

TEKNISK RAPPORT, SAKSNR. 2016/45

# Skadeundersøkelse av instrumentfitting, Kårstø

Petroleumstilsynet

Rapportnr.: 2016-3074, Rev. 0

Dokumentnr.: 110018II-2

Dato: 2016-05-27




Prosjektnavn: Teknisk rapport, saksnr. 2016/45 DNV GL AS Oil & Gas  
Rapporttittel: Skadeundersøkelse av instrumentfitting, Kårstø Materials Technology  
Oppdragsgiver: Petroleumstilsynet, Postboks 8163 P.O.Box 300  
0034 Oslo 1322 Høvik  
Norway Norway  
Kontaktperson: Ole Jacob Næss Tel: +47 67 57 99 00  
Dato: 2016-05-27 NO 945 748 931 MVA  
Prosjektnr.: PP156935  
Org. enhet: Materials Technology  
Rapportnr.: 2016-3074, Rev. 0  
Dokumentnr.: 110018II-2  
Levering av denne rapporten er underlagt bestemmelsene i relevant(e) kontrakt(er):

Utført av:

  
Mario Søfferud  
Senior Engineer

Verifisert av:

  
Geir Magne Bakken  
Principal Engineer

Godkjent av:

  
Gustav Heiberg  
Business Development Leader, Materials,  
Høvik

  
Lars Even Torbergsen  
Senior Principal Specialist

Beskyttet etter lov om opphavsrett til åndsverk m.v. (åndsverkloven) © DNV GL 2016. Alle rettigheter forbeholdes DNV GL. Med mindre annet er skriftlig avtalt, gjelder følgende: (i) Det er ikke tillatt å kopiere, gjengi eller videreformidle hele eller deler av dokumentet på noen måte, hverken digitalt, elektronisk eller på annet vis; (ii) Innholdet av dokumentet er fortrolig og skal holdes konfidensielt av kunden, (iii) Dokumentet er ikke ment som en garanti overfor tredjeparter, og disse kan ikke bygge en rett basert på dokumentets innhold; og (iv) DNV GL påtar seg ingen aktsomhetsplikt overfor tredjeparter. Det er ikke tillatt å referere fra dokumentet på en slik måte at det kan føre til feiltolkning. DNV GL og Horizon Graphic er varemerker som eies av DNV GL AS.

DNV GL distribusjon:

- Fri distribusjon (internt og eksternt)  
 Fri distribusjon innen DNV GL  
 Fri distribusjon innen det DNV GL-selskap som er kontraktspart  
 Ingen distribusjon (konfidensiell)

Nøkkelord:

Manometer, instrumentfitting, tubing,  
ventilblokk, gasslekkasje, utmatting, VIV

Rev.nr.	Dato	Årsak for utgivelser	Utført av	Verifisert av	Godkjent av
0	2016-05-27	Første utgave	MARSO/LETOR	GMB	GHEI

## Innholdsfortegnelse

1	SAMMENDRAG.....	1
2	EXECUTIVE SUMMARY .....	2
3	INTRODUKSJON .....	3
3.1	Hensikt med arbeidet	3
3.2	Arbeidsomfang	3
3.3	Mottatt informasjon	4
4	RESULTATER - SKADEANALYSE .....	5
4.1	Visuell undersøkelse og målinger	5
4.2	Fraktografisk undersøkelse (SEM – EDS)	9
4.3	Metallografisk undersøkelse og hardhetsmålinger	10
4.4	Ruhetsmålinger	11
5	TRYKKTESTING .....	12
6	STRØMNING OG VIBRASJONER .....	13
6.1	Vindinduserte laster	13
6.2	Strømningsinduserte laster	16
6.3	Modellering av egenfrekvenser	16
6.4	Lekkasjerater	20
7	KONKLUDERENDE OPPSUMMERING.....	21
8	FIGURER .....	22
9	REFERANSER .....	43

[Appendix A](#)    [Modellering av egenfrekvenser. Animasjoner \(video\)](#)

## 1 SAMMENDRAG

DNV GL AS, Avdeling for materialteknologi, har på vegne av Petroleurstilsynet utført en teknisk skadeundersøkelse av en instrumentkobling som forårsaket gasslekkasjen på Kårstø 7. januar 2016.

Undersøkelsen har dekket ventilblokken, instrumentkoblingen med brudd og manometeret.

Instrumentfittingen, som var en del av en såkalt snittringskobling («male adapter» og «twin ferrule»), har fått konstatert et to-sidig utmattingsbrudd. Dette har oppstått på male adapter i hulkilen mellom rør og nøkkelgrep. Dette området representerer det minste tverrsnittet i den mottatte sammenstillingen av deler, og er dermed et svakt punkt i sammenstillingen. Hulkilen er dernest relativt skarp, og utgjør derfor en betydelig spenningskonsentrasjon. Utmattingsbruddet har altså oppstått i det mest belastede området på sammenstillingen som har vært montert uten rørstøtter.

Det er utført FE-modellering og beregninger av den aktuelle 2" bypass-loopen, med analyse av egenfrekvenser til systemet. Videre er det gjort beregninger av vindlaster og virvelavløsningsfrekvenser. Resultatene viser at egenfrekvensene til systemet sammenfaller med mulige virvelavløsningsfrekvenser for vind mellom 5 og 25 m/s.

Sannsynlig årsak til bruddet som medførte gasslekkasjen anses å være bøyeutmattning som følge av at systemets egenfrekvenser sammenfaller med virvelavløsningsfrekvenser i normale vindhastigheter. Indirekte årsak er manglende avstiving av sammenstillingen og bruk av en tynnvegget instrumentkobling som svakeste lastbærende element.

Grunnet manglende historisk informasjon på hvordan og hvor mye 2" bypass-systemet har vært benyttet til trykkutjevning siden installasjon har det ikke vært mulig å vurdere hvorvidt strømningsinduserte laster kan ha vært en medvirkende årsak til utmattingskaden på male adapter.

Ventilblokken hadde en utvendig sprekk-lignende defekt som var mistenkt å være en mulig sekundær lekkasje. Ventilblokken ble separat utsatt for en trykktest i DNV GLs testlaboratorie opp til 135 bar med vann. Det ble ikke funnet tegn til lekkasje. Feilen ble avdekket å være overfladisk og sannsynligvis relatert til fabrikasjon.

## 2 EXECUTIVE SUMMARY

DNV GL As, Section for Materials Technology, has on request of the Petroleum Safety Authority, Norway (Petroleumstilsynet) carried out a failure investigation of an instrument fitting that caused the gas leak at Kårstø processing plant on January 7<sup>th</sup> 2016.

The examinations have covered the valve block, the fractured instrumentation fitting and the manometer.

The instrument fitting was part of a twin ferrule assembly. The male tube adapter has suffered a reverse bending fatigue fracture. This has occurred in the fillet radius between the tube and the grip. This area represents the smallest cross-section of the assembly, and thus the weakest point. In addition the fillet radius is relatively sharp, thus forming a considerable stress concentration. The fatigue crack has in other words occurred in the highest stressed area of the unsupported instrument assembly.

FE modelling and calculations have been performed on the instrument assembly and 2" bypass loop, with analysis of the natural frequencies of the system. Further, calculations of wind loads and vortex induced vibration (VIV) frequencies have been carried out. The results show that the natural frequencies of the system coincide with possible VIV frequencies for wind in the range 5–25 m/s.

The most likely cause of failure is considered to be reversed bending fatigue as a result of coinciding natural frequencies and VIV frequencies at normal wind speeds. Indirect causes are lack of adequate pipe supports of the valve block and the use of a thin walled fitting as the weakest load bearing element.

Due to lack of information regarding how and when the 2" bypass loop has been used for pressure balancing, it has not been possible to evaluate whether or not flow induced vibrations (FIV) may have contributed to the failure.

The valve block had an external crack-like defect that was suspected to be a secondary leak. The valve block was subjected to a pressure test with water up to 135 bar. No signs of leaks were discovered. The defect was found to be superficial and most likely related to fabrication.

## 3 INTRODUKSJON

DNV GL AS, Avdeling for materialteknologi, har på vegne av Petroleumstilsynet utført en materialteknisk skadeundersøkelse av en instrumentkobling som forårsaket gasslekkasjen på Kårstø 7. januar 2016. Det har i tillegg blitt utført en trykktest av den tilhørende ventilblokken i DNV GLs testlaboratorie. Forenklede strømningsberegninger av vind-induserte laster og modellering av egenfrekvenser for sammenstillingen slik den var montert på et 2" bypass-rør har også blitt utført.

### 3.1 Hensikt med arbeidet

Hensikten med arbeidet har vært å bestemme skademekanismen og om mulig avdekke de direkte (tekniske) årsakene til bruddet som forårsaket lekkasjen. Videre skulle det utføres en trykktest av ventilblokken for å avdekke mulig lekkasje fra en sprekkliknende defekt i overflaten.

### 3.2 Arbeidsomfang

Følgende arbeidsomfang ble avtalt:

- Vurdering av mottatt dokumentasjon (rapporter, bilder, tegninger osv)
- Vurderinger av det strømningsmekaniske
  - Vurdering av lekkasjerate
  - Modellering av hele bypass-loop inkludert vekt og lengdeangivelser, plassering av ventiler og ventilblokk/manometer.
  - Uttak av egenfrekvenser til ventilblokk/manometer ved ulike vibrasjonsmoder (inkludert animasjoner)
  - Modellering av effekten av tiltenkt supportering av ventilblokk
  - Vurdering av vindlaster, inkludert både statiske og dynamiske vindlaster
- Vurderinger av utførelse piping/instrument-tubing
  - Vurdering av fagmessig utførelse av rørkoblinger, montering av snittringskobling, bruk av gjengetape, NPTF eller NPT-gjenger (ASME B1.20.1)
- Visuell undersøkelse og fotodokumentasjon
- Målsetting av arealet til åpningen / bruddet i male adapter.
- Diameter og veggtykkelse på male adapter
- Visuell kartlegging av identifikasjon og skader på individuelle komponenter
- Veiling og oppmåling av alle individuelle komponenter
- Vurdering av overflatebeskaffenhet, måling av radier og eventuelt overflateruhet. Eventuelt replika av geometrier og overflater før videre prøvetaking
- Vurdering av tilstand på sammenkobling av komponenter, herunder bruk av gjengetape, evt. monteringsfeil, evt. skader som kan ha oppstått under montering
- Prøveuttak: prøvepreparering av 2 bruddflater (fitting og ventilblokk), inkludert bryte opp en evt. bruddflate i ventilblokk
- Fraktografiske undersøkelser i stereomikroskop (SEM) inkludert bruk av EDS for kjemisk mikroanalyse
- Karakterisering av bruddforløp, bruddmekanisme(r) og initieringsområde
- Kjemisk analyse vha. EDS på enkeltkomponenter
- Metallografisk undersøkelse av 2 prøver (fitting og ventilblokk)
- Vurdering av mikrostruktur og hardhetsmålinger av grunnmaterialet og nær bruddsted
- Forberedelse av trykktest: testoppsett, instrumentering og sikring
- Trykktesting til 140 bar, stegvis eller direkte (etter avtale med PTIL)
- Samlet vurdering av resultater fra skadeundersøkelse og trykktesting
- Sluttrapportering av undersøkelser og tester, internverifikasjon og oppfølging av kvalitet

### 3.3 Mottatt informasjon

Følgende informasjon ble mottatt ved oppstart av arbeidet:

- Statoil granskningsrapport «Gasslekkasje i Statpipe mottaksområde på Kårstø, 7-8 januar 2016» rapportnr. A 2016-1 MMP L2, datert 2016-03-10.
- Statoil presentasjon over arbeid m manometer og i nærheten *15-pi-0040*, datert 2016-02-12.
- Statoil dybdestudie «Gasslekkasje i instrumentkobling på brønn B-25 strømningslinje» synergir. 1264920, datert 2011-12-20
- Epost Kjetil Meyer, oversikt over gasskomposisjon for innløpet i Statpipe 2016-01-07 kl 22:30
- Dokument «Figur med enkelt flytdiagram av Statpipe», P&ID og beskrivelse av hendelsesforløp (udatert).
- Tegning ISO LL-15-PG-0021 rev.C (inkludert 15-PI-0040), målsatt
- Epost fra Statoil Kårstø ved Kjell Stokka, med vektangivelse på 1" ventiler på 5,4 kg.
- Materialsertifikater fra Parker: Heat No HCT E035, -E137, -E168 og -H01
  - HCT E035 gjelder for «male adapter» og er datert 1992-11-13.
- Brev fra Parker Hannifin Manufacturing Ltd. «Parker Statement for Statoil Inquiry from Karsto Processing Plant», datert 2016-02-16
- Tegning fra Parker av male adapter: M12MA1/2N DETAIL, datert 2016-05-20.
  - Følgende tillegg er mottatt per epost fra Parker v/Norvald Olsen:
  - Innerdiameter skal være 9,1 mm
  - Overflateruhet skal være 1,6 µm (63 µ-in)
  - Minimum hulradius  $r = 0,4$  mm (maksimum angitt på tegning  $r = 0,8$  mm)



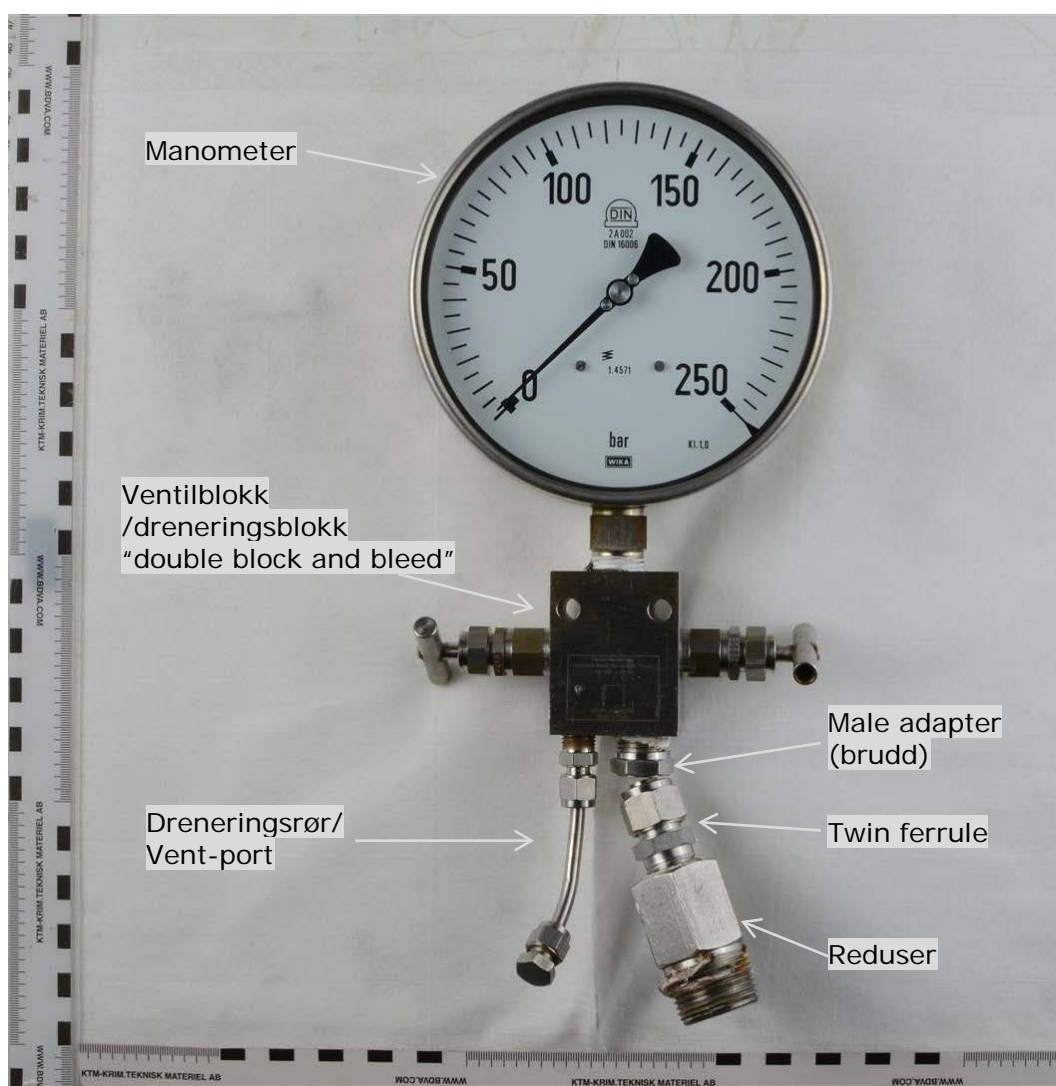
## 4 RESULTATER - SKADEANALYSE

### 4.1 Visuell undersøkelse og målinger

En grundig visuell undersøkelse av de mottatte komponentene er utført, inkludert målinger av dimensjoner og vekt. Den visuelle undersøkelsen er oppsummert i Tabell 1, samt noen avstander som er relevante for monteringen. Tabell 2 angir merking/sporbarhetsnummer, målte dimensjoner og vekt.

Sammenstillingen og navngitte komponenter er vist i Illustrasjon 1. «Male adapter» og «twin ferrule» inngår i det som på norsk kalles en snittringskobling og som består av totalt 5 deler.

I følge mottatt informasjon /1/ stammer instrumenteringen fra 1993. Manometeret har blitt byttet i 2007, angivelig til et med større diameter. Kun manometeret ble byttet, resten av delene ble gjenbrukt. Det er informasjon om at manometerskiven tidligere stod vendt mot sør, og at den senere ble vendt mot vest, men det er ubekreftet om dette har blitt utført og i tilfelle når.



