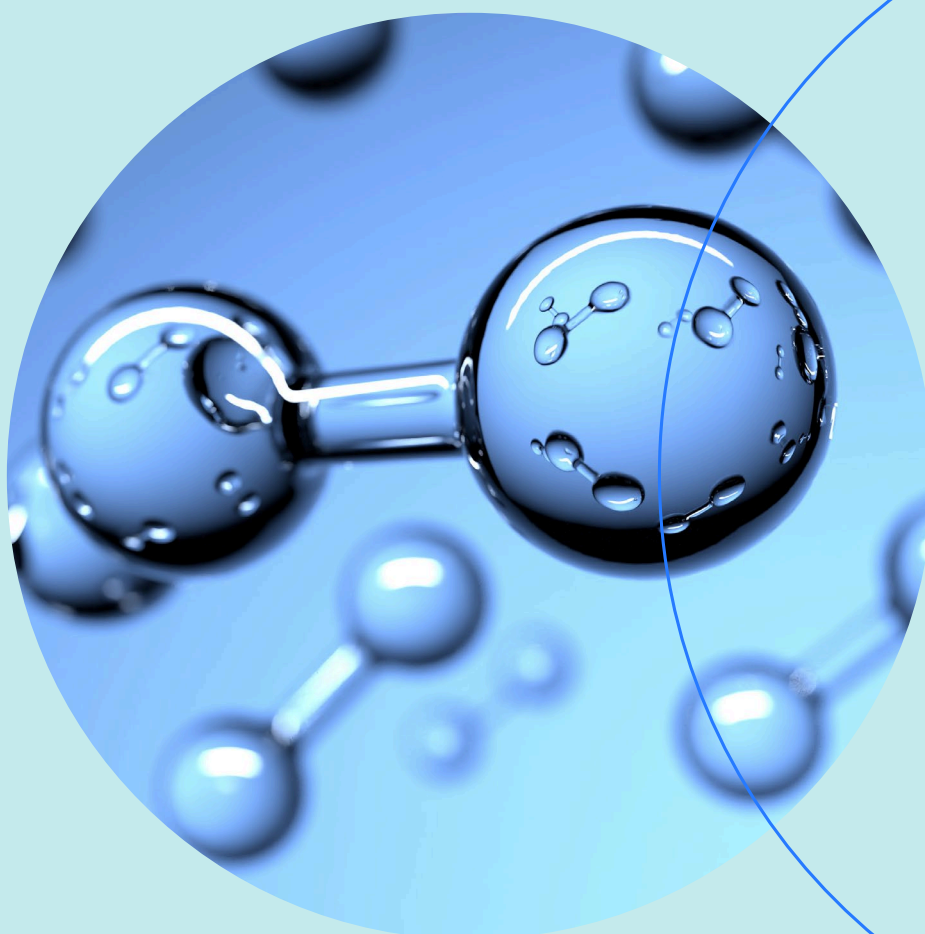


Berekeningen effectafstanden van waterstoffakkels

WP4 Veiligheidsaspecten en risico's

Auteur: Margreet Spoelstra (NIPV)

Dit project is medegefinancierd door TKI Nieuw Gas | Topsector Energie uit de PPS-toeslag onder referentienummer TKI2019 WVIP



Aanleiding

WVIP WP 4 werkt aan kennisvragen voor het borgen van waterstofveiligheid en heeft als doelstelling:

1. Het inventariseren van alle mogelijke veiligheidsrisico's die gepaard gaan met de productie, opslag, transport en gebruik van waterstof.
2. Welke maatregelen zijn noodzakelijk om waterstof als veilige en betrouwbare energiedrager grootschalig te kunnen introduceren en daarmee de publieke acceptatie te vergroten.

Dit document is bedoeld voor alle partijen die bezig zijn met de ontwikkeling van de waterstofinfrastructuur en specifiek hen die geïnteresseerd zijn in effect- en risicoberekeningen van waterstoffakkels. Dit document geeft handvatten om de vragen en antwoorden die er over dit onderwerp zijn centraal te ontsluiten met het doel de waterstofveiligheid te borgen.

