

# Teknologikvalifikasjon av flensforbindelse for undervannsproduksjonssystemer

Maskinert fra smidd stang i dupleks rustfritt  
stål

**Toralv Tolo**  
**Andreas Skau Woldsdal**

Undervannsteknologi

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Olav Egeland, IPK

Medveileder: Ragnar Gjengedal, Høgskolen i Bergen  
Ørjan Fyllingen, Høgskolen i Bergen  
Majid Anvari, Aker Solutions

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for produksjons- og kvalitetsteknikk



## Forord

Denne masteroppgaven er en del av det toårige masterprogrammet *Undervannsteknologi - Drift og vedlikehold* ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU), Institutt for produksjon og kvalitetsteknikk (IPK). Det første året av mastergraden ble gjennomført i Trondheim (NTNU) og det andre året ved Høgskolen i Bergen (HiB). Oppgaven er et resultat av rundt 22 ukers arbeid våren 2014, og omhandler teknologikvalifikasjon av en flens maskinert fra smidd stang for undervannsproduksjonssystemer.

Arbeidet har i stor grad vært knyttet opp mot standardverk, tekniske rapporter og anbefalte praksiser, noe som har gitt nyttig lærdom å ta med videre i arbeidslivet. Det har vært givende å arbeide sammen om en større oppgave, og i tillegg har det vært interessant å få innsikt i nødvendige prosesser for kvalifisering av ny teknologi.

Vi vil rette en takk til vår veileder ved NTNU, Olav Egeland, som har bidratt til samarbeidet mellom NTNU og HiB. Videre vil vi takke våre tre veiledere Ragnar Gjengedal (HiB), Ørjan Fyllingen (HiB) og industriveileder Majid Anvari (Aker Solutions), for veiledningsmøter gjennom semesteret. Takk til avdelingsingeniørene Harald Moen og Nafez Mohammad Ardestani, og forskningstekniker Kjetil Gravelsæter for hjelp med fremstilling av prøvestykker og utførelse av strekkprøver.

Andreas Skau Woldsdal og Toralv Tolo

Bergen, Juni 2014





## Sammendrag

API Spec 17D (2011) spesifiserer at flenser for undervanns brønnhode- og juletreutstyr skal være smidd, dersom utstyret går inn under spesifikasjonsnivå PSL 3 eller PSL 3G. Videre spesifiseres det i ASTM A182/A182M (2013) at flenser skal være smidd så nær til form som praktisk mulig, og at flenser ikke skal maskineres direkte fra smidd stang.

Skal det være mulig å maskinere flenser direkte fra smidd stang, kreves det en kvalifikasjon av denne teknologien. En kartlegging av flensen avdekket tre nøkkelutfordringer som krever bevisførsel. Dette omfatter flensens resistans mot kombinasjoner av statiske laster, dynamiske laster og tidsavhengige degraderingsmekanismer. Hver av disse nøkkelutfordringene har en rekke underliggende usikkerheter.

Ekperimentelle forsøk er utført med formål å gi bevisførsel for flensens resistans mot kombinasjoner av statiske laster. Strukturanalyser er sentral ved slik bevisførsel, og det er derfor essensielt med gode materialdata. På bakgrunn av dette er det hentet ut strekkprøver fra to stangdimensjoner (Ø220/Ø250 mm) i dupleksmaterialet UNS S31803. Strekkprøver er gjennomført i langsgående og tverrgående retning, i ulike radielle posisjoner, samt ved temperaturer fra -60 til 200 °C. E-modul, Poissons tall, 0,2 % offset flytegrense, strekkfasthet, bruddforlengelse og kontraksjon er dokumenterte materialdata fra strekkprøvene. Resultatene er videre vurdert opp mot teori, krav fra standardverk, krav fra materialprodusenten, og tidligere arbeid med strukturanalyser av flenser.

Fra resultatene fremkommer det en tydelig trend med økende 0,2 % offset flytegrense fra kjernen til overflaten i stangen. Det er også tydelig anisotropi i stengene. Temperaturtestene viste endringer i E-modul, 0,2 % offset flytegrense, strekkfasthet og bruddforlengelse. Et interessant funn var en økning av bruddforlengelse ved senkede temperaturer ned til -60 °C.

Vurdert opp mot materialkrav fra standardverket viste stangmaterialet tilfredsstillende egenskaper uansett retning og posisjon, men med noen usikkerheter rundt temperaturklassen. Sammenlignet med materialprodusentens egne krav, viste en stor andel av prøvestykkene til stangdimensjonen Ø220 mm, verdier som er under minimumskravet for 0,2 % offset flytegrense i langsgående retning. Flere av disse strekkprøvene var også hentet fra områder i stangen, som basert på tidligere arbeid, vil tilsvare kritiske områder i flensen.



## **Abstract**

API Spec 17D (2011) specifies that flanges used for subsea wellhead and tree equipment shall be wrought if the equipment is defined with product specification level PSL 3 or PSL 3G. Additionally, ASTM A182/A182M (2013) specifies that flanges shall be forged as close as practicable to the specified shape and size, and that flanges shall not be machined directly from bar stock.

Usage of flange machined directly from bar stock will therefore require a qualification of the technology. An assessment of the flange identified three key challenges that require evidential actions. This includes capabilities of the flange under the combination of static loads, dynamic loads, and time dependent degradation mechanisms. Each one of these key challenges have underlying uncertainties.

With the purpose of providing evidence for the flange capability under the combination of static loads, several experimental actions have been performed. Structural analysis are an integral part of the required evidence, and therefore material data is essential. To provide the material data, tensile specimens have been retrieved from two different duplex bars (UNS S31803 Ø220/Ø250 mm). Tensile tests have been carried out in longitudinal and transverse direction, for different radial positions and for temperatures ranging from -60 to 200 °C. E-modulus, Poisson's ratio, 0,2 % offset yield strength, tensile strength, relative elongation and reduction in area are collected data. The results are further evaluated against theory, requirements from standards and the material producer, and previous work on structural analysis of flanges.

From the results, a visible trend with increasing 0,2 % offset yield strength from the core to the surface of the bar is shown. Both bars also show clear anisotropy. Tests at different temperatures shows clear variation for the mechanical data. An interesting find, was the increase in relative elongation with decreasing temperatures.

Evaluated against requirements from the standards, the bar material showed satisfactory properties, however, there are some uncertainties around the required temperature class. Compared with the material producers own requirements, several of the tensile tests performed for the Ø220 mm bar, yielded values below the requirement for 0,2 % offset yield strength in longitudinal direction. Several of these specimens were also retrieved from positions in the bar, which based on previous work, would correspond to critical areas of the flange.



# Innholdsfortegnelse

<b>Forord</b> .....	<b>iii</b>
<b>Sammendrag</b> .....	<b>v</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>vii</b>
<b>Symbolliste</b> .....	<b>xi</b>
<b>Forkortelser</b> .....	<b>xi</b>
<b>1 Innledning</b> .....	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn .....	1
1.2 Problemstilling og avgrensning .....	2
1.3 Metodebruk.....	3
1.4 Disposisjon .....	5
<b>2 Teoretisk grunnlag</b> .....	<b>7</b>
2.1 Kvalifisering av ny teknologi i henhold til DNV-RP-A203 .....	7
2.2 Dupleks rustfritt stål .....	12
2.3 Introduksjon til flensforbindelser .....	16
2.4 Tilvirkning av flenser .....	20
<b>3 Kvalifikasjonsbasis</b> .....	<b>27</b>
3.1 Klassifisering .....	28
3.2 Systembeskrivelse .....	29
3.3 Material- og designkrav (API Spec 17D/6A) .....	38
3.4 Tidligere arbeid.....	45
<b>4 Teknologikartlegging</b> .....	<b>49</b>
4.1 Hva er nytt? .....	49
4.2 Nøkkelfordringer og usikkerheter .....	51
4.3 Oversikt .....	53
4.4 Valgt kvalifiseringsområde.....	55

<b>5</b>	<b>Kvalifikasjonsplan og utførelse av kvalifikasjonsaktiviteter .....</b>	<b>59</b>
5.1	Mål og plan for strekkprøving .....	59
5.2	Utførelse av strekkprøving .....	72
5.3	Behandling av rådata .....	76
<b>6</b>	<b>Resultater fra kvalifikasjonsaktiviteter .....</b>	<b>85</b>
6.1	Materialegenskaper etter radiell avstand fra senter i stengene .....	85
6.2	Anisotropi i stengene .....	91
6.3	Materialegenskaper ved hevede og senkede temperaturer .....	96
<b>7</b>	<b>Evaluering av kvalifikasjonsbevis .....</b>	<b>103</b>
7.1	Resultater sammenlignet med krav til 60K-materiale .....	103
7.2	Resultater sammenlignet med produsentens egne materialkrav .....	105
7.3	Resultater vurdert opp mot tidligere arbeid med aksesymmetrisk modell .....	106
7.4	Observasjoner i stangdimensjonene Ø220 mm og Ø250 mm .....	109
7.5	Fremgangsmetode: behandling av rådata .....	111
7.6	Teknologiutfordringer .....	114
<b>8</b>	<b>Konklusjon.....</b>	<b>117</b>
	<b>Referanser .....</b>	<b>119</b>
	<b>Vedlegg .....</b>	<b>123</b>

## Symbolliste

$L_{radiell}$	- Radiell avstand fra senterlinje (flens og stang)
$\sigma_{ts}$	- Strekkfasthet
$\sigma_y$	- Flytegrense
$\sigma_{y,0,2}$	- 0,2 % offset flytegrense
$K_{1C}$	- Bruddseighet
$SI$	- Spenningsintensitet
$SI_b$	- Bøyespenningsintensitet
$S_T$	- Akseptert test spenningsintensitet
$S_m$	- Akseptert membran spenningsintensitet
$\tau$	- Skjærspenning
$\varepsilon_e$	- Tøyning målt med påmontert ekstensiometer (25 mm opprinnelig målelengde)
$\varepsilon_s$	- Tøyning målt med skrekkmaskinens avstand mellom grepene (32 mm opprinnelig lengde)

## Forkortelser

<b>AFLA</b>	Average Fatigue Limit in Air
<b>API</b>	American Petroleum Institute
<b>ASME</b>	American Society of Mechanical Engineers
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>CFL</b>	Corrosion Fatigue Limit
<b>DSS</b>	Duplex Stainless Steel
<b>FEA</b>	Finite Element Analysis
<b>HBW</b>	«H» for hardhet, «B» for Brinell, «W» for Wolfram (inntrykksmateriale)
<b>HISC</b>	Hydrogen Induced Stress Cracking
<b>HRC</b>	Rockwell C Hardness
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>PSL</b>	Production Specification Level
<b>QTC</b>	Qualification Test Coupon
<b>RTJ</b>	Ring Type Joint
<b>RWP</b>	Rated Working Pressure
<b>SCC</b>	Stress Corrosion Cracking
<b>UNS</b>	Unified Numbering System





# Kapittel 1

## Innledning

### 1.1 Bakgrunn

Flensforbindelser er en sentral komponent i rørsystemer. Statistikk fra Nordsjøen viser at 30 % av innrapporterte feil i undervanns rørledninger er relatert fittings eller flenser, hvorav 7 % av disse hendelsene førte til lekkasje (DNV-RP-F116, 2009). Olje- og gassindustrien er styrt av standardverk med formål om å sikre integriteten til utstyr og med dette oppnå høy sikkerhet. Det er fundamentalt at kravene som stilles i standardverkene støttes av god dokumentasjon og at de baserer seg på god praksis.

API Spec 17D (2011) og API Spec 6A (2010) definerer spesifikasjonsnivåene PSL 2, PSL 3 og PSL 3G for undervanns brønnhode- og juletreutstyr. Standardverkene stiller krav til at materialet skal være smidd dersom utstyret går inn under spesifikasjonsnivå PSL 3 eller PSL 3G.

Videre spesifiseres det i ASTM A182 (2013, s. 2) følgende om smidde flenser:

*«Materials shall be forged as close as practicable to the specified shape and size. Flanges of any type, elbows, return bends, tees and header tees shall not be machined directly from bar stock.»*

Flenser skal i henhold til standardverket være smidd så nær til form som praktisk mulig, og skal ikke maskineres direkte fra stangmateriale.

Standardverkene låser seg til bruk av én tilvirkningsmetode hvor flenser kun kan «smis til form», noe som eliminerer bruk av andre tilvirkningsmetoder som potensielt også kan gi produkter med tilfredsstillende integritet. Begrensninger i tilvirkningsmetoden av flenser begrenser også antall leverandører. Dersom flere tilvirkningsmetoder er tilgjengelig, kan dette potensielt gi økt konkurranse, redusert leveringstid og reduserte kostnader.

Bruk av nye metoder for fremstilling av allerede eksisterende produkter, kan anses som «ny teknologi». Implementering av ny teknologi, eller bruk av nye metoder og produkt, vil introdusere usikkerheter for utvikleren, fabrikanten, leverandøren, operatøren og sluttbrukeren.

Konsepter med kjent teknologi blir oftest valgt framfor teknologi med uprøvde elementer, selv om den nye teknologien kan gi nye forretningsmuligheter, bedre operasjonell drift og bedre økonomisk effektivitet (DNV-RP-A203, 2011, s. 6). Bruk av alternative tilvirkningsmetoder for en flens, krever bevisførsel for å begrense/fjerne disse usikkerhetene, slik at denne nye teknologien kan benyttes med en tiltro om at den utfører jobben som ønsket og planlagt.

## 1.2 Problemstilling og avgrensning

Det er ønskelig å undersøke mulighetene for å benytte seg av en API-flens maskinert fra smidd stang til undervanns brønnhode- og juletreutstyr. Det vil derfor være nødvendig å kartlegge bevisførsel som må inkluderes i en kvalifikasjon av et slikt produkt, som for undervannsinstallasjoner vil være kategorisert som «ny teknologi». Deler av kvalifikasjonsbevisene skal produseres gjennom materialtesting av stangmaterialet UNS S31803. Kvalifikasjonsbevisene skal til slutt vurderes opp mot relevante material- og designkrav.

På bakgrunn av dette er det i samråd med veilederne valgt å besvare følgende punkter:

- *Litteraturstudium:* Nødvendige steg og bevisførsel i en teknologikvalifisering av en flens maskinert fra smidd stang skal kartlegges. Dette innebærer en undersøkelse av hovedforskjellene mellom en flens «smidd til form» og «maskinert fra smidd stang», en kartlegging av nøkkelutfordringer og usikkerheter for den nye teknologien, samt en kartlegging av aktuelle material- og designkrav fra standardverk.
- *Eksperimentelle forsøk:* Basert på litteraturstudiet skal materialtester designes og gjennomføres for to ulike stangdimensjoner av dupleksmaterialet UNS S31803. Materialtestene skal være deler av bevisførselen som er nødvendig for å kvalifisere den nye teknologien.
- *Evaluerings av resultater:* Resultater fra eksperimentelle forsøk skal vurderes opp mot aktuell litteratur, forventede verdier og aktuelle krav fra standardverk.

Oppgaven avgrenses til flensdesignet «6BX sveiseflens med hals», som er et flensdesign beskrevet gjennom standardverkene API Spec 17D (2011) og API Spec 6A (2010). Videre avgrenses oppgaven til produktspesifikasjonsnivåene PSL 3/3G og trykklassen 69,0 MPa.

### **1.3 Metodebruk**

Metoden benyttet for å møte oppgavens problemstilling kan deles inn to deler; litteraturstudium og eksperimentelle forsøk.

Litteraturstudiet innebærer i hovedsak gjennomgang av relevante standardverk for flenser til undervanns produksjonssystemer, kartlegging av nøkkelutfordringer og usikkerheter, tidligere arbeid, og teori. Relevante standardverk er beskrevet under i *Kapittel 1.3.1*. En tabell med sentrale litteratursøk er å finne i *Vedlegg A*.

Fremgangsmetoden for det eksperimentelle forsøkene fremkommer i *Kapittel 5*.

#### **1.3.1 Benyttede standardverk**

En sentral del av informasjonsinnhenting har vært å sette seg inn i relevante standarder. Kravene som stilles til undervannsflenser i forbindelse med brønnhode- og juletreutstyr fremkommer i hovedsak fra standardverkene API Spec 6A (2010) og API Spec 17D (2011). Standardverkene refererer også videre til andre standardverk. Det er viktig å merke seg forskjellen mellom disse standardverkene og hvordan de arbeider sammen. API Spec 6A (2010) er et standardverk med spesifikasjoner gjeldende for brønnhode- og juletreutstyr, mens API Spec 17D (2011) gjelder design og operasjon av undervanns brønnhode- og juletreutstyr. API Spec 17D er laget slik at den skal følge majoriteten til API Spec 6A ved fabrikasjon og testing, men i tillegg belyses viktige designforskjeller i et nedsunken marint miljø (FMC Technologies, 2012).

Presentasjon av relevant informasjon fra standardverkene i denne oppgaven er primært oppsummert med oversettelse til norsk, med noen uttak hvor det er valgt å beholde engelsk tekst. Dette er gjort for å skape en lesbar og oversiktlig tekst. Det anbefales at leseren ved videre arbeid oppsøker de refererte standardverkene på sidetallene som er spesifisert.

API Spec 6A (2010) viser til standardverket ASTM A370 (2012) ved utførelse av strekkprøving. ASTM E21 (2009) er benyttet som støttende retningslinjer for prøvestykkene som ble utført ved hevede temperaturer, og ISO 15579 (2000) for retningslinjer ved senkede temperaturer. Beregning av E-modul er basert på ASTM E111 (2010), og beregningen av Poissons tall baserer seg på retningslinjer funnet i ASTM E132 (2010).

Boken «*Tensile Testing*» av J.R Davis (2004) er benyttet som støttende litteratur under planlegging av strekkprøvene og behandling av rådata. Boken gir utfyllende informasjon rundt aspekter ved strekkprøving, og refererer videre til relevante standardverk.

Tabell 1-1 viser en oversikt av standardverkene benyttet i rapporten. Merk at API Spec 17D (2011) er identisk med ISO 13628, og at API Spec 6A (2010) er planlagt å være identisk med ISO 10423 i standardens neste utgave.

**Tabell 1-1: Relevante standarder benyttet i oppgaven.**

<b>Standard</b>	<b>Navn</b>
API Spec 6A (2010)	<i>Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment</i>
API Spec 17D (2011)	<i>Design and Operation of Subsea Production Systems—Subsea Wellhead and Tree Equipment</i>
ISO 15156 (2009)	<i>Materials for use in H<sub>2</sub>S-containing environments in oil and gas production</i>
ASTM A370 (2012)	<i>Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products</i>
ASTM E111 (2010)	<i>Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus</i>
ASTM E132 (2010)	<i>Standard Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature</i>
ASTM E21 (2009)	<i>Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials</i>
ISO 15579 (2000)	<i>Metallic materials - Tensile testing at low temperature</i>

## 1.4 Disposisjon

Det er utført litteratursøk med formål å finne praksiser benyttet ved teknologikvalifisering i industrien. Et viktig funn var DNV-RP-A203 (2011) «*Qualification of New Technology*», en anbefalt praksis for teknologikvalifisering rettet mot blant annet undervannssystemer. Retningslinjene i den anbefalte praksisen er benyttet som basis for å oppnå en systematisk fremgangsmetode i kvalifiseringen.

DNV-RP-A203 (2011) er tilpasset et bredt spekter av utstyr, systemer og fagfelt, og det har derfor vært nødvendig å velge ut elementer fra de ulike stegene som passer med problemstillingens omfang. Nærmere beskrivelse av typiske steg under en teknologikvalifisering er å finne i *Kapittel 2.1 Kvalifisering av ny teknologi (s.7)*.

Videre beskrives oppgavedisposisjonen som baserer seg på fremgangsmetoden i DNV-RP-A203 (2011).

*Kapittel 2 Teoretisk grunnlag* gir en presentasjon av relevant teori med hensikt å gi et godt grunnlag for å forstå valg, gjennomførte kvalifikasjonsaktiviteter, og drøftinger i oppgaven.

*Kapittel 3 Kvalifikasjonsbasis* inkluderer en systembeskrivelse, klassifisering, og material- og designkrav for standardisert 6BX-sveiseflens med hals, samt tidligere arbeid. Kvalifikasjonsbasis skal gi et felles sett med kriterier og spesifikk informasjon gjeldende for en standardisert 6BX-flens. Kvalifikasjonsaktiviteter og kvalifikasjonsbevis vurderes opp mot informasjon presentert i dette kapittelet.

*Kapittel 4 Teknologikartlegging* kartlegger elementene som involverer «ny teknologi», og har som hovedmål å indentifisere nøkkelutfordringer og usikkerheter ved å maskinere en flens ut stangmateriale. En oppsummering av nøkkelutfordringene presenteres i figurform, hvor nøkkelutfordringer brytes ned til underliggende usikkerheter.

*Kapittel 4.4 Valgt kvalifiseringsområde* avgrensner videre arbeid til én av nøkkelutfordringene kartlagt i *Kapittel 4*.

*Kapittel 5 Kvalifikasjonsplan* presenterer fremgangsmetoden for de eksperimentelle forsøkene (kvalifikasjonsaktiviteter) gjennom spesifisering av mål, plan for uthenting av prøvestykker fra stangdimensjonene Ø220 mm og Ø250 mm, fremstilling av prøvestykker, benyttet utstyr, testparametere og prosedyrer, og behandling av rådata.

*Kapittel 6 Resultater fra kvalifikasjonsaktiviteter.* Presentasjon av resultater fra de eksperimentelle forsøkene, og en generell evaluering av kvalifikasjonsbevisene.

*Kapittel 7 Evaluering av kvalifikasjonsbevis.* En oppsummering av presenterte resultater hvor viktige funn og avvik drøftes nærmere opp mot materialkrav fra standardverk, produsentens egne krav, kritiske områder fra en strukturanalyse, og teorien. I tillegg drøftes funnene fra teknologikartleggingen og fremgangsmetoden benyttet under de eksperimentelle forsøkene.

# Kapittel 2

## Teoretisk grunnlag

Dette kapittelet presenterer relevant teori med den hensikt å gi et grunnlag for å forstå valg, gjennomførte kvalifikasjonsaktiviteter, og drøftinger i oppgaven.

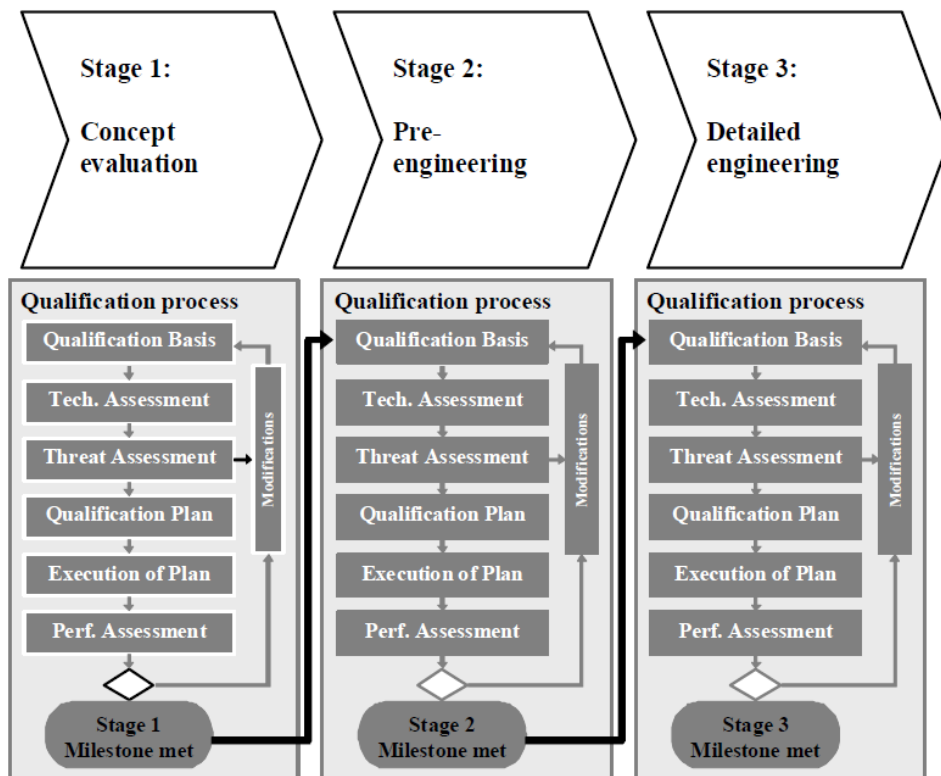
### 2.1 Kvalifisering av ny teknologi i henhold til DNV-RP-A203

DNV-RP-A203 (2011) presenterer en systematisk fremgangsmetode for kvalifisering av ny teknologi, som skal sørge for at teknologien fungerer pålitelig innenfor spesifiserte grenser. Fremgangsmetoden er anvendelig for komponenter, utstyr og sammensatte systemer, som kan defineres som ny teknologi innenfor olje- og gassindustrien.

Fremgangsmetoden skal sørge for at det er sporbarhet gjennom hele prosessen. Ønskede resultater fra teknologikvalifikasjonen er dokumentasjon på at den nye teknologien møter spesifiserte krav i det tiltenkte anvendelsesområdet. Bevis skal være nøye dokumentert og sporbarheten må være god (DNV-RP-A203, 2011, s. 12).

Generelt i en teknologikvalifisering er det viktig å identifisere alle elementene ved teknologien som hittil er ukjent. De ukjente elementene representerer den mest signifikante usikkerheten i den nye teknologien. Usikkerheten kan være assosiert med teknologien selv, dens tiltenkte bruk eller tiltenkt operasjonsmiljø. En kvalifikasjon skal fokusere på disse ukjente elementene (DNV-RP-A203, 2011, s. 12).

Når ny teknologi skal utvikles, vil den alltid gå gjennom flere faser før den er klar til bruk i sitt tenkte anvendelsesområde. Kvalifiseringsprosessen kan implementeres under hele utviklingen til teknologien, både fra starten av eller underveis. Hovedformålet er at kvalifiseringsprosessen skal gi kunnskap og fjerne usikkerheter som kommer opp i de forskjellige fasene under teknologiutviklingen. Teknologiutvikling er vanligvis en iterativ prosess, og modifikasjoner fører ofte til nye usikkerheter som må fjernes gjennom kvalifikasjonsaktiviteter. *Figur 2-1* illustrerer hvordan en kvalifiseringsprosess kan implementeres i de ulike fasene i en teknologiutvikling (DNV-RP-A203, 2011, s. 13-15).

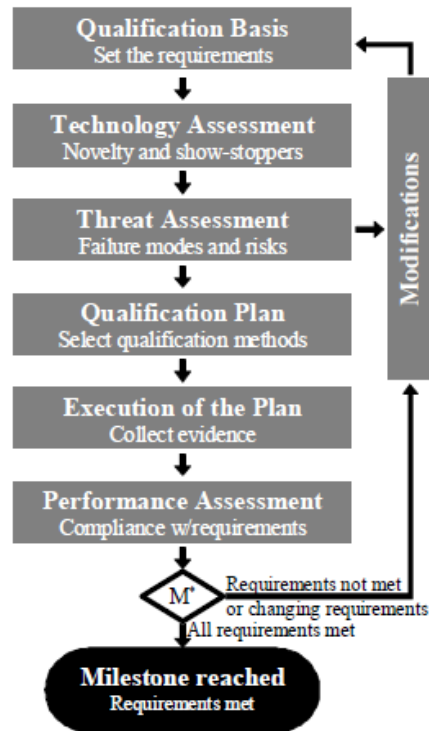


*Figur 2-1: Illustrasjon av kvalifiseringsprosessen gjennom flere faser av en teknologiutvikling (DNV-RP-A203, 2011, s. 15).*

### 2.1.1 Hovedsteg i kvalifisering av ny teknologi

DNV-RP-A203 (2011) beskriver en iterativ fremgangsmetode bestående av seks steg; «kvalifikasjonsbasis», «teknologikartlegging», «trusselvurdering», «kvalifikasjonsplan», «utførelse av kvalifikasjonsplan» og «evaluering av kvalifikasjonsbevis». Figur 2-2 illustrerer disse stegene og hvordan iterasjon er en sentral del av prosessen. Videre beskriver underkapitlene de ulike stegene i teknologikvalifiseringen. Ønskes det en dypere forståelse av stegene, anbefales det å oppsøke DNV-RP-A203 (2011).





M\* = Milepæl nådd (Målene nådd)?

Figur 2-2: Hovedsteg i kvalifisering av ny teknologi (DNV-RP-A203, 2011, s. 17).

### 2.1.1.1 Kvalifikasjonsbasis

Kvalifikasjonsbasisen skal gi et felles sett med kriterier som alle kvalifikasjonsaktiviteter og avgjørelser skal vurderes mot. Dette betyr at teknologien må spesifiseres, og det inkluderer definering av hvordan teknologien skal brukes, i hvilke miljø den skal benyttes, nødvendige funksjoner, akseptkriterier, og yteevne gjennom livssyklusen. Teknologien skal være entydig og fullstendig beskrevet gjennom tekst, kalkulasjoner, tegninger og andre relevante dokumenter. Det er viktig at teknologispesifikasjonen identifiserer alle funksjonelle krav, begrensninger, kritiske parametere og faser gjennom levetiden til teknologien (DNV-RP-A203, 2011, s. 18).

DNV-RP-A203 (2011) lister flere områder som skal kartlegges under steget «kvalifikasjonsbasis», som:

- Generell systembeskrivelse.
- Systemfunksjoner og funksjonelle begrensninger.
- Klassifisering og/eller myndighetskrav.
- Standarder og industripraksiser, eller deler av dem som brukes for kvalifisering.
- Allerede eksisterende bevis som hevder å støtte kvalifiseringen.

### **2.1.1.2 Teknologikartlegging**

Etter at kvalifikasjonsbasisen er fastsatt, skal det utføres en «teknologikartlegging». Dette steget bruker kvalifikasjonsbasisen som informasjonstilførsel, og gir en oversikt over elementene som inngår i den nye teknologien. Denne oversikten benyttes videre til å identifisere hvilke elementer som er ukjent teknologi, samt disse elementenes nøkkelutfordringer og usikkerheter. Oppsummert utføres teknologikartleggingen gjennom følgende tre understeg (DNV-RP-A203, 2011, s. 19-21):

- **Analyse av teknologisammensetning:** Her brytes teknologien ned til passende elementer, hvor det startes med funksjoner på systemnivå og ender med mindre elementer, som for fysisk teknologi vil være elementer og funksjoner på komponentnivå. Det er også viktig å få med grensesnittet mellom elementene.
- **Teknologikategorisering:** Siden ny teknologi typisk er utviklet fra allerede eksisterende teknologi, er normalt bare noen av elementene ukjent teknologi. Usikkerhetene ligger hovedsakelig i disse elementene og det er hensiktsmessig å fokusere på områdene hvor usikkerheten er størst. DNV-RP-A203 (2011) foreslår et kategoriseringssystem, hvor elementene gis en karakter fra 1 til 4 etter i hvor stor grad teknologien er ukjent. Karakter 1 betyr at teknologien er kjent, mens karakterene 2 til 4 krever en økende grad av bevisføring.
- **Identifikasjon av nøkkelutfordringer og usikkerheter**

### **2.1.1.3 Trusselvurdering**

Det tredje steget, «trusselvurdering», har som mål å identifisere relevante feilmoder med underliggende feilmekanismer for de usikre teknologielementene, samt vurdere tilhørende risiko. De tidligere stegene fungerer som informasjonstilførsel, og som resultat av dette steget, fremkommer et register over alle identifiserte feilmoder med tilhørende risikovurdering. Dette gir et grunnlag for å definere og prioritere aktiviteter i teknologikvalifikasjonsplanen. Oppsummert gjennomføres trusselvurderingen hovedsakelig gjennom fire understeg; identifikasjon av feilmoder, konsekvens av en feilmode, sannsynlighet for en feilmode, og tilhørende risikovurdering basert på konsekvens og sannsynlighet for en gitt feilmode (DNV-RP-A203, 2011, s. 22-27).

### **2.1.1.4 Kvalifikasjonsplan**

Kvalifikasjonsplanen skal utvikles slik at den gir bevis som gjør det mulig å håndtere de kritiske feilmodiene som er identifisert i trusselvurderingen. Utviklingen av denne planen skal være en iterativ prosess. En rekke kvalifikasjonsmetoder kan benyttes for å skaffe de nødvendige

bevisene. Eksempler på noen metoder som kan benyttes, både selvstendig og kombinert, er listet under (DNV-RP-A203, 2011, s. 28):

- Analyse av tidligere dokumenterte erfaringer med lignende utstyr og driftstilstander.
- Analytiske metoder som håndbokløsninger, metoder fra eksisterende standarder, empiriske korrelasjoner og matematiske formler.
- Numeriske metoder som FEM-analyser, korrosjonsmodeller o.l.
- Eksperimentelle metoder.

#### **2.1.1.5 Utførelse av kvalifikasjonsplan**

Gjennomføringen av kvalifikasjonsplanen representerer vanligvis den største kostnaden ved teknologikvalifiseringsprosessen. Det er også vanligvis det steget som er mest tidkrevende. Det er derfor viktig at kvalifikasjonsaktivitetene som utføres i dette steget er nøye valgt og godt planlagt, slik at tiden og ressursene som legges ned gir god avkastning. Resultatet fra dette steget skal være dokumentering av ytelsesmarginer for de kritiske feilmodiene (DNV-RP-A203, 2011, s. 34).

Utførelsen av kvalifiseringsplanen inneholder følgende steg:

- Utførelse av alle aktivitetene i teknologikvalifiseringsplanen.
- Samle og dokumentere data fra de forskjellige kvalifikasjonsaktivitetene.
- Sikre sporbarhet til innsamlet data.
- Fastslå ytelsesmarginer for feilmodiene.

#### **2.1.1.6 Evaluering av kvalifikasjonsbevis**

Dette er det siste steget i kvalifikasjonsprosessen, og formålet er å vurdere kvalifikasjonsbevisene opp mot krav fastsatt i kvalifikasjonsbasisen. Målet er at usikkerheter og risiko forbundet med den nye teknologien er redusert til et akseptabelt nivå gjennom teknologiens livssyklus. Kravene som er satt i kvalifikasjonsbasisen skal være oppnådd. Ytelsesmarginer funnet under kvalifikasjonsaktiviteter blir da sammenligningsgrunnlaget. Skulle man konkludere med at noen de funksjonelle kravene til den nye teknologien ikke er oppnådd, kan modifikasjoner og videre kvalifikasjonsaktiviteter identifiseres og igangsettes. Dette kan være innstramming av driftsbetingelser, eller nye inspeksjons- vedlikeholds-, og reparasjonsstrategier. Skulle slike endringer likevel ikke gjøre den nye teknologien mulig, har teknologikvalifisering feilet. (DNV-RP-A203, 2011, s. 26).

## 2.2 Dupleks rustfritt stål

Rustfritt stål er en jernbasert legering som inneholder mer enn 10,5 % krom. Det finnes en rekke grupperinger av rustfritt stål hvor det skilles mellom legeringens egenskaper (Schweitzer, 2003).

«AISI numbering system» og «Unified Numbering System» (UNS) er klassifiseringssystemer utviklet av ASTM (American Society for Testing and Materials) og SAE (Society of Automotive Engineers) for systematisering av kommersielle metaller og legeringer. Rustfritt stål kan deles inn i sju grunnleggende familier basert på materialets metallstruktur, hvorav tre av disse er; ferrittisk, austenittisk, og dupleks (ferrittisk og austenittisk) (Schweitzer, 2003).

Det karakteristiske for dupleks rustfritt stål, herav navngitt DSS (eng. «duplex stainless steel»), er dens mikrostruktur som består av to faser, austenitt og ferritt, og normalt anvendes begrepet når begge fasene er representert med en andel over 30 %. Nyere dupleks-stål har typisk en mikrostruktur med 50 % volum austenitt i FCC-struktur, og 50 % volum ferritt i BCC-struktur (Gunn, 1997, s. 1-24).

Rundt størkningstemperaturen til DSS vil materialet først ha en 100 % ferritt-fase. Fra en temperatur rundt 1300 °C, vil austenitt kunne dannes i korn grensene til ferritten under sakte nedkjøling til romtemperatur, og legge seg som «øyer» i ferritten. Skal dette forekomme må de diffunderende legeringsadditivene bidra med transformeringen av ferritt til austenitt, og i denne prosessen brukes austenitt-stabilisatorer (nikkel, mangan, karbon og nitrogen) som konsentrerer seg i austenitten, og ferritt-stabilisatorer (krom, molybden og silikon) som konsentreres i ferritten (Davis, 1994).

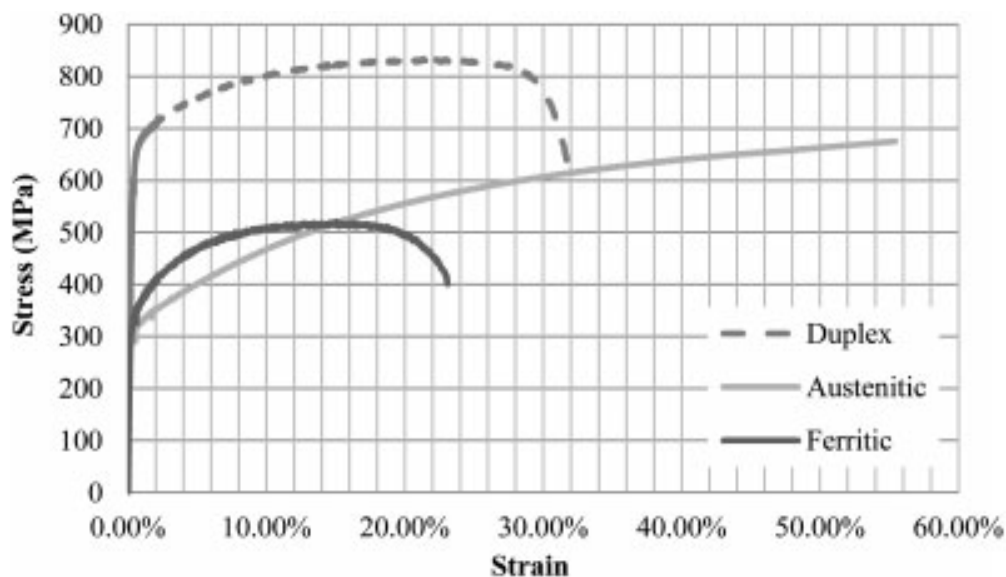
Sammenlignet med austenittisk stål har DSS økt resistans mot korrosjon, og da spesielt mot SCC (Stress Corrosion Cracking) forårsaket av klorid, og en korrosjonsbestandig mikrostruktur etter sveising. De nevnte egenskapene gjør at duplekslegeringer med 22 % og 25 % krom i stor utstrekning er brukt i applikasjoner som manifolder og juletrær under vann (Fisher et al., 2002, s. 35).

Bruk av DSS har flere fordeler, men det er likevel viktige faktorer som må tas i betraktning dersom materialet skal brukes under vann. Fisher et al. (2002) legger frem at HISC (Hydrogen Induced Stress Cracking) er en feilmekanisme som står for en stor del av innrapporterte feil ved kilsveising av DSS-materialer. Grunnen til dette er kombinasjon av høye lokale spenninger i tillegg til en uønsket mikrostruktur med høy andel ferritt som kan forekomme under en slik sveis.

Anvendelsesområdet til DSS begrenser seg ofte til temperaturer under 280 °C for strukturer uten sveis, mens sveisede strukturer begrenser seg til omlag 250 °C. Grunnen til dette er dens høye legeringsinnhold og andel ferrittstruktur gjør at DSS er utsatt for sprøhet og tap av mekaniske egenskaper, spesielt slagseighet, når den utsettes for høye temperaturer over lengre tid slik at ødeleggende faser oppstår (Davis, 1994).

### 2.2.1 Fysiske egenskaper

DSS består av både ferritt og austenitt, og dette medfører at egenskapene ligger ett sted mellom egenskapene til et ferrittisk stål og et austenittisk stål. Den har høyere slagseighet enn et stål bestående av ferritt, i tillegg til at den har høyere flytegrense enn et stål bestående av austenitt (Schweitzer, 2003). *Figur 2-3* viser en sammenligning av spenning-tøyningskurvene til et ferrittisk-, austenittisk- og dupleks rustfritt stål. Lav termisk ekspansjonskoeffisient er en viktig fysisk egenskap for dupleksmaterialer, og dette gjør at stålet egner seg til anvendelse hvor den utsettes for termiske sykluser. Ferrittfasen gjør at stålet har en grad av magnetisme, men dette er ubetydelig og svekker ikke maskineringsmulighetene (Gunn, 1997, s. 56).



*Figur 2-3: Spenning-tøyningskurve for UNS S43000(ferrittisk), UNS S30400(austenittisk) og UNS S31803(dupleks) (Arrayago, Real, & Mirambell, 2013)*

#### 2.2.1.1 Karakteristikker under strekking

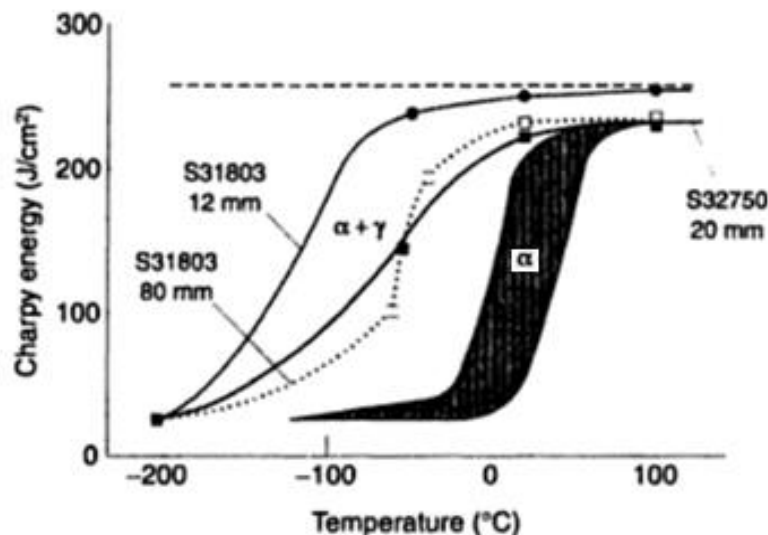
Av de mekaniske egenskapene til DSS er spesielt flytegrensen vesentlig å trekke fram, og sammenlignet med austenittisk stål er den normalt dobbelt så høy. Dette kombineres i tillegg med høy strekkfasthet og en bruddforlengelse over 25 %. Denne kombinasjonen av egenskaper kan gjøre DSS til et rimeligere valg med tanke på at resulterende godstykkelse vil være mindre enn for et austenittisk stål, til tross for dens høye kilopris (Gunn, 1997, s. 57).

### 2.2.1.2 Hardhet

Skal materialet godkjennes for bruk i sur service stilles det i ISO 15156 (2009) krav om at hardheten til materialet skal ha en maksimalverdi mellom 28 og 34 Rochwell C (HRC), alt etter type legering. Generelt er dupleks rustfritt stål under disse grensene etter *gløding* (solution annealing), men etter kaldbearbeiding og utfellinger av intermetalliske faser kan det være at dette kravet ikke tilfredsstilles (Gunn, 1997, s. 63).

### 2.2.1.3 Slagseighet

DSS har en slagseighet som ligger mellom verdiene til et ferrittisk og et austenittisk materiale når temperaturen er svært lav ( $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Sammenlignet med et austenittisk stål vil DSS oppnå høyere slagseighet for temperaturer rundt  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . *Figur 2-4* viser hvordan slagseighet påvirkes av temperaturen og tykkelsen til materialet. Avlesning av grafen ved  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  viser en slagseighet rundt 100 J for DSS, mens det for austenittisk stål har en signifikant lavere verdi. Dette gjelder for anløpet stål som ikke har vært gjennom en sveiseprosess. Her er det viktig å presisere at det er variasjoner alt etter komposisjonene til legeringene og behandlingen materialet har fått. I figuren er « $\alpha$ » et symbol for austenitt og « $\gamma$ » er symbolet for ferritt. Området som er svart representerer verdier for austenittstål, mens område med symbolene  $\alpha$  og  $\gamma$  representerer dupleks-stål. Utfellinger av intermetalliske faser, som sigma- og chifase, gir signifikant redusert slagseighet (Gunn, 1997, s. 64-65).



*Figur 2-4: Charpy-energi versus temperatur for ulike typer rustfritt stål (Gunn, 1997, s. 64).*

### 2.2.2 Utmattingsegenskaper

Resultater av roterende bøye-tester av polerte prøvestykker indikerer at utmattingsgrensen for alle typer rustfrie stål ligger rundt 50% av materialets strekkfasthet. Markedets kommersielle materialer viser varierende resultater når de utsettes for marint miljø, hvor noen av materialene opplever reduserte egenskaper når materialet utsettes for korrosjon. Under betraktning av utmattingsegenskaper i korrosive miljøer brukes begrepet «corrosion fatigue limit (CFL)». Noen duplex og austenittisk stål har en CFL som er omtrent lik utmattingsgrensen i luft (AFLA = Average Fatigue Limit In Air), mens andre har CFL som kan være  $0,4 \times AFLA$ , eller  $0,2 \times \sigma_{ts}$ , hvor  $\sigma_{ts}$  er materialets strekkfasthet (Gunn, 1997, s. 67).

Utmattingslevetiden er sterkt avhengig av korrosjonsresistansen i det utsatte miljøet, og under valg av materiale må man sørge for at materialet har tilstrekkelig korrosjonsresistans i det aktuelle miljøet. I de fleste applikasjoner har DSS framragende utmattingsegenskaper (Gunn, 1997, s. 70).

### 2.2.3 Maskinerbarhet

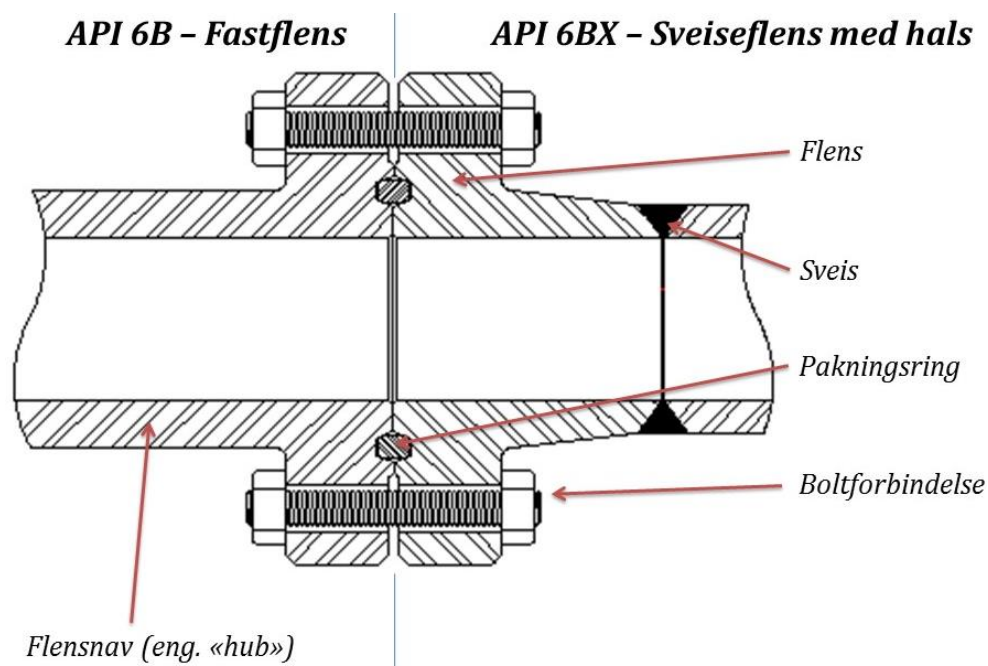
Maskinerbarheten er materiales egnethet for skjærende bearbeiding (Norsk Stålforbund, 2000). Dette omfatter flere ulike operasjoner inkludert dreining, boring, skjæring og gjenging. Maskinerbarheten til DSS er sterkt avhengig av legeringsinnhold, spesielt nitrogen og molybden, hvor et økt innhold fører til en signifikant reduksjon av maskinerbarhet (Gunn, 1997, s. 52). DSS er generelt mer krevende å maskinere sammenlignet med konvensjonelle austenittiske stålklasser, grunnet dens høye hardhet (Outokumpu, 2013, s. 8).

## 2.3 Introduksjon til flensforbindelser

Dette delkapittelet skal gi en generell introduksjon til flensforbindelser som benyttes i forbindelse med undervannsproduksjonssystemer. En nærmere beskrivelse av designet til flensen som er betraktet i problemstillingen, en API 6BX-sveiseflens med hals (eng. «welding neck flange»), er å finne i *Kapittel 3.2.1 Flensforbindelsen* (s. 29).

Boltede flensforbindelser er en ringformet anordning som brukes som et alternativ til andre skjøtemetoder som klemmer, sveiser og mekaniske skjøter (Bai & Bai, 2010, s. 683). Fordelen med en flensforbindelse kontra er en sveiseforbindelse er friheten til modifikasjon av det sammensatte systemet. Flensforbindelser kan lett monteres og demonteres, noe som gjør inspeksjon, vedlikehold og utskiftning lettere. En flensforbindelse velges ofte foran en gjengeforbindelse fordi den er billigere og har bedre pålitelighet, spesielt ved større dimensjoner. Flenser blir typisk brukt til skjøting av rør, ventiler, mekanisk utstyr eller andre integrerte deler i et system (Parisher & Rhea, 2012).

API Spec 17D (2011, s. 48) stiller krav til at flenskoblinger som er tiltenkt undervanns kompletteringsutstyr skal være av typen «ring type joint» (RTJ). Primært består en slik kobling av tre komponenter; en pakningsring av metall, bolter (med mutter), og selve flensen. Benyttes en sveiseflens med hals, består en slik flenskobling også av en sveis. En typisk flensforbindelse av denne typen er vist i *Figur 2-5*.



*Figur 2-5: Illustrasjon av en flensforbindelse bestående av to flenshalvdeler: 6B-fastflens (venstre) og 6B-sveiseflens med hals (høyre) (WOODCO USA, 2013).*



Pakningsringen skal sammen med kompresjonskrefter fra boltene sørge for tilstrekkelig tetning mellom flenshalvdelene. Under tilstramming av bolter og mutter, deformeres pakningsringen plastisk i ringsporet, noe som gir ønsket tetning. Siden kraften er fordelt over et lite tetningsareal, blir det høye spenninger på overflaten til pakningsringen og i ringsporet (Flexitallic, 2012).

Videre skal det gis en bedre forståelse av flensforbindelsen, ved at de ulike komponentene blir beskrevet videre i de påfølgende underkapitlene.

### 2.3.1 Flens

API Spec 6A (2010) og API Spec 17D (2011) omtaler tre ulike flenstyper som kan benyttes for produksjonssystemer under vann; sveiseflens med hals (eng. «welding neck flange»), fastflens (eng. «integral flange») og blindflens.

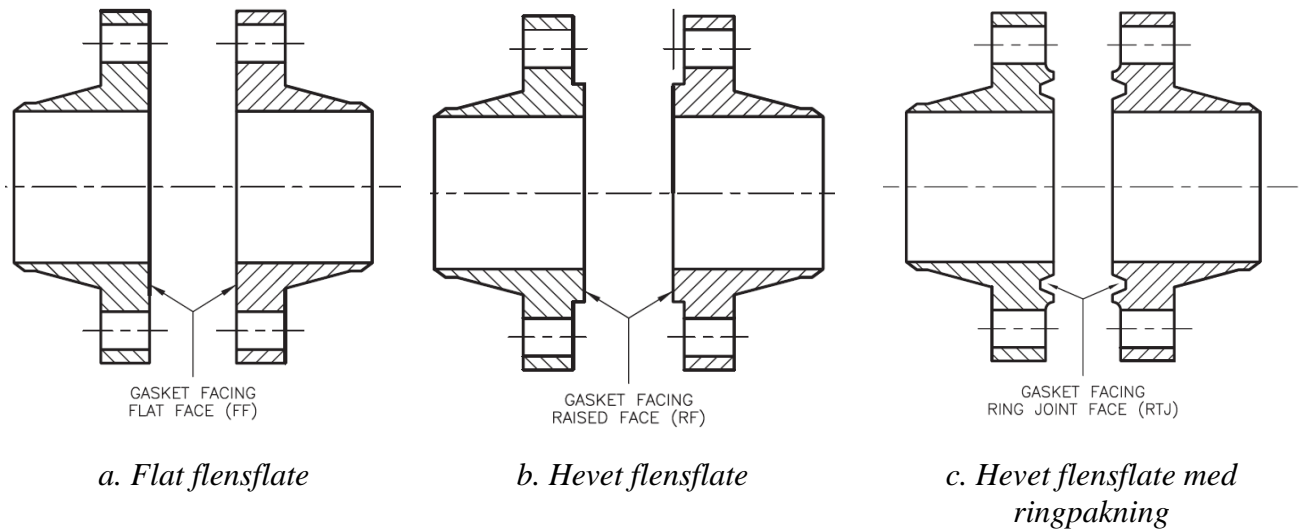
En *sveiseflens med hals* er designet for redusere konsentrasjoner med høy spenning i flensen ved å overføre spenning til det tilsluttede røret. Dette gjør den ved at vegttykkelsen på flensnavet øker gradvis fra punktet den er sveist til røret og frem til flensen. Dette er fordelaktig i situasjoner der man har gjentakende bøyning, som følge av utvidelse eller sammentrekning av rørledningen, eller andre eksterne krefter (Parisher & Rhea, 2012, s. 59). En sveiseflens med hals har en utforming som tillater påsveisning til et rør eller et overgangstykk (API Spec 6A, 2010, s. 20)

*Fastflensen* designes eller påsveises som en del av et ventilhus eller en lignende komponent (WOODCO USA, 2014). En fastflens av typen 6BX vil ha tilsvarende utforming som en sveiseflens med hals (API Spec 6A, 2010, s. 132-133, 138-139). Andre typer kan ha forskjeller i flensnavet, som illustrert i *Figur 2-5*.

En *blindflens* er en flens uten senterhull eller flensnav, og benyttes til å stenge av fullstendig og hindre gjennomstrømning (API Spec 6A, 2010, s. 9).

Flensflaten utgjør sammen med pakningsringen kontaktflaten mellom flenshalvdelene. Som tidligere spesifisert, skal alle flensforbindelser for undervanns kompletteringsutstyr være av typen «ring type joint» (RTJ). Videre står det spesifisert i API Spec 17D (2011, s. 48) at de eksterne kreftene og sammensettingskrefter primært skal virke på den hevede flensflaten, og som et resultat av dette, skal minst en av flensoverflatene være hevet. *Figur 2-6* viser en

illustrasjon over ulike typer flensflater, hvor (c) viser en RTJ-flensforbindelse som vil være godkjent til bruk i forbindelse med undervanns juletre- og brønntstyr.

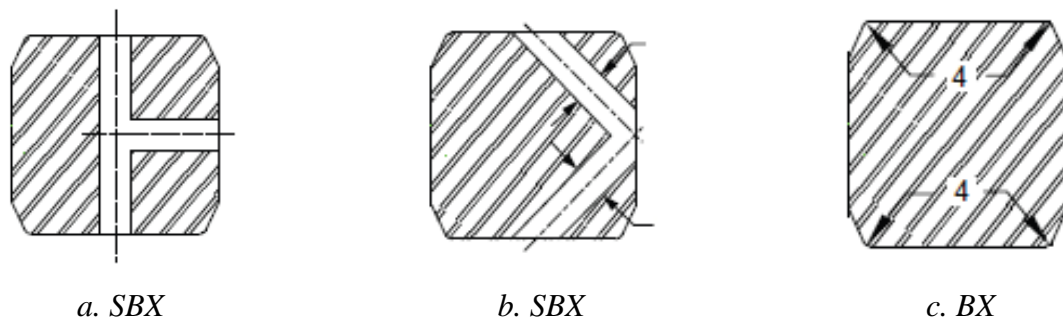


**Figur 2-6: Ulike typer flensflater(Parisher & Rhea, 2012)**

### 2.3.2 Pakningsring og ringspor

Pakningsringen skal plastisk deformeres og det er derfor nødvendig at pakningsringen har signifikant lavere hardhet enn ringsporet, slik at det er pakningsringen som deformeres, og ikke ringsporet. Bruk av hardere pakningsringer kan resultere i skader på ringsporet (Flexitallic, 2012).

Flenser kan enten settes sammen på overflaten eller under vann. Det stilles krav til at alle flensforbindelser som settes sammen under vann skal ha en anordning som kan ventilere eventuell innestengt væske. Pakningsring av typen SBX er en akseptabel design som løser dette problemet. Flenser som ikke er settes sammen under vann trenger ikke ventilering av fanget væske, og da kan en ordinær BX-pakningsring benyttes. Pakningsringene er illustrert i *Figur 2-7*.



**Figur 2-7: Illustrasjon av pakningsringene BX og SBX (API Spec 17D, 2011).**

### **2.3.3 Boltforbindelse**

Boltene trenger tilstrekkelig styrke og elastisitet for å overkomme alle mekaniske og termiske laster (Sandbrook, Emery, & Ludman, 2011).

Boltene sørger for at flensene presses sammen og gir tetning. Erfaringer viser at bolter er spesielt kritisk i et rørsystem, og det blir ansett som en sentral feilmekanisme i olje og gassindustrien. Det er naturligvis nødvendig med høystyrke materialer når boltene skal spenne flensene og ringpakningen sammen. Det viser seg at flere av materialene som i utgangspunktet egner seg godt med tanke på høy fasthet, ofte har en ulempe med svakhet mot hydrogensprøhet og sprekkdannelse i forbindelse med katodisk beskyttelse. Typiske krav som stilles til bolteforbindelser under vann er høy fasthet, korrosjonsresistans, resistans mot riving (eng. «galling»), og følsomhet mot sprekker forårsaket av hydrogen (Lillebø, 2006).

Fisher et al. (2002) presenterer de viktigste utfordringene som olje og gassindustrien møter med bolteforbindelser under vann. Hydrogeninduserte sprekker er den feilmekanismen som er mest sentral i rapporten, og denne mekanismen assosieres også med navnene hydrogenassistert sprekkdannelse eller hydrogensprøhet.

### **2.3.4 Sveis**

Sveisen er et kritisk element som man bør ta spesielt hensyn til under valg av flensmateriale. En sveiseflens med hals har en utforming hvor sveisen har distanse fra flensflatene. Dette er praktisk da sveiseoperasjonen har en distanse til flensflaten, og med dette unngår man at uheldige forspenninger i flensflatene (MultAlloy, 2012).

## **2.4 Tilvirkning av flenser**

Rustfritt stål er tilgjengelig i flere former som plater, tynnplater, band, tråd, stang, metallfolie og halvfabrikater. Alt etter størrelse og bruksområde produseres ofte smidde flenser fra en smidd/valset stang (U.S International Trade Commission, 1994, s. II-7). Det er en rekke operasjoner som må utføres før man oppnår et ferdig produkt. I tillegg til prosesser for å imøtekomme dimensjonskrav, er det en rekke operasjoner som må utføres for å imøtekomme materialkrav.

Dette delkapittelet beskriver relevant teori rundt tilvirkning av flenser, og inkluderer en introduksjon til smiing, smidde produkters egenskaper, valsede stenger, og typiske steg for tilvirkning av smidde flenser.

### **2.4.1 Introduksjon til smiing**

ASTM A788/A788M (2013, s. 3) definerer at smidde produkter i vesentlig grad er plastisk deformert gjennom operasjoner hvor materialet komprimeres for å bedre materialegenskaper og/eller gi produktet en ønsket form. Plastisk bearbeiding må deformere materialet slik at produktet i hovedsak består av smidd mikrostruktur. Denne omformingen kan skje ved romtemperatur (kaldforming) eller etter oppvarming til egnet smitemperatur (varmforming) (Corneliussen, 2000, s. 68).

Før en smiprosess består produksjon av rustfritt stål av en rekke prosesser. Et typisk førstesteg er å smelte stålet sammen med legeringselementene i en elektrisk lysbueovn (eng. «electric arc furnace» EAF). Denne prosessen følges deretter opp med støpning av det smeltede metallet i en passende form for videre tilvirkning. Utforminger etter støpning er typisk grovemne, finemne (rektangulær med avrundede hjørner), rektangulære- og kvadratiske former, slab (valseemne), stang, og rør (Singh, 2012, s. 65).

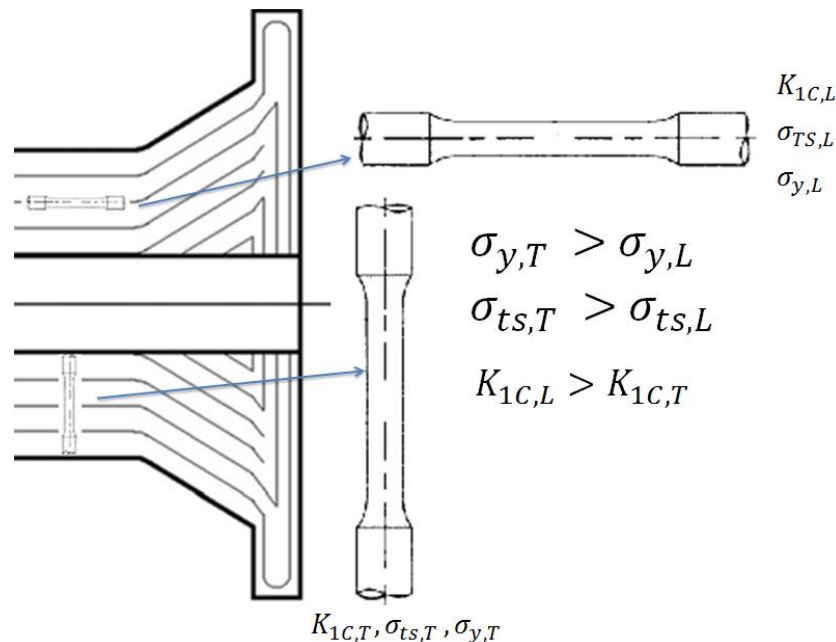
Smidde emner klassifiseres etter metoden som benyttes og blant tilgjengelige metoder finnes; senkesmiing med åpen form, senkesmiing med lukket form, roterende smiing, og valsing. Metodene deles videre inn etter hvilket verktøy som benyttes i formingen, enten hammer eller presse, som styres av damp, hydraulikk eller mekanisk kraft (Nisbett, 2005, s. 24).

### 2.4.2 Smidde produkters egenskaper

En viktig faktor under fremstilling av smidde produkter er graden av varmbearbeiding av et smiemne (eng. «ingot material») som transformerer emnet til det smidde sluttproduktet. Mål for grad av smiing uttrykkes som reduksjonsgrad, som er forholdet mellom original tverrsnittareal av blokken og maksimalt tverrsnittareal etter smi-prosessen. Reduksjonsgraden som benyttes varierer alt etter bruk, og typisk brukes det en reduksjonsgrad 3:1 (Nisbett, 2005, s. 27).

Smidde duplexmaterialer er typisk anisotropisk, som vil si at de mekaniske egenskapene ikke er lik i alle retninger. Anisotropien forekommer som følge av forlengelse av kornene og krystallteksturen (International Molybdenum Assosiation (IMOA), 2009, s. 23).

Figur 2-8 illustrerer de mekaniske egenskapene til en flens i langsgående og tverrgående retning. Figuren er produsert basert på informasjon hentet fra International Molybdenum Assosiation (IMOA) (2009, s. 23), og bilde fra Stewart & Lewis (2013, s. 226). Figuren viser flytegrensen ( $\sigma_y$ ), strekkfastheten ( $\sigma_{ts}$ ) (eng. «tensile strenght»), og bruddseigheten ( $K_{1C}$ ) sammenlignet for testprøver tatt ut i langsgående og tverrgående retning. Symbolene for de mekaniske egenskapene er videre bemerket med bokstavene «L» eller «T», som henholdsvis representerer egenskaper i langsgående og tverrgående retning.

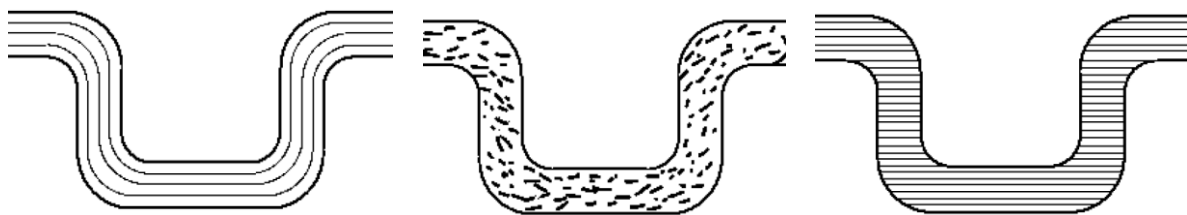


**Figur 2-8: Illustrasjon som viser de mekaniske egenskapene til en flens for transvers og langsgående retning (rulleretning) (International Molybdenum Assosiation (IMOA), 2009; Stewart & Lewis, 2013, s. 226).**

Det unike med produkter smidd til form, er dens strømlinjeformede kornorientering som følger produktets kontur. Sammenlignet med strukturen som oppnås i et støpt materiale (Figur 2-9 a.) og produkter som maskineres fra en rettlinjert kornstruktur (Figur 2-9 c.), er følgende vesentlig å trekke frem for smidde produkter (Schweitzer, 2003):

- Smiing gir fordelaktig kornstruktur og gir styrke der det er mest nødvendig, ved at spenninger påføres i alle retninger (x,y,z) (Nisbett, 2005, s. 6).
- Høyere styrke-vekt forhold som gjør at man kan bruke tynnere og lettere seksjoner uten svekkelse av sikkerhet.
- Gir generelt bedre slagseighet, utmattingsegenskaper, duktilitet, og reduksjon av sprekkvekster.
- Smidde produkter er massive, ikke-porøs, og uniform i den metallurgiske strukturen.

En illustrasjon som viser hvordan et smidd produkt skiller seg fra støpt eller maskinert, er presentert i Figur 2-9.



a. Smidd til form

b. Støpt

c. Maskinert fra stang

Figur 2-9: Materialstruktur for materialer som er smidd til form(a.), støpt (b.), og maskinert fra stang(c.) (Schweitzer, 2003).

### 2.4.3 Valset/smidd stang

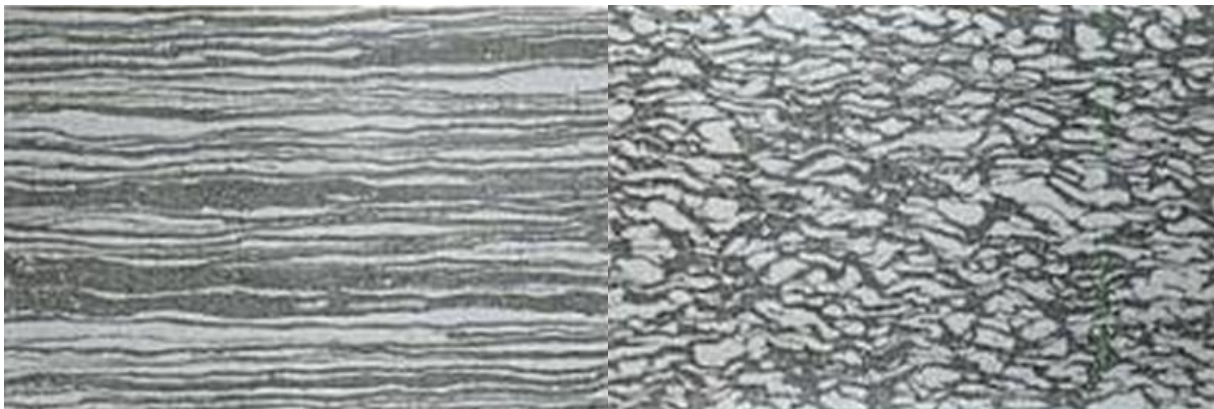
Både varm- eller kaldbearbeiding benyttes under tilvirkning av stenger. Vanligvis er en stang produsert med teknikker som *varmvalsing* (eng. «hot rolling»), *smiing* (eng. «forging»), eller en blanding hvor en blokk først presses til grovemne eller metallstang i middels størrelse, som senere blir varmvalset, smidd, eller ekstrudert til ønskede sluttdimensjoner. Sluttproduktets dimensjon og sammensetning er faktorer som spiller inn på hvilke teknikker som benyttes. *Varmvalsing* vil si at et arbeidsstykke passerer mellom valser som roterer i motsatt retning, mens *smiing* er forming av emne til ønsket form ved hjelp av hamring eller pressing (Davis, 1994; Norsk Stålforbund, 2000).

En varmvalset stang (eng. «hot rolled bar») har vanligvis en markant forskjell i de mekaniske egenskapene i rulleretning og tverrgående retning (anisotropi). Det kan også være signifikante

forskjeller i de mekaniske egenskaper etter radiell posisjon i stangen. Dette skyldes at effekten av varmbearbeiding vil være mer konsentrert i den ytre delen av stangen, sammenlignet med senterområdet. Det blir derfor en ulik grad av deformasjon etter radiell posisjon i stangen, hvor senterområdet har en lavere deformasjonsgrad, sammenlignet med områder nær ytterkanten. Denne forskjellen blir tydeligere når stangdiameteren øker, noe som gir begrensninger for størrelsen til rullede produkter (Nisbett, 2005, s. 5-6).

En varmvalset stang benyttes ofte som utgangspunkt for et smidd produkt, hvor den varmvalsede stangen videre formes til ønskede sluttdimensjoner. Fordelene med smidde produkter som videre formes fra en stang, er at spenninger påføres i alle tre retninger (x,y,z) og dette gjør at man kan oppnå fordelaktige materialeegenskaper (Nisbett, 2005, s. 5-6).

Fasene ferritt og austenitt vil under varmvalsing (eng. «hot rolling») få en mikrostruktur som følger valseretningen, se *Figur 2-10* (Davis, 1994). Før smi-prosessen settes i gang vil strukturen til det rustfrie materialet typisk være isotropisk, noe som vil endre seg til en struktur med anisotropi. DSS vil etter valsing ha en struktur med en høyere strekkfasthet og flytegrense i tverrgående retning, sammenlignet med rulleretningen. Slagseigheten vil være høyere for tester som utføres på et langsgående prøvestykke, sammenlignet med et tverrgående prøvestykke (International Molybdenum Assosiation (IMOA), 2009, s. 23).



*a.Rulleretning*

*b.På tvers av rulleretning*

**Figur 2-10: Mikrostrukturen til en valset DSS (Davis, 1994).**

#### **2.4.4 Flenser smidd til form**

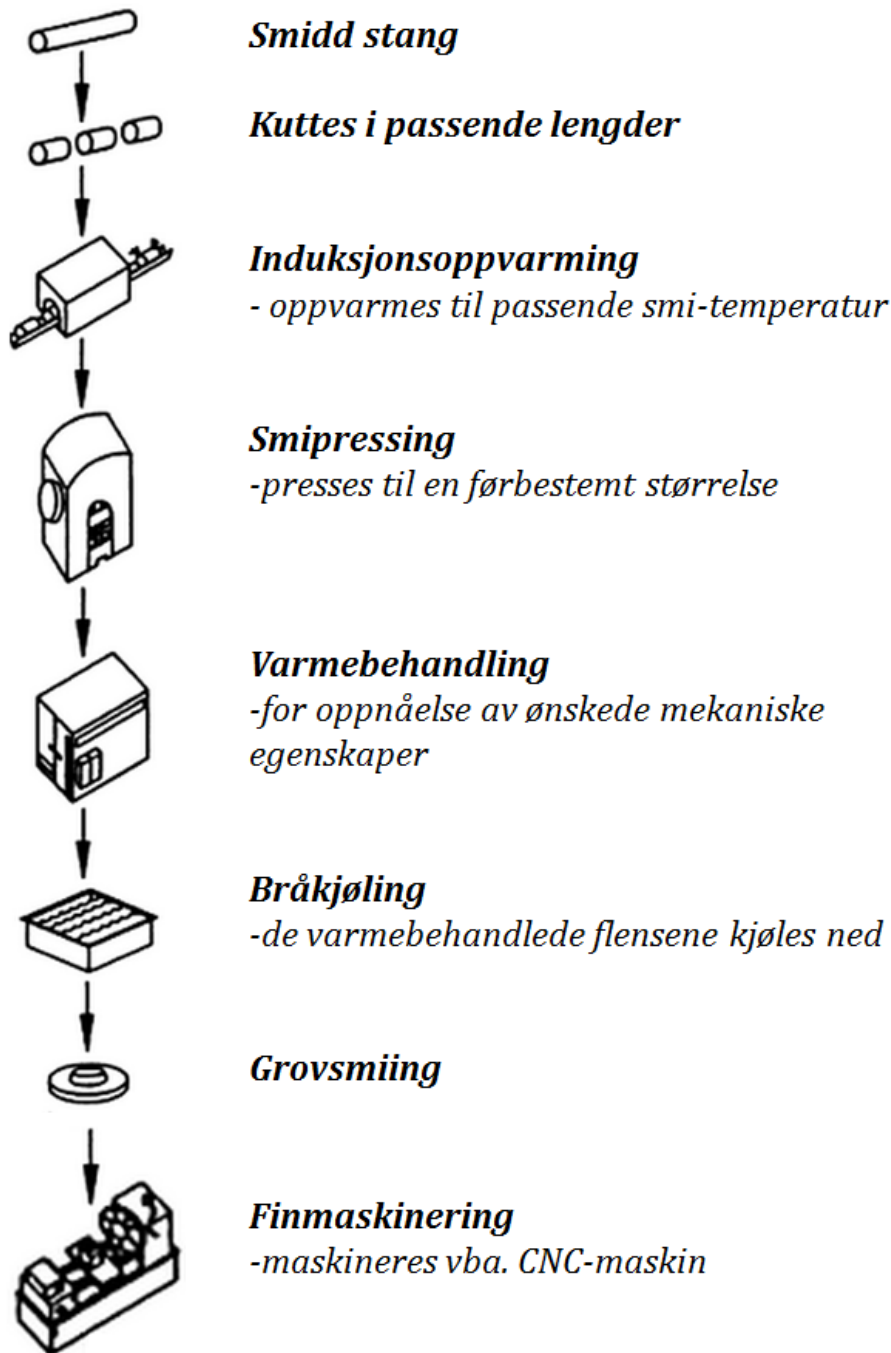
En generell tilvirkningsmetode for smidde flenser er illustrert i *Figur 2-11*. Selve formingen kan utføres i en smipresse eller gjennom en serie av slag ved bruk av smihammer. En smipresse er en mer automatisert prosess sammenlignet smihammer, og vil eliminere antall nødvendige slag (ca. en fjerdedel) (U.S International Trade Commission, 1994, s. II-7).

De fleste produsenter har en filosofi om en produksjon hvor flensene smis til form i den grad dette er praktisk mulig. Grunnen til dette er besparelser i maskineringstid, tap av materiale, og utstyrs-kostnader (U.S International Trade Commission, 1994, s. II-7).

Gløding (eng. «annealing») er nødvendig som en del av prosessen for å fjerne spenninger bygget opp gjennom smipressing. Deretter bråkjøles produktet i vann, før glødeskall fjernes ved beising. Ytterdiameteren til flensen blir så grovmaskinert, i tillegg til at den indre diameteren bores ut, før finmaskineringen igangsettes (U.S International Trade Commission, 1994, s. II-7)

Smidde flenser i dupleks rustfritt materiale skal nedkjøles til en temperatur under 538 °C (1000 °F) før den varmebehandles med metoder som innherding (solution treatment) og bråkjøling (ASTM A182/A182M, 2013, s. 2).





Figur 2-11: Stegvis prosess for tilvirkning av flenser (U.S International Trade Commission, 1994, s. II-8).



# Kapittel 3

## Kvalifikasjonsbasis

Kvalifikasjonsbasis skal gi et felles sett med kriterier og spesifikk informasjon gjeldende for en standardisert API-flens (6BX-sveiseflens med hals), benyttet i forbindelse med undervanns brønnhode- og juletreutstyr. Design av kvalifikasjonsaktiviteter og vurderinger i denne rapporten gjøres opp mot informasjon gitt i denne delen. Relevante standardverk og litteratur er studert, og en oppsummering av dette presenteres i følgende punkter:

- **Klassifisering:** Beskrivelse av to sentrale avgrensinger for teknologikvalifiseringen, gjennom en innføring i flensens produktspesifikasjonsnivå og trykkklasse. Disse avgrensingene er avgjørende for hvilke krav standardverkene setter til flensen.
- **Systembeskrivelse:** Beskrivelse av flensens design, miljøbetingelser, og sentrale feilmekanismer. Dette er punkter som er essensielle for videre vurdering av flensens teknologielementer og usikkerheter. Flere av punktene vil også være en del av evalueringsgrunnlaget som resultater fra kvalifikasjonsaktivitetene vurderes opp mot.
- **Material- og designkrav (API Spec 17D/6A):** Presenterer material- og designkrav, samt nødvendige valideringsprosesser for en API-flens (6BX sveiseflens med hals), gitt i standardverkene API Spec 6A (2010) og API Spec 17D (2011). Informasjon er i hovedsak rettet mot flensens mekaniske materialkrav, da dette er en sentral del av evalueringsgrunnlaget som resultatene fra kvalifikasjonsaktivitetene vurderes opp mot.
- **Tidligere arbeid:** Innføring i tidligere arbeid rundt lignende problemstillinger som kan være relevant for bevisførselen i denne teknologikvalifiseringen.

