
RAPPORT

ONDERZOEK NAAR DE AARD EN OORZAAK VAN FALEN VAN BOUTEN VAN WINDMOLENS

© Copyright :
Element Materials Technology Rotterdam b.v.

All rights reserved. Nothing of this publication may be multiplied, stored in an automatic databank, or made public in any form or in any way, either electronically, mechanically, by photocopy, recordings, or any other way without preceding written permission of Element Materials Technology.

Oprachtgever : Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed

Ref. opdrachtgever : 4500050500

Element Project : ERO004604P

Rapportnummer : ERO004604 Rev.0

Onderzoekperiode : 4-6 april 2017

Datum rapport : 10 mei 2017

Datum revisie : ---

Classificatie : -

Verdeling : Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed (pdf)

Element, archief (1x)

1 Introductie en achtergrondinformatie

Een deel van de bouten die de roededelen van de Haastrechtse molen met elkaar verbinden zijn in verschillende perioden na relatief korte tijd gefaald. Bij een molen in Schiedam zijn in mindere mate dezelfde problemen opgetreden.

In totaal 48 molens zijn sinds circa 2011 uitgerust met verzinkte stalen roeden uit twee delen. Oorspronkelijk waren de roeden van deze molens uit een stuk. Gezien de maximale verzinklengte van ca. 15 m is bij restauratie gekozen om de roeden uit twee delen samen te stellen. De roededelen hebben een maximale lengte van 15 meter en zijn aan één zijde voorzien van een flens. Twee roededelen worden met behulp van kwaliteit 10.9 bouten met elkaar verbonden tot een roede. Van de 48 molens toonden twee molens gefaalde bouten, namelijk de Haastrechtse molen en een molen in Schiedam. Beide molens hebben een relatief grote roedelengte van respectievelijk 30 m en 27,5 m, waarbij de Haastrechtse molen de langste wieken heeft van Nederland. Van de Haastrechtse molen zijn ook na vervanging en/of modificatie van de bouten herhaaldelijk bouten gefaald na relatief korte tijd. De flensverbindingen bevinden zich in de gietijzeren askop en zijn daardoor beperkt toegankelijk voor inspectie.

In onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de voor onderzoek beschikbaar gestelde bouten. Hiervan bestond batch D uit langere bouten die in combinatie met verlengbussen waren toegepast.

batch	molen / periode	roe	intacte bout + moer	intacte bout zonder moer	gebroken bout + breukdeel met moer	anders gefaalde bout	in bedrijf
A	Haastrecht 1	buitenroe	2	-	3	1 ^{*)}	340.000 omw.
B	Haastrecht 2	buitenroe	1	-	2	-	8 maanden
C	Haastrecht 2	binnenroe	2	-	1	-	8 maanden
D	Haastrecht 3	onbekend	-	1	-	1 ^{**)}	8 maanden
E	Schiedam	onbekend	-	-	1	-	onbekend

*) gescheurde bout met moer

***) gebroken boutdeel met moer, geen boutkop

Element Materials Technology Rotterdam b.v. ("Element", locatie Breda) is gevraagd om de aard en mogelijke oorzaak van het falen van de bouten te bepalen.

2 Uitgevoerd onderzoek

De aangeboden gefaalde bouten zijn visueel en stereomicroscopisch onderzocht. De breukvlakken zijn ontroest met een geïnhibiteerd ontroestingsmiddel en daarna verder stereomicroscopisch onderzocht. Het breukoppervlak van bout C bleek representatief voor de onderzochte bouten en is vanwege de relatief goede conditie verder onderzocht. Het ontroeste breukoppervlak van bout C is onderzocht met behulp van een raster elektronen microscoop (REM). Een doorsnede over het afgebroken boutende en de moer van bout C is geprepareerd voor microscopisch onderzoek. Vickers hardheidsmetingen zijn uitgevoerd op de geprepareerde doorsnede.

3 Resultaten en discussie

3.1 Visueel en stereomicroscopisch onderzoek

Alle voor onderzoek aangeboden gefaalde bouten betroffen M20 kwaliteit 10.9 bouten met moer en eventueel ringen of delen van deze samenstelling. De boutkoppen toonden allen de gesmede markering " 10.9 - FRIEDBERG - HV " met in het midden van de kop het batchnummer. HV duidt op het gedrag van falen bij overbelasting (zie EN 14399-4): een HV type boutverbinding zal bij overbelasting afschuiven (deformer) over de schroefdraad, de boutverbinding zal daarbij zijn voorspanning verliezen maar niet breken.

De lengte van de bouten was ~ 83 mm. Van de batches waarvan meerdere bouten gebroken zijn, zijn de bouten door Element willekeurig gecodeerd met de letter van de batch gevolgd door een nummer 1, 2 of 3. Van batch A zijn 3 gebroken bouten aangeleverd en één vrijwel doorgescheurde bout. De bouten zijn gefaald op de overgang van de bout naar de moer. In sommige gevallen leek de bout iets verder van de moer gefaald, maar is de moer meest waarschijnlijk na falen en uithalen nog iets verdraaid. De gescheurde bout toonde een openstaande scheur over vrijwel de gehele doorsnede op de overgang van de schacht naar de draad. De scheur liep door het dal van de draad vrijwel haaks op de langsrichting van de bout. De scheur was zeer recht en toonde geen significante deformatie. De breukoppervlakken stonden eveneens haaks op de lengte van de bout en waren grotendeels zeer vlak. De breukoppervlakken toonden meest (rood)bruin corrosieproduct (figuur 1).

Van batch B zijn twee gebroken bouten aangeleverd en van batch C één gebroken bout. Bout B1 en C1 zijn gebroken op de eerste dragende draadgang bij de moer. Bout B1 toonde bovendien nog een secundaire scheur op de overgang van de schacht naar de draad. Bout B2 is gefaald bij de overgang van de schacht naar de draad. De breukoppervlakken stonden haaks op de lengte van de bout en waren grotendeels zeer vlak. De breukoppervlakken van de bouten van batch B waren grotendeels bedekt met (rood)bruin corrosieproduct. Het breukoppervlak van bout C toonde veel minder corrosieproduct (figuur 2).

Van batch D is enkel het afgebroken boutende met de moer aangeleverd. De bout is enkele draadgangen bouten de overgang met de moer gefaald. In verband met de grotere lengte van de bouten van batch D is het niet duidelijk hoe de positie van de breuk zich verhoudt tot de positie in de bout en in relatie tot het constructiedetail. De bout van batch E is gefaald op de eerste dragende draadgang bij de moer. Beide bouten toonden relatief weinig corrosie (figuur 3). Van iedere gebroken bout is één breukoppervlak ontroest met behulp van een geïnhibiteerd ontroestingsmiddel.

Bout A1 toonde een grotendeels vlak breukvlak met een vaag patroon van concentrische beach marks. Beach marks zijn macroscheurgroeirustlijnen en zijn kenmerkend voor een mechanisme van stapsgewijze scheurgroei. Initiatie heeft plaatsgevonden langs een groot deel van de omtrek van de bout. In deze zone waren veel ratchet marks aanwezig. Ratchet marks zijn kleine richeltjes die de grenzen markeren tussen verschillende vlakken van scheurgroei en zijn daarmee kenmerkend voor scheurinitiatie op verschillende posities (figuur 4). Tegenover de primaire initiatiezone was een aanzienlijk kleinere secundaire initiatiezone zichtbaar. Deze zone had eveneens een relatief glad oppervlak, initieerde vanuit het dal van een dieper liggende draadgang en toonde geen significante deformatie. Aan één rand van de secundaire initiatie was een kleine gedeformeerde lip zichtbaar: de taaie restbreuk. De gecombineerde breukkenmerken zijn kenmerkend voor een mechanisme van vermoeiing. De zeer kleine restbreuk suggereert dat de statische spanningen op de bout gering waren.

