



Europees "Train the Trainer"-programma voor hulpverleners

Les 9

Veilige afstand van waterstofvlammen en brandbestrijding

NIVEAU I

Brandweerman

De informatie in deze les is gericht op het niveau van **brandweerman**.

Dit onderwerp is ook beschikbaar op niveau IV (specialist).

Deze les maakt deel uit van een pakket met opleidingsmateriaal voor de niveaus I tot IV: brandweerman, onderofficier, officier en specialist. Gelieve de les af te stemmen op de competenties en de leerverwachtingen van de doelgroep.

Opmerking: dit materiaal is eigendom van het HyResponder Consortium en moet als dusdanig erkend worden; de resultaten van HyResponse zijn als basis gebruikt.



Disclaimer

Ondanks de zorg waarmee dit document werd opgesteld, is de volgende disclaimer van toepassing: de informatie in dit document wordt verschaft zoals ze is; er wordt geen enkele garantie gegeven dat de informatie geschikt is voor een bepaald doel. De gebruiker ervan gebruikt de informatie op eigen risico en verantwoordelijkheid.

Het document bevat enkel de meningen van de auteurs. De FCH JU en de Europese Unie zijn niet aansprakelijk voor enig gebruik dat gemaakt zou worden van de hierin verschafte informatie.

Dankwoord

Het project heeft subsidies ontvangen van de Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) onder subsidieovereenkomst nr. 875089. De JU ontvangt steun van het onderzoeks- en innovatieprogramma Horizon 2020 van de Europese Unie en van het Verenigd Koninkrijk, Frankrijk, Oostenrijk, België, Spanje, Duitsland, Italië, Tsjechië, Zwitserland en Noorwegen.

Overzicht

In deze les concentreren we ons op ontstoken vrijgekomen waterstof. Aan het begin wordt nuttige terminologie geïntroduceerd. Daarna wordt een indeling gegeven van de verschillende soorten waterstofbranden.

Trefwoorden

Waterstofbrand, vlamhoogte

Inhoudstafel

Overzicht	3
Trefwoorden	3
1. Doelgroep	5
1.1 Taakomschrijving: brandweerman	5
1.2 Competentieniveau: brandweerman	5
1.3 Voorkennis: brandweerman	5
2. Inleiding en doelstellingen	6
3. Voornaamste terminologie	8
4. Soorten waterstofbranden en -vlammen	10
5. Uitgestraalde warmtefluxen van fakkelbranden en vuurballen	11
5.1 Uitgestraalde warmtefluxen van fakkelbranden	11
5.2 Fakkelbranden van waterstof in vergelijking met fakkelbranden van andere brandstoffen	11
6. Brand bij brandstofcelvoertuigen	14
Dankwoord	15
Referenties	16

1. Doelgroep

De informatie in deze les is gericht op NIVEAU 1: brandweerman. Er zijn ook lessen beschikbaar op niveau II, III en IV: onderofficier, officier en specialist.

De taakomschrijving, het competentieniveau en de leerverwachtingen waarvan wordt uitgegaan op het niveau van brandweerman worden hieronder beschreven.

1.1 Taakomschrijving: brandweerman

Een brandweerman is verantwoordelijk en wordt verwacht in staat te zijn om op een veilige manier interventies uit te voeren met persoonlijke beschermingsmiddelen, inclusief ademhalingsbescherming, waarbij hij de ter beschikking gestelde uitrusting gebruikt, zoals voertuigen, ladders, slang, blusapparaten, communicatie- en uitrusting, in eender welke klimatologische omstandigheden, op eender welke plaats en in alle noodsituaties waarin redelijkerwijs kan worden verwacht dat er een antwoord geboden moet worden.

1.2 Competentieniveau: brandweerman

Een brandweerman dient opgeleid te zijn in het veilig en correct gebruik van PBM, ademhalingsbescherming en andere uitrusting die hulpverleners verwacht worden te gebruiken, waarbij ondersteuning door passende kennis en oefening noodzakelijk is. Gedrag dat hun eigen veiligheid en die van andere collega's beschermt, moet beschreven worden in standaard operationele procedures. Vaardigheid en oefening in het dynamisch beoordelen van risico's voor de eigen veiligheid en die van anderen zijn noodzakelijk.