## 3.1 Klassifisering

Dette delkapittelet presenterer to av de mest sentrale avgrensingene for denne teknologikvalifiseringen; produktspesifikasjonsnivå og trykkklasse.

### 3.1.1 Produktspesifikasjonsnivå

Utstyr som designes i henhold til API Spec 17D (2011) og API Spec 6A (2010) skal defineres med et produktspesifikasjonsnivå (PSL, eng. «Product Specification Level»). Trykkholdige komponenter til undervanns brønnhode- og juletreutstyr skal benytte et av følgende nivåer:

- PSL 2
- PSL 3
- PSL 3G

Produktspesifikasjonsnivåene definerer forskjellige nivå for krav til materialkvalifikasjon, testing og dokumentasjon (API Spec 17D, 2011, s. 13). Produktspesifikasjonsnivå for et spesifikt utstyr, bestemmes av faktorer som trykk, temperatur, partialtrykk av H<sub>2</sub>S (sur service), gassproduksjon og om utstyret er primær- eller sekundærutstyr. Primærutstyr er utstyr som ikke kan isoleres fra brønnstrøm eller brønntrykk, mens sekundærutstyr er utstyr som normalt kan isoleres fra brønnstrømmen og brønntrykket (API Spec 6A, 2010, s. 15, 17). Flytdiagram for valg av PSL-grad kan er å finne i *Vedlegg B*.

Kvalifikasjon av valgt flensdesign er avgrenset til produktspesifikasjonsnivåene PSL 3 og PSL 3G. Kravene for PSL 3G er de samme som for PSL 3, men med noen ekstra hensyn for brønner som produserer gass, hovedsakelig for tilstedeværelsen av H<sub>2</sub>S. PSL 3/3G er et produktspesifikasjonsnivå som er anbefalt for primærutstyr i sur service for alle arbeidstrykk, og primærutstyr i generell service for trykk over 34,5 MPa. Det er også anbefalt for alt utstyr med arbeidstrykk over 69,0 MPa eller temperaturer som overskrider 121°C (API Spec 17D, 2011, s. 227).

Andre hensyn som kan føre til at man velger PSL 3 over PSL 2 inkluderer vanddyp, sammensetning til brønn- eller injeksjonsvæsken, infrastrukturen til feltet, vanskelighetsgraden til brønnintervensjoner, akseptabel risikograd, miljøet rundt og forventet levetid for utstyret (API Spec 17D, 2011, s. 227).

### 3.1.2 Trykkklasse

API Spec 17D (2011, s. 15) spesifiserer tre standard trykklasser (RWP, eng. «Rated Working Pressure») som skal benyttes for trykkholdige komponenter<sup>1</sup> til undervannsinstallasjoner:

- 34,5 MPa
- 69,0 MPa
- 103,5 MPa

Trykklassen representerer det maksimale interntrykket som det spesifikke utstyret er designet for å holde inne/kontrollere (API Spec 17D, 2011, s. 9). Hovedformålet med standardiserte trykklasser, er å sørge for at utstyret er sikkert og utskiftbart. Trykklasser som ikke samsvarer med en av de standardiserte trykklassene, er ikke dekket av dette standardverket (API Spec 17D, 2011, s. 15-16).

Det er valgt å avgrense til trykkklasse 69,0 MPa i denne kvalifikasjonen.

## 3.2 Systembeskrivelse

Dette delkapittelet skal gi en grunnleggende forståelse av flensens design, miljøbetingelser, og sentrale feilmekanismer. Flensens design beskrives gjennom *Kapittel 3.2.1 til 3.2.2*, mens miljøbetingelser og sentrale feilmekanismer er beskrevet gjennom *Kapittel 3.2.3 til 3.2.6*.

### 3.2.1 Flensforbindelsen

Kvalifikasjonen er avgrenset til en API-flens (6BX-sveiseflens med hals), som er et standardisert flensdesign gitt i API Spec 6A (2010). Flensdesignet 6BX kan benyttes som sveiseflens med hals, fastflens og blindflens. Med avgrensningene til flenstypen «sveiseflens med hals» og arbeidstrykk lik 69,0 MPa, vil flensdesignet 6BX være begrenset til flensstørrelser fra 1<sup>13/16"</sup> – 16<sup>3/4"</sup>. Flensdesignet er utformet med ringspor til en pakningsring av typen BX eller SBX, hevet flensflate og 8-24 bolthull (API Spec 6A, 2010, s. 131-148).

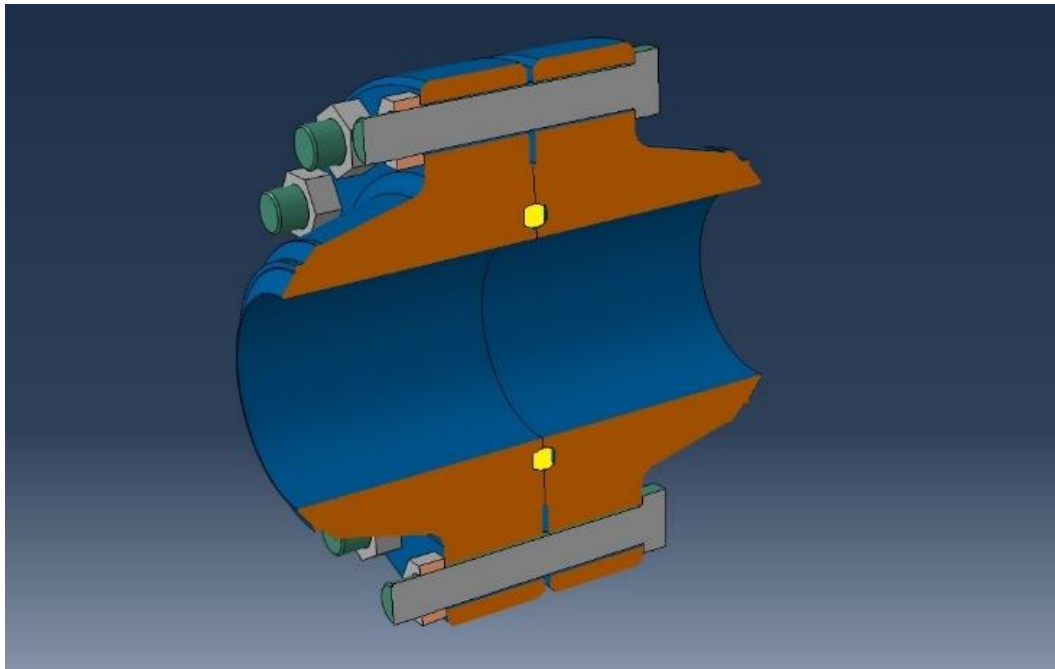
Dimensjonale krav for de ulike flensstørrelsene vil være gitt i API Spec 6A (2010, s. 137-139). *Vedlegg C* gir en beskrivelse av flensstørrelsen 2<sup>1/16"</sup> med tilhørende dimensjonale krav. Dette er en flensstørrelse som benyttes som sammenligningsgrunnlag i kommende kapitler. Øvrige designkrav for flensen vil være gitt i det refererte standardverket. En større andel av disse

---

<sup>1</sup> Trykkholdig komponent = Komponent som ved funksjonsfeil resulterer i utslipp av brønnfluider til miljøet (API Spec 17D, 2011, s. 8)

designkravene vil også være oppsummert i *Kapittel 3.3 Material- og designkrav (API Spec 17D/6A) (s. 38)*.

*Figur 3-1* viser et snitt av en 6BX flensforbindelse. Pakningsringen skal følge dimensjon- og designkrav gitt i API Spec 17D (2011) og API Spec 6A (2010). Videre skal benyttede bolter samsvare med ASTM A193/A193M, og tilhørende muttere skal samsvare med ASTM A194/A194M (API Spec 6A, 2010, s. 157). Øvrige designkrav for boltene er gitt i API Spec 6A (2010).



*Figur 3-1: Snitt av en 6BX-flenskobling*

### 3.2.2 Flensmaterialet

Det skal benyttes et smidd stangmateriale av typen UNS S31803, som er et dupleks rustfritt stål med materialeegenskaper gitt i *Tabell 3-1* og *Tabell 3-2*. Databladene stangdimensjonene Ø220 mm og Ø250 mm er gitt i *Vedlegg D*.

Verdiene for E-modul og Poissons tall, samt verdier i *Tabell 3-2*, er hentet fra Outokumpu (2013). Referansen er benyttet etter anbefaling fra leverandøren av stangmaterialet.

**Tabell 3-1: Materialeegenskaper for UNS S31803 ved romtemperatur**

Materialeegenskap	Enhet	UNS S31803
<b>E-modul</b> <sup>1</sup>	GPa	200
<b>Poissons tall</b> <sup>1</sup>		0,3
<b>Flytegrense</b> <sup>2</sup> (0,2% offset flytegrense) (langsgående/tverrgående)	MPa	485/450
<b>Strekfasthet</b> <sup>2</sup> (langsgående/tverrgående)	MPa	655/620
<b>Bruddforlengelse</b> <sup>2</sup> (50 mm målelengde) (langsgående/tverrgående)	%	25/20
<b>Kontraksjon</b> <sup>2</sup>	%	45
<b>Slagseighet</b> <sup>2</sup> (Gj.snitt verdi i langsgående og tverrgående) (Alle testtemperaturer)	J	45 (- 46 °C) / 27 (- 46 °C)
<b>Hardhet</b> <sup>2</sup> (Brinell)	HB	>= 264
<sup>1</sup> Dupleksmaterialer generelt (Outokumpu, 2013).		
<sup>2</sup> Verdier fra datablader levert av Sverdrup Steel AS (Vedlegg D). Verdiene representerer minimumskravet produsenten har satt for materialet.		

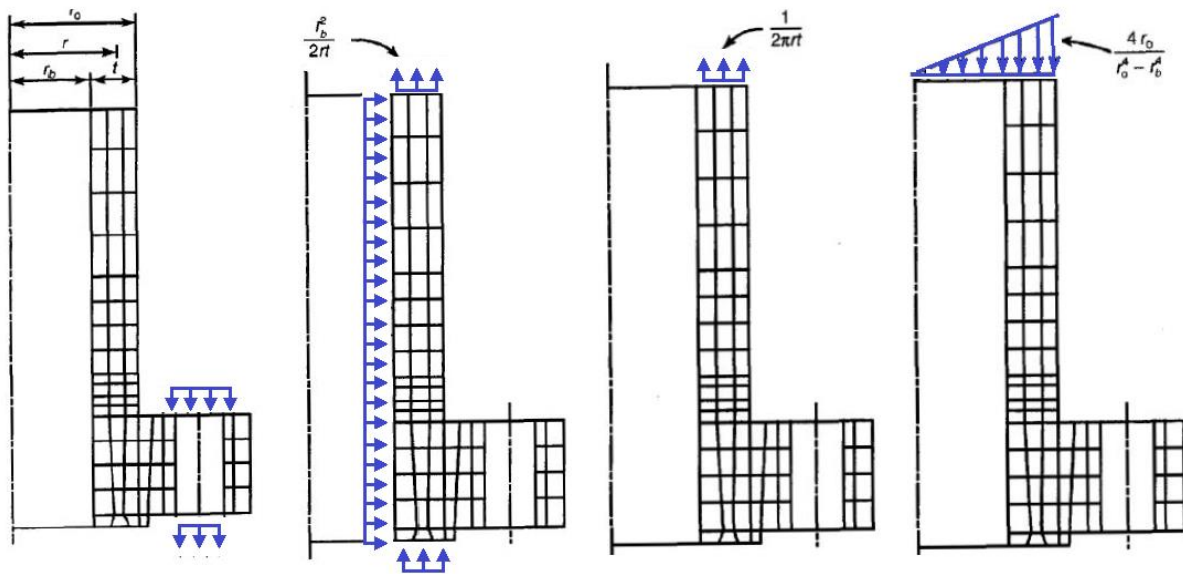
**Tabell 3-2: Materialeegenskaper for UNS S31803 ved hevede temperaturer (Outokumpu, 2013)**

Materialeegenskap	Enhet	Temperatur [°C]		
		100	150	200
<b>E-modul</b> <sup>1</sup>	GPa	194	-	186
<b>Flytegrense</b> <sup>1</sup> (0,2% offset flytegrense)	MPa	360	335	315
<b>Strekfasthet</b> <sup>1</sup>	MPa	590	570	550
<sup>1</sup> Dupleksmaterialer generelt (Outokumpu, 2013).				

### 3.2.3 Kombinasjoner av statiske laster

API-TP-6AF2 (2013) evaluerer lastbærende kapasitet for flenstypene 6B og 6BX under kombinasjon av fire statiske last-typer. Last-typene er illustrert *Figur 3-2* og listet i punktene under:

- Sammensettingskrefter (eng. «makeup forces»)
- Klassifisert trykk
- Endespenning
- Bøyemoment



a. Sammensettingskrefter    b. Trykk    c. Endespenning    d. Bøyemoment

**Figur 3-2: Fire last-typer benyttet for evaluering av kapasiteten til flenser i API-TR-6AF2 (2013).**

Skal man være i stand til å vurdere kapasiteten til en flens under en gitt lastkombinasjon, er det nødvendig å etablere kriterier. API-TP-6AF (2013, s. 21) definerer to kriterier:

- *Lekkasjekriterium.*
- *Spenningskriterium.*

**Lekkasjekriteriet** sier noe om hvorvidt man med en gitt kombinasjon av laster vil få lekkasje eller ikke. Lekkasjekriteriet er definert som lastkombinasjon som reduserer de initiale kompresjonskreftene i ringpakningen til null ( $R_g = 0$ ) (API-TP-6AF2, 2013, s. 21). En slik situasjon indikerer at sammensettingskreftene i ringpakningen er tømt for et punkt i pakningen, og dette signaliserer at en lekkasje er begynnende.



Formel for ringpakningens reaksjon ( $R_g$ ) er satt sammen av de fire last-typene som vist i Figur 3-2 (s.32):

$$R_g = (R_{mu} \sigma_{mk} + R_{pu} P + R_{tu} T + R_{bu} M) \quad (3-1)$$

hvor,  $R_{mu}$  : enhetsreaksjon for sammensetting  
 $R_{pu}$  : enhetsreaksjon for trykk  
 $R_{tu}$  : enhetsreaksjon for strekking  
 $R_{bu}$  : enhetsreaksjon for bøyemoment.  
 $\sigma_{mk}$ : sammensettingsspennning  
 $P$ : trykk  
 $T$ : endespenning  
 $M$ : bøyemoment

Fra formel 3-1 er det antatt at en lekkasje vil oppstå når ringpakningens reaksjon blir null ( $R_g = 0$ ), og eksempelvis får man da:

$$P = -\frac{R_{mu}\sigma_{mk} + R_{tu}T + R_{bu}M}{R_{pu}}, \quad (3-2)$$

og med dette har man en lineær sammenheng mellom  $P$  og  $M$  for gitte verdier for sammensettingsspennning og endespenning. Den lineære sammenhengen i den tekniske rapporten benyttes til å analysere hvilke lastkombinasjoner som tilfredstiller lekkasjekriteriet.

**Spenningskriteriet** er et sett med grenseverdier som ulike seksjoner av flensen skal vurderes opp mot. Spenningsintensitetene som fremkommer i en analyse skal vurderes opp mot kriterier som er satt i «ASME Section VIII, Division 2 Pressure Vessel Code», krav til flytegrenser i API Spec 6A (2010), og aksepterte spenninger.

API-TP-6AF2 (2013, s. 23) benytter Tresca-kriterium i beregning av spenningsintensitet. Den maksimale skjærspenningen,  $\tau_{maks}$ , er definert som halvparten av den maksimale skjærspenningen, som igjen er differansen mellom minste og største verdi av hovedspenningene  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , og  $\sigma_3$ . Eksempelvis dersom  $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ , vil  $\tau_{maks}$  være:

$$\tau_{maks} = \frac{(\sigma_3 - \sigma_1)}{2} \quad (3-3)$$

Spenningsintensiteten er definert som to ganger maksimal skjærspenning, som gir:

$$SI = 2 \cdot \tau_{maks} = \sigma_3 - \sigma_1 \quad (3-4)$$

Spenningen «SI» kalles «ekvivalent intensitet av kombinerte spenninger», eller «spenningsintensitet». SI kan direkte sammenlignes med test-data for flytegrense som hentes fra strekkprøver, medregnet en sikkerhetsfaktor (L. Nayyar, 2000).

API-TP-6AF2 (2013, s. 23) betrakter seks følgende lastkombinasjoner, satt sammen av lastene i *Figur 3-2*, hvor hver kombinasjon vurderes opp mot en grenseverdi for spenningsintensitet:

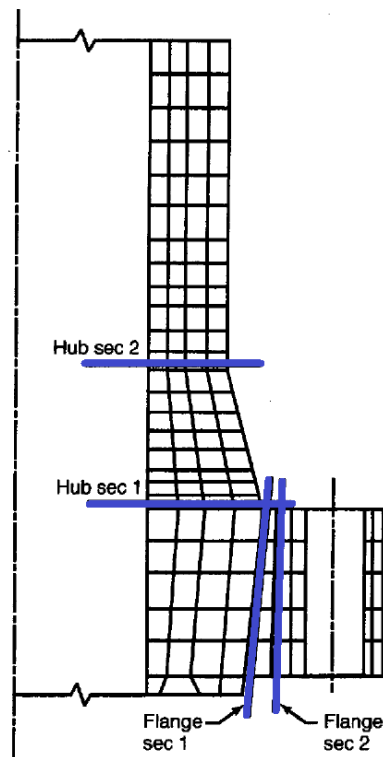
- Sammensettingskrefter alene.
- Test-trykk alene ( $1,5 \times$  arbeidstrykk for flenser mindre enn 14")
- Sammensetting og test-trykk.
- Arbeidstrykk, endespenning og bøyemoment.
- Sammensettingskrefter, arbeidstrykk, endespenning og bøyemoment.
- Sammensettingskrefter, arbeidstrykk, endespenning og temperatur.

*Vedlegg E* gir en oversikt over grenseverdier som er satt for hver seksjon og lastkombinasjon. Kriteriene består av en faktor multiplisert med materialets flytegrense. Det skilles mellom to spenningsintensiteter som skal imøtekommes; akseptert membran-spenningsintensitet ( $S_m$ ) og akseptert test-spenningsintensitet ( $S_T$ ). Akseptert membran-spenningsintensitet har følgende forhold til materialets flytegrense ( $S_y$ );

$$S_m = \frac{2}{3} S_y , \quad (3-5)$$

og akseptert test-spenningsintensitet er gitt som,

$$S_T = 0,83 S_y . \quad (3-6)$$



*Figur 3-3: Flens delt inn i seksjoner (API-TP-6AF2, 2013, s. 25).*

### 3.2.4 Kombinasjoner av dynamiske laster

Produkter som er smidd til form (se s. 21) har ofte bedre utmattingsegenskaper, sammenlignet med produkter som er maskinert til ønskede sluttdimensjoner. Dette delkapittelet beskriver kilder til vibrasjoner som kan føre til utmatting.

DNV-RP-D101 (2008) lister følgende sentrale kilder til sykliske laster som må tas hensyn til for rørsystemer under vann:

- *Slug*
- *Akustisk utmatting*
- *Kombinasjon av virvelinduserte vibrasjoner (VIV), slug, og trykktransienter.*

Slug er et fenomen som ofte forekommer i flerfasestrømning (olje, gass og vann) og det kan forekomme ved visse frekvenser som gjør utmatting problematisk. Akustisk utmatting er et fenomen som spesielt er aktuelt for gassbrønner med høye strømningshastigheter og tynne vegger av dupleks rustfritt stål. Virvelinduserte vibrasjoner (VIV) består av kompliserte interaksjoner mellom flere strukturer sammen med væskekrefter, som kan føre til strukturfeil eller utmattingsskader under visse forhold. Strukturer utsatt for strømninger med høyt Reynolds-nummer kan skape virvelavløsning. Dersom de produserte virvelavløsningene resulterer i oscillerende hydrodynamiske laster, kan dette føre til at strukturen begynner å vibrere ved dens egenfrekvens (DNV-RP-D101, 2008).

En annen strømningsrelatert vibrasjonsform er *strømningsinduserte vibrasjoner* (FIV, eng. «flow induced vibrations»), og disse vibrasjonene skapes av et stort spekter av turbulente energikilder som er assosiert med diskontinuerlige strømninger som typisk fremkommer av delvis lukkede ventiler, bend og T-profiler. Vibrasjonsnivåene kan bli høye dersom det genereres energier som er nær den naturlige frekvensen til rørsystemet (API 1PER15K-1, 2013, s. 44).

Sykliske laster er noe som kan oppstå som følge av eksterne mekaniske laster som strømning, bølgekrefter, laster under installasjon, og interne mekaniske laster som trykk og operasjonskrefter. Utmattingstesting er komplekst og det er viktig at alle parametere som frekvens, og maks/min spenning, er korrekte. En nøyaktig metode skal reflektere alle sykliske laster gjennom utstyrets levetid (API 1PER15K-1, 2013).

Det er spesielt viktig å betrakte det miljøet utstyret skal utsettes for. Metaller med en utmatningsbegrensning i luft har nødvendigvis ikke den samme utmatningsbegrensningen i et

korrosivt miljø. Utmattelsen vil variere med temperatur, legering, styrkenivå, varmebehandlingstilstand og mikrostruktur. Spesielt må man være forsiktig med å bruke publisert dokumentasjon for legeringer i samme miljø, da det likevel kan være uforutsette variasjoner (API 1PER15K-1, 2013).

### 3.2.5 Temperatureffekter

API Spec 17D (2011, s. 17) spesifiserer følgende hensyn for et flensdesign:

*“The design should take into account the effects of temperature gradients and cycles on the metallic and non-metallic parts of the equipment.”*

API-TP-6AF2 (2013, s. 1) beregner responsen av temperaturdifferansen i et typisk system under vann med 121 °C (250 °F) på innsiden og -1 °C (30 °F) på yttersiden av flensen. Flenser under vann har naturligvis en temperaturdifferanse fra det ytre til den indre miljøet. Skal man vite hvordan temperaturen er distribuert gjennom flensen må man utføre en varmekonduktivitet-analyse. Fra en slik analyse får man ut hvilken temperatur man har i et bestemt knutepunkt i et maskenett (API-TP-6AF2, 2013, s. 18). Vedlegg F viser resultatet av en slik analyse for en 6BX-sveiseflens med hals, med en indre temperatur 121 °C (250 °F) på innsiden og -1 °C (30 °F) på yttersiden av flensen.

Bouzid & Nechache (2005) oppgir at differansen i termisk ekspansjonskoeffisient er en potensiell kilde til endringer i sammensettingskreftene. En pakningsring med en termisk ekspansjonskoeffisient som er ulik resten av elementene i flenskoblingen, i hovedsak boltene, vil føre til at en endring i temperatur vil ha en direkte innvirkning på kompresjon av pakningsringen. Da en flenskobling består av flere elementer av ulik temperatur, er det viktig å betrakte hvordan ekspansjonsdifferansen mellom aksial og radial retning påvirker sammentrekningskreftene. API Spec 6A (2010, s. 22) spesifiserer følgende angående termisk ekspansjon:

*“The design shall consider the effects of differential thermal expansion from temperature changes and temperature gradients which the equipment can experience in service.”*

### 3.2.6 Andre tidsavhengige degraderingsmekanismer

Statistikker fra Nordsjøen og Mexicogolfen viser at henholdsvis 27% og 40% av rapporterte feil på undervanns rørledninger skyldes korrosjon. I tillegg kommer det frem at 30% av tilfellene skyldes feil som er relatert til feil på flenser og fittings (DNV-RP-F116, 2009, s. 36). Korrosjon er med andre ord en essensiell mekanisme som i stor grad er med på å bestemme flensens yteevne.

API Spec 17D (2011, s. 26) lister hensyn som må tas i betraktning ved degradering som følge av korrosjon:

- Interne og eksterne væsker
- Sveis
- Spaltnkorrosjon
- Effekter ved bruk av ulike metaller
- Effekter som følge av galvanisk korrosjon
- Overflatebelegg

API-TR-18 (2013) beskriver miljøeffekter som bør inkluderes i en materialvalgprosess for komponenter under vann i forbindelse med olje og gass, og det er spesielt fire degraderingsmekanismer;  $CO_2$ -korrosjon,  $H_2S$ -korrosjon, kloridkorrosjon og hydrogensprøhet.

Spenningsrelaksasjon og siging er degraderingsmekanismer som kan forekomme i boltede flensforbindelser over tid. Dette kan til slutt føre til lekkasje av interne fluider i forbindelsen, og det er derfor viktig å etablere og benytte metoder som kan forutse spenningsrelaksasjon og siging. Temperatur er en sentral faktor for disse fenomenene (Yamaguchi, Tsuji, & Honda, 2010, s. 1). Siging er en tidsavhengig deformasjon av et materiale som er utsatt for høy konstant last. Dette fenomenet forekommer vanligvis i miljøer hvor materialet utsettes for 40 – 50 % av smeltepunktet (API 1PER15K-1, 2013, s. 44). Spenningsrelaksasjon er et lignende fenomen, men i dette tilfellet er det et jevnt tap av spenning for design som er utsatt for høye laster. Et eksempel er en boltet flensforbindelser hvor boltene sakte men sikkert taper spenning (Bickford, 2008). Sentrale faktorer som påvirker spenningsrelaksasjonen av boltene og pakningsringen er initial boltspenning, temperaturendringer og trykk av interne væsker og gasser (Fisher et al., 2002).

### **3.3 Material- og designkrav (API Spec 17D/6A)**

Gjennomgangen av material- og designkrav fra standardverkene API Spec 17D (2011) og API Spec 6A (2010) vil kartlegge hva som skal til for å kvalifisere og kvalitetssikre en API-flens (6BX- sveiseflens med hals) i materialet UNS S31803, under de gitte initialbegrensningene for produktspesifikasjonsnivå og trykkklasse.

#### **3.3.1 Generelt**

API Spec 17D (2011, s. 22) spesifiserer at yteevnen til et produktdesign må dokumenteres når det får endringer i tilpasning, form, funksjon eller materiale. Et design som gjennomgår signifikante endringer, blir ansett som et nytt design og krever omprøving. En signifikant endring, er en endring fra tidligere kvalifiserte konfigurasjoner eller materialvalg, som kan påvirke yteevnen eller bruksområde til produktet. Produktet i denne oppgaven, har usikkerheter i en grad hvor re-kvalifikasjon er nødvendig.

API Spec 17D (2011, s. 25) spesifiserer at materialytelsen for trykkholdige undervannskomponenter skal samsvare med materialkrav fremsatt i API Spec 6A (2010). API Spec 17D (2011, s. 27) spesifiserer også at en kvalitetskontroll av materialet skal samsvare med krav fremsatt i API Spec 6A (2010). Generelle system- og designkrav er spesifisert i API Spec 17D (2011), med referanser til API Spec 6A (2010) hvor krav for undervannsutstyr er tilsvarende krav for overflateutstyr.

Materialkrav, designkrav og kvalitetskontroll for både materialet og flensen er videre forklart i *Kapittel 3.3.2 til 3.3.6*.

#### **3.3.2 Mekaniske materialkrav**

Når et flensmateriale skal velges, kan det velges mellom et standard og et ikke-standard materiale. Et standardmateriale er et materiale som møter eller overgår kravene til en gitt materialbetegnelse. Ikke-standard materialer er materialer som ikke dekker alle disse kravene, og slike materialer krever egen bevisføring som tilfredsstillende krav gitt i API Spec 6A (2010). Det er totalt fire standardmaterialer, med økende krav til 0,2 % offset flytegrense og strekkfasthet. En sveiseflens med hals, avgrenset til trykkklasse 69,0 MPa, vil i utgangspunktet være begrenset til materialbetegnelsene 60K og 75K (API Spec 6A, 2010, s. 34-35).

**Tabell 3-3: Materialdata for UNS S31803 (Vedlegg D) og materialkrav til 60K og 75K-materialer (API Spec 6A, 2010, s. 35, 36, 38, 64).**

Materialegenskap	Enhet	UNS S31803	60K	75K
<b>Flytegrense</b> <sup>1</sup> (0,2% offset flytegrense)	MPa	450	414	517
<b>Strekfasthet</b> <sup>1</sup>	MPa	620	586	655
<b>Bruddforlengelse</b> <sup>1</sup> (50 mm målelengde)	%	25	18	17
<b>Kontraksjon</b> <sup>1</sup>	%	45	35	35
<b>Slagseighet</b> (Gj.snitt verdi i tverrgående/langsgående retning) (Alle testtemperaturer)	J	27 (- 46 °C) / 45 (- 46 °C)	20/27	20/27
<b>Hardhet</b> <sup>3</sup> (Brinell)	HBW	> 210 HB <sup>3</sup>	174	197

<sup>1</sup> Minimumskrav ved romtemperatur (Vedlegg D).  
<sup>2</sup> Testtemperaturen bestemmes av nedre driftsgrense til valgt temperaturklasse (Se Kapittel 3.3.4)  
<sup>3</sup> Verdi basert på hardhetsmålinger oppgitt i datablad (Vedlegg D).

	Godkjent
	Ikke godkjent

Tabell 3-3 viser en sammenligning av oppgitte data for UNS S31803 mot minimumskravene til de tillatte materialbetegnelser. Her ser man at UNS S31803 dekker alle kravene for et 60K-materiale, men ikke for et 75K-materiale. Dette vil bety at en eventuell fremtidig kvalifikasjon for en høyere trykklasse er uaktuelt, da dette vil kreve et 75K-materiale (API Spec 6A, 2010, s. 35).

En oppsummering av tabeller fra API Spec 6A (2010) som er benyttet i dette delkapittelet, er å finne i Vedlegg G, Tabell G-1 til G-4.

### 3.3.3 Materialklasser og korrosjonshensyn

Et flensdesign skal i tillegg til mekaniske egenskaper ta hensyn til driftsbetingelser og relativ korrosivitet (API Spec 6A, 2010, s. 23). Et materialklassifiseringssystem benyttes for å velge ut materialer som motstår driftsbetingelsene forårsaket av interne fluider. Materialklassene er definert i materialklasser fra AA-HH (API Spec 17D, 2011, s. 14), og en fullstendig tabell med klassene er å finne i Vedlegg G, Tabell G-5.

Det valgte materialet UNS S31803 dekker kravene til materialklasse FF, noe som betyr at det er et rustfritt stål som samsvarer med ISO 15156 (2009), og kan dermed benyttes for sur service. ISO 15156 gir krav og anbefalinger til valg og kvalifikasjon av karbon- og lavlegert stål, korrosjonsresistente legeringer, og andre legeringer for bruk i olje- og gassproduksjon i omgivelser som inneholder H<sub>2</sub>S (ISO 15156-1, 2009, s. 1).

UNS S31803 er i dette standardverket definert med en kjemisk sammensetning og PRE<sup>2</sup>-nummer som gitt i *Tabell 3-4*.

**Tabell 3-4: Kjemisk sammensetning og PRE-nummer for UNS S31803 fra ISO 15156-3 (2009, s. 67) sammenlignet med oppgitt data.**

UNS S31803	Maksimal massefraksjon i %									PREN
	C	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	N	P	S	
ISO 15156	0,03	21,0 - 23,0	4,5 - 6,5	2	1	2,5 - 3,5	0,08 - 0,2	0,03	0,02	31 - 38
Data-blad	0,022	22,20	5,70	1,49	0,31	3,15	0,19	0,021	0,0007	-

Sammenlignet med oppgitte data i datablad (*Vedlegg D*), ser man at det valgte materialet ikke overskrider noen av maksimalverdiene for den kjemiske materialsammensetningen i ISO 15156-3 (2009). Basert på PRE-nummeret gir dette miljø- og materialbetingelser som gitt i *Tabell 3-5*.

**Tabell 3-5: Miljø- og materialbegrensninger for UNS S31803 (ISO 15156-3, 2009, s. 31).**

Temperatur [°C]	Partialtrykk H <sub>2</sub> S [kPa]	Kloridkonsentrasjon [mg/l]	pH	Svovelresistans
232	10	Se <sup>1</sup>	Se <sup>1</sup>	Se <sup>2</sup>
<sup>1</sup> Alle kombinasjoner av kloridkonsentrasjon og lokal pH i produksjonen er akseptabel. <sup>2</sup> Ingen tilgjengelig data som kan fastslå om dette materialet kan benyttes i miljø som inneholder elementært svovel.				

API Spec 17D (2011, s. 228-229) spesifiserer flere miljø- og produksjonsbestemte faktorer for det interne fluidet, som er med å bestemme fluidkorrosivitet, og dermed må være med i betraktningen ved valg av materialklasse og legering. Dette omhandler blant annet; trykk, eksponering mot saltvann under installasjon eller drift, bruk av inhibitorer, sandproduksjon og andre potensielle erosjonskilder, og fremtidige operasjoner som kan forandre driftsbetingelsene. En mer fullstendig liste kan finnes i *Vedlegg G, Liste G-1*.

Det er også viktig å ta hensyn til eksterne korrosjonsfaktorer fra det marine miljøet. Materialvalget bør som et minimum være basert på hensyn for følgende eksterne faktorer (API Spec 17D, 2011, s. 26):

- Egenskaper til det eksterne fluidet.
- Sveisbarhet.
- Spaltkorrosjon.

<sup>2</sup> PRE(N)=Pitting Resistance Equivalent (Number)



- Effekter fra ulike metaller som eventuelt er satt sammen i konstruksjonen.
- Effekt fra katodisk beskyttelse.
- Overflatebehandling (maling etc.).

### 3.3.4 Temperaturklasser og temperaturhensyn

Temperaturklasser benyttes når utstyr skal klassifiseres for et temperaturområde. Det finnes totalt 8 standard temperaturklasser med betegnelser fra K-V (API Spec 6A, 2010, s. 23), og en fullstendig tabell er å finne i *Vedlegg G, Tabell G-6*. Det er spesifisert i API Spec 17D (2011, s. 17) at temperaturklasse «U» vil være minimums temperaturklasse for trykkholdige komponenter med klassifiseringen PSL 3/3G. Dette gir øvre og nedre driftsgrense som gitt i *Tabell 3-6*.

**Tabell 3-6: Temperaturklasse U (API Spec 6A, 2010, s. 23).**

Temperaturklasse	Nedre driftsgrense [°C]	Øvre driftsgrense [°C]
U	- 18	121

Skal flensen plasseres i nærheten av en strupeventil eller andre komponenter hvor ekstremt lave temperatur kan forekomme som følge av Joule-Thomson effekter<sup>3</sup>, må det dokumenteres at komponenten kan motstå slike forhold (API Spec 17D, 2011, s. 17).

Det er også mulig klassifisere materialet for temperaturer over øvre driftsgrense for de aktuelle standard temperaturklassene. API Spec 6A (2010, s. 352) spesifiserer da følgende:

*“The design of equipment for operating temperatures above 121 °C (250 °F) shall take into consideration the effects of temperature on material strength.”*

API Spec 6A (2010, s. 352-355) gir forslag på to metoder som kan benyttes for å kvalifisere utstyret for slike driftstemperaturer. For begge metodene vil det være nødvendig å definere egne temperaturklasser. Standarden foreslår følgende temperaturklassene som er vist i *Tabell 3-7*.

<sup>3</sup> Joule-Thomson effekt: Dersom en gass i beholder 1 ved temperatur  $T_1$  og trykk  $P_1$  ekspanderer sakte gjennom en ventil eller porøs plugg inn i beholder 2 hvor trykket  $P_2 < P_1$ , vil man få en temperaturforandring  $\Delta T = T_2 - T_1$  som kan være negativ (Schoen, 1999).

**Tabell 3-7: Temperaturklasser for temperaturer over 121 °C (API Spec 6A, 2010, s. 352).**

Temperaturklasse	Nedre driftsgrense [°C]	Øvre driftsgrense [°C]
X	- 18	180
Y	- 18	345

*Metode 1* går ut på å definere en trykk-temperatur belastningsreduksjon for flensen. Dette betyr at det maksimale arbeidstrykket som er tillat for flensen senkes under standardisert trykkklasse.

*Metode 2* har som utgangspunkt å kvalifisere flensen for et standard maksimalt arbeidstrykk. I stedet for for å redusere det akseptable maksimale arbeidstrykket for flensen, må det bevises at materialet tilfredsstillende materialkravene ved romtemperatur for 0,2 % offset flytegrense og strekkfasthet, også ved de hevede temperaturene. Det er i API Spec 6A (2010, s. 354) indikert en reduksjon på 20 % i flytegrense ved 180 °C for DSS.

Skal UNS S31803 samsvare med ISO 15156 (2009) vil temperaturklasse «Y» ikke kunne benyttes, siden denne standarden setter en maksimal temperatur for materialet på 232 °C (se *Tabell 3-5, s. 40*). Et alternativ er å definere en egen temperaturklasse som har øvre driftsgrense under denne temperaturen.

### 3.3.5 Generelle designkrav

Generelt må en flens, som en komponent i en flensekobling, dekke integritetskravene som stilles til produktet. API Spec 17D (2011, s. 13-15) deler integritet inn i følgende kategorier:

**Trykkintegritet:** Produktet skal være kapabel til å motstå klassifisert arbeidstrykk ved klassifisert temperatur uten deformasjon i en grad som påvirker andre ytelseskrav, eller fører til at spenningskriterier overstiges.

**Termisk integritet:** Produktet skal være kapabel til å fungere gjennom hele temperaturområde til temperaturklassen som er satt for produktet. Produktet skal kvalifiseres for maksimum og minimum temperatur, samt andre termiske effekter som kan oppstå i operasjonstiden.

**Lastkapabilitet:** Produktet skal være kapabel til å motstå alle laster, både interne og eksterne, som det skal utsettes for, uten deformasjon i en grad som påvirker andre ytelseskrav, eller fører til at spenningskriterier overstiges.

**Sykluser:** Produktet skal være kapabel til å yte som planlagt gjennom det antall driftsykluser som er spesifisert for produktet. Med dette er det underforstått at produktet skal være designet slik at det fungerer under det antall trykk-, temperatur- og lastsykluser som kreves for produktet.

### 3.3.6 Kvalitetskontroll av flenser i henhold til API Spec 17D

En rekke kvalitetskontroller må utføres før en standardisert flens plasseres på havbunnen. Dette gjøres for å vise at det ferdige produktet innehar tilstrekkelig integritet.

Aktuelle kvalitetskontroller gjeldende for en flens, er presentert i *Tabell 3-8*. I tillegg må det gjøres egne vurderinger om andre valideringstester er nødvendig for å kvalifisere produktet for bruk. Disse testene må kunne korreleres med tilsiktet levetid (API Spec 17D, 2011, s. 22). Valideringstestene skal utføres med en prototype/testflens som er representativ for det endelige produktets design, dimensjoner/toleranser, planlagt fabrikkasjonsprosess, avvik og materiale (API Spec 17D, 2011, s. 22).

Uttak av prøvestykker til strekkprøving og skårslagsprøving skal i henhold til API Spec 17D (2011, s. 47) utføres med en standardisert metode. Formålet med den standardiserte metoden er at prøvestykkene skal representere slagseigheten og fastheten til produktet i ulike posisjoner. Testprøver hentes ut fra et større stykke (QTC «Qualification Test Coupon»). QTC skal ha lik varmebehandling og varmbearbeiding som produktet den kvalifiserer. Størrelsen til QTC og hvordan testprøvene skal tas ut bestemmes av standardiserte beregninger, og sentrale faktorer er produktets geometri og størrelse.

**Tabell 3-8: Sammendrag av kvalitetskontroller i henhold til API Spec 17D (2011).**

Kategori	Kvalitetskontroll	Beskrivelse
<b>Mekaniske tester</b>	<i>Strekktester</i>	Utføres ved romtemperatur for å verifisere at materialkrav imøtekommes. Testprøve hentes ut fra QTC. Krav skal imøtekomme krav framsatt i <i>Tabell 3-3</i> . Relevante standardverk: ISO 6892-1, ASTM A370
	<i>Skårslagsprøving</i>	Charpy V-notch. Testprøve hentes ut fra QTC. Minimum tre slagprøver, hvor det maksimalt er tillat at en av slagprøvene havner én tredjedel under kravene framsatt i <i>Tabell 3-3</i> . Relevante standardverk: ISO 148 (alle deler) eller ASTM A370
	<i>Hardhetstester</i>	Utføres på alle deler av et utstyr, og skal være innenfor spesifiserte krav. Relevante standardverk: Brinell: ISO 6506 (avdrag 1-4) eller ASTM E10 Rockwell: ISO 6508 (avdrag 1-3) eller ASTM E18
<b>Validerings-tester</b>	<i>Hydrostatisk test</i>	Test av produkt med 1,5 ganger klassifisert arbeidstrykk. Ingen synlig lekkasje tillatt.
	<i>Trykksyklus-test</i>	Trykksykluser skal simulere oppstart og nedstenging som forekommer i løpet av feltets levetid.
	<i>Lastsyklus-test</i>	Tester hvor utstyret utsettes for laster den skal være klassifisert til å tåle i et gitt antall sykluser. Verifisering i form av valideringstesting og tekniske analyser.
	<i>Temperatursykluser</i>	Temperatursyklustestene skal utføres vekselvis med oppvarming og nedkjøling til øvre og nedre ekstremalverdier hvor ingen lekkasje skal inntreffe.
	<i>Levetids-/utholdenhets-tester</i>	Utsette produktet for operasjonssykluser. For eksempel åpne/lukke ventil under maksimalt trykk, eller «make-break»-tester for tilkoblinger.
<b>Annet</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Kjemisk analyse</i> – kontrollere riktig kjemisk sammensetning av legeringselementer.</li> <li>• <i>Dimensjonskontroll</i></li> <li>• <i>Volumetrisk NDE</i></li> <li>• <i>Overflate NDE</i></li> <li>• <i>Eksaminering og testing av sveis</i></li> </ul>	

### 3.4 Tidligere arbeid

Gjengedal, Fyllingen & Sture (2013) har gjennomført strekkprøver og Charpy-tester av stangmaterialet UNS S31803, med formål om å undersøke potensielt bruk som flensmateriale. De har også utarbeidet en strukturanalyse (FEA) som en del av arbeidet for eksaminering av en boltet flensforbindelse.

Det er viktig å påpeke at det er en 2" ASME-flens med trykklassen «1500 psi», som er benyttet i modellen. Dette er en annen trykkklasse, samt at det er dimensjonale forskjeller sammenlignet med 2<sup>1/16</sup>" 6BX API-flens.

Laveste verdi fra Charpy-testene var 117 J, noe som er god margin sammenlignet med krav om 45 J som gjennomsnittsverdi og 35 J som enkeltverdi. Uavhengig av retningen var alle prøvene godt innenfor designkravene. Testene som ble utført ved -46 °C viste ingen fare for sprøbrudd (Gjengedal et al., 2013).

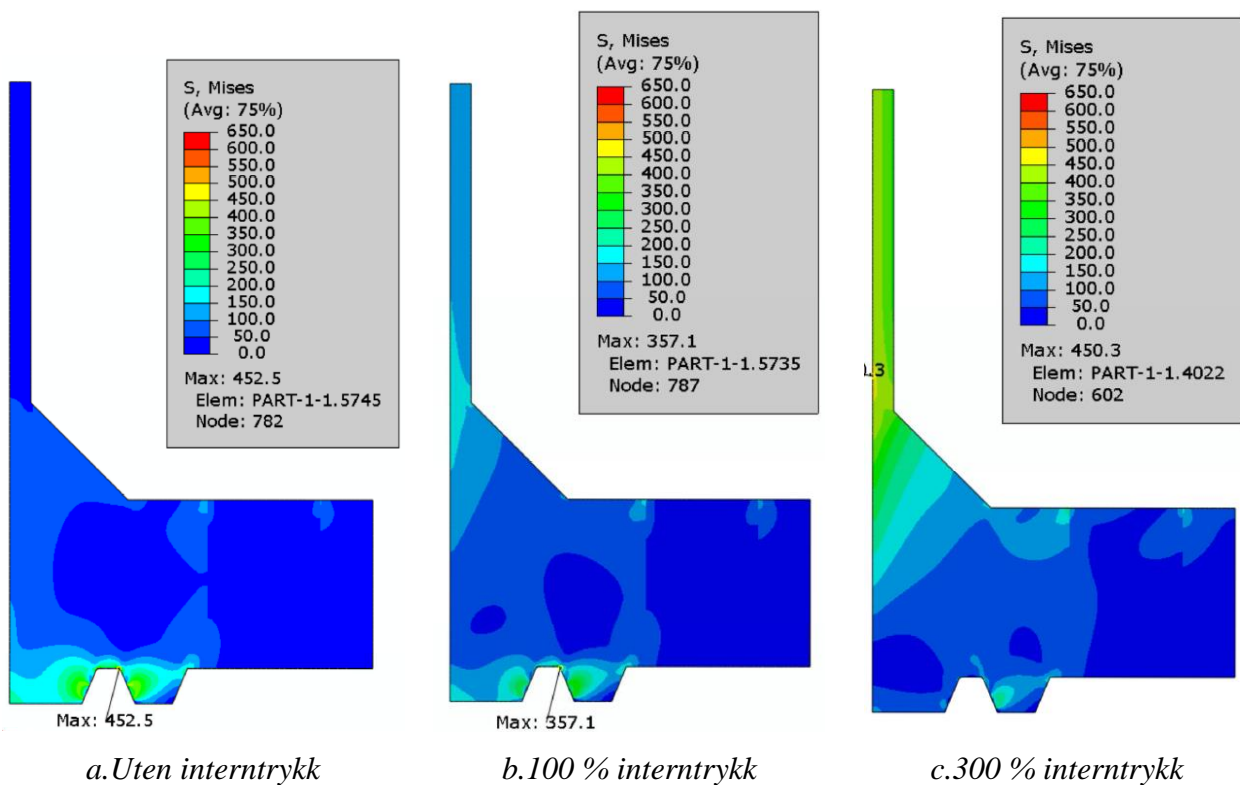
Strekkprøvene viste at flytegrensen varierte mellom stangdimensjonene Ø220 mm og Ø250 mm. Testresultatene viste en minimums flytegrense på 480 MPa for stangdimensjonen Ø220 mm, og 465 MPa for stangdimensjon Ø250 mm. En interessant observasjon fra disse resultatene var at minimumsverdiene ble observert i prøvestykker med lik radiell posisjon i de to stengene (48mm fra senterlinje). Observerte maksimalverdier for flytegrense var 549 MPa (Ø220 mm) og 624 MPa (Ø250 mm). Gjengedal, Fyllingen & Sture (2013) kommenterer at stangdimensjonen har en klar innflytelse på variasjonene i de mekaniske egenskapene, noe som antageligvis skyldes ulik grad av varmbearbeiding (smiing og rulling).

Gjengedal, Fyllingen & Sture (2013) utførte strukturanalyser (FEA) for å undersøke spenningsnivåene i den boltede flensforbindelsen. Dimensjonene til flensen ble hentet fra ASME B16.5. Friksjonskoeffisienter ble undersøkt mellom bolter og flensmateriale, og dette viste at en minkende friksjon gav økende maksimal spenningsintensitet i flensen. Med dette som grunnlag ble en friksjon lik 0 benyttet i den videre analysen. Henholdsvis ble UNS S31803, UNS S31603 og UNS G41400 benyttet for flensmaterialet, pakningsringen, og boltene. Materialeegenskapene er illustrert i *Tabell 3-10*. Boltspenningen ble beregnet basert på designregler for boltede flensforbindelser i «ASME Boiler and pressure vessel code».

*Figur 3-4* viser et utdrag fra strukturanalysen. Utdraget viser tre situasjoner med 100% boltspenning; ingen interntrykk (a.), 100 % interntrykk (b.), og 300 % interntrykk(c.). Den betraktete ASME-flensen er klassifisert for trykklassen «1500 psi», og dette tilsvarer 100 %

interntrykk i strukturanalysen. Ingen interntrykk gav den største spenningskonsentrasjonen, lokalisert i ringsporet. Et økende interntrykk vil være med på å separere flenshalvdelene, noe som gir en mindre spenningskonsentrasjon i ringsporet. En økning av interntrykket gir også økte spenningskonsentrasjoner i hubben/halsen til flensen. Nærmere beskrivelse av fremgangsmetoden og detaljer om den aksesymmetriske modellen er å finne i referansen. Benyttet materialdata i FEM-analysen er presentert i *Tabell 3-9*.

*Tabell 3-10* viser kombinasjon av boltelaster og interntrykk benyttet i modellen, og resulterende maksimal Von Mises spenningsequivivalent. De beregnede spenningsintensitetene i ringsporet viste nivåer over materialets antatte flytegrense (450 MPa). Gjengedal, Fyllingen & Sture (2013) kommenterer at denne spenningen i høy grad er lokalisert, noe som betyr at kun et lite område opplever plastisk deformasjon. Det eksponerte volumet som opplever plastisk deformasjon anses å være liten og kan neglisjeres for flensens systemintegritet.



**Figur 3-4: Område for maksimal spennings-konsentrasjon med boltspenning 100% boltspenning, og varierende interntrykk (Gjengedal et al., 2013).**

**Tabell 3-9: Materialelegenskaper som er benyttet i modellen (Gjengedal et al., 2013)**

Parameter	Bolt	Flange	Gasket
Young's Modulus [MPa]	204 000	200 000	195 000
Poisson's Ratio [-]	0.3	0.3	0.3
Yield stress [MPa]	-	450	259
Plastic tangent modulus [MPa]	-	1457	1604

**Tabell 3-10: Maksimale spenninger for ulike kombinasjoner av boltelaster og internovertrykk (Gjengedal et al., 2013).**

Step	Set I	Set II	Set III
Bolt Load	100 %	125 %	240 %
Seating condition	452.5 MPa	459.9 MPa	626.9 MPa
Pressure 1 (100%)	357.1 MPa	407.0 MPa	571.5 MPa
Pressure 2 (150%)	329.9 MPa	386.5 MPa	571.7 MPa
Pressure 3 (200%)	327.4 MPa	366.1 MPa	572.0 MPa
Pressure 4 (300%)	450.3 MPa	450.4 MPa	573.2 MPa





# Kapittel 4

## Teknologikartlegging

Teknologikartleggingen benytter kvalifikasjonsbasisen som informasjonstilførsel, og skal identifisere hvilke elementer som involverer «ny teknologi», samt at nøkkelutfordringer og usikkerheter kartlegges.

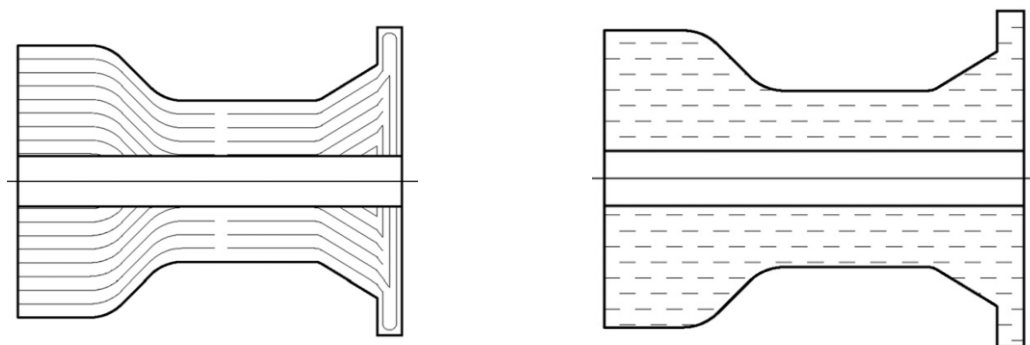
Etter en teknologikartlegging er det i henhold til DNV-RP-A203 (2011) naturlig å følge opp med å gjennomføre en trusselvurdering hvor identifiserte feilmoder og underliggende feilmekanismer evalueres gjennom vurdering av risiko (sannsynlighet og konsekvens). Det er valgt å begrense oppgaven til å kartlegging av nøkkelutfordringer og usikkerheter.

Teknologikartleggingen er bygget opp slik at *Kapittel 4.1* beskriver hva som involverer «ny teknologi». Videre identifiseres nøkkelutfordringene og usikkerhetene ved å maskinere flens fra stangmateriale i *Kapittel 4.2*. En oppsummering av dette arbeidet er presentert gjennom figurer i *Kapittel 4.3*.

*Kapittel 4.4* beskriver avgrensinger for kommende kvalifikasjonsaktiviteter (eksperimentelle forsøk) planlagt og utført i *Kapittel 5*.

### 4.1 Hva er nytt?

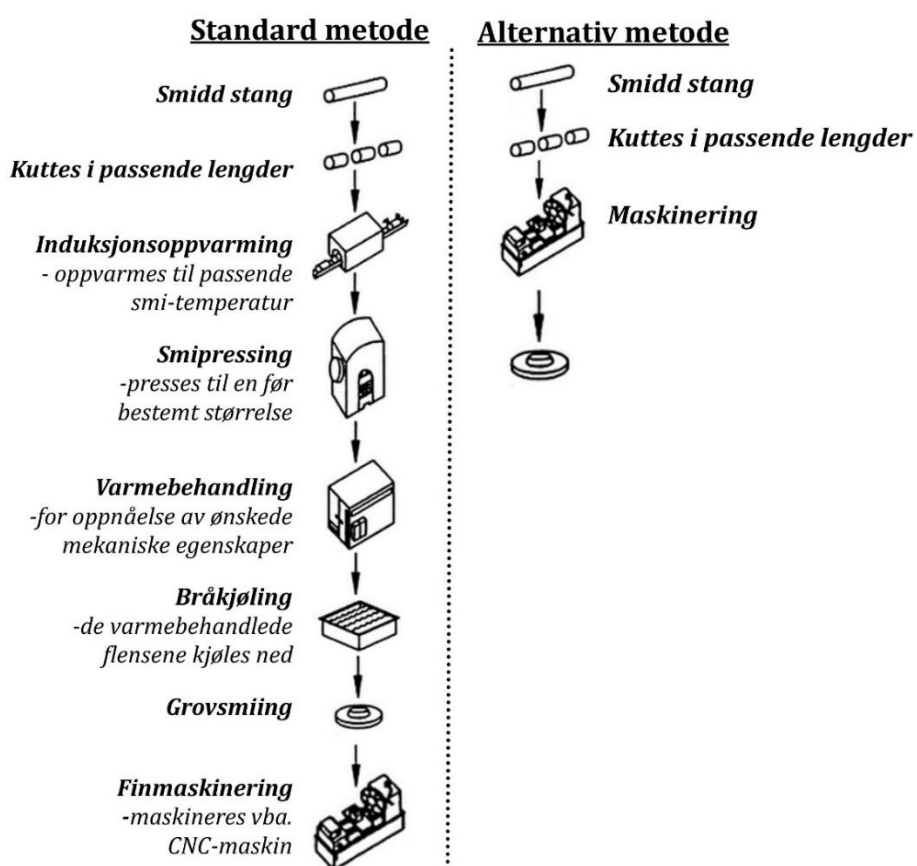
Tilvirkningsprosessene for flens «smidd til form» og «maskinert fra smidd stang», er illustrert i *Figur 4-2*. Det er mulig at den alternative metoden vil inkludere flere steg. Fra *Kapittel 2.4.2* (s. 21) er det kjent at produkter som smis til form kan oppnå fordelaktige materialeegenskaper, ved at spenninger påføres i tre retninger. Materialstrukturen til et produkt smidd til form, kontra maskinert fra smidd stang, er illustrert i *Figur 4-1*. Den alternative metoden gir usikkerheter om hvorvidt man oppnår en design som er tilfredsstillende i det gitte miljøet flensen utsettes for, og disses usikkerhetene kartlegges i *Kapittel 4.2*.



a. Dyse som er smidd til form

b. Dyse som er maskinert ut fra en smidd stang

**Figur 4-1** Illustrasjon av strukturen til en dyse som er smidd til form og en dyse som er maskinert fra stang (Stewart & Lewis, 2013, s. 226).



**Figur 4-2:** Illustrasjon av standardisert metode og en alternativ metode for tilvirkning av flenser. Egenprodusert basert på U.S International Trade Commission (1994).

## 4.2 Nøkkelfordringer og usikkerheter

Ny teknologi eller nye design er ofte basert allerede eksisterende teknologier der det benyttes en kombinasjon kjente og ukjente elementer. Usikkerhetene er i hovedsak assosiert med de ukjente elementene (DNV-RP-A203, 2011, s. 20). Det er derfor hensiktsmessig å kartlegge ukjente elementene som oppstår når tilvirkningsmetoden endres for en standardisert 6BX-sveiseflens med hals. Tre nøkkelfordringer er kartlagt basert på informasjonen samlet i *Kapittel 3.2 Systembeskrivelse (s. 29)* og *Kapittel 2 Teoretisk grunnlag*:

- Flensens resistans mot kombinasjoner av statiske laster
- Flensens resistans mot kombinasjoner av dynamiske laster
- Flensens resistans mot tidsavhengige degraderingsmekanismer

Nøkkelfordringene med underliggende usikkerheter blir videre forklart i kapitlene 4.2.1 til 4.2.3.

### 4.2.1 Flensens resistans mot statiske laster

Den tekniske rapporten API-TP-6AF2 (2013) tar for seg yteevnen til 6BX-integralflenser under kombinasjon av statiske laster. Fra *Kapittel 2.4.2 (s. 21)* kommer det frem at flenser smidd til form oppnår fordelaktige materialegenskaper ved at det påføres spenninger i tre retninger. På generelt grunnlag kan det antas at resistansen mot kombinasjonen av statiske laster er mindre god for en flens som er maskinert ut fra en smidd stang, sammenlignet med en flens som er smidd til form. Som beskrevet i *Kapittel 3.2.3 (s.32)*, er flensens resistans mot statiske laster basert på to kriterier; lekkasjekriterium og spenningskriterium. Det er usikkert om disse kriteriene tilfredsstilles.

#### 4.2.2 Flensens resistans mot dynamiske laster

Utmattingssegenskapene til flensen som maskineres ut fra en smidd stang skal kunne motstå alle dynamiske laster i løpet av dens levetid. Generelt beskrives følgende vedrørende resistans mot sykliske laster i API Spec 17D (2011):

*“Product designs shall be capable of performing and operating in service as intended for the number of operating cycles as specified by the manufacturer. Products should be designed to operate for the required pressure/temperature cycles, cyclic external loads and multiple make/break (latch/unlatch), as applicable and where applicable as verified in validation testing”*

Fra *Kapittel 2.4.2 (s.21)* kommer det frem at en flens som er smidd til form har bedre utmattingssegenskaper, sammenlignet med en flens maskinert fra stangmateriale. Derfor vurderes det som usikkert om resistansen mot dynamiske laster for en flens som er maskinert direkte fra en smidd stang er tilstrekkelig. Kilder til dynamiske laster er nærmere beskrevet i *Kapittel 3.2.4 Kombinasjoner av dynamiske laster (s. 35)*.

Tidligere er det beskrevet i *Kapittel 3.2.5 (s. 36)* at termisk ekspansjon har stor betydning for integriteten til boltede flensforbindelser. Bouzid & Nechache (2005) oppgir at halvparten av de initiale sammentrekningskreftene i ringpakningen kan gå tapt i en flenskobling for visse typer ringpakninger utsatt for relativt høye temperaturer. Det presiseres videre at det viktig å betrakte hvordan ekspansjonsdifferansen mellom aksial og radial retning påvirker sammensettingskreftene for en flenskobling som består av flere elementer av ulik temperatur.

#### 4.2.3 Flensens resistans mot tidsavhengige degraderingsmekanismer

*Kapittel 3.2.6 (s.37)* peker på degraderingsmekanismer over tid som vesentlig for integriteten til boltede flensforbindelser. Endring av tilvirkningsmetoden til flensen gir usikkerheter om flensen har tilstrekkelig integritet i miljøet den utsettes for.

Sentrale korrosjonsformer vil være;  $CO_2$ -korrosjon,  $H_2S$ -korrosjon, kloridkorrosjon. Det er kjent at dupleksmaterialer kan være utsatt for materialsprøhet når den er i et undervannsmiljø hvor en annen struktur er beskyttet katodisk. Det er usikkerheter hvor god flensens resistans er mot disse degraderingsmekanismene sammenlignet med en flens som er smidd til form. Cassagne & Busschaert (2005) presiserer at det er viktig at undervannsfleuser «smis til form»,

og følger opp med at dette vil gi bedre resistans mot HISC, sammenlignet med en flens som ikke tilvirkes på denne måten.

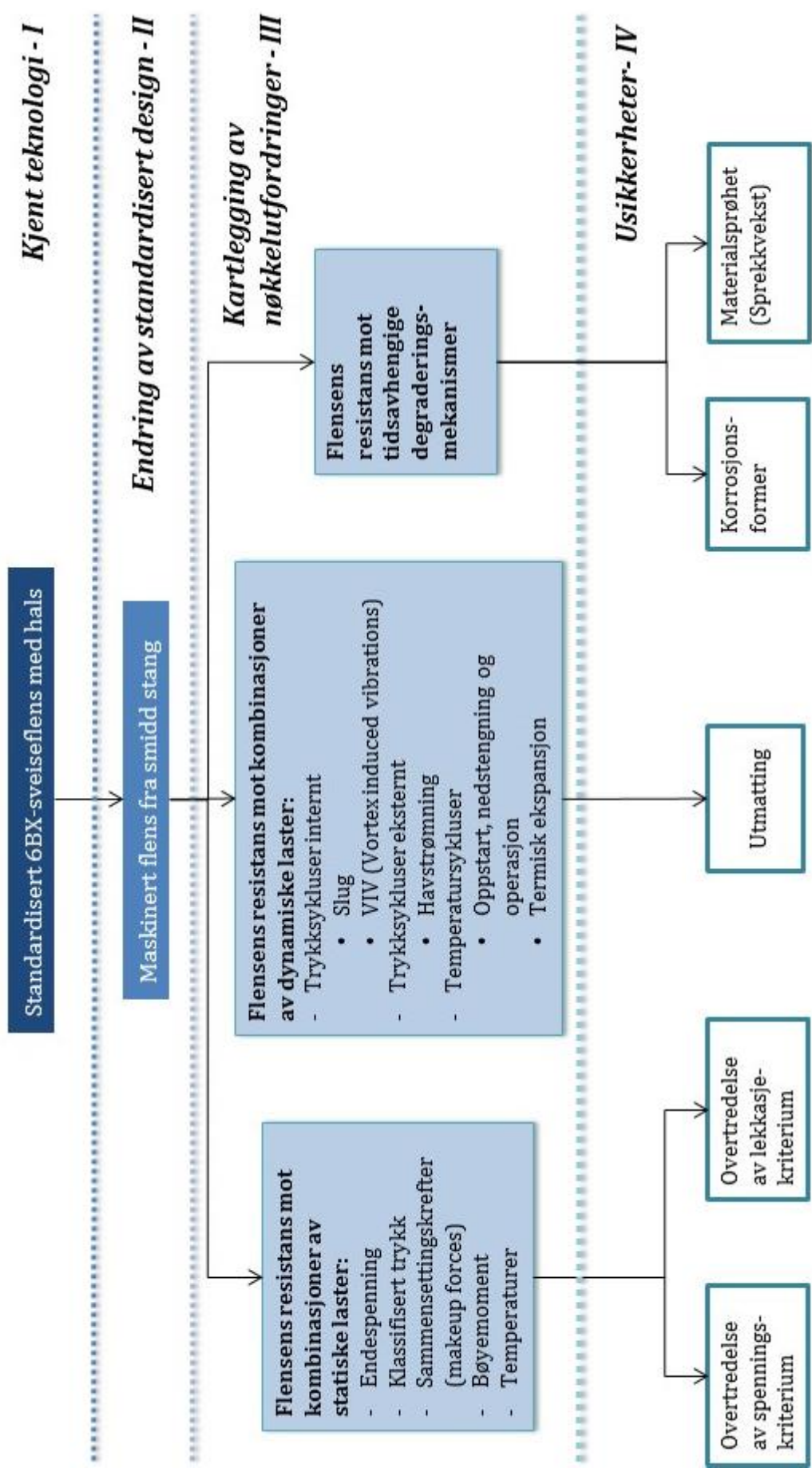
Siging og spenningsrelaksasjon andre degraderingsmekanismer som bør vurderes for den totale integriteten til en boltet flensforbindelse. Nechache og Bouzid (2007) peker på at det er vanskelig å bedømme siging av sammensettingskreftene i en boltet forbindelse. Tetthetsgraden til boltede flensforbindelser er ikke bare et resultat av siging i pakningsringen, men også siging av boltmaterialet og selve flensmaterialet. Flenser kan oppleve lekkasjer i tiden etter en hydrostatisk test av påkjenningene den opplever som følge av siging. Sigefenomenet er av størst bekymring i miljøer hvor temperaturene er høye.

### 4.3 Oversikt

På bakgrunn av kartlegging av nøkkelutfordringer og usikkerheter i *Kapittel 4.1* og *4.2*, er det laget en oppsummering som presenteres i *Figur 4-3*. Her brytes nøkkelutfordringer ned til underliggende usikkerheter.

Figuren består av fire steg, hvor den øverste boksen (I) representerer en godkjent standardisert 6BX-sveiseflens med hals. Videre representerer boksen under (II) en endring i det standardiserte designet, ved at tilvirkningsmetoden endres fra «å smi til form» til «å maskinere direkte fra smidd stang». Neste nivå (III) viser de tre hovedkategoriene av nøkkelutfordringer for det nye flensdesignet. Hver hovedkategori brytes så videre ned til et høyere detaljnivå av usikkerheter (feilmoder eller feilmekanismer) (IV).

Det er viktig å påpeke at figuren er ment som en generell retningslinje, og at det kan være flere usikkerheter som ikke er kartlagt. Ved videre arbeid gir figuren likevel et utgangspunkt for hvilke nøkkelutfordringer og usikkerheter som må undersøkes nærmere.



Figur 4-3: Teknologinedbrytning.

#### 4.4 Valgt kvalifiseringsområde

Nøkkelfordringene kartlagt i *Figur 4-3* viser at en total kvalifikasjon er en omfattende prosess. Det er valgt å avgrense videre arbeid til nøkkelfordringen «*Flensens resistans mot kombinasjoner av statiske laster*».

Usikkerhetene ved denne nøkkelfordringen, er hvorvidt flensen vil overskride lekkasje- eller spenningskriteriet. For å kunne vurdere om flensen overskrider disse kriteriene, vil det være nødvendig å utvikle en modell av flenskoblingen, slik at det kan utføres strukturanalyser (FEA - Finite Element Analysis). Det er i den tekniske rapporten API 17TR8 (2013) presisert at materialeegenskapene flytegrense, E-modul og Poissons tall, er typisk informasjon som bør inkluderes i en materialmodell under en lineær-elastisk FEA. Skal det utføres en elastisk-plastisk FEA, er det i tillegg nødvendig å inkludere informasjon som strekkfasthet, termiske egenskaper, og sann-spenning-/sann-tøyningsdata.

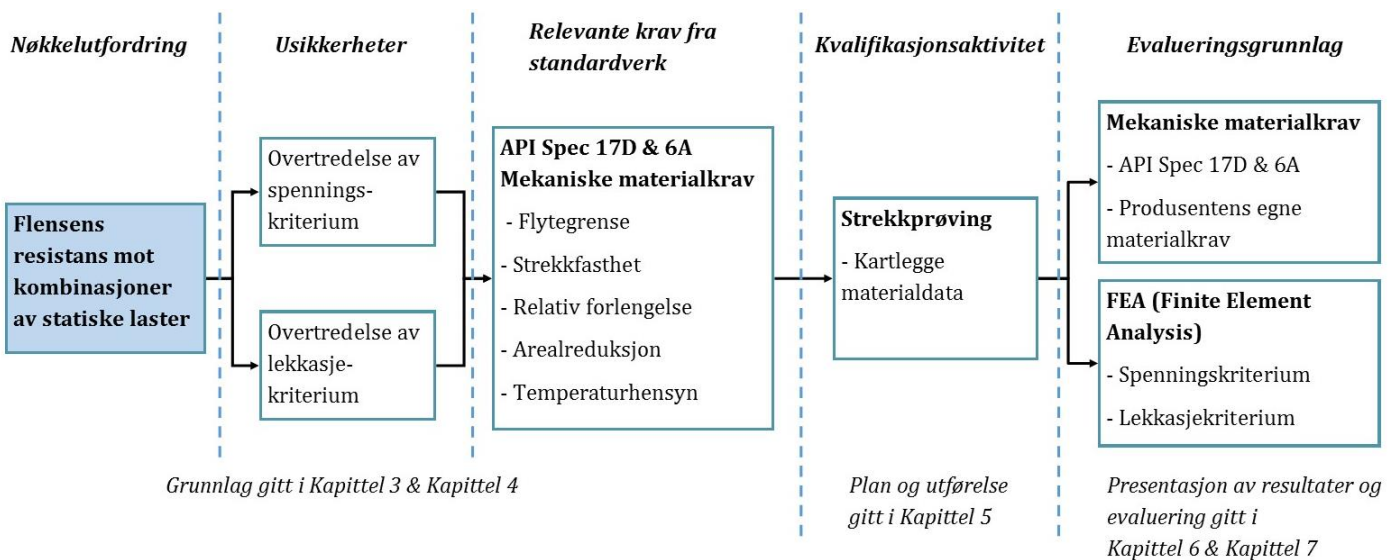
Basert på informasjon som er nødvendig for å utføre en FEA, er det valgt å kartlegge materialdata gjennom strekkprøver av stangmaterialet UNS S31803. Dette vil gi informasjon om E-modul, Poissons tall, 0,2 % offset flytegrense, strekkfasthet og duktilitet i stangmaterialet. Kartlegges materialdata i tillegg i ulike posisjoner, retninger, og ved ulike temperaturer, vil dette gi en bedre materialmodell, noe som gir en mer nøyaktig strukturanalyse av flensen.

Denne oppgaven inkluderer ikke egne strukturanalyser, og det er valgt å benytte andre kilder som evalueringsgrunnlag for de innsamlet data fra strekkprøvene. Det er i *Kapittel 3.3 Material- og designkrav (API Spec 17D/6A) (s. 38)* etablert en rekke materialkrav for en 6BX-flens under de gitte avgrensningene i denne kvalifikasjonen. Dette er materialkrav som verifiserer at dagens standardisert flenser har tilstrekkelige materialeegenskaper, og det er tenkelig at den nye teknologien kan kvalifiseres om den oppfyller de samme kravene. Dersom kravene oppfylles for alle posisjoner og retninger i stangen, vil en flens maskinert fra denne stangen også ha tilstrekkelig egenskaper vurdert opp mot disse kravene.

Det vil også være naturlig å sammenligne resultatene fra strekkprøvene opp mot materialprodusentens egne krav til materialet, slik at det kan vurderes om informasjonen oppgitt fra produsenten er tilstrekkelig ved fremtidige strukturanalyser av flenser.

En illustrasjon av hvordan den valgte nøkkelfordringen skal føres fra et usikkert stadium til bevist teknologi, er gitt i *Figur 4-4*. Figuren viser hvordan nøkkelfordringen er brutt ned i

usikkerheter, hvilke relevante standardverk som gjelder for disse usikkerhetene, og hvilken kvalifikasjonsaktivitet som skal benyttes for å gi bevisførsel for disse usikkerhetene. Til slutt viser figuren evalueringsgrunnlaget som bevisene skal vurderes opp mot. En oppsummering av de mekaniske materialkravene og typiske materialverdiene som benyttes som evalueringsgrunnlag er gitt i *Tabell 4-2* og *Tabell 4-3*. Ved en vellykket kvalifikasjon vil flensen i materialet UNS S31803 oppfylle spesifikasjonene gitt i *Tabell 4-1*.



**Figur 4-4: Flytdiagram for valgt kvalifiseringsområde.**

**Tabell 4-1: Oppfylte spesifikasjoner ved en vellykket kvalifikasjon.**

Spesifikasjon	
Spesifikasjonsnivå	PSL 3 og 3G
Trykkklasse	69 MPa
Temperaturklasse	-18 – 120 °C (Klasse U) eller høyere
Materialbetegnelse	60K

**Tabell 4-2: Evalueringsgrunnlag (60K-materiale, produsentens egne krav og forventede verdier)**

Materialegenskap	Krav	
	60K (API Spec 6A, 2010)	Produsenten
E-modul [GPa]	-	200 GPa <sup>1</sup>
Poissons tall	-	0,3 <sup>1</sup>
0,2% offset flytegrense [MPa]	414 MPa	485/450MPa <sup>2</sup>
Strekkfasthet [MPa]	586 MPa	655/620 MPa <sup>2</sup>
Minimum bruddforlengelse [%]	18 %	25/20 % <sup>2</sup>
Minimum kontraksjon [%]	35 %	45 % <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Generelt for dupleks rustfritt stål (Outokumpu, 2013)  
<sup>2</sup> Langsgående retning / Tverrgående retning (Vedlegg D)



**Tabell 4-3: Materialegenskaper for UNS S31803 ved hevede temperaturer (Outokumpu, 2013)**

Materialegenskap	Enhet	Temperatur [°C]		
		100	150	200
<b>E-modul<sup>1</sup></b>	GPa	194	-	186
<b>Flytegrense<sup>1</sup></b> (0,2% offset flytegrense)	MPa	360	335	315
<b>Strekfasthet<sup>1</sup></b>	MPa	590	570	550

<sup>1</sup> Generelt for dupleks rustfritt stål (Outokumpu, 2013)



# Kapittel 5

## Kvalifikasjonsplan og utførelse av kvalifikasjonsaktiviteter

Dette kapittelet tar for seg usikkerhetene fra det valgte kvalifiseringsområdet, forklart i kapittel 4.4 *Valgt kvalifiseringsområde*, og skal presentere hvordan bevisinnsamling skal gjennomføres for å håndtere disse usikkerhetene.

Kvalifikasjonsaktiviteter i form av strekkprøving skal utføres for kartlegging av materialegenskaper til ulike seksjoner i stengene. Viktig data kan da vurderes opp mot materialkrav fra standardverk, produsentens egne materialkrav, teori, og ulike seksjoner i flensen. Innsamlet data vil også være essensiell i strukturanalyser av flensen.

### 5.1 Mål og plan for strekkprøving

Denne delen skal forklare hvilke data det er valgt å innhente, prøvestykkenes dimensjoner, og hvordan prøvestykkene fremstilles og hentes ut fra stengene.

#### 5.1.1 Mål for strekkprøving

Fra *Kapittel 4.4 Valgt kvalifiseringsområde* kommer det frem at det vil være fordelaktig å kartlegge materialdata for stangmaterialet i ulike posisjoner, retninger og ved ulike temperaturer. Dette vil gi data som kan vurderes opp mot krav gitt fra standardverkene API Spec 17D/6A, produsentens egne krav til materialet, og benyttes ved strukturanalyser av flensen. Det er derfor ønskelig at E-modul, Poissons tall, 0,2 % offset flytegrense, strekkfasthet, bruddforlengelse og kontraksjon kartlegges for alle strekkprøvene. Grunnet begrensninger ved tilgjengelig utstyr, er det kun mulig å finne Poissons tall for strekkprøver ved romtemperatur.

Det er i *Kapittel 2.4.3 (s. 22)* forklart at en varmvalset stang kan ha egenskaper som varierer med radiell posisjon i stangen. Grunnen til dette er ulik grad av deformasjon, hvor senter av stangen vil ha minst deformasjon, mens posisjoner nærmere ytterkanten vil ha større deformasjon som kan gi sterkere materiale. Variasjon etter radiell posisjon vil være avhengig av stangens diameter, hvor variasjonene øker med økt diameter (Nisbett, 2005, s. 5). Det er usikkerheter i hvor stor grad det vil være variasjoner i de mekaniske egenskapene etter radiell

avstand fra senter i stangen, og med mangel på detaljert dokumentasjon i publikasjoner og datablad, vil det være essensielt å undersøke dette som en del av kvalifikasjonen.

