

---

Deltares  
[redacted]

Postbus 177  
2600 MH Delft

Onderwerp : Second opinion rapportages schadegevallen Vlaketunnel en  
Prinses Margriet Tunnel  
Onze referentie : ERO040969

[redacted] 10 oktober 2023

---

Geachte [redacted]

Element Materials Technology ("Element") is gevraagd om, op basis van verstrekte rapportage van opgetreden breuken van voorspanstaven van de ankers bij de Vlaketunnel en de Prinses Margriet Tunnel (PMT), een second opinion te geven betreffende de aard van de opgetreden breuken.

De volgende vragen zijn aan Element gesteld:

1. Kunt u de conclusie onderschrijven dat de meest waarschijnlijke oorzaak voor het bezwijken van de voorspanstaven in de PMT is gelegen in loegspanningscorrosie?
2. In het rapport dat Exova destijds heeft opgesteld over de Vlaketunnel is geconcludeerd: "The crack initiations are identified as stress corrosion cracking". Kunt u, op basis van de huidige inzichten, aangeven of er bij de Vlaketunnel, naar uw oordeel, ook sprake geweest kan zijn van loegspanningscorrosie?

### Verstreckte informatie

De volgende rapporten zijn beschouwd:

A: Vlaketunnel: een eerder EXOVA rapport 3739/S/S100418 ([redacted], 28 maart 2011)

"Investigation of cracked and fractured prestressed steel bars from the Vlaketunnel" en

B: Prinses Margrietunnel (PMT): TNO rapport 2023 R11418 ([redacted], 24 juli 2023) "Onderzoek voorspanstaven Prinses Margrietunnel"

### Geraadpleegde literatuur

1. NACE Corrosion Engineer's Reference Book, NACE, 3rd ed., 2002
2. Corrosion Engineering Guide, [redacted], DSM 2004, topics caustic SCC and hydrogen stress cracking
3. ASM Handbook Vol 11 Failure analysis and prevention, 2002, topic Stress-Corrosion Cracking pp 823-842, and topic Hydrogen Damage and Embrittlement pp 809-822
4. API RP 571, Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry, **2020**
5. NACE SP0472, Standard Practice Methods and Controls to Prevent In-Service Environmental Cracking of Carbon Steel Weldments in Corrosive Petroleum Refining Environments, 2015

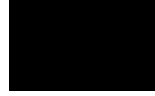
## Review met discussie

### Rapport Vlaketunnel:

Na ca. 35 jaar is splijtbreuk (transkristallijne breuk zonder significante deformatie) opgetreden aan gevormde scheurtjes aan het oppervlak van de toegepaste voorspanstaven ("Dywidag" staven, "Ø32 mm en Ø36 mm). Het materiaal van de voorspanstaven was een hoog koolstofhoudend vrijwel perlitisch (gedesoxideerd, "killed") staal, met een relatief hoge hardheid tot 335 HV10. Element schat hieruit dat de voorspanstaven een treksterkte (conversie volgens ISO18265) tot ca. 1078 MPa hadden. Met trekproeven aan de diverse voorspanstaven is een treksterkte van 1008 MPa tot 1119 MPa gemeten, waarbij de Ø32 mm staven de hoogste treksterkte toonden. De voorspanstaven waren met gevette linnen bekleding (Denso band) omgeven.

Na ca. 35 jaar is plotseling splijtbreuk (transkristallijne breuk zonder significante deformatie) opgetreden aan initieel gevormde scheurtjes aan het oppervlak van de voorspanstaven. Deze scheurtjes stonden dwars op de spanningsrichting. De scheurtjes hadden een deels inter- en transkristallijn karakter, en vertoonden soms wat vertakkingen. De scheurtjes waren preferent geïnitieerd op corrosieputten. Het oppervlak van de voorspanstaven toonden zwarte afgezette producten, duidende op corrosie. Ook de breukvlakken waren in meer of mindere mate gecorrodeerd, waarbij met name de initiële scheurtjes met zwart corrosieproduct waren bedekt.