Bout A2 toonde soortgelijke breukkenmerken als bout A1. Het breukvlak was vlak en toonde een vaag patroon van beach marks. Primaire initiatie heeft plaatsgevonden langs een groot deel van de omtrek van de bout. In deze zone waren veel ratchet marks zichtbaar. Tegenover de primaire initiatie was een kleinere secundaire initiatiezone zichtbaar met aan de rand een kleine taaie restbreuk (figuur 5). Bout A3 toonde soortgelijke breukkenmerken als bout A1 en A2, maar met een kleinere initiatiezone. Het breukvlak was vlak en toonde een patroon van vrijwel rechte beach marks. Primaire initiatie heeft plaatsgevonden langs een kleiner deel van de omtrek van de bout. In deze zone waren meerdere ratchet marks zichtbaar. Tegenover de primaire initiatie was een kleinere secundaire initiatiezone zichtbaar met aan de rand een kleine taaie restbreuk die aan twee zijden begrensd was door een vermoeiingsbreuk (figuur 6).

Bout B1 toonde een breukvlak in twee vlakken. Primaire initiatie is opgetreden langs een groot deel van de omtrek van de bout. Een relatief grote secundaire initiatie had plaatsgevonden in een vlak parallel aan het primaire breukvlak, waarbij de scheuren elkaar deels overlaptten. Beide initiaties vonden plaats vanuit het dal van de draad bij de eerste dragende draadgang van de moer (figuur 7). Bout B2 is gebroken op de overgang van de schacht naar de draad. Initiatie heeft plaatsgevonden op één positie vanuit het dal van de draad. Het breukvlak toont een patroon van beach marks en een relatief kleine, taaie restbreuk (figuur 8).

Bout C toonde in de originele, niet ontroeste, conditie een relatief gaaf en zeer vlak breukvlak met een patroon van beach marks. Initiatie heeft tegelijkertijd plaatsgevonden langs een groot deel van de omtrek van de bout op de positie van de eerste dragende draadgang bij de moer. Tegenover de primaire initiatiezone was

een secundaire vermoeiingsinitiatie zichtbaar met aan de rand een kleine taaie restbreuk (figuur 9). Het breukoppervlak van bout D was zeer vlak. Het toonde een enkelvoudige initiatie, een regelmatig patroon van beach marks en een relatief kleine taaie restbreuk (figuur 10). Het breukvlak van bout E toonde een vermoeiingsbreuk met drie afzonderlijke initiatievlakken. Primaire initiatie vond plaats langs een relatief groot deel van de omtrek van de bout. De secundaire initiaties liggen in andere, deels parallelle, vlakken (figuur 11).

Het breukoppervlak van bout C was representatief voor de onderzochte bouten en is vanwege de relatief goede conditie verder onderzocht. Het breukvlak toonde relatief weinig corrosie, maar op de rand van de moer was een dikke afzetting van witte zinkroest zichtbaar, met name bij de primaire initiatiezone. Dit duidt op relatief corrosieve condities ter plaatse van de bouten. Op het breukvlak zelf was in de initiatiezone een smalle, iets golvende en relatief donkere band zichtbaar (figuur 12). De structuur van het breukvlak in deze donkere band was gelijk aan de structuur van het aangrenzende breukoppervlak. In de initiatiezone was een groot aantal ratchet marks zichtbaar. Dit geeft aan dat de dynamische spanningen over een groot deel van de omtrek van de bout kritisch genoeg waren om vrijwel gelijktijdig tot vermoeiingsinitiatie te leiden (figuur 13).

Verder weg van de initiatiezone waren de beach marks zeer duidelijk en werd het breukoppervlak geleidelijk iets grover als gevolg van het toenemende spanningsniveau in de kleiner geworden resterende dragende doorsnede (figuur 14). Het complementaire boutdeel van bout C toonde in het zijaanzicht relatief veel witte zinkroest in de draad. Op de positie van secundaire initiatie was in het uitstekende deel slechts geringe deformatie zichtbaar. Dit suggereert dat dit deel van de breuk grotendeels onder invloed van vermoeiing tot stand is gekomen (figuur 15).

De moeren op de vijf onderzochte afgebroken bouteinden konden overwegend zonder veel koppel over de schroefdraad gedraaid worden. Dit duidt erop dat de belasting op de bouten niet tot significante plastische deformatie van de schroefdraad heeft geleid.

3.2 REM-onderzoek van het breukoppervlak van bout C

Het ontroeste breukoppervlak van bout C is onderzocht met behulp van een raster elektronen microscoop (REM) bij vergrotingen tot 3000x. Het breukoppervlak vanaf de initiatie was zeer vlak en was grotendeels bedekt met resterende corrosieproducten. Het breukvlak toonde op macroschaal geen significante deformatie en op microschaal geen restanten van (brosse) splijt of (taaie) dimples, kenmerken van brosse of taaie overbelasting. Lokaal waren restanten te zien van striaties. Striaties zijn microscheurgroeistappen en deze zijn kenmerkend voor een mechanisme van vermoeiing. De aangetroffen restanten striaties hadden een submicron spatiering. Dit, en de afwezigheid van deformatie, duiden op een mechanisme van high cycle fatigue (HCF). Er is geen verschil waargenomen in de breukkenmerken van de donkere strook in de initiatiezone en de rest van het breukoppervlak (figuur 16). De secundaire initiatiezone was voor een groot deel versmeerd en toonde geen herkenbare breukkenmerken meer.

3.3 Microscopisch onderzoek

Een doorsnede over het afgebroken bouteinde en de moer van bout C is geprepareerd voor microscopisch onderzoek. Bij lage vergroting toonde de doorsnede dat de primaire initiatie in de bout had plaatsgevonden in het dal van de eerste dragende draadgang bij de moer. De primaire breuk was loodrecht georiënteerd op de lengte van de bout. Op de positie tegenover de primaire initiatie toonde het breukvlak een secundaire initiatie vanuit het dal van de tweede draadgang met de moer (figuur 17).

In de ongeëtste gepolijste conditie toonde het boutmateriaal een relatief schone matrix met lage hoeveelheden aan fijne mangaansulfidestringers georiënteerd in de walsrichting (langsrichting) van de bout. Op de positie van de draad waren de stringers mee georiënteerd met de draad, wat duidt op een gerolde draad. Na etsen met 3% Nital toonde het boutmateriaal een fijne en homogene veredelingsstructuur (figuur 18). Het primaire breukvlak was zeer vlak en toont geen significante deformatie. Het secundaire breukvlak was vanaf de initiatie ook relatief vlak, maar toonde verder weg van het boutoppervlak geleidelijk iets toenemende oppervlakkige deformatie. Dit is meest waarschijnlijk het gevolg van een toenemend spanningsniveau in de kleine resterende dragende doorsnede (figuur 19).

Een draadgang onder de positie van het secundaire deel van het breukoppervlak was een secundaire scheurinitiatie zichtbaar met een lengte van ~ 0.84 mm. De scheur was eveneens geïnitieerd vanuit het dal van de draad en was zeer recht en had een transkristallijn verloop zonder deformatie langs de scheurflanken. Dit is kenmerkend voor een mechanisme van vermoeiing (figuur 20). De zinklaag op het boutmateriaal had een dikte van ~ 45 μm en toonde een dendritische structuur en ijzerzink overgangslagen kenmerkend voor thermisch verzinken. De zinklaag op de moer had een gelijke structuur en was over het algemeen iets dikker. Ter plaatse van de overlappende draaddelen met de bout was de zinklaag echter grotendeels verdwenen. Het oppervlak van de draad van de moer was hier relatief ruw en gedeformeerd (figuur 21).

3.4 Vickers hardheidsmetingen

Vickers hardheidsmetingen zijn uitgevoerd op de geprepareerde doorsnede in de kern van de bout en de kern van de moer. De hardheidsmetingen zijn uitgevoerd met een belasting van 98.1 N (HV10). De resultaten van de hardheidsmetingen zijn weergegeven in tabel 1.

Tabel 1. Resultaten van Vickers HV10 hardheidsmetingen.

doorsnede	positie	resultaten Vickers hardheidsmetingen	gemiddeld	eisen
bout C	kern	322 - 325 - 325	324	320 - 380*
moer C	kern	317 - 317 - 319	318	295 - 353**

*) eisen voor boutkwaliteit 10.9 volgens ISO 898-1

**) eisen voor moerkwaliteit 10 volgens ISO 898-2

De hardheden van de bout en moer voldoen aan de gestelde eisen.

