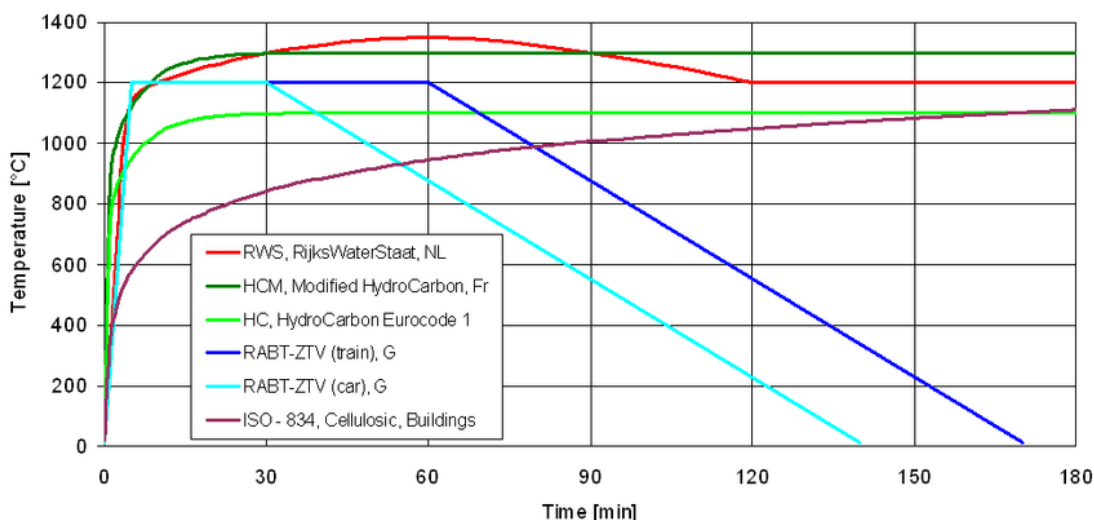
- > **Betonafspat.** Beton bevat poriën die gevuld kunnen zijn met water, zeker aan het oppervlak van het beton. Als de temperatuur van het beton hoger is dan 100 °C, wordt het water in de poriën gasvormig en zet het uit. Hierdoor komen er extra krachten op het beton te staan, waardoor uiteindelijk stukken beton kunnen loskomen en afspringen. Bij hogere temperaturen vinden in het beton fysische processen (zwellen) en chemische processen (ontleding) plaats, waardoor het afspringen van beton toeneemt.<sup>10</sup>
- > **Degradatie van staal.** De stalen wapening in beton kan door hoge temperaturen ook worden aangetast. De sterkte van staal kan bij temperaturen van 700 °C nog maar 20 % zijn van de sterkte bij kamertemperatuur. De bouwconstructie kan daardoor falen.
- > **Onthechting van beton en wapening.** Beton en staal zetten bij hogere temperaturen uit, maar doen dat in verschillende mate. Boven 400 °C zorgt dit ervoor dat de hechting tussen het beton en de stalen wapening verloren gaat.

Ongespannen beton vormt bij temperaturen van meer dan 300 °C microscheurtjes; bij 500 °C ontstaan grotere scheurtjes en bij 700 °C heeft ongespannen beton de meeste sterkte verloren. Bij voorgespannen beton vindt de vorming van scheurtjes bij hogere temperaturen plaats (HyTunnel, 2019b).

<sup>10</sup> Door overdruk kan beton ook afspringen (Cheng, 2021). Dat aspect is in dit rapport niet beschouwd.

Gewapend beton kan beschermd worden door te voorkomen dat het te warm wordt. Maatregelen zijn bijvoorbeeld de aanwezigheid van ventilatie en/of sprinklers. Daarnaast kan gewapend beton beschermd of versterkt worden door het aanbrengen van een extra betonlaag, het aanbrengen van een brandwerende laag of door vezels toe te voegen aan gewapend beton (HyTunnel, 2019a).

Gebouwen of constructies die beschermd moeten worden tegen brand, moeten volgens de daarvoor geldende regelgeving branden kunnen weerstaan conform een voorgeschreven brandkromme. Een brandkromme is een grafiek die het verloop van de temperatuur van een brand weergeeft als functie van de tijd (Promat, 2020). Figuur 2.1 geeft een overzicht van enkele bekende brandkrommen. Eén van de brandkrommen in Figuur 2.1 is de standaard brandkromme (paarse lijn) die gebaseerd is op de verbrandingsnelheid van veelgebruikte bouwmaterialen. Deze kromme moet gebruikt worden om aan te tonen dat een gebouw brandwerend is (NEN, 2021). Een andere brandkromme is de kromme die door Rijkswaterstaat ontwikkeld is (rode lijn) en die representatief is voor de zwaarst mogelijke koolwaterstofbrand in een tunnel. Een landtunnel moet één uur bestand zijn tegen een thermische belasting volgens de RWS-brandkromme en een onderwatertunnel twee uur.



**Figuur 2.1 Diverse brandkrommen (bron: (Imran et al, 2015))**

# 3 Waterstoffakkel

## 3.1 Inleiding

Eén van de effecten waar bij waterstofauto's in parkeergarages rekening mee moet worden gehouden, is het ontstaan van een waterstoffakkel. De waterstoffakkel ontstaat wanneer een waterstoftank aangestraald wordt door een brand en de afblaasbeveiliging (TPRD) geactiveerd wordt. De TPRD voorkomt dat de waterstoftank explodeert ten gevolge van het verzwakken van de tankwand door aanstraling. Een TPRD wordt geactiveerd bij 110 °C, waarna de inhoud van de waterstoftank in een tijdsbestek van enkele minuten vrijkomt. Door de brand ontsteekt de brandbare waterstof meteen en ontstaat een waterstoffakkel. Hoewel het opengaan van de TPRD als een veiligheidsmaatregel wordt beschouwd, kan de fakkel die hierdoor ontstaat, gevolgen hebben voor de omgeving (zie verderop). Door een juiste locatie en uitstroomrichting te kiezen, worden de gevolgen echter beperkt. Het ontstaan van een waterstoffakkel wordt dan ook verkozen boven het exploderen van de waterstoftank.

Er zijn voor zover bekend geen experimenten uitgevoerd om het gedrag van waterstoffakkels in parkeergarages te onderzoeken (Hussein et al, 2021). Wel is literatuur beschikbaar waarin CFD-berekeningen en experimenten met waterstoffakkels in tunnels beschreven worden. Ook is er literatuur over fakkelexperimenten met constructiedelen die representatief zijn voor parkeergarages. Die artikelen zijn gebruikt voor dit hoofdstuk dat eerst de effecten beschrijft van een waterstoffakkel in de open lucht. Daarna wordt ingegaan op de thermische belasting die een waterstoffakkel kan hebben op betonnen constructies van tunnels en parkeergarages. Hierbij is aangenomen dat de TPRD geactiveerd wordt door een brand in de waterstofauto zelf (interne brand) of door een brand buiten de waterstofauto (externe brand). Oorzaken voor interne en externe branden zijn beschreven in (NIPV, 2021a).

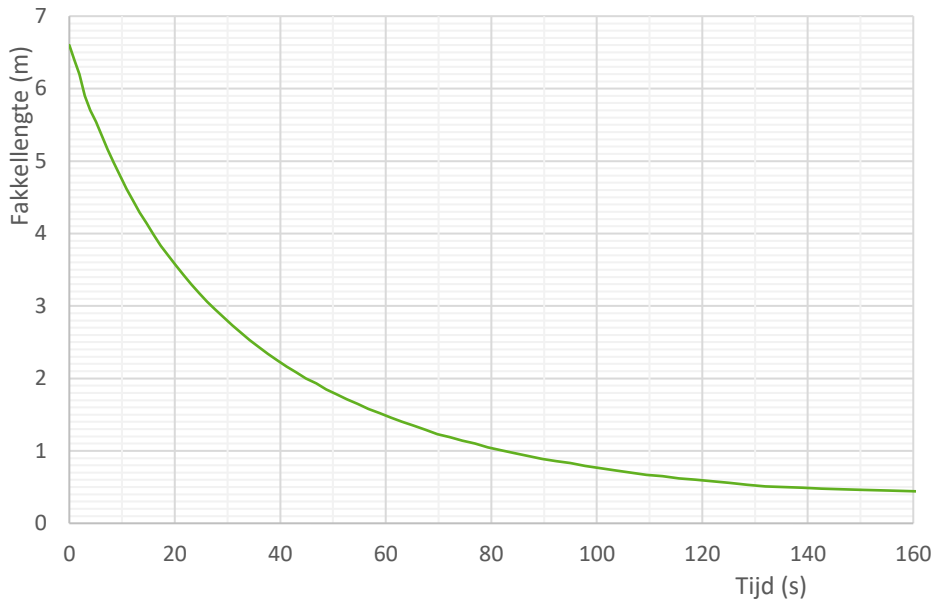
## 3.2 Effecten waterstoffakkel in de open lucht

### Fakkellengte

Uitgangspunt bij het beschrijven van de effecten van een waterstoffakkel in de open lucht is dat de waterstoffakkel niet belemmerd wordt door obstakels. De waterstoffakkel kan zich dus volledig ontwikkelen. De lengte van de waterstoffakkel wordt bepaald door de druk in de waterstoftank, de inhoud van de waterstoftank en door de diameter van de TPRD. Bij het activeren van de TPRD is de druk in de tank het hoogst en de waterstoffakkel het langst. Naarmate de druk in de waterstoftank afneemt, neemt ook de lengte van de waterstoffakkel af. Dit is te zien in Figuur 3.1 voor een tank van 60 liter met een druk van 700 bar en met een TPRD van 2 mm.<sup>11</sup> De afstanden gelden voor een onbelemmerde uitstroom en zijn berekend met behulp van modellen in E-laboratory (FCH2Edu, z.d.).

Het meeste waterstof in de tank komt in de eerste minuut vrij en de fakkel is dan ook het langst. In die tijd neemt de fakkellengte af van 6,5 m op het moment van openen tot 1,5 m na 1 minuut. De druk in de waterstoftank zakt gedurende die tijd van 700 bar naar 20 bar.

<sup>11</sup> Met een 'TPRD van 2 mm' wordt een TPRD bedoeld die een uitstroomopening heeft met een diameter van 2 mm.



**Figuur 3.1 De lengte van een waterstoffakkel als functie van de tijd bij onbelemmerde uitstroom uit een 60 L waterstoftank van 700 bar met een TPRD van 2 mm<sup>12</sup>**

### Uitstroomrichting

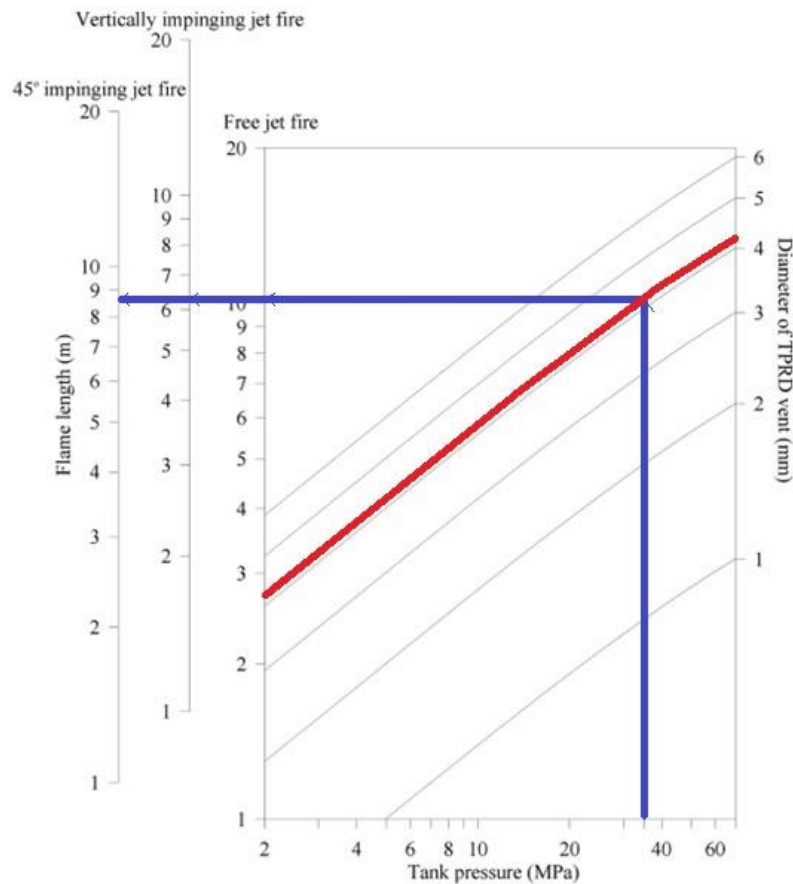
In werkelijkheid wordt bij een waterstofauto de waterstoffakkel belemmerd doordat de fakkel tegen de grond botst (tenzij de auto door een ongeval op zijn zij of op de kop ligt). De uitstroomrichting van een TPRD bij een waterstofauto is namelijk naar beneden gericht, meestal onder een hoek van 30 - 45 ° naar achteren (UN/ECE, 2019).<sup>13</sup> De waterstoffakkel wordt hierdoor korter in vergelijking met een onbelemmerde uitstroom (Russo, 2022) (Li et al, 2015).

De diameter van TPRD's is de laatste jaren kleiner geworden en ligt tegenwoordig ergens tussen de 2 en 3 mm (Mattelaer, 2022). Figuur 3.2 geeft een nomogram<sup>14</sup> waarmee de fakkellengte bepaald kan worden aan de hand van de druk van de waterstoftank en de diameter van de TPRD (Sun et al, 2021). In het nomogram is het voorbeeld uitgewerkt van een waterstoftank met een druk van 350 bar (35 MPa) en een TPRD-diameter van 4,2 mm (rode lijn). Vanaf de x-as is een blauwe verticale lijn omhoog getrokken en vanaf het snijpunt met de rode lijn is de blauwe lijn doorgetrokken naar de y-assen. De waterstoffakkel is 10 m lang, maar als deze onder een hoek van 90 ° of van 45 ° op een muur botst, wordt de fakkellengte respectievelijk zo'n 6,3 m en 8,7 m. Voor een waterstoftank met een druk van 700 bar en een TPRD-diameter van 2 mm zijn de afstanden 6,4 m (vrije lengte), 3,9 m (90 °) en 5,5 m (45 °).

<sup>12</sup> De grafiek is opgesteld op basis van gegevens die afkomstig zijn van twee modellen in E-laboratory, te weten 'Tank blowdown for gaseous, two-phase or supercritical tank conditions' en 'Flame length correlation and three hazard distances for jet fires'.

<sup>13</sup> Regeling 134 van de UN/ECE schrijft voor dat de uitstroom niet horizontaal mag zijn en niet gericht mag zijn op een besloten ruimte van de auto. De hoek waaronder waterstof uitstroomt, is niet voorgeschreven.

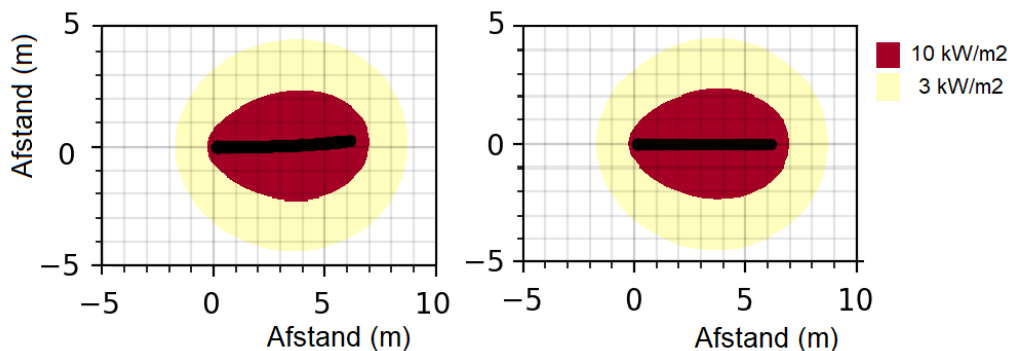
<sup>14</sup> Een nomogram is een grafiek waarmee de resultaten van een wiskundige formule met meerdere parameters snel – maar wel bij benadering – afgelezen kunnen worden.



**Figuur 3.2** Nomogram voor het bepalen van de fakkellengte uit een TPRD en bij belemmerde uitstroom (bron: (Sun et al, 2021))

### Warmtestraling

Een waterstoffakkel is zeer heet en kan temperaturen tot 1700 °C bereiken (HyTunnel, 2022a). Waterstoffakkels bevatten geen roetdeeltjes en stralen relatief weinig warmte uit, zeker in vergelijking met fakkels van bijvoorbeeld aardgas (Kotchourko et al, 2022). Logischerwijs neemt de warmtestraling toe naarmate de afstand tot de fakkel kleiner wordt. Bij warmtestraling van 3 kW/m<sup>2</sup> moet de brandweer beschermende kleding aantrekken. Bij warmtestraling van 10 kW/m<sup>2</sup> ontstaan na 20 s blootstelling tweedegraads brandwonden met een letaliteit van 1 % (RIVM, 2021).



**Figuur 3.3** Zijaanzicht (links) en bovenaanzicht (rechts) van de warmtestraling van een waterstoffakkel (700 bar, 2 mm opening); figuren zijn zelf gemaakt met behulp van HyRAM v 3.1.0.

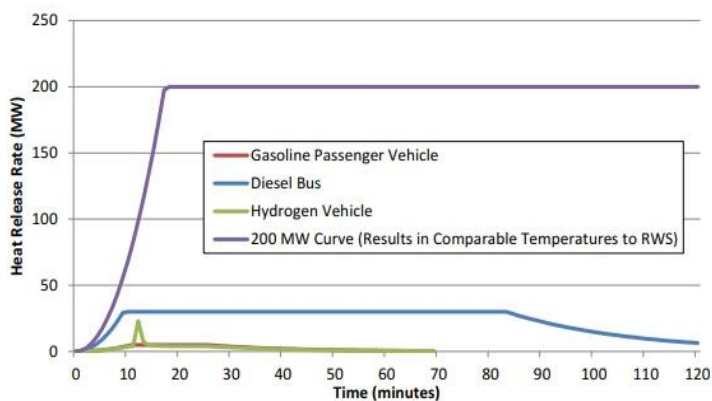


Hoe de warmtestraling van een waterstoffakkelt in praktijksituaties is, is op voorhand niet te zeggen. Als de dimensies van een waterstoffakkelt veranderen door obstakels of door nabijgelegen oppervlakken, zal ook de warmtestraling naar de omgeving toe anders zijn. Dit is alleen met softwaremodellen en met experimenten te bepalen.

### Heat release rate (HRR)

De hoeveelheid energie die per seconde bij een brand vrijkomt, wordt uitgedrukt in Watt (W) en wordt ook wel het brandvermogen of 'heat release rate' (HRR) genoemd. Het brandvermogen van een autobrand varieert gedurende de tijd dat een auto brandt en is onder andere afhankelijk van de gebruikte materialen, de grootte van de auto en de hoeveelheid plastic in de auto. Gemiddeld genomen is het brandvermogen van een autobrand zo'n 4 à 5 MW met uitschieters naar 2 MW en naar 8 MW (Tohir et al, 2013) (NFPA, 2020). Als twee auto's bij een brand betrokken zijn, is dat 3,5 - 10 MW.<sup>15</sup> Op het moment dat een TPRD geactiveerd wordt en de vrijgekomen waterstof ontsteekt, komt in enkele minuten tijd zeer veel warmte vrij, doordat waterstof een hoge verbrandingswarmte heeft. Voor een TPRD-diameter van 2,5 mm wordt het brandvermogen geschat op 27 MW (Li, 2018) en voor een TPRD-diameter van 3 mm op 29 MW (Molkov et al, 2019).

Figuur 3.4 laat de warmte zien die ontstaat bij verschillende voertuigbranden (Sandia, 2017). Het groene piekje is de warmte die ontstaat als de TPRD van een waterstofauto zich opent. Het is goed te zien dat de duur van een waterstoffakkelt veel korter is dan de duur van de voertuigbrand. Een bus op diesel heeft een maximaal brandvermogen van 30 MW (blauwe lijn) en een tankwagen met benzine 200 MW (paarse lijn).



Figuur 3.4 De warmte die vrijkomt bij verschillende voertuigbranden (bron: (Sandia, 2017))

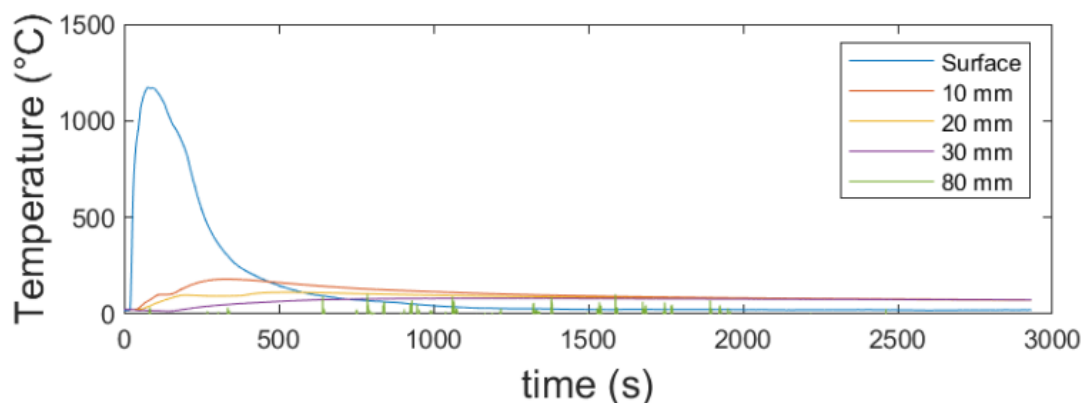
## 3.3 Effecten waterstoffakkelt op constructies

Bij waterstoffakkelt ontstaat schade vooral door rechtstreeks contact van de fakkelt met een object en niet door warmtestraling door de lucht. In het Europese HyTunnel-programma is onderzocht welke effecten waterstoffakkelt hebben op betonnen tunnelconstructies. Veel aandacht is uitgegaan naar het falen van betonnen constructies ten gevolge van betonafspat. Dit kan immers tot gevolg hebben dat de wapening in het beton bloot komt te liggen en haar sterkte verliest.