Eén van de kennisvragen heeft betrekking op de effect- en veiligheidsafstanden van waterstof. Dit document beschrijft de effectafstanden van waterstoffakkels en vat de resultaten samen van een rapport dat hierover geschreven is. Hiermee wordt antwoord gegeven op één van de kennisvragen die zijn geïnventariseerd door de deelnemers van WP4 in 2020. Voor meer informatie over en de toestandkoming van de kennisvragen zie de [inventarisatie van deze kennisvragen](#). De gegevens in dit document zijn te gebruiken voor gasvormig waterstof bij drukken vanaf 7 bar.

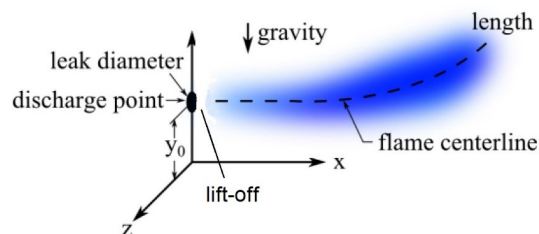
Dit document is een samenvatting van het rapport *'Berekeningen aan waterstoffakkels met behulp van HyRAM'* dat het NIPV geschreven heeft. In het NIPV-rapport zijn de resultaten van HyRAM niet vergeleken met SAFETI-NL, in deze samenvatting wel.

Met behulp van effectafstanden zijn initiatiefnemers, vergunningverleners en hulpverleners in staat te adviseren of beslissingen te nemen over het veilig gebruiken van waterstof in de omgeving waarin de waterstoftoepassing zich bevindt.

1. Waterstoffakkels

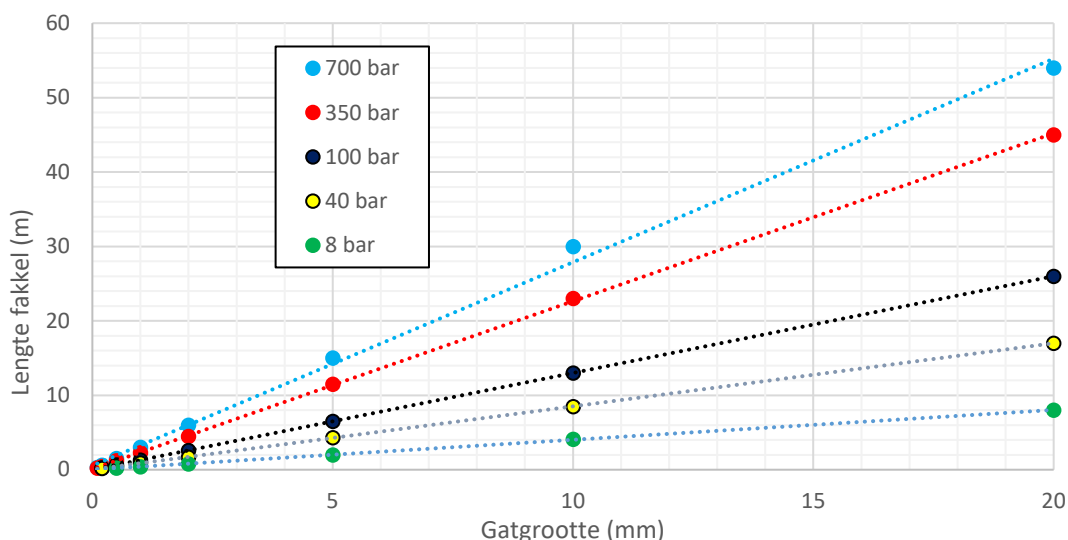
Waterstof wordt gebruikt bij drukken die variëren van 30 mbar in woonhuizen, 700 bar in een waterstofauto tot 1000 bar in de industrie. Dit heeft invloed op de lengte van de waterstoffakkel als zich een lekkage met ontsteking voordoet (Figuur 1.1). Kennis over de lengte van waterstoffakkels en over de warmtestraling is van belang voor hen die te maken hebben of krijgen met waterstof, bijvoorbeeld initiatiefnemers, vergunningverleners en hulpverleners.