4 Concluderende discussie

Het boutmateriaal toonde een gebruikelijke microstructuur en hardheid voor boutkwaliteit 10.9 volgens ISO 898-1. Hetzelfde geldt voor de moeren, maar dan volgens ISO 898-2.

De bouten en moeren toonden geen significante deformatie, er zijn geen aanwijzingen gevonden dat de boutverbindingen tijdens montage of gebruik overbelast zouden zijn geweest. Alle bouten zijn gefaald als gevolg van langzame scheurvorming tijdens bedrijf, onder relatief lage spanningen, waarbij geen significante deformatie is opgetreden.

De vastgestelde breukkenmerken (geen significante deformatie, glad breukvlak met beach marks en striaties) duiden in alle gevallen op vermoeiing als faalmechanisme. De vermoeiing lijkt te zijn opgetreden onder relatief lage spanningsamplitudes, waarbij meer dan 20.000 belastingswisselingen (type high cycle fatigue, HCF) tot breuk zijn opgetreden. De meeste bouten toonden bovendien meervoudige vermoeiingsinitiaties in verschillende vlakken of langs een groot deel van de omtrek van de bout. Vermoeiing kan optreden als aan de volgende voorwaarden worden voldaan:

- Er moet sprake zijn van wisselende trekspanningen, tenminste op lokaal niveau. In dit geval waren deze wisselende belasting het gevolg van het draaien van de wieken.
- Deze spanningen moeten boven een bepaalde (materiaalafhankelijke) drempelwaarde uitkomen om tot vermoeiingsscheurinitiatie en scheurgroei te kunnen leiden.

Vermoeiing initieert aan het oppervlak en soms onder het oppervlak ter plaatse van spanningsconcentraties. Spanningsconcentraties kunnen optreden als gevolg van geometrische overgangen, kervende werking van oppervlaktebewerkingen (snij- of slijpgroeven), oppervlaktedefecten (krassen, putten, deuken e.d.) en materiaaldefecten (insluitels, scheurtjes) of grote lokale verschillen in materiaaleigenschappen (hardheidsverschillen, structuurverschillen). In de onderzochte bouten is scheurinitiatie in alle gevallen opgetreden in het dal van de draad in of nabij de eerste dragende draadgang bij de moer en in enkele gevallen bij de overgang schacht naar de draad.

Over het algemeen vindt vermoeiingsinitiatie in bouten op één (dominante) positie plaats in het dal van de draad. Vaak is dat, als gevolg van spanningsconcentratie, de eerste draadgang onder de schacht of de eerste draadgang van de bout in de moer.

Onder sterk wisselende belastingscondities (trek, buiging afschuiving), eventueel verband houdende met herzetting van de flensverbinding, kan het dynamisch spanningsniveau in een bout achtereenvolgens op meerdere posities kritisch genoeg zijn voor vermoeiingsinitiatie. De kleine restbreuken duiden op een laag statisch spanningsniveau.

Als gevolg van het verlies in stijfheid van de gescheurde boutverbindingen (verlies van voorspanning) worden de (wisselende) belastingen door de overige intacte bouten van de flensverbinding gedragen, zodat ook deze onder het hogere spanningsniveau zullen gaan scheuren. Hierdoor ontstaat een cascade van scheurende en uiteindelijk ook brekende bouten, waarbij de laatst dragende bouten plotseling kunnen breken onder overbelasting.

Verder kan opgemerkt worden dat de voorspanning op de bouten in ieder geval niet te hoog is geweest (geen significante deformatie van de schroefdraad). Hoe hoog de voorspanning precies is geweest is onbekend. In het algemeen, in geval van een stijve constructie, is hoog voorspannen van de bouten van een op vermoeiing belaste constructie gewenst. De bouten worden daarbij tot 70 tot 90% van de rekgrens aangespannen. Het koppel dat daarbij hoort is afhankelijk van de wrijvingscoëfficiënt (o.a. beïnvloed door de wijze van smering) van de schroefdraad.

De nader onderzochte bout C en enkele andere bouten toonden aan het buitenoppervlak relatief veel witte zinkroest, zeker op de schroefdraad, de kop van de moer en onder de kop van de bout. Ter plaatse van de primaire initiatie waren ook dikke afzettingen van zinkroest. Dit duidt op corrosieve condities en kan op termijn leiden tot waterstofverbrossing van de bouten als gevolg van de opgetreden corrosie.

5 Conclusies

Alle onderzochte bouten zijn gefaald als gevolg van vermoeiing.

De meeste bouten toonden meervoudige vermoeiingsinitiatie en/of initiatie langs een relatief groot deel van de omtrek van de bout. Dit duidt op sterk wisselende belastingscondities.

De nader onderzochte bout C toonde een gebruikelijke microstructuur en hardheid.

Alle specifieke kenmerken van het (de) bovengenoemde object(en) zijn, voor zover toegankelijk en relevant, geverifieerd door Element Materials Technology Rotterdam b.v. (Element). Overige informatie is aangeleverd door de opdrachtgever. Deze informatie is voor zover mogelijk geverifieerd en verder ongewijzigd in dit rapport overgenomen. Element draagt geen verantwoordelijkheid voor de correctheid van deze aangeboden informatie. Iedere vorm van "witnessing" en conclusies door derden wordt niet door de RVA accreditatie L063 gedekt en is geen onderdeel van de Element rapportage. Wij verklaren dat de onderzoeksresultaten correct zijn weergegeven en dat het (de) bovengenoemd(e) onderzoeksobject(en) is (zijn) onderzocht conform de eisen van de opdrachtgever en/of de bovengenoemde procedure(s) en/of code(s)/specificatie(s). In voorkomende gevallen wordt door Element onderzoek uitbesteed, onder vermelding van het accreditatienummer van de uitvoerende partij. Interpretaties, meningen, conclusies en adviezen zijn deels gebaseerd op de onderzoeksresultaten en deels op de door de opdrachtgever aangeboden informatie. Rechtsgeldigheid hebben slechts de rapporten die voorzien zijn van een geautoriseerde ondertekening. Als, bij reproductie, slechts delen van dit rapport worden gekopieerd, draagt Element geen enkele verantwoording voor inhoud, strekking en conclusies in dat kopie.

De onderzoeksobjecten zullen 2 maanden bewaard blijven, ingaande op de rapportdatum zoals vermeld op het titelblad. Indien wij voor het verstrijken van deze periode van de opdrachtgever geen andersluidende instructies hebben ontvangen, nemen wij aan dat opdrachtgever er geen bezwaar tegen heeft dat de betreffende objecten daarna op een door Element te bepalen moment zullen worden vernietigd.