In de discussie van het rapport wordt aangenomen dat de scheurtjes die het falen hebben ingeleid spanningscorrosie scheuren betreffen, en wel in het bijzonder basische (loog) spanningscorrosie scheurtjes ("caustic stress corrosion cracking, caustic SCC). Aangegeven wordt echter dat bij kamertemperatuur (en de temperatuur van de grond is vermoedelijk overwegend lager dan kamertemperatuur) deze vorm van spanningscorrosie niet verwacht wordt op te treden. Wel wordt verwezen naar de bijzonder lange tijd tot scheurvorming, en vermoedelijk bijzondere corrosiecondities onder de Denso band. Er wordt verwezen naar de aanwezigheid van As (arseen) in het toegepaste vet, hetgeen het diffunderen van waterstof in het staal zou bevorderen. Hiermee wordt in feite geduid op mogelijke waterstofschaad van het materiaal. Corrosieproducten zijn met EDX op samenstelling onderzocht, maar de breukvlakken waren voorafgaande aan het onderzoek al met terpentijn en aceton gereinigd. De verkregen resultaten van het EDX leverden dan ook nauwelijks verdere informatie op dan dat er corrosie is opgetreden, waarbij behalve de materiaaleigen elementen van het staal wat zuurstof (O), calcium (Ca) en natrium (Na) is aangetroffen. Uiteindelijk is op basis van de gecombineerde onderzoeksresultaten in het rapport geconcludeerd dat de initiële scheurvorming caustic SCC betreft, en dat (plotselinge) brosse restbreuk is opgetreden aan de initiële scheuren. In de optiek van Element is de afleiding dat de initiële scheuren caustic SCC (loogspanningscorrosie, ofwel een vorm van alkaline stress corrosion cracking, ASCC [5]) betreffen onvoldoende door de combinatie van gebruikscondities en onderzoeksresultaten ondersteund.



#### Rapport PMT:

Na ca. 45 jaar is splijtbreuk (transkristallijne breuk zonder significante deformatie) opgetreden aan gevormde scheurtjes aan het oppervlak van voorspanstaven, soortgelijk aan die van de Vlaketunnel.

De resultaten van onderzoek aan de voorspanstaven van de PMT tonen een materiaal dat qua microstructuur overeenkomend is met de voorspanstaven van de Vlaketunnel.

Ook hier is sprake van hoog koolstofhoudend (vrijwel volledig perlitisch) staal. De mechanische eigenschappen (trekproef, hardheid) zijn echter niet bepaald maar komen naar verwachting overeen met die zoals gerapporteerd voor de Vlaketunnel. Bij een trekproef op staaf 14-8 trad bij een belasting van 700 kN na 1 minuut breuk op. Het breukvlak toonde oudere scheuren.

Alle onderzochte breuken toonden soortgelijke initiële scheuren als zijn aangetroffen in de voorspanstaven van de Vlaketunnel. Ook zijn er secundaire scheuren aan het oppervlak van de voorspanstaven aangetroffen. Het schadebeeld lijkt daarmee dus overeen te komen met het geschetste schadebeeld aan de voorspanstaven uit de Vlaketunnel.

In dit rapport wordt echter vermeld dat het hier overwegend interkristallijne scheurtjes betreft. De breukvlakken waren niet gereinigd voorafgaande aan het SEM onderzoek, hetgeen de beoordeling lastiger maakt. Het beeld van de gerapporteerde SEM foto's van de initiële scheuren in de voorspanstaven lijkt echter overeen te komen met het SEM beeld van de initiële scheuren zoals die zijn aangetroffen bij de voorspanstaven van de Vlaketunnel. In dit geval lijkt er dus ook eerder sprake te zijn van mixed inter- en transkristallijne scheuren in plaats van volledig interkristallijne initiële scheuren, zoals in het rapport gemeld. Ook de microscopische beelden van de initiële scheuruitbreiding komen sterk overeen met de scheurtjes zoals zichtbaar in de microfoto's van de voorspanstaven uit de Vlaketunnel. Gemeld wordt ook dat sommige initiële scheuren een verloop lieten zien van interkristallijn naar meer transkristallijn (voorspanstaaf E12). De EDX analyses van de (niet gereinigde) corrosieproducten tonen aan dat er ook enig zwavel in de corrosieproducten is aangetroffen. Het is echter niet duidelijk (en bovendien lastig vast te stellen) of het zwavel als sulfide of als sulfaat gebonden is geweest.

Waterstofverbrossing wordt in het PMT rapport gemeld als mogelijke oorzaak van de initiële scheurvorming, maar wordt uitgesloten gezien de afwezigheid van duidelijke SEM kenmerken. Hier moet echter bedacht worden dat de breukvlakken voorafgaande aan het SEM onderzoek niet gereinigd zijn.