Dit document beschrijft de lengte van waterstoffakkels die berekend zijn met behulp van HyRAM (versie 3.1.0). HyRAM is een rekenprogramma dat ontwikkeld is en beheerd wordt door Sandia National Laboratories en gratis ter beschikking wordt gesteld. Dat maakt dit rekenpakket toegankelijker voor gebruikers dan rekenpakketten als SAFETI-NL en EFFECTS waar licentiekosten aan verbonden zijn. [De uitgangspunten voor de berekeningen staan beschreven in het NIPV-rapport 'Berekeningen aan waterstoffakkels met behulp van HyRAM'](#).

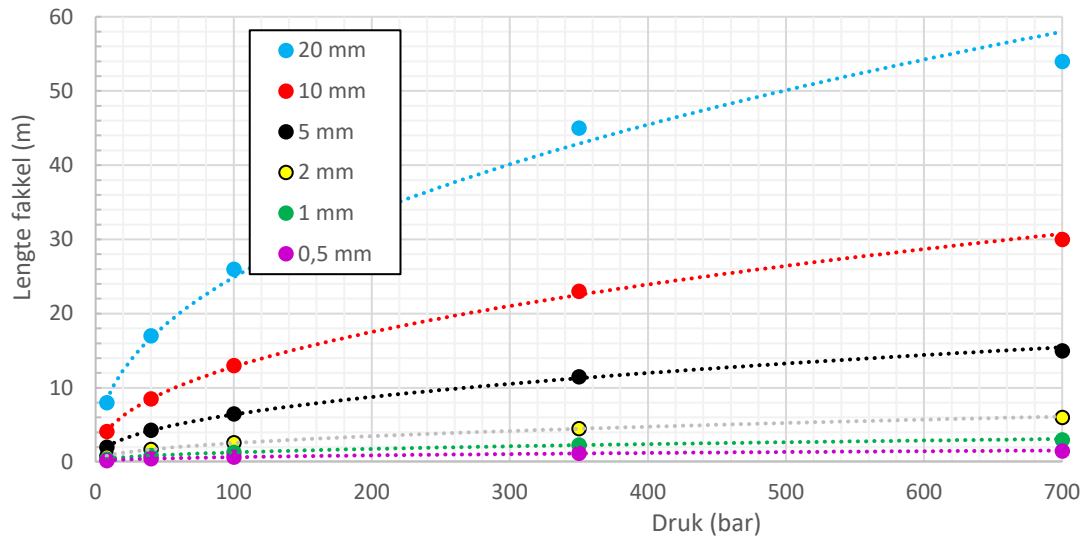


Figuur 1.1: Schematische weergave van een horizontale waterstoffakkel. De fakkellengte is de afstand vanaf de uitstroomopening (discharge point) tot aan de tip van de fakkel, gemeten langs de centrumlijn (flame centerline) van de fakkel. De fakkel stijgt op naar boven, omdat waterstofgas lichter is dan lucht. De fakkel kan blijven branden zolang er waterstofgas uit de opening stroomt. (bron: Ehrhart, 2020)

De lengte van een waterstoffakkel wordt vooral bepaald door de druk in het waterstofsysteem en de grootte van de opening waardoor waterstofgas naar buiten stroomt, zie Figuur 1.2 en Figuur 1.3.



Figuur 1.2 De lengte van een waterstoffakkel als functie van de gatgrootte bij verschillende drücken.



Figuur 1.3 De lengte van een waterstoffakkel als functie van de waterstofdruk bij verschillende gatgroottes.

Naast waterstofdruk en gatgrootte kan de lengte ook worden beïnvloed door obstakels. Zo is de fakkel korter als deze een obstakel tegenkomt en langer als de fakkel parallel aan een oppervlak brandt. Verder heeft wind invloed op de richting van de fakkel, alleen wordt dit niet in HyRAM verwerkt.

