

Invloed procesvoering hogedrukleidingen op het faalgedrag van de leiding

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. Aanvullend zijn aspecten ook opgenomen die gelden voor buisleidingen onder hoge(re) druk met waterstof als energiedrager. Dit document gaat niet in op kunststofleidingen; de faalmechanismen kunnen en zullen deels anders zijn.

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 duiden van de effecten van sterk fluctuerende procescondities (met name druk en in mindere mate temperatuur) op de levensduur van hogedruk pijpleidingen.

Introductie

In licht van de energietransitie zal door middel van electrolyzers op grote schaal waterstof gemaakt gaan worden. Naast de stationaire productie, zal in de toekomst bijvoorbeeld bij een overschot aan elektriciteit ook worden ingezet op het produceren van waterstof om deze elektrische energie niet verloren te laten gaan. Daarmee zal de productie van waterstof – in tegenstelling tot de productie van aardgas wat uit gasputten komt – een veel dynamischer proces zijn. Doordat de productie van waterstof sterker tijdsafhankelijk wordt, zal ook de druk in de leidingen sterker fluctueren. Met name voor hogedruk leidingen kan dit eventueel effect hebben op de levensduur van deze leidingen¹.

Kennisvragen

In licht van bovenstaande, zijn de volgende kennisvragen geformuleerd:

1	Wat is het (faal)gedrag van de staalsoorten die gebruikt worden voor hogedruk leidingen wanneer de druk niet fluctueert?
2	Wat is het (faal)gedrag van de staalsoorten die gebruikt worden voor hogedruk leidingen wanneer de druk wel fluctueert?
3	Heeft het vervangen van aardgas voor waterstof hier invloed op?
4	Zijn er nog meer procesparameters die van invloed zijn op het faalgedrag van hogedrukleidingen?

¹ Hiervoor is een vooronderzoek uitgevoerd, zie voor de algemene aspecten het onderzoek Technische aspecten van waterstof in bestaande buisleidingen t.b.v. de energietransitie, doc.nr. 53052.01-1917001, Bilfinger Tebodin, 19 november 2019.

Uitwerking van de kennisvraag 1

Wat is het (faal)gedrag van de staalsoorten die gebruikt worden voor hogedruk leidingen wanneer de druk niet fluctueert?

Hogedruk leidingen onder constante gasdruk mits goed ontworpen, aangelegd en onderhouden falen alleen door externe oorzaken zoals bijvoorbeeld graafschade. Door beschadiging door externe oorzaken wordt de weerstand van de gasleiding verminderd. Als de weerstand lager is dan de belasting dan leidt dit tot een lek. De grootte van het lek is afhankelijk van de grootte van de beschadiging en de taaheid van het materiaal. Een breuk is een lek waarbij de opening even groot is als de doorsnede van de leiding. De gasuitstroom is dan maximaal, vanuit beide zijden van de gasleiding.

Bij een goed ontworpen, aangelegd en onderhouden leiding wordt onder meer rekening gehouden met bescherming tegen overdruk en te hoge temperatuur, en degradatiemechanismen (corrosie, kruip, vermoeiing) in de drie fasen van een gasleiding.

Is het gas corrosief dan heeft men een materiaal geselecteerd dat voldoende corrosieweerstand heeft is, het gas wordt geïnjecteerd met een inhibitor of op de wanddikte wordt een corrosietoeslag berekend.

Is er kruip te verwachten dan kiest men een kruipvast materiaal of kiest men voor een inspectiebeleid gericht op het detecteren van kruipschade in combinatie met reparatie of een begrensde levensduur.

Is er vermoeiing te verwachten dan kiest men voor een grotere wanddikte (verlaging van de spanningswisseling, vermijden van vermoeiingsgevoelige lasverbindingen en spanningconcentraties, of lekdetectie.

Uitwerking van de kennisvraag 2

Wat is het (faal)gedrag van de staalsoorten die gebruikt worden voor hogedruk leidingen wanneer de druk wel fluctueert?

Drukfluctuaties (indien veelvuldig en sterk) kunnen zorgen voor degradatiemechanisme vermoeiing. Door vermoeiing zal de weerstand van de stalen gasleiding verminderen. Bestaande scheurachtige defecten kunnen gaan groeien.

Bij het ontwerp van een leiding wordt hiermee rekening gehouden, zodanig dat drukfluctuaties niet tot nadelige gevolgen zullen leiden. Hiermee is dit degradatiemechanisme geen faaloorzaak van de leiding.

Indien er bij het ontwerp geen rekening mee gehouden is, dan kan dit degradatiemechanisme beheerst worden door een combinatie van drukbeheersing en/of inwendig inspectie op defecten.

Uitwerking van de kennisvraag 3

Heeft het vervangen van aardgas voor waterstof hier invloed op?

Vermoeiing van staal gebeurt zowel in aardgas als in waterstof in dezelfde mate. Echter waterstofatomen in contact met en in het staal, zorgen dat scheurtjes onder een fluctuerende belasting sneller groeien dan in aardgas of lucht. Het is niet bekend dat de initiatie van scheuren wordt beïnvloed door waterstof. Daarnaast neemt de breukrek en breuktaaiheid af naarmate de belastingsnelheid afneemt. Onder snelle belastingen is er geen effect. Bijvoorbeeld in de kerfslagproef is de belastingsnelheid vrij hoog waardoor er geen effect van waterstof is in de kerfslagenergie.

Met een eventuele versnelde scheurgroei dient in het ontwerp en in de bedrijfsfase rekening te worden gehouden, om te borgen dat een leiding niet zal falen door scheurgroei.

Integriteitsborging tijdens de beheersfase door het voeren van een integriteitsmanagementsysteem is daarnaast van belang. Hiervoor zijn in Nederland randvoorwaarden geformuleerd.

In Europa [EGIG] is nog geen lek of breuk van hogedruk gasleidingen door vermoeiing gerapporteerd.

Uitwerking van de kennisvraag 4

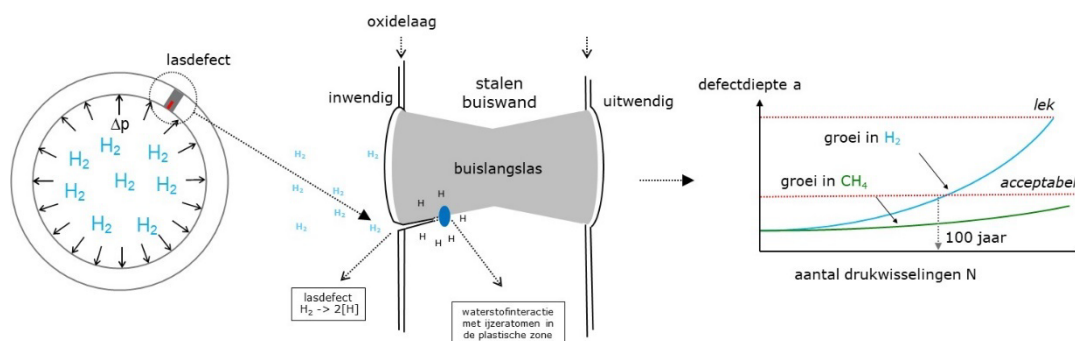
Zijn er nog meer procesparameters die van invloed zijn op het faalgedrag van hogedrukleidingen?

De procesparameters druk en temperatuur onder transportcondities zijn zodanig dat deze geen invloed hebben op het degradatiemechanisme waterstofversnelde scheurgroei. Een harde ondergrens van de waterstof druk is vooralsnog niet te geven. Al bij 5 bar is er een invloed op de scheurgroeirelatie vanaf een bepaalde scheurdrijvende kracht. Vanaf circa 20 bar waterstof is er nauwelijks meer een effect van een hogere waterstofdruk. Dus een hogere waterstofdruk zorgt dan niet voor een nog grotere scheurgroei. Dit betekent dat gebruik kan worden gemaakt van een scheurgroeirelatie representatief voor een groot waterstofdrukgebied, zie paragraaf “Vermoeiingsscheurgroeirelaties”.

Discussie

Waterstofgas bestaat uit waterstofmoleculen. Waterstofmoleculen vormen geen directe bedreiging voor stalen buisleidingen. Alleen als de moleculen kunnen ontleden in waterstofatomen kan er een negatief effect zijn. Temperatuur en druk onder transportcondities zijn te laag voor spontane vorming van waterstofatomen. Om toch bij deze condities waterstofatomen te krijgen is een katalysator nodig. IJzer (staal) is een geschikte katalysator.