In de optiek van Element is de afleiding dat de aangetroffen initiële scheuren het gevolg zijn van caustic SCC (loog-spanningscorrosie) ook in dit rapport onvoldoende ondersteund door de combinatie van gebruikscondities en onderzoeksresultaten.

## Interpretatie van het opgetreden scheurgroeimechanisme in de PMT en Vlaketunnel

Ongelegeerd staal met de gemeten hardheid en treksterkte is zowel gevoelig voor spanningscorrosie als waterstofverbrossing, waaronder scheurvormige waterstofschade (bv. hydrogen induced cracking HIC, stress oriented hydrogen induced cracking SOHIC, sulfide stress cracking SSC. Dit betreffen net zoals “hydrogen stress cracking” vormen van omgevingsgerelateerde scheurvormige waterstofschade (hydrogen assisted cracking) [1,5]. Het is dus zeker niet zo dat enkel veredeld (gehard en ontlaten) staal gevoelig is voor scheurvormige waterstofschade.

Zowel SCC als scheurvormige waterstofschade kunnen optreden als het gevolg van corrosieve condities. Beide schademechanismen hebben gemeen dat er sprake moet zijn van bepaalde corrosieve condities, een voor het specifieke schademechanisme gevoelig materiaal, de aanwezigheid van materiaalspanningen (residuele spanningen en/of opgelegde spanningen) en een bepaalde materiaalt temperatuur.

Caustic SCC wordt overigens vroeger vaak (foutief) in de literatuur “caustic embrittlement” genoemd, hetgeen ook aangeeft dat de fenomenen erg op elkaar lijken. Deze term wordt nu niet meer gebruikt voor caustic SCC [1]. Het is bekend dat SCC en hydrogen assisted cracking verschillend reageren op de corrosiecondities. Uit de literatuur blijkt dat kathodische bescherming een effectieve methode is om SCC te voorkomen, terwijl hierdoor hydrogen assisted cracking juist versneld zal optreden [2].

Het aangetroffen zwarte corrosie product met de EDX analyse (Vlake product) kan duiden op magnetiet met zouten uit het beton, maar ook op magnetiet met FeS en zouten (daarmee mogelijk relateren aan SSC). Er is met EDX analyse geen zwavel in de producten aangetroffen, maar het corrosieproduct was echter voorafgaande aan de analyse gereinigd. In het PMT product (niet gereinigd) is wel enig zwavel aangetroffen.

Het is bekend dat scheurvormende waterstofschade, afhankelijk van de condities, op zeer lange termijn kan optreden. Er wordt dan ook wel gesproken over “hydrogen stress cracking”, “hydrogen induced delayed fracture”, “sustained load cracking” en soms “static fatigue” [3]. Dat daarbij door waterstofbelasting ook de breuktaaiheid van het materiaal negatief beïnvloed wordt, zou verklaren dat de relatief kleine initiële scheuren aan het oppervlak tot plotselinge brosse “restbreuk” van de voorspanstaven (oorspronkelijk relatief taai materiaal) hebben kunnen leiden. Het effect van waterstof verklaart ook de vertraagde brosse restbreuk bij de trekproef van voorspanstaaf 14-E8 uit de Prinses Margriet Tunnel. Bovendien is er, gezien de volledig brosse restbreuk, aanzienlijke verbrossing (reversibel, op de aanwezige initiële scheuren na) van het materiaal opgetreden als gevolg van het door corrosie opgenomen waterstof. Verwacht wordt dat gloeien van het materiaal op ca. 220°C gedurende enkele dagen voldoende zal zijn om de reversibele verbrossing op te heffen (door uitgloeien van het mobiele deel van de waterstof). Hiermee zou het effect van waterstof op de breuk aantoonbaar zijn.

Het materiaal van de voorspanstaven betreft gezien het hoge koolstofgehalte (vrijwel volledig perlitisch staal) niet echt een engineering materiaal. Een eerste blik in de literatuur geeft dan ook weinig specifieke informatie over corrosiegerelateerde schade aan dit materiaal. De door invloed van waterstof ontstane scheuren zijn lastig te onderscheiden van caustic SCC [2,3], zeker ook omdat er vaak vervolgschade (corrosie na breuk) aan de scheur- cq. breukvlakken optreedt. Vergeleken met caustic SCC zijn waterstofgerelateerde scheuren veelal in mindere mate vertakt, verlopen interkristallijn maar vaak ook deels transkristallijn (in plaats van volledig interkristallijn zoals bij caustic SCC), en ontstaan bij voorkeur juist bij veel lagere temperaturen dan caustic SCC [3]. Gezien de relatief lage gebruikstemperaturen lijkt dit een belangrijke factor. De microfoto's van de initiële scheuren in beide rapporten tonen relatief weinig vertakking, en een deels inter- en transkristallijn beeld.

