

Effect op de constructie en de omgeving

WP4 Veiligheidsaspecten en risico's

Auteur: TNO

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



1. 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 waren, momenteel bezig zijn, dan wel in de nabije toekomst betrokken zullen zijn bij de ontwikkeling van de waterstofinfrastructuur en specifiek voor partijen die zich bezig houden met de toepassing van waterstof als brandstof voor mobiliteit over de weg. 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.

Dit document beantwoordt een van de kennisvragen zoals die zijn geïnventariseerd door de deelnemers van WP4 in 2020. Voor meer informatie over en de totstandkoming van de kennisvragen zie <https://nlhydrogen.nl/wp4-inventarisatie-van-kennisvragen>.

Het doel van het behandelen van de kennisvraag is om een het effect van een waterstofexplosie in een (deels) afgesloten ruimte inzichtelijk te maken ten gevolge van een lekkage van waterstof uit een voertuig welke een waterstoftank aan boord heeft.

2. Introductie

In de nabije toekomst kunnen er meer auto's op de weg verschijnen die een waterstoftank aan boord hebben. In 2020 reden er ongeveer 300 auto's in Nederland op de openbare weg met een waterstoftank aan boord [1]. Deze auto's kunnen ook geparkeerd worden in een garage, wat een deels gesloten ruimte is. Door het lage soortelijke gewicht van waterstof kan het snel opstijgen en gekoppeld aan het brede ontvlambaarheidsgebied kunnen de risico's van een waterstofbrand of -explosie anders zijn vergeleken met de huidige 'conventionele' brandstoffen, zoals benzine, diesel en meer in het bijzonder LPG. Vanwege de beperkte ervaring met waterstofauto's is het risicoprofiel van waterstof in (deels) afgesloten ruimtes een grote onbekende, laat staan dat helder is wat het effect van een waterstofincident is op de constructie zelf.

3. Kennisvraag

In licht van bovenstaande, is de volgende kennisvraag geformuleerd:

Een auto met een waterstoftank onder hoge druk is betrokken bij een ongeluk. Door een breuk in één van de leidingen stroomt de inhoud van de tank leeg. Gedurende dit leegstomen wordt het waterstof-lucht pas na een zekere tijd door een externe bron ontstoken. Wat is het effect op de constructie en de omgeving?

4. Uitwerking van de kennisvraag

Gezien de nadruk in de vraag van het effect op de constructie, is voor de beantwoording van deze vraag uitgegaan van een (deels) afgesloten ruimte, zoals een parkeergarage of een tunnel. De

hoeveelheid informatie over het effect van een waterstofbrand/explosie op de mechanische integriteit van een constructie van een (deels) afgesloten ruimte is gelimiteerd. Kennis is aanwezig over het vrijkomen van waterstof in met name een tunnel en welke mitigerende maatregelen er genomen kunnen worden om de effecten van een dergelijke situatie te minimaliseren dan wel te vermijden. Er dient overigens te worden vermeld dat de kans dat een leiding breekt zeer klein is.

De vraag verder concretiserend, wordt aangenomen dat de volle tank volledig leeggestroomd is, dat het waterstof zich heeft verspreid in de deels afgesloten ruimte, waarbij er concentratiegradiënten aanwezig zullen zijn in de ruimte en dat ergens een ontstekingsbron aanwezig is, die zich in een ontvlambaar deel van het mengsel bevindt en daarmee de verbrandingsreactie op gang brengt. Daarmee wordt het scenario van bijvoorbeeld het effect van een waterstoffakkel op de constructie uitgesloten. Het is overigens bekend dat een fakkel - 4 kg waterstof, 700 bar tank, 2 mm gaatje, afstand tot muur 1 meter, met een tijdsduur van bijna 4 minuten – alleen oppervlakkige betonspat veroorzaakt [2]. Dit wordt ook bevestigd door LaFleur et al. [3] die stellen dat er alleen sprake zal zijn van lokale betonspat. Indien er sprake is van ventilatie, zal de kans op betonspat navenant afnemen. Verder werd vastgesteld dat er geen schade was te verwachten op de (ijzeren) constructie van de tunnel. Voor een algemeen overzicht van alle mogelijke effecten op een constructie, inclusief die van een fakkel, brokstukken en een fysische explosie, wordt verwezen naar de rapporten van Spoelstra [4, 5].