Voor stalen buisleidingen betekent opname van waterstofatomen zonder maatregelen een verhoogde vermoeiingsscheurgroei ten opzichte van aardgas, een factor 10 of hoger. Scheurachtige defecten groeien alsdan met waterstofatomen sneller door het staal dan zonder waterstofatomen. Vermoeiingsscheurgroei kan zonder maatregelen ook optreden in aardgasleidingen. Echter omdat de scheurgroei veel lager is en de vermoeiingsbelasting laag is, is er ook nauwelijks groei van scheurachtige defecten. Figuur 1 geeft een illustratie van bovenstaande.



Figuur 1 Illustratie van versnelde vermoeiingsscheurgroei door atomair waterstof van een lasdefect in de langslas van een buisleiding. Voor een lasdefect in een spiraal- of rondlas kan een vergelijkbare illustratie worden gemaakt.

Waarom nou juist bij scheurachtige defecten? Deze defecten zijn het meest gevoelig voor vermoeiing. Staal heeft van nature een oxidelaag. Puur ijzer reageert direct met zuurstof. Door vermoeiing in het geval van zuurstofloos gas zoals aardgas en waterstof (maximaal O_2 10 mol ppm) ontstaan scheuroppervlakken van zuiver ijzer. Aan dit oppervlak kunnen waterstofmoleculen ontleed worden en in het staal worden opgenomen. Een scheur is een spanningsverhogende afwijking met bij de scheurtip een plastische zone. Dat is een zone met blijvende vervormingen in tegenstelling tot elastische vervormingen. De spanning nabij de scheurtip kan veel hoger worden dan de rekgrens. Spanningen onder rekgrens veroorzaken alleen elastische vervormingen. Waterstofatomen bevorderen het proces van plasticiteit met als gevolg dat scheurachtige defecten sneller groeien

onder een wisselende druk en dat de taaiheid, de weerstand tegen scheurgroei, omlaag gaat. Samenvattend leidt een scheurachtig defect tot degradatie door waterstof.

Het scenario van waterstofversnelde vermoeiingsscheurgroei is ook de basis in optie B van ASME B31.12 [1] en in DVGW G464 [2], zie paragraaf "Vermoeiingsscheurgroeirelaties". Beide zijn standaarden voor waterstofleidingen.

Scheurachtige defecten in buisleidingen

Een buisleiding bestaat uit pijpen die aan elkaar verbonden zijn met rondlassen. Daarnaast kan de buis ook een langslas (SAWL, HFI) of spiraallas (SAWH) hebben. De lasverbinding is de meest waarschijnlijke plaats voor scheurachtige defecten. Daarnaast kunnen er koud- en warmscheuren zijn in de lasverbinding.

Naadloze buizen worden ook toegepast in buisleidingen met name als de diameter wanddikte verhouding klein is. Het spreekt voor zich dat deze buizen geen lasfouten hebben. Door het walsproces van naadloze buizen kunnen er wel scheurachtige defecten ontstaan. Dit zijn overlapsingen ('overlaps'). Omdat de oriëntatie evenwijdig is aan het buisoppervlak, worden deze defecten niet beïnvloed door de inwendige druk noch door een axiale belasting. Dit betekent dat zulke defecten niet groeien door een vermoeiingsbelasting.

Bij inwendige druk is de omtrekspanning in de buis de grootste spanningscomponent en daarmee ook de spanningswisseling. De defecten in de langslas zijn het gevoeligst voor vermoeiingsscheurgroei omdat deze loodrecht georiënteerd zijn op de omtrekspanning. Het probleem is dat we niet weten hoeveel defecten er zijn, waar deze defecten in de lasverbindingen zijn, en dat we ook de grootte in langs- en diepterichting (loodrecht op het plaatoppervlak) niet goed weten.

Bij een vrije overspanning wordt een buisleiding op zee ook belast op spanningswisselingen in de lengterichting van de buisleiding. Defecten in de rondlas zijn het gevoeligst voor vermoeiingsscheurgroei omdat deze loodrecht georiënteerd zijn op de langsspanning (spanning in de buisleiding richting).

Wat we vanuit onderzoek door EGIG² weten is dat er in Europa nog geen lek of breuk van hogedruk gasleidingen door vermoeiing is gerapporteerd [3]. In Referentie 4 wordt gesteld dat falen van gasbuisleidingen door vermoeiing zeldzaam is. We weten ook van de buisspecificatie dat de buizen niet-destructief zijn onderzocht en dat volgens de constructiespecificatie de rondlassen zijn onderzocht. Tezamen met het lasproces (onderpoederde lassen of inductielassen) is duidelijk dat alleen plak- of bindingsfouten relevant zijn voor de inwendige drukbelasting.

Van buizen gemaakt volgens NEN-EN-ISO 3183 Annex A [5] of zijn voorganger NEN-EN 10208-2 [6] zijn in de fabriek niet-destructief onderzocht mogelijk met ultrasoon onderzoek volgens EN-ISO 10893-10 of EN 10246-7, -8, -9. De acceptatiecriteria zijn U2 of U3. Dit betekent dat de gevoeligheid van de techniek gebaseerd is op referentiekerven, met diepte van 5% van de wanddikte (U2) of 10% van de wanddikte. Indicaties met een respons die hoger is dan de respons van de referentiekerv worden aanvullend onderzocht en mogelijk gerepareerd indien de afmetingen groter zijn dan de referentiekerven. Dit betekent dat het zeer aannemelijk is dat buizen die op deze wijze zijn onderzocht geen defecten bevatten groter dan de referentiekerv. Voorbeelden van scheurachtige defectafmetingen in de verschillende lasverbindingen worden gegeven in Tabel 1.

² European gas pipeline incident data group (www.egig.eu)

Tabel 1 Voorbeeld aangenomen defectafmetingen in buisleidingen voor de scheurgroeivermoeiingsanalyses

lasverbinding	onderzoeksmethode	defectdiepte* [mm]	defectlengte [mm]
langslas (HFI, SAWL)	geautomatiseerd ultrasoon	5% of 10%	50
	radiografie	3	50
spiraallas (SAWH)	geautomatiseerd ultrasoon	5% of 10%	50
	radiografie	3	50
rondlas	geautomatiseerd ultrasoon	2	50
	radiografie	3	50

* percentage van de nominale wanddikte

Geschiktheid van stalen leidingen voor waterstofgas

Waterstofatomen in staal kunnen een negatief effect hebben op de mechanische eigenschappen van staal. Overzichtsdocumenten van de invloed van waterstof op staal zijn te vinden in Referenties 7,8,9. Zolang er geen waterstofatomen kunnen ontstaan uit het waterstofgas is elke stalen leiding die geschikt is voor aardgastransport ook geschikt voor waterstofgastransport bij dezelfde ontwerpdruk. Dit geldt zowel voor nieuwe als voor oude leidingen. Op het moment van ingebruikname is de waterstofleiding integer omdat er nog geen tijd is voor de vorming van waterstofatomen in het staal.

In de loop der tijd kunnen we het ontstaan van waterstofatomen niet uitsluiten omdat in gasleidingen de druk niet constant is, er zijn dus drukwisselingen, en er zijn scheurachtige defecten. Door de drukwisselingen kunnen deze defecten gaan groeien waardoor er schoon staaloppervlak ontstaat. Scheurachtige defecten kunnen ook ontstaan door vermoeiing. Hiervoor zijn heel veel meer wisselingen nodig. Onder lage spanningswisselingen zijn de meeste wisselingen (grofweg 90%) nodig voor initiatie van de scheur en voor scheurgroei het restant (10%) [10].

