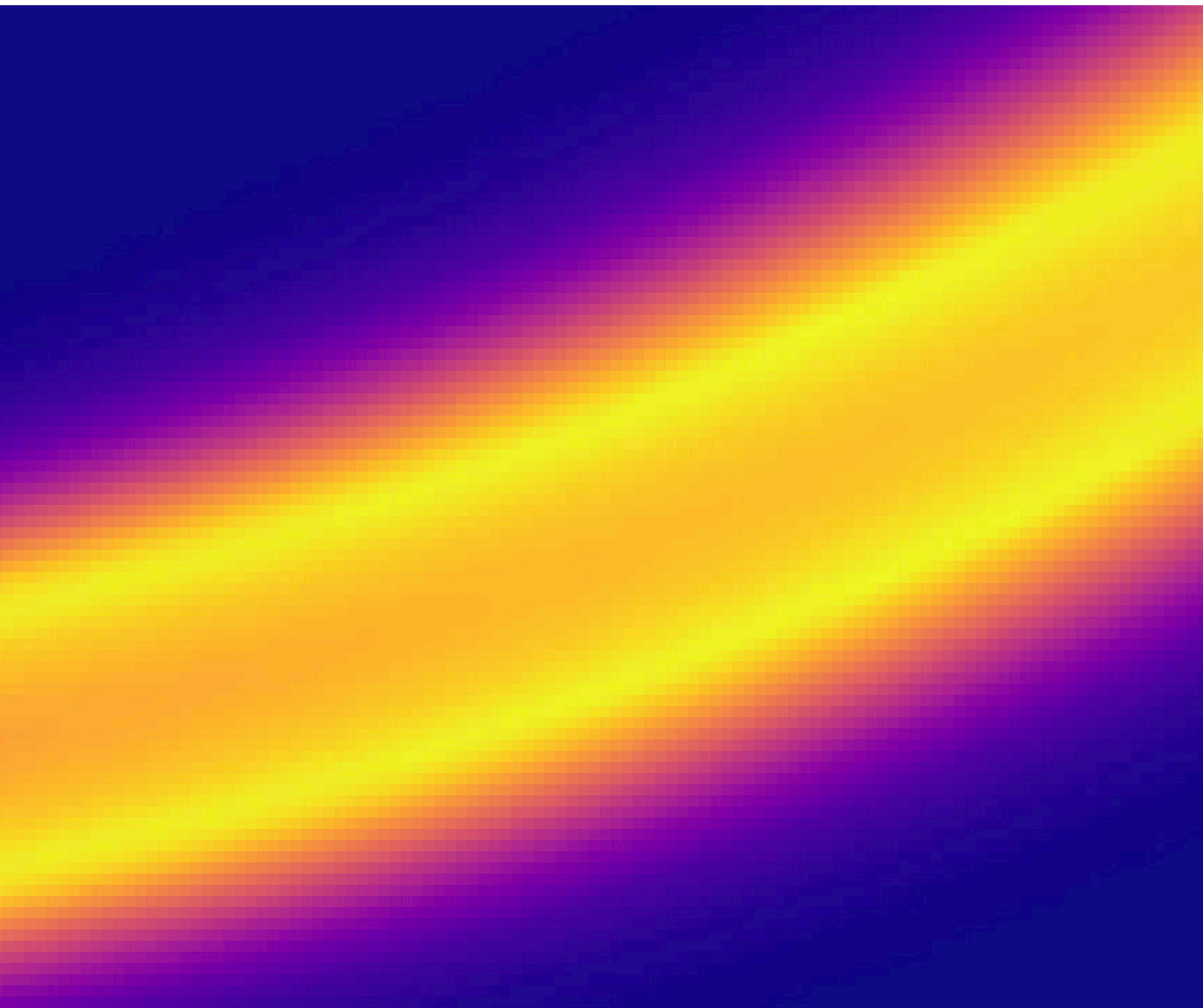


Berekeningen aan waterstoffakkeLS met behuIp van HyRAM



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). *Berekeningen aan waterstoffakkels met behulp van HyRAM*. Arnhem: IFV.

Titel:	Berekeningen aan waterstoffakkels met behulp van HyRAM
Datum:	17 september 2021
Status:	Definitief
Versie:	1.0
Auteur en projectleider:	dr. M.B. Spoelstra
Review en eindverantwoordelijk:	dr. Ir. N. Rosmuller
Afbeelding voorpagina:	Detail van temperatuurplot van een waterstoffakkel

Voorwoord

Waterstof wordt steeds vaker genoemd als een essentiële energiebron en -drager die bij kan dragen aan de energietransitie in Nederland. Zoals bekend, heeft waterstof zijn eigen specifieke veiligheidskenmerken, die het noodzakelijk maken dat waterstoftoepassingen goed begrepen moeten worden.

Een manier om begrip te krijgen is door de gevolgen van waterstofincidenten – in dit rapport fakkels en stralingsintensiteiten – te modelleren. Dat is gedaan met behulp van HyRAM, een gratis verkrijgbare modelleringstool van Sandia Laboratories. Want ook dat is relevant onderzoek en innovatie in relatie tot de veilige energietransitie: het toepassen van (nieuwe) instrumenten en het analyseren van de uitkomsten van modelberekeningen van bijvoorbeeld alternatieve brandstoffen. Dergelijke inzichten kunnen behulpzaam zijn bij zowel het ontwikkelen van risicobeheersingsmaatregelen als bij de incidentbestrijding en de voorbereiding daarop.

Dergelijke studies zijn zeker niet eenvoudig. De hulp van Sandia Laboratories gedurende het modelleren en van DNV bij het beoordelen van de resultaten zijn dan ook van grote waarde gebleken. Kennis zit op tal van plekken en samenwerking met externen (ook door middel van reviews) is nodig om betrouwbare stappen vooruit te maken en bij te dragen aan de veilige energietransitie.

Nils Rosmuller
Lector Energie en transportveiligheid

Inhoud

	Inleiding	5
1	HyRAM	8
1.1	Het doel van HyRAM	8
1.2	De werking van HyRAM	8
2	Fakkeltberekeningen	10
2.1	Inleiding	10
2.2	Fakkellengte	10
2.3	Warmtestraling	17
3	Conclusies en aanbeveling	22
3.1	Conclusies	22
3.2	Aanbeveling	24
	Literatuur	25
	Bijlage 1 Meetgegevens	27
	Bijlage 2 Validatiedetails	29

Inleiding

Aanleiding

Waterstof staat in het kader van de energietransitie volop in de belangstelling, omdat waterstof energie kan opslaan en kan vervoeren waardoor energie gebruikt kan worden waar en wanneer dat nodig is. Daarnaast kunnen (zware) voertuigen rijden op waterstof in combinatie met een brandstofcel en kan waterstof aardgas vervangen voor het verwarmen van woningen. De toename van de aanwezigheid van waterstof in de samenleving roept echter vragen op over het veilig gebruiken van waterstof. Op basis van de kennis en ervaring die het IFV met waterstof heeft opgedaan (IFV, 2020a, 2020b, 2021a en 2021b), is geconstateerd dat er betrekkelijk weinig gegevens beschikbaar zijn over de effecten van het vrijkomen van waterstof. De effecten die op kunnen treden bij het vrijkomen van gasvormig waterstof, zijn een fakkel, een wolkbrand of een explosie (IFV 2021a). Er is in het veld behoefte aan informatie over de mogelijke effecten en de bijbehorende effectafstanden, aangezien deze gegevens tot nu toe ontbreken.¹

In Nederland worden effecten van het vrijkomen van gevaarlijke stoffen berekend met rekenpakketten als SAFETI-NL, PHAST of EFFECTS. Om deze rekenpakketten te kunnen gebruiken, zijn kennis en ervaring nodig en moeten jaarlijks licentiekosten worden betaald. Daardoor worden deze rekenpakketten maar door een beperkt aantal professionals in Nederland gebruikt.

Sinds 2015 is het rekenpakket HyRAM (Hydrogen Risk Assessment Model) beschikbaar. Dit pakket is ontwikkeld om alléén effect- en risicoberekeningen op het gebied van gasvormig waterstof te kunnen doen (Sandia, 2021). Dit rapport beschrijft een onderzoek waarbij met behulp van HyRAM de lengte van waterstoffakkel en de bijbehorende effectafstanden worden berekend. De kennis die hiermee wordt opgedaan, is relevant voor het beoordelen van veiligheidsrisico's door overheden, bedrijfsleven en kenniscentra.

Doel

Het doel van dit onderzoek is om te bepalen of HyRAM voor het IFV en voor de adviseurs vanuit de veiligheidsregio's een geschikt instrument is om berekeningen aan waterstoffakkel te doen, op basis waarvan adviezen gegeven kunnen worden.

Onderzoeksvragen

1. Hoe zijn de werking en de wetenschappelijke onderbouwing van HyRAM?

¹ Deze kennishiaten werden geconstateerd door de Praktijkgroep Instrumenten Omgevingsveiligheid (PriO van het RIVM), door het Waterstof Veiligheid Innovatie Programma (WVIP) en door Netbeheer Nederland.

2. Wat is de lengte van waterstoffakkels bij diverse combinaties van waterstofdruk en gatgrootte?²
3. Wat zijn de effectafstanden van waterstoffakkels voor stralingsniveaus van 3 kW/m², 10 kW/m² en 35 kW/m²?
4. Hoe valide zijn de resultaten van HyRAM voor wat betreft de fakkellengte en stralingsniveaus?
5. Is HyRAM wat betreft gebruik en qua resultaten een geschikt instrument om berekeningen aan waterstoffakkels te doen?

De geschiktheid van HyRAM wordt bepaald aan de hand van de volgende indicatoren (RIVM, 2012):

- > *Transparantie*: in hoeverre bestaat er helderheid over de gebruikte methodes van HyRAM?
- > *Verifieerbaarheid*: in hoeverre zijn de bronnen toegankelijk waar in HyRAM naar wordt gerefereerd?
- > *Robuustheid*: zijn uitkomsten reproduceerbaar of in grote mate afhankelijk van de interpretatie en expert judgement van de gebruiker?
- > *Validiteit*: zijn de aannames en de uitgangspunten van de berekeningen juist en verschaffen de resultaten van de berekeningen inzicht in de omvang van de effecten?

Daarnaast worden ook de volgende indicatoren gebruikt:

- > *Beschikbaarheid*: wat zijn de voorwaarden om over HyRAM te kunnen beschikken?
- > *Gebruiksgemak*: hoe gebruiksvriendelijk is HyRAM voor het doen van berekeningen door gebruikers met kennis van het vrijkomen van gevaarlijke stoffen?

