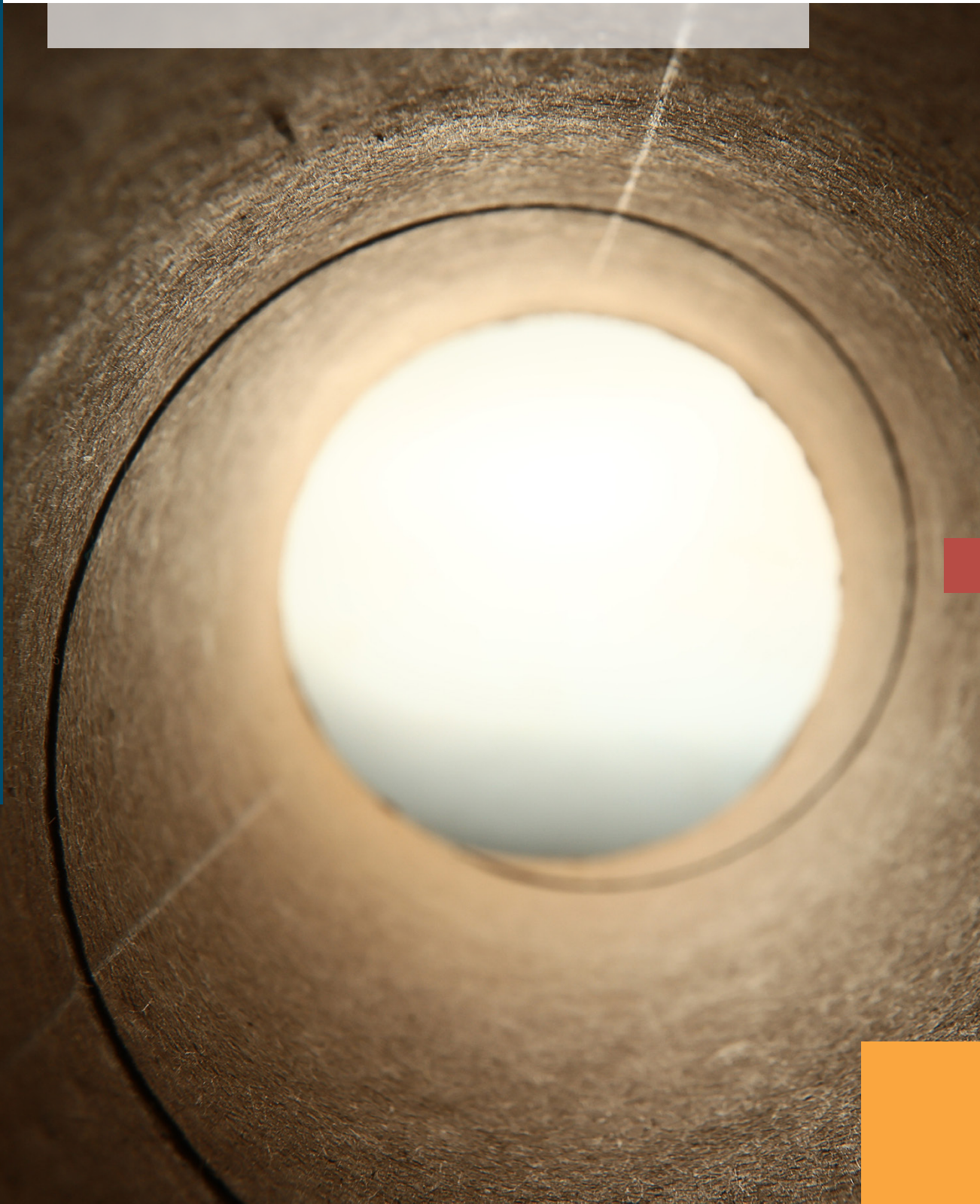


Maatregelen bij transport van waterstof door aardgastransportleidingen



Nederlandse Academie voor
Crisisbeheersing en Brandweezorg
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
Kemperbergerweg 783, Arnhem
www.nipv.nl
info@nipv.nl
026 355 24 00

Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2026

Auteur(s) M. Spoelstra
Met medewerking van dr. V. Popovich (universitair hoofdocent) en Ir. A. Suresh (PhD-student), afdeling Materials Science and Engineering (MSE) van de faculteit Werktuigbouwkunde aan de Technische Universiteit Delft.

Datum 9 februari 2026

Foto cover Shutterstock

Wij hechten veel belang aan kennisdeling. Delen uit deze publicatie mogen dan ook worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding.

Het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid is bij wet vastgelegd onder de naam Instituut Fysieke Veiligheid.

Inhoud

1	Inleiding	4
2	Aardgasleidingen	5
3	Mechanische eigenschappen van staal	6
3.1	Spanning-rek gedrag	6
3.2	Taaigheid en brosheid	7
3.3	Scheurgroei en breuktaaiheid	7
4	Invloed van waterstof op staal	8
4.1	Waterstofopname in staal	8
4.2	Verbrossing	9
4.3	Vermoeiing	9
4.4	Verschil en samenhang tussen verbrossing en vermoeiing	10
5	Maatregelen tegen verbrossing en vermoeiing	11
5.1	Materiaalkeuze en karakterisatie	11
5.2	Ontwerpmaatregelen	11
5.3	Inspectie en monitoring	11
5.4	Proces- en bedrijfscondities	12
5.5	Indeling maatregelen naar faalmechanisme	12
6	Normen en standaarden	14
7	Praktische overwegingen	16
7.1	Componenten en aansluitingen	16
7.2	Compressoren en stroming	16
7.3	Afblaasleidingen en lekdetectie	16
7.4	Operationele procedures	16
8	Discussie en onzekerheden	17
8.1	Representativiteit van laboratoriumtesten	17
8.2	Tijdafhankelijk gedrag van waterstof	17
8.3	Invloed van waterstofdruk	17
9	Eindconclusie en aanbeveling	18
	Bronnen	19
	Bijlage A Vermoeiingsscheurgroei in staal	20

