

Effect van gecombineerde belasting op faalkans van een tank

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



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 het inzichtelijk maken van de lange-termijn veiligheid van een (composieten) waterstoftank.

Introductie

Waterstoftanks dienen te voldoen aan stringente veiligheidseisen, alvorens ze toegepast mogen worden in applicaties, zoals bijvoorbeeld in een auto rijdend op waterstof. Deze brandstoftanks zijn onder meer onderworpen aan crash tests en zijn in de nodige gevallen zelfs 'bulletproof'. Afhankelijk van het materiaal dat toegepast wordt om de tank te maken, zijn er tanks die hittebestendig zijn, bijvoorbeeld wanneer deze gemaakt zijn van Kevlar. Onder invloed van zowel hoge druk aan waterstof, thermische effecten (koude of tropische omgeving, alsmede temperatuurfuctuaties tijdens het bijvoorbeeld vullen van de tank) en het diffunderen van waterstof door de wand van de (composieten) tank invloed kunnen hebben op het faalgedrag ervan. Tevens kunnen na verloop van tijd de gebruikte materialen in de composiettank ook verouderingsverschijnselen vertonen, waardoor de faalkans van een tank kan veranderen.

Kennisvraag

In licht van bovenstaande, is de volgende kennisvraag geformuleerd:

Wat is het gecombineerde effect van mechanische, thermische en fysische (permeatie waterstof) belasting op de composiettank, inclusief de appendages (leidingwerk, O-ringen, kranen, et cetera) op de faalkans van de tank?

Uitwerking van de kennisvraag

Alvorens de vraag te beantwoorden, dient te worden opgemerkt dat er geen (publiekelijk) beschikbare informatie is, die het gecombineerde effect van deze belastingen kwantificeert, laat staan dat deze informatie ook de appendages meeneemt in de analyses.

Er worden 5 verschillende typen tanks onderscheiden:

- 1) **Type 1** – Een metalen tank gemaakt van staal of aluminium

- 2) **Type 2** – Een tank gemaakt van staal met glasvezel- of koolstofvezelfilament gewikkeld rond het middengedeelte van de cilinder
- 3) **Type 3** – composiettank van glasvezel of koolstofvezel met een aluminium liner.
- 4) **Type 4** – composiettank van koolstofvezel met een thermoplastische polymeren liner.
- 5) **Type 5** – Tank compleet van composiet gemaakt zonder liner.

In de vraagstelling wordt de fysische belasting onder invloed van permeatie als uitgangspunt genomen. Permeatie door metalen wordt gezien als insignificant, waardoor de tanks van typen 1 tot en met 3 hier geen last van zullen hebben. De meeste informatie is voorhanden voor Type 4 tanks. Voor alle typen is veel informatie te vinden over de gemeten barstdruk (bursting pressure).

Composiet drukvaten dienen aan een zeer hoog veiligheidsniveau te voldoen, waarbij een rigoureuus kwalificatietraject doorlopen dient te worden, waaronder [1]:

- 1) 11.250 (of 750 x levensduur in jaren) drukcycli tot 125% nominale werkdruk, zonder lekkage of breuk.
- 2) Onder druk gebracht met waterstofgas tot 125% van de nominale werkdruk en gedurende 1.000 uur op +65°C gehouden.
- 3) Tank met waterstof op druk gebracht tot de werkdruk waarop een kogel wordt afgeschoten met een diameter van minimaal 7,6 mm om te controleren of het vat hierdoor niet scheurt.
- 4) Van een hoogte van maximaal 2 meter worden valtesten uitgevoerd. De tanks vallen hierbij horizontaal, verticaal van beide kanten en onder een hoek van 45° op een ruwe betonnen ondergrond. Vervolgens worden de tanks aan drukcycli blootgesteld om te verifiëren dat er geen verslechtering van de levensduur is.
- 5) Minimaal 1.000 snelvul- en leegloopcycli, uitgevoerd bij omgevingstemperatuur, om de afwezigheid van lekkage en materiaaldegradatie te verifiëren.
- 6) Een zogenoemde bonfire-test, waarbij een tank tot 100% van de werkdruk wordt gevuld en niet dient open te barsten.