Illustrasjon 1. Sammenstilt instrumentering som mottatt



**Tabell 1. Visuell undersøkelse.**

Komponent/ Område	Kommentar	Vist i
Alle deler	Generelt: noe svak rust/misfarging på overflater (mest på ventilblokken).	Figur 1- Figur 3
Manometer	Ingen tegn til signifikante skader på glass. Noen overfladiske riper på huset. Ingen bulker eller slagskader. Noe irr eller grønske rundt hann-kobling. Hvit gjengetape dekker gjengene helt opp. Noen verktøymerker på nøkkelgrepets kanter. Avstand fra øvre kant av nøkkelgrep til ventilblokk: 21,2 mm.	Figur 1- Figur 5
Ventilblokk ("double block and bleed valve")	Det er et avvik på ca. 7-8° mellom blokk og manometer (moturs, sett ovenfra). Fremside (med diagram): noen spredte overfladiske riper, disse er ikke følbare. Et verktøymerke nedre venstre hjørne (mot vent-port) ca 4x5 mm med riller. To mindre merker mot senter. Sidekanter: ingen tydelige verktøymerker. Bakside (med merking): Et verktøymerke på nedre halvdel over merking, ca 5x7 mm. Noen flere langsgående riper. Svakt, sirkulært merke rundt venstre bolthull. Øvre halvdel av bakside: sprekkliknende horisontal defekt i overflaten, ca 5 mm fra øvre kant. Synlig lengde 14,5 mm. Sentrert over bredden, men lignende defekt kan sees ut mot den høyre sidekanten. Begge ventilene kan opereres, men block-ventilen går tregt og har noe ujevn motstand.	Figur 6– Figur 8
Vent-port/ drenerings-rør	Tubing har to merker rundt omkretsen på øvre halvdel, ca. 10 mm avstand. Røret har et knekkmerke i bøyen litt under midten. Koblingene har noen få verktøymerker på nøkkelgrep. Gjengetape er delvis synlig helt inntil blokken. Synlig lengde på kobling mot ventilblokk er 28,7 mm.	Figur 9
Male adapter	Male adapter har et brudd som har initiert i hulkilen mellom tubing og nøkkelgrep. Initieringen er tosidig fra ytre overflate med to diametralt motsatte restbrudd. Et mindre restbrudd er fullstendig, mens manometeret fortsatt henger i det største restbruddet. Hvit gjengetape dekker gjengene delvis utenfor blokken. Ett tydelig sett med diametralt motsatte verktøymerker observeres på nøkkelgrep. Det er ingen synlige skader eller merker på tubing. Vinkelen mellom blokk og restbrudd er ca 50° medurs sett ovenfra. Figur 13 viser avstøp av åpningsvinkel på bruddet, dette er målt til ca 23° vha stereomikroskop. Synlig lengde av tubing (fra bruddflate til twin ferrule) er ca. 1,9 mm. Avstand fra nedre kant av nøkkelgrep ("flens") til blokk: 15,8 mm. Utv. diameter: 11,98 mm Inv. diameter 9,08 mm. Veggtykkelse: 1,43 mm Høyde gjengeparti: 26,00 mm. Tykkelse i overgang: ca 6,3 mm Høyde tubing med brudd: ca. 23,11 mm	Figur 10- Figur 12, Figur 13
Twin ferrule	Selve låsemekanismen på snittringskoblingen har ingen synlige ytre skader. Totalt 3 relativt kraftige verktøymerker diametralt motsatt på nedre nøkkelgrep. På øvre nøkkelgrep, nærmest bruddet, er det to sett med diametralt motsatte verktøymerker, totalt 5 merker. Synlig lengde 35,0 mm.	Figur 10- Figur 12
Reduser	Reduser har flere verktøymerker på alle 6 kanter av nøkkelgreet, men er ellers uskadd. Rester av gjengetape og gulmaling på de største gjengene.	Figur 9

Tabell 2. Merking, mål og vekt

Del	Produsent	Merking	Diameter [mm]	Høyde/ Lengde [mm]	Bredde [mm]	Tykkelse [mm]	Vekt [kg]
<b>Alle deler</b>	-	-	-	359,0	161,0	58,0	2,70
<b>Manometer</b>	WIKA	2A002 DIN 16006 1.4571 KI.1,0	161,0	-	-	57,8-58,0	1,3
<b>Ventilblokk</b>	Parker	E168 (blokk) E128 (ventiler) LS2V 1/2" NPT (FEM) 1/2" NPT (FEM) 1/4" NPT (FEM) GAD MWP = 413 BARS	-	63,5	50,0	31,7	0,82
<b>Vent-port</b>	Swagelok/ Parker	Swagelok 316 EAW H01 Parker A-lok M6 316 H07 E53	6,0	105	-	-	0,06
<b>Male adapter</b>	Parker	A-LOK 316 E035	11,98	26,0+23,1	-	1,43 <sup>1</sup>	0,06
<b>Twin ferrule</b>	Parker	A-LOK M12 316 E137 E092	-	35,0 <sup>3</sup>	-	-	-
<b>Reducer</b>	CH	314542 L-9685 316 10K	-	57,8	34,9	34,9	0,44 <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Veggykkelse tubing <sup>2</sup>Vekt inkl. twin ferrule <sup>3</sup>Synlig lengde ned til reduser

## Demontering

For å muliggjøre videre undersøkelse av male adapter ble denne demontert. Bruddflatene ble separert fullstendig ved forsiktig belastning av de to motstående nøkkelgrepene på male adapter og twin ferrule, uten å la bruddflatene komme i kontakt.

Dernest ble gjenværende del av male adapter som satt i ventilblokken demontert vha. et pipesett, og twin ferrule ble åpnet ved bruk av håndverktøy slik at tubing-siden av bruddet ble frigjort. Snittringen ble ikke fjernet for å unngå å skade bruddflaten.

Delene ble beskyttet så godt det lot seg gjøre mot verktøymerker, og posisjonene (synlig lengde) ble på forhånd registrert som angitt i Tabell 1. Vent-port ble fjernet og erstattet med en blindplugg før trykktesting, se Kap. 4.

**Tabell 3. Visuell undersøkelse av bruddflate**

Male adapter	Kommentar	Vist i
<b>Før demontering</b>	Det er i Figur 14 forsøkt å illustrere vinkelen mellom manometeret og det som er kalt bøye-planet. Da bruddflaten karakteriseres som tosidig bøyeutmatting, er dette et tenkt nøytralplan, det vil si at bøyeretningen er vinkelrett på dette. I følge mottatt dokumentasjon var manometerskiven vestvendt. Ut ifra denne forutsetningen er det lagt inn en kompassrose, <i>invertert</i> da dette er sett nedenfra. Vi ser da at bøyeplanet er tilnærmet nordøst-sydvest og bøyeretningen tilsvarende nordvest-sydøst.	Figur 14
<b>Bruddflate på tubing-siden</b>	Sett mot tubing-siden, dvs. sett ovenfra som installert, har bruddflatene følgende karakteristiske trekk: -to nær-diametralt motsatte initieringspunkt på ytre overflate. -Bruddflatene er adskilt med to restbrudd, og har klare hvilelinjer (beach marks) som er karakteristiske for utmattingsbrudd. -Utmattingsbruddet er helt plant og vinkelrett på rørets lengderetning. Dette er typisk for bøyeutmatting.	Figur 15
<b>Bruddflate på gjenge-siden</b>	Sett mot gjengene, dvs. sett nedenfra som installert, er bruddflaten tilsvarende godt bevart med et relativt tydelig mønster over bruddforløpet. Restbruddene består av en sektor på ca. 5 mm og et lite, triangulært område på motsatt side. Arealet på restbruddet er i størrelsesorden 8 mm <sup>2</sup> . Undersøkelse i stereomikroskop viser en punktkilde for utmattingssprekken med sprekkvekst radielt og rundt omkretsen. Dette indikerer at sprekken har vokst gjennom tykkelsen før den har vokst rundt mot hver side (se også SEM-undersøkelse). Ingen spesielle tegn til defekter i initieringsområde kunne observeres, men antydning til mikroskopiske korrosjonsgroper ble funnet i hulkilen. Hulkilen karakteriseres som skarp, med for øvrig relativt jevn.	Figur 16- Figur 18

## 4.2 Fraktografisk undersøkelse (SEM – EDS)

Bruddflaten på male adapter på siden med gjengeparti ble undersøkt ved hjelp av SEM. Prøven ble vasket og rensset i aceton i ultralydbad før undersøkelse. Prøven ble undersøkt ved forstørrelser opp til 4000x for å karakterisere bruddtype. I bildene er prøven orientert tilnærmet likt som på Figur 16 med initieringsområde i klokkeposisjon 2 og kl 8. Det lille restbruddet er da ca. kl 11.

I tillegg ble det brukt EDS («energy dispersive spectroscopy») for å utføre kjemisk mikroanalyse av male adapter. EDS gir en semi-kvantitativ kjemisk sammensetning av materialet som undersøkes, men har lavere nøyaktighet enn f.eks. spektrometri. Kjemisk mikroanalyse utføres etter prinsippene i ISO 22309. I tilfelle man ikke benytter en kjent referanseprøve, såkalt standardløs analyse, må det tas høyde for usikkerhet opptil  $\pm 5$ –10 %. For høylegerte stål vil en slik analyse likevel gi en god indikasjon på sammensetningen. SEM-undersøkelsen av bruddflaten er oppsummert i Tabell 4.

Tabell 4. Fraktografisk undersøkelse

Område	Kommentar	Vist i
Initierings-områder	<p>I de diametralt motsatte initieringsområdene er det ikke et tydelig mikromønster ved høy forstørrelse, og det er ikke mulig å se striasjoner tydelig. I noen områder er nær ytre overflate og initieringsområde er det parallelle sprekker i overflaten som er indikativ for utmatningsbrudd. Større områder, spesielt ut mot ytre overflate, er skadet (hamret eller klint) slik at mønsteret er ødelagt.</p> <p>På ytre horisontal overflate mellom hulkil og nøkkelgrep er det tegn til groptæringer. Noen av disse gropene ligger også nær hulkil, se Figur 25. For bruddet som er initiert ca. kl 8 er det tegn til slike groper i initieringspunktet. Slike korrosjonsgroper kan bidra til å initiere utmatningssprekker.</p> <p>Nær det store restbruddet er det mindre sekundærskader på bruddflaten og striasjonene er tydelige ved høy forstørrelse. Avstanden mellom striasjonene i dette området er ca. 1–2 <math>\mu\text{m}</math>. Merk at dette er i siste fase av utmatningssprekkvekst, og at avstanden mellom striasjonene normalt øker mot slutten.</p> <p>Ved undersøkelse av perimeter langs indre radius er det ingen tegn til duktilt overbelastningsbrudd, utmatningsbruddet går tilsynelatende gjennom hele tykkelsen.</p>	Figur 19- Figur 23, Figur 25, Figur 28
Restbrudd	Restbruddene er karakterisert av dimpler, som er typisk for duktile overbelastningsbrudd. Dette gjelder både det lille, trekantede restbruddet og det store restbruddet fra åpning av bruddflatene.	Figur 24- Figur 28
EDS	<p>Kjemisk mikroanalyse ble utført på 2 ulike steder på horisontal flate mellom bruddflaten og nøkkelgripen, med følgende resultater:</p> <p>Cr: 15,9–16,3 % Ni: 10,5–10,8 % Mo: 1,9–2,0 % Mn: ~1,0 % Si: ~0,5 % Fe: ~70 %</p> <p>Resultatene er i god overensstemmelse med kjemisk analyse i mottatt materialsertifikat E035 for 316 austenittisk rustfritt stål.</p>	Figur 29

### 4.3 Metallografisk undersøkelse og hardhetsmålinger

Et utsnitt av male adapter fra siden med gjengeparti ble saget ut for metallografisk undersøkelse. Utsnittet ble plassert i nærheten av det ene initieringspunktet. Prøven ble støpt inn, slipt, polert og etset i henhold til standard metallografisk prosedyre og deretter undersøkt i et optisk lysmikroskop ved forstørrelser på 10–500x i både polert og etset tilstand.

Videre ble det også gjort prøveuttak og slip av ventilblokken som hadde en sprekkindikasjon på baksiden.

**Tabell 5. Metallografisk undersøkelse**

Prøve	Kommentar	Vist i
Male adapter Polert tilstand	Prøven viser ingen tegn til uregelmessigheter i forbindelse med initieringsområdet og bruddflaten. Hulkilradius er målt vha. programvaren; ca. 400 $\mu\text{m}$ (0,4 mm) er den beste tilpasningen rett ved bruddet.	Figur 30- Figur 33
Male adapter Etset tilstand	I etset tilstand karakteriseres mikrostrukturen av austenittkort med en høy grad av deformasjon i form av tvillingdannelse. Det observeres også en relativt høy andel deltaferritt. Det er ikke funnet korn grense-karbider. Ingen tegn til uregelmessigheter i forbindelse med initieringsområdet	Figur 34- Figur 35
Ventilblokk	Ventilblokken ble slipt ned til 2000-papir og den sprekkliknende defekten i overflaten ble undersøkt. Stereomikroskopi avslørte raskt at feilen var begrenset til overflaten. Feilen er svært grunn, ca. 0,2 mm, og er nesten parallell med overflaten. Den er videre delvis fylt med oksider, noe som indikerer en mulig fabrikkasjonsfeil og ikke en ytre skade fra f.eks. verktøy. Overflatefeilen anses ikke å være av betydning for integriteten eller å ha noen sammenheng med lekkasjen, og ble derfor ikke videre undersøkt.	Figur 36
Male adapter Kon og gjenger	Gjengeprofilen og kon-vinkel ble målt vha. stereomikroskopi. I følge mottatt tegning skal gjengene være 1/2" NPT i hht. ASME B1.20.1. Dette tilsvarer en gjengestigning på 14 TPI, tannflankevinkel på 60° +0,125° / -0,063° og en kon-vinkel på 1,79°.  Kon er målt, relativt til indre overflate, til 1,0–1,4° avhengig av om det måles til gjengebunn eller gjengetopp. Tannflankevinkel måles til ca. 57,3° og gjengestigning måles til 10,85 mm/7 pitch tilsvarende nærmere 16 TPI. Disse verdiene avviker fra oppgitte verdier for NPT, men da gjengeforbindelsen har vært tett, anses dette ikke for å være av betydning for lekkasjen.	Figur 37- Figur 38

I følge mottatt informasjon (M12MA1/2N DETAIL) er maksimum radius i hulkil 0,8 mm og minimum radius 0,4 mm. Geometrien er derfor innenfor spesifiserte grenser, om enn ved nedre grense. Det kan legges til at i følge tilgjengelig litteratur<sup>1,2</sup>, vil denne hulkilradius representere en spenningskonsentrasjon på i størrelsesorden 2,5.

<sup>1</sup> Warren C. Young; Roark's formulas for stress and strain; McGraw-Hill, 1989

<sup>2</sup> DIN 743 1-4 (2010); Calculation of Load Capacity for Shafts and Axles

Hardhetsmålinger ble utført ved hjelp av en stasjonær Vickers-tester med 10 kgf last (HV10) i henhold til ISO 6507:2005. Målingene ble tatt på metallografisk slip i nærheten av bruddsted.

**Tabell 6. Hardhetsmålinger**

Posisjon	Enkeltverdier [HV10]	Gjennomsnitt [HV10]
Male adapter, side med gjengeparti	330, 335, 339, 328, 332, 338	334

I følge mottatt materialsertifikat HCT E035 er det oppgitt en hardhet på 277 HB (Brinell) i kaldtrukket tilstand. Det er ingen standardiserte tabeller i ASTM E140 for konvertering for austenittisk stål, men Vickers ligger normalt noe over Brinell i verdi (ifølge ASTM A370: 277HB tilsvarer ca. 294HV; 334HV tilsvarer 318HB). Det målte gjennomsnittet på 334 HV10 er derfor ansett å være i overensstemmelse med sertifikatverdien, og trolig med en noe høyere fasthet.

#### 4.4 Ruhetsmålinger

Overflateruhet på tubing (male adapter) ble målt ved hjelp av en Mitutoyo SJ-301 ruhetstester. Overflaten ble rensert før testing. Ruheten ble målt i henhold til JIS-B0601:2001.

Ra = Aritmetisk middel (gjennomsnitt)

Rz = Største høyde i profilen. Gjennomsnitt av 5 enkelttopper.

**Tabell 7. Ruhetsmålinger. Korresponderende par med målinger (Ra, Rz)**

Posisjon	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]
Tubing, utvendig under snittring	0,82; 0,84; 0,90; 0,92	4,33; 4,26; 4,84; 4,85
Tubing, innvendig	2,28; 3,46; 3,15; 3,67	12,73; 17,79; 15,97; 16,84

Ruhetsmålingene er som forventet for en finmaskinert overflate. Innvendig er det større ruhet og dette bekreftes visuelt av en mer grov overflate etter boring/dreining.

Mottatt spesifikasjon angir ruhet til Ra=1,6  $\mu\text{m}$ , dette er oppnådd på utvendig overflate med et gjennomsnitt på Ra=0,87  $\mu\text{m}$ , men på innvendig overflate er gjennomsnittet Ra=3,14  $\mu\text{m}$  og derfor utenfor kravet. Da bruddet er initiert fra ytre overflate anses dette imidlertid for ikke å være av betydning.

## 5 TRYKKTESTING

Trykktesting ble utført i to steg etter avtale med Ptil. Først ble det utført en trykktest med trykkluft til ca. 7 bar. Deretter ble det utført en trykktest med vann til ca. 135 bar. Ptil var til stede på sistnevnte.

Som forberedelse til trykktesten ble vent-linje koblet fra og erstattet med en blindplugg. En luftslange med 1/2" nippel ble koblet til der «male adapter» hadde gått til brudd. Ventilene og manometer forble urørt.

Bruk av lekkasjesøker viste ingen tegn til lekkasje ved ca. 7 bar i området rundt sprekkindikasjonen på ventilblokka. Se Figur 37 og Figur 38.