1 Inleiding

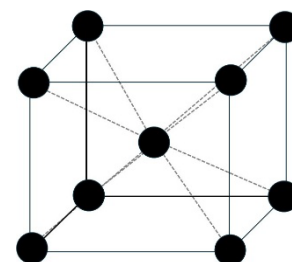
In juli 2024 publiceerde het tijdschrift Energy Science and Engineering een artikel waarin het gebruik van waterstof in bestaande hogedruk aardgastransportleidingen kritisch werd beoordeeld (Martin et al., 2024). De auteurs waarschuwden voor verhoogde veiligheidsrisico's, wat leidde tot bezorgdheid bij een aantal veiligheidsregio's. Zij vroegen NIPV om duiding van het artikel: is het veilig om waterstof via bestaande aardgasleidingen te transporteren? Het NIPV concludeerde in een memo dat dit mogelijk is, mits er passende maatregelen worden genomen om verbrossing en vermoeiing van staal te voorkomen (M.B.Spoelstra, 2024).

Dit rapport geeft een overzicht van die maatregelen waarbij de focus ligt op hogedruk aardgastransportleidingen van ferritisch staal, niet op gasdistributieleidingen. Het rapport is bedoeld voor adviseurs binnen veiligheidsregio's die betrokken zijn bij de beoordeling van risico's rondom waterstoftransport.

2 Aardgasleidingen

Aardgasleidingen bestaan uit segmenten van meestal 12 meter die aan elkaar worden gelast met rondlassen ('girth welds'). Afhankelijk van de manier waarop de segmenten worden gemaakt, kunnen ze ook een langslas ('seam weld') bevatten. De meeste hogedruk aardgastransportleidingen in Europa zijn voor 1984 aangelegd en enkele zelfs voor 1954. Tweederde van de aardgasleidingen wordt bedreven op een druk hoger dan 65 bar (EGIG, 2023; Smedberg, 2025).

Aardgasleidingen zijn gemaakt van ferritisch staal (Smedberg, 2025). Ferritisch staal heeft een kristalrooster waarin de ijzeratomen als volgt gerangschikt zijn: acht ijzeratomen bevinden zich op de hoeken van een kubus met een ijzeratoom in het midden van de kubus, zie Figuur 1 (ALURVS, n.d.). Bij andere staalsoorten is de ruimtelijke indeling anders en meer gevuld met ijzeratomen waardoor het voor waterstofatomen moeilijker is om zich in die kristalroosters te verplaatsen (Boby & Odqvist, 2023).



Figuur 1
Kristalrooster
(kubisch ruimtelijk
gecentreerd).
Tekening is niet op
schaal.

De meest voorkomende staalsoorten zijn Grade B, X52, X60 en X70. De staalsoorten verschillen van elkaar in vloeigrens en trekspanning.¹ Grade B heeft een lagere vloeigrens en een lagere treksterkte en wordt gebruikt in leidingen met een kleinere diameter. De X geeft aan dat het staal hard is en het getal achter de X geeft de minimale vloeigrens aan. X52 heeft bijvoorbeeld een minimale vloeigrens van 52.000 psi (359 MPa) (San Marchi & Somerday, 2021).²

¹ Deze begrippen worden in hoofdstuk 3 toegelicht.

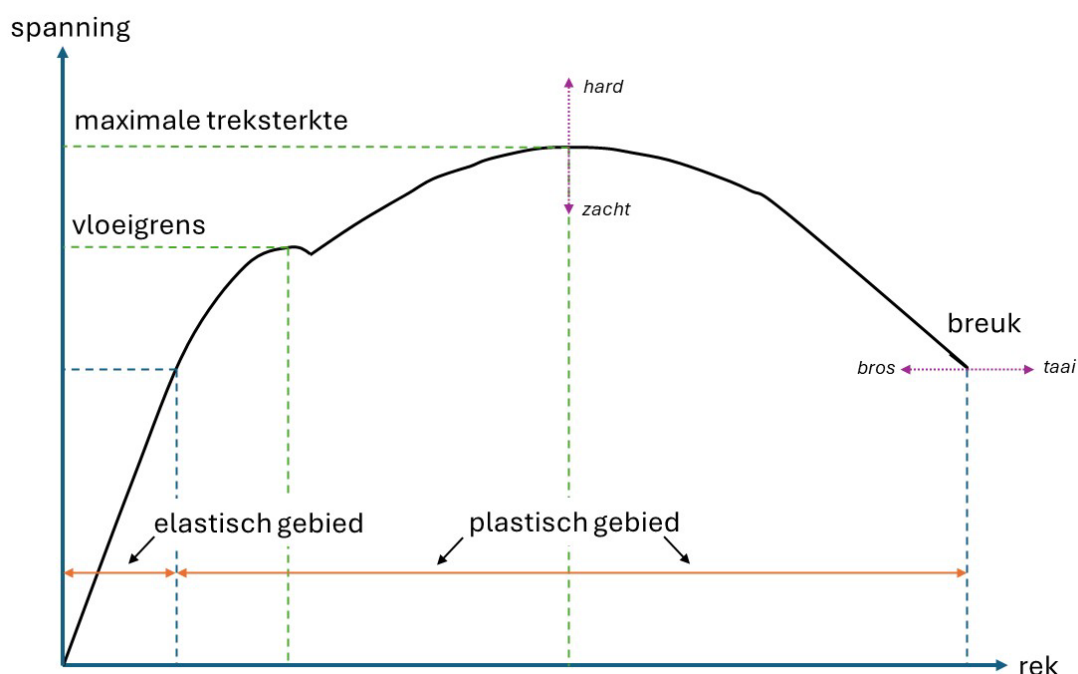
² Psi staat voor 'pounds per square inch'. 1 psi = 6,9 kPa.

3 Mechanische eigenschappen van staal

Om de invloed van waterstof op staal te begrijpen, is kennis nodig van metallurgie, van de mechanische eigenschappen van staal en van termen die gebruikt worden in breukmechanica. Dit hoofdstuk beschrijft de belangrijkste eigenschappen en termen.