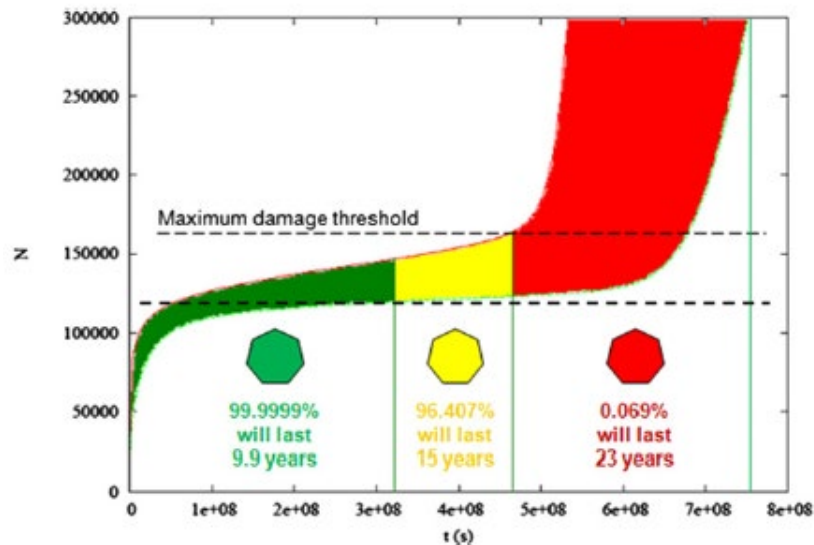
1.1. Effect van thermomechanische belasting

De gangbare liner die wordt toegepast bij Type 4 waterstofcilinders bestaat uit materialen zoals hoogwaardig polyetheen (HDPE), polyamide (PA), polyethyleentereftalaat (PET), en polyethers. Diverse strategieën worden ingezet om de eigenschappen van de liner, zoals sterkte en thermische stabiliteit, te verbeteren. Tijdens het wikkelp proces is het essentieel dat de koolstofvezellaag goed hecht met de liner om spanning op de liner te verminderen, inclusief statische spanning (elastische vervorming als gevolg van hoge druk) en cyclische spanning (door snel laden en ontladen van waterstof). Naast koolstofvezel worden ook glasvezel, aramidevezel en basaltvezel gebruikt [2].

Het snel vullen van een waterstoftank leidt tot thermomechanische spanningen in de structuur van het vat ten gevolge van de stijgende druk en temperatuur. Of deze spanningen invloed hebben op het faalgedrag van de tank is van een aantal parameters afhankelijk, waaronder de manier waarop de filamenten over elkaar zijn gelegd tijdens het vervaardigen van de tank. Dit was al bekend ver voordat waterstof als mogelijke brandstof werd beschouwd en er zijn vele studies gewijd aan het optimaliseren van de levensduur van dergelijke vaten [3, 4]. Zo is onder meer bekend van koolstofvezel versterkte polymeren (Type 4), dat hun veroudering sterker wordt beïnvloed wordt door de thermische cycli dan door de mechanische belasting ten gevolge van drukcycli [3]. Het eerstgenoemde effect kan worden ondervangen door voorwaarden te stellen aan de duur van tanks. Hierbij dient een compromis gevonden te worden tussen de tanks aan de ene kant lichter, goedkoper en veiliger te maken zonder dat dit tot nadelige effecten leidt voor wat betreft de prestaties van de tank (aantal cycli dat het kan doorstaan onder een zo kort mogelijke tankduur) en de grootte van de tank. De eerder genoemde temperatuurgradiënten veroorzaken spanningen in het