Met behulp van een breukmechanische analyse kunnen we met verschillende aannames de scheurgroei gedurende een bepaalde tijdsduur, bijvoorbeeld 100 jaar, voorspellen. Een aanpak is dat het aantal en grootte van de drukwisseling wordt gevarieerd waarbij de berekende scheurgroei slechts 0,25 mm is. Er wordt dus niet berekend wanneer het scheurachtige defect door de leidingwand is gegroeid tot een lek. Een breuk wordt overigens uitgesloten als tenminste het lek tijdig wordt ontdekt. Wordt het lek niet gedetecteerd dan wordt het lek groter zolang de vermoeiingsbelasting blijft. Een groei van 0,25 mm in de buiswand is zeer beperkt en in de praktijk niet te meten. De 0,25 mm scheurgroei is gekozen omdat dan de scheurgroei eenvoudig is te berekenen. Enerzijds wiskundig en anderzijds dat er geen lek wordt berekend waarvoor meer materiaalgegevens nodig zijn zoals de rekgrens en de breuktaaiheid van de buisleiding. Voor de scheurgroeisnelheid kan de relatie uit het Naturalhy-project gebruikt worden [11]. De vergelijking voor de berekening van scheurgroei Δa van 0,25 mm is [12]:

$$\Delta a = N C \Delta K^m = C (f \Delta \sigma \sqrt{\pi(a+0,25/2)})^m \quad (1)$$

waarin N het aantal drukwisselingen en a de scheurlengte, C en m constanten verkregen uit het fitten van resultaten van vermoeiingsscheurgroei proeven in waterstofgas, ΔK de wisselende spanningintensiteitsfactor van het aangenomen scheurachtige defect, en f een defectgeometriefunctie. Voor een defect in de langslas van een buisleiding onder drukwisselingen is de spanningswisseling:

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta p D}{2t} \quad (2)$$

waarin Δp , drukwisseling, D de uitwendige diameter van de buis en t de wanddikte van de buis. De spanningsintensiteitsfactor K combineert de spanning en de defectlengte en kan worden beschouwd als de scheurdrijvende kracht: hoe groter ΔK is hoe sneller de scheur groeit. Uit Vergelijking 1 volgt dat grote scheuren sneller groeien dan kleine scheuren bij dezelfde spanningswisseling.

Om een lek door waterstof te voorkomen kunnen we de scheurgroei tot een lek berekenen. De bijbehorende vermoeiingsbelasting is de toegestane belasting gedurende 100 jaar of grenswaarde. Hogere vermoeiingsbelastingen, grotere drukwisselingen en meer drukwisselingen zijn toegestaan maar gaan ten koste van een kortere levensduur. Zolang de vermoeiingsbelasting binnen de gestelde grenzen blijft, is de waterstofbuisleiding integer mits de aanname van de aangenomen defectafmetingen correct zijn. Inwendige leidinginspectie is een middel om deze aanname te toetsen voor leidingen met SAWL-buizen.

Vermoeiing en scheurgroei

Inleiding

Vermoeiing is bezwijken door een herhaalde (cyclische, wisselende) belasting. Een aantal ongevallen met het falen van stalen treinassen in de negentiende eeuw bracht ingenieurs ertoe de onderdelen te omschrijven als 'moe' of 'vermoeid'. De term 'metaalmoeheid' werd bedacht [13].

Vermoeiing bestaat uit drie fasen: initiatie van een scheur, groei van een scheur, en uiteindelijk breuk. Bij lage belastingwisselingen zijn grofweg 90% van de wisselingen tot breuk nodig, voor de groei grofweg 10% en voor de breuk 1 wisseling. Vermoeiing laat zich beschrijven door S-N-curven ook wel Wöhlerkrommen genoemd. De levensduur, het aantal wisselingen tot breuk (of lek), wordt verkort door spanningconcentraties zoals een lasteen, een kerf of een deuk. De levensduur van een constructie wordt ook verkort door aanwezigheid van scheurachtige defecten, bijvoorbeeld bindingsfouten in de lasverbinding. We spreken dan van scheurgroei-ermoeiing vanwege de afwezigheid van initiatiefase.

Scheurgroei-ermoeiing laat zich deels beschrijven door de empirische Paris-relatie [13]. De geïnitieerde vermoeiingsscheur groeit eerst langzaam maar steeds sneller naarmate de scheur groter wordt: de groeisnelheid is exponentieel. In formulevorm:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m = C (f \Delta \sigma \sqrt{\pi a})^m \quad (3)$$

waarin da/dN de scheurgroeisnelheid is, C en m constanten afhankelijk van materiaal, temperatuur en stof, ΔK , de wisselende spanningintensiteitsfactor, f een functie afhankelijk van de geometrie zoals wanddikte en scheurlengte, $\Delta \sigma$ de wisselende mechanische spanning, en a de scheurlengte. De scheurgroeisnelheid is afhankelijk van de grootte van de vermoeiingsbelasting, corrosieve stoffen. Door atomair waterstof in staal opgelost kan de scheurgroeisnelheid aanzienlijk toenemen.

Scheurgroei-data in de vorm van da/dN en ΔK worden in een grafiek met logaritmische assen weergegeven. Als de data op een rechte lijn liggen dan kan de Paris-relatie worden toegepast, zie paragraaf "Vermoeiingsscheurgroei-relaties" voor voorbeelden.

In buisleidingen kunnen scheurachtige defecten en vermoeiingsbelastingen niet worden uitgesloten. In aardgasbuisleidingen op land waarvan de vermoeiingsbelasting gering is, is de scheurgroeisnelheid

erg laag zodat bestaande scheurachtige defecten nauwelijks groeien. Vermoeiingsbelastingen worden veroorzaakt door variaties in de druk, in de temperatuur, verkeersbelastingen, door vrije overspanningen in combinatie met de getijdebeweging, of door vortex-geïnduceerde vibraties. Bij een vrije overspanning wordt de leiding niet meer in zijn geheel ondersteund door de ondergrond. Uit de vermoeiingsbelasting volgt ook de locatie van de vermoeiingsscheuren in de leiding. Voor drukwisselingen zijn defecten in de langslas bepalend, en in mindere mate defecten in de spiraallas. Voor getijdebewegingen die leiden tot bewegen van de leiding loodrecht op de leidinglas zijn defecten in de rondlas bepalend.

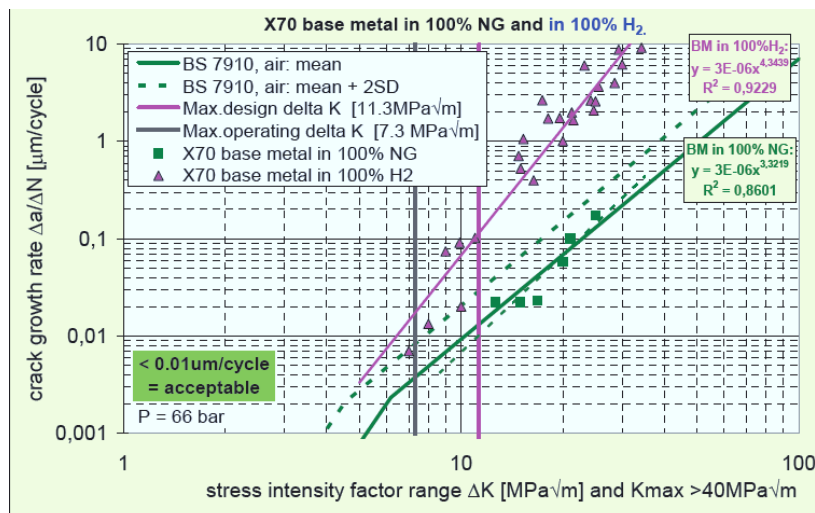
Vermoeiingsscheurgroeirelaties

Er zijn verschillende relaties ontwikkeld voor de scheurgroeisnelheid in staal als functie van de spanningsintensiteitsfactor (SIF). In deze paragraaf worden de verschillende relaties behandeld.

Europees onderzoeksproject Naturalhy

Naturalhy was een groot project door de EU gesponsord met als doel het voorbereiden van de waterstofeconomie met het bestaande Europese aardgasnetwerk als katalysator. Er is heel veel onderzoek naar de integriteit, duurzaamheid en veiligheid bij het gebruik van waterstof in aardgas buisleidingen [14].

Onder meer is onderzocht wat de invloed is van waterstof op de vermoeiingsscheurgroei, zie bijvoorbeeld Figuur 2 [15]. De invloed van verschillende staalsoorten, microstructuren en waterstofdrukken is onderzocht. Uit Figuur 2 volgt duidelijk een grote invloed van waterstof. Bijvoorbeeld bij een ΔK van 10 MPa \sqrt{m} is de de scheurgroeisnelheid in 66 bar aardgas ongeveer 0,01 μm /wisseling en in 66 bar waterstof 0,1 μm /wisseling, een factor 10 hoger. Dit betekent grofweg dat de levensduur met factor 10 is verkort. De scheurgroeisnelheid in aardgas ligt op de lijn voor luhct. Dit betekent dat de aardgas en daarmee ook de druk van het aardgas geen invloed hebben.