De eerste vier indicatoren zijn wetenschappelijk gezien het belangrijkste en wegen in de bepaling van de geschiktheid van HyRAM zwaarder dan de beschikbaarheid en het gebruiksgemak.

Onderzoeksmethode

Het onderzoek is in drie fasen uitgevoerd:

1. Het leren kennen en begrijpen van het rekenpakket HyRAM.
Het zich eigen maken van een rekenpakket kost tijd en roept vragen op. Door te oefenen en door gevoeligheidsberekeningen te doen, is kennis over en ervaring met HyRAM opgedaan. Waar nodig werd hulp ingeroepen van Sandia National Laboratories, de ontwikkelaar van HyRAM.
2. Het uitvoeren van effectberekeningen aan diverse combinaties van waterstofdruk en gatgrootte.
De eigen kennis plus de kennis en ervaring die opgedaan zijn in de eerste fase van het onderzoek, zijn gebruikt om bij diverse combinaties van waterstofdruk en gatgrootte de lengte van de waterstoffakkel te berekenen. Ook zijn in deze fase de maximale afstanden tot een drietal stralingscontouren bepaald.
3. Het valideren van de resultaten van HyRAM.
Om te bepalen of de resultaten van HyRAM valide zijn, zijn deze vergeleken met gegevens uit de literatuur en met de resultaten van berekeningen met EFFECTS.³

² Met gatgrootte wordt de diameter van de uitstroomopening bedoeld en niet het oppervlak dan deze opening.

³ Het IFV beschikt niet over SAFETI-NL, het rekenpakket voor het berekenen van de omgevingsveiligheidsregio's van inrichtingen en buisleidingen met gevaarlijke stoffen.

Afbakening

De berekeningen zijn uitgevoerd aan gasvormig waterstof, omdat HyRAM niet geschikt is om berekeningen aan vloeibaar waterstof uit te voeren.

Leeswijzer

Hoofdstuk 1 beschrijft de opzet en de werking van HyRAM. Hoofdstuk 2 gaat in op de opzet van de berekeningen, geeft de resultaten van de berekeningen weer en beschrijft de validatie van de berekeningen. De conclusies van het rapport staan samengevat in hoofdstuk 3.

1 HyRAM

HyRAM staat voor 'Hydrogen Risk Assessment Models' en is een rekenprogramma dat ontwikkeld is door Sandia National Laboratories in opdracht van het Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office (HFTO) van het Amerikaanse Department of Energy (DoE). In dit hoofdstuk wordt uitgelegd hoe en met welk doel HyRAM tot stand is gekomen, hoe het programma werkt, hoe het gevalideerd is en voor welke situaties, welke berekeningen met HyRAM gedaan kunnen worden en wat de voor- en nadelen van HyRAM zijn.

1.1 Het doel van HyRAM

Voor veel professionals die met veiligheidsvraagstukken over waterstof van doen hebben, zijn de toegang tot gegevens, wetenschappelijke modellen en software niet vanzelfsprekend beschikbaar, omdat hiervoor betaald moet worden. Zij kunnen niet rekenen aan het vrijkomen van waterstof en kunnen zelf geen risicoanalyses opstellen, maar zijn daarvoor afhankelijk van andere (commerciële) partijen. Projecten, ontwikkelingen of het geven van adviezen kunnen daardoor vertraging oplopen en om dit te voorkomen, heeft de Amerikaanse overheid opdracht gegeven HyRAM te ontwikkelen (Sandia, 2021). Hierdoor hebben professionals wereldwijd de beschikking over een gratis rekentool die opgesteld is aan de hand van wetenschappelijke inzichten en modellen (Padilla, 2016).

1.2 De werking van HyRAM

Met HyRAM kunnen effect- en risicoberekeningen gedaan worden aan het vrijkomen van gasvormig waterstof onder hoge druk, zowel binnen als buiten. HyRAM is bijvoorbeeld gebruikt om veiligheidsafstanden bij waterstoftankstations te berekenen (Hirayama et al, 2019) of om de pluim te modelleren bij uitstroom in werkplaatsen van garages (Harris, 2021). HyRAM is open source software en maakt voor de eigenschappen van en het rekenen aan waterstof gebruik van CoolProp. Dat is software waarmee de relatie tussen grootheden als volume, temperatuur en druk berekend kunnen worden.

HyRAM is een semi-empirisch model: het bevat generieke informatie, algoritmen en wiskundige modellen die afkomstig zijn uit de literatuur en afgeleid zijn uit experimenten met waterstof en/of uit simulaties. Semi-empirische modellen kunnen alleen worden toegepast op de specifieke onderwerpen die door middel van experimenten zijn onderzocht, omdat de uitkomsten van die experimenten de basis vormen voor de modellen. Waar HyRAM gegevens gebruikt die niet gevalideerd zijn, geeft HyRAM de gebruiker de keuze uit verschillende modellen (Ehrhart et al, 2020).

De technische handleiding van HyRAM beschrijft op welke manier gegevens zijn verkregen of zijn afgeleid. Deze beschrijving wordt op hoofdlijnen gegeven en bevat de wiskundige formules die voor de berekeningen worden gebruikt; voor de rest wordt verwezen naar de brongegevens uit de literatuur. Dit kunnen meetgegevens van experimenten zijn waaraan de

uitkomsten van HyRAM gefit zijn. De brongegevens zijn niet altijd accuraat: een presentatie over fakkelexperimenten op een congres is niet vindbaar, maar lijkt naderhand in een artikel in een tijdschrift gepubliceerd te zijn.

2 Fakkelberekeningen

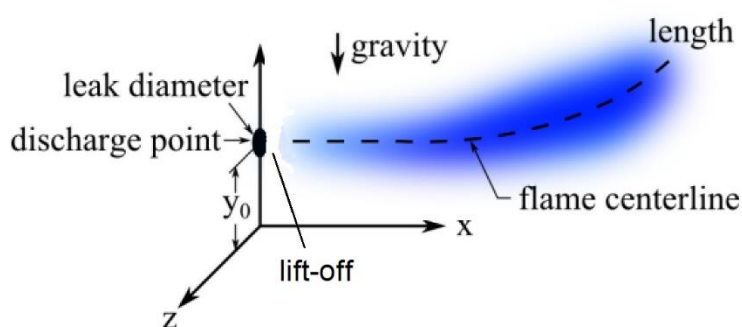
2.1 Inleiding

Omdat de toepassingen van waterstof zo divers zijn, zijn de drukken waarmee met waterstof gewerkt wordt ook divers. De range gaat van 30 mbar bij gebruik in woningen via 700 bar bij opslag in een waterstofauto tot 1000 bar voor industriële doeleinden. Dit heeft invloed op de lengte van de waterstoffakkel als zich een lekkage met ontsteking voordoet. De vlammen kunnen namelijk variëren van microvlammen van enkele millimeters tot fakkels van tientallen meters. Hulpverleners kunnen bij hun adviestaken of bij incidenten met deze waterstoffakkels te maken krijgen. Kennis over de lengte van waterstoffakkels en over de warmtestraling zijn voor hulpverleners van belang, omdat zij op basis van die kennis uitgangspunten voor een veilige inzet kunnen opstellen en in hun adviezen op het gebied van omgevingsveiligheid hun aanbevelingen kunnen onderbouwen.

2.2 Fakkellengte

2.2.1 Theorie

- > De lengte van een waterstoffakkel wordt met name bepaald door de druk in het waterstofsysteem en door de grootte van de opening waardoor waterstof naar buiten stroomt. De fakkellengte is de afstand vanaf de uitstroomopening tot aan de tip van de fakkel, gemeten langs de centrumlijn van de fakkel. HyRAM gebruikt diverse modellen om de fakkellengte te berekenen. Zo zijn er modellen voor uitstroming uit cirkelvormige openingen, voor expansie tot atmosferische druk en voor de vorming van een fakkel. Om de rekentijd te verkorten, maakt HyRAM in de modellen gebruik van fictieve uitstroomopeningen ('notional nozzles') (Ehrhart et al, 2020).⁴



Figuur 2.1 Schematische weergave van een horizontale fakkel (bron: Ehrhart, 2020)

- > De richting van de fakkel wordt bepaald door de impuls waarmee waterstof vrijkomt en door het drijvend vermogen van waterstof (IFV, 2020a). Wind heeft ook invloed op de

⁴ Een notional nozzle bevindt zich fictief buiten het systeem dat waterstof bevat. Het oppervlak van een notional nozzle is groter dan het oppervlak van het eigenlijke uitstroompunt. Bij een notional nozzle is geen sprake meer van expansie van het uitstromend gas en is het uitstroomdebiet gelijk aan dat van het eigenlijke uitstroompunt.

richting van de fakkel, maar in HyRAM wordt wind niet meegenomen (Ehrhart et al, 2020).

- > Een fakkel begint meestal niet bij de uitstroomopening, maar op een zekere afstand daarvan. Deze afstand ('lift-off') wordt groter naarmate de uitstroomopening en/of de druk in het waterstofsysteem groter worden. HyRAM berekent de fakkellengte inclusief lift-off, maar dit wordt niet aangegeven in de resultaten (Hecht, 2021).
- > De lengte van een waterstoffakkel wordt beïnvloed wanneer de fakkel een obstakel tegenkomt of parallel aan een oppervlak brandt. In het eerste geval wordt de fakkel korter en in het tweede geval langer (Bénard et al, 2016). Dergelijke omstandigheden komen in binnensituaties vaker voor dan in buitensituaties.
- > Bij horizontale uitstroming heeft een uitstroombuigter dicht bij een oppervlak dus invloed op de lengte van de fakkel (HyTunnel, 2019). Dit effect is groter naarmate de uitstroomopening kleiner wordt. Bij een waterstofdruk van 200 bar is een afstand van 1 m tussen de uitstroomopening en het oppervlak voldoende om dit effect teniet te doen (HyResponder, 2021).
- > De lengte van een waterstoffakkel neemt in de tijd af wanneer het debiet afneemt ten gevolge van de steeds lager wordende druk in het waterstofbevattende systeem. Als de inhoud van het systeem groot is en de uitstroomopening relatief klein, zal de waterstoffakkel langere tijd aan kunnen houden.

2.2.2 Uitgangspunten van de berekeningen

In Tabel 2.1 staan de uitgangspunten en de invoerwaarden gegeven van de variabelen die in de berekeningen met HyRAM zijn gebruikt. In de berekeningen is steeds het standaard model ('default') van HyRAM voor notional nozzles gebruikt.