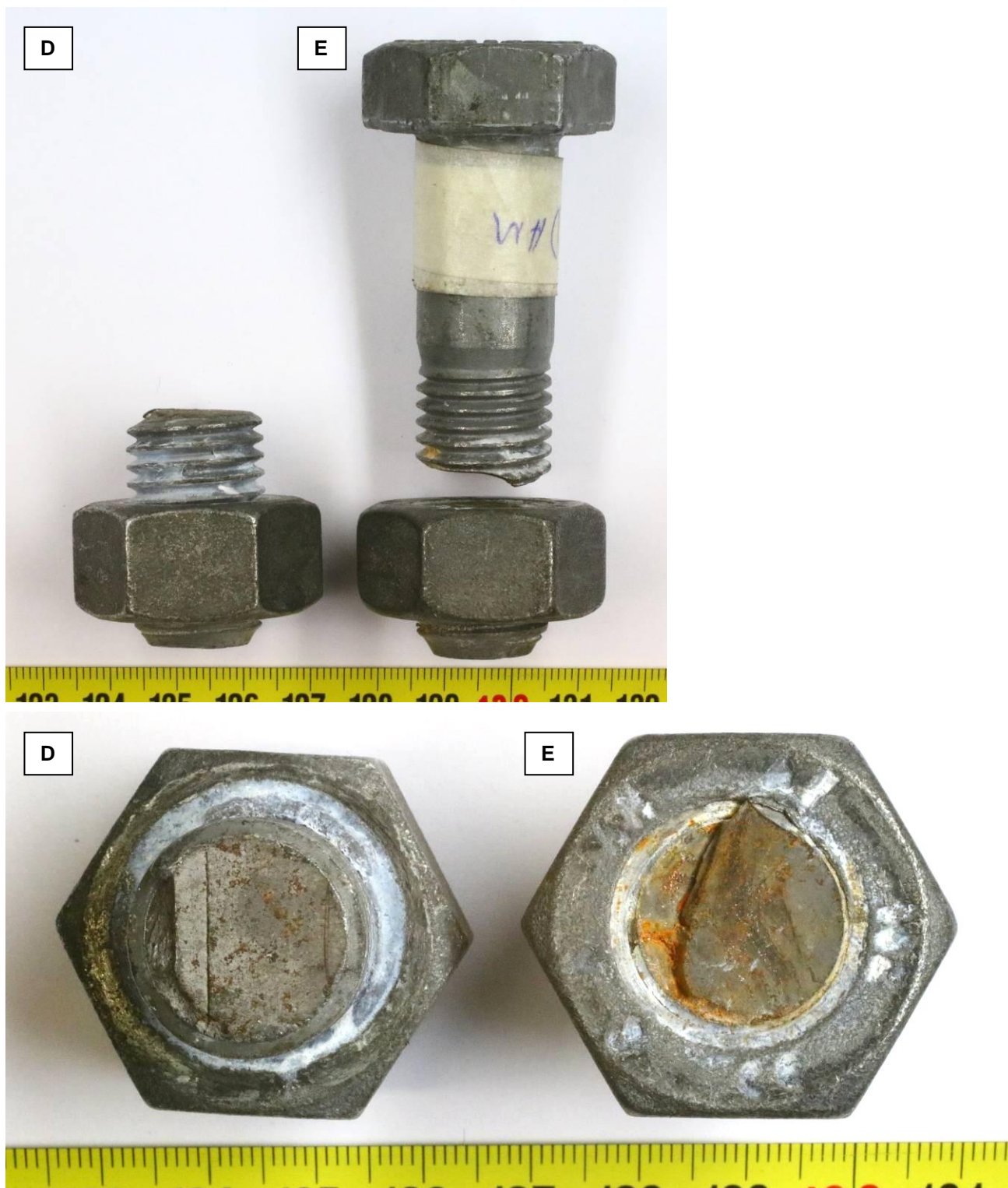
Breda, 10 mei 2017,



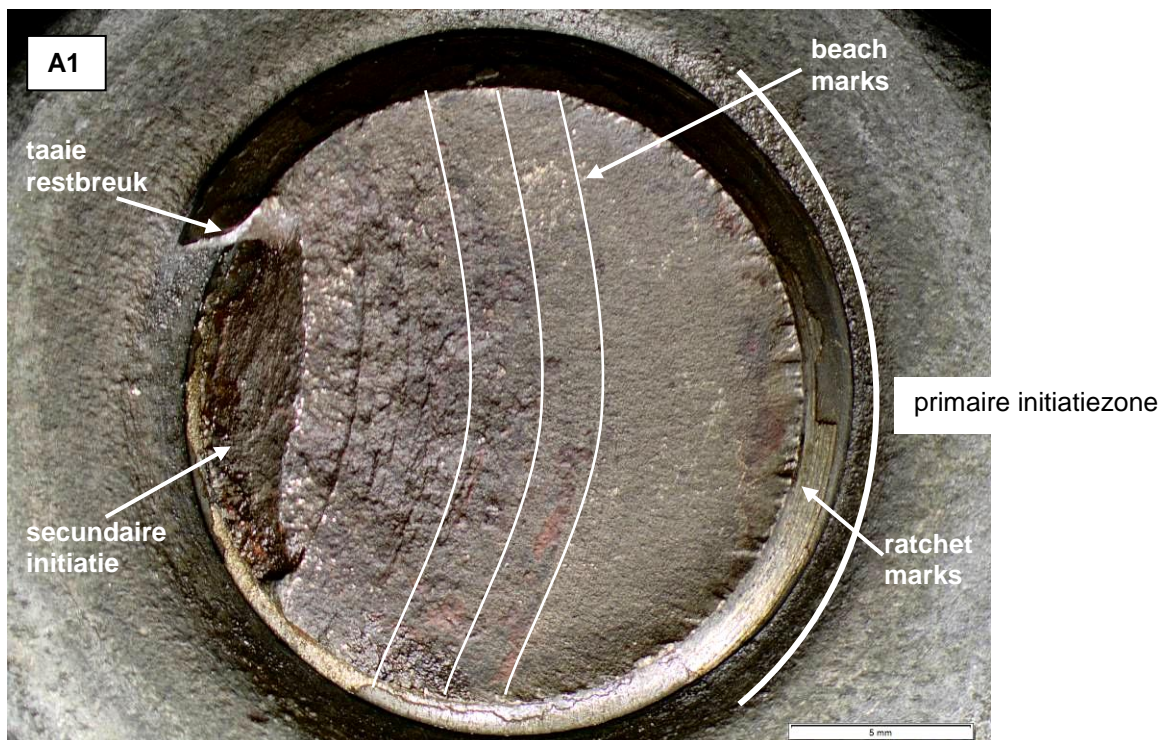
Figuur 1. Van batch A zijn 3 gebroken bouten aangeleverd en één vrijwel doorgescheurde bout. De bouten zijn gefaald op de overgang van de bout naar de moer. In sommige gevallen leek de bout iets verder van de moer gefaald, maar is de moer meest waarschijnlijk na falen en uithalen nog iets verdraaid. De gescheurde bout toonde een openstaande scheur over vrijwel de gehele doorsnede op de overgang van de schacht naar de draad. De scheur liep door het dal van de draad vrijwel haaks op de langsrichting van de bout. De scheur was zeer recht en toonde geen significante deformatie. De breukoppervlakken stonden eveneens haaks op de lengte van de bout en waren grotendeels zeer vlak. De breukoppervlakken toonden meest (rood)bruin corrosieproduct.



Figuur 2. Van batch B zijn twee gebroken bouten aangeleverd en van batch C één gebroken bout. Bout B1 en C1 zijn gebroken op de eerste dragende draadgang bij de moer. Bout B1 toonde bovendien nog een secundaire scheur op de overgang van de schacht naar de draad. Bout B2 is gefaald bij de overgang van de schacht naar de draad. De breukoppervlakken stonden haaks op de lengte van de bout en waren grotendeels zeer vlak. De breukoppervlakken van de bouten van batch B waren grotendeels bedekt met (rood)bruin corrosieproduct. Het breukoppervlak van bout C toonde veel minder corrosieproduct.



Figuur 3. Van batch D is enkel het afgebroken bouteinde met de moer aangeleverd. De bout is enkele draadgangen bouten de overgang met de moer gefaald. In verband met de grotere lengte van de bouten van batch D is het niet duidelijk hoe de positie van de breuk zich verhoudt tot de positie in de bout en in relatie tot het constructiedetail. De bout van batch E is gefaald op de eerste dragende draadgang bij de moer. Beide bouten toonden relatief weinig corrosie.



Figuur 4. Bout A1 toonde een grotendeels vlak breukvlak met een vaag patroon van concentrische beach marks. Beach marks zijn macroscheurgroeirustlijnen en zijn kenmerkend voor een mechanisme van stapsgewijze scheurgroei. Initiatie heeft plaatsgevonden langs een groot deel van de omtrek van de bout. In deze zone waren veel ratchet marks aanwezig. Ratchet marks zijn kleine richeltjes die de grenzen markeren tussen verschillende vlakken van scheurgroei en zijn daarmee kenmerkend voor scheurinitiatie op verschillende posities.