Deretter ble ventilblokken koblet til en trykkluftdrevet høytrykkspumpe for vann. På grunn av det økte trykket ble objektet sikret til en tung struktur og beskyttelsesglass ble satt opp rundt. En sikker-jobb-analyse ble utført sammen med Ptil før oppstart.

Trykktest til ca. 135 bar viste ingen tegn til lekkasje i området rundt sprekkindikasjonen på ventilblokka. Se Figur 39 og Figur 40.





**Tabell 8. Statisk vindlast**

Middelvind V (m/s)	F-DRAG (N)	F-DRAG (kg)
5	0,3	0,03
10	1,3	0,13
15	2,9	0,29
20	5,1	0,51
25	8,0	0,80

### 6.1.2 Dynamisk vindlast som følge av vindskiftninger

Vindskiftninger (vindkast) vil medføre en dynamisk lastvariasjon på manometer. Nær bakken vil turbulensintensiteten typisk være i størrelse 15-20 % av middelvinden, hvilket tilsvarer variasjoner i vindhastighet på  $\pm 15-20$  % av middelvinden. Lastvariasjoner er estimert under for vindretning normalt på manometeret (størst flate eksponert mot vind) som funksjon av middelvind.

Lastvariasjonene forårsaket av vindskiftninger vil ha en frekvens typisk  $< 1$  Hz, hvilket er under den laveste beregnede egenfrekvensen for systemet. Lastvariasjonene forbundet med vindkast er vurdert å være relativt små, se tabell under. Ettersom frekvenser forbundet med vindkast ikke sammenfaller med typiske egenfrekvenser for systemet samt at lastamplitudene er små, anses dette ikke å være hovedforklaring på den erfarte utmattingskaden.

**Tabell 9. Variasjon i vindlast på manometer**

Middelvind V (m/s)	Vindkast v' (m/s)	Variasjon i vindlast (N)	Variasjon i vindlast (kg)
5	1,0	0,01	0,0013
10	2,0	0,05	0,0051
15	3,0	0,11	0,0115
20	4,0	0,20	0,0204
25	5,0	0,32	0,0318

### 6.1.3 Dynamisk vindlast som følge av virvelavløsning

Strømning rundt objekter er forbundet med virvelavløsning (VIV) som gjenspeiles i periodiske trykksvingninger på legemets overflate. Dersom trykksvingningene sammenfaller med en eller flere av objektets egenfrekvenser vil dette kunne gi en uønsket forsterkende effekt (resonans). Virvelavløsningsfrekvens og amplitude på trykksvingningene avhenger av objektets form, størrelse og vindhastighet.

Virvelavløsningsfrekvens er beregnet for følgende:

1. Manometer
2. 2" bypass piping

Virvelavløsningsfrekvens for manometeret er beregnet på basis av følgende formelverk:

$$f = St \cdot \frac{V}{L}$$

Virvelavløsningsfrekvens

$St$  Strouhal tall

$L$  [m] Karakteristisk lengdeskala for objektet

$V$  [m/s] Vindhastighet

Estimert virvelavløsningsfrekvens er vist i tabell under for vind normalt på og parallelt med manometer-skiven. Resultatene viser estimerte virvelavløsningsfrekvenser i området 5-60 Hz avhengig av vindhastighet og retning. Frekvensene sammenfaller med egenfrekvenser (se kapittel 6.3) for systemet og anses for å være en sannsynlig forklaring på den erfarne utmattingskaden.

**Tabell 10. Resultater, virvelavløsningsfrekvenser for diameter som lengdeskala**

Lengdeskala	L (m)	0,16	Diameter på manometer
Strouhal tall	St (-)	0,15	Litteraturdata
Vindhastighet	V (m/s)	f (Hz)	
	5	5	
	10	9	
	15	14	
	20	19	
	25	23	

**Tabell 11. Resultater, virvelavløsningsfrekvenser for manometer tykkelse som lengdeskala**

Lengdeskala (L)	L (m)	0,065	Tykkelse på manometer
Strouhal tall (St)	St (-)	0,15	Litteraturdata
Vindhastighet	V (m/s)	f (Hz)	
	5	12	
	10	23	
	15	35	
	20	46	
	25	58	

Bypass linjen som manometeret er tilkoblet er også relativt fritt eksponert mot vind. Basert på at utvendig diameter på 2" rørføring er tilsvarende tykkelse på manometer vil virvelavløsningsfrekvens være i samme område som for manometer, se tabell over. Det kan ikke utelukkes at 2" rørføring kan ha blitt eksitert av VIV ved høye vindlaster og at dette har vært medvirkende årsak til utmattingskaden i manometerblokk.

## 6.2 Strømningsinduserte laster

Innvendig strømming i rør kan under visse strømningskondisjoner gi strømningsinduserte laster som kan medføre vibrasjoner i rørsystemet.

For en gassdominert strømming er potensialet for strømningsinduserte vibrasjoner bestemt av stivheten i rørsystemet og strømningsforhold. Stivheten i rørsystemet bestemmes av rørets dimensjon, veggtykkelse og hvordan rørføringen er understøttet. For en gassdominert strømming relateres strømningsinduserte laster til turbulens-genererte trykkpulser. Turbulensnivå bestemmes hovedsakelig av gasshastighet og gassegenskaper i form av tetthet og viskositet. For å kartlegge mulighet for strømningsinduserte vibrasjoner benytter DNV GL normalt retningslinjer fra Energy Institute (UK) som avhengig av parameterne over gir en indikator på hvorvidt tiltak må iverksettes for å hindre vibrasjonskader.

Rørføringen som manometeret er tilknyttet benyttes kun i korte intervaller ved behov for trykkutjevning over hovedventilen. Det foreligger per i dag ikke tilstrekkelig informasjon på hvor hyppig bypass systemet har vært i drift, heller ikke hvilke strømningsforhold som systemet typisk vil se under en trykkbalansering. Det kan derfor ikke uten videre utelukkes at strømningsinduserte laster kan ha medført vibrasjoner i bypass loop som videre kan ha bidratt til utmattingskade på manometer. Dersom det foreligger data på historisk drift av 2" trykkutjevningssystem, anbefales å gjøre en sjekk på hvorvidt driftsbetingelser under trykkutjevning kan medføre strømningsinduserte vibrasjoner.

## 6.3 Modellering av egenfrekvenser

For å komplettere strømningsberegningene ble det laget en forenklet modell av sammenstillingen. Da ventilblokken og manometeret er koblet til to 1" ventiler, og disse står på en 2" bypass-loop, var det nødvendig å inkludere hele systemet for å kunne vurdere egenfrekvenser og responsen i systemet.

Av programvare ble DNV GL Softwares interne GenIE FEM-verktøy og solver brukt. Denne programvaren brukes for styrkeberegninger og vibrasjonsanalyse for skip og offshore-strukturer. I tillegg er SESAM/Sestra solver brukt for å beregne egenfrekvenser og respons i strukturen. SESAM brukes til statiske og dynamiske strukturanalyser.

Strukturen er modellert med følgende antakelser og forutsetninger:

- Mål og dimensjoner er tatt fra mottatt målsatte tegning ISO LL-15-PG-0021
- Den er modellert med 1" og 2" SCH160 rør med 10 mm mesh-størrelse. 2" bypass-loop er festet til fast struktur (høy stivhet).
  - I sammenstillingen er det mange overganger i tverrsnittsareal, fra 1" til ½" og ned til 12 mm som er dimensjonen på male adapter. Denne går videre over i ventilblokken. Forenklingen ved bruk av 1" rør innebærer at systemet er modellert noe stivere, slik at egenfrekvensene kan forventes å ligge lavere enn resultatene tilsier.
- Manometer-sammenstillingen og 1" ventilene er modellert som punktmasser på henholdsvis 2,7 kg og 5,4 kg per ventil.
- De første 20 egenfrekvenser er kalkulert. Merk at tabellen oppgir disse med høy nøyaktighet, videre referanse til egenfrekvensene er angitt med desimaler for å skille nærliggende frekvenser. Da modellen er forenklet vil det være noe unøyaktighet knyttet til disse.

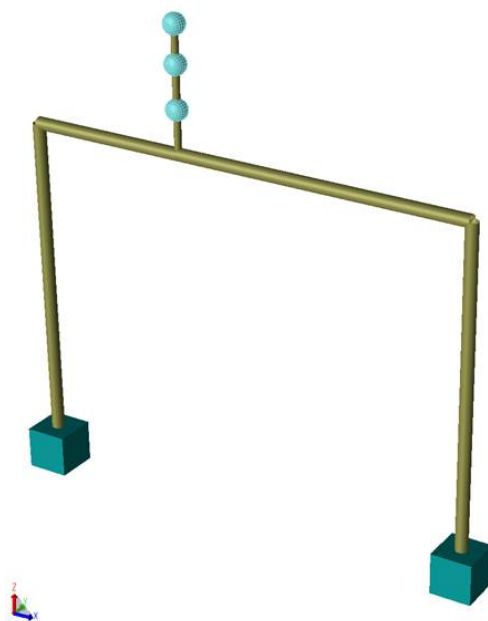
- En punktlast på 100 N er påført på toppen av manometeret i både x- og y-retning (faseforskjøvet 90°) for å vurdere hvilke egenfrekvenser som gir høyest respons.
- Som en hypotetisk regneøvelse ble det lagt til 2 rørstøtter (L50x50x5 mm) festet til 2" bypass-loop og til fast struktur, for å vurdere endring i respons og egenfrekvenser som følge av dette.

Diagrammene og animasjoner av ulike vibrasjonsmoder er vist i Appendix A (video).

Diagram 2 viser modellen med 1"- og 2"-rør og punktmasser. Tabell 12 og Diagram 3 viser de kalkulerte egenfrekvensene og de tilhørende responsene i systemet ved påført punktlast. Høyest frekvens oppnås i området mellom 5–35 Hz med 6 tilhørende egenfrekvenser ved ulike vibrasjonsmoder. Dette er i hovedsak vibrasjoner i x-retning, y-retning og «whipping» (pisking). Animasjoner av disse er vist i Appendix A frem til lysbilde 7.

Legg her spesielt merke til at frekvensområdet der responsen er høyest sammenfaller med virvelavløsningsfrekvensene for vindhastigheter mellom 5–25 m/s.

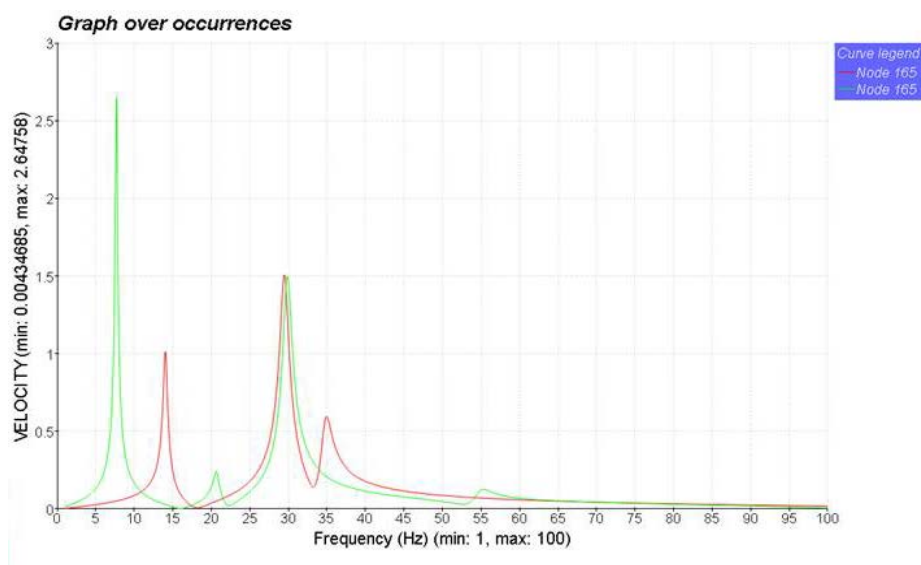
En modell med 2 rørstøtter, men for øvrig med like forutsetninger, er vist i Diagram 4. Tabell 13 og Diagram 5 viser egenfrekvensene og de tilhørende responsene i systemet ved påført punktlast. Egenfrekvensene ligger fortsatt i samme område (10–40 Hz), men responsen er betydelig dempet som følge av rørstøttene. Begge «whipping»-moder rundt 30 Hz er borte, men det oppstår noe mer komplekse vibrasjonsmoder pga avstivingen. Animasjon er vist i Appendix A (lysbilde 9).



**Diagram 2. GeniE-modell med punktlaster (ventiler og manometer)**

**Tabell 12. Kalkulerte egenfrekvenser for systemet. Frekvensene med høyest respons er markert**

ALL EIGENVALUES BEING CALCULATED ARE PRINTED TOGETHER WITH THE CORRESPONDING FREQUENCIES AND PERIODS. FREQ = SQRT(EIGENV)/(2.*PI) PERI = 1./FREQ			
NO.	EIGENVALUE UNIT: (SEC)-2	FREQUENCY UNIT: HERTZ	PERIOD UNIT: SEC
1	0.2294205E+04	7.623	0.13118
2	0.7729840E+04	13.993	0.07147
3	0.1682677E+05	20.645	0.04844
4	0.3421419E+05	29.439	0.03397
5	0.3510657E+05	29.820	0.03353
6	0.4755955E+05	34.709	0.02881
7	0.1189294E+06	54.863	0.01823
8	0.4194530E+06	103.077	0.00970
9	0.4507076E+06	106.848	0.00936
10	0.5671511E+06	119.859	0.00834
11	0.5949844E+06	122.765	0.00815
12	0.8195969E+06	144.086	0.00694
13	0.8688131E+06	148.349	0.00674
14	0.1185783E+07	173.310	0.00577
15	0.1452760E+07	191.830	0.00521
16	0.3387697E+07	292.936	0.00341
17	0.3445498E+07	295.424	0.00338
18	0.4501064E+07	337.659	0.00296
19	0.4665035E+07	343.754	0.00291
20	0.5179363E+07	362.208	0.00276



**Diagram 3. Frekvensrespons tatt fra node øverst på manometeret. Frekvensresponsen er høyest mellom 5–35 Hz med de 6 tilhørende egenfrekvensene som angitt i Tabell 12. Rød og grønn kurve viser x- og y-retning, hhv.**

FE-Modell med rørstøtter

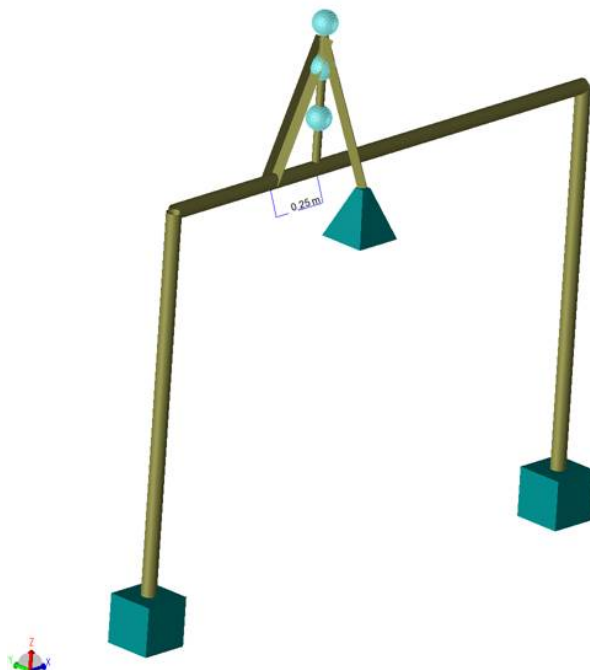


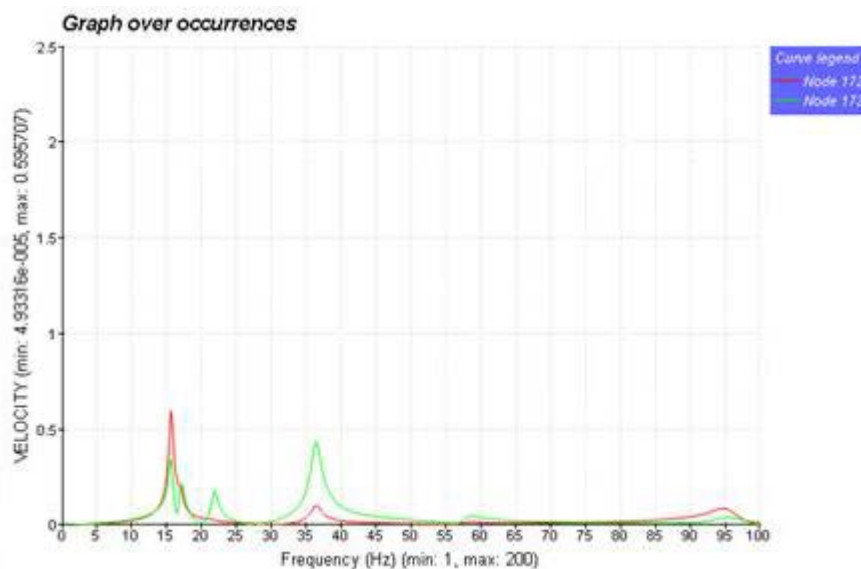
Diagram 4. GeniE-modell med 2 rørstøtter i x- og y-retning

Tabell 13. Kalkulerte egenfrekvenser for systemet med rørstøtter. Frekvensene med høyest respons er markert

ALL EIGENVALUES BEING CALCULATED ARE PRINTED TOGETHER WITH THE CORRESPONDING FREQUENCIES AND PERIODS.  
 FREQ =  $\sqrt{\text{EIGENV}} / (2 \cdot \text{PI})$   
 PERI =  $1 / \text{FREQ}$

NO.	EIGENVALUE UNIT: (SEC) <sup>-2</sup>	FREQUENCY UNIT: HERTZ	PERIOD UNIT: SEC
1	0.9537621E+04	15.543	0.06434
2	0.1142558E+05	17.012	0.05878
3	0.1864656E+05	21.733	0.04601
4	0.5202025E+05	36.300	0.02755
5	0.1337007E+06	58.195	0.01718
6	0.3580478E+06	95.234	0.01050
7	0.4574759E+06	107.648	0.00929
8	0.4743524E+06	109.615	0.00912
9	0.6170709E+06	125.022	0.00800
10	0.6571508E+06	129.019	0.00775
11	0.9708885E+06	156.821	0.00638
12	0.1026359E+07	161.239	0.00620
13	0.1254722E+07	178.276	0.00561
14	0.1837480E+07	215.740	0.00464





**Diagram 5. Frekvensrespons tatt fra node øverst på manometeret. Frekvensresponsen er høyest mellom 10–40 Hz med de 4 tilhørende egenfrekvensene som angitt i Tabell 12**

## 6.4 Lekkasjeater

Lekkasjeater og konsekvenspotensialet forbundet med hendelsen er beskrevet i Statoil granskningsrapport A 2016-1 MMP L2, datert 10.03.2016 /1/. Uavhengige lekkasjeaterberegninger foretatt av DNV GL bekrefter, innenfor usikkerheten i beregningen, de estimatene på lekkasjeater og totalt gassutslipp som er fremlagt i rapporten fra Statoil /1/. Beregningene utført av DNV GL er basert på trykkprofil i Statpipe før og etter initiering av trykkavlastning, aktuell gasskomposisjon og sonisk lekkasje. Basert på utformingen av skaden er strømningsareal for lekkasjen antatt lik tverrsnittsareal for ID 9 mm rør.