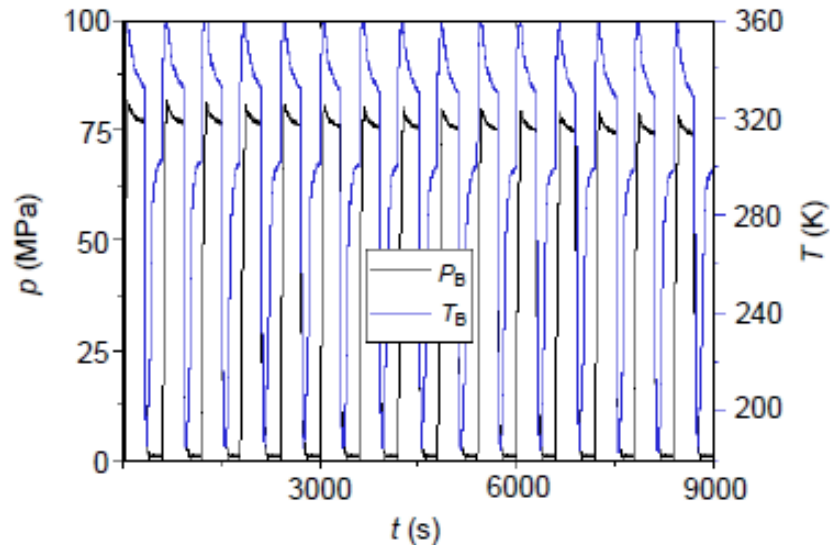
materiaal waardoor de eigenschappen van dat materiaal veranderen, die op hun beurt de locatie van de opgetreden spanningen kunnen verplaatsen, met name in de bolvormige uiteinden van de tank.

Het falen van een tank wordt met name bepaald door het breken van de vezels in de composietenmatrix. De barstdruk van een tank neemt af naar mate de temperatuur toeneemt. Zo heeft Gentileau et al. [4] laten zien dat de barstdruk van een Type 4 tank reduceert van 1262 MPa bij 25°C tot 1205 MPa bij 85°C. Let wel dat dergelijke drukken ver boven de werkdrukken van dergelijke vaten ligt, zijnde 700 bar. De meeste tanks falen in het middengedeelte van de tank [6]. Camara et al. [7] hebben getracht op basis van het eerder genoemde vezelfalen een statistisch model op te zetten voor de faalkans van een Type 4 tank op basis van een beperkte set aan samples, zie Figuur 1.



Figuur 1. Levensduur van Type 4 tank als functie van tijd. Criterium is het aantal gebroken vezels [5].
Voor fabrikanten van tanks geldt een gewenste faalkans van 1 op 1 miljoen of beter.

Zheng et al. [6] hebben een Type 4 tank blootgesteld aan een meerdere cycli om vast te stellen wat het gecombineerde thermomechanische effect van druk en temperatuur was op de tank. De originele tank had een ontwerpdruk van 1400 bar en de duur van 1 cyclus was 10 minuten (600 seconden), zie Figuur 2. Zoals te zien in Figuur 2 zijn de temperatuurschommelingen fors. Na 500 cycli is de barstdruk bepaald en deze bleek met 15% gedaald te zijn naar 1190 bar ten opzichte van de ontwerpdruk. Een andere tank is aan dergelijke cycli blootgesteld net zolang tot aan de buitenkant van de tank lekkage waargenomen kon worden door de vorming van belletjes in zeepsop. Na 5122 cycli werden de eerste belletjes zichtbaar (geen breuk). Middels een hydraulische test, waarbij wel het drukprofiel kon worden opgelegd, maar waarbij het temperatuureffect afwezig was, waren ruwweg 12000 cycli nodig alvorens de tank begon te lekken. Om het getal van 5122 cycli in perspectief te plaatsen, aannemende van 1 tankbeurt per week, komt dit overeen met een levensduur van ruwweg 100 jaar. De data van Camara et al. [5] in ogenschouw nemende en uitgaande van een levensduur van 15 jaar, komt dit overeen met ruwweg 1 tankbeurt per dag. Hierbij dient verder te worden aangetekend dat de resultaten verkregen uit deze testen relatief conservatief zijn, vanwege de korte ontlaadtijd van de tanks. Verder is het aantal gebruikte tanks te klein om hier een statistisch verantwoorde analyse op los te laten. De resultaten geven wel een eerste indicatie van levensduur van de tanks.



Figuur 2. Gemeten druk en temperatuur van een Type 4 tank met een cyclustijd van 600 seconden [4].