1.3 Voorkennis: brandweerman

Een brandweerman dient te beschikken over basiskennis en praktische basisvaardigheden die vereist zijn om relevante informatie te gebruiken om taken uit te voeren en standaard problemen met behulp van eenvoudige regels en hulpmiddelen op te lossen. Werken of studeren onder toezicht met enige zelfstandigheid.

2. Inleiding en doelstellingen

Naar de term "veiligheid" wordt vaak verwezen als een "niet-technische" barrière voor de opkomende technologieën op basis van brandstofcellen en waterstof. Er zijn echter een aantal technische uitdagingen die aangepakt moeten worden voordat deze technologieën naar de markt uitgerold kunnen worden. Eén daarvan is de beperking van de lengte van de straalvlam van waterstof uit het opslagsysteem van een brandstofcelvoertuig, die momenteel 10-15 m bedraagt, om hulpverleners toe te laten passagiers te evacueren en in veiligheid te brengen. Een ander belangrijk onopgelost probleem is het vergroten van de brandbestendigheid van de opslagtanks voor waterstof in voertuigen, die op dit moment 1-7 minuten bedraagt voor vaten van het type IV, zodat er meer tijd is voor het afblazen van uit de tanks. Dit zou ernstige schade aan bouwconstructies zoals garages in geval van accidenteel vrijkomen van waterstof voorkomen. Verder zou het elke kans op de vorming van grote waterstof-luchtwolken in tunnels, die in geval van brand kunnen leiden tot dodelijke slachtoffers over de hele lengte van de tunnel, uitsluiten. De hogere brandbestendigheid van opslagtanks voor waterstof zouden de veilige evacuatie van burgers uit een ongevallocatie toelaten en het leven van passagiers en hulpverleners beschermen[1].

Zonder twijfel zullen hulpverleners moeten omgaan met incidenten of ongevallen waarbij waterstofvlammen betrokken zijn, want een waterstofbrand is een typisch scenario voor veel ongevallen. De kennis van de mogelijke lengte van waterstofvlammen en de overeenkomstige veilige afstand is cruciaal voor hulpverleners. Bij een brand zal er ook thermische straling zijn, die schade kan toebrengen aan mensen en constructies, gebouwen, uitrusting enz. op afstanden groter dan de vlamhoogte. In deze les zullen een aantal factoren besproken worden die de omvang van een fakkelbrand en de ermee verbonden uitgestraalde warmteflux beïnvloeden, waaronder de druk waarmee waterstof wordt opgeslagen en de grootte van een lek. De methoden voor de detectie van een waterstofbrand en de technieken voor risicobeperking en het blussen van waterstofbranden worden ook behandeld in deze les.

Aan het eind van deze les kan een hulpverlener/cursist:

- Onderscheid maken tussen de verschillende soorten waterstofbranden: van microvlammen tot fakkelbranden en vuurballen,
- De lengte van waterstofvlammen beoordelen met behulp van nomogrammen, gedimensioneerde en dimensieloze correlaties,
- De gemiddelde plaats van de punt van de straalvlam bepalen,
- De veiligheidsafstand voor de bescherming van mensen en structuren voorspellen,
- Het effect van verschillende factoren op de lengte van de vlammen van een fakkelbrand uitleggen: afmetingen en vorm van het mondstuk, verbindingsstuk voor de straal, drijfvermogen, barrières of wanden,
- De vlamhoogtes en warmtefluxen voor fakkelbranden bij waterstof en andere gangbare brandstoffen (CNG en LPG) vergelijken,
- De drukeffecten van fakkelbranden van waterstof uitleggen,
- De belangrijkste methoden voor de detectie van waterstofbranden identificeren,
- De beperkingstechnieken voor waterstofbranden herkennen,
- Praktijken voor het blussen van waterstofbranden toepassen,

- Zich bewust zijn van de voornaamste veiligheidsuitdagingen bij de huidige stand van de technologieën op basis van brandstofcellen en waterstof.