2. Effectafstanden op basis van warmtestraling

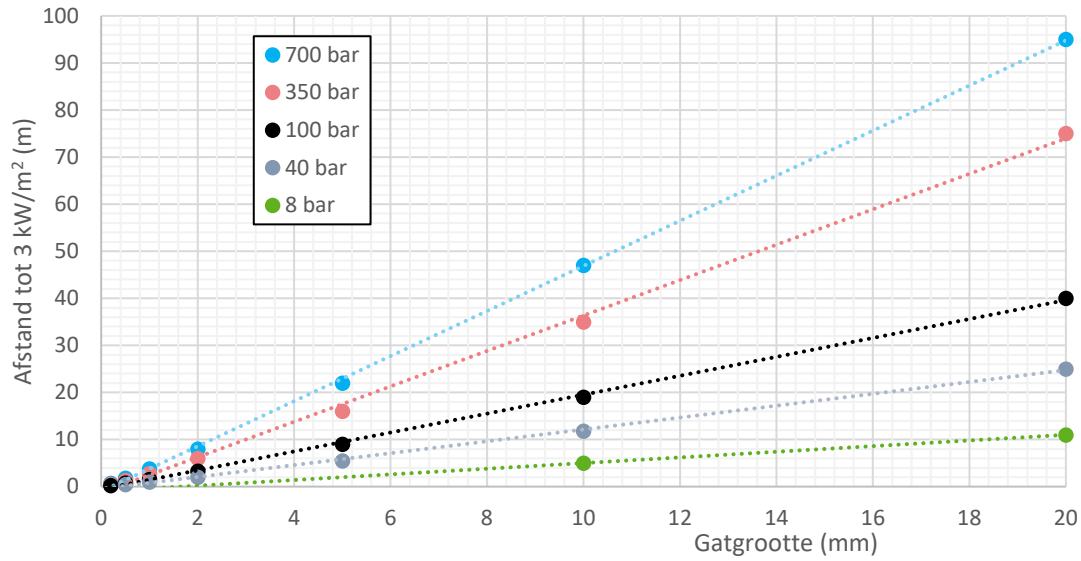
Waterstoffakkels stralen warmte uit en deze warmtestraling reikt bij grote fakkels verder dan de fakkel zelf. Warmtestraling kan leiden tot schade aan gebouwen en tot (dodelijke) slachtoffers. Om veilig met waterstof om te kunnen gaan, is kennis nodig over de warmte die waterstoffakkels uitstralen, omdat op basis daarvan veiligheidsafstanden bepaald kunnen worden. Met HyRAM zijn de effectafstanden berekend voor een warmtestraling van 3 kW/m^2 , 10 kW/m^2 en 35 kW/m^2 . Met 'effectafstand' wordt dan de afstand bedoeld tussen het uitstroompunt van de fakkel en de uiterste afstand waarop de warmtestraling een bepaalde waarde bereikt.

De berekeningen gaan uit van een horizontale uitstroomrichting op een uitstroomhoogte van 1 meter (leefniveau), aangezien bij deze waarden de effectafstanden maximaal zijn. Alle effectafstanden zijn bepaald in axiale richting, dat wil zeggen in het verlengde van de fakkel.

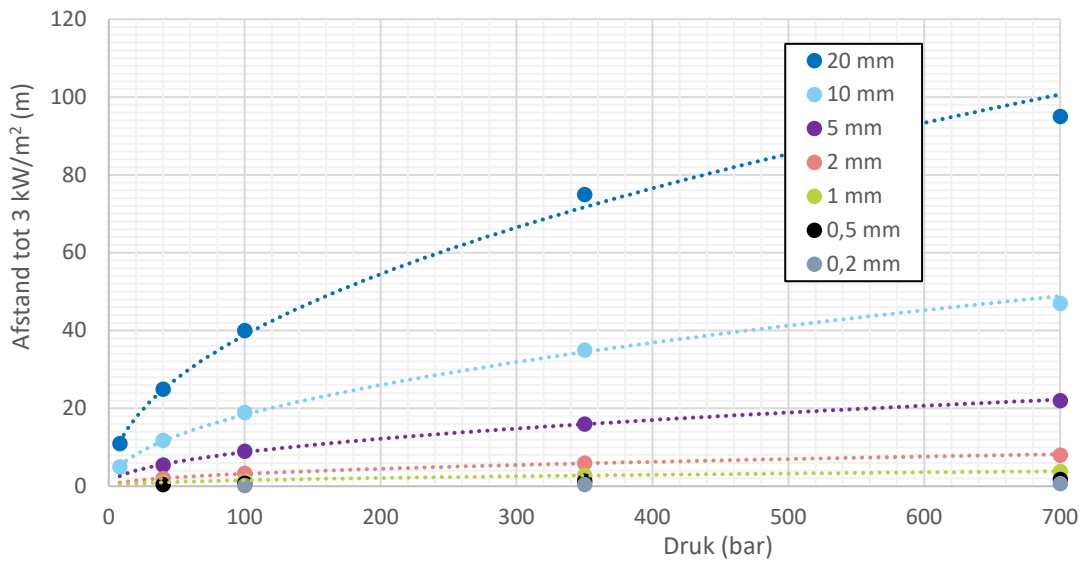
2.1 Effectafstanden tot warmtestraling van 3 kW/m^2