In een serie experimenten zijn betonmonsters gedurende 200 seconden blootgesteld aan waterstoffakkelt (700 bar, TPRD-diameter 3 mm). De temperatuur is gemeten aan het oppervlak van de betonmonsters en op verschillende dieptes in het beton (10 mm, 20 mm,

<sup>15</sup> Door het toenemend gebruik van plastics in auto's zal de energie-inhoud van auto's toenemen en daarmee ook de warmte die vrijkomt bij een autobrand (NFPA, 2020).

30 mm en 80 mm).<sup>16</sup> Figuur 3.5 geeft een voorbeeld van één van de metingen in het HyTunnel-programma. Aan het oppervlak worden temperaturen tot 1200 °C bereikt en in de betonmonsters temperaturen tussen 200 en 400 °C (HyTunnel, 2022a) (Markert et al, 2022). De temperaturen in het beton zijn te laag en de aanstraling duurt te kort om constructies te verzwakken of te vervormen. Dit wordt bevestigd door andere experimenten binnen het HyTunnel-programma waarin aangetoond wordt dat betonafspat beperkt is tot de eerste 3 centimeter van een constructie (HyTunnel, 2022a). Als de wapening in een betonnen constructie dus een dekking heeft van meer dan 3 centimeter, is het niet te verwachten dat een waterstoffakkelt de wapening verzwakt en daarmee de constructie.



**Figuur 3.5 De temperatuur aan het oppervlak en in een betonmonster<sup>17</sup> tijdens en na het aanstralen van een waterstoffakkelt (700 bar, 3 mm) voor verschillende dekkingsdiktes (bron: (HyTunnel, 2022a))**

### 3.4 Effecten waterstoffakkelt in parkeergarages

Voor het beschrijven van de effecten van een waterstoffakkelt in een parkeergarage is onderscheid gemaakt tussen parkeergarages die opgetrokken zijn uit gewapend beton of uit staal.

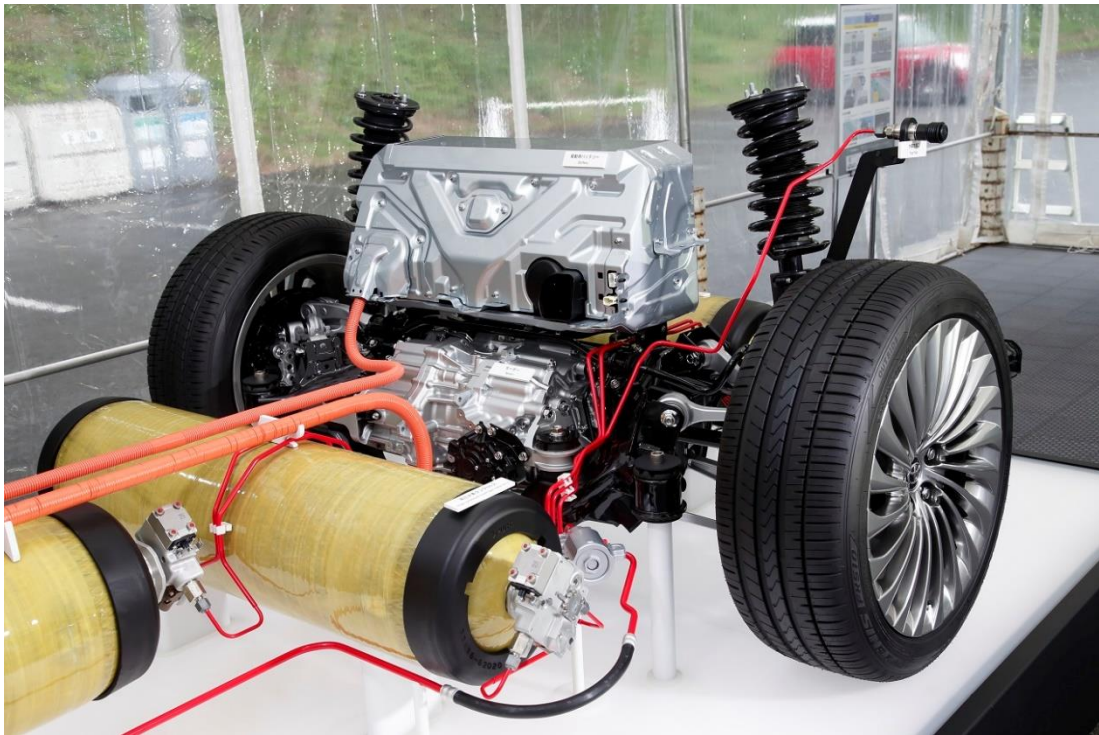
Gewapend beton is beton dat voorzien is van stalen staven om de trekkracht in het beton op te vangen en af te voeren. De bouwconstructie bestaat uit horizontale delen (liggers) en verticale delen (kolommen). Als een betonnen constructie of betonnen platen (vloeren en plafonds) van een parkeergarage of wordt blootgesteld aan intense hitte, kan betonafspat optreden, bijvoorbeeld bij het plafond boven een brandende auto (HyTunnel, 2019a). De vraag is wat de invloed van een waterstoffakkelt is op betonnen constructies van parkeergarages. Meestal zal de waterstoffakkelt gericht zijn op de vloer van de parkeergarage, tenzij de waterstofauto door een ongeluk op de zijkant ligt of op de kop. In dat geval kunnen ook muren, kolommen en plafonds worden aangestraft, maar gezien de maximale toegestane snelheid van 15 km/uur in parkeergarages is een dergelijke situatie niet waarschijnlijk (RVV, 1990).

<sup>16</sup> De afstand van de waterstoffakkelt tot de betonnen monsters wordt niet vermeld in het artikel, maar op basis van foto's wordt deze afstand geschat op minder dan 0,5 m.

<sup>17</sup> Betonmonster: zwaarbeton, watercementfactor 0,4, 1 m.% micro-silica, bevat weekmaker, polypropyleenvezels en aggregaten.

In tunnels zijn betonnen segmenten vaak geprefabriceerd en vezelversterkt, met staalvezels voor sterkte en duurzaamheid en polypropyleenvezels voor vuurbestendigheid. Bovendien wordt er in het ontwerp rekening mee gehouden dat een deel van het beton verloren gaat door betonafspat (Hytunnel, 2022a). Bij parkeergarages is geen sprake van vezelversterkt beton of van extra dikke betonnen constructies, omdat de noodzaak daartoe ontbreekt en omdat dit te duur is (Van de Leur, 2023).

Als een waterstofauto in brand staat, kunnen meerdere waterstoffakkels ontstaan. Deze fakkels kunnen na elkaar branden, maar ook tegelijkertijd. Dit hangt af van de locatie van de TPRD's op de waterstoftanks ten opzichte van de brand in de waterstofauto. Verwacht wordt dat een betonnen constructie van een parkeergarage onder deze omstandigheden niet verzwakt of vervormd wordt. Hiervoor is de tijdsduur van aanstraling te kort, en daarnaast stralen de waterstoffakkels het beton elk op een andere plek aan ('hotspots'). Geschat wordt dat de afstand tussen de hotspots minimaal 50 cm is, gezien de afstand tussen de TPRD's op de kopse kant van de waterstoftanks (zie bijvoorbeeld Figuur 3.6).



**Figuur 3.6 Opengewerkt interieur van de Toyota Mirai<sup>18</sup> (bron: Newsroom Toyota)**

Bij onbeschermde stalen constructies van open parkeergarages maakt het weinig uit welk type auto de constructie aanstraalt (diesel, waterstof, elektrisch, LPG en CNG).<sup>19</sup> In experimenten steeg de temperatuur van stalen balken boven brandende auto's tot maximaal 820 - 930 °C. Geconcludeerd werd dat de stabiliteit van de constructie niet nadelig wordt beïnvloed door het type voertuig (Tramoni et al, 2021). In deze experimenten zorgde de uitstroom van waterstof voor een verheviging van de brand, waardoor de temperatuur van de stalen balken meer dan 100 °C steeg. Maar de uitstroom duurde te kort om impact te

<sup>18</sup> Van de Toyota Mirai is bekend dat de TPRD van de voorste tank loodrecht naar beneden gericht is en die van de middelste tank schuin naar beneden en naar achteren.

<sup>19</sup> Een open parkeergarage is een natuurlijk geventileerde parkeergarage door de aanwezigheid van open verbindingen met de buitenlucht (open gevels). Een gesloten parkeergarage heeft deze open verbindingen niet, waardoor mechanische ventilatie nodig is. De eisen voor natuurlijke en mechanische ventilatie staan beschreven in NEN 2443 (NEN 2443, 2013).

hebben op de sterkte van de constructie. Ook in de studie van Zhao is geconcludeerd dat onbeschermde stalen constructies van open parkeergarages kunnen worden gebruikt zonder gevaar op instorten bij brand (Zhao et al, 2004).

### 3.5 Samenvatting

Over het effect van waterstoffakkels op de constructieve veiligheid van parkeergarages is weinig bekend. Dit effect wordt in de literatuur wel beschreven voor tunnels en ook zijn experimenten in de open lucht gedaan met het aanstralen van betonmonsters aan waterstoffakkels.

Als een betonnen of stalen constructie kortdurend aangestraald wordt door een waterstoffakkel, zal de constructie lokaal wel beschadigd kunnen raken maar niet falen, omdat de constructie daarvoor te kort wordt blootgesteld aan de waterstoffakkel. De levensduur van een waterstoffakkel ligt namelijk in de orde van 2 à 3 minuten (700 bar, TPRD 2 mm). Een waterstoffakkel die in een parkeergarage ontstaat bij een brand van of nabij een waterstofauto, zal die brand tijdelijk versterken, maar de schade aan de parkeergarage zal eerder het gevolg zijn van de (auto)brand dan van de waterstoffakkel zelf.

# 4 Explosie waterstoftank

## 4.1 Inleiding

Bij een explosie van een waterstoftank komt de inhoud van de tank instantaan vrij en zal de waterstof bij ontsteking verbranden. Er zijn overdrukeffecten te verwachten van de explosie, thermische effecten van de vuurbal en impacteffecten door de brokstukken die weggeslingerd worden. De thermische effecten van de vuurbal worden beschreven in hoofdstuk 5 en de impacteffecten van brokstukken in hoofdstuk 6. Dit hoofdstuk beschrijft eerst de overdrukeffecten van een explosie van een waterstoftank in een waterstofauto in de open lucht en daarna de overdrukeffecten in tunnels en parkeergarages.<sup>20</sup>

Waterstoftanks bestaan uit een omhulsel en/of een liner en worden ingedeeld op basis van de materialen waarvan het omhulsel en de liner zijn gemaakt (HyFindr, 2023):

Type I – Metalen omhulsel zonder liner

Type II – Dun polymere omhulsel met metalen liner

Type III – Vezelversterkt polymere omhulsel met dunne metalen liner

Type IV – Vezelversterkt polymere omhulsel met een polymere liner.

Waterstoftanks in waterstofauto's moeten hoge drukken kunnen weerstaan. Regelgeving vereist een veiligheidsfactor van 2,25 en dat betekent dat een waterstoftank met een werkdruk van 700 bar niet mag exploderen bij drukken tot 1575 bar (UN ECE, 2013). Als een waterstoftank aangestraald wordt door een brand, zal de inhoud weinig opwarmen, omdat het polymere omhulsel warmte slecht geleidt. Hierdoor zal de druk in de waterstoftank ook weinig toenemen (Molkov et al, 2019).<sup>21</sup> Een explosie van een waterstoftank zal ontstaan als het polymere omhulsel degradeert onder invloed van warmte.<sup>22</sup> Hierdoor komen de vezels in het omhulsel los te zitten en verliest de tankwand zijn sterkte (Molkov et al, 2021b). Deze explosie treedt op bij een druk die nauwelijks groter is dan de werkdruk.

## 4.2 Effecten explosie waterstoftank in de open lucht

Er zijn weinig experimenten gedaan met het exploderen van waterstoftanks en de informatie over het verloop van de overdruk is dan ook beperkt (Molkov et al, 2021a). De gegevens die er zijn, staan samengevat in Tabel 4.1 en zijn afkomstig van experimenten waarbij ook gekeken is naar de warmtestraling van de vuurbal (zie paragraaf 5.2). De experimenteel verkregen gegevens zijn gebruikt om rekenmodellen en software te valideren.

<sup>20</sup> Uitgangspunt is dat één waterstoftank explodeert. Een waterstofauto heeft twee of drie waterstoftanks en onbekend is of het exploderen van één waterstoftank leidt tot het falen van de andere waterstoftank(s). In de literatuur wordt over dit aspect niets geschreven. Aangenomen wordt dat de effecten van het falen van één (de grootste) tank bepalend zal zijn voor de gevolgen. Mocht een tweede explosie optreden, dan zullen de gevolgen (hooguit) het gebied beslaan dat al door de eerste explosie is getroffen. Daarom wordt aangenomen dat een tweede explosie weinig tot geen additionele schade aanricht.

<sup>21</sup> Dat is de reden dat een waterstoftank in een waterstofauto niet is voorzien van een overdrukbeveiliging (Mattelaer, 2022).

<sup>22</sup> Het is niet te verwachten dat een waterstoftank zal bezwijken door externe impact (Weerts, 2021) (NIPV, 2021a).

De waterstoftanks in de experimenten explodeerden door de tanks bloot te stellen aan vuur. De tanks in de experimenten van Zalosh en van Weyandt waren niet voorzien van een TPRD, die in de experimenten van Shen wel (Zalosh, 2007), (Weyandt, 2006), (Shen et al, 2018).

**Tabel 4.1 Gegevens en resultaten van explosie-experimenten van waterstoftanks**

Type tank	Druk (bar)	Inhoud (liter)	Overdruk	Opmerking	Bron
IV	345	88	1,4 bar op 1,2 m 0,8 bar op 2,4 m	Waterstoftank in auto	(Weyandt, 2006) (Zalosh, 2007)
IV	343	72,4	3 bar op 1,9 m 0,83 bar op 4,2 m 0,41 bar op 6,6 m	Losse tank	
III	707	36	0,74 bar op 5 m 0,23 op 10 m	Losse tank	(Molkov, 2021a) <sup>23</sup>
IV	702	35	1,1 bar op 5 m 0,23 bar op 10 m	Losse tank	

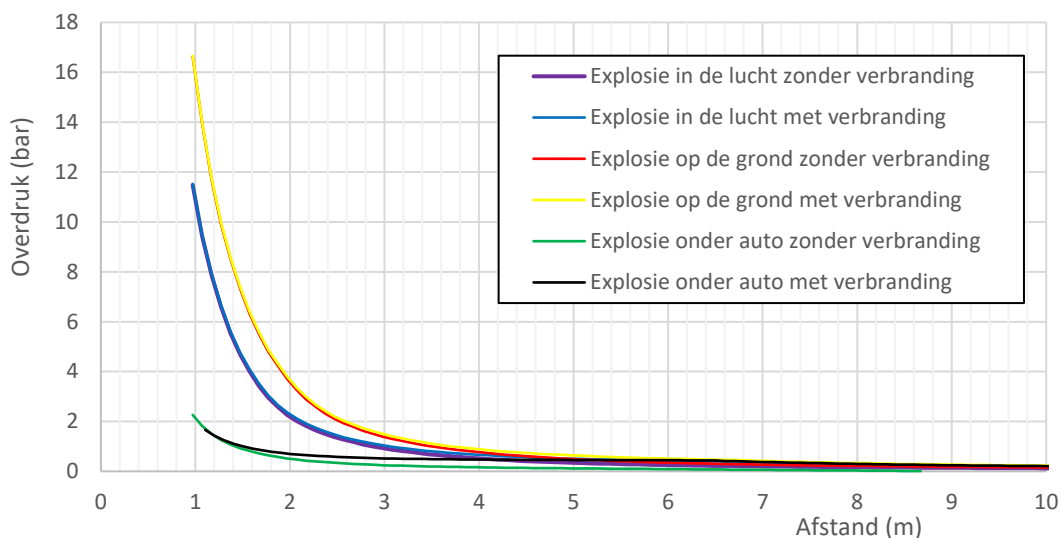
Bij het bepalen van de kracht van een explosie van een waterstoftank wordt vaak alleen rekening gehouden met de mechanische energie die opgeslagen zit in een waterstoftank. De reden hiervoor is de aanname dat de explosie dermate snel verloopt, dat verbranding van waterstof niet bij kan dragen aan de kracht van de explosie, omdat verbranding ten opzichte van een explosie een langzamer proces is. Kashkarov is echter van mening dat de verbranding van waterstof (chemische energie) ook bijdraagt aan de kracht van de explosie en dat deze bijdrage zelfs groter kan zijn dan de bijdrage van mechanische energie. De modellen komen dan beter overeen met experimenteel bepaalde resultaten (Kashkarov et al, 2015).

Het model dat Kashkarov ontwikkeld heeft om de overdruk van een fysische waterstofexplosie te bepalen, is beschikbaar op E-Laboratory en heet 'Blast wave from high-pressure tank rupture without and with combustion' (FCH2, z.d). Enkele berekeningen van de overdruk van een explosie van een 60 liter waterstoftank met een druk van 700 bar zijn weergegeven in Figuur 4.1 en Figuur 4.2, waarbij Figuur 4.2 een uitvergroting is van Figuur 4.1. Het betreft berekeningen aan waterstoftanks die zijn gepositioneerd (a) in de open lucht, (b) op de grond, of (c) gemonteerd in een auto. Voor elke positie zijn twee varianten doorgerekend: één waarbij uitsluitend de mechanische energie van druk uit de tank vrijkomt en één waarbij ook de energie van verbranding van de waterstof bijdraagt aan de overdruk.

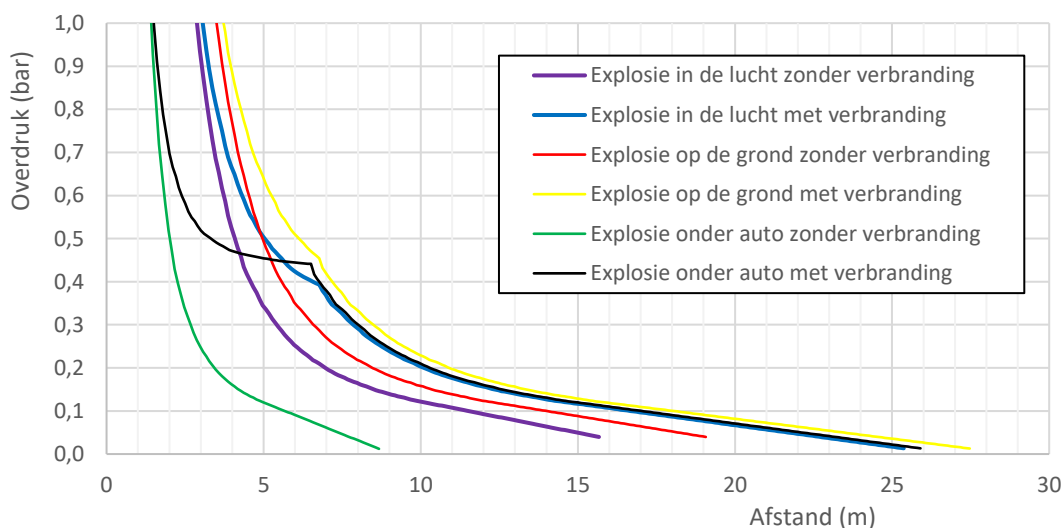
Bij een explosie in de open lucht kan de overdruk zich vrij in alle richtingen verspreiden (de paarse lijn in Figuur 4.1 en in Figuur 4.2). Het oppervlak van de drukgolf neemt toe, waardoor de overdruk van de explosie exponentieel afneemt als functie van de afgelegde afstand. Bij een waterstoftank die op de grond staat, komt de naar beneden gerichte druk tegen het grondoppervlak, waardoor de overdruk naar de omgeving (in theorie) verdubbelt. Omdat in de praktijk een deel van de overdruk 'verloren' gaat door het vervormen van de bodem (kratervorming), wordt in het model voor de overdruk van de explosie een factor 1,8 in plaats van 2 gehanteerd (rode lijn). Dit effect is vooral op korte afstanden merkbaar. Als

<sup>23</sup> Molkov beschrijft de experimentele gegevens van Tamura, omdat het artikel van Tamura in het Japans is.

de waterstoftank zich in een auto bevindt en explodeert, absorbeert de auto een groot deel van de mechanische energie. De auto raakt vervormd en kan over meters verplaatst worden. Ook objecten in de omgeving kunnen een deel van de vrijgekomen energie absorberen en vervormd en/of verplaatst worden. De overdruk naar de omgeving toe is dan een stuk kleiner dan de druk bij een explosie in de open lucht: het model hanteert nu een vermenigvuldigingsfactor 0,12 (groene lijn).



**Figuur 4.1 De overdruk van een explosie van een waterstoftank (700 bar, 60 liter) als functie van de afstand<sup>24</sup>**



**Figuur 4.2 De overdruk van een explosie van een waterstoftank (700 bar, 60 liter) als functie van de afstand (detail van Figuur 4.1)**

De kracht van de explosie wordt in de eerste milliseconden bepaald door de mechanische energie van het openbarsten van de waterstoftank. Wanneer de bijdrage van de verbranding van waterstof wordt meegenomen, neemt de explosieduur toe vanwege de langere duur van het verbranden van waterstof in de wolk ten opzichte van het openbarsten van de waterstoftank. De kracht van de explosie neemt hierdoor langzamer af, waardoor effectafstanden groter worden. Op grotere afstand van de explosie komen de overdrukken voor de drie

<sup>24</sup> De inhoud komt overeen met de inhoud van de grootste waterstoftank van een Toyota Mirai (Toyota, 2019).

situaties met verbranding meer met elkaar overeen, omdat de kracht van de explosie daar vooral bepaald wordt door de verbranding van waterstof in de gaswolk en niet meer door het openbarsten van de waterstoftank. Deze overgang is bij een afstand van 6 à 7 meter te zien in de curves waar rekening wordt gehouden met chemische verbranding.