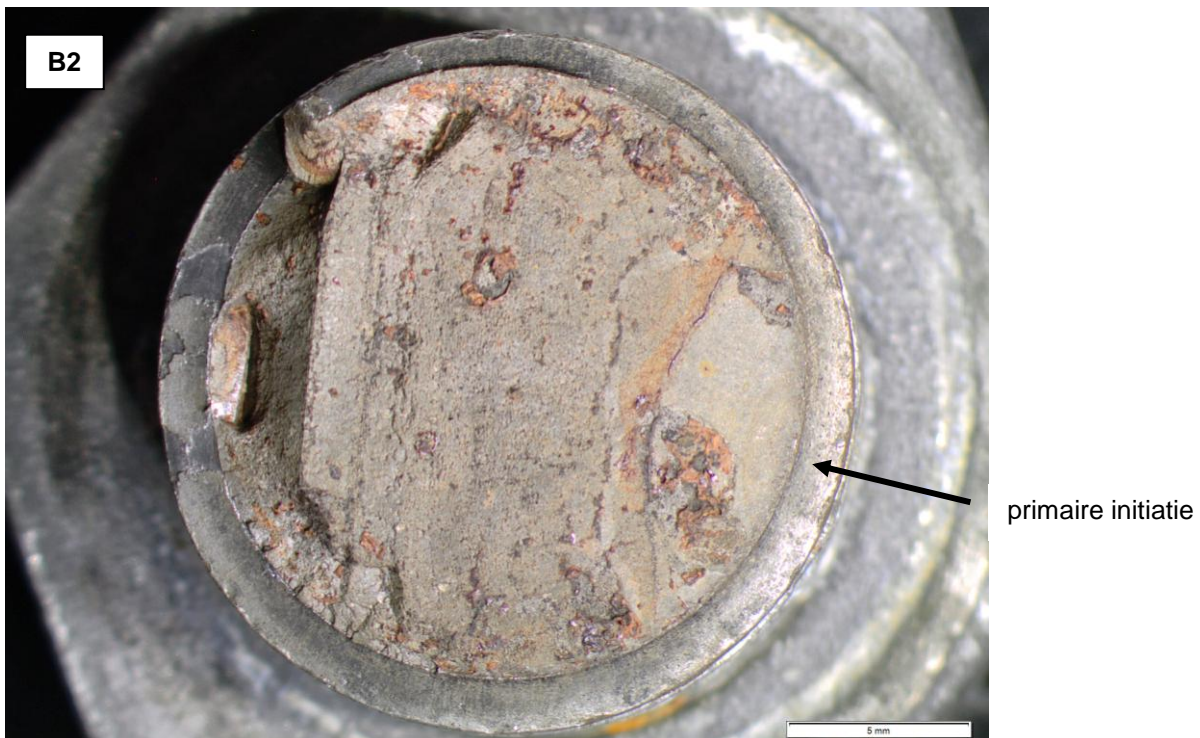
Figuur 5. Bout A2 toonde soortgelijke breukkenmerken als bout A1. Het breukvlak was vlak en toonde een vaag patroon van beach marks. Primaire initiatie heeft plaatsgevonden langs een groot deel van de omtrek van de bout. In deze zone waren veel ratchet marks zichtbaar. Tegenover de primaire initiatie was een kleinere secundaire initiatiezone zichtbaar met aan de rand een kleine taai restbreuk.



Figuur 6. Bout A3 toonde soortgelijke breukenmerken als bout A1 en A2, maar met een kleinere initiatiezone. Het breukvlak was vlak en toonde een patroon van vrijwel rechte beach marks. Primaire initiatie heeft plaatsgevonden langs een kleiner deel van de omtrek van de bout. In deze zone waren meerdere ratchet marks zichtbaar. Tegenover de primaire initiatie was een kleinere secundaire initiatiezone zichtbaar met aan de rand een kleine taaie restbreuk die aan twee zijden begrensd was door een vermoeingsbreuk.



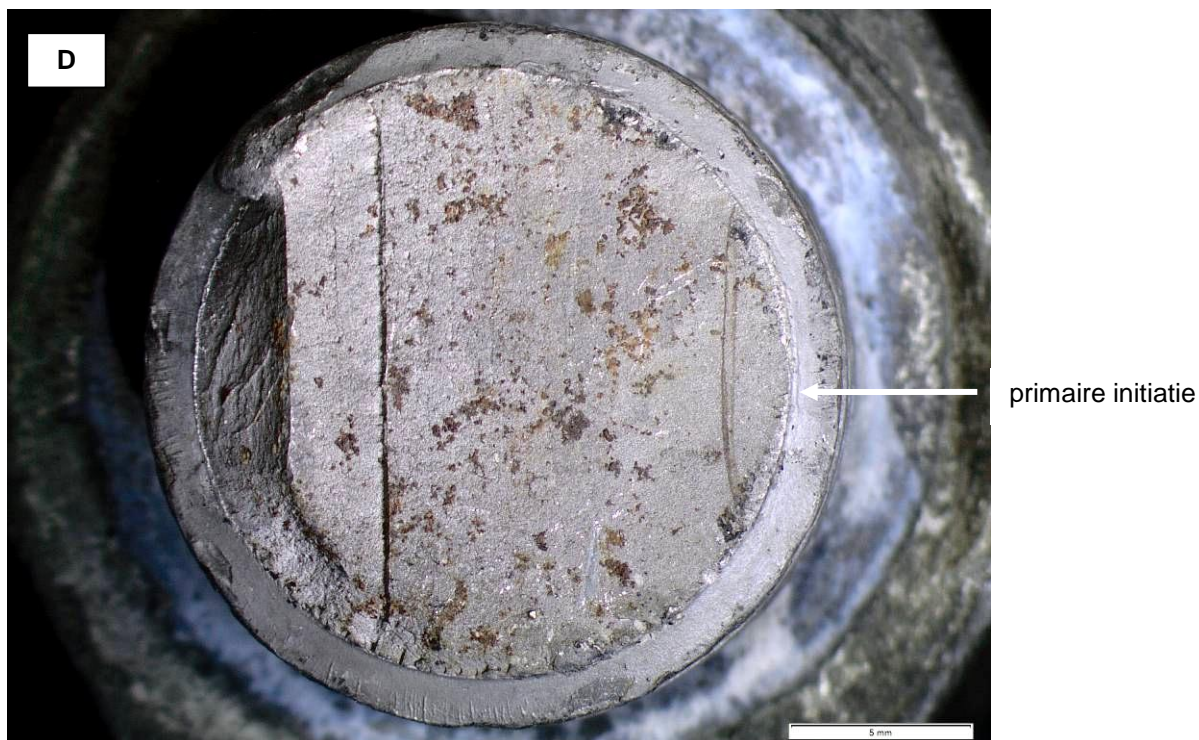
Figuur 7. Bout B1 toonde een breukvlak in twee vlakken. Primaire initiatie is opgetreden langs een groot deel van de omtrek van de bout. Een relatief grote secundaire initiatie had plaatsgevonden in een vlak parallel aan het primaire breukvlak, waarbij de scheuren elkaar deels overlaptten. Beide initiaties vonden plaats vanuit het dal van de draad bij de eerste dragende draadgang van de moer.



Figuur 8. Bout B2 is gebroken op de overgang van de schacht naar de draad. Initiatie heeft plaatsgevonden op één positie vanuit het dal van de draad. Het breukvlak toont een patroon van beach marks en een relatief kleine, taai restbreuk.



Figuur 9. Bout C toonde in de originele, niet ontroeste, conditie een relatief gaaf en zeer vlak breukvlak met een patroon van beach marks. Initiatie heeft tegelijkertijd plaatsgevonden langs een groot deel van de omtrek van de bout op de positie van de eerste dragende draadgang bij de moer. Tegenover de primaire initiatiezone was een secundaire vermoeiingsinitiatie zichtbaar met aan de rand een kleine taai restbreuk.



Figuur 10. Het breukoppervlak van bout D was zeer vlak. Het toonde een enkelvoudige initiatie, een regelmatig patroon van beach marks en een relatief kleine taaiere restbreuk.



