

Lavsyklus utmatting og Finite Element Method Analyse basert på lab resultater

PETTER F. ROGNALDSEN
ANDERS H. NAMTVEDT

Bacheloroppgave i Havteknologi
Bergen, Norge 23



Lav-syklus utmatting og FEA analyse

Petter F. Rognaldsen
Anders H. Namtvedt

Institutt for Maskin- og Marinfag
Høgskulen på Vestlandet
NO-5063 Bergen, Norge

Høgskulen på Vestlandet
Fakultet for Ingeniør- og Naturvitskap
Institutt for maskin- og marinfag
Inndalsveien 28
NO-5063 Bergen, Norge

Omslag fotografi © Norbert Lümmen

English title: Low Cycle Fatigue and Finite Element Method Analysis
based on lab results

Forfatter(e), studentnummer: Petter F. Rognaldsen, 584913
Anders H. Namtvedt, 592356

Studieprogram: Havteknologi
Dato: Mai 2023
Rapportnummer: IMM 2023-M100
Veileder ved HVL: Ragnar Gjengedal HVL ansatt
Ørjan Fyllingen HVL ansatt
Oppdragsgiver: HVL
Oppdragsgivers referanse: Ragnar Gjengedal

Antall filer levert digitalt: 53

Forord

Denne bacheloroppgaven definerer vår avslutning på våre tre år som havteknologi bachelorstudenter ved Institutt for Maskin- og Marinfag (IMM) ved Høgskulen på Vestlandet (HVL) i Bergen. Oppgaven er gitt til oss av HVL og dreier seg om sammenligninger mellom eksperimentelle og simulerte lav syklus utmattinger av varmvalset stål.

Vi vil første takke veilederne våre, førsteamanuensis Ragnar Gjengedal og professor Ørjan Fyllingen, for den veldig gode oppfølgingen, engasjementet og den faglige hjelpen vi har fått gjennom hele semesteret. Også takk til overingeniør Harald Moen for hjelp og tilliten vi har fått til dyre utstyr nede på labben. Takk til Ørjan og førsteamanuensis Hassan Momeni for innspill til simuleringene på ANSYS. Og ikke minst takk til avdelingsingeniør Kjetil Gravelseter for å ha produsert materialstavene tatt i bruk i denne studien.

Anders Håkon Namtvedt, Petter Fjæra Rognaldsen

Bergen, 21.05.2023

Sammendrag

Denne oppgaven har grundig forklart teori knyttet til materialegenskaper, eksperimentelle metoder og bruk av elementmetode (FEM) programvare. En systematisk tilnærming til både eksperiment og simulering er presentert, hvor oppsettet for simuleringene og gjennomføringen av laboratorieeksperimentet er beskrevet. Det er utført to eksperimenter, en strekkprøve der resultatene er brukt til å klargjøre for det siste eksperimentet, den lavsykliske utmattingen. Resultatene er presentert oversiktlig i oppgaven og alt som ikke er tilgjengelig i oppgaven er å finne i vedlegget. Til tross for at simuleringene dessverre ikke strekker seg lengre enn 20 sykluser er det gjort en analyse og sammenligning mellom det eksperimentelle og simulerte innen denne rekkevidden.

Det er også presentert interessante observasjoner i sammenligninger av de eksperimentelle resultatene, men disse er ikke betraktet som relevant for problemstilling og oppfordres til videre studie i en annen oppgave.

Abstract

This thesis has provided a comprehensive explanation of the theory related to material properties, experimental methods, and the use of finite element method (FEM) software. A systematic approach to both experimentation and simulation has been presented, describing the setup of the simulation and the execution of laboratory experiments. Two experiments were conducted, a tensile test to establish baseline for the subsequent low-cycle fatigue experiment. The results have been presented in a clear manner in the thesis, with additional details submitted. Despite the simulations being limited to only 20 cycles, a thorough analysis and comparison between experiments and simulation results have been made. Furthermore, interesting observations have been made. These observations are not considered relevant to the research question and encouraged to be further investigated in future studies.

Innhold

Forord.....	V
Sammendrag.....	VII
Abstract	IX
1. Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling med avgrensinger.....	2
2. Teoretisk bakgrunn.....	2
2.1 Mekaniske egenskaper av metall.....	2
2.1.1 Spenning.....	2
2.1.2 Tøyning	2
2.1.3 Spenning – tøyingsdiagram	3
2.1.4 Elastisk deformasjon	4
2.1.5 Plastisk deformasjon.....	5
2.1.6 Sann spenning og sann tøyning	6
2.1.7 Herding.....	7
2.2 Eksperimentell metode	8
2.2.1 Strekkprøve	8
2.2.2 Lavsyklus utmatting	8
2.2.3 Utstyret.....	10
INSTRON Model 8801	10
Ekstensometer	11
Stavene	13
2.2.4 Creo Parametric.....	13
2.2.5 Microsoft Excel	13
2.3 Simulering	14
2.3.1 Finite Element Method opprinnelse og ANSYS	14
2.3.2.....	14
2.3.3 Element og mesh	14
2.3.4 Steg i FEM.....	16