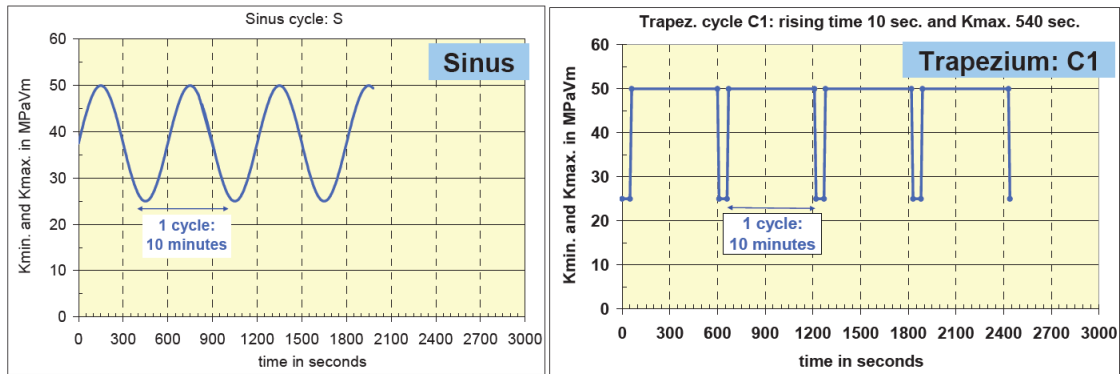
Figuur 2 Scheurgroeivermoeiing van X70 buisstaal in waterstofgas [15]

De hoogste vermoeiingsscheurgroei in waterstof is gevonden bij een X70 staal. De fit van de Parisrelatie is:

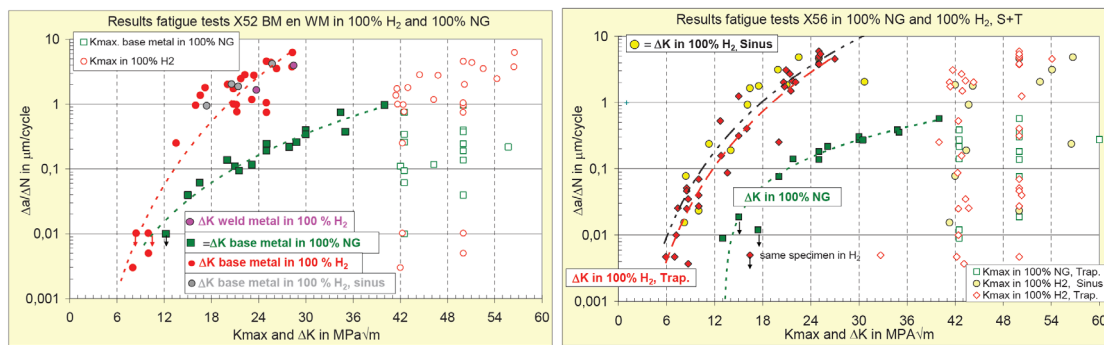
$$\frac{da}{dN} = 3 \cdot 10^{-9} \Delta K^{4,3439} \tag{4}$$

waarbij da/dN in mm/wisseling en ΔK in MPa \sqrt{m} .

Bijzonder van het Naturalhy-onderzoek is dat het SIF-verloop, zie Figuur 3, zoveel mogelijk overeenkwam met het dagelijkse drukverloop in het aardgasnetwerk van Gasunie. Dit betekent dat de frequentie van de wisseling veel kleiner is dan in andere onderzoeken naar de invloed van waterstof op de scheurgroeivermoeiing en dat de maximale SIF K_{max} langer op het hoogste niveau blijft. Echter er is gebleken dat de vorm van de SIF-wisseling geen invloed heeft op de scheurgroeivermoeiing, zie Figuur 4.



Figuur 3 Sinusvormige en trapeziumvormige SIF-wisseling [16]



Figuur 4 Invloed van de sinusvormige en trapeziumvormige SIF-wisseling op scheurgroeivermoeiing [16]

Standaard voor waterstofleidingen ASME B31.12

In ASME B31.12 wordt de volgende vermoeiingsscheurgroeirelatie gegeven:

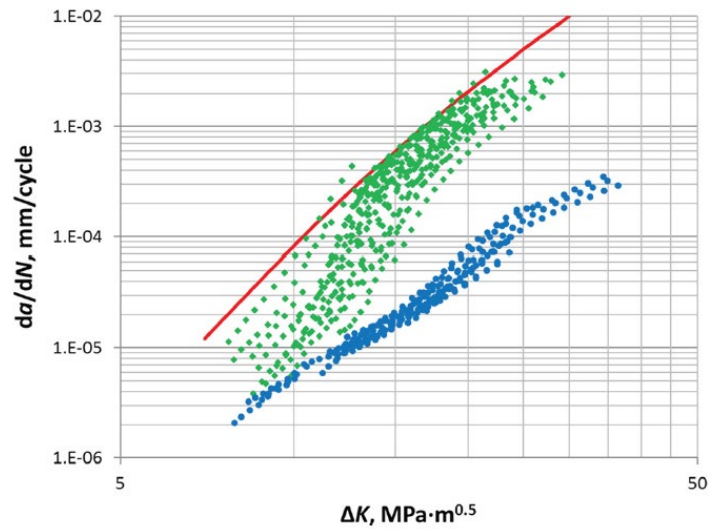
$$\frac{da}{dN} = a_1 \Delta K^{B_1} + \frac{1}{\frac{1}{a_3 \Delta K^{B_3}} + a_4 \Delta K^{B_4}} \quad (5)$$

waarin ΔK in MPaVm en de constanten de volgende waarden hebben:

	mm/wisseling		
a_1	4,0812	B_1	3,2106
a_3	4,0862	B_3	6,4822
a_4	4,8810	B_4	3,6147

De eerste term van het rechterlid van deze vergelijking is de scheurgroeisnelheid in lucht.

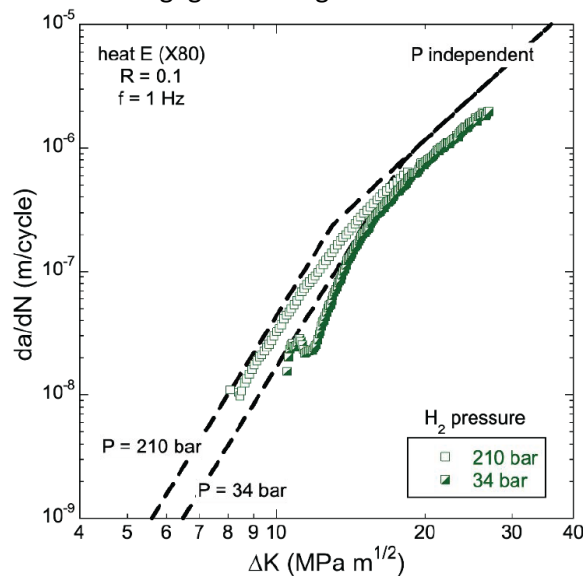
Vergelijking 5 is een bovengrens fit van scheurgroeivermoeiingsproeven aan oud en nieuw X52-staal, en twee vergelijkbare X70-stalen met drie verschillende frequenties, en waterstofdrukken van 55 en 340 bar [17], zie Figuur 5.