Smidde stenger kan ha grad av anisotropi (se *Kapittel 2.4.3, s. 22*), noe som vil si at materialet har ulike mekaniske egenskaper avhengig av retning i materialet. Fra produsentens egne krav (se *Tabell 3-1, s. 31*), fremkommer det også ulike krav til materialet for langsgående (i rulleretning) og tverrgående retning (på tvers av rulleretning). Det vil derfor være nødvendig å undersøke eventuell anisotropi i stangen.

*Tabell 3-2 (s. 31)* indikerer at flere av materialeegenskapene vil forandre seg som følge av temperaturendringer. Det stilles også krav til at produkter med produktspesifikasjonsnivå PSL 3, må være kvalifisert for et minimums temperaturområde fra -18 til 121 °C (se *Kapittel 3.3.4, s. 41*). Det er derfor ønskelig å undersøke materialeegenskapene ved disse grenseverdiene. For å undersøke hvordan materialet yter utover minimums temperaturområde, er det også fordelaktig å undersøke temperaturer utenfor disse grenseverdiene.

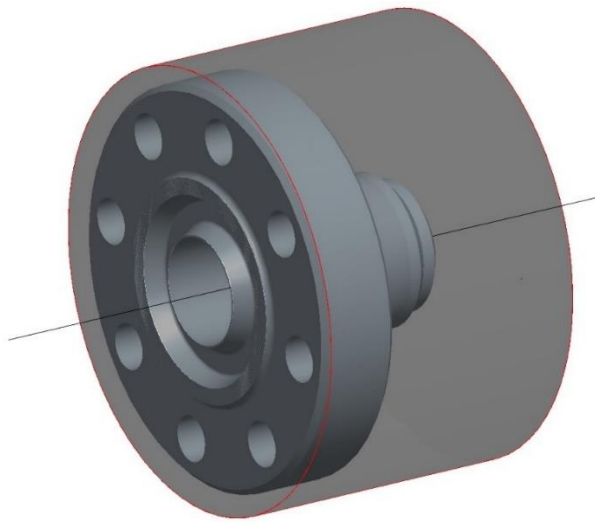
Basert på valgt kvalifikasjonsområde og vurderingene gjort i dette kapittelet, er følgende mål er satt for strekkprøvingen:

- Kartlegge E-modul, 0,2 % offset flytegrense, strekkfasthet, bruddforlengelse og kontraksjon for alle prøvestykkene. Poissons tall skal kartlegges for strekkprøver ved romtemperatur.
- Undersøke om det er variasjoner i mekaniske egenskaper ved ulik radiell avstand fra senter i stangen.
- Undersøke eventuell anisotropi i stangen.
- Undersøke materialets mekaniske egenskaper ved øvre og nedre driftsgrense for minimum temperaturklasse (-18 °C og 121 °C). Materialeegenskaper for temperaturer over og under driftsgrensene skal også undersøkes for å kunne gi et bedre bilde på hvordan materialet presterer ved ulike temperaturer.

### 5.1.2 Oppdeling av stang: Ø220/250 mm

Det er valgt å se på to ulike stangdimensjoner i denne kvalifikasjonen, slik at i tillegg til å gjenspeile resultater, vil det være mulig å se hvilken påvirkning stangdimensjonen har på resultatene. Begge dimensjonene kan potensielt benyttes for flensstørrelsen  $2^{1/16}$ ", og denne flensstørrelsen er valgt som referansestørrelse videre i kvalifikasjonen.

Det er antatt at en maskinert flens vil være plassert slik at den deler senterlinjen med stangen, slik som vist på *Figur 5-1*. Siden denne senterlinjen vil være felles referansepunkt for flens og stang, uansett størrelse, vil en radiell avstand fra denne linjen gi godt utgangspunkt for å finne materialeegenskaper på ulike steder i flensen.

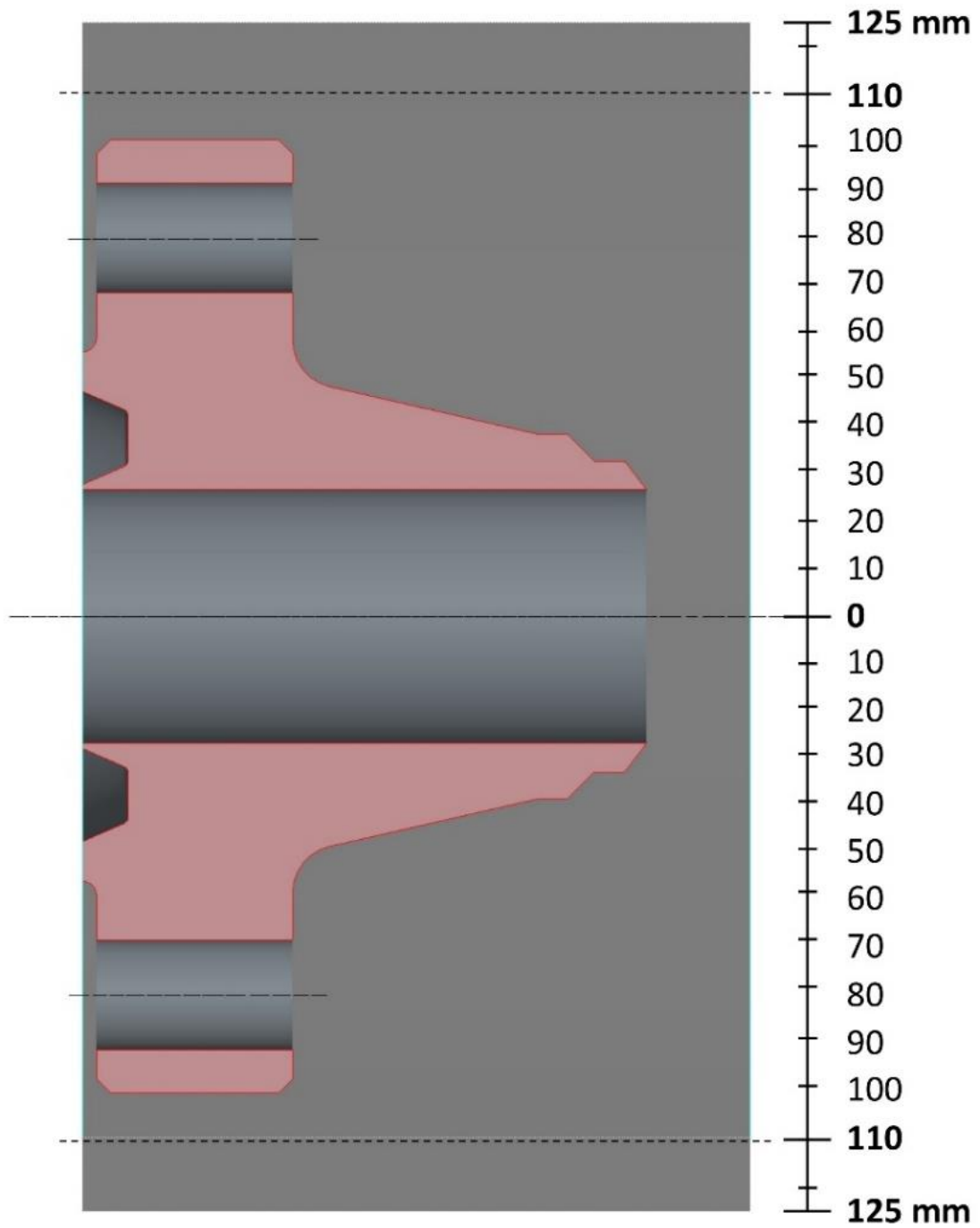


*Figur 5-1: Flensen deler senterlinjen med stangen.*

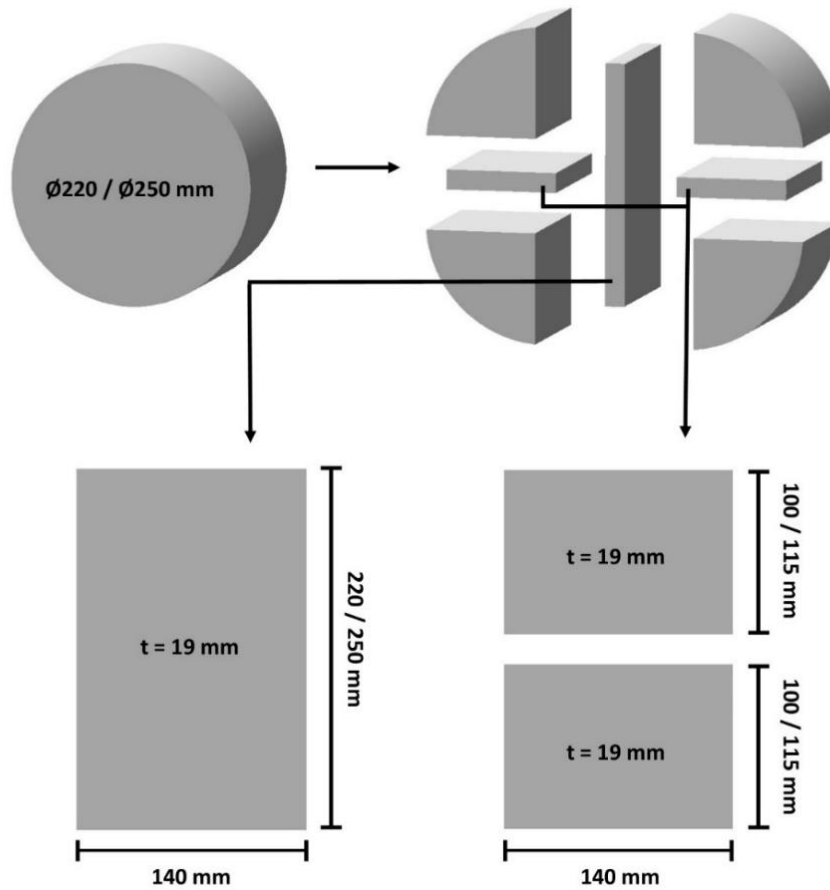
Det er antatt at stangen er aksesymmetrisk, noe som betyr at to prøvestykker med samme radiell avstand fra senterlinjen vil gi like mekaniske egenskaper. Den radielle skalaen vist i *Figur 5-2* benyttes derfor ved sammenligning av prøvestykkenes testresultater.

Det skal hentes ut prøvestykker fra forskjellige radielle posisjoner, og da er det hensiktsmessig å skjære ut plater som dekker hele tverrsnittet til stengene. Dette er illustrert i *Figur 5-3*, hvor tre 19 mm tykke plater er skjært ut av fra begge stangdimensjonene. Da det også er ønskelig å utføre strekkprøver ved hevede og senkede temperaturer, deles Ø220-stangen videre opp som vist på *Figur 5-4*, noe som gir fire ekstra 19 mm tykke plater.

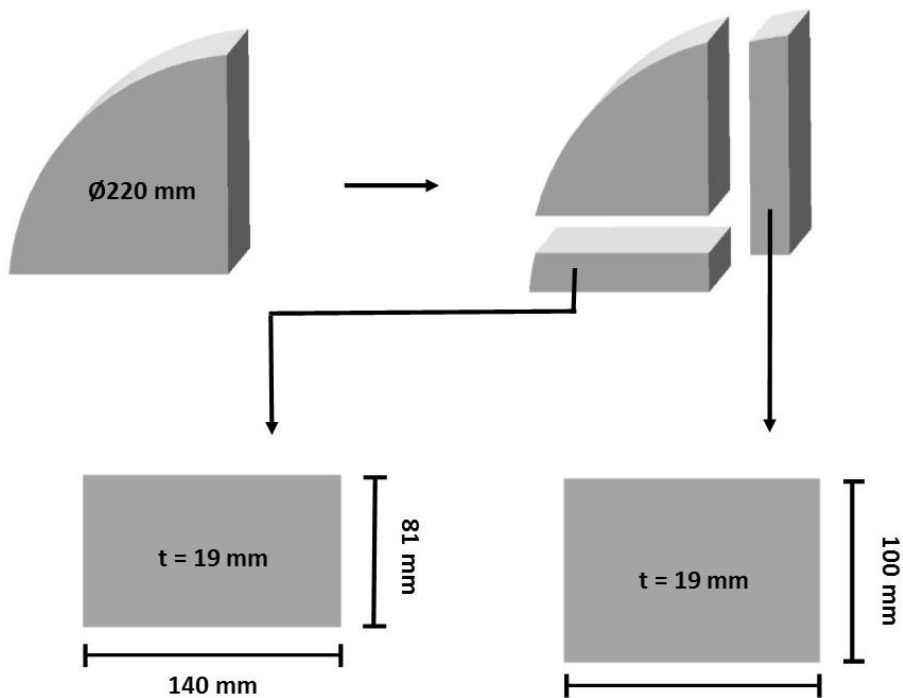
Oppdelingen av platene og de ulike prøvestykkenes radielle avstand fra senter i stangen, er videre forklart og illustrert i *Kapittel 5.1.4*.



*Figur 5-2: Radiell skala for stangdimensjonene Ø220/250 mm og 6BX 2 <sup>1/16</sup> " sveiseflens med hals.*



Figur 5-3: Oppdeling av UNS S31803-stang:  $\varnothing 220/250$  mm .

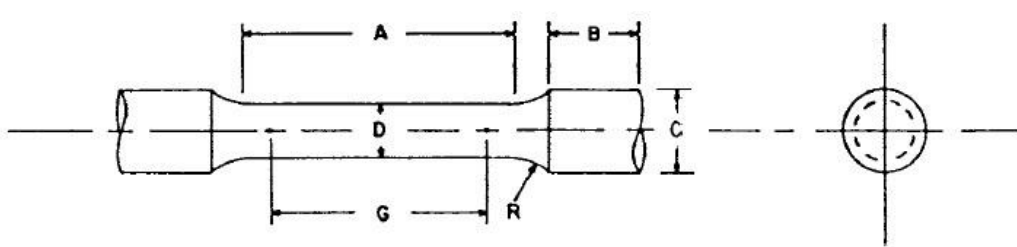


Figur 5-4: Videre oppdeling av UNS S31803-stang:  $\varnothing 220$  mm.

### 5.1.3 Prøvestykkenes dimensjoner

Prøvestykkenes dimensjoner er bestemt på bakgrunn av standardiserte betingelser fra standardverket ASTM A370 (2012). Med utgangspunktet i dimensjonene til platene som er skjært ut (*Figur 5-3* og *Figur 5-4*), har det vært nødvendig å benytte prøvestaver som er 50 % av standardstørrelsen. Dette er noe ASTM A370 (2012, s. 6) tillater i tilfeller hvor dette er nødvendig. Gripedelen til prøvestykkene er tilpasset strekkmaskinens gripemekanisme som benyttes under strekkprøvene, noe som tillates dersom utformingen sørger for at lasten påføres aksialt på prøvestykket (ASTM A370, 2012, s. 6). Dimensjoner for prøvestykkene er vist i *Tabell 5-1*.

**Tabell 5-1: Dimensjoner for prøvestykker (ASTM A370, 2012, s. 6)**

						
<b>G</b> [mm]	<b>D</b> [mm]	<b>R</b> [mm]	<b>A</b> [mm]	<b>L</b> [mm]	<b>B</b> [mm]	<b>C</b> [mm]
25	6,25	5	32	122	40/35 <sup>1</sup>	16
<i>G – Målelengde</i> <i>D – Diameter</i> <i>R – Avrundingsradius, min</i> <i>A – Lengde til redusert tverrsnitt, min</i>			<i>L – Totallengde, tilnærmet</i> <i>B – Gripelengde, tilnærmet</i> <i>C – Diameter for gripelengde</i>			
<sup>1</sup> Den varierende lengden til gripelengden er lagt inn for å gi fleksibilitet ved utfordringer under maskineringsarbeidet.						

Det trengs minimum 15-20 mm ekstra i tillegg til total lengde av prøvestaven, for å kunne spenne inn prøvestykket under maskineringsarbeidet, noe som betyr at matriseinndelingen må tillate 137-140 mm i totallengde.

Arbeidstegning for prøvestykkene er å finne i *Vedlegg H*.



#### 5.1.4 Matriseinndeling for prøvestykker

Platene definert i *Kapittel 5.1.2* deles videre opp i seksjoner hvor prøvestykkene hentes ut fra. Hver seksjon representerer et prøvestykke. Det benyttes et matrisesystem med identifikasjonsnumre for å sikre sporbarhet til hver enkelt strekkprøve, hvor de ulike seksjonenes senterlinjer gir en radiell avstand fra senter til stangen/flensen. Prøvestykker i tverrgående retning vil ha hele sin målelengde i radiell retning, noe som gjør dem uegnet til å oppdage radiell variasjon.

Matriseinndelingen for platene er vist i *Figur 5-5* til *Figur 5-8*, der *Figur 5-5* viser prøvestykkenes posisjon i stengene, mens *Figur 5-6* til *Figur 5-8* viser matriseinndeling av platene. Den stiplede linjen representerer skillet mellom stangdiameterne. Det er valgt å benytte lik matriseinndeling for begge stengene, slik at avstanden fra senter i stengene blir et felles referansepunkt.

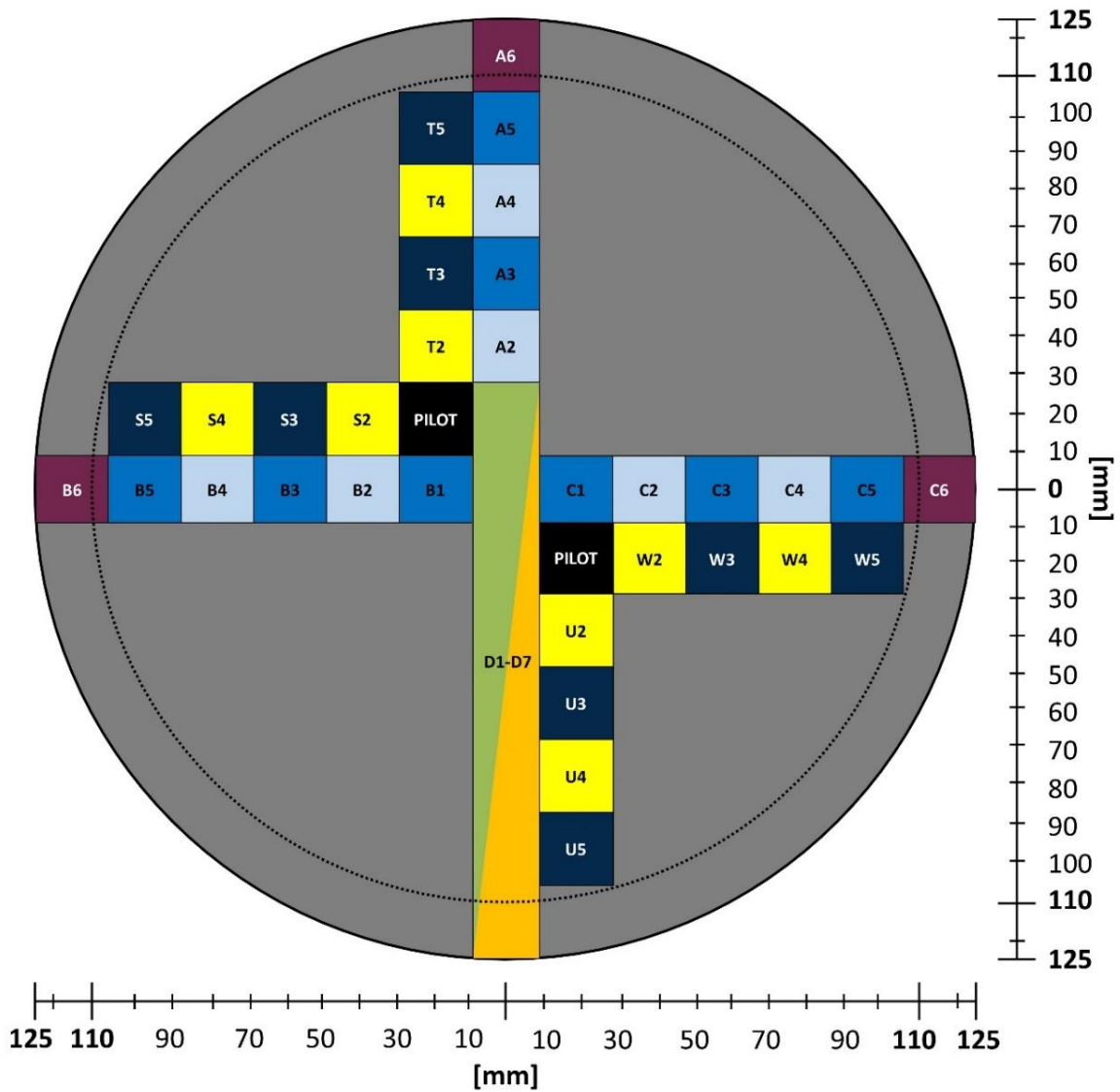
Siden samme matriseinndeling benyttes for begge stengene, vil prøvestykkene i tillegg til identifikasjonsnummer merkes med bokstaven «X» for stangdimensjonen Ø220 mm og «Y» for stangdimensjonen Ø250 mm. Radiell avstand for de ulike prøvestykkene i langsgående retning er å finne i *Tabell 5-2*. Som man ser av *Figur 5-5* får stangdimensjonen Ø250 mm, 3 ekstra prøvestykker (A6, B6 og C6).

Totalt gir matriseinndelingen 63 prøvestykker, hvor de ulike seksjonene skal brukes på følgende måte:

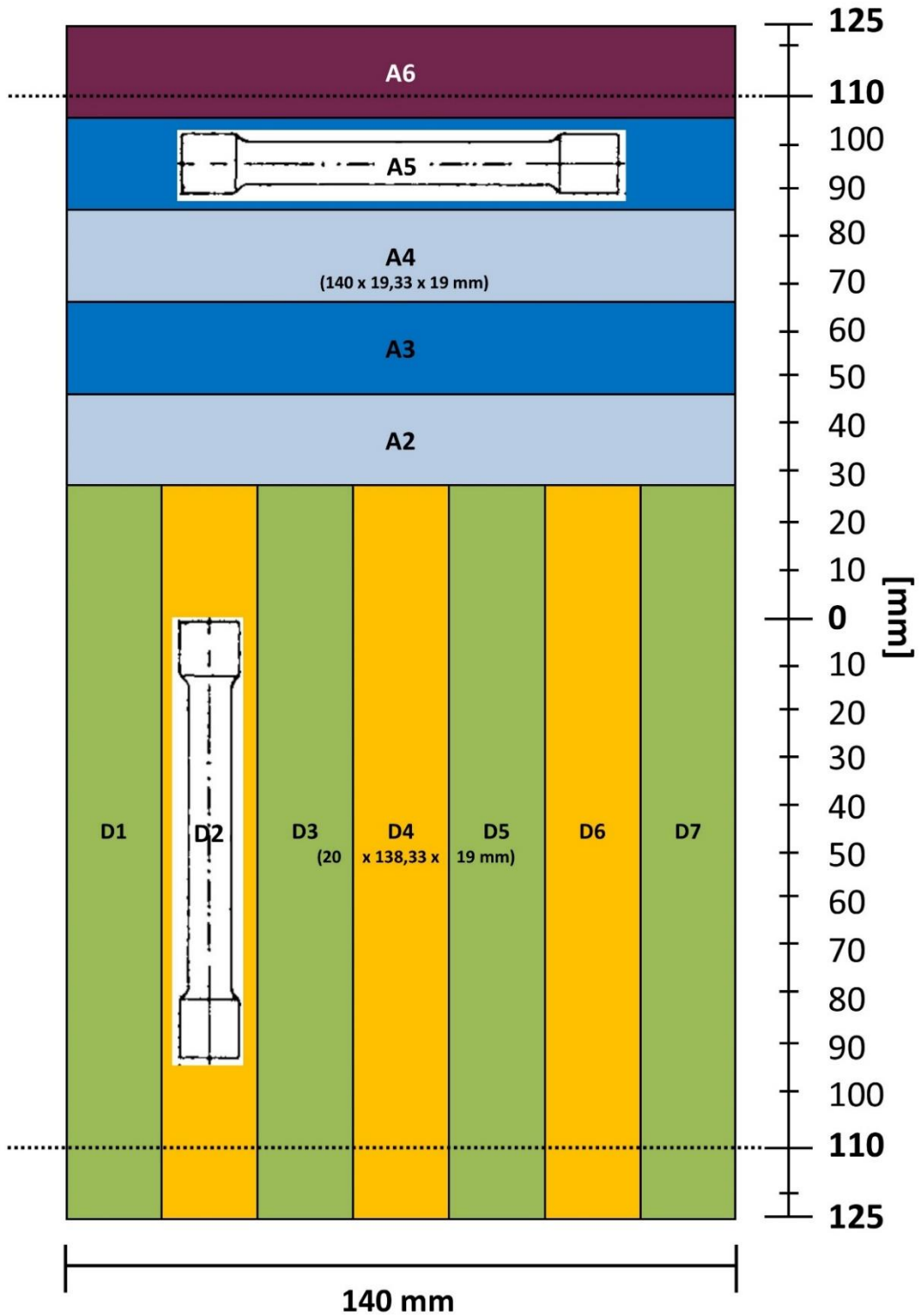
- **A2-A6, B1-B6 og C1-C6:** Prøvestykker for kartlegging av materialeegenskaper langsgående retning.
  - Ø220 mm: 14 prøvestykker fordelt på 5 ulike radielle avstander fra senter.
  - Ø250 mm: 17 prøvestykker fordelt på 6 ulike radielle avstander fra senter.
- **D1-D7:** Prøvestykker for kartlegging av materialeegenskaper i tverrgående retning.
  - Ø220 mm: 7 prøvestykker med midtpunkt 40,1 mm fra radielt senter i stangen
  - Ø250 mm: 7 prøvestykker med midtpunkt 48,3 mm fra radielt senter i stangen.
- **S2-S5, T2-T5, U2-U5 og W2-W5:** Prøvestykker for kartlegging av materialeegenskaper ved hevede og senkede temperaturer.
  - Ø220 mm: 16 prøvestykker fordelt på 4 radielle avstander fra senter i stangen.
- **PILOT:** Pilottester før den ønskede materialdataen innsamles.
  - Ø220 mm: 2 prøvestykker.

**Tabell 5-2: Prøvestykkenes radielle avstand fra senter i stangen.**

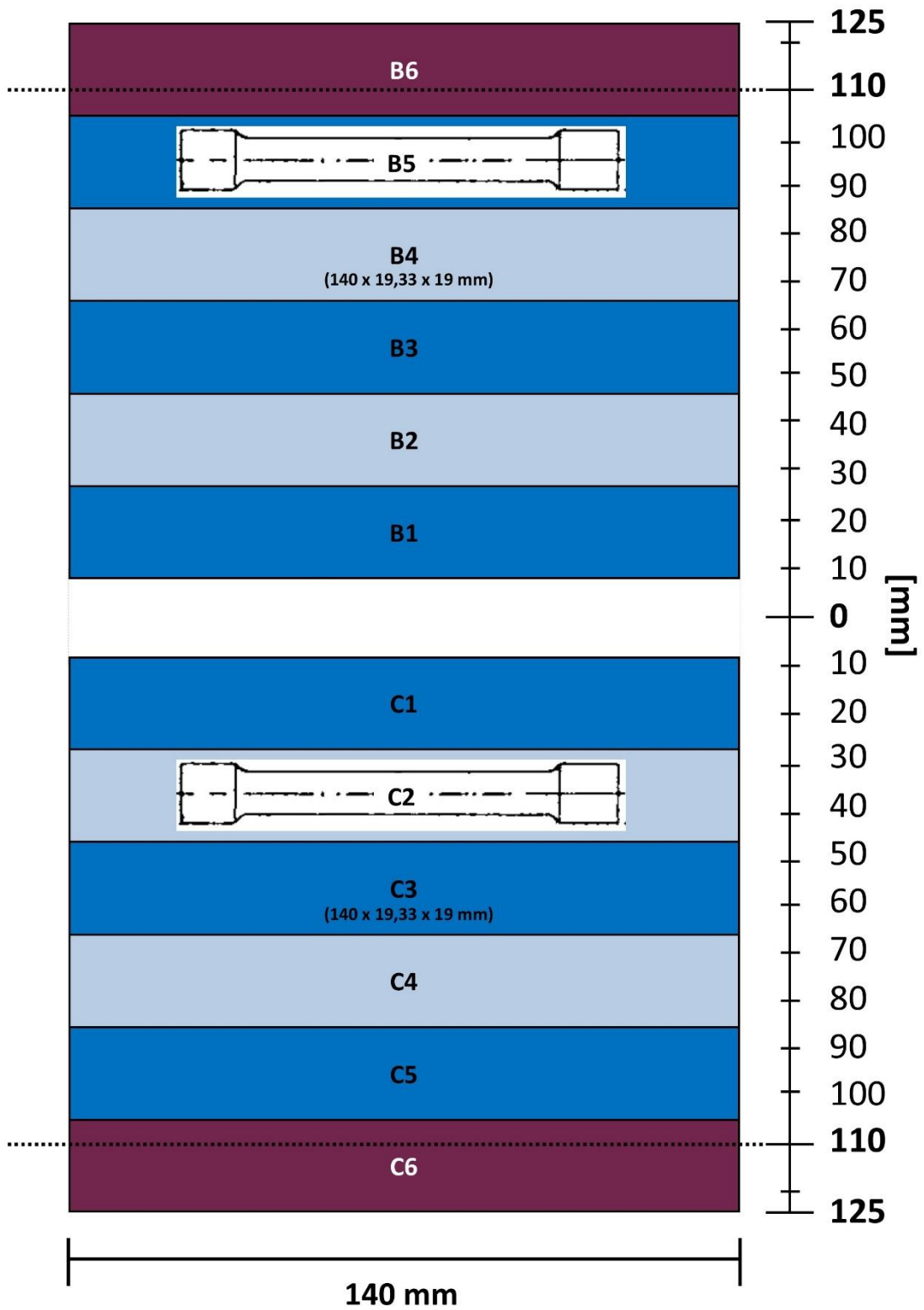
Prøvestykke	Radiell avstand fra senter i stangen [mm]
B1/C1	19,1
A2/B2/C2	38,4
A3/B3/C3	57,6
A4/B4/C4	76,9
A5/B5/C5	96,1
A6/B6/C6	115,4
PILOT	27,0
S2/T2/U2/W2	42,9
S3/T3/U3/W3	60,7
S4/T4/U4/W4	79,2
S5/T5/U5/W5	98,0



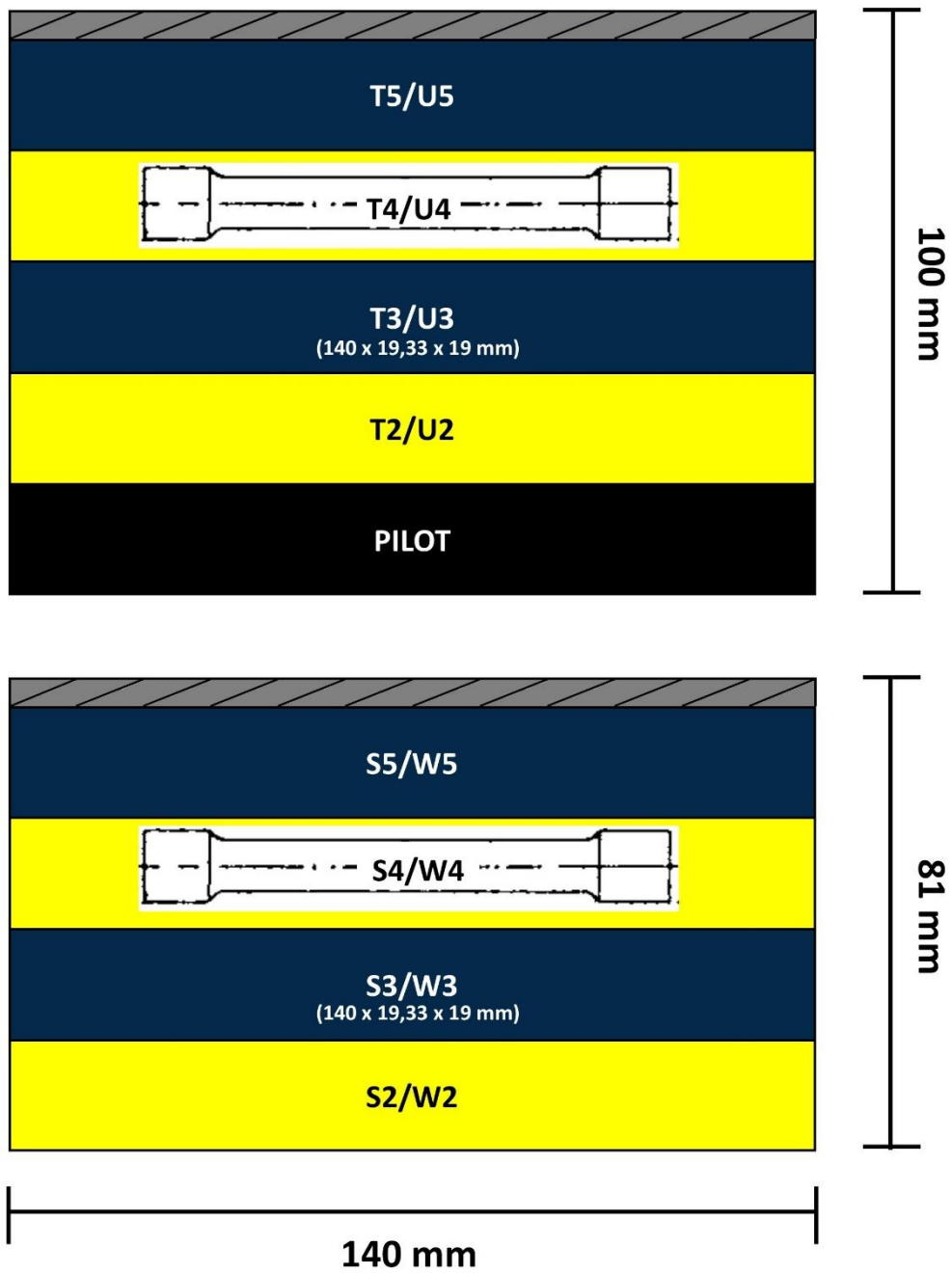
**Figur 5-5: Prøvestykkenes posisjon i stangdimensjonene Ø220 mm og Ø250 mm.**



Figur 5-6: Matriseinndeling for plate (Ø220/Ø250 mm): 140 x 220 x 19 mm / 140 x 250 x 19 mm



Figur 5-7: Matriseinndeling for 2 x plate ( $\text{\O}220/\text{\O}250$  mm): 140 x 100 x 19 mm / 140 x 115 x 19 mm



Figur 5-8: Matriseinndeling av plater ( $\text{\O}220$  mm): 140 x 100 x 19 mm og 140 x 81 x 19 mm

### 5.1.5 Strekkprøver ved hevede/senkede temperaturer

Et av målene for kvalifikasjonen er å undersøke materialets mekaniske egenskaper ved øvre og nedre driftsgrense for minimum temperaturklasse «U» (-18 °C og 121 °C). Materialeegenskaper for temperaturer over og under driftsgrensene skal også undersøkes for å gi et bedre bilde på hvordan materialet presterer ved ulike temperaturer. Ved å velge flere testtemperaturer, vil det være lettere å kartlegge eventuelle trender i materialet som følge av temperaturpåvirkning. Det er derfor valgt å prioritere et større antall testtemperaturer, fremfor antall prøvestykker per testtemperatur. Med 16 tilgjengelige prøvestykker til temperaturtesting, gir de valgte 8 testtemperaturene 2 prøvestykker per testtemperatur.

*Tabell 5-3* gir en oversikt over hvilke valgte testtemperaturer. Temperaturene -60 °C, -46 °C og -29 °C er valgt på bakgrunn av nedre driftsgrense for øvrige temperaturklasser i API Spec 6A (2010). En oversikt over temperaturklassene er å finne i *Vedlegg G, Tabell G-6*. Temperaturene 150 °C, 180 °C og 200 °C er valgt for å oppnå passende intervall mellom testtemperaturene over 121 °C. API Spec 6A (2010) oppgir at det generelt for dupleksmaterialer kan forventes 20 % reduksjon i flytegrense ved 180 °C, og derfor er denne testtemperaturen inkludert.

**Tabell 5-3: Testtemperaturer ved hevede/senkede temperaturer**

Identifikasjonsnummer	Testtemperatur [°C]
S2/U2	- 60
S3/U3	- 46
S4/U4	- 29
S5/U5	- 18
T2/W2	121
T3/W3	150
T4/W4	180
T5/W5	200

### **5.1.6 Fremstilling av prøvestykker**

Totalt er det laget 63 prøvestykker, 39 stk. fra stangen Ø220 mm og 24 stk. fra Ø250 mm, i henhold til dimensjonene spesifisert i *Kapittel 5.1.3*.

Fremstillingen av prøvestykkene er stegvis beskrevet i *Vedlegg I*. Oppsagingen gav kvadratiske emner med dimensjonene 19 x 19 mm, med noen variasjoner ( $\pm 2$  mm) grunnet nøyaktigheten til sageprosessen og tap av materiale under denne prosessen. Dimensjonsvariasjonene var tilfredsstillende for den videre fremstillingen av prøvestykkene.

De aller fleste prøvestykkene fikk dimensjoner som i stor grad er overens med forbestemte dimensjoner for prøvestykkene. Et fåtall prøvestykker innehar dimensjonale avvik i de sirkulære gripe-endene, og et eksempel av dette er vist i *Figur 5-9*. Avviket ansees som lite betydelig siden måleområdet ikke er påvirket, samt at utførte tester ikke viste tegn til dårlig gripeevne.



*Figur 5-9: Eksempel på dimensjonalt avvik i gripeende.*

## 5.2 Utførelse av strekkprøving

Dette kapittelet forklarer hvordan strekkprøvingen er utført. Benyttet utstyr er beskrevet i *Kapittel 5.2.1*, testparameterne strekkhastighet og temperatur er beskrevet i *Kapittel 5.2.2*, mens stegvis testprosedyre for strekkprøving er beskrevet i *Kapittel 5.2.3*.

### 5.2.1 Benyttet utstyr

*Instron 8801* er benyttet under strekkprøvingen. Dette er et servohydraulisk testsystem som kan benyttes for en rekke dynamiske og statiske tester, og blant dem strekkprøver. Maskinen har en lastkapabilitet på  $\pm 100$  kN og er kompatibel med eksterne ekstensiometre for både langsgående og tverrgående tøyning (Instron, 2012). Utstyret er illustrert i *Figur 5-10*.



*Figur 5-10: Instron 8801 Servohydraulic Fatigue Testing System (Instron, 2012).*



*Figur 5-11: Instron 3119-407 Environmental Chamber (Instron, 2014a).*

Måling av tøyning i langsgående retning ble utført med et Instron-ekstensiometer av typen «2620 Series Dynamic Strain Extensiometer». Produktets manual opplyser at måleinstrumentet kan benyttes innenfor temperaturområdet  $-80$  °C til  $+200$  °C. Før igangsetting av strekkprøvene, ble ekstensiometeret kalibrert ved bruk av en innebygget automatisk kalibreringsfunksjon i den medfølgende softwaren til strekkmaskinen.



Manualen spesifiserer at man ideelt sett bør kalibrere ekstensiometeret etter testtemperaturen, og at variasjoner mellom testtemperaturen og temperaturen ekstensiometeret er kalibrert for vil introdusere en liten feil. Fabrikanten henviser videre til en manuell temperaturkalibreringsprosedyre som medfølger testmaskinens kontrollsystem. Det er ikke lykkes i å få tak i den manuelle temperaturkalibreringsprosedyren, og dette medfører at temperaturtestene er utført med et ekstensiometer som er kalibrert ved romtemperatur. Det kan derfor forventes at ekstensiometeret under temperaturtestingen vil ha noe mindre nøyaktighet sammenlignet med tester ved romtemperatur.

Måling av tøyning i tverrgående retning ble utført med Instron-ekstensiometeret «*W-E404 Series Transverse Extensometers*». Dette ekstensiometeret fungerer for dimensjoner mellom 0-25 mm, og er et typisk utstyr for måling av Poissons tall. Ekstensiometeret kan benyttes i temperaturområdet -40 °C til 100 °C (Instron, 2014b). Strekkprøving ved hevede/senkede temperaturer ble utført uten dette ekstensiometeret, da noen av testtemperaturene er utenfor temperaturområdet til utstyret.

Strekkprøvingen ved hevede/senkede temperaturer ble gjennomført ved bruk av klimakammeret «Instron 3119-407», som vist i *Figur 5-11*. Dette kammeret kan benyttes ved temperaturer fra -70 °C til +350 °C (Instron, 2014a).

### **5.2.2 Testparametere – strekkhastighet og temperatur**

ASTM A370 (2012) spesifiserer flere måter å definere strekkhastigheten på. Det er valgt å benytte hastigheten mellom grepene til strekkmaskinen. Det defineres minimums- og maksimumsverdier for strekkhastigheten avhengig av lengden til det reduserte tverrsnittet. Kravene til hastighet er forskjellig over og under antatt flytegrense til materialet. Det er valgt å bruke en konstant hastighet gjennom hele testen, og basert på beregninger er det valgt å sette strekkhastigheten til 1,8 mm/min (se *Vedlegg J*).

Ordinære strekkprøver skal som spesifisert i *Kapittel 3.3.6 (s.43)* utføres ved romtemperatur. API Spec 6A (2010, s. 17) definerer romtemperatur som enhver temperatur mellom 4 og 50 °C. Romtemperaturen i testlaboratoriet ligger mellom 23-25 °C, noe som er innenfor grenseverdiene. Temperatur er notert for hvert prøvestykke. Prøvestykker fra seksjoner A, B, C og D utføres som ordinære strekkprøver. Strekkprøver ved hevede/senkede temperaturer utføres ved temperaturene gitt i *Kapittel 5.1.5, Tabell 5-3*.

### 5.2.3 Testprosedyrer

En stegvis testprosedyre for strekking av prøvestykkene ved romtemperatur og hevede/senkede temperaturer er å finne i *Vedlegg K*. Bakgrunn for valg av stegene i testprosedyren og øvrige kommentarer er beskrevet under.

Standardverket ASTM E111 (2010, s. 4) spesifiserer at lave laster kan introdusere feil i ekstensiometerets utgående data som blant annet skyldes slark ved innfestingen. Det er benyttet en forlast på 500 N for å eliminere denne effekten.

Ekstensiometeret i langsgående retning har en begrensning for tøyning lik 0,2 mm/mm. Derfor var det nødvendig å ta av ekstensiometeret under testen når denne grensen var nådd. Det ble valgt å ta av begge ekstensiometrene ved dette punktet. Registrering av data ble stoppet under demontering, og fortsatte når testen startet igjen etter demonteringen.

En forskjell mellom prosedyrene ved romtemperatur og hevede/senkede temperaturer, er at testene ved romtemperaturer er benyttet hydrauliske grep, mens det for hevede/senkede temperaturer er benyttet mekaniske grep. Grunnen til dette er at de hydrauliske grepene ikke kan benyttes i klimakammeret.

En annen forskjell at begge ekstensiometrene er benyttet ved romtemperatur, mens det for hevede/senkede temperaturer kun er benyttet ekstensiometer for måling i langsgående retning.

#### 5.2.3.1 Hevede/senkede temperaturer

ASTM E21 (2009) er et standardverk gjeldene for strekkprøving ved hevede temperaturer. Standardverket spesifiserer at oppvarmingstiden skal bestemmes slik at den sikrer at testtemperaturen oppnås i hele prøvestykket. Standardverket anbefaler generelt en stabiliseringstid på 20 minutter. Siden prøvestykkene er 50 % av standardstørrelse, samt at testene er utført med forholdsvis lave temperaturer (200 °C), er det valgt å bruke 10 minutters stabiliseringstid etter at temperaturen i klimakammeret er nådd.

ISO 15579 (2000) er et standardverk gjeldende for strekkprøving ved senkede temperaturer. Kjølletiden bestemmes av teststykkets størrelse, form, overflate, materiale, massen til grepene, samt kjølemediet som benyttes. Standardverket oppgir at kjøletiden skal bestemmes ved hjelp av førtester. Uten dedikert utstyr for måling av prøvestykkets faktiske temperatur, ble det valgt en stabiliseringstid på 10 minutter etter at testtemperaturen i klimakammeret er oppnådd.

Under testen fjernes langsgående ekstensiometer ved en tøyning på 0,02 mm/mm. Grunnet temperaturendringer under demontering av ekstensiometer, er det valgt å bruke 5 minutters stabiliseringstid etter at testtemperaturen i kammeret er oppnådd, for å sikre riktig temperatur i prøvestaven før testen forsettes. Dette gjelder både hevede og senkede strekkprøver.

### 5.3 Behandling av rådata

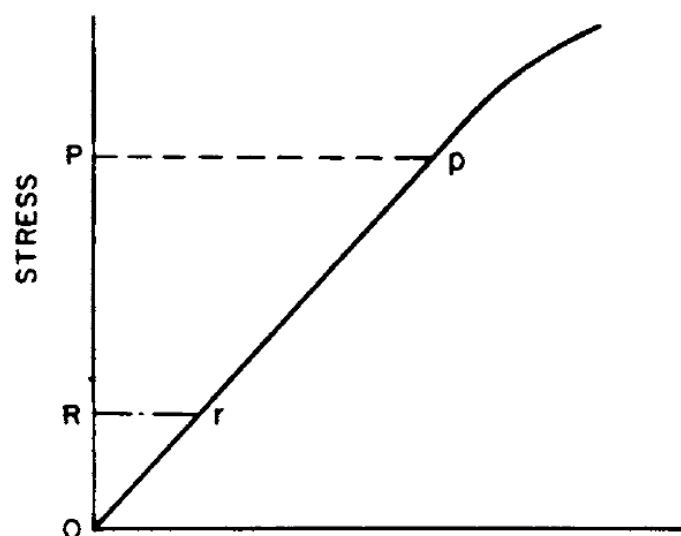
Strekprøver gir en mengde rådata som må behandles videre for å få ønsket informasjon fra testene. Dette kapitlet beskriver hvordan ønskede materialegenskaper er innhentet i henhold til relevante standardverk.

Standardverkene gir rom for egne vurderinger under behandlingen av rådata. Det er spesielt verdt å merke seg vurderinger som er gjort i *Kapittel 5.3.1* og *5.3.2* under valg av spenningsområde benyttet ved beregning av E-modul, Poissons tall, og 0,2 % offset flytegrense.

#### 5.3.1 Proporsjonalitetsgrense

ASTM E111 (2010) er et standardverk som benyttes ved måling/beregning av E-modul. Standardverket definerer E-modul som forholdet mellom strekk- eller kompresjonsspenning og korresponderende tøyning under proporsjonalitetsgrensen (eng. «proportional limit»). Davis (2004, s. 39) definerer proporsjonalitetsgrensen som et punkt i det elastiske området hvor proporsjonaliteten/lineariteten mellom spenning og tøyning avtar. Navnet kommer av at forholdet mellom spenning og tøyning opp til dette punktet er proporsjonalt.

Valg av spenningsområde i beregningen av E-modul og Poissons tall skjer under proporsjonalitetsgrensen. E-modul og valgt spenningsområde er sentralt når 0,2 % offset flytegrense fastsettes. En illustrasjon som beskriver fremgangsmetoden benyttet ved valg av spenningsområde, presenteres i *Figur 5-12*. Valg av øvre spenning «P» skal være under proporsjonalitetsgrensen, og valg av nedre spenningen «R» skal være over forspenningen.



*Figur 5-12: E-modul og Poissons tall beregnes fra datapunkter mellom valgt spenning «P» under proporsjonalitetsgrensen, og valgt spenningen «R» eller forspenningen (ASTM E111, 2010, s. 2).*

Rådata fra prøvestykkene viser at dupleksmaterialet i store deler av det elastiske området viser grad av ikke-lineært spenning-tøyningsforhold. Basert på gjennomgang av en mengde prøvestykker er det valgt å sette proporsjonalitetsgrensen til 200 MPa. Beregningene av E-modul og Poissons tall utføres data under denne proporsjonalitetsgrensen.

Det er valgt å bruke datapunkter fra spenningsområdet 50-150 MPa, for å sikre at man befinner seg i det lineære område, samt sørge for en tilstrekkelig mengde datapunkter i beregningen av E-modul og Poissons tall. Enkelte unntak er gjort under valg av spenningsområde, og dette begrunnes i *Kapittel 5.3.2*.

### 5.3.2 E-modul

**E-modul** (Young's modulus) beregnes ved å benytte Hooke's lov i følgende form (ASTM E111, 2010, s. 5):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{\Delta F}{A_0}}{\frac{\Delta l}{l_0}} \quad (5-1)$$

der  $\sigma$  er spenning,  $\varepsilon$  er tøyning,  $\Delta F$  er kraftøkningen i måleintervallet,  $A_0$  er det opprinnelige tverrsnittarealet til prøvestykket,  $\Delta l$  er den målte forlengelsen i måleintervallet, og  $l_0$  er opprinnelig målelengde for prøvestykket.

Det er nevnt i foregående delkapittel at E-modulen beregnes fra datapunkter i spenningsområdet 50-150 MPa, med noen unntak. Et eksempel for hvordan beregning av E-modul fra rådata er utført, er illustrert i *Figur 5-13*. Her hentes datapunkter fra spenningsområdet 50-150 MPa. Stigningstallet i ligningen til trendlinjen (svart linje) representerer E-modulen i MPa for valgt spenningsområde. ASTM E111 (2010) foreslår flere måter å bestemme E-modulen. Det ble vurdert at en trendlinje mellom et stort sett av datapunkter i større grad gir sikkerhet om riktig stigning, sammenlignet med metode hvor stigningen beregnes mellom to datapunkter eller ved bruk av tangent for en bestemt verdi.

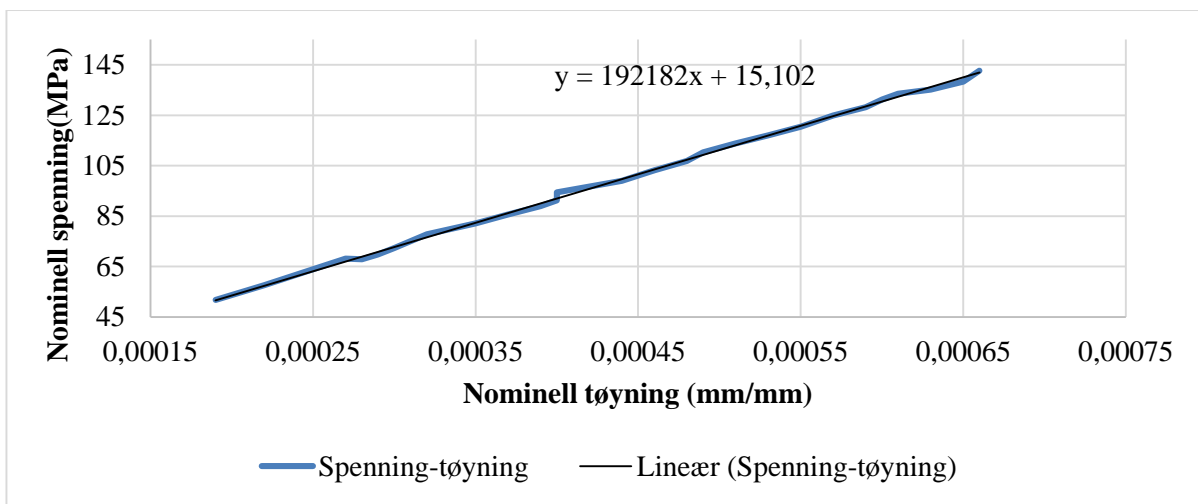
En gjennomgang av rådata viser at E-modul hovedsakelig ligger i området 185-195 GPa. Prøvestykker med E-modul som betydelig avviker fra dette området, grunnet unøyaktige målepunkter, er korrigert ved å endre spenningsområde. Med dette oppnår man en troverdig E-modul, som igjen gir en mer korrekt 0,2 % offset flytegrense<sup>4</sup>. *Figur 5-13 (b.)* viser et

---

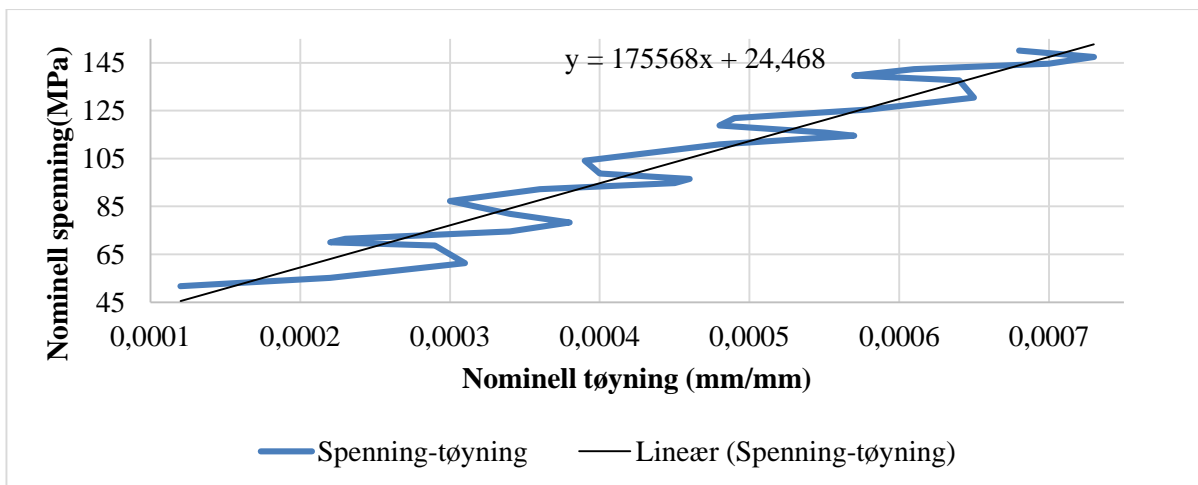
<sup>4</sup> I beregningen av 0,2% offset flytegrense benyttes prøvestykkets E-modul. Se *Kapittel 5.3.4*.

eksempel hvor dette har vært nødvendig. Målt tøyning for denne staven virker sporadisk/unøyaktig sammenlignet med prøvestav XA2 (Figur 5-13 (a.)). Det er da vurdert som hensiktsmessig å endre spenningsområdet, slik at trendlinjen baseres på flere datapunkter. Dette er gjort for å redusere effekten av uregelmessigheter, men kan igjen øke sannsynligheten for at man beveger seg i et elastisk område som er ikke-lineært.

Prøvestykker hvor det er benyttet et annet spenningsområde enn 50-150 MPa, er merket i Vedlegg M.



a. Prøvestykke XA2 med gode måledata (50—150 MPa)



b. Prøvestykke XD5 med unøyaktige måledata (50—150 MPa)

Figur 5-13: Beregning av E-modul. Stigningstallet i ligningen til trendlinjen (svart linje) mellom datapunktene representerer E-modul i MPa.

### 5.3.3 Poissons tall

ASTM E132 (2010, s. 1) definerer **Poissons tall** som følgende:

*“The negative of the ratio of transverse strain to the corresponding axial strain resulting from an axial stress below the proportional limit of the material”.*

Definisjonen gir følgende formel (Callister & Rethwisch, 2007, s. 141):

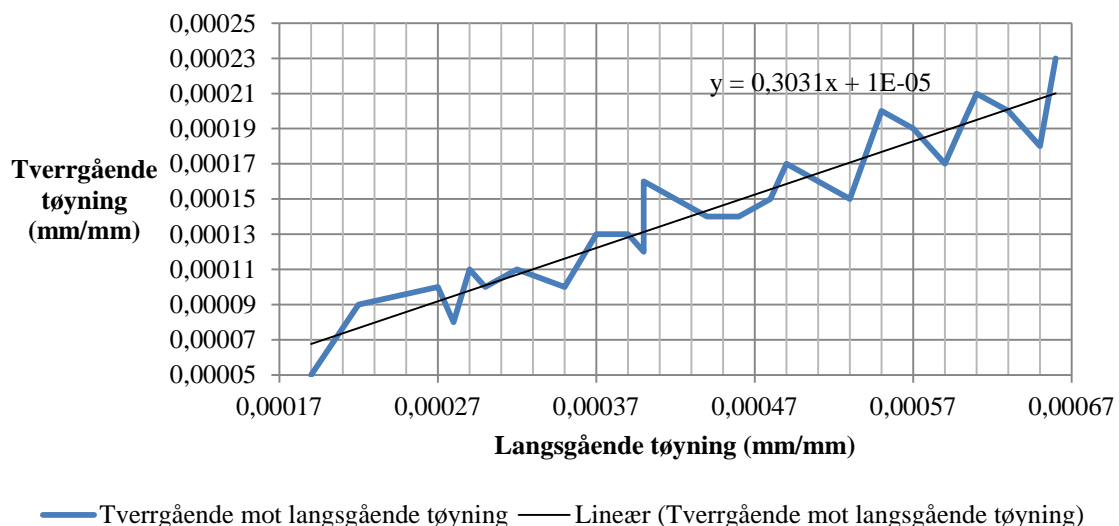
$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (5-2)$$

der  $\varepsilon_y$  er tøyning i tverrgående retning og  $\varepsilon_x$  er tøyning i langsgående retning. Tøyningen ( $\varepsilon$ ) beregnes med formelen (Callister & Rethwisch, 2007, s. 135):

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (5-3)$$

hvor  $l_i$  er momentan forlengelse, og  $l_0$  er opprinnelig målelende. Et eksempel på beregning av Poissons tall fra rådata er illustrert i *Figur 5-14*, og dette er gjort ved å plote tverrgående tøyning (y-akse) mot langsgående tøyning (x-akse) med en lineær trendlinje basert på datapunktene i spenningsområde. Stigningstallet til trendlinjen representerer Poissons tall.

Data som benyttes for beregning av Poissons tall er hentet ut fra det lineær-elastiske spenningsområdet 50-150 MPa, med noen unntak som er merket i *Vedlegg M*.

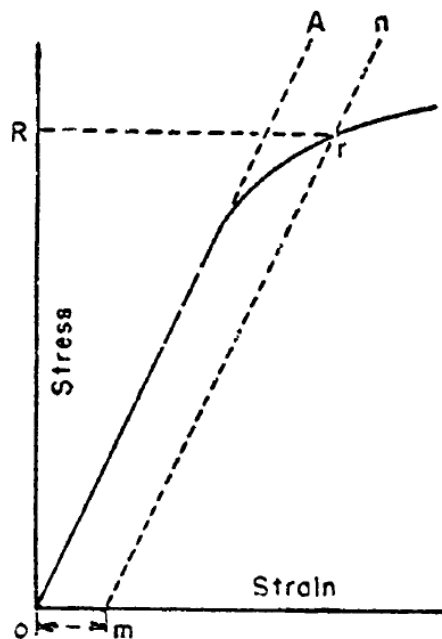


**Figur 5-14: Beregning av Poissons tall fra rådata. Stigningstallet til trendlinjen (svart linje) representerer Poissons tall.**

### 5.3.4 0,2 % offset flytegrense og strekkfasthet

Noen materialer har en utydelig overgang fra elastisk til plastisk deformasjon. I slike tilfeller benytter man seg ofte av **0,2% offset flytegrense** ( $\sigma_{y,0,2}$ ) ved bruk av «offset-metoden», som er en konvensjon etablert for materialer der flytegrensen er vanskelig å bestemme presist (Callister & Rethwisch, 2007, s. 144).

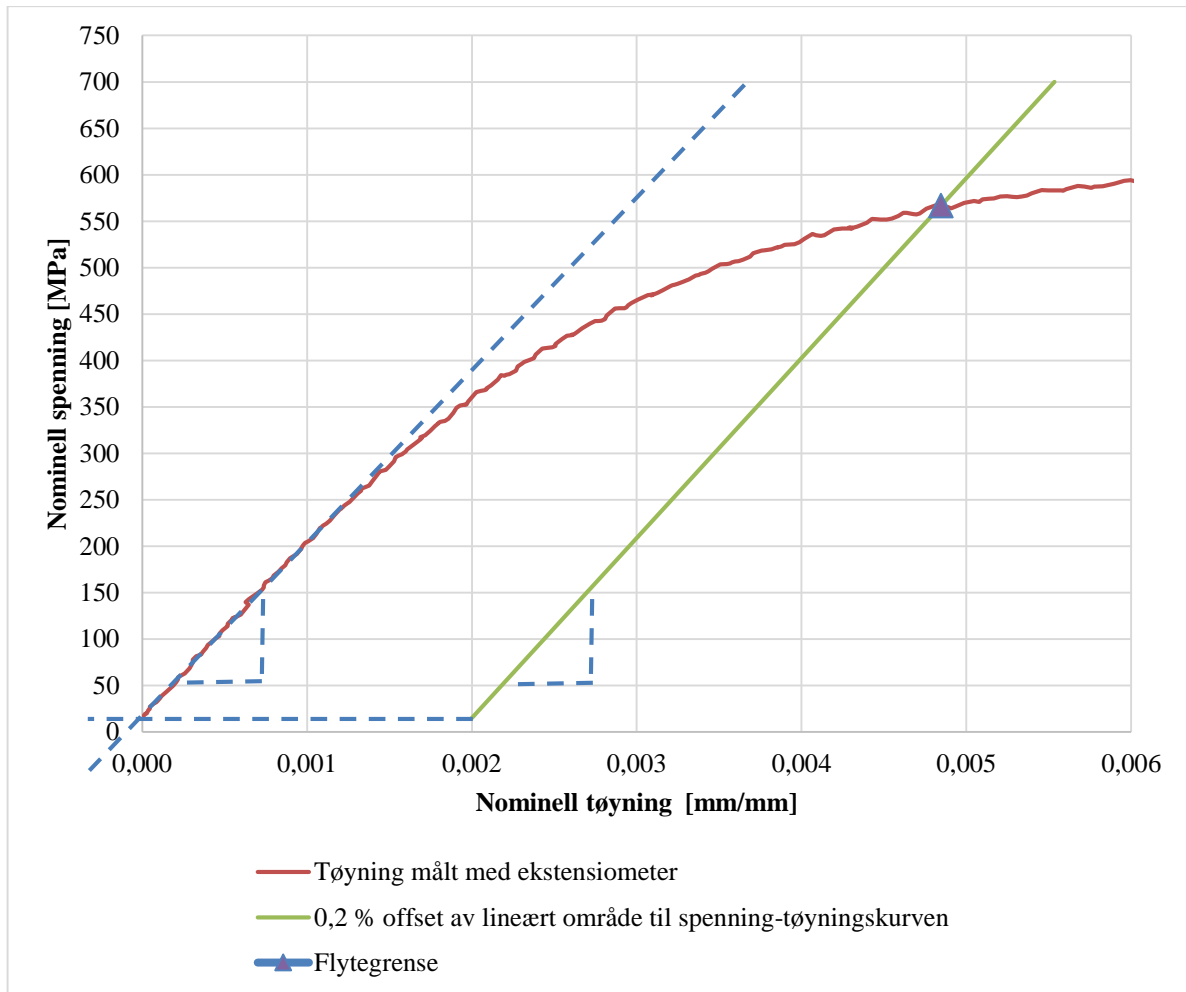
Fastsettelse av flytegrense med offset-metoden er illustrert i *Figur 5-15*. Y-verdien til krysningpunktet «r» representerer  $\sigma_{y,0,2}$ , og dette finner man ved å forskyve den lineære delen av spenning-tøynings kurven OA med offset-distansen «Om», slik at linjen «mn» kan konstrueres (ASTM A370, 2012, s. 9-10). Distansen «Om» blir i dette tilfellet, en lengde tilsvarende en tøyning på 0,002, som gir 0,2 % tøyning. API Spec 6A (2010) stiller krav til 0,2 % offset flytegrense.



*Figur 5-15: Spennings-tøynings diagram for bestemmelse av flytegrense ved offset-metoden (ASTM A370, 2012, s. 10).*

Et eksempel hvor  $\sigma_{y,0,2}$  er beregnet fra rådata med offset-metoden, er illustrert i *Figur 5-16*. E-modul til gjeldende prøvestykke benyttes som stigningstall for den lineære delen av spenning-tøyningskurven som forskyves. Under forskyvning av den lineære spenning-tøyningskurven er det tatt hensyn til forspenningen.





**Figur 5-16:** Beregnet skjæringspunkt hvor y-verdi representerer materialets 0,2% offset flytegrense.

**Strekfasthet** skal ifølge ASTM A370 (2012, s. 10) beregnes på følgende måte:

$$\sigma_{ts} = \frac{F_{maks}}{A_0} \quad (5-4)$$

der  $F_{maks}$  er den maksimale belastningen prøvestykket opplever under strekkprøven.

### 5.3.5 Bruddforlengelse og kontraksjon

**Bruddforlengelse** finner man ved å måle prøvestykkets lengde før og etter brudd. Etter brudd plasseres prøvestykkene sammen slik at total lengde etter brudd kan måles. Prøvestykkenes målelengde er markert tusj før strekking slik at forlengelse etter brudd ( $l_f$ ) kan måles (ASTM A370, 2012, s. 10). Videre beregnes bruddforlengelse i prosent med formelen gitt under (Callister & Rethwisch, 2007, s. 148):

$$\%EL = \left( \frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \cdot 100 \quad (5-5)$$

der  $l_f$  er målelengden ved brudd, og  $l_0$  er opprinnelig målelengde.

Størrelsen til  $\%EL$  vil være avhengig av målelengden til prøvestykket, og siden målelengden til de valgte prøvestykkene bare er halvparten av den benyttede målelengden for kravene til et 60K-materiale (se *Tabell 3-3*, s. 39), vil det ikke være mulig å sammenligne disse verdien direkte. De målte verdiene benyttes for å dokumentere eventuelle ulikheter som følge av temperatur, radiell posisjon og anisotropi.

I tillegg til å måle bruddforlengelse manuelt, er det også beregnet bruddforlengelse basert på lengden til det reduserte tverrsnittet på 32 mm og avstanden mellom grepene til maskinen ved brudd.

**Kontraksjon** måles ved at endene til prøvestykket plasseres sammen, og diameteren måles så ved prøvestykkets minste tverrsnitt ( $A_f$ ). Kontraksjon beregnes så ved å benytte følgende formel (Callister & Rethwisch, 2007, s. 148):

$$\%RA = \left( \frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \cdot 100 \quad (5-6)$$

der  $A_f$  er tverrsnittsarealet ved brudd, og  $A_0$  er opprinnelig tverrsnittsareal.

Resultatet av fysiske målinger er oppsummert i *Vedlegg L*.

### 5.3.6 Spenning-tøyningskurve

Spenning-tøyningskurver for hvert prøvestykke er gitt i *Vedlegg N*. Et utvalg av spenning-tøyningskurver fra prøvestykker med ulike temperaturer, retninger og posisjoner er vist i *Figur 5-17*.

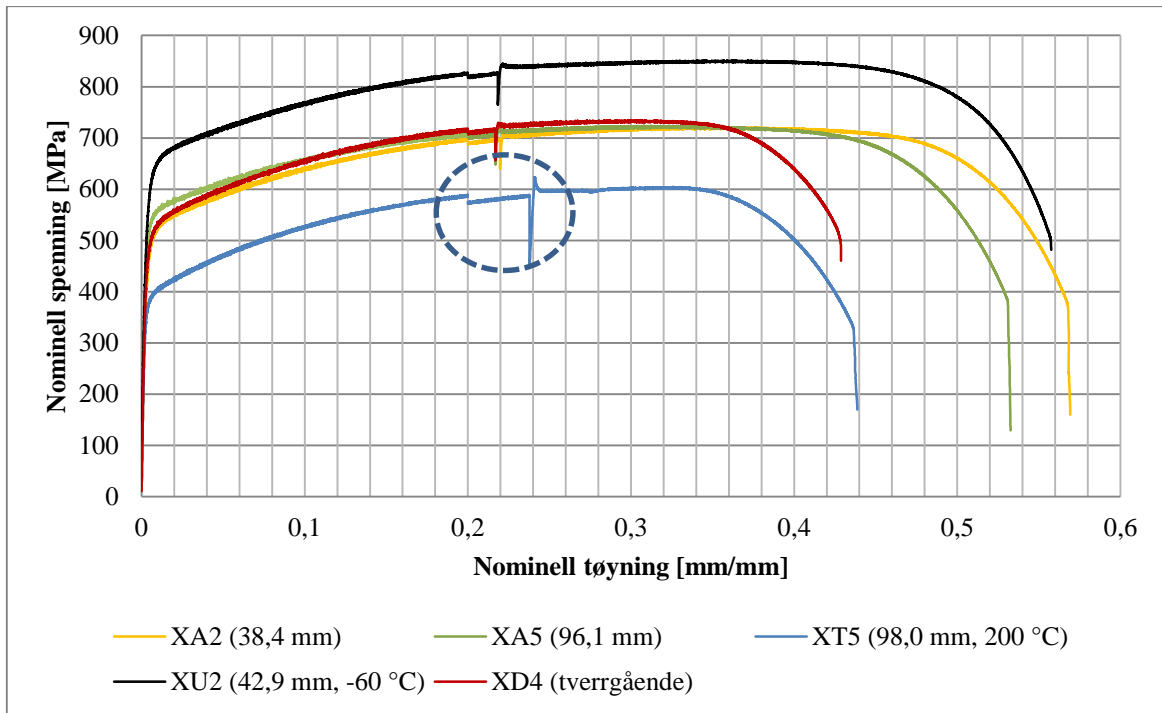
Tøyning er målt på to måter; påmontert ekstensiometer ( $\epsilon_e$ ), og beregnet tøyning som funksjon av avstandsmålinger mellom grepene til strekkmaskinen ( $\epsilon_s$ ). Ekstensiometeret måler tøyning basert på 25 mm som opprinnelig lengde. Beregnet tøyning som funksjon av avstanden mellom grepene, benytter 32 mm som opprinnelig lengde (innsnevret område).

Spenning-tøyningskurven er satt sammen av to kurver; første del består av spenning mot  $\epsilon_e$ , og den andre delen består av spenning mot  $\epsilon_s$ . Overgangen mellom disse kurvene er markert med en blå sirkel i *Figur 5-17*, og dette er punktet hvor ekstensiometeret ble tatt av ved 0,2 mm/mm tøyning  $\epsilon_e$ . En forstørret illustrasjon av det markerte området er gitt i *Figur 5-18*, og den røde stiplede linjen markerer overgangen fra tøyning  $\epsilon_e$  til tøyning  $\epsilon_s$ . Ved en vilkårlig spenning vil  $\epsilon_s$  være større enn  $\epsilon_e$ , og med dette vil man få en kurve som ikke er sammenhengende.

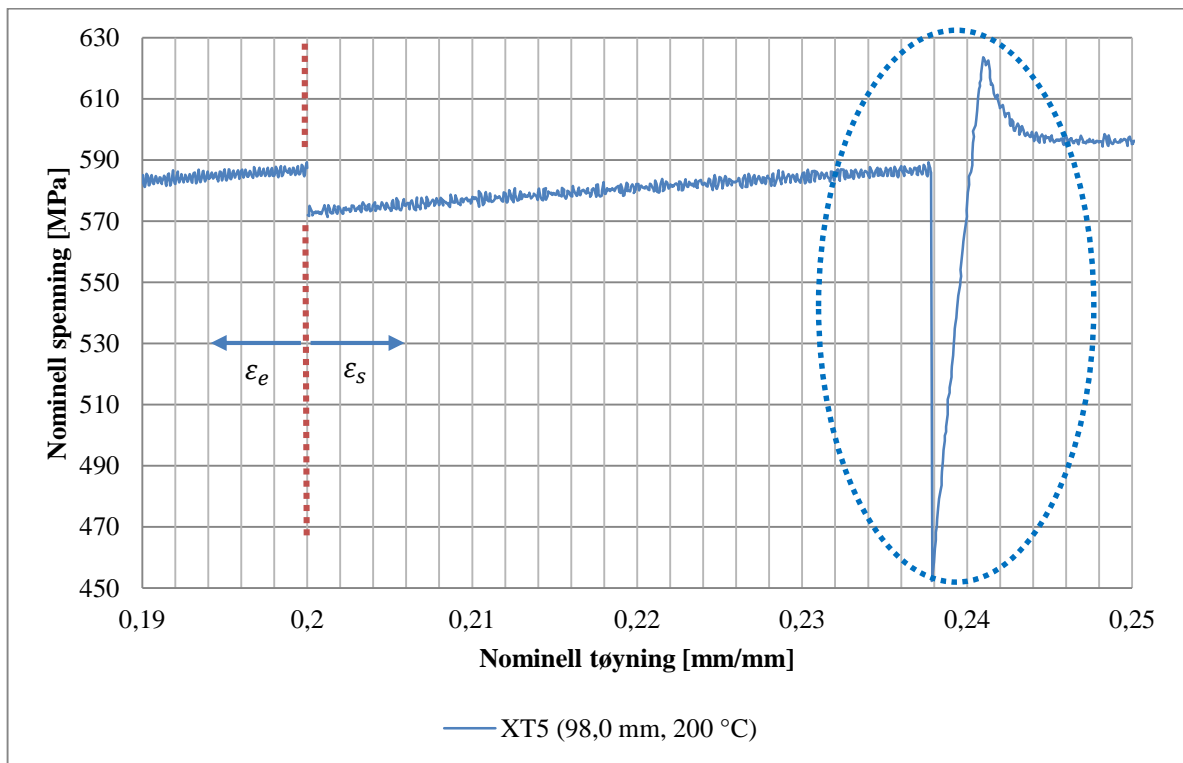
Under demontering av ekstensiometer ved  $\epsilon_e = 0,2$  mm/mm, holder strekkmaskinen en konstant avstand mellom grepene. I utgangspunktet skal lasten holdes konstant under demonteringen. Fra *Figur 5-18* ser man likevel et lite spenningsfall markert med blå sirkel i spenning-tøyningskurven. Det er ukjent hva som forårsaker dette spenningsfallet. En mulig årsak kan være deformasjonsharding<sup>5</sup> av materialet (Norsk Stålforbund, 2000). Spenningsfallet er vurdert som lite signifikant for sluttresultatene, da det ser ut til at kuven forsetter som normalt etter kort tid.

---

<sup>5</sup> «Økning av fasthet som følge av (eller under) plastisk deformasjon ved temperaturer under rekrystallisasjonsgrensen» (Norsk Stålforbund, 2000).



Figur 5-17: Spenning-tøyningskurver.



Figur 5-18: Forstørret område av overgangen mellom bruk av tøyning med ekstensiometer og tøyning beregnet som funksjon av avstand mellom grepene til strekkmaskinen.

# Kapittel 6

## Resultater fra kvalifikasjonsaktiviteter

Dette kapitlet presenterer resultatene fra kvalifikasjonsaktivitetene i *Kapittel 5*, hvor en statistisk gjennomgang av de beregnede materialdataene presenteres. Materialdata fra spesifikke prøvestykker er å finne i oversikten i *Vedlegg M*, eller på strekkprøvenes eget datablad i *Vedlegg N*. Resultatene vurderes underveis opp mot de mekaniske materialkravene fra API Spec 17D/6A (se *Tabell 3-3*, s.39) og produsenten (se *Tabell 3-1*, s. 31). Dette er første steg i evaluering av testresultatene, og en grundigere evaluering av funn presenteres i *Kapittel 7*.

Presentasjonen av materialeegenskapene er delt inn i tre delkapitler; endring i materialeegenskaper etter radiell avstand fra senter i stangen, grad av anisotropi i stengene, og temperaturpåvirkning på materialet.