## 7 KONKLUDERENDE OPPSUMMERING

Undersøkelsene, testene og beregningene som er utført er oppsummert følgende punkter:

- Den utløsende årsaken til bruddet og den påfølgende gasslekkasjen var tosidig bøyeutmatting i tubingen på male adapter som var en del av snittringskoblingen. Utmattingen har initiert i en relativt skarp hulkil i male adapter, på ytre overflate. Bruddet karakteriseres som høycykelutmatting og har oppstått i sammenkoblingens svakeste tverrsnitt, der hulkilen representerer en høy spenningskonsentrasjon. Bruddflaten indikerer sprekkvekst ved utmatting gjennom tykkelsen og i omkretsretning, før et delvis restbrudd som har åpnet bruddet og ført til lekkasjen. Når bruddforløpet viser sprekkvekst gjennom tykkelsen før restbruddet har oppstått, indikerer dette at det har vært en lekkasjevei på et tidligere tidspunkt. Dette kan ha akselerert sprekkveksten i perioden frem til bruddet. Det er funnet tegn til mikroskopiske groptæringer i hulkil og i forbindelse med initieringsområdene, som kan ha bidratt til initieringen, men som trolig ikke har vært avgjørende for å få initiert utmatting gitt den store spenningskonsentrasjonen.
- Sammenstillingen av instrumenteringen er svært uheldig utført, da det ikke er benyttet rørstøtter, og en rørkobling er benyttet som strukturelt, lastbærende komponent. Det er benyttet flere overganger hvor det minste tverrsnittet har vært i male adapter, der liten veggtykkelse har sammenfalt med en høy spenningskonsentrasjon.
- Det er ikke funnet tegn til irregulariteter med hensyn på materialets kjemiske sammensetning, fasthet (hardhet) eller mikrostruktur, hvilket utelukker dette som hovedårsak til skaden. Male adapter er, for kritiske dimensjoner, funnet å være i overensstemmelse med mottatt tegning.
- Det er etter trykktesting ikke funnet tegn til noen lekkasje fra den sprekk lignende defekten på ventilblokken. Nærmere undersøkelse avdekket at dette var en overflatefeil, trolig fra fabrikkasjon.
- Det er ikke funnet vesentlige tegn til ytre, fysiske skader i form av slagskader e.l. på de mottatte delene. Koblingene har verktøymerker på nøkkelgrep som forventet på slike deler som typisk monteres med håndverktøy. I de fleste tilfelle er det funnet noen få (ett eller to) sett med diametralt motsatte verktøymerker, og således ingenting som tilsier at delene har blitt montert eller demontert en rekke ganger (med unntak av reduser som har mange verktøymerker). Det er utover dette ikke grunnlag for å si noe om utstyret er forsøkt reparert i tiden fra 1993–2016, eller nøyaktig når disse verktøymerkene stammer fra. Bruk av gjengetape i teflon er påkrevd for å danne en tett forbindelse med NPT-koblinger og derfor som forventet.
- Tatt i betraktning plasseringen av ventilblokken og eksponering mot vind, anses det som sannsynlig at vind-induserte krefter på manometer knyttet til virvelavløsning i frekvensområde som er sammenfallende med systemets egenfrekvenser er årsaken til utmattingskaden. Det kan ikke utelukkes at virvelavløsning med påfølgende eksitering av 2" bypass-linje kan ha vært en medvirkende årsak til utmattingskaden.
- Det kan ikke uten videre utelukkes at strømningsinduserte laster kan ha medført vibrasjoner i bypass-loop som videre kan ha bidratt til utmattingskade på manometer. Dersom det foreligger data på historisk drift av 2" trykkutjevningssystem, anbefales det å gjøre en sjekk på hvorvidt driftsbetingelser under trykkutjevning kan medføre strømningsinduserte vibrasjoner. Dette er forhold som normalt sjekkes i design av rørføring.
- Uavhengige beregninger av lekkasjerater og totalt gassutslipp forbundet med hendelsen er utført av DNV GL og resultatene bekreftes å være i samsvar med tall rapportert i Statoils granskningsrapport /1/ med referanse til lekkasjekategori.

## 8 FIGURER



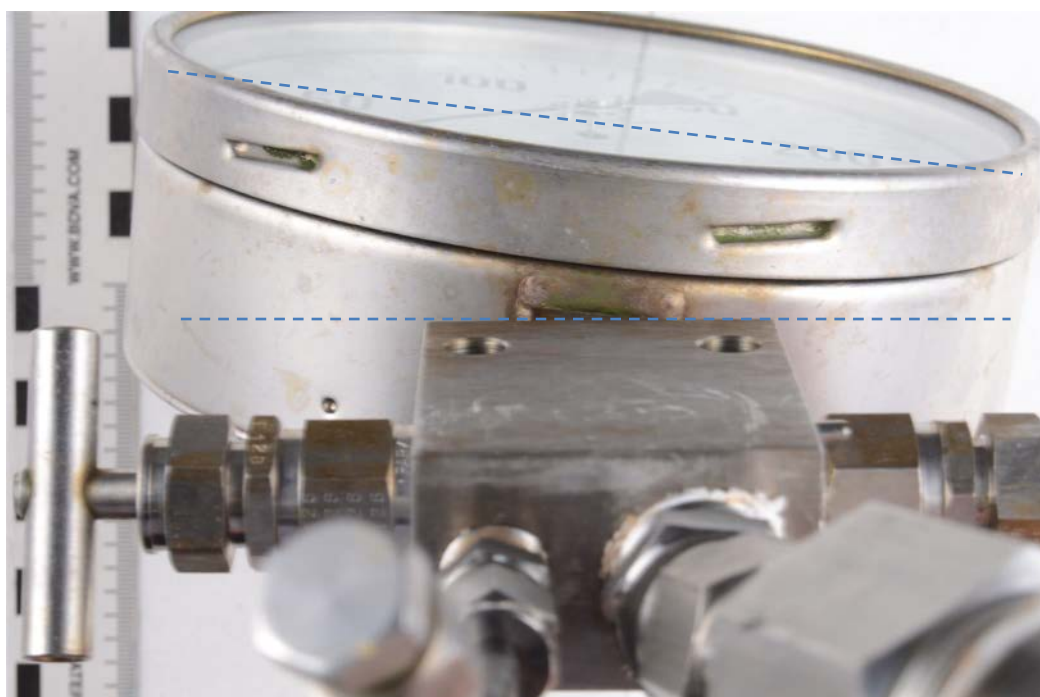
Figur 1. Oversiktsbilde som mottatt, fremside (sett fra vest, som installert).



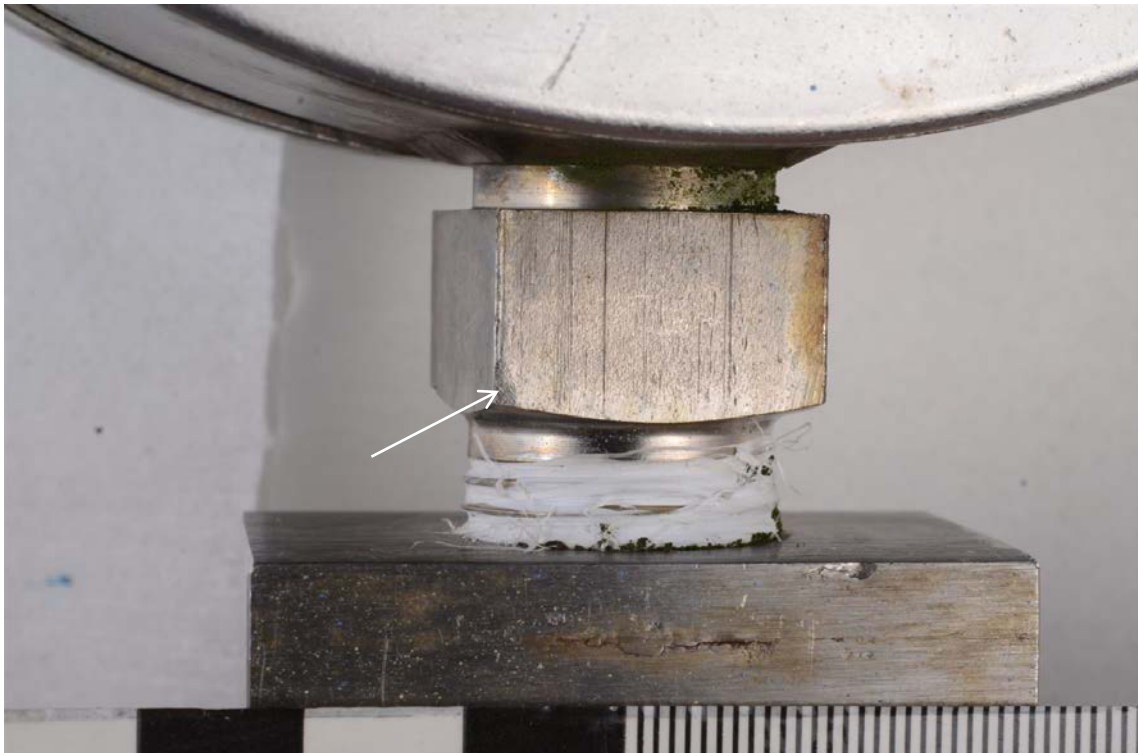
Figur 2. Oversiktsbilde som mottatt, bakside (sett fra øst, som installert). Brudd pilmerket.



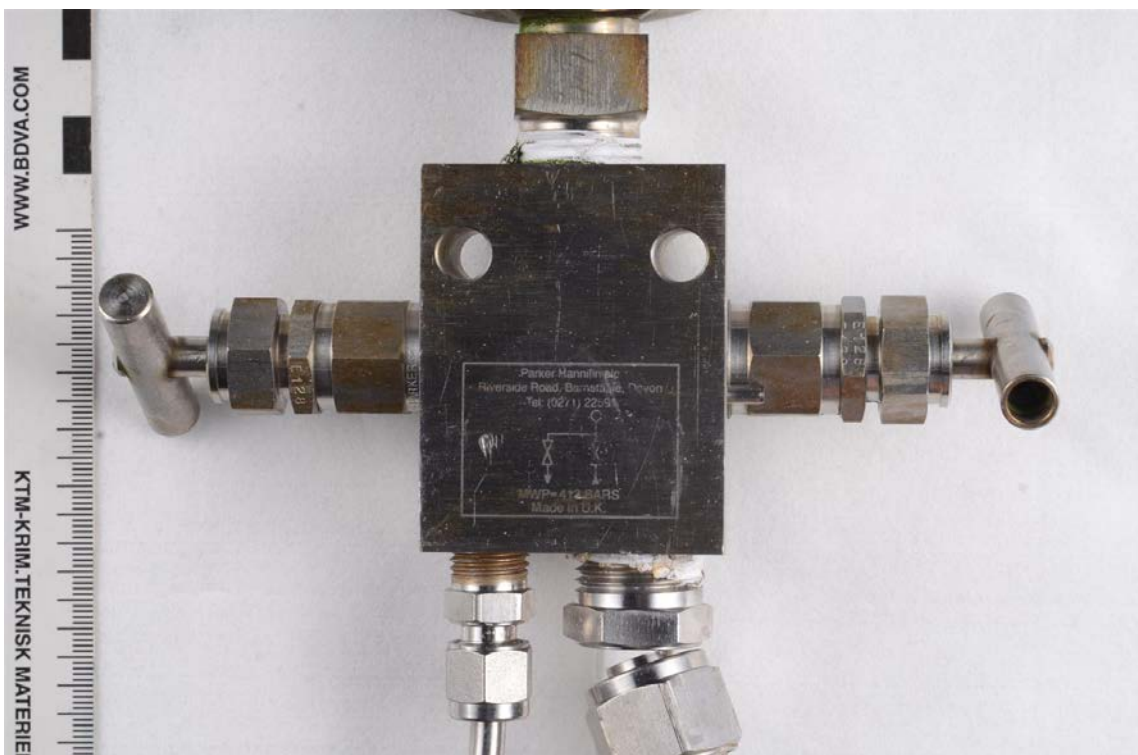
Figur 3. Oversiktsbilde som mottatt, sett fra høyre (sett fra sør, som installert).



Figur 4. Indikasjon på vinkelavvik mellom manometer og blokk (ca. 7-8° moturs, sett ovenfra)

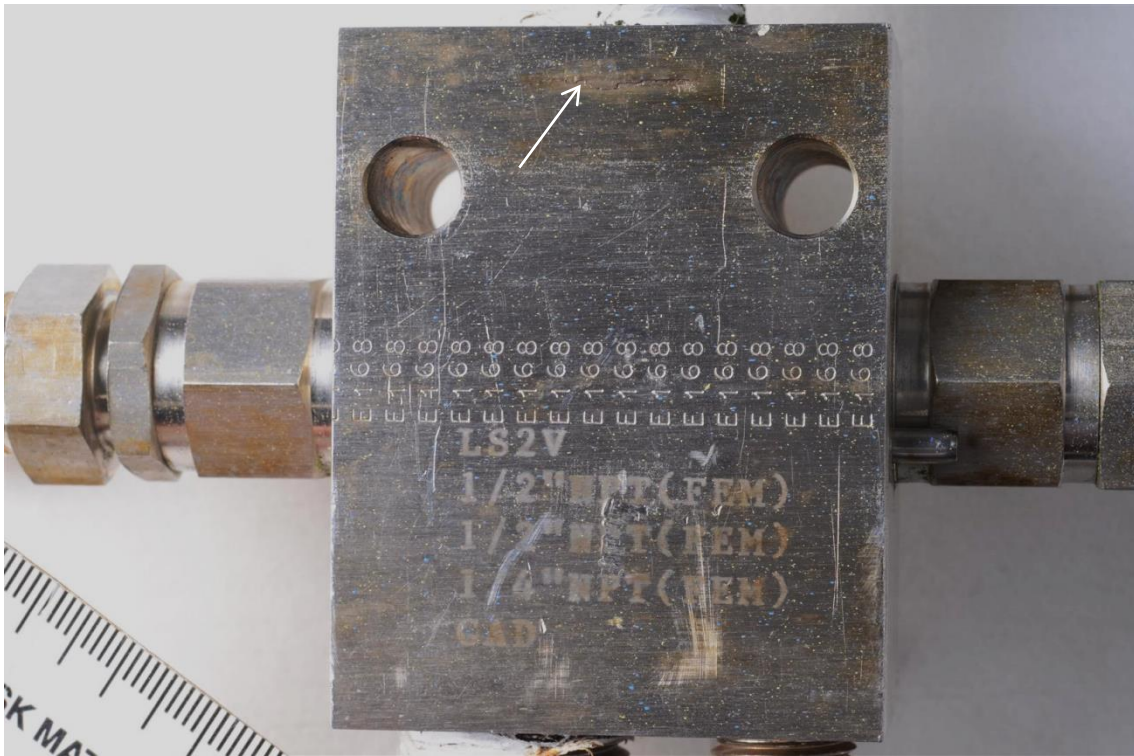


Figur 5. Nærbilde av nøkkelgrep manometer (et verktøymerke pilmerket), gjengetape og sprekk-lignende defekt i ventilblokk. Merk at nøkkelgripet har langsgående mønster/merker i overflaten fra produksjon.



Figur 6. Oversiktsbilde, ventilblokk (forside).