3.1 Spanning-rek gedrag

Wanneer staal wordt uitgerekt, ontstaat een karakteristieke spanning-rek curve, zie Figuur 2. In het begin gedraagt staal zich elastisch: het vervormt tijdelijk en keert terug naar zijn oorspronkelijke vorm zodra de belasting verdwijnt. Dit is het elastisch gebied en stalen constructies worden zo ontworpen dat zij qua spanningen en rek binnen dit gebied blijven. Zodra de belasting toeneemt tot voorbij de vloeigrens (ook wel *yield strength* genoemd), vervormt staal blijvend. Het bevindt zich dan in het plastisch gebied. Staal kan echter grotere spanningen aan, omdat het sterker wordt als gevolg van veranderingen in het kristalrooster. Het hoogste punt op de curve is de maximale treksterkte van staal (*ultimate tensile strength*). Daarna treedt insnoering op en uiteindelijk breuk (Veidth, 2025).



Figuur 2 Spanning-rek diagram van staal.

3.2 Taaiheid en brosheid

Het oppervlak onder de curve is een maat voor de taaiheid van staal. Hoe groter dit oppervlak, hoe meer energie staal kan absorberen voordat het breekt. Taai (*ductiel*) staal kan relatief veel rekken (plastisch vervormen) voordat het breekt; bros staal rekt juist heel weinig en breekt plotseling, zonder veel plastische vervorming.

Hard staal heeft een hoge treksterkte en is over het algemeen bros, omdat het weinig energie kan absorberen voordat het breekt. Het oppervlak onder de curve is daardoor klein. Zacht staal heeft een lagere treksterkte en is taai, omdat het veel energie kan absorberen voordat het breekt. Het oppervlak onder de curve is daardoor groot (Veidth, 2025).

3.3 Scheurgroei en breuktaaiheid

Staal bestaat uit kristallijnen gebieden ('korrels') die van elkaar gescheiden worden door korrelgrenzen. Deze korrelgrenzen kunnen onzuiverheden of poriën ('dislocaties') bevatten die lokaal spanningen veroorzaken waardoor microscheurtjes kunnen ontstaan. Als staal wisselend belast wordt, kunnen deze microscheurtjes uitgroeien tot grotere scheuren waardoor een stalen constructie kan falen.

Het vermogen om weerstand te bieden tegen scheurgroei wordt breuktaaiheid genoemd. Een hoge breuktaaiheid betekent dat een kleine scheur moeilijk kan uitgroeien tot een breuk. Zacht staal heeft een hogere breuktaaiheid dan hard staal, omdat het makkelijker plastisch kan vervormen waardoor spanningen in staal afvlakken (Veidth, 2025).

4 Invloed van waterstof op staal

Waterstof beïnvloedt de vloeigrens en de treksterkte van staal niet of nauwelijks. Waterstof vermindert wel de taaiheid en breuktaaiheid van staal ('verbrossing') en verhoogt de snelheid waarmee scheurtjes groeien ('vermoeiing'). Dit is vooral bij harde staalsoorten het geval. Bij harde staalsoorten kunnen dislocaties maar beperkt verschuiven waardoor spanningen zich lokaal opbouwen. Waterstofatomen verzwakken deze spanningszones waardoor scheurtjes ontstaan. Zachte staalsoorten kunnen plastisch vervormen waardoor spanningspieken worden afgevlakt en scheurvorming wordt vertraagd of voorkomen (Smedberg, 2025).

Verbrossing en vermoeiing worden vaak samen genoemd, maar hebben verschillende oorzaken en effecten. Om te kunnen bepalen welke maatregelen nodig zijn om veilig gebruik van waterstof in aardgasleidingen te waarborgen, is kennis over verbrossing en vermoeiing noodzakelijk.

4.1 Waterstofopname in staal

Zowel verbrossing als vermoeiing beginnen met het binnendringen van waterstof in het metaalrooster. Waterstof kan als molecuul (H_2) niet het kristalrooster van een stalen leiding binnendringen, maar wel als waterstofatoom ('radicaal').³ Dit proces bestaat uit een aantal stappen (Smedberg, 2025; Yu et al., 2024):

1. Adsorptie: waterstofmoleculen hechten zich aan het metaaloppervlak.
2. Dissociatie: waterstofmoleculen ontleden in waterstofatomen.⁴
3. Absorptie: waterstofatomen dringen het metaalrooster binnen.
4. Diffusie: waterstofatomen verplaatsen zich in het metaalrooster
 1. Bij verbrossing verzamelen waterstofatomen zich op onregelmatigheden in het kristalrooster (korrelgrenzen, roosterfouten ('dislocaties') enz.).
 2. Bij vermoeiing verzamelen waterstofatomen zich in de punt van een microscheur.

De omstandigheden waarin deze stappen plaatsvinden, hebben invloed op de manier waarop waterstof doorwerkt op staal. Gedacht moet worden aan mechanische parameters, omgevingsparameters en materiaalparameters. Zo bepaalt de temperatuur de snelheid waarmee adsorptie, absorptie en verplaatsing van waterstof in staal plaatsvinden en bepaalt de gasdruk de hoeveel waterstof dat geabsorbeerd wordt in staal (Monsma, 2025).

³ Wanneer een atoom of een molecuul een ongepaard elektron bevat, wordt het een radicaal genoemd. Radicalen zijn zeer reactieve deeltjes, omdat ze op zoek gaan naar een ander ongepaard elektron zodat het atoom of molecuul stabiel wordt.

⁴ Waterstofmoleculen dissociëren niet spontaan tot waterstofatomen. Dat gebeurt alleen bij hoge temperaturen en bij elektrochemische reacties op een actief staaloppervlak (oppervlak zonder oxidelaagje).