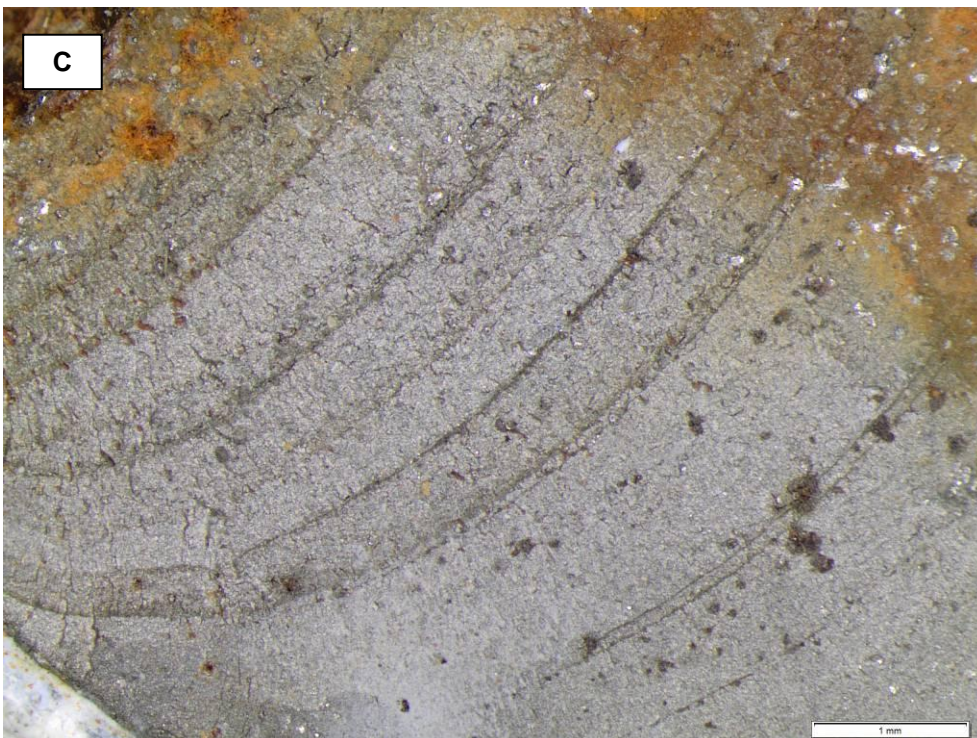
Figuur 11. Het breukvlak van bout E toonde een vermoeiingsbreuk met drie afzonderlijke initiatievlakken. Primaire initiatie vond plaats langs een relatief groot deel van de omtrek van de bout. De secundaire initiaties liggen in andere, deels parallelle, vlakken.



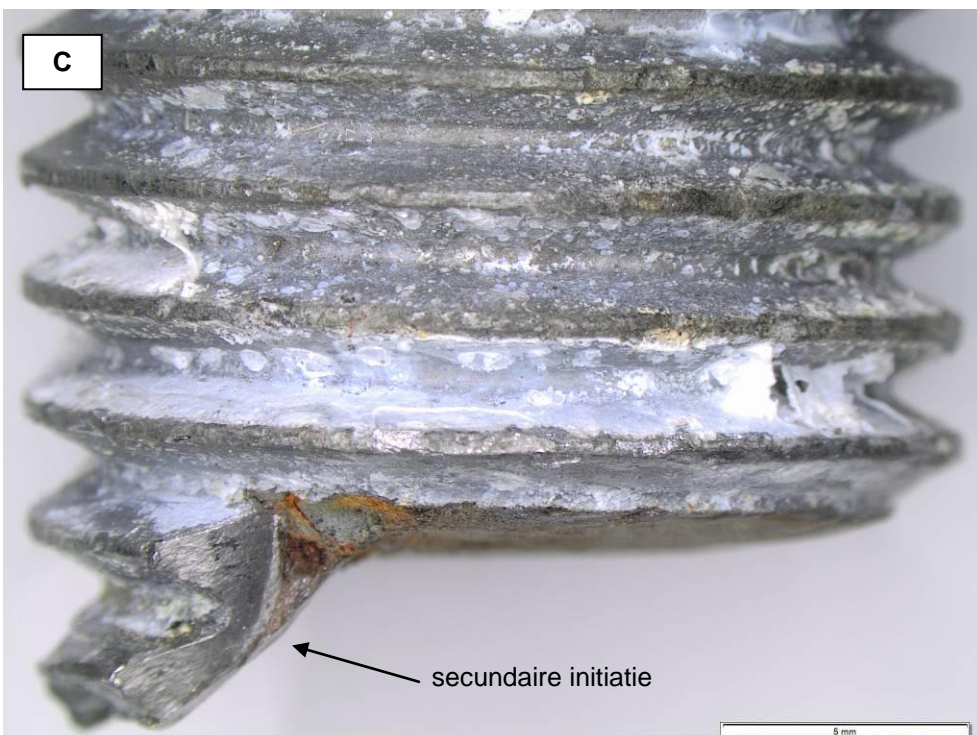
Figuur 12. Het breukvlak toonde relatief weinig corrosie, maar op de rand van de moer was een dikke afzetting van witte zinkroest zichtbaar, met name bij de primaire initiatiezone. Dit duidt op relatief corrosieve condities ter plaatse van de bouten. Op het breukvlak zelf was in de initiatiezone een smalle, iets golvende en relatief donkere band zichtbaar.



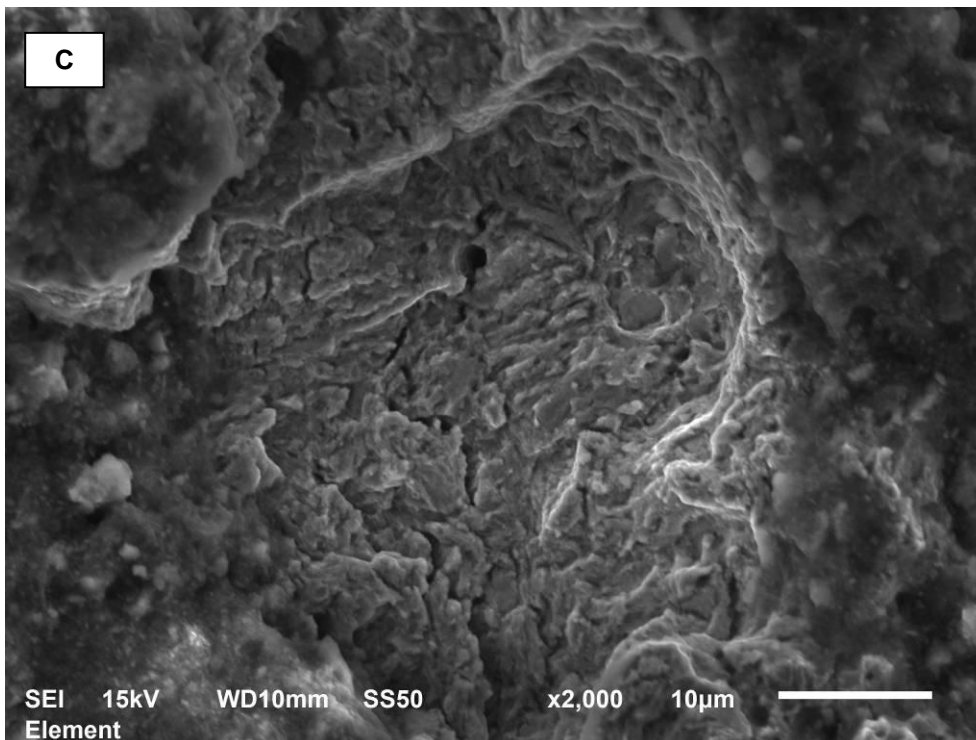
Figuur 13. De structuur van het breukvlak in deze donkere band was gelijk aan de structuur van het aangrenzende breukoppervlak. In de initiatiezone was een groot aantal ratchet marks zichtbaar. Dit geeft aan dat de dynamische spanningen over een groot deel van de omtrek van de bout kritisch genoeg waren om vrijwel gelijktijdig tot vermoeiingsinitiatie te leiden.