Thermische straling

De tijdsduur van de explosie van het waterstof-lucht mengsel en de bijbehorende vlamverschijnselen zal enkele seconden bedragen, uitgaande van een standaard waterstoftank die volledig gevuld was. Uit het HyTunnel project [6] komt naar voren dat het falen een (deels) gesloten constructie (tunnel) ten gevolge van de (kortdurende) thermische straling onwaarschijnlijk is, juist door de korte duur van de aanwezigheid van de vlam. Voor een openbare parkeergarage geldt dat deze geometrisch complexer is, zoals de aanwezigheid van meerdere openingen, het meerdere verdiepingen kan hebben, een lager plafond heeft en meerdere en andersoortige obstakels kan bevatten. Deze factoren kunnen de duur van de explosie veranderen, maar niet dusdanig dat de duur van de thermische straling significant anders zal zijn ten opzichte van een tunnel. Daarmee is de verwachting dat het onwaarschijnlijk is dat uitsluitend het thermische effect van het waterstof-lucht mengsel verantwoordelijk zal zijn voor het falen van een parkeergarage. Ten gevolge van de explosieve verbranding van het mengsel kunnen andere objecten in de deels gesloten ruimte ontbranden en deze kunnen tot lokale branden leiden. De thermische straling van deze branden houden veel langer houden en kan lokaal leiden tot schade aan en eventueel falen van de constructie. Dit fenomeen ligt buiten de scope van dit document en is overigens ook niet specifiek voor waterstof.

Overdruk

Experimentele data aangaande overdrukken ten gevolge van een waterstofexplosie in een tunnel, dan wel schaalmodel van een tunnel zijn schaars, laat staan informatie over de impact van de overdrukken op dergelijke constructies. Bratland et al. [7] maakten gebruik van een metalen kanaal met een lengte van 3 meter en een vierkant doorstroomd oppervlak van 0,01 m², welke aan één kant was afgesloten en aan de andere kant open. Waterstof werd in deze tunnel geblazen, waardoor een inhomogeen mengsel werd gevormd in de tunnel die op verschillende plekken konden worden ontstoken. De gevormde mengsels waren gemiddeld stoichiometrisch of brandstofrijk (meer brandstof dan zuurstof aanwezig, waardoor verbranding onvolledig is). Naast de gemeten overdrukken, die lagen tussen de 0,1 en 0,4 bar, werd ook een structurele responsanalyse uitgevoerd. Sterke en relatief langdurende drukoscillaties werden gedetecteerd tijdens de explosies,

die aanleiding gaven tot trillingen. Die trillingen waren dusdanig krachtig en van een dusdanige duur dat deze potentieel permanente schade zouden kunnen aanbrengen aan (elementen van) de constructie.

Groethe et al. [8] hebben experimenten uitgevoerd in een metalen schaalmodel van een tunnel (1:5). Ontvlambare waterstof-luchtmengsels met een volume tot 37 m³ op een totaalvolume van de tunnel van bijna 300 m³, werden ontstoken en de resulterende overdruk als functie van de waterstofconcentratie werd bepaald. Een mengsel met 9.5% waterstof resulteerde in een druk die niet gedetecteerd kon worden door de druksensoren. Voor een 20% en 30% (stoichiometrisch) mengsel werden overdrukken van respectievelijk 0,35 bar en 1,5 bar gemeten.

Het voorliggende scenario is een extreme worst-case versie. Meer experimentele data is voorhanden voor voertuigen met een waterstoftank aan boord, waarbij er vanuit wordt gegaan dat de veiligheidsklep (TPRD) van de waterstoftank open gaat en dat enkele seconden hierna ontsteking plaatsvindt. Dit is een andere situatie dan in voorliggend geval en zal in de meest gevallen, na een vuurbal, leiden tot een fakkel. De resulterende overdrukken zijn beduidend lager dan de waarden die door Groethe et al. [8] worden gerapporteerd en liggen in dezelfde grootteorde als die van Bratland et al. [7].

Een ander scenario waarvoor data voorhanden is, is de fysische explosie van een waterstoftank met een inhoud van 62,4 liter en een druk van 700 bar in een tunnel [9]. De gemeten piekdruk van de daarop volgende waterstofexplosie bedroeg 1,52 bar. Op basis van deze data en middels CFD berekeningen hebben Lui et al. [10] gekeken naar de structurele respons van een gewapend betonplaat, ten gevolge van de resulterende drukcurve [9]. De berekende maximale verplaatsing van de betonplaat viel binnen de marges zoals die door de internationale standaard [11] zijn gesteld, waarbij deze niet zou falen. Wel is er sprake van permanente schade, waardoor de plaat zwakker is dan voor de explosie en versteviging van de plaat werd aangeraden.