4.2 Verbrossing

Waterstof zorgt er voor dat staal minder energie kan absorberen. Dit komt doordat waterstofatomen zich ophopen op zwakke plekken in het kristalrooster, zoals korrelgrenzen, dislocaties, insluitsels en hard spots.⁵ Hierdoor ontstaan microscheurtjes die het materiaal verzwakken. Hierdoor neemt de taaiheid van staal af en kan scheurvorming sneller en eenvoudiger optreden. Dit proces wordt verbrossing genoemd. Er zijn verschillende vormen van verbrossing mogelijk (Tebodin Bilfinger, 2019; Yu et al., 2024). Enkele voorbeelden zijn:

- > Hydrogen induced cracking (HIC): bij HIC is lokaal sprake van een corrosieve omgeving waar waterstofionen (H^+) aanwezig zijn die aan het staaloppervlak reduceren tot atomair waterstof. De waterstofatomen diffunderen het staal in en recombineren tot waterstofmoleculen (H_2). Dit gebeurt bij korrelgrenzen, imperfecties en insluitsels waardoor lokaal de spanning in staal toeneemt en microscheurtjes ontstaan.
- > Stress corrosion cracking (SCC): om spanningscorrosie te krijgen is naast een corrosieve omgeving ook trekspanning in staal nodig. De interactie tussen trekspanning en corrosieve aantasting van staal veroorzaakt microscheurtjes. Spanningscorrosie kan ook ontstaan in een corrosieve omgeving waar geen waterstof aanwezig is.
- > High Temperature Hydrogen Attack (HTHA): deze vorm van verbrossing treedt op als staal bij hoge temperaturen ($> 200\text{ °C}$) langdurig wordt blootgesteld aan een waterstofrijke omgeving. Waterstofatomen dringen staal binnen en reageren daar met koolstof waarbij methaanmoleculen (CH_4) worden gevormd. Deze moleculen zijn te groot om zich te kunnen verplaatsen waardoor lokaal de spanning in staal toeneemt en microscheurtjes ontstaan.
- > Hydrogen Induced Cold Crack (HICC): deze vorm van verbrossing treedt op bij lage temperaturen, vaak na het lassen van staal ('koudscheuren'). Tijdens het lassen ontstaan waterstofatomen die staal binnendringen in de warmte-beïnvloede zone en zich nestelen bij korrelgrenzen en dislocaties. Na het lassen koelt staal af en krimpt waardoor intern spanningen ontstaan rondom de plekken met waterstof. Binnen enkele dagen na het lassen ontstaan microscheurtjes (A.J.Lambert, n.d.).

Bij een druk van 80 bar is de waterstofconcentratie in staal maximaal 0,1 ppm. Om verbrossing te krijgen, moet de waterstofconcentratie in staal veel hoger zijn. Afhankelijk van het mechanisme zijn concentraties van minstens 10 ppm nodig (Tebodin Bilfinger, 2019). Waterstofatomen kunnen al in staal zitten (HICC) of afkomstig zijn van buiten het staal (HIC, SCC, HTHA).

4.3 Vermoeiing

Als staal herhaald belast wordt, kan het falen bij spanningen die lager zijn dan de vloeigrens van het staal. Dit proces wordt vermoeiing genoemd. Bij vermoeiing ontstaan microscheurtjes op plekken waar sprake is van spanningsopbouw, bijvoorbeeld bij lassen. Deze scheurtjes groeien langzaam per belastingcyclus. Waterstof versnelt dit proces doordat waterstofatomen zich ophopen in de punt van een bestaand microscheur en de cohesie tussen ijzeratomen daar verzwakt. Hierdoor kan een microscheur tot wel 10–100 keer sneller groeien dan in lucht (Smedberg, 2025).

⁵ Hard spots zijn plekkjes die een hogere hardheid hebben dan het omringende materiaal. Ze ontstaan meestal door lasprocessen en door mechanische bewerkingen. Hard spots kunnen minder plastische vervormen en waterstof hoopt zich er sneller op. Ze worden vooral gezien in leidingen van voor 1970 (PHMSA, 2024).

De snelheid van scheurgroei wordt bepaald door (San Marchi & Somerday, 2021):

- > De spanningsintensiteitsfactor (K).
- > De frequentie van spanningsbelasting.
- > De waterstofconcentratie bij de scheurtip.

De spanningsintensiteitsfactor K is een maat voor de concentratie van mechanische spanning aan de tip van een scheur in een materiaal. In een homogeen materiaal zonder scheuren is de spanning gelijkmatig verdeeld. Zodra er een scheur ontstaat, concentreert de spanning zich aan de punt van die scheur. Hoe groter de scheur en hoe hoger de belasting, hoe hoger de waarde van K. De eenheid van K is $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$. De factor wordt gebruikt bij het beoordelen van de kans op scheurgroei in leidingen onder druk (breuktaaiheid).

K_{IC} is de kritische spanningsintensiteitsfactor en geeft aan bij welke waarde van K het materiaal zal bezwijken. Als $K > K_{IC}$ groeit de scheur snel en kan het materiaal falen. Als $K < K_{IC}$ blijft de scheur stabiel (Smedberg, 2025).

Bij wisselende belasting (zoals drukschommelingen in leidingen) is niet alleen de absolute waarde van K van belang, maar ook het verschil tussen de maximale en minimale spanning: $\Delta K = K_{\text{max}} - K_{\text{min}}$. Hoe groter ΔK , hoe sneller een scheur groeit per belastingcyclus. In Bijlage A staat hoe de scheurgroei van een materiaal bepaald wordt.

4.4 Verschil en samenhang tussen verbrossing en vermoeiing

Hoewel verbrossing en vermoeiing tegelijk voor kunnen komen, zijn er duidelijke verschillen. Voor vermoeiing is een microscheur nodig, maar voor verbrossing niet. Daarnaast zijn voor vermoeiing drukwisselingen nodig, maar voor verbrossing niet. Een overeenkomst tussen vermoeiing en verbrossing is dat beide vaker voorkomen bij harde staalsoorten.

In de praktijk treden verbrossing en vermoeiing vaak tegelijkertijd op en is het risico groter dan de som der delen. Zo verzwakt staal door verbrossing waardoor vermoeiingsscheuren sneller ontstaan en door vermoeiing worden scheurtjes gecreëerd waar waterstof zich kan ophopen. Daarom moeten leidingen integraal beoordeeld worden waarbij zowel statische als dynamische belasting wordt meegenomen.