De effectafstanden voor de zes beschreven situaties bij diverse overdruk niveaus staan in Tabel 4.2 en zijn afgeleid van Figuur 4.1 en Figuur 4.2.

**Tabel 4.2 Effectafstanden van een explosie van een waterstoftank (700 bar, 60 liter)**

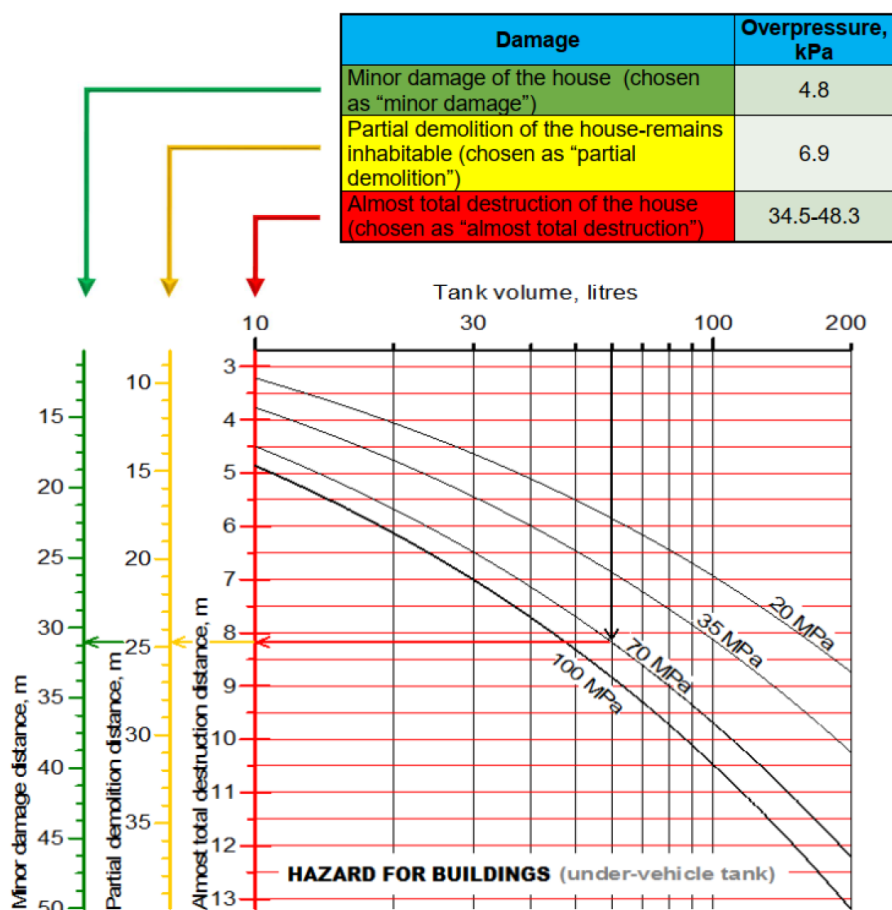
Locatie explosie	Verbranding	Effectafstand (m) bij onderstaande overdrukken		
		0,3 bar	0,1 bar	0,02 bar
Lucht	Nee	5,5	12	17
Lucht	Ja	7,9	17	25
Grondniveau	Nee	6,6	14	21
Grondniveau	Ja	8,6	19	27
Onder auto	Nee	2,3	5,8	8,6
Onder auto	Ja	8,0	18	26

### 4.3 Effecten explosie waterstoftank op gebouwen

Als een waterstoftank explodeert terwijl deze zich in de buurt van een gebouw bevindt, kan het gebouw beschadigd raken door de gereflecteerde overdruk. Tabel 1.2 in paragraaf 1.6 geeft een overzicht van het schadebeeld van gebouwen door overdruk.

In het HyResponder-programma zijn nomogrammen opgesteld waarmee op een eenvoudige manier schadeafstanden bepaald kunnen worden met behulp van het volume en de druk van een waterstoftank (HyResponder, 2021). Het nomogram voor het bepalen van schadeafstanden voor gebouwen voor een fysische explosie van een waterstoftank in een waterstofauto is weergegeven in Figuur 4.3. Een explosie van een waterstoftank van 60 liter en een druk van 700 bar leidt tot de volgende effectafstanden: 8 m voor het volledig instorten van gebouwen (0,35 bar), 25 m voor het deels instorten van gebouwen (0,069 bar) en 31 m voor glasbreuk (0,048 bar). Deze afstanden komen redelijk tot goed overeen met de afstanden die afgelezen kunnen worden uit Figuur 4.2 (zwarte curve).





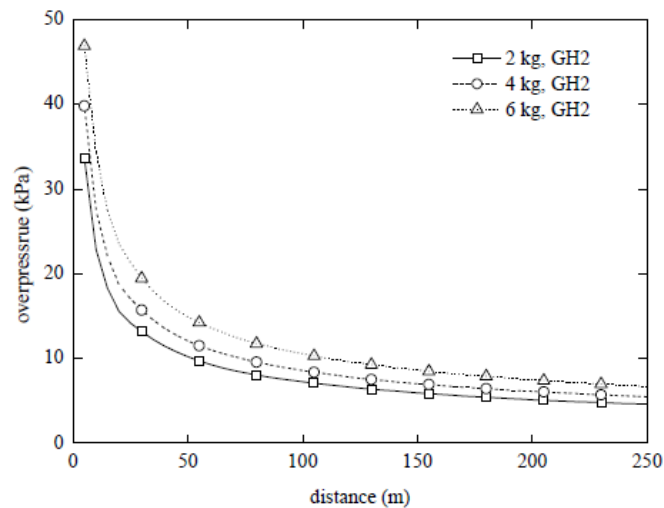
Figuur 4.3 Nomogram voor het bepalen van schade-afstanden aan gebouwen (bron: [European Emergency Response Guide \(HyResponder, 2021\)](#))

#### 4.4 Effecten explosie waterstoftank in tunnels

De explosies die in de vorige paragraaf beschreven zijn, vonden plaats in de open lucht. De vraag is hoe groot de overdrukken zijn die ontstaan wanneer een waterstoftank in een waterstofauto explodeert in een besloten ruimte als een tunnel. Er is geen literatuur gevonden waarin experimenten beschreven staan met een exploderende waterstoftank van een waterstofauto in een tunnel. Wel worden in de literatuur experimenten beschreven met explosies van losse waterstoftanks in een tunnel en berekeningen met software die deze explosies modelleren. Deze paragraaf beschrijft drie relevante artikelen en daarin is te zien dat in een tunnel de overdruk van een explosie lang gehandhaafd blijft, omdat het oppervlak van de drukgolf over de lengte van de tunnel niet groter wordt maar constant blijft.

(Li, 2019)

Li modelleert in zijn onderzoek naar explosies in tunnels de overdruk van het openbarsten van een 350 bar waterstoftank. De tunnel heeft een dwarsoppervlak van 50 m<sup>2</sup>, dat wil zeggen een oppervlak van 50 m<sup>2</sup> loodrecht op de rijrichtingen. In tegenstelling tot Kashkarov houdt Li geen rekening met de bijdrage van chemische energie als gevolg van het verbranden van waterstof. De resultaten staan weergegeven in Figuur 4.4.



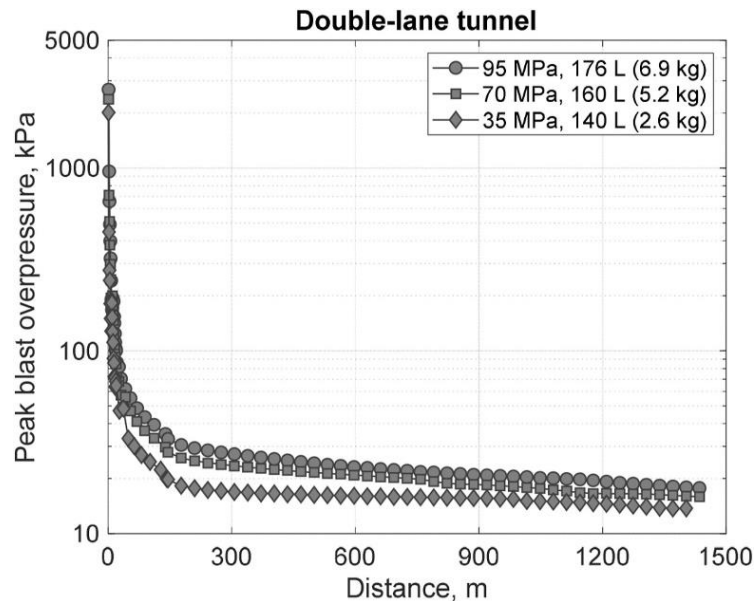
**Figuur 4.4 De overdruk van een explosie van een 350 bar waterstoftank in een lege tunnel met een lengte van 250 m en een dwarsoppervlak van 50 m<sup>2</sup>. 10 kPa = 0,1 bar (bron: (Li, 2019))**

Overdrukken hoger dan 0,3 bar worden bereikt op afstanden van 5 m (2 kg waterstof) tot 15 m (6 kg waterstof). In een tunnel zijn overdrukken groter en reiken veel verder dan in de open lucht, waar de druk zich vrij in alle richtingen kan verspreiden (zie ook paragraaf 4.2). Wanneer een drukgolf eenmaal door een tunnel loopt, kan deze zich niet meer verspreiden (het oppervlak van het front blijft gelijk) en zal de druk slechts langzaam afnemen. Pas buiten de tunnel zal de overdruk snel afnemen en verdwijnen (Molkov, 2019). Waar bijvoorbeeld in Figuur 4.2 de overdruk van een explosie van een waterstoftank in de open lucht binnen 20 m afneemt naar nul, laat Figuur 4.4 zien dat daar voor een explosie in de gemodelleerde tunnel na 250 m nog geen sprake van is.

**(Molkov et al, 2020)**

Molkov heeft een model ontwikkeld om de overdruk van een explosie van een waterstoftank in een lege tunnel te modelleren. Het model houdt rekening met de bijdrage van chemische energie als gevolg van het verbranden van waterstof. Als voorbeeld wordt onder andere Figuur 4.5 gegeven. De trend die hier en in Figuur 4.4 te zien is, is dat de overdruk eerst snel afneemt en dat vervolgens deze afname aanzienlijk minder wordt. Pas als de drukgolf bij het tunneleinde is gekomen, neemt de overdruk af naar nul.

Molkov heeft zijn model toegepast op een waterstoftank van 700 bar en 62 liter die explodeert in de Lærdaltunnel in Noorwegen. Deze tunnel is 24,5 km lang en heeft een dwarsoppervlak van 56,4 m<sup>2</sup>. Op 15 m afstand is de overdruk 1 bar, op 190 m is de overdruk 0,165 bar en op 6900 m is de overdruk 0,014 bar (Molkov et al, 2020).



**Figuur 4.5 De overdruk van een explosie van een losse waterstoftank in een tunnel, gemeten over een lengte van 1500 m en een dwarsoppervlak van 39,5 m<sup>2</sup>. 10 kPa = 0,1 bar. Let op de logaritmische schaal van de y-as. Bron: (Molkov et al, 2020)**

**(Kudriakov et al, 2022)**

In het kader van het HyTunnel-programma zijn in 2021 experimenten uitgevoerd in een lege voetgangerstunnel van 507 m op 228 m van de ingang. De tunnel is uitgehakt in rotsen en voor een deel bekleed met beton. Er zijn explosies uitgevoerd met tanks gevuld met waterstof en met tanks gevuld met helium. Helium is chemisch inert en heeft net als waterstof een zeer lage dichtheid. Bij een explosie van helium komt er geen chemische energie vrij zoals dat bij waterstof wel het geval is, maar alleen mechanische energie.

De druk waarmee de type IV tanks van 78 liter zijn beproefd, was 90, 520 en 610 bar voor waterstof en 650 bar voor helium. De snelheid van de schokgolf lag steeds in de orde van 350 m/s.<sup>25</sup> Door reflectie tegen de wanden en door resonantie zijn er meerdere overdrukpieken te zien. De maximale overdrukken die gemeten zijn, zijn weergegeven in Tabel 4.3. Er zijn geen drukopmeters geplaatst binnen 30 m van de explosie, vermoedelijk omdat deze door de explosie vernietigd zouden worden.

Tabel 4.3 laat zien dat de overdrukken in een tunnel lang aanhouden en na honderden meters niet naar nul zijn gegaan. Tabel 4.3 laat ook zien dat de overdrukken die ontstaan bij een waterstoftank van 610 bar tot een factor 5 hoger liggen dan de overdrukken van een heliumtank van 650 bar. Dit verschil wordt veroorzaakt doordat de chemische energie die vrijkomt bij de verbranding van waterstof bijdraagt aan de kracht van de explosie. Doordat helium inert is, is er bij een explosie van een heliumtank geen sprake van een chemische verbranding die bij kan dragen aan de overdruk.

In het artikel wordt niet vermeld of er schade is ontstaan aan de rotswand of aan de betonnen bekleding daarvan.

<sup>25</sup> Hoewel de snelheid waarmee de drukgolf zich verplaatst groter is dan de snelheid van geluid in lucht, kan hier niet gesproken worden van een detonatie. Er is namelijk geen sprake van een (volledig) reactiefront.

**Tabel 4.3 De maximale overdrukken (bar) die gemeten zijn op diverse afstanden van de explosie van type IV waterstoftanks (78 liter) in een tunnel (bron: (Kudriakov et al, 2022))**

Tankdruk (bar)	Overdruk (bar) op onderstaande afstanden van de explosie					
	30 m	50 m	80 m	110 m <sup>26</sup>	140 m	1 <sup>9</sup> m
<b>Waterstof</b>						
<b>90</b>	0,136	0,120	0,113	0,118	0,119	-
<b>520</b>	0,271	0,243	0,226	0,206	0,202	-
<b>610</b>	0,218	0,225	0,204	0,336	0,301	0,179
<b>Helium</b>						
<b>650</b>	0,098	0,085	0,072	0,068	0,061	0,055

Hoe groot de effecten zijn als niet een losse waterstoftank explodeert in een tunnel, maar een waterstoftank die onder een auto gemonteerd zit, is op voorhand niet te zeggen. In paragraaf 4.2 is aangegeven dat bij een explosie van een waterstoftank die zich in een auto bevindt, de auto een groot deel van de vrijgekomen mechanische energie absorbeert en daardoor vervormd raakt en meters verplaatst kan worden. In berekeningen wordt hier rekening mee gehouden door de overdruk te vermenigvuldigen met een factor 0,12. Dit houdt in dat 88% van de vrijgekomen mechanische energie wordt geabsorbeerd door de auto. In een tunnel zal dit effect niet anders zijn. Daar komt bij dat simulaties en experimenten zijn uitgevoerd in lege tunnels, terwijl in werkelijkheid voertuigen aanwezig zullen zijn. Deze voertuigen beperken de overdrukeffecten van de drukgolf ook, omdat zij net als de waterstofauto de energie van de drukgolf absorberen.

In het HyTunnel-programma is modelmatig onderzocht hoe het plafond van een tunnel reageert op een fysische explosie van een losse waterstoftank (HyTunnel, 2022b). Aan het plafond hingen platen van gewapend beton met een lengte van 10 m en een dikte van 35 cm. De breedte van de betonplaten is niet gegeven. De betonplaten konden buigen en daarbij maximaal een statische druk van 18.3 kN/m<sup>2</sup> weerstaan. De betonplaten bevonden zich op ruim 6 m hoogte boven een waterstoftank (700 bar, 62,4 l). Een explosie van deze tank gaf in de hoeken van de betonplaat boven de waterstoftank een overdruk van 152 kN/m<sup>2</sup>. De betonplaat zou falen als het om statische druk zou zijn gegaan. Bij een explosie is echter sprake van een dynamische druk.

In het onderzoek is berekend dat de duur van de explosie (24 ms) veel korter is dan de duur van de eigentrilling van de betonplaat (165 ms) en dat dit niet leidt tot falen van de betonplaat. In vervolgberekeningen is de maximale overdruk van 152 kN/m<sup>2</sup> toegepast op de gehele betonplaat en hebben de onderzoekers berekend dat de betonplaat maximaal en permanent 22 cm doorbuigt, maar niet breekt. Deze doorbuiging is volgens regelgeving toegestaan.<sup>27</sup> De manier waarop de betonplaat reageert op de overdruk van de exploderende waterstoftank, kan in de praktijk echter hoger zijn, omdat:

<sup>26</sup> Doordat het eerste deel van de tunnel (tot 87 m vanaf de explosie, 41 m<sup>2</sup>) groter is dan het tweede deel (33 m<sup>2</sup>), neemt vanaf 87 m de overdruk weer wat toe.

<sup>27</sup> BS476 (British Standard 476 Fire Tests) en ISO834-1 (Beproeving van de brandwerendheid - Bouwdelen - Deel 1: Algemene eisen).

- > in de praktijk delen van de betonplaten blootgesteld kunnen worden aan drukgolven die een lagere overdruk hebben maar langer duren
- > er geen rekening is gehouden met het exploderen van meerdere waterstoftanks
- > er geen rekening is gehouden met brand waarvan de warmtestraling ook inwerkt op beton.

## 4.5 Effecten explosie waterstoftank in parkeergarages

Er is in de literatuur geen informatie gevonden over het exploderen van een waterstoftank in parkeergarages, maar er zijn wel enkele gegevens van dergelijke explosies in tunnels bekend. Deze paragraaf is grotendeels op die gegevens gebaseerd.

Er zijn veel factoren die van invloed zijn op de hoogte van de overdruk in een parkeergarage, en dat maakt dat het moeilijk is om algemeen geldende uitspraken hierover te doen en te bepalen wat de gevolgen zijn voor de constructieve veiligheid van parkeergarages. Eén van de belangrijkste factoren is de geometrie: tunnels en parkeergarages worden beide gezien als besloten ruimtes, maar de geometrie van een tunnel is wezenlijk anders dan die van een parkeergarage. Tabel 4.4 geeft een overzicht van de geometrische verschillen die bestaan tussen tunnels en parkeergarages en hoe deze volgens de onderzoeker doorwerken op de overdruk van een fysisch exploderende waterstoftank.

**Tabel 4.4 Geometrische verschillen tussen tunnels en parkeergarages en de gevolgen daarvan voor de overdruk van een fysische explosie van een waterstoftank**

Verschillen	Gevolg voor de overdruk
In parkeergarages is de plafondhoogte lager dan in tunnels.	In een parkeergarage is de overdruk van een explosie initieel hoger dan in een tunnel.
Een open parkeergarage heeft in de gevel grote openingen naar de open lucht in tegenstelling tot gesloten parkeergarages en tunnels.	De drukgolf kan in een open parkeergarage ontsnappen, waardoor de overdruk lager wordt.
Een parkeergarage is breder dan een tunnel en kan meerdere verdiepingen beslaan die in open verbinding staan met elkaar.	In een parkeergarage kan de drukgolf zich in verticale richting verspreiden waardoor het oppervlak van de drukgolf toeneemt, in tegenstelling tot een tunnel waar verspreiding vrijwel eendimensionaal is en het oppervlak van de drukgolf constant is. Hierdoor neemt de overdruk in een parkeergarage sneller af dan in een tunnel. In een parkeergarage moet rekening worden gehouden met schade op andere verdiepingen.

Op basis van Tabel 4.4 is te verwachten dat de effectafstanden van een exploderende waterstoftank in een parkeergarage kleiner zullen zijn dan in een tunnel, omdat in veel parkeergarages de drukgolf relatief snel kan wegvloeien. Dat laat onverlet dat bij een explosie van een waterstoftank de constructieve veiligheid van een parkeergarage in het geding kan zijn, gezien de mogelijke belasting op constructie-elementen dicht bij de explosie. De beschikbare informatie uit de literatuur geeft dit ook aan, maar meer zekerheid hierover is gewenst. Zonder experimenten op ware schaal is dat echter moeilijk te realiseren.

Een alternatief zijn modelberekeningen, maar die zijn complex door de vele factoren die van invloed zijn op de kracht van een explosie. Het gaat dan onder meer om de dimensies van de parkeergarage, de aanwezigheid van gevelopeningen, de aanwezigheid van verdiepingen, de locatie van de waterstofauto in de parkeergarage, de vulgraad van de waterstoftank, de aanwezigheid van andere voertuigen dicht bij de waterstofauto en de manier waarop een parkeergarage constructief ontworpen is.

Voor een parkeergarage is door de onderzoeker een grove inschatting gemaakt van de overdruk die ontstaat als een volle waterstoftank (700 bar, 60 liter) in een waterstofauto fysisch explodeert als de auto in het midden van de garage staat. De parkeergarage bestaat uit één laag, bevat geen kolommen, bevindt zich op de eerste etage en heeft een hoogte van 2,4 m. De waterstoftank bevindt zich 0,4 m boven de vloer.