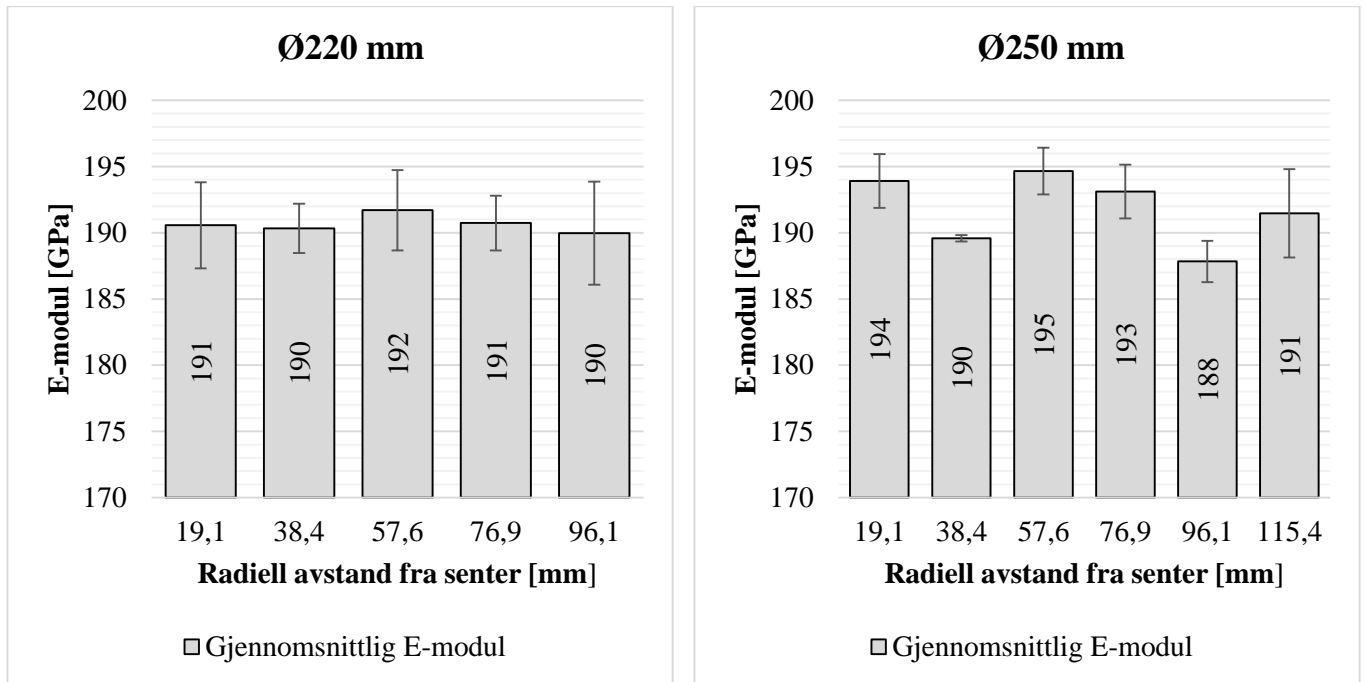
### 6.1 Materialeegenskaper etter radiell avstand fra senter i stengene

Figurene i dette kapitlet viser gjennomsnittlige verdier for prøvestykker med tilnærmet lik radiell avstand senter i stangen ( $L_{radiell}$ ). Dette betyr f.eks. at verdiene ved en radiell avstand fra senter på 38,4 mm, vil være basert på resultatene til prøvestykkene A2, B2 og C2 fra den stangdimensjonen figuren representerer. Hvilke prøvestykker som tilhører de ulike radielle avstandene, er gitt i *Kapittel 5.1.4* (s.65). Gjennomsnittsverdiene baseres på tre målinger, med unntak av  $L_{radiell} = 19,1$  mm, hvor det kun er to tilgjengelige prøvestykker per stangdimensjon. Prøvestykkene A2 (Ø220 mm) og C3 (Ø250 mm) ga også noe ufullstendige data, slik at noen av gjennomsnittsverdiene hvor disse prøvene er en del av datasettet, baseres på to målinger. Standardavviket for gjennomsnittsverdiene er vist på alle figurene.

#### 6.1.1 E-modul etter radiell avstand fra senter

*Figur 6-1* viser variasjonene i E-modul gjennom de to stangdimensjonene. Stangdimensjon Ø220 mm har en forholdsvis liten variasjon i gjennomsnittlig E-modul med et moderat standardavvik, og dette viser at E-modulen er nokså konstant. Stangdimensjon Ø250 mm viser større variasjon i gjennomsnittlig E-modul, men verdiene viser ikke noen trend til endring av

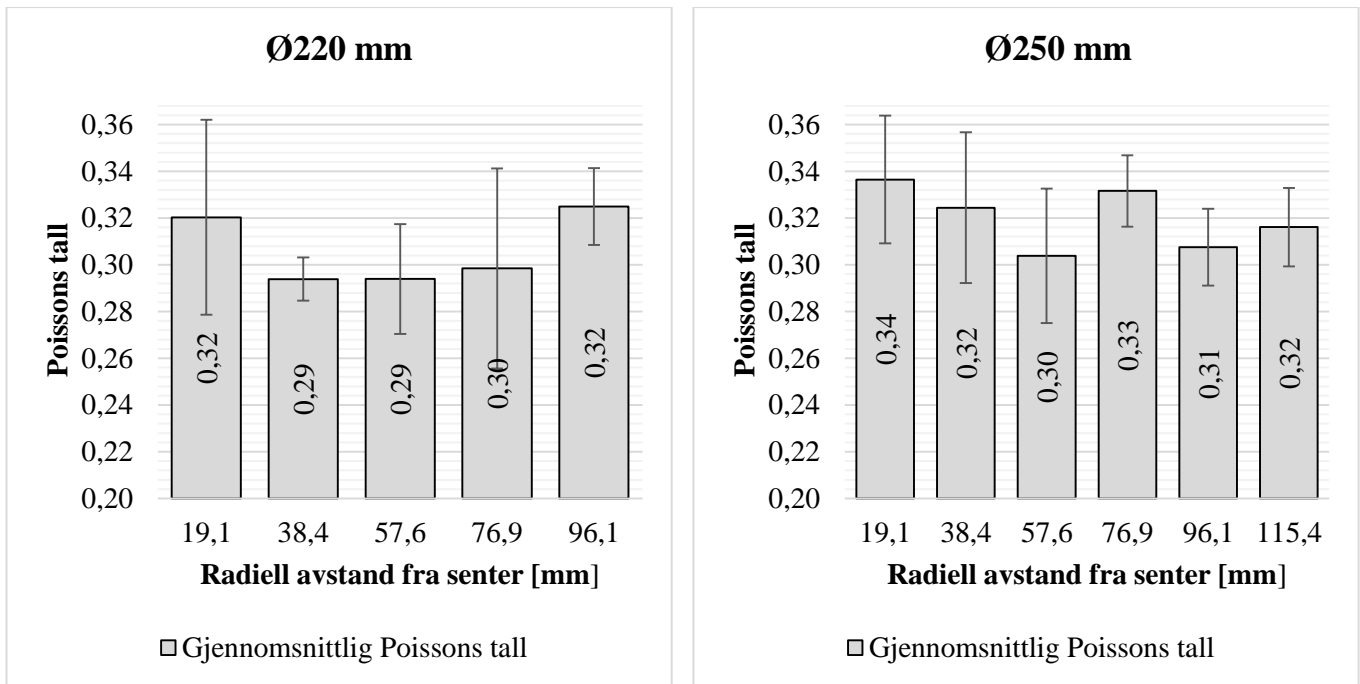
E-modul som følge av radiell avstand fra senter i stangen. En annen ting å merke seg, er at alle verdiene er under den forventede verdien for E-modul på 200 GPa.



*Figur 6-1: Gjennomsnittlig E-modul etter radiell avstand fra senter i stangen.*

### 6.1.2 Poissons tall etter radiell avstand fra senter

Testresultatene for Poissons tall (se *Figur 6-2*) viser ingen trend til endringer i verdi etter radiell avstand fra senter i stangen. Standardavvik er også signifikant ved flere av de radielle avstandene, noe som gjør det vanskelig å konkludere med hvilke Poissons tall materialet faktisk har. Det er likevel tydelig at de fleste verdiene er i nærheten av den forventede verdien for Poissons tall på 0,3.



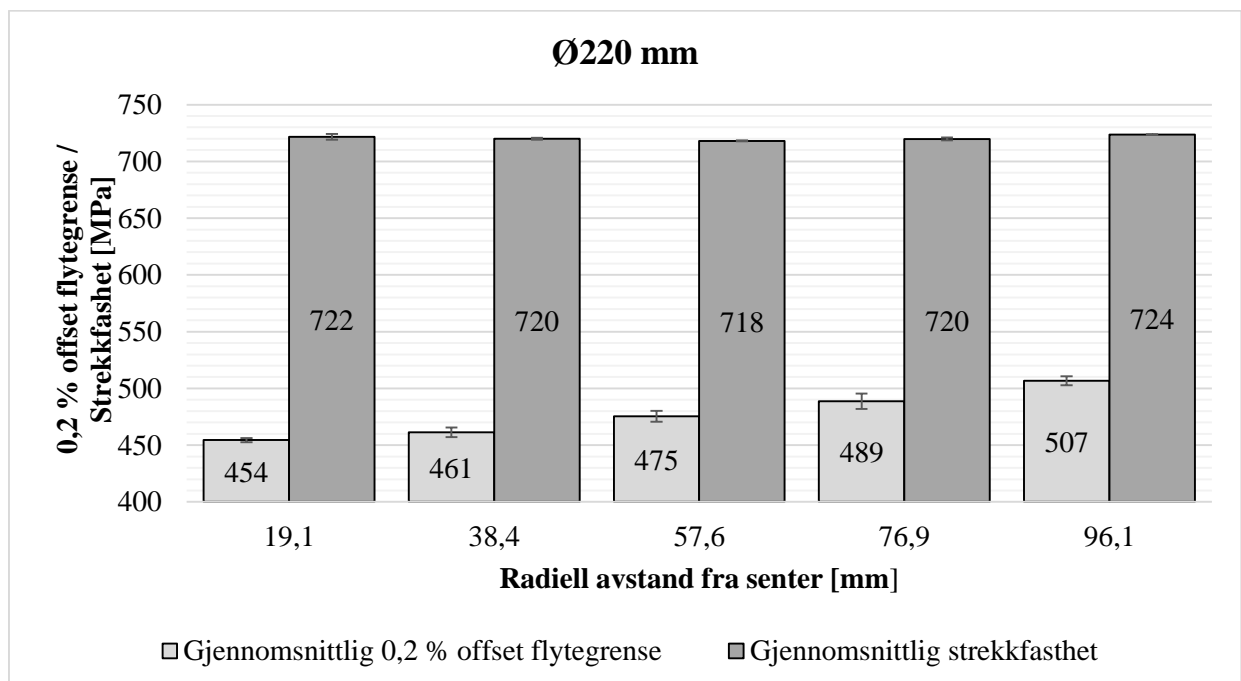
*Figur 6-2: Gjennomsnittlig Poissons tall etter radiell avstand fra senter i stangen.*

### 6.1.3 0,2 % offset flytegrense og strekkfasthet etter radiell avstand fra senter

0,2 % offset flytegrense ( $\sigma_{y,0,2}$ ) og strekkfasthet for stangdimensjonene Ø220 mm og Ø250 mm er presentert i *Figur 6-3* og *Figur 6-4*. Begge stengene viser en tilnærmet konstant strekkfasthet med lite standardavvik, uavhengig av posisjon i stangen. Merk at strekkfastheten er betydelig høyere enn materialleverandørens eget minimumskrav på 655 MPa og kravet til et 60K-materiale på 586 MPa.

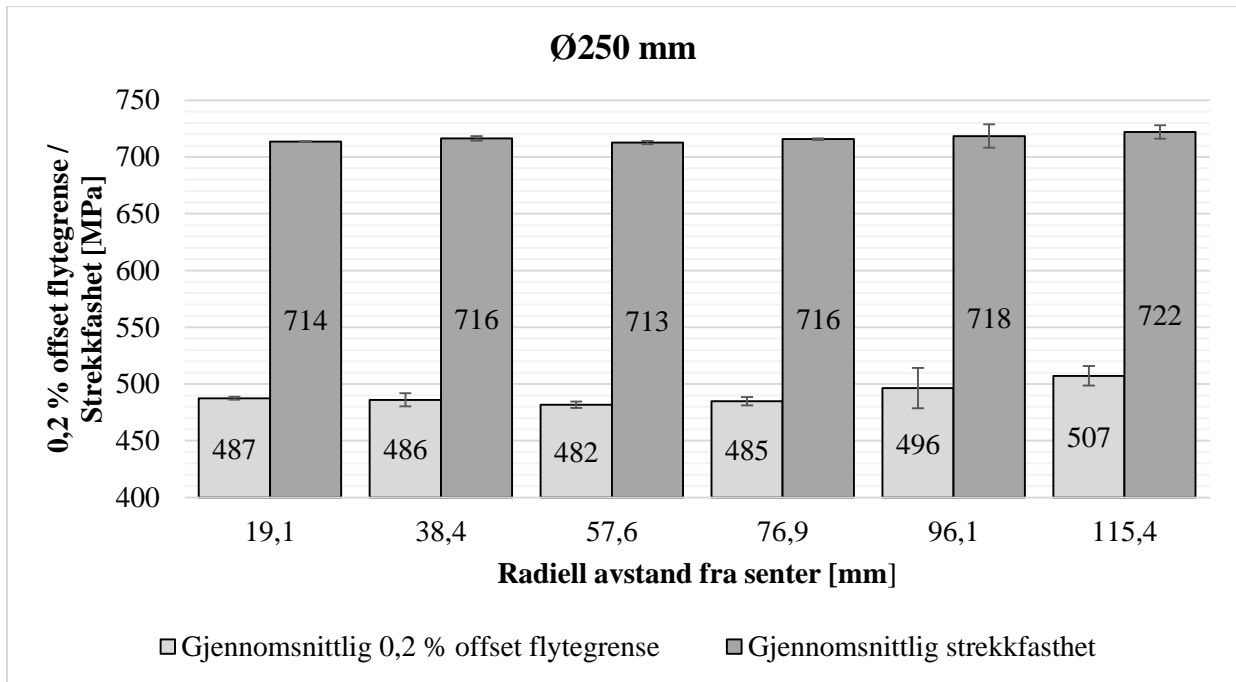
Variasjoner ser man derimot for  $\sigma_{y,0,2}$ . Stangdimensjonen Ø220 mm viser en tydelig trend der  $\sigma_{y,0,2}$  øker i verdi ved en økende radiell avstand fra senter. Størrelsen på standardavviket tyder også på repeterbare resultater. Stangdimensjonen Ø250 mm viser ikke den samme trenden. Her er det mindre endringer gjennom stangen. Resultatene viser likevel en noe høyere  $\sigma_{y,0,2}$  ved de to største radielle avstandene fra senter i stangen, altså nærmest overflaten til stangen. Det verdt å merke seg størrelsen på standardavviket ved en radiell avstand på 96,1 mm i denne stangen.

Sammenlignes de målte verdiene med kravet til  $\sigma_{y,0,2}$  for et 60K-materiale på 414 MPa, ser man at samtlige målte verdier dekker dette kravet. Sammenlignes derimot de målte verdiene med materialprodusentens eget krav i langsgående retning (485 MPa), faller flere av gjennomsnittsverdiene under denne grensen. Dette er spesielt tydelig for stangdimensjonen Ø220 mm, hvor kun de radielle avstandene 76,9 mm og 96,1 mm dekker produsentens eget krav. En gjennomgang av enkeltresultater for Ø220 mm viser at bare 4 av 13 fullførte strekkprøver i langsgående retning har en  $\sigma_{y,0,2}$  over 485 MPa. Stangdimensjonen Ø250 viser her bedre resultater. En gjennomgang av enkeltresultater viser at 6 av 17 fullførte strekkprøver i langsgående retning har en  $\sigma_{y,0,2}$  som ikke tilfredsstillter kravet om 485 MPa. De 6 prøvestykkene viser forholdsvis små avvik fra kravet.



**Figur 6-3: Gjennomsnittlig 0,2 % offset flytegrense og strekkfasthet etter radiell avstand fra senter i stangen (Ø220).**





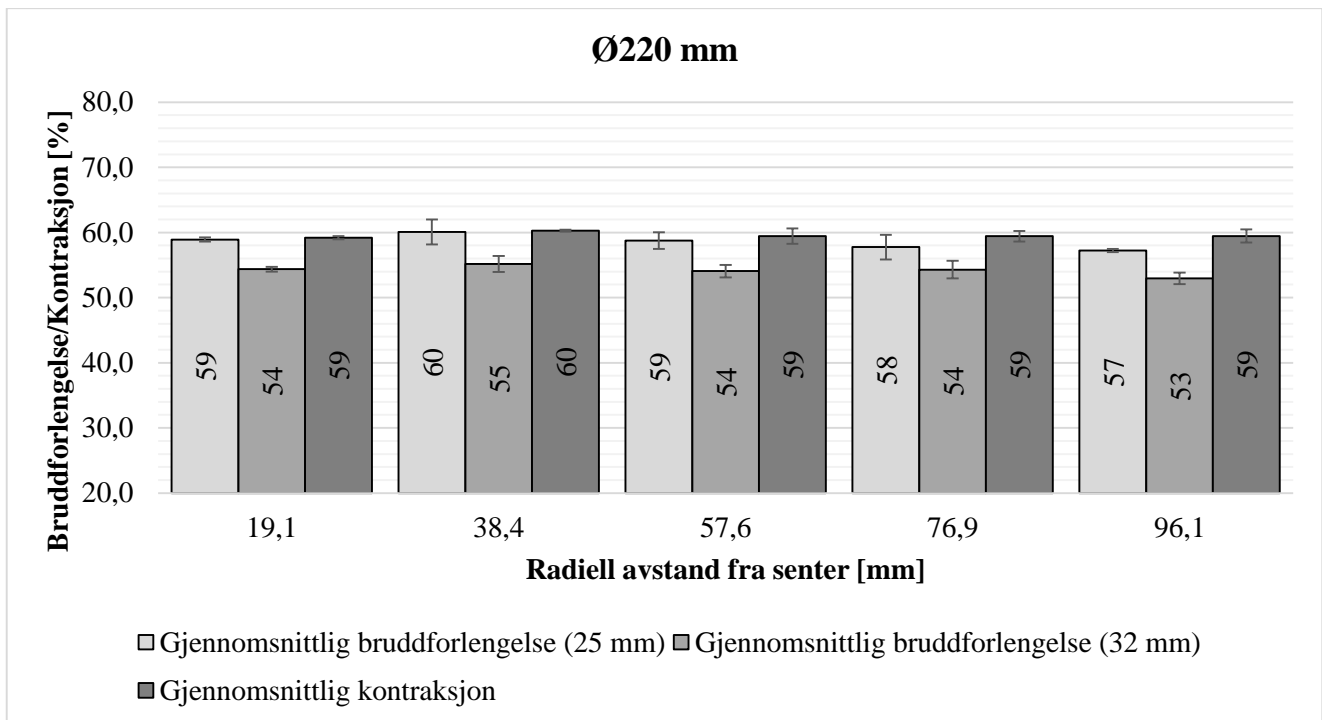
Figur 6-4: Gjennomsnittlig 0,2 % offset flytegrense og strekkfasthet etter radiell avstand fra senter i stangen (Ø250).

#### 6.1.4 Bruddforlengelse og kontraksjon etter radiell avstand fra senter

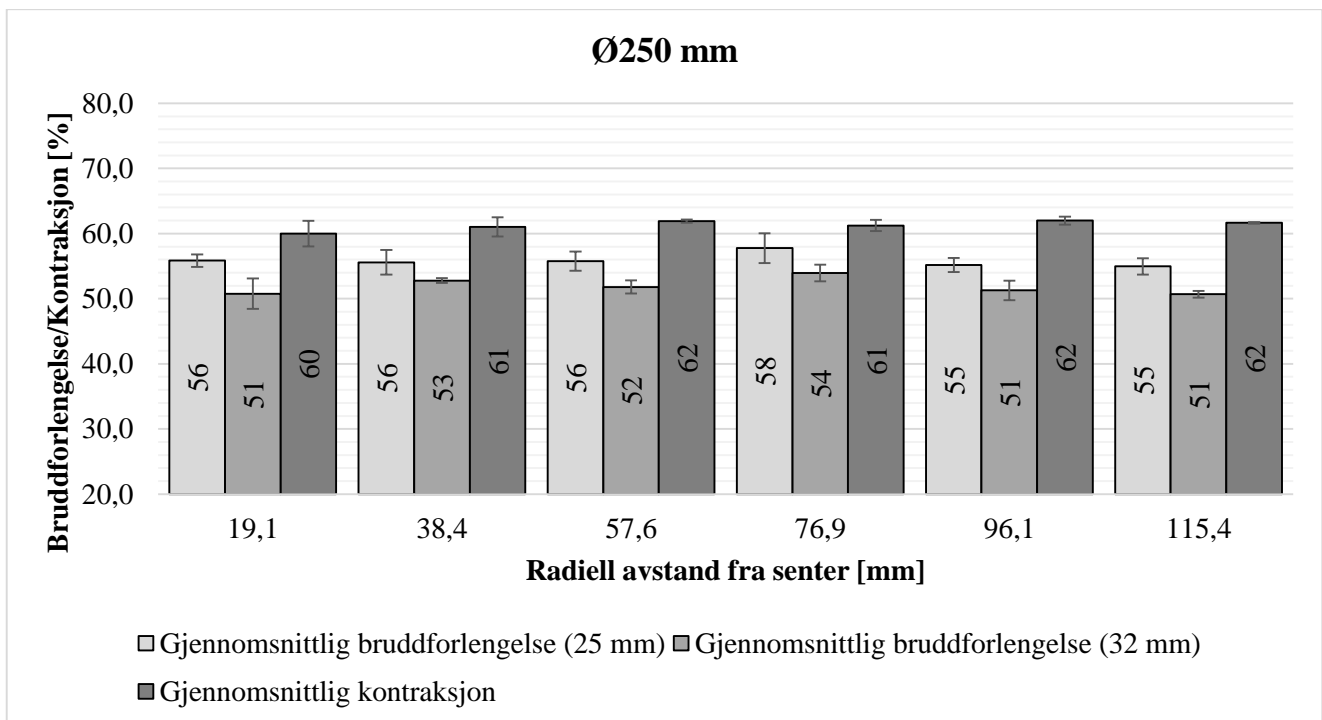
Figur 6-5 og Figur 6-6 viser bruddforlengelse basert på fysisk måling (25 mm målelengde), bruddforlengelse basert på avstanden mellom grepene til strekkmaskinen (32 mm målelengde), og kontraksjon for begge stangdimensjonene. Resultatene viser at verdiene er tilnærmet konstant fra en radiell avstand til en annen. Standardavvikene er i de fleste tilfellene også av en størrelse som viser repeterbare målinger.

Tidligere er det tydeliggjort i *Kapittel 5.3.5* (s.82) at bruddforlengelse beregnet med de opprinnelige målelengdene 25 mm og 32 mm kan ikke sammenlignes direkte med kravet for et 60K-materiale (18 %) eller produsentens egnede krav (25 % i langsgående retning), siden kravene er basert på 50 mm målelengde. Dette er derfor drøftet nærmere i *Kapittel 7.1* (s.103).

Kravene til kontraksjon for et 60K-materiale på 35 %, og produsentens eget krav på 45 % er oppfylt for samtlige prøvestykker.



**Figur 6-5: Gjennomsnittlig bruddforlengelse (25 mm/32 mm) og kontraksjon etter radiell avstand fra senter i stangen (Ø220).**



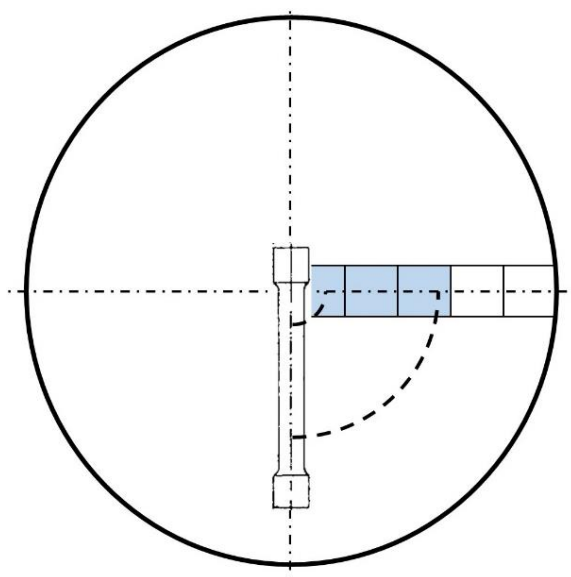
**Figur 6-6: Gjennomsnittlig bruddforlengelse (25 mm/32 mm) og kontraksjon etter radiell avstand fra senter i stangen (Ø250).**

## 6.2 Anisotropi i stengene

Figurene i dette kapittelet presenterer gjennomsnittsverdier for begge stangdimensjonene, hvor prøvestykker i langsgående retning sammenlignes med prøvestykker i tverrgående retning. Standardavvik er inkludert på alle figurene.

Siden resultatene i *Kapittel 6.1* hovedsakelig viste lite variasjon i sammenheng med radiell avstand, er det vurdert som hensiktsmessig å bruke hele datasettet i langsgående retning som sammenligningsgrunnlag, med unntak av 0,2 % offset flytegrense ( $\sigma_{y,0,2}$ ), noe som beskrives i neste avsnitt. Dette betyr at gjennomsnittsverdien i langsgående retning vil være basert på et større datasett enn gjennomsnittsverdien i tverrgående retning. Stangdimensjonen  $\text{Ø}220$  mm vil med dette ha 14 prøvestykker i langsgående retning og 7 i tverrgående retning, mens  $\text{Ø}250$  mm vil ha 17 prøvestykker i langsgående retning og 7 i tverrgående retning. Totalt er det to prøvestykker som gav ufullstendige data, og manglende verdier er utelatt fra gjennomsnittsverdiene.

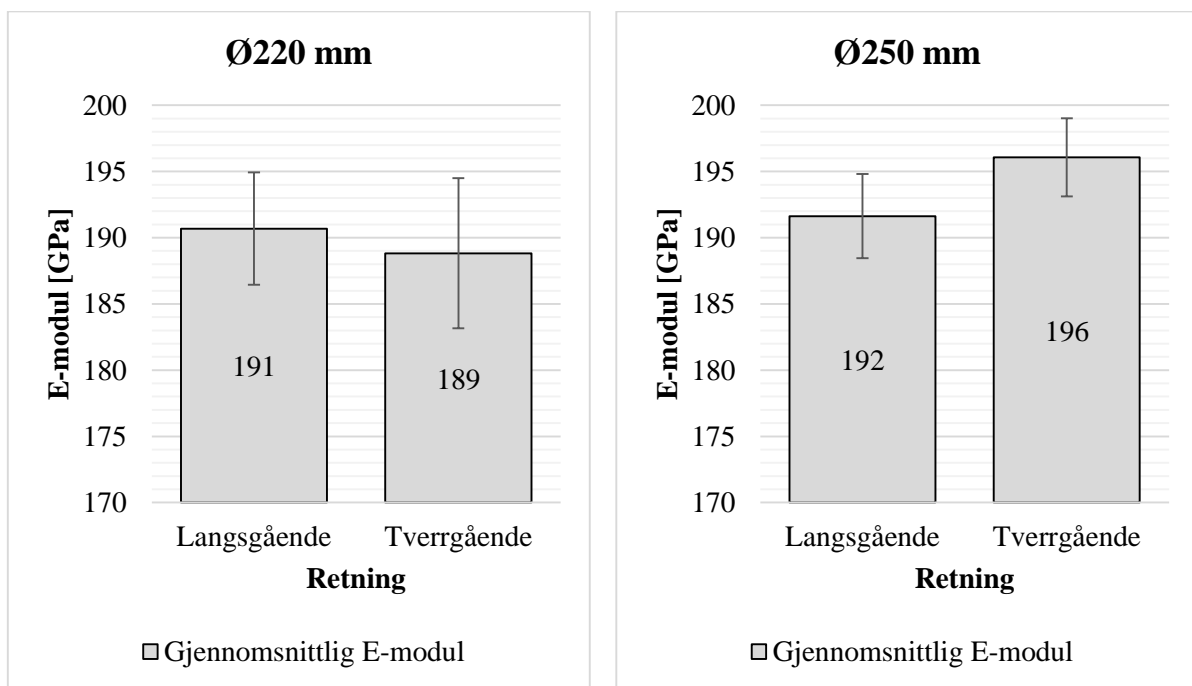
0,2 % offset flytegrense varierte med radiell avstand. Derfor er gjennomsnittsverdien for  $\sigma_{y,0,2}$  i langsgående retning basert på prøvestykker hvor tilhørende seksjon havner i lengden til det reduserte tverrsnittet på de tverrgående prøvestykkene. Det medfører at gjennomsnittsverdiene baserer seg på resultater fra prøvestykker med 19,1-57,6 mm radiell avstand fra senter for stangdimensjonen  $\text{Ø}220$  mm (7 prøvestykker), og 38,4-57,6 mm for stangdimensjonen  $\text{Ø}250$  mm (6 prøvestykker). En illustrasjon av benyttede soner som sammenlignes med tverrgående retning for stangdimensjon  $\text{Ø}220$  mm, er vist i *Figur 6-7*.



*Figur 6-7: Illustrasjon av sammenligningsgrunnlag.  $\text{Ø}220$  mm.*

### 6.2.1 E-modul i langsgående og tverrgående retning

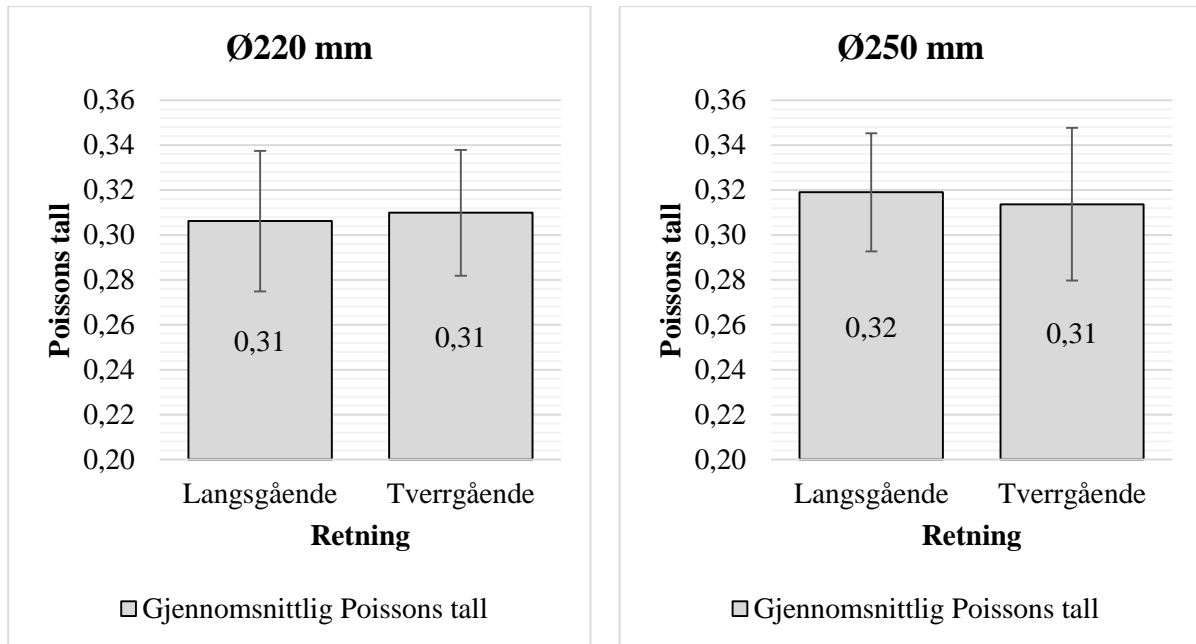
Figur 6-8 viser gjennomsnittlig E-modul i langsgående og tverrgående retning for begge stangdimensjonene. Stangdimensjonen Ø220 mm viser tilnærmede like verdier både i langsgående og tverrgående retning, men det er verdt å merke seg standardavviket. Stangdimensjonen Ø250 mm viser gjennomsnittlig en noe høyere E-modul i tverrgående retning sammenlignet med langsgående retning. Det er også noe lavere standardavvik for disse målingene enn for tilsvarende målinger på stangdimensjonen Ø220 mm. Totalt sett viser ingen av stangdimensjonene signifikant grad av anisotropi for E-modul. Beregnede gjennomsnittsverdier for stangdimensjonene Ø220 mm og Ø250, er henholdsvis 190 GPa og 192 GPa, medregnet alle strekkprøver i begge retninger. Det er verdt å merke seg at samtlige verdier er under den typiske verdien for E-modul på 200 GPa.



Figur 6-8: Gjennomsnittlig E-modul i langsgående og tverrgående retning.

### 6.2.2 Poissons tall i langsgående og tverrgående retning

En sammenligning av Poissons tall i langsgående og tverrgående retning (Figur 6-9), viser at gjennomsnittsverdiene er tilnærmet lik uavhengig av retning for begge stengene. Beregnet gjennomsnittsverdi for både Ø220 mm og Ø250 mm ble 0,31, medregnet alle strekkprøver i begge retninger. Gjennomsnittsverdiene er også nær forventet Poissons tall på 0,3. Det er likevel verdt å merke seg standardavviket for disse målingene, som er av en betydelig størrelse.

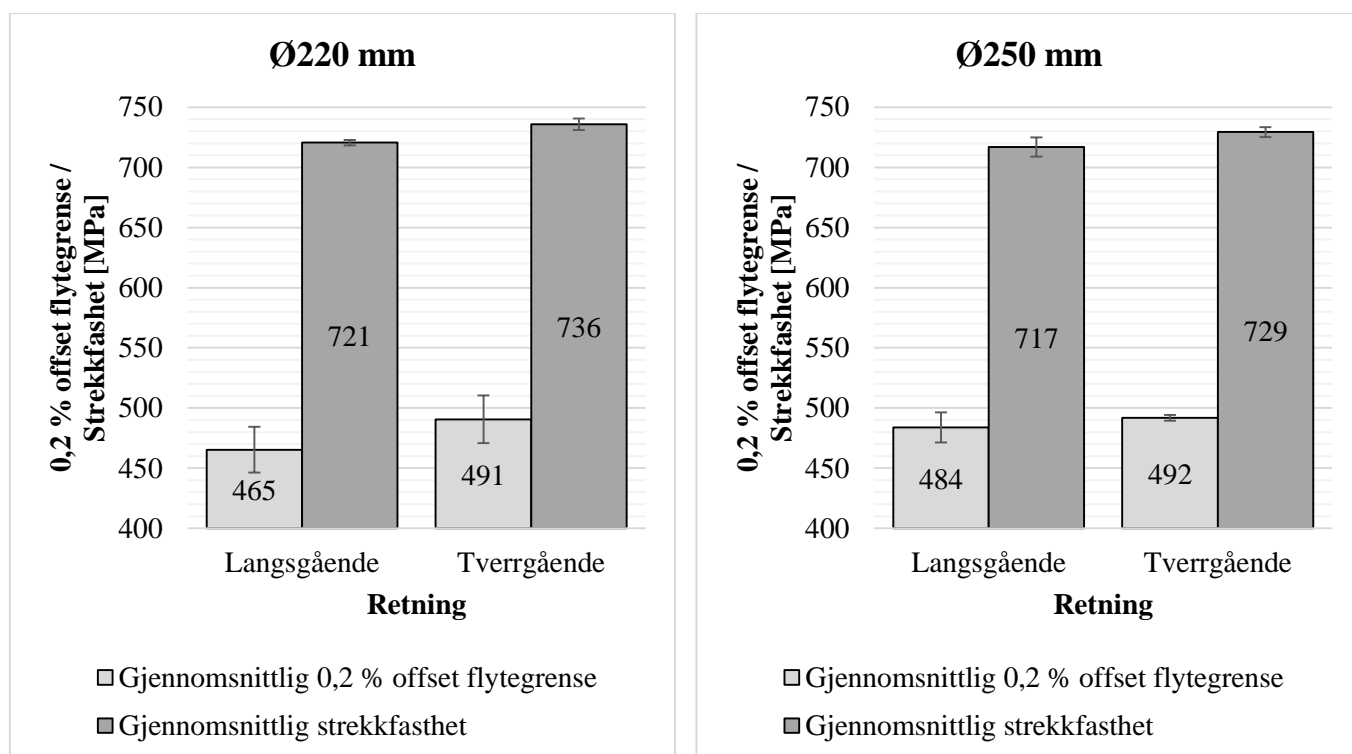


Figur 6-9: Gjennomsnittlig Poissons tall i langsgående og tverrgående retning.

### 6.2.3 0,2 % offset flytegrense og strekkfasthet i langsgående og tverrgående retning

0,2 % offset flytegrense ( $\sigma_{y,0,2}$ ) og strekkfasthet i langsgående og tverrgående retning for begge stengene, er presentert i Figur 6-10. Gjennomsnittsverdiene til begge stengene viser at strekkfastheten er noe høyere i tverrgående retning sammenlignet med langsgående retning. Det lave standardavviket viser også til repeterbare målinger. Resultatene viser dermed at strekkfastheten i stengene har en grad av anisotropi. Uansett retning dekker likevel verdiene for strekkfasthet kravet til et 60K-materiale (586 MPa), og produsentens egne krav (655/620 MPa).

0,2 % offset flytegrense viser også grad av anisotropi, der  $\sigma_{y,0,2}$  i tverrgående retning noe høyere enn i langsgående retning. Forskjellen er størst for stangdimensjonen Ø220 mm. Testresultatene viser at  $\sigma_{y,0,2}$  oppfyller kravene til et 60K-materiale (414 MPa) uavhengig av retning. Vurdert opp mot produsentens egne krav til  $\sigma_{y,0,2}$  i langsgående retning (485 MPa), ser man at gjennomsnittsverdien for Ø220 mm-stangen er vesentlig lavere enn dette kravet. Produsentens egne krav til  $\sigma_{y,0,2}$  i tverrgående retning (450 MPa) oppfylles for begge stengene.



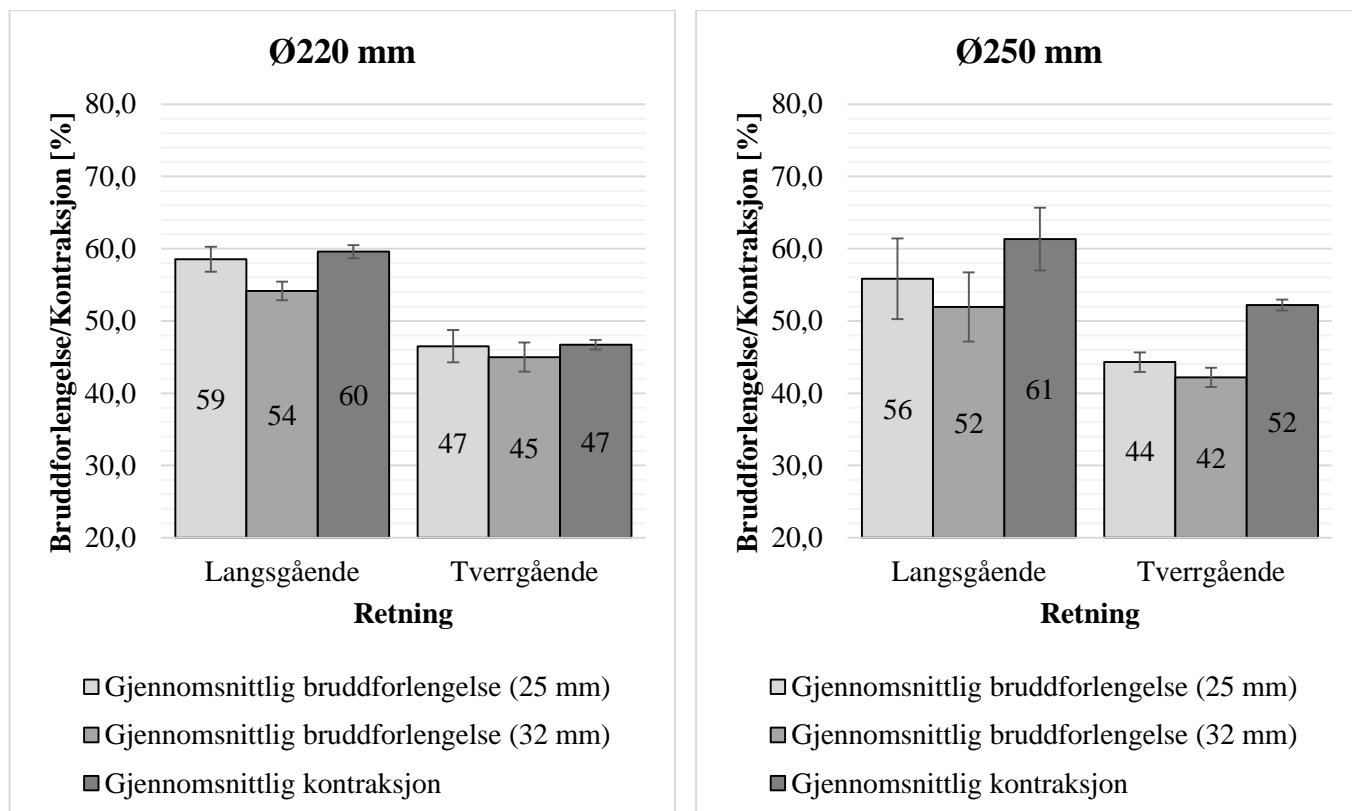
**Figur 6-10: Gjennomsnittlig 0,2 % offset flytegrense og strekkfasthet for langsgående og tverrgående retning.**

#### 6.2.4 Bruddforlengelse og kontraksjon i langsgående og tverrgående retning

Figur 6-11 sammenligner følgende gjennomsnittsverdier i langsgående og tverrgående retning; bruddforlengelse basert på fysisk måling (25 mm målelengde), forlengelse basert på avstanden mellom grepene til strekkmaskinen (32 mm målelengde), og kontraksjon. Begge stengene viser tydelig anisotropi, der materialet er vesentlig mer duktilt i langsgående retning sammenlignet med tverrgående retning.

Bruddforlengelse beregnet med de opprinnelige målelengdene 25 mm og 32 mm kan ikke sammenlignes direkte med kravet for et 60K-materiale (18%) eller produsentens egne krav (25/20 %), siden kravene er basert på 50 mm målelengde. Dette er derfor drøftet nærmere i *Kapittel 7.1 (s.103)*.

Kravene til kontraksjon er oppfylt i begge retninger, både vurdert opp mot et 60K-materiale (35 %) og produsentens eget krav (45 %).



Figur 6-11: Gjennomsnittlig bruddforlengelse (25 mm/32 mm) og kontraksjon for langsgående og tverrgående retning.

### 6.3 Materialelegenskaper ved hevede og senkede temperaturer

Dette kapitlet presenterer en rekke figurer som skal vise hvordan materialeegenskapene til stangdimensjonen Ø220 mm påvirkes av ulike temperaturer. Gjennomsnittsverdiene som presenteres for hevede/senkede temperaturer baserer seg på to strekkprøver med lik radiell avstand fra senter. Gjennomsnittsverdiene sammenlignes med strekkprøver utført ved romtemperatur, definert som 24 °C på figurene. Standardavvik er vist på de figurene hvor dette er naturlig.

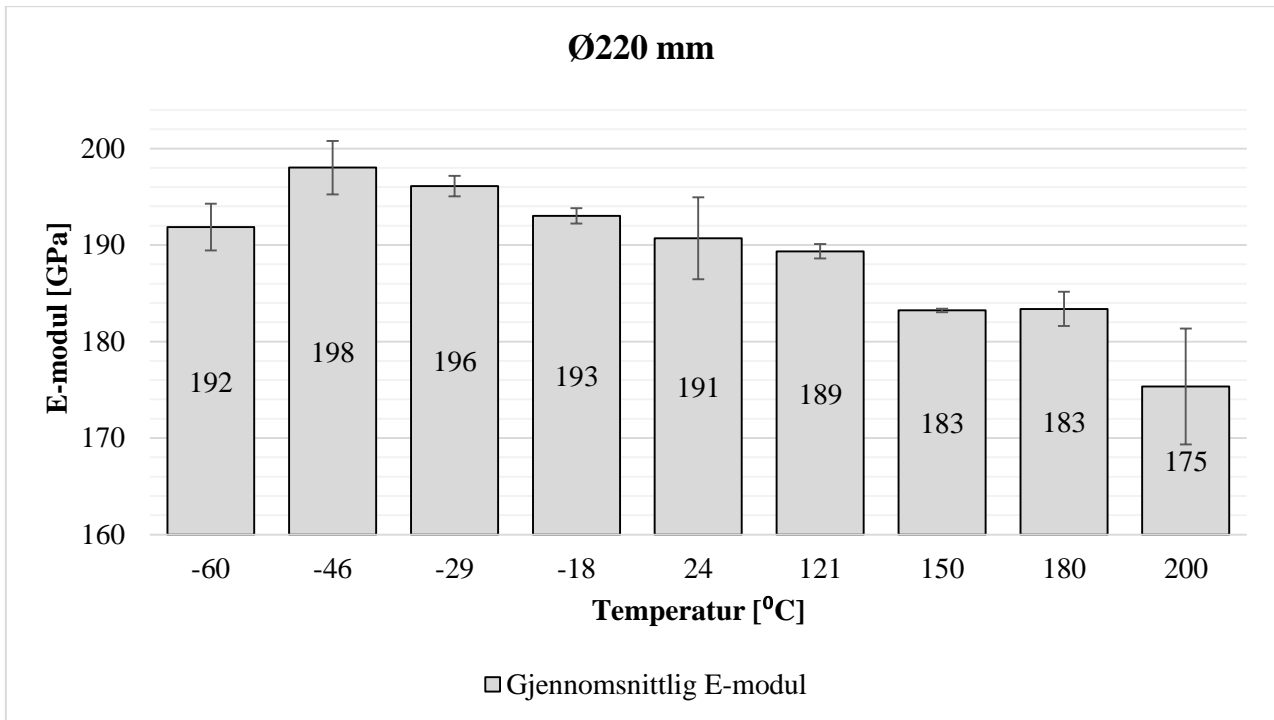
Gjennomsnittsverdiene for romtemperatur er basert på alle langsgående prøvestykker hentet fra stangdimensjonen Ø220 mm. Det er gjort et unntak for *Figur 6-15*, som viser endringsfaktoren til flytegrensen som følge av temperatur. Siden 0,2 % offset flytegrense varierte etter radiell avstand, vil strekkprøver ved hevede/senkede temperaturer sammenlignes med strekkprøver ved romtemperatur som har tilsvarende radiell avstand fra senter.

#### 6.3.1 E-modul ved hevede og senkede temperaturer

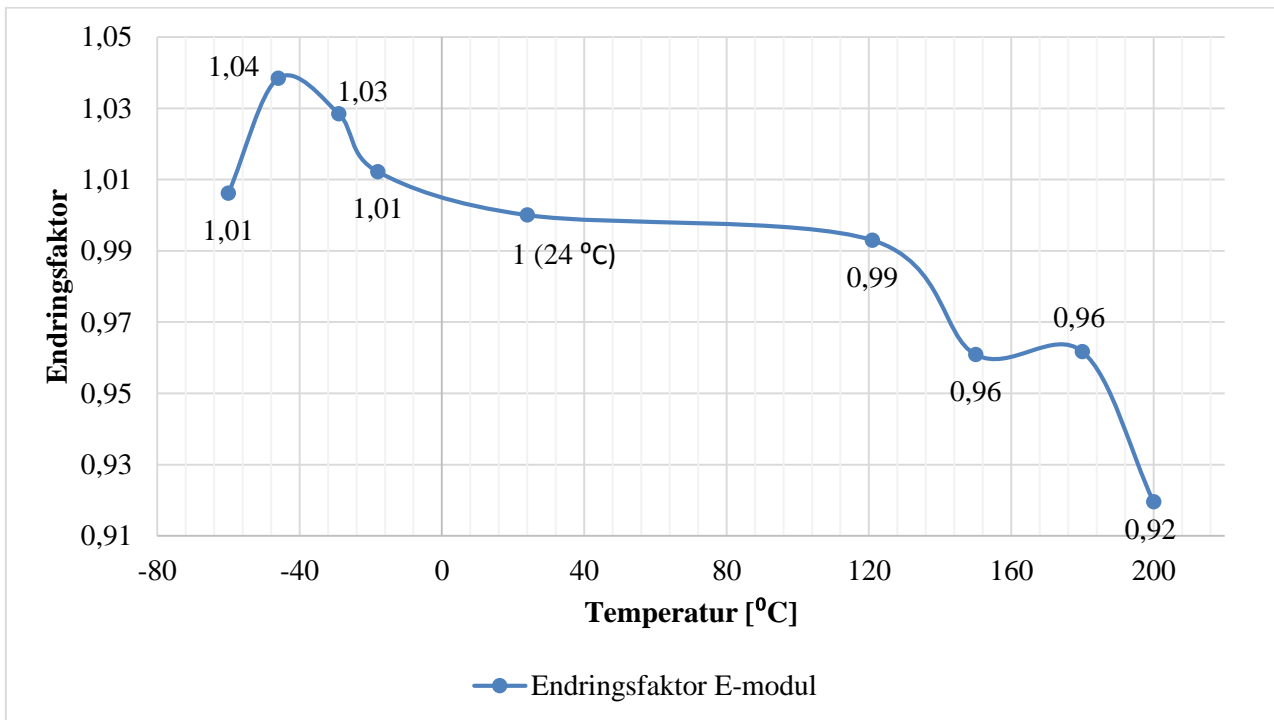
*Figur 6-12* viser hvordan E-modul endrer seg som følge av temperaturen i materialet. Ser man bort fra gjennomsnittsverdien for E-modulen ved -60 °C, viser resultatene en trend hvor E-modulen øker ved synkende temperatur, og minker ved stigende temperatur. Denne trenden kommer tydelig frem i *Figur 6-13*, som viser endringsfaktoren til E-modulen.

Sammenlignet med romtemperatur viser gjennomsnittsverdiene 4 % høyere E-modul ved -46 °C, og 8 % lavere E-modul ved 200 °C. Merk det store standardavviket ved 200 °C. Endringsfaktor basert på verdier i *Tabell 3-2 (s. 31)* gir 0,97 ved 100 °C og 0,93 ved 200 °C. Testresultatene viste til sammenligning en endringsfaktor på 0,99 ved 121 °C, og 0,92 ved 200 °C.





Figur 6-12: Gjennomsnittlig E-modul for hevede og senkede temperaturer.



Figur 6-13: Endringsfaktor for E-modul ved hevede og senkede temperaturer.

### 6.3.2 0,2 % offset flytegrense og strekkfasthet ved hevede og senkede temperaturer

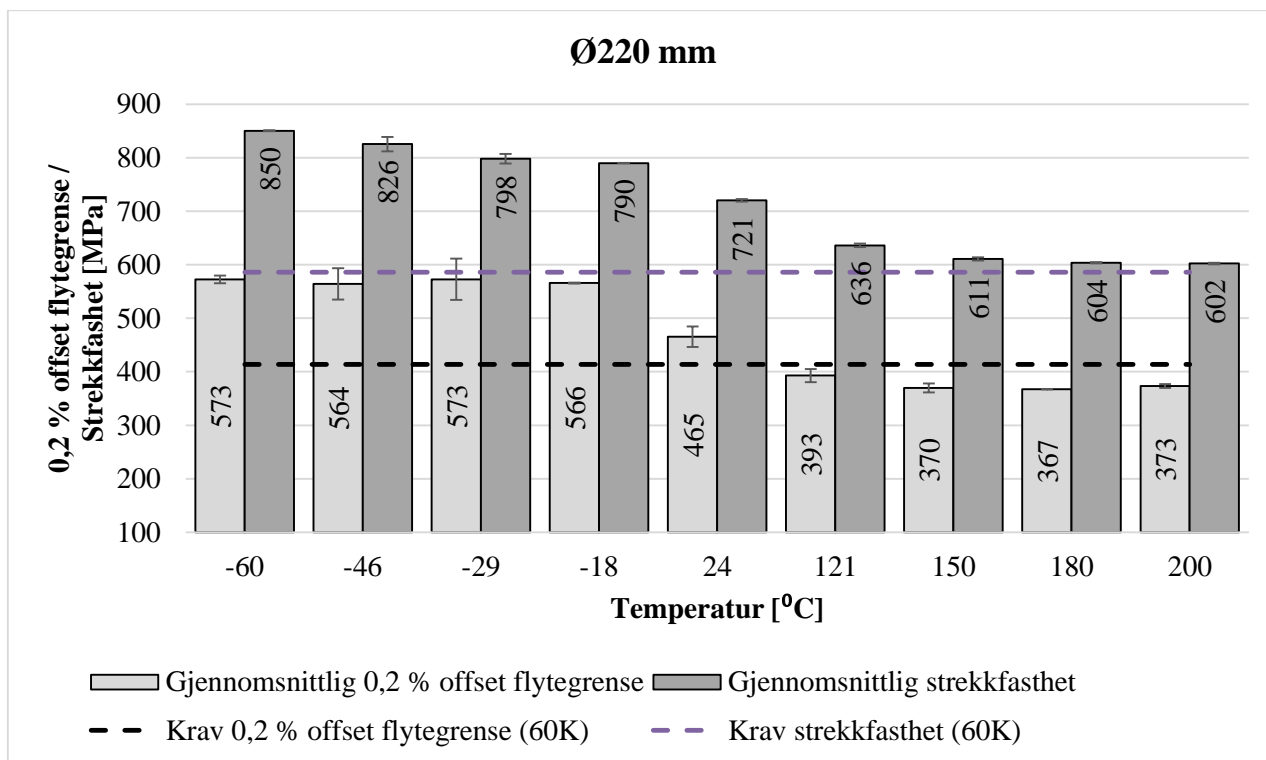
Gjennomsnittsverdiene for 0,2 % offset flytegrense ( $\sigma_{y,0,2}$ ) og strekkfasthet ved de ulike testtemperaturene er presentert i *Figur 6-14*. Sammenlignet med romtemperatur, viser både  $\sigma_{y,0,2}$  og strekkfastheten økt verdi ved senkede temperaturer, og redusert verdi ved hevede temperaturer. Endringsfaktoren presentert i *Figur 6-15*, viser tydelig en trend hvor  $\sigma_{y,0,2}$  og strekkfastheten stiger ved synkende temperatur, og synker ved stigende temperatur. Det er også tydelig at  $\sigma_{y,0,2}$  påvirkes i større grad enn strekkfastheten. Beregnede endringsfaktorer for  $\sigma_{y,0,2}$  tar hensyn til radiell avstand fra senter.

Stiplede linjer i *Figur 6-14* markerer kravene for  $\sigma_{y,0,2}$  og strekkfasthet for et 60K-materiale ved romtemperatur. Resultatene viser at gjennomsnittsverdien for  $\sigma_{y,0,2}$  fra 121 °C til 200 °C ikke oppfyller dette kravet. Strekkfastheten oppfyller derimot kravene for alle testtemperaturene.

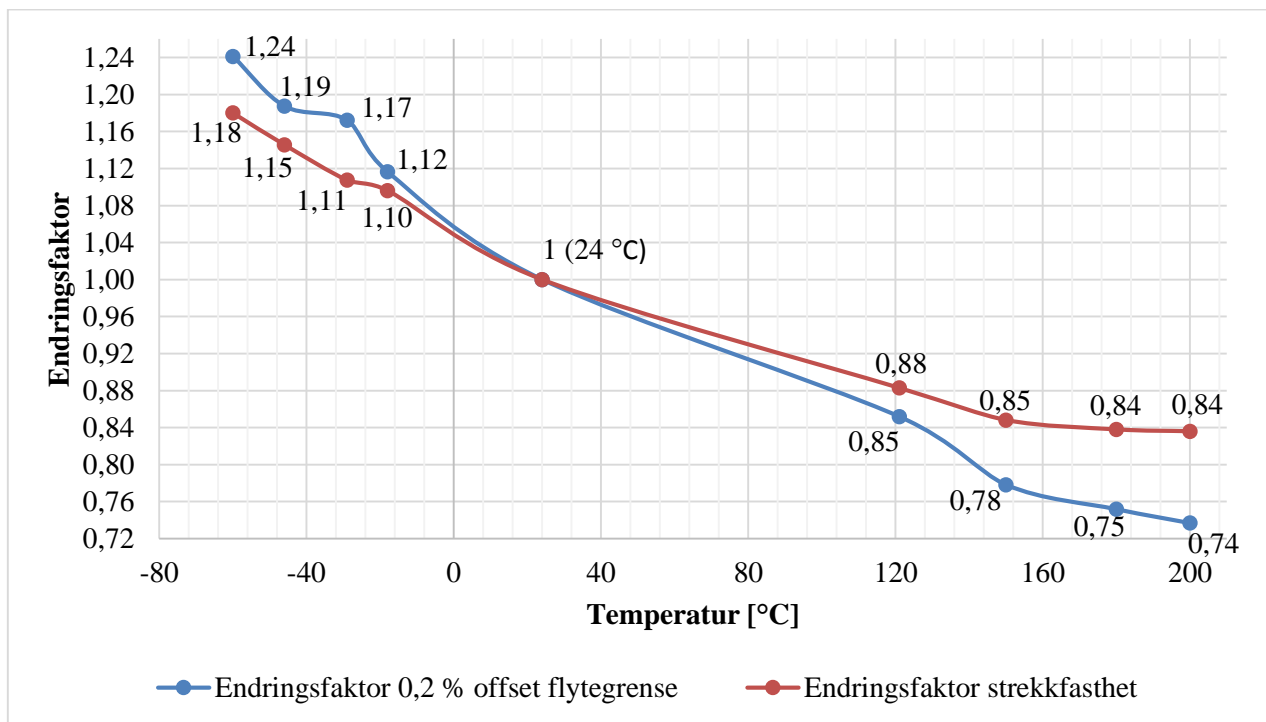
Sammenlignes resultatene i *Figur 6-15* med indikasjonen fra API Spec 6A (2010) (se s. 41) om 20 % reduksjon i flytegrense ved 180 °C, viser resultatene tilsvarende verdi. Beregnes endringsfaktor<sup>6</sup> fra de typiske verdiene beskrevet i *Tabell 3-2* (s. 31), vil man forvente 0,78 ved 100 °C, 0,73 ved 150,0 °C og 0,69 ved 200,0 °C. Resultatene i *Figur 6-15* er noe høyere. Tilsvarende sammenligning for strekkfastheten gir samme resultat, hvor de oppnådde resultatene er noe høyere enn forventede verdier.

---

<sup>6</sup> Beregnet endringsfaktorer tar utgangspunkt i en flytegrense på 460 MPa, da dette er oppgitt flytegrense for UNS S31803 i den eksterne kilden Outokumpu (2013).



Figur 6-14: Gjennomsnittlig 0,2 % offset flytegrense/strekkfasthet ved hevede og senkede temperaturer.



Figur 6-15: Endringsfaktor for 0,2 % offset flytegrense/strekkfasthet ved hevede og senkede temperaturer.

### 6.3.3 Bruddforlengelse og kontraksjon ved hevede og senkede temperaturer

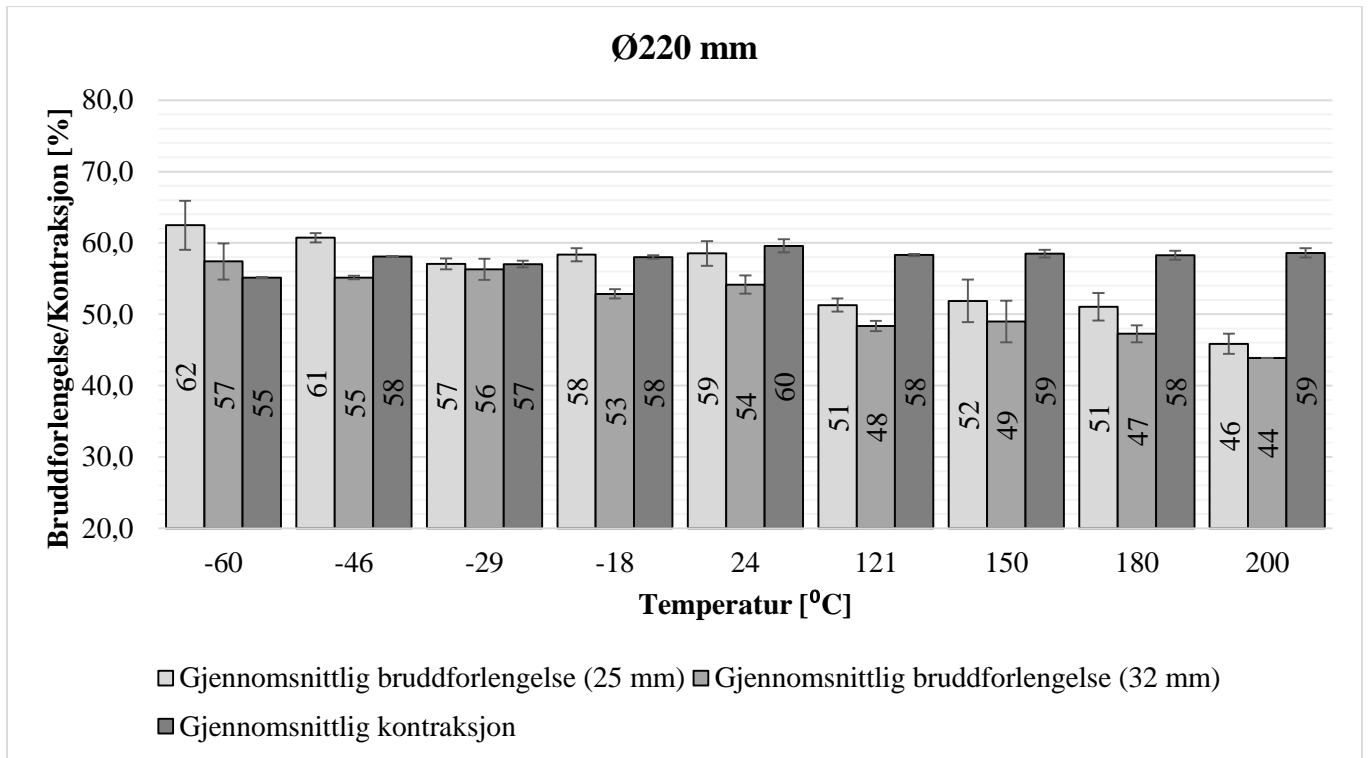
*Figur 6-16* presenterer gjennomsnittsverdier ved testtemperaturene for bruddforlengelse basert på fysisk måling (25 mm), bruddforlengelse basert på avstanden mellom grepene til strekkmaskinen (32 mm) og kontraksjon.

Gjennomsnittlig kontraksjon viser generelt liten variasjon som følge av temperaturpåvirkning, med unntak av  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , hvor kontraksjonen er noe lavere enn for resten av målingene. Endringsfaktor for kontraksjon, presentert i *Figur 6-17*, viser denne trenden tydelig.

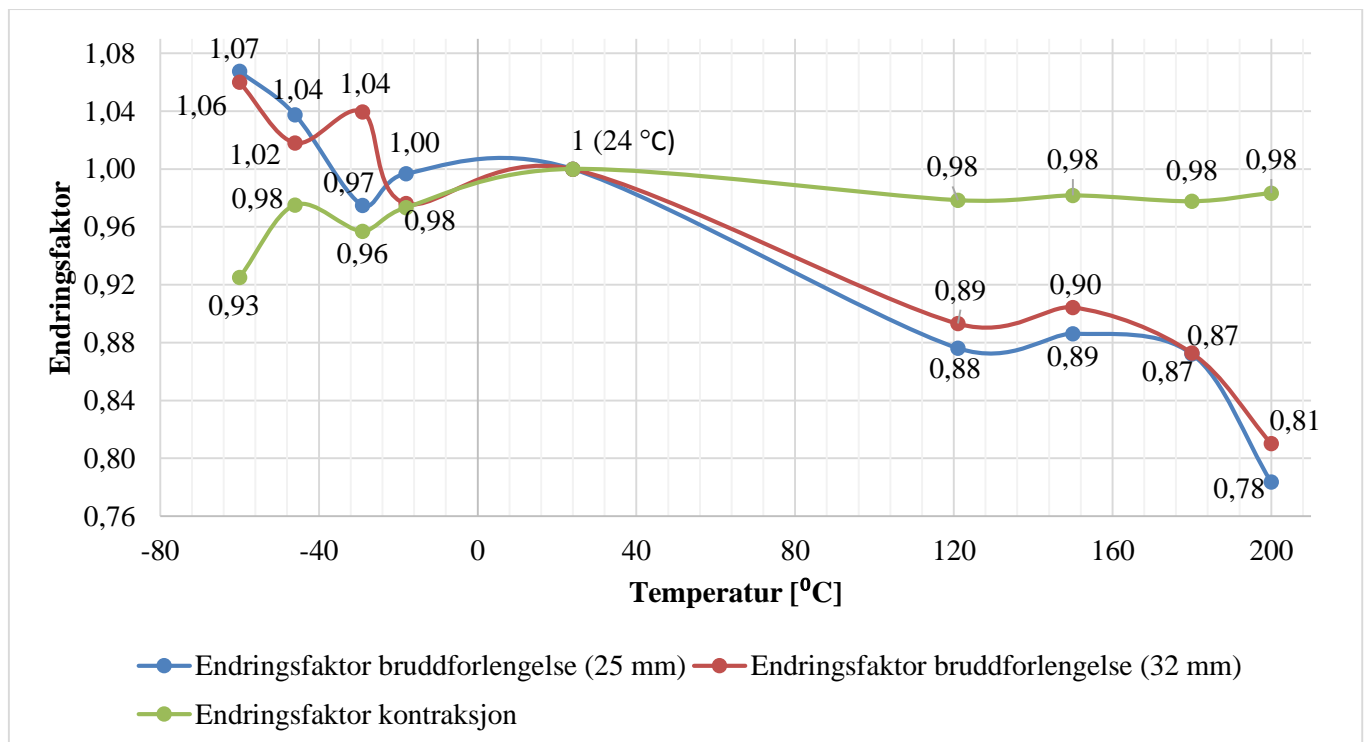
Bruddforlengelse viser i motsetning til kontraksjonen en større variasjon avhengig av temperaturen. Her viser de fysiske målingene (25 mm) en økning i bruddforlengelse ved  $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$  og  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ellers viser resultatene en redusert bruddforlengelse for de resterende temperaturene, hvor det mest signifikante reduksjonene er ved de høyeste temperaturene. Fra *Figur 6-17* kan det avleses en reduksjon på ca. 20 % for den relative forlengelsen ved  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Bruddforlengelse basert på avstanden mellom grepene til strekkmaskinen (32 mm) viser den samme trenden som de fysiske målingene, med unntak av strekkprøver ved  $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ , hvor det er beregnet en økning i forlengelsen sammenlignet med romtemperatur.

Sammenlignet krav om minimum kontraksjon på 35 % for et 60K-materiale, ser man at samtlige verdier ved hevede/senkede temperaturer tilfredsstiller kravet. Også produsentens krav på 45 % tilfredsstilles. Den laveste målte kontraksjonen er 55 % ved  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Bruddforlengelse beregnet med de opprinnelige målelengdene 25 mm og 32 mm kan ikke sammenlignes direkte med kravet for et 60K-materiale (18 %) eller produsentens egne krav (25/20 %), siden kravene er basert på 50 mm målelengde. Dette er derfor drøftet nærmere i *Kapittel 7.1 (s.103)*.



**Figur 6-16: Gjennomsnittlig bruddforlengelse (25 mm/32 mm)/ og kontraksjon ved hevede og senkede temperaturer.**



**Figur 6-17: Endringsfaktor bruddforlengelse (25 mm/32 mm) og kontraksjon ved hevede og senkede temperaturer.**



# Kapittel 7

## Evaluering av kvalifikasjonsbevis

Resultatene fra de eksperimentelle forsøkene, samt en generell evaluering av kvalifikasjonsbevisene, er presentert i *Kapittel 6*. Dette kapittelet oppsummerer viktige funn og avvik som drøftes nærmere opp mot materialkrav fra standardverk (*Kapittel 7.1*), produsentens egne krav (*Kapittel 7.2*), kritiske områder fra en strukturanalyse (*Kapittel 7.3*), og teorien (*Kapittel 7.4*). I tillegg drøftes fremgangsmetoden benyttet i de eksperimentell forsøkene (*Kapittel 7.5*), og funn fra teknologikartleggingen (*Kapittel 7.6*).

### 7.1 Resultater sammenlignet med krav til 60K-materiale

En oversikt over mekaniske materialeegenskaper fra strekkprøvingen sammenlignet med krav til et 60K-materiale, er presentert i *Tabell 7-1*. De mekaniske egenskapene viser tilfredsstillende resultater ved romtemperatur. Når det kommer til temperaturklassen «U» er det usikkerheter om denne klassen godkjennes, noe som drøftes nærmere under. I tillegg drøftes resultatene for bruddforlengelse.

*Tabell 7-1: Resultater sammenlignet med krav til 60K-materiale.*

Krav fra API Spec 17D/6A	Oppfyller kravet gitt for et 60K-materiale	
	Ø220 mm	Ø250 mm
<b>0,2 % offset flytegrense</b>	√	√
<b>Strekfasthet</b>	√	√
<b>Bruddforlengelse (50 mm målelengde)</b>	√	√ <sup>1</sup>
<b>Kontraksjon</b>	√	√
<b>Temperaturklasse U (-18 til 121°C)</b>	X <sup>1</sup>	Ingen tester utført
<sup>1</sup> Uklare krav fra standardverk om materialeegenskaper innenfor temperaturklassen U.		
Oppfylt	Usikkert	

Temperaturklasse «U» (-18 °C til 121 °C) er minimumskravet for utstyr som går innunder spesifikasjonsnivå PSL 3. Det er spesifiseres at det ved temperaturer over 121°C skal tas følge for redusert materialstyrke som følge av temperaturpåvirkning. Dersom utstyret kvalifiseres for trykklassen «69,0 MPa», skal materialkravene som gjelder ved romtemperatur også oppfylles for temperaturer over 121°C. Innenfor temperaturklasse «U» er det derimot ikke spesifisert direkte at effekten av temperatur skal betraktes, men som et overordnet krav spesifiserer standardverket følgende (API Spec 17D, 2011, s. 14):

*“Product designs shall be capable of functioning throughout the temperature range for which the product is rated.”*

Da materialkravene som gjelder ved romtemperatur også skal være oppfylt for temperaturer over 121 °C, kan det tenkes at dette også er gjeldende innenfor hele temperaturområdet til temperaturklasse «U».

Testresultatene viser at kravene ved romtemperatur ikke overholdes gjennom hele temperaturområdet. Dette er noe som var forventet på bakgrunn av materialdata hentet fra Outokumpu (2013) (se *Tabell 3-2, s.31*), som viser at dupleksmaterialer typisk har  $\sigma_{y,0,2}$  lik 360 MPa ved 100 °C. Denne verdien tar utgangspunkt i en flytegrense på 460 MPa. Kravet til  $\sigma_{y,0,2}$  for et 60K-materiale er 414 MPa. Resultatene viser gjennomsnittlig  $\sigma_{y,0,2}$  lik 393 MPa for strekkprøver ved 121 °C. Dette gir en differanse på 21 MPa fra kravet.

Dersom det er slik at krav om materialstyrke ved romtemperatur er gjeldende for alle temperaturer, viser resultatene og forventet verdi at materialegenskapene ikke er tilstrekkelig ved 121 °C. Den forbestemte trykklassen (69 MPa) kan med dette ikke kvalifiseres for hele temperaturområdet. Det kan derfor være aktuelt å utføre nøyaktige strukturanalyser som tar følge for temperaturpåvirkningen på flensen, for å undersøke om flensen oppnår tilstrekkelig integritet.

Tidligere er det tydeliggjort i *Kapittel 5.3.5 (s.82)* at bruddforlengelse målt med målelengdene 25 mm og 32 mm ikke kan sammenlignes direkte med kravet for et 60K-materiale, siden kravet er basert på 50 mm målelengde. Databladene (se *Vedlegg D*) til stengene viser at utført kvalitetskontroll gav 42-46 % bruddforlengelse (50 mm målelengde), noe som dekker kravet til et 60K-materiale (18 %) med god margin. Testresultatene fra de eksperimentelle forsøkene ved romtemperatur med 25 mm målelengde, er av en størrelse som gjør det rimelig å anta at kravene til bruddforlengelse vil imøtekommes.

Testresultatene for bruddforlengelse ved romtemperatur viser generelt lavere bruddforlengelse for tverrgående retning, sammenlignet med langsgående retning. Tverrgående prøvestykker er ikke testet ved hevede/senkede temperaturer. Da målt bruddforlengelse for langsgående prøvestykke (25/32 mm målelengde) ved hevede/senkede temperaturer viser forholdsvis liten nedgang (maksimalt 22 % nedgang ved 200 °C) som følge av temperaturpåvirkning, kan det godt tenkes at kravet om 18 % bruddforlengelse (60K-materiale) også vil være oppfylt for



temperaturområdet -18 °C til 121 °C (temperaturklasse «U»), i både tverrgående og langsgående retning.

## 7.2 Resultater sammenlignet med produsentens egne materialkrav

En oversiktstabell med sammenligning av resultater fra strekkprøving og produsentens egne krav til stangmaterialet UNS S31803, er presentert i *Tabell 7-2*. Merk at verdiene i tabellen for E-modul, Poissons tall og variasjon ved hevede temperatur, gjelder for DSS generelt. Begge stangdimensjonene samsvarer med krav og forventede verdier, med unntak av E-modul og produsentens eget krav til 0,2 % offset flytegrense i langsgående retning for stangdimensjon Ø220 mm.

**Tabell 7-2: Resultater vurdert opp mot produsentens egne krav og forventninger til stangmaterialet.**

Materialegenskap	Oppfyller materialprodusentens egne krav eller forventede verdier	
	Ø220 mm	Ø250 mm
<b>E-modul</b> (Generelt for duplekslegeringer)	X	X
<b>Poissons tall</b> (Generelt for duplekslegeringer)	√	√
<b>0,2 % offset flytegrense</b> (langsgående/tverrgående)	X / √	√ <sup>1</sup> / √
<b>Strekfasthet</b> (langsgående/tverrgående)	√ / √	√ / √
<b>Bruddforlengelse</b> (50 mm målelengde) (langsgående/tverrgående)	√ / √	√ / √
<b>Kontraksjon</b>	√	√
<b>Variasjon ved hevede temperaturer</b> ( $\sigma_{y,0,2}$ , E-modul, og bruddforlengelse)	√ <sup>2</sup>	√ <sup>2</sup>
<sup>1</sup> Et fåtall prøvestykker viser verdier like under produsentens minimumskrav i langsgående retning. <sup>2</sup> Viser ikke samme endringsfaktor, men tilsvarende endringsfaktorer vurdert som nære nok.		
Samsvarer	Samsvarer ikke i begge retninger	Samsvarer ikke

Testresultatene viser noe lavere E-modul sammenlignet med forventet verdi (200 GPa). Den forventede verdien gjelder generelt for duplekslegeringer i flere ulike produktformer, og det er ikke funnet en forventet verdi spesifikt for stangmaterialet UNS S31803. Med tanke på at verdien gjelder generelt, kan det være at den forventede verdien ikke er nøyaktig for stangmaterialet UNS S31803. Resultatene viste gjennomsnittsverdier i langsgående og tverrgående retning for begge stangdimensjonene mellom 188,8-196,1 GPa. Dette viser at E-modulen til stangmaterialet er noe lavere enn verdien hentet fra Outokumpu (2013). En faktor

som spiller inn på resultatet er fremgangsmetoden benyttet i beregning av E-modul. Fremgangsmetoden er nærmere drøftet i *Kapittel 7.5.1 (s.111)*.

Testresultatene for 0,2 % offset flytegrense i langsgående retning oppfyller ikke produsentens eget krav på 485 MPa. Den laveste verdien i Ø220 mm-stangen er 452 MPa. Dersom en flens skal maskineres ut fra stangmaterialet er det viktig at materialverdier oppgitt i datablader er korrekte. Det er forsøkt å kontakte leverandøren av stangmaterialet for å finne ut hvor i stangen prøvestykket er tatt ut. Det lykkes ikke å få svar.

Forskjellen kan skyldes metode benyttet i denne rapporten sammenlignet med produsentens egen kvalitetskontroll. En mulig årsak kan være at materialprodusentens godkjenning av materialet i langsgående retning er utført med prøvestykker som ikke representerer stangens laveste materialeegenskaper, for eksempel nær overflaten til materialet istedenfor senterområdet av stangen. Den benyttede fremgangsmetoden under strekkprøvingen og beregningen av  $\sigma_{y,0,2}$  anses å gi materialeegenskaper som i stor grad representerer de faktiske materialeegenskapene. Siden standardverkene gir rom for egne vurderinger, kan fremgangsmetoden likevel være en medvirkende årsak til forskjellen. Det er likevel lite trolig at den store differanse mellom testresultatene og produsentens krav vil kunne utjevnes selv med en annen fremgangsmetode. Fremgangsmetoden benyttet i beregningen av 0,2 % offset flytegrense drøftes nærmere i *Kapittel 7.5.2 (s.112)*.

Bruddforlengelse beregnet med de opprinnelige målelengdene 25 mm og 32 mm ikke kan sammenlignes direkte med produsentens egne krav (25/20 %), siden kravet er basert på 50 mm målelengde. Basert på drøfting i *Kapittel 7.1 (s.103)* kan man med høy sikkerhet anta at produsentens egne krav tilfredsstilles ved romtemperatur, da produsentens egen kvalitetskontroll viste god margin til kravene (42-46 % for begge stengene).