5 Maatregelen tegen verbrossing en vermoeiing

Om waterstof veilig via bestaande aardgasleidingen te transporteren, zijn maatregelen nodig om de kansen op verbrossing en vermoeiing te beperken.⁶ Dit hoofdstuk beschrijft deze maatregelen, gegroepeerd in vier categorieën: materiaal, ontwerp, inspectie en monitoring, en proces- en bedrijfscondities (ASME, 2023; Huising & Krom, 2020; PHMSA, 2024; Smedberg, 2025; Tebodin Bilfinger, 2019).

5.1 Materiaalkeuze en karakterisatie

Nieuwe leiding

- > Gebruik staal dat ontworpen is om waterstof te transporteren.

Bestaande leiding

- > Voer materiaalkarakterisatie uit (korrelstructuur, lasnaden en dislocaties).
- > Inspecteer de leiding op scheuren, hard spots en spanningsconcentraties door middel van Inline Inspection (ILI, 'pigging').
- > Besteed aandacht aan de laskwaliteit en versterk lasverbindingen waar nodig.
- > Voer hydrostatische testen uit om zwakke plekken op te sporen.
- > Beoordeel de leiding op waterstofbestendigheid aan de hand van de bevindingen van bovengenoemde onderzoeken.

5.2 Ontwerpmaatregelen

Nieuwe leiding

- > Pas de ontwerpfactor aan: beperk de maximale spanning tot bijvoorbeeld 50% van de vloeigrens.⁷
- > Bereken de wanddikte op basis van ontwerpdruk, corrosietoeslag en toleranties.
- > Vermijd lokale vervorming.

5.3 Inspectie en monitoring

Bestaande leiding

- > Voer niet-destructief onderzoek uit, zoals magnetic flux leakage (MFL).
- > Gebruik inline inspectie om scheuren, corrosie en hardheidsverschillen op te sporen.

⁶ Niet alle vormen van verbrossing zijn relevant voor waterstoftransport via aardgasleidingen. HTHA bijvoorbeeld vereist temperaturen boven 200 °C, wat in transportleidingen in Nederland niet voorkomt.

⁷ De ontwerpfactor is de verhouding tussen de druk die maximaal op de leidingwand aanwezig mag zijn en de druk die de leidingwand maximaal kan hebben.

- > Beoordeel bestaande defecten met Fitness-for-Service (FFS) en Failure Assessment Diagrams (FAD).⁸
- > Monitor continu op druk, temperatuur en scheurgroei.
- > Pas frequentere inspectie-intervallen toe vanwege versnelde vermoeiingsgroei in waterstof.

5.4 Proces- en bedrijfscondities

- > Beperk drukwisselingen.
- > Vervang waar nodig onderdelen door waterstofbestendige varianten (kleppen, afsluiters, verbindingen, rubbers).
- > Denk na over afblaasleidingen en hun locatie.
- > Controleer zuiverheid en samenstelling van waterstof.
- > Houd het dauwpunt lager dan -8 °C om condensatie van aanwezig water te voorkomen.
- > Overweeg om gasimpuriteiten zoals zuurstof of CO te injecteren om adsorptie van waterstof te remmen.⁹
- > Controleer regelmatig bovengronds op het lekken van waterstof.

5.5 Indeling maatregelen naar faalmechanisme

De maatregelen in paragrafen 5.1 tot en met 5.4 zijn gegroepeerd naar materiaalkeuze en karakterisatie, ontwerp, inspectie en monitoring, en proces- en bedrijfscondities. In Tabel 1 zijn dezelfde maatregelen opnieuw weergegeven, maar nu geordend naar het mechanisme dat zij beïnvloeden, namelijk het beperken van vermoeiing en/of verbrossing.

Tabel 1 – Maatregelen ingedeeld naar faalmechanisme

Vermoeiing	Verbrossing
Beperk drukfluctuaties (voorkomt scheurgroei).	Karakteriseer staal op basis van korrelstructuur, lasnaden, hard spots (voorkomt toepassing van staal met verhoogde brosheidsrisico's).
Beperk maximale werkdruk (vermindert mechanische belasting en verlengt levensduur). Dit is optie A van ASME B31.12:	Inspecteer inwendig op hard spots en lasfouten (voorkomt lokale zones met verhoogde waterstofgevoeligheid).
Gebruik drukdata voor vermoeiingsanalyse (voorkomt onderschatting van cyclische belasting).	Toon geschiktheid aan van leidingmateriaal voor waterstof aan de hand van experimenteel bepaalde spanningsintensiteits-factor K_{IH} (voorkomt verzwakking leiding-materiaal) ¹⁰ Dit is optie B van ASME B31.12.

⁸ Bij FFS wordt onderzocht of een leiding ondanks eventueel aanwezige schade, nog veilig gebruikt kan worden gegeven de te verwachten omstandigheden. FAD is een grafische methode binnen FFS om de geschiktheid van de leiding te beoordelen op basis van de relatie tussen plastische vervorming en scheurgroei.

⁹ Het effect is lokaal en moeilijk te beheersen over lange afstanden.

¹⁰ Om het veilig gebruik van een leiding te verhogen, kan een leiding volgens ASME B31.12 op twee manieren ontworpen worden. Bij optie A wordt uitgegaan van de materiaalprestatiefactor H_f . Deze is afhankelijk van de

Vermoeiing	Verbrossing
Voer Inline inspectie uit met pigs (spoort scheuren en hard spots op).	Versterk lasverbindingen waar nodig (voorkomt initiatie van microscheurtjes in warmtebeïnvloede zones).
Plan frequentere inspectie-intervallen (detecteren van vermoeiingsscheuren voordat ze kritiek worden).	Controleer waterstofzuiverheid en dauwpunt (voorkomt corrosieve omstandigheden die verbrossing versterken).
Beoordeel bestaande defecten met Fitness-for-Service (FFS, voorkomt falen door kritische scheuren).	Injecteer gasimpureiteiten (vormt oxidehuid en voorkomt waterstofadsorptie).

sterkte van de stalen leiding en van de druk in de leiding. Bij optie B is het uitgangspunt dat het leidingmateriaal bestand is tegen waterstof waardoor H_f gelijk aan 1 en er geen extra aanpassingen nodig zijn. Testen moeten aantonen dat het leidingmateriaal, de lassen en de warmtebeïnvloede zones daaromheen niet bros worden door waterstof. Bij deze testen wordt de spanningsintensiteitsfactor bij scheurgroei (K_{IH}) vergeleken met de kritische waarde (K_{IC}).