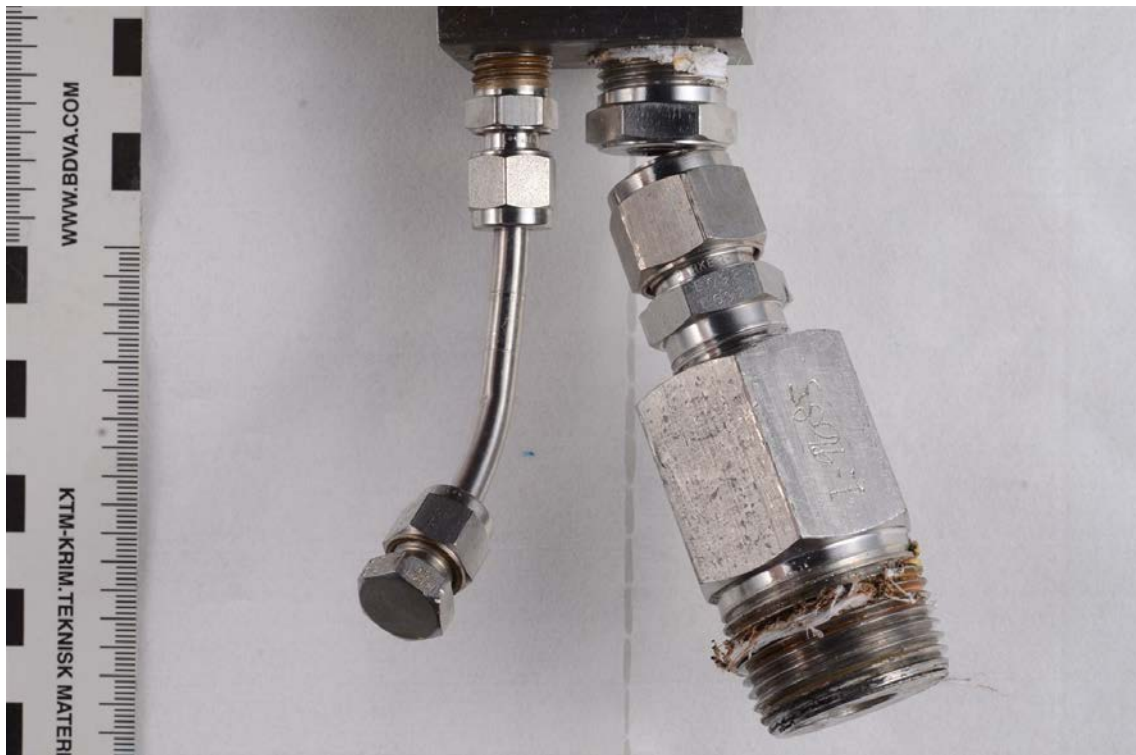




Figur 7. Oversiktsbilde, ventilblokk (bakside) med merking. Sprekklignende defekt i øvre kant mot manometer er pilmerket.



Figur 8. Ventilblokk – nærbilde av spreklignende defekt (pilmerket). Synlig lengde 14,5 mm.

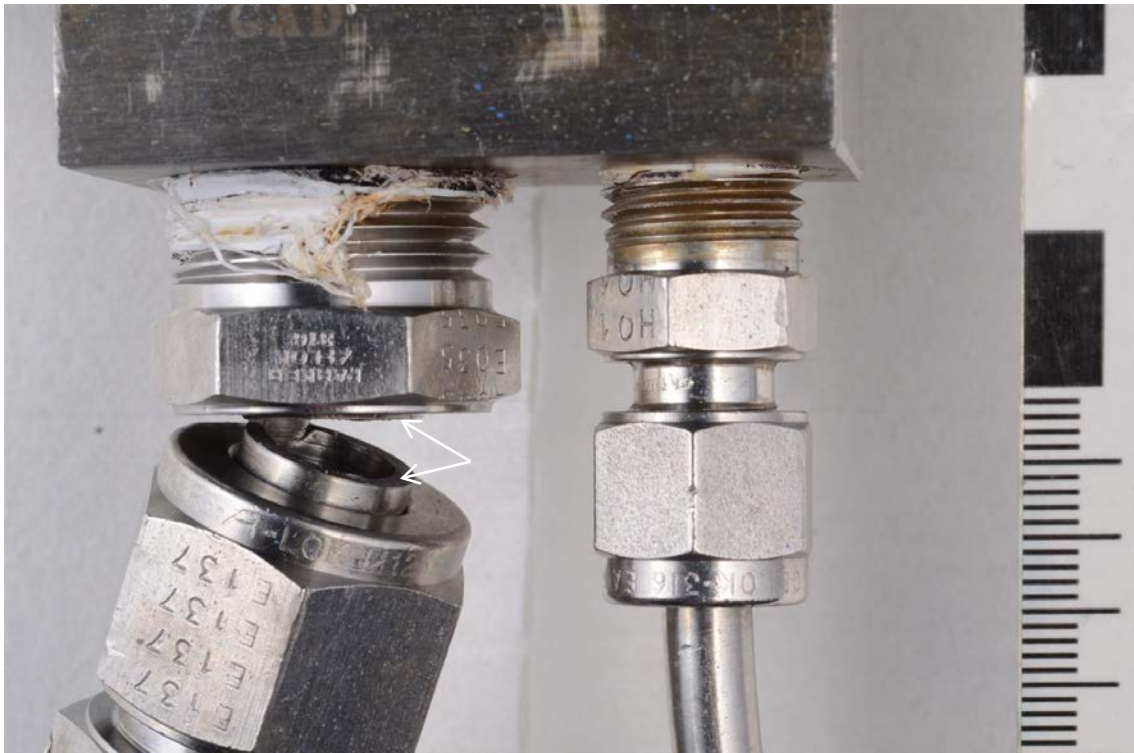


Figur 9. Oversiktsbilde, nedre del av sammenstilling. Ett knekkmerke er synlig midt på det bøyde dreneringsrøret ut fra vent-port. På reduser er det verktøymerker på alle sideflatene på nøkkelgrepet.



Figur 10. Nærbilde av male adapter og twin ferrule til høyre, sett forfra (mhp ventilblokk). Verktøymerker er angitt med piler.





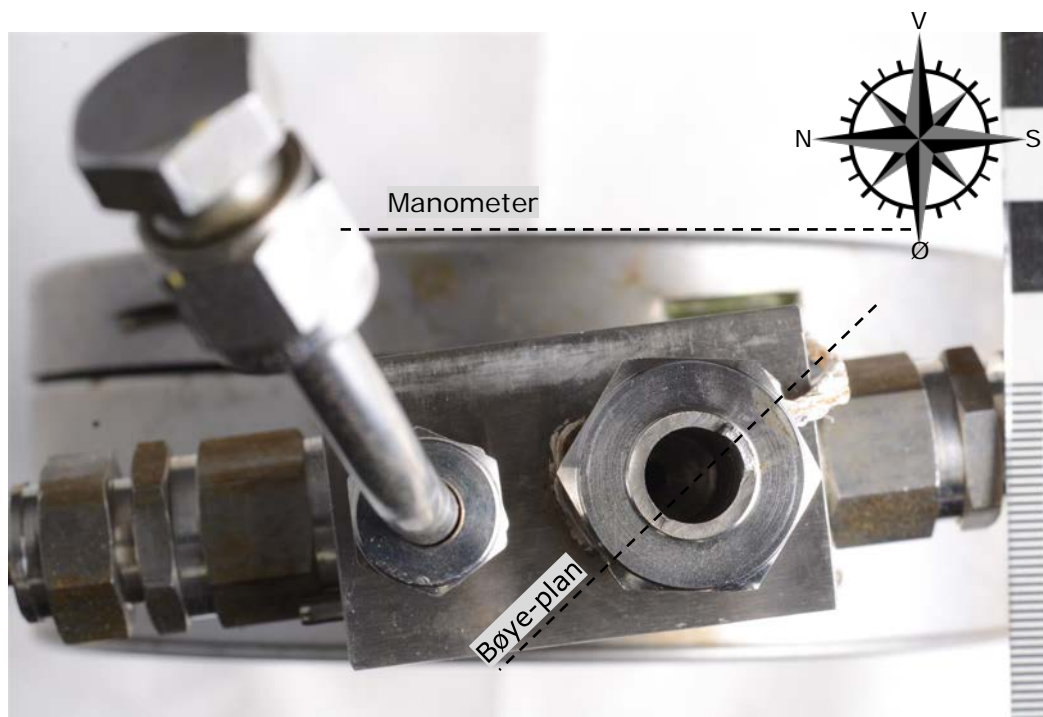
Figur 11. Nærbilde av male adapter og twin ferrule, sett bakfra. Bruddflaten (pilmerket) er plassert i hulket mellom tubing og den horisontale flaten mot nøkkelgrep. Under denne er 1,9 mm av tubing synlig før inngangen til twin ferrule. Merking på male adapter (E035) og twin ferrule (E137) vises.



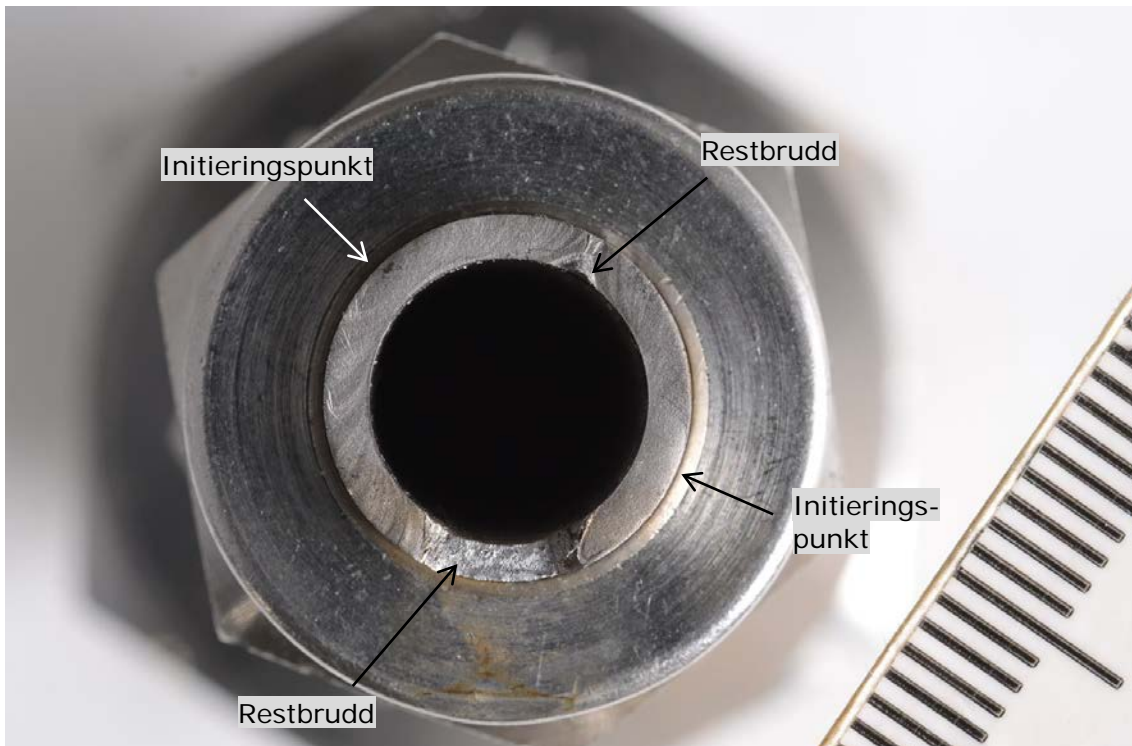
Figur 12. Nærbilde som viser verktøymerker på twin ferrule (se pil). Merk ulikt heat-nr E092.



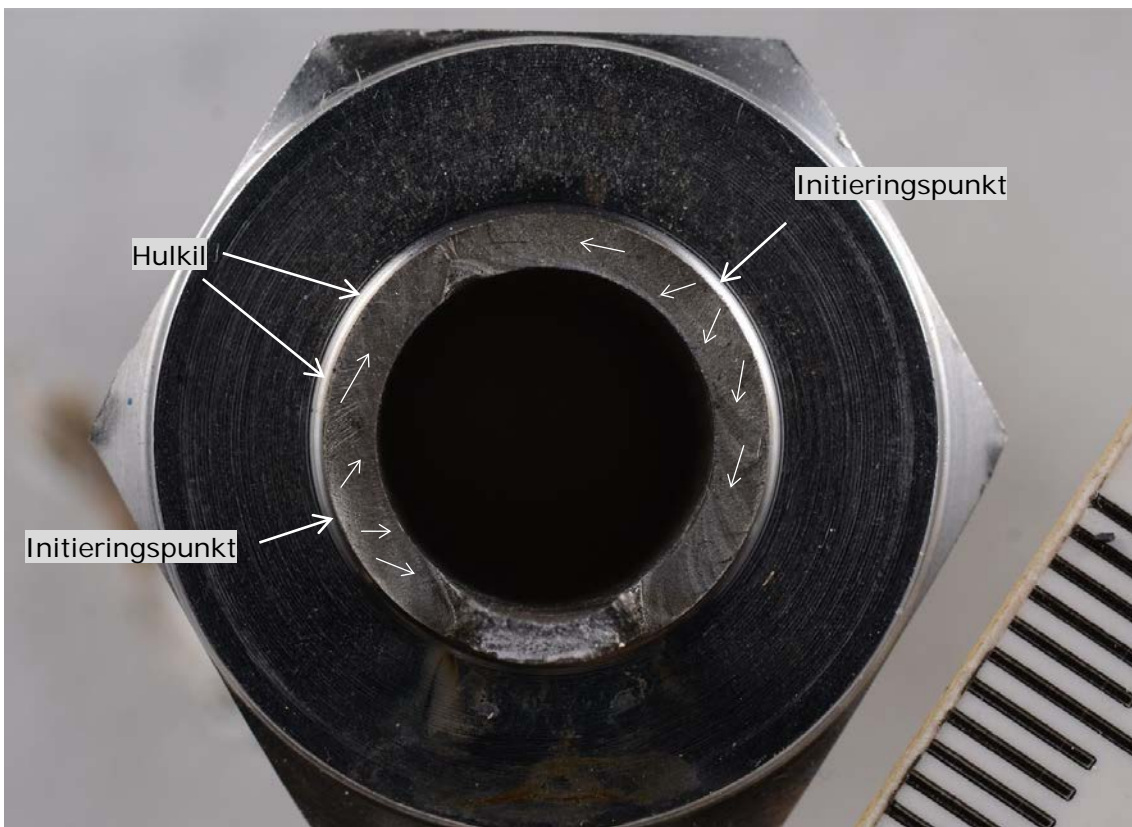
Figur 13. Avstøp av åpningsvinkelen i bruddet vha. stereomikroskop. Vinkelen er ca. 23°.



Figur 14. Etter separasjon av bruddflatene. Vinkelen mellom manometer og «bøye-plan» er indikert. Under forutsetning av manometerskiven var vendt mot vest, er bøyeplanet tilnærmet NØ-SV. Initieringsområdene (se under) er tilsvarende plassert ca. SØ og NV. Merk! Kompassrosen er invertert da dette er sett fra undersiden.

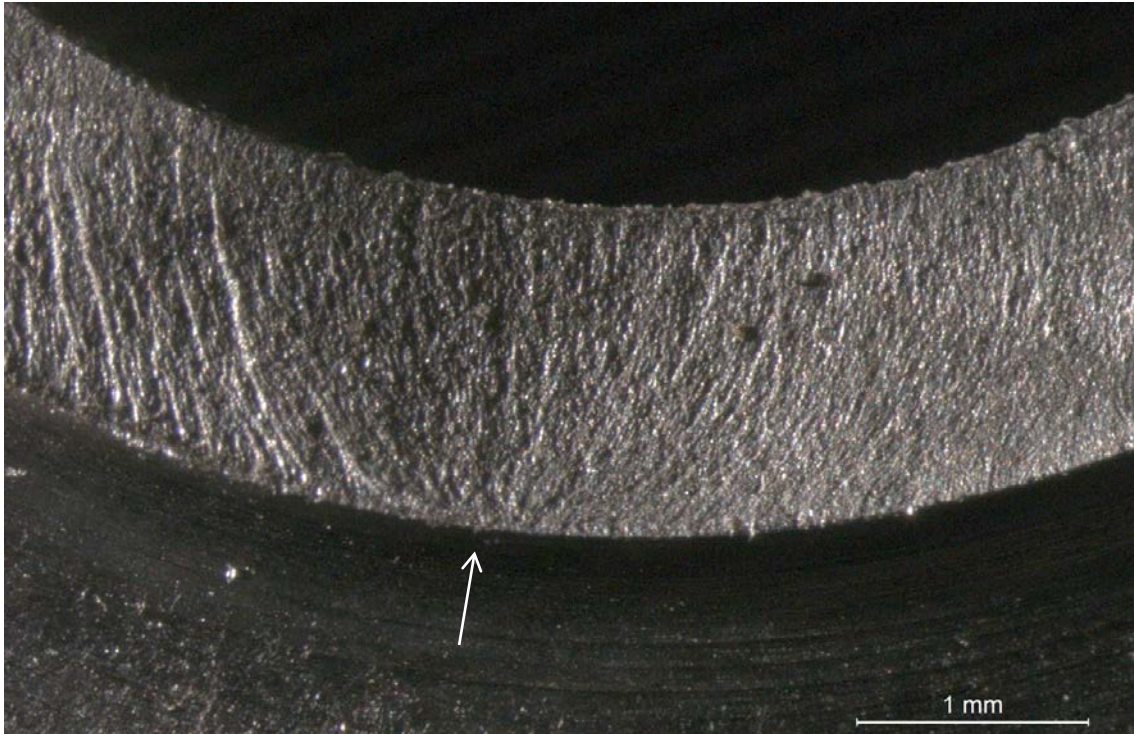


Figur 15. Bruddflate på tubing-siden (globalt: sett ovenfra). To nær-diametralt motsatte initieringspunkt på ytre overflate er markert. Den venstre utmattingsbruddflaten har vokst lengre enn den høyre. To restbrudd, et lite triangulært og et større er markerte.