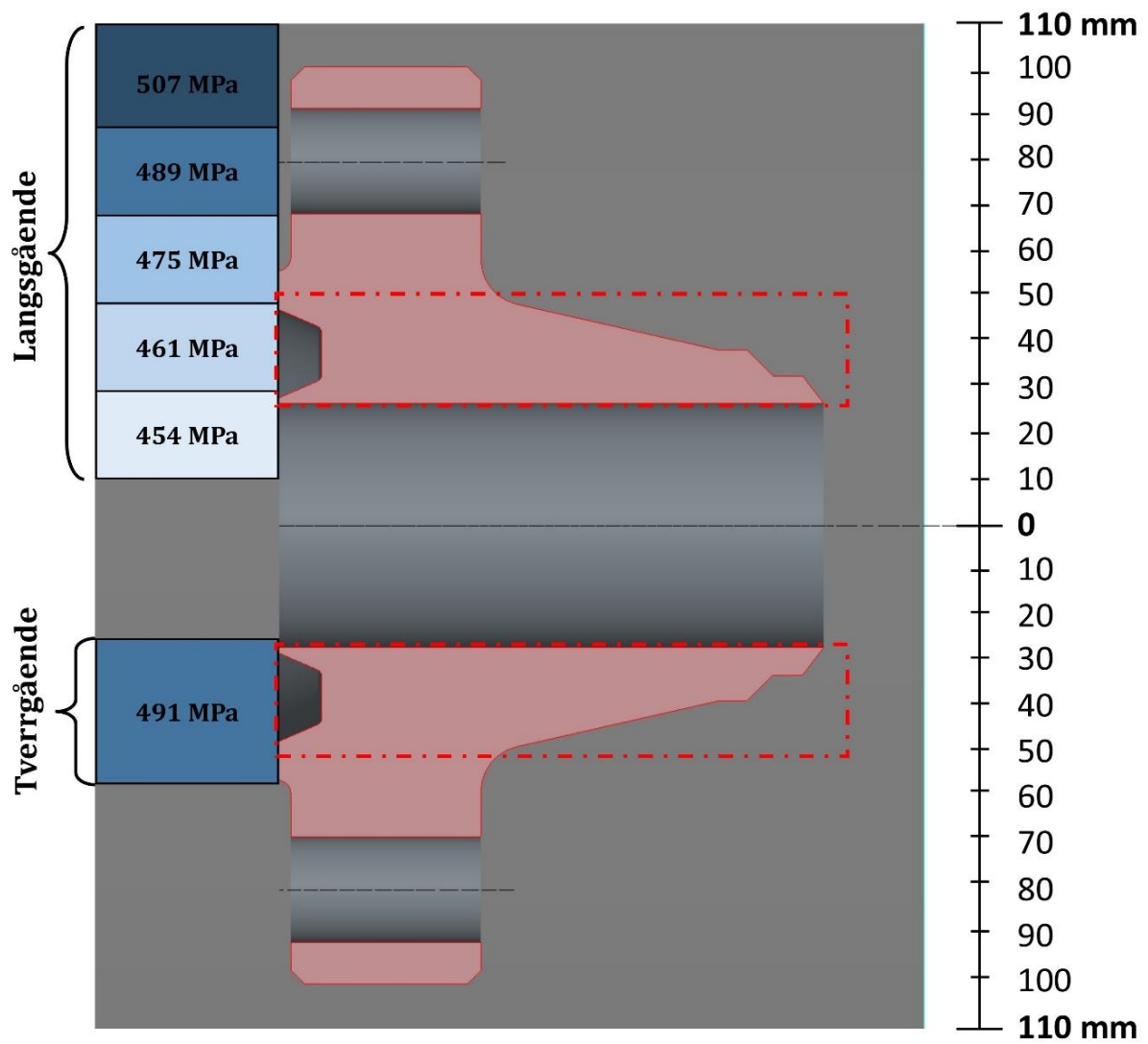
### **7.3 Resultater vurdert opp mot tidligere arbeid med aksesymmetrisk modell**

Kartlagt data vil i denne delen vurderes opp mot et flensdesign. Resultatene vurderes opp mot kritiske områder fra aksesymmetrisk FEM-analyse av Gjengedal, Fyllingen, & Sture (2013). Se tilbake på *Kapittel 4.4 (s.45)*, for flere detaljer om denne modellen. Det er viktig å påpeke at det er en 2" ASME-flens med trykklassen «1500 psi», som er benyttet i modellen. Dette er en annen trykklasser, samt at den har dimensjonale forskjeller sammenlignet med 2 <sup>1/16</sup> " 6BX API-flens. På grunn av ulik klassifisering og dimensjonale forskjeller vurderes ikke spenningsintensitetene i modellen direkte opp mot testresultatene. Dermed benyttes den

aksesymmetriske modellen i denne sammenheng for å se hvor de kritiske områdene er, slik at testresultater fra strekkprøvene kan vurderes opp mot disse områdene.

Den aksesymmetriske modellen viste at området rundt ringsporet fikk størst spenningsintensitet i flensen. Maksimal spenningsintensitet ble funnet i dette området når sammensettingskrefter ble betraktet alene, uten interntrykk. En økning av interntrykket gav lavere spenninger i ringsporet og økning av spenninger i halsområdet. Med dette er kritiske områdene for en flens markert i *Figur 7-1*. Figuren viser i tillegg gjennomsnittlig  $\sigma_{y,0,2}$  for ulike seksjoner i stangdimensjonen Ø220 mm, i både langsgående og tverrgående retning. En betraktning av det kritiske området av flensen opp mot testresultatene, viser en gjennomsnittsverdi lik 461 MPa i langsgående retning, og 491 MPa i tverrgående retning. Resultatene viser god margin for det kritiske området til kravet som stilles til et 60K-materiale (414 MPa). En interessant observasjon er at  $\sigma_{y,0,2}$  ikke tilfredsstillende produsentens egne krav (485 MPa) i langsgående retning for de kritiske områdene.

Resultater fra strekkprøvene ved hevede/senkede temperaturer viste at E-modul synker betydelig med økende temperatur. Akisanya & Deans (2013) opplyser at det er vanlig å anta at det er tilstrekkelig å benytte E-modul ved romtemperatur under design av føringsrør, produksjonsrør og rørdesign i olje og gassindustrien. Dersom dette stemmer kan det medføre i unøyaktige beregninger når UNS S31803 benyttes. *Vedlegg F* viser resultatet av en varmekonduktivitetsanalyse i API-TP-6AF2 (2013, s. 1), med en typisk temperaturredifferanse for en flens med 121 °C (250 °F) på innsiden og -1 °C (30 °F) på yttersiden av flensen. Den viser at flensmaterialet har temperaturer bestående av hele temperaturområdet. Hvor stor effekt det har å benytte en E-modul som funksjon av temperatur for ulike punkter i flensmaterialet, kan være et interessant område for fremtidige strukturanalyser.



Figur 7-1: Testresultater (Ø220 mm) vurdert opp mot 2 <sup>1/16</sup> " 6BX-flens.

#### 7.4 Observasjoner i stangdimensjonene Ø220 mm og Ø250 mm

En oppsummering av observasjoner fra testresultatene for stangdimensjonene Ø220 mm og Ø250 mm, er presentert i *Tabell 7-3*. Denne delen drøfter utvalgte observasjoner opp mot teorien.

**Tabell 7-3: Sammendrag av resultater for stangdimensjonene Ø220 mm og Ø250 mm.**

Materialegenskap	Variasjon ved radiell avstand		Anisotropi		Variasjon ved hevede/senkede temperaturer Ø220
	Ø220	Ø250	Ø220	Ø250	
<b>E-modul</b>	X	X	X	X	√
<b>Poissons tall</b>	X	X	X	X	-
<b>0,2 % offset flytegrense</b>	2	1	2	1	√
<b>Strekfasthet</b>	X	X	1	1	√
<b>Bruddforlengelse</b>	X	X	2	2	√ <sup>1</sup>
<b>Kontraksjon</b>	X	X	2	2	X
<sup>1</sup> Uventet variasjon.					
Ja	1 = I liten grad	2 = I stor grad	Nei		

Det er studert hvilke materialegenskaper som har variasjoner etter radiell avstand fra senter i stangen, og som et resultat av dette viste kun 0,2 % offset flytegrense tydelige endringer. Stangdimensjonen Ø220 mm viste størst grad av endring, med en betydelig endring fra senter til overflaten. I *Kapittel 2.4.3* (s. 22) kommer det frem at en større stangdimensjon normalt vil gi størst variasjon i materialegenskaper etter radiell avstand fra senter i stangen. Resultatene viser derimot det motsatte for de testede stangdimensjonene. Med tanke på at det er en liten dimensjonsforskjell mellom stengene, er det tenkelig at man i utgangspunktet ikke kunne forvente de store forskjellene mellom stengene. Det kan være flere årsaker til at den minste stangen viser størst variasjon. Forskjellen kan ligge i fremstillingen av stengene, dersom det er benyttet ulikt utstyr og/eller prosedyre. Fremstilling av stengene bør undersøkes nærmere, og det kan være interessant å gjenskape testene for å se om Ø220 mm får størst variasjoner hver gang sammenlignet med Ø250 mm.

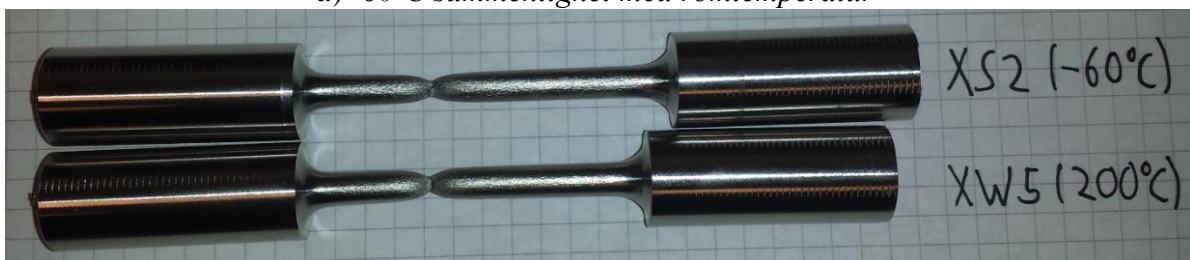
Stangdimensjonen Ø220 mm viste størst grad av anisotropi for 0,2 % offset flytegrense. Strekkfasthet, bruddforlengelse og kontraksjon viste omtrent samme grad av anisotropi i begge stengene. E-modul og Poissons tall viste ingen merkbar grad av anisotropi for noen av stangdimensjonene.

Materialegenskapene E-modul, 0,2 % offset flytegrense, strekkfasthet, og bruddforlengelse, viste alle variasjoner ved hevede/senkede temperaturer sammenlignet med resultater ved romtemperatur. Spesielt er det interessant å trekke frem bruddforlengelse, som viste en økende

bruddforlengelse ved senkede temperaturer og en redusert bruddforlengelse ved hevede temperaturer. *Figur 7-2* viser prøvestykkene satt ved siden av hverandre, og her ser man hvordan duktiliteten endrer seg som følge av temperaturpåvirkningen. API 1PER15K-1 (2013, s. 36), en protokoll for verifikasjon og validering av høy-trykk og høy-temperatur utstyr, opplyser generelt at man kan forvente at duktiliteten øker med stigende driftstemperatur, og at den reduseres ved synkende driftstemperatur. Testresultatene viser det motsatte. Det er gjort litteratursøk for å finne sammenlignbare testresultater, uten at dette har lyktes. Det bør utføres nærmere undersøkelser rundt denne observasjonen. Dersom funnene stemmer, viser UNS S31803 gode egenskaper ved lave temperaturer, da duktiliteten ivaretas.



*a) -60°C sammenlignet med romtemperatur*



*b) -60°C sammenlignet med 200°C.*

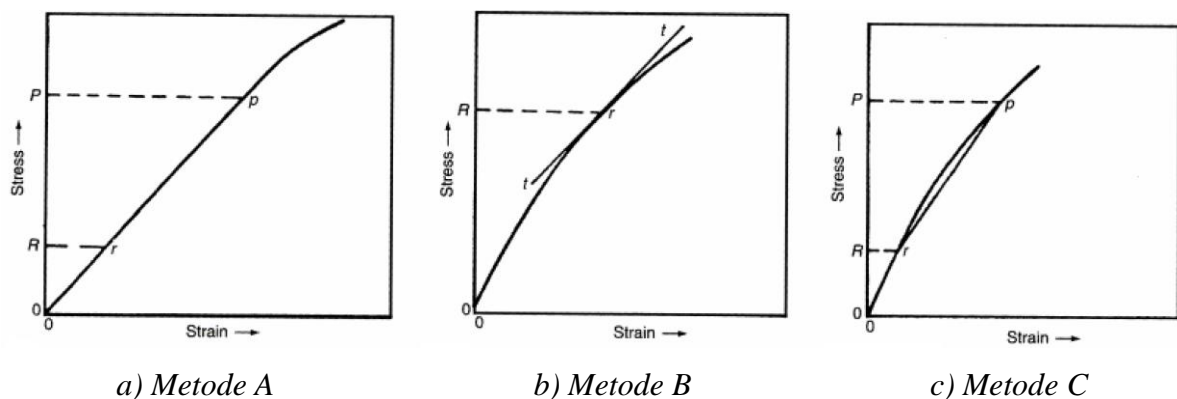
**Figur 7-2: Bruddforlengelse som følge av temperaturpåvirkning.**

## 7.5 Fremgangsmetode: behandling av rådata

Denne delen drøfter fremgangsmetoden benyttet i kartleggingen av materialdata i stengene. Behandling av rådata gir rom for egne vurderinger, og beregning av E-modul og 0,2 % offset flytegrense drøftes derfor nærmere.

### 7.5.1 Behandling av rådata: E-modul

Standardverket ASTM E111 (2010) gir tre metoder for beregning E-modul. *Figur 7-3* illustrerer metodene, hvor «Metode A» er benyttet. Fremgangsmetoden er nærmere beskrevet i *Kapittel 5.3.2* (s.77).



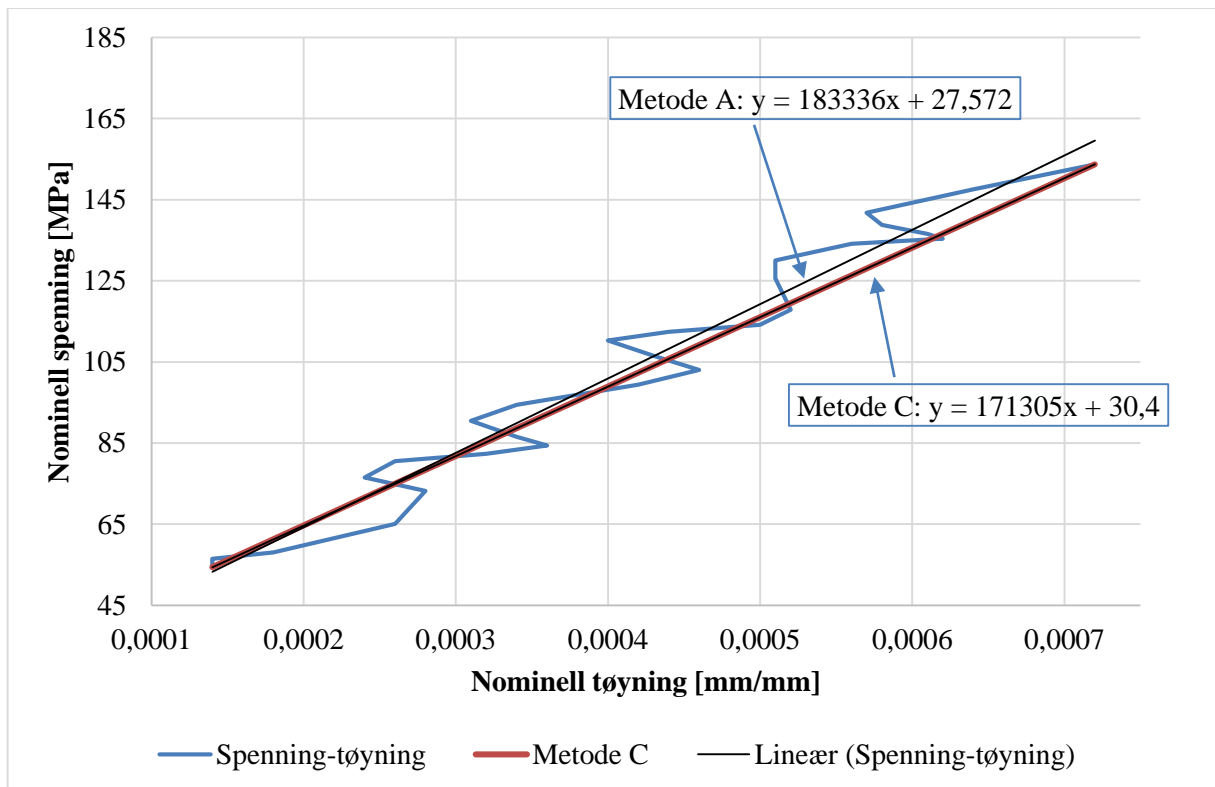
**Figur 7-3: Metoder for beregning av E-modul (Davis, 2004).**

Outokumpu (2013) oppgir en E-modul på 200 GPa generelt for dupleksmaterialer. Resultatene viste at E-modul var under forventet verdi for alle prøvestykkene. Differansen kan skyldes metoden benyttet i beregning av E-modul, da standardverket gir rom for å ta egne vurderinger.

Beregningen av E-modul er utført med data fra spenningsområdet 50-150 MPa, med noen få unntak. Dette området ble ansett som representativt for materialets lineære spennings-tøyingsområde. Valg av spenningsområde påvirker resultatene. Et større spenningsområde vil gi flere datapunkter som den lineære trendlinjen vil basere seg på, slik at effekten av unøyaktige/sporadiske datapunkter reduseres. På en annen side vil dette gi større sannsynlighet for at datapunkter som representerer et ikke-lineært spennings-tøyingsforhold inkluderes. En illustrasjon på målinger med unøyaktige/sporadiske datapunkter, er vist i *Figur 5-13 b*. (s. 78). Under behandling av rådata viste det seg at valg av spenningsområde under proporsjonalitetsgrensen (se *Kapittel 5.3.1*, s. 76), stort sett gav liten effekt på sluttresultatet.

En annen faktor som påvirker resulterende E-modul, er benyttet metode. *Figur 7-4* gir et eksempel hvor den benyttede metoden og «Metode C» er sammenlignet. På figuren

representerer stigningstallet i ligningen resulterende E-modul i MPa. «Metode C» gir i dette tilfellet en lavere E-modul. Spennings-tøyingskurven viser svingninger i det avgrensede spenningsområdet. Denne svingningen kan i større grad gi unøyaktig E-modul ved bruk av «Metode C» (to datapunkter), sammenlignet med den benyttede metoden som baserer seg på alle datapunktene i spenningsområdet. Den benyttede metoden anses derfor som mer nøyaktig.



Figur 7-4: Eksempel på to metoder for beregning av E-modul.

### 7.5.2 Behandling av rådata: 0,2 % offset flytegrense

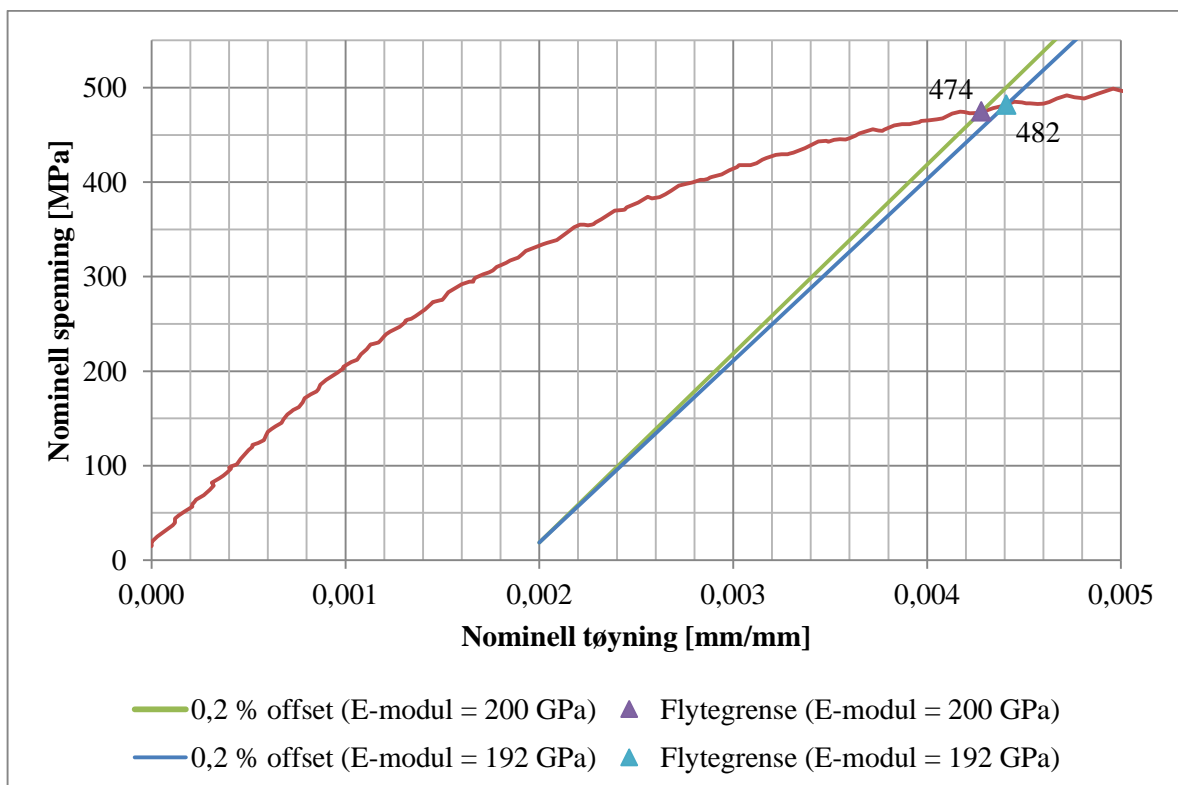
Benyttet metode for beregning av 0,2 % offset flytegrense ( $\sigma_{y,0,2}$ ) er beskrevet i *Kapittel 5.3.4* (s. 80). E-modul representerer stigningen til den lineære kurven som forskyves (0,2 % offset). Det ble valgt å benytte E-modulen til gjeldende prøvestav under beregningen av  $\sigma_{y,0,2}$ . Standardverket ASTM A370 (2012) tilføyer at materialer uten klar/distinkt E-modul, bør benytte en passende konstant E-modul når  $\sigma_{y,0,2}$  beregnes. Det anbefales også at produsenten kontaktes for å finne en passende E-modul.

Dupleksmaterialet UNS S31803 har et spennings-tøyingsforhold med grad av ikke-linearitet i det elastiske området. Testresultatene viste variasjoner i E-modul, og med dette kan det tenkes at benyttelse av konstant E-modul ville vært mer hensiktsmessig. Valg av konstant E-modul



kunne i så fall blitt bestemt i samråd med produsenten av stangmaterialet. Alternativt kunne man benyttet en gjennomsnittlig E-modul til aktuell stangdimensjon i beregningen av  $\sigma_{y,0,2}$ .

Et eksempel som viser forskjellen mellom bruk av konstant E-modul og prøvestykkets tilhørende E-modul, er gitt i *Figur 7-5*. Figuren viser i dette tilfellet at  $\sigma_{y,0,2}$  øker med 8 MPa når en konstant E-modul (200 GPa) benyttes, sammenlignet med bruk av tilhørende E-modul (192 MPa). Andre tilfeller med større differanse i E-modul, vil kunne gi større differanse i resulterende  $\sigma_{y,0,2}$ . Stort sett gir endringen i E-modul lite utslag for resulterende  $\sigma_{y,0,2}$ , og det vurderes derfor som liten forskjell mellom metodene.



*Figur 7-5:  $\sigma_{y,0,2}$  som følge av E-modul i beregningen. Prøvestykke XA2.*

## 7.6 Teknologiuutfordringer

Det er gjennom strekkprøver vist at begge stangdimensjonene Ø220 mm og Ø250 har tilfredsstillende mekaniske egenskaper ved romtemperatur. Dersom man ser på flensens «resistans mot kombinasjoner av statiske laster» alene, tyder kvalifikasjonsbevisene som fremkommer i denne rapporten på at en flens potensielt kan maskineres ut fra stangmaterialet. Dette er forbeholdt at kravene ved romtemperatur ikke gjelder gjennom hele temperaturområdet til temperaturklasse «U». Videre arbeid bør inkludere kvalifikasjonsbevis for flensens resistans mot kombinasjoner av dynamiske laster og tidsavhengige degraderingsmekanismer.

Fra litteraturstudiet (se s. 52) kommer det frem en at en flens som er «smidd til form» er mindre utsatt for degraderingsmekanismen HISC, og at man derfor ikke bør benytte «maskinert flens fra stangmateriale». HISC er et kjent problem for DSS-materialer i kombinasjon med katodisk beskyttelse av strukturer under vann, og er med dette et viktig område. Da problemstillingen begrenser seg til kartlegging av nøkkelutfordringer og usikkerheter, er det ikke gjort nærmere undersøkelser for dette området. En videre kvalifikasjon av «maskinert flens fra stangmateriale» bør derfor se nærmere på denne problematikken gjennom bevisførsel og dokumentering.

Stangmaterialet UNS S31803 er i utgangspunktet godt egnet med tanke på korrosjonsbestandighet. Det er spesifisert i materialets datablad (se *Vedlegg D*) at stangmaterialet godkjent for PSL 3, noe som betyr at korrosjonsegenskapene er tilstrekkelig for spesifikasjonsnivået betraktet i kvalifikasjonen. Det er tenkelig at korrosjonsegenskapene er tilstrekkelig også etter at en flens er maskinert ut fra stangmaterialet. Om videre tilvirkning av stangmaterialet i signifikant grad endrer korrosjonsegenskapene, er utenfor problemstillingens omfang, men som en del av den videre kvalifikasjonen er dette et område som bør undersøkes nærmere.

En standardisert API-flens vil naturligvis være tilpasset spesifisert miljø med tanke på resistans mot utmatting. Beveger man seg bort fra det standardiserte designet ved å maskinere en flens ut fra smidd stang, vil det være begrenset bevisførsel for resistans mot utmatting. Generelt fra teorien kommer det frem at utmattingsegenskapene er bedre for produkter som er smidd til form, sammenlignet med produkter maskinert fra stang (se *Kapittel 2.4.2 s.21*). En videre kvalifikasjon av «maskinert flens fra stangmateriale» bør derfor se nærmere flensens resistans mot utmatting.

Teorien oppgir generelt at man ved å «smi til form» oppnår fordelaktige materialeegenskaper med økt styrke i de områdene det er mest nødvendig (se *Kapittel 2.4.2, s.21*). Et slikt produkt vil inneha en bedre systemintegritet, sammenlignet med produkt som maskineres fra stangmateriale. Det er den totale systemintegriteten som må vurderes etter at flensens nøkkelutfordringer og usikkerheter er tilstrekkelig dokumentert. Olje- og gassindustrien har naturligvis et mål om høyest mulig sikkerhet, men samtidig bør det tydeliggjøres hvilket akseptnivå som kan tillates. Videre kvalifikasjon bør dokumentere i hvor stor grad endringen av tilvirkningsmetoden vil ha på den totale systemintegriteten til en boltet flenseforbindelse.



# Kapittel 8

## Konklusjon

Eksperimentelle forsøk i form av strekkprøving er utført med formål om innhente deler av nødvendige bevis for å kvalifisere en API-flens (6BX-sveiseflens med hals) maskinert fra smidd stang. Testresultatene viste at stangmaterialet UNS S31803 har tilfredsstillende materialeegenskaper i langsgående og tverrgående retning ved romtemperatur, vurdert opp mot krav til et 60K-materiale i standardverket API Spec 6A (2010).

Spesifikasjonsnivå PSL 3 gir temperaturklasse «U» som minimumskrav (-18 °C til 121 °C). Forsøkene viser at kravene ved romtemperatur ikke er tilfredsstillende over hele temperaturområdet som følge av temperatureffekter. To strekkprøver utført ved 121 °C gav en gjennomsnittlig 0,2 % offset flytegrense lik 393 MPa, noe som er lavere enn kravet på 414 MPa. Kravet til strekkfasthet, bruddforlengelse og kontraksjon var tilfredsstillende for hele temperaturområdet.

Sammenlignet med produsentens egne krav til stangdimensjon Ø220 mm, viste forsøkene at kravet til 0,2 % offset flytegrense i langsgående retning ikke ble oppfylt, noe som stiller spørsmål til kvalitetskontrollen av stangen.

E-modul og Poissons tall er kartlagt til bruk i strukturanalyser. Gjennomsnittlig E-modul for stangdimensjonene Ø220 mm og Ø250 mm, ble henholdsvis 190 GPa og 192 GPa. E-modul som følge av temperaturpåvirkning viste reduksjon ved hevede temperaturer (8 % ved 200 °C), og økning ved senkede temperaturer. Gjennomsnittlig Poissons tall ble beregnet til 0,31 for begge stangdimensjonene.

Testresultatene viste at den minste stangdimensjonen (Ø220 mm) innehar størst variasjoner i 0,2 % offset flytegrense, etter radiell avstand fra senter i stangen, noe som fra teorien var forventet å være motsatt. Begge stangdimensjonene har størst 0,2 % offset flytegrense nær overflaten, og lavere i områder som vil tilsvare flensens kritiske områder (ringspor og hals). Begge stengene viste grad av anisotropi, hvor dette var størst for bruddforlengelse og 0,2 % offset flytegrense.

Forslag til videre arbeid fremkommer i drøftingskapittelet 7.6 s.114.



# Referanser

- API 1PER15K-1. (2013). Protocol for Verification and Validation of High-pressure High-temperature Equipment: American Petroleum Institute.
- API 17TR8. (2013). High-Pressure High-Temperature (HPHT) Design Guidelines, rev. 0.: American Petroleum Institute.,
- API Spec 6A. (2010). Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment. American Petroleum Institute.
- API Spec 17D. (2011). Design and Operation of Subsea Production Systems—Subsea Wellhead and Tree Equipment. American Petroleum Institute.
- API-TP-6AF2. (2013). Technical Report on Capabilities of API Integral Flanges Under Combination of Loading—Phase II: American Petroleum Institute.
- Arrayago, I., Real, E., & Mirambell, E. (2013). *Constitutive equations for stainless steels: Experimental tests and new proposal*.
- ASTM A182/A182M. (2013). Standard Specification for Forged or Rolled Alloy and Stainless Steel Pipe Flanges, Forged Fittings, and Valves and Parts for High-Temperature Service: ASTM International.
- ASTM A370. (2012). Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products: ASTM International.
- ASTM A788/A788M. (2013). Standard Specification for Steel Forgings, General Requirements ASTM International.
- ASTM E21. (2009). Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials: ASTM International.
- ASTM E111. (2010). Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus: ASTM International.
- ASTM E132. (2010). Standard Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature: ASTM International.
- Bai, Y., & Bai, Q. (2010). Chapter 21 - Subsea Connections and Jumpers. In B. Yong & B. Qiang (Eds.), *Subsea Engineering Handbook* ( s. 663-701). Boston: Gulf Professional Publishing.
- Bickford, J. H. (2008). *Introduction to the design and behavior of bolted joints*. Boca Raton: CRC Press.
- Bouzid, A. H., & Nechache, A. (2005). An analytical solution for evaluating gasket stress change in bolted flange connections subjected to high temperature loading. *Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME*, 127(4), 414-422.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2007). *Materials science and engineering: an introduction*. New York: Wiley.
- Cassagne, T., & Busschaert, F. (2005). *A Review On Hydrogen Embrittlement Of Duplex Stainless Steels*.
- Corneliussen, R. G. (2000). *Tilvirkningsteknikk*. Bergen: Fagbokforl.
- Davis, J. R. (1994). *Stainless steels*. Materials Park, OH: ASM International.
- Davis, J. R. (2004). *Tensile testing*. Materials Park, Ohio: ASM International.
- DNV-RP-A203. (2011). Qualification of New Technology. Hentet 12.02, 2014, fra <http://exchange.dnv.com/publishing/codes/download.asp?url=2011-07/rp-a203.pdf>
- DNV-RP-D101. (2008). Structural Analysis of Piping Systems. Hentet 24.02, 2014, fra <https://exchange.dnv.com/publishing/codes/download.asp?url=2008-10/rp-d101.pdf>
- DNV-RP-F116. (2009). Integrity Management Of Submarine Pipeline Systems. Hentet 17.10, 2013, fra <https://exchange.dnv.com/publishing/codes/download.asp?url=2009-10/rp-f116.pdf>
- Fisher, K. P., Heier, E., Sæther, T., Johnsrud, M., Askheim, D. Ø., & Heiberg, G. (2002). Joining methods - technological summaries. Hentet 07.02, 2014, fra <http://www.ptil.no/getfile.php/z%20Konvertert/Helse,%20milj%C3%B8%20og%20sikkerhet/Hms-Aktuelt/Dokumenter/dnvrapport2.pdf>
- Flexitallic. (2012). GASKET DESIGN CRITERIA. Hentet 02.03, 2014, fra [http://www.induseal.com/wp-content/kataloge/Gasket\\_Design\\_Brochure.pdf](http://www.induseal.com/wp-content/kataloge/Gasket_Design_Brochure.pdf)

- FMC Technologies. (2012). New Items for ISO 13628-4 – API 17D and how it works with ISO 10423 - API 6A. Hentet 25.01, 2014, fra <http://mycommittees.api.org/standards/ecs/sc17/17g/Shared%20Documents/ISO%2013628-4%20-%20API%2017D/New%20Version%20of%2017D%20changes%20and%20how%20it%20works%20with%206A.ppt>
- Gjengedal, R., Fyllingen, Ø., & Sture, H. (2013) Integrity evaluation of steel flanges joined with metallic gaskets. *Vol. 554-557* ( s. 2187-2199).
- Gunn, R. N. (1997). *Duplex stainless steels: microstructure, properties and applications*. Cambridge: Abington.
- Instron. (2012). 8801 Servohydraulic Fatigue Testing System: Illinois Tool Works Inc.
- Instron. (2014a). 3119-400 Series Environmental Chambers: Illinois Tool Works Inc.
- Instron. (2014b). Transverse Clip-on Extensometers. Hentet 05.05.2014 fra [http://www.instron.se/wa/acc\\_catalog/prod\\_list.aspx?cid=905&cname=Transverse%20Clip-on%20Extensometers](http://www.instron.se/wa/acc_catalog/prod_list.aspx?cid=905&cname=Transverse%20Clip-on%20Extensometers)
- International Molybdenum Assosiation (IMOA). (2009). Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steel. Hentet 05.03, 2014, fra [http://www.imoa.info/files/stainless\\_steel/Duplex\\_Stainless\\_Steel\\_2d\\_Edition.pdf](http://www.imoa.info/files/stainless_steel/Duplex_Stainless_Steel_2d_Edition.pdf)
- ISO 15156-1. (2009). Petroleum and natural gas industries - Material for use in H<sub>2</sub>S-containing enviroments in oil and gas production - Part 1: General principles for selection of cracking-resistant materials. International Organization for Standardization (ISO).
- ISO 15156-3. (2009). Petroleum and natural gas industries - Material for use in H<sub>2</sub>S-containing enviroments in oil and gas production - Part 3: Cracking-resistant CRAs (corrosion-resistant alloys) and other alloys. International Organization for Standardization (ISO).
- ISO 15579. (2000). Metallic materials -Tensile testing at low temperature: International Organization for Standardization (ISO).
- L. Nayyar, M. (2000). *Piping Handbook, Seventh Edition*. McGraw-Hill Professional.
- Lasebikan, B. A., Akisanya1, A. R., & Deans, W. F. (2013). *The Mechanical Behavior of a 25Cr Super Duplex Stainless Steel at Elevated Temperature*. School of Engineering, University of Aberdeen.
- Lillebø, B. (2006). Bolting materials subsea. *CONFERENCE - Materials in Offshore Constructions*. Hentet 03.05, 2014, fra [http://www.offshorecenter.dk/log/filer/1\\_7%20DNV.pdf](http://www.offshorecenter.dk/log/filer/1_7%20DNV.pdf)
- MultAlloy. (2012). METHODS OF WELDING FLANGES TO PIPE. Hentet 03.04, 2014, fra [http://www.multalloy.com/pdfs/MA\\_Methods\\_of\\_Welding\\_Flanges\\_to\\_Pipe.pdf](http://www.multalloy.com/pdfs/MA_Methods_of_Welding_Flanges_to_Pipe.pdf)
- Nechache, A., & Bouzid, A. H. (2007). Creep analysis of bolted flange joints. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 84(3), 185-194.
- Nisbett, E. G. (2005). *Steel forgings: design, production, selection, testing, and application*: ASTM International.
- Norsk Stålforbund. (2000). Metallurgisk ordbok. Hentet 28.02, 2014, fra [http://www.stalguiden.com/member/Metallurgisk\\_ordbok.htm](http://www.stalguiden.com/member/Metallurgisk_ordbok.htm)
- Outokumpu. (2013). Duplex Stainless Steel. Hentet 13.05, 2014 fra <http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Outokumpu-Duplex-Stainless-Steel-Data-Sheet.pdf>
- Parisher, R. A., & Rhea, R. A. (2012). Chapter 4 - Flange Basics *Pipe Drafting and Design (Third Edition)* ( s. 56-78). Boston: Gulf Professional Publishing.
- Sandbrook, T., Emery, M., & Ludman, J. (2011). Improve flange joint reliability. *Chemical Engineering Progress*, 107(1), 31-37.
- Schoen, M. (1999). The Joule–Thomson effect in confined fluids. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 270(3–4), 353-379. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4371\(99\)00189-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4371(99)00189-2)
- Schweitzer, P. A. (2003). *Metallic materials: physical, mechanical, and corrosion properties*. New York: Marcel Dekker.
- Singh, R. (2012). Chapter 8 - Stainless Steels. In R. Singh (Ed.), *Applied Welding Engineering* ( s. 65-73). Boston: Butterworth-Heinemann.
- Stewart, M., & Lewis, O. T. (2013). *Pressure Vessels Field Manual*. Gulf Professional Publishing



- U.S International Trade Commission. (1994). Stainless Steel Flanges from India and Taiwan. Hentet 05.03, 2014, fra [http://books.google.no/books?id=tWZAAAIAAJ&printsec=frontcover&hl=no&source=gb\\_s\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q=flanges&f=false](http://books.google.no/books?id=tWZAAAIAAJ&printsec=frontcover&hl=no&source=gb_s_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q=flanges&f=false)
- WOODCO USA. (2013). About Weld Neck Flanges. Hentet 03.02, 2014, fra [http://www.woodcousa.com/about\\_wnf.htm](http://www.woodcousa.com/about_wnf.htm)
- WOODCO USA. (2014). Oilfield Glossary: Terms and Definitions. Hentet 03.02, 2014, fra <http://www.woodcousa.com/flgterms.htm>
- Yamaguchi, A., Tsuji, H., & Honda, T. (2010). *Prediction of relaxation property for long term in bolted flange joints based on viscoelasticity model of gasket.*



# Vedlegg

Vedlegg A: Litteratursøk .....	124
Vedlegg B: Flyttdiagram for valg av PSL-grad.....	129
Vedlegg C: Dimensjoner 2 1/16 "6BX Sveiseflens med hals .....	130
Vedlegg D: Datablad UNS 31803 Ø220/Ø250 .....	131
Vedlegg E: Aksepterte spenningsintensiteter for design av API-flenser .....	140
Vedlegg F: Temperaturdistribusjon: 2 1/16" 6BX-flens .....	141
Vedlegg G: Tabeller fra API Spec 6A/17D.....	142
Vedlegg H: Arbeidstegning prøvestykke .....	145
Vedlegg I: Fremstilling av prøvestykker .....	146
Vedlegg J: Beregning av strekkhastighet i henhold til ASTM A370 (2012) .....	149
Vedlegg K: Utførelse av strekkprøver.....	150
Vedlegg L: Fysiske målinger av prøvestykker .....	154
Vedlegg M: Oppsummering resultater .....	156
Vedlegg N: Datablader for prøvestykker.....	159

## Vedlegg A: Litteratursøk

Tabell A-1: Sentrale litteratursøk

Dato	Søkeord	Database	Begrensninger	Kriterier	Antall	Funn		
						Tittel	Forfatter	Årstell
31.01	«Duplex stainless steel»	BIBSYS NTNU	-	Generell teori om dupleks rustfritt stål	1/20	Metallic materials: physical, mechanical, and corrosion properties.	Schweitzer, P. A.	2003
03.02	“Metallic ring type joints flanges”	Google	-	Litteratur RTJ-flenser	-	Metallic ring type joints (rtj) – overview and recent developments	Currie, R.	2012
03.02	<i>Tittel, sammendrag og nøkkelord: “flange”</i>	Science Direct	2006-2014 Bok	Bok med generell litteratur om flenser.	1/57	Chapter 4 - Flange Basics <i>Pipe Drafting and Design (Third Edition)</i> (s. 56-78).	Parisher, R. A., & Rhea, R. A.	2012
03.02	«Api 17D weld neck flange»	Goolge	-	Generelt søk etter nettsider med fokus på API 17D og weld neck-flenser.	2/-	1. <a href="http://www.woodco.usa.com/about_17d.htm">http://www.woodco.usa.com/about_17d.htm</a> 2. <a href="http://www.woodco.usa.com/about_wnf.htm">http://www.woodco.usa.com/about_wnf.htm</a>	WOODCO USA WOODCO USA	2013 2013
05.02	“Forging of duplex stainless steel”	Google Scholar	-	Litteratur om smiing av dupleks rustfritt stål	-	Stainless Steels	Davis, J. R.	1994
07.02	<i>Tittel og sammendrag</i> «Subsea» OG «Flange»	Science Direct (Avansert søk)	2008-2014	Generelt om flenser under vann.	1/3	Subsea Engineering Handbook Ch 21 – Subsea Connections and Jumpers	Bai, Bai	2010

07.02	<i>Alle felt:</i> «Qualification process subsea»	Science Direct	2004-2014	Litteratur om kvalifisering av utstyr i olje-/gassindustrien	1/98	Subsea Engineering Handbook Ch 10.5 – Subsea Risk and Reliability	Bai, Bai	2010
07.02	«Challenges bolted joints»	Google	-	Litteratur om utfordringer knyttet til bolteforbindelser	-	Joining methods - technological summaries: Petroleum safety authority norway (PSA).	Fisher, K. P et al.	2002
15.02	«API flanges»	IHS Standards Expert (API søkemotor) <sup>1</sup>	-	Tekniske rapporter om API-flenser	1/19	Technical Report on Capabilities of API Integral Flanges Under Combination of Loading—Phase II: American Petroleum Institute.	API	2013
17.02	“High pressure equipment”	IHS Standards Expert (API søkemotor) <sup>2</sup>	-	Tekniske rapporter utarbeidet av API med fokus på høytrykk og høytemperatur utstyr.	1/60	API 1PER15K-1 Protocol for Verification and Validation of High-pressure High-temperature Equipment: American Petroleum Institute.	API	2013
17.02	<i>Kapittel:</i> “Stainless steel”	Science Direct	2006-2014 Bok	Litteratur om rustfritt stål	1/59	Chapter 8 - Stainless Steels. In R. Singh (Ed.), <i>Applied Welding Engineering</i>	Singh, R.	2012

<sup>1</sup> <http://specs4.ihserc.com/?PROD=SPECS4&sess=790986218> (Krever innlogging)

<sup>2</sup> <http://specs4.ihserc.com/?PROD=SPECS4&sess=790986218> (Krever innlogging)

17.02	<i>Utvalgte felt:</i> “Duplex stainless steels”	BIBSYS HIB	-	Bøker som omhandler dupleks rustfritt stål	1/2	Duplex stainless steels: microstructure, properties and applications	Gunn, R. N.	1997
24.02	«Duplex stainless steel»	DNV <sup>3</sup>	-	Anbefalt praksis for dupleks rustfritt stål benyttet i undervannsmiljø	-	DNV-RP-F112 Design of Duplex Stainless Steel Subsea Equipment Exposed to Cathodic Protection	DNV	2008
24.02	«Structural analysis»	DNV	-	Anbefalt praksis for rørssystemer i undervannsmiljø	-	DNV-RP-D101 Structural analysis of piping systems	DNV	2008
24.02	«Integrity»	DNV	-	Anbefalt praksis med relevans om integritet av rørssystemer under vann.	-	DNV-RP-F116 Integrity Management Of Submarine Pipeline Systems.	DNV	2009
25.02	<i>Tittel, sammendrag og nøkkelord:</i> «Thermal expansion» OG «bolted flanges»	Scopus	-	Artikler med fokus på effekten av termisk ekspansjon i boltede flensforbindelser	2/36	(1) Effects of temperature change on bolt load and gasket load of bolted flange connection with ring type joint gasket  (2) An Analytical Solution for Evaluating Gasket Stress Change in Bolted Flange Connections Subjected to High Temperature Loading	Nagata, S., & Sawa, T.  Bouzid, A. H., & Nechache, A.	2008  2005

<sup>3</sup> [https://exchange.dnv.com/publishing/Codes/ToC\\_edition.asp#Recommended\\_Practices](https://exchange.dnv.com/publishing/Codes/ToC_edition.asp#Recommended_Practices)

25.02	<i>Tittel, sammendrag og nøkkelord:</i> «Creep» OG «Bolted flanges»	Scopus	-	Artikler med fokus på kryp/spenningsrelaksjon i boltede flensforbindelser.	1/63	Prediction of relaxation property for long term in bolted flange joints based on viscoelasticity model of gasket.	Yamaguchi, A., Tsuji, H., & Honda, T.	2010
25.02	“Creep and stress relaxation bolted flange”	Google	-	Litteratur med fokus på kryp/ spenningsrelaksjon i boltede flensforbindelser	-	Introduction to the design of bolted flange connections	Bickford, J. H.	2008
05.03	“Effect of degree of forming duplex stainless steel”	Google	-	Artikler med litteratur om effekten smiing har på mekaniske egenskaper	-	Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels	TMR Stainless (International Molybdenum Assosiation (IMOA)	2009
10.03	“Forging reduction ratio”	ASTM SEDL - Digital Library <sup>4</sup>	Manualer	Litteratur om smidde produkter av ASTM.	1/46	Steel forgings: design, production, selection, testing, and application	Nisbett, E. G.	2005
15.03	“Production forged stainless steel flanges”	Google Books	Sortert etter relevans	Litteratur om hvordan smidde flenser produseres	-	Stainless steel flanges from India and Taiwan	U.S International Trade Commission	1994
10.04	“Tensile testing”	BIBSYS NTNU	-	Generell litteratur om strekktesting	1/60	Tensile testing	J.R. Davis	2004
29.04	“Forged to shape” AND “Flange”	Scopus	Tittel, sammen- drag og nøkkelord	Artikler med relevant tematikk	1/22	Integrity evaluation of steel flanges joined with metallic gaskets	Gjengedal, R., Fyllingen, Ø., Sture, H.	2013

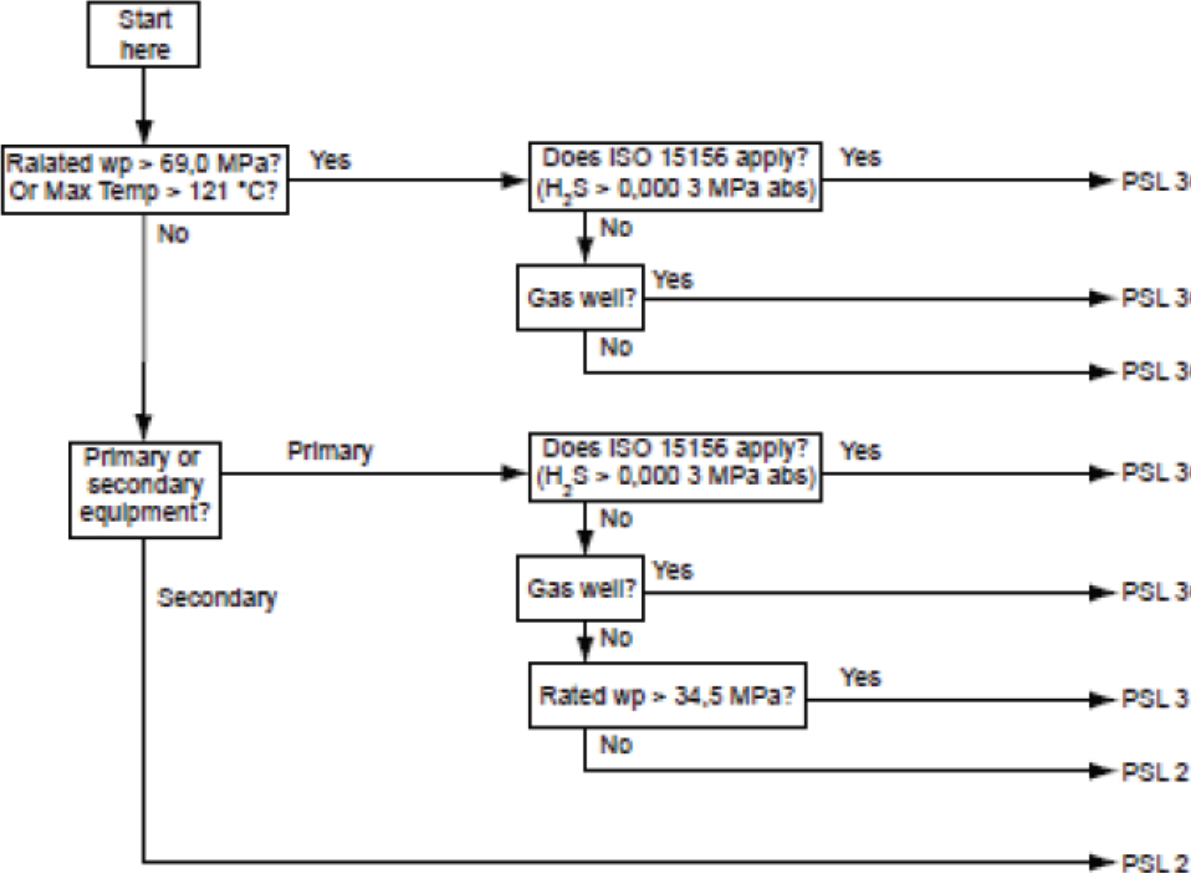
<sup>4</sup> [http://enterprise.astm.org/SUBSCRIPTION/filtrexx40.cgi?-P+LANDING+true+complete\\_library.frm](http://enterprise.astm.org/SUBSCRIPTION/filtrexx40.cgi?-P+LANDING+true+complete_library.frm) (Dokumenter krever innlogging)

29.04	"Forged to shape"	OnePetro	Fulltekst	Artikler med relevant tematikk	1/1	A Review On Hydrogen Embrittlement Of Duplex Stainless Steel	Theirry Cassange	2005
03.05	"2205" AND "tensile testing" AND "stress strain curves"	Onepetro	-	Sammenlignbar data for UNS S31803.	0/12	-	-	-
01.06	"2205" AND "tensile testing"	Scopus	Tittel, sammendrag og nøkkelord	Sammenlignbar data for UNS S31803.	0/38	-	-	-
01.06	<i>Tittel, sammendrag og nøkkelord:</i> "UNS S31803" AND "tensile testing"	Scopus	Tittel, sammendrag og nøkkelord	Sammenlignbar data for UNS S31803.	0/6	-	-	-



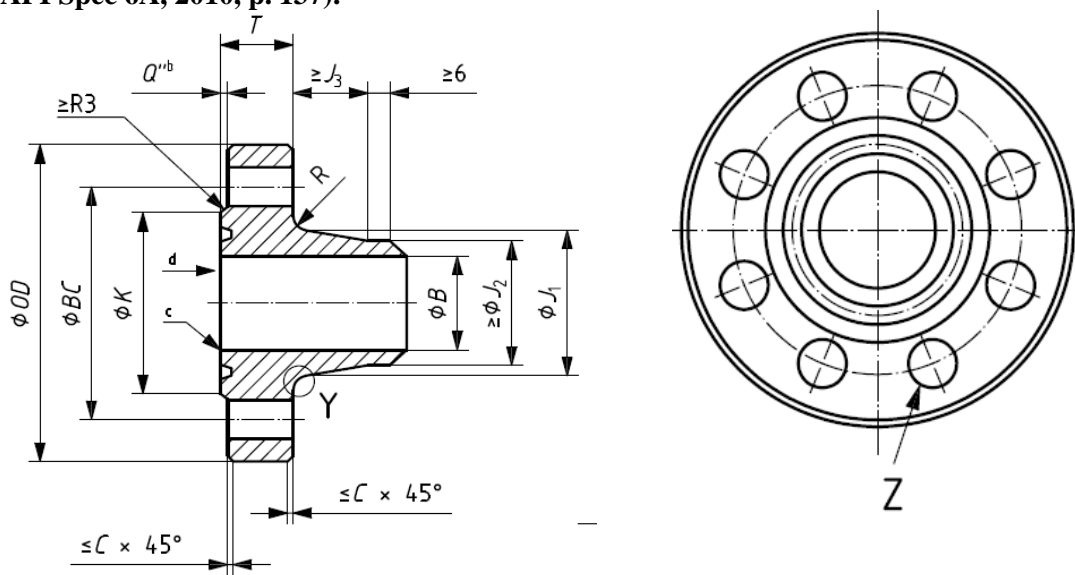
**Vedlegg B: Flytdiagram for valg av PSL-grad**

**Figur B-1: Flytdiagram for valg av PSL-grad (API Spec 17D, 2011, p. 228)**



## Vedlegg C: Dimensjoner 2 1/16 "6BX Sveiseflens med hals

Figur C-1: Design og dimensjonshenviisning for 6BX-sveiseflens med hals, trykkklasse 69 MPa (API Spec 6A, 2010, p. 137).



Tabell C-2: (API Spec 6A, 2010, pp. 138-139, Tabell 55)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Nominal size and bore of flange		Basic flange dimensions							
		Maximum bore	Outside diameter of flange		Maximum chamfer	Diameter of raised face	Total thickness of flange	Large diameter of hub	Small diameter of hub
mm	(in)	<i>B</i>	<i>OD</i>	tol.	<i>C</i>	<i>K</i> ± 1,6	<i>T</i> +3 0	<i>J</i> <sub>1</sub> 0 -3	<i>J</i> <sub>2</sub>
69,0 MPa									
52	2 1/16	53,2	200	± 2	3	111	44,1	100,0	74,6

(1)	(2)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)
Nominal size and bore of flange		Bolting dimensions								
		Length of hub	Radius of hub	Diameter of bolt circle	Number of bolts	Diameter of bolts	Bolt holes		Minimum length of stud bolts	Ring number
mm	(in)	<i>J</i> <sub>3</sub>	<i>R</i>	<i>BC</i>		(in)	diameter	tol. <sup>e</sup>	<i>L</i> <sub>ssb</sub>	BX
69,0 MPa										
52	2 1/16	51,6	10	158,8	8	3/4	23	+ 2	135	152

# Vedlegg D: Datablad UNS 31803 Ø220/Ø250



BGH Edelstahl Siegen GmbH

BGH Edelstahl Siegen GmbH, Industriestr. 9, 57076 Siegen

**Sverdrup Hanssen Specialstaal A/S**  
**Strandsvingen 2**  
**4032 Stavanger**  
**NORGE**

Zeugnis-Nr. **218623**  
 Certificate no.  
 No. de certificat

Bescheinigung über Werkstoffprüfung nach DIN EN 10204  
 Certificate of material tests according to DIN EN 10204 **3.1**  
 Certificat des essais des matériaux selon DIN EN 10204

Die Lieferung entspricht den vereinbarten Lieferbedingungen.  
 Delivery in accordance with the agreed terms of delivery.  
 La livraison correspond aux conditions de livraison convenues.

Zeichen des Lieferwerkes / Trade mark / Signe du fournisseur  
 Stempel des Werksachverständigen / Inspector's stamp / Poinçon de l'inspecteur

Kunden-Bestell-Nr. **430547**  
 Customer order no.  
 Cde. no. du client

BGH-Auftrags-Nr. **852667-006-01**  
 BGH works no.  
 BGH référence



Erzeugnisform Product		Stab, rund, geschmiedet, geschält Round bars, forged, peeled										
Werkstoff / Quality		1.4462 UNS S31803										
Anforderungen Requirements		43.200.024 Rev. A - 10/02 UNS S31803 NACE MR0175/ISO15156 UNS S31803 MDS - D 47 Rev.3 UNS S31803 ASTM A479/A479M 2006a UNS S31803 ASTM A 276 - 2006 UNS S31803 - F51 ASTM A182/182M - 07a UNS S31803/S32205 UNS S31803/S32205 ASTM A182/182M 05 a										
Besichtigung und Maßnachprüfung Inspection and dimensional control Inspection et contrôle de dimension ohne Beanstandung without objection				Erschmelzung/Nachbehandlung Melting process/secondary refining Mode d'élaboration/traitement ultérieur E AOD VD				Verwechslungsprüfung (spectroanalytisch) Identification test (spectral-analysis) examination d'identification (analyse spectrale) ohne Beanstandung without objection				
Pos. Item	Anzahl Quantity	Abmessung Dimension						Gewicht Weight	kg	Schmelz-Nr. Heat-No.		
6	2	220 mm dia. x 4292 + 4527 mm						2644		770713		
Schmelze Heat %	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N2			
770713	0,028	0,40	1,56	0,021	0,001	22,00	3,17	5,65	0,1800			
Wärmebehandlungszustand Condition of heat treatment Traitement thermique		lösungsgeglüht solution annealed 1050°C 3h water										
Probe-Nr.	Lage	Temp.	Rp0,2		Rm	A4	Z	Kerbschlagarbeit Impact value		Probenform Shape of test piece	Härte Hardness	
Test-No.	Loc.	°C	N/mm <sup>2</sup>		N/mm <sup>2</sup>	%	%	J		Charpy-V	HB	HRC
Soll/Req.	L	RT	>=485		>=655	>=25	>=45	>=45		-46°C	<=264 <=28	
Soll/Req.	Q	RT	>=450		>=620	>=20	>=45	>=27		-46°C		
140G1	L	RT	489		711	46	78	48	47	48	-46°C	216 < 22
140G1	Q	RT	542		724	42	72	28	27	28	-46°C	
Testing procedure acc. to ASTM A 370												
Corrosions test acc. ASTM G 48, method A - 24h at 30°C No pitting at 20x magnification / Weight loss: 0.025 g/m <sup>2</sup>												
No welding or weld repair												
Ferrite content acc. ASTM E 562: 47 %												
Microstructure: free from intermetallic phases and precipitates												
Anlagen Gefügeaufnahme / Micrograph Encl. US-Zeugnis / UT cert.					Siegen, den Place and date Lieu et date 07.05.2008				Abnahmebeauftragter Inspector representative Inspecteur de réception <b>M. Mertens</b>			
Das Zeugnis wurde maschinell erstellt und ist auch ohne Unterschrift gültig. Ce certificat a été établi sur système informatique et est valable sans signature aussi.												





**BGH**

BGH Edelstahl Siegen GmbH

**Gefügeaufnahme**  
Micrograph  
Microstructure

BGH-Auftragsnr.: 85266700601  
BGH works no.:  
BGH référence:

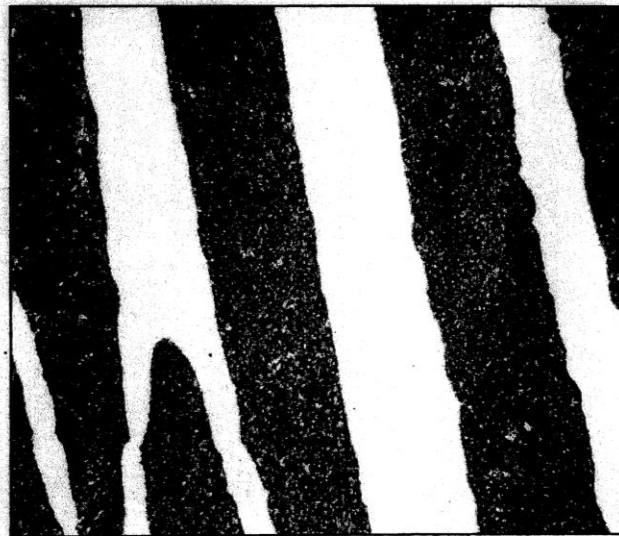
Charge: 770713  
Heat:  
Coulée:

Werkstoff: 4462  
Quality:  
Matériel:

Probe-Nr.: 140 G  
Test-No.:  
Échant.:

Ätzmittel: V2A-Beize  
Etchant:  
Agent caustique:

Vergrößerung: 500fach  
Magnification:  
Agrandissement:



Kunden-Bestell-Nr. **430547**  
Customer order no.  
Cde. no. du client

BGH-Auftrags-Nr. **852667-006-01**  
BGH works no.  
BGH référence

Zeugnis-Nr. **218623**  
Certificate no.  
No. de certificat

Erzeugnisform : Stab, rund, geschmiedet, geschält  
Product : Round bars, forged, peeled  
Werkstoff/Quality : 1.4462 UNS S31803  
Abmessung/Dimension : 220 mm dia. x 4292 + 4527 mm  
Anzahl/Quantity : 2 Gewicht /Weight : 2644 kg  
Wärmebehandlungszustand : lösungsgeglüht  
Condition of heat treat : solution annealed

**Prüfrichtlinie**

Specification

API 6A, 19.Ed. 07/04 point 7.4.2.3.15 (b)  
PSL 3

Prüfgerät : Krautkrämer USM 25  
Testing device

Prüfkopf : B2S  
Search unit

Kopplungsmittel : Wasser / Kleister  
Couplant water / glue

Prüfumfang : vollständig  
Amount of inspection completely

Prüfrichtung : radial  
Scanning direction radial

Registriergrenze : 50 % Bezugslinie von 6,0 mm FBB  
Recording threshold 50 % reference line of 6.0 mm FBH

Befund : Keine registrierpflichtigen Anzeigen.  
Result No reportable indications.

Siegen, den  
Place and date  
Lieu et date  
07.05.08

Prüfer  
Testing operator  
Opérateur  
Schneider  
Level I (SNT-TC-1A)

Abnahmebeauftragter  
Inspector representative  
Inspecteur de réception  
Jung  
Level III (SNT-TC-1A)



Überwacher  
Supervisor  
Surveilleur

Das Zeugnis wurde maschinell erstellt und ist auch ohne Unterschrift gültig.

This certificate was generated by data system it must not be signed for validity as well.  
Ce certificat a été établi sur système informatique et est valable sans signature aussi.



**BGH Edelstahl Siegen GmbH**

BGH Edelstahl Siegen GmbH Industriestr. 9 57076 Siegen

**Sverdrup Steel A/S**  
**Strandsvingen 2**  
**4032 Stavanger**  
**NORGE**

**Zeugnis-Nr. 292183**  
**Certificate no.**  
**No. de certificat**

Bescheinigung über Werkstoffprüfung nach DIN EN 10204  
 Certificate of material tests according to DIN EN 10204 **3.1**  
 Certificat des essais des matériaux selon DIN EN 10204

Die Lieferung entspricht den vereinbarten Lieferbedingungen.  
 Delivery in accordance with the agreed terms of delivery.  
 La livraison correspond aux conditions de livraison convenues.

Zeichen des Lieferwerkes Stempel des Werksachverständigen  
 Trade mark Inspector's stamp  
 Signe du fournisseur Poinçon de l'inspecteur

Kunden-Bestell-Nr. **802331**  
 Customer order no.  
 Cde. no. du client

BGH-Auftrags-Nr. **863027-009-01**  
 BGH works no.  
 BGH référence



Erzeugnisform Product		Stab, rund, geschmiedet, geschält Round bars, forged, peeled										
Werkstoff / Quality		UNS S31803/S32205										
Anforderungen Requirements		UNS S31803 ,NORSOK M 650 Revision 3 04/04 UNS S31803 ,NORSOK MDS - D 47 Rev. 3 UNS S31803 ,ASTM A 276 - 10 UNS S32205 ,ASTM A 276 - 10 UNS S31803 ,NACE MR 0175 ISO15156-1 2009 UNS S31803/32205 ,ASTM A 479 /A479M - 11 UNS S31803 - F51 ,ASTM A 182 /A 182M - 11a UNS S31803 ,Doc.-No. 43.200.024 Rev.C 11/05 UNS 31803 u. Kundeverb. vom 10.07.09 ,TR 2000 Sec. 6 MDS: DB101 18.06.09 F51 UNS S31803 ,Doc.-No. 6010-0329- D Rev. C 01/10 Die MDS D44 kann von uns nicht bescheinigt werden, da wir über keine Zulassung verfügen. BGH is not approved towards MDS D44, hence it can not be confirmed. Zertifiziert nach DGRL 97/23/EG Anhang 1 Kap. 4.3; Zertifikat-Nr. 07-202-1405 WZ-1161/10, Kenn-Nr. 0045; und AD 2000-Regelwerk W0/TRD100; Zertifikat-Nr. 07-202-1405 WP-1161/10 Certificated PED 97/23/EC Annex 1 Chap. 4.3; Certificate No. 07-202-1405 WZ-1161/10, Registration No. 0045; and AD 2000 W0/TRD100; Certificate No. 07-202-1405 WP-1161/10										
Besichtigung und Maßnachprüfung Inspection and dimensional control Inspection et contrôle de dimension ohne Beanstandung without objection				Erschmelzung/Nachbehandlung Meltingprocess/secondary refining Mode d'élaboration/traitement ultérieur E AOD LF				Verwechslungsprüfung (spectroanalytisch) Identification test (spectral-analysis) examination d'identification(analyse spectrale) ohne Beanstandung without objection				
Pos. Item	Anzahl Quantity	Abmessung Dimension						Gewicht Weight	kg	Schmelz-Nr. Heat-No.		
9	2	250 mm dia. x 7604 + 7630 mm						5892		783792		
Schmelze Heat %	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N	PRE		
783792	0,014	0,30	1,51	0,022	0,0004	22,10	3,18	5,70	0,1885	35,61		
Wärmebehandlungszustand Condition of heat treatment Traitement thermique		lösungsgeglüht / solution annealed 1050°C 5h water - heat treat lot no. 6172 water temperature at start: 14°C, water temperature at end: 25°C										
Probe-Nr. Test-No.	Lage Loc.	Temp. °C	Rp0,2 N/mm <sup>2</sup>		Rm N/mm <sup>2</sup>	A4 %	Z %	Kerbschlagarbeit Impact value J		Probenform Shape of test piece Charpy-V	Härte Hardness HB HRC	
Soll/Req.	L	RT	>=485		>=655	>=25	>=45	>=45		-46°C	<=264 <=28	
Soll/Req.	Q	RT	>=450		>=620	>=20	>=45	>=27		-46°C		
187J1	L	RT	486		702	45	84	65	73	68	-46°C	217 < 22
187J1	Q	RT	499		728	42	71	33	40	29	-46°C	
Testing on prolongation of bar, in a quarter of thickness in accordance with ASTM A 370.												
Anlagen Encl. Annexe	Gefügeaufnahme / Micrograph Ofendiagramm / Furnace chart US- + FE-Zeugnis / UT + PT cert.				Siegen, den Place and date Lieu et date 13.07.2012				Abnahmebeauftragter Inspector representative Inspecteur de réception <b>M. Mertens</b>			
Das Zeugnis wurde maschinell erstellt und ist auch ohne Unterschrift gültig.						This certificate was generated by data system it must not be signed for validity as well. Ce certificat a été établi sur système informatique et est valable sans signature aussi.						



BGH Edelstahl Siegen GmbH

BGH Edelstahl Siegen GmbH, Industriestr. 9, 57076 Siegen

Sverdrup Steel A/S  
Strandsvingen 2  
4032 Stavanger  
NORGE

Zeugnis-Nr. 292183  
Certificate no.  
No. de certificat

Bescheinigung über Werkstoffprüfung nach DIN EN 10204  
Certificate of material tests according to DIN EN 10204 3.1  
Certificat des essais des matériaux selon DIN EN 10204

Die Lieferung entspricht den vereinbarten Lieferbedingungen.  
Delivery in accordance with the agreed terms of delivery.  
La livraison correspond aux conditions de livraison convenues.

Zeichen des Lieferwerkes Stempel des Werkssachverständigen  
Trade mark Inspector's stamp  
Signe du fournisseur Poinçon de l'inspecteur

Kunden-Bestell-Nr. 802331  
Customer order no.  
Cde. no. du client

BGH-Auftrags-Nr. 863027-009-01  
BGH works no.  
BGH référence



Probe-Nr.	Temp.	Lage	Laterale Breitung (mm)		
Test-No.	°C	Loc.	Lateral extension (mm)		
187J1	-46	L	0,7	0,8	0,8

Corrosions test acc. ASTM G 48, method A - 24h at 25°C  
No pitting at 20x magnification / Weight loss: 0.025 g/m<sup>2</sup>

Reduction ratio: 5.3 : 1

Ferrite content acc. ASTM E 562: 46 %

The examined samples were extensively free from intermetallic phases and precipitates.

No welding or weld repair

Radioactivity inspection without objection, the measured value is below the detection limit of 0.1 Bq/g.

Anlagen Encl. Annexe	Gefügeaufnahme / Micrograph Ofendiagramm / Furnace chart US- + FE-Zeugnis / UT + PT cert.	Siegen, den Place and date Lieu et date 13.07.2012	Abnahmebeauftragter Inspector representative Inspecteur de réception <b>M. Mertens</b>
----------------------------	---	---	---

Das Zeugnis wurde maschinell erstellt und ist auch ohne Unterschrift gültig.

This certificate was generated by data system it must not be signed for validity as well.  
Ce certificat a été établi sur système informatique et est valable sans signature aussi.



**Gefügeaufnahme**  
Micrograph  
Microstructure

BGH-Auftragsnr.: 86302700901  
BGH works no.:  
BGH référence:

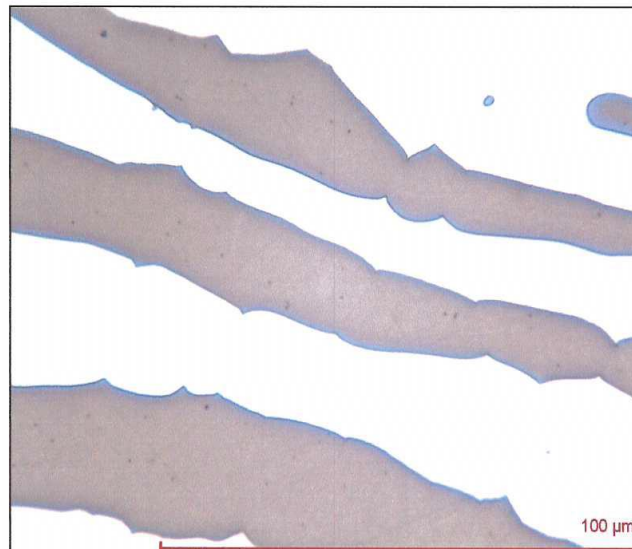
Charge: 783792  
Heat:  
Coulée:

Werkstoff: 4462  
Quality:  
Matériel

Probe-Nr.: 187 J  
Test-No.:  
Échant.:

Ätzmittel: NaOH 10 %/ elektrolytisch  
Etchant:  
Agent caustique:

Vergrößerung: 500 fach  
Magnification:  
Agrandissement:

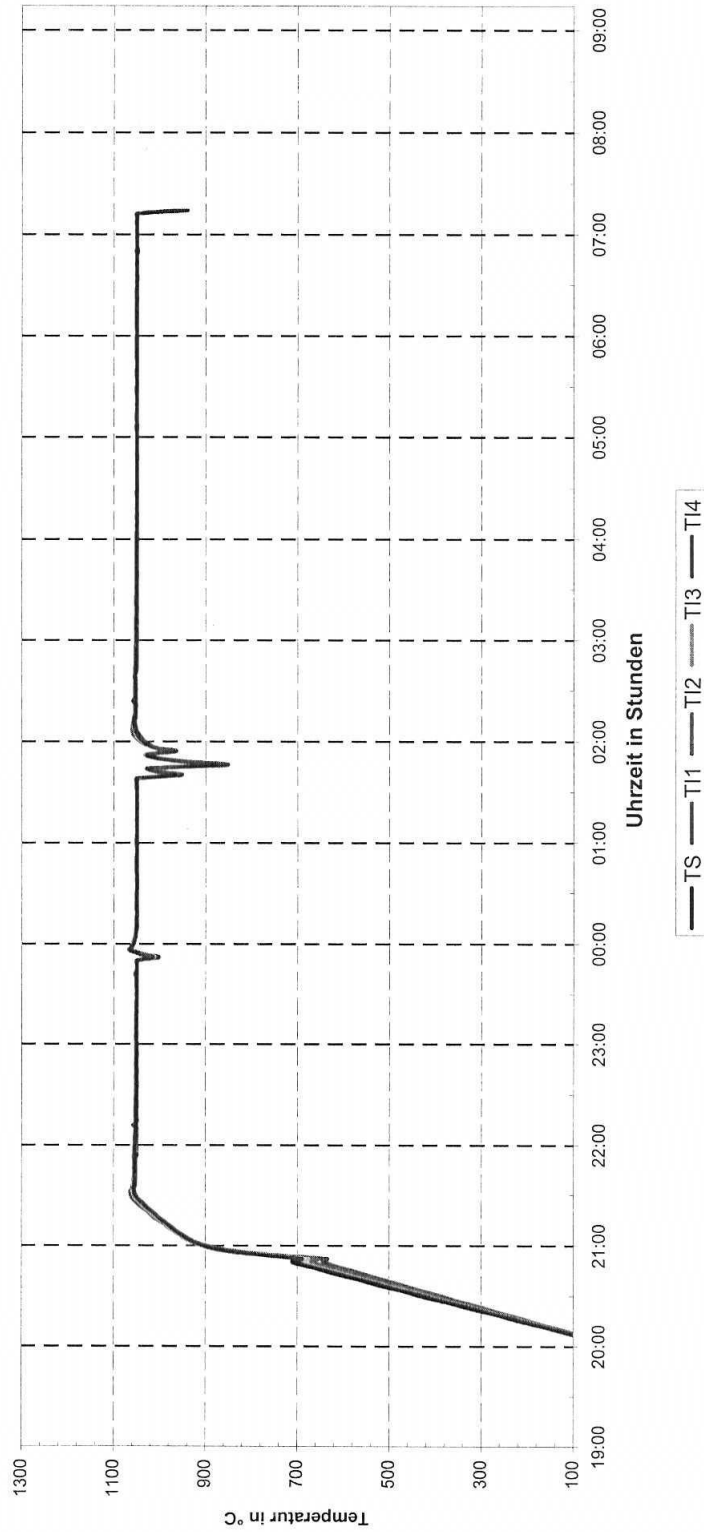




### Diagramm Ofen 425

BGH Edelstahl  
Siegen GmbH

BGH-Auftragsnr.: 863027-009-01  
Start: 07.05.2012 20:50 Uhr  
Ende: 08.05.2012 07:14 Uhr  
Gesamtzeit: 0 Tage 10:24 Stunden  
Los-Nr.: 425/6172/1



Kunden-Bestell-Nr. **802331**  
Customer order no.  
Cde. no. du client

BGH-Auftrags-Nr. **863027-009-01**  
BGH works no.  
BGH référence

Zeugnis-Nr. **292183**  
Certificate no.  
No. de certificat

Erzeugnisform : Stab, rund, geschmiedet, geschält  
Product : Round bars, forged, peeled  
Werkstoff/Quality : UNS S31803/S32205  
Abmessung/Dimension : 250 mm dia. x 7604 + 7630 mm  
Anzahl/Quantity : 2 Gewicht /Weight : 5892 kg  
Wärmebehandlungszustand : lösungsgeglüht  
Condition of heat treat : solution annealed

**Prüfrichtlinie**

Specification

ASTM A 388 / ASME SA-388  
Zulässigkeitskriterien nach ASME VIII, Div.2, Punkt 3.3.4 Ausgabe 2008a  
Anforderungen nach API 6A, 20.Ausgabe Okt.2010/ISO 10423 Ausg.2009,  
PSL 3, Punkt 7.4.2.3.15(b).  
Acceptance criteria to ASME VIII, Div.2, point 3.3.4 Edition 2008a  
Requirements per API 6A, 20.Edition Oct.2010/ISO 10423 Ed.2009, PSL 3,  
PSL 3, Point 7.4.2.3.15 (b).

