

# Waterstofauto's in parkeergarages



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

### **Colofon**

Instituut Fysieke Veiligheid (2021). *Waterstofauto's in parkeergarages – Deel 1*.  
Arnhem: IFV.

Opdrachtgever:	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Contactpersoon:	Ir. N.W. van den Berg, Rijkswaterstaat WVL
Titel:	Waterstofauto's in parkeergarages - Deel 1
Datum:	9 februari 2021
Status:	Definitief
Versie:	1.0
Auteurs:	Dr. M.B. Spoelstra
Met dank aan:	Ing. P. Dijkhof (KIWA) en dhr. M. de Vos (Hyundai)
Review en eindverantwoordelijk:	Dr. Ir. N. Rosmuller

# Voorwoord

Toen ik ruim anderhalf jaar geleden op de campus van de TU Delft moest zijn, kwam ik daar ook bij de recent opgeleverde parkeergarage nabij de sportstichting. Een meerlaagse, bovengrondse parkeergarage met behoorlijk wat gevelopeningen. Mijn aandacht werd met name getrokken door het verbodsbord bij de ingang voor zowel elektrische auto's als voor waterstofauto's.

Over de veiligheid van parkeergarages waarin elektrische auto's staan, hebben we in de zomer van 2020 een rapport gepubliceerd. Onze conclusies luiden om het parkeren van elektrische auto's in parkeergarages niet op voorhand te verbieden en dat het goed is om te kijken naar het ontwerp van parkeergarages en na te denken over eventuele extra veiligheidsmaatregelen.

Direct na publicatie van dat rapport kwam de vraag of dezelfde inzichten ook golden voor waterstofauto's, of dat er andere maatregelen nodig zouden zijn om de veiligheid te waarborgen. Om antwoord op dergelijke vragen te kunnen geven, zul je door kennis tot je te nemen de materie moeten begrijpen. Die stap hebben we gemaakt in dit rapport. Aan de hand van drie gebeurtenissenbomen (voor brand, botsing en lekkage) wordt in voorliggend rapport de ontwikkeling van incidentscenario's met een waterstofauto uitgewerkt. Hierdoor hebben we meer zicht gekregen op de effecten (fakkel, explosie) van dergelijke scenario's.

Er zijn echter nog tal van resterende vraagstukken, zoals de kwantitatieve duiding van de omvang van de effecten en de bijbehorende kansen. In 2021 zullen we daarom nader onderzoek verrichten naar de veiligheidsaspecten van waterstofauto's. Dit betreft primair de mogelijkheden voor risicobeheersing en incidentbestrijding, met name voor de hulpverlening in lastige omgevingen zoals parkeergarages. Voorliggend onderzoek biedt hiervoor al een prima startpunt. En dat is ook wat onderzoek is: voortbouwen op bestaande kennis om zo-doende telkens een stapje verder te komen. In dit geval om de veiligheidsgevolgen van alternatief aangedreven voertuigen en bijbehorende infrastructuur verder te onderzoeken en te begrijpen.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>5</b>
	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>De werking van een waterstofauto</b>	<b>9</b>
1.1	Vulsysteem	10
1.2	Waterstoftank	10
1.3	Leidingsysteem	11
1.4	Brandstofcel	12
1.5	Elektromotor	12
<b>2</b>	<b>Oorzaken</b>	<b>13</b>
2.1	Inleiding	13
2.2	Vrijkomen van waterstof uit de waterstoftank	13
2.3	Vrijkomen van waterstof uit leidingsysteem	15
2.4	Samenvatting	16
<b>3</b>	<b>Effecten</b>	<b>17</b>
3.1	Inleiding	17
3.2	Gebeurtenissenboom voor een botsing	17
3.3	Gebeurtenissenboom voor brand	19
3.4	Gebeurtenissenboom voor lekkage	19
3.5	Discussie	20
3.6	Samenvatting	20
<b>4</b>	<b>Bepalende condities</b>	<b>22</b>
4.1	Inleiding	22
4.2	Omgeving	22
4.3	Uitstroming	23
4.4	Brandoverslag	26
4.5	Samenvatting	29
<b>5</b>	<b>Kansen</b>	<b>31</b>
5.1	Inleiding	31
5.2	Botsing	32
5.3	Brand	32
5.4	Vrijkomen van waterstof	34
5.5	Aanspreken en falen van de TPRD	35
5.6	Ontsteking	38
5.7	Samenvatting	40
	<b>Bronnen</b>	<b>41</b>

# Samenvatting

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) heeft het IFV gevraagd onderzoek te doen naar de veiligheidsaspecten van waterstofauto's in parkeergarages. Hiertoe zijn zeven onderzoeksvragen geformuleerd, waarvan er in dit deelrapport drie worden beantwoord, te weten:

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?

Waterstof kan op verschillende manieren vrijkomen: door het instantaan falen van de waterstoftank, door continue uitstroom vanuit de afblaasbeveiliging of door een continue uitstroom door een kleine opening. Deze uitstromingen worden veroorzaakt door een botsing, een brand of een op zichzelf staande lekkage, bijvoorbeeld door micro-openingen.

Gebeurtenissenbomen voor brand, botsing en lekkage geven de volgorde van de omstandigheden en gebeurtenissen aan die leiden tot één van de drie mogelijke effecten, te weten een fakkel, een explosie of geen effect. De gebeurtenissenbomen laten niet de omvang zien waarin een fakkel of een explosie zich voor kan doen.

Belangrijke factoren die de omvang van een fakkel of een explosie bepalen, zijn de omgeving waarin de waterstofauto zich bevindt en de condities waaronder waterstof uitstroomt:

- > In parkeergarages zijn de effecten van een fakkel of een explosie groter dan in het vrije veld. De aanwezigheid en de mate van ventilatie kunnen echter voorkómen dat bij het vrijkomen van waterstof de LFL<sup>1</sup> wordt bereikt.
- > Uitstroomcondities als de hoeveelheid waterstof die vrijkomt, de waterstofdruk, de grootte van de uitstroomopening en de uitstroomrichting bepalen in grote mate de grootte en de richting van de fakkel c.q. de omvang van de waterstofwolk en de waterstofconcentratie in de wolk. Bij het ontwerpen van een veilige werking van het waterstofsysteem wordt met deze factoren rekening gehouden. Onderzoek laat zien dat veiligheidswinst te behalen is door de diameter van de TPRD<sup>2</sup> te verkleinen in combinatie met het vergroten van de hittebestendigheid van de waterstoftank, of door het ontwikkelen van een waterstoftank die bij brand kleine hoeveelheden waterstof zal lekken.

In hoeverre een waterstofauto betrokken raakt bij een brand, wordt onder andere bepaald door de warmte-intensiteit ( $MW/m^2$ ) van de brand op de waterstofauto. Hoe hoger de warmte-intensiteit, hoe eerder een TPRD geactiveerd wordt. Het is niet uit te sluiten dat de fakkel die ontstaat bij het openen van de TPRD, in een parkeergarage tot brandoverslag naar naastgelegen auto's leidt.

<sup>1</sup> LFL = Lower Flammability Limit. De LFL is de laagste concentratie waarbij een ontvlambaar gas ontsteekt en waarbij de vlam die ontstaat, zichzelf in stand houdt.

<sup>2</sup> TPRD = Thermally Activated Pressure Device.

Van de kans dat bij een waterstofauto in een parkeergarage waterstof *vrijkomt*, is alleen een indicatie te geven, omdat waterstofauto's nog geen gemeengoed zijn waardoor empirische gegevens ontbreken. Op basis van een kwalitatieve vergelijking tussen waterstofauto's en conventionele auto's, is de conclusie dat de kans dat in een parkeergarage waterstof vrijkomt niet groter is - en waarschijnlijk zelfs kleiner - dan de kans dat brandstof vrijkomt uit een conventionele auto, in het geval beide soorten voertuigen bij eenzelfde type incident zijn betrokken.

De literatuur laat grote verschillen zien wat de *ontstekingskans* van waterstof betreft, waardoor een vergelijking met de ontstekingskansen van conventionele brandstoffen niet mogelijk is en verder onderzoek nodig is om meer duidelijkheid te verschaffen.

# Inleiding

## Aanleiding

Waterstof is een gas met een zeer lage dichtheid en omdat het ontvlambaar is, wordt waterstof beschouwd als een gevaarlijke stof. De fysische eigenschappen van waterstof en het daaruit voortvloeiende gedrag, staan uitgebreid beschreven in de literatuur en in rapporten (IFV, 2020a). Het gebruik van waterstof in auto's brengt daarom risico's met zich mee en deze risico's verschillen van de risico's van auto's met conventionele brandstoffen als benzine en diesel. Daarnaast speelt risicoperceptie een rol; enerzijds hebben conventionele auto's risico's die gebruikers al sinds jaar en dag kennen en begrijpen terwijl dat bij waterstofauto's niet het geval is. Anderzijds wordt van waterstofauto's verlangd dat ze in vergelijking met conventionele auto's niet risicovoller zijn (Dadashzadeh, 2018).

Veel onderzoek dat gedaan wordt aan waterstofauto's, heeft betrekking op het gevaarsaspect van waterstof, dat wil zeggen op de effecten die plaats kunnen vinden op het moment dat waterstof vrijkomt. Het vrijkomen van waterstof is in de literatuur in die gevallen vaak het vertrekpunt en een vast gegeven. Voor beleidsbepalers zijn echter niet alleen de effecten van het vrijkomen van waterstof van belang, maar ook de kans dat die effecten kunnen optreden, bijvoorbeeld naar aanleiding van een ongeval met een waterstofauto. Hier wordt echter weinig onderzoek naar gedaan.

Dit is zeker het geval bij parkeergarages; deze staan de laatste tijd in de belangstelling vanwege branden waarbij elektrisch aangedreven voertuigen zijn betrokken (IFV, 2020b). Hoewel er nog maar weinig waterstofauto's in Nederland rijden, roept de mogelijkheid dat ook deze auto's in parkeergarages gestald worden, vragen op over de veiligheid.

## Vraagstelling

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) heeft het IFV gevraagd onderzoek te doen naar de veiligheidsaspecten van waterstofauto's in parkeergarages. De volgende onderzoeksvragen zijn geformuleerd:

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. Zijn parkeergarages bestand tegen de mogelijke effecten van die scenario's (temperatuur en overdruk)?
4. Welke combinaties van bestaande scenario's (zonder waterstofauto's) en nieuwe scenario's (met waterstofauto's) zijn mogelijk in parkeergarages?
5. Wat is bekend over de kans op het vrijkomen van waterstof in een parkeergarage en over de kans dat het vrijgekomen waterstof ontsteekt?
6. Kan een sprinkler- of een watermistinstallatie gebruikt worden bij een incident met een waterstofauto in een parkeergarage om de gevolgen effectief te beperken?

7. Geef een beschrijving hoe in het verleden is omgegaan met veiligheidsvraagstukken en -beleid rondom LPG-voertuigen in parkeergarages.

De beantwoording van de onderzoeksvragen vindt in twee fasen plaats. In samenspraak met de opdrachtgever worden in dit rapport eerst onderzoeksvragen 1, 2 en 5 beantwoord vanwege het belang van en de grote samenhang tussen deze vragen.<sup>3</sup> De resterende onderzoeksvragen worden in de volgende delen van dit rapport behandeld.

## Onderzoeksmethode

Om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden en de antwoorden te kunnen onderbouwen, is een literatuurstudie uitgevoerd waarbij met diverse zoektermen gericht is gezocht in de kennisdatabank van ScienceDirect. De zoektermen bestonden uit combinaties van twee of meer woorden die in de titel of in de abstract van een publicatie voor moesten komen. Voorbeelden van gebruikte zoektermen zijn HYDROGEN, SAFETY, PARKING, GARAGE, IGNITION, RISK ANALYSIS, PROBABILITIES en variaties op deze woorden. Na het bestuderen van de titel en/of de abstracts van de publicaties, zijn daarvan per onderwerp één of meerdere gekozen om nader bestudeerd te worden. Het betreffen veelal publicaties uit peer reviewed tijdschriften, waarvan het *International Journal of Hydrogen Energy* het belangrijkste is.

Naast het gebruik van zoektermen, is ook gebruik gemaakt van de 'sneeuwbalmethode', waarbij artikelen worden gevonden waar in publicaties naar wordt verwezen. Ten slotte zijn publicaties, artikelen en documenten verkregen via contacten en via zoeken op internet met Google Search.

## Afbakening

- > Dit rapport heeft betrekking op waterstofauto's die gasvormig waterstof gebruiken. Het gebruik van vloeibaar waterstof komt niet aan bod omdat vloeibaar waterstof niet wordt gebruikt bij waterstofauto's.
- > De waterstofauto's die in dit rapport beschreven worden, gebruiken waterstof als energiedrager: waterstof wordt hierbij omgezet om elektriciteit te genereren waarmee een elektromotor wordt aangedreven. Waterstof kan ook als brandstof in een brandstofmotor verbrand worden, maar de meeste waterstofauto's werken niet volgens dit principe en zijn daarom niet beschouwd in dit onderzoek.

## Leeswijzer

Dit rapport start met een korte beschrijving in hoofdstuk 2 van de werking van een waterstofauto. Hoofdstukken 3 en 4 beschrijven respectievelijk de oorzaken en de effecten van het vrijkomen van waterstof uit een waterstofauto. De condities die hiervoor bepalend zijn, worden besproken in hoofdstuk 5. Hoofdstuk 6 beschrijft wat in de literatuur gevonden is over kansen op het vrijkomen van waterstof. Ieder hoofdstuk eindigt met een samenvatting van de belangrijkste aspecten van dat hoofdstuk.

---

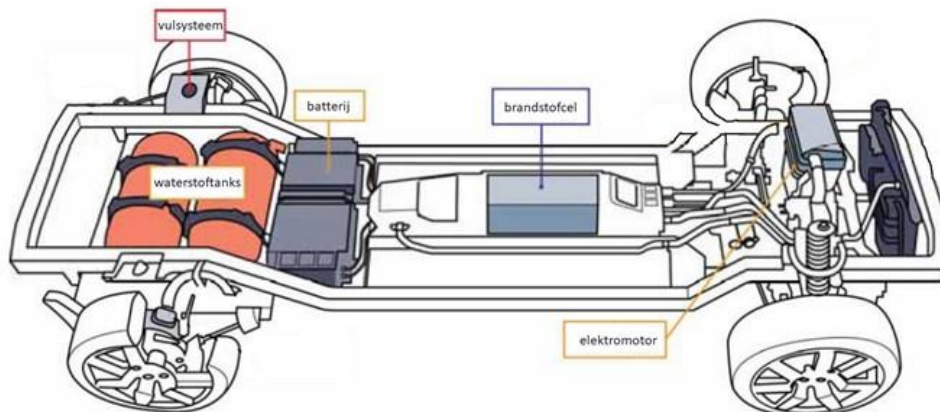
<sup>3</sup> In de uitwerking van vraag 5 is ook de mogelijkheid meegenomen dat waterstof vrijkomt zonder dat er sprake is van een incident met een externe oorzaak.



# 1 De werking van een waterstofauto

Een waterstofauto is een auto die waterstof gebruikt om elektriciteit te genereren waarmee een elektromotor wordt aangedreven. De aandrijving van een waterstofauto bevat uit de volgende componenten en deelsystemen (zie ook Figuur 1.1):

- > vulsysteem
- > waterstoftank
- > leidingsysteem van waterstoftank naar brandstofcel
- > brandstofcel
- > elektromotor



Figuur 1.1 Schematische weergave van een waterstofauto (UN, 2013)



Figuur 1.2 Opengewerkte Toyota Mirai (Newsroom Toyota)

## 1.1 Vulsysteem

Waterstof wordt als gecomprimeerd gas afgeleverd aan waterstofauto's. Het tankpistool en de vulopening zijn zodanig ontworpen, dat een gesloten systeem ontstaat waarbij geen waterstoflekkage kan optreden. De vulopening bevat een terugslagklep die lekkage van waterstof voorkomt wanneer het tankpistool na het tanken losgekoppeld wordt.