Tabel 2.1 Variabelen voor de fakkelberekeningen met HyRAM

Variabele	Waarde	Onderbouwing
Uitstroombuigter en hoogte warmtestraling	1 m	Deze hoogte wordt in risicoberekeningen gezien als leefniveau (RIVM, 2021a).
Uitstroomrichting	Horizontaal	De warmtestraling van een horizontaal gerichte fakkel reikt op leefniveau verder dan een verticaal of schuin gerichte fakkel en geeft daarom de grootste effectafstanden.
Temperatuur	15 °C	Standaardwaarde HyRAM.
Waterstofdruk	8 bar 40 bar 350 bar 700 bar	Maximale waterstofdruk in distributieleidingen. Tussenwaarde om overgang van 8 bar naar 100 bar te vullen. Waterstofdruk in tanks van zware voertuigen. Waterstofdruk in tanks van waterstofauto's.
Gatgrootte (diameter)	0,1 mm 0,2 mm 0,5 mm 1 mm 2 mm 5 mm 10 mm 20 mm	Een brede range om zowel kleine als grote lekken door te kunnen rekenen.

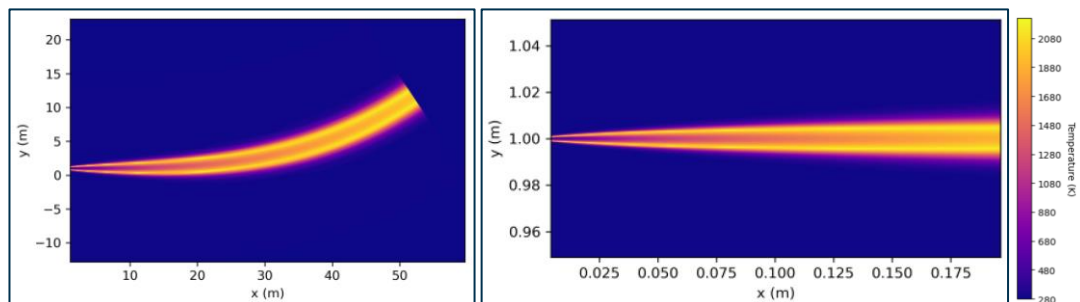
Variabele	Waarde	Onderbouwing
Warmtestraling	3 kW/m ² 10 kW/m ² 35 kW/m ²	3 kW/m ² is de grens voor inzet van de brandweer (LEC Brzo, 2009), 10 kW/m ² is de grens voor 1% letaliteit en 35 kW/m ² is de grens voor 100% letaliteit, steeds voor een blootstellingsduur van 20 s (IFV, 2020c).

Hoewel de factor tijd geen variabele is in HyRAM, is het belangrijk om te weten dat de fakkellengte en de warmtestraling bepaald worden op $t = 0$ s, dat wil zeggen: het moment dat waterstof vrijkomt. Dit geeft de grootste afstanden.

Voor het bepalen van de fakkellengte wordt niet de lengte aangehouden als gemeten langs de centrumlijn, maar de geprojecteerde lengte op de x-as.

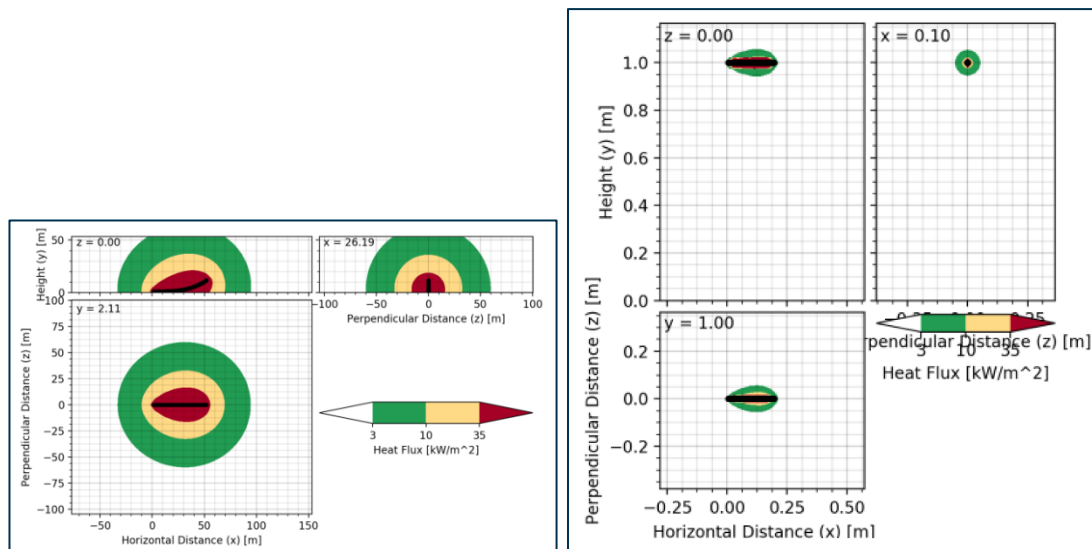
Met HyRAM kunnen geen fakkelberekeningen worden gedaan aan systemen met een druk die lager is dan 1 bar, omdat het programma dan foutmeldingen geeft. HyRAM is bedoeld voor waterstofsyste­men met een hoge druk (Ehrhart, 2021). Berekeningen met waterstofdrukken die gebruikt worden in leidingen in woningen (30 mbar) en naar woningen (100 mbar) bleken niet mogelijk te zijn.

In Figuur 2.2 en Figuur 2.3 zijn ter illustratie de resultaten gegeven zoals HyRAM die genereert voor de grootste en de kleinste fakkel die in dit onderzoek doorgerekend zijn. Figuur 2.2 toont de temperatuurplots en Figuur 2.3 de warmtestraling van de waterstoffak­kels. Bij de uitstroomopening is de snelheid van waterstof het grootst en heeft het stijgend vermogen van waterstof meestal geen vat op de richting van de fakkel. Naarmate de waterstoffakkel langer is en snelheid verliest, krijgt het stijgend vermogen van waterstof meer vat op de richting van de fakkel en buigt de fakkel af naar boven (links in Figuur 2.2).⁵



Figuur 2.2 Temperatuurplots van twee waterstoffak­kels. Links 700 bar, gatgrootte 20 mm en rechts 8 bar, gatgrootte 0,5 mm

⁵ In Figuur 2.2 is te zien dat het uiteinde van de fakkel niet taps toeloopt, maar als het ware afgeplat wordt. Dit komt omdat HyRAM het temperatuurprofiel stopt wanneer de zichtbare vlam­lengte is bereikt (Ehrhart, 2021).

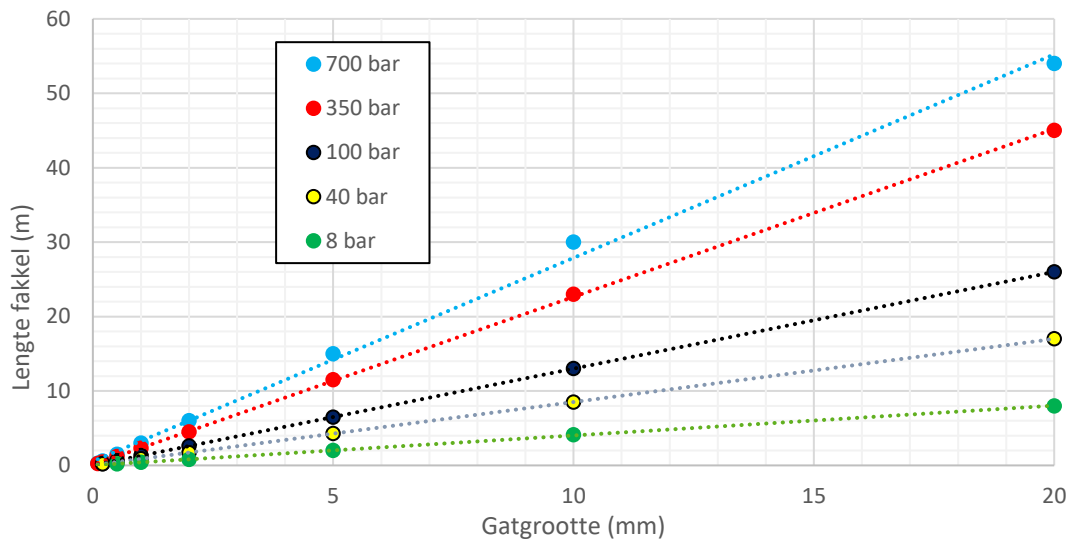


Figuur 2.3 Warmtestraling van twee waterstoffakkels. Links 700 bar, gatgrootte 20 mm en rechts 8 bar, gatgrootte 0,5 mm. Per situatie worden een bovenaanzicht (xy-vlak), een zijaanzicht (xz-vlak) en een vooraanzicht (yz-vlak) gegeven.

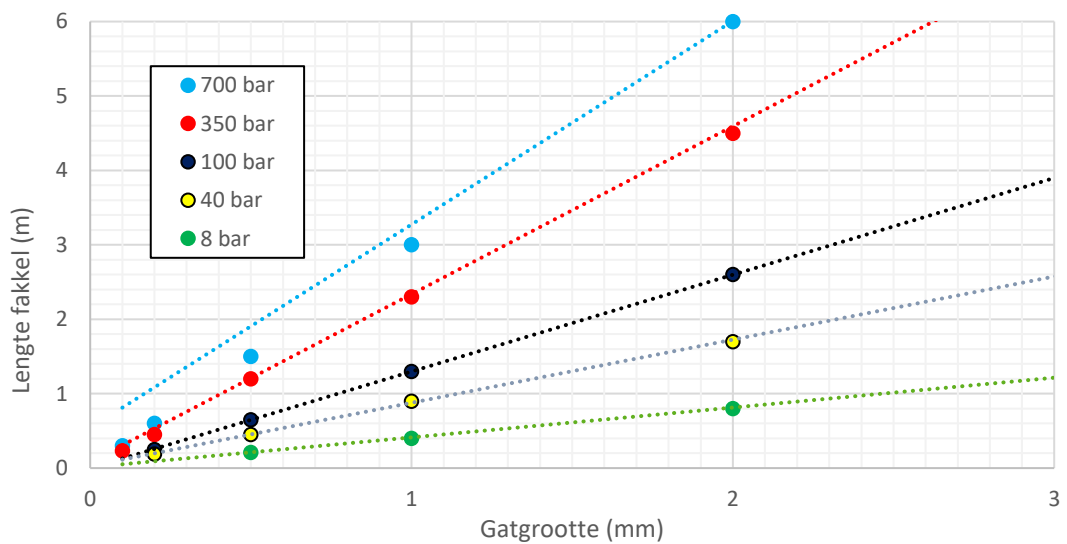
2.2.3 Berekeningen

De lengte van een waterstoffakkel is recht evenredig met de gatgrootte c.q. de diameter van de uitstroomopening (HyResponse, 2016). Als de gatgrootte twee keer zo groot wordt, wordt de fakkel twee keer zo lang. De berekeningen die met HyRAM zijn gedaan, laten dit verband ook zien. In Figuur 2.4 staan de resultaten van de berekeningen met HyRAM weergegeven. In Figuur 2.5 is het deel voor kleine gatgroottes uitvergroet. De meetresultaten van de berekeningen staan verzameld in Bijlage 1.