3. Voornaamste terminologie

Voor een volledig begrip van waterstofbranden en andere gerelateerde fenomenen zal het nuttig zijn een aantal hieronder gegeven definities te leren. Gelieve te letten op de dimensieloze grootheden, die vaak gebruikt zullen worden in deze en volgende lessen.

De *gevarenafstand* (or *scheidingsafstand*) is een minimale afstand die "specifieke doelen scheidt van de gevolgen van mogelijke ongevallen in het kader van de werking van een waterstofinstallatie" [6]. De gevarenafstand is een afstand van (de bron van) het gevaar tot een (door fysische of numerieke modellering of door een voorschrift) bepaalde fysische effectwaarde (normaal, thermisch of druk) die kan leiden tot een schadeomstandigheid (gaande van "geen schade" tot "maximale schade") voor mensen, uitrusting of milieu

Normale temperatuur en druk wil zeggen: temperatuur 293.15 K en druk 101.325 kPa [1].

Brandbestendigheid is een tijd gedurende dewelke een passief brandbeschermingssysteem kan weerstaan bij een standaard brandbestendigheidstest [1].

De *maximaal toegestane werkdruk* is de maximale druk waaraan eender welk onderdeel of deel van het druksysteem mag worden blootgesteld over het volledige bereik van de ontwerptemperaturen [5].

Overdruk is de druk in een drukgolf boven de atmosferische druk, of de druk binnenin een omhulling die hoger is dan de maximaal toegestane werkdruk van de omhulling [5].

Het *vlampunt* is de laagste temperatuur waarbij de brandstof voldoende damp produceert op zijn oppervlakte om een brandbaar mengsel te vormen met lucht [1].

De *vlamsnelheid* is de snelheid van de vlam met betrekking tot een vaste waarnemer [3].

De *laminaire brandsnelheid* is de snelheid van de vlamverspreiding in verhouding tot de snelheid van het onverbrande gas dat zich ervoor bevindt, onder de aangegeven voorwaarden van samenstelling, temperatuur en druk van het onverbrande gas [1].

De *niet-voorgemengde vlam* (vaak *diffusievlam* genoemd) is de vlam waarin het oxidatiemiddel en de brandstof niet vermengd worden voordat een vlamfront wordt bereikt. Tijdens de verbranding verbindt het oxidatiemiddel zich met een brandstof via diffusie. De vlamsnelheid wordt beperkt door de diffusiesnelheid.

De *voorgemengde vlam* is de vlam waarin het oxidatiemiddel met de brandstof werd vermengd voordat het vlamfront werd bereikt. De verbranding van voorgemengde brandstof en oxidatiemiddel vormt een dun vlamfront doordat de reactanten vrij beschikbaar zijn.

De *zichtbare vlamhoogte* is de afstand op de middellijn vanaf het uiteinde van het mondstuk tot aan het einde van de vlam [2]. Voor het meten van de vlamhoogte worden vaak zichtbare infrarode (IR) en ultraviolette (UV) digitale beelden gebruikt, en de gemeten vlamhoogtes variëren tussen verschillende beelden [8].

Deflagratie is het proces dat volgt op de zwakke ontsteking in een brandbaar mengsel, dat zich aan subsonische snelheid verspreidt naar vers, onverbrand mengsel [3].

Detonatie is het proces waarbij de verbrandingsgolf zich aan een supersonische snelheid verspreidt naar het niet-gereageerde medium [3].

Afblazen is een proces waarbij waterstof vrijkomt en de opslagdruk na verloop van tijd daalt bij een lek [1].

Het loskomen van de vlam is de situatie waarin de vlam en de brander van elkaar gescheiden worden.

De *loskomhoogte* is de hoogte vanaf het uiteinde van het mondstuk tot aan de basis van een losgekomen vlam [2].

De *loskomsnelheid* is de snelheid van de brandstofstroom waardoor een vlam loskomt van het mondstuk [2].