Voor het bepalen van de overdruk op de vloer en het plafond is gebruikgemaakt van de zwarte curve ('explosie onder auto met verbranding') van Figuur 4.2. De drukgolf die op het plafond inwerkt, heeft vlak voordat die het plafond raakt – dus als het ware in de vrije ruimte – een afstand overbrugd van 2 m; de overdruk is dan 0,7 bar.<sup>28</sup> Een deel van de energie wordt opgenomen door het plafond en een deel wordt gereflecteerd, waardoor de overdruk ter plaatse hoger wordt dan 0,7 bar. Hoeveel hoger is niet bekend, maar de invallende drukgolf is al krachtig genoeg om het plafond te doen instorten. De kracht van de drukgolf neemt snel af door het instorten van het plafond en doordat de afstand die de drukgolf aflegt, steeds groter wordt. De explosie heeft daarom een lokaal karakter. De afstand tussen de waterstoftank en de vloer is kleiner. De drukgolf heeft een afstand van 0,4 m afgelegd voordat deze de vloer raakt. Hoewel de zwarte curve van Figuur 4.2 voor deze afstand geen informatie geeft, laat extrapolatie van de curve zien dat de overdruk van de invallende drukgolf groter zal zijn dan 2 bar. De invallende drukgolf is ook zo krachtig dat de vloer het zal begeven.

Het exploderen van een volle waterstoftank in een parkeergarage zal daarom ter plaatse leiden tot het falen van constructiedelen als kolommen, liggers, muren, vloeren en plafonds. Gezien het lokale karakter van de explosie, zal het lokaal falen van de constructie naar verwachting niet leiden tot het voortschrijdend instorten van de parkeergarage (Hinman, 2017). Reden hiervoor is dat het falen van enkele constructiedelen volgens NEN-EN 1991-1-7 niet mag leiden tot het instorten van het gebouw aangezien andere constructiedelen de krachten moeten opvangen (zie paragraaf 1.4).

## 4.6 Samenvatting

Er is geen informatie beschikbaar over het exploderen van een waterstoftank van een waterstofauto in een parkeergarage. Die informatie is er wel voor het exploderen van een losse waterstoftank in de open lucht of in een tunnel en voor het exploderen van een waterstoftank in een waterstofauto in de open lucht.

De energie die vrijkomt bij de explosie van een waterstoftank bestaat uit mechanische energie en chemische energie. In de open lucht zal deze energie zich naar alle kanten verspreiden, waardoor de drukgolf tientallen meters ver kan komen en schade aan gebouwen en mensen kan aanrichten. Als de explosie aan de grond plaatsvindt, wordt de drukgolf deels gereflecteerd, waardoor de overdruk groter wordt. Bevindt de waterstoftank zich in een auto, dan absorbeert de auto een groot deel van de vrijgekomen energie, waardoor deze vervormd raakt en verplaatst kan worden. De drukgolf zal in dat geval minder ver komen.

<sup>28</sup> Als de waterstoftank voor een deel leeg is en intern een druk heerst van 100 bar, is de overdruk op 2 m afstand 0,5 bar.

Overdrukeffecten van een explosie zijn in een besloten ruimte groter dan in de open lucht, omdat de energie zich niet goed kan verspreiden en omdat er sprake is van reflecties tegen wanden, vloeren en plafonds. De grootte en de geometrie van besloten ruimtes alsook de aanwezigheid van obstakels beïnvloeden de grootte van de overdruk en de daarmee gepaard gaande effecten. In een tunnel blijft de overdruk van een explosie gehandhaafd over de lengte van de tunnel, terwijl in een parkeergarage de drukgolf meer mogelijkheden heeft om zich te verspreiden, bijvoorbeeld door openingen in gevels of naar andere verdiepingen, waardoor de overdruk sneller afneemt.

Op basis van verkennende berekeningen is de verwachting van de onderzoeker dat het exploderen van een volle waterstoftank in een parkeergarage ter plaatse zal leiden tot het falen van nabijgelegen constructie-elementen. Gezien de bouweisen zal naar verwachting de schade beperkt blijven tot de directe omgeving en zal een explosie van een waterstoftank niet leiden tot het voortschrijdend instorten van de parkeergarage.

# 5 Vuurbal

## 5.1 Inleiding

Bij het exploderen van een waterstoftank ontstaat een vuurbal als na de explosie de inhoud van de tank vrijkomt en verbrandt. Tijdens de explosie verbrandt in een tijdsbestek van milliseconden al een deel van de aanwezige waterstof (zie paragraaf 4.1), maar het grootste deel verbrandt in de vuurbal (Kim et al, 2015) (Kashkarov et al, 2015). Vanwege de warmte die vrijkomt bij de verbranding en de opwaartse kracht van waterstofgas, stijgt de vuurbal en krijgt een halfronde vorm. Een vuurbal van waterstof zal moeilijk te zien zijn en in de literatuur worden de dimensies van een vuurbal dan ook begrensd aan de hand van een gekozen temperatuurwaarde. Zodra de temperatuur onder die waarde komt, is de vuurbal voorbij. De thermische effecten van een vuurbal worden in dit hoofdstuk beschreven.

## 5.2 Effecten vuurbal in de open lucht

### Diameter vuurbal

Er zijn drie experimenten bekend met exploderende waterstoftanks in de open lucht waarbij gegevens zijn verzameld over de vuurbal die hierbij ontstaat (Molkov et al, 2021a). Deze gegevens staan in Tabel 5.1.

**Tabel 5.1 Gegevens vuurbalexperimenten**

Type tank	Druk (bar)	Inhoud (liter)	Inhoud (kg)	Diameter vuurbal (m)	Opmerking	Bron
III	345	88	1,65	24,4	Tank in auto	(Weyandt, 2006)
IV	343	72,4	1,86	7,7	Losse tank	(Zalosh, 2007)
III	707	36	1,41	≈ 18	Losse tank	(Molkov, 2021a) <sup>23</sup>
IV	702	35	1,37	≈ 18	Losse tank	
III	350	165	onbekend	7,7 en 7	Losse tanks	(Shen, 2018) <sup>29</sup>

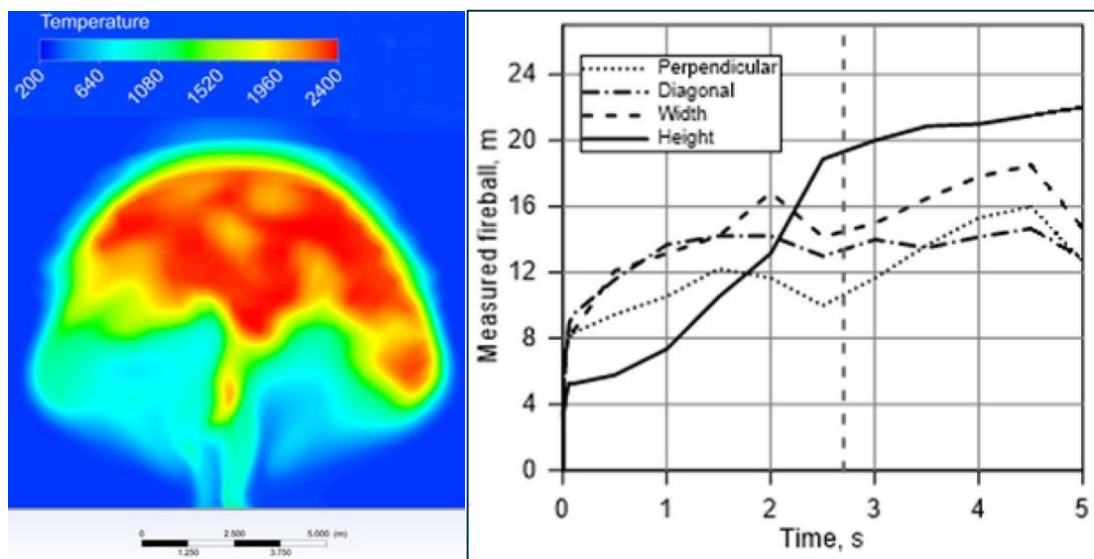
De diameter van de vuurbal wordt bepaald door de druk en de inhoud van de waterstoftank, maar ook door de locatie van de tank. De diameter van de vuurbal die bij de explosie van een vrijstaande waterstoftank ontstaat, is kleiner dan die van een waterstoftank die onder een auto gemonteerd zit. De vuurbal die ontstaat bij het exploderen van een waterstoftank onder een auto, kan niet alle kanten op en wordt afgeplat en daarmee breder in omvang.

<sup>29</sup> De warmtestraling van de vuurbal is niet experimenteel bepaald maar berekend.



Niet bij alle experimenten is al het aanwezige waterstof verbrand. Bij de experimenten van Shen (2018) heeft een deel van de aanwezige waterstof bijgedragen aan het wegschieten van de waterstoftank, terwijl het andere deel heeft bijgedragen aan de vuurbal. Hierdoor was de maximale omvang van de vuurbal relatief klein.

Molkov heeft een model ontwikkeld waarmee onder andere de diameter van een vuurbal kan worden bepaald; hij heeft dit model gevalideerd aan de hand van de experimenten uit 2006 en 2007 (Molkov et al, 2021a). Enkele resultaten staan weergegeven in Figuur 5.1. Links is goed te zien dat de vorm van een vuurbal halfrond is. Een temperatuur van 70 °C wordt gebruikt om de diameter van de vuurbal te bepalen.<sup>30</sup> Rechts is de groei van de vuurbal weergegeven. Nadat alle waterstof verbrand is (na 2,7 s) bestaat de vuurbal nog enkele seconden. Na 5 seconden is de temperatuur van de vuurbal onder de 70 °C gezakt.



**Figuur 5.1** Links: Temperatuurprofiel na 1,5 s van de vuurbal die ontstaat na het exploderen van een waterstoftank in de open lucht (350 bar, 59.5 L). Rechts: de diameter van deze vuurbal als functie van de tijd (bron: (Molkov et al, 2021a))

Het model van Molkov is beschikbaar in E-laboratory (FCH2edu, z.d.). Voor een waterstoftank van 700 bar met een inhoud van 62,4 liter in de open lucht berekent het model een vuurbaldiameter van 13,5 m. Bevindt de waterstoftank zich onder een auto, dan is de vuurbaldiameter een factor 2,6 groter, namelijk 35,2 m.

### Warmtestraling

De levensduur van een vuurbal is enkele seconden en in deze tijd wordt een aanzienlijke hoeveelheid warmtestraling geproduceerd door verbranding van waterstof. In de experimenten van Weyandt en Zalosh (2006 en 2007) was de warmtestraling 210 kW/m<sup>2</sup> op ruim 15 m afstand van de waterstoftank in de waterstofauto. Bij de experimenten van Shen was dat 35,7 kW/m<sup>2</sup> op bijna 31 m afstand van de waterstoftank. De temperatuur van deze vuurbal is naderhand berekend op meer dan 2000 °C (Kim et al, 2015).

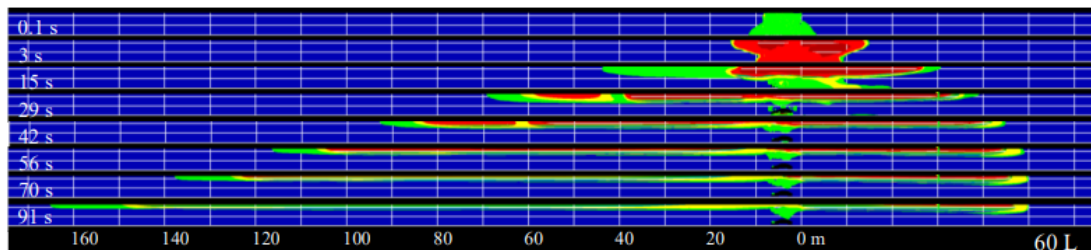
Over de doorwerking van de warmtestraling van een vuurbal op gebouwen is niets bekend, waarschijnlijk omdat de blootstellingsduur aan de vuurbal slechts enkele seconden bedraagt en/of omdat een waterstofvlam weinig warmte uitstraalt.

<sup>30</sup> Dit is de temperatuur aan de randen van de vuurbal. De temperatuur in de vuurbal is vele malen hoger.

### 5.3 Effecten vuurbal in tunnels

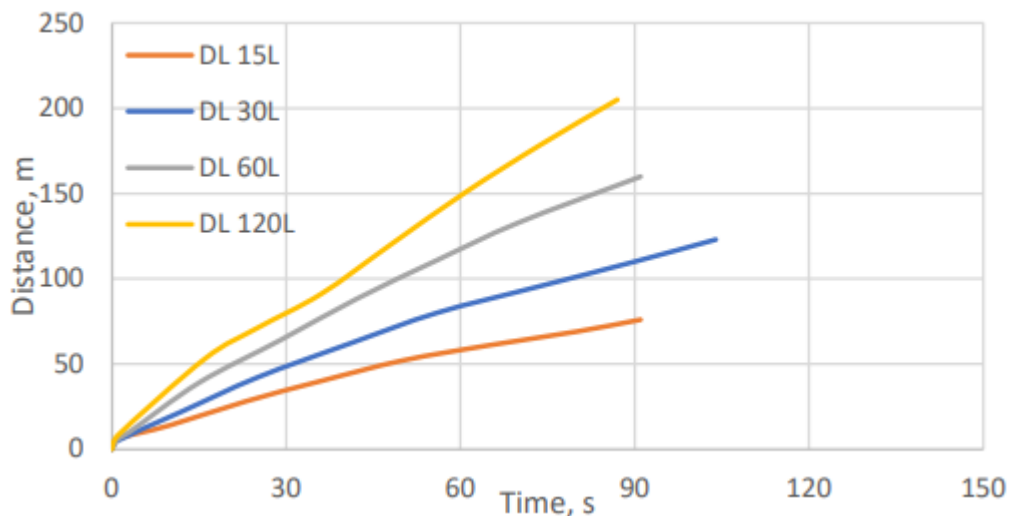
De omvang van een vuurbal is in een tunnel anders dan in de open lucht. Bij de explosie van een waterstoftank in een tunnel kan de vuurbal niet hoger komen dan het plafond van de tunnel, waardoor de vuurbal zich in de lengte van de tunnel zal verspreiden (Kudriakov et al, 2022). Dit effect wordt versterkt doordat de vuurbal zich ook verspreidt als gevolg van overdrukeffecten. Hoe groter de inhoud van de waterstoftank en hoe kleiner het dwarsoppervlak van een tunnel, hoe groter de afstand waarover een vuurbal in een tunnel zich verspreidt, zie Figuur 5.2. Dit vergroot het effectgebied van een vuurbal in een tunnel aanzienlijk in vergelijking met het vrije veld (HyTunnel, 2022a). De aanwezigheid van een waterstofauto boven de waterstoftank versterkt dit effect ook (Dadashzadeh et al, 2018), maar de mate waarin dat gebeurt in een besloten ruimte als een tunnel is niet bekend.

In Figuur 5.2 is ook te zien dat alleen in de eerste seconden na de explosie de tunnel ter plaatste gevuld zal zijn door de vuurbal en dat deze zich daarna in het bovenste deel van de tunnel bevindt. De vuurbal mengt zich daar met lucht en verdunt de verbrandingsproducten.



**Figuur 5.2** Zijaanzichten van de vuurbal van een 60 liter-waterstoftank in een tunnel met twee rijbanen (hoogte 4,5 m, dwarsoppervlak 40 m<sup>2</sup>). De explosie van de waterstoftank vindt plaats op 50 m afstand van de tunnelingang. Rood: 309 °C ('fatality'), geel: 115 °C ('pain') en groen: 70 °C ('no=harm'). Bron: (HyTunnel, 2022a)

Waar de thermische effecten van een vuurbal in de open lucht na enkele seconden verdwenen zal zijn, houden die in een tunnel langer aan, omdat het in vergelijking met de open lucht moeilijker is om zuurstof aan te voeren (zie Figuur 5.3).



**Figuur 5.3** Lengte vuurbal als functie van de tijd in een tunnel van 750 m met twee rijbanen. Het dwarsoppervlak van de tunnel bedraagt 40 m<sup>2</sup> (bron: (HyTunnel, 2022a))

In de geraadpleegde literatuur is geen informatie gevonden over het falen van tunnels door de thermische belasting van de vuurbal, waarschijnlijk omdat de blootstellingsduur van de vuurbal slechts enkele seconden bedraagt en omdat de overdruk van de explosie een grotere impact heeft dan de hitte van de kortstondige vuurbal. De thermische belasting van de vuurbal lijkt derhalve niet te leiden tot het falen van de constructie van een tunnel.

## 5.4 Effecten vuurbal in parkeergarages

In de literatuur ligt de aandacht voor de effecten van een vuurbal vooral bij tunnels en niet bij parkeergarages. Er is namelijk geen informatie over de effecten van een vuurbal in een parkeergarage gevonden. Toch kan er in algemene zin hier wel iets over gezegd worden.

Een tunnel is geometrisch gezien eenvoudig van vorm: het is een ruimte waarvan de lengte vele malen groter is dan de breedte. Parkeergarages daarentegen zijn korter, breder en lager<sup>31</sup> dan tunnels en kunnen meerlaags zijn. Dit leidt tot verschillende en tegengestelde effecten die elkaar kunnen uitmiddelen:

- > In een open parkeergarage kan een vuurbal door openingen ontsnappen naar buiten, waardoor de vuurbal beter kan verbranden. De vuurbal zal dan eerder opgebrand zijn en minder ver komen dan in een tunnel.
- > In een parkeergarage kan een vuurbal zich in verticale richting verspreiden naar andere verdiepingen, waardoor de vuurbal verder komt dan in een tunnel.
- > Een parkeergarage is lager dan een tunnel waardoor een vuurbal zich minder goed kan ontwikkelen en het verbrandingsproces langer duurt. De vuurbal zal daardoor verder komen dan in een tunnel.
- > Een parkeergarage is breder dan een tunnel waardoor een vuurbal zich in horizontale richting beter kan ontwikkelen en het verbrandingsproces korter duurt. De vuurbal zal dan minder ver komen dan in een tunnel.

Op basis van de hierboven beschreven argumenten is de verwachting dat de dimensies van een vuurbal in een parkeergarage beperkt blijven tot de etage waar de explosie plaatsvindt, aangevuld met de etages die erboven en eronder liggen en met de ruimte buiten gevelopeningen.

Over de doorwerking van de warmtestraling van een vuurbal op parkeergarages is niets bekend. Hoewel in een vuurbal zeer hoge temperaturen worden bereikt, is de verwachting dat de blootstellingsduur van tientallen seconden te kort is om de constructie te doen falen. Wel zullen ontvlambare objecten in de vuurbal in brand kunnen raken en tot secundaire branden leiden. Deze branden kunnen schade berokkenen aan de parkeergarage, naast de schade die de explosie van de waterstoftank heeft aangericht.

## 5.5 Samenvatting

Een vuurbal die ontstaat na het exploderen van een waterstoftank heeft in de open lucht een halfronde vorm en een levensduur van enkele seconden. In een besloten ruimte als een tunnel houdt een vuurbal langer aan, omdat het verbrandingsproces langer duurt. Hierbij

---

<sup>31</sup> In parkeergarages is de minimale vrije hoogte 2,1 tot 2,3 m (NEN, 2013), terwijl voor snelwegtunnels een minimale hoogte van 4,6 m gebruikelijk is. Een veelgebruikte hoogte voor parkeergarages is 2,4 m.

verspreidt de vuurbal zich onder het plafond in horizontale richting over afstanden van tientallen meters. Hoe groot deze afstand is, hangt af van de dimensies van de besloten ruimte.

Parkeergarages zijn in vergelijking met tunnels korter, breder en lager en kunnen meerlaags zijn. De geometrie van een parkeergarage werkt op diverse manieren door op de omvang van de vuurbal. De dimensies van een vuurbal in een parkeergarage blijven naar verwachting beperkt tot de etage waar de explosie plaatsvindt, mogelijk aangevuld met de etages die erboven en eronder liggen en met de ruimte buiten bij gevelopeningen.

De vuurbal zelf zal naar verwachting niet leiden tot het falen van de constructie van een parkeergarage, omdat de blootstellingsduur daarvoor de kort is. De constructie van een parkeergarage zal aangetast zijn door het exploderen van de waterstoftank en de vuurbal kan dit verergeren doordat secundaire branden kunnen ontstaan.

# 6 Brokstukken

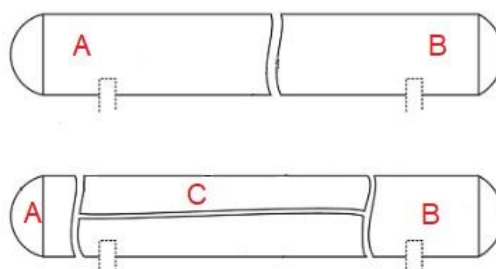
## 6.1 Inleiding

Bij het exploderen van een waterstoftank komt veel energie vrij (enkele MJ). Slechts een fractie van deze energie wordt gebruikt om brokstukken weg te slingeren. Het gaat hierbij om brokstukken die afkomstig zijn van de waterstoftank (primaire brokstukken). Deze brokstukken kunnen voor schade in de omgeving zorgen. Dit hoofdstuk beschrijft het ontstaan van brokstukken afkomstig van de waterstofauto en de schade die zij kunnen berokkenen.

## 6.2 Effecten brokstukken in de open lucht

### Werpafstanden

Waterstoftanks zijn cilindrische tanks die bij het exploderen in een beperkt aantal grote brokstukken uiteenvallen. Vaak gaat het om stukken van de uiteinden van de tank, al dan niet aangevuld met stukken uit het middendeel (Figuur 6.1). Bij veel explosies komen uiteinden A en B van een cilindrische tank terecht in het verlengde van de tank, terwijl brokstukken van het middendeel C terecht komen in het gebied loodrecht op de as van de tank (Vaidogas, 2021).



**Figuur 6.1 Brokstukken van een cilindrische tank zoals die vaak ontstaan bij het exploderen van de tank (bron: (Vaidogas, 2021))**

Hoe ver de brokstukken kunnen komen, is op voorhand niet te zeggen. De hoeveelheid energie die vrijkomt en diverse andere grootheden bepalen de werpafstand van brokstukken. Voorbeelden van die grootheden zijn de startsnelheid van een brokstuk, het gewicht van het brokstuk, de hoek waaronder het wordt weggeslingerd<sup>32</sup> en de luchtweerstand. Deze gegevens zijn niet bekend en moeten geschat worden, waarna met behulp van ballistische modellen werpafstanden berekend kunnen worden (Ineris, 2012).