Bij uitstroomopeningen van 0,1 mm ligt de lengte van de waterstoffakkel bij de gehanteerde drukken in de orde van 1 à 2 decimeter. Dit zijn de openingen die overeenkomen met lekkende verbindingen en het meest zullen voorkomen. Uitstroomopeningen in de orde van enkele millimeters zullen meestal bij een incident ontstaan, bijvoorbeeld bij het doorboren van een leiding of het vrijkomen van waterstof bij het aanspreken van een veiligheidsvoorziening. Lekken in de orde van centimeters zijn in het algemeen een gevolg van afgebroken of niet afgedichte aansluitingen. De lengte van de fakkel kan dan oplopen tot tientallen meters zoals te zien is in Figuur 2.4.

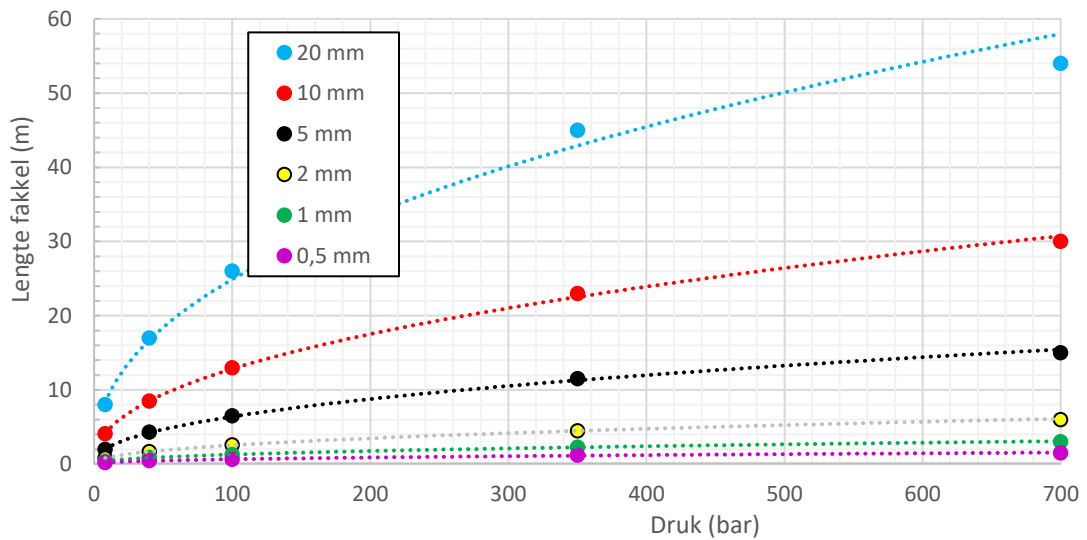


Figuur 2.4 De lengte van een waterstoffakkel als functie van de gatgrootte

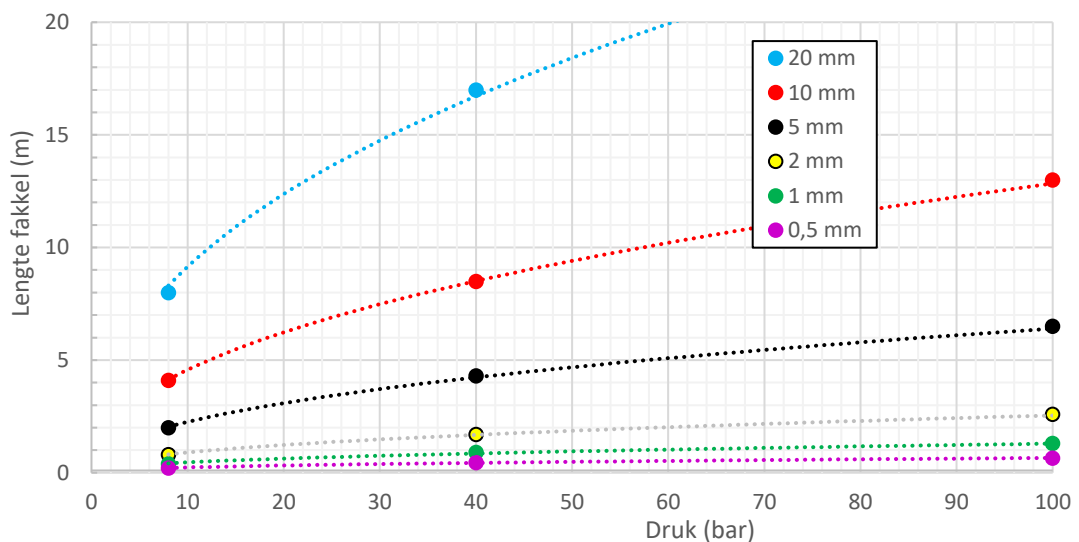


Figuur 2.5 Detailweergave van Figuur 2.4 (bereik: 0-3 mm)

De lengte van een waterstoffakkel is ook berekend als functie van de waterstofdruk. Deze lengte neemt toe met toenemende druk, maar de toename is niet lineair en vlakkt boven de 300 bar behoorlijk af (Proust et al, 2011). De berekeningen met HyRAM laten dit gedrag ook zien, alhoewel de toename daar al vanaf 100 bar begint af te vlakken, zie Figuur 2.6. Een detailweergave van deze grafieken is weergegeven in Figuur 2.7.



Figuur 2.6 De lengte van een waterstoffakkel als functie van de druk



Figuur 2.7 Detailweergave van Figuur 2.6 (bereik 0-100 bar)

2.2.4 Validatie van de berekeningen

De berekeningen met HyRAM zijn gevalideerd door de fakkellengtes voor acht verschillende combinaties van druk en gatgrootte te vergelijken met:

- > de e-tool van Ulster University (FCH2, z.d.)
- > berekeningen met het rekenpakket EFFECTS
- > resultaten van experimenten die in de literatuur beschreven staan (Liu et al, 2018; Proust et al, 2011).

De resultaten staan samengevat in Tabel 2.2. Details over de e-tool, de berekeningen met EFFECTS en de gegevens uit de literatuur staan beschreven in Bijlage 2.

Tabel 2.2 Resultaten van verschillende methoden voor het berekenen van de lengte van waterstoffakkels

#	Druk (bar)	Gatgrootte (mm)	Fakkellengte (m)			
			HyRAM	E-tool	EFFECTS	Experimenten (Proust et al, 2011)
1	2	1	0,2 - 0,3	0,35	0,4	
2	10	10	4,5	5,4	5,7	
3	100	2	2,3	3,1	3,3	2,4
4	100	10	11,5	15,5	14,6	
5	350	3	7	7,8	8,1	5,7
6	700	0,5	1,5	1,6	2,0	
7	700	3	8	9,9	10,7	6,4
8	700	4	12	13,2	14,0	

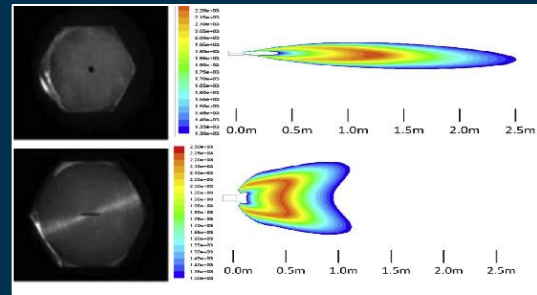
HyRAM berekent bij hoge drukken (100-700 bar) fakkels die qua lengte redelijk overeenkomen met wat in experimenten is waargenomen. Ook verschillen de door HyRAM berekende fakkellengtes weinig met de fakkellengtes die EFFECTS en de e-tool berekenen. HyRAM geeft de kleinste effectafstanden en EFFECTS de grootste.

De verschillen tussen HyRAM enerzijds en de experimenten en andere software anderzijds, zijn bij de hier getoonde combinaties van druk en gatgrootte niet groter dan een factor twee. Gezien de onnauwkeurigheden in het aflezen van de resultaten in HyRAM, de foutenmarges in experimenteel werk, model- en parameteronzekerheden alsook het gebruik van verschillende rekenmodellen is dit een goed resultaat te noemen.⁶ Dat betekent dat HyRAM een geschikt rekenpakket is voor het berekenen van de lengte van waterstoffakkels. Dit geldt alleen voor waterstofdrukken hoger dan 1 bar, aangezien HyRAM geen resultaten geeft voor waterstofdrukken kleiner dan 1 bar.

⁶ Het RIVM heeft in 2002 een benchmarkstudie uitgevoerd waarin met vijf verschillende rekenpakketten risicoberekeningen zijn gedaan. Alhoewel de invoerparameters zoveel als mogelijk voorgeschreven werden, bleek uit het onderzoek dat de resulterende onzekerheden tot verschillen van een factor 10 konden leiden. Er werd echter geconstateerd dat dit "in vergelijking met eerdere benchmarkstudies een aanzienlijke verbetering" was (RIVM, 2002).

De uitkomsten van berekeningen zijn altijd een benadering van de werkelijkheid. Een tweetal voorbeelden geeft dit aan.

1. Bij berekeningen wordt meestal uitgegaan van een ronde uitstroomopening. Maar als de opening platter is, wordt de waterstoffakkel breder, platter en korter (Makarov, 2013). Dit kan tot een factor 2 schelen. Een voorbeeld staat weergegeven in Figuur 2.8. Opvallend detail hierbij is dat het vlak van de afgeplatte fakkel loodrecht kan staan op het vlak van de afgeplatte uitstroomopening.
2. Bij hogere drukken worden fakkels turbulenter en wordt tijdens experimenten meer spreiding gezien in de fakkel-lengte (Proust et al, 2011), zie Figuur B2.2 in Bijlage 2.