6 Normen en standaarden

Het transporteren van waterstof in aardgasleidingen wordt gezien als een wijziging van de functie van een buisleidingsysteem. NEN 3650 (Algemene eisen voor buisleidingsystemen) zegt hierover: 'Door onderzoek moet worden aangetoond dat het ontwerp en de integriteit van het buisleidingsysteem geschikt zijn voor de beoogde nieuwe toepassing. Het onderzoek moet uitgaan van het actuele leidingdossier en de voorgenomen stof en/of de voorgenomen procescondities. De externe veiligheidseisen en vergunningsvoorwaarden moeten in het onderzoek worden meegenomen. Bijzondere aandacht kan nodig zijn voor o.a. de toegepaste materialen, verbindingen, afsluiters, andere leidingcomponenten, inwendige en uitwendige bekledingen en beschermingsmethoden' (NEN, 2025).

De Amerikaanse standaard voor het transport van waterstof door buisleidingen (ASME B31.12-2023) gaat dieper in op de maatregelen die getroffen moeten worden als waterstof getransporteerd wordt door een aardgasleiding. Het geeft een lijst met 18 maatregelen (ASME, 2023):

- a. Voer een risicoanalyse uit als berekening van potentiële impact dit vereist.
- b. Stel een schriftelijke procedure op met stappen voor studie en ombouw, inclusief bijzondere omstandigheden.
- c. Bewaar alle documentatie van onderzoeken, inspecties, tests, reparaties en wijzigingen gedurende de levensduur van de leiding.
- d. Bestudeer alle beschikbare informatie over het originele ontwerp, inspectie, testen, lasprocedures, verbindingen, coatings en materiaal.
- e. Analyseer beschikbare operationele en onderhoudsdata, zoals lekregistraties, storingen, kathodische bescherming en interne corrosie.
- f. Beoordeel leeftijd en stilstandperiode van de leiding.
- g. Inspecteer bovengrondse delen van de leiding op fysieke staat.
- h. Ga na waar gebouwen zich dicht bij de leiding bevinden en bepaal per leidingdeel de benodigde ontwerpfactor.
- i. Bepaal de maximale werkdruk van de leiding. Deze mag niet hoger zijn dan 153 bar.
- j. Bepaal de reductiefactor H_f op basis van testdata en certificaten; gebruik mill-certificaten als die beschikbaar zijn.^{11 12}
- k. Als de mill-certificaten niet beschikbaar zijn, moeten chemische en mechanische analyses worden uitgevoerd; minimaal één monster per 1,6 km. Voor de leiding moet de laagst bepaalde H_f -waarde gebruikt worden.
- l. Kwalificeer het leidingmateriaal volgens de eisen voor breukbeheersing.¹⁰ Als de kwalificatie niet plaatsvindt, mag de maximale werkdruk van de leiding niet groter zijn dan 40% van de minimale vloeigrens.
- m. Ga na of interne corrosie, externe schade of slechte kathodische bescherming hebben kunnen leiden tot afname van de wanddikte van de leiding.

¹¹ H_f staat voor 'hydrogen performance factor'. Het is een reductiefactor die wordt toegepast op de toelaatbare spanningen van materialen die worden gebruikt in leidingsystemen voor waterstof onder hoge druk. De spanningen die een materiaal mag ondergaan, worden met deze factor verlaagd om veiligheid te garanderen.

¹² Een mill-test bevat de resultaten van een chemische analyse, mechanische eigenschappen, hydrostatische druktest en visuele en dimensionele inspecties.

- n. Haal om de 1,6 km een monster uit de leiding en analyseer deze op insluitels, hardheid, vloeigrens en treksterkte.
- o. Meet de wanddikte langs de leiding als punt m. hiertoe aanleiding geeft. Gebruik de dunste wanddikte of beoordeel de leiding volgens ASME B31G.¹³
- p. Voer een hydrostatische test uit als er geen interne inspectie is uitgevoerd.
- q. Controleer alle drukgerelateerde componenten (kleppen, flenzen) op voldoende sterkte.
- r. De diepteligging van de leiding moet voldoen aan de eisen die ASME B31.12 stelt.

¹³ ASME B31G Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines. Het is een aanvulling op de ASME B31-normenreeks en wordt toegepast bij leidingen die zijn aangetast door corrosie.

7 Praktische overwegingen

Bij het ombouwen van aardgasleidingen voor waterstoftransport komt meer kijken dan alleen materiaaleigenschappen en ontwerpcriteria. In de praktijk spelen ook componenten, inspectiemethoden, operationele procedures en omgevingsfactoren een belangrijke rol. Hieronder worden de belangrijkste aandachtspunten besproken.

7.1 Componenten en aansluitingen

Waterstof is een klein molecuul dat gemakkelijk door materialen diffundeert. Dit maakt componenten zoals rubbers, pakkingen, kleppen en flensverbindingen extra kwetsbaar. Veel gebruikte elastomeren in aardgasinstallaties verouderen sneller in een waterstofomgeving en veroudering kan leiden tot lekkage. Daarom moeten afdichtingen en rubbers vervangen worden door waterstofbestendige varianten en moet de lekdichtheid van flensverbindingen en kleppen gecontroleerd worden.

7.2 Compressoren en stroming

Waterstof vereist veel meer compressie-energie dan aardgas. Compressoren moeten daarom geschikt zijn voor waterstof. Bovendien kunnen meetinstrumenten in leiding voor wervelingen en resonantie zorgen.