## 1.2 Waterstoftank

Een waterstofauto bevat één of meerdere waterstoftanks waar waterstof onder hoge druk wordt opgeslagen (max. 700 bar). Wanneer de tank gevuld is, bevat deze meer dan 99,9 % van al het waterstof dat in de waterstofauto aanwezig is (De Vos, 2020), zie Tabel 1.1. De waterstoftank, het vulsysteem en het leidingsysteem zijn van elkaar gescheiden door middel van afsluiters waarvan de werking gemonitord wordt tijdens het uitgeschakeld zijn van de waterstofauto.

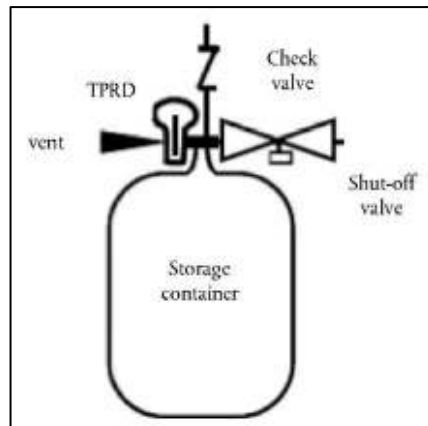
Om de hoge drukken te kunnen weerstaan, is een waterstoftank opgebouwd uit twee lagen. De binnenlaag voorkomt permeatie, terwijl de buitenlaag de waterstoftank sterkte geeft. De binnenlaag bestaat uit een metaal of een thermoplastisch polymeer, terwijl de buitenlaag uit een metaal bestaat of een thermohardend polymeer geïmpregneerd met een vezelversterkte composiet.

**Tabel 1.1 Hoeveelheid waterstof in Hyundai Nexu (De Vos, 2020)**

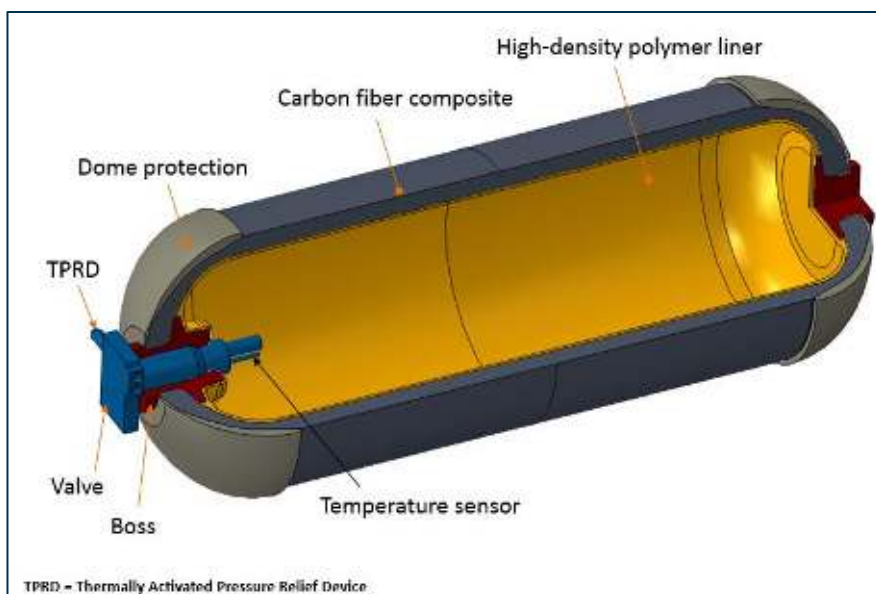
Omschrijving	Hoeveelheid
Inhoud waterstoftanks	3 x 52 liter
Maximum waterstofdruk in tanks	700 bar
Hoeveelheid waterstof in tanks	109.000 liter $\approx$ 9,11 kilo
Inhoud leidingen naar brandstofcel	0,275 liter
Waterstofdruk in leidingen	17 bar
Hoeveelheid waterstof in leidingen	4,68 liter $\approx$ 0,39 gram
Inhoud brandstofcel ('stack')	5,17 liter
Waterstofdruk in brandstofcel	2,1 bar
Hoeveelheid waterstof in brandstofcel	10,85 liter $\approx$ 0,91 gram

De tankwand van een waterstoftank kan bij blootstelling aan hitte verzwakken, waardoor de tank kan exploderen. Om dit te voorkomen, is een waterstoftank voorzien van een veiligheidssysteem dat de inhoud van de tank gecontroleerd laat vrijkomen wanneer de temperatuur in de buurt van de tank te hoog wordt, de TPRD ('thermally activated pressure relief device'). Zie verder paragraaf 2.2.1.

De TPRD is opgenomen in een T-vormig onderdeel dat zich op de kopse kant van een waterstoftank bevindt. Het T-vormig onderdeel bestaat uit meerdere sluitsystemen, te weten de TPRD, een terugslagklep om te voorkomen dat waterstof via de vulleiding kan uitstromen en een automatische afsluitklep die voorkomt dat waterstof naar de brandstofcel kan stromen. Zie Figuur 1.3 en Figuur 1.4.



**Figuur 1.3** Opbouw van afsluit-systeem op een waterstoftank (EU-Regulation 134)



**Figuur 1.4** Voorbeeld van een tank voor de opslag van gasvormig waterstof (Rivard et al, 2019)

Om een TPRD bij 110 °C te laten openen, kan gebruik gemaakt worden van een smeltlegering of van een glazen ampul gevuld met een vloeistof. Een smeltlegering is een (eutectisch) metaallegering die bij relatief lage temperatuur smelt waardoor de TPRD geopend wordt. Bij de glazen ampul zet de vloeistof in de ampul uit wanneer de temperatuur hoog wordt. Hierdoor breekt de ampul en wordt de TPRD geopend. De huidige waterstofauto's zijn voorzien van TPRD's met een vloeistof gevulde glazen ampul.

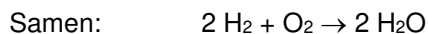
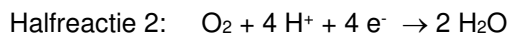
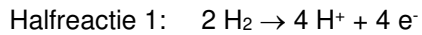
### 1.3 Leidingsysteem

Waterstof gaat via leidingen van de waterstoftank naar de brandstofcel. De druk wordt hierbij met behulp van drukregelaars verlaagd van 700 bar naar minder dan 1 bar (overdruk). Het leidingsysteem is voorzien van doorstroombegrenzers om in geval van een beschadigde leiding de toevoer van waterstof af te sluiten. Als de druk in het leidingsysteem te groot wordt,

bijvoorbeeld door een storing in de drukregelaar, wordt de inhoud van de leiding afgeblazen door middel van overdrukbeveiligingen.

## 1.4 Brandstofcel

Meerdere brandstofcellen vormen samen een 'stack' die genoeg vermogen levert voor de elektromotor. In iedere brandstofcel worden waterstof en zuurstof elektrochemisch omgezet in water:



De elektronen die in halfreactie 1 gevormd worden, zijn nodig in halfreactie 2. De elektronenstroom die daardoor gaat lopen, wordt gebruikt om de elektromotor aan te drijven.

## 1.5 Elektromotor

Het elektrische vermogen dat door de stack gegenereerd wordt, gaat naar de elektromotor om de waterstofauto aan te drijven waarbij een batterij als buffer fungeert. In deze batterij wordt bovendien de teruggewonnen remenergie opgeslagen. Op de veiligheidsaspecten van batterijen gaan we in deze literatuurstudie niet in. Zie hiervoor bijvoorbeeld (IFV, 2020b).

# 2 Oorzaken

## 2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de vraag beantwoord in hoeverre incidentscenario's met waterstofauto's in parkeergarages leiden tot het vrijkomen van waterstof (het eerste deel van onderzoeksvraag 1). De effecten die uit de diverse scenario's kunnen voortvloeien, worden beschreven in hoofdstuk 3 (het tweede deel van onderzoeksvraag 1).

Over de oorzaken van het vrijkomen van waterstof wordt in de literatuur betrekkelijk weinig geschreven. Het vrijkomen van waterstof is namelijk in veel onderzoeken een gegeven c.q. het uitgangspunt, waarbij het niet uitmaakt wat de oorzaak is waardoor waterstof vrijkomt.

Veruit het meeste waterstof in een waterstofauto bevindt zich in de tank (>99,9 %). Gezien de hoge druk waaronder dit waterstof wordt opgeslagen, kan het ongewenst vrijkomen van waterstof uit de waterstoftank grote gevolgen hebben. Waterstof kan daarnaast vrijkomen uit de leidingen van de waterstoftank naar de brandstofcel. De gevolgen die dit 'leidingscenario' met zich meebrengt, zullen echter relatief klein zijn, gezien de beperkte inhoud van deze leidingen. Om die reden wordt in dit rapport de nadruk gelegd op het vrijkomen van waterstof uit de waterstoftank.

In dit onderzoek is aangenomen dat door de juiste materiaalkeuze de technische integriteit van het waterstofsysteem in een waterstofauto optimaal is, waardoor een oorzaak als bijvoorbeeld waterstofverbrossing wordt voorkomen (Barth et al, 2013); Ustolin et al, 2020).

## 2.2 Vrijkomen van waterstof uit de waterstoftank

Waterstof kan in principe op drie manieren vrijkomen uit de waterstoftank:

1. instantaan door het falen van de waterstoftank
2. continu door het aanspreken van de afblaasbeveiliging<sup>4</sup>
3. continu door een waterstoflek

Een vierde manier is permeatie waarbij waterstof door de tankwand heen diffundeert. De tank blijft hierbij intact en er is geen sprake van een opening waar waterstof doorheen lekt zoals bij manier 3. Het permeatieproces vormt echter geen veiligheidsrisico, omdat permeatie sterk beperkt wordt door aan de binnenkant van de waterstoftank een dun laagje van een bepaald materiaal aan te brengen (een 'liner') waar waterstof niet of slecht doorheen kan. Onderzoek laat zien dat de hoeveelheid waterstof die vrijkomt, ook als een dergelijke laag ontbreekt, al verwaarloosbaar klein is (Makarov et al, 2009; Adams et al, 2011).

### 2.2.1 Falen van de waterstoftank

De belangrijkste oorzaken voor het falen van de waterstoftank zijn (HySafe, 2005):

---

<sup>4</sup> De term 'continu' wordt gebruikt in risicoanalyses en houdt in dat een uitstroom gedurende langere tijd plaats vindt (RIVM, 2021)

- > botsing van de waterstofauto met een object of een ander voertuig
- > falen van de afblaasbeveiliging waardoor de druk in de tank te hoog wordt

### **Botsing van de waterstofauto met een object of een ander voertuig**

De waterstoftank is ontworpen om externe impact van buiten te weerstaan. De eisen waaraan de waterstoftank moet voldoen en de testen die het daarvoor moet ondergaan, staan beschreven in Regulation 134 van de EU (EU, 2019) en in GTR 13 (UN, 2013). Hiertoe behoren testen waarbij een waterstoftank geheel of gedeeltelijk verhit wordt door een brand en impacttesten waarbij de waterstoftank op verschillende manieren van een zekere hoogte naar beneden valt.

De waterstoftank in een waterstofauto bevat waterstof bij een druk van 700 bar. Waterstoftanks worden ontworpen om drukken van minimaal 1575 bar te weerstaan, aangezien wetgeving een veiligheidsfactor van 2,25 vereist (UN, 2013). Dat maakt dat waterstoftanks zeer sterk en stijf zijn en het minder waarschijnlijk – maar niet onmogelijk – is dat een waterstoftank faalt door impact van buitenaf, bijvoorbeeld door een botsing.

### **Falen van de afblaasbeveiliging (TPRD)**

Om de hoge drukken te kunnen weerstaan, worden waterstoftanks gemaakt van composietmaterialen. Dit zijn polymere materialen die versterkt zijn met koolstofvezels. De polymeren degraderen onder de invloed van warmte, waardoor de tank z'n sterkte verliest naarmate de tank langer wordt aangestraald, bijvoorbeeld bij brand. De belangrijkste maatregel om te voorkomen dat de tankwand degradeert en daardoor zou exploderen, is de 'thermally activated pressure relief device', kortweg TPRD (zie Figuur 1.4).

De TPRD wordt geactiveerd wanneer de temperatuur bij de TPRD oploopt tot 110 °C. Wanneer de TPRD geactiveerd wordt, wordt al het aanwezige waterstof door een opening in de TPRD vrijgelaten uit de tank. Bij ontsteking ontstaat een fakkel, maar wordt een explosie van de waterstoftank voorkomen (Cirrone, 2018).

Het kan voorkomen dat de TPRD niet functioneert, bijvoorbeeld wanneer de waterstoftank niet volledig maar lokaal wordt aangestraald (Li et al, 20150) (Dadshzadeh et al, 2018). Dit kan leiden tot het exploderen van de waterstoftank, wat gezien wordt als het belangrijkste risico bij waterstofauto's (Dadashzadeh et al, 2018).

Er zijn twee ontwikkelingen die in de toekomst het falen van de TPRD kunnen voorkomen:

1. De Ulster University heeft een waterstoftank ontwikkeld die niet zal falen wanneer de tank lokaal wordt aangestraald door brand. Hierdoor is de aanwezigheid van een TPRD niet meer nodig (Kashkarov, 2019).
2. Een activatiedraad die over de gehele lengte van een waterstoftank loopt. Wanneer de tank lokaal wordt aangestraald, krimpt ter plaatse de draad, waardoor de TPRD op de kop van de tank geopend wordt (Dijkhof, 2021)

### **2.2.2 Aanspreken TPRD**

Zoals hierboven beschreven, vindt het aanspreken van de TPRD plaats wanneer de temperatuur in de directe omgeving van de TPRD te hoog wordt, bijvoorbeeld doordat de waterstoftank rechtstreeks aangestraald wordt door een brand of doordat in de nabijheid van de waterstofauto een brand woedt en de hitte van die brand de TPRD activeert (UN, 2013). De branden die een TPRD activeren, kunnen overal plaats vinden en hoeven niet gerelateerd te zijn aan parkeerplaatsen in de open lucht of aan parkeergarages. De branden zijn

onder te verdelen in branden in de waterstofauto zelf (interne branden) en branden buiten de waterstofauto (externe branden). Oorzaken van interne en externe branden kunnen zijn (Olt-hof et al, 2011; Tamura et al, 2014; Li et al, 2015; Ren et al, 2019):

#### **'Interne' brand activeert TPRD**

- > Traveling fire: door een brand op een parkeerplaats of in een parkeergarage vatten auto's één voor één vlam, waaronder de waterstofauto
- > Eenzijdige botsing van de waterstofauto met een object of tweezijdige botsing met een ander voertuig waarbij brand ontstaat
- > In brand steken van de waterstofauto
- > Ontbranding in de waterstofauto, bijvoorbeeld door roken in de auto
- > Zelfontbranding door een technisch of elektrisch probleem in de waterstofauto

#### **Externe brand activeert TPRD**

- > Nabijgelegen object of auto brandt (bijvoorbeeld door brandstichting, kortsluiting, botsing of problemen met de motor (conventionele auto) of accu (elektrische auto)).
- > Nabijgelegen conventionele auto lekt brandstof (bijvoorbeeld door een botsing) en de brandstofplas brandt.
- > Traveling fire: een nabijgelegen auto brandt ten gevolge van een traveling fire.

'Traveling fires' zijn lokale branden die ontstaan doordat een brand van het ene object overgaat op het andere object. Voordat de brand van het ene object volledig is ontwikkeld, is de brand van een ander object al gedoofd. De brand reist als het ware door een compartiment, maar ontwikkelt zich niet tot een brand van het compartiment zelf (Mattheüs, 2018).