Prüfgerät : Krautkrämer USM 35  
Testing device  
Prüfkopf : S 10 W 2 C  
Search unit  
Kopplungsmittel : Wasser / Kleister  
Couplant water / glue  
Prüfumfang : vollständig  
Amount of inspection completely  
Prüfrichtung : radial, axial  
Scanning direction radial, axial  
Registriergrenze : 50 % Bezugslinie von 6,0 mm FBB  
Recording threshold 50 % reference line of 6.0 mm FBH  
Befund : Keine registrierpflichtigen Anzeigen.  
Result No reportable indications.

Siegen, den  
Place and date  
Lieu et date  
13.07.12

Prüfer  
Testing operator  
Opérateur  
Jantschenko  
Level II (SNT-TC-1A)

Abnahmebeauftragter  
Inspector representative  
Inspecteur de réception  
Jung  
Level III (SNT-TC-1A)



Überwacher  
Supervisor  
Surveilleur

Das Zeugnis wurde maschinell erstellt und ist auch ohne Unterschrift gültig. This certificate was generated by data system it must not be signed for validity as well.  
Ce certificat a été établi sur système informatique et est valable sans signature aussi.

Kunden-Bestell-Nr. **802331**  
Customer order no.  
Cde. no. du client

BGH-Auftrags-Nr. **863027-009-01**  
BGH works no.  
BGH référence

Zeugnis-Nr. **292183**  
Certificate no.  
No. de certificat

Erzeugnisform : Stab, rund, geschmiedet, geschält  
Product : Round bars, forged, peeled  
Werkstoff/Quality : UNS S31803/S32205  
Abmessung/Dimension : 250 mm dia. x 7604 + 7630 mm  
Anzahl/Quantity : 2 Gewicht /Weight : 5892 kg  
Wärmebehandlungszustand : lösungsgeglüht  
Condition of heat treat : solution annealed

**Prüfrichtlinie**

Specification

ASTM E 165, Ed.02

ASME VIII Div. 2 Part 7, Edition 2008

ASME V Artikel 6

ASME V Article 6

Prüfumfang : gesamte Prüfstückoberfläche (außen)  
Amount of inspection : total test piece surface (outside)

Prüfsystem DIN EN 571-1 : II E d (EN 571-1)

Test system DIN EN 571-1

Prüfmittel : Karl Deutsch

Check medium

Penetrant : KD-Check, RDP-1, Charge: 4043

Penetrant

Eindringzeit : 30 Minuten

Dwell time : 30 minutes

Reinigungsmittel : Wasser und mit Reiniger getränkter Lappen

Detergent : wasser and with cleaner soaked cloth

Entwickler : KD-Check, SD-1, Charge: 4044

Developer

Ausblutzeit : 30 Minuten

Bleed out time : 30 minutes

Beurteilungszeitpunkt : Nach dem Antrocknen des Entwicklers  
und nach 30 Minuten.

Moment of evaluation : after drying of developer  
and after 30 minutes.

Befund : Keine registrierpflichtigen Anzeigen.

Result : No reportable indications.

Siegen, den  
Place and date  
Lieu et date  
13.07.12

Prüfer  
Testing operator  
Opérateur  
Jantschenko  
Level II (SNT-TC-1A)

Abnahmebeauftragter  
Inspector representative  
Inspecteur de réception  
Jung  
Level III (SNT-TC-1A)



Überwacher  
Supervisor  
Surveilleur

Das Zeugnis wurde maschinell erstellt und ist auch ohne Unterschrift gültig.

This certificate was generated by data system it must not be signed for validity as well.  
Ce certificat a été établi sur système informatique et est valable sans signature aussi.

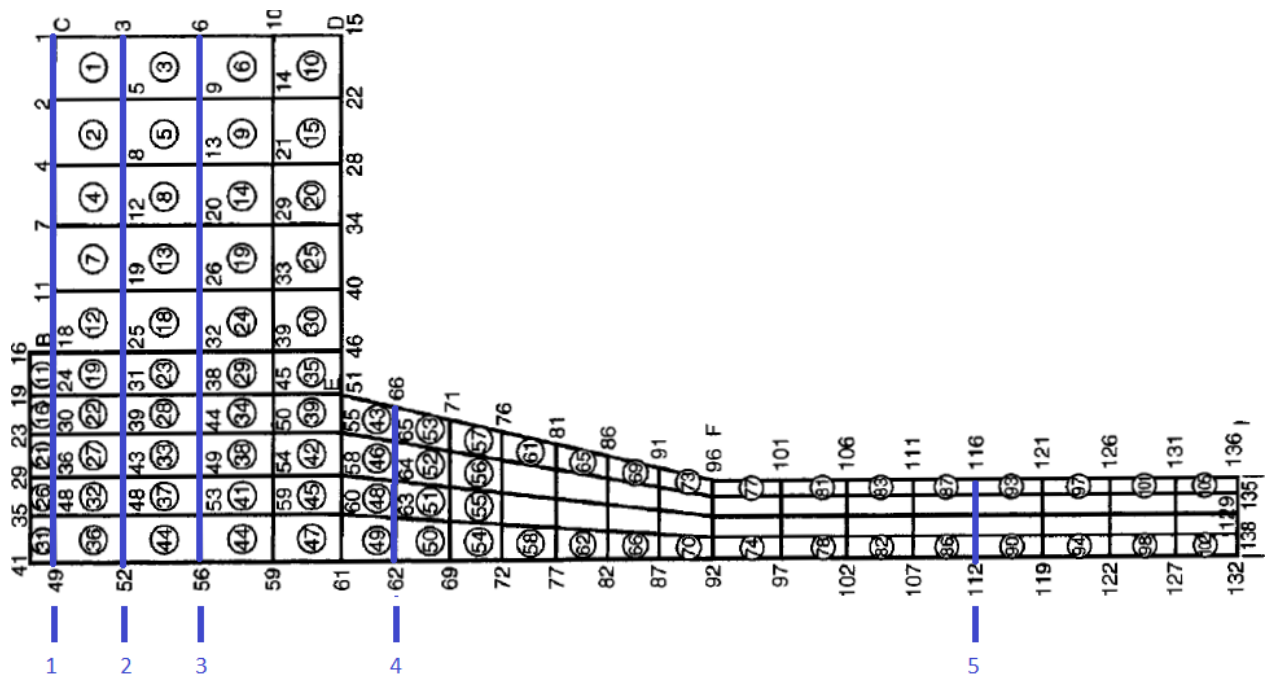
## Vedlegg E: Aksepterte spenningsintensiteter for design av API-flenser

Tabell E-1: Grenseverdier for spenningskriteriet (API-TP-6AF2, 2013, p. 23)

Load Condition		Allowable Stress Intensity				
		ASME Classification	Membrane Component $S_{Im}$		Membrane and Bending $S_{Imb}$	
No.	Description		Flange Sections	Hub Sections	Flange Sections	Hub Sections
1	Makeup only	Primary	$S_m^a$	$S_m$	$1.5 S_m$	$1.5 S_m$
2	Test pressure only <sup>d</sup>	Primary	$S_T^c$	$S_T$	$1.35 S_y^b$	$1.35 S_y$
3	Makeup	Primary	$S_T$	—	$1.35 S_y$	—
	plus test pressure	Secondary	—	$1.5 S_m$	—	$3.0 S_m$
4	Work pressure					
	plus tension plus bending moment	Primary	$S_m$	$S_m$	$1.5 S_m$	$1.5 S_m$
5.	Makeup					
	plus work pressure plus tension	Primary	$S_m$	—	$1.5 S_m$	—
	plus bending moment	Secondary	—	$1.5 S_m$	—	$3.0 S_m$
6	makeup					
	plus work pressure plus tension plus bending moment plus temperature	Secondary	$1.5 S_m$	$1.5 S_m$	$3.0 S_m$	$3.0 S_m$

<sup>a</sup>  $S_m$  = Allowable membrane stress intensity, =  $2/3 S_y$ .  
<sup>b</sup>  $S_y$  = Yield strength = 60 ksi for up to 10,000 psi work pressure, or = 75 ksi for 15,000 psi and 20,000 psi work pressure.  
<sup>c</sup>  $S_T$  = Allowable testing stress intensity, =  $0.83 S_y$ .  
<sup>d</sup> Test pressure =  $2 \times$  work pressure for < 14 in. flanges or < 10,000 psi working pressure, or =  $1.5 \times$  work pressure for > 14 in. flanges or  $\geq$  10,000 psi working pressure.

## Vedlegg F: Temperaturdistribusjon: 2 1/16" 6BX-flens



Masknett med nummererte knutepunkt brukt i en varmekonduktivitet-analyse for API 2<sup>1/16</sup>" 6BX flens (API-TP-6AF2, 2013, p. 18).

Viser et utvalg knutepunkttemperaturer fra figuren over. Modellen benytter en indre temperatur som er 121 °C og med ytre temperatur som -1 °C. Forkortet tabell hentet fra API-TR-6AF (2013, p. 20)

Kolonne 1		Kolonne 2		Kolonne 3		Kolonne 4		Kolonne 5	
Knute punkt	Temp. [°C]	Knute punkt	Temp. [°C]	Knute punkt	Temp. [°C]	Knute punkt	Temp. [°C]	Knute punkt	Temp. [°C]
1	-1,1	3	-1,1	6	-1,1	66	-1,1	116	-1,1
2	2,3	5	2,0	9	1,4	65	38,9	112	121,2
4	6,7	8	6,3	13	4,8	64	59,3		
7	12,9	12	12,3	20	10,2	63	85,0		
11	21,8	19	35,8	26	19,3	62	121,1		
18	36,0	25	33,1	32	31,0				
24	44,3	31	42,4	28	43,6				
30	55,8	39	36,3	44	55,0				
36	71,2	43	70,5	49	72,4				
48	92,0	48	92,0	53	93,1				
49	121,1	52	121,1	56	121,1				

## Vedlegg G: Tabeller fra API Spec 6A/17D

**Tabell G-1: Standard og ikke-standard materialanvendelse for sveiseflenser med hals (API Spec 6A, 2010, p. 35).**

Part	Material designations for pressure ratings					
	13,8 MPa (2 000 psi)	20,7 MPa (3 000 psi)	34,5 MPa (5 000 psi)	69,0 MPa (10 000 psi)	103,5 MPa (15 000 psi)	138,0 MPa (20 000 psi)
Loose connectors						
Welding neck	45K	45K	45K	60K, 75K	75K, NS	75K, NS
<sup>a</sup> If end connections are of the material designation indicated, welding is in accordance with Clause 6 and design is in accordance with Clause 4. <sup>b</sup> "NS" indicates non-standard materials as defined in 4.3.3 and 5.4.1 a). <sup>c</sup> As specified by manufacturer.						

**Tabell G-2: Standard materialegenskaper for flensmaterialer (API Spec 6A, 2010, p. 35).**

Material designation	0,2 % offset yield strength	Tensile strength	Elongation in 50 mm (2 in)	Reduction in area
	min. Mpa (psi)	min. Mpa (psi)	min. %	min. %
38K	248 (36 000)	483 (70 000)	21	No requirement
45K	310 (45 000)	483 (70 000)	19	32
60K	414 (60 000)	586 (85 000)	18	35
75K	517 (75 000)	655 (95 000)	17	35

**Tabell G-3: Charpy V-notch slagseighetskrav (API Spec 6A, 2010, p. 36).**

Temperature		Minimum average impact value		
Classification	Test °C (°F)	Transverse direction		
		PSL 1	PSL 2	PSL 3 and PSL 4
K	-60 (-75)	20 (15)	20 (15)	20 (15)
L	-46 (-50)	20 (15)	20 (15)	20 (15)
N	-46 (-50)	20 (15)	20 (15)	20 (15)
P	-29 (-20)	—	20 (15)	20 (15)
S	-18 (0)	—	—	20 (15)
T	-18 (0)	—	—	20 (15)
U	-18 (0)	—	—	20 (15)
V	-18 (0)	—	—	20 (15)

**Table G-4: Minimum hardhetsverdier (API Spec 6A, 2010, p. 64).**

Material designation	Minimum Brinell hardness
36K	HBW 140
45K	HBW 140
60K	HBW 174
75K	HBW 197

**Tabell G-5: Materialkrav for gitte materialklasser (API Spec 17D, 2011, p. 14)**

Materials class <sup>a</sup>	Minimum material requirements	
	Body, bonnet and flange	Pressure-controlling parts, stems and mandrel hangers
AA-General service	Carbon or low alloy steel	Carbon or low alloy steel
BB-General service	Carbon or low alloy steel	Stainless steel
CC-General service	Stainless steel	Stainless steel
DD-Sour service <sup>a</sup>	Carbon or low alloy steel <sup>b</sup>	Carbon or low alloy steel <sup>b</sup>
EE-Sour service <sup>a</sup>	Carbon or low alloy steel <sup>b</sup>	Stainless steel <sup>b</sup>
FF-Sour service <sup>a</sup>	Stainless steel <sup>b</sup>	Stainless steel <sup>b</sup>
HH-Sour service <sup>a</sup>	CRA <sup>b,c,d</sup>	CRA <sup>b,c,d</sup>
NOTE Refer to 5.1.2.3 for information regarding material class selection.		
<sup>a</sup> As defined in ISO 10423; in accordance with ISO 15156 (all parts). <sup>b</sup> In accordance with ISO 15156 (all parts). <sup>c</sup> CRA required on retained fluid wetted surfaces only; CRA cladding of low-alloy or stainless steel is permitted. <sup>d</sup> CRA as defined in 3.1.13. The definition of CRA in ISO 15156 (all parts) does not apply.		
NOTE For the purposes of the provisions in this table, ANSI/NACE MR0175/ISO 15156 is equivalent to ISO 15156 (all parts).		

**Liste G-1: (API Spec 17D, 2011, pp. 228-229)**

#### M.4 Material class

Material-class manufacturing requirements are given in ISO 10423 and in Table 1. Material class shall be determined by the purchaser with consideration to the various environmental factors and production variables listed below:

- a) pressure;
- b) temperature;
- c) composition of produced or injected fluid, particularly H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, and chlorides;
- d) pH of water phase or brine;
- e) exposure to salt water during installation or operation;
- f) use of inhibitors for scale, paraffin, corrosion or other reasons;
- g) possibility of acidizing and concentration of acidizing solutions;
- h) anticipated production rates;

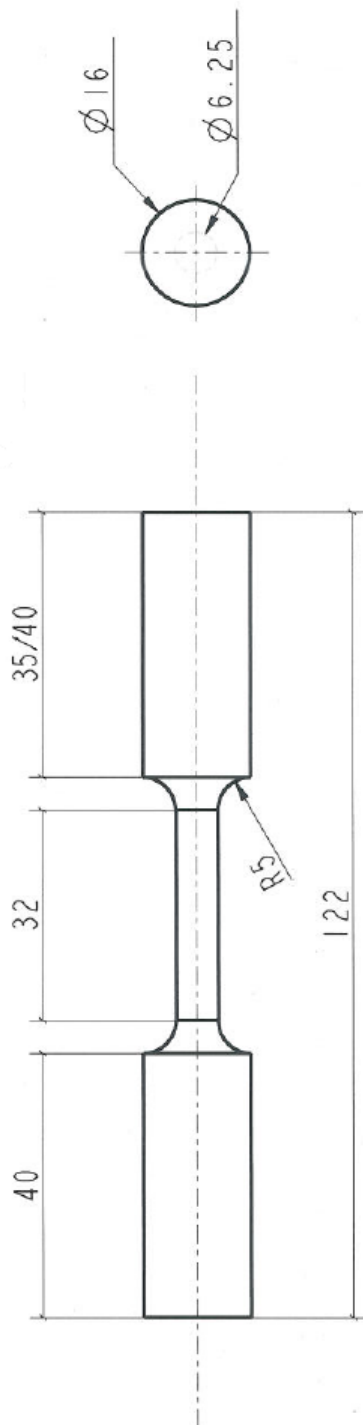
- i) sand production and other potential for erosion;
- j) anticipated service life;
- k) future operations that can affect pressure, temperature or fluid content;
- l) risk analysis.

**Tabell G-6: Standard temperaturklasser (API Spec 6A, 2010, p. 23).**

Temperature classification	Operating range			
	°C		°F	
	min.	max.	min.	max.
K	- 60	82	- 75	180
L	- 46	82	- 50	180
N	- 46	60	- 50	140
P	- 29	82	- 20	180
S	- 18	60	0	140
T	- 18	82	0	180
U	- 18	121	0	250
V	2	121	35	250



## Vedlegg H: Arbeidstegning prøvestykke



Konstr	Tegnet	Revisjon	Vekt	Skala	Format	Blad.nr
		Artikkel/Model PROVESTYKKE_6_25_MM		1:1	A4	1(1)
Beskrivelse					Dato	19-Mar-14
					Tegning	<b>PROVESTYKKE</b>

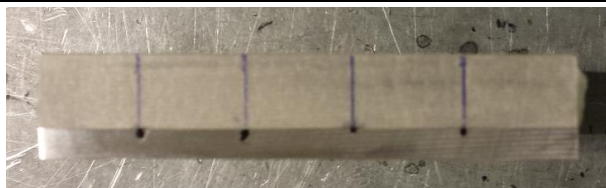
## Vedlegg I: Fremstilling av prøvestykker



1. Stengene fikk deler av sagingen utført eksternt før ved ankomst til Høgskolen i Bergen.



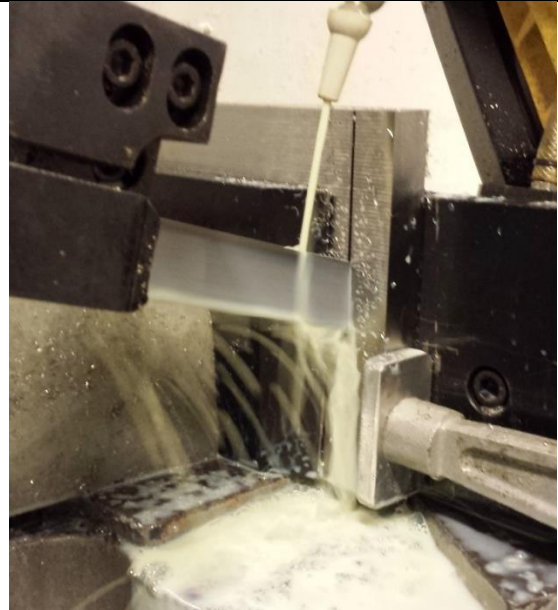
2. Den resterende sagingen ble utført med Høgskolens eget utstyr, slik at alle de ønskede platene kunne hentes ut fra stengene.



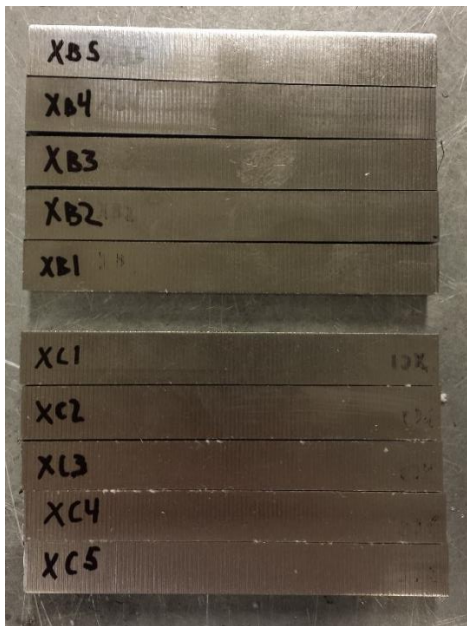
3. Hver plate ble deretter nøyaktig inndelt og merket med sin identifikasjonskode.



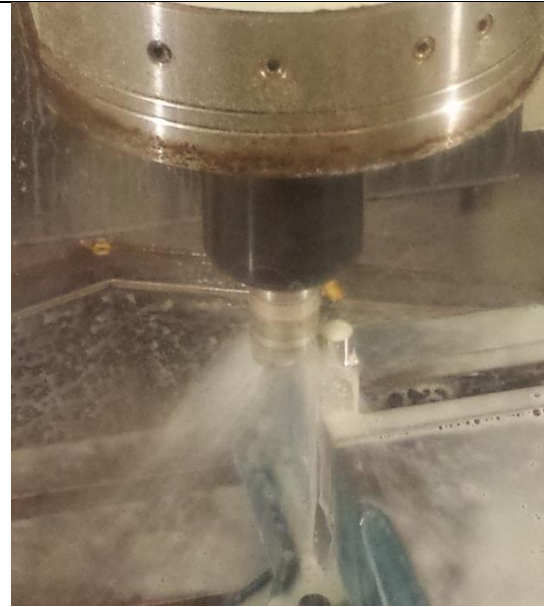
4. Hver seksjon fikk også et tall innstemplet for å sikre sporbarhet om identifikasjonskoden skulle forsvinne under videre maskinering.



5. Hver plate ble videre saget til seksjoner med lav mating og kjøling.



6. Resultatet etter at to av platene til  $\text{\O}220$  mm er ferdig oppsaget.



7. For å kunne plassere seksjonstykkene i CNC-dreiebenken, ble den ene enden frest til et sirkulært tversnitt.



8. Hvert seksjonstykke ble plassert i en merket boks med skillevegger, slik at sporbarheten for hvert prøvestykke var sikret om/når den fysiske merkingen forsvant.

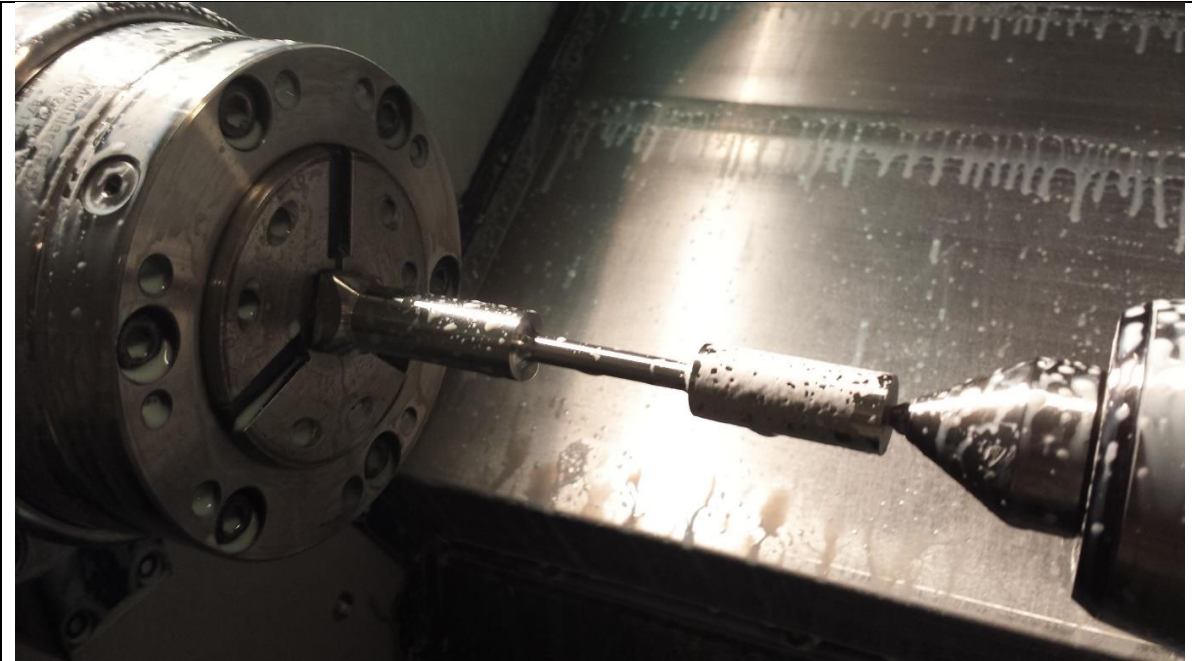


9. Seksjonstykke plassert i CNC-dreiebank.



10. Seksjonstykkene ble først grovdreid, og videre findreid til et sirkulært tversnitt med diameter på 16 mm.





**11.** Den reduserte seksjonen ble dreid til førbestemt tversnitt og avrundingsradius. Skjærene i dreiebenken ble hyppig utskiftet for å sikre et godt overflateresultat.



**12.** De ferdige prøve-stykkene ble merket på nytt med vannfast tusj.



**13.** Resultatet etter at 7 av prøvestykkene var ferdig maskinert. Den merkede boksen med skillevegger, kombinert med markering på prøvestykkene, sørget for god sporbarhet og kontroll når strekkprøvene ble utført.

## Vedlegg J: Beregning av strekkhastighet i henhold til ASTM A370 (2012)

Faktor mm-->inch	0,04		
Faktor inch-->mm	25,40		
Hastigheten til strekkmaskin			
1/16 inch/min for $0,5\sigma_y \rightarrow \sigma_y$	0,06 inch		
1/2 inch/min for $\sigma_y \rightarrow \sigma_{ts}$	0,50 inch		
Redusert seksjon	32,00 mm		
	1,26 inch		
Maskimal hastighet fra $0,5\sigma_y \rightarrow \sigma_y$	0,08 inch/min		$0,2 < v_1 < 2$
	2,00 mm/min		
Faktor mellom maks. og min.	0,10		
Minimal hastighet fra $0,5\sigma_y \rightarrow \sigma_y$	0,20 mm/min		
Maksimal hastighet $\sigma_y \rightarrow \sigma_{ts}$	0,63 inch/min		$1,6 < v_2 < 16$
	16 mm/min		
Faktor mellom maks. og min.	0,10		
Minimal hastighet $\sigma_y \rightarrow \sigma_{ts}$	1,6 mm/min		
<b>Valgt hastighet:</b>	<b>1,8 mm/min</b>		$1,6 < v_{valgt} < 2$

For hver tomme redusert seksjon skal hastigheten maksimalt være 1/16 tomme/min før og gjennom flytegrenseområdet, og 1/2 tomme/min etter flytegrenseområdet.

## Vedlegg K: Utførelse av strekkprøver



1. Målelengden ble merket på alle prøvestykkene med tusj. Dette gjør det mulig å plassere ekstensiometrene riktig, samtidig som det blir mulig å måle bruddforlengelsen etter en utført strekkprøve.



2. Prøvestykke etter merking.

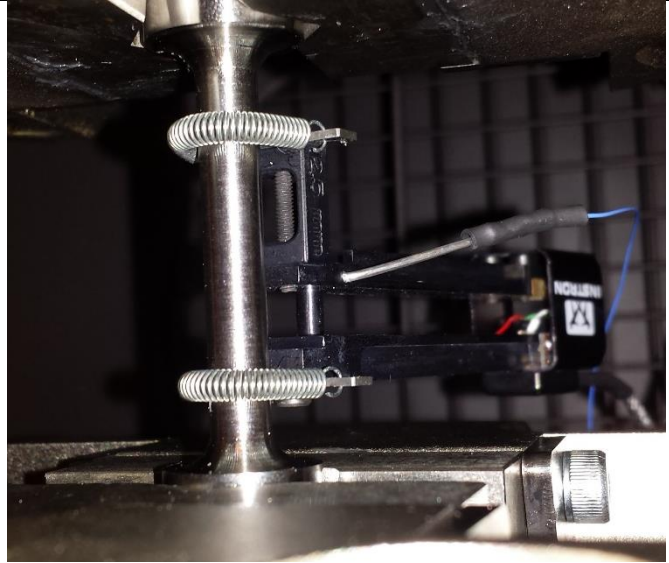
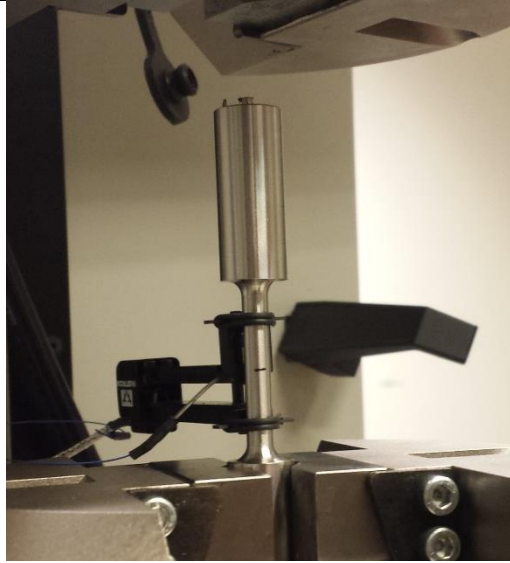


3. Diameteren ble målt på de tre merkede punktene på prøvestykket. Gjennomsnittet av disse målingene ble videre benyttet ved beregninger.

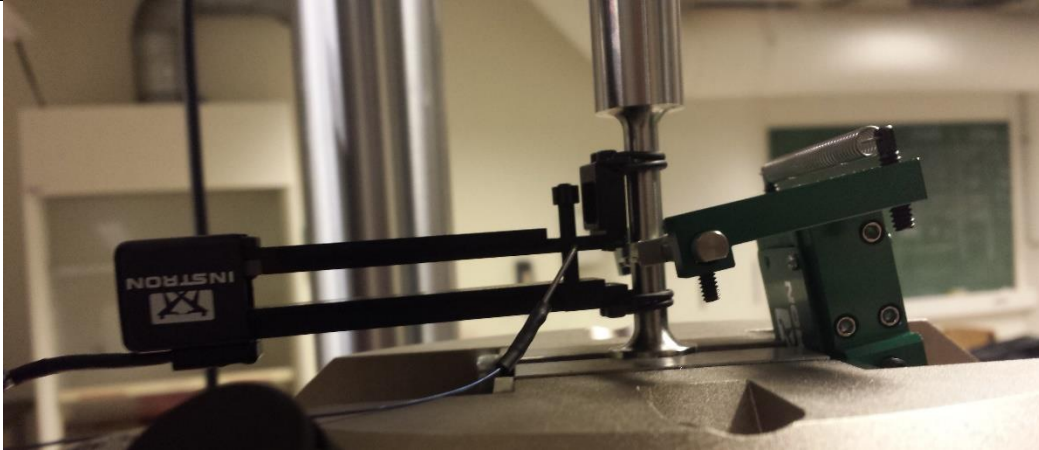


4. Prøvestykket ble innspent i nedre grep på strekkmaskinen. Ved romtemperatur (ordinære strekkprøver) ble dette utført med hydrauliske grep, mens ved hevede og senkede temperaturer var det kun mulig å benytte mekaniske grep.

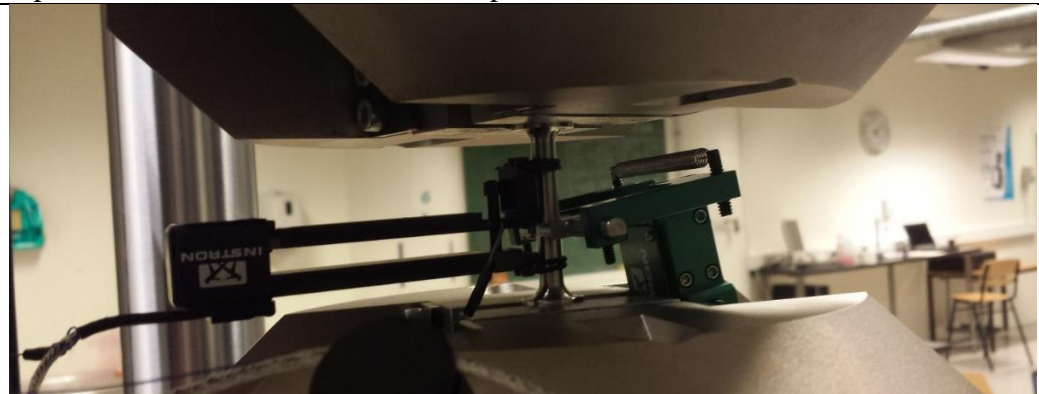




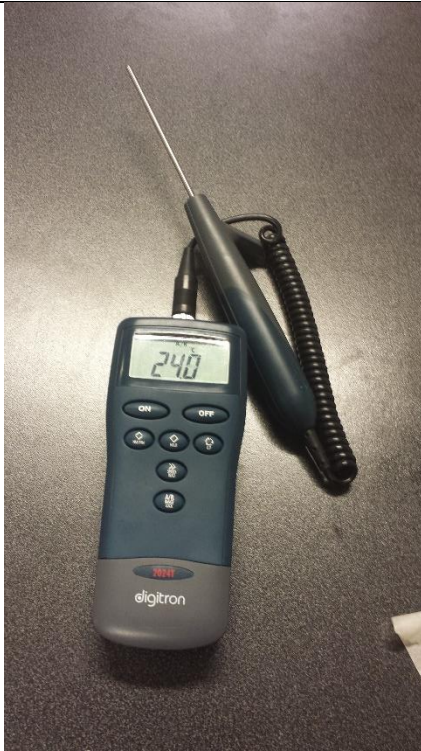
5. Langsgående ekstensiometer ble påmontert strekkprøven. Ved romtemperatur (til venstre) ble det benyttet strikk for å feste ekstensiometeret fast, mens det ved andre temperaturer (til høyre) ble det benyttet fjær.



6. Tverrgående ekstensiometer ble påmontert. Det var kun mulig å benytte dette ved romtemperatur. Etter at ekstensiometre var påmontert, ble målt last nullstilt.



7. Strekkprøven ble innspent oppe. Målt tøyning fra ekstensiometrene og maskinen ble deretter nullstilt.

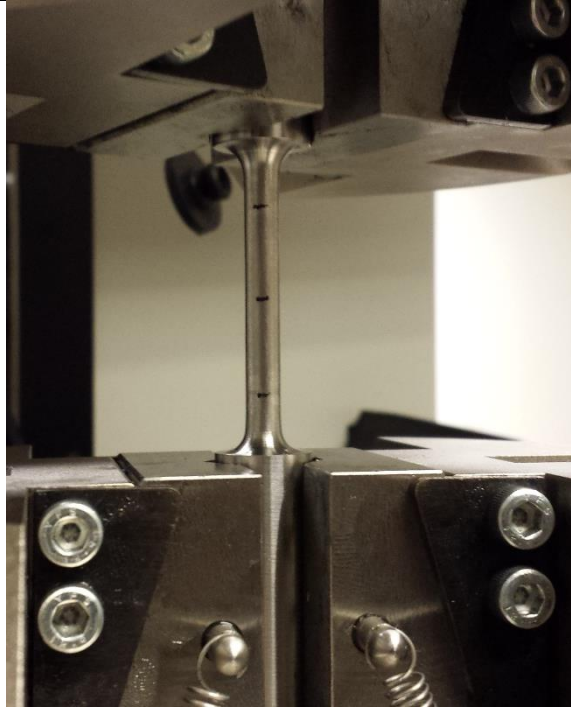


8. Temperaturen ble for ordinære strekkprøver målt før hver strekkprøve (til venstre). Strekkprøver ved hevede eller senkede temperaturer ble plassert i klimakammeret (til høyre). Temperaturen ble så stilt inn på ønsket temperatur, og når denne var oppnådd fikk strekkprøvene 10 minutter til å stabilisere seg på denne temperaturen før strekkprøven ble startet.

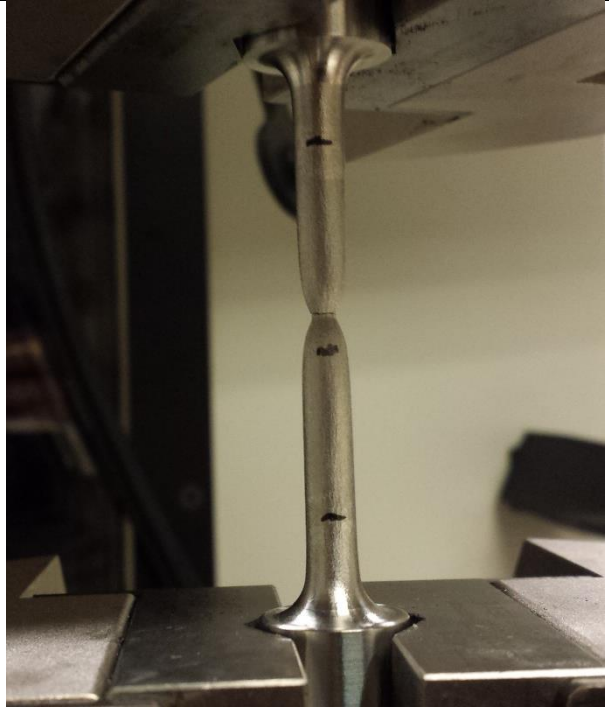


9. Strekkprøven ble startet. Da langsgående ekstensiometer nådde sin maksimalgrense ved en tøyning på 0,2 mm/mm, ble ekstensiometrene fjernet før strekkprøven fortsatte. For strekkprøver ved hevede eller senkede temperaturer, ble det ventet til den ønskede temperaturen var oppnådd igjen, deretter gitt 5 minutters stabiliseringstid, før strekkprøven ble fortsatt.





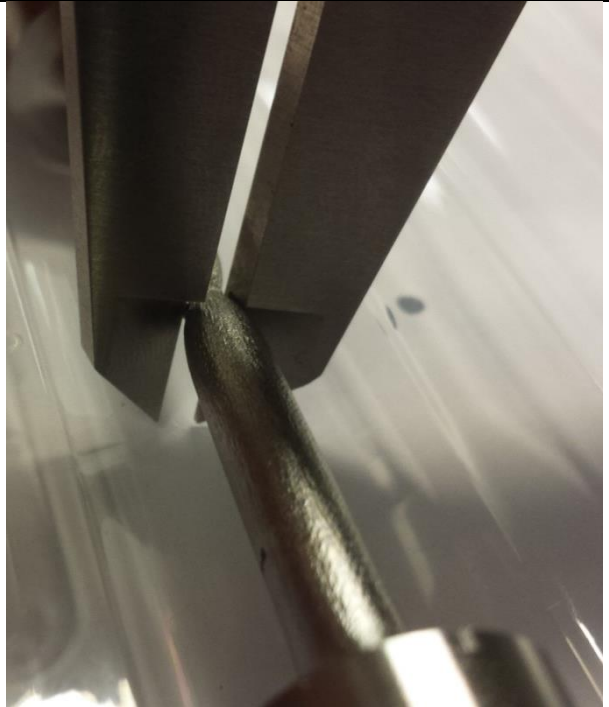
10. Strekkprøven etter at ekstensiometrene er fjernet.



11. Prøvestykket er gått til brudd, og strekkprøven er ferdig.



10. Prøvestykket ble plassert sammen slik at bruddflatene var i fullstendig kontakt. Dette gjorde det mulig å måle bruddforlengelsen til målelengden (til venstre) og kontraksjonen i bruddet (til høyre).



## Vedlegg L: Fysiske målinger av prøvestykker

Identifikasjons- kode	Diameter måleområde				Temp. [°C]	Målelengde ved brudd [mm]	Diameter ved brudd [mm]
	[mm]						
	1	2	3	Snitt			
XA2	6,28	6,29	6,29	6,29	23,2	40,68	2,49
XA3	6,29	6,29	6,29	6,29	23,4	39,28	2,57
XA4	6,28	6,29	6,29	6,29	23,7	38,85	2,58
XA5	6,29	6,29	6,29	6,29	23,9	39,39	2,50
XB1	6,29	6,28	6,29	6,29	23,9	39,81	2,55
XB2	6,29	6,28	6,29	6,29	24,1	39,82	2,51
XB3	6,29	6,29	6,29	6,29	23,7	40,07	2,63
XB4	6,29	6,29	6,29	6,29	24,4	40,01	2,48
XB5	6,30	6,29	6,29	6,29	24,1	39,23	2,51
XC1	6,29	6,29	6,28	6,29	23,9	39,65	2,58
XC2	6,28	6,28	6,28	6,28	24,2	39,57	2,49
XC3	6,29	6,29	6,29	6,29	24,0	39,72	2,45
XC4	6,28	6,29	6,28	6,28	23,5	39,46	2,59
XC5	6,29	6,29	6,29	6,29	23,5	39,30	2,64
XD1	6,24	6,24	6,25	6,24	24,5	36,99	3,28
XD2	6,24	6,24	6,25	6,24	24,4	36,64	3,36
XD3	6,24	6,25	6,25	6,25	24,2	35,71	3,27
XD4	6,24	6,24	6,24	6,24	23,8	35,83	3,36
XD5	6,24	6,24	6,25	6,24	24,2	37,02	3,35
XD6	6,24	6,24	6,25	6,24	24,4	37,08	3,29
XD7	6,29	6,29	6,29	6,29	24,4	37,12	3,40
XS2	6,25	6,25	6,26	6,25	-60,0	41,48	2,80
XS3	6,25	6,25	6,26	6,25	-46,0	40,02	2,62
XS4	6,26	6,26	6,27	6,26	-29,0	39,07	2,72
XS5	6,27	6,27	6,28	6,27	-18,0	39,81	2,65
XT2	6,26	6,26	6,26	6,26	121,0	37,59	2,60
XT3	6,24	6,25	6,26	6,25	150,0	37,22	2,56
XT4	6,25	6,25	6,26	6,25	180,0	38,24	2,57
XT5	6,25	6,26	6,26	6,26	200,0	36,11	2,63
XU2	6,26	6,27	6,28	6,27	-60,0	39,76	2,82
XU3	6,25	6,26	6,26	6,26	-46,0	40,34	2,62
XU4	6,26	6,26	6,25	6,26	-29,0	39,46	2,66
XU5	6,25	6,25	6,26	6,25	-18,0	39,36	2,61
XW2	6,25	6,26	6,27	6,26	121,0	38,05	2,62
XW3	6,25	6,26	6,26	6,26	150,0	38,71	2,63
XW4	6,25	6,25	6,26	6,25	180,0	37,28	2,65
XW5	6,25	6,26	6,26	6,26	200,0	36,82	2,55

Identifikasjons- kode	Diameter måleområde				Temp. [°C]	Målelengde ved brudd [mm]	Diameter ved brudd [mm]
	1	2	3	Snitt			
YA2	6,28	6,28	6,29	6,28	23,5	39,29	2,40
YA3	6,28	6,29	6,29	6,29	23,8	38,57	2,41
YA4	6,28	6,28	6,29	6,28	23,7	38,80	2,38
YA5	6,28	6,29	6,29	6,29	23,5	38,90	2,40
YA6	6,28	6,28	6,29	6,28	23,6	38,30	2,40
YB1	6,28	6,28	6,29	6,28	23,7	38,72	2,39
YB2	6,29	6,29	6,29	6,29	23,5	38,23	2,37
YB3	6,29	6,28	6,29	6,29	23,5	39,31	2,38
YB4	6,29	6,28	6,29	6,29	23,4	39,34	2,42
YB5	6,30	6,29	6,29	6,29	23,9	39,05	2,34
YB6	6,29	6,28	6,29	6,29	23,9	38,90	2,41
YC1	6,28	6,29	6,29	6,29	23,6	39,20	2,64
YC2	6,28	6,28	6,29	6,28	23,4	39,17	2,58
YC3	6,28	6,28	6,29	6,28	23,6	-	-
YC4	6,28	6,29	6,29	6,29	23,7	40,19	2,51
YC5	6,28	6,28	6,28	6,28	23,4	38,42	2,43
YC6	6,29	6,28	6,28	6,28	23,5	39,02	2,42
YD1	6,26	6,26	6,26	6,26	24,1	35,73	3,02
YD2	6,28	6,27	6,28	6,28	24,1	36,35	2,95
YD3	6,27	6,28	6,28	6,28	24,1	36,37	2,99
YD4	6,28	6,29	6,28	6,28	23,3	35,70	2,94
YD5	6,27	6,27	6,28	6,27	23,7	36,51	3,08
YD6	6,28	6,28	6,29	6,28	23,2	36,21	2,99
YD7	6,29	6,29	6,28	6,29	23,3	35,67	3,03

## Vedlegg M: Oppsummering resultater

<b>Ø220 Varierende temperaturer</b>																
Identifikasjonskode	S2	T2	U2	W2 <sup>3</sup>	S3	T3	U3	W3	S4	T4	U4	W4	S5	T5	U5	W5
Temperatur	-60,0	121,0	-60,0	121,0	-46,0	150,0	-46,0	150,0	-29,0	180,0	-29,0	180,0	-18,0	200,0	-18,0	200,0
Radiell avstand fra senter i stangen [mm]	42,9	42,9	42,9	42,9	60,7	60,7	60,7	60,7	79,2	79,2	79,2	79,2	98,0	98,0	98,0	98,0
E-modul [GPa]	194,3	190,1	189,4	188,6	200,8	183,0	195,2	183,4	197,2	181,6	195,1	185,2	193,8	181,4	192,2	169,3
0,2 % Offset flytegrense [MPa]	565,4	405,3	579,7	380,7	593,6	378,4	535,2	361,4	611,2	367,6	534,5	367,1	566,7	369,9	564,8	376,8
Strekfasthet [MPa]	849,6	639,4	851,2	632,9	839,0	614,0	812,2	608,1	807,0	604,8	789,1	602,8	789,5	603,8	790,3	600,8
Bruddforlengelse (25 mm) [%]	65,9	50,4	59,0	52,2	60,1	48,9	61,4	54,8	56,3	53,0	57,8	49,1	59,2	44,4	57,4	47,3
Bruddforlengelse (32 mm) [%]	60,0	47,6	54,9	49,1	55,4	46,1	54,9	51,9	54,8	48,4	57,8	46,1	53,5	43,9	52,2	43,9
Kontraksjon [%]	55,2	58,5	55,0	58,1	58,1	59,0	58,1	58,0	56,6	58,9	57,5	57,6	57,8	58,0	58,3	59,2

### Spenningsområde ved beregning av E-modul og Poissons tall:

<sup>1</sup> Forspenning - 150 MPa

<sup>2</sup> Forspenning - 200 MPa

<sup>3</sup> 50 - 100 MPa

<sup>4</sup> 150 - 200 MPa

<b>Ø220</b>														
Identifikasjonskode	B1	C1	A2	B2	C2	A3	B3 <sup>2</sup>	C3	A4	B4 <sup>4</sup>	C4	A5	B5 <sup>1</sup>	C5
Radiell avstand fra senter i stangen [mm]	19,1	19,1	38,4	38,4	38,4	57,6	57,6	57,6	76,9	76,9	76,9	96,1	96,1	96,1
E-modul [GPa]	193,8	187,3	192,2	Feil	188,5	192,3	195,1	187,7	188,8	189,8	193,6	191,1	184,7	194,0
Poissons tall	0,36	0,28	0,30	Feil	0,28	0,28	0,33	0,28	0,33	0,33	0,24	0,33	0,30	0,34
0,2 % Offset flytegrense [MPa]	456,3	452,5	457,1	Feil	465,6	482,0	472,7	471,2	498,2	483,8	484,1	512,1	505,1	503,1
Strekfasthet [MPa]	724,2	719,2	720,8	718,7	720,3	718,2	717,4	718,5	719,0	718,8	721,7	723,5	723,6	723,8
Bruddforlengelse (25 mm) [%]	59,2	58,6	62,7	59,3	58,3	57,1	60,3	58,9	55,4	60,0	57,8	57,6	56,9	57,2
Bruddforlengelse (32 mm) [%]	54,8	54,0	56,9	54,3	54,3	52,8	54,2	55,2	52,5	55,7	54,7	53,3	51,7	53,8
Kontraksjon [%]	59,4	59,0	60,4	60,1	60,4	59,1	58,2	61,0	59,0	60,6	58,8	60,3	60,1	58,0

<b>Ø220</b>							
Identifikasjonskode	D1	D2	D3	D4	D5 <sup>2</sup>	D6	D7 <sup>2</sup>
Radiell avstand fra senter i stangen [mm]	-	-	-	-	-	-	-
E-modul [GPa]	179,0	197,4	189,9	194,7	184,6	189,1	187,1
Poissons tall	0,29	0,27	0,33	0,35	0,29	0,34	0,29
0,2 % Offset flytegrense [MPa]	524,5	512,0	488,6	476,4	467,1	471,7	494,2
Strekfasthet [MPa]	745,2	740,1	730,6	734,3	732,3	734,6	733,7
Bruddforlengelse (25 mm) [%]	48,0	46,6	42,8	43,3	48,1	48,3	48,5
Bruddforlengelse (32 mm) [%]	46,2	45,9	41,0	42,9	45,8	47,0	46,2
Kontraksjon [%]	47,5	46,2	47,7	46,2	46,3	47,3	45,9

**Spenningsområde ved beregning av E-modul og Poissons tall:**

<sup>1</sup> Forspenning - 150 MPa

<sup>2</sup> Forspenning - 200 MPa

<sup>3</sup> 50 - 100 MPa

<sup>4</sup> 150 - 200 MPa

<b>Ø250</b>														
Identifikasjonskode	B1	C1	A2	B2	C2	A3 <sup>2</sup>	B3	C3	A4	B4	C4	A5	B5	C5
Radiell avstand fra senter i stangen [mm]	19,1	19,1	38,4	38,4	38,4	57,6	57,6	57,6	76,9	76,9	76,9	96,1	96,1	96,1
E-modul [GPa]	191,9	195,9	189,5	189,9	189,4	192,2	195,3	196,4	191,2	195,9	192,2	186,2	189,9	187,3
Poissons tall	0,36	0,31	0,29	0,37	0,32	0,34	0,28	0,29	0,35	0,33	0,31	0,32	0,32	0,28
0,2 % Offset flytegrense [MPa]	486,3	488,6	482,1	481,9	494,3	478,6	481,0	485,3	479,8	488,8	485,6	476,6	492,8	519,8
Strekfasthet [MPa]	713,9	713,1	715,5	714,4	719,2	711,3	714,1	Feilet	714,9	716,8	715,6	708,1	714,6	732,7
Bruddforlengelse (25 mm) [%]	54,9	56,8	57,2	52,9	56,7	54,3	57,2	Feilet	55,2	57,4	60,8	55,6	56,2	53,7
Bruddforlengelse (32 mm) [%]	48,4	53,1	52,4	53,3	52,7	50,8	52,8	Feilet	52,5	53,9	55,6	52,1	52,6	49,1
Kontraksjon [%]	62,0	58,0	61,8	62,3	58,9	61,7	62,1	Feilet	62,1	61,5	60,1	61,8	62,8	61,3

<b>Ø250</b>										
Identifikasjonskode	A6	B6 <sup>1</sup>	C6	D1	D2	D3	D4	D5 <sup>2</sup>	D6	D7
Radiell avstand fra senter i stangen [mm]	115,3	115,3	115,3	-	-	-	-	-	-	-
E-modul [GPa]	188,7	189,5	196,2	194,7	196,7	197,2	202,2	192,0	195,3	194,4
Poissons tall	0,32	0,29	0,33	0,32	0,38	0,28	0,33	0,27	0,30	0,33
0,2 % Offset flytegrense [MPa]	513,2	513,2	495,1	496,9	490,3	489,7	492,0	491,4	489,8	493,2
Strekfasthet [MPa]	724,9	727,4	713,9	736,8	722,5	726,0	729,6	729,5	730,8	729,9
Bruddforlengelse (25 mm) [%]	53,2	55,6	56,1	42,9	45,4	45,5	42,8	46,0	44,8	42,7
Bruddforlengelse (32 mm) [%]	50,0	51,0	51,1	41,0	43,8	43,2	40,0	43,2	42,9	41,3
Kontraksjon [%]	61,8	61,7	61,5	51,8	53,0	52,4	53,2	50,9	52,4	51,8

**Spenningsområde ved beregning av E-modul og Poissons tall:**

<sup>1</sup> Forspenning - 150 MPa

<sup>2</sup> Forspenning - 200 MPa

<sup>3</sup> 50 - 100 MPa

<sup>4</sup> 150 - 200 MPa

## Vedlegg N: Datablader for prøvestykker

### Innhold

#### Ø220 mm

Identifikasjonskode	Sidetall
---------------------	----------

A2/A3	160
A4/A5	161
B1/B2	162
B3/B4	163
B5/C1	164
C2/C3	165
C4/C5	166
D1/D2	167
D3/D4	168
D5/D6	169
D7	170

#### Ø250 mm

Identifikasjonskode	Sidetall
---------------------	----------

A2	170
A3/A4	171
A5/A6	172
B1/B2	173
B3/B4	174
B5/B6	175
C1/C2	176
C3/C4	177
C5/C6	178
D1/D2	179
D3/D4	180
D5/D6	181
D7	182

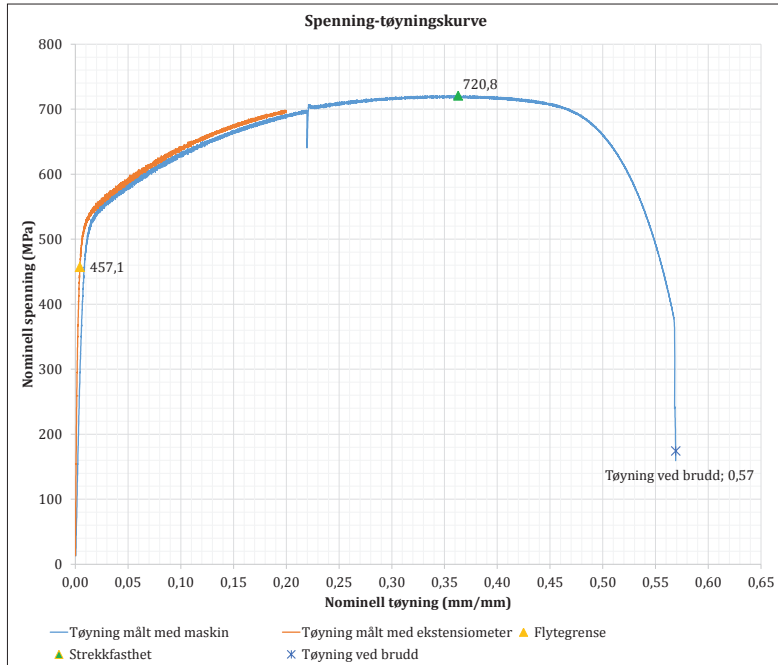
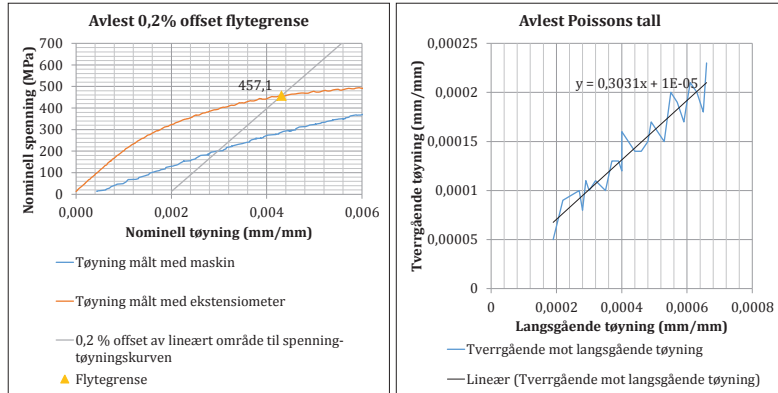
#### Ø220 mm (Temperatur)

Identifikasjonskode	Sidetall
---------------------	----------

S2	182
S3/S4	183
S5/T2	184
T3/T4	185
T5/U2	186
U3/U4	187
U5/W2	188
W3/W4	189
W5	190

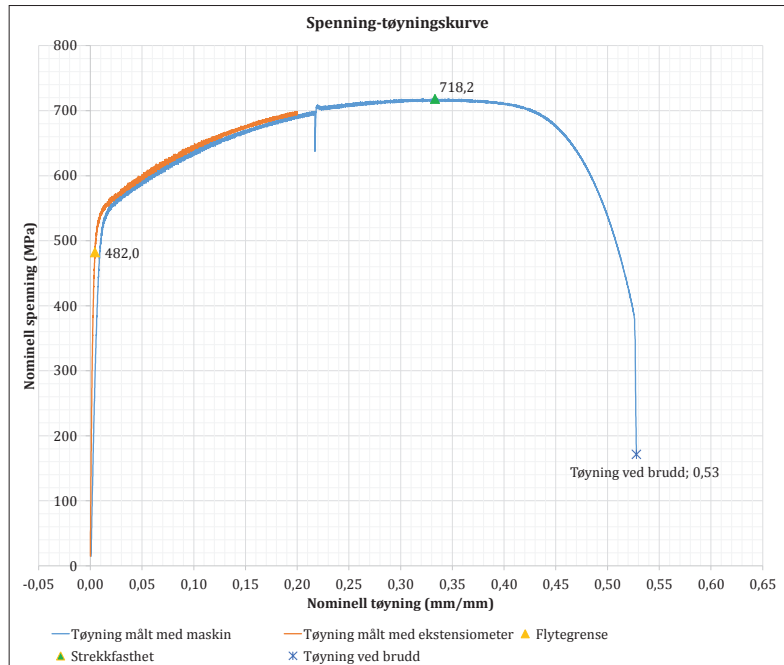
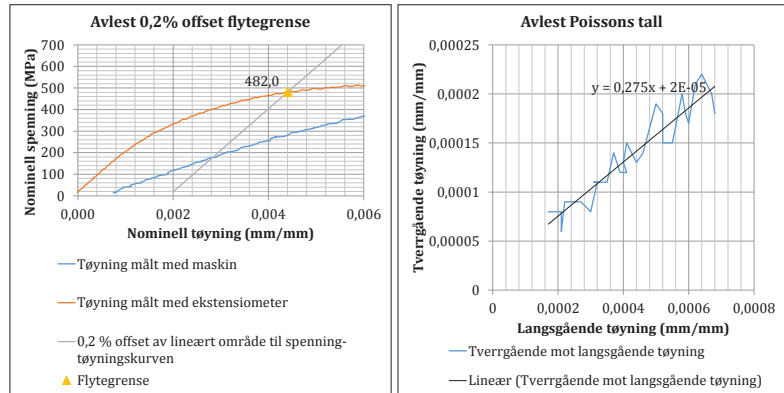
### XA2

Flytegrense (0,2% offset)	457,1 MPa
Strekfasthet	720,8 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	62,7 %
Bruddforlengelse (32 mm)	56,9 %
Kontraksjon	60,4 %
Poissons tall	0,303
E-modul	192,2 GPa
Temperatur	23,2 °C



### XA3

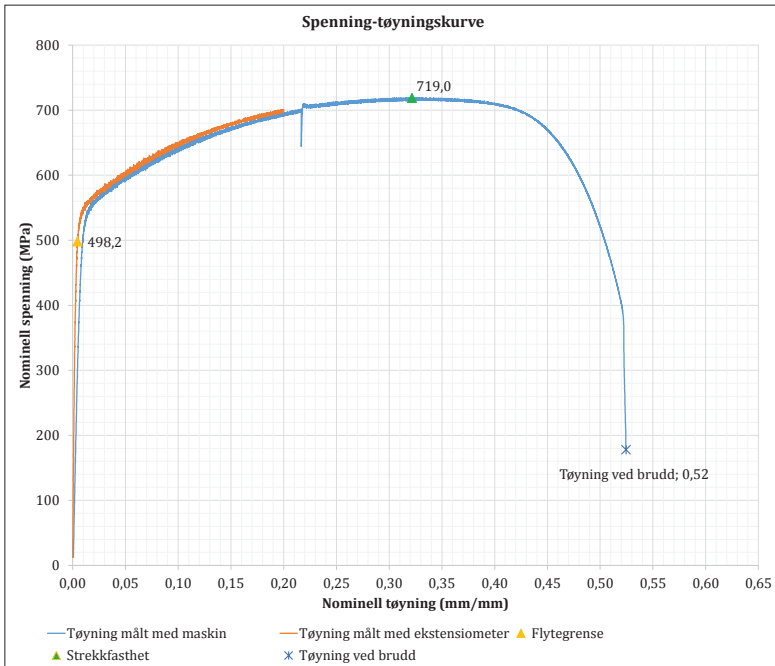
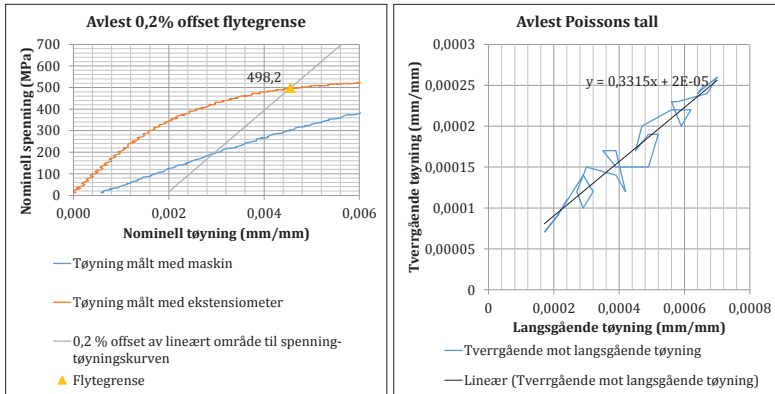
Flytegrense (0,2% offset)	482,0 MPa
Strekfasthet	718,2 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	57,1 %
Bruddforlengelse (32 mm)	52,8 %
Kontraksjon	59,1 %
Poissons tall	0,275
E-modul	192,3 GPa
Temperatur	23,4 °C





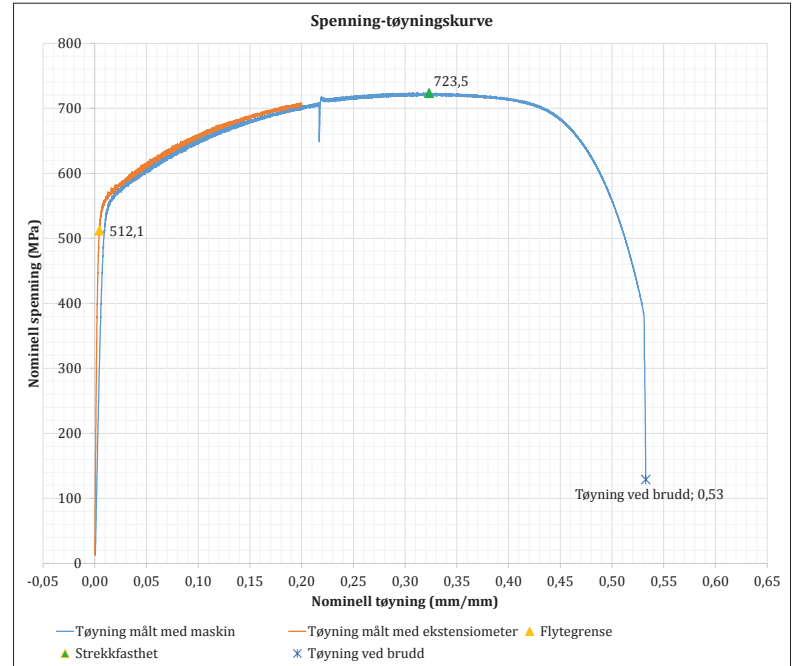
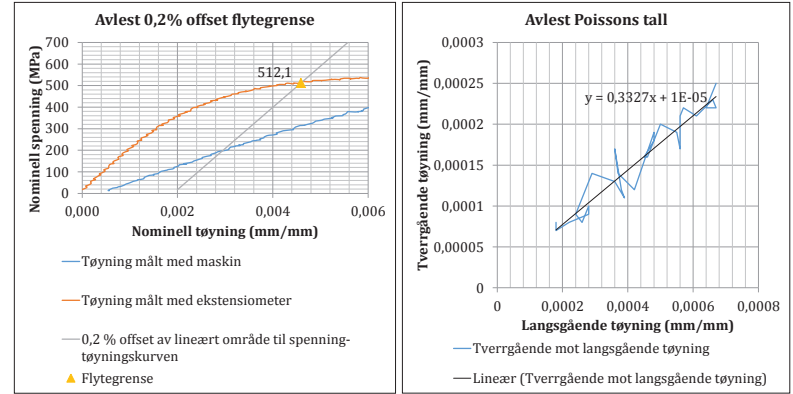
### XA4

Flytegrense (0,2% offset)	498,2 MPa
Strekfasthet	719,0 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	55,4 %
Bruddforlengelse (32 mm)	52,5 %
Kontraksjon	59,0 %
Poissons tall	0,332
E-modul	188,8 GPa
Temperatur	23,7 °C



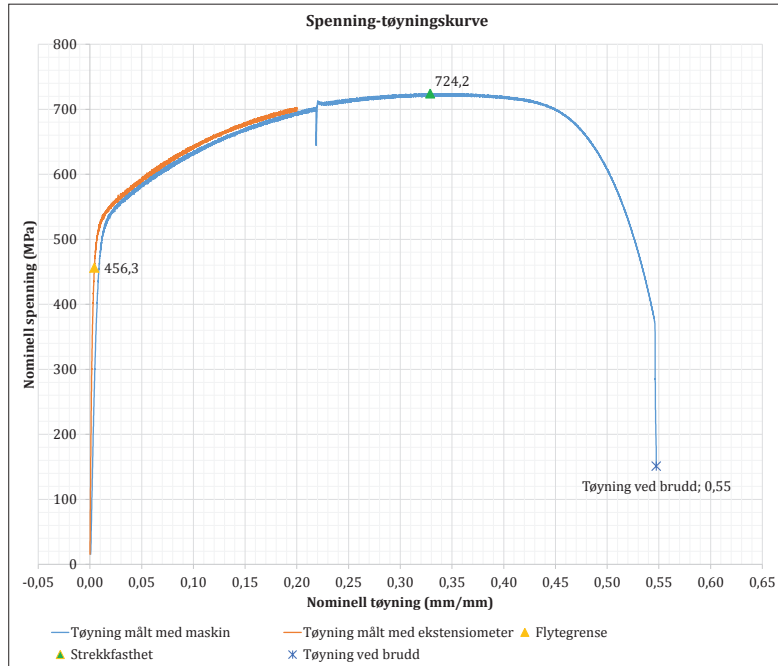
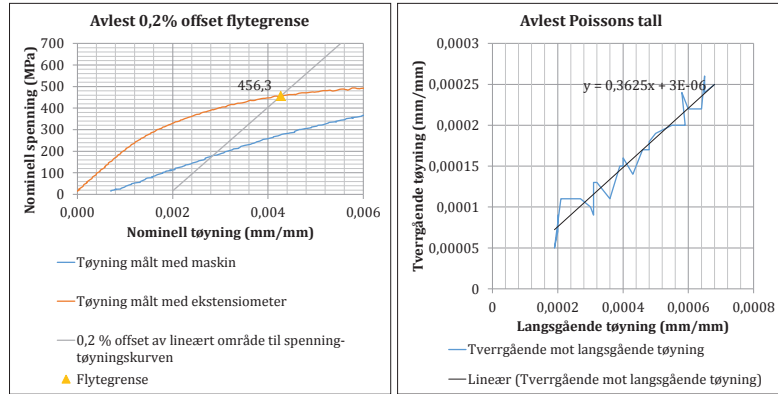
### XA5

Flytegrense (0,2% offset)	512,1 MPa
Strekfasthet	723,5 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	57,6 %
Bruddforlengelse (32 mm)	53,3 %
Kontraksjon	60,3 %
Poissons tall	0,333
E-modul	191,1 GPa
Temperatur	23,9 °C



### XB1

Flytegrense (0,2% offset)	456,3 MPa
Strekfasthet	724,2 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	59,2 %
Bruddforlengelse (32 mm)	54,8 %
Kontraksjon	59,4 %
Poissons tall	0,362
E-modul	193,8 GPa
Temperatur	23,8 °C



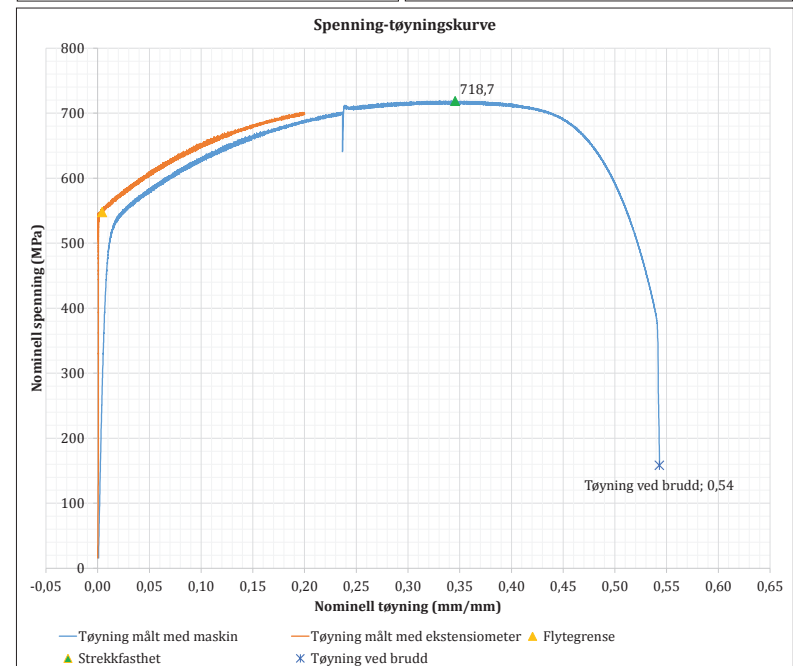
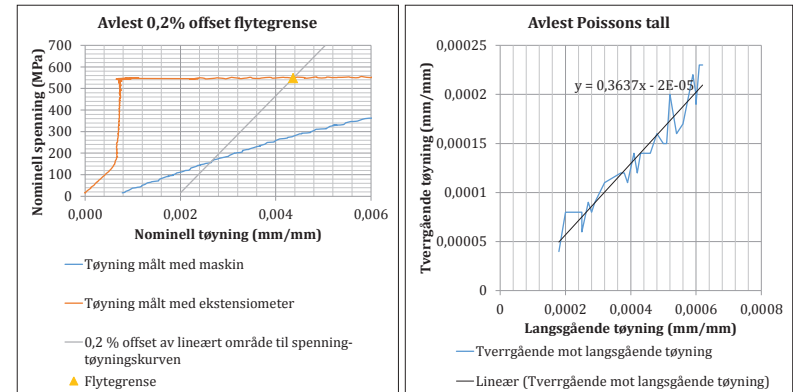
### XB2

Feil installasjon av ekstensiometer

Flytegrense (0,2% offset)	- MPa
Strekfasthet	718,7 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	59,3 %
Bruddforlengelse (32 mm)	54,3 %
Kontraksjon	60,1 %
Poissons tall	-
E-modul	- GPa
Temperatur	24,1 °C

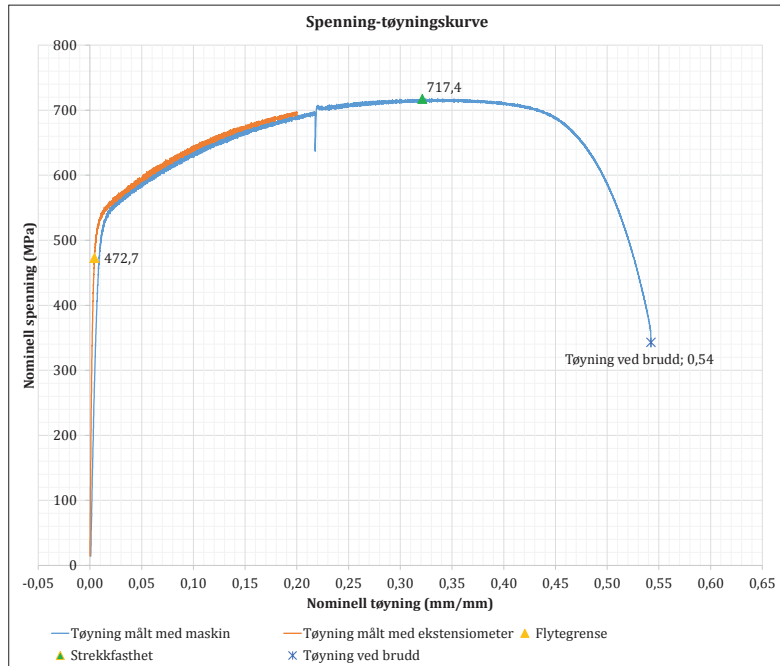
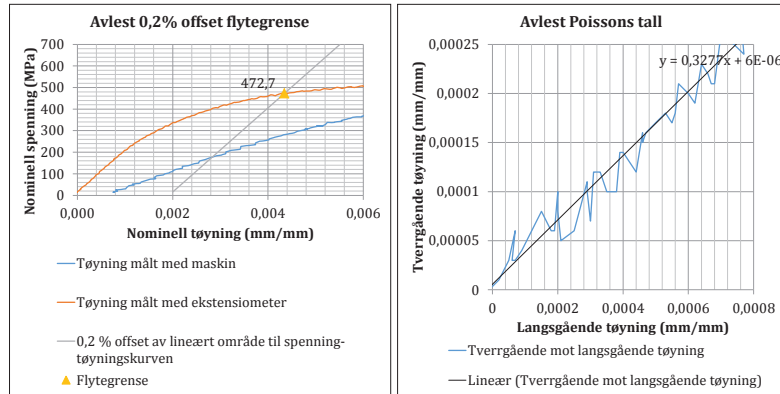
NB! Feil installasjon av ekstensiometer

Målinger uten ekstensiometer

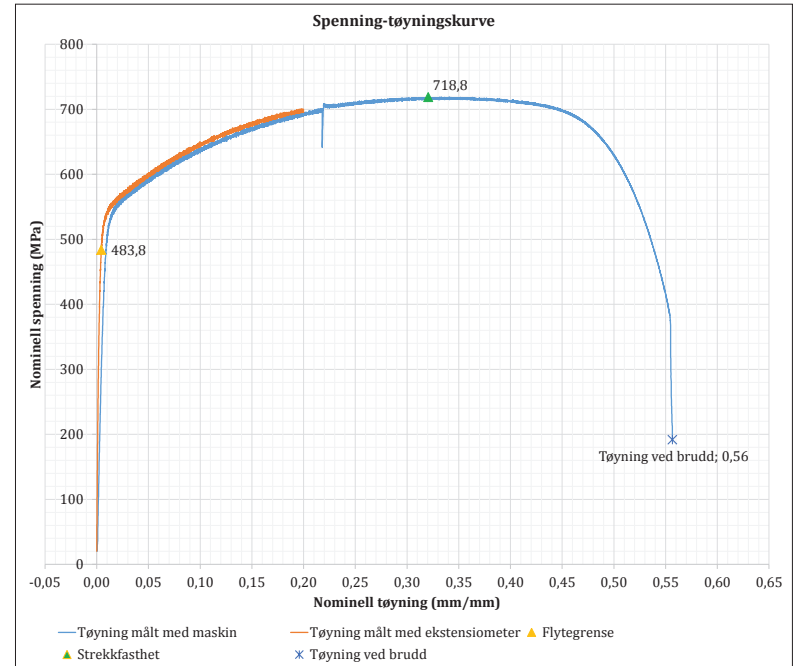
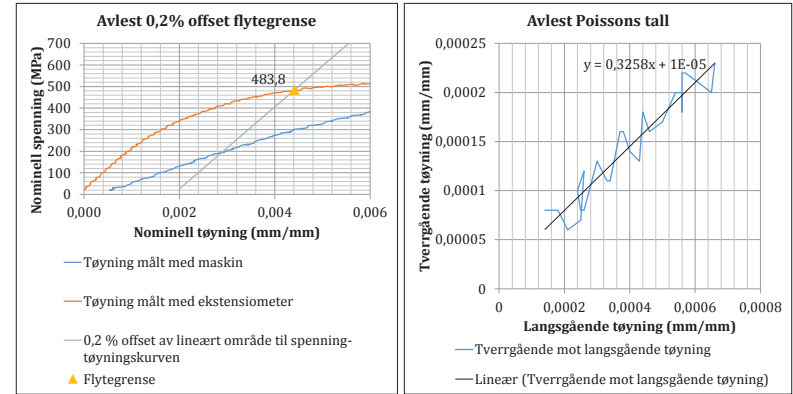


**XB3**

Flytegrense (0,2% offset)	472,7 MPa
Strekfasthet	717,4 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	60,3 %
Bruddforlengelse (32 mm)	54,2 %
Kontraksjon	58,2 %
Poissons tall	0,327
E-modul	195,1 GPa
Temperatur	23,7 °C