7.3 Afblaasleidingen en lekdetectie

Bij onderhoud of incidenten moet waterstof veilig kunnen worden afgeblazen. De locatie en uitvoering van afblaasleidingen zijn daarbij van belang. Afblaasleidingen moeten daarom zodanig ontworpen worden dat afvoer plaatsvindt op een veilige locatie, bij voorkeur op het terrein van de leverancier of gebruiker.

7.4 Operationele procedures

Waterstof vraagt om aangepaste procedures voor onderhoud, veiligheid en incidentenbestrijding. Zo moeten noodprocedures worden aangepast voor waterstofspectifieke risico's en mogen er geen laswerkzaamheden uitgevoerd worden of aansluitingen op de leiding gemaakt worden als deze in bedrijf is.

8 Discussie en onzekerheden

Hoewel er steeds meer bekend is over de invloed van waterstof op staal, blijven er belangrijke onzekerheden bestaan. Deze onzekerheden hebben betrekking op zowel materiaalgedrag als operationele omstandigheden.

8.1 Representativiteit van laboratoriumtesten

Veel kennis over waterstofverbrossing en vermoeiing is gebaseerd op kleinschalige laboratoriumproeven. Daarbij worden gestandaardiseerde staalmonsters getest onder gecontroleerde condities. In de praktijk zijn leidingen echter groter en complexer van vorm, bevatten ze lassen, zijn ze verouderd en hebben ze jarenlang drukverschillen ervaren. Aangezien scheurgroei tijdsafhankelijk is, is de vraag of laboratoriumresultaten representatief zijn voor transportleidingen. Bij het gebruiken van bestaande leidingen voor het transport van waterstof, is het verstandig om gebruik te maken van staalmonsters uit de leiding zelf (Smedberg, 2025).

8.2 Tijdafhankelijk gedrag van waterstof

Waterstofverbrossing is een tijdafhankelijk proces. Waterstofatomen moeten zich eerst ophopen bij de scheurtip voordat ze schade veroorzaken. De snelheid waarmee dit gebeurt hangt onder andere af van de snelheid waarmee de druk in de leiding verandert en van de snelheid waarmee waterstof zich in de leidingwand verplaatst. Bij snelle belasting kan waterstof zich onvoldoende concentreren, waardoor het effect beperkt blijft. Bij langzame belasting of langdurige druk, kan het effect juist versterkt worden. Dit maakt het lastig om te voorspellen of en waar vermoeiing zal optreden (Smedberg, 2025).

8.3 Invloed van waterstofdruk

Een microscheur groeit als gevolg van mechanische belasting op de tip van de microscheur. De mechanische belasting hangt niet alleen af van de interne druk in de leiding, maar ook van de wanddikte van de leiding, de geometrie van de leiding en van de scheurgrootte. Een leiding kan dus een hoge waterstofdruk hebben, terwijl de spanningsintensiteitsfactor K laag kan zijn door een dikke wand en een kleine scheur.

De invloed van waterstof op scheurgroei varieert. Bij lage waarden voor K ($< 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) speelt de waterstofdruk een grotere rol dan bij hoge waarden voor K ($> 30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$). Bij hoge waarden van K is de mechanische belasting op de scheur groot en groeit de microscheur sowieso snel, ongeacht de waterstofdruk. Bij lage waarden van K is de mechanische belasting op de scheur kleiner en kan waterstof meer bijdragen aan scheurgroei door de weerstand tegen scheurgroei lokaal te verlagen. In het gebied tussen 10 en 30 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ bepaalt de waterstofdruk of een scheur stabiel blijft of snel groeit (Smedberg, 2025).

9 Eindconclusie en aanbeveling

Uit literatuurstudie blijkt dat het transport van waterstof via bestaande aardgasleidingen technisch mogelijk is en dat risico's beheersbaar zijn als passende maatregelen genomen worden op het gebied van leidingbeheer.

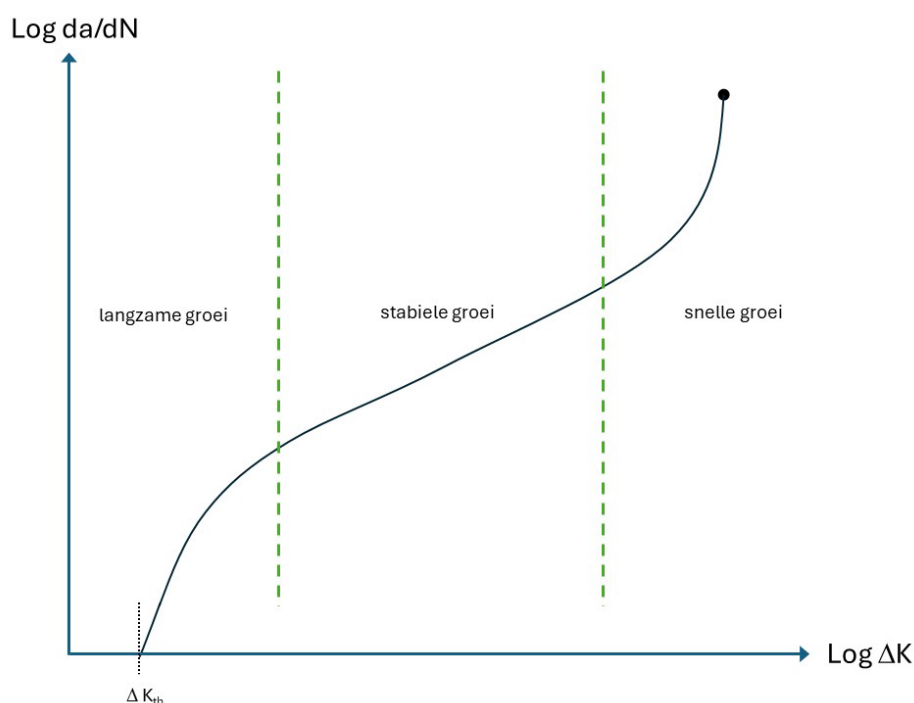
Aanbevolen wordt om altijd een beoordeling uit te voeren voordat een aardgasleiding wordt hergebruikt voor waterstoftransport. Gebruik ontwerp- en constructiegegevens alsook operationele en onderhoudsgegevens om de integriteit van de leiding te beoordelen. Gebruik bestaande normen als basis en vul deze aan met praktijkervaring en actuele data.