### **2.2.3 Waterstoflekkage**

Als een waterstoflek aanwezig is, bevindt de lekkage zich meestal bij kleppen of aansluitingen, omdat daar micro-openingen aanwezig kunnen zijn. Hoewel zeer klein, zijn deze openingen groot genoeg om waterstofmoleculen (ordegrootte  $10^{-11}$  m) door te laten. Voor lage-druk aardgassystemen in woningen is dit een bekend fenomeen (Netbeheer Nederland, 2019) en het is te verwachten dat dit voor hogedruk systemen met waterstof niet anders is. De 'worst case' situatie is die waarbij het vrijgekomen waterstof zich verzamelt in een besloten ruimte van de auto met weinig tot geen ventilatie. Ontsteking kan dan leiden tot een explosie (Salva et al, 2012).<sup>5</sup>

## **2.3 Vrijkomen van waterstof uit leidingsysteem**

Het transport van waterstof vanuit de tank naar de brandstofcel verloopt via een leidingsysteem waarbij de waterstofdruk in twee stappen van 700 bar naar 1 bar wordt gebracht (UN, 2013). In dit systeem zitten verbindingen en kleppen waar waterstof uit zou kunnen lekken. Waterstoflekkages kunnen optreden door bijvoorbeeld ouderdom van het systeem, door verkeerd onderhoud of materiaalgebruik of door verkeerd materiaalgebruik (Molkov et al, 2019).

<sup>5</sup> De aanwezigheid van waterstof in besloten ruimtes van een waterstofauto wordt door middel van sensoren gemonitord. Bij 0,16 vol.% waterstof wordt het waterstofsysteem afgesloten.

Wanneer een lek gedetecteerd wordt door één van de sensoren in een waterstofauto, wordt de toevoer vanuit de waterstoftank afgesloten, zodat alleen de inhoud van het leidingsysteem vrijkomt. Dit leidt naar verwachting niet tot een ontvlambare wolk, omdat het leidingsysteem weinig waterstof bevat dat bij vrijkomen bovendien meteen verdund wordt (Reuther et al, 2013).

Bij een Hyundai Nexo bevat het waterstofsysteem tussen de tank en de brandstofcel ongeveer 15 liter waterstof. (Ter vergelijking: de drie waterstoftanks bevatten meer dan 100.000 liter samengeperst waterstof.) Wanneer deze 15 liter in één keer vrij zou komen, is de waterstofconcentratie dicht bij de auto het hoogst. De concentratie neemt echter snel af doordat waterstof stijgt en zich in de omgeving verspreidt. Dit kan aan de hand van een voorbeeld duidelijk worden gemaakt:

Stel dat 15 liter waterstof onder de Hyundai Nexo vrijkomt en zich buiten de auto verspreidt. De waterstofconcentratie in het gebied 0,5 meter rondom deze auto is dan 0,07 vol.%. Deze waarde ligt onder de LFL van waterstof (4 vol.%), de laagste concentratie waarbij waterstof ontsteekt.

Volume Hyundai Nexo =  $4,7\text{m} \times 1,9\text{m} \times 1,6\text{m} = 14,3\text{ m}^3 = 14.300\text{ liter}$

Volume ruimte 0,5 m rondom auto =  $5,7\text{m} \times 2,9\text{m} \times 2,1\text{m} = 34,7\text{ m}^3 = 34.700\text{ liter}$

Volume waarin waterstof zich heeft verspreid =  $34.700\text{l} - 14.300\text{l} = 20.400\text{ liter}$

De waterstofconcentratie is dan  $(15/20.400) \times 100\% = 0,07\text{ vol.}\%$ .

## 2.4 Samenvatting

Waterstof kan op verschillende manieren vrijkomen: door het instantaan falen van de waterstoftank, door continue uitstroom vanuit de afblaasbeveiliging of door een continue uitstroom door een kleine opening. De uitstromingen worden veroorzaakt door een botsing, een brand of een op zichzelf staande lekkage, bijvoorbeeld door micro-openingen.



# 3 Effecten

## 3.1 Inleiding

In hoofdstuk 3 is aangegeven dat botsing, brand en lekkage de drie manieren zijn waarop waterstof kan vrijkomen. Voor brand en botsing geldt dat de omstandigheden bepalend zijn of waterstof daadwerkelijk vrijkomt: bij een botsing is de kracht van de impact bijvoorbeeld een bepalende factor, terwijl dit voor een brand het functioneren van de TPRD bepalend is. Andere omstandigheden bepalen of het vrijgekomen waterstof ontsteekt en of dat meteen gebeurt of met vertraging. Door middel van een gebeurtenissenboom kunnen zowel de volgorde van de omstandigheden en de gebeurtenissen inzichtelijk worden gemaakt als de effecten die ten gevolge hiervan ontstaan.

Dit hoofdstuk beschrijft de gebeurtenissenbomen voor botsing, brand en lekkage (het tweede deel van onderzoeksvraag 1). De gebeurtenissenbomen gelden algemeen en zijn niet specifiek voor parkeergarages.

## 3.2 Gebeurtenissenboom voor een botsing

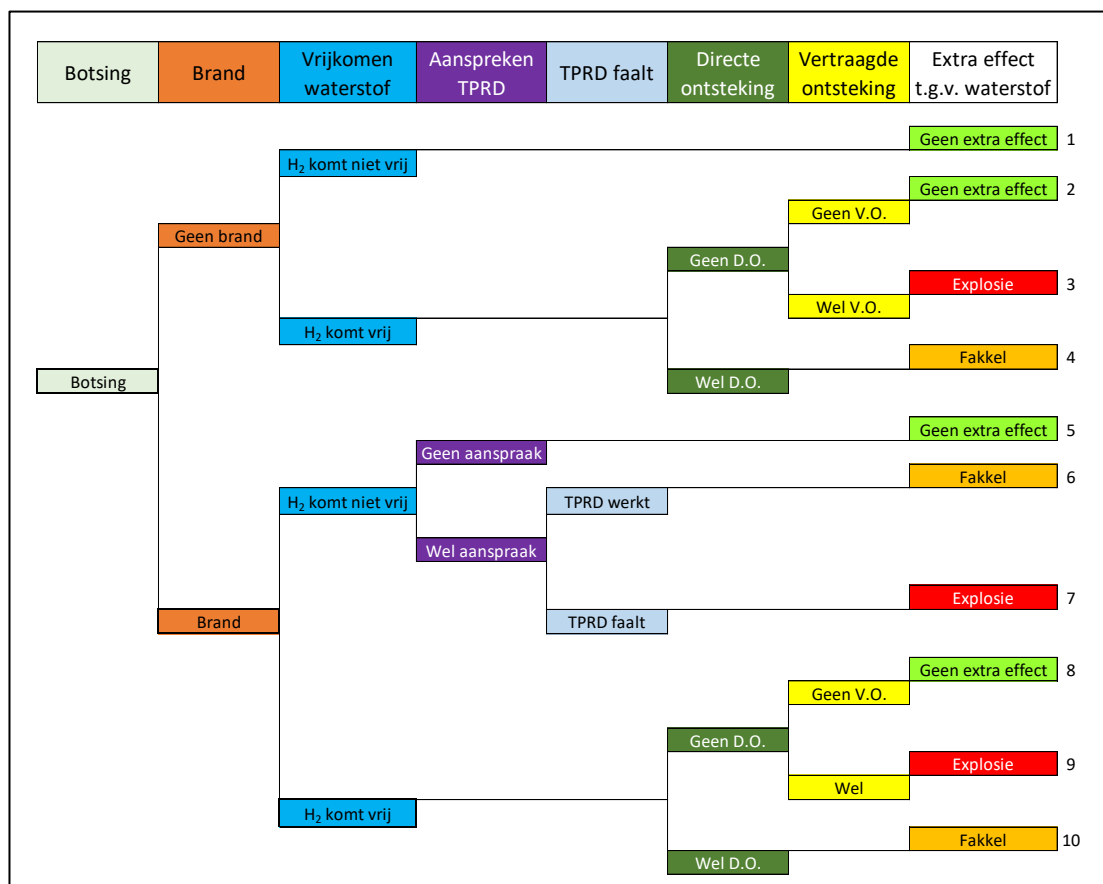
Figuur 3.1 toont de gebeurtenissenbomen voor een botsing. Er zijn tien scenario's mogelijk met drie verschillende effecten (Ehrhart, 2020). In de beschrijving van de scenario's wordt er van uit gegaan dat de waterstofauto niet kantelt<sup>6</sup>; een eventuele fakkel is daardoor naar de grond gericht. Wanneer een waterstofauto wel gekanteld is, kan de fakkel ook horizontaal gericht zijn of gericht zijn naar boven.

1. De botsing leidt niet tot een brand en ook niet tot het vrijkomen van waterstof, omdat de impact van de botsing te klein is of omdat de veiligheidssystemen bij een ongeval functioneren. Mogelijk is er blikshade en zijn er gewonden, maar er zijn geen effecten die gerelateerd zijn aan waterstof.
2. De botsing leidt niet tot een brand, maar wel tot het vrijkomen van waterstof. Dit ontsteekt niet, bijvoorbeeld doordat een ontstekingsbron ontbreekt of doordat de LFL niet wordt bereikt. Gezien de sterkte van de waterstoftank en de aanwezigheid van kleppen die uitstroming vanuit de waterstoftank voorkomen, is dit scenario mogelijk bij een waterstofleiding.
3. De botsing leidt niet tot een brand maar wel tot het vrijkomen van waterstof, waarschijnlijk uit een waterstofleiding. Het vrijgekomen waterstof ontsteekt na verloop van tijd, met in het ergste geval een explosie tot gevolg.<sup>7</sup>

<sup>6</sup> Deze aanname is reëel omdat in een parkeergarage de mogelijkheid om te kantelen erg klein is gezien de snelheidsbeperkingen. Zie ook paragraaf 5.4. GTR 13 schrijft voor dat de uitstroombuiging naar beneden gericht is.

<sup>7</sup> De effecten van het ontsteken van waterstof zijn afhankelijk van de waterstofconcentratie. Bij concentraties tussen 4 – 9 vol.% vindt ontbranding plaats (wolkbrand) maar ontstaat er geen explosie. Explosies vinden plaats bij hogere concentraties; tussen 9 – 18 vol.% in de vorm van deflagratie en boven 18 vol.% in de vorm van detonatie. Bij detonatie kunnen de overdrukken een factor 20 groter zijn dan bij deflagratie (IFV, 2020a).

4. De botsing leidt niet tot een brand, maar wel tot het vrijkomen van waterstof, waarschijnlijk uit een waterstofleiding. Het vrijgekomen waterstof ontsteekt meteen en geeft een fakkel zolang waterstof uit de leiding stroomt.
5. Een botsing leidt wel tot een brand, maar niet tot het vrijkomen van waterstof. De TPRD wordt niet aangesproken, bijvoorbeeld omdat de brand te ver weg is of de brand te kort duurt. Er zijn geen effecten die gerelateerd zijn aan waterstof.
6. Een botsing leidt wel tot een brand, maar niet tot het vrijkomen van waterstof. De TPRD wordt door de brand aangesproken en functioneert, waardoor waterstof vrijkomt dat meteen ontsteekt door de brand. Hierdoor ontstaat een fakkel.
7. Een botsing leidt wel tot een brand maar niet tot het vrijkomen van waterstof. De TPRD wordt door de brand aangesproken maar functioneert niet. Door verzwakking van de tankwand, scheurt de tank open en ontstaat er in het ergste geval een explosie.



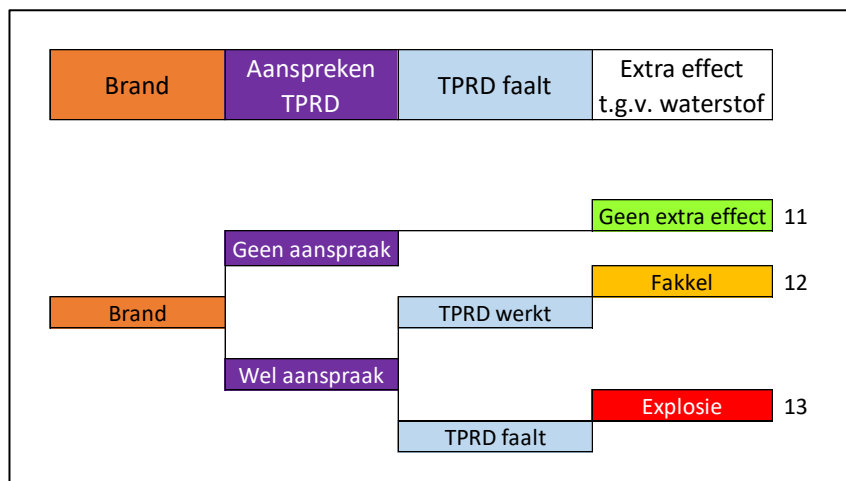
**Figuur 3.1** Gebeurtenissenboom van het vrijkomen van waterstof ten gevolge van een botsing (Ehrhart et al, 2020)

8. Een botsing leidt tot een brand en het vrijkomen van waterstof, waarschijnlijk uit een waterstofleiding. Het waterstof ontsteekt echter niet, bijvoorbeeld omdat de hoeveelheid te klein is om boven de LFL te komen of doordat waterstof uitstroomt van de brand vandaan. Er zijn geen effecten die gerelateerd zijn aan waterstof.
9. Een botsing leidt tot een brand en het vrijkomen van waterstof, waarschijnlijk uit een waterstofleiding. Dit waterstof ontsteekt vertraagd en geeft in het ergste geval een explosie.
10. Een botsing leidt tot een brand en het vrijkomen van waterstof, waarschijnlijk uit een waterstofleiding. Dit waterstof ontsteekt meteen en geeft een fakkel zolang waterstof uit de leiding stroomt.

### 3.3 Gebeurtenissenboom voor brand

Figuur 3.2 toont de gebeurtenissenboom voor een brand (Ehrhart et al, 2020). De gebeurtenissenboom maakt deel uit van de gebeurtenissenboom voor botsing, maar wordt hier voor de duidelijkheid apart weergegeven. Er zijn drie scenario's mogelijk met drie verschillende effecten.

11. Een interne of een externe brand leidt niet tot het aanspreken van de TPRD, omdat de brand te ver weg is. Er komt geen waterstof vrij uit de waterstoftank en er zijn geen effecten die gerelateerd zijn aan waterstof. Dit scenario komt overeen met scenario 5.
12. Een interne of een externe brand leidt tot het aanspreken van de TPRD. Deze functioneert, waardoor waterstof vrijkomt dat meteen ontsteekt door de brand. Hierdoor ontstaat een fakkel. Dit scenario komt overeen met scenario 6.
13. Een interne of een externe brand leidt tot het aanspreken van de TPRD. Deze functioneert niet. Ook kan het zo zijn dat de waterstoftank lokaal aangestraald wordt waardoor de TPRD niet geactiveerd wordt. Door verzwakking van de tankwand scheurt de tank open en ontstaat er in het ergste geval een explosie. Dit scenario komt overeen met scenario 7.



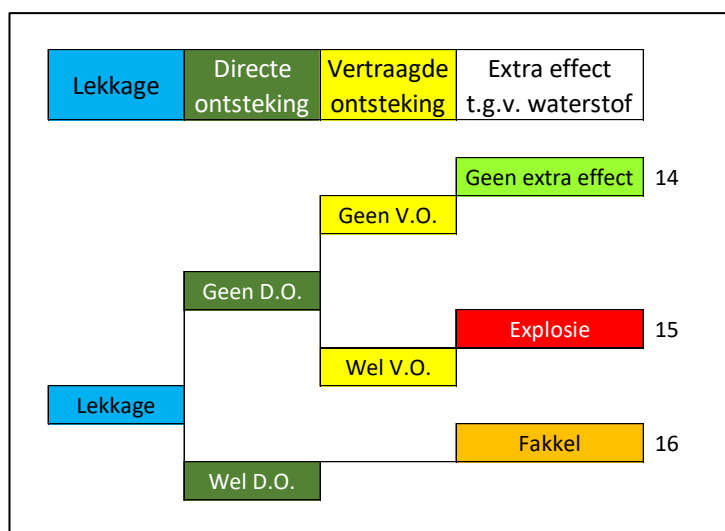
Figuur 3.2 Gebeurtenissenboom van het vrijkomen van waterstof ten gevolge van een brand (Ehrhart et al, 2020)

### 3.4 Gebeurtenissenboom voor lekkage

Figuur 3.3 toont de gebeurtenissenboom voor een lekkage (Ehrhart et al, 2020). De gebeurtenissenboom maakt deel uit van de gebeurtenissenboom voor botsing, maar wordt hier voor de duidelijkheid apart weergegeven. De term 'vrijkomen waterstof' is hierbij aangepast tot 'lekkage'. Er zijn drie scenario's mogelijk met drie verschillende effecten.