In Figuur 2.1 wordt de afstand tot een warmtestraling van 3 kW/m^2 weergegeven als functie van de gatgrootte en in Figuur 2.2 als functie van de waterstofdruk. De waarde 3 kW/m^2 is de grens voor inzet van de brandweer.¹

¹ In het rapport zijn detailweergaven van deze en andere grafieken opgenomen, zodat waarden vlakbij het 0-punt beter afgelezen kunnen worden.



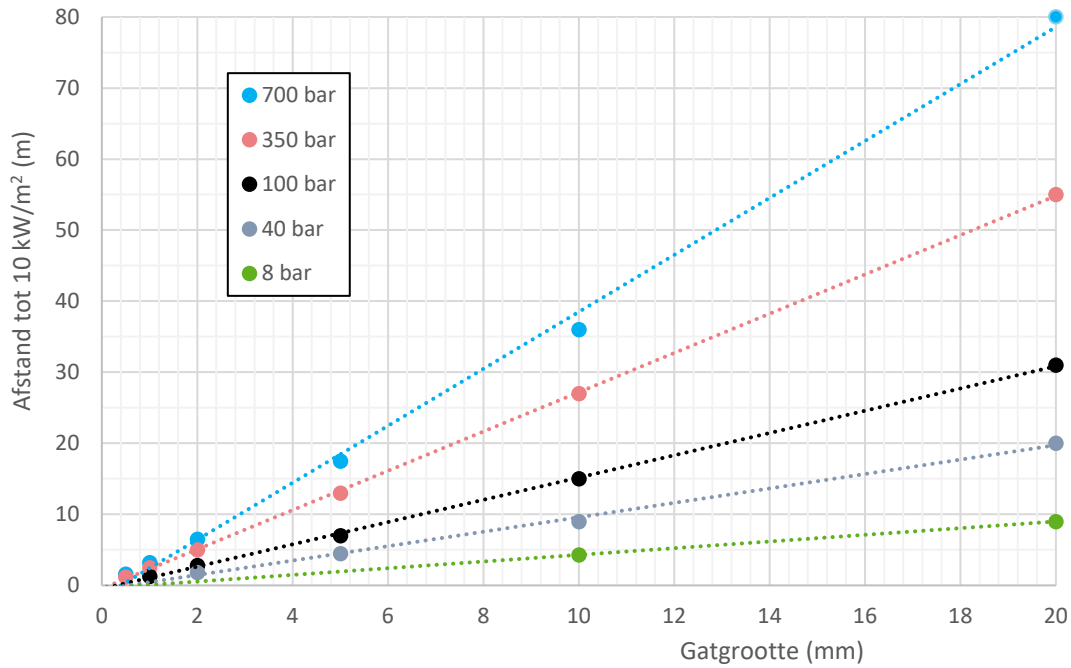
Figuur 2.1: De afstand tot 3 kW/m² als functie van de gatgrootte bij verschillende druken.