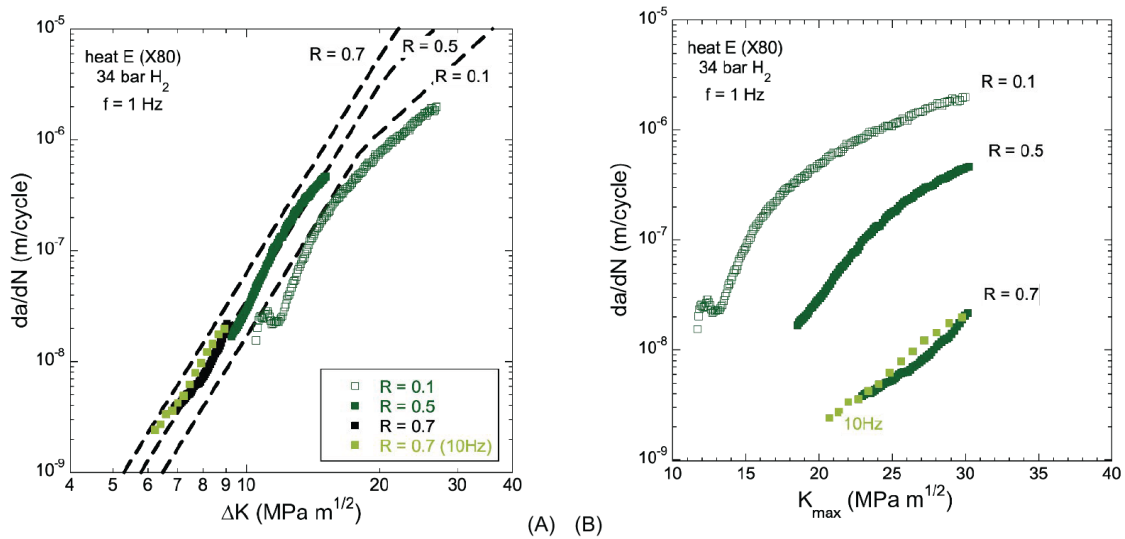
Figuur 5 Scheurgroeivermoeiingsdata in waterstof (groen) en in lucht (blauw) en de bovengrens fit (rode lijn) Vergelijking 5 die in ASME B31.12 is opgenomen [17]

Sandia San Marchi & Ronevich

In Referentie 18 is de invloed van de waterstofdruk en spanningsverhouding R onderzocht. Hiervoor zijn vermoeiingsproeven uitgevoerd aan drie X80-staalsoorten met verschillende chemische samenstellingen. Een resultaat wordt gegeven in Figuren 6 en 7.



Figuur 6 Scheurgroeivermoeiingsdata in waterstof bij verschillende druken [18]



Figuur 7 Scheurgroeivermoeiingsdata in waterstof bij verschillende R's [18].
a) als functie van ΔK (log-log-schaal) en b) als functie van K_{\max} (log-lineaire schaal)

De groeisnelheden van vermoeiingsscheuren voor spanningsverhoudingen van $R = 0,1$, $0,5$ en $0,7$ laten een duidelijk verschil zien, zoals weergegeven in Figuur 7. Terwijl de basisvorm van deze curven is vergelijkbaar, is de scheurgroeisnelheid duidelijk groter voor $R = 0,7$ dan voor $R = 0,5$ en voor $R = 0,7$ dan voor $R = 0,1$. Het is echter belangrijk te realiseren dat de K_{\max} substantieel verschillend is voor verschillende verhoudingen R en dezelfde ΔK . De wisseling in de spanningsintensiteitsfactor ΔK , de spanningsverhouding R en de maximale spanningsintensiteitsfactor K_{\max} is als volgt aan elkaar gerelateerd:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} = \frac{K_{\max} - \Delta K}{K_{\max}} \Leftrightarrow \Delta K = K_{\max}(1-R) \quad (6)$$

Voor $\Delta K = 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ is de K_{\max} ongeveer $33 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ voor $R = 0,7$ maar $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ voor $R = 0,5$ en $11 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ voor $R = 0,1$. Voor een drukhoudend systeem werkend bij constante maximale druk met een gegeven defect, zal K_{\max} onafhankelijk zijn van R aangezien K_{\max} wordt bepaald door de maximale spanning en de defectgrootte. De weergave van gegevens zoals in Figuur 7b benadrukt dat bij een diepe drukcyclus ($R = 0,1$) veel grotere scheuruitbreiding zal optreden dan een bij ondiepere drukcyclus ($R = 0,5$ of $0,7$) bij dezelfde K_{\max} .

Uit de resultaten volgt dat de scheurgroeisnelheid uit twee delen bestaat: een deel afhankelijk van druk en een deel onafhankelijk druk. Het voorstel voor de scheurgroeisnelheid is het minimum van Vergelijkingen 7a en 7b:

$$\frac{da}{dN} = 7,6 \cdot 10^{-13} \frac{1 + 0,4286R}{1 - R} \Delta K^{6,5} \sqrt{f_{H_2}} \quad (7a)$$

$$\frac{da}{dN} = 1,5 \cdot 10^{-8} \frac{1 + 2R}{1 - R} \Delta K^{3,66} \quad (7b)$$

waarin da/dN in mm/wisseling, ΔK in $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, en f_{H_2} de fugaciteit van waterstof in bar. De fugaciteit kan worden gezien als een correctie van de waterstofdruk vanwege het niet ideaal zijn van het waterstofgas.

In Tabel 2 wordt de invloed van spanningsratio R op da/dN zichtbaar. Naarmate R nadert tot 1, wordt de invloed oneindig groot maar ΔK zal tegelijkertijd naar 0 gaan. Omdat ΔK tot macht 3,66 of 6,5 wordt verheven, gaan dit sneller naar 0 waardoor de scheurgroeisnelheid naar 0 gaat.

Tabel 2 Grote van de spanningsverhouding R op de bijdrage in Vergelijking 7 en ΔK bij twee verschillende K_{max} , berekend met Vergelijking 6

			$K_{max} = 5$ [MPa \sqrt{m}]	$K_{max} = 20$ [MPa \sqrt{m}]
R	$1+0,4R/(1-R)$	$1+2R/(1-R)$	ΔK	ΔK
0	1,0	1,0	5	20
0,1	1,2	1,3	4,5	18
0,2	1,4	1,8	4	16
0,3	1,6	2,3	3,5	14
0,4	2,0	3,0	3	12
0,5	2,4	4,0	2,5	10
0,6	3,1	5,5	2	8
0,7	4,3	8,0	1,5	6
0,8	6,7	13	1	4
0,9	14	28	0,5	2
0,99	142	298	0,05	0,2

DVGW project SyWeSt-H2

In het DVGW project SyWest-H2 [19] zijn breuktaaiheids- en scheurgroeivermoeingsproeven uitgevoerd aan veel verschillende buisleidingstaalsoorten, zowel oud als nieuw, basis, warmte-beïnvloede zone en lasmetaal van de buislas als rondlas. Daarnaast is de invloed van de hardheid, de waterstofdruk en spanningsratio R onderzocht op de scheurgroeiselheid. Het doel is om te toetsen of ASME B31.12 ook van toepassing is op oud en nieuw buisleidingstaal toegepast in Duitsland. Gasunie gebruikt sinds de oprichting meestal Duitse buisfabrikanten. Vermoedelijk is dit ook van toepassing op ander buisleidingen in Nederland. Figuur 8 geeft een overzicht van de gebruikte staalsoorten en de onderzoeksvariabelen.

Material	Testing da/dN & K _{IC}	H ₂ Test pressure [bar]	R-value	
L290 NE	BM, SAWL	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Legend</p> <p>da/dN Crack growth</p> <p>K_{IC} Fracture toughness</p> <p>BM Base material</p> <p>HAZ Heat-affected zone</p> <p>SAWL Submerged arc longitudinal weld</p> <p>SAWH Submerged arc spiral weld</p> <p>ERW Electric Resistance Weld</p> <p>GW Girth weld</p> <p>LW Longitudinal weld</p> <p>WM Weld material</p> </div>	0.5	
Grade A	BM, SAWL			
St35	BM			
15 k (St.35)	BM, SAWL, GW			
X42	BM, ERW, GW, HAZ			
RR St 43.7	BM			
P355 NH	BM			
L360 NE	BM			
StE 360.7	SAWL, BM			
L360 NB	SAWL, BM			
14 HGS	BM, LW, GW			
TStE 355 N	BM			
WSTE 420	BM			
St53.7	GW, BM			
X56.7	BM, SAWL, GW			
St60.7	BM, GW			
P 460 NH	SAWL, BM			
X70	BM, SAWH, HAZ			
X70	BM, GW, HAZ			
L485	BM, SAWH, HAZ			
GR5550/X80	BM, SAWL			
L485 (HV high/low)	BM, GW, HAZ			
L415 (curve)	BM, SAWL			
P355 NL1 (Valve)	BM			
GJS 400 (Valve)	BM			
C22.3 (Valve)	BM			
GS C25 N (Valve)	BM			
P460 QL1 (Valve)	BM			
St35	BM			0 / 0.2 / 1 / 2 / 5 / 10 / 20 / 100
L485	BM			
L360 NB	BM, WM	10 / 100		
StE 320.7	BM, GW			
StE 480.7 TM	BM, SAWL, GW			
L485	BM	100	0.1 / 0.5 / 0.7	
L360	BM			