14. Waterstof komt vrij, maar ontsteekt in het geheel niet en verdwijnt naar de open lucht. Er zijn geen effecten die gerelateerd zijn aan waterstof. Dit scenario komt overeen met scenario's 2 en 8.
15. Waterstof komt vrij en ontsteekt na verloop van tijd en kan in het ergste geval een explosie geven. Dit scenario komt overeen met scenario's 3 en 9.

16. Waterstof komt vrij en ontsteekt direct en geeft een fakkel zo lang de uitstroom duurt. Dit scenario komt overeen met scenario's 4 en 10.



Figuur 3.3 Gebeurtenissenboom van het vrijkomen van waterstof ten gevolge van een lekkage (Ehrhart et al, 2020)

### 3.5 Discussie

De gebeurtenissenbomen voor botsing, brand en lekkage kennen veel overlap voor wat betreft het al dan niet vrijkomen van waterstof. De gebeurtenissenbomen maken inzichtelijk welke effecten op kunnen treden, maar ze laten niet zien onder welke omstandigheden waterstof vrijkomt. Deze omstandigheden bepalen echter in belangrijke mate de omvang van de effecten en daarmee de schade die op kan treden. In hoofdstuk 4 wordt hier dieper op in gegaan.

De worst case situatie is een explosie. Deze kan ontstaan door het exploderen van de waterstoftank (scenario 7 en 13) of door het vertraagd ontsteken van een waterstofwolk (scenario 3, 9 en 15). Zijn de waterstofconcentraties te laag voor een explosie, dan zal bij ontsteking een wolkbrand ontstaan.

Ook een fakkel is een scenario met grote effecten, maar de effecten van een fakkel zijn over het algemeen minder groot dan die van een explosie, omdat een fakkel één richting heeft terwijl de overdrukeffecten bij een explosie alle kanten op gaan.

### 3.6 Samenvatting

De gebeurtenissenbomen voor brand, botsing en lekkage geven de volgorde van de omstandigheden en gebeurtenissen aan die leiden tot de effecten die hieruit voort kunnen vloeien. Belangrijke omstandigheden en gebeurtenissen zijn het ontstaan van brand, het vrijkomen van waterstof door een botsing of een brand, het aanspreken en functioneren van de TPRD en het al dan niet (direct of vertraagd) ontsteken van waterstof.

Uiteindelijk zijn er drie waterstof-specifieke effecten mogelijk: een fakkel, een wolkbrand c.q. explosie of er is geen effect. Dat laatste houdt in dat er geen waterstof vrijkomt of dat er wel waterstof vrijkomt, maar dat de concentratie te laag is om te kunnen ontsteken. De ernstigste situaties zijn die waarbij een explosie of een fakkel ontstaat. De mate waarin deze effecten

zich voordoen, worden echter niet duidelijk uit de gebeurtenissenbomen. Daarvoor is informatie nodig over de omstandigheden waaronder waterstof vrij kan komen.

# 4 Bepalende condities

## 4.1 Inleiding

Een brand, botsing of een lekkage staat niet op zichzelf. Zodra één van deze drie begingebourtenissen zich voordoet, kan een scala aan vervolgebourtenissen plaatsvinden. De volgorde en de mate van deze vervolgebourtenissen worden door veel factoren bepaald en dit werkt door in de omvang en ernst van een fakkel of een explosie.

Dit hoofdstuk beschrijft op hoofdlijnen de condities die van invloed zijn op de effecten van het vrijkomen van waterstof wanneer een waterstofauto in een parkeergarage brandt, botst of lekt (onderzoeksvraag 2).

De condities die beschreven worden, zijn ingedeeld in de volgende thema's:

- > de omgeving waarin de waterstofauto staat (parkeergarages)
- > de manier waarop waterstof vrijkomt
- > de factoren die invloed hebben op brandoverslag

## 4.2 Omgeving

De gebeurtenissenbomen die in hoofdstuk 3 beschreven staan, gelden in het vrije veld en zijn niet specifiek voor parkeergarages. De omgeving waarin waterstof vrijkomt, heeft echter grote invloed op de ernst en de omvang van een fakkel of een explosie. In een parkeergarage zijn de consequenties groter dan in de open lucht. Voor fakkels geldt dat de warmtestraling in parkeergarages teruggekaatst wordt, zodat de warmte-intensiteit van een fakkel in een parkeergarage verder reikt dan in de open lucht. Voor explosies geldt dat in de open lucht de overdruk afneemt met de afstand, omdat het oppervlak van de drukgolf toeneemt naarmate de afstand tot de ontstekingsbron groter wordt. In een parkeergarage kan het oppervlak van de drukgolf echter niet toenemen door de aanwezigheid van plafonds en muren. De overdruk van een explosie in een parkeergarage zal dan ook groter zijn dan in de open lucht (Molkov et al, 2019).

### 4.2.1 Type parkeergarage

Parkeergarages kunnen onderverdeeld worden in open parkeergarages en gesloten parkeergarages. Bij open parkeergarages is er sprake van een natuurlijke ventilatie vanwege de aanwezigheid van grote openingen met de buitenlucht. Gesloten parkeergarages hebben niet of veel minder verbinding met de open lucht, waardoor mechanische ventilatie nodig is om de luchtkwaliteit te kunnen waarborgen (Jonkman, 2015). Open parkeergarages bevinden zich bovengronds, terwijl gesloten parkeergarages zich meestal ondergronds bevinden. Als waterstof in kleine hoeveelheden vrijkomt in een parkeergarage, zal het zich mengen met de lucht en zich door mechanische of natuurlijke ventilatie verder verspreiden en verdwijnen naar de open lucht. Als waterstof echter in grote hoeveelheden vrijkomt - bijvoorbeeld bij het openen van de TPRD - en direct ontsteekt of vertraagd ontsteekt, maakt het

nogal uit of de waterstofauto in een open parkeergarage staat of in een gesloten parkeergarage. Hoe meer gesloten een ruimte is, hoe hoger de waterstofconcentratie kan worden en hoe groter de effecten bij het ontsteken van de waterstofwolk (Molkov et al, 2019). Verwacht mag worden dat in een gesloten parkeergarage de consequenties van het vrijkomen en ontsteken van waterstof groter zullen zijn dan in een open parkeergarage.

#### 4.2.2 Ventilatie

Ventilatie (natuurlijk of mechanisch) in parkeergarages kan zowel positief als negatief doorwerken op de waterstofconcentratie. In positieve zin geldt dat ventilatie de snelheid en de richting waarin waterstof zich verspreidt, vergroot waardoor waterstofconcentraties lager worden (Choi et al, 2013). Daar staat tegenover dat de waterstofwolk verder komt en dat wanneer de ventilatierichting tegengesteld is aan de uitstroomrichting, lokaal ophoping kan ontstaan. Ventilatie bespoedigt ook de verbranding van waterstof en dat kan tot grotere overdrukken leiden (Molkov et al, 2019).

In normen wordt aangegeven dat de ventilatievoud<sup>8</sup> van ruimtes dusdanig moet zijn, dat de waterstofconcentratie niet hoger wordt dan 1 vol. % (Molkov et al, 2019). Zeker wanneer de waterstofuitstroom groot is, bijvoorbeeld bij het openen van de TPRD, kan ventilatie onvoldoende zijn om de waterstofconcentratie laag te houden.

Met behulp van onderstaande formule kan bepaald worden of het ventilatiesysteem in staat is de waterstofconcentratie onder de 1 vol.% te houden:

$$\text{vol. \% waterstof} = \frac{Q_{\text{lek}}}{Q_{\text{ventilatie}} + Q_{\text{lek}}} \times 100\% \quad \text{met } Q \text{ in m}^3/\text{min.} \quad [1]$$

Stel dat een parkeergarage van 1000 m<sup>2</sup> geventileerd wordt met een snelheid van 0,0038 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>·m<sup>-2</sup>, oftewel 228 m<sup>3</sup> per minuut (= Q<sub>ventilatie</sub>) (ICC, 2018). Een lek van 2 m<sup>3</sup>/min (= Q<sub>lek</sub>) geeft dan een waterstofconcentratie van 0,9 vol.% en dat is lager dan de gestelde eis van 1 vol.%.

De formule is een ruwe benadering, omdat hierbij wordt uitgegaan dat al vrijgekomen waterstof zich over de ruimte verspreidt en dat de concentratie overal gelijk is.

### 4.3 Uitstroming

De volgende aspecten spelen een belangrijke rol in de uitstroming van waterstof en daarmee in de verspreiding van waterstof.

#### 4.3.1 De inhoud van het waterstofbevattende systeem

Het waterstofbevattende systeem van een waterstofauto bestaat uit de waterstoftank, leidingen van het vulpunt naar de waterstoftank en leidingen van de waterstoftank naar de brandstofcel. De diverse delen van dit systeem kunnen door middel van (veiligheids)kleppen afgesloten worden.

De waterstoftank bevat de meeste waterstof en de mate waarin de tank gevuld is, werkt door op de uitstroomduur. Bij een volle tank zal in geval van directe ontsteking de fakkel langer

<sup>8</sup> De ventilatievoud is een maat voor de ventilatie in een ruimte en is het getal dat aangeeft hoeveel keer per uur de ruimte van verse lucht wordt voorzien.

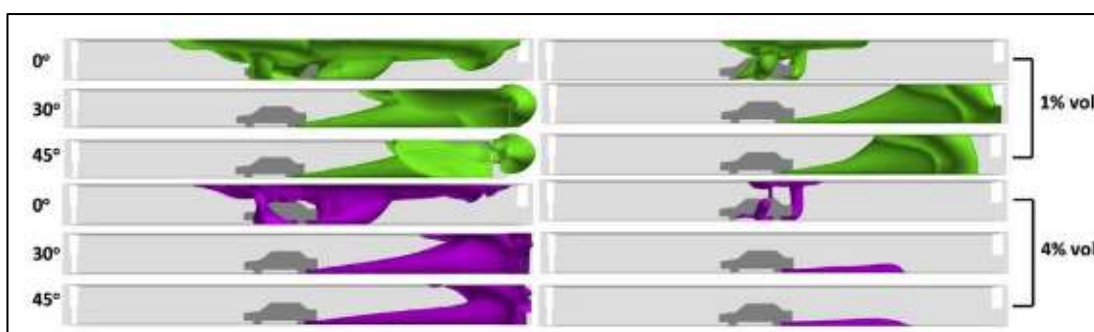
duren. In geval van vertraagde ontsteking zal de waterstofwolk groter kunnen worden en hogere concentraties kunnen bereiken. Als de waterstofwolk vervolgens ontsteekt, kunnen de effecten groter zijn dan wanneer de waterstoftank voor de helft gevuld zou zijn geweest. De leidingen van de waterstoftank naar de brandstofcel staan onder lage druk en bevatten weinig waterstof. Als dit waterstof vrijkomt, zullen de effecten beperkt zijn (zie ook paragraaf 2.3).

### 4.3.2 Uitstroomrichting

De uitstroomrichting van waterstof heeft invloed op de mate waarop een fakkel warmte kan uitstralen naar personen of objecten. De warmte van een fakkel die naar boven gericht is, reikt op grondniveau minder ver dan een fakkel die horizontaal gericht is. Deze verschillen zullen naar verwachting in een parkeergarage een stuk minder duidelijk zijn, vanwege de aanwezigheid van obstakels als plafonds, vloeren, muren en auto's die de loop van de fakkel als het ware breken.

Voor een waterstofwolk geldt iets soortgelijks. De afstand (in het horizontale vlak) die een waterstofwolk in het vrije veld aflegt wanneer de uitstroming naar boven toe gericht is, is kleiner dan wanneer de uitstroming horizontaal gericht is. In parkeergarages wordt de verspreiding echter sterk beïnvloed door de aanwezigheid van natuurlijke of mechanische ventilatie en door de aanwezigheid van obstakels. Obstakels als muren en plafonds zorgen ter plaatse voor ophoping van waterstof. Het is daarom op voorhand niet te zeggen welke invloed de uitstroomrichting heeft op de verspreiding, omdat de verspreiding ook van veel andere factoren afhangt.

Omdat praktijkexperimenten met waterstof duur zijn, zijn computersimulaties uitgevoerd om het verspreidingsgedrag van waterstof in een kleine parkeergarage te onderzoeken (Hussein et al, 2020). Hierbij is gekeken naar de hoek waaronder waterstof uit een TPRD uitstroomt met een diameter van 2 mm, zie Figuur 4.1. Wanneer waterstof onder een hoek van 0° (ten opzichte van maaiveld) uitstroomt, ontstaat ter hoogte van de waterstofauto een ontvlambare wolk, terwijl deze bij een uitstroomhoek van 30° of 45° verder weg wordt geduwd. Dit is gunstig wanneer de bestuurder en andere inzittenden moeten vluchten.

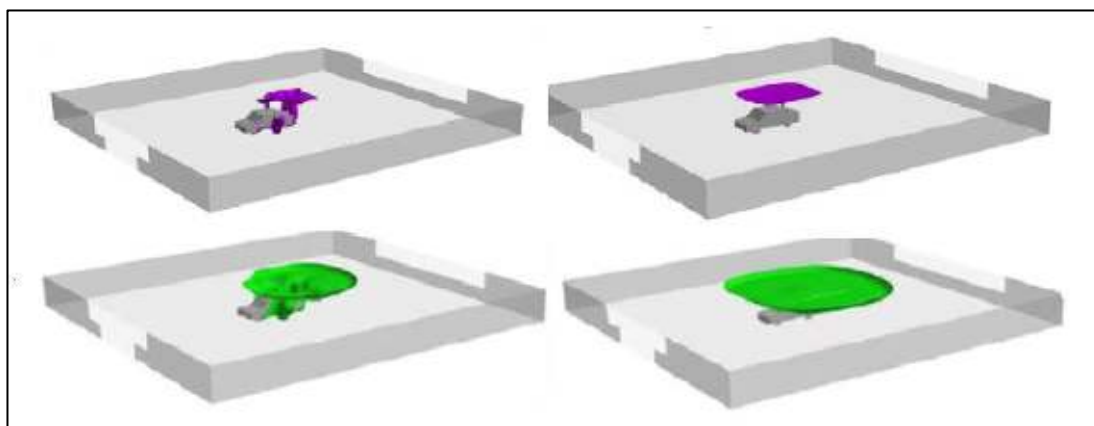


**Figuur 4.1** Afbeeldingen van dispersieberekeningen in een kleine half open parkeergarage bij uitstroming uit een 700 bar waterstoftank met een TPRD-diameter van 2 mm (links) en 0,5 mm (rechts). De waterstofconcentraties na 20 s zijn gegeven voor 1 vol.% H<sub>2</sub> (groen) en 4 vol.% H<sub>2</sub> (paars) voor drie verschillende uitstroomrichtingen. In de simulaties was geen sprake van mechanische ventilatie (Hussein et al, 2020)

Bij een TPRD met een diameter van 0,5 mm werden uitstromingen naar boven en naar beneden gesimuleerd, zie Figuur 4.2. De neerwaartse uitstroom (links in de figuur) geeft na 20



seconden een waterstofwolk in, om en boven de waterstofauto. Dit is ongunstig voor inzittenden wanneer zij moeten vluchten. De opwaartse uitstroom (rechts in de figuur) geeft een waterstofwolk onder het plafond van de parkeergarage.