Neerblazen is het doven van de vlam aan een hoge snelheid zonder loskomen [2].

Uitblazen is het doven van de vlam aan een hoge snelheid met loskomen [2].

De *uitblaasgrens* is een snelheidsgrens voor de brandstofstroom waarbij een opgestegen vlam bij overschrijding ervan uitgeblazen wordt [2].

Terugdaling is het zich opnieuw vasthechten van een opgestegen vlam aan het mondstuk door de daling van de loskomsnelheid [2].

De *geëxpandeerde straal* is de straal met een druk aan het uiteinde van het mondstuk die gelijk is aan de atmosferische druk [1].

De *ondergeëxpandeerde straal* is de straal met een druk aan het uiteinde van het mondstuk die groter is dan de atmosferische druk [1].

De *effectieve diameter* is de diameter van de straal op de plaats waar de expansie tot op 1 bar plaatsvindt in een ondergeëxpandeerde straal [4].

De *doofopening* is de vonkbrug tussen twee elektroden met evenwijdige platen waarbij de ontsteking van brandbare brandstof-luchtmengsels wordt onderdrukt. De doofopening is de doorgangsopening met de afmetingen die nodig zijn om de verspreiding te voorkomen van een open vlam doorheen een brandbaar brandstof-luchtmengsel dat de doorgang vult [1].

Het *getal van Froude (Fr)* is de dimensieloze grootte gelijk aan de verhouding tussen de traagheidskracht en de zwaartekracht [1].

Het *Machgetal (M)* is de dimensieloze grootte gelijk aan de verhouding tussen de lokale stroomsnelheid en de lokale snelheid van het geluid [1].

Het *Reynoldsgetal (Re)* is de dimensieloze grootte die de verhouding uitdrukt tussen traagheids- en viskeuze krachten [1].

4. Soorten waterstofbranden en -vlammen

Waterstof kan branden op verschillende manieren, bv. wolkbrand, fakkelbrand, deflagratie, detonatie enz.

Waterstofbranden kunnen gaan van microvlammen met een massadebiet van 10^{-9} kg/s tot vlammen met een hoog massadebiet (honderden kg/s). In de scenario's waarin een defect van de opslagtank mogelijk is waarbij waterstof onmiddellijk in de omringende atmosfeer vrijkomt, kunnen er grote vuurballen (tientallen meters) gevormd worden.

Het vrijgekomen waterstof kan branden in de vorm van laminaire diffusie of turbulente niet-voorgemengde vlammen, afhankelijk van het Reynoldsgetal (Re) bij de uitgang van een lek. Vlammen kunnen beïnvloed worden door het drijfvermogen van waterstof of door de werkdruk.

De fakkelbranden kunnen, afhankelijk van de voorwaarden van het lek, subsonisch ($Mach$ getal $M < 1$), sonisch en sterk ondergeëxpandeerd supersonisch zijn.. De aanwezigheid van obstakels, oppervlakken en afgesloten ruimten kan de straalvlam aanzienlijk beïnvloeden.

Een speciaal geval zijn branden waarbij vloeibaar gemaakte waterstof (LH_2) betrokken is. De kennis over branden met LH_2 is op dit moment beperkt. Er is een kennishiaat, met een aanwijzing is dat de condensatie en het vast worden van zuurstof (uit de atmosfeer) in het geval van gelekte/gemorste LH_2 onder bepaalde voorwaarden kan leiden tot explosieve mengsels.