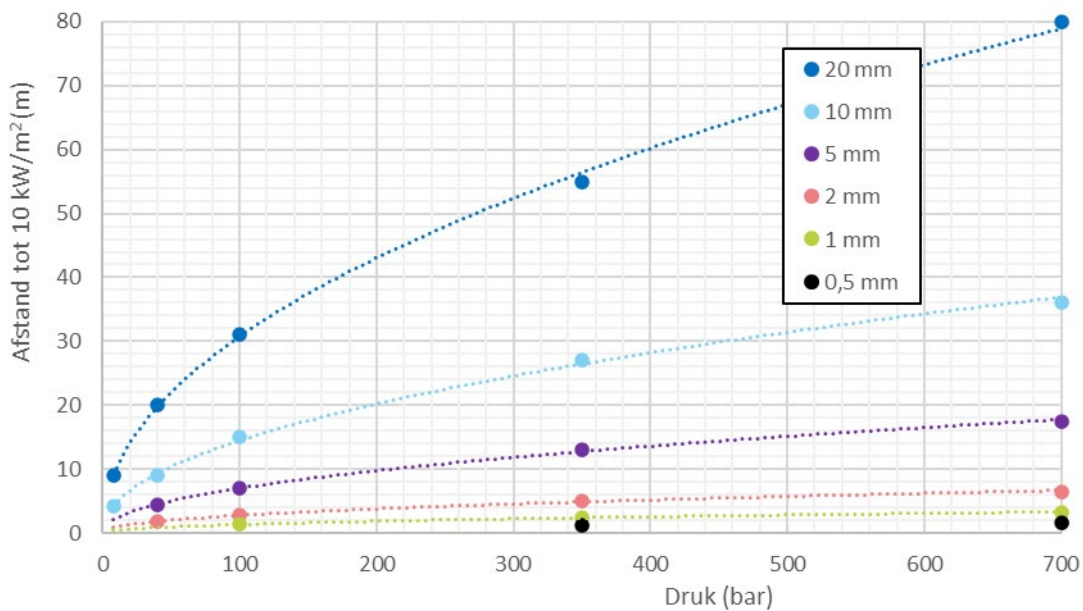
Figuur 2.2: De afstand tot 3 kW/m² als functie van de waterstofdruk bij verschillende gatgroottes.

2.2 Effectafstanden tot warmtestraling van 10 kW/m²

In Figuur 2.3 wordt de afstand tot een warmtestraling van 10 kW/m² weergegeven als functie van de gatgrootte en in Figuur 2.4 als functie van de waterstofdruk. De waarde 10 kW/m² is de grens voor 1% letaliteit bij een blootstellingsduur van 20 seconden.



Figuur 2.3: De afstand tot 10 kW/m² als functie van de gatgrootte bij verschillende drukken.



Figuur 2.4: De afstand tot 10 kW/m² als functie van de waterstofdruk bij verschillende gatgroottes.

2.3 Fakkellengte en effectafstanden tot warmtestraling van 35 kW/m²

In Figuur 1.2 zijn de berekende lengtes van waterstoffakkels weergegeven als functie van de gatgrootte en in Figuur 1.3 als functie van de waterstofdruk. De fakkellengtes uit die figuren kunnen ook worden gezien als de afstand tot een warmtestraling van 35 kW/m². Uit de analyse met HyRAM is namelijk gebleken dat de fakkellengte kleiner of gelijk is aan de effectafstand tot een warmtestraling van 35 kW/m². De waarde 35 kW/m² is de grens voor 100% letaliteit bij een blootstellingsduur van 20 seconden.

3. Discussie

3.1 Fakkellengte

De lengte van een waterstoffakkel is recht evenredig met de gatgrootte. Als de gatgrootte twee keer zo groot wordt, wordt de fakkel twee keer zo lang. De lengte van een waterstoffakkel neemt toe met toenemende druk, maar de toename is niet lineair en vlakt boven de 300 bar behoorlijk af.

3.2 Effectafstand als functie van gatgrootte

De berekeningen met HyRAM laten zien dat het verband tussen gatgrootte en effectafstand bij benadering recht evenredig is. Men kan dus uitgaan van de volgende vuistregel: wanneer de gatgrootte twee keer zo groot is, worden de effectafstanden ook twee keer zo groot.

3.3 Effectafstand als functie van waterstofdruk

De effectafstanden zijn ook berekend als functie van de waterstofdruk. De berekeningen laten zien dat de afstanden toenemen met toenemende druk, maar dat deze toename niet lineair is en afvlakt. Voor het verband tussen waterstofdruk en effectafstand is daarom geen eenduidige vuistregel op te stellen.

3.4 Validiteit

De fakkellengtes die met HyRAM zijn berekend, zijn vergeleken met experimenteel vastgestelde afstanden en met de rekenmodellen EFFECTS (versie 11.0) en SAFETI-NL (versie 8.5). De resultaten staan in Tabel 1. SAFETI-NL geeft de kleinste fakkellengtes en EFFECTS de grootste. HyRAM zit hier tussenin. De verschillen zijn nooit meer dan een factor twee van elkaar en voor dit soort berekeningen is dit een goed resultaat.