**Figuur 4.2** Afbeeldingen van dispersieberekeningen in een kleine half open parkeergarage uit een 700 bar waterstoftank met een TPRD-diameter van 0,5 mm bij uitstrooming naar beneden (links in de figuur) en naar boven (rechts in de figuur). De waterstofconcentraties zijn gegeven na 20 s voor 1 vol.% (groen) en 4 vol.% (paars). In de simulaties was geen sprake van mechanische ventilatie (Hussein et al, 2020)

### 4.3.3 Gatgrootte

Bij een lekkage bepaalt de grootte van de opening (gat) de hoeveelheid waterstof die uitstroomt en daarmee de duur en de omvang van de uitstrooming. Hoe kleiner de opening, hoe minder waterstof vrijkomt, en hoe kleiner de waterstofwolk. In het ontwerp van de TPRD kan hier rekening mee worden gehouden, maar omdat het langer duurt voordat de waterstoftank leeg is (zie Figuur 4.3), moet de tijd die het duurt totdat de waterstoftank kan falen verbeterd worden. Dit heet de Fire Resistance Rate (FRR, zie paragraaf 4.4).

### 4.3.4 Materiaal waterstoftank

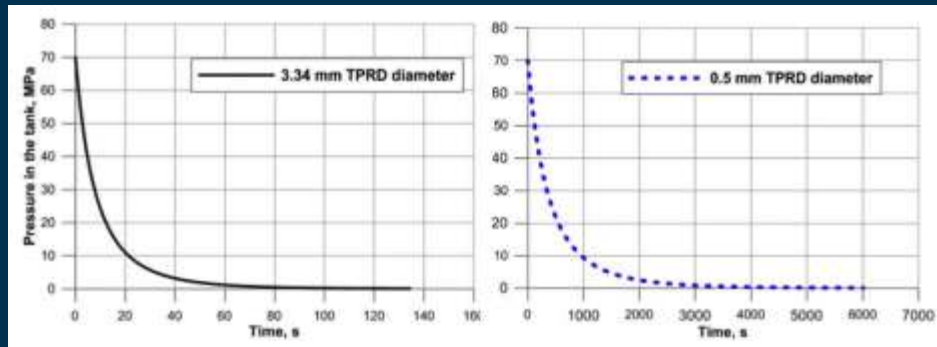
In het HyTunnel-project is men van mening dat het (veel) efficiënter is om een inherent veilige waterstofauto te ontwikkelen, dan om 'zwaar' te investeren in het aanpassen van bestaande gebouwen en het treffen van preventieve maatregelen in die gebouwen (Molkov et al, 2019). Om die reden wordt onderzoek gedaan naar het materiaal waaruit de waterstoftank wordt opgebouwd en is een waterstoftank ontwikkeld die bij brand waterstof zal lekken.<sup>9</sup> De hoeveelheid waterstof die dan uit de waterstoftank lekt, komt overeen met het lekdebiet van een TPRD met een diameter van 0,2-0,3 mm. Dit zorgt ervoor dat de omvang van de ontvlambare wolken veel kleiner wordt of zelfs dat de waterstofconcentraties onder de LFL blijven (Molkov, 2018; Hussein, 2020). Dergelijke waterstoftanks bevinden zich nog in het onderzoekstadium en zijn niet toegepast in de huidige waterstofauto's (Dijkhof, 2021)

### 4.3.5 Waterstofdruk

Bij een lekkage bepaalt ook de waterstofdruk de hoeveelheid waterstof die uitstroomt. Hoe hoger de druk, hoe groter de uitstroomsnelheid en hoe meer waterstof er uitstroomt. De meeste uitstroom vindt in het begin plaats, omdat de druk in de waterstoftank dan het hoogst is en afneemt zodra waterstof uitstroomt.

<sup>9</sup> Deze waterstoftank wordt een LNB-tank genoemd: Leak-No-Burst.

In het ontwerp van de TPRD is de diameter een belangrijke parameter. De diameter van de TPRD wordt mede bepaald door de inhoud van de waterstoftank: hoe groter de inhoud van de waterstoftank, hoe groter de diameter van de TPRD moet zijn om de inhoud van de waterstoftank tijdig te kunnen laten leegstromen. Een grote diameter van de TPRD heeft als nadeel dat een eventuele fakkel groot is. Een kleine diameter heeft als voordeel dat de hoeveelheid waterstof die per tijdseenheid uitstroomt veel kleiner is, waardoor het zelfs zo kan zijn dat de LFL niet bereikt wordt. Daar staat tegenover dat de waterstoftank langer bestand moet zijn tegen hittestraling (Hussein et al, 2020).



**Figuur 4.3** De drukval in een waterstoftank van 117 liter als functie van de tijd voor twee verschillende TPRD-diameters (Hussein et al, 2020)

De diameters van de TPRD's in waterstofauto's zijn confidentieel (Dijkhof, 2021). In de literatuur wordt aangegeven dat de diameter van TPRD's in 2019 zo'n 2-3 mm bedroeg en de jaren daarvoor 6 mm. De reden om naar kleinere diameters te gaan, was het feit dat de lengte van de waterstoffakkel evenredig is met de diameter van de TPRD. Met andere woorden; een kleinere TPRD-diameter geeft een kortere fakkel en leidt daardoor tot minder schade (Molkov et al, 2019).

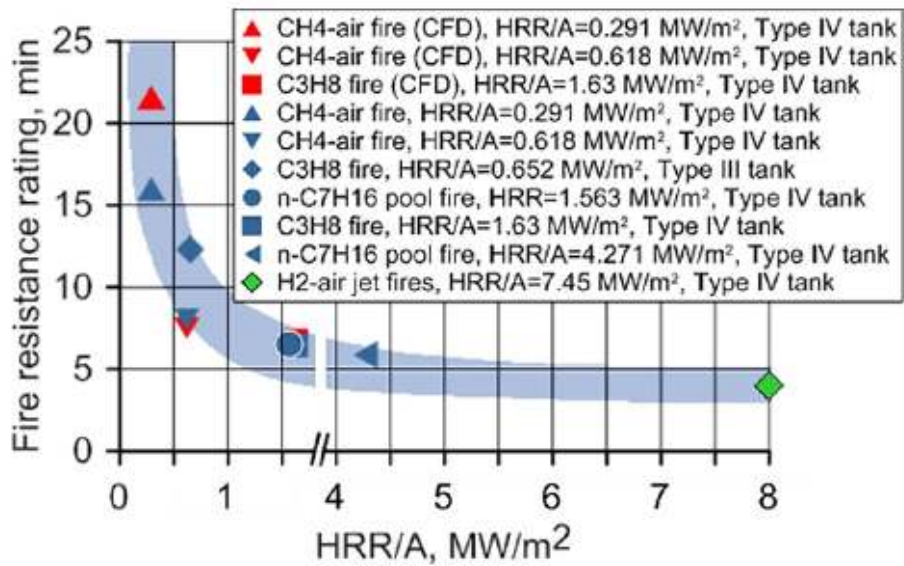
## 4.4 Brandoverslag

Deze paragraaf beschrijft een aantal aspecten die een belangrijke rol spelen in de snelheid waarmee brand kan overslaan van de ene auto op de andere.

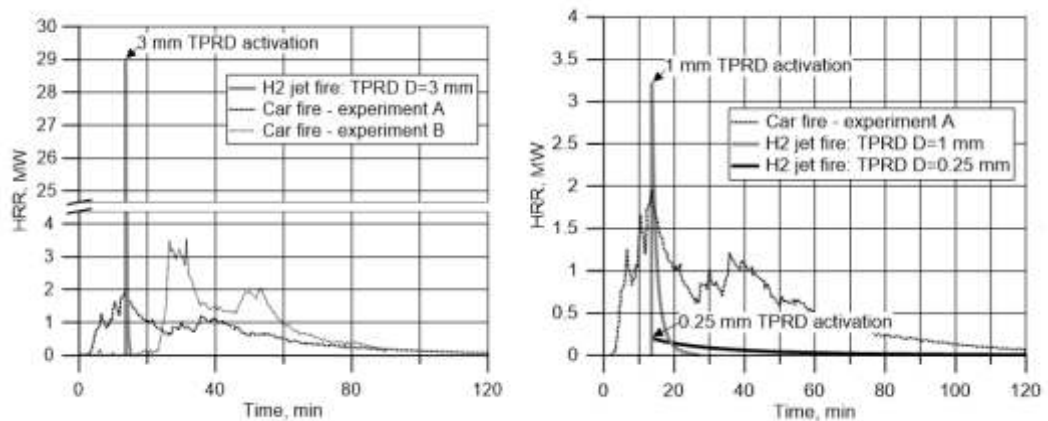
### 4.4.1 Intensiteit warmtestraling

De intensiteit van de warmte die op een waterstoftank straalt (Heat Release Rate (HRR) per  $m^2$ ), is bepalend voor de tijd die het duurt totdat de waterstoftank faalt (FRR). Bij testen waarbij waterstoftanks niet voorzien waren van een TPRD, is te zien dat naarmate de intensiteit van de brand toeneemt, de FRR afneemt, zie Figuur 4.4 (Molkov et al, 2019).

De hoeveelheid warmte die bij een autobrand vrijkomt (HRR), neemt toe wanneer een TPRD geactiveerd wordt en een fakkel ontstaat. Bij experimenten waarbij maximaal 3 MW aan energie vrij kwam, nam de hoeveelheid energie toe tot maximaal 29 MW bij het openen van een TPRD met een diameter van 3 mm, zie Figuur 4.5. Het verkleinen van de diameter van de TPRD zorgt er voor dat dit effect grotendeels teniet wordt gedaan.



Figuur 4.4 De tijd tot falen van de waterstoftank (FRR) als functie van de hoeveelheid warmte (*Heat Release Rate*) per m<sup>2</sup> (Molkov et al, 2019)



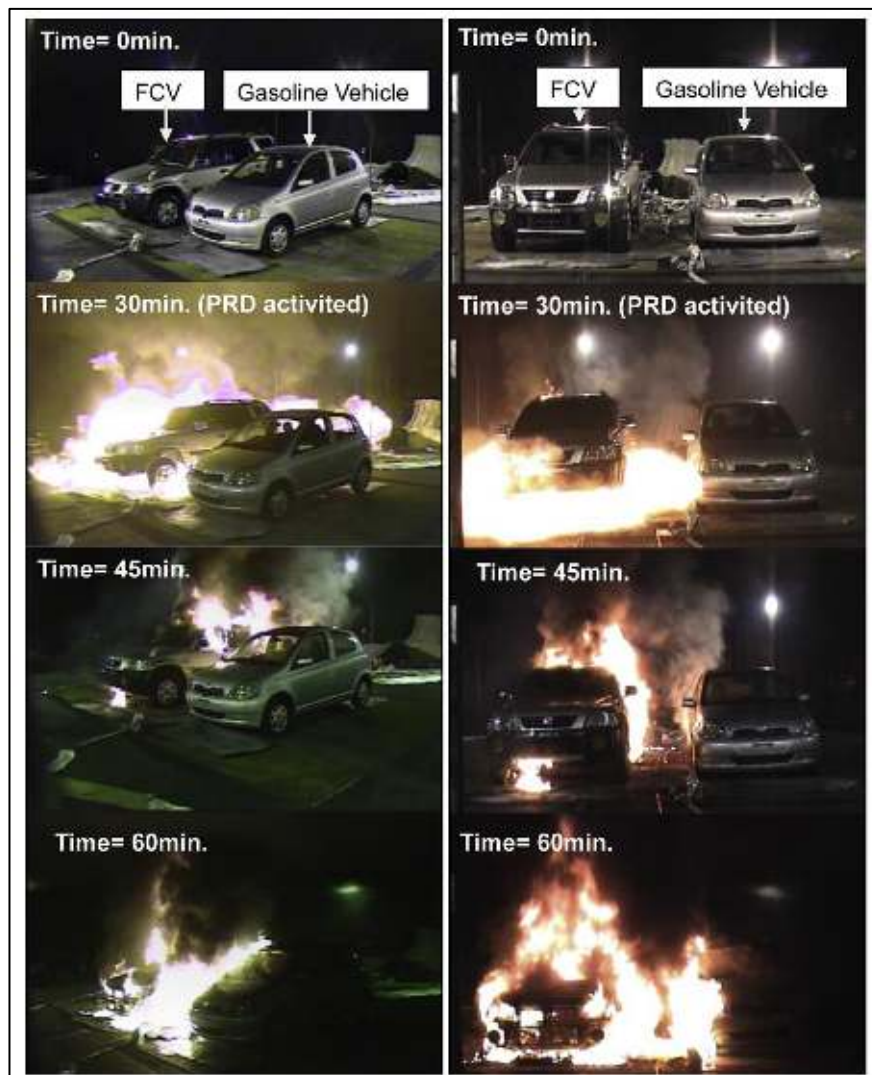
Figuur 4.5 De hoeveelheid warmte (HRR) die gedurende een autobrand vrijkomt (experimenten A en B) en wanneer een 3 mm TPRD (links) of een 0,25 mm c.q. 1 mm TPRD (rechts) een fakkel geven (Molkov et al, 2019)

Het is niet gezegd dat het openen van een TPRD en het ontstaan van een fakkel per definitie brandoverslag bevorderen. Bij experimenten in de open lucht werd een TPRD met een diameter van 4,2 mm na 30 minuten handmatig geactiveerd waardoor een fakkel ontstond die naar de grond gericht was en door afbuiging een vlammenzee gaf onder de waterstofauto. Deze vlammen bereikten de nabij geparkeerde conventionele auto echter niet (onderlinge afstand is 0,85 m). Pas na 58 minuten raakte de conventionele auto in brand en toen was de waterstofauto al bijna helemaal afgebrand, zie Figuur 4.6 (Tamura, 2014). De reden dat de naastgelegen conventionele auto niet in brand raakte, was dat de vlammen door het stijgend vermogen van waterstof afbogen naar boven en de conventionele auto niet raakten (zie Figuur 4.7) en de aanstraling te gering was om de naastgelegen auto te doen ontbranden.

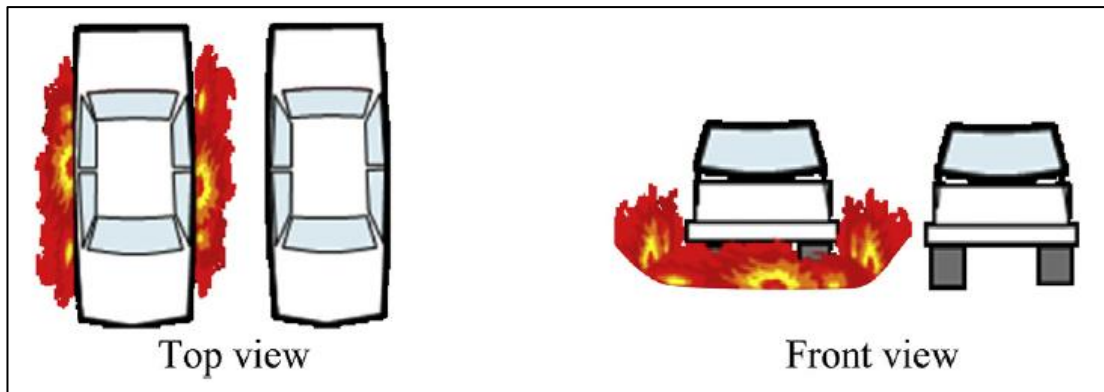
Ten opzichte van de open lucht kan in een parkeergarage de hitte van de fakkel minder goed weg waardoor de directe omgeving meer wordt opgewarmd. Het is daardoor niet uit te sluiten dat in een parkeergarage brandoverslag van een waterstofauto naar een naastgelegen auto plaats vindt. Een eerste simulatie met een TPRD van 5 mm laat dit zien (Markert et

al, 2019). Als de naastgelegen auto een waterstofauto is, zou in theorie de TPRD van die waterstoftank geactiveerd worden (Tamura et al, 2014). Experimenten in parkeergarages om brandoverslag van waterstofauto's naar andere auto's te onderzoeken, zijn echter nog niet beschreven in de literatuur.

De literatuur geeft aan dat de diameter van de TPRD's de laatste jaren kleiner is geworden. Hierdoor worden fakkels kleiner en kunnen de hierboven beschreven effecten ook kleiner worden. Zolang echter de diameter van de TPRD confidentieel is en er geen nieuwe experimenten beschreven worden, kan de mogelijkheid van brandoverslag in parkeergarages van waterstofauto's naar andere auto's niet uitgesloten worden.