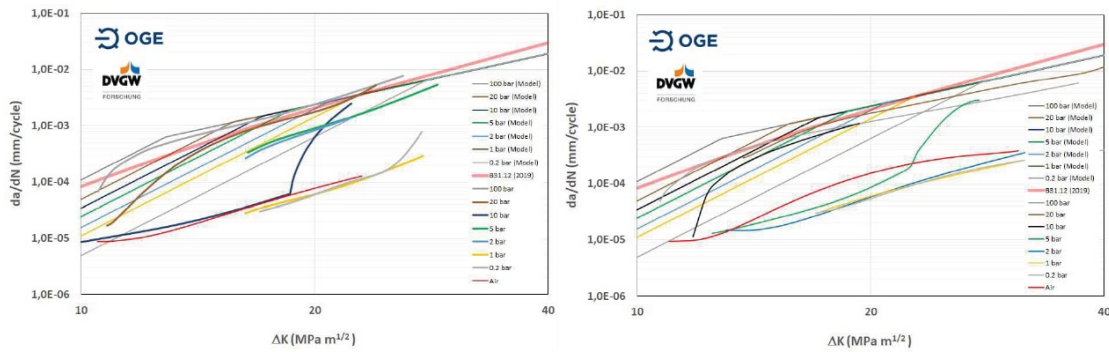
Figuur 8 Overzicht van gebruikte materialen en onderzoeksvariabelen in het DVGW project SyWest-H2 [19]

De invloed van de waterstofdruk op de breuktaaiheid is weergegeven in Figuur 9 voor een oud staalsoort met een lage rekgrens (St 37) en modern staalsoort met een hoge rekgrens (L485). Er zijn twee opmerkelijke resultaten te zien in deze figuur. Lage waterstofdrukken zorgen al voor een afname van de breuktaaiheid en de verschillen in breuktaaiheden bij 100 bar waterstof zijn klein terwijl deze in lucht een factor 3 verschillen. Dus waterstof heeft meer invloed op een staal dat taaiër is dan een staal dat minder taai is. In alle gevallen is de breuktaaiheid bij 100 bar waterstofdruk veel groter dan 55 MPa√m, die vereist wordt in ASME B31.12.



Figuur 9 Invloed van de waterstofdruk op de breuktaaiheid van staalsoorten St37 (links) en L485 (rechts) [19]. De geschatte breuktaaiheid van L485 in lucht is 480 MPa√m.

De scheurgroeivermoegingsnelheid da/dN als functie van de SIF-wisseling ΔK is voor twee staalsoorten weergegeven in Figuur 10. De onderzoekers concluderen dat de scheurgroei bij lage ΔK en waterstofdrukken vergelijkbaar is met de scheurgroei in lucht en aardgas. Bij hogere waterstofdrukken gaat de scheurgroei vrij snel naar de scheurgroei in 100 bar waterstof. Een overgang van langzame scheurgroei naar snelle scheurgroei is afhankelijk van de waterstofdruk, hoewel dit niet precies voorspeld kan worden.



Figuur 10 Invloed van de waterstofdruk op de scheurgroeisnelheid op staalsoorten St37 (links) en L485 (rechts) [19]

Met alle scheurgroeidata is de relatie in Vergelijking 8 afgeleid. Hierin is de invloed van de waterstofdruk en spanningsratio R opgenomen.

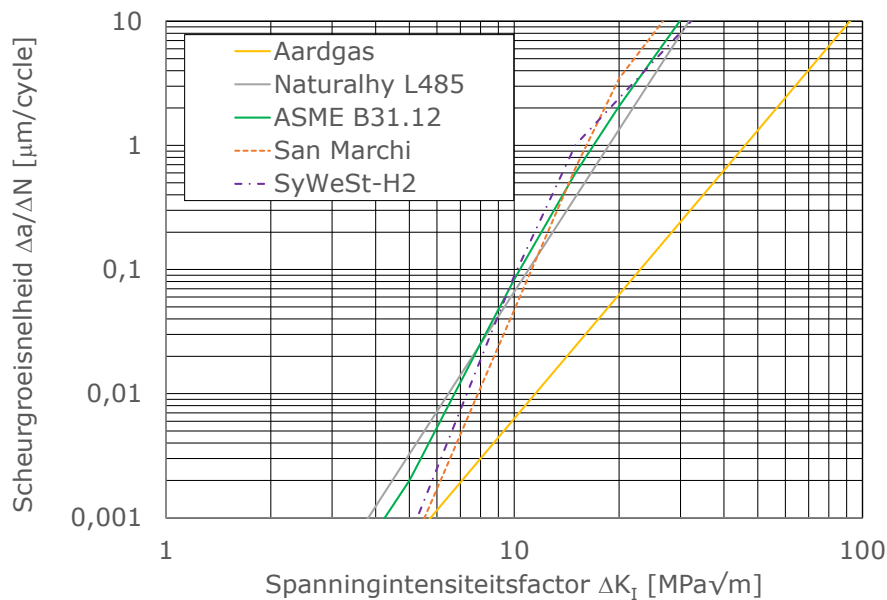
$$\Delta K < [3,6667 \cdot 10^{-6} \sqrt{p_{H_2}}]^{-0,25} \quad \frac{da}{dN} = 4,4 \cdot 10^{-13} (1 + 3R) \Delta K^7 \sqrt{p_{H_2}} \quad (8a)$$

$$\Delta K \geq [3,6667 \cdot 10^{-6} \sqrt{p_{H_2}}]^{-0,25} \quad \frac{da}{dN} = 1,2 \cdot 10^{-7} (1 + 3R) \Delta K^3 \quad (8b)$$

met p_{H_2} de waterstofdruk in bar (over), da/dN in mm/wisseling, en ΔK in $MPa\sqrt{m}$.

Vergelijking van scheurgroeirelaties van staal in waterstof

In Figuur 11 zijn Vergelijkingen 4, 5, 7 en 8 voor p_{H_2} is 66 bar (o) en R is 0,5 weergegeven. De Naturalhy relatie ligt nagenoeg gelijk aan die van ASME B31.12. De relatie van SyWeSt-H2 project ligt nagenoeg op die van San Marchi.

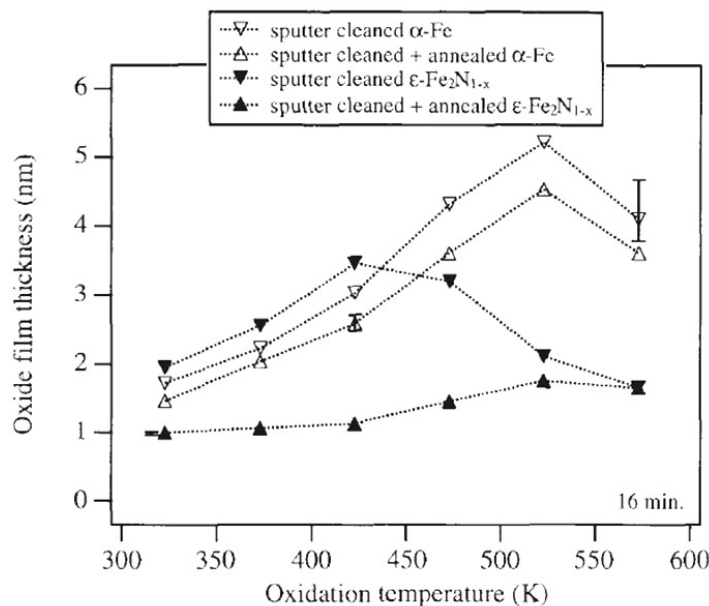


Figuur 11 Scheurgroeivermoeingsrelaties voor waterstof en aardgas
 Naturalhy L485
 ASME B31.12 Vergelijking 5
 San Marchi
 SyWest-H2

Invloed van zuurstof

IJzer reageert bij kamertemperatuur met zuurstof en vormt een oxidelaag. Figuur 12 toont de dikte van de oxidelaag na 16 minuten blootstelling aan een zuurstofdruk van $8 \cdot 10^{-5}$ Pa [20]. Deze laag is niet zichtbaar voor het oog. In de atmosfeer met een zuurstofdruk van $2,1 \cdot 10^5$ Pa ($\approx 21\%$), dus een veel hoger niveau (factor 10^{10}), zal de reactie van ijzer en zuurstof naar verwachting sneller verlopen en zal de laag dikker zijn.