Figuur 2.8 Temperatuurprofielen van waterstoffakkels, stromend uit een ronde (boven) en een platte opening (onder) (bron: Makarov et al, 2013)

2.3 Warmtestraling

2.3.1 Theorie

- > Waterstoffakkels stralen warmte uit en deze warmtestraling reikt bij grote fakkels verder dan de fakkel zelf. Warmtestraling kan leiden tot schade aan gebouwen en tot (dodelijke) slachtoffers. Om veilig met waterstof om te kunnen gaan, is kennis nodig over de warmte die waterstoffakkels uitstralen, omdat op basis daarvan veiligheidsafstanden bepaald kunnen worden. Het berekenen van de warmtestraling is complex, mede omdat de warmtestraling door een groot aantal parameters wordt bepaald. Belangrijke parameters zijn (PGS 2, 2005):
 1. de hoeveelheid warmte die gegenereerd wordt bij het verbranden van waterstof
 2. de afmetingen van de fakkel
 3. de hoeveelheid roet- en stofdeeltjes in de fakkel
 4. de fractie warmte die als warmtestraling wordt afgegeven
 5. de positie van de persoon of het object ten opzichte van de fakkel
 6. de hoeveelheid waterdamp en kooldioxide in de lucht.

Bij het verbranden van waterstof komt energie vrij. Hoe meer waterstof per tijdseenheid vrijkomt, hoe groter de brand en hoe meer energie er bij verbranding gegenereerd wordt. Die energie blijft deels in de vlammen van de brand en komt deels buiten de vlammen vrij in de vorm van warmtestraling. De fractie warmte die als warmtestraling naar buiten treedt, is afhankelijk van het type brand (fakkel, plasbrand, wolkbrand) en van de stof die verbrandt. De warmtestraling wordt 'surface emissive power' (SEP) genoemd en is afkomstig van hete gasvormige verbrandingsproducten, van niet verbrand waterstof en van eventueel aanwezige (roet)deeltjes. Hoe groter de afstand tussen de fakkel en de ontvanger (persoon of object), hoe minder warmte de ontvanger zal bereiken. Hier zijn twee redenen voor. De eerste reden is dat een deel van de warmte die een brand uitstraalt, geabsorbeerd wordt door waterdamp en kooldioxide (CO_2) in de lucht die zich tussen de bron en de ontvanger bevindt. Hoe groter de afstand, hoe meer warmte geabsorbeerd wordt. De tweede reden is dat het deel van de uitgestraalde warmte dat de ontvanger kan bereiken, kleiner wordt naarmate de onderlinge afstand groter wordt. De vorm en de oriëntatie van de ontvanger ten opzichte van de fakkel spelen hier ook een rol bij en worden 'view factor' genoemd. Dit is het deel van de uitgestraalde warmte dat de ontvanger bereikt.

- > HyRAM maakt voor het berekenen van de warmtestraling van waterstoffakkels gebruik van modellen die Houf en Schefer hebben ontwikkeld op basis van empirische correlaties en wiskundige formules (Houf et al, 2007). In de modellen wordt rekening gehouden met de hierboven genoemde parameters. De modellen – en daarmee ook HyRAM – zijn bedoeld voor hogedruk waterstofsyste­men waarbij sprake is van choked flow.⁷
- > De schade die een persoon of een constructie ondervindt door een waterstoffakkel wordt bepaald door de intensiteit van de warmtestraling en door de bloot­stellingsduur. Er zijn verschillende schadecriteria, bijvoorbeeld voor type verwonding, voor overlijden, voor het in brand raken of het vervormen van een constructie (PGS 1, 2005).

2.3.2 Berekeningen

Bij de berekeningen is uitgegaan van een onbelemmerde horizontale uitstroming van waterstof op een hoogte van 1 meter. De afstanden zijn bepaald voor warmtestralingen van 3 kW/m² en 10 kW/m² op een hoogte van 1 meter ('leefniveau') in axiale richting.⁸ Deze benadering geeft de grootste resultaten.

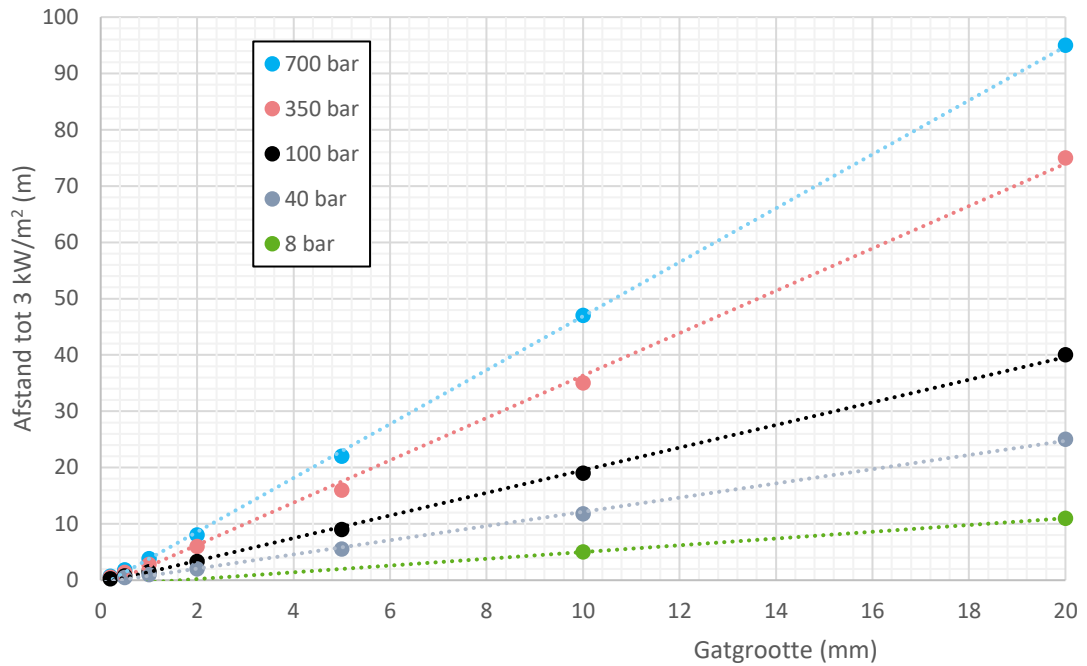
De afstanden voor warmtestraling van 35 kW/m² bleken in HyRAM steeds kleiner of gelijk te zijn aan de fakkellengte. Dit is goed te zien in Figuur 2.3. De reden hiervoor is dat in axiale richting de warmtestraling zich minder ver uitstrekt door de afbuiging van de fakkel naar boven (Hecht, 2021). Voor de afstand tot 35 kW/m² wordt daarom verwezen naar Figuur 2.4 (fakkellengte als functie van de gatgrootte) en naar Figuur 2.6 (fakkellengte als functie van de druk).

De afstanden voor warmtestraling van 10 kW/m² en 3 kW/m² worden niet altijd bereikt of konden niet worden afgelezen, omdat ze te klein waren. Dit was vooral het geval bij lage drukken en/of kleine gatgroottes. Pas vanaf een fakkellengte van één meter reikten de afstanden voor warmtestraling van 10 kW/m² en 3 kW/m² verder dan de fakkel.

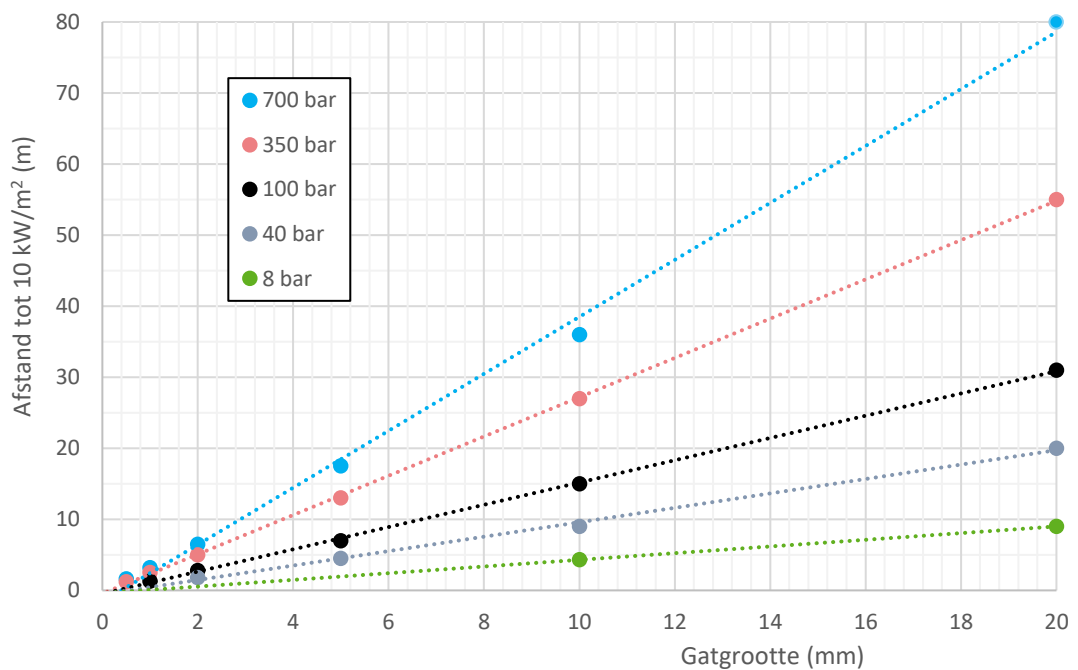
Bij hoge drukken is de warmtestraling min of meer recht evenredig met de gatgrootte (Ehrhart, 2021). Bij hoge drukken is sprake van choked flow en is de uitstroomsnelheid constant, maximaal en gelijk aan de geluidssnelheid. Onder die omstandigheden is het uitstroomdebiet min of meer recht evenredig met de gatgrootte. Aangezien het uitstroomdebiet ook recht evenredig is met de warmtestraling, kan gesteld worden dat de warmtestraling min of meer recht evenredig is met de gatgrootte (Ehrhart, 2021). De berekeningen met HyRAM laten de rechtevenredigheid ook zien: wanneer de gatgrootte twee keer zo groot is, worden de afstanden tot 3 kW/m² (Figuur 2.9) en 10 kW/m² (Figuur 2.10) iets meer dan twee keer zo groot.

⁷ Choked flow houdt in dat het debiet van een medium dat door een kleine opening naar buiten stroomt, beperkt wordt en niet groter kan worden. Bij hoge druk (> 10 bar) en een kleine opening is veelal sprake van choked flow. Bij lagere drukken en relatief grote openingen kunnen volgens de ontwikkelaar issues ontstaan.

⁸ De axiale richting is de richting die in het verlengde ligt van de richting van de waterstoffakkel. De radiale richting is de richting die loodrecht staat op de richting van de waterstoffakkel. Omdat een fakkel alle richtingen op kan gaan, is het kennen van de grootste afstand tot een bepaald warmtestralingniveau voldoende om passende maatregelen te treffen. Deze afstand wordt in axiale richting gevonden en niet in radiale richting, omdat de lengte van een fakkel groter is dan de breedte.