Figuur 4.6 Foto's van experiment (Tamura et al, 2014)



Figuur 4.7 Afbuigen waterstoffakkels na activeren van de TPRD (Tamura et al, 2014)

#### 4.4.2 De grootte van de auto

De hoeveelheid warmte die op de waterstofauto straalt, is van belang voor het bepalen van de tijd tot het falen van de waterstoftank (FRR). Men zou verwachten dat een grotere en zwaardere auto meer warmte genereert, maar er is geen duidelijke relatie gevonden tussen de gewichtsklasse van auto's en de HRR (NFPA, 2020).

De HRR voor auto's ligt tussen de 2 en de 9 MW. Voor een auto van 4 m lang en 1,5 m hoog die aangestraald wordt, is de warmte intensiteit daarmee 0,3 - 1,5 MW/m<sup>2</sup>. Bij het mogelijk niet functioneren van de TPRD, zal het dan 5 tot 15 minuten duren voordat de waterstoftank bezwijkt.

#### 4.4.3 Kunststof

Modernere auto's bevatten steeds meer kunststof om gewicht te besparen en om bepaalde vormen in een auto te kunnen maken. Qua gewicht is het aandeel kunststof inmiddels zo'n 10% (NFPA, 2020). De toename van kunststof in auto's brengt een aantal gevolgen met zich mee:

- > een toename van de hoeveelheid warmte die vrijkomt bij een brand
- > auto's ontbranden eerder en verbranden sneller (NFPA, 2020).

### 4.5 Samenvatting

Het vrijkomen van waterstof leidt bij directe ontsteking tot een fakkels en bij vertraagde ontsteking tot een explosie. Veel factoren hebben invloed op de mate en ernst van deze effecten. Zo is de omgeving waarin waterstof vrijkomt een belangrijke factor. In parkeergarages zijn de effecten van een fakkels of een explosie groter dan in het vrije veld. De aanwezigheid en de mate van ventilatie kunnen echter voorkomen dat bij het vrijkomen van waterstof de LFL wordt bereikt.

De uitstroombcondities spelen ook een grote rol in de mate waarin waterstof vrijkomt en in het verspreidingsgedrag. Het betreft dan de inhoud van het waterstofhoudende systeem, de waterstofdruk, de gatgrootte, het materiaal waarvan de waterstoftank is gemaakt en de uitstroombcondities.

Onderzoek laat zien dat de veiligheid verder vergroot kan worden door de diameter van de TPRD te verkleinen in combinatie met het vergroten van de hittebestendigheid van de waterstoftank, of door het ontwikkelen van een waterstoftank die bij brand kleine hoeveelheden waterstof zal lekken.

In hoeverre een waterstofauto betrokken raakt bij een brand, wordt onder andere bepaald door de intensiteit van de brand. Hoe hoger de warmte-intensiteit, hoe eerder een TPRD geactiveerd wordt. De fakkel die ontstaat bij het openen van de TPRD, hoeft hierbij niet tot brandoverslag naar naastgelegen auto's te leiden.

# 5 Kansen

## 5.1 Inleiding

Risico's zijn het samenspel van de kansen op ongewenste gebeurtenissen en de effecten van die gebeurtenissen. Risico's zijn er in alle vormen en maten: er zijn gebeurtenissen met kleine kansen en grote effecten en er zijn gebeurtenissen met grote kansen en kleine effecten. Hoe groot een risico mag zijn en of het aanvaardbaar is, is niet altijd vastgelegd in wet- en regelgeving, en verschilt veelal per domein.

In de wetenschap wordt veel onderzoek gedaan naar de effecten van het vrijkomen van waterstof en de omstandigheden waaronder die effecten optreden, terwijl het voor het bepalen van de risico's net zo belangrijk is om een gevoel te krijgen voor kansen en waarschijnlijkheden. Er bestaat echter nu nog niet zoiets als 'de' kans of 'de' waarschijnlijkheid van de waterstofincidentscenario's van personenauto's, omdat er door gebrek aan gegevens veel onzekerheden zijn.<sup>10</sup> Er zijn nog te weinig waterstofauto's waarmee te weinig incidenten gebeuren om - statistisch gezien - betrouwbare kansen af te leiden zijn.<sup>11</sup> Iedere gebeurtenis in de gebeurtenissenbomen van Figuur 3.1 - Figuur 3.3 kent haar eigen onzekerheden waardoor de kans op een fakkel, explosie of geen effect uiteindelijk een kans is met een (behoorlijke) onzekerheidsmarge.

Dit hoofdstuk beschrijft wat in de literatuur te vinden is over kansen en waarschijnlijkheden (onderzoeksvraag 5) van de hieronder aangegeven gebeurtenissen. Dit zijn de gebeurtenissen uit de gebeurtenissenbomen van figuren 4.1 - 4.3:

- > botsing
- > brand
- > vrijkomen waterstof
- > aanspreken en falen TPRD
- > ontsteking

Zoveel als mogelijk zal aangegeven worden hoe de gegevens voor waterstofauto's zich verhouden tot de gegevens voor conventionele auto's. Zoals eerder gemeld, geeft die kwalitatieve vergelijking meer een indruk dan absolute zekerheid.

---

<sup>10</sup> 'De kans om getroffen te worden door een overstroming is eens in de 10.000 jaar.' De term 'kans' is hierbij een absoluut getal dat aangeeft hoe vaak een gebeurtenis per tijdseenheid kan plaatsvinden. De term 'waarschijnlijkheid' geeft de verhouding aan tussen het aantal keren dat een gebeurtenis zich kan voordoen ten opzichte van het totaal aantal mogelijkheden. De waarschijnlijkheid is daardoor een getal tussen de 0 en de 1. Voorbeeld: de waarschijnlijkheid dat met een dobbelsteen een 2 wordt gegooid, is 0,17 (1/6).

<sup>11</sup> Eind juli 2020 waren er 261 waterstofauto's in Nederland op bijna 8,7 miljoen personenauto's; dat komt overeen met 0,003%.

## 5.2 Botsing

### 5.2.1 Conventionele auto

De kans op een ongeval<sup>12</sup> met een conventionele auto in Nederland wordt geschat op  $7,7 \times 10^{-3}$  per auto per jaar. Dit getal moet gezien worden als ordegrrootte en is gebaseerd op de volgende cijfers:

- > 73.000 ongevallen met auto's en bestelbusjes in Nederland in 2017 (RWS, 2017)
- > 9,4 miljoen auto's en bedrijfswagen in Nederland in 2017 (CLO, 2018)

### 5.2.2 De oorzaken van een botsing van een conventionele auto

Volgens Amerikaans onderzoek is menselijk falen de belangrijkste oorzaak van een ongeval met een voertuig (NHTSA, 2015). Zo'n 94% van de ongevallen wordt veroorzaakt door de bestuurder, terwijl andere oorzaken het falen van het voertuig zelf en omgevingsfactoren<sup>13</sup> zijn (ieder 2%). Van 2% van de onderzochte ongevallen in Amerika is de directe oorzaak onbekend. Botsingen in parkeergarages gebeuren meestal bij bijzondere manoeuvres van voertuigen en menselijk falen ligt hier dus aan ten grondslag (Webb, 2020).

### 5.2.3 Waterstofauto's versus conventionele auto's

Er rijden in Nederland op dit moment 261 waterstofauto's (EVConsult, 2020) waar voor zover bekend één ongeval mee gebeurd is (Waterstofmagazine, n.b.).<sup>14</sup> Statistisch gezien zijn deze aantallen te klein om betrouwbare ongevalskansen voor waterstofauto's uit af te leiden.

Als aangenomen wordt dat menselijk falen de belangrijkste oorzaak is van een ongeval met een voertuig en als aangenomen wordt dat het gedrag van de bestuurder niet afhangt van het soort voertuig dat hij/zij bestuurt, betekent dit dat de kans op een ongeval met een waterstofauto vergelijkbaar is met de kans op een ongeval met een conventionele auto. De term 'vergelijkbaar' houdt in dat er onderling wel verschillen kunnen zijn, maar dat de kansen qua ordegrrootte gelijk zijn en statistisch gezien weinig van elkaar verschillen.

## 5.3 Brand

### 5.3.1 Conventionele auto

De kans op een brand in een conventionele auto in Nederland wordt geschat op  $4,3 \times 10^{-4}$  per auto per jaar. Dit getal moet gezien worden als ordegrrootte en is gebaseerd op de volgende cijfers:

- > 4004 autobranden in Nederland in 2017 (CVS, 2020)
- > 9,4 miljoen personenauto's en lichte bedrijfswagens in Nederland in 2017 (CLO, 2018).

Een beperkt deel daarvan vindt plaats in parkeergarages. Tussen 2006 en 2015 deden zich in Nederland gemiddeld zo'n 5 branden per jaar voor in parkeergarages (BZK, 2020). Het is onbekend hoeveel voertuigen hierbij betrokken waren. Niet altijd was een voertuigbrand daar de oorzaak van. Als aangenomen wordt dat alle branden in parkeergarages voertuigbranden betreffen en dat één voertuig bij de brand betrokken is<sup>15</sup>, is de kans dat een conventionele

<sup>12</sup> In dit rapport wordt onder een ongeval een ongeluk verstaan waarbij één of meerdere voertuigen betrokken zijn. Een ongeval is in veel gevallen een botsing, vandaar dat gegevens met betrekking tot ongevallen zijn toegepast op botsingen.

<sup>13</sup> Voorbeelden hiervan zijn weersomstandigheden of een slecht wegdek.

<sup>14</sup> Er is geen informatie over dit ongeval te vinden, waardoor de precieze toedracht niet achterhaald kon worden.

<sup>15</sup> In verreweg de meeste gevallen is slechts één auto bij een brand in een parkeergarage betrokken (Tohir, 2014).



auto brandt in een parkeergarage  $5,3 \times 10^{-7}$  per auto per jaar<sup>16</sup> (5/9.400.000) en is het aandeel autobranden in parkeergarages 0,12% (5/4004) van het totaal aantal autobranden.

Data van de NFPA geven aan dat in Amerika 1% van alle voertuigbranden plaatsvindt in 'storage locations'. Daaronder vallen showrooms maar ook parkeergarages (NFPA, 2020a). Wanneer de cijfers van de NFPA worden toegepast op de Nederlandse situatie, zouden er jaarlijks zo'n 40 autobranden moeten zijn in 'storage locations' (1% van 4004). Omdat het aandeel parkeergarages onbekend is, moet dit aantal als een bovengrens gezien worden. De bovengrens voor de kans op een brandende conventionele auto in een parkeergarage komt daarmee op  $4,3 \times 10^{-6}$  per jaar (40/9.400.000).

Cijfers uit Nieuw-Zeeland geven aan dat in de periode 2005-2012 de kans dat een voertuig brand vatte in een parkeergarage gelijk was aan  $1,2 \times 10^{-6}$  per jaar. Over de periode 1997-2003 was dit  $4,8 \times 10^{-6}$  per jaar (Tohir, 2014). In de literatuur wordt niet aangegeven waar deze reductie van een factor 4 door veroorzaakt werd.

### 5.3.2 Oorzaken van interne brand

De belangrijkste oorzaken van een interne brand bij conventionele auto's zijn brandstoflekages, fouten in het elektrisch circuit van een auto, een oververhitte motor, een oververhitte katalysator, brandstichting, botsingen<sup>17</sup>, slecht onderhoud en ontwerpfouten (NFPA, 2020b) (Mattheüs, 2016). Elektrische auto's kennen daarnaast batterijbrand als oorzaak van een interne brand (IFV, 2020b).

Het in brand steken van een auto is in een kwart van de gevallen de oorzaak van een autobrand in een parkeergarage (Li, 2004; Wijnhoven, 2009). De aanwezigheid van toezicht en/of van camera's verkleint de kans op brandstichting.

### 5.3.3 Oorzaken externe brand

Een voertuig dat geparkeerd staat in een parkeergarage, kan door direct vlamcontact of door aanstraling gaan branden als dichtbij een brand woedt. Dat kan brand in een voertuig betreffen dat ernaast geparkeerd staat ('traveling fire') of bijvoorbeeld een afvalcontainer waar brand in is gesticht (Mattheüs, 2018; BZK, 2020). De kans op dergelijke branden in parkeergarages neemt toe, doordat er meer polymeren worden toegepast in auto's en auto's groter worden (NFPA, 2020). Vanwege de lage ontstekings temperatuur van rubber, ontsteken de banden meestal als eerste.

### 5.3.4 Waterstofauto's versus conventionele auto's

Waterstofauto's hebben geen brandstofmotor en geen uitlaatsysteem met katalysatoren. Brand door falen van één van deze onderdelen is bij waterstofauto daarom uitgesloten. Lekkage van waterstof uit het waterstofsysteem kan wel voorkomen, zie paragraaf 5.4.

Op basis van de verzamelde gegevens lijkt de kans op een interne brand voor waterstofauto's kleiner te zijn dan voor conventionele auto's. De kans om *betrokken te raken* bij een externe brand zal voor waterstofauto's net zo groot zijn als voor conventionele auto's. Dit maakt dat de kans voor een waterstofauto om betrokken te raken bij een brand in een parkeergarage kleiner is dan die kans voor een conventionele auto.

<sup>16</sup> Het zou juister zijn om de kans op autobrand per bezoek aan een parkeergarage te berekenen, maar dit is bij gebreken aan gegevens niet mogelijk. In de literatuur wordt hier een waarde van  $1,71 \times 10^{-7}$  per bezoek voor gegeven (Li, 2004).

<sup>17</sup> Het betreft hier voertuigbranden op (snel)wegen.

## 5.4 Vrijkomen van waterstof

### 5.4.1 Conventionele auto

T.a.v. lekkage: bij een conventionele auto kan brandstof uit de tank of uit de leiding lekken, bijvoorbeeld door slecht onderhoud of door veroudering van het brandstofsysteem. Dat kan overal gebeuren en de kans hierop in een parkeergarage is niet anders dan wanneer de auto elders staat.

T.a.v. botsing: brandstoflekkage ten gevolge van een botsing is in een parkeergarage minder waarschijnlijk dan daarbuiten. Voertuigen beschikken over kreukelzones die ontworpen zijn om de kracht van de botsing te absorberen en om de inzittenden en belangrijke delen van het voertuig te beschermen. Daarnaast mag de snelheid in parkeergarage meestal niet boven de 15 km per uur uitkomen (RVV, 1990).

T.a.v. brand: veel conventionele auto's hebben een kunststof brandstoftank. Bij een plasbrand onder de auto zal de kunststof brandstoftank binnen 2 tot 5 minuten gaan lekken en bijdragen aan de plasbrand (NFPA, 2020).

### 5.4.2 Waterstofauto vs. conventionele auto

T.a.v. lekkage: Een faaloorzaak als veroudering wordt bij waterstofauto's beperkt door de eis dat het waterstofsysteem niet ouder mag zijn dan 15 jaar. Voor conventionele auto's geldt geen leeftijdseis voor het brandstofsysteem. Daarnaast wordt de integriteit van het gehele waterstofsysteem tijdens onderhoudsbeurten gecontroleerd (UN, 2013), wordt de druk in de diverse onderdelen van het waterstofsysteem gemonitord en is een waterstofauto op diverse plekken voorzien van waterstofdetectie. Bij het waarnemen van een waterstoflek zal de waterstofauto uitschakelen (De Vos, 2020).

T.a.v. botsing: Waterstoftanks zijn sterker dan de brandstoftanks van conventionele auto's, omdat waterstof in waterstoftanks onder hoge druk wordt opgeslagen (maximaal 700 bar overdruk), terwijl benzine en diesel bij omgevingsdruk wordt opgeslagen (0 bar overdruk). Een waterstoftank moet echter veel hogere drukken dan 700 bar aankunnen (ruim 1500 bar, zie paragraaf 2.2.1). Verwacht wordt dat waterstoftanks door hun sterkte en stijfheid niet alleen bestand zijn tegen de interne druk in de tank, maar ook tegen externe impact van een botsing (zie ook kader op volgende bladzijde). Daar komt bij dat bij waterstofauto's veiligheidsmaatregelen zijn ingebouwd om bij botsing of bij het kantelen van de waterstofauto de afvoer van waterstof te stoppen, zodat uitstroom naar buiten toe voorkomen wordt (UN, 2013).