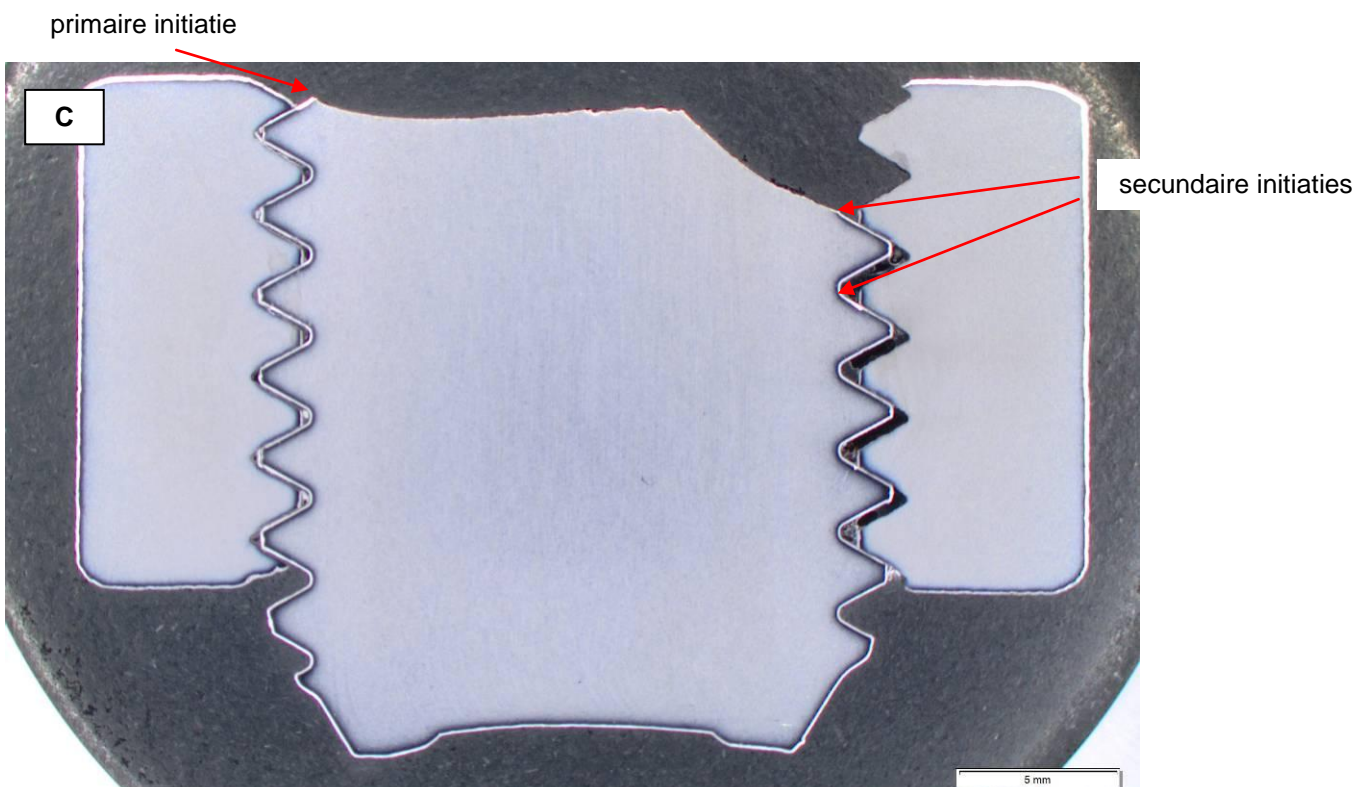
Figuur 14. Verder weg van de initiatiezone waren de beach marks zeer duidelijk en werd het breukoppervlak geleidelijk iets grover als gevolg van het toenemende spanningsniveau in de kleiner geworden resterende dragende doorsnede.



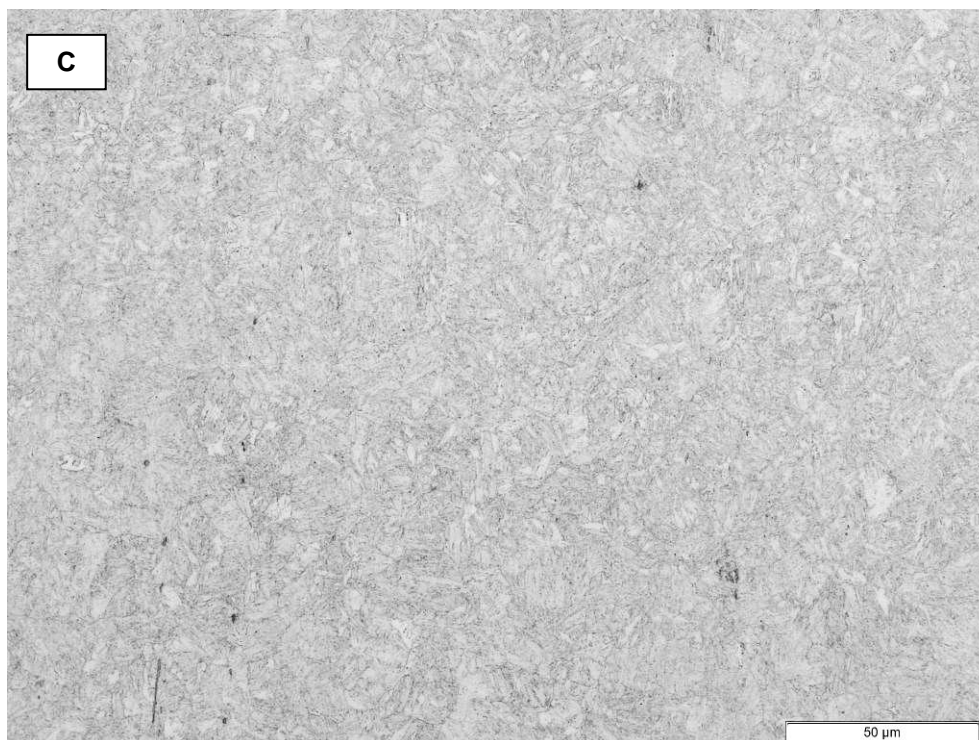
Figuur 15. Het complementaire boutdeel van bout C toonde in het zijaanzicht relatief veel witte zinkroest in de draad. Op de positie van secundaire initiatie was in het uitstekende deel slechts geringe deformatie zichtbaar. Dit suggereert dat dit deel van de breuk grotendeels onder invloed van vermoeiing tot stand is gekomen.



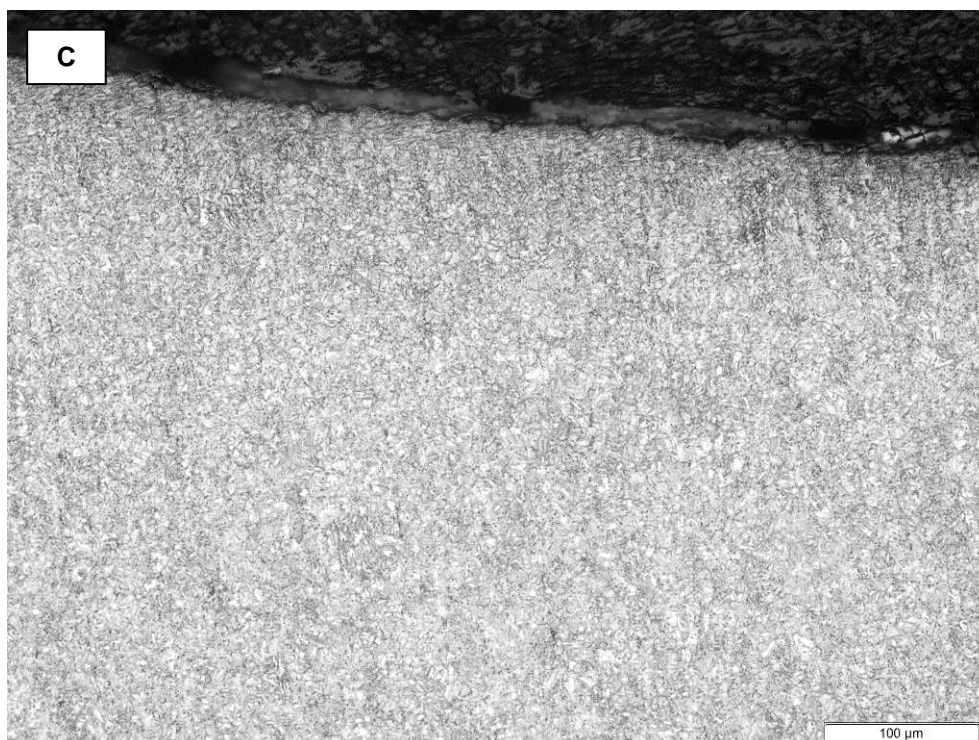
Figuur 16. Het breukoppervlak vanaf de initiatie was zeer vlak en was grotendeels bedekt met resterende corrosieproducten. Het breukvlak toonde op macroschaal geen significante deformatie en op microschaal geen restanten van (brosse) splijt of (taaie) dimples, kenmerken van brosse of taaie overbelasting. Lokaal waren restanten te zien van striaties.