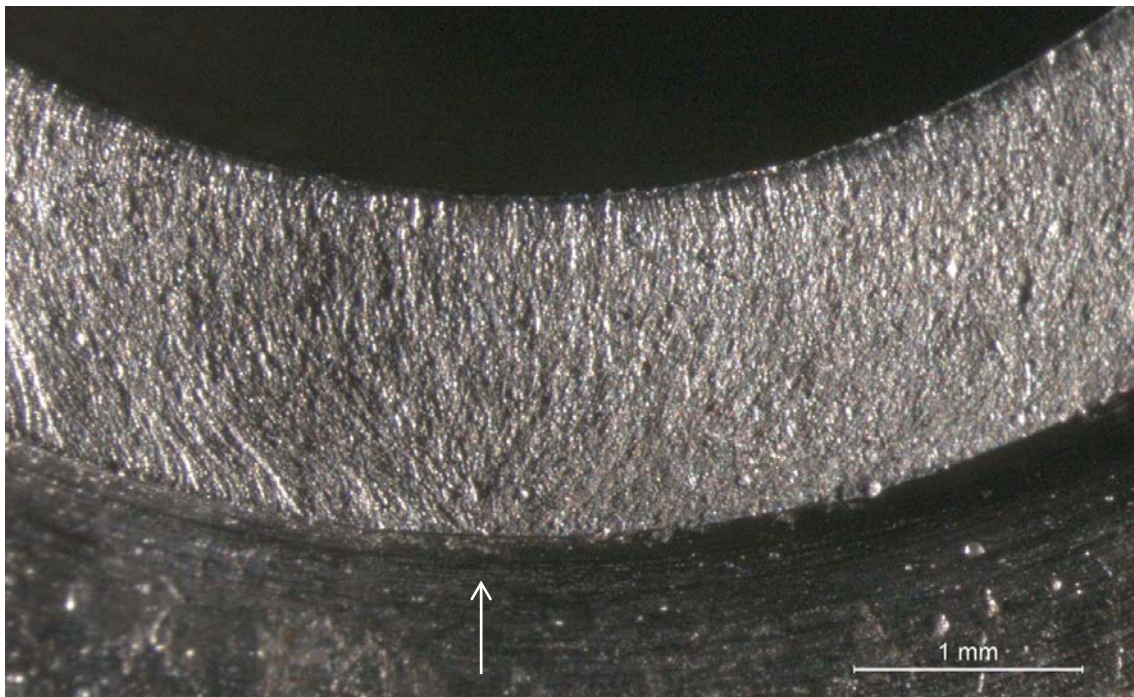




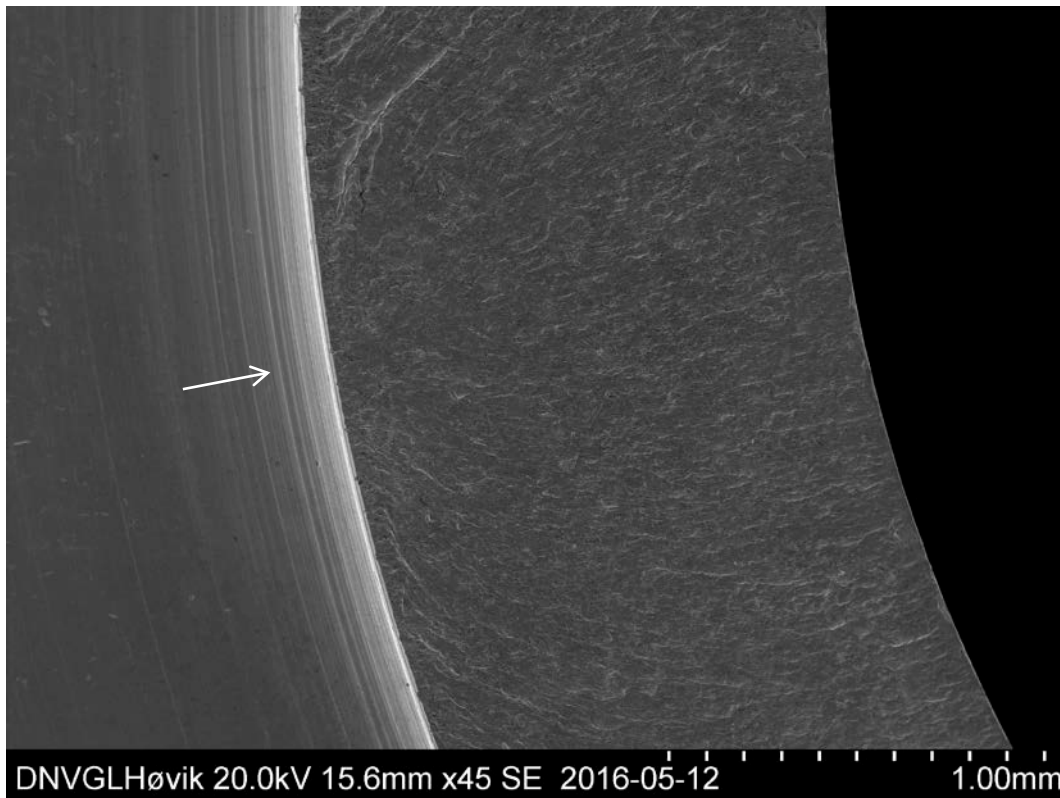
Figur 16. Bruddflate på gjenge-siden (globalt: sett nedenfra). To nær-diametralt motsatte initieringspunkt på ytre overflate, i hulkil, er markert.



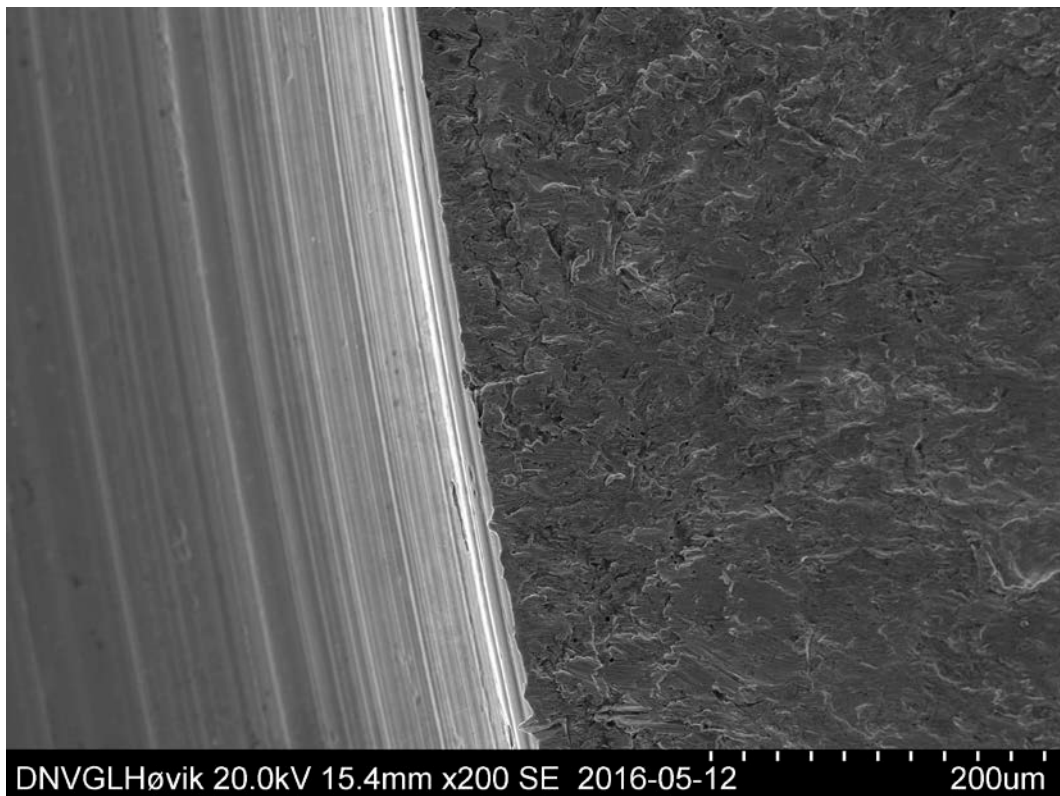
Figur 17. Stereomikroskop-bilde av initieringsområde (pilmerket), kl 2 i Figur 16.



Figur 18. Stereomikroskop-bilde av initieringsområde (pilmerket), kl 8 i Figur 16.

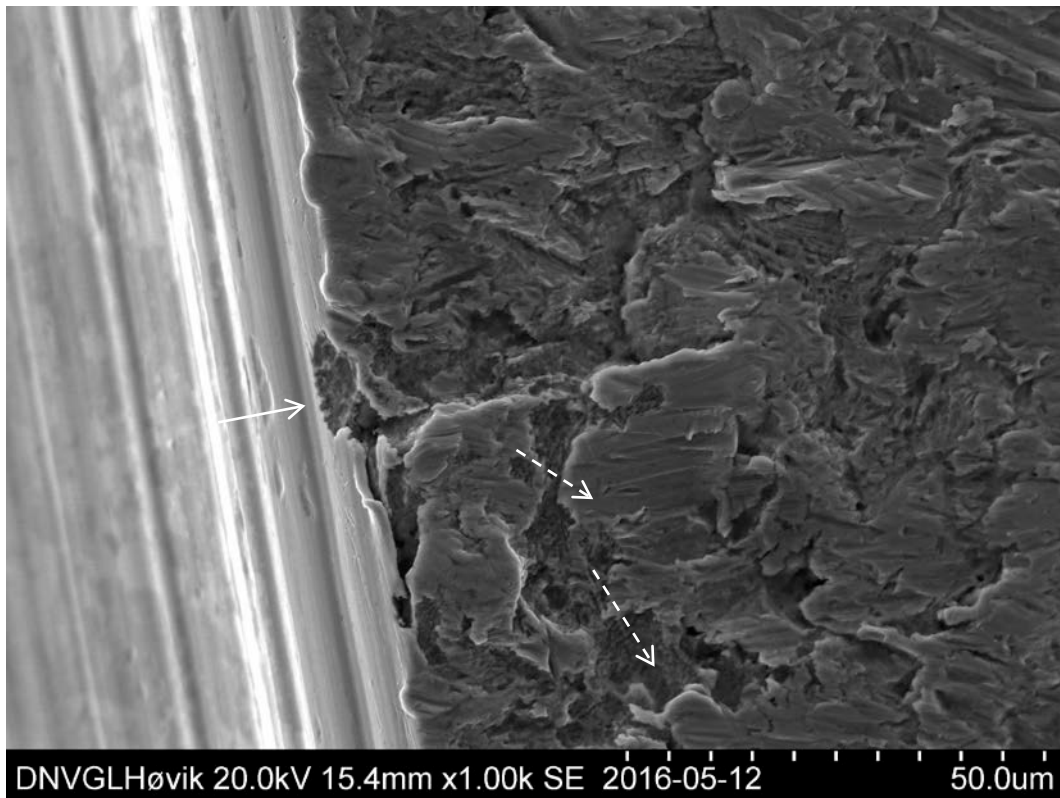


Figur 19. SEM-foto av initieringsområde (pilmerket), kl 8 i Figur 16. 45x forstørrelse.

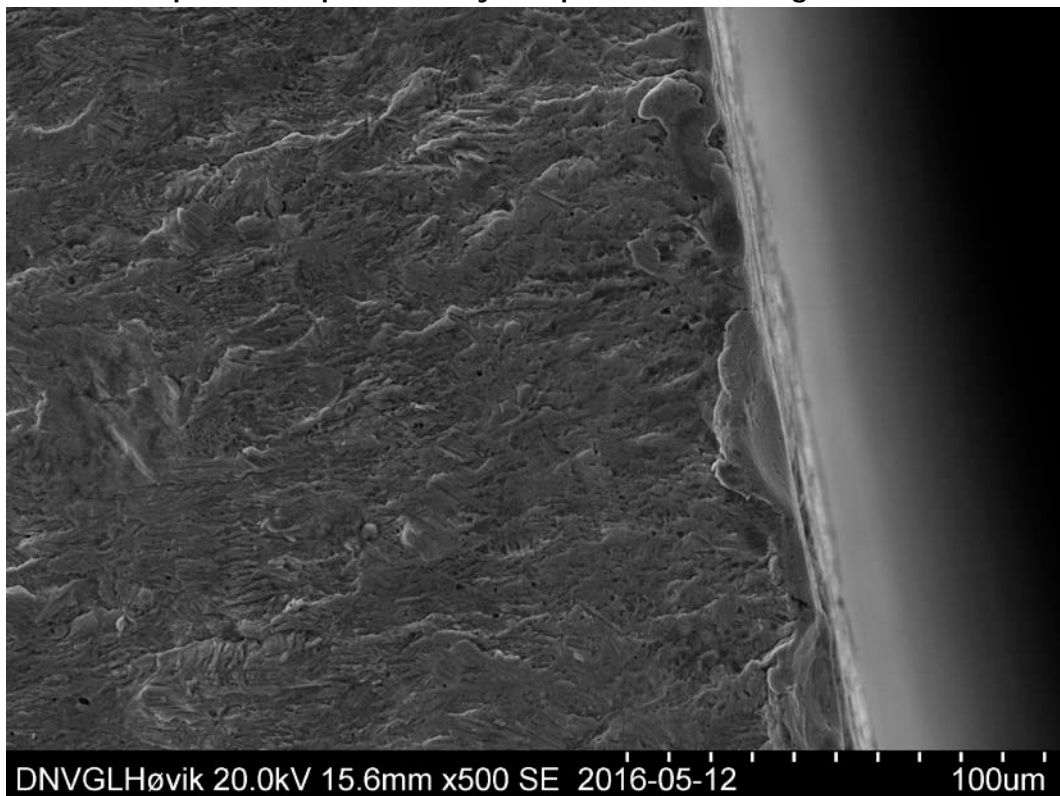


Figur 20. Initieringsområde , kl 8. Mikromønsteret er skadet av klining/hamring. Bildet viser at bruddflaten følger en linje i hulken. 200x forstørrelse.



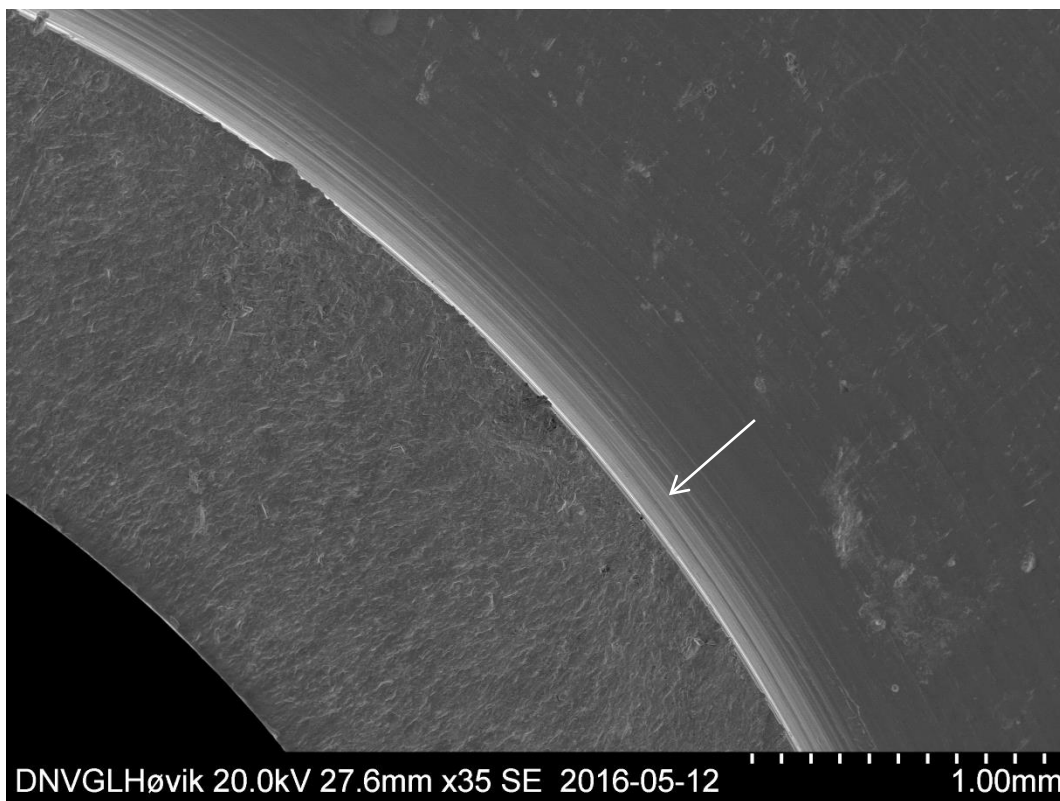


Figur 21. Initieringsområde , kl 8. Et mulig initieringspunkt/korrosjonsgrøp er pilmerket. Et svakt mønster etter parallelle sprekker antyder sprekkvekstretning. 1000x forstørrelse.

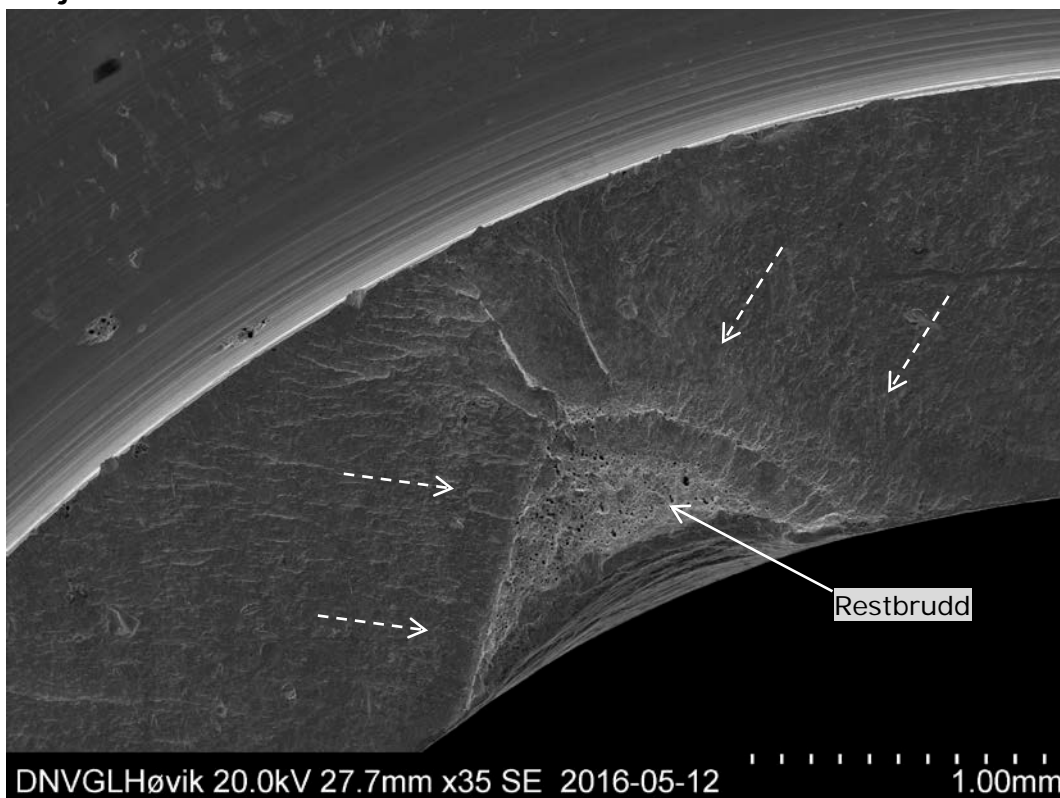


Figur 22. Indre radius , kl 8. Selv om bruddflaten har noe sekundærskader, er det er ingen tegn til duktil overbelastning langs indre perimenter (skjærleppe eller dimpler). 500x forstørrelse.