T.a.v. brand: waterstofauto's hebben een kunststof tank die onder invloed van hitte zal degraderen. Daarin verschillen conventionele auto's en waterstofauto's niet van elkaar. De consequenties bij een waterstofauto zijn echter groter dan bij een conventionele auto, vandaar de aanwezigheid van een TPRD om in geval van brand waterstof gecontroleerd te laten vrijkomen.

Op basis van deze overwegingen, wordt de kans op het vrijkomen van waterstof klein geacht en is deze kans naar verwachting bovendien kleiner dan de kans op het vrijkomen van brandstof bij een conventionele auto.

Bij een botsing met een waterstofauto komt een rijdende auto opeens tot stilstand. De krachten die op de waterstofauto worden uitgeoefend, worden beschreven met de formule:

$$F = m \times a \quad [2]$$

De kracht  $F$  (N) is gelijk aan de massa  $m$  (kg) maal de versnelling  $a$  ( $m/s^2$ ). Bij een botsing is de versnelling het snelheidsverschil voor en na de botsing, gedeeld door de tijd die het kost om tot stilstand te komen:

$$a = \Delta v / \Delta t \quad [3]$$

Het combineren van formules [2] en [3] geeft:

$$F = m \times \Delta v / \Delta t \quad [4]$$

Wanneer een auto met 15 km/uur (4,2 m/s) botst tegen een waterstoftank van 25 kilo en de duur van de botsing 0,01 s is, dan is de kracht die op de waterstoftank wordt uitgeoefend:<sup>18</sup>

$$F = 25 \times 4,2 / 0,01 = 10.500 \text{ N}$$

Deze kracht wordt verdeeld over het contactoppervlak met de waterstoftank. Stel dat het contactoppervlak 0,3 m<sup>2</sup> bedraagt, dan is druk die op het contactoppervlak van de waterstoftank wordt uitgeoefend:

$$P = F/A = 10.500/0,3 = 35.000 \text{ N/m}^2 = 0,35 \text{ bar}$$

Het is niet te verwachten dat een waterstoftank, die een interne druk aan kan van meer dan 1500 bar, zal falen door een externe druk van minder dan 1 bar.

## 5.5 Aanspreken en falen van de TPRD

Voertuigen op LPG of CNG hebben een voorziening op de brandstoftank om bij een te hoge tankdruk de inhoud van de tank gecontroleerd te laten vrijkomen. Een brandstoftank voor benzine of diesel heeft een dergelijke veiligheidsvoorziening niet, omdat de effecten van het vrijkomen van benzine of diesel kleiner zijn dan de effecten die mogelijk zijn bij het vrijkomen van waterstof.

Waterstofauto's hebben een TPRD als veiligheidsvoorziening op de waterstoftanks om te voorkomen dat de druk in de tank te hoog wordt bij aanstralen (zie paragraaf 2.2.1). Ondanks dat TPRD's beproefd worden ten behoeve van typegoedkeuringen, is de kans op falen niet nul. Een TPRD kan op twee manieren falen:

- > de TPRD opent terwijl er geen brand in de buurt is (unintended opening)
- > de TPRD opent niet, terwijl er wel een brand in de buurt is.

Over de faalkansen van beide manieren zijn in de literatuur nauwelijks gegevens bekend en ook navraag bij experts leverde niets op (De Vos, 2021) (Dijkhof, 2021). De gegevens in deze paragraaf zijn dan ook afkomstig van een beperkt aantal publicaties. In die publicaties worden bij gebrek aan gegevens data van vergelijkbaar systemen ('analogon') gebruikt. Een dergelijke aanpak is niet ongewoon (RIVM, 2012).

### 5.5.1 Openen van de TPRD bij afwezigheid van brand

De kans bestaat dat een TPRD in werking treedt, terwijl er geen brand is die de TPRD heeft geactiveerd. Dit kan gebeuren bij forse botsingen, maar de oorzaak van de inwerkingtreding van een TPRD is echter niet altijd te achterhalen (Sunderland, 2008) (Dadashzadeh, 2018).

<sup>18</sup> Hierbij is geen rekening gehouden met de kreukelzone die een gedeelte van de impact absorbeert.

Gezien de lage maximum snelheid in parkeergarages (15 km/uur), zijn botsingen met veel impact niet te verwachten.

In de literatuur wordt de waarschijnlijkheid dat een TPRD in werking treedt bij afwezigheid van een brand, geschat op  $6,0 \times 10^{-3}$ , dat wil zeggen dat van de duizend TPRD's er zes zullen openen. Deze waarde is bij gebrek aan goede data gebaseerd op gegevens van veiligheidssystemen in de procesindustrie waarbij op drukverandering wordt gereageerd in plaats van op temperatuur (Saw, 2016), de zogeheten 'pressure relieve devices' (PRD). Deze waarde is bijna drie keer zo hoog als de waarde ( $2,2 \times 10^{-3}$ ) die gevonden wordt voor het falen van de PRD van CNG-tanks in voertuigen bij afwezigheid van brand (Berghmans, 2014).

Wetenschappelijk gezien is het niet juist om PRD's uit de procesindustrie als analogon te gebruiken voor TPRD's van waterstofauto's, omdat er te veel verschillen zijn tussen beide systemen (uitvoeringen, onderhoudsregime, procescondities, intensiteit van het gebruik etcetera). Het enige dat overeenkomt, is de *functie* van beide systemen. De PRD van een CNG-tank is ook geen goed analogon, maar kent al wat meer overeenkomsten met de TPRD van een waterstoftank. Een waarde voor het falen van een TPRD van  $2,2 \times 10^{-3}$  kan daarom gebruikt worden als conservatieve bovengrens. Wanneer in de toekomst meer gegevens beschikbaar komen, kan de daadwerkelijke faalkans beter afgeleid worden.

### 5.5.2 Niet openen van de TPRD bij brand

Bij een brand bij een waterstoftank, bestaat de kans dat TPRD niet opent. De belangrijkste oorzaak hiervoor is het lokaal aanstralen van de waterstoftank (Ruban et al, 2012; Ehrhart et al, 2020). Als het lokaal aanstralen van de waterstoftank op enige afstand van de TPRD gebeurt, kan de temperatuurstijging nabij de TPRD onvoldoende zijn om deze te activeren. Hierdoor krijgt de brand de kans om de waterstoftank aan te tasten, omdat het composietmateriaal op het aangestraalde deel van de waterstoftank de koolstofvezels niet meer kan vasthouden. De waterstoftank verliest daardoor zijn sterkte en kan exploderen.

De mogelijkheid tot lokaal aanstralen wordt in de literatuur echter betwist, omdat:

- > waterstoftanks omgeven worden door de carrosserie van de waterstofauto;
- > de kans verwaarloosbaar geacht wordt dat een tank van minder dan één meter afstand lokaal aangestraald wordt;
- > plasbranden zich verspreiden en geen lokaal karakter hebben;
- > een lokale brand van de auto (bijvoorbeeld van een band) zich snel uitbreidt naar de gehele auto (Ehrhart, 2020).

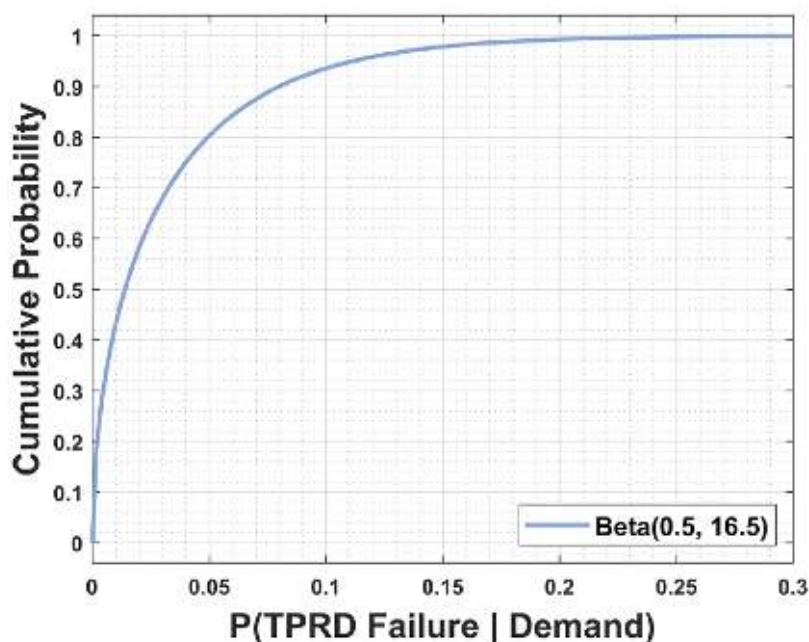
Bij een waterstofauto die op zijn kant ligt, is lokale aanstraling mogelijk, maar gezien de lage snelheden in een parkeergarage, is die kans verwaarloosbaar (zie voetnoot 6).

Van enkele incidenten met CNG-tanks is bekend dat de PRD niet functioneerde door een blokkerend systeem (Sunderland, 2008) of doordat de PRD te traag reageerde (NHTSA, 2010). In hoeverre deze faaloorzaken van toepassing zijn op TPRD's bij waterstoftanks, is niet duidelijk omdat de exacte werking en de lay-out van de TPRD's in de huidige waterstofauto's onbekend zijn:

- > Als een TPRD reageert bij 110 °C, moet het mechanisme van de TPRD er voor zorgen dat toevoer van waterstof vanuit de waterstoftank mogelijk wordt. Hier worden veren of zuigers voor gebruikt die door corrosie of vuil niet of onvoldoende kunnen werken (Heise, 2014). Het is onbekend of dit faalmechanisme bij de huidige TPRD's mogelijk is.

- > De huidige TPRD's op waterstoftanks bestaan uit een glazen ampul met vloeistof (De Vos, 2021; Dijkhof, 2021). Dit type TPRD reageert sneller op temperatuurstijging dan TPRD's die zijn uitgevoerd met een smeltzekering.
- > De uitstroomopening van een TPRD is een pijpje dat afgesloten is met een dopje (De Vos, 2021) of een sticker (Dijkhof, 2021). Dit houdt vuil en vocht buiten, maar blokkeert de uitstroom van waterstof niet.<sup>19</sup>

Zoals eerder is aangegeven, zijn in de literatuur nauwelijks gegevens bekend over de faalkansen van TPRD's. Doordat er veel onzekerheden zijn<sup>20</sup> en waarden voor faalkansen een zekerheid suggereren die er niet is, wordt in de literatuur de voorkeur gegeven aan onzekerheidsgebieden. Dit principe heeft men toegepast bij de statistische bepaling van de faalkansen van TPRD's (Ehrhart, 2020). In vijf verschillende onderzoeken tussen 2006 en 2017 werden in totaal zestien waterstoftanks volledig aangestraft. De TPRD's op deze waterstoftanks werden in alle proeven geactiveerd en functioneerden als bedoeld. Op basis hiervan is men tot de statistische onzekerheidsverdeling gekomen die te zien is in Figuur 5.1.



**Figuur 5.1** Onzekerheidsverdeling voor de waarschijnlijkheid dat de TPRD bij aanspraak faalt.

Op basis van de hierboven genoemde gegevens is de waarschijnlijkheid van het falen van de TPRD altijd 0,3 of lager. Of anders gezegd: de waarschijnlijkheid dat 'de waarschijnlijkheid van het falen van de TPRD op aanspraak' 0,3 of kleiner is, is gelijk aan 1. Wanneer de zekerheid niet 100% (1) maar 99% (0,99) mag bedragen, wordt 'de waarschijnlijkheid van het falen van de TPRD op aanspraak' kleiner, namelijk 0,2. En met een zekerheid van 94% wordt gesteld dat 'de waarschijnlijkheid van het falen van de TPRD op aanspraak' maximaal 0,1 is.

Deze cijfers moeten gezien worden als een indicatie, aangezien het aantal experimenten beperkt is en de waterstoftanks en de TPRD's uit 2006-2017 naar de huidige maatstaven mogelijk niet representatief zijn. Door het toepassen van grote onzekerheidsintervallen, worden

<sup>19</sup> Let op: de uitstroomopening van een TPRD moet niet verward worden met de opening in de TPRD die open gaat zodra de TPRD geactiveerd wordt.

<sup>20</sup> Voorbeelden van onzekerheden zijn het type TPRD, de leeftijd van de TPRD, het onderhoudsregime, de beschikbaarheid en validiteit van gegevens etc.

cijfers hoger dan ze in werkelijkheid zijn, maar daar staat tegenover dat cijfers robuust zijn en nauwelijks veranderen mocht er bijvoorbeeld sprake zijn van een falende TPRD bij een volgend experiment.

Voor een veiligheidsmaatregel als een TPRD leidt bovengenoemde statistische aanpak tot een niet realistische waarde. Het is te verwachten dat het 95% betrouwbaarheidsinterval voor het falen van de TPRD smaller wordt en veel lager komt te liggen zodra in de toekomst meer gegevens beschikbaar komen. Tot die tijd zal per situatie (bijvoorbeeld voor een risico-inschatting) bekeken moeten worden of en hoe de hierboven beschreven statistische benadering toegepast kan worden en welke faalkans voor een TPRD op basis daarvan gehanteerd kan worden.

## 5.6 Ontsteking

De kans op ontsteking is de som van de kans op directe ontsteking en de kans op vertraagde ontsteking. De kans op ontsteking is een waarde die tussen de 0 en 1 ligt. Het is erg lastig om de ontstekingskansen voor waterstof te bepalen. Het ontbreekt vaak aan voldoende gegevens en daarnaast zijn gegevens vaak niet compleet (Moosemiller, 2011). Zo gaf het Health and Safety Laboratory in 2015 aan dat het op basis van de beschikbare literatuur over zeer ontvlambare stoffen geen directe ontstekingskansen voor waterstof kon vinden (HSL, 2015).

Bij gebrek aan goede gegevens zijn in de literatuur pogingen gedaan formules te ontwikkelen waarmee kansen op directe ontsteking en op vertraagde ontsteking kunnen worden berekend (Moosemiller, 2011). De uitkomsten van deze formules zijn een benadering en kunnen alleen als indicatie worden beschouwd.

De meest voorkomende oorzaak van ontsteking is statische ontlading, bijvoorbeeld door een vonk (HSL, 2008). De kans op statische ontlading wordt gerelateerd aan de energie die vrijkomt en die is gerelateerd aan parameters als procesdruk en uitstroomsnelheid. Hoe meer energie er vrijkomt, hoe groter de kans op directe ontsteking. De kans op statische ontlading wordt gegeven door formule 4:

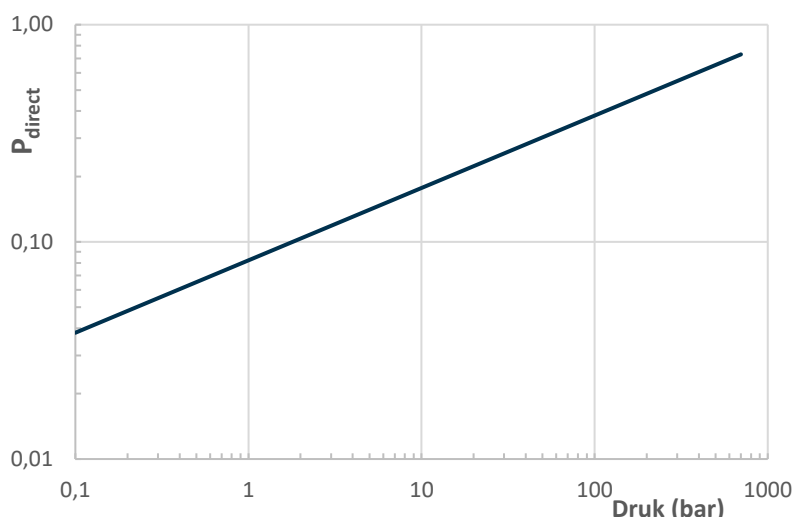
$$P_{\text{statische ontlading}} = 0,0024 \times \frac{(P)^{1/3}}{(MOE)^{2/3}} \quad [4]$$

Met:

P = druk in psi (1 psi = 0.069 bar)

MOE = minimum ontstekingsenergie in mJ

In Figuur 5.2 staat de formule grafisch weergegeven, waarbij de procesdruk is omgezet van psi naar bar en een minimum ontstekingsenergie gehanteerd is van 0,019 mJ. Bij een procesdruk van 700 bar ( $\approx 10.000$  psi) is volgens deze formule de kans op directe ontsteking behoorlijk groot, namelijk 0,73.