Het is bekend dat de experimentele bepaling van de waterstofdiffusie in staal wordt beïnvloed door de oxidelaag. In Referentie 21 staat: "*Otherwise, especially in the case of hydrogen absorption from the gas phase, the entry side of the membrane had to be palladium coated, to avoid the inhibition of hydrogen adsorption and absorption by oxide films.*"



Figuur 12 Het effect van temperatuur op de oxidelaagdikte na 16 minuten blootstelling aan zuurstof met een druk van $8 \cdot 10^{-5}$ Pa in ultra-hoog vacuüm [20]

Aan het ijzer- of staaloppervlak waterstofmoleculen kunnen dissociëren. De volgende reactie vindt plaats:



waarbij de haakjes rond de hoofdletter betekenen dat het waterstofatoom is opgelost in het ijzer of staal. Een verklaring voor het zuurstofeffect op diffusie van waterstof in staal is dat op nieuw gevormde staaloppervlakken ijzer reageert met zuurstof, waardoor het dissociatieproces van de waterstofmoleculen wordt geremd.

Door waterstof versterkte vermoeiingsscheurgroei kan worden beperkt in aanwezigheid van andere gassen zoals O_2 , CO , COS en H_2O [24]. Gevonden werd dat, met zuurstof, de scheurgroeisnelheid in waterstof hetzelfde was als in stikstofgas (of aardgas). Experimenten in het Naturalhy-project bevestigden dit fenomeen, zie Figuur 13 [16], waar de scheurgroei wordt weergegeven als een functie van vermoeiingscycli met verschillende hoeveelheden zuurstof. Figuur 14 toont hetzelfde effect van zuurstof. Het blijkt dat er meer zuurstof nodig is als de cyclische spanningsintensiteit ΔK_I toeneemt.

Merk op dat de waterstof en zuurstof een brandbaar gasmengsel kunnen vormen in de buisleiding. In dit geval moeten we kijken naar de bovengrens van ontvlambaarheid van waterstof in zuivere zuurstof in plaats van naar de ondergrens. De ontvlambaarheidsgrenzen worden uitgedrukt als het

percentage waterstof in de lucht of zuurstof. Onder de ondergrens is er te weinig waterstof en boven de bovengrens is er te veel waterstof. De bovenste ontvlambaarheidsgrens van waterstof bij normale druk en temperatuur in zuivere O₂ is 94% [22]. Meer dan 6% zuurstof is nodig om een brandbaar gasmengsel in de leiding te hebben. De zuurstofniveaus die nodig zijn om het waterstofeffect te verminderen, liggen ver onder de 6% zuurstof.

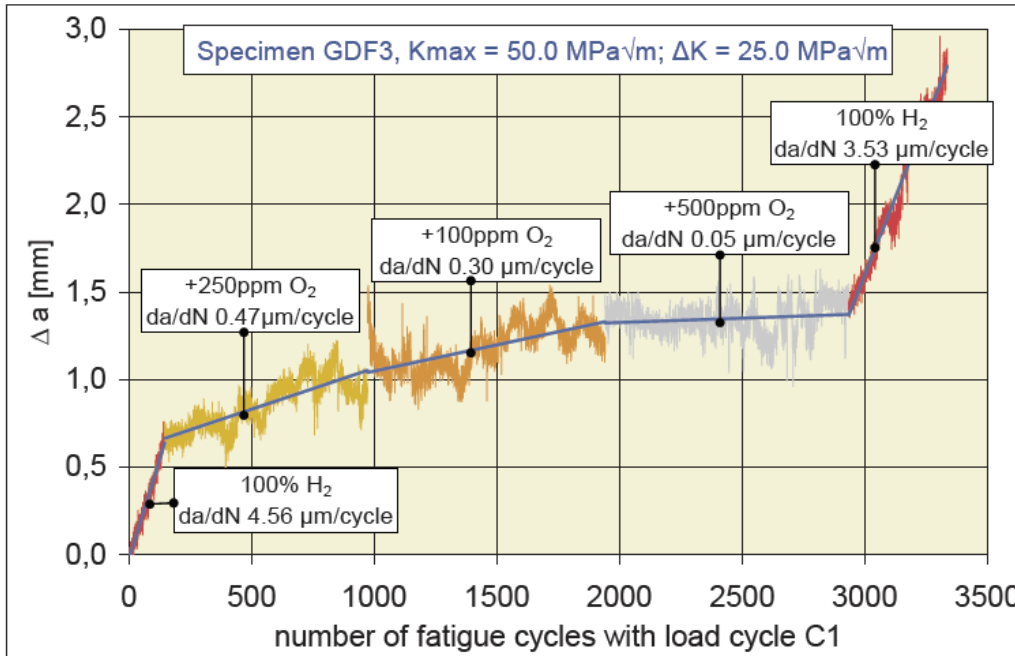
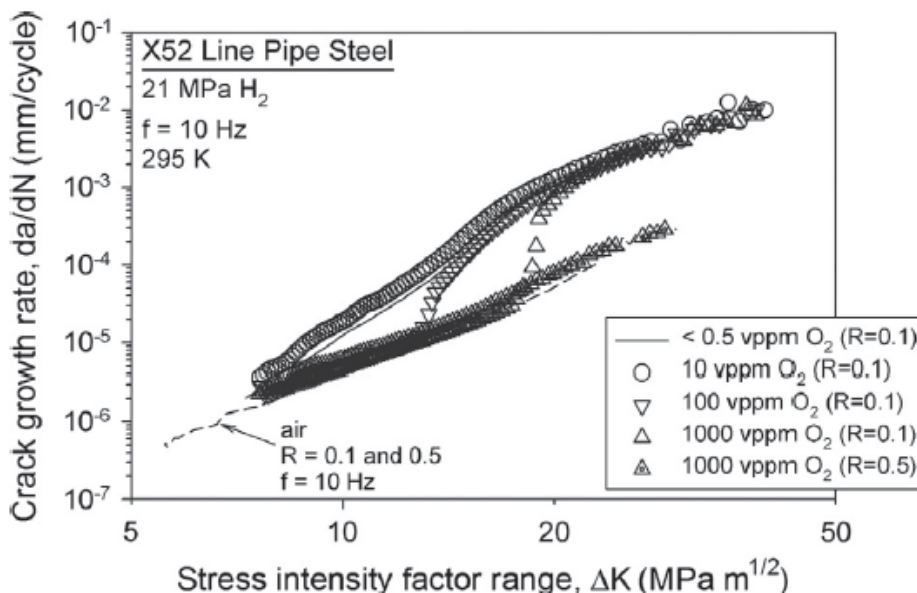


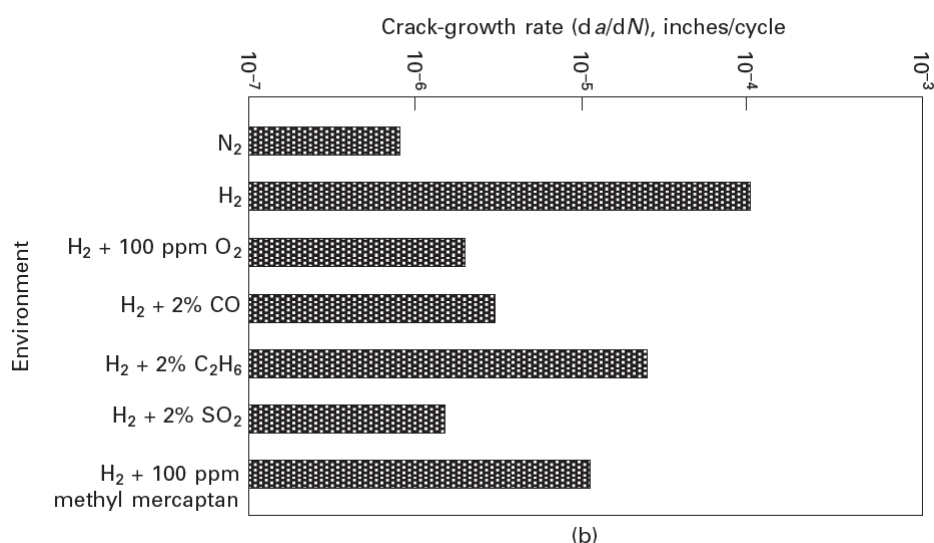
Figure 13 Het effect van zuurstofgas op de scheurgroei van X52 steel in waterstof [16]. De proef is gestart met puur waterstof. Vervolgens is 250 vol. ppm zuurstof toegevoegd, na 1000 wisselingen, 100 vol. ppm en na circa 2000 wisselingen 500 vol. ppm. Bij 500 ppm vol. zuurstof is de scheurgroei nagenoeg gestopt. Na het verwijderen van de zuurstof, gaat de scheurgroei weer door.