In bovenstaand geval is uitgegaan van een volle tank die open barst in een tunnel, waarbij vervolgens de gevormde wolk ontsteekt. De waterstofconcentratie in de brandbare wolk en de vulgraad van de tank en daarmee grootte van de wolk hebben een grote invloed op de uiteindelijke overdruk. Een openbare parkeergarage heeft, zoals hierboven aangegeven, andere karakteristieken die van invloed zijn op de uiteindelijk gemeten overdruk ten opzichte van de situatie in een tunnel. Andere factoren die invloed hebben op de uiteindelijk gemeten overdrukken zijn ventilatie en de aanwezigheid van obstakels. Deze factoren hebben een tegengesteld effect op de verbranding: ten gevolge van ventilatie wordt het waterstof beter gemengd met de omringende lucht en zal de waterstofconcentratie lager worden. Obstakels versnellen de vlam juist waardoor de uiteindelijke druk hoger is dan in een situatie zonder obstakels.

De eisen die in Nederland aan een betonnen gebouw gesteld worden om buitengewone drukbelastingen te weerstaan, zijn vastgelegd in normen [12]. Een gebouw moet bestand zijn tegen bekende buitengewone belastingen die zijwaarts (botsingen) of alzijdig (explosies) plaatsvinden. Normaal gesproken zal een gebouw zó ontworpen zijn, dat als een deel van een constructie faalt, andere constructiedelen de krachten kunnen opvangen om voortschrijdend falen te voorkomen [5]. Bij een explosie wordt een gebouw gedurende zeer korte tijd belast op een manier waarvoor het niet ontworpen is. Het gewicht en de stijfheid van de constructie spelen dan een grote rol in het al dan niet falen van het gebouw. De manier waarop vervorming optreedt en de omvang van de vervorming

hangen niet alleen af van de overdruk, maar ook van de eigenschappen van de staande en liggende elementen en de manier waarop deze elementen tot een constructie zijn samengesteld [5].

5. Conclusies

Een auto met een waterstoftank aan boord is betrokken bij een ongeluk in een (deels) afgesloten ruimte, waarbij door een breuk in de waterstofinstallatie de inhoud van de tank leegstroomt in deze ruimte. Het thermische effect van de vlam is dusdanig kort van duur, dat het effect hiervan op de constructie te verwaarlozen is. De gevormde overdruk zal kunnen leiden tot vervormingen van de constructie. Wanneer de belasting groter is dan waar het gebouw voor ontworpen is, dan kan het gebouw permanente schade oplopen, zijnde deels instorten of zelfs volledig voortschrijdend instorten. Op basis van beschikbare, beperkte informatie behoren permanente beschadigingen tot de mogelijkheden en is het falen van een constructie niet uit te sluiten.

6. Referenties

1. [Waterstof in parkeergarages - Opwegmetwaterstof.nl \(nlhydrogen.nl\)](https://www.opwegmetwaterstof.nl)
2. Bergin, S., Fletcher, J., Pursell, M., & Royle, M. (2004). Erosive effects of hydrogen jet fires on tunnel structural materials. 4th International Seminar on Fire and Explosion Hazards.
3. LaFleur, C. B., Bran Anleu, G. A., Muna, A. B., Ehrhart, B. D., Blaylock, M. L., & Houf, W. G. (2017). *Hydrogen fuel cell electric vehicle tunnel safety study* (No. SAND-2017-11157). Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States); Sandia National Lab.(SNL-CA), Livermore, CA (United States).
4. Spoelstra, M.B. Veiligheidsaspecten van waterstof in een besloten ruimte, Instituut Fysieke Veiligheid, oktober 2020.
5. Spoelstra, M.B. Waterstofincidenten in besloten ruimtes, Nederlands Instituut Publieke Veiligheid, september 2023.
6. F. Markert, L. Giuliani, L.G. Sorensen and W. Liu, Final report on analytical, numerical and experimental studies on fires including innovative prevention and mitigation strategies, Deliverable D3.3, Version 220228, February 2022.
7. Bratland, M., Bjerketvedt, D., & Vaagsaether, K. (2021). Structural response analysis of explosions in hydrogen-air mixtures in tunnel-like geometries. *Engineering Structures*, 231, 111844.
8. Groethe, M., Merilo, E., Colton, J., Chiba, S., Sato, Y., & Iwabuchi, H. (2007). Large-scale hydrogen deflagrations and detonations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(13), 2125-2133.
9. Rattigan, W. & Moodie, K. (2022). Final report on analytical, numerical and experimental studies on explosions including innovative prevention and mitigation strategies, Deliverable D4.3, Version 220218, February 2022.
10. Liu, W., Markert, F., Shentsov, V., & Giuliani, L. (2023, April). Nonlinear analysis of a tunnel slab under a hydrogen explosion. In *10th International Symposium on Tunnel Safety and Security*.
11. ISO Standard 834-1, Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements, 1999.
12. NEN-EN 1991-1-7, Belasting op constructies – Deel 1-7: Algemene belastingen – Buitengewone belastingen, 1991.