Vanuit explosie-experimenten die zijn gedaan met waterstoftanks zijn gegevens bekend over de werpafstanden van brokstukken. Het gaat hierbij alleen om waterstoftanks met een druk van rond de 350 bar. De gegevens staan verzameld in Tabel 6.1.

<sup>32</sup> De hoek waaronder het uiteinde van een cilindrische tank bij een explosie wordt weggeslingerd, ligt gemiddeld genomen tussen 0 en 10 graden (Hauptmanns, 2001).

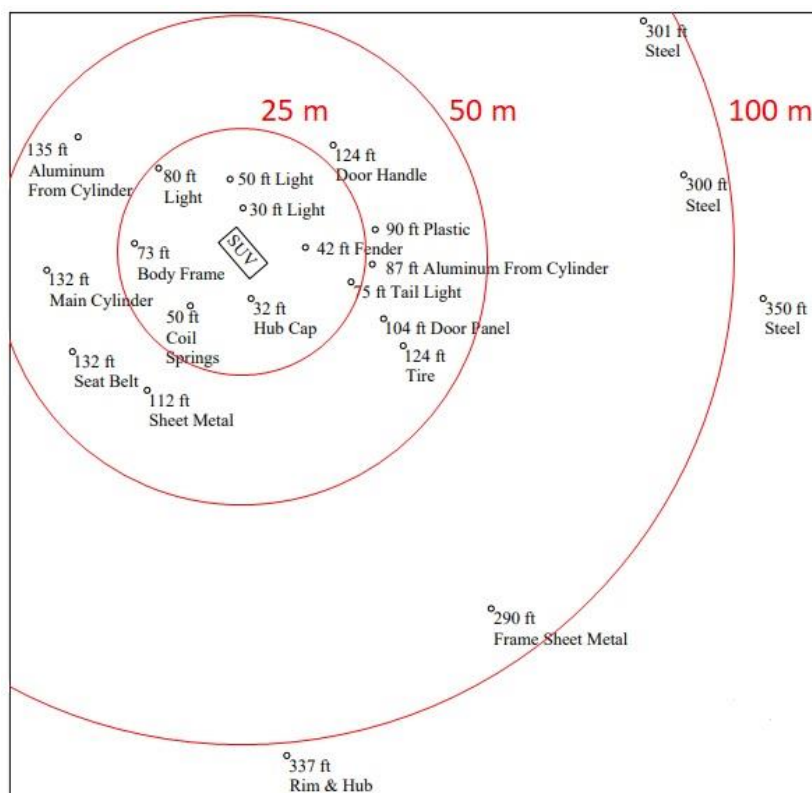
**Tabel 6.1 Werpafstanden van brokstukken bij experimenten met waterstoftanks<sup>33</sup>**

Type tank	Druk (bar)	Inhoud (liter)	Werpafstand (m)	Opmerking	Bron
III	345	88	40 m (48 kg) 107 (2,3 kg)	Tank in auto	(Weyandt, 2006) (Zalosh, 2007)
IV	343	72,4	82 (14 kg) < 82 (brokstukjes tank)* < 110 (brokstukjes auto)*	Losse tank	
III	350	165	32,5 (79 kg)** 16,8 en 40**	Losse tanks	(Shen, 2018) <sup>34</sup>
III	350	165	200*	Losse tank	

\* Het gewicht van deze brokstukken is niet beschreven. De brokstukken in de experimenten van Weyandt en Zalosh betroffen onder andere veren, stukken metaal, een deurgreep en stukken rubberband.

\*\* Het brokstuk trof een truck waardoor de werpafstand beperkt bleef.

Opgemerkt moet worden dat sommige brokstukken afkomstig zijn van de auto waarin de waterstoftank zich bevond. Dat is ook te zien in het overzicht van de locaties waarin brokstukken zijn gevonden bij het experiment van Weyandt en Zalosh met de waterstoftank gemonteerd onderin een auto (Figuur 6.2).



**Figuur 6.2 Locaties waar brokstukken aangetroffen werden van de geëxplodeerde waterstoftank en van de auto (bron: (Weyandt, 2006))**

<sup>33</sup> Bij de losse waterstoftank komt ongeveer 6 MJ aan mechanische energie vrij. Bij een waterstoftank in de auto ook, maar meer dan 5 MJ wordt gebruikt voor het vervormen en verplaatsen van de auto (Kashkarov et al, 2015).

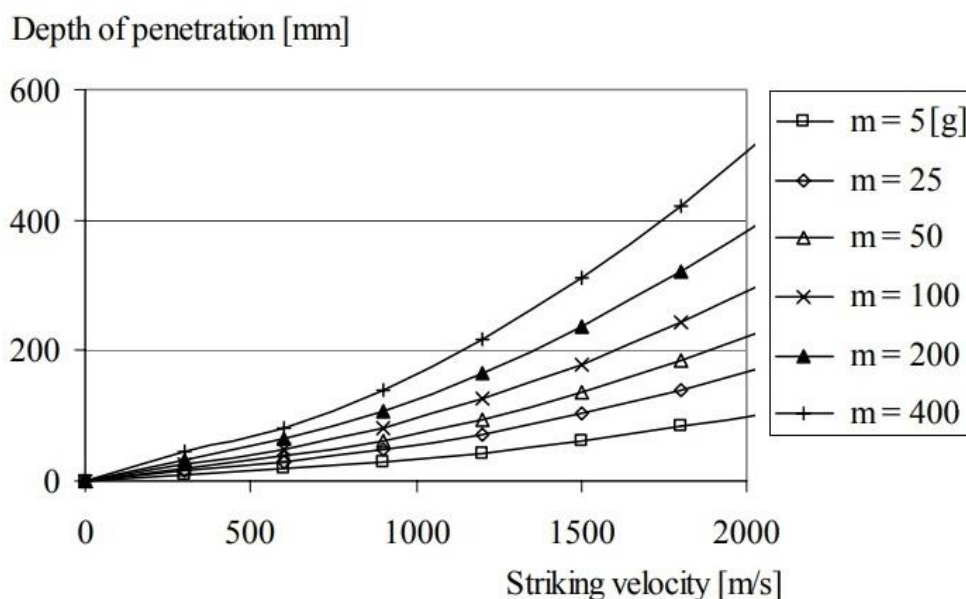
<sup>34</sup> De waterstoftanks die gebruikt zijn in de experimenten van Shen waren 178 cm lang en wogen 89 kilo. Hiervan was 36 kilo afkomstig van de aluminium liner en 53 kilo van het composietomhulsel.

Figuur 6.2 laat zien dat bij een waterstoftank van 350 bar de meeste brokstukken terechtkomen binnen een straal van 50 m rondom de waterstofauto. Verwacht mag worden dat bij een waterstoftank van 700 bar de brokstukken verder zullen komen, maar hoeveel verder is niet te zeggen.

### 6.3 Effecten brokstukken op gebouwen

Het exploderen van een waterstoftank in een waterstofauto leidt tot de vorming van brokstukken die naar alle kanten weggeblazen worden en schade kunnen veroorzaken aan gebouwen. Hoe groot de schade is, wordt bepaald door de snelheid waarmee een brokstuk het gebouw raakt, door de vorm en het gewicht van het brokstuk, door de hoek waarmee het brokstuk het gebouw raakt en door het materiaal waaruit het gebouw opgetrokken is. Dichter bij de explosie is de snelheid van een brokstuk het grootst en zal het meer schade aanrichten dan verder weg (Leppänen, 2002).

De inslag van een brokstuk in beton zorgt voor het scheuren en verbrijzelen van beton. Hoe diep een brokstuk hierbij kan komen, wordt weergegeven in Figuur 6.3. Figuur 6.3 is opgesteld voor situaties waarbij sprake was van explosieven of van kogels. Daar is bij een waterstoftank geen sprake van en de snelheid waarmee brokstukken weggeslingerd worden, zal dan ook lager zijn. Hoeveel lager is echter niet bekend.



**Figuur 6.3 Diepte tot waar brokstukken kunnen komen in beton (druksterkte 30 MPa) voor brokstukken van 5 - 400 g en met diverse snelheden (bron: (Leppänen, 2002))**

In het ergste geval ontstaat een opening in het beton. Een betonnen muur (druksterkte 30 MPa) moet 15 cm dik zijn om te voorkomen dat een brokstuk van 400 gram met een snelheid van 600 m/s een opening in die muur maakt. Of een betonnen constructie faalt als het geraakt wordt door een brokstuk, hangt onder andere af van het gewicht van het brokstuk en de dikte van de constructie. Hoe groter het brokstuk, hoe groter de impact is. Wapening in beton kan echter voorkomen dat de betonnen constructie uiteenvalt en faalt (Leppänen, 2002).

## 6.4 Effecten brokstukken in parkeergarages

In een parkeergarage zijn de werpafstanden van brokstukken van een waterstoftank en van een waterstofauto klein, omdat er overal obstakels zijn in de vorm van voertuigen, muren, kolommen, plafonds en vloeren. Voertuigen vangen een deel van de brokstukken op en kunnen door de impact verplaatst worden.<sup>35</sup> Muren, kolommen, plafonds en vloeren kunnen geraakt worden door de brokstukken, maar dit zal naar verwachting niet leiden tot instorting van de parkeergarage, omdat maar een gering deel van de constructie beschadigd kan raken.

Door een explosie van een waterstoftank zal in een parkeergarage een drukgolf ontstaan (paragraaf 4.4). Overdrukeffecten kunnen versterkt worden door de effecten van brokstukken, maar het mechanisme hierachter is niet heel duidelijk (Leppänen, 2002).

Als een explosie in een binnensituatie plaatsvindt, zullen de brokstukken die daarbij ontstaan eerder voor slachtoffers zorgen dan thermische effecten en overdrukeffecten (Lian et al, 2020). Voor brokstukken van meer dan 1 kg geldt dat bij snelheden van meer dan 4 m/s onomkeerbare schade aan mensen optreedt (schedelbreuk) (Ineris, 2012).

## 6.5 Samenvatting

Bij een explosie van alleen een waterstoftank ontstaan een beperkt aantal grote brokstukken en veel kleine brokstukken. De kracht van de explosie zal ervoor zorgen dat er ook brokstukken ontstaan die afkomstig zijn van de waterstofauto. Van een explosie van een 350 bar waterstoftank in een waterstofauto is bekend dat de meeste brokstukken in een straal van 50 m terecht kwamen. Van waterstoftanks van 700 bar is die informatie niet voorhanden.

De brokstukken zullen beton beschadigen en kunnen stukken daarvan doen afbreken of zelfs doorboren. Het is niet te verwachten dat een parkeergarage volledig bezwijkt als deze geraakt wordt door brokstukken, omdat maar een gering deel van de constructie beschadigd kan raken.

---

<sup>35</sup> Bij de experimenten van Shen heeft een brokstuk van 79 kg een truck van 1500 kg geraakt die hierdoor 0,5 m verschoof (Shen et al, 2018).



# 7 Explosie waterstofwolk

## 7.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft welke effecten een explosie van een waterstofwolk heeft op de constructieve veiligheid van parkeergarages. In paragraaf 1.5 is in algemene zin al uitleg gegeven over explosies, terwijl de manier waarop een explosie van een waterstoftank doorwerkt op gebouwen besproken is in paragraaf 4.3. Dit hoofdstuk beschrijft de effecten van een explosie van een waterstofwolk in achtereenvolgens de open lucht, tunnels en parkeergarages.

## 7.2 Effecten explosie waterstofwolk in de open lucht

Om een explosie te krijgen, moet de waterstofconcentratie in een wolk groot genoeg zijn. Bij concentraties tussen 4 - 10 vol.% ontbrandt waterstof wel, maar explodeert niet, omdat de waterstofvlammen zich niet in alle richtingen kunnen verspreiden. De vlam heeft moeite zich in stand te houden en is daarom niet in staat om voor significante overdruk te zorgen. Wel komt bij de verbranding energie vrij, waardoor de lucht om de waterstofwolk uitzet en zich verplaatst. Dit proces gaat dermate snel, dat een harde knal hoorbaar is. Experimenten met explosies van waterstof worden vaak gedaan bij concentraties vanaf 15 vol.%, omdat bij lagere concentraties druksensoren nauwelijks overdruk meten (Zhang et al, 2022) (Hu et al, 2023).

Het ontbranden in de open lucht van een waterstofwolk met een hoge waterstofconcentratie leidt tot een 'vapor cloud explosion' (VCE). In een open omgeving zonder obstakels zijn de gegenereerde overdrukken lager dan in een besloten omgeving (zie ook paragraaf 1.2), maar wel hoger dan bij soortgelijke explosies van ontvlambare koolwaterstoffen als methaan en propaan.

Bij experimenten in de open lucht zijn waterstofwolken met een volume van 1,4 – 300 m<sup>3</sup> en een waterstofconcentratie van 20 - 57 vol.% tot ontsteking gebracht. Dit gaf overdrukken van 0,01 - 0,1 bar met uitschieters naar 0,17 bar of meer bij waterstofwolken van 200 - 300 m<sup>3</sup> en 30 vol.%. Tabel 7.1 op de volgende pagina geeft de resultaten van deze experimenten.

De praktijk heeft geleerd dat er uitzonderingen zijn, zoals de explosie die in 2019 plaatsvond bij een waterstoftankstation in Kjørbo (Noorwegen). De overdruk van deze explosie was groter dan verwacht, aangezien de waterstofopslag zich in de open lucht bevond en niet overkapt was. Mogelijk is er sprake geweest van een deflagratie die overging in een detonatie (Hansen, 2019). Tot op heden is er geen officieel onderzoeksrapport gepubliceerd, waardoor de overdruk die bij deze explosie ontstond, onverklaard blijft.

**Tabel 7.1 Resultaten van enkele experimenten met het ontbranden van waterstofwolken in de open lucht (bron: (Mukhim et al, 2018))**

Volume (m <sup>3</sup> )	Concentratie (vol.%)	Overdruk (bar)	Afstand (m)	Bron
1,4	22,7	0,02	1,0	(Otsuka, 2007)
1,4	29,6	0,03	1,0	
1,4	43	0,10	1,0	
5,2	20	0,03	2,5	(Sato, 2006)
5,2	30	0,06	2,5	
37	20	0,02	4,9	
37	30	0,10	4,9	
200	30,7	0,25	8,0	(Wakabayashi, 2007)
300	30	0,25	9,4	(Groethe, 2007)
		0,17	16	

### 7.3 Effecten explosie waterstofwolk in gebouwen

Eén van de belangrijkste voorwaarden om een chemische explosie in een besloten omgeving te krijgen, is dat vrijgekomen waterstof een wolk kan vormen waarin de waterstofconcentratie hoog genoeg is. Andere factoren die een rol spelen bij de sterkte van een explosie van een waterstofwolk in een besloten ruimte, zijn onder meer (NIPV, 2020):

- > De aanwezigheid van obstakels: obstakels in besloten ruimtes zorgen voor meer turbulentie en een betere verbranding van waterstof, waardoor de overdruk hoger wordt.
- > De uniformiteit van de waterstofwolk: een uniforme waterstoflaag geeft lagere overdrukken dan een waterstoflaag die uit meerdere lagen bestaat waarvan de hoogst gelegen lagen de hoogste waterstofconcentratie hebben.
- > De locatie van de ontstekingsbron ten opzichte van de uitstroomopening en ten opzichte van de besloten ruimte.
- > De grootte van de besloten ruimte: hoe groter de besloten ruimte, hoe meer tijd en ruimte het vlamfront heeft om zich te ontwikkelen en hoe hoger de overdruk kan worden wanneer het waterstof-luchtmengsel ontsteekt.

Op 24 februari 2023 explodeerde in een parkeergarage van een ziekenhuis in [Detroit](#) een waterstofcilinder in een auto. De cilinder die werd gebruikt voor het oplaten van weerballonnen, lekte waterstof, dat na te zijn vrijgekomen ontstak in de auto. De explosie verwoestte de auto, maar de bestuurder en de passagier raakten niet levensgevaarlijk gewond. Op ruim 30 m afstand braken ramen van een lift en drie naastgelegen auto's raakten beschadigd.

Als waterstof via de TPRD vrijkomt uit een waterstoftank van 700 bar, duurt de uitstroom een paar minuten en is de uitstroming turbulent. Dit leidt tot een goede menging met lucht en daarmee tot een meer uniform verdeelde waterstoflaag onder het plafond. Als het uitstromend waterstof echter snelheid verliest door een obstakel als een vloer of een voertuig, verspreidt het zich minder snel en minder uniform onder een plafond. Dan zal er meer

laagvorming zijn, waarbij de waterstofconcentratie in de hoogste lagen hoger is dan in de laagst gelegen lagen (Pitts et al, 2012) (De Stefano et al, 2019). Na een lange tijd (een tijd die althans veel langer is dan de uitstromingsduur) zal de waterstofwolk zich in zijwaartse richting verspreiden en zich door diffusie ook neerwaarts uitbreiden (Huang et al, 2022).

In de literatuur worden diverse experimenten beschreven waarbij een waterstofwolk is ontstoken in een besloten ruimte. In het kader van het HySea-project zijn experimenten in 20 ft containers uitgevoerd met een inhoud van 32,6 m<sup>3</sup> (Skjold et al, 2019a) (Skjold et al, 2019b). Bij de eerste serie experimenten werd een geopende container gevuld met homogeen verdeeld waterstof met een concentratie van 15 vol.%. Om uitstroom van waterstof te voorkomen, was de opening afgesloten met een dun laagje plastic. Bij de tweede serie testen was de container gesloten en waren in het plafond van de container explosieluiken aangebracht. In de container werd een hoeveelheid waterstof gebracht gelijk aan 20 vol.% homogeen verdeeld waterstof, maar door laagvorming was de maximale concentratie in de bovenste laag hoger, namelijk 27 vol.%. De resultaten van de explosie-experimenten staan samengevat in Tabel 7.2. De maximale overdrukken zijn in de container gemeten. De resultaten laten zien dat de overdruk van de explosie groter was in de gesloten container dan in de open container en dat obstakels de overdruk in de gesloten container meer vergroten dan in de open container.<sup>36 37</sup>

**Tabel 7.2 Resultaten uit het testprogramma van het HySea-project (bron: (Skjold et al, 2019a en 2019b))**

Verdeling	Concentratie (vol.%)	Open	Aanwezigheid obstakels	Max. overdruk (bar)
Homogeen	15	Ja	Nee	0,05
Homogeen	15	Ja	Ja	0,08
Gelaagd	20 → 27	Nee	Nee	0,34
Gelaagd	20 → 27	Nee	Ja	0,68

## 7.4 Effecten explosies waterstofwolk in tunnels

Er is geen literatuur gevonden waarin experimenten beschreven staan met een exploderende waterstofwolk – afkomstig van een waterstofauto – in een tunnel. Wel worden in de literatuur experimenten beschreven met explosies van losse waterstoftanks in een tunnel en van berekeningen met software waarmee explosies worden gemodelleerd. Deze paragraaf beschrijft enkele artikelen.

### (Groethe et al, 2007)

Groethe heeft experimenten gedaan in een tunnel op schaal 1:5. Een wolk van 37 m<sup>3</sup> en 30 vol.% (1 kg waterstof, homogeen verdeeld) werd ontstoken en leidde in de tunnel tot een

<sup>36</sup> Containers zijn relatief zwakke constructies en de overdruk zorgde ervoor dat de zijwanden boller kwamen te staan.  
<sup>37</sup> De experimentele gegevens zijn afkomstig uit een benchmarkstudie waarin CFD-modellen met elkaar zijn vergeleken. Hieruit kwam naar voren dat CFD-modellen de experimenteel gevonden resultaten binnen een zekere marge goed voorspelden, uitzonderingen daargelaten. Te zien was ook dat a) verschillende modelleers met hetzelfde model verschillende resultaten kregen en b) de grootte van de rekcellen ('meshgrootte') veel invloed heeft op de nauwkeurigheid van de resultaten. Om deze beïnvloeding zo veel mogelijk te voorkomen, zijn richtlijnen opgesteld (Tolias et al, 2018).

overdruk van 1,5 bar. Het experiment met 20 vol % waterstof gaf een overdruk van 0,35 bar, terwijl het ontsteken van een wolk met 9,5 vol.% waterstof niet tot een meetbare overdruk leidde. De overdruk in de tunnel bleef in de experimenten nagenoeg constant over de gehele lengte van de tunnel.



**Figuur 7.1** De tunnel die gebruikt is in de experimenten van Groethe (bron: (Groethe et al, 2007))

**(Middha en Hansen, 2009)**

Middha en Hansen hebben met behulp van het softwarepakket FLACS gerekend aan een halfronde tunnel van  $500 \times 9,2 \times 7,1$  m ( $l \times b \times h$ ) en een rechthoekige tunnel van  $500 \times 10 \times 5$  m. Het dwarsoppervlak van deze tunnels bedroeg respectievelijk  $60 \text{ m}^2$  en  $50 \text{ m}^2$ . Ze bepaalden de overdruk die kan ontstaan als de inhoud van één waterstoftank (700 bar, 5 kg) vrijkomt uit een 4 mm gat in het midden van deze tunnel. De concentratie van de waterstofwolken was steeds 30 vol.%, maar de omvang varieerde. De overdruk werd berekend ter hoogte van het plafond. De resultaten staan samengevat in Tabel 7.3.