Figuur 14 Invloed van zuurstof in waterstof op de scheurgroeisnelheid in waterstof van X52-staal [23]

Hoofdstuk 5 van Referentie 24 geeft een uitvoerig overzicht van het effect van zuurstof en andere gassen. Figuur 15 laat het effect zien van verschillende gassen op de scheurgroeisnelheid van X42-staal in waterstofgas. Interessant is dat naar ruikende gassen zoals SO₂ en methyl mercaptan ook een

positief effect hebben. Als het nodig is om waterstofgas te odoriseren, combineren deze gassen twee functies: alarmering en vertraging van de scheurgroei.



Figuur 15 Effect van verschillende gassen op de scheurgroei in waterstof van X42-staal (R=0,1, kamertemperatuur, $\Delta K=15,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) [24]

Vermoeiing

Proeven aan gladde proefstukken in waterstofgas zijn beperkt.

Volle-schaal proef

In Referentie 25 wordt een volle-schaal proef beschreven. Het gaat om een aantal ringen met rondlassen uit een buisleiding die circa 20 jaar in het Deense aardgasnetwerk hebben gezeten. De ringen zijn aan elkaar gelast tot een drukvat. De diameter is 508 mm (DN500), de wanddikte 7 mm, en het staalsoort StE 480.7 TM (DIN 17172), vergelijkbaar met X70M.

Het drukvat is op 70 bar waterstofdruk gebracht en vervolgens door drukwisselingen van 20 tot 30 bar vermoeid. De frequentie is 1 wisseling per 8,3 minuten. Na 30.000 wisselingen is de proef gestopt. De proefduur is dus 208 dagen. De rondlassen zijn onderzocht op scheuren welke niet zijn gevonden. Ook zijn er geen lekken geconstateerd.

De volle-schaal proef toont aan dat hoge waterstofdruk in buizen met een hoge-rek grens staalsoort veilig is. Overigens volgens optie A van ASME B31.12 is bij 70 bar waterstof en X70 staal de materiaalfactor 0,776. Dit betekent dat de wanddikte ten minste 9 mm had moeten zijn in plaats van 7 mm.

Conclusies

Waterstof kan zorgen dat de scheurgroei van scheurgroei sneller groeit dan in lucht of in aardgas. Van belang is voor buisleidingen dat vooraf een breukmechanische vermoeiingsanalyse wordt uitgevoerd om grenswaarden aan de vermoeiingsbelasting te stellen. Deze analyse is noodzakelijk om het degradatiemechanisme waterstofversnelde vermoeiingscheurgroei te voorkomen. De vermoeiingsanalyse moet een beschouwing bevatten van potentieel aanwezige scheurachtige defecten in de gasleiding en vermoeiingsbelastingen (bijvoorbeeld inwendige drukvariaties).

Aanbevelingen

Het is aan te bevelen om de rol van zuurstof of andere inhibitoren in waterstof nader te onderzoeken om het degradatiemechanisme waterstofversnelde vermoeiingscheurgroei te voorkomen.

Referenties

- [1] ASME B31.12, Hydrogen piping and pipelines, 2019
- [2] DVGW Technischer Hinweis G 464 (M), Bruchmechanische Bewertungskonzept für Gasleitungen aus Stahl mit einem Auslegungsdruck von mehr als 16 bar für den Transport von Wasserstoff, maart 2023
- [3] EGIG, Gas Pipeline Incidents, 11th report of the European Pipeline Incident Data Group, period 1970-2019
- [4] A. Cosham, P. Hopkins, Time for pipeline fatigue: a historical review of failures due to fatigue, Proceedings of the Ageing Pipeline Conference, Oostende, 7-9 oktober, 2015
- [5] NEN-EN-ISO 3183, Petroleum and natural gas industries - Steel pipe for pipeline transportation systems, 2019
- [6] NEN-EN 10208-2, Steel pipes for pipelines for combustible fluids -Technical delivery conditions - part 2: Pipes of requirement class B, 1996
- [7] NPR-CEN/TR 17797, Gas infrastructure - Consequences of hydrogen in the gas infrastructure and identification of related standardization need in the scope of CEN/TC 234, CEN TC 234 technical report, 2022
- [8] N. Gallon, Hydrogen pipelines – design and material challenges and mitigations, EPRG report 221, 2020
- [9] W. Huinen, Onderzoek Technische Aspecten van Waterstof in bestaande Buisleidingen t.b.v. de Energietransitie, Documentnummer: 53052.01-1917001, revisie B, Bilfinger Tebodin Netherlands B.V., 2019
- [10] L.G. Fritzscheier, W.T. Chandler, Hydrogen embrittlement – Rocket engine applications, In: Superalloys, Supercomposites and Superceramics, J.K. Tien, T. Caulfield (eds.), Materials Science Series, Academic Press, Inc., pp. 491-524, 1989
- [12] O.J.H. Wesselink, A.H.M. Krom, M.H. van Agteren, Balancing hydrogen networks safely; a method for calculating linepack potential without causing integrity risk due to hydrogen-enhanced fatigue, Proceedings of the ASME 2022 14th International Pipeline Conference, IPC2022-86674
- [13] M. Janssen, J. Zuidema, R.J.H. Wanhill, Fracture mechanics, tweede editie 2002, ISBN 90-407-2221-8
- [14] O. Florisson, “Preparing for the hydrogen economy by using the existing natural gas system as a catalyst”
- [15] J. van Wortel, M. Gomes, G. Demofonti, J. Capelle, I. Alliat, E. Chatzidouros, Durability of steels for transmission pipes with hydrogen, report R0096-WP3-C-0, Naturalhy “Preparing for the hydrogen economy by using the existing natural gas system as a catalyst”, SES6/CT/2004/502661, 15-07-2009
- [16] J. van Wortel, Effect of hydrogen on fatigue performance natural gas transmission pipelines, TNO-rapport 033.11804, April 2008
- [17] A.J. Slifka, E.S. Drexler, R.L. Amaro, L.E. Hayden, D.S. Lauria, N.W. Hrabe, Fatigue measurement of pipeline steels for the application of transporting gaseous hydrogen, Journal of Pressure Vessel Technology, 2018
- [18] C. San Marchi, J.A. Ronevich, Fatigue and fracture of pipeline steels in high-pressure hydrogen gas, Proceedings of the ASME 2022 Pressure vessels and piping conference, PVP2022-84757

- [19] M. Steiner, U. Marweski, H. Silcher, Investigation of steel materials for gas pipelines and plants for assessment of their suitability with hydrogen, eindrapport DVGW project SyWest H₂, januari 2023
- [20] P.C.H. Graat, The initial oxidation of iron nitride, Ph.D. thesis Delft University of Technology, 1999
- [21] H.J. Grabke, E. Riecke, Absorption and diffusion of hydrogen in steels, *Materiali in Tehnologije* vol 34, no 6, 2000, 331-342
- [22] NPR-ISO/TR 15916, Basic considerations for the safety of hydrogen systems, 2015
- [23] B.P. Somerday, et al., Elucidating the variables affecting accelerated fatigue crack growth of steels in hydrogen gas with low oxygen concentrations, *Acta Materialia*, 61, issue 16, September 2013, 6153-6170
- [24] Gaseous Hydrogen Embrittlement of Materials in Energy Technologies Volume 2: Mechanisms, Modeling and Future Developments, eds. R.P. Gangloff, B.P. Somerday, Cambridge, Woodhead Publishing Limited, 2012
- [25] H. Iskov, Field test of hydrogen in national grid, rapport Dansk Gasteknisk Center, 2010, ISBN 978-87-7795-334-7