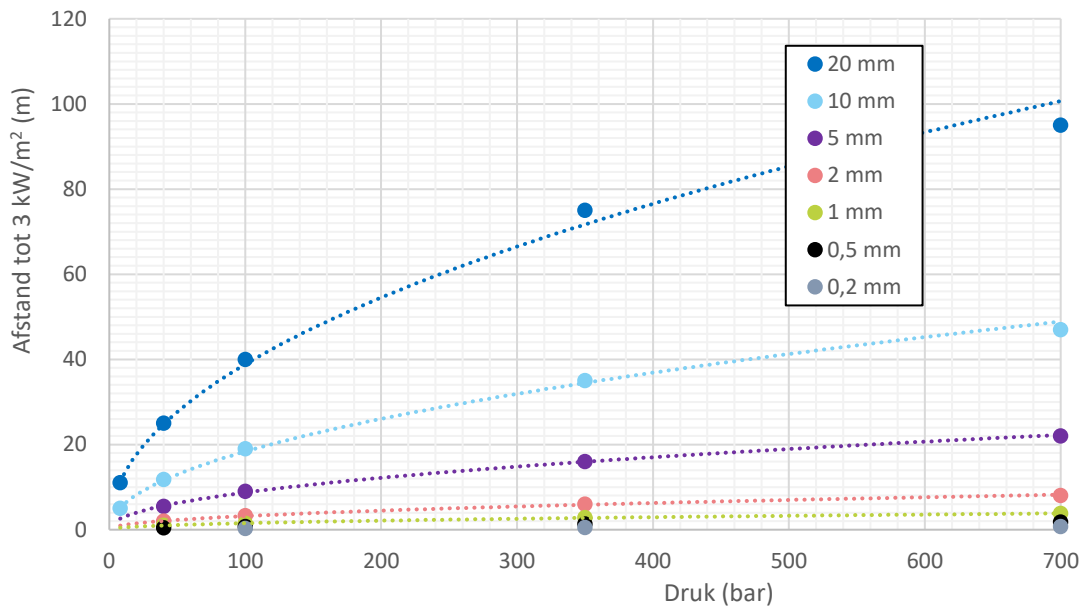


Figuur 2.9 De afstand tot 3 kW/m² als functie van de gatgrootte

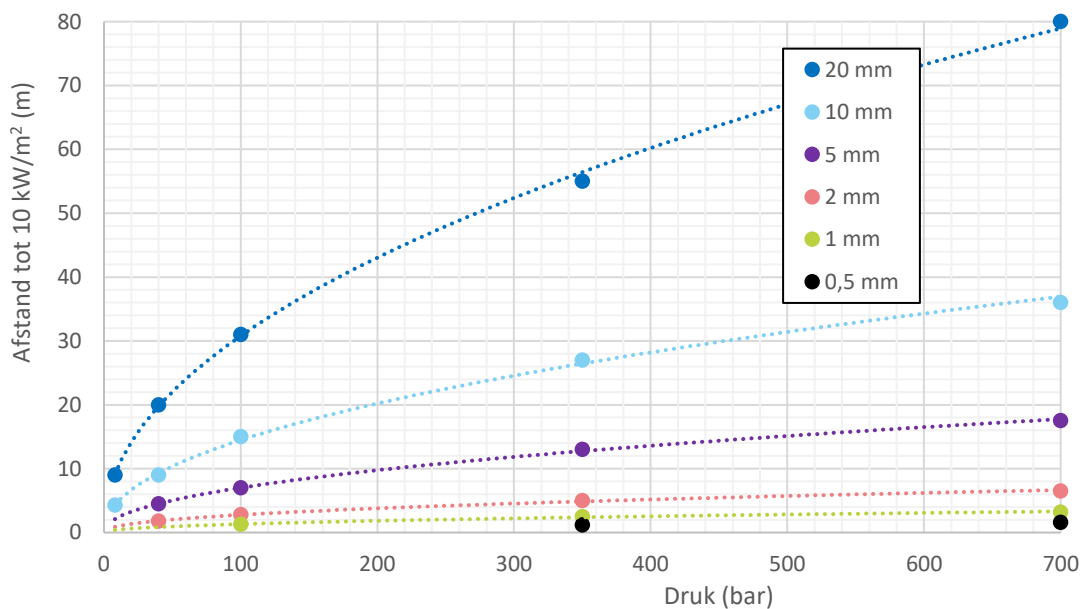


Figuur 2.10 De afstand tot 10 kW/m² als functie van de gatgrootte

De afstand tot de warmtestraling van 3 kW/m² en 10 kW/m² is ook berekend als functie van de waterstofdruk. De berekeningen met HyRAM laten zien dat de afstanden net als de fakkellengte toenemen met toenemende druk, maar dat de toename niet lineair is en afvlakt. Zie Figuur 2.11 voor de afstand tot 3 kW/m² en Figuur 2.12 voor de afstand tot 10 kW/m². Wetenschappers van Sandia National Laboratories geven aan dat het verband tussen warmtestraling en de waterstofdruk weliswaar wiskundig te bepalen is, maar dat dit verband niet te vertalen is in een vuistregel (Hecht, 2021).



Figuur 2.11 De afstand tot 3 kW/m² als functie van de druk



Figuur 2.12 De afstand tot 10 kW/m² als functie van de druk

2.3.3 Validatie van de berekeningen

De resultaten van de warmtestralingberekeningen met HyRAM kunnen niet gevalideerd worden met behulp van een e-tool of met behulp van experimenten, omdat er geen geschikte e-tool is⁹ en omdat er geen experimenten in de literatuur beschreven worden waarbij de warmtestraling van waterstoffakkels in axiale richting gemeten is.¹⁰ De warmte-

⁹ De e-tool van Ulster University berekent drie effectafstanden in axiale richting op basis van temperatuur (FCH2, z.d.).

¹⁰ Hiervoor zijn enkele redenen: 1) Experimenten zijn zeer duur, zeker experimenten op grote schaal. 2) Omdat dergelijke experimenten voor een deel ook confidencieel zijn, is het aantal publicaties met gegevens uit experimenten beperkt. 3) De experimenten die ten grondslag liggen aan HyRAM zijn gepubliceerd door Sandia National Laboratories, maar kunnen niet gebruikt worden voor de validatie van HyRAM zelf, omdat het niet om onafhankelijke experimenten gaat. 4) In enkele experimenten is de warmtestraling in axiale richting gemeten, maar omdat het grote fakkels betrof die afbogen naar boven, werd de warmtestraling eigenlijk in radiale richting gemeten (Ekoto et al, 2014).

stralingsberekeningen kunnen alleen vergeleken worden met behulp van EFFECTS en dan ook alleen maar voor de 3 kW/m² en de 10 kW/m².

In 2009 is een rapport gepubliceerd waarin de grondleggers van HyRAM veiligheidsafstanden op basis van drie verschillende stralingsniveaus hebben afgeleid voor opname in waterstofnormen en -codes (LaChance et al, 2009). In Appendix A van dit rapport worden veiligheidsafstanden gegeven voor diverse gatgroottes en waterstofdrukken. Omdat dit rapport en de daaruit afgeleide artikelen de basis vormen van HyRAM, kunnen deze bronnen niet gebruikt worden om HyRAM te valideren.

EFFECTS berekent wat grotere afstanden tot de 3 kW/m² en de 10 kW/m² dan HyRAM (Tabel 2.3). De verschillen zijn kleiner dan een factor twee, uitzonderingen daargelaten. De verschillen tussen HyRAM en EFFECTS zijn het grootst bij de kleinste gatgroottes en bij de laagste drukken.

De verschillen tussen HyRAM en EFFECTS zijn dus niet groot, zeker als bedacht wordt dat HyRAM specifiek bedoeld is voor waterstof terwijl EFFECTS ook bedoeld is voor andere gassen. Het is een indirecte aanwijzing dat de resultaten van HyRAM valide zijn.

Tabel 2.3 Resultaten van HyRAM en EFFECTS voor het berekenen van de warmtestraling van waterstoffakkels

Waterstofdruk (bar)	Gatgrootte (mm)	Afstand tot 3 kW/m ² (m)		Afstand tot 10 kW/m ² (m)	
		HyRAM	EFFECTS	HyRAM	EFFECTS
2	1	0,3	1,0	0,5	1,0
10	10	6	9,1	5	7,5
100	2	3,3	5,2	2,7	4,3
100	10	19	22,9	15	19
350	10	36	38	27	32
700	0,5	1,9	3,3	1,6	2,7
700	3	13,5	16,9	10,8	14
700	4	18,5	22	14,5	18

In Amerika is een benchmarkonderzoek gedaan tussen HyRAM en ALDEA (Air Liquide Dispersion and Explosion Assessment). Voor vlammen en fakkels berekenen HyRAM en ALDEA vergelijkbare fakkellengtes en afstanden tot warmtestraling van 3 kW/m² en 8 kW/m² (Hecht, 2020).

3 Conclusies en aanbeveling

Dit hoofdstuk beschrijft de antwoorden op de vijf onderzoeksvragen en doet op basis daarvan een aanbeveling.

3.1 Conclusies

1. Hoe zijn de werking en de wetenschappelijke onderbouwing van HyRAM?

HyRAM is een semi-empirisch model, dat wil zeggen dat HyRAM gebruik maakt van wiskundige modellen die gebaseerd zijn op en waar nodig ingevuld zijn met gegevens afkomstig van experimenten. De wiskundige modellen berekenen in een aantal stappen factoren als de diameter van de notional nozzle, het uitstroomdebiet en de uitstroomsnelheid, de fakkellengte, de surface emissive power (SEP) en de doorlaatbaarheid van waterdamp en CO₂.

De technische handleiding van HyRAM beschrijft op welke manier gegevens zijn verkregen of zijn afgeleid. Zowel de experimenten als veel van de wiskundige modellen zijn afkomstig van de onderzoeksgroep van Houf en Schefer van Sandia National Laboratories. Uit dit onderzoek komt het beeld naar voren dat deze groep baanbrekend werk heeft gedaan op het gebied van waterstof in het algemeen en waterstoffakkels in het bijzonder. In veel geraadpleegde publicaties wordt verwezen naar het werk van Houf en Schefer.

2. Wat is de lengte van waterstoffakkels bij diverse combinaties van waterstofdruk en gatgrootte?

Er zijn berekeningen gedaan aan waterstofsysteem met een druk van 8 bar tot 700 bar en met een gatgrootte van 0,1 mm tot 20 mm. De fakkellengte varieert van 20 cm bij de laagste drukken en de kleinste openingen tot ruim 50 m bij 700 bar en 20 mm. De fakkellengte is recht evenredig met de gatgrootte.