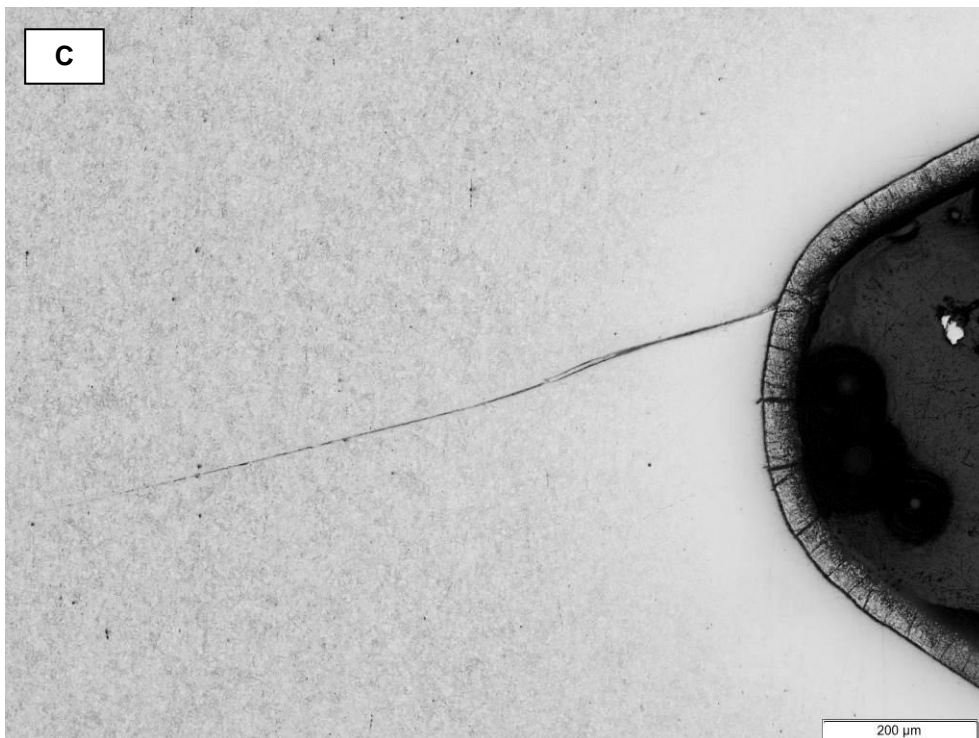
Figuur 17. Bij lage vergroting toonde de doorsnede dat de primaire initiatie in de bout had plaatsgevonden in het dal van de eerste dragende draadgang bij de moer. De primaire breuk was loodrecht georiënteerd op de lengte van de bout. Op de positie tegenover de primaire initiatie toonde het breukvlak een secundaire initiatie vanuit het dal van de tweede draadgang met de moer.
Etsmiddel: 3% Nital



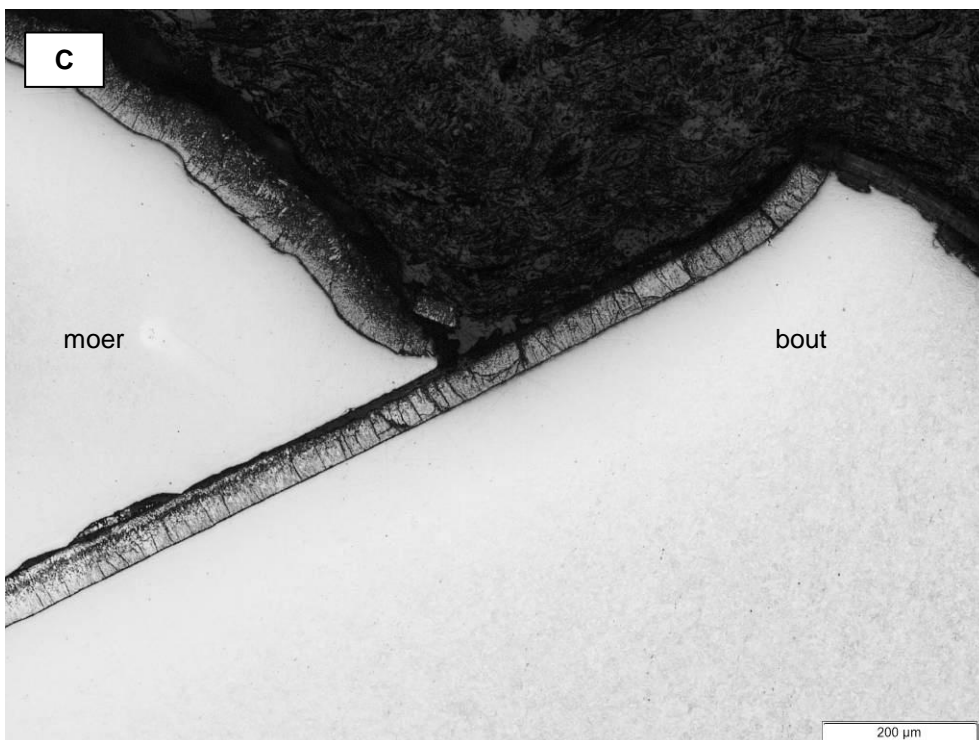
Figuur 18. In de ongeëtste gepolijste conditie toonde het boutmateriaal een relatief schone matrix met lage hoeveelheden aan fijne mangaansulfidestringers georiënteerd in de walsrichting (langsrichting) van de bout. Op de positie van de draad waren de stringers mee georiënteerd met de draad, wat duidt op een gerolde draad. Na etsen met 3% Nital toonde het boutmateriaal een fijne en homogene veredelingsstructuur.
Etsmiddel: 3% Nital



Figuur 19. Het primaire breukvlak was zeer vlak en toont geen significante deformatie. Het secundaire breukvlak was vanaf de initiatie ook relatief vlak, maar toonde verder weg van het boutoppervlak geleidelijk iets toenemende oppervlakkige deformatie. Dit is meest waarschijnlijk het gevolg van een toenemend spanningsniveau in de kleine resterende dragende doorsnede.
Etsmiddel: 3% Nital



Figuur 20. Een draadgang onder de positie van het secundaire deel van het breukoppervlak was een secundaire scheurinitiatie zichtbaar met een lengte van ~ 0.84 mm. De scheur was eveneens geïnitieerd vanuit het dal van de draad en was zeer recht en had een transkristallijn verloop zonder deformatie langs de scheurflanken. Dit is kenmerkend voor een mechanisme van vermoeiing.
Etsmiddel: 3% Nital



Figuur 21. De zinklaag op het boutmateriaal had een dikte van ~ 45 μm en toonde een dendritische structuur en ijzerzink overgangslagen kenmerkend voor thermisch verzinken. De zinklaag op de moer had een gelijke structuur en was over het algemeen iets dikker. Ter plaatse van de overlappende draaddelen met de bout was de zinklaag echter grotendeels verdwenen. Het oppervlak van de draad van de moer was hier relatief ruw en gedeformeerd.
Etsmiddel: 3% Nital