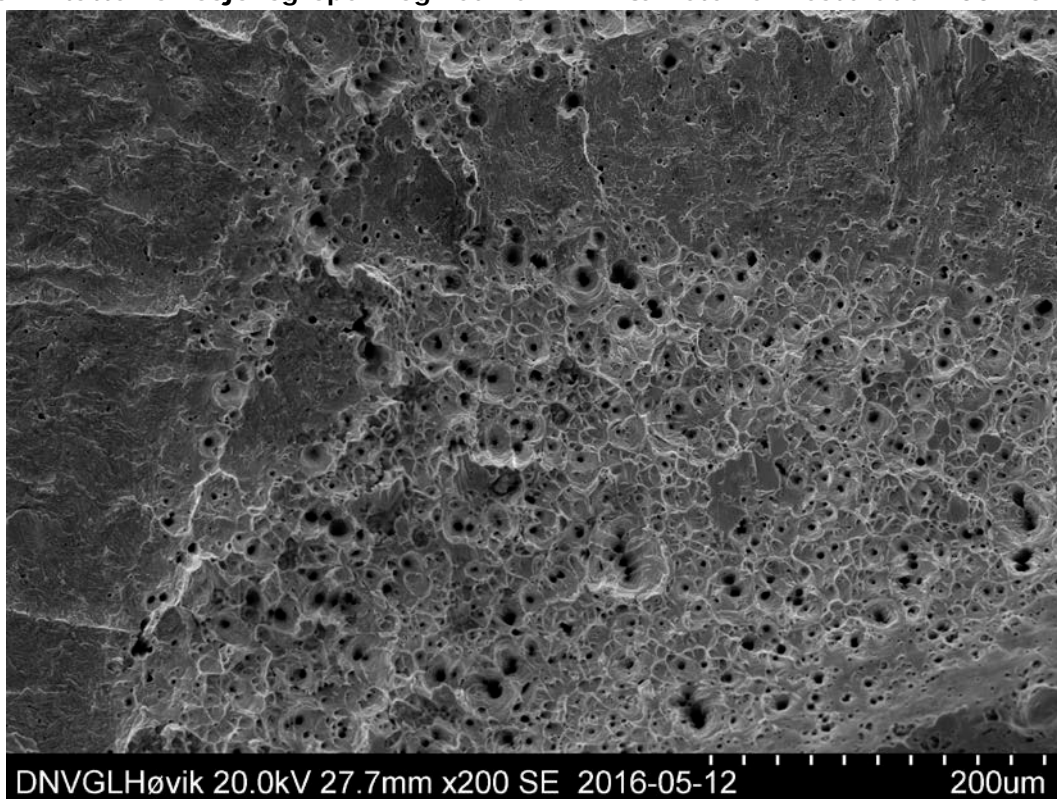
Figur 23. SEM-foto av initieringsområde (pilmerket), kl 2 i Figur 16. Bildet viser at bruddflaten følger en linje i hulken.



Figur 24. Oversiktsbilde av triangulært restbrudd, med sprekkevekst fra to sider. 35x forstørrelse.

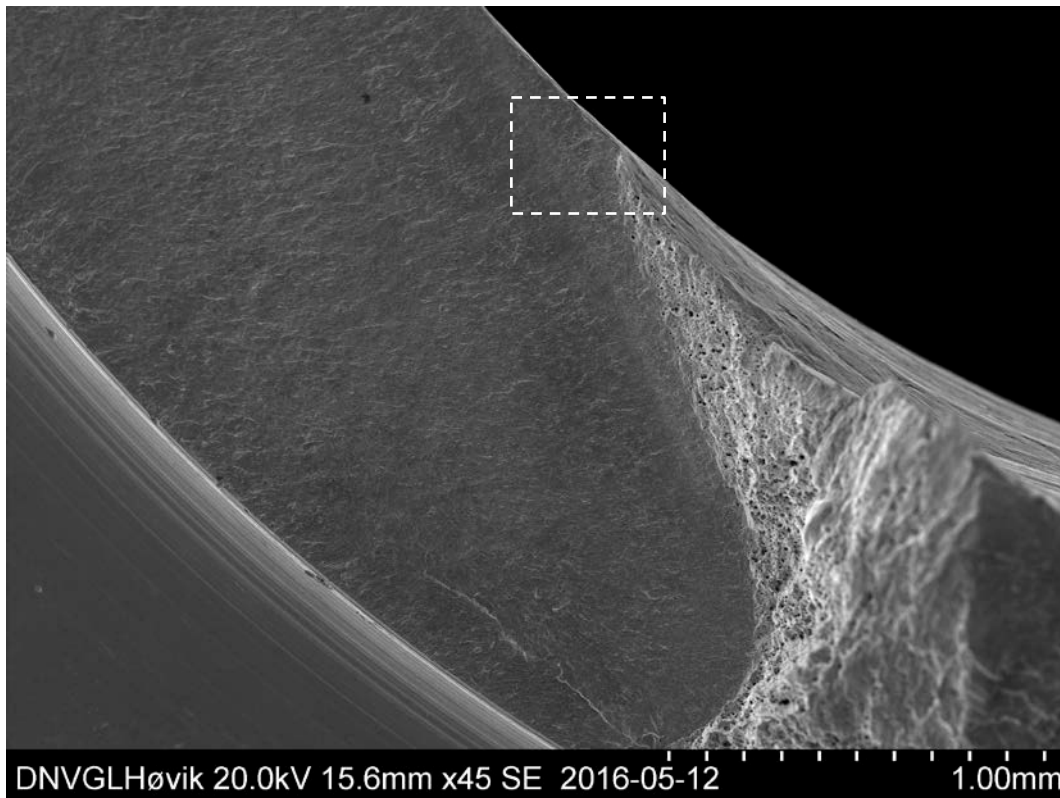


Figur 25. Antatte korrosjonsgroper i og ved hulkil. I nærheten av restbrudd. 100x forstørrelse.

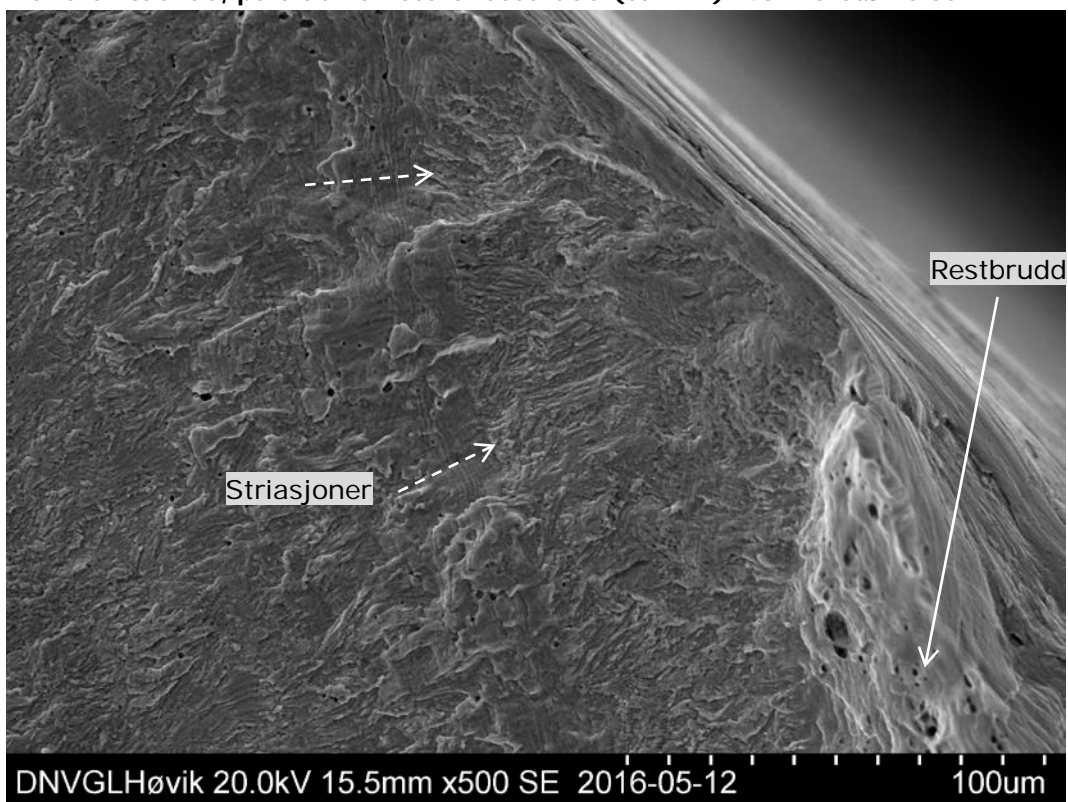


Figur 26. Nærbilde av triangulært restbrudd, duktil overbelastning (dimpler). 200x forstørrelse.

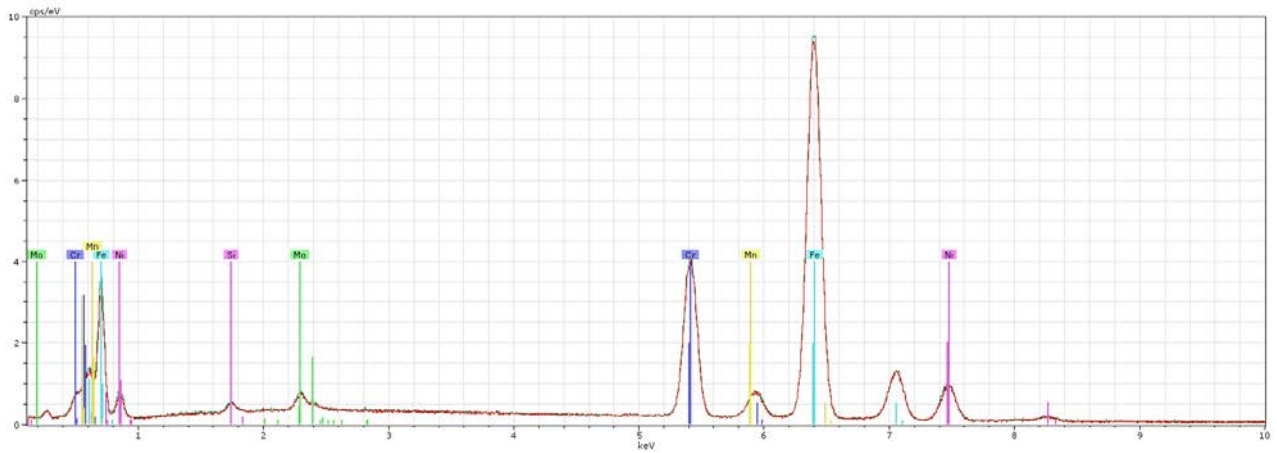




Figur 27. Oversiktsbilde, på siden av stort restbrudd (ca kl 7). 45x forstørrelse.



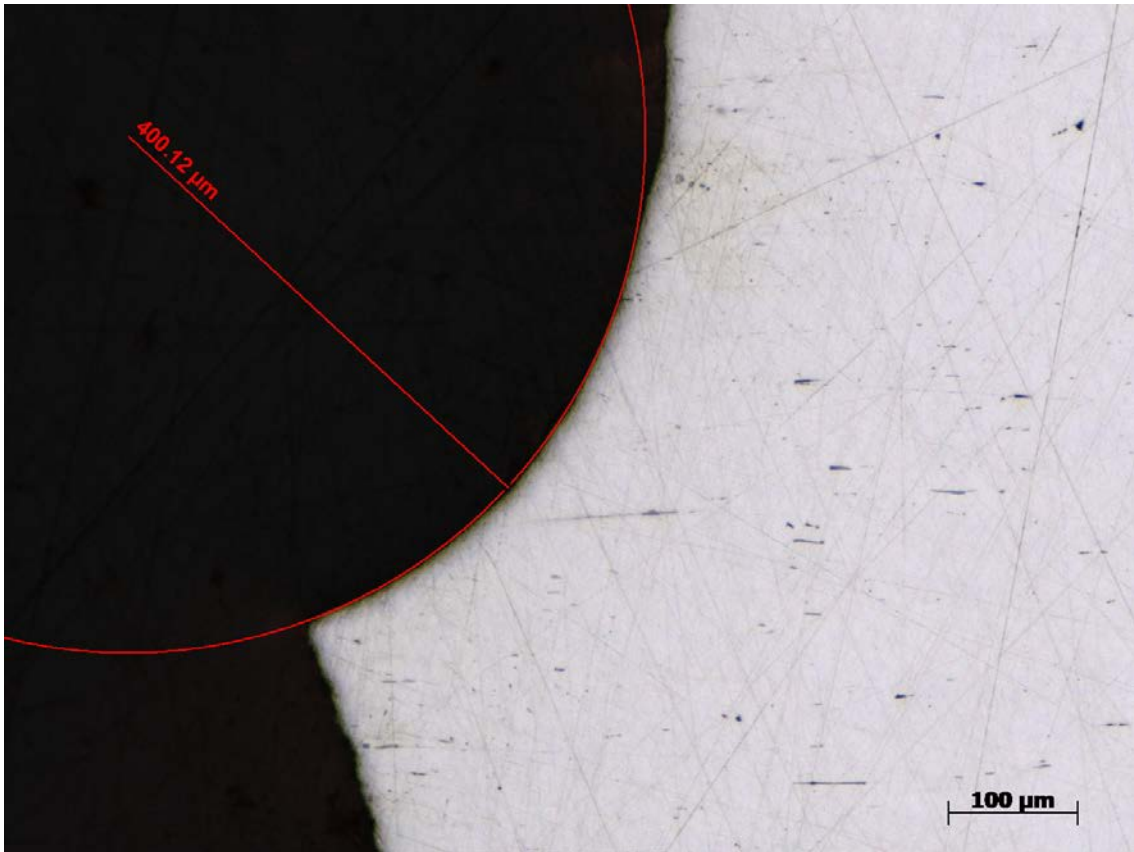
Figur 28. Utsnitt fra Figur 28, overgang mellom utmatting og restbrudd (ca kl 7). I dette området er det intakte striasjoner i bruddflaten. Sprekkvekstretningen er angitt med piler. 500x forstørrelse.



Figur 29. EDS-spektrum fra male adapter grunnmateriale.



Figur 30. Metallografisk slip av male adapter, polert tilstand. Hulkil og bruddflate vises. Indre overflate viser noe deformasjonstekstur. 50x forstørrelse.



Figur 31. Måling av hulkilradius i lysmikroskop. Radius er ca. 0,4 mm. 100x forstørrelse.

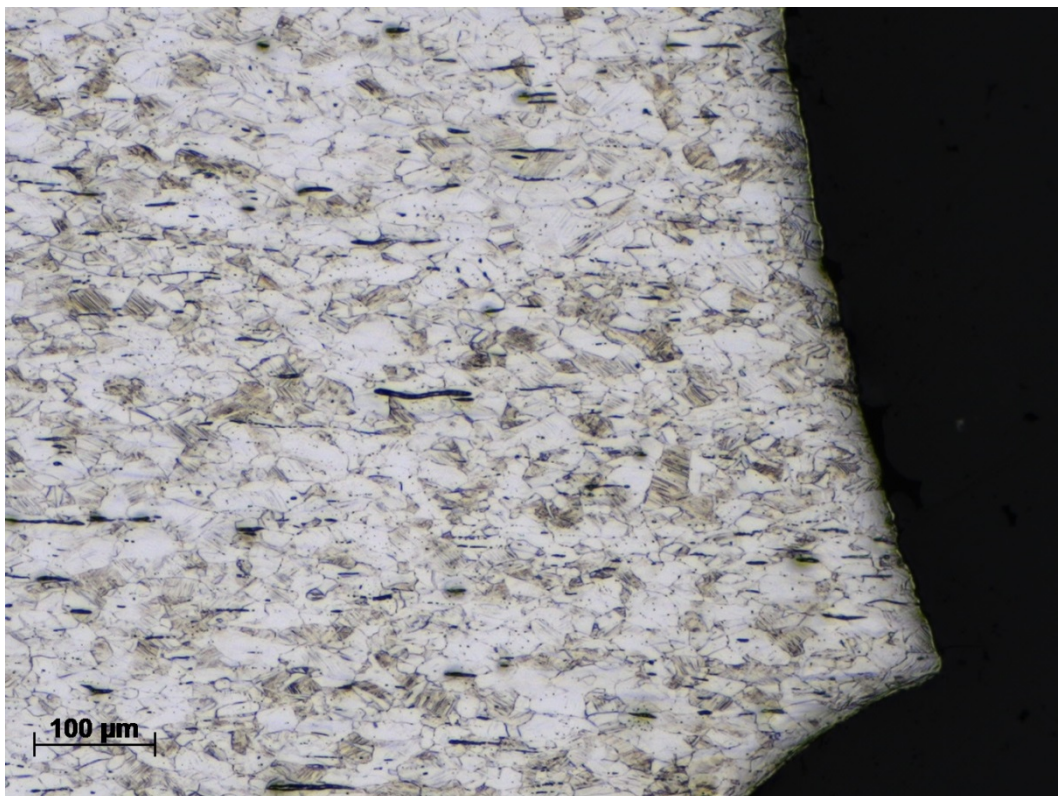


Figur 32. Polert tilstand, før etsing – ingen spesielle irregulariteter nær initieringsområde.