3. Wat zijn de effectafstanden voor stralingsniveaus van 3 kW/m², 10 kW/m² en 35 kW/m²?

De effectafstanden zijn bepaald in axiale richting, dat wil zeggen in het verlengde van de fakkel. Warmtestraling van 35 kW/m² komt in HyRAM dan niet verder dan de fakkel. Warmtestraling van 10 kW/m² en 3 kW/m² komt vanaf een fakkellengte van 1 meter verder dan de fakkel.

Bij 700 bar varieert de afstand tot warmtestraling van 10 kW/m² van 1,6 m (gatgrootte 0,5 mm) tot 80 m (gatgrootte 20 mm). Bij 8 bar varieert deze afstand van 4 m (gatgrootte 10 mm) tot 9 m (gatgrootte 20 mm). Meer gegevens zijn te vinden in Figuur 2.10 en Figuur 2.12.

Bij 700 bar varieert de afstand tot warmtestraling van 3 kW/m² van 1,8 m (gatgrootte 0,5 mm) tot 95 m (gatgrootte 20 mm). Bij 40 bar varieert deze afstand van 1 m (gatgrootte 1 mm) tot 25 m (gatgrootte 20 mm). Meer gegevens zijn te vinden in Figuur 2.9 en Figuur 2.11.

Bij hoge drukken is de warmtestraling min of meer recht evenredig met de gatgrootte.

4. Hoe valide zijn de resultaten van HyRAM voor wat betreft fakkellengtes?

De fakkellengtes die met HyRAM zijn berekend komen goed overeen met experimenteel vastgestelde afstanden en met afstanden die met andere rekenmodellen zijn bepaald. De verschillen tussen de resultaten van HyRAM en de andere rekenmodellen zijn het grootst bij lage drukken en bij kleine gatgroottes. De fakkellengtes verschillen echter nooit meer dan een factor twee van elkaar. Voor effectberekeningen is dit een goed resultaat.

De resultaten met HyRAM voor wat betreft warmtestraling konden alleen vergeleken worden met EFFECTS. HyRAM berekent wat kleinere afstanden tot de 3 kW/m² en de 10 kW/m² dan EFFECTS en de verschillen zijn meestal kleiner dan een factor twee. Dit is een indirecte aanwijzing dat de afstanden die HyRAM berekent voor bepaalde warmtestralingsniveaus, valide zijn.

5. Is HyRAM wat betreft gebruik en qua resultaten een geschikt instrument om berekeningen aan waterstoffakkels te doen?

De geschiktheid van HyRAM is bepaald aan de hand van zes indicatoren, waar HyRAM naar onze mening als volgt op scoort:

- > *Transparantie:* de technische handleiding van HyRAM geeft de afleiding en de wiskundige formules die gebruikt worden in de fakkellengtes en warmtestraling komen in grote lijnen overeen met het stappenplan die beschreven wordt in PGS 2.
- > *Verifieerbaarheid:* de bronnen waar in de technische handleiding van HyRAM naar verwezen wordt, betreffen meestal publicaties in wetenschappelijke tijdschriften. Deze zijn openbaar, alhoewel een abonnement nodig is om toegang te krijgen tot die gegevens.
- > *Robuustheid:* onze ervaring is dat de uitkomsten van fakkellengtes met HyRAM goed reproduceerbaar zijn. Identieke berekeningen die verspreid over enkele maanden zijn uitgevoerd, gaven identieke uitkomsten.
- > *Validiteit:* de experimenten die ten grondslag liggen aan HyRAM, zijn specifiek voor waterstof. Dit leidt tot minder extrapolatie van gegevens en resultaten. Voor zover wij na hebben kunnen gaan, zijn de aannames en uitgangspunten die gebruikt worden in HyRAM representatief en correct en geven de uitkomsten van de berekeningen een goed beeld van de omvang van de effecten. Ten opzichte van andere rekenpakketten – die niet specifiek zijn voor waterstof – verschillen de resultaten minder dan een factor twee. Een nadeel van HyRAM is dat de invloed van wind niet meegenomen kan worden en dat fakkellengtes niet mogelijk zijn voor lagedruksystemen.¹¹
- > *Beschikbaarheid:* HyRAM wordt gratis beschikbaar gesteld. Er zijn geen verborgen kosten of voorwaarden om over HyRAM te kunnen beschikken.
- > *Gebruiksgemak:* onze ervaring heeft alleen betrekking op het doen van berekeningen aan fakkels. Op dat vlak is het gebruiksgemak van HyRAM groot. De berekeningen gaan snel en het aantal in te voeren parameters is beperkt, wat gunstig is voor de robuustheid van de resultaten. Een nadeel is wel dat de resultaten afgelezen moeten worden uit grafieken en dat de schaalverdeling niet aangepast kan worden om het aflezen nauwkeuriger te maken.

¹¹ Navraag leert dat het niet meenemen van de wind gezien wordt als een conservatieve aanname: 'verondersteld wordt dat wind tot vermenging en verdunning van de waterstofwolk leidt waardoor gevaren verminderen. Het toevoegen van wind zal de modellen nauwkeuriger maken, alhoewel er altijd scenario's kunnen zijn waar die aanname niet klopt' (Ehrhart, 2021).

Onze conclusie is dat HyRAM een geschikt instrument is om berekeningen aan waterstoffakkels te doen. Vooral het gegeven dat HyRAM specifiek is voor waterstof, valide resultaten geeft en gratis, snel en eenvoudig is, maakt het programma geschikt voor fakkelberekeningen. Wel is kennis van effectberekeningen nodig om de resultaten van HyRAM te kunnen interpreteren.

3.2 Aanbeveling

De ontwikkelingen die de energietransitie met zich meebrengt, maken dat de aanwezigheid van waterstof niet meer beperkt zal zijn tot industriële bedrijven, maar zich uit zal breiden naar de gebouwde omgeving. Dit heeft consequenties voor het werk van de adviseurs van de veiligheidsregio. Zij geven adviezen die veelal gebaseerd zijn op de scenario's die beschreven staan in het Scenarioboek Externe Veiligheid (veiligheidsregio's, 2021).¹² De scenario's in het Scenarioboek zijn doorgerekend met EFFECTS en voor waterstof gaat het om drie industriële scenario's met een vaste combinatie van druk en gatgrootte.¹³ Deze scenario's hoeven echter niet representatief te zijn voor het uitstromen van waterstof uit de systemen die in de toekomst in de gebouwde omgeving aanwezig zijn. Waterstof zal bij woningen, remises en andere plaatsen in de gebouwde omgeving met andere drukken en met andere aansluitingen gebruikt kunnen worden.

HyRAM biedt de adviseurs van de veiligheidsregio's de flexibiliteit om waterstoffakkels door te rekenen bij andere combinaties van druk en gatgrootte dan waar het Scenarioboek van uitgaat. Dit draagt bij aan begripsvorming over de omvang en de gevolgen van waterstoffakkels en daarmee ook aan de adviezen die veiligheidsregio's geven op pilotprojecten en/of vergunningaanvragen in de gebouwde omgeving. Daarom beveelt het IFV de adviseurs van de veiligheidsregio het gebruik van HyRAM aan voor het doen van fakkelberekeningen aan waterstof.

¹² Uitvraag in het netwerk Omgevingsveiligheid van Brandweer Nederland via online platform Viadesk d.d. 3 september 2021 en bij de Vakgroep Omgevingsveiligheid d.d. 9 september 2021.

¹³ Het gaat om fakkelbranden bij een waterstoftankstation (950 bar, 5,2 mm), bij een waterstofcilinder (300 of 500 bar, 6,4 mm) en bij een tubetrailer (200 bar, 6,4 mm). De gatgroottes betreffen 'voorlopig aangenomen waarden'.

Literatuur

- > Bénard, P. et al (2016). Adjacent surface effect on the flammable cloud of hydrogen and methane jets: Numerical investigation and engineering correlations. *International Journal of Hydrogen Energy* 41, 18654–18662.
- > Brandweer Nederland (2021). Uitvraag via Viadesk op 6 september 2021 en Vakgroep Omgevingsveiligheid op 9 september 2021.
- > Ehrhart, B.D. et al (2020). [Hydrogen Risk Assessment Models \(HyRAM\) Version 3.0 Technical Reference Manual](#).
- > Ehrhart, B.D. (2021). Persoonlijke communicatie per e-mail tussen M.B. Spoelstra (IFV), B.D. Ehrhart en B.D. Hecht (beide Sandia National Laboratories), d.d. 12 april, 15 juli en 30 augustus 2021.
- > Ekoto, I.W. et al (2014). Updated jet flame radiation modeling with buoyancy corrections, *International Journal of Hydrogen Energy* 39, 20570 – 20577.
- > Fuel Cell and Hydrogen Education (FCH2edu, z.d.). [E-laboratory - Flame length correlation and three hazard distances for jet fires](#).
- > Harris, S.R. (2021). Risk assessment and ventilation modeling for hydrogen releases in vehicle repair garages. *International Journal of Hydrogen Energy* 46 (23), 12429-12438.
- > Hecht, E. (2020). [Development, Validation, and Benchmarking of Quantitative Risk Assessment Tools for Hydrogen Refueling Stations](#)
- > Hecht, E. (2021). Persoonlijke communicatie per e-mail tussen M.B. Spoelstra (IFV) en E. Hecht (Sandia National Laboratories), d.d. 7 juli en 15 juli 2021.
- > Hirayama, M. et al (2019). Simplified approach to evaluating safety distances for hydrogen vehicle fuel dispensers, *International Journal of Hydrogen Energy* 44 (33), 18639 – 18647.
- > Houf, W. en Schefer, R. (2007). Predicting radiative heat fluxes and flammability envelopes from unintended releases of hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy* 32, 136–151.
- > HyResponder (2021). [Lecture 9: Hazard distances from hydrogen flames and fire fighting, LEVEL IV Specialist officer](#).
- > HyResponse (2016). [Lecture: Hydrogen fires](#).
- > HyTunnel (2019). [Deliverable 1.2 - Report on hydrogen hazards and risks in tunnels and similar confined spaces](#).
- > Instituut Fysieke Veiligheid (IFV, 2020a). [Veiligheidsaspecten van waterstof in een besloten ruimte](#). Arnhem: IFV.
- > Instituut Fysieke Veiligheid (IFV, 2020b). [Veiligheidsmaatregelen voor het gebruik van waterstof binnenshuis](#). Arnhem: IFV.
- > Instituut Fysieke Veiligheid (IFV, 2020c). [Onderbouwing van de slachtofferinschatting van www.scenarioboek.nl](#). Arnhem: IFV.
- > Instituut Fysieke Veiligheid (IFV, 2021a). [Waterstofauto's in parkeergarages](#). Arnhem: IFV.
- > Instituut Fysieke Veiligheid (IFV, 2021b). [Kenniscbundel Waterstof in de gebouwde omgeving](#). Arnhem: IFV.