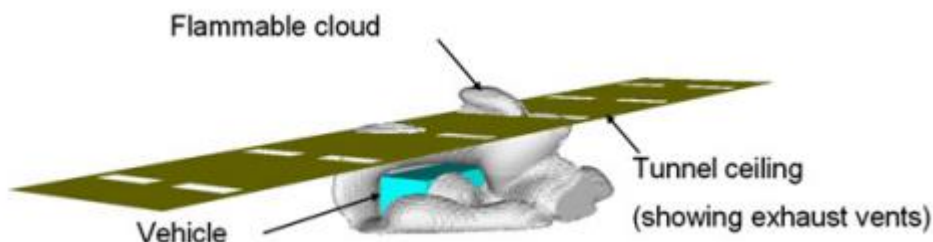
**Tabel 7.3** Berekende maximale overdrukken bij het ontsteken van 30 vol.% waterstofwolken van diverse omvang in twee type tunnels (bron: (Middha en Hansen, 2009))

Omvang wolk ( $\text{m}^3$ )	Maximum overdruk (bar)	
	Halfronde tunnel	Rechthoekige tunnel
5	0,05	0,05
25	0,11	0,11
50	0,17	0,19
125	0,29	0,37
250	0,50	2,45
500	1,29	2,90
1000	2,66	9,46

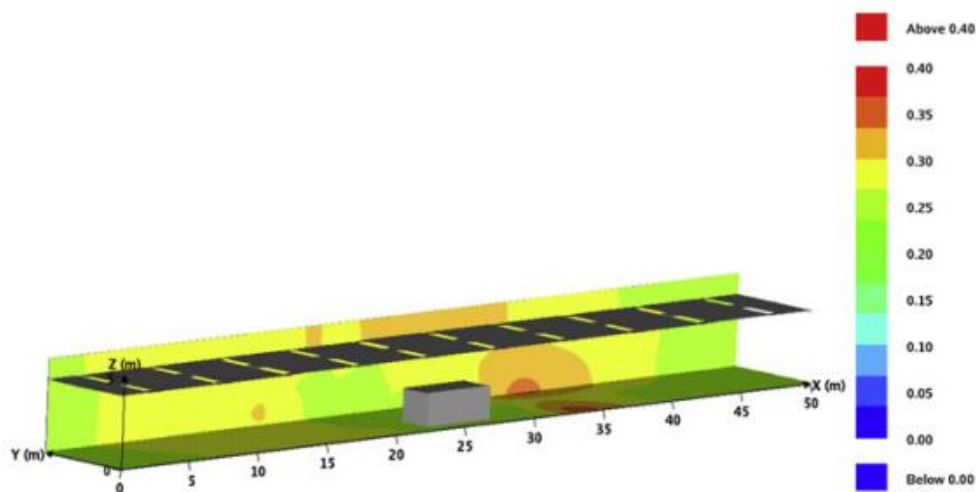
Te zien is dat de berekende overdruk toeneemt met de omvang van de waterstofwolk. Het ontsteken van een 30 vol.% waterstofwolk van  $5 \text{ m}^3$  of  $25 \text{ m}^3$  leidt tot relatief lage overdrukken, maar vanaf  $50 \text{ m}^3$  zijn de berekende overdrukken aanzienlijk groter. Ook is te zien dat een gaswolkexplosie in een tunnel met een rond dak lagere overdrukken geeft. Dit effect is vooral bij de grotere wolken merkbaar.

**(Houf et al, 2012)**

Houf heeft de resultaten van experimenten gebruikt om softwaremodellen te valideren. De experimenten vonden plaats in de tunnel die in Figuur 7.1 afgebeeld staat. Men heeft waterstof gelijktijdig laten vrijkomen uit drie waterstoftanks onder één auto ( $3 \times 1,67$  kg, 700 bar). Dit wordt gezien als de worst-case-situatie. De uitstroom was naar beneden gericht en de tunnel was voorzien van zijwaartse ventilatie (ventilatievoud = 15x/uur). Bij de experimenten is onder meer gekeken naar de invloed van het tijdstip en de locatie van vertraagde ontsteking. Figuur 7.2 laat de verspreiding van de waterstofwolk in de tunnel zien, 2 seconden na het openen van de TPRD's. De overdrukken die ontstaan als de waterstofwolk onder de waterstofauto ontstoken wordt, zijn weergegeven in Figuur 7.3.



**Figuur 7.2 Waterstofwolk (4 – 75 vol.%) rondom waterstofauto 2 seconden na vrijkomen in een geventileerde tunnel (bron: (Houf et al, 2012))**



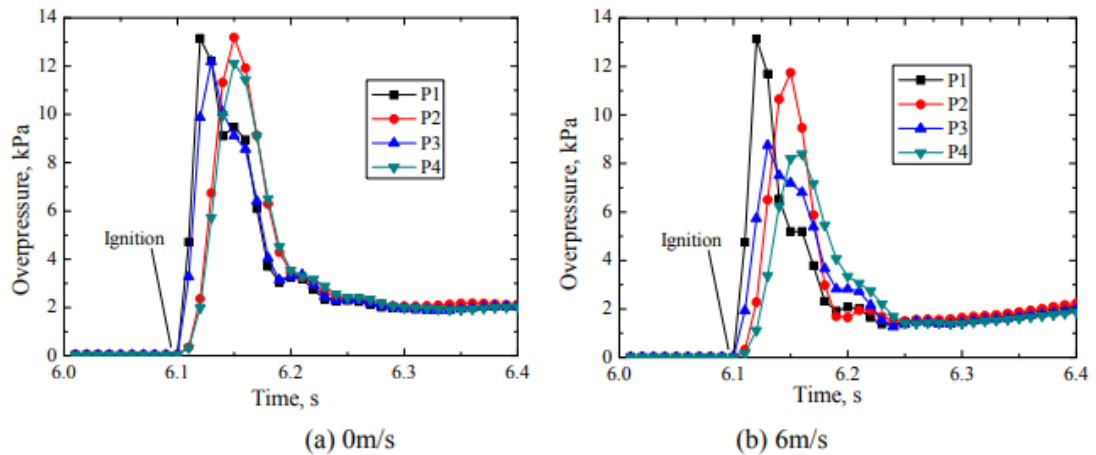
**Figuur 7.3 Overdruk (bar) van de explosie van de waterstofwolk 2 seconden na vrijkomen in een geventileerde tunnel. Locatie ontsteking is onder de auto (bron: (Houf et al, 2012))**

Ter hoogte van de waterstofauto worden overdrukken van meer dan 0,3 bar berekend, terwijl de overdruk in de rest van de tunnel tussen 0,15 - 0,30 bar bedraagt. Als ontsteking boven in de tunnel gebeurt, dus onder het plafond, zijn de berekende overdrukken groter en kunnen een waarde bereiken van 3 bar.

**(Bie en Hao, 2017)**

Bie en Hao hebben modelberekeningen gedaan aan het vrijkomen van de inhoud van één waterstoftank (700 bar, 5 kg) uit een gat van 6 mm bij een waterstofauto die in het midden van een tunnel staat. De uitstroomrichting is omhoog. Het betreft een rechthoekige tunnel van  $500 \times 13,5 \times 5$  m met een dwarsoppervlak van  $67 \text{ m}^2$ . De wolk werd na 6,1 s ontstoken, maar het is onbekend waar. De berekende overdrukken lagen rond de 0,12 - 0,13 bar, zie

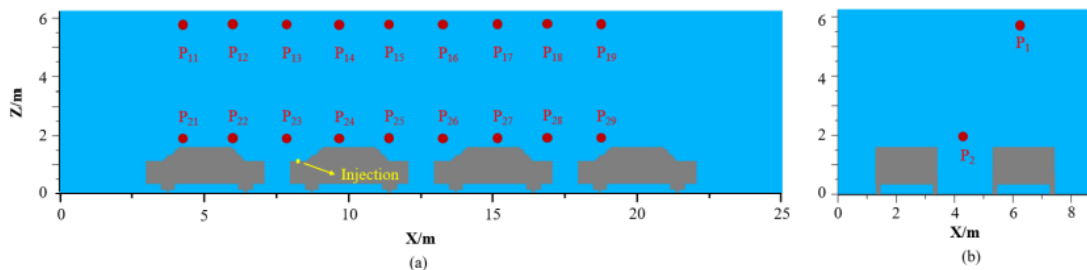
Figuur 7.4. Door te ventileren werd de overdruk verlaagd naar 0,08 - 0,09 bar, behalve dicht bij de auto.



Figuur 7.4 De berekende overdruk bij twee verschillende ventilatiesnelheden. P1 en P2 zijn meetpunten op 5 m en 10 m afstand stroomafwaarts van de waterstofauto. Meetpunten P3 en P4 staan op 5 m en 10 m afstand stroomopwaarts (bron: (Bie en Hao, 2017))

#### (HyTunnel, 2022b)

In het HyTunnel-programma zijn modelberekeningen gedaan aan een tunnel met twee rijbanen met een ronde en met een rechte bovenkant (HyTunnel, 2022b). In de tunnel waren acht auto's aanwezig. In deze paragraaf worden de resultaten van de berekeningen aan de rechthoekige tunnel gegeven, omdat waterstof zich in rechthoekige tunnels meer ophoopt dan in halfronde tunnels (HyTunnel, 2022b).<sup>38</sup>

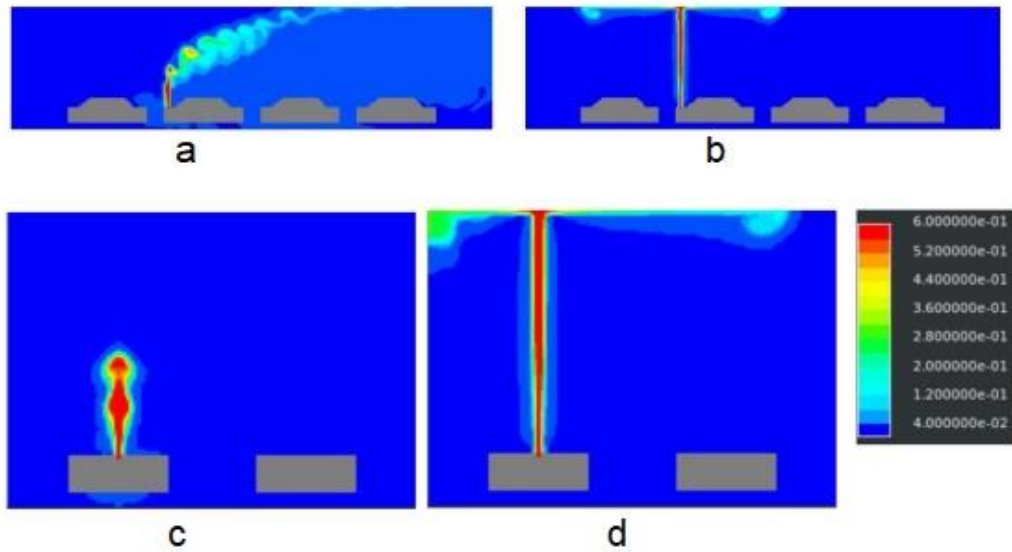


Figuur 7.5 Zijaanzichten van het tunnelmodel: a) aanzicht in de lengterichting en b) aanzicht in de dwarsrichting (bron: (HyTunnel, 2022b))

De dimensies van de tunnel zijn  $25 \times 8,7 \times 6,3$  m ( $l \times b \times h$ ). De volgende situatie is doorge-rekend: waterstof komt vrij uit een waterstoftank van 700 bar, de uitstroom is naar boven gericht en de diameter van de TPRD's is 2,5 mm. De waterstofwolk ontsteekt na vijf seconden. De waterstofconcentratie en de overdruk zijn berekend op 2 m hoogte en op 6 m hoogte voor twee situaties, te weten met en zonder ventilatie (3 m/s). In de situatie zonder ventilatie is de ontstekingslocatie **recht** boven het lek genomen op 6 m hoogte, terwijl die in de situatie met ventilatie 1,8 m stroomafwaarts van het lek is op een hoogte van 4 m. Zonder ventilatie bereikt het uitstromende waterstof snel het plafond, hoopt zich daar op en verspreidt zich in de lengterichting en zijwaarts (Figuur 7.6b en d). Met ventilatie daaren-

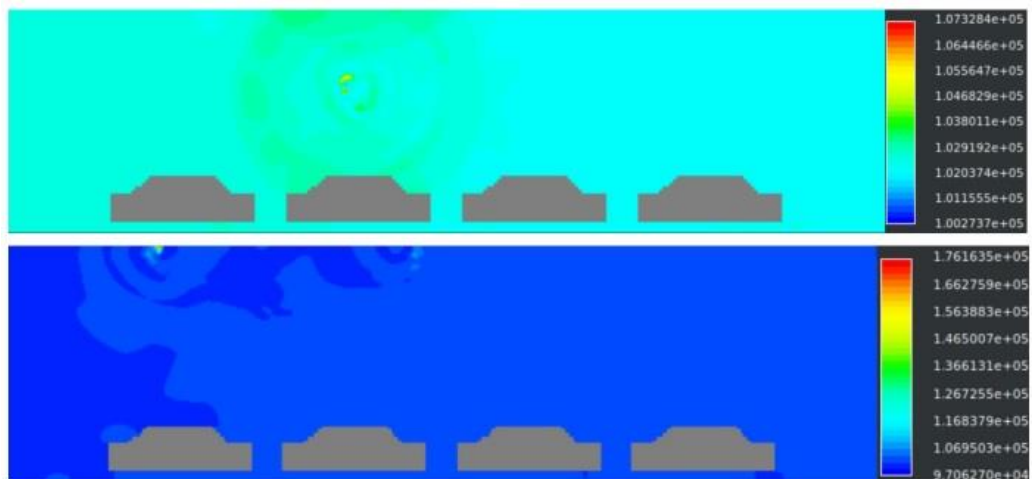
<sup>38</sup> Reden hiervoor kan zijn dat het plafond bij halfronde tunnels wat hoger is dan bij rechthoekige tunnels, waardoor bij een halfronde tunnel meer tijd is voor verdunning (Kumar, 2009).

tegen is er geen sprake van ophoping onder het plafond en zijn de concentraties in de wolk lager (Figuur 7.6a en c).



**Figuur 7.6** De verspreiding van en concentratie (vol.%) in een waterstofwolk op  $t = 5$  s nadat waterstof in een tunnel is vrijgekomen uit een 700 bar waterstoftank: a) in de lengterichting met ventilatie, b) in de lengterichting zonder ventilatie, c) in de dwarsrichting met ventilatie en d) in de dwarsrichting zonder ventilatie (bron: (HyTunnel, 2022b))

De invloed van ventilatie werkt door op de overdruk die gegenereerd wordt bij het ontsteken van de waterstofwolk. Zonder ventilatie is de overdruk op 4 m hoogte 0,05 bar en op 6 m hoogte 0,17 bar met uitschieters naar 0,7 bar. Met ventilatie is de overdruk op 4 m hoogte en 6 m hoogte gelijk, te weten 0,04 bar met uitschieters naar 0,07 bar. Figuur 7.7 geeft het zijaanzicht van de berekende absolute druk voor de situatie met en zonder ventilatie.



**Figuur 7.7** De absolute druk op  $t = 5,2$  s voor de situatie met (boven) en zonder (onder) ventilatie. De druk wordt gegeven in Pa ( $1 \times 10^5$  Pa  $\equiv$  1 bar). De overdruk is de absolute druk – 1 bar (bron: (HyTunnel, 2022b))

## 7.5 Effecten explosie waterstofwolk in parkeergarages

Er zijn geen artikelen gevonden die experimenten met of simulaties van het exploderen van waterstofwolken in parkeergarages beschrijven.<sup>39</sup> Dat maakt het lastig om uitspraken te kunnen doen over de kracht van een waterstofexplosie in een parkeergarage. Duidelijk is wel dat er veel parameters zijn die invloed hebben op een dergelijke explosie. Er zijn overeenkomsten met de parameters die invloed hebben op de kracht van een explosie van een waterstoftank (paragraaf 4.5), maar aangezien een dergelijk explosie op een andere manier tot stand komt dan een explosie van een waterstofwolk, zijn er ook verschillen. Deze paragraaf beschrijft wat de effecten van het exploderen van een waterstofwolk in een parkeergarage zouden kunnen zijn. De beschrijving is voor een deel gebaseerd op de gegevens van het exploderen van waterstofwolken in tunnels.

### Geometrie en grootte waterstofwolk

De kracht van een gaswolkexplosie is onder andere afhankelijk van de grootte van de gaswolk en van de waterstofconcentratie in de gaswolk. Hoe langer of groter de gaswolk en/of hoe hoger de waterstofconcentratie, hoe groter de overdruk. De geometrie van een besloten ruimte heeft veel invloed op beide factoren.

De geometrie van een parkeergarage is wezenlijk anders dan die van een tunnel, wat invloed heeft op de grootte van en de waterstofconcentratie in de gaswolk. De verschillende geometrieën leiden tot verschillende en tegengestelde effecten:

- > In een open parkeergarage kan een waterstofwolk door openingen naar buiten ontsnappen, waardoor de wolk verdunt en ophoping wordt voorkomen. De waterstofwolk verspreidt zich minder ver dan in een tunnel en de waterstofconcentratie zal lager zijn. Bij vertraagde ontsteking zullen de overdrukeffecten lager zijn dan in een tunnel.
- > In een parkeergarage kan een waterstofwolk zich in verticale richting verspreiden naar bovengelige verdiepingen. Gezien het stijgend vermogen van waterstof is het niet te verwachten dat er één grote waterstofwolk ontstaat, maar eerder dat de waterstofwolk zich verdeelt over meerdere verdiepingen. De grootte van die waterstofwolken zal kleiner zijn, en bij vertraagde ontsteking op elk van die verdiepingen leidt dit tot wat lagere overdrukeffecten dan in een tunnel.
- > Een parkeergarage is lager dan een tunnel, waardoor er in een parkeergarage eerder sprake zal zijn van ophoping van een waterstofwolk en de waterstofconcentratie in de wolk hoger is. Bij vertraagde ontsteking zijn hogere overdrucken mogelijk dan in een tunnel.
- > Een parkeergarage is breder dan een tunnel, waardoor een waterstofwolk zich in de breedte verder kan verspreiden. Dit maakt dat een waterstofwolk in een parkeergarage korter is dan in een tunnel en dit leidt tot een lagere overdruk.

Bij vertraagde ontsteking van de waterstofwolk zal de grootte van het vlamfront hoe dan ook klein zijn ten opzichte van de grootte van de besloten ruimte waarin het vlamfront zich voortbeweegt. Het maakt wat dat betreft weinig uit of die besloten ruimte een tunnel is of een parkeergarage; de overdruk van een gaswolkexplosie in een parkeergarage zou dan van dezelfde orde grootte moeten zijn als in een tunnel. Een parkeergarage is echter minder

---

<sup>39</sup> Er worden weinig experimenten met waterstof op grote schaal gedaan, omdat onderzoekers dat te gevaarlijk vinden en omdat er weinig locaties zijn waar dit soort onderzoeken gedaan kunnen worden (Zhao et al, 2021). In de literatuur zijn er wel artikelen beschikbaar over de verspreiding van waterstofwolken in privé-garages (Hajji et al, 2015) en parkeergarages (Mo et al, 2022) (Hussein et al, 2020), over explosies op parkeerplaatsen in de open lucht (Lv et al, 2023) en over explosies in privé-garages bij woningen (Brennan et al, 2019). De onderzoekers maken in deze studies gebruik van rekenmodellen om de verspreiding en het exploderen van waterstofwolken te onderzoeken.



gesloten dan een tunnel, aangezien er meer ontlastingsmogelijkheden zijn. Daarom zou in een parkeergarage de overdruk in principe lager moeten zijn dan in een tunnel.

Aan de hand van een verkennende berekening wordt hieronder getracht de overdruk te bepalen van een explosie van een waterstofwolk in een parkeergarage.

Een waterstoftank van 62 liter en 700 bar bevat maximaal 2,5 kg waterstof. Theoretisch geeft dit een pure waterstofwolk (100 vol.% waterstof) van 29 m<sup>3</sup>.<sup>40</sup> In werkelijkheid treedt verdunning op, waardoor de wolk groter wordt en de concentratie in de wolk afneemt. Zo zal de waterstofwolk van 29 m<sup>3</sup> uit kunnen dijen tot een wolk van 97 m<sup>3</sup> met een homogeen verdeelde waterstofconcentratie van 30 vol.%.

In de berekeningen van Middha en Hansen (zie paragraaf 7.4) voor een rechthoekige tunnel werd voor een wat grotere waterstofwolk (125 m<sup>3</sup>) met een waterstofconcentratie van 30 vol.% een maximale overdruk berekend van 0,37 bar. Een explosie van een waterstofwolk van 97 m<sup>3</sup> zal in een tunnel een wat lagere overdruk geven en in een open parkeergarage is dat naar verwachting nog wat lager. De overdruk van een explosie van een waterstofwolk, afkomstig van een leeggelopen waterstoftank van een waterstofauto, zal daarmee naar schatting rond de 0,3 bar komen. Dit is voldoende om vloeren, plafonds, muren en kolommen te doen falen. Omdat de explosie geen lokaal karakter heeft, is niet uit te sluiten dat bij een parkeergarage sprake is van voortschrijdende instorting.

### Ventilatie

Veel onderzoek is er op gericht om de omvang van en de concentratie in de waterstofwolk laag te houden. Ventilatie is hierbij één van de belangrijkste maatregelen, omdat luchtstromingen ontstaan die voor wervelingen zorgen en daarmee voor een betere menging van een waterstofwolk met de lucht daaromheen. Hierdoor wordt de waterstofwolk snel kleiner, wordt waterstof gelijkmatiger verdeeld in de wolk en wordt de waterstofconcentratie lager (HySafe, 2009). Belangrijke parameters bij ventilatie zijn de locatie en de grootte van ventilatieopeningen en de ventilatievoud.

### Obstakels

Waar luchtstromingen een gaswolk verdunnen en daarmee de overdruk van een explosie voorkomen of verlagen, zorgen gaswervelingen in een exploderende gaswolk voor het verhogen van de overdruk. Deze wervelingen ontstaan rondom obstakels; dit speelt vooral een rol bij plafonds aangezien waterstof zich daar ophoopt en verspreidt (HyTunnel, 2022b). Voorbeelden van obstakels in het plafond van parkeergarages zijn lichtarmaturen, ventilatoren en buizen.