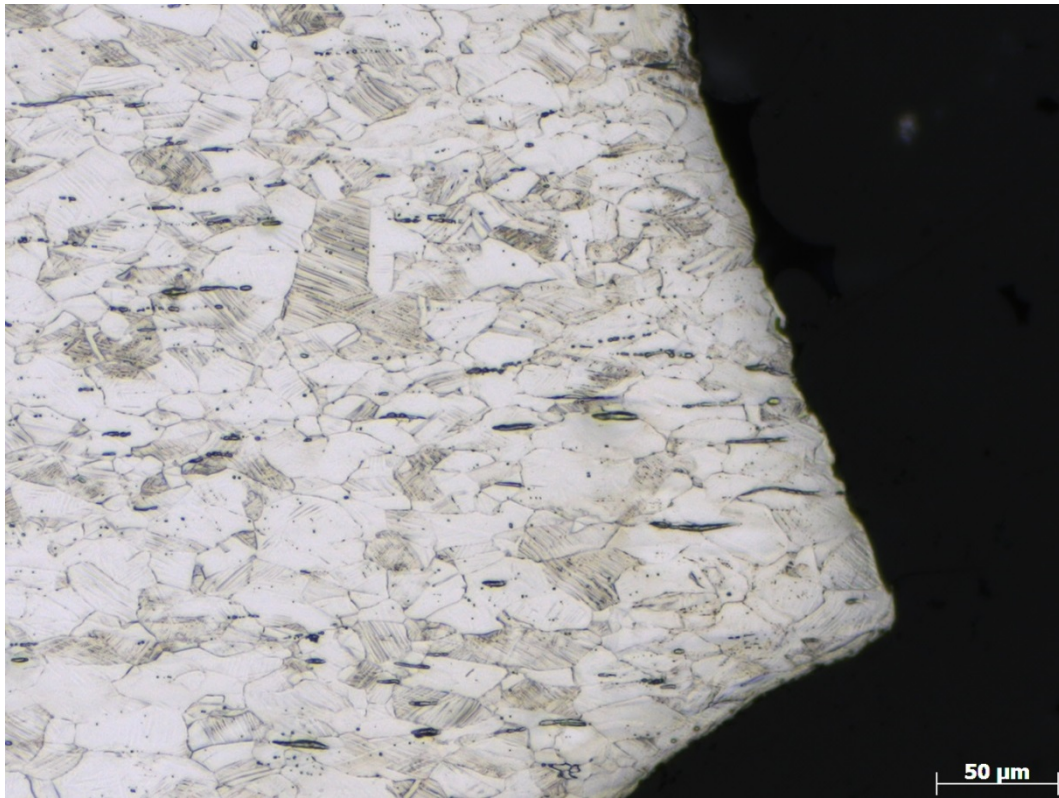


Figur 33. Polert tilstand: Noen opplinjerte innslutninger vises. 200x forstørrelse.

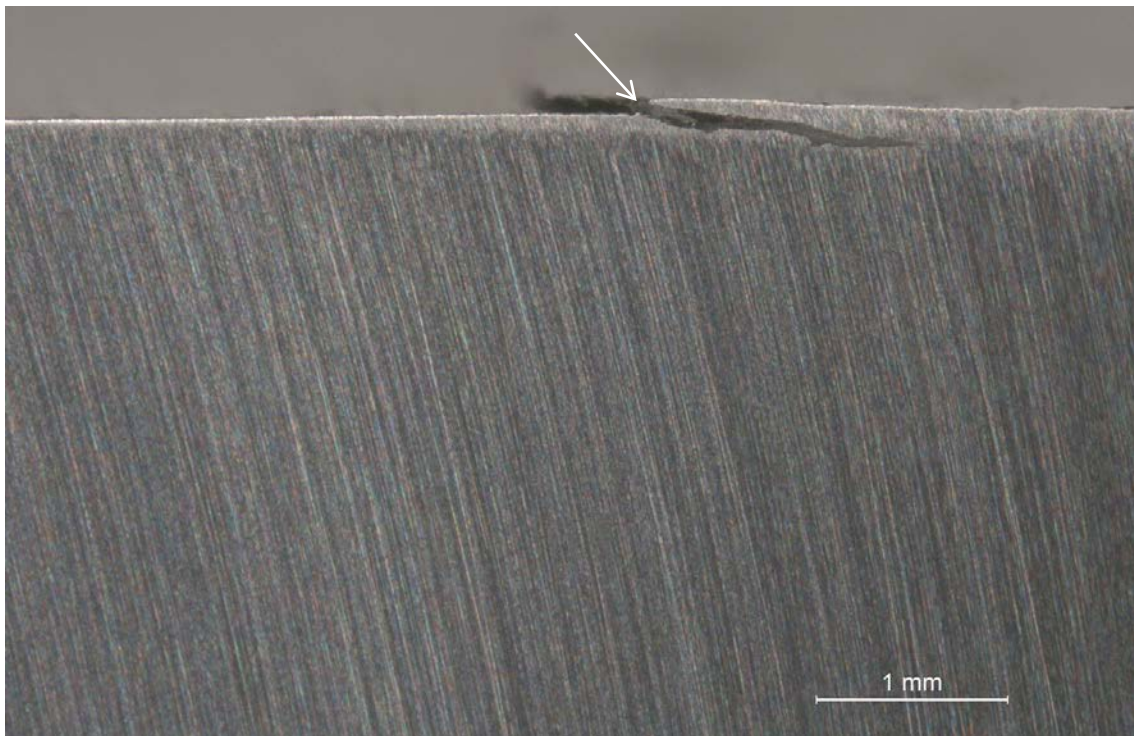


Figur 34. Etset tilstand (rotert 180°), 100x forstørrelse.

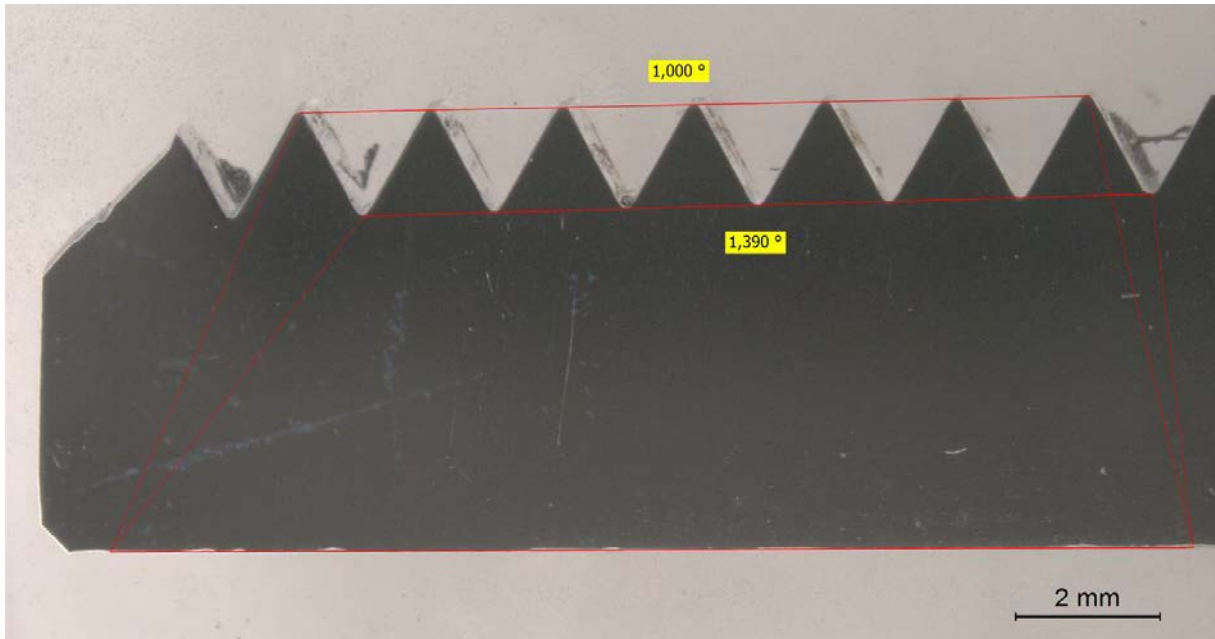




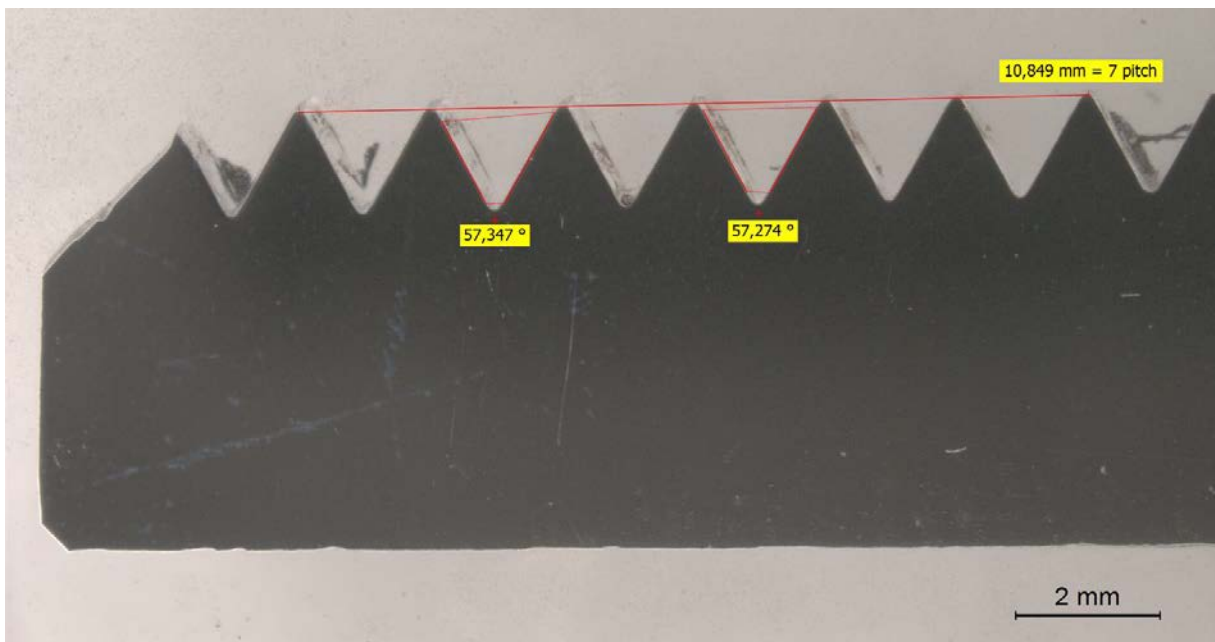
Figur 35. Etset tilstand (rotert 180°), 200x forstørrelse.



Figur 36. Slip av sprekkliknende defekt i ventilblokk. Defekten ligger i overflaten og er ca. 0,2 mm dyp. Forstørrelse ca. 40x.

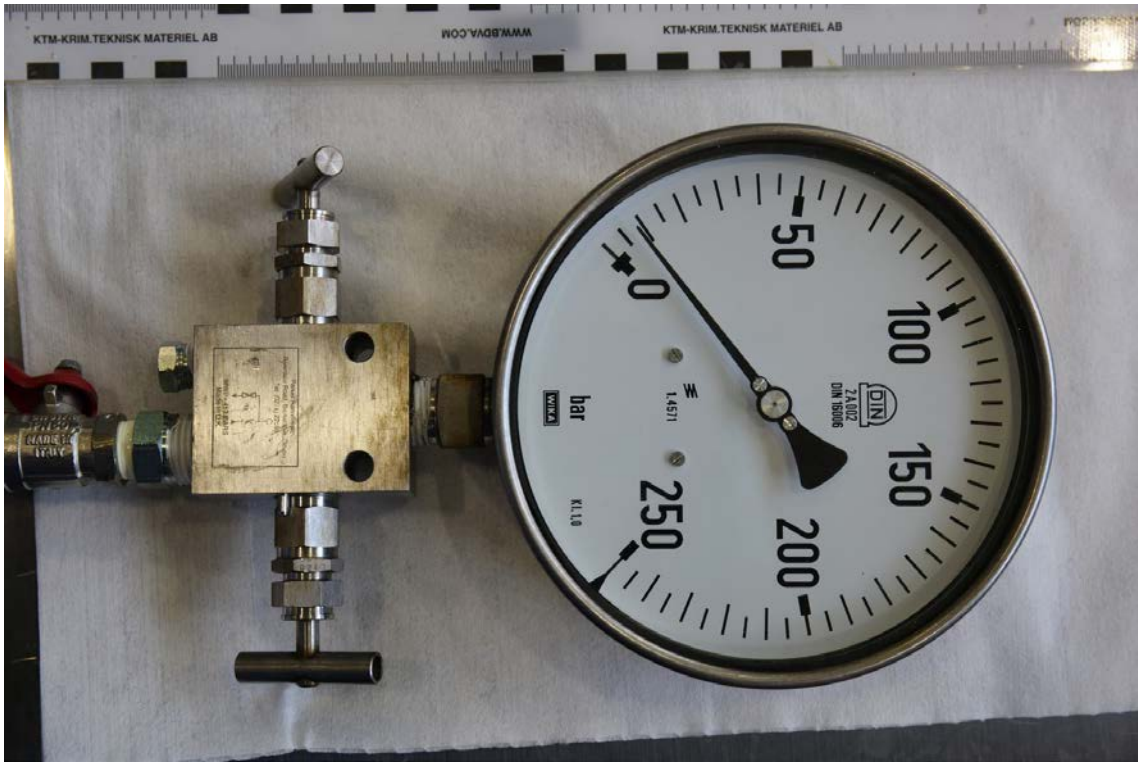


Figur 37. Male adapter. Måling av kon-vinkel med utgangspunkt i indre overflate.

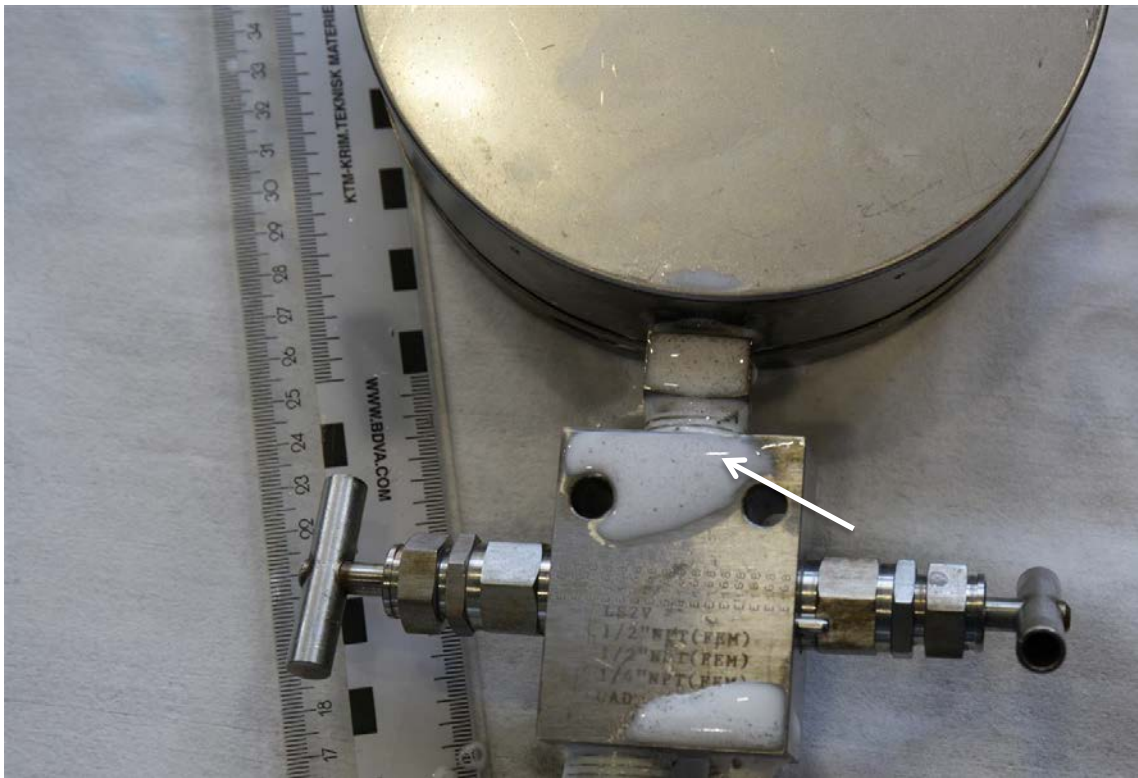


Figur 38. Male adapter. Måling av tannflanke-vinkel og gjengestigning.





Figur 39. Trykktesting med luft, ca. 7 bar



Figur 40. Bruk av lekkasjesøker på ventilblokk i område med sprekkindikasjon.



Figur 41. Trykktest med vann til ca. 135 bar. Ingen tegn til lekkasje i område med sprekkindikasjon.



Figur 42. Manometeret viste ca. 135 bar under trykktesten.



## 9 REFERANSER

/1/ Statoil A-2016-1 MMP L2; Granskningsrapport COA INV; Intern ulykkesgranskning;  
Gasslekkasje i Statpipe mottaksområde på Kårstø 8.-8. januar 2016



## APPENDIX A

---

### Modellering av egenfrekvenser. Animasjoner (video)





## About DNV GL

Driven by our purpose of safeguarding life, property and the environment, DNV GL enables organizations to advance the safety and sustainability of their business. We provide classification and technical assurance along with software and independent expert advisory services to the maritime, oil and gas, and energy industries. We also provide certification services to customers across a wide range of industries. Operating in more than 100 countries, our 16,000 professionals are dedicated to helping our customers make the world safer, smarter and greener.