5. Uitgestraalde warmtefluxen van fakkelbranden en vuurballen

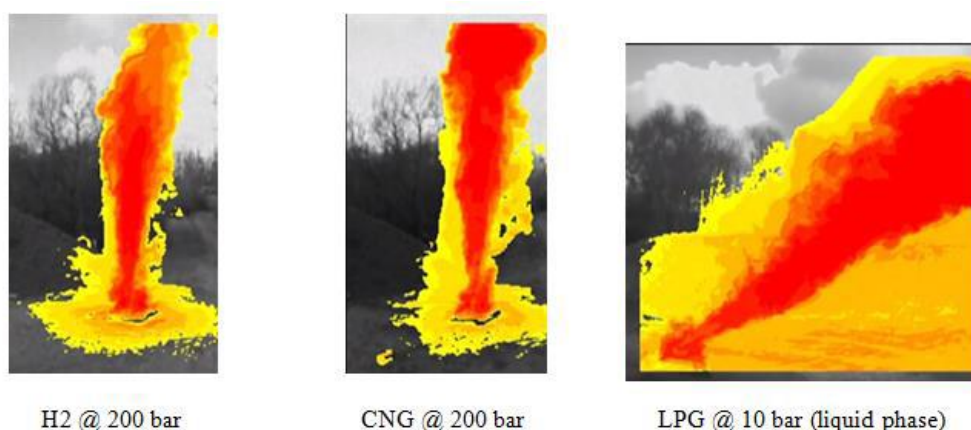
5.1 Uitgestraalde warmtefluxen van fakkelbranden

Waterstof brandt in zuivere lucht met een onzichtbare vlam. In vergelijking met andere brandstoffen heeft het een iets hogere vlamtemperatuur bij normale druk en temperatuur. Deze vlamtemperatuur kan een oorzaak zijn van ernstig letsel bij een ongeval, vooral in een zuivere laboratoriumomgeving, waar de waterstofvlam nagenoeg onzichtbaar is. De verbranding van waterstof en de hete stromen veroorzaken veranderingen in de omgeving die gebruikt kunnen worden om de vlam te detecteren. Hoewel de niet-oplichtende waterstofvlam het moeilijk maakt deze visueel te detecteren, is er een sterk effect van warmte en turbulentie op de omringende atmosfeer en de opstijgende pluim van hete verbrandingsproducten. Deze veranderingen worden de *signatuur van de brand* genoemd.

Het volgende onderdeel is gebaseerd op het werk uitgevoerd door het onderzoekscentrum HySAFER van de Universiteit van Ulster [7]. Vooraleer over te gaan naar de bespreking van stralingswarmtefluxen dient opgemerkt te worden dat een waterstofvlam slechts een minimale infraroodstraling en zo goed als geen zichtbare straling uitzendt. Door de afwezigheid van CO₂-stralingsbanden en de sterke absorptie door waterdamp uit de omgeving bedraagt de verhouding tussen zichtbare en infrarode straalvlammen van waterstof 0,88 en de verhouding tussen de ultraviolette en de infrarode vlamhoogte 0,78 [9]. Toch blijven warmtefluxen van convectie en straling belangrijk en moeten ze beoordeeld worden met het oog op de bescherming van het leven, eigendommen en het milieu.

Het effect van stralingswarmtefluxen op mensen, milieu en structuren wordt gedetailleerd besproken in les 6 - Schadecriteria voor mensen en eigendommen.

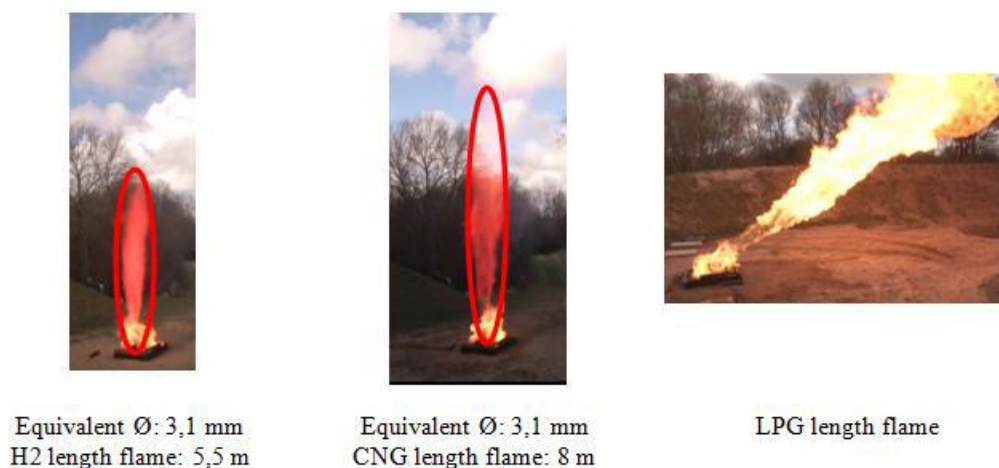
5.2 Fakkelbranden van waterstof in vergelijking met fakkelbranden van andere brandstoffen



Figuur 1. Infraroodbeelden van fakkelbranden waarop de thermische straling te zien is die wordt geproduceerd door de verbranding van waterstof (200 bar), CNG (200 bar) en LPG (10 bar).