## 7.6 Samenvatting

Bij concentraties lager dan 15 vol.% zal het ontsteken van een waterstofwolk niet leiden tot een explosie. Het maakt hierbij niet uit of de ontsteking zich in de open lucht of in een besloten ruimte voordoet. Is de waterstofconcentratie hoger dan 15 vol.%, dan zal een explosie van een waterstofwolk in de open lucht tot lagere overdrukken leiden dan in een besloten ruimte als een tunnel of een parkeergarage, mits in de open lucht geen sprake is van een mate van opsluiting.

<sup>40</sup> De inhoud van de waterstoftank is 62 l. De dichtheid van waterstof bij 700 bar is 40 kg/m<sup>3</sup> en onder atmosferische omstandigheden 0,085 kg/m<sup>3</sup>.

Het vertraagd ontsteken van waterstof dat uitgestroomd is uit een waterstoftank, is te zien als het slechtst mogelijke incidentscenario in een tunnel. De overdrukken die hierbij gegenereerd worden, variëren nogal, omdat de omstandigheden in de experimenten en simulaties verschillen. Het gaat dan bijvoorbeeld om de omvang van de gaswolk, de waterstofconcentratie in de wolk en de aanwezigheid van ventilatie. Duidelijk is wel dat overdrukken van meer dan 0,3 bar bereikt kunnen worden.

In parkeergarages is de gegenereerde overdruk van een explosie van een waterstofwolk naar verwachting lager dan in tunnels, omdat er meer mogelijkheden voor drukontlasting zijn. Deze overdrukken kunnen echter nog steeds groot genoeg zijn om muren, plafonds, vloeren en kolommen te doen falen. Ernstige schade aan grote delen van de parkeergarage of zelfs het instorten van een parkeergarage is daarbij niet uit te sluiten, omdat de explosie van een waterstofwolk geen lokaal karakter heeft.

# 8 Beleid rondom LPG

Dit hoofdstuk beschrijft hoe in het verleden is omgegaan met veiligheidsvraagstukken en -beleid rondom LPG-voertuigen in parkeergarages (onderzoeksvraag 6). In de jaren 80 en 90 van de vorige eeuw is gediscussieerd over de risico's van LPG-voertuigen in parkeergarages, omdat LPG brandbaar is en onder bepaalde omstandigheden kan exploderen. Met de komst van waterstofauto's doet zich een vergelijkbare situatie voor, aangezien waterstof ook brandbaar is en kan exploderen. Dit hoofdstuk geeft daarom historische context over hoe indertijd beleid over LPG-voertuigen in parkeergarages tot stand is gekomen.

## 8.1 Voertuigeisen

Sinds 1 juli 1983 moeten personenauto's met een LPG-installatie in Nederland die opnieuw worden gekeurd voorzien zijn van een automatische vulbegrenzing van 80 % (Tweede Kamer, 1984). Deze eis is sinds 2003 opgenomen in een internationale standaard van de Verenigde Naties (United Nations, 2007). In België geldt deze verplichting sinds 2007 ook voor het verkrijgen van een vignet dat nodig is om te kunnen parkeren in parkeergarages (KB België, 2007).

De vulbegrenzing zorgt ervoor dat de tank voor maximaal 80% is gevuld, zodat bij uitzetting door temperatuurstijging ruimte overblijft voor de faseovergang naar gas. Met het gas wordt de overdruk tot een zekere grens opgevangen en wordt voorkomen dat LPG in vloeibare vorm vrijkomt. Bij het bereiken van deze kritische grens komt LPG vervolgens door de veiligheidsklep vrij in gasvorm. In oudere installaties zonder vulbegrenzing bestond de kans dat bij overdruk LPG via de veiligheidsklep in vloeibare vorm vrijkwam, omdat vloeistoffen nauwelijks samendrukbaar zijn. Ook kwam het voor dat de veiligheidsklep blokkeerde, waardoor alle LPG vrijkwam. Het vrijkomen van vloeibaar LPG is gevaarlijker dan van gasvormig LPG, omdat lucht dan sneller verzadigd raakt met LPG (Brandveilig, z.d.).

## 8.2 Parkeerverboden en aanvullende eisen parkeergarages

Hoewel LPG wereldwijd een veelgebruikte brandstof is, geldt in veel landen een parkeerverbod voor LPG-auto's in ondergrondse parkeergarages (Brezinska en Markowski, 2017). Dit beleid vormt een belemmering voor de gebruikers en is tegenstrijdig met algemeen beleid dat erop is gericht milieuvriendelijkere brandstoffen te stimuleren (Molag en Steen, 1998). Daarnaast heeft ervaring geleerd dat een dergelijk parkeerverbod doorgaans slecht wordt nageleefd (Saabforum, 2010) (Leur, 2015). In België was het parkeren van LPG-auto's in parkeergarages verboden tot 2007, waarna nieuwe wetgeving aanvullende eisen stelde aan de veiligheidsinstallaties van parkeergarages voor het toestaan van LPG-auto's. De eisen voor parkeergarages bestaan uit een LPG-detectiesysteem en een automatisch ventilatiesysteem. Een belangrijk kenmerk hiervan is dat LPG-detectoren op een lage hoogte, rond de 15 cm, moeten zijn geplaatst (KB België, 2007). LPG is zwaarder dan lucht, waardoor het gas als een deken op de grond blijft liggen. Zodra LPG wordt gedetecteerd, moet het ventilatiesysteem automatisch maximaal aanslaan. De eisen rondom LPG-detectie

en automatische ventilatie zijn ook verplicht in Nederland en opgenomen in NEN 2443. In België is een aantal eigenaren niet bereid tot deze investeringen en zij verbieden LPG-auto's alsnog (Brandveilig, z.d.). Ook in Nederland zijn er eigenaren van parkeergarages die het stallen van LPG-auto's verbieden, omdat zij de risico's te groot vinden.

### 8.3 Risico-studies

In 1984 heeft TNO in opdracht van de Brandweerinspectie een eerste studie uitgevoerd naar de verspreiding van LPG in parkeergarages na lekkage (TNO, 1984). Er waren namelijk meerdere incidenten in Nederland geweest waarbij LPG mogelijk een rol heeft gespeeld. Het was echter onduidelijk of er sprake was van extreem ongunstige omstandigheden of van een algemeen probleem. Dit leidde tot discussie over het explosiegevaar van LPG in particuliere garages. Het doel van de TNO-studie was om na te gaan of lekkage van LPG uit een personenauto in een particuliere garage tot gevaarlijke situaties kan leiden. Hiervoor heeft TNO een theoretisch verspreidingsmodel opgesteld en getoetst met verspreidingsexperimenten die de slechts denkbare omstandigheden nabootsten. Uit deze studie is een bovengrens voor de verspreiding gekomen; gebleken is dat de concentratie rondom de auto het grootst is vanwege het ontstaan van een laaggelegen LPG-wolk. De conclusie van de studie was dat "onder omstandigheden die redelijkerwijs in particuliere garages mogen worden verwacht, LPG [...] geen reëel explosiegevaar vormt", omdat de gasconcentratie dan lager is vanwege de lagere bronsterkte en de betere menging met lucht.

Later in 1984 was er een debat over LPG in de Tweede Kamer en werd ook besproken of veiligheidsmaatregelen nodig werden geacht in particuliere garages. De TNO-studie uit 1984 gaf voldoende onderbouwing om geen extra maatregelen te eisen voor particuliere garages. Wel zijn er voorlichtingscampagnes gehouden waaronder een voorlichtingsfilm en folders waarin het belang van een goed geventileerde garage wordt benadrukt (Tweede Kamer, 1984). Het restrisico bestond namelijk uit onvoldoende ventilatie als bijvoorbeeld ventilatieopeningen zouden zijn afgedicht.

In een aantal Europese landen zijn LPG-auto's sinds 1998 verboden in parkeergarages en lange tunnels. Aan deze verboden lag de gedachte ten grondslag dat er een reëel risico was op het vrijkomen van LPG-gas door lekkage of een ongeluk. Dit belemmerde de verdere introductie van LPG-auto's, terwijl er destijds wel overeenstemming was over het feit dat LPG milieuvriendelijker is dan benzine. Deze tegenstrijdige situatie was aanleiding voor TNO om met een risicoanalyse de risico's van LPG en benzineauto's te vergelijken (TNO, 1998). Hiervoor zijn de kansen en effecten van incidenten onder gelijkwaardige omstandigheden naast elkaar gelegd. Geconcludeerd werd dat de berekende risico's voor benzineauto's en LPG-auto's vergelijkbaar waren en dat een verbod op LPG-auto's onnodig werd geacht. Wel werd opgemerkt dat een diepgaander onderzoek gewenst was om de gebruikte data te valideren.

Volgens (Brezinska en Markowski, 2017) is er onvoldoende gedegen onderzoek in de vorm van praktijkexperimenten gedaan naar het daadwerkelijke risico van een LPG-lekkage. Zo waren er zover bekend tot 2017 geen praktijkexperimenten uitgevoerd op ware schaal en ontbraken eenduidige richtlijnen met betrekking tot de aanvullende veiligheidseisen aan parkeergarages. Wel waren er uitgebreide CFD-computersimulaties uitgevoerd. Brezinska en Markowski hebben in 2017 daarom een aantal praktijkexperimenten gedaan met de

verspreiding van LPG na een LPG-lekkage. Uit deze studie bleek dat LPG-detectiesystemen en automatische ventilatiesystemen effectief zijn in het beperken van het risico op brand en explosie als gevolg van een LPG-lekkage. Dit is in overeenstemming met het gevoerde beleid in Nederland dat gericht is op goede ventilatie. Aangezien er weinig incidenten zijn geweest, wordt er in Nederland geen onderzoek meer gedaan naar de risico's van LPG-auto's in parkeergarages (Ale, 2022).

# 9 Vergelijking effecten LPG en waterstof

Onderzoeksvraag 7 luidt: 'Zijn voor waterstofauto's en LPG-auto's de effecten in parkeergarages (scenario's, kansen, effecten) vergelijkbaar?' Voor de beantwoording van de vraag zijn verkennende berekeningen uitgevoerd met EFFECTS v. 12.<sup>41</sup>

## 9.1 LPG-auto's versus waterstofauto's

De effecten van een incident met een waterstofauto zullen anders zijn dan de effecten van een incident met een LPG-auto. Dat heeft een aantal oorzaken die hieronder kort worden toegelicht.

- > LPG bestaat voor het merendeel uit de brandbare gassen propaan en butaan. Deze gassen worden onder druk gebracht (tot circa 8 bar) waardoor ze vloeibaar worden. LPG is daarom een tot vloeistof verdicht gas. Een LPG-tank bevat naast vloeibaar LPG echter ook gasvormig LPG. Waterstof daarentegen is niet vloeibaar te maken door de druk te verhogen, maar wel door het sterk af te koelen. In waterstofauto's is waterstof daarom alleen in gasvorm aanwezig en onder hoge druk opgeslagen (700 bar). De druk in een waterstoftank is dus veel hoger dan in een LPG-tank.
- > Waterstof is een licht gas, wat wil zeggen dat het een lagere dichtheid heeft dan lucht en in lucht daarom zal stijgen. De gassen in LPG daarentegen zijn zware gassen met een dichtheid die groter is dan lucht. Deze gassen zullen in de open lucht uitzakken en zich via de grond verspreiden.
- > Waterstoftanks bevinden zich onder de auto, terwijl LPG-tanks vaak in de auto zijn geplaatst.

## 9.2 Effecten van LPG in een parkeergarage

Het vrijkomen van LPG kan diverse effecten hebben. Dit is afhankelijk van onder meer de aggregatietoestand van LPG en van het moment waarop ontsteking plaats vindt. In de literatuur worden de volgende effecten beschreven bij de uitstroom van LPG (Van der Schoor et al, 2013):

- > Fakkelt: ontstaat bij directe ontsteking van gasvormig en vloeibaar LPG.
- > Explosie LPG-tank (BLEVE): ontstaat bij instantaan falen van LPG-tank waarbij de vloeistoffase meteen verdampt en expandeert.
- > Vuurbal: ontstaat als de gaswolk die bij de explosie ontstaat, direct ontsteekt.
- > Gaswolkexplosie: ontstaat bij vertraagde ontsteking van een gaswolk in een besloten ruimte.

<sup>41</sup> Opgemerkt moet worden dat rekenen met verschillende modellen aan het vrijkomen van gevaarlijke stoffen altijd leidt tot verschillen in resultaten (NIPV, 2021b). De resultaten van EFFECTS-berekeningen aan waterstof verschillen daarom altijd van de resultaten zoals die beschreven staan in hoofdstukken 3 – 6 van dit rapport. Deze verschillen worden in dit hoofdstuk buiten beschouwing gelaten.

- > Wolkbrand: ontstaat bij vertraagde ontsteking van een gaswolk in de open lucht.

Omdat de overdruk bij een wolkbrand verwaarloosbaar klein is, wordt dit effect verder buiten beschouwing gelaten.<sup>42</sup>

De effecten van het vrijkomen van LPG en van waterstof zijn bepaald met EFFECTS, waarbij voor LPG propaan als voorbeeldstof is gebruikt (RIVM, 2021). In de berekeningen is gebruikgemaakt van de gegevens zoals die in Tabel 9.1 vermeld staan.

**Tabel 9.1 Gegevens van de LPG-tank en van de waterstoftank**

Parameter	LPG (propaan)	Waterstof
Inhoud tank	60 liter / 23,3 kg	60 liter / 2,5 kg
Vulling	76%	100%

### 9.2.1 Fakkels

Als een LPG-tank aangestraald wordt door een brand, neemt de druk in de tank toe; boven een druk van 27 bar wordt de drukbeveiliging geactiveerd (pressure relief device, PRV). De temperatuur in de LPG-tank is dan 72 °C. Door het openen van de PRV, neemt de druk in de LPG-tank af en zodra de druk lager is dan de ingestelde waarde, sluit de PRV. Bij de berekeningen is echter aangenomen dat de PRV niet sluit, omdat de externe brand de LPG-tank voortdurend verwarmt, waardoor de druk in de tank en dus ook de fakkellengte nauwelijks afnemen totdat de tank leeg is.

De PRV heeft een diameter van circa 10 mm en bevindt zich aan de bovenkant van de tank. Propaan zal daardoor in gasvorm ontsnappen en als dit direct ontsteekt, ontstaat een fakkel. De resultaten van de fakkelberekeningen staan in Tabel 9.2 samengevat. De waarden gelden voor een horizontale fakkel.

**Tabel 9.2 Resultaten effectberekeningen aan fakkel uit LPG-tank en waterstoftank**

Parameter	Propaan	Waterstof
Druk (bar)	27	700
Temperatuur bij openen ventiel (°C)	72	15
Diameter PRV/TPRD (mm)	10	2,5
Debiet (kg/s)	0,50	0,11
Fakkellengte (m)	8,8	8,3
Afstand tot 35 kW/m <sup>2</sup> (m)	11	9,4
Afstand tot 10 kW/m <sup>2</sup> (m)	13	11
Afstand tot 3 kW/m <sup>2</sup> (m)	17	13
Uitstromingsduur	50 seconden	2 minuten

De lengte van de propaanfakkel is onder de gegeven omstandigheden van dezelfde orde-grootte als de waterstoffakkel; beide hebben een lengte van 8 à 9 meter. De propaanfakkel duurt bijna een minuut en de waterstoffakkel twee minuten, alhoewel de waterstoffakkel snel in lengte afneemt. In werkelijkheid zal de lengte van de waterstoffakkel kleiner zijn, omdat de

<sup>42</sup> Een propaanwolk van 5 m<sup>3</sup> en 4 vol.% (stoichiometrische concentratie) geeft bij ontsteking in een half open parkeer-garage bijvoorbeeld een overdruk van minder dan 0,02 bar (Van der Schoor et al, 2013).

uitstroomrichting naar beneden gericht is. De warmtestraling van de propaanfakkel komt enkele meters verder dan die van de waterstoffakkel. Als bij een LPG-tank sprake is van een uitstroomopening in de vloeistoffase, ontstaat een fakkel van 20 m lengte omdat het debiet veel groter is (2,2 kg/s). De fakkel houdt dan 11 seconden aan.

Voor waterstoffakkels is in paragraaf 3.5 aangegeven dat een aangestraalde constructie in een parkeergarage wel beschadigd kan raken door de fakkel, maar niet zal bezwijken. Dit zal ook gelden voor propaanfakkels, aangezien de blootstellingsduur bij een propaanfakkel nog korter is dan bij een waterstoffakkel.

### 9.2.2 Fysische explosie tank

Een BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) is een fysische explosie van een vat dat gevuld is met een tot vloeistof verdicht gas. Door verhitting kan de LPG-tank openscheuren, waardoor LPG meteen zal gaan koken, uitzetten (flashen) en verdampen. De fysische explosie veroorzaakt ter plaatse overdrukeffecten (Reinders en Spoelstra, 2022). Dit scenario kan alleen optreden als de PRV niet functioneert of onvoldoende in staat is de druk af te voeren.

EFFECTS modelleert een BLEVE standaard in de open lucht en houdt geen rekening met de bijdrage van het verbranden van het ontvlambare gas. Aangenomen is dat de bezwijkdruk van de LPG-tank 30 bar is en de temperatuur van LPG in de tank 78 °C. Voor de waterstoftank zijn die waardes 700 bar en 15 °C. De resultaten van de berekeningen staan in Tabel 9.3.

**Tabel 9.3 Resultaten effectberekeningen aan fysische explosie LPG-tank en waterstoftank**

Parameter	Propaan	Waterstof
Faaldruk tank (bar)	30	700
Inhoud tank (liter - kg)	60 - 23,3	60 - 2,5
Temperatuur bij falen (°C)	78	15
Afstand tot 0,3 bar (m)	4	12
Afstand tot 0,1 bar (m)	9	20

De berekeningen laten zien dat de explosie van de waterstoftank in de open lucht krachtiger is dan die van de LPG-tank, waardoor de effectafstanden voor waterstof verder reiken. In een parkeergarage zal dat niet anders zijn, maar de doorwerking op de parkeergarage zal soortgelijk zijn. De kracht van de explosie wordt deels geabsorbeerd door het voertuig en door de resterende kracht van de explosie raakt de parkeergarage ter plaatse zwaar beschadigd. Vanwege het lokale karakter van de explosie van de LPG-tank, is voortschrijdend instorten van de parkeergarage niet te verwachten.

### 9.2.3 Vuurbal

De fysische explosie van een gastank gaat vaak gepaard met een vuurbal. De vuurbal ontstaat door ontsteking en verbranding van de gevormde gaswolk. Bij LPG worden de termen BLEVE en vuurbal vaak door elkaar gebruikt, maar strikt genomen heeft het woord BLEVE alleen betrekking op de drukeffecten van de fysische explosie (Reinders en Spoelstra, 2022).



De resultaten van de berekeningen in EFFECTS staan in Tabel 9.4. De vuurbal bij propaan is groter dan bij waterstof, omdat er qua massa meer propaan verbrandt dan waterstof (zie ook het kader verder op deze bladzijde). Doordat propaanvlammen aanzienlijk meer warmte uitstralen dan waterstofvlammen, reikt de hitte van een vuurbal van propaan tientallen meters verder dan een vuurbal van waterstof.

Als aangenomen wordt dat de inhoud van een vuurbal in een parkeergarage hetzelfde is als in de open lucht, dan zal de vuurbal van propaan de parkeergarage over grotere afstanden en over meer verdiepingen vullen dan de vuurbal van waterstof. De warmtestraling komt daardoor ook veel verder dan bij een vuurbal van waterstof.

**Tabel 9.4 Resultaten effectberekeningen aan vuurbal propaan en waterstof**

Parameter	Propaan	Waterstof
Faaldruk tank (bar)	30	700
Inhoud tank	60 liter / 23,3 kg	60 liter / 2,5 kg
Temperatuur bij falen (°C)	78	15
Diameter vuurbal (m)	15	8
Hoogte bovenkant vuurbal (m)	23	9
Afstand tot 35 kW/m <sup>2</sup> (m)	20	4
Afstand tot 10 kW/m <sup>2</sup> (m)	36	9
Afstand tot 3 kW/m <sup>2</sup> (m)	65	17

De tijdsduur van de vuurbal van propaan ligt net als bij die van waterstof in de orde van enkele seconden. Dit is te kort om de parkeergarage te doen falen, maar wel kunnen secundaire branden ontstaan die de constructie van een parkeergarage vervolgens kunnen aantasten.

Als de inhoud van de vuurbal gelijk blijft, kan voor een enkellaags parkeergarage berekend worden hoe groot het oppervlak is dat gevuld wordt door een vuurbal van propaan. Bij benadering is de diameter van een vuurbal gelijk aan (Roberts, 2000):

$$D = 6.48 M^{0.325}$$

M is de hoeveelheid brandstof (kg) die vrijkomt. Als de inhoud van een LPG-tank 23 kg is, is de diameter van de vuurbal 18 m en de straal r 9 m. Het volume van de vuurbal is  $\frac{4}{3} \times \pi \times r^3 = 3030 \text{ m}^3$ . De hoogte van een parkeergarage is 2,4 m, waardoor in een enkellaags parkeergarage een gebied van (afgerond) 1250 m<sup>2</sup> wordt gevuld door de vuurbal. Voor waterstof wordt bij M = 2,5 kg een vuurbaldiameter van bijna 9 m berekend met een volume van 350 m<sup>3</sup>. Dit vult een oppervlak van 145 m<sup>2</sup>. Opgemerkt moet worden dat een vuurbal buiten de parkeergarage kan komen als er openingen aanwezig zijn, waardoor de vuurbal in de parkeergarage minder ver reikt.