Caustic SCC treedt pas op bij hoge concentraties caustic en onder hete condities, overwegend wordt in de literatuur een temperatuur hoger dan 50°C aangenomen [2]. Caustic SCC wordt dan ook meer beschouwd als een hoge temperatuur schadefenomeen [4]. Ook zou koolstofstaal met lager koolstofgehalte (ca 0,1 m%) meer gevoelig zijn voor SCC dan hoger koolstofhoudend staal [3].

Het is bekend dat waterstofvormende corrosie met name optreedt onder zure condities en in contact met H<sub>2</sub>S. De vorming van waterstof onder gewone basische corrosie is echter zeer wel mogelijk, een bekende overall waterstofvormende corrosiereactie onder basische condities is:  $\text{Fe} + 2\text{NaOH} > \text{Na}_2\text{Fe(II)O}_2 + \text{H}_2$  [2]. Waterstofvormende corrosie kan, vergeleken met caustic SCC, ook optreden bij relatief lage temperaturen (kamertemperatuur en lager).

Gezien de gemelde resultaten in het onderzoeksrapport en bovenstaande informatie zou een vorm van scheurvormige waterstofschade (hydrogen stress cracking HSC, SSC, SOHIC) aannemelijker zijn dan caustic SCC.

Uitgaande van de beide rapporten, de geconsulteerde literatuur en ervaring beoordeelt Element de opgetreden vorming en uiteindelijke brose breuk voor beide tunnels als waterstof gerelateerde schade. Waterstof heeft initieel tot scheuren geleid (irreversibele waterstofschade), en aan deze scheuren is uiteindelijk plotselinge brose restbreuk opgetreden (bij belastingen lager dan relaterende aan de treksterkte) door verlies van ductiliteit (reversibele waterstofschade).

De volgende kanttekening moet echter geplaatst worden:

De schademechanismen loogspanningscorrosie (caustic SCC) en scheurvormige waterstofschade zijn beide gebaseerd op een combinatie van

- een daarvoor gevoelig materiaal (hoge hardheid)
- langdurig hoge statische belasting
- een corrosieproces waarbij langzaam scheuren ontstaan (door interkristallijne scheurvorming in geval van spanningscorrosie of waterstof-geïnduceerde scheurvorming door de effecten van waterstofopname gerelateerd aan corrosie)
- een temperatuur waarbij het scheurvormingsmechanisme kan optreden

De door beide schademechanismen optredende scheurvorming is qua aard lastig van elkaar te onderscheiden. Vaststelling van het exacte schademechanisme is daarmee praktisch gezien van minder belang voor de inschatting van de verwachte levensduur van overige soortgelijke voorspanstaven onder overeenkomende condities. Uiteraard is kennis van het exacte schademechanisme wel van belang indien kathodische bescherming overwogen zou worden.



## Conclusies

1. Kunt u de conclusie onderschrijven dat de meest waarschijnlijke oorzaak voor het bezwijken van de voorspanstaven in de PMT is gelegen in loogspanningscorrosie?

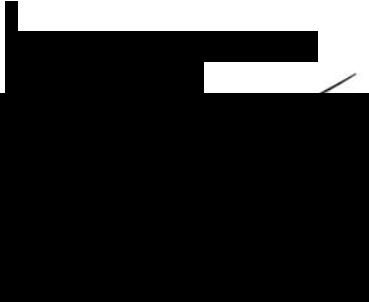
Nee. Meest waarschijnlijk betreft het een vorm van scheurvormige waterstofschade.

2. In het rapport dat Exova destijds heeft opgesteld over de Vlaketunnel is geconcludeerd: "The crack

initiations are identified as stress corrosion cracking". Kunt u, op basis van de huidige inzichten, aangeven of er bij de Vlaketunnel, naar uw oordeel, ook sprake geweest kan zijn van loogspanningscorrosie?

Ook in het geval van de Vlaketunnel lijkt er eerder sprake te zijn geweest van een vorm van scheurvormige waterstofschade.

Erop vertrouwend u hiermee naar behoren te hebben geïnformeerd, teken ik, namens Element Materials Technology,



Geautoriseerd,  
10-10-2023,



Element Materials Technology