**Figuur 5.2 De kans op directe ontsteking als functie van de procesdruk**

Onderzoek naar incidenten in de procesindustrie waarbij waterstof is vrijgekomen, laat zien dat bij 4 van de 81 incidenten sprake was van vertraagde ontsteking. Van de overige 77 incidenten wordt aangenomen dat deze direct zijn ontstoken (Astbury et al, 2007).<sup>21</sup> Deze cijfers uit de procesindustrie moeten gezien worden als een indicatie, omdat het nog maar de vraag is in hoeverre de onderzochte systemen gezien kunnen worden als analogon voor waterstoftanks.

Bovenstaande onderzoeken duiden erop dat er bij het vrijkomen van waterstof bij grote druk, een relatief grote kans op directe ontsteking is. Daar staat tegenover dat in HyRAM (software dat door Sandia National Laboratories ontwikkeld is), lagere waarden voor de kansen op directe en vertraagde ontsteking worden gehanteerd, zie Tabel 5.1 (Groth et al, 2015). Een database van DNV staat aan de basis van deze cijfers en die laat zien dat de kans op ontsteking voor koolwaterstoffen 0,01 is bij uitstroomsnelheden kleiner dan 1 kg/s. Op basis hiervan zijn voor HyRAM ontstekingskansen voor waterstof afgeleid, waarbij gebruik is gemaakt van de verschillen en overeenkomsten tussen waterstof en methaan (Tchouvelev et al, 2006).

**Tabel 5.1 Ontstekingskansen voor waterstof in HyRam (Groth et al, 2015).**

Debiet (kg/s)	$P_{\text{direct}}$	$P_{\text{vertraagd}}$
< 0,125	0,008	0,004
0,125 – 6,25	0,053	0,027
> 6,25	0,230	0,120

Brandstoffen als benzine en diesel kennen een kans op directe ontsteking, maar geen kans op vertraagde ontsteking. De kans op directe ontsteking is voor benzine 0,065 en voor diesel 0,01 (RIVM, 2021). De grote verschillen in de literatuur voor de ontstekingskansen van wa-

<sup>21</sup> Het gegeven dat er 0 waterstofincidenten zonder ontsteking in de database staan, wil niet wil zeggen dat die incidenten er niet zijn geweest. Omdat er geen effecten zijn waargenomen, kunnen dergelijke incidenten niet zijn opgenomen in de database.

terstof roepen vraagtekens op en zorgen ervoor dat een vergelijking met de ontstekingskansen van brandstoffen niet mogelijk is. Verder literatuuronderzoek is nodig om meer zicht te krijgen op de totstandkoming en aannames van de ontstekingskansen van waterstof.

## 5.7 Samenvatting

De gegevens die verzameld zijn in dit hoofdstuk, geven in absolute zin geen zekerheid over de kansen en waarschijnlijkheden van het vrijkomen van waterstof uit een waterstofauto. Zolang waterstofauto's nog geen gemeengoed zijn waardoor empirische gegevens ontbreken, blijven aannames en gegevens van andere, vergelijkbare systemen nodig. In dit onderzoek is dat gedaan door waterstofauto's te vergelijken met conventionele auto's. De resultaten van deze vergelijking staan verzameld in Tabel 5.2 en moeten gezien worden als een indicatie.

**Tabel 5.2 Vergelijking waterstofauto en conventionele auto**

Gebeurtenis	Kans of waarschijnlijkheid waterstofauto t.o.v. conventionele auto
Botsing	Gelijk
Brand	Kleiner
Vrijkomen brandstof	Kleiner of gelijk
Aanspreken en falen TPRD	N.v.t.
Ontsteking	Onduidelijk

De conclusie is dat op basis van de verzamelde gegevens de kans dat waterstof vrijkomt in een parkeergarage niet groter – en waarschijnlijk zelfs kleiner - is dan de kans dat brandstof vrijkomt in een parkeergarage. Daar staat tegenover dat de ontstekingskansen van waterstof groter lijkt te zijn dan die voor brandstoffen als benzine en diesel, maar omdat de literatuur grote verschillen laat zien, is het niet verstandig om uitspraken te doen over de ontstekingskansen van waterstof. Daar is meer en grondiger onderzoek voor nodig, waarbij de omstandigheden waaronder experimenten zijn gedaan, met elkaar vergeleken moeten worden.



# Bronnen

- > Adams, P. et al. (2011). Allowable hydrogen permeation rate from road vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 36, Issue 3, 2742-2749.
- > Astbury, G.R. et al. (2007). Spontaneous ignition of hydrogen leaks: A review of postulated mechanisms. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 2178-2185.
- > Barth, R.R. et al (2013). [Polymers for hydrogen infrastructure and vehicle fuel systems: Applications, properties, and gap analysis](#). Sandia National Laboratories, rapport SAND2013-8904.
- > Berghmans, J. et al. (2014). Safety aspects of CNG cars. *Procedia Engineering* 84, 33-46.
- > Brooks, D. et al (2019). [Implementation of uncertainty in analysis of hydrogen vehicles in tunnels](#).
- > Centrum voor Verzekeringsstatistiek. (CVS, 2020). [Aantal autobranden blijft stijgen](#).
- > Choi, J. et al. (2013). A CFD simulation of hydrogen dispersion for the hydrogen leakage from a fuel cell vehicle in an underground parking garage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 8084 – 8091.
- > Cirrone, D.M.C. (2018). [Hazards from catastrophic failure of high-pressure hydrogen storage](#). Proefschrift Faculty of Computing, Engineering and the Built Environment, Ulster University.
- > Compendium voor de Leefomgeving. (CLO, 2018). [Aantal motorvoertuigen - 990-2017](#).
- > Dadashzadeh, M. et al. (2018). Risk assessment methodology for onboard hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 6462 – 6475.
- > Dijkhof, P. (2021). Telefonisch gesprek met expert van KIWA die participeert in GTR 13, d.d. 21 januari 2021.
- > Ehrhart, B.D. et al. (2020). Risk Assessment of hydrogen fuel cell electric vehicles in tunnels. *Fire Technology*, 56, 891-912.
- > Euro NCAP. (2018). [Test results Hyundai NEXO](#).
- > Europese Unie. (EU, 2019). [Reglement nr. 134 van de Economische Commissie voor Europa van de Verenigde Naties \(VN/ECE\) - Uniforme voorschriften voor de goedkeuring van motorvoertuigen en onderdelen daarvan wat de veiligheidsprestaties van voertuigen op waterstof \(HFCV\) betreft \[2019/795\]](#).
- > EVConsult. (2020). *EV Monitor – Personenauto's*. Geraadpleegd op 18 november 2020 van <https://datastudio.google.com/reporting/1sqzGyjORyvtlp8bpyiAGYWYlyl2nkH-N/page/ljQX>.
- > Groth, K.M. et al (2015). *Methodology for assessing the safety of Hydrogen Systems: HyRAM 1.0 technical reference manual*. SAND2015-10216, Sandia National Laboratories, Albuquerque.
- > Health and Safety Laboratory. (HSL, 2008). [Spontaneous ignition of hydrogen – Literature review](#). Rapport RR615, Health and Safety Executive.
- > Health and Safety Laboratory. (HSL, 2015). *Review of the event tree structure and ignition probabilities used in HSE's pipeline risk assessment code MISHAP*, Research Report RR1034.
- > Heise, A. (2014). [Glass bulb thermally-activated pressure relief device, safety inspection method, and equipment](#). Patent US20130146147A1.

- > Hussein, H. et al (2020). Dispersion of hydrogen release in a naturally ventilated covered car park. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 23882 – 23897.
- > Hysafe. (2005). [Deliverable D24: Report on Phenomena/ Scenario Ranking: Results of the PIRT \(Phenomena Identification and Ranking Table\) exercise.](#)
- > Hyundai. (n.d.) *What Makes Fuel Cell Electric Vehicles Safe?* Geraadpleegd op 24 november van <https://tech.hyundaimotorgroup.com/article/what-makes-the-fuel-cell-electric-vehicle-safe/>.
- > Instituut Fysieke Veiligheid. (IFV, 2020a). [Veiligheidsaspecten van waterstof in een besloten ruimte.](#) Arnhem: IFV.
- > Instituut Fysieke Veiligheid. (IFV, 2020b). [Brandveiligheid van parkeergarages met elektrisch aangedreven voertuigen.](#) Arnhem: IFV.
- > International Code Council. (ICC, 2018). [Significant Changes to the IMC 2018 Edition - Mechanical Ventilation of Enclosed Parking Garages.](#)
- > Jonkman, M. (2015). [Gasdetectie in parkeergarages in theorie en praktijk - Volgens de Nederlandse norm NEN 2443: 2013.](#)
- > Kashkarov, S. et al. (2019). *Composite pressure vessel for hydrogen storage.* European patent No. 18706224.
- > Li, Y. (2004). [Assessment of vehicle fires in New Zealand parking buildings.](#) Afstudeerscriptie Universiteit van Canterbury.
- > Li, Z.Y. et al. (2015). [CFD study of the unignited and ignited hydrogen release from TPRD under a fuel cell car.](#) International Conference on Hydrogen Safety (ICHS), Yokohama.
- > Makarov, D. en Molkov, V. (2009). *Modelling of dispersion following hydrogen permeation for safety engineering and risk assessment.* II International Conference on Hydrogen Storage Technologies, Moskou, d.d. 28-29 oktober 2009.
- > Markert, F. & Giuliani, L. (2019). [Hydrogen-fueled car fire spread to adjacent vehicles in car parks.](#) Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Hydrogen Safety, Adelaide.
- > Mattheüs, B. (2016). [Literature study: A traveling fire in an open car park - A case study of the car park of Designer Outlet Centre Roermond.](#)
- > Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties. (BZK, 2020). [Beantwoording vragen van de leden Beckerman en Laçin \(beiden SP\) over brandgevaar in parkeergarages en onder woningen.](#) Kamerbrief 2020-0000138658.
- > Molkov, V. et al (2018). [Leak-no-burst \(LNB\) safety technology for Type IV tanks.](#) UN GRT#13 IWG SGS meeting. Brussel.
- > Molkov et al. (2019). [Deliverable 1.2 HyTunnel - Report on hydrogen hazards and risks in tunnels and similar confined spaces.](#)
- > Moosmiller, M. (2011). Development of algorithms for predicting ignition probabilities and explosion frequencies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24, 259-265.
- > National Fire Protection Association. (NFPA, 2020a). [Modern vehicle hazards in parking structures and vehicle carriers.](#) Rapport FPRF-2020-07.
- > National Fire Protection Association. (NFPA, 2020b). [Vehicle Fires.](#)
- > National Highway Traffic Safety Administration. (NHTSA, 2010). [Localized fire protection assessment for vehicle compressed hydrogen containers.](#)
- > National Highway Traffic Safety Administration. (NHTSA, 2015). [Critical reasons for crashes investigated in the national motor vehicle crash causation survey.](#)
- > Netbeheer Nederland. (2019). *Betrouwbaarheid van gasdistributienetten in Nederland - Resultaten 2018.* Versie: 098, kenmerk: GT-190045.

- > Olthof, P. & Scheerder, R. (2011). [Brandscenario's geparkeerd? – Onderzoek naar brandscenario's in ondergrondse parkeergarages](#). Afstudeerrapport Hanzehogeschool Groningen.
- > Pape, D. et al. (2015). [Compressed hydrogen container fuelling option for crash testing](#). Rapportnummer DOT HS 812 133. Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration.
- > Ramirez, J.P.B. et al. (2015). 700 bar type IV high pressure hydrogen storage vessel burst – Simulation and experimental validation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 13183-13192.
- > Reglement verkeersregels en verkeerstekens 1990 (RVV 1990), artikel 45.<sup>22</sup>
- > Ren, R. et al. (2019). Statistical analysis of fire accidents in Chinese highway tunnels 2000–2016. *Tunnelling and Underground Space Technology* 83, 452 – 460.
- > Reuther, J.J. et al. (2013). [Post-crash hydrogen leakage limits and fire safety research](#). National Highway Traffic Safety Administration. Rapportnummer DOT HS 811 816. Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration.
- > Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. (RIVM, 2012). [Protocol aanpassing rekenmethodieken Externe Veiligheid](#). RIVM-rapport 620550009/2012.
- > Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. (RIVM, 2021). [Handleiding Risicoberekening Bevi](#). Versie 4.3.
- > Rijkswaterstaat. (RWS, 2017). [Verkeersveiligheid en ongevallencijfers](#).
- > Rivard, E. et al. (2019). [Hydrogen Storage for Mobility: A Review](#). *Materials*, 12, 1973.
- > Rodionov, A. (2011). Risk assessment of hydrogen explosion for private car with hydrogen-driven engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 2398 – 2406.
- > Ruban, S. et al (2012). Fire risk on high-pressure full composite cylinders for automotive applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 17630-17638.
- > Salva, J.A. et al. (2012). Safety study of a hydrogen leak in a fuel cell vehicle using computational fluid dynamics. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 5299 – 5306.
- > Saw, J.L. et al. (2016). [The EU FireComp project and risk assessment of hydrogen composite storage applications using bow-tie analysis](#). Hazards 26 Edinburg
- > Sunderland, P.B. (2008). [Pressure relief devices for hydrogen vehicles](#). Third European summer school on hydrogen safety.
- > Tamura, Y. et al (2014). The spread of fire from adjoining vehicles to a hydrogen fuel cell vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 6169 – 6175.
- > Tchouvelev, A. et al. (2006). [Comparative risk estimation of compressed hydrogen and CNG refuelling options](#). Canadian Hydrogen Association workshop on building Canadian strength with hydrogen systems Proceedings, 538. Canada: Canadian Hydrogen Association.<sup>23</sup>
- > Tohir, M.Z.M. et al (2014). [Development of fire scenarios for car parking buildings using risk analysis](#). Fire Safety Science – Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Symposium, 944-957.
- > Ustolin, F. et al. (2020). Loss of integrity of hydrogen technologies: a critical review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 23809 – 23840.
- > United Nations. (2013). [UN Global Technical Regulation No.13 \(Hydrogen and fuel cell vehicles\)](#).

<sup>22</sup> Dit artikel geldt voor woonerven, maar wordt ook vaak voor parkeergarages gebruikt.

<sup>23</sup> In de technische handleiding van HyRAM wordt verwezen naar een publicatie die online niet beschikbaar is (A. V. Tchouvelev. (2006). Risk assessment studies of hydrogen and hydrocarbon fuels, fuelling stations: Description and review, *International Energy Agency Hydrogen Implementing Agreement Task 19*). Van de auteur is wel de hier aangegeven publicatie gevonden, waar uitleg wordt gegeven over de afleiding van ontstekingskansen voor waterstof.

- > Vos, M. de. (2020). Mailverkeer met technisch specialist van Hyundai, d.d. 2 december 2020.
- > Vos, M. de. (2021). Telefoongesprek met technisch specialist van Hyundai, d.d. 18 januari 2021.
- > Waterstofmagazine (jaar niet bekend). Link functioneert niet meer: <https://www.waterstofmagazine.nl/11-nieuws/915-nederland-ongeluk-met-waterstofauto-in-groningen>.
- > Webb, G. (2020). *Parking Lot Accidents: Who's Fault Is It?* Geraadpleegd op 29 november 2020 van <https://www.insurancehotline.com/resources/fault-determination-in-a-parking-lot-accident/>.
- > Wijnhoven, P. et al. (2009) [Risico's bij brand in parkeergarages](#). *TVVL-magazine* 7-8, 12-17.