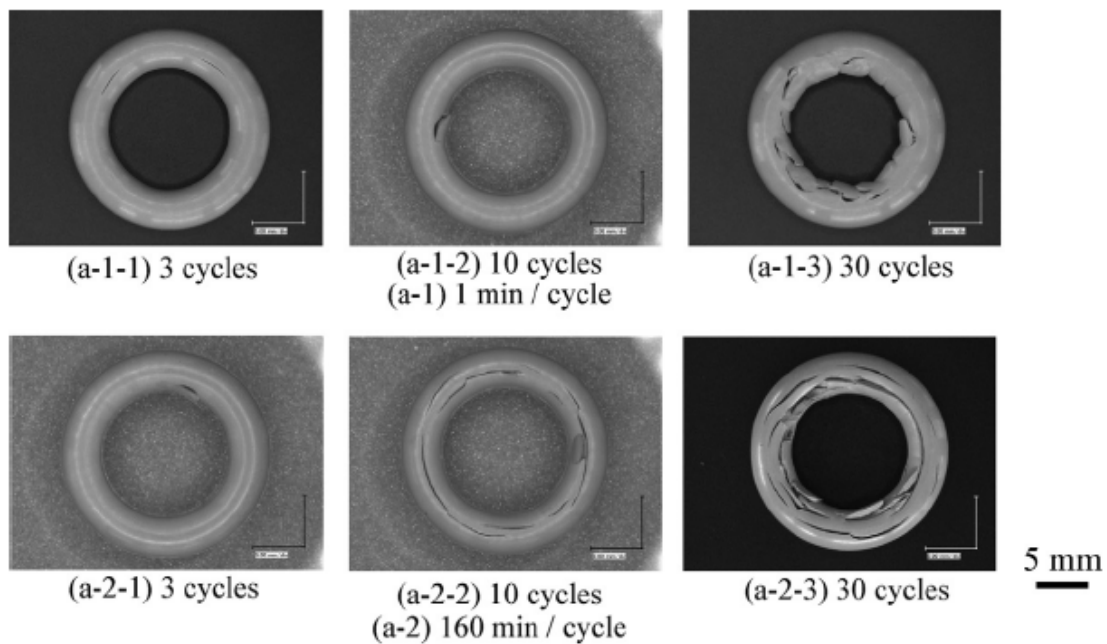
1.2. Effect van fysische belasting (permeatie)

Fujiwara et al. [7] hebben onderzoek gedaan naar het effect van waterstofpermeatie, waarbij de focus lag op polyethyleen als zogenaamd liner-materiaal. Over het algemeen schaalde de permeabiliteit lineair met de opgelegde druk; hoe hoger de druk, hoe groter de permeatie van het gas. Het is bekend dat in Type 4 tanks er gasophoping, ten gevolge van waterstofgaspermeatie, kan plaatsvinden tussen de liner en de koolstofvezel-gebaseerde buitenmantel. Dit gas kan ten gevolge van decompressie en temperatuurschommelingen leiden tot de 'delamineren' van de liner-laag ten opzichte van de buitenmantel, met lekkage tot gevolg [8]. Bij een waterstoftestdruk van 900 bar vonden Fujiwara et al. [7] dat de permeabiliteitscoëfficiënt afnam met een toename van de waterstofdruk ten gevolge van veranderingen in het specifieke volume en de mate van kristalliniteit van het polymeer. In de literatuur is geen specifieke correlatie van het effect van permeatie op de faalkans van een composieten tank gevonden.

1.3. Effect van belasting op appendages

Het is bekend dat O-ringen blaren of scheuren kunnen vormen bij snelle decompressie, afhankelijk van het gekozen Oring materiaal, opgelegde druk en type gas. Zo is van koolstofdioxide bekend dat ze bij snelle decompressie zorgen voor een zwelling van de Oringen die een factor 3 van de originele Oring diameter kan bedragen.

Yamabe et al. [9] hebben EPDM Oringen onderworpen aan een cyclische blootstelling van waterstofgas uitgevoerd bij waterstofdrukken variërend van 100 tot 700 bar en omgevings-temperaturen variërend van 30 tot 100 C onder twee testfrequenties. Bij een druk van 100 bar ontstaan blaren ten gevolge van decompressie. Bij drukken van 350 bar of meer was er sprake van een grote volumevergroting ten gevolge van zwelling wat leidde tot extrusie en scheuring van de Oringen in de groeven waarin ze lagen, zie Figuur 3.. Hoe hoger de frequentie van de cycli, hoe sterker het effect van scheurschade. Er moet gesteld worden dat de experimenten uitgevoerd zijn met EPDM Oringen; in de praktijk kunnen er ook ander Oring materiaal gebruikt worden. Yamabe et al. [9] hebben soortgelijke bevindingen overigens wel gevonden voor NBR Oringen.