Bronnen

- A.J.Lambert. (n.d.). *Waterstofscheuring in lassen*. Retrieved December 15, 2025, from https://www.alurvs.nl/staal/kennisbank-staal/waterstofscheuring-in-lassen_15135/
- ALURVS. (n.d.). *Basis Roestvast staal les 2 - Enkele metallurgische principes*. <https://www.alurvs.nl/roestvast-staal/artikellijst/7959/>
- ASME. (2023). *Hydrogen Piping and Pipelines - ASME Code for Pressure Piping, B31*. <https://studylib.net/doc/27621880/asme-b31.12-2023hydrogen-piping-and-pipelines>
- Boby, S., & Odqvist, J. (2023). Statistical Model of Hydrogen Diffusion in BCC Metals. *Defect and Diffusion Forum*, 429, 33–44. <https://doi.org/10.4028/p-rbcq6Z>
- EGIG. (2023). *12th report of EGIG, GAS PIPELINE INCIDENTS* (Issue September 2023). [https://www.egig.eu/news/\\$174](https://www.egig.eu/news/$174)
- Huising, O. J. C., & Krom, A. H. M. (2020). H2 in an existing natural gas pipeline. *Proceedings of the 2020 13th International Pipeline Conference. Volume 1: Pipeline and Facilities Integrity*, 1–8. <https://asmedigitalcollection.asme.org/IPC/proceedings-abstract/IPC2020/84447/V001T03A057/1095967>
- M.B.Spoelstra. (2024). *Reactie NIPV op artikel over veilig gebruik van waterstof in bestaande aardgasleidingen*. <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2024/11/20241106-NIPV-Reactie-op-artikel-waterstof-en-aardgasleidingen.pdf>
- Martin, P., Ocko, I. B., Esquivel-Elizondo, S., Kupers, R., Cebon, D., Baxter, T., & Hamburg, S. P. (2024). A review of challenges with using the natural gas system for hydrogen. *Energy Science & Engineering*, 12(10), 3995–4009. <https://doi.org/10.1002/ese3.1861>
- Monsma, V. (2025). *Repurposing protocol*. <https://zenodo.org/records/14825905>
- NEN. (2025). *NEN 3650-1 Eisen voor buisleidingsystemen - Deel 1: Algemene eisen (ontwerp)*.
- PHMSA. (2024). *Pipeline Safety: Identification and evaluation of potential hard spots - Inline Inspection Tools and Analysis*. United States Department of Transportation (DoT),. <https://www.phmsa.dot.gov/sites/phmsa.dot.gov/files/2024-11/2024-26725.pdf>
- San Marchi, C., & Somerday, B. P. (2021). *Technical Reference On Hydrogen Compatibility Of Materials: Plain Carbon Ferritic Steels: C-Mn Alloys (Code 1100)*. <https://www.sandia.gov/matlstechref/>
- Smedberg, E. (2025). *Pipelines for hydrogen transport: A review of integrity and safety challenges*. <https://doi.org/10.2760/4545832>
- Tebodin Bilfinger. (2019). *Onderzoek technische aspecten van waterstof*. <https://www.rivm.nl/sites/default/files/2025-04/53052.01-1917001 - BilfingerTebodin Waterstof buisleidingen.pdf>
- Veidth, M. (2025). *Stress Strain Curve Explained - A Beginner's Guide*. <https://caeassistant.com/blog/stress-strain-curve/>
- Yu, H., Díaz, A., Lu, X., Sun, B., Ding, Y., Koyama, M., He, J., Zhou, X., Oudriss, A., Feaugas, X., & Zhang, Z. (2024). Hydrogen Embrittlement as a Conspicuous Material Challenge—Comprehensive Review and Future Directions. *Chemical Reviews*, 124(10), 6271–6392. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00624>

Bijlage A Vermoeiingsscheurgroei in staal

Vermoeiing is het falen van een materiaal als gevolg van cyclische of fluctuerende spanningen die lager liggen dan de spanningen die het materiaal aankan. Vermoeiing kan op verschillende manieren worden bepaald. Een manier is het maken van monsters met een scheurtje er in. De monsters worden cyclisch belast en de snelheid van scheurgroei wordt gemeten (*fatigue crack growth rate*, FCGR) (Smedberg, 2025). Een voorbeeld is te zien in Figuur 3.



Figuur 3 Schematische weergave van een vermoeiingsscheurgroei-curve

Op de wand van een leiding staat spanning vanwege de druk in de leiding, weergegeven als de spanningsintensiteitsfactor K . Er staat ook spanning op de tip van een microscheur. Als de druk in de leiding verandert, verandert de spanning op de tip van een microscheur en groeit de scheur een beetje. Het verschil in spanningsintensiteit wordt aangegeven met ΔK . De groeisnelheid van de microscheur per spanningscyclus wordt uitgedrukt als da/dN , waarbij a de lengte van de microscheur is en N het aantal belastingcycli.

De curve vertoont drie gebieden. In het eerste gebied zijn de spanningsverschillen klein en groeit de microscheur nauwelijks. Er is een drempelwaarde in spanningsintensiteit (ΔK_{th}) waaronder geen scheurgroei optreedt. In het tweede gebied groeit de microscheur gestaag en lineair. De snelheid waarmee een scheur in deze fase groeit, wordt beschreven met de formule:

$$da/dN = C \cdot (\Delta K)^m$$

waarbij:

da/dN = scheurgroeisnelheid per cyclus

C en m = materiaalconstanten

ΔK = spanningsintensiteitsverschil

In het derde gebied is er sprake van grote spanningsverschillen. De scheur groeit snel en is onstabiel. Als de spanningsverschillen te groot zijn, zal het materiaal breken.