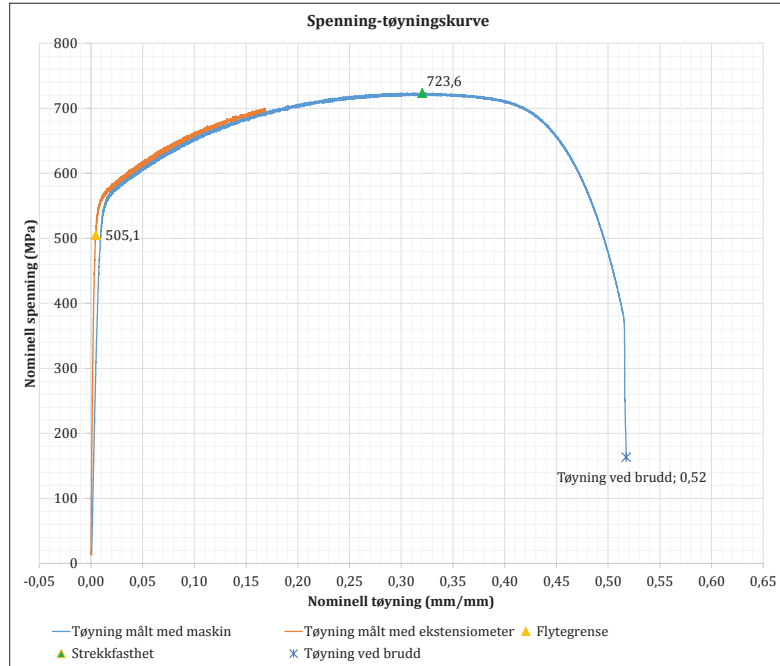
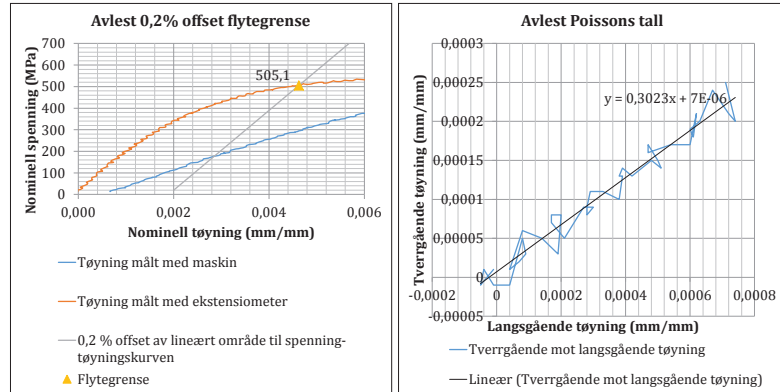
**XB4**

Flytegrense (0,2% offset)	483,8 MPa
Strekfasthet	718,8 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	60,0 %
Bruddforlengelse (32 mm)	55,7 %
Kontraksjon	60,6 %
Poissons tall	0,326
E-modul	189,8 GPa
Temperatur	24,3 °C

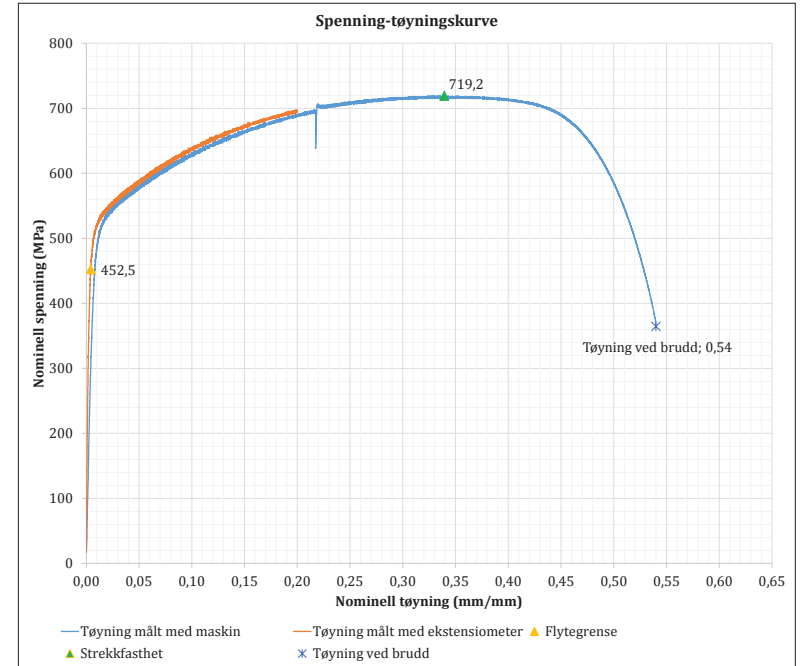
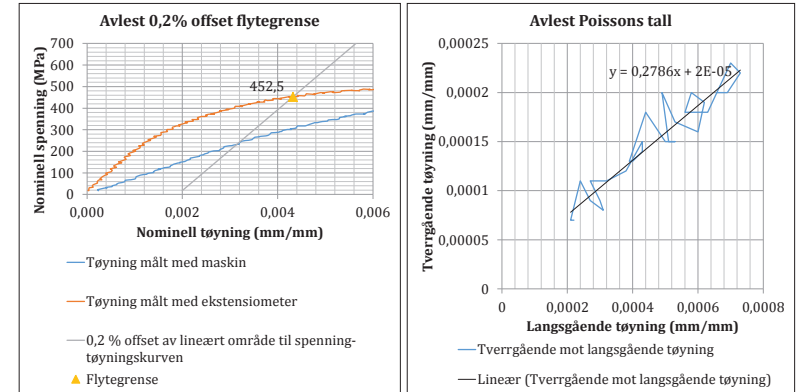


**XB5**

Flytegrense (0,2% offset)	505,1 MPa
Strekfasthet	723,6 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	56,9 %
Bruddforlengelse (32 mm)	51,7 %
Kontraksjon	60,1 %
Poissons tall	0,302
E-modul	184,7 GPa
Temperatur	24,1 °C

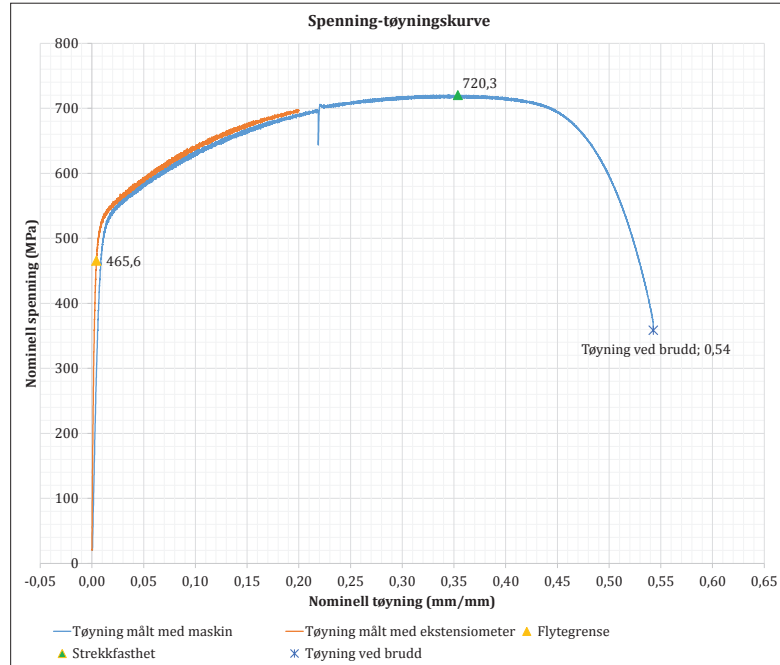
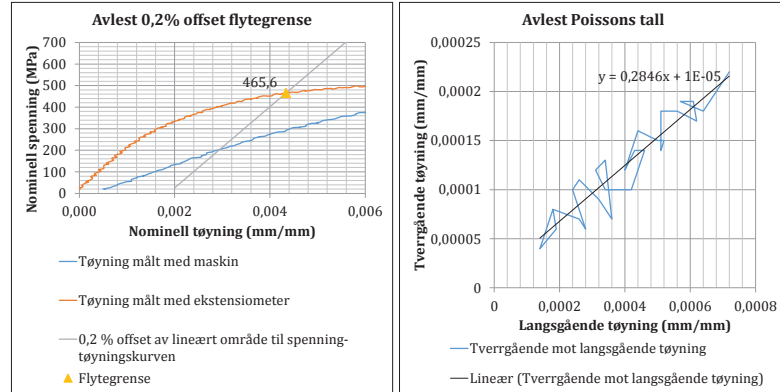
**XC1**

Flytegrense (0,2% offset)	452,5 MPa
Strekfasthet	719,2 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	58,6 %
Bruddforlengelse (32 mm)	54,0 %
Kontraksjon	59,0 %
Poissons tall	0,279
E-modul	187,3 GPa
Temperatur	23,8 °C



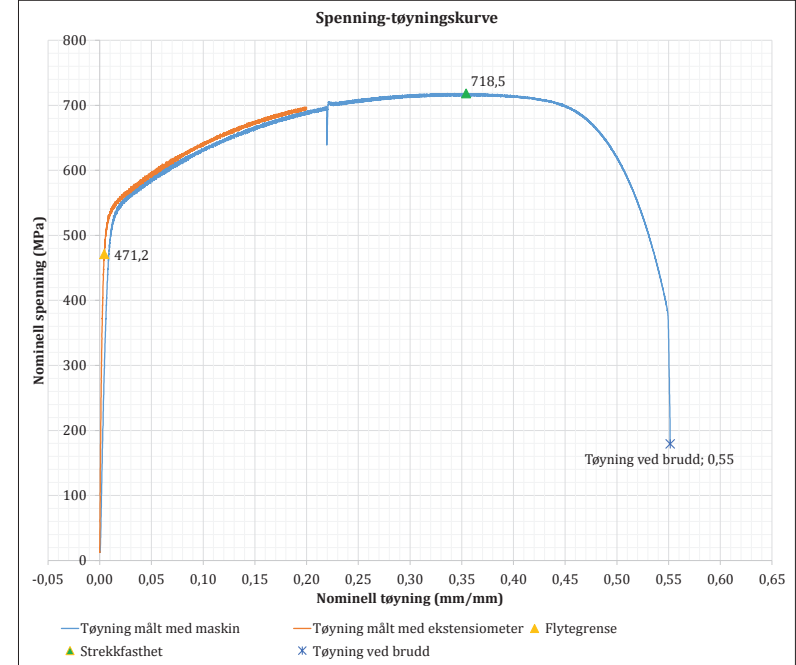
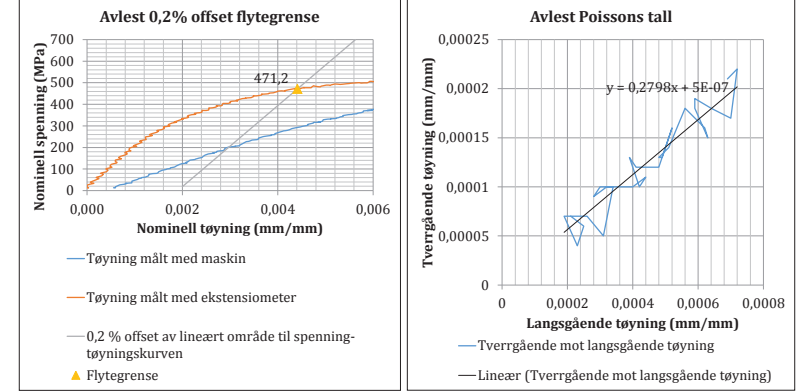
### XC2

Flytegrense (0,2% offset)	465,6 MPa
Strekfasthet	720,3 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	58,3 %
Bruddforlengelse (32 mm)	54,3 %
Kontraksjon	60,4 %
Poissons tall	0,285
E-modul	188,5 GPa
Temperatur	24,2 °C



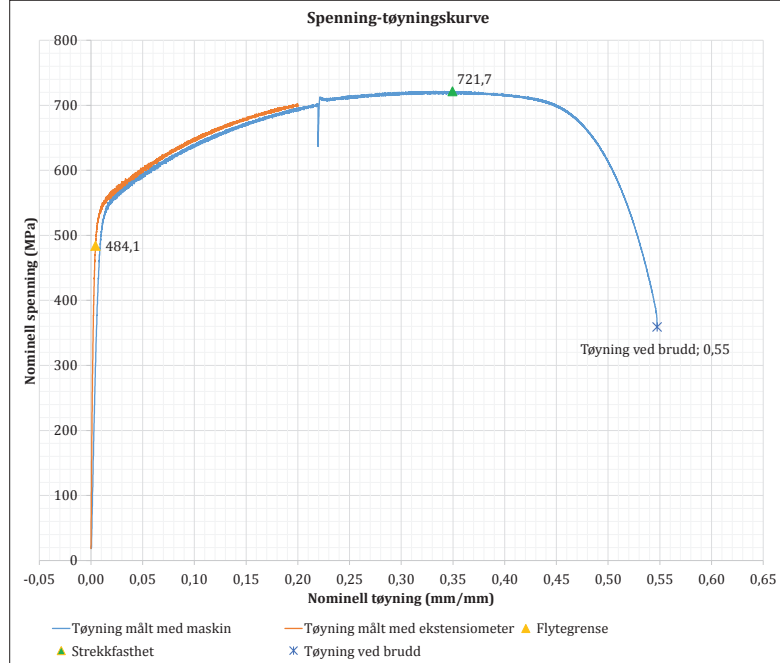
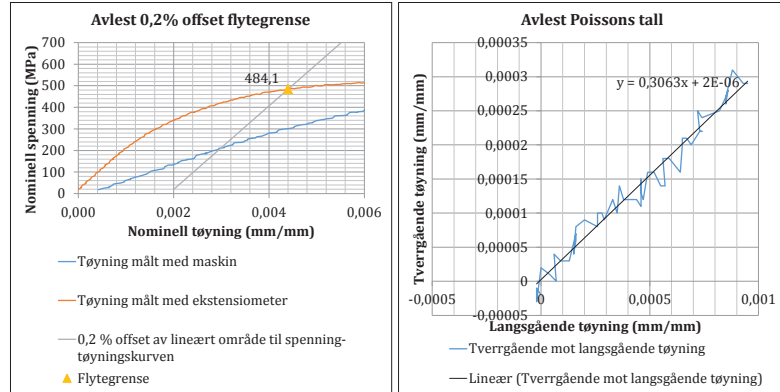
### XC3

Flytegrense (0,2% offset)	471,2 MPa
Strekfasthet	718,5 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	58,9 %
Bruddforlengelse (32 mm)	55,2 %
Kontraksjon	61,0 %
Poissons tall	0,280
E-modul	187,7 GPa
Temperatur	24 °C



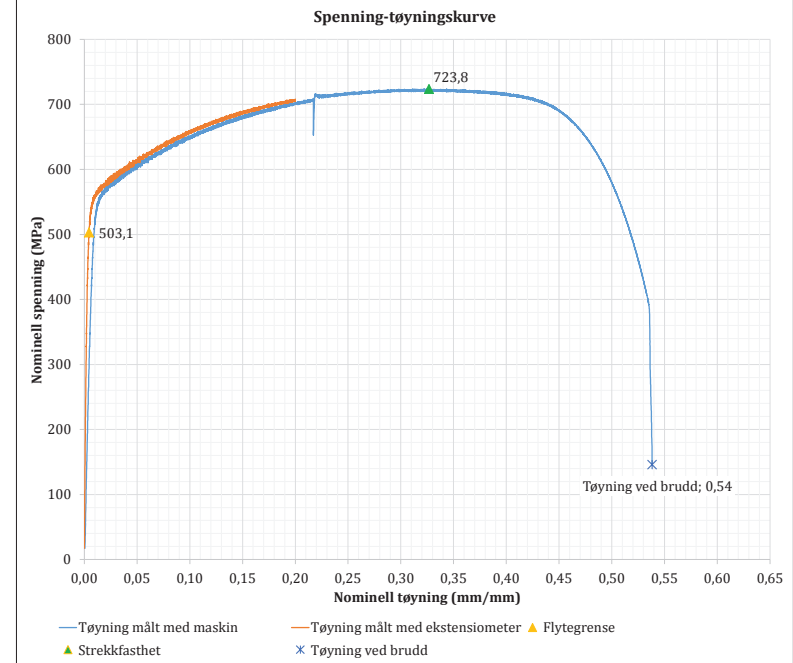
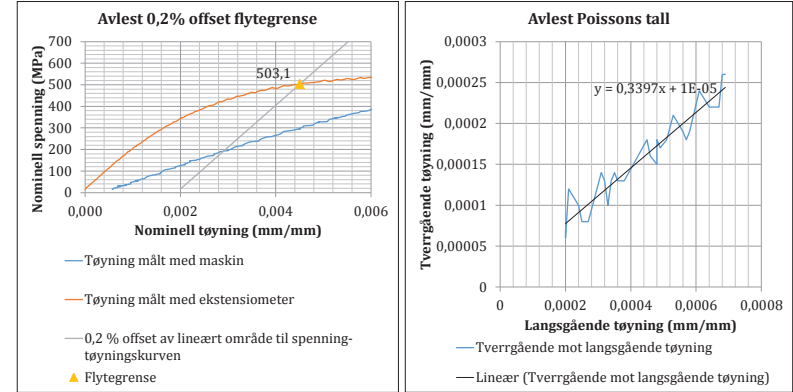
### XC4

Flytegrense (0,2% offset)	484,1 MPa
Strekfasthet	721,7 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	57,8 %
Bruddforlengelse (32 mm)	54,7 %
Kontraksjon	58,8 %
Poissons tall	0,238
E-modul	193,6 GPa
Temperatur	23,5 °C



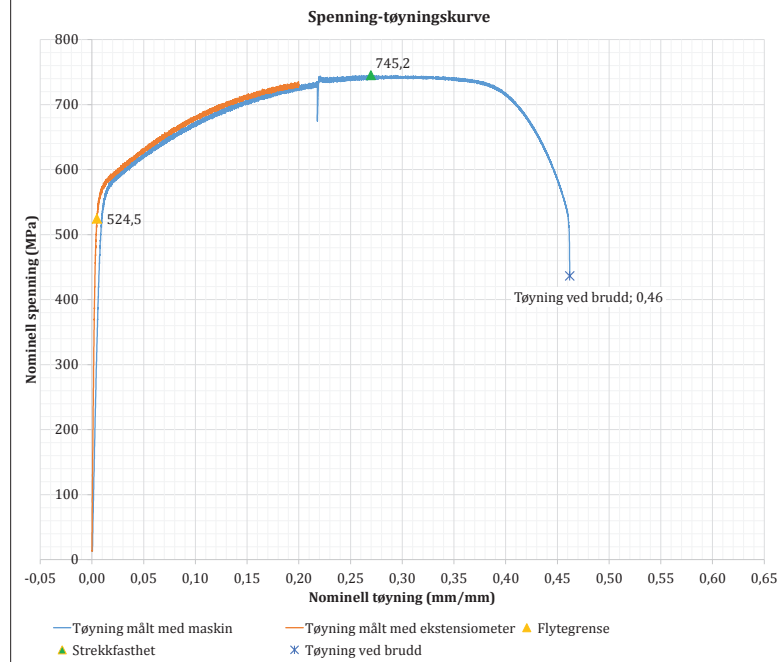
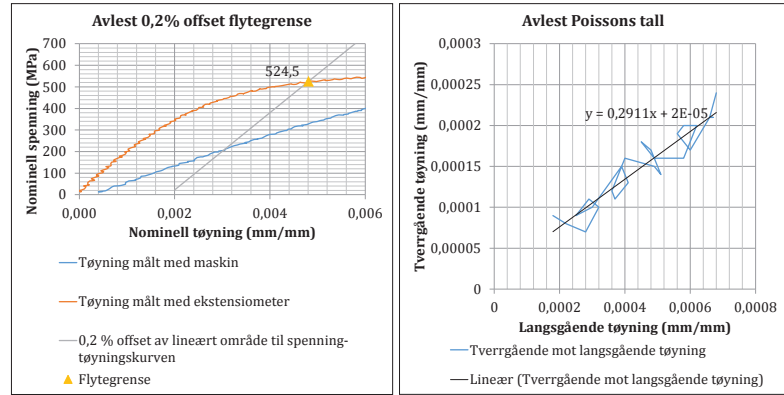
### XC5

Flytegrense (0,2% offset)	503,1 MPa
Strekfasthet	723,8 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	57,2 %
Bruddforlengelse (32 mm)	53,8 %
Kontraksjon	58,0 %
Poissons tall	0,340
E-modul	194,0 GPa
Temperatur	23,5 °C

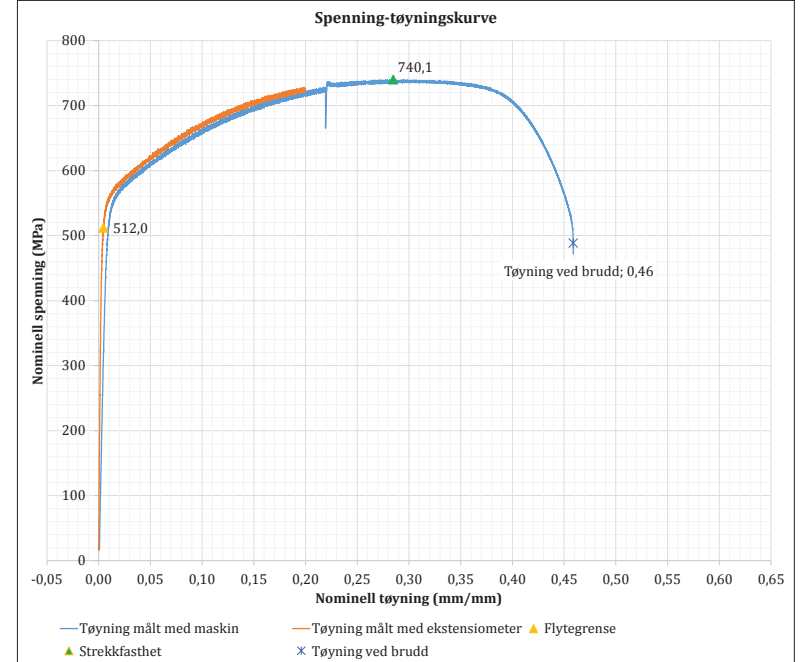
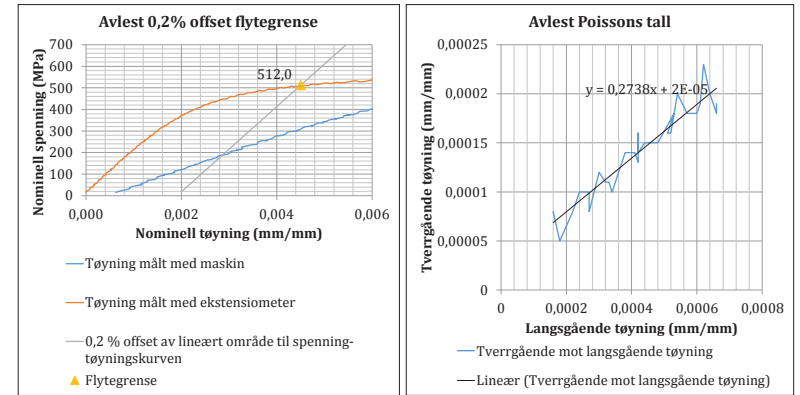


**XD1**

Flytegrense (0,2% offset)	524,5 MPa
Strekfasthet	745,2 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	48,0 %
Bruddforlengelse (32 mm)	46,2 %
Kontraksjon	47,5 %
Poissons tall	0,291
E-modul	179,0 GPa
Temperatur	24,5 °C

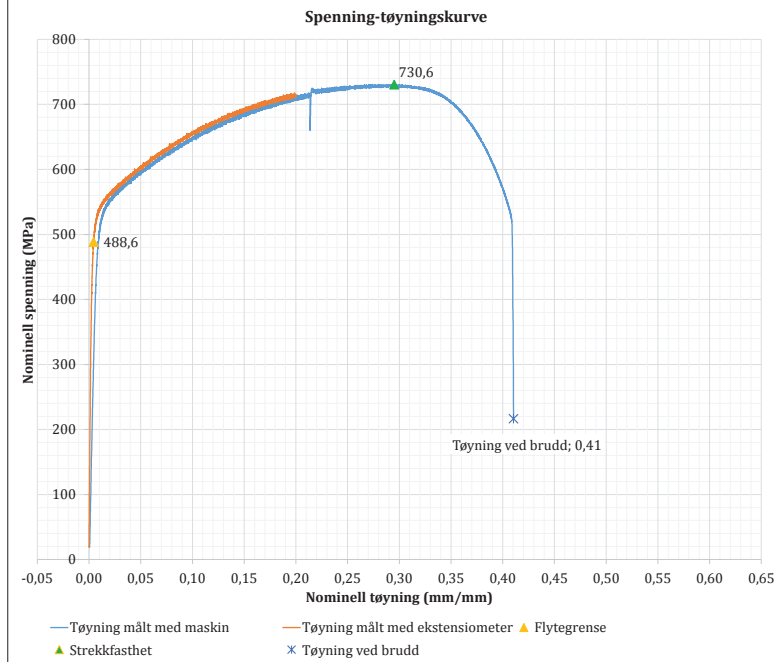
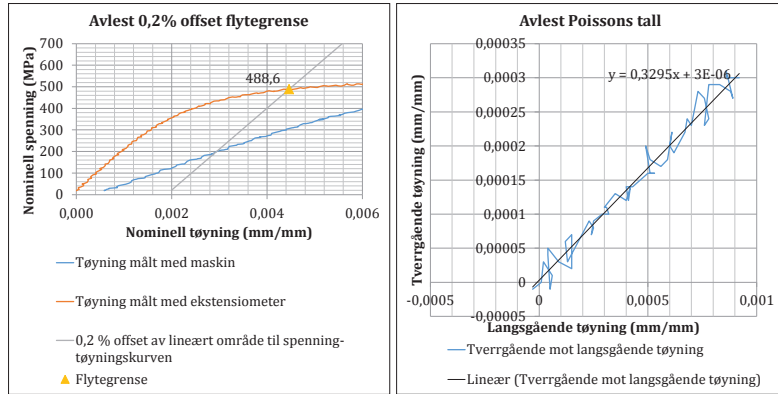
**XD2**

Flytegrense (0,2% offset)	512,0 MPa
Strekfasthet	740,1 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	46,6 %
Bruddforlengelse (32 mm)	45,9 %
Kontraksjon	46,2 %
Poissons tall	0,274
E-modul	197,4 GPa
Temperatur	24,4 °C



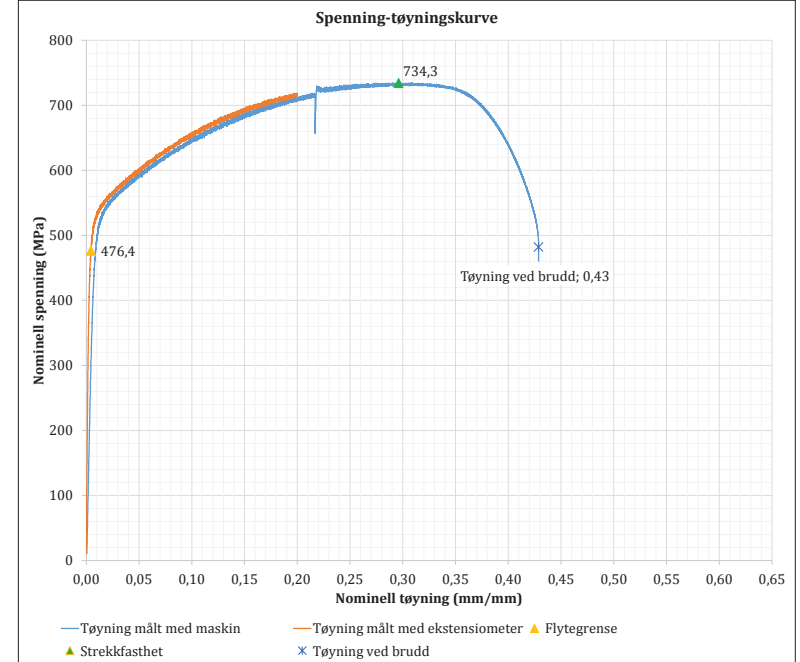
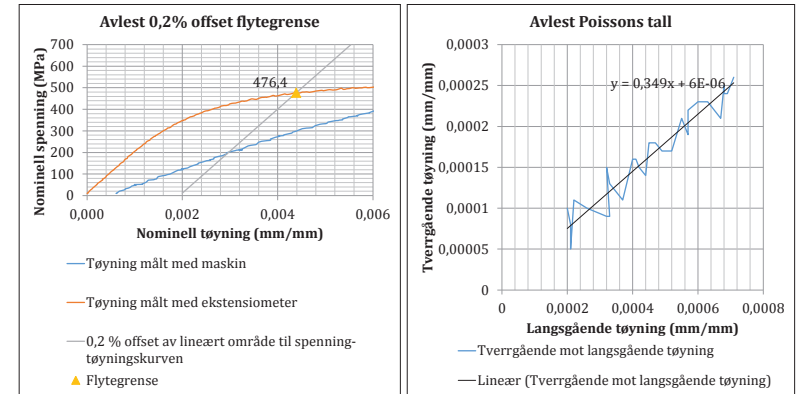
### XD3

Flytegrense (0,2% offset)	488,6 MPa
Strekfasthet	730,6 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	42,8 %
Bruddforlengelse (32 mm)	41,0 %
Kontraksjon	47,7 %
Poissons tall	0,330
E-modul	189,9 GPa
Temperatur	24,2 °C



### XD4

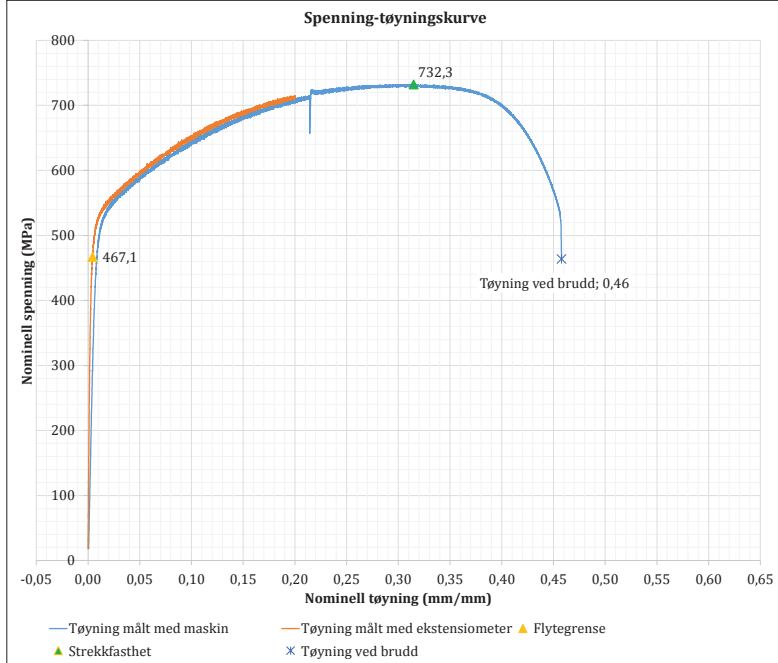
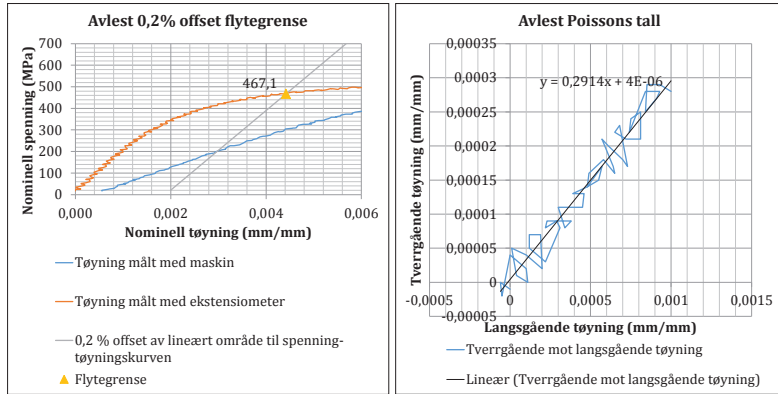
Flytegrense (0,2% offset)	476,4 MPa
Strekfasthet	734,3 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	43,3 %
Bruddforlengelse (32 mm)	42,9 %
Kontraksjon	46,2 %
Poissons tall	0,349
E-modul	194,7 GPa
Temperatur	23,8 °C





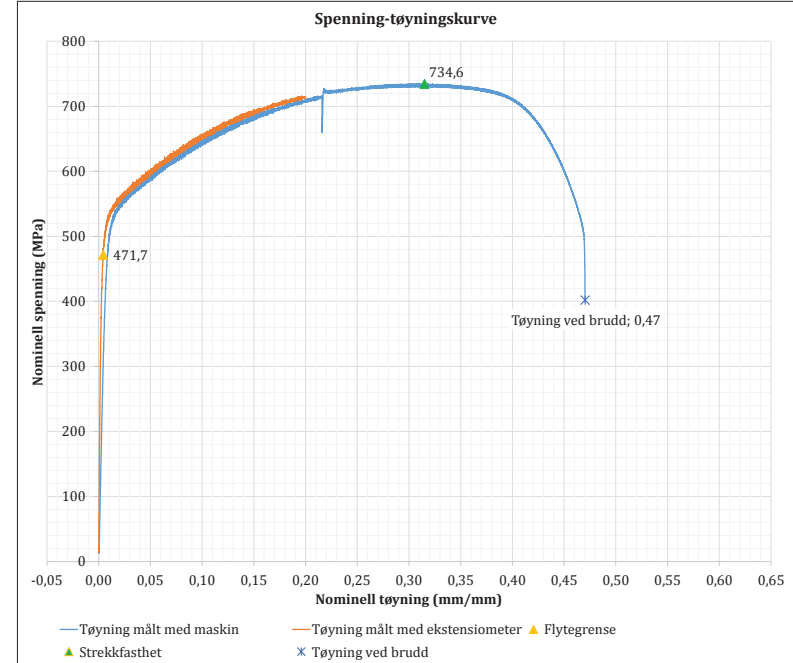
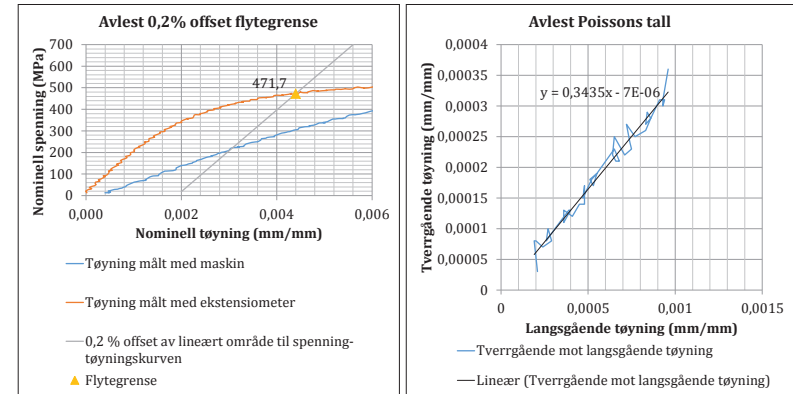
### XD5

Flytegrense (0,2% offset)	467,1 MPa
Strekfasthet	732,3 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	48,1 %
Bruddforlengelse (32 mm)	45,8 %
Kontraksjon	46,3 %
Poissons tall	0,291
E-modul	184,6 GPa
Temperatur	24,2 °C



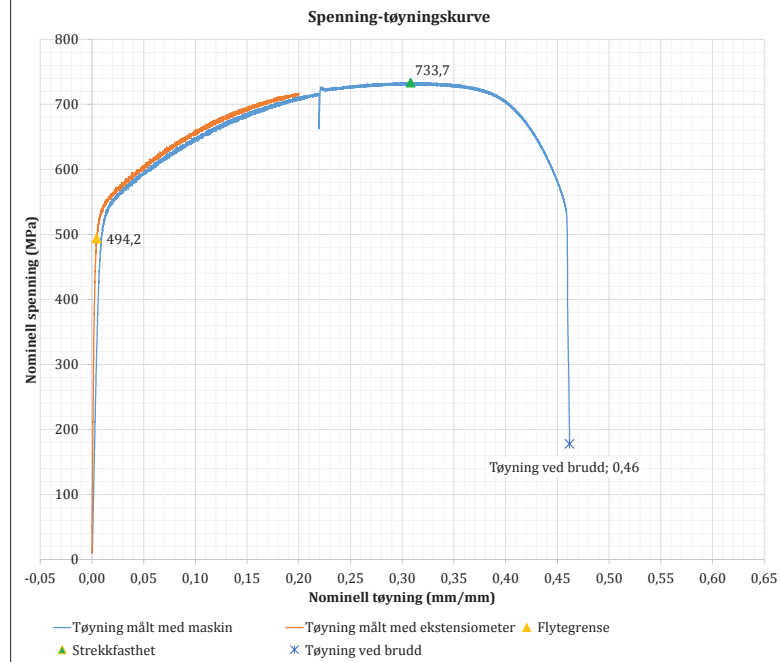
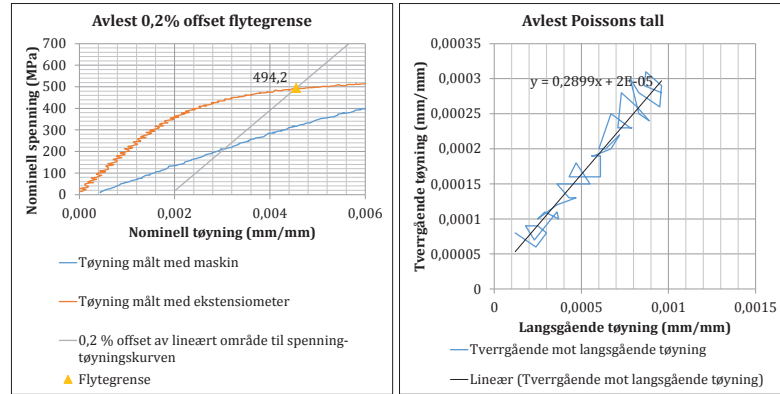
### XD6

Flytegrense (0,2% offset)	471,7 MPa
Strekfasthet	734,6 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	48,3 %
Bruddforlengelse (32 mm)	47,0 %
Kontraksjon	47,3 %
Poissons tall	0,344
E-modul	189,1 GPa
Temperatur	24,4 °C



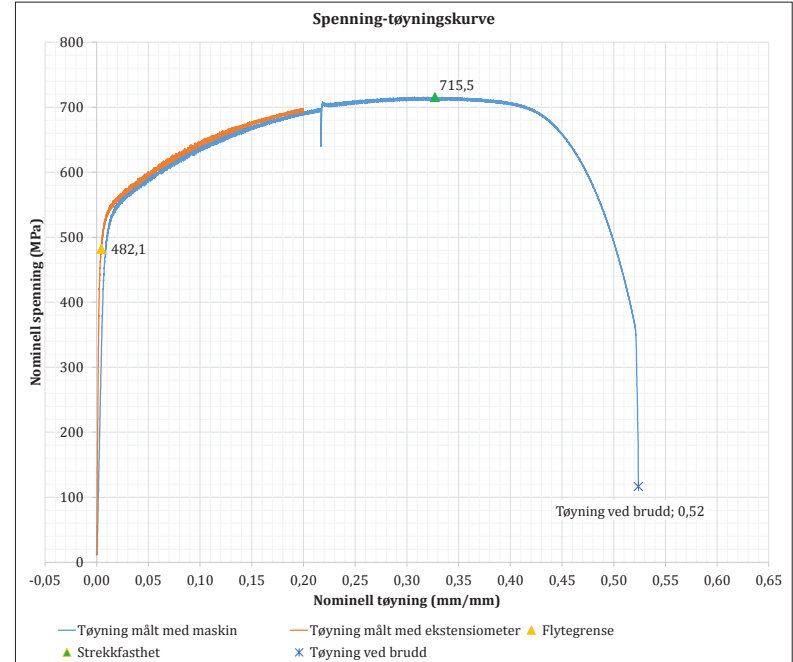
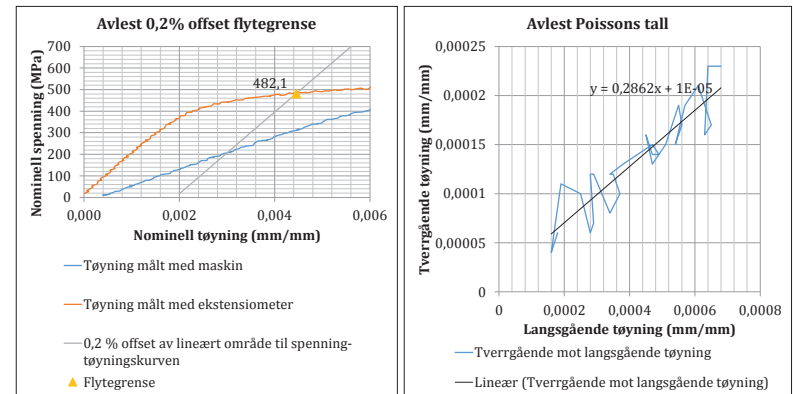
### XD7

Flytegrense (0,2% offset)	494,2 MPa
Strekfasthet	733,7 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	48,5 %
Bruddforlengelse (32 mm)	46,2 %
Kontraksjon	45,9 %
Poissons tall	0,290
E-modul	187,1 GPa
Temperatur	24,4 °C



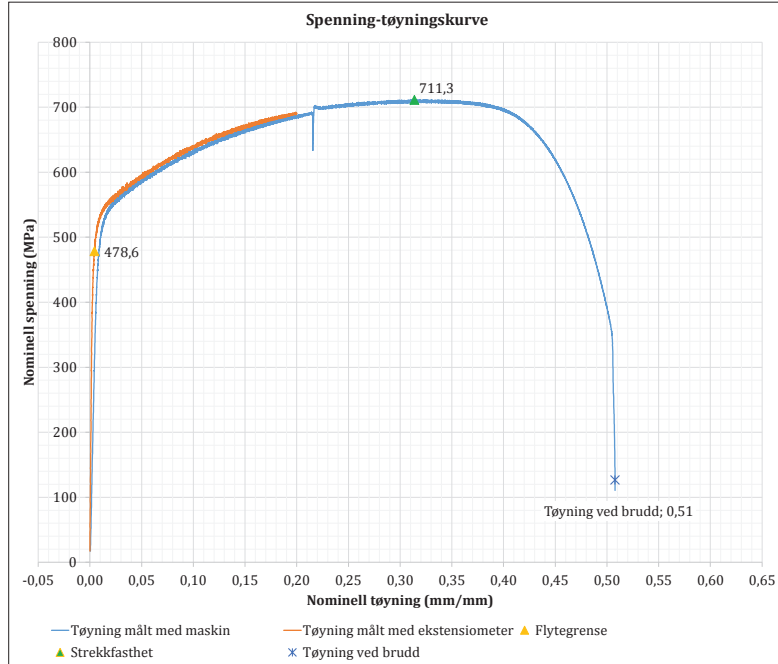
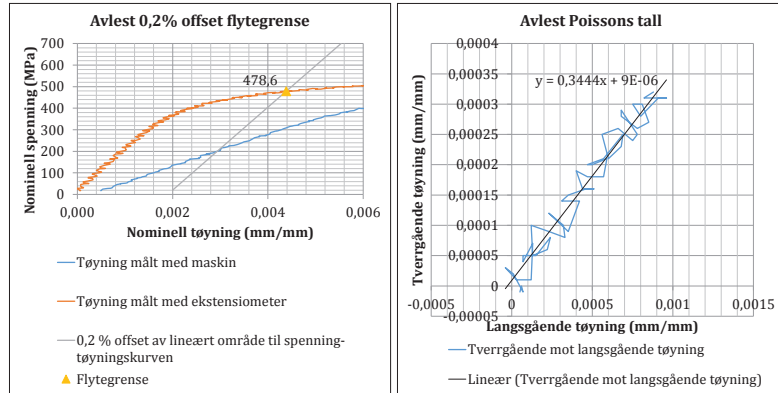
### YA2

Flytegrense (0,2% offset)	482,1 MPa
Strekfasthet	715,5 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	57,2 %
Bruddforlengelse (32 mm)	52,4 %
Kontraksjon	61,8 %
Poissons tall	0,286
E-modul	189,5 GPa
Temperatur	23,5 °C



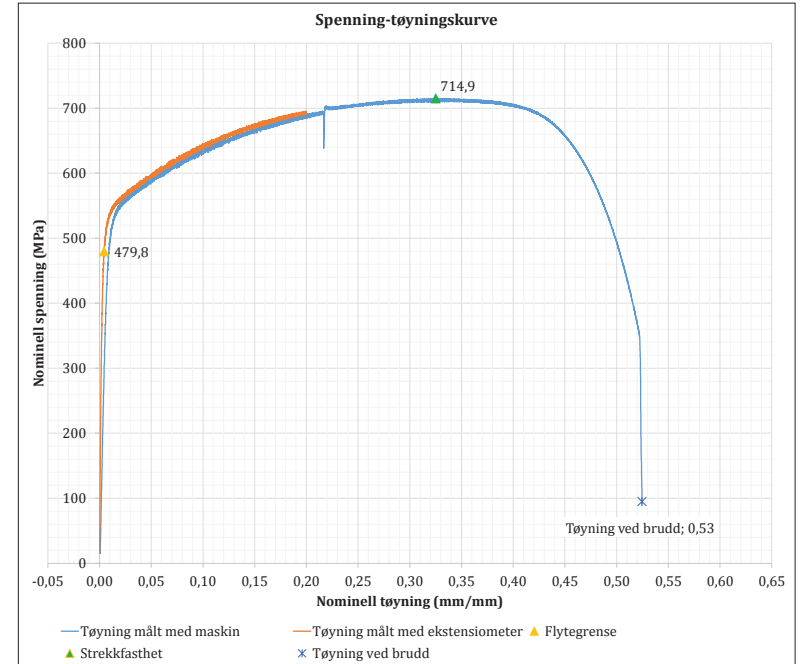
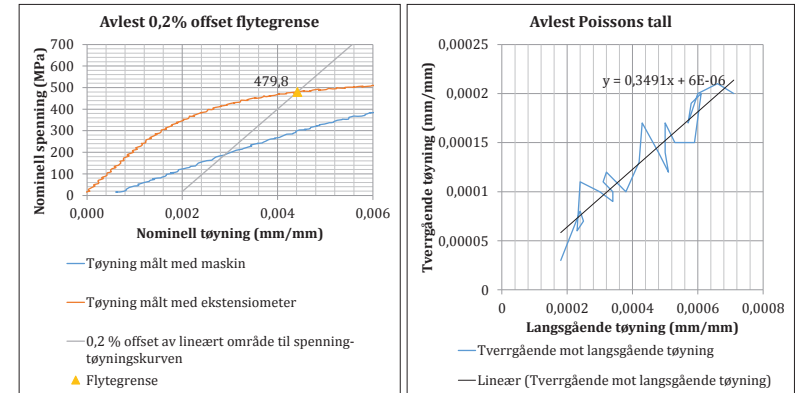
### YA3

Flytegrense (0,2% offset)	478,6 MPa
Strekfasthet	711,3 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	54,3 %
Bruddforlengelse (32 mm)	50,8 %
Kontraksjon	61,7 %
Poissons tall	0,344
E-modul	192,2 GPa
Temperatur	23,8 °C



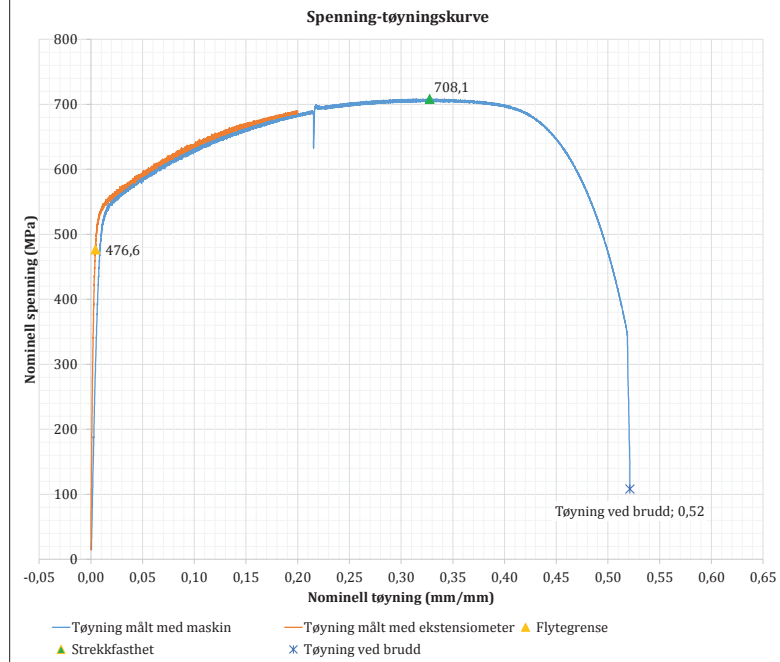
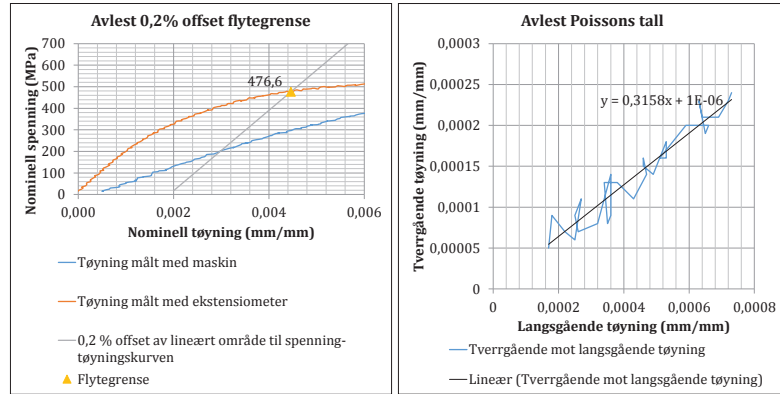
### YA4

Flytegrense (0,2% offset)	479,8 MPa
Strekfasthet	714,9 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	55,2 %
Bruddforlengelse (32 mm)	52,5 %
Kontraksjon	62,1 %
Poissons tall	0,349
E-modul	191,2 GPa
Temperatur	23,7 °C



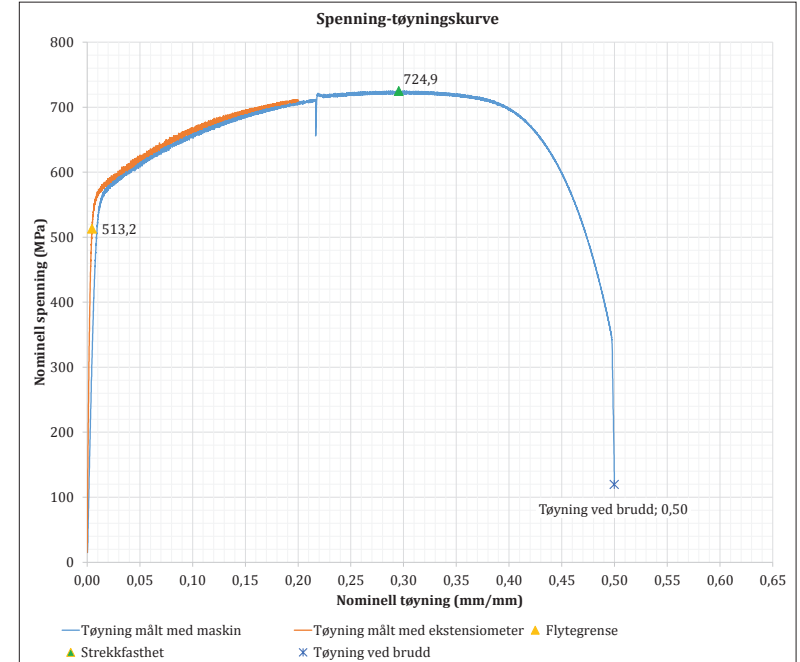
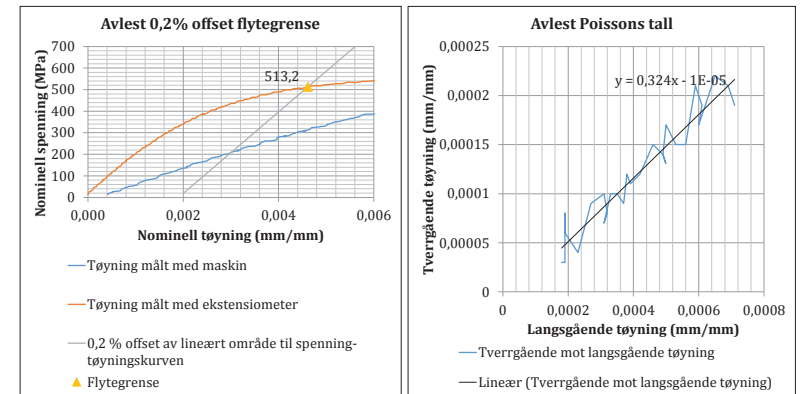
### YA5

Flytegrense (0,2% offset)	476,6 MPa
Strekfasthet	708,1 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	55,6 %
Bruddforlengelse (32 mm)	52,1 %
Kontraksjon	61,8 %
Poissons tall	0,316
E-modul	186,2 GPa
Temperatur	23,5 °C



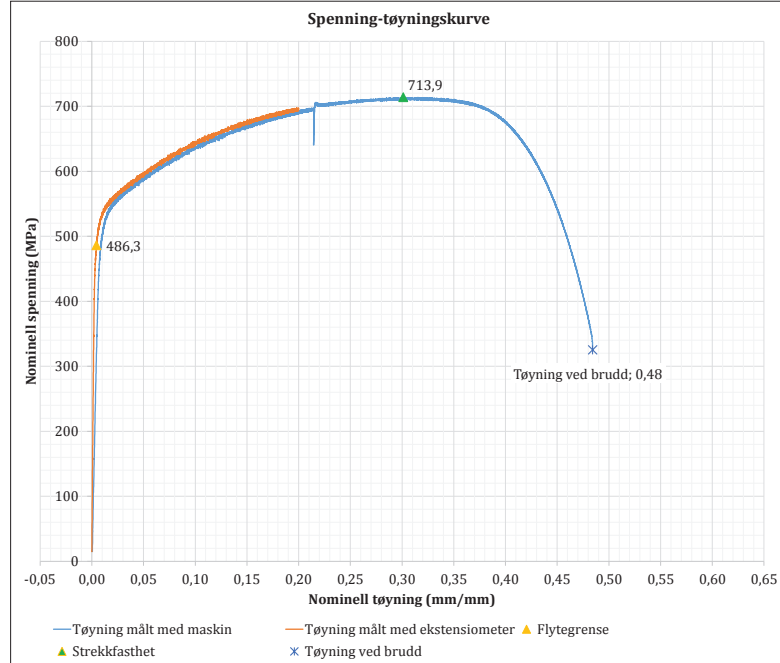
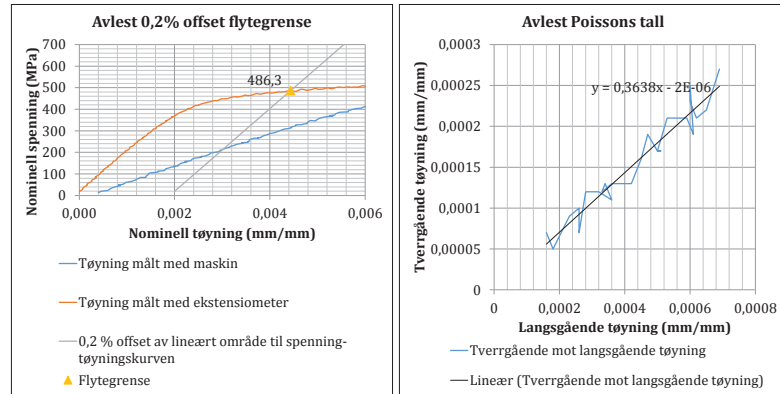
### YA6

Flytegrense (0,2% offset)	513,2 MPa
Strekfasthet	724,9 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	53,2 %
Bruddforlengelse (32 mm)	50,0 %
Kontraksjon	61,8 %
Poissons tall	0,324
E-modul	188,7 GPa
Temperatur	23,6 °C



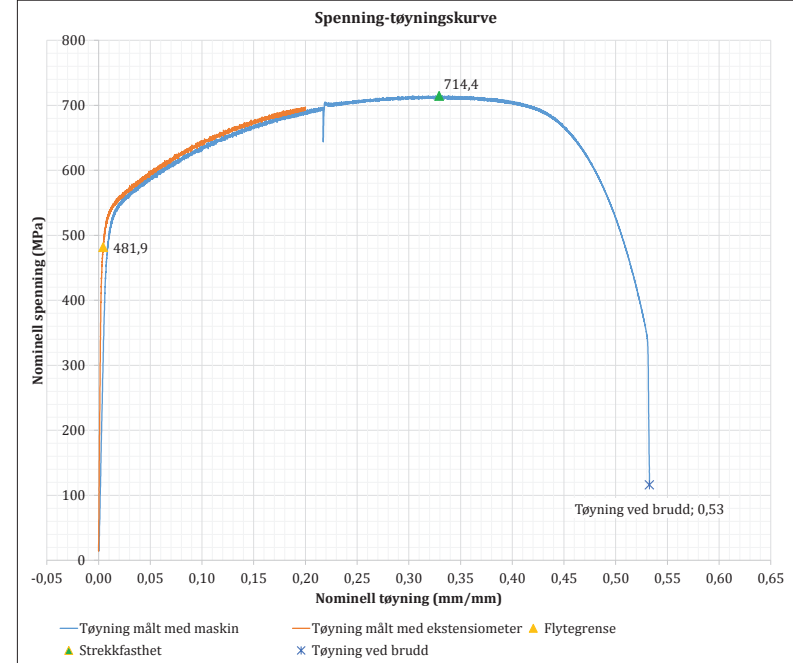
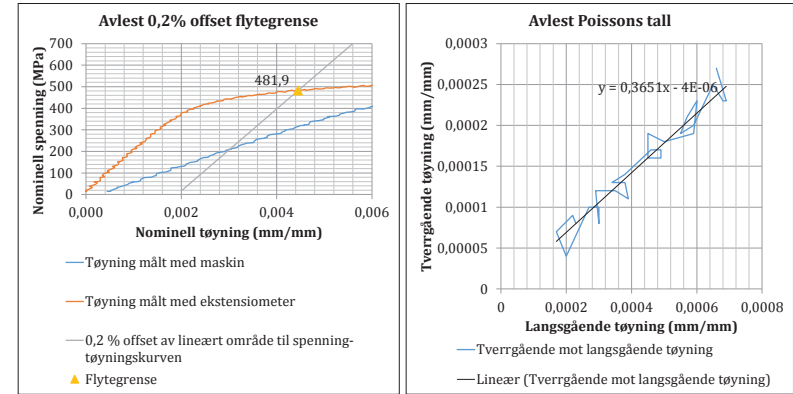
### YB1

Flytegrense (0,2% offset)	486,3 MPa
Strekfasthet	713,9 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	54,9 %
Bruddforlengelse (32 mm)	48,4 %
Kontraksjon	62,0 %
Poissons tall	0,364
E-modul	191,9 GPa
Temperatur	23,7 °C



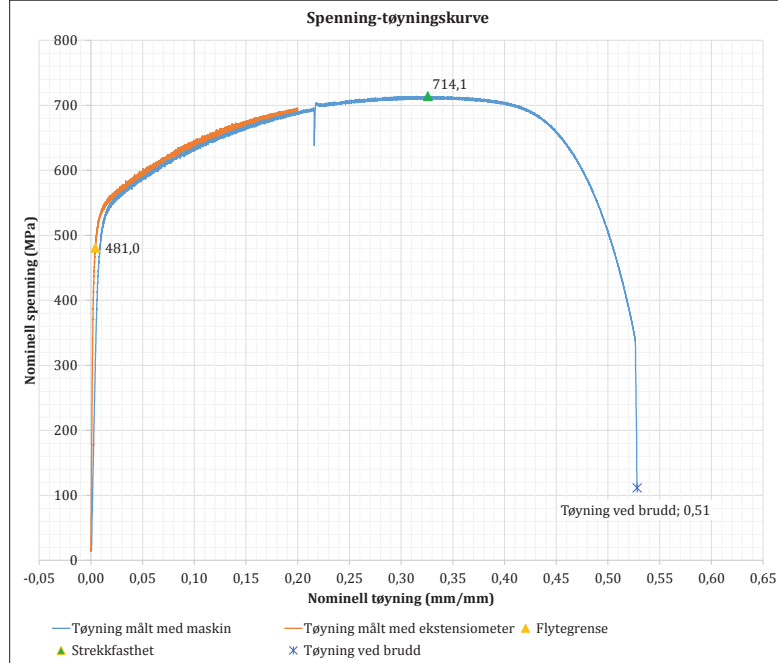
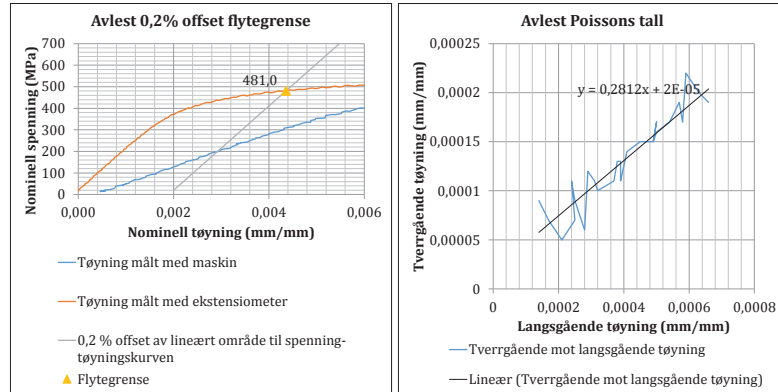
### YB2

Flytegrense (0,2% offset)	481,9 MPa
Strekfasthet	714,4 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	52,9 %
Bruddforlengelse (32 mm)	53,3 %
Kontraksjon	62,3 %
Poissons tall	0,365
E-modul	189,9 GPa
Temperatur	23,7 °C



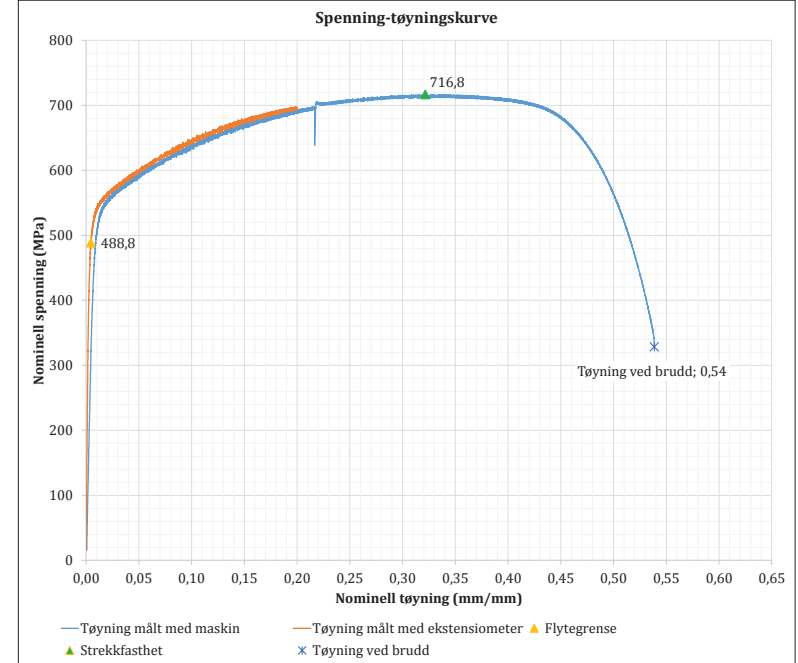
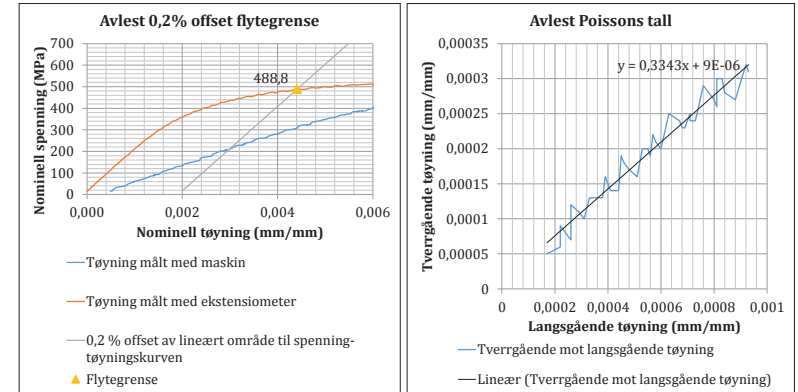
### YB3

Flytegrense (0,2% offset)	481,0 MPa
Strekfasthet	714,1 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	57,2 %
Bruddforlengelse (32 mm)	52,8 %
Kontraksjon	62,1 %
Poissons tall	0,281
E-modul	195,3 GPa
Temperatur	23,5 °C



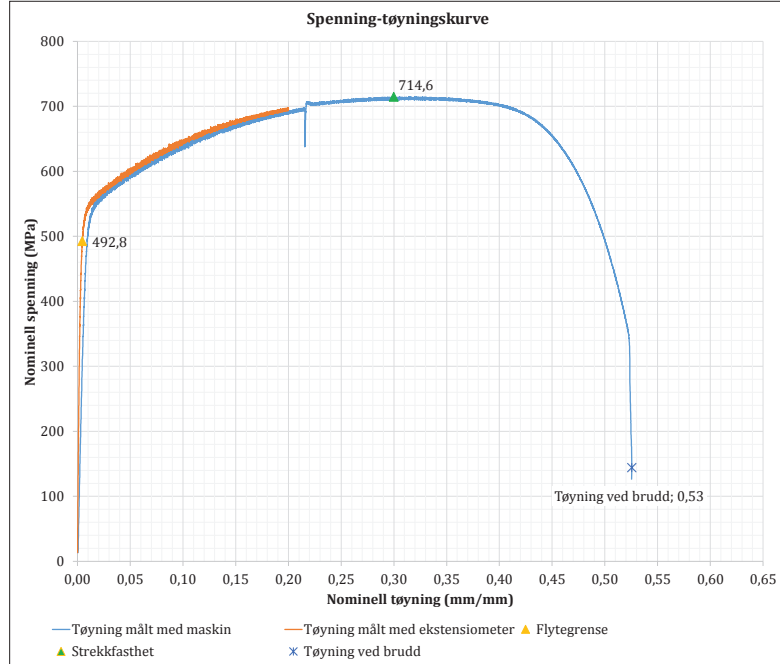
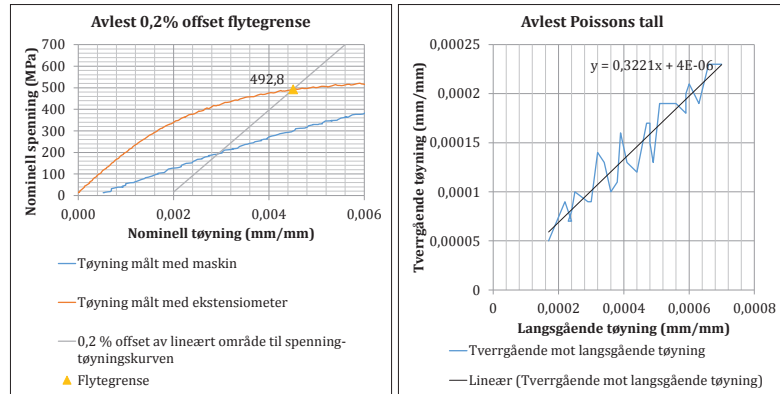
### YB4

Flytegrense (0,2% offset)	488,8 MPa
Strekfasthet	716,8 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	57,4 %
Bruddforlengelse (32 mm)	53,9 %
Kontraksjon	61,5 %
Poissons tall	0,334
E-modul	195,9 GPa
Temperatur	23,4 °C



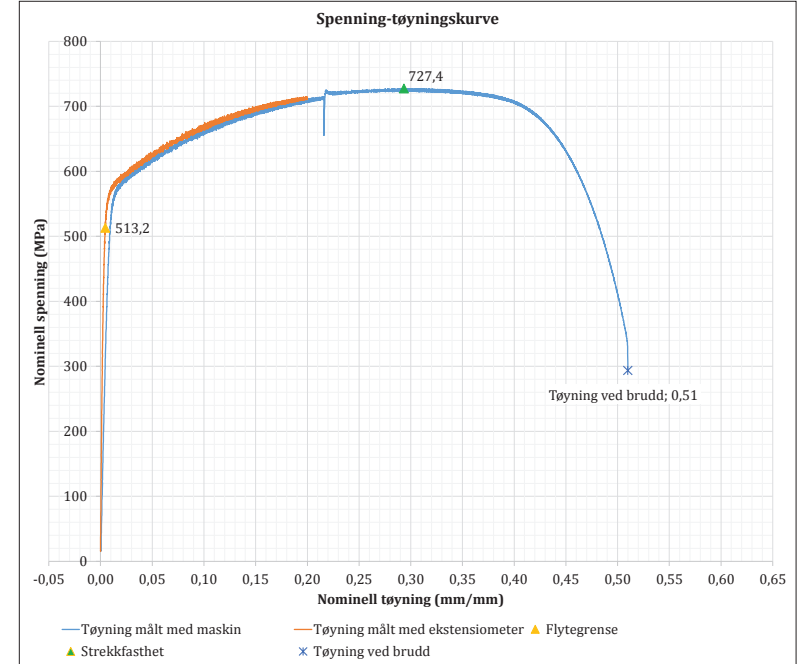
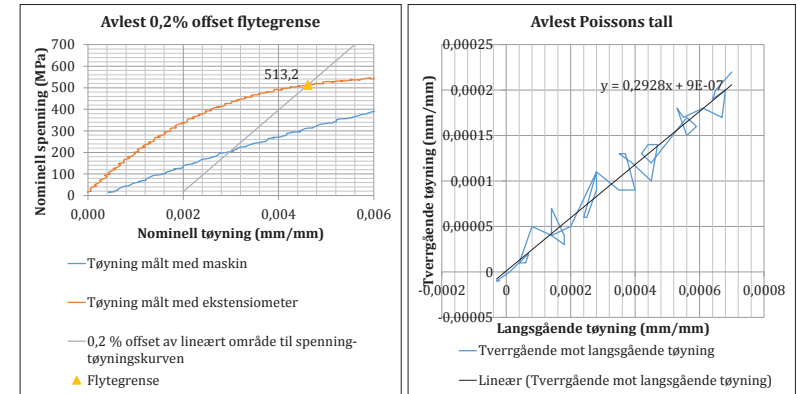
### YB5

Flytegrense (0,2% offset)	492,8 MPa
Strekfasthet	714,6 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	56,2 %
Bruddforlengelse (32 mm)	52,6 %
Kontraksjon	62,8 %
Poissons tall	0,322
E-modul	189,9 GPa
Temperatur	23,9 °C



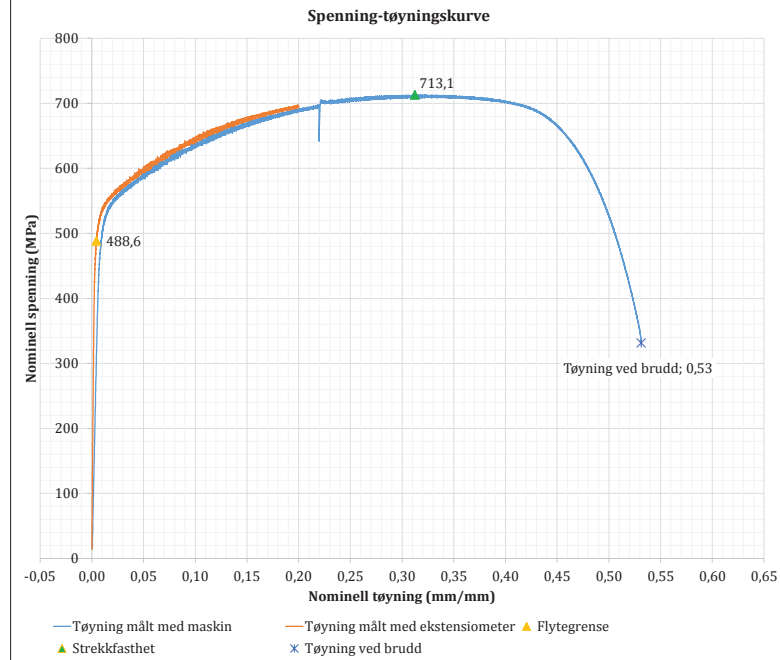
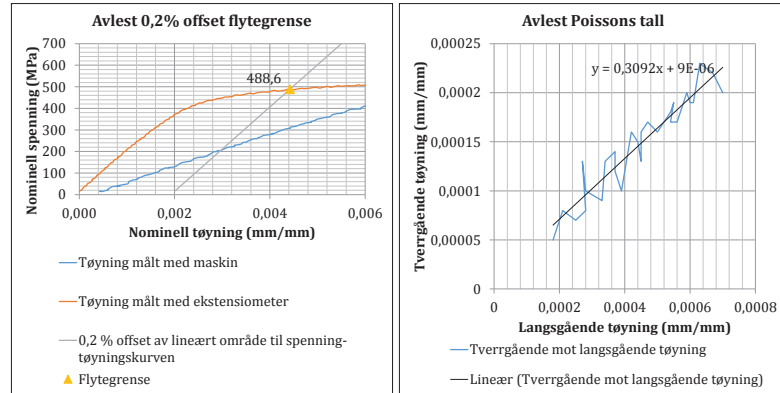
### YB6

Flytegrense (0,2% offset)	513,2 MPa
Strekfasthet	727,4 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	55,6 %
Bruddforlengelse (32 mm)	51,0 %
Kontraksjon	61,7 %
Poissons tall	0,293
E-modul	189,5 GPa
Temperatur	23,9 °C



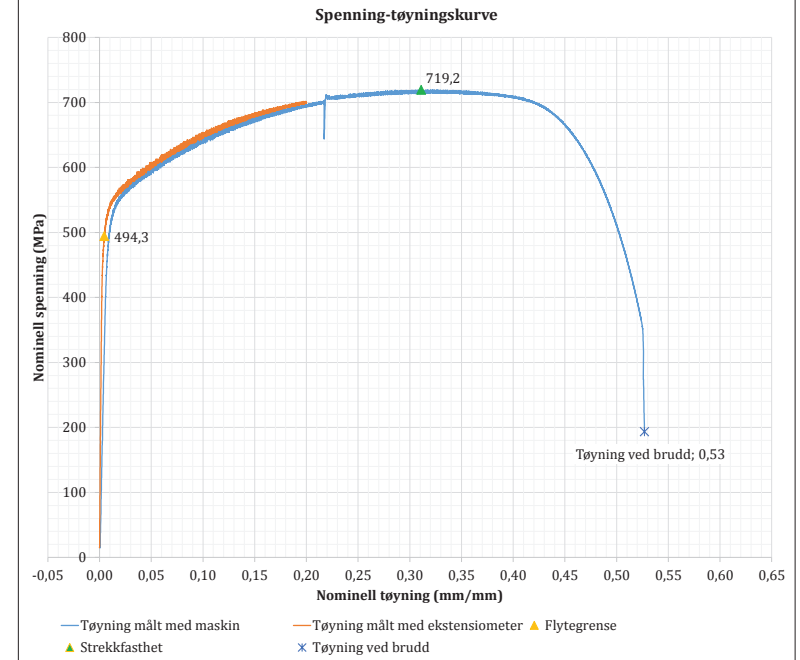
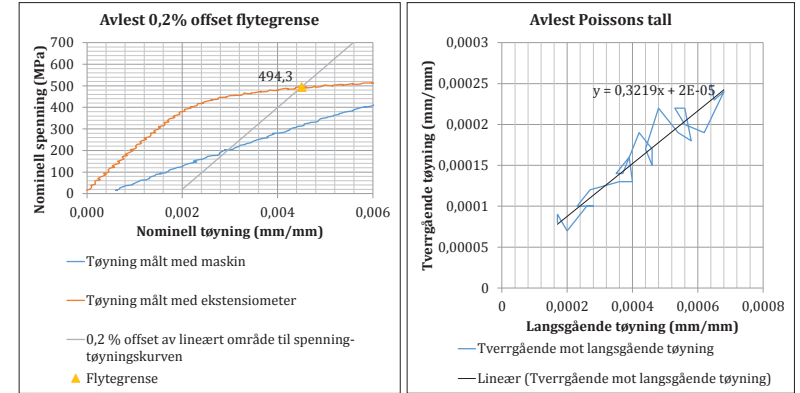
### YC1

Flytegrense (0,2% offset)	488,6 MPa
Strekfasthet	713,1 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	56,8 %
Bruddforlengelse (32 mm)	53,1 %
Kontraksjon	58,0 %
Poissons tall	0,309
E-modul	195,9 GPa
Temperatur	23,6 °C



### YC2

Flytegrense (0,2% offset)	494,3 MPa
Strekfasthet	719,2 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	56,7 %
Bruddforlengelse (32 mm)	52,7 %
Kontraksjon	58,9 %
Poissons tall	0,322
E-modul	189,4 GPa
Temperatur	23,4 °C