De effectafstanden die HyRAM berekent voor warmtestraling, zijn vergeleken met effectafstanden die verkregen zijn met EFFECTS en met SAFETI-NL.² De resultaten staan in Tabel 2. SAFETI-NL geeft de kleinste effectafstanden en EFFECTS de grootste. HyRAM zit hier tussenin. De verschillen zijn kleiner dan een factor twee, uitzonderingen daargelaten. De verschillen tussen HyRAM enerzijds en EFFECTS en SAFETI-NL anderzijds zijn het grootst bij de laagste drukken en de kleinste gatgroottes.

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

De wet (Bevi en Bevb) schrijft voor welke rekenmodellen gebruikt moeten worden voor het uitvoeren van risicoberekeningen voor bevoegd gezagen. Voor inrichtingen is dat bijvoorbeeld SAFETI-NL. Voor andere toepassingen - zoals bijvoorbeeld effectberekeningen - mag gebruik gemaakt worden van andere rekenprogramma's. Dit gebeurt bijvoorbeeld bij de Scenarioboeken waar gebruik is gemaakt van EFFECTS.

² Reden hiervoor is dat er geen geschikte e-tool is en geen experimenten in de literatuur beschreven worden die warmtestraling in axiale richting geven.

4. Conclusies

Met behulp van HyRAM kunnen berekeningen aan waterstoffakkels worden gedaan. HyRAM is een gebruiksvriendelijk en geschikt instrument om berekeningen aan waterstoffakkels te doen. De resultaten van HyRAM zijn vergeleken met andere rekenmodellen en de uitkomsten zijn vergelijkbaar. Enige kennis van effectberekeningen is nodig om de resultaten van HyRAM te kunnen interpreteren. HyRAM biedt meer mogelijkheden dan momenteel is onderzocht. Op dit moment is er nog geen behoefte om deze mogelijkheden verder uit te zoeken.

5. Bronnen

- Ehrhart, B., Hecht, E., & Groth, K. (2020). Hydrogen Risk Assessment Models (HyRAM) [Version 3.0 Technical Reference Manual](#). Livermore, CA, Verenigde Staten: Sandia National Laboratory.
- Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV). (2021). [Berekeningen aan waterstoffakkels met behulp van HyRAM](#). Arnhem: NIPV (voorheen IFV).
- Proust, C. et al (2011). High pressure hydrogen fires. *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (3), 2367-2373.

Bijlage Resultaten van de vergelijking van HyRAM met EFFECTS en SAFETI-NL

Tabel 1 - Resultaten van verschillende rekenmodellen voor het berekenen van de lengte van waterstoffakkels.

	Druk (bar)	Gatgrootte (mm)	Fakkellengte (m)			
			HyRAM	EFFECTS	SAFETI-NL ³	Experimenten (Proust et al., 2011)
1	2	1	0,2-0,3	0,4	0,2	
2	10	10	4,5	5,7	3,6	
3	100	2	2,3	3,3	2,0	2,4
4	100	10	11,5	14,6	9,4	
5	350	3	7	6,1	4,8	5,7
6	700	0,5	1,5	2,0	1,4	
7	700	3	9	8	6,6	6,4
8	700	4	12	10,4	8,1	

Tabel 2 - Resultaten van verschillende rekenmodellen voor het berekenen van de warmtestraling van waterstoffakkels.

	Druk (bar)	Gatgrootte (mm)	Afstand tot 3 kW/m ² (m)			Afstand tot 10 kW/m ² (m)		
			HyRAM	EFFECTS	SAFETI-NL ³	HyRAM	EFFECTS	SAFETI-NL ³
1	2	1	0,3	1,0	-	0,5	1,0	-
2	10	10	6	9	4	5	7,5	3,8
3	100	2	3,3	5,2	2,1	2,7	4,3	2,1
4	100	10	19	23	13	15	19	11
5	350	3	10	12	7	6	10	6
6	700	0,5	1,9	3,3	1,5	1,6	2,7	-
7	700	3	14	16	9	11	14	7,5
8	700	4	19	21	12	15	18	10

³ Enkele waarden van SAFETI-NL zijn bepaald met behulp van interpolatie van rekenresultaten.