3.	Fremgangsmåte	16
3.1	Lab Eksperiment.....	16
3.1.1	Modellering	16
3.1.2	Strekk-test.....	17
3.1.3	Lav syklus utmatting test.....	19
3.2	ANSYS.....	19
3.2.1	Definer problem	20
3.2.2	Lage modell.....	20
3.2.3	Importer til simulering program	21
3.2.4	Definer material.....	21
3.2.5	Definer grensebestemmelser	23
3.2.6	Definer last	23
3.2.7	Meshing.....	25
3.2.8	Kjør simulering.....	26
3.2.9	Vurder og presenter resultater	26
4.	Resultat.....	27
4.1	Strekk test.....	27
4.1.1	Lab resultater – Strekk test.....	27
4.1.2	ANSYS – Strekk test.....	30
4.2	Lav syklisk utmatting	33
4.2.1	Lab resultater – Syklisk utmatting.....	33
4.2.2	ANSYS – Syklisk utmatting.....	39
4.3	Kommentarer.....	44
5.	Diskusjon.....	44
6.	Konklusjon	45
	Liste over Figurer	48
	Liste over Tabeller.....	50
	Vedlegg	51

1. Innledning

1.1 Bakgrunn

Denne bacheloroppgaven handler om lavsyklus utmatting av varmvulset stål. Oppgaven baserer seg på laboratorie-tester og simuleringer i FEA program (ANSYS). Resultatene sammenlignes og analyseres med mål om å bedre forstå hvordan stål oppfører seg gjennom en lavsyklus utmatting. Resultatene skal kunne brukes til å maksimere kvaliteten på design av redskap som skal borre dypt ned i jordens overflate og hente ut energikilder som befinner seg der.

Det som er viktig for ingeniører å forstå er årsaken til feil. Utmatting er den største årsaken til brudd i metall. Det er beregnet at 90% av alle metalliske brudd er forårsaket av utmatting. Utmatting er sprekkdannelse som opptrer i et materiale når det utsettes for vekslende spenning over en viss størrelse over lang tid [1]. Det er denne sykliske spenningen som svekker materialet og resulterer i strukturelle skader. Etter hvert dannes det små sprekker i overflaten av materialet. For hver spenningssyklus vil disse sprekke vokse sammen til større sprekker, og til slutt brudd. Sprekkene dannes av mindre plastiske deformasjoner i materialets atomstruktur. Det skille mellom duktile brudd og sprøbrudd. Duktile materialer har stor kapasitet for plastisk deformasjon og energioptak. Sprekkforplantningen skjer dermed langsomt over lengre tid, og på en måte viser til kommende brudd. Ved sprøbrudd er det tilnærmet ingen plastisk deformasjon og skjer plutselig. Denne type brudd er veldig vanskelig å oppdage skaden har skjedd. Gjennom denne bacheloren er det duktile brudd som blir behandlet og analysert. Også utmatting deles inn i to typer. Lavsyklus utmatting og høysyklus utmatting. Lavsyklus utmatting er mange små sykliske belastninger som langsomt bryter ned materialet. Belastningen skal være slik at materialet bryter/feiler innen 10 000 sykluser. Det er denne typen utmatting denne teksten skal handle om. Testene i denne studien utføres på timeglassformede stålstaver med tre forskjellige mål. Utfordringen er at det er veldig vanskelig å forutse når de timeglassformede eksemplarene vil bryte. Det er så små marginer involvert. Små endringer i frekvens, tøyningsgrenser og temperatur kan endre antall sykluser før brudd drastisk. Det varierer også mellom stavtypene.

Undersøkelsen og analysen er gjort med hensyn til ASTM E606/E606[2]. Forsøkene er utført på timeglassformede staver. Før forsøkene utføres blir disse stavene tegnet i Creo og kjørt gjennom simuleringer i Ansys, et Finite Element Analysis (FEA) program.

1.2 Problemstilling

Problemstillingen denne oppgaven undersøker er *hvordan simulere lav syklisk utmattelse basert på eksperiment data i Finite Element Program (ANSYS)*. Hensikten er å kunne lage en modell som kan simulere utmattelse, og bruke den til å forutsi brudd.

2. Teoretisk bakgrunn

Dette kapittelet formidler hvilke metoder som er tatt i bruk for å løse oppgaven og beskrivelse slik at leseren kan forstå hva som er gjort og undersøkelsen kan lett gjentas. Metoden er delt i tre deler; litterær metode, eksperimentell metode og modellering.

2.1 Mekaniske egenskaper av metall

Dette delkapittelet formidler informasjon om mekaniske egenskaper i metaller nødvendig for å forstå oppgaven.

2.1.1 Spenning

Å belaste et materiale med en kraft kan føre til deformasjon, om ikke brudd. Graden av deformasjon avhenger av kraften påført i forhold til det originale tversgående arealet. Dette er det som kalles spenning, σ , [3]. Dette kan også kalles ingeniørspenning. Også retningen kraften har i forhold til et materiales overflate spiller en rolle i hvilken type spenning som oppstår. Er kraften, F , loddrett på materialets overflateareal, A , er formelen:

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

der A_0 er det opprinnelige arealet til materialeksemplaret. Kraften kan også stå parallelt i forhold til overflaten[3]. Dette kalles skjærspenning og er definert som:

$$\tau = \frac{F}{A_0}$$