- > LaChance, J. et al (2009). [Analyses to Support Development of Risk-Informed Separation Distances for Hydrogen Codes and Standards](#). Sandia National Laboratories: Albuquerque.
- > Landelijk Expertisecentrum Brzo (LEC Brzo, 2009). [BrandweerBRZO Scenarioboek](#).
- > Liu, J. et al (2018). Prediction of flame length of horizontal hydrogen jet fire during high-pressure leakage process. *Procedia Engineering* 211, 471-478.
- > Makarov, D. et al (2013). Plane hydrogen jets. *International Journal of Hydrogen Energy* 38 (19), 8068-8083.
- > Molkov, V. (2012). [Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering I](#). E-boek.
- > Molkov, V. et al (2013). Hydrogen jet flames. *International Journal of Hydrogen Energy* 38 (19), 8141-8158.
- > Padilla, M. (2016). [Hydrogen Risk Assessment Models toolkit now available](#).
- > Proust, C. et al (2011). High pressure hydrogen fires. *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (3), 2367-2373.
- > Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (PGS 1, 2005). *Methoden voor het bepalen van mogelijke schade, deel 1A: Effecten van brand op personen en deel 1B: effecten van brand op constructies*.
- > Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (PGS 2, 2005). [2 - Methods for the calculation of physical effects](#). Den Haag: VROM.
- > Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM, 2002). [Benchmark risk analysis models](#). RIVM-rapport 610066015/2001. Bilhoven: RIVM.
- > Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM, 2012). [Protocol aanpassing rekenmethodieken Externe Veiligheid](#). RIVM rapport 620550009/2012. Bilthoven: RIVM
- > Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM, 2021a). [Handleiding Risicoberekeningen Bevi](#), versie 4.3, Module B, blz. 11. Bilthoven: RIVM.
- > Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM, 2021b). [Interne- en externe afstanden voor multifuel tankstations](#). RIVM-briefrapport 2021-0010. Bilthoven: RIVM.
- > Sandia National Laboratories (Sandia, 2021). [Hydrogen Risk Assessment Model \(HyRAM\)](#).
- > Veiligheidsregio's in Noord-Holland, Utrecht en Flevoland (Veiligheidsregio's, 2021). [Scenarioboek Externe Veiligheid - Een handboek met beschrijvingen van ongeval-scenario's met gevaarlijke stoffen](#)

Bijlage 1 Meetgegevens

In onderstaand tabel staan de meetgegevens van fakkelberekeningen die gemaakt zijn met het model 'Radiative Heat Flux' van HyRAM versie 3. Deze resultaten zijn geanalyseerd en staan beschreven in dit rapport.

Tabel B1.1 Resultaten fakkelberekeningen HyRAM

Gatgrootte (mm)	Fakkellengte (m)	Afstand tot 3 kW/m ² (m)	Afstand tot 10 kW/m ² (m)
700 bar			
20	54	95	80
10	30	47	36
5	15	22	17,5
2	6	8	6,5
1	3	3,8	3,2
0,5	1,5	1,8	1,6
0,2	0,6	0,7	
0,1	0,3		
350 bar			
20	45	75	55
10	23	35	27
5	11,5	16	13
2	4,5	6	5
1	2,3	2,8	2,5
0,5	1,2	1,35	1,2
0,2	0,45	0,5	
0,1	0,23		
100 bar			
20	26	40	31
10	13	19	15
5	6,5	9	7
2	2,6	3,3	2,8

Gatgrootte (mm)	Fakkellengte (m)	Afstand tot 3 kW/m ² (m)	Afstand tot 10 kW/m ² (m)
1	1,3	1,5	1,3
0,5	0,65	0,75	
0,2	0,25	0,25	
40 bar			
20	17	25	20
10	8,5	11,8	9
5	4,3	5,5	4,5
2	1,7	2	1,8
1	0,9	1	
0,5	0,45	0,45	
0,2	0,19		
8 bar			
20	8	11	9
10	4,1	5	4,3
5	2		
2	0,8		
1	0,4		
0,5	0,21		

Bijlage 2 Validatiedetails

Voor wat betreft de fakkellmodellering (lengte en warmtestraling) is HyRAM gevalideerd door de resultaten van HyRAM te vergelijken met resultaten uit experimenten en met resultaten van een E-tool en van EFFECTS.

E-tool

De e-tool heet 'Flame length correlation and three hazard distances for jet fires' en is beschikbaar op het platform van Fuel Cell and Hydrogen Education (www.fch2edu.eu). Het model maakt gebruik van een correlatie die geldt voor alle soorten fakkels (klein en groot, subsonisch, sonisch of supersonisch) en is door Molkov van de Ulster University ontwikkeld (Molkov et al, 2013).¹⁴

Flame length correlation and three hazard distances for jet fires			
Name	Symbol	Value	Unit
H2 pressure in reservoir	p_1	700	bar
H2 temperature in reservoir	T_1	15	°C
Orifice diameter	d_3	0.5	mm
Ambient pressure	p_4	1	bar
Ambient temperature	T_{atm}	15	°C
Flame length	L_F	1.6476	m
No harm (70°C) separation distance	X_{70}	5.76659	m
Pain limit (5 mins, 115°C) separation distance	X_{115}	4.94279	m
Third degree burns (20 sec, 309°C) separation distance	X_{309}	3.29519	m

Figuur B2.1 Schermweergave e-tool 'Flame length correlation and three hazard distances for jet fires'

De afstanden tot de drie schadecriteria zijn in dit rapport niet gebruikt, maar worden als volgt berekend (LaChance, 2010):

- > Geen gevolgen (70°C): $d = 3,5x$ de fakkellengte
- > Grens voor pijn (5 minuten blootstelling, 110°C): $d = 3x$ de fakkellengte
- > Derdegraads brandwonden (20 s blootstelling, 309°C): $d = 2x$ de fakkellengte

EFFECTS

EFFECTS is een softwarepakket waarmee risico- en effectberekeningen gedaan kunnen worden. EFFECTS is ontwikkeld door TNO en is eigendom van Gexcon. EFFECTS gebruikt voor fakkellberekeningen de formules en de zeven stappen die beschreven staan in § 6.5.3 van PGS 2 *Methods for the calculation of physical effects* (PGS 2, 2005). Met behulp van deze formules is de warmtestraling op elk punt bij de fakkell te berekenen. Aan de formules

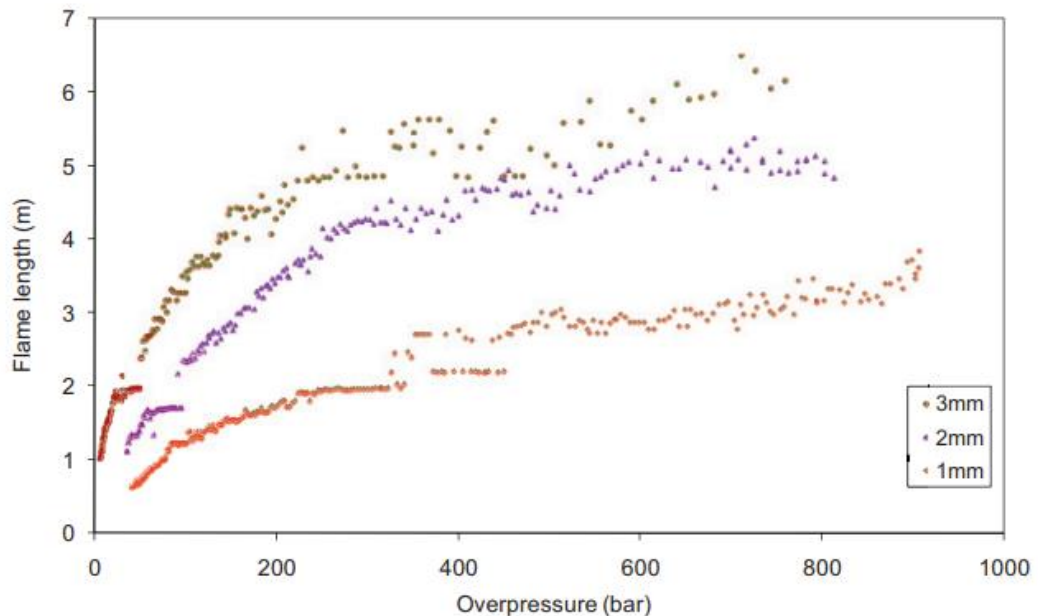
¹⁴ Molkov heeft ook een nomogram ontwikkeld waarmee fakkellengtes bepaald kunnen worden (Molkov, 2012). Een nomogram is een tweedimensionaal diagram waarop de waarde van een wiskundige functie bij benadering afgelezen kan worden, zonder dat er een berekening aan te pas komt. De uitkomsten van het nomogram moeten vermenigvuldigd worden met een factor 1,5 vanwege onzekerheden.

van PGS 2 ligt het semi-empirisch model van Chamberlain ten grondslag. Dit model is gevalideerd door middel van experimenten en door middel van testen in windtunnels.

De berekeningen met EFFECTS (versie 11.0) zijn gedaan door dr. J. Reinders die bij TNO heeft gewerkt en jarenlang met EFFECTS heeft gewerkt. Bij de berekeningen zijn de invoerparameters in EFFECTS steeds zoveel mogelijk gelijkgetrokken met die van HyRAM. In EFFECTS is bijvoorbeeld gerekend met de laagst mogelijke windsnelheid, omdat HyRAM geen rekening houdt met wind.

Experimenten

Voor het valideren van de berekeningen voor wat de fakkellengte betreft, is gebruikgemaakt van de publicatie van Proust (Proust et al, 2011). Ten behoeve van het Europese HyPER-project¹⁵ zijn fakkelexperimenten uitgevoerd bij drukken van 1 tot 900 bar en met uitstroombopeningen variërend van 1 tot 3 mm. De resultaten staan in Figuur B2.2.2. Deze figuur is gebruikt om de fakkellengte bij drie verschillende druk-gatgrootte-combinaties af te lezen.



Figuur B2.2 Fakkellengte als functie van de druk en gatgrootte (bron: Proust et al, 2011)

¹⁵ Zie voor informatie over dit project <https://cordis.europa.eu/project/id/39028/reporting>.