Figuur 3. Effect van decompressie op EPDM Oringen als functie van aantal cycli en cyclussnelheid. Opgelegde druk was 350 bar bij een temperatuur van 100°C [9].

Conclusies

Het snel vullen van een waterstoftank leiden tot dermate temperatuurverhogingen – in combinatie met de toegenomen druk - dat daarmee de faalkans zal toenemen als functie van de tijd. Op basis van de beperkte data voorhanden, kan een voorzichtige conclusie worden getrokken dat in ieder geval Type 4 waterstoftanks een levensduur heeft van minimaal 15 jaar. Geen conclusies kunnen worden getrokken aangaande het effect van fysische belasting (permeatie) op de faalkans van een tank.

Het is bekend dat Oringen bij veelvuldige, decompressie blaren en scheuren kunnen gaan vertonen. In geval van een waterstoftank is het echter niet aannemelijk dat deze veelvuldig decompressiecycli zal ondergaan. Daarmee zal de in de literatuur gemelde blaar- en scheurvorming minder snel optreden.

Geen eenduidige uitspraak is te doen over wat de zwakste schakel zal zijn van de complete waterstoftank inclusief appendages.

Aanbevelingen

De hoeveelheid data voor alle genoemde vormen van belasting op de complete tank, inclusief appendages is te beperkt om tot een verantwoorde statistische uitspraak te kunnen komen over de faalkans. Meer data is nodig om deze leemte op te vullen.

Referenties

1. Sirosh, N., & Niedzwiecki, A. (2008). Development of storage tanks: high-pressure vessels. In *Hydrogen Technology: Mobile and Portable Applications* (pp. 291-310). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

2. Alves, M. P., Gul, W., Cimini Junior, C. A., & Ha, S. K. (2022). A review on industrial perspectives and challenges on material, manufacturing, design and development of compressed hydrogen storage tanks for the transportation sector. *Energies*, *15*(14), 5152.
3. Bertin, M., Touchard, F., & Lafarie-Frenot, M. C. (2010). Experimental study of the stacking sequence effect on polymer/composite multi-layers submitted to thermomechanical cyclic loadings. *international journal of hydrogen energy*, *35*(20), 11397-11404.
4. Gentilleau, B., Touchard, F., & Grandidier, J. C. (2014). Numerical study of influence of temperature and matrix cracking on type IV hydrogen high pressure storage vessel behavior. *Composite Structures*, *111*, 98-110.
5. Camara, S., Bunsell, A. R., Thionnet, A., & Allen, D. H. (2011). Determination of lifetime probabilities of carbon fibre composite plates and pressure vessels for hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, *36*(10), 6031-6038.
6. Zheng, C. X., Wang, L., Li, R., Wei, Z. X., & Zhou, W. W. (2013). Fatigue test of carbon epoxy composite high pressure hydrogen storage vessel under hydrogen environment. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, *14*, 393-400.
7. Fujiwara, H., Ono, H., Ohyama, K., Kasai, M., Kaneko, F., & Nishimura, S. (2021). Hydrogen permeation under high pressure conditions and the destruction of exposed polyethylene-property of polymeric materials for high-pressure hydrogen devices (2)-. *International Journal of Hydrogen Energy*, *46*(21), 11832-11848.
8. Li, X., Huang, Q., Liu, Y., Zhao, B., & Li, J. (2023). Review of the Hydrogen Permeation Test of the Polymer Liner Material of Type IV On-Board Hydrogen Storage Cylinders. *Materials*, *16*(15), 5366.
9. Yamabe, J., & Nishimura, S. (2013). Failure behavior of rubber O-ring under cyclic exposure to high-pressure hydrogen gas. *Engineering Failure Analysis*, *35*, 193-205.