Zoals te zien is in [figuur 1](#) produceren CNG en LPG door de onvolledige verbranding CO₂, CO, roet en andere producten, die een groter effect hebben op de straling dan waterstof. Dit

fenomeen verklaart waarom de verbranding van waterstof gekenmerkt wordt door kleinere thermische effecten dan bij andere gangbare brandstoffen, ook al is de temperatuur hoger dan die van een CNG-vlam. **Figuur 1** toont de vergelijking van de thermische straling geproduceerd door waterstof (200 bar), CNG (200 bar) en LPG (10 bar); de thermische signatuur van een fakkelbrand van waterstof is iets kleiner dan die van CNG, en beide zijn aanzienlijk kleiner dan de thermische straling van een LPG-brand.



Figuur 2. Vergelijking van de vlamhoogtes voor fakkelbranden van waterstof (openingsdiameter 3,1 mm), CNG (openingsdiameter 3,1 mm) en LPG.

De berekende vlamhoogtes in functie van de diameter van de thermisch geactiveerde overdrukinrichting in een aantal typische gevallen worden getoond in tabel 1. Het hulpmiddel "Flame length correlation and three hazard distances for jet fires" in e-Laboratory (<https://elab.hysafer.ulster.ac.uk/>) wordt gebruikt om de resultaten te bekomen.

Tabel 1. Berekende vlamhoogtes in functie van de diameter van de thermisch geactiveerde overdrukinrichting in typische gevallen

Opslagdruk (bar)	Openingsdiameter (mm)	Tanktemperatuur (°C)	Vlamhoogte (m)
350	1,0	20	2,6
700	1,0	20	3,3
350	1,0	50	2,5
700	1,0	50	3,2
350	3,0	20	7,8
700	3,0	20	9,9
350	3,0	50	7,5

700	3,0	50	9,6
350	1,0	100	3,1
700	3,0	100	9,2

6. Brand bij brandstofcelvoertuigen

Brandstofcelvoertuigen behoren tot de voornaamste zich snel ontwikkelende toepassingen van technologieën op basis van waterstof en brandstofcellen. Net als een elektrische auto met batterij, heeft een brandstofcelauto geen interne verbrandingsmotor. Brandstofcellen vormen de in chemische vorm opgeslagen energie rechtstreeks om tot elektrische energie die de auto's aandrijft. Wereldwijd zijn er enkele duizenden brandstofcelvoertuigen geproduceerd en kleine vloten van brandstofcelvoertuigen worden voornamelijk gebruikt door bedrijven en overheden, maar ook door privépersonen. Deze omvatten onder andere de door Hyundai geproduceerde modellen (iX35 Fuel Cell en NEXO) en de modellen Mirai I en II van Toyota. In Duitsland zijn er meer dan duizend auto's in gebruik, en een honderdtal tankstations! Ook zijn er reeds enkele brandweerwagens met brandstofcellen.

Als voorbeeld werden er volgens de Britse brandstatistieken [10] in de periode 2011-2012 in het VK 28.800 branden van wegvoertuigen geregistreerd. Ter vergelijking: in de VS waren er in dezelfde periode 172.500 voertuigbranden. Er waren verschillende soorten voertuigen bij betrokken: personenwagens, zware vrachtwagens, lichte bedrijfsvoertuigen, voertuigen voor openbaar vervoer enz. De meeste branden (65%) gebeurden bij auto's, 10% bij bestelwagens, 4% bij vrachtwagens en 2% bij bussen of minibussen [10]. De oorzaken van de brand kunnen accidenteel, opzettelijk of onbekend zijn. De meeste opzettelijke branden (43%) hadden betrekking op wegvoertuigen: 13.900 branden. Het aantal doden bij branden van wegvoertuigen in 2011-12 bedroeg 37 [10].