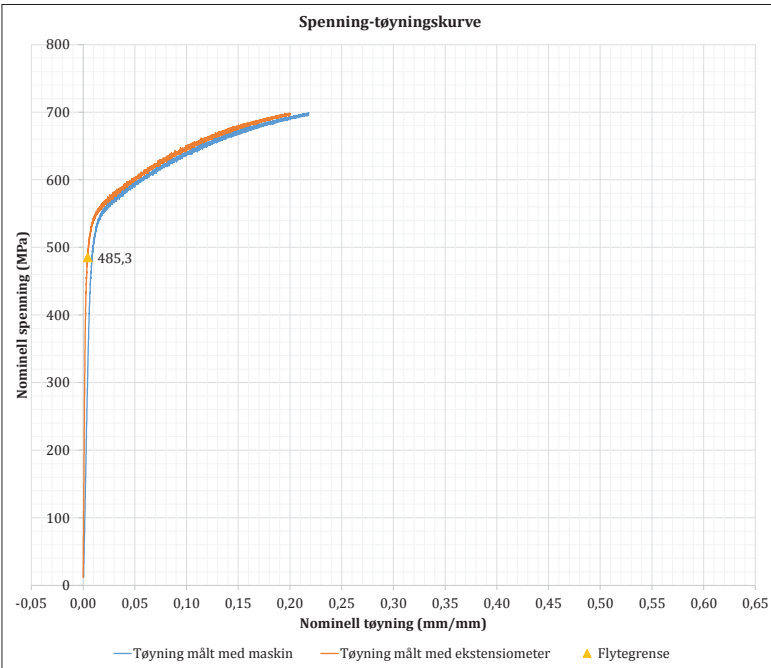
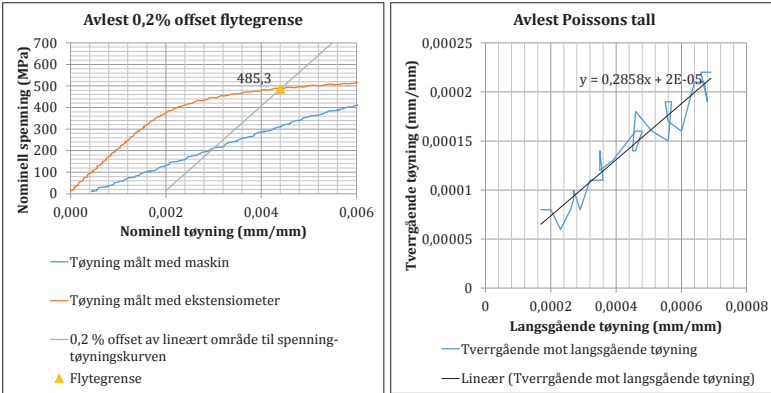




### YC3

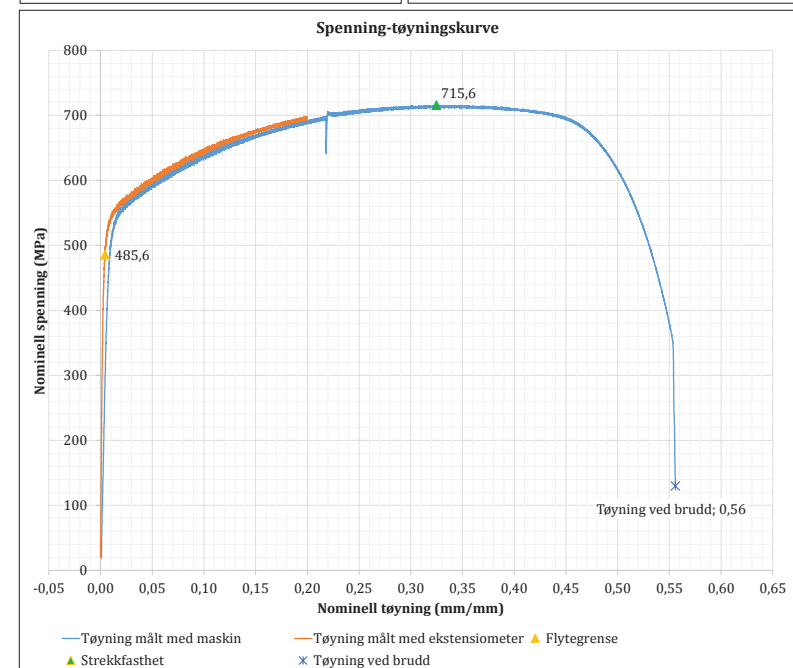
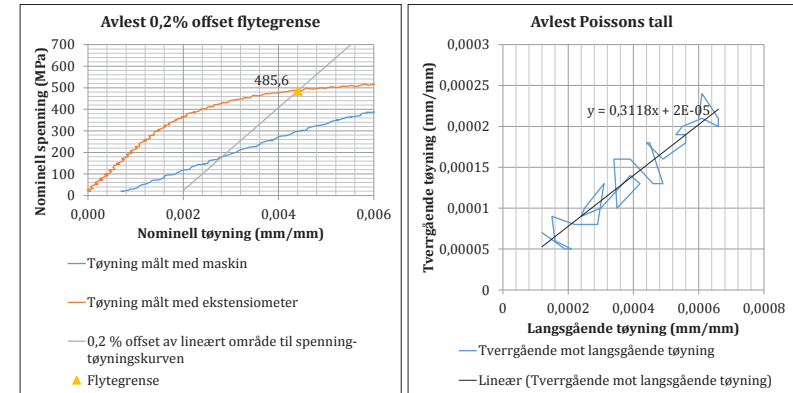
Flytegrense (0,2% offset)	485,3 MPa
Strekfasthet	- MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	- %
Bruddforlengelse (32 mm)	- %
Kontraksjon	- %
Poissons tall	0,286
E-modul	196,4 GPa
Temperatur	23,6 °C

*Kommentar: Test feilet da ekstensiometrene ble tatt av. Overtredelse av grense for langsgående ekstensiometer.*



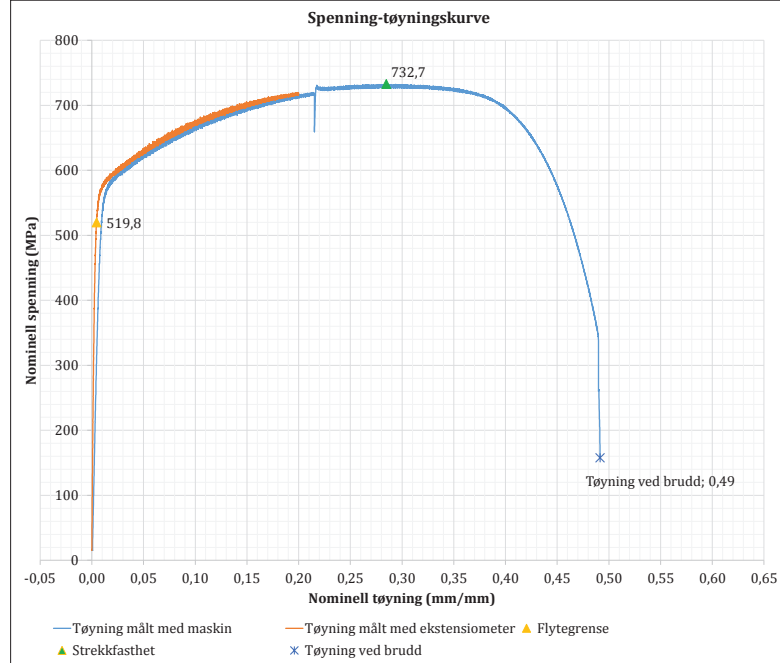
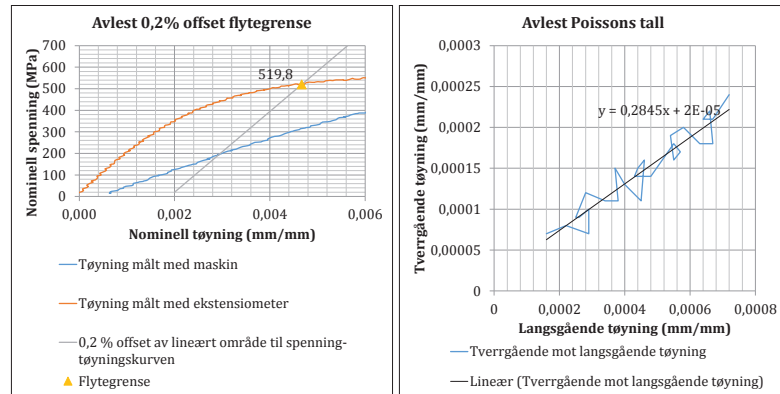
### YC4

Flytegrense (0,2% offset)	485,6 MPa
Strekfasthet	715,6 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	60,8 %
Bruddforlengelse (32 mm)	55,6 %
Kontraksjon	60,1 %
Poissons tall	0,312
E-modul	192,2 GPa
Temperatur	23,7 °C



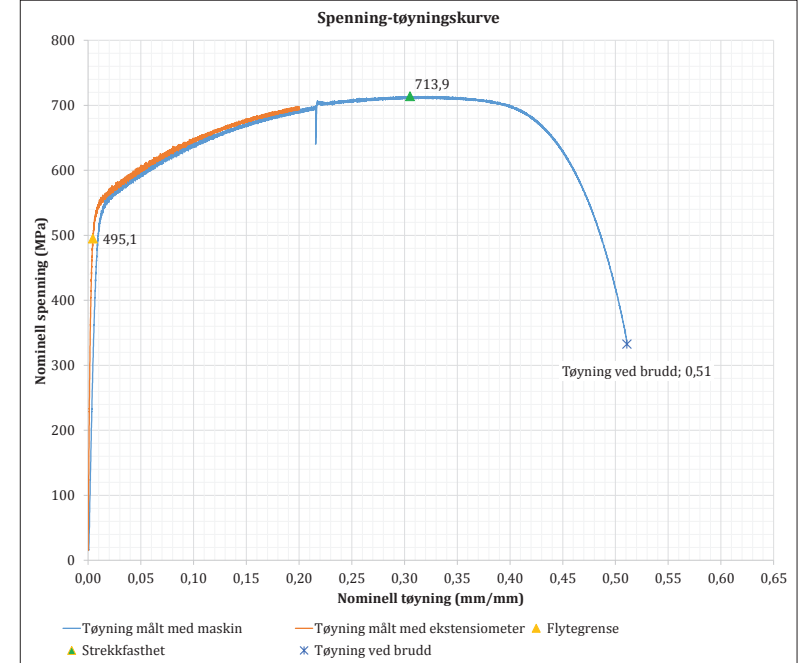
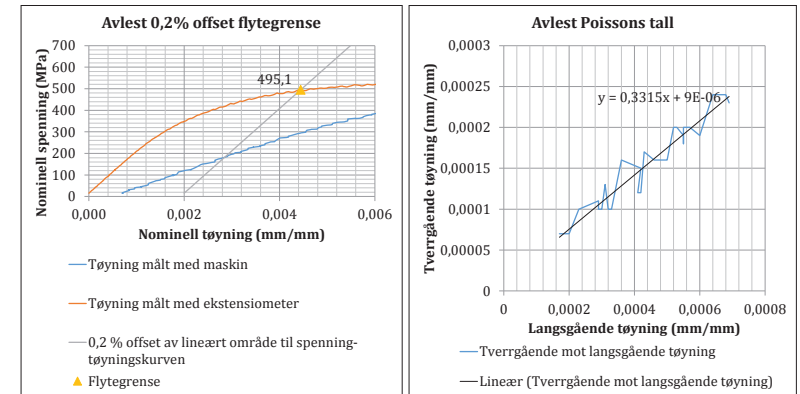
### YC5

Flytegrense (0,2% offset)	519,8 MPa
Strekfasthet	732,7 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	53,7 %
Bruddforlengelse (32 mm)	49,1 %
Kontraksjon	61,3 %
Poissons tall	0,285
E-modul	187,3 GPa
Temperatur	23,5 °C



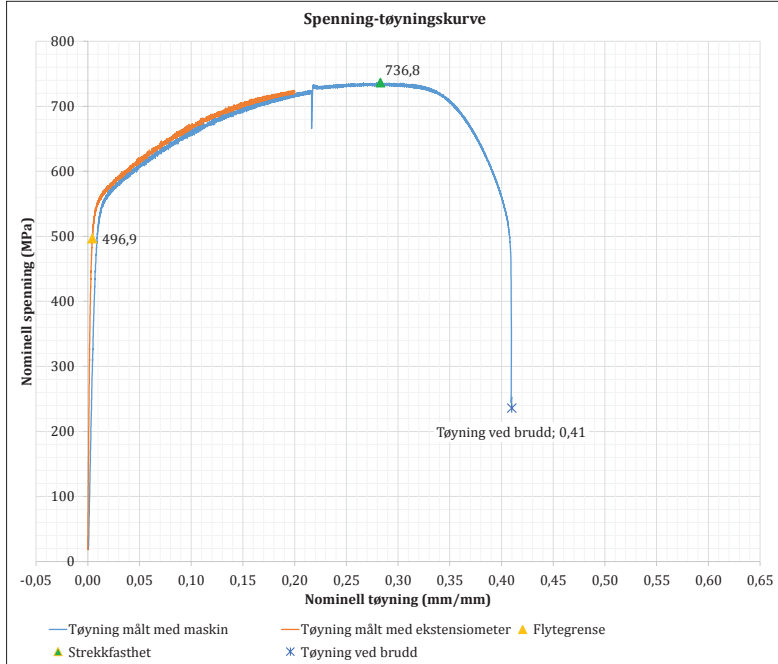
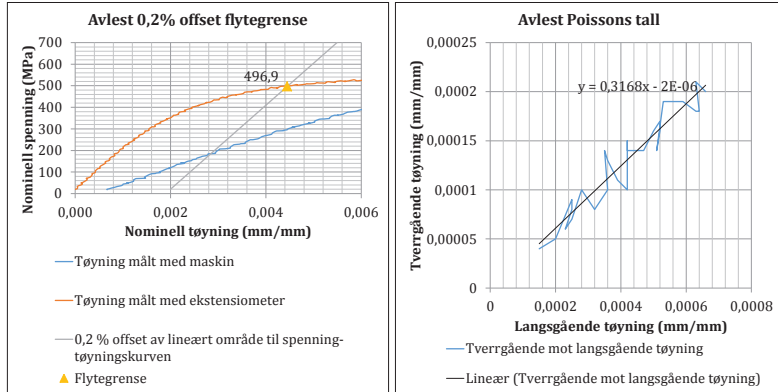
### YC6

Flytegrense (0,2% offset)	495,1 MPa
Strekfasthet	713,9 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	56,1 %
Bruddforlengelse (32 mm)	51,1 %
Kontraksjon	61,5 %
Poissons tall	0,332
E-modul	196,2 GPa
Temperatur	23,4 °C



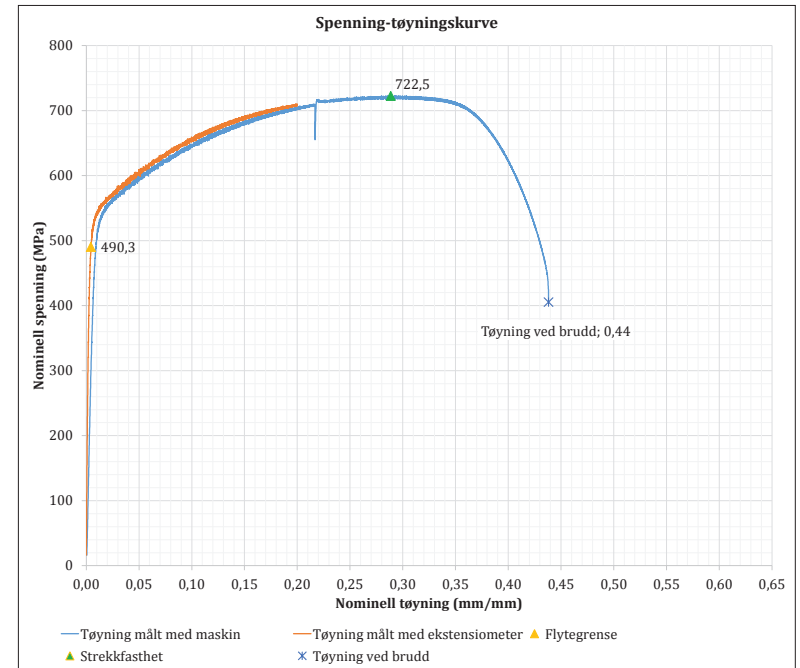
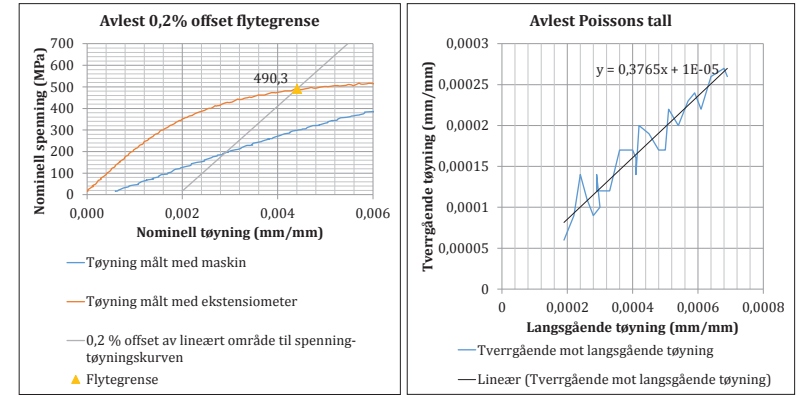
### YD1

Flytegrense (0,2% offset)	496,9 MPa
Strekfasthet	736,8 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	42,9 %
Bruddforlengelse (32 mm)	41,0 %
Kontraksjon	51,8 %
Poissons tall	0,317
E-modul	194,7 GPa
Temperatur	24,1 °C



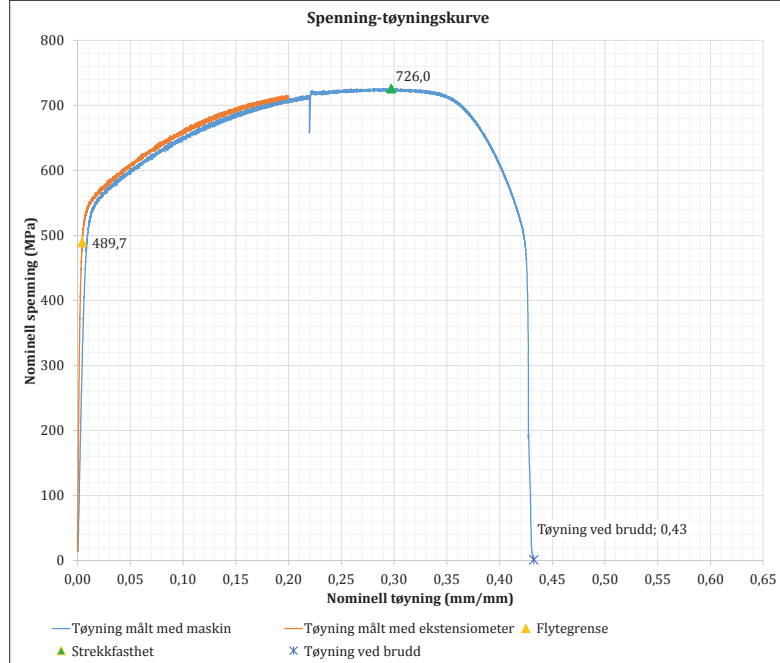
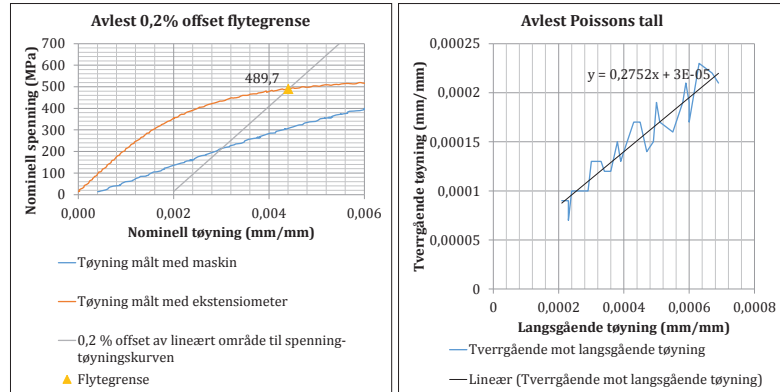
### YD2

Flytegrense (0,2% offset)	490,3 MPa
Strekfasthet	722,5 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	45,4 %
Bruddforlengelse (32 mm)	43,8 %
Kontraksjon	53,0 %
Poissons tall	0,377
E-modul	196,7 GPa
Temperatur	24,1 °C



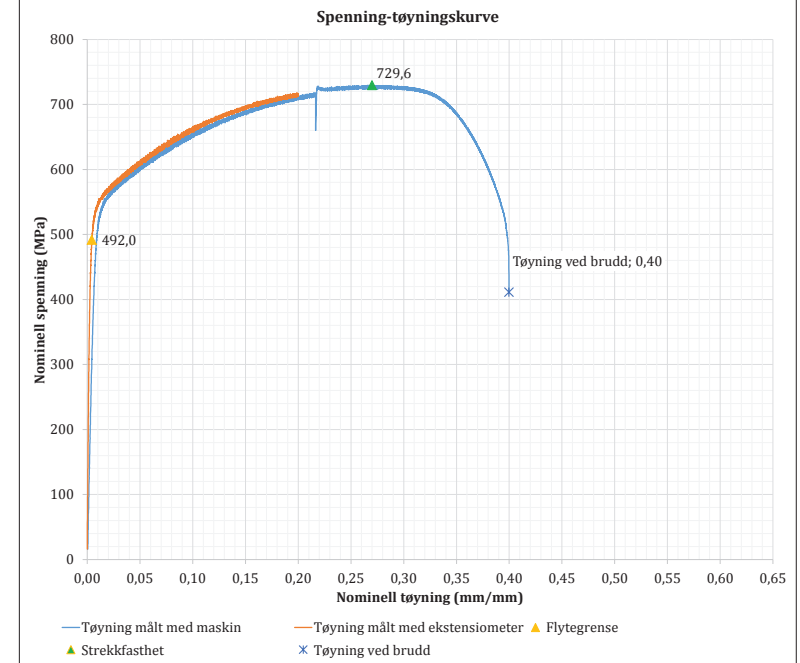
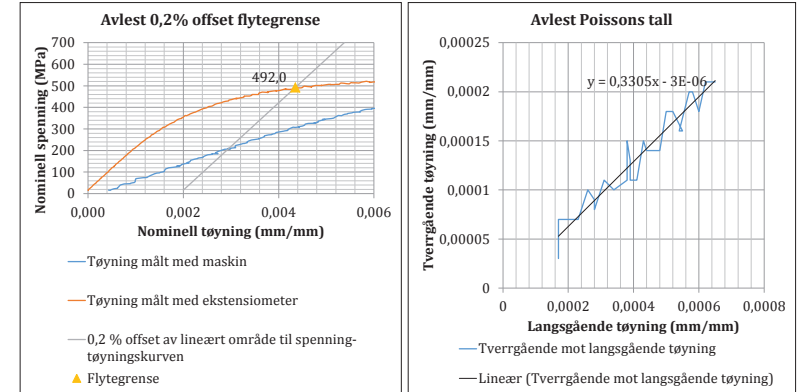
### YD3

Flytegrense (0,2% offset)	489,7 MPa
Strekfasthet	726,0 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	45,5 %
Bruddforlengelse (32 mm)	43,2 %
Kontraksjon	52,4 %
Poissons tall	0,275
E-modul	197,2 GPa
Temperatur	24,1 °C



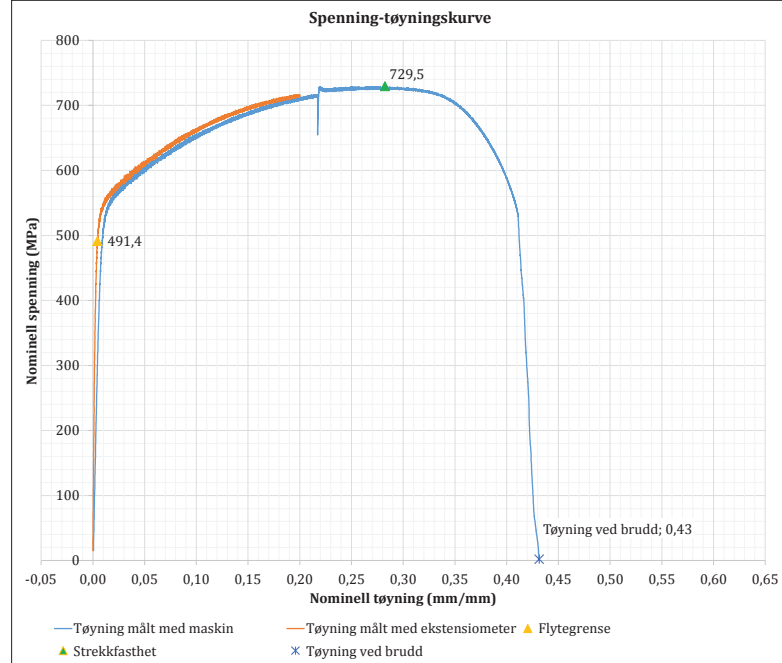
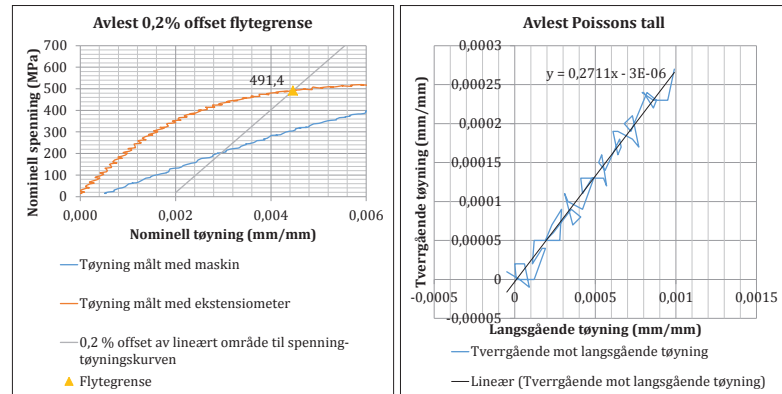
### YD4

Flytegrense (0,2% offset)	492,0 MPa
Strekfasthet	729,6 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	42,8 %
Bruddforlengelse (32 mm)	40,0 %
Kontraksjon	53,2 %
Poissons tall	0,331
E-modul	202,2 GPa
Temperatur	23,3 °C



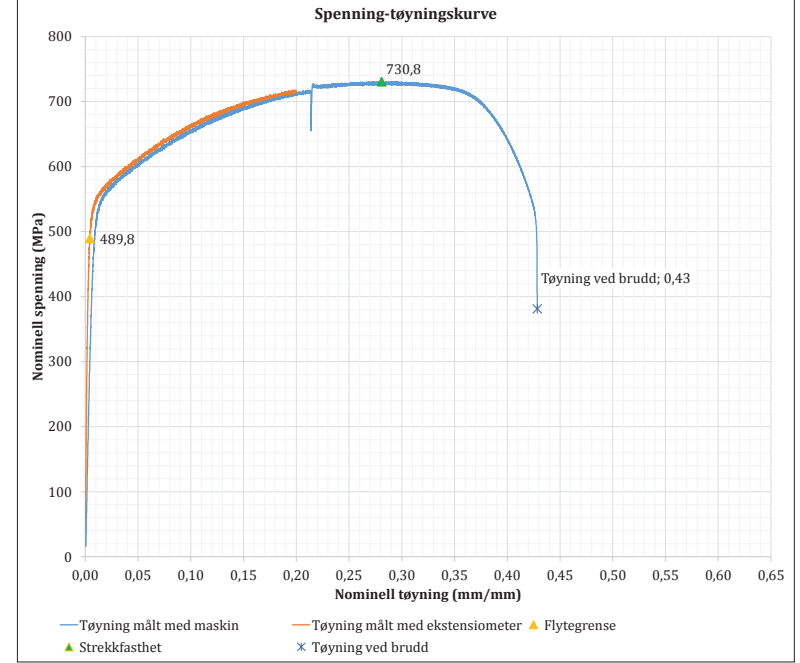
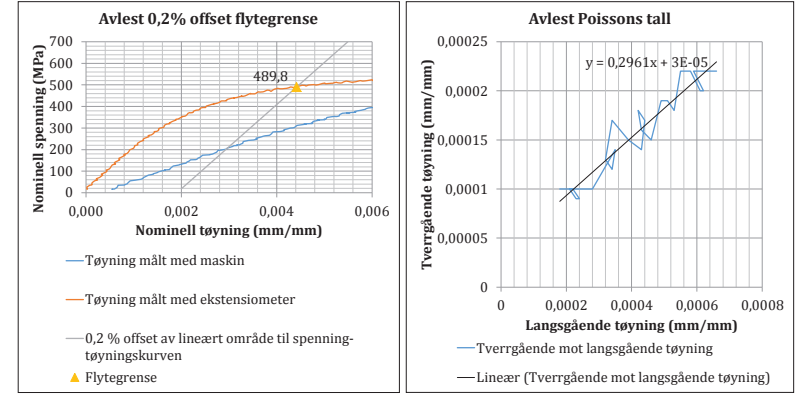
### YD5

Flytegrense (0,2% offset)	491,4 MPa
Strekfasthet	729,5 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	46,0 %
Bruddforlengelse (32 mm)	43,2 %
Kontraksjon	50,9 %
Poissons tall	0,271
E-modul	192,0 GPa
Temperatur	23,7 °C



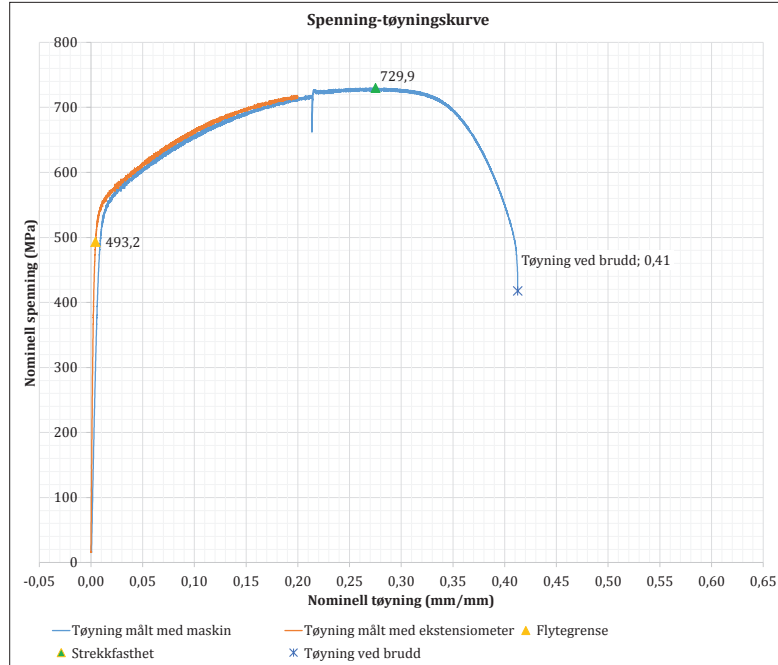
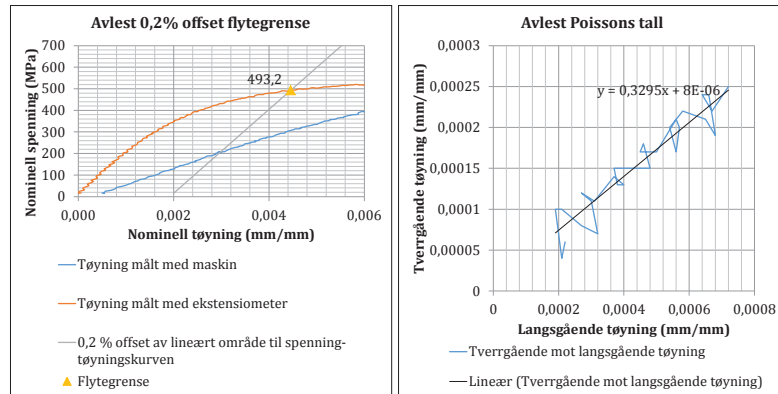
### YD6

Flytegrense (0,2% offset)	489,8 MPa
Strekfasthet	730,8 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	44,8 %
Bruddforlengelse (32 mm)	42,9 %
Kontraksjon	52,4 %
Poissons tall	0,296
E-modul	195,3 GPa
Temperatur	23,2 °C



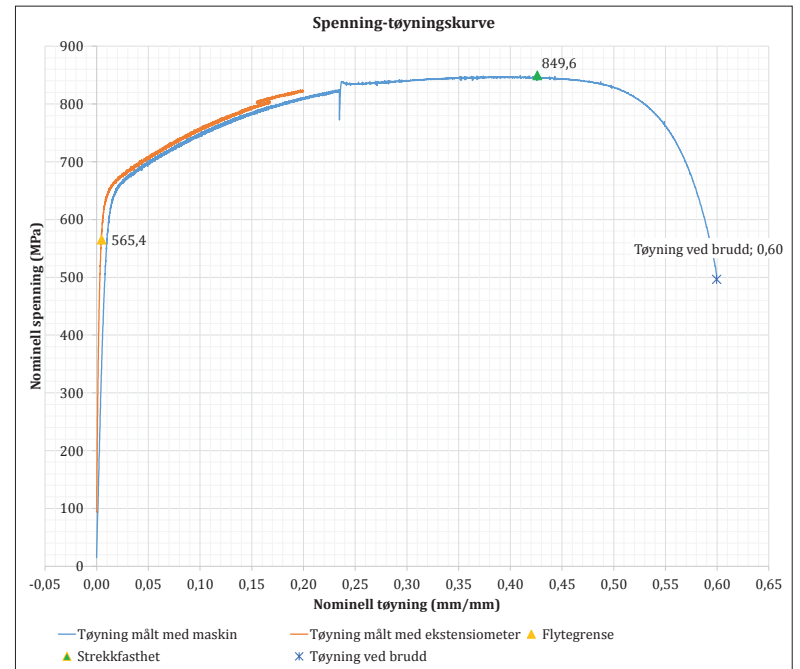
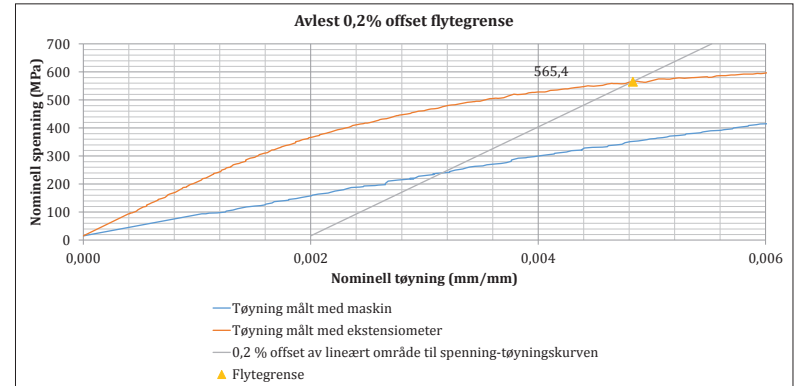
## YD7

Flytegrense (0,2% offset)	493,2 MPa
Strekfasthet	729,9 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	42,7 %
Bruddforlengelse (32 mm)	41,3 %
Kontraksjon	51,8 %
Poissons tall	0,330
E-modul	194,4 GPa
Temperatur	23,3 °C



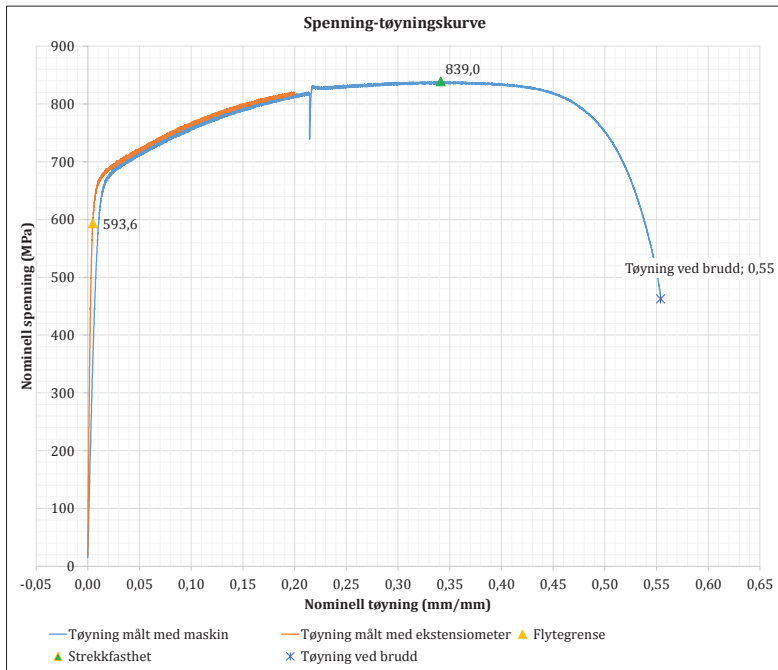
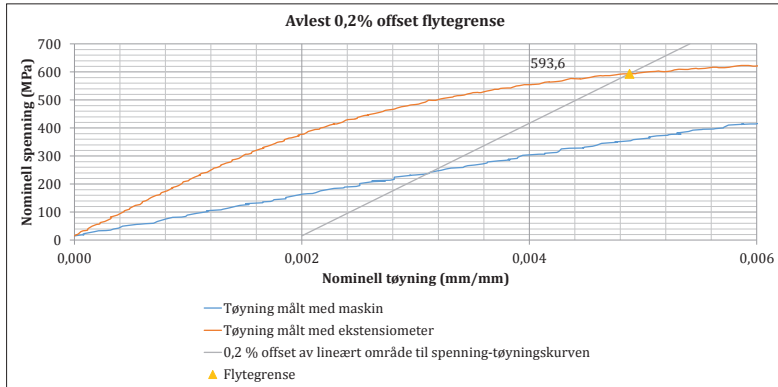
## XS2

Flytegrense (0,2% offset)	565,4 MPa	
Strekfasthet	849,6 MPa	Kommentar:
Bruddforlengelse (25 mm)	65,9 %	
Bruddforlengelse (32 mm)	60,0 %	Ekstensiometer glipper ved 0,17 mm/mm tøyning
Kontraksjon	55,2 %	
E-modul	194,3 GPa	
Temperatur	-60 °C	

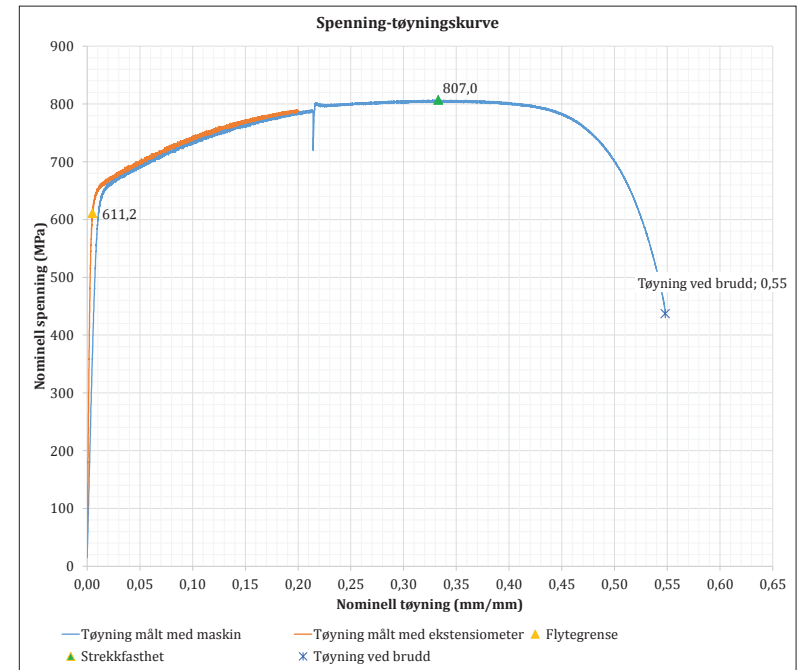
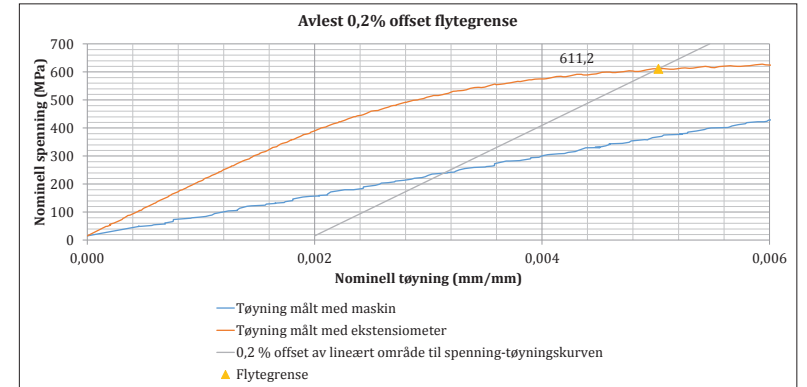


**XS3**

Flytegrense (0,2% offset)	593,6 MPa
Strekfasthet	839,0 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	60,1 %
Bruddforlengelse (32 mm)	55,4 %
Kontraksjon	58,1 %
E-modul	200,8 GPa
Temperatur	-46 °C

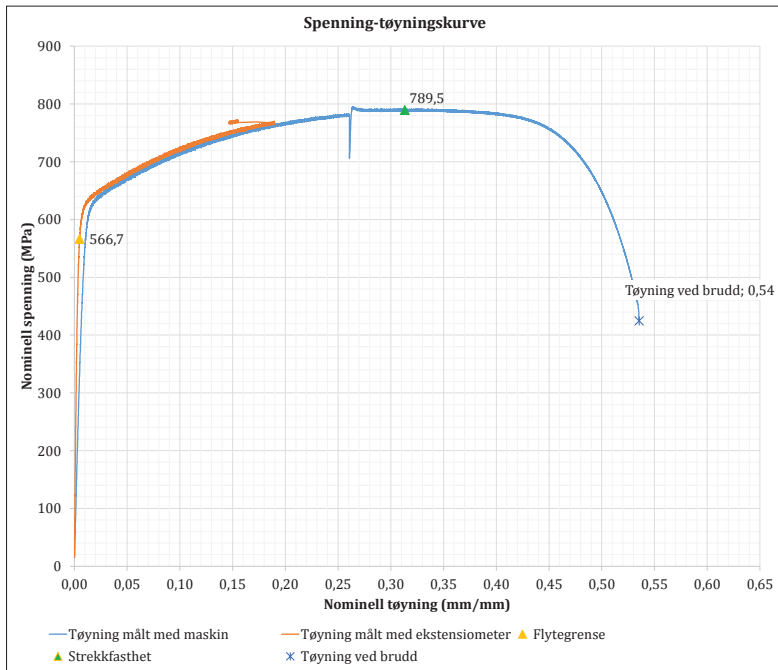
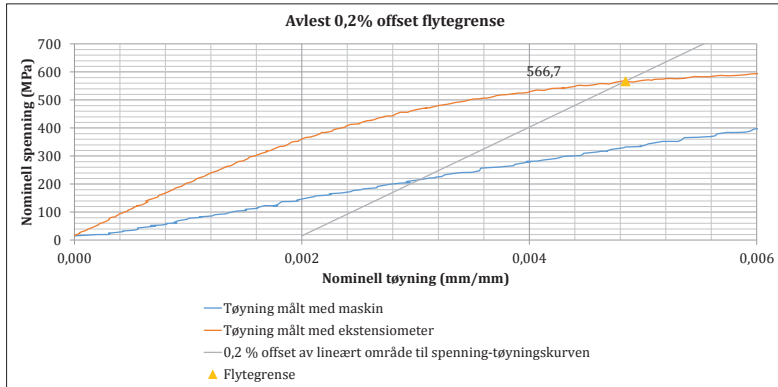
**XS4**

Flytegrense (0,2% offset)	611,2 MPa
Strekfasthet	807,0 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	56,3 %
Bruddforlengelse (32 mm)	54,8 %
Kontraksjon	56,6 %
E-modul	197,2 GPa
Temperatur	-29 °C



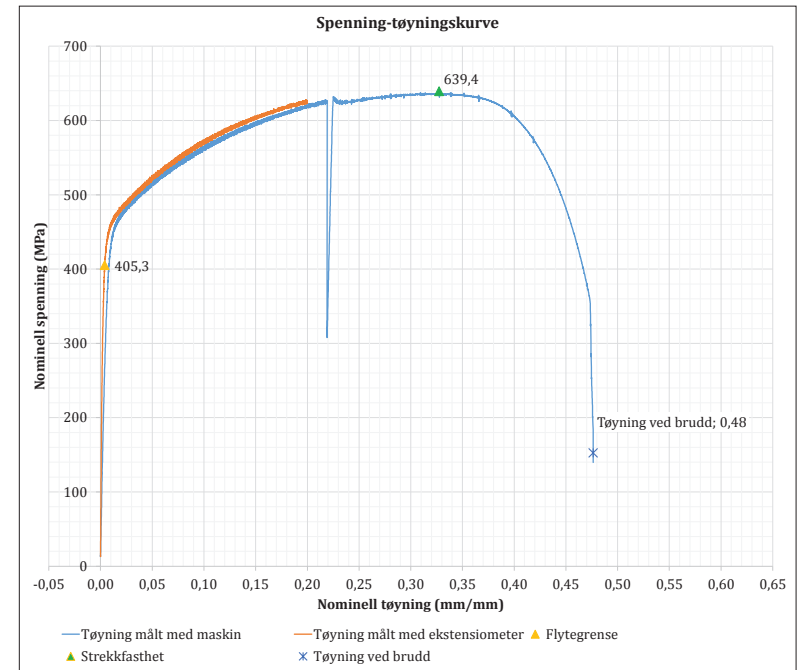
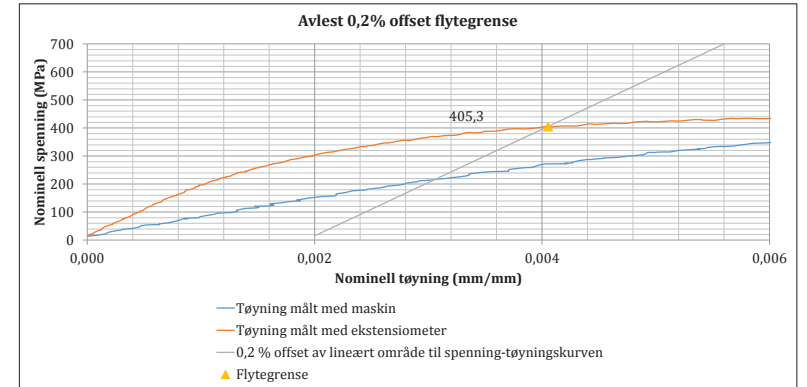
## XS5

Flytegrense (0,2% offset)	566,7 MPa	
Strekfasthet	789,5 MPa	Kommentar:
Bruddforlengelse (25 mm)	59,2 %	
Bruddforlengelse (32 mm)	53,5 %	Ekstensiometer slipper ved 0,19 mm/mm tøyning
Kontraksjon	57,8 %	
E-modul	193,8 GPa	
Temperatur	-18 °C	



## XT2

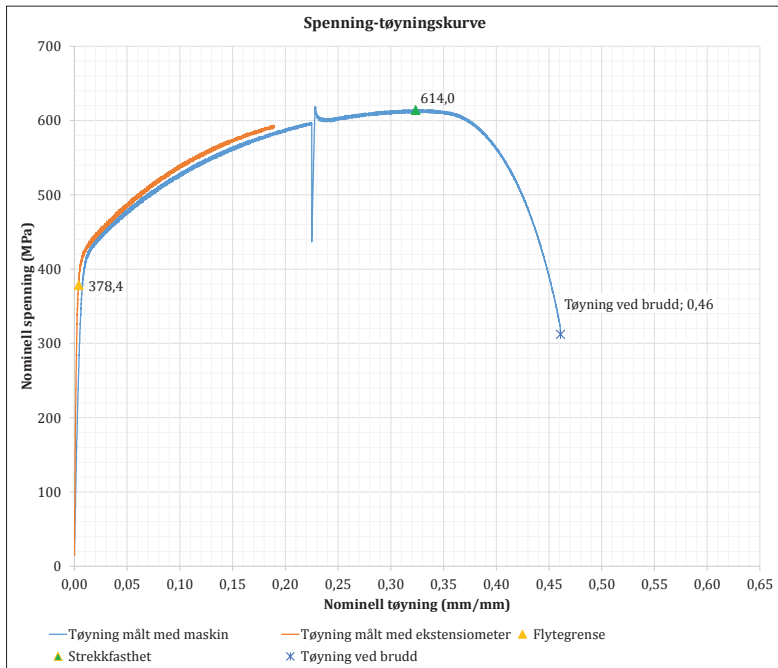
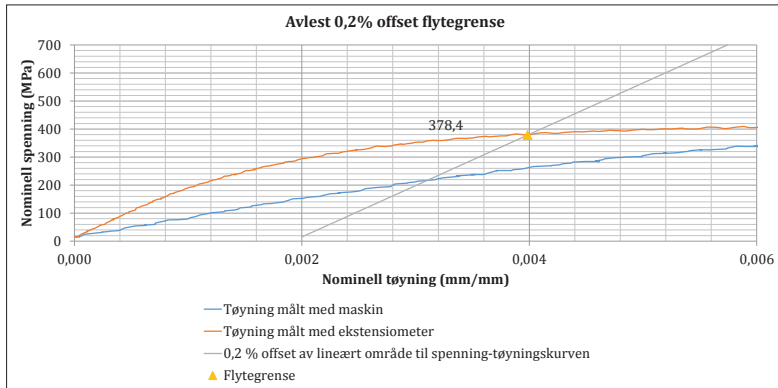
Flytegrense (0,2% offset)	405,3 MPa	
Strekfasthet	639,4 MPa	
Bruddforlengelse (25 mm)	50,4 %	
Bruddforlengelse (32 mm)	47,6 %	
Kontraksjon	58,5 %	
E-modul	190,1 GPa	
Temperatur	121 °C	



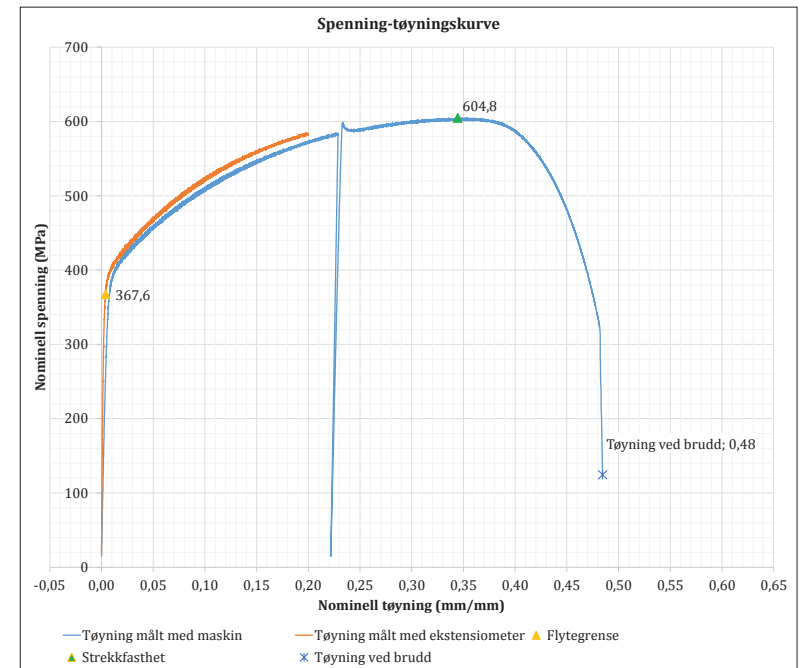
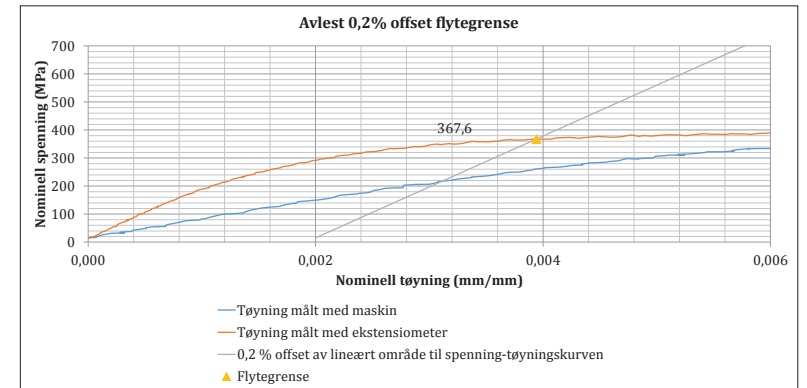


**XT3**

Flytegrense (0,2% offset)	378,4 MPa
Strekfasthet	614,0 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	48,9 %
Bruddforlengelse (32 mm)	46,1 %
Kontraksjon	59,0 %
E-modul	183,0 GPa
Temperatur	150 °C

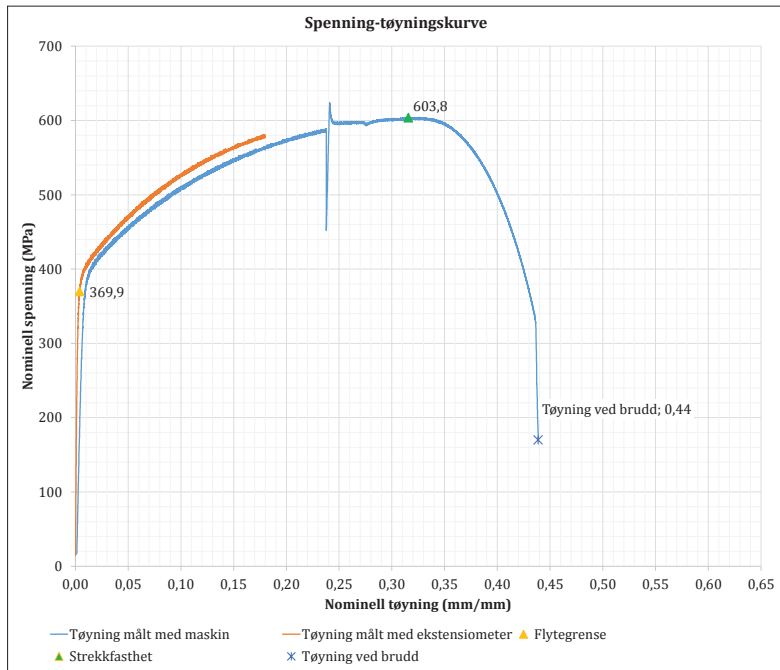
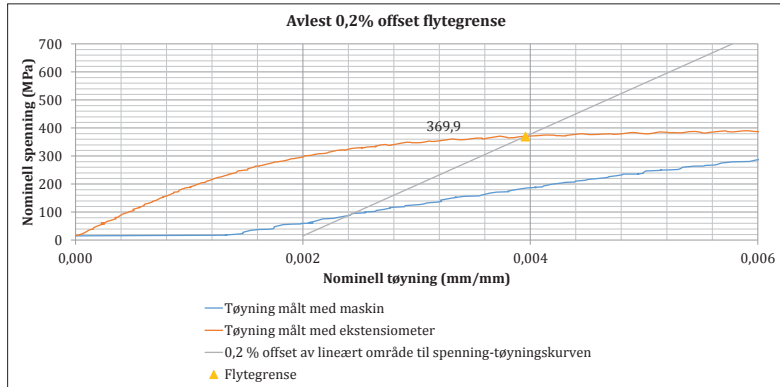
**XT4**

Flytegrense (0,2% offset)	367,6 MPa	<i>Kommentar: Lang dal ved 0,22 mm/mm tøyning skyldes overtredelse av grense for ekstensiometer. Aktuatorene slo ut, og testen ble dermed utført i to omganger.</i>
Strekfasthet	604,8 MPa	
Bruddforlengelse (25 mm)	53,0 %	
Bruddforlengelse (32 mm)	48,4 %	
Kontraksjon	58,9 %	
E-modul	181,6 GPa	
Temperatur	180 °C	



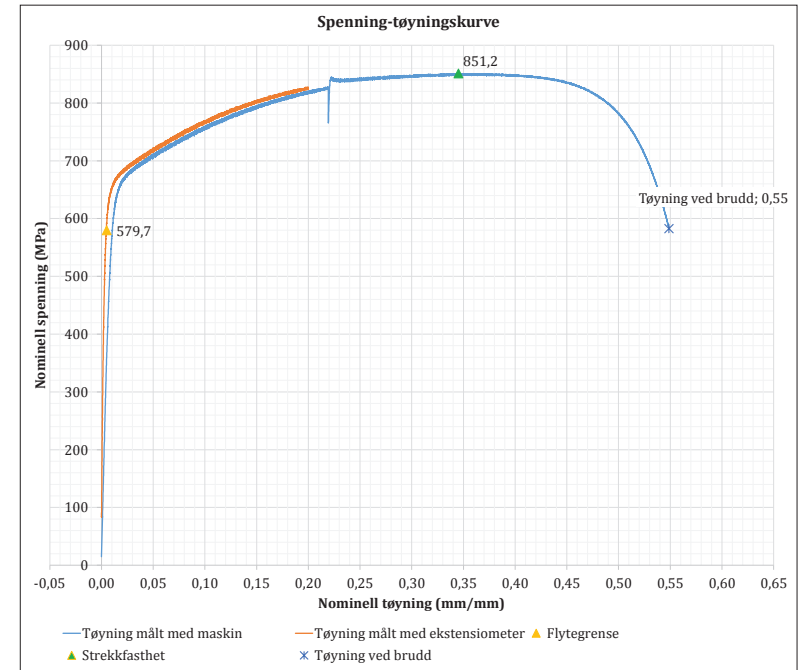
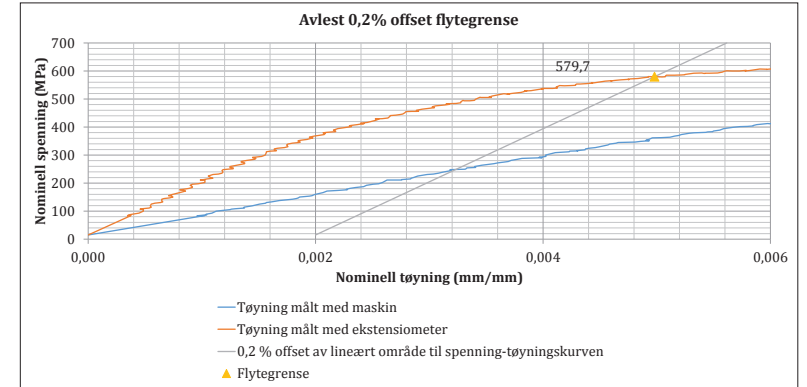
## XT5

Flytegrense (0,2% offset)	369,9 MPa
Strekfasthet	603,8 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	44,4 %
Bruddforlengelse (32 mm)	43,9 %
Kontraksjon	58,0 %
E-modul	181,4 GPa
Temperatur	200 °C



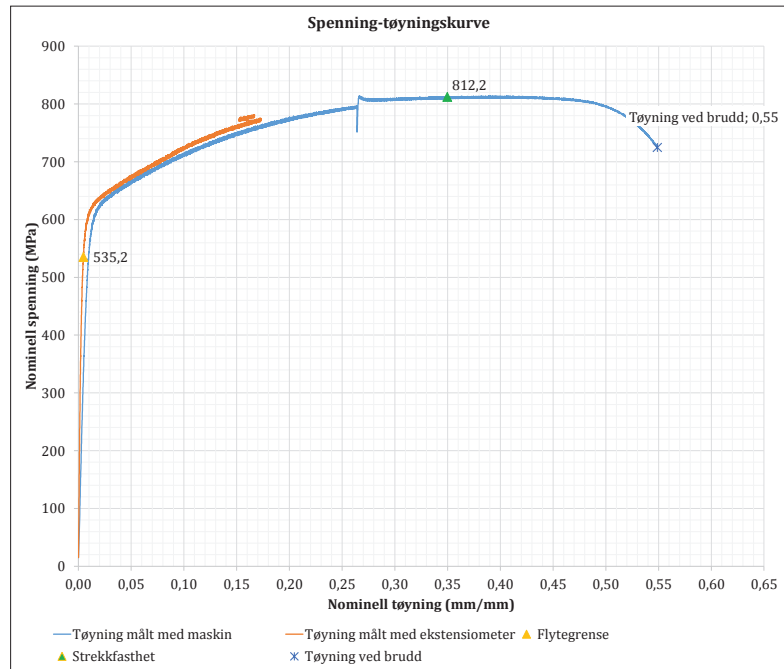
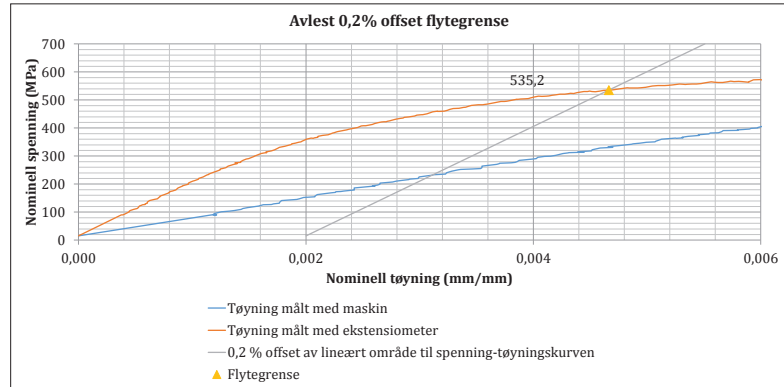
## XU2

Flytegrense (0,2% offset)	579,7 MPa
Strekfasthet	851,2 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	59,0 %
Bruddforlengelse (32 mm)	54,9 %
Kontraksjon	55,0 %
E-modul	189,4 GPa
Temperatur	-60 °C



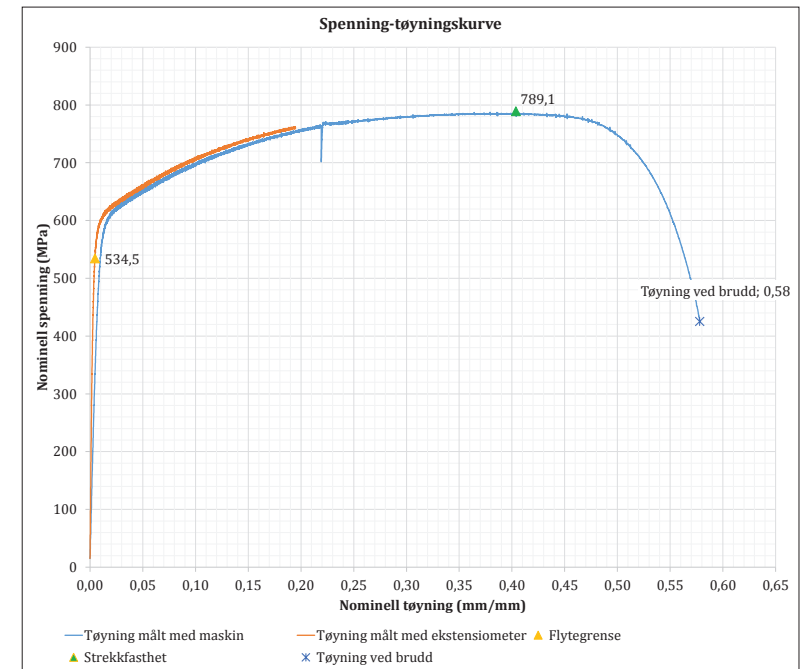
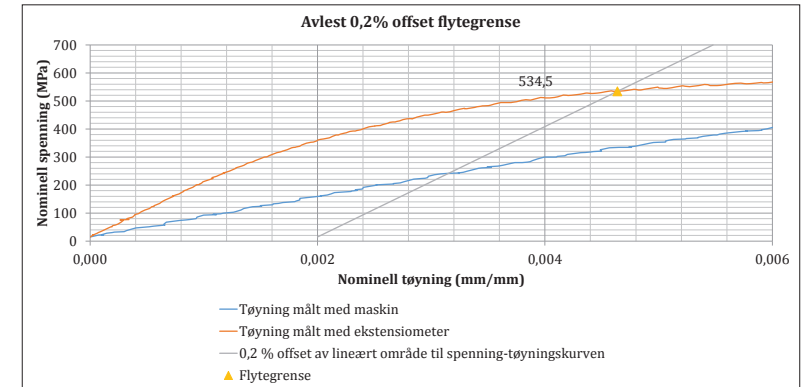
### XU3

Flytegrense (0,2% offset)	535,2 MPa
Strekfasthet	812,2 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	61,4 %
Bruddforlengelse (32 mm)	54,9 %
Kontraksjon	58,1 %
E-modul	195,2 GPa
Temperatur	-46 °C



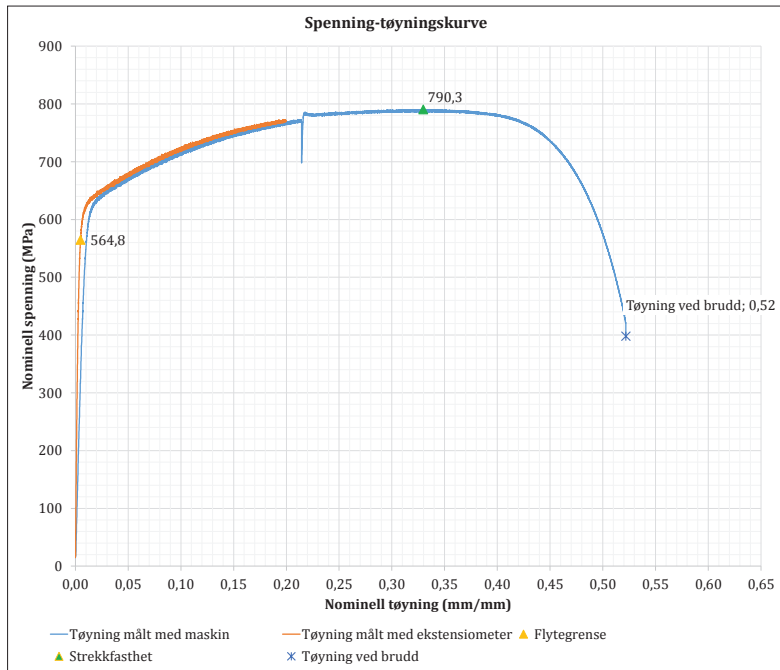
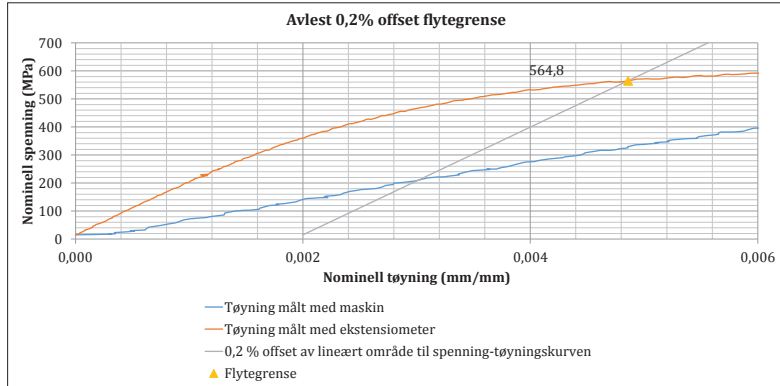
### XU4

Flytegrense (0,2% offset)	534,5 MPa
Strekfasthet	789,1 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	57,8 %
Bruddforlengelse (32 mm)	57,8 %
Kontraksjon	57,5 %
E-modul	195,1 GPa
Temperatur	-29 °C



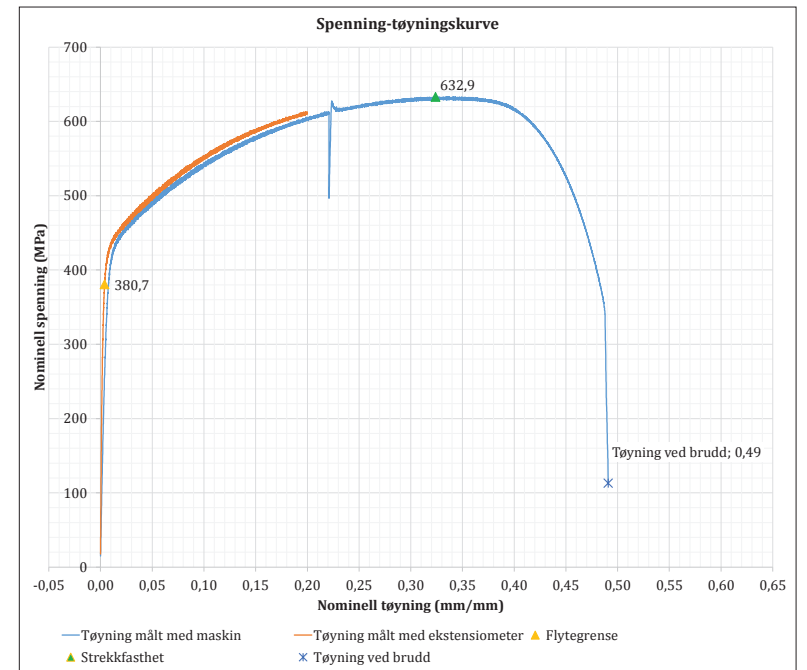
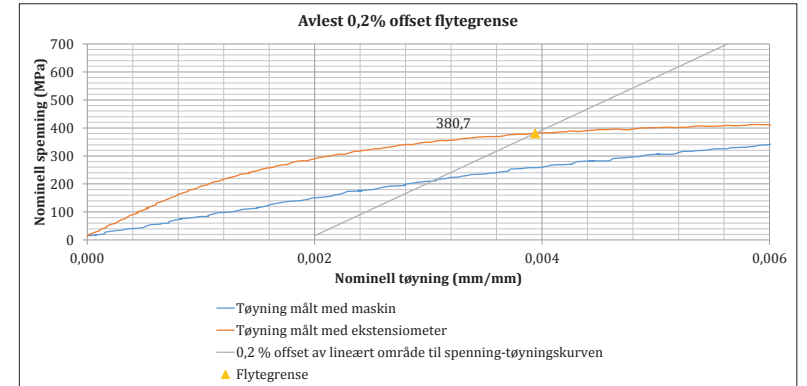
## XU5

Flytegrense (0,2% offset)	564,8 MPa
Strekfasthet	790,3 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	57,4 %
Bruddforlengelse (32 mm)	52,2 %
Kontraksjon	58,3 %
E-modul	192,2 GPa
Temperatur	-18 °C



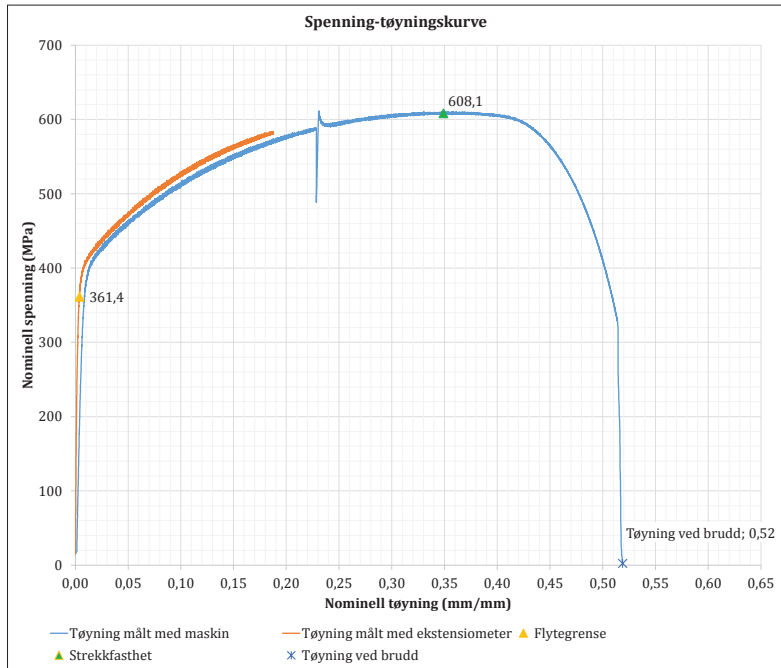
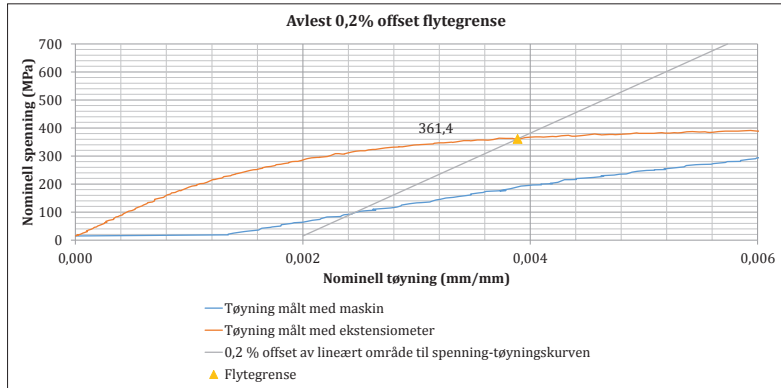
## XW2

Flytegrense (0,2% offset)	380,7 MPa
Strekfasthet	632,9 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	52,2 %
Bruddforlengelse (32 mm)	49,1 %
Kontraksjon	58,1 %
E-modul	188,6 GPa
Temperatur	121 °C



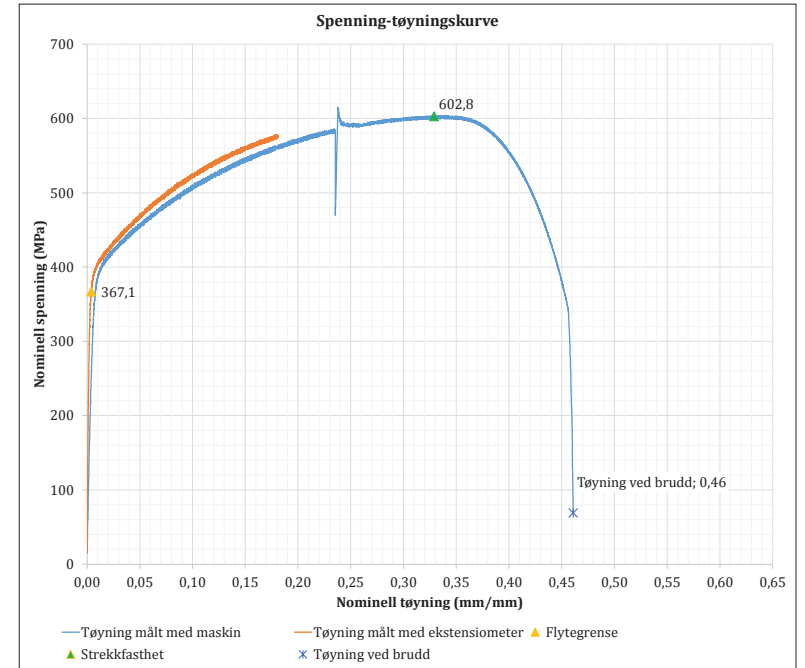
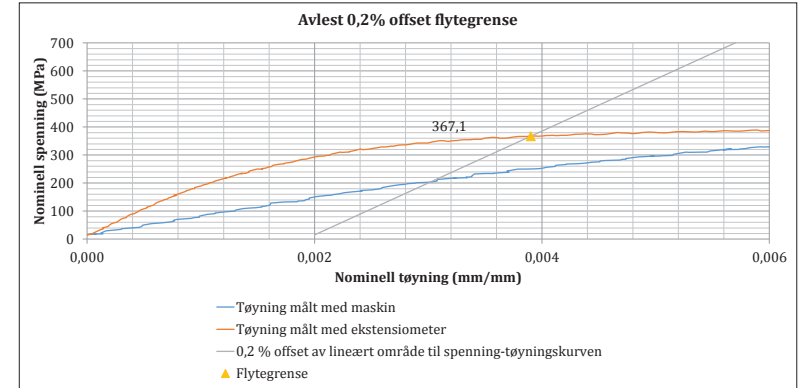
### XW3

Flytegrense (0,2% offset)	361,4 MPa
Strekfasthet	608,1 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	54,8 %
Bruddforlengelse (32 mm)	51,9 %
Kontraksjon	58,0 %
E-modul	183,4 GPa
Temperatur	150 °C



### XW4

Flytegrense (0,2% offset)	367,1 MPa
Strekfasthet	602,8 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	49,1 %
Bruddforlengelse (32 mm)	46,1 %
Kontraksjon	57,6 %
E-modul	185,2 GPa
Temperatur	180 °C



## XW5

Flytegrense (0,2% offset)	376,8 MPa
Strekfasthet	600,8 MPa
Bruddforlengelse (25 mm)	47,3 %
Bruddforlengelse (32 mm)	43,9 %
Kontraksjon	59,2 %
E-modul	169,3 GPa
Temperatur	200 °C