### 9.2.4 Gaswolkexplosie

In een besloten ruimte als een parkeergarage zal het ontsteken van een gaswolk leiden tot een gaswolkexplosie. Bij waterstof is een dergelijke explosie pas te verwachten bij concentraties die hoger zijn dan 10 vol.% (zie paragraaf 7.2.). Deze concentratie is 2,5 keer hoger dan de laagste concentratie waarbij waterstof ontsteekt, te weten 4 vol.%. Het maximale volume van de waterstofwolk met een concentratie van 10 vol.% is dan 2,5 keer kleiner, namelijk 291 m<sup>3</sup>. De waterstofwolk is daarmee twee keer zo klein als de propaanwolk (586 m<sup>3</sup>).

Berekeningen met EFFECTS laten zien dat in de open lucht de afstand tot waar de overdruk 0,3 bar is, voor propaan groter is dan voor waterstof (Tabel 9.5). Dit wordt veroorzaakt door de grotere omvang van de propaanwolk. Onder de gegeven omstandigheden zal een gaswolkexplosie van propaan ten opzichte van een gaswolkexplosie van waterstof over een grotere afstand schade veroorzaken. In een parkeergarage is voortschrijdend instorten van de constructie niet uit te sluiten, net zoals dat bij waterstof het geval is (zie paragraaf 7.6).

**Tabel 9.5 Resultaten effectberekeningen aan gaswolkexplosie propaan en waterstof**

Parameter	Propaan	Waterstof
Druk (bar)	7,3	700
Inhoud	60 liter, 23,3 kg	60 liter, 2,5 kg
Gehanteerde explosiegrens (vol.%)	2	10
Maximaal volume gaswolk	586	292
Afstand tot 0,3 bar (m)	28	18

### 9.3 Samenvatting

Het vrijkomen en het al dan niet ontsteken van propaan (LPG) geeft dezelfde soort effecten als het vrijkomen en ontsteken van waterstof. De grootte van deze effecten kan verschillen, maar de doorwerking ervan op een parkeergarage is vergelijkbaar. Tabel 9.6 vat de resultaten van de vergelijking samen.

**Tabel 9.6 Kwalitatieve vergelijking van de effecten van LPG ten opzichte van waterstof in een parkeergarage**

Effect	LPG (propaan) ten opzichte van waterstof
Fakkels	Fakkels zijn vergelijkbaar. Doorwerking op parkeergarage is vergelijkbaar.
Fysische explosie	Explosie is minder krachtig. Doorwerking op parkeergarage is vergelijkbaar.
Vuurbal	Vuurbal reikt verder. Doorwerking op parkeergarage is vergelijkbaar.
Chemische explosie	Explosie is krachtiger. Doorwerking op parkeergarage is vergelijkbaar.

# 10 Referenties

- > Ale, B. (2022). Mailcontact met Ben Ale. Mailverkeer van M.B. Spoelstra (NIPV) met B. Ale op 13 en 14 mei 2022.
- > Bie, H.Y. en Hao, Z.R. (2017). [Simulation analysis on the risk of hydrogen releases and combustion in subsea tunnels](#). *Int. J. Hydrogen Energy*, 42, p. 7617 - 7624.
- > Brandveilig.be (zonder datum). Dossier 'Discussie wagens op LPG in ondergrondse parkeergarages'. Geciteerd op [SAABForum.nl](#) (2010). Het originele bestand is niet meer beschikbaar.
- > Brennan, S. et al. (2019). [Pressure effects of an ignited release from onboard storage in a garage with a single vent](#). *Int. J. Hydrogen Energy*, 44, p. 8927 - 8934.
- > Brzezinska, D. en Markowski, A. S. (2017). [Experimental investigation and CFD modelling of the in-ternal car park environment in case of accidental LPG release](#). *Process Safety and Environmental Protection*, 110, 5–14.
- > Callister, W.D. (1997). *Materials Science and Engineering – An Introduction*. 4th ed. edition. Salt Lake City
- > Cheng, R. et al. (2021). [A state-of-the-art review of road tunnel subjected to blast loads](#). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 112, p. 103911.
- > Cheng, R. et al. (2022). [Effect of internal explosion on tunnel secondary and adjacent structures: A review](#). *Tunneling and Underground Space Technology*, 126, p. 104536.
- > Dadashzadeh, M. et al. (2018). [Risk assessment methodology for onboard hydrogen storage](#). *Int. J. Hydrogen Energy*, 43, p. 6464 – 6475.
- > De Stefano, M. et al. (2019). [Hydrogen dispersion in a closed environment](#). *Int. J. Hydrogen Energy*, 44, p. 9031 - 9040.
- > Fuel Cells and Hydrogen Education (FCH2Edu, z.d.). [E-Laboratory](#). De website is sinds de zomer van 2023 niet meer bereikbaar.
- > Groethe, M. et al. (2007). [Large-scale hydrogen deflagrations and detonations](#). *Int. J. Hydrogen Energy*, 32, p. 2125 – 2133.
- > Hajji, Y. et al. (2015). [Numerical study of hydrogen release accidents in a residential garage](#). *Int. J. Hydrogen Energy*, 40, p. 9747-9759.
- > Hansen, O.R. (2019). [Hydrogen Safety: Kjørbo-incident, overview and perspectives](#). MoZEES Workshop (Mobility Zero Emission Energy Systems), Oslo.
- > Hauptmanns, U. (2001). [A procedure for analyzing the flight of missiles from explosions of cylindrical vessels](#). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 14, p. 395–402
- > Hinman, E. (2017). [Blast Safety Of The Building Envelope](#).
- > Houf, W.G., et al. (2012). [Releases from hydrogen fuel-cell vehicles in tunnels](#). *Int. J. Hydrogen Energy*, 37, p. 715 – 719.
- > Hu, Q. et al. (2023). [A review of hydrogen-air cloud explosions: The fundamentals, overpressure prediction methods, and influencing factors](#). *Int. J. Hydrogen Energy*, 48, p. 13705 – 13730.
- > Huang, T. et al. (2022). [Modeling of hydrogen dispersion from hydrogen fuel cell vehicles in an underground parking garage](#). *Int. J. Hydrogen Energy*, 47, p. 686 – 696.
- > Hussein, H. et al. (2020). [Dispersion of hydrogen release in a naturally ventilated covered car park](#). *Int. J. Hydrogen Energy*, 45, p. 23882 – 23897

- > Hussein, S. et al. (2021). [Hydrogen jet fire from a thermally activated pressure relief device \(TPRD\) from onboard storage in a naturally ventilated covered car park](#), *Hydrogen*, 2(3), p. 343-361.
- > HyFindr (2023). [Hydrogen tank – FAQ Guide](#). Geraadpleegd op 16 maart 2023.
- > Hy4Heat (2021). [Consequence Modelling Report](#).
- > HyResponse(2013). [Dealing with hydrogen explosions](#).
- > HyResponder (2021). [European Emergency Response Guide](#).
- > HySafe (2009). [Deliverable D113 - Initial Guidance for Using Hydrogen in Confined Spaces - Results from InsHyde](#).
- > HyTunnel (2019a). [Deliverable 1.1 - Report on assessment of effectiveness of conventional safety measures in underground transportation systems and similar confined spaces](#).
- > HyTunnel (2019b). [Deliverable 1.2 - Report on hydrogen hazards and risks in tunnels and similar confined spaces](#).
- > HyTunnel (2022a). *Deliverable D4.4 Results of the deferred experimental programme and associated activities*. Rapport verkregen via Christian Brauner van de 'International Fire Academy' (IFA) in Zwitserland.
- > HyTunnel (2022b). [Deliverable D4.3 - Final report on analytical, numerical and experimental studies on fires, including innovative prevention and mitigation strategies](#).
- > International Fire Academy (IFA, 2023). [Hydrogen vehicles in tunnels: great danger for emergency response personnel](#).
- > Imran, M. et al. (2015). [Experimental Studies on Fire for Offshore Structures and Its Limitations: A Review](#). *Chemical Engineering Transactions*, 45, p. 1951-1956.
- > Ineris (2012). [Omega 15 - Formalization of knowledge and tools in the area of major risks - Vessel bursts, phenomenology and effect modelling](#).
- > Jonkman, M. (2013). [Gasdetectie in parkeergarages in theorie en praktijk – Volgens de Nederlandse norm NEN 2443: 2013](#). MSA Nederland BV.
- > Kashkarov, S. et al. (2015). [Blast wave from a high-pressure gas tank rupture in a fire: Stand-alone and under-vehicle hydrogen tanks](#). *Int. J. Hydrogen Energy*, 40, p. 12581 - 12603.
- > Kennisportaal constructieve veiligheid (KPCV, z.d.). [Gevolgklassen](#).
- > Kim, W. et al. (2015). [High pressure hydrogen tank rupture: blast wave and fireball](#). Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Hydrogen Safety (ICHHS-6), Yokohama (Japan). September 19-21, Paper ID 337.
- > Koninklijk Besluit België (KB België, 2007). [Koninklijk Besluit van 17 mei 2007 tot vaststelling van de maatregelen voor de preventie van brand en ontploffing waaraan de gesloten parkeergebouwen moeten voldoen om LPG-voertuigen te parkeren](#). Belgisch Staatsblad
- > Kotchourko, A. et al. (2022). [Hydrogen Safety for Energy Applications - Engineering Design, Risk Assessment, and Codes and Standards](#).
- > Kudriakov, S. et al. (2022). [Full-scale tunnel experiments: Blast wave and fireball evolution following hydrogen tank rupture](#). *Int. J. Hydrogen Energy*, 47, p. 18911 – 18933.
- > Kumar, S. et al. (2009). [HyTunnel project to investigate the use of hydrogen vehicles in road tunnels](#). Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Hydrogen Safety (ICHHS-3), Ajaccio (France), September 16-18, Paper ID 241.
- > Leur, P.H.E. van der (2015). [Onderzoek richtlijn brandveiligheid parkeergarages](#). DGMR, Rapportnummer F.2013.0591.01.R.002.

- > Leppänen, J. (2002). [Dynamic Behaviour of Concrete Structures subjected to Blast and Fragment Impacts](#). Chalmers University of Technology, Göteborg, Zweden.
- > Li, Z.Y. et al. (2015). [CFD study of the unignited and ignited hydrogen releases from trpd under a fuel cell car](#). Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Hydrogen Safety (ICHS-6), Yokohama (Japan), October 19-21, Paper ID 131.
- > Li, Y.Z. (2018). [Fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels](#).
- > Li, Y.Z. (2019). [Study of fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels](#). *Fire Safety Journal*, 110, 102871.
- > Li, Y. et al. (2021). [Numerical analysis of hydrogen release, dispersion and combustion in a tunnel with fuel cell vehicles using all-speed CFD code GASFLOW-MPI](#). *Int. J. Hydrogen Energy*, 46, p. 12474 – 12486.
- > Lian, Z. et al. (2020). [Methods for estimating fragment hazard in gas explosion](#). *Journal of Hazardous Materials*, 382, 120989.
- > Leur, van de P. (2023). Persoonlijke communicatie tussen A. Barreveld (NIPV) en P. van de Leur (DGMR) op 9 juni 2023.
- > Lv, H. et al. (2023). [Numerical study of hydrogen leakage, diffusion, and combustion in an outdoor parking space under different parking configurations](#), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 173, p. 113093.
- > Makarov, D. et al. (2013). [Plane hydrogen jets](#). *Int. J. Hydrogen Energy*, 38, p. 8068-8083.
- > Makarov, D. et al. (2021). [Hydrogen Tank Rupture in Fire in the Open Atmosphere: Hazard Distance Defined by Fireball](#), *Hydrogen*, 2, p. 134-146.
- > Markert, F. et al. (2022). [Concrete spalling by hydrogen jet fires](#). HyTunnel-CS dissemination conference, 14-15 July 2022, Brussels, Belgium.
- > Mattelaer, V. (2022). Persoonlijke communicatie per e-mail tussen M.B. Spoelstra (NIPV) en V. Mattelaer (Toyota Europe), tussen 13 oktober 2022 en 16 december 2022.
- > Middha, P. en Hansen, O.R. (2009). [CFD simulation study to investigate the risk from hydrogen vehicles in tunnels](#). *Int. J. Hydrogen Energy*, 34, p. 5875-5886.
- > Mo, F. et al. (2022). [Study on hydrogen dispersion in confined space with complex air supply and exhaust system](#), *Int. J. Hydrogen Energy*, 47, p. 29131-29147.
- > Molkov, V.V. et al. (2019). Deliverable 1.2 HyTunnel - [Report on hydrogen hazards and risks in tunnels and similar confined spaces](#).
- > Molkov, V.V. et al. (2020). [The blast wave decay correlation for hydrogen tank rupture in a tunnel fire](#). *Int. J. Hydrogen Energy*, 45, p. 31289-31302.
- > Molkov, V.V. et al. (2021a). [Dynamics of blast wave and fireball after hydrogen tank rupture in a fire in the open atmosphere](#). *Int. J. Hydrogen Energy*, 46, p. 4644 – 4665.
- > Molkov, V.V. et al. (2021b). [Performance of hydrogen storage tank with TPRD in an engulfing fire](#). *Int. J. Hydrogen Energy*, 46, p. 36581 – 36597.
- > Mukhim, E.D. et al. (2018). [A method for the estimation of overpressure generated by open air hydrogen explosions](#). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 52, p. 99–107.
- > National Fire Protection Association. (NFPA, 2020). [Modern vehicle hazards in parking structures and vehicle carriers](#). Rapport FPRF-2020-07.
- > Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV, 2020). [Veiligheidsaspecten van waterstof in een besloten ruimte](#). NIPV.
- > Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV, 2021a). [Waterstofauto's in parkeergarages](#). NIPV.
- > Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV, 2021b). [Berekeningen aan waterstoffakkels met behulp van HyRAM](#). NIPV.

- > Nederlandse Normalisatie Instituut (NEN, 2013). NEN 2443:2013 nl [Parkeren en stallen van personenauto's op terreinen en in garages](#).
- > Nederlandse Normalisatie Instituut (NEN, 2015). NEN-EN 1991-1-7+C1+A1 (nl) [Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-7: Algemene belastingen – Buitengewone belastingen: stootbelastingen en ontploffingen](#).
- > Nederlandse Normalisatie Instituut (NEN, 2019). NEN-EN 1991-1-7+C1+A1/NB (nl) [Nationale bijlage](#) bij NEN-EN 1991-1-7+C1+A1: Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-7: Algemene belastingen - Buitengewone belastingen.
- > Nederlandse Normalisatie Instituut (NEN, 2021). Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-2: [Algemene regels](#) - Ontwerp en berekening van constructies bij brand.
- > Nolan, D.P. (2019). [Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical, and Related Facilities](#) (Fourth Edition).
- > Otsuka, T. et al. (2007). [Hazard evaluation of hydrogen–air deflagration with flame propagation velocity measurement by image velocimetry using brightness subtraction](#). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 20, p. 427–432.
- > Pitts, W.M. et al. (2012). [Dispersion and burning behavior of hydrogen released in a full-scale residential garage in the presence and absence of conventional automobiles](#). *Int. J. Hydrogen Energy*, 37, p. 17457 – 17469.
- > Post Hoger Onderwijs Veiligheidskunde (PHOV, 2022). Handboek procesveiligheid.
- > Promat (2020). [International fire curves – useful tool for designing fire safety](#).
- > Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (PGS1-2B, 2005). [Deel 2B: Effecten van explosie op constructies](#).
- > Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (PGS2, 2005). [Methods for the calculation of physical effects – due to releases of hazardous materials \(liquids and gases\) – ‘Yellow Book’](#).
- > Reglement verkeersregels en verkeerstekens 1990 (RVV 1990), artikel 45.<sup>43</sup>
- > Reinders, J. en Spoelstra, M.B. (2022). [Wat is een Blevé?](#) Artikel in Brandveilig.com, vol.4, november 2022.
- > Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM, 2021). [Handleiding Risicoberekeningen Bevi](#), versie 4.3.
- > Russo, P. (2022). Preliminary results on QRA Scenario 4 - a hydrogen city bus driving in a tunnel is involved in a traffic accident. Dit rapport is (nog) niet gepubliceerd.
- > SAABForum.nl (2010). [LPG en Parkeren \(garage\) in Brussel](#), topic gestart op 4 mei 2010. Geraadpleegd op 6 juli 2022.
- > Sandia National Laboratories (Sandia, 2017). [Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle Tunnel Safety Study](#). Report number SAND2017-11157.
- > Sandia national Laboratories (Sanida, 2020). [Hydrogen Fuel Cell Vehicles in Tunnels](#). Report number SAND2020-4507R.
- > Sato, Y. et al. (2006). [Experiments on hydrogen deflagration](#). *Journal of Power Sources*, 159, p. 144–148.
- > Scheffer, C. (2022). Mondelinge en schriftelijke communicatie met mevrouw Scheffer (constructeur bij ABT) op 16 september, 19 september en 20 september 2022.
- > Schoor, van der, F. et al. (2013). [Risk analysis of LPG \(liquefied petroleum gas\) vehicles in enclosed car parks](#). *Fire Safety Journal*, vol.57, p. 58-68.

---

<sup>43</sup> Dit artikel geldt voor woonerven waar stapvoets gereden moet worden. Onder stapvoets rijden wordt een snelheid van 15 km/uur verstaan. De regel voor stapvoets rijden wordt vaak ook in parkeergarages toegepast.

- > Shen, C. et al. (2018), [Consequence assessment of high-pressure hydrogen storage tank rupture during fire test](#). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 55, p. 223-231.
- > Skjold, T. et al. (2019a). [Blind-prediction: Estimating the consequences of vented hydrogen deflagrations for homogeneous mixtures in 20-foot ISO containers](#). *Int. J. Hydrogen Energy*, 44, p. 8997 – 9008.
- > Skjold, T. e al. (2019b). [Blind-prediction: Estimating the consequences of vented hydrogen deflagrations for inhomogeneous mixtures in 20-foot ISO containers](#). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 61, p. 220-226.
- > Sun, K. et al. (2021). [Development of emergency response strategies for typical accidents of hydrogen fuel cell electric vehicles](#). *Int. J. Hydrogen Energy*, 46, p. 37679 – 37696.
- > Tamura, Y. et al. (2006). [Fire exposure burst test of 70MPa automobile high-pressure hydrogen cylinders](#). Proceedings of JSAE International Congress, vol. 105-16, p. 7-10. Het artikel is in het Japans en wordt beschreven in (Molkov, 2021a).
- > Tamura, Y. et al. (2014). [The spread of fire from adjoining vehicles to a hydrogen fuel cell vehicle](#). *Int. J. Hydrogen Energy*, 39, p. 6169 – 6175.
- > TNO (1984). Explosiegevaar door LPG in particuliere garages. Rapportnummer B-82-895. Een digitale versie van dit rapport is in het bezit van het NIPV.
- > TNO (1998). [Risk comparison of LPG and petrol vehicles in public car parks](#). AEGPL Conference, 21-22 May 1998, Budapest, Hongarije.
- > Tohir, M.Z.M. et al. (2013). [Distribution analysis of the fire severity characteristics of single passenger road vehicles using heat release rate data](#). *Fire Science Reviews* 2013, 2:5
- > Tohir, M.Z.M. et al. (2021). [Probabilistic design fires for passenger vehicle scenarios](#). *Fire Safety Journal*, 120, 103139
- > Toliás, I.C. et al. (2018). [Best practice guidelines in numerical simulations and CFD benchmarking for hydrogen safety applications](#). *Int. J. Hydrogen Energy*, 44, p. 9050–9062.
- > Toyota (2019). [Mirai Product Information](#).
- > Tramoni, J.-B. et al. (2021). [Temperature assessment of steel members subjected to fire generated by alternative fuel vehicles: Experimental tests](#). *Fire and Materials*. 45, p. 1096–1105.
- > Tweede Kamer (1984). [Integrale nota LPG – Lijst van antwoorden](#), 18233 Nr. 4 van 23 okt 1984.
- > UN ECE (2013). [Global technical regulation on hydrogen and fuel cell vehicles - Addendum 13: Global technical regulation No. 13](#).
- > United Nations (UN, 2007). [Regulation No 115 of the Economic Commission for Europe of the United Nations \(UN/ECE\) Uniform provisions concerning the approval of: I. specific LPG \(liquefied petroleum gases\) retrofit systems to be installed in motor vehicles for the use of LPG in their propulsion system; — II. specific CNG \(compressed natural gas\) retrofit systems to be installed in motor vehicle for the use of CNG in their propulsion system](#).
- > Vaidogas, E.R. (2021). [Predicting the ejection velocities of fragments from explosions cylindrical pressure vessels: Uncertainty and sensitivity analysis](#). *Journal of Loss Prevention in the process Industries*, 71, 104450.
- > Wakabayashi, K. et al. (2007). Experimental study on blast wave generated by deflagration of hydrogen-air mixture up to 200 m<sup>3</sup>. *Science and Technology of Energetic Materials*, 68, p. 25-28.

- > Weerts, R. A. J. (2021). [The impact behavior of thick-walled composite-overwrapped pressure vessels](#). PhD Thesis, Mechanical Engineering). Eindhoven University of Technology.
- > Weyandt, N. (2006) [Vehicle bonfire to induce catastrophic failure of a 5000-psig hydrogen cylinder installed on a typical SUV](#). Southwest Research Institute report for the Motor Vehicle Fire Research Institute.
- > Zalosh, R. (2007). [Blast Waves and Fireballs Generated by Hydrogen Fuel Tank Rupture During Fire Exposure](#).
- > Zhang, K. et al. (2022). [Effect of hydrogen concentration on the vented explosion of hydrogen–air mixtures in a 5-m-long duct](#). *Process Safety and Environmental Protection*, 162, p. 978-986.
- > Zhao, B. et al. (2004). [Structural behaviour of an open car park under real fire scenarios](#). *Fire and Materials*, 28, p. 269–280.
- > Zhang, B. et al. (2014). [Methods to predict the critical energy of direct detonation initiation in gaseous hydrocarbon fuels](#) – An overview. *Fuel*, p. 294-308.