Tijdens de periode van 2000 tot 2006 werden er 20 gevallen van catastrofaal falen van een CNG-tank opgetekend, waarvan er 11 toegeschreven werden aan voertuigbranden [11]. Het bewijsmateriaal toont aan dat bij de meeste van deze 11 incidenten de overdrukrichtingen niet geactiveerd werden (in geval van een gelokaliseerde brand). "Tests hebben uitgewezen dat alle brandstoftanks (zowel CNG als waterstof) onafhankelijk van de werkdruk zeer vatbaar zijn voor snelle degradatie door gelokaliseerde branden" [11]. Dit betekent dat catastrofaal falen niet uitgesloten kan worden in de risicobeoordeling [10].



Figuur 3. Fakkelflam van waterstof en brand van benzine: 3 s (links) en 60 s (rechts) na aanvang van een autobrand [13].

De gevaren en risico's verbonden aan brandstofcelvoertuigen moeten op een professionele manier aangetoond en geïnterpreteerd worden, met een volledig begrip van de gevolgen door

alle betrokkenen, van ontwerpers van brandstofcelsystemen over regelgevende instanties tot gebruikers. De eerste vergelijking van de "ernst" van lekken en ontstekingen van waterstof en benzine werd uitgevoerd door Swain [13]. **Figuur 3** toont momentopnames van een fakkelbrand van waterstof en een brand van benzine 3 s (links) en 60 s (rechts) na aanvang van een autobrand. Er dient opgemerkt te worden dat deze vroege beelden NIET het meer recente hoekige ontwerp van thermisch geactiveerde overdrukinrichtingen met een kleinere diameter weergeven.

Verder moeten ook de geluidsniveaus bij waterstoflekken en -explosies in beschouwing worden genomen.

Dankwoord

Het HyResponse-project wordt hier vermeld omdat het hier voorgestelde materiaal gebaseerd is op de originele lessen van HyResponse.

Referenties

1. Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part I and Part II. Available from: www.bookboon.com, free download e-book.
2. Cheng, TS, Chiou, CR (1998). Experimental investigation of the characteristics of turbulent hydrogen jet flames. Combustion Science and Technology. Col. 136, p. 81-84.
3. Dorofeev, SB (2009). Evaluation of hydrogen explosion hazards: phenomenology and potential flame acceleration and DDT. 4th European Summer School on Hydrogen Safety.
4. Birch, AD, Brown, MG, Dodson, MG, Swaffield, F (1984). The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas. Combustion Science and Technology. Vol. 36, p. 249-261.
5. NFPA®52. Vehicular Natural Gas Fuel Systems Code, 2019 Edition.
6. LaChance, J, Tchouvelev, A and Engebo, A (2011). Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 36 p. 2381-2388.
7. Saffers, JB (2010). Principles of hydrogen safety engineering. PhD thesis. University of Ulster.
8. Schefer, RW, Houf, WG, Bourne, B and Colton, J (2006). Spatial and radiative properties of an open-flame hydrogen plume. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 31, pp. 1332-1340.
9. Houf, WG and Schefer, RW (2007). Predicting radiative heat fluxes and flammability envelopes from unintended releases of hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 32, pp. 136-151.
10. Case for safety. Relative frequency of failure modes. Available from: http://h2safe.net/case_safety.html [accessed on 25.11.20].
11. Fire statistics, Great Britain, 2011-2012. Department of Communities and Local Government.
12. Gambone, LR and Wong, JY (2007). Fire protection strategy for compressed hydrogen-powered vehicles. 2nd International Conference on Hydrogen Safety, San Sebastian, Spain, 11-13 September, 2007.
13. Swain, MR (2001). Fuel leak simulation. Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Program Review. Available from: <https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/30535be.pdf> [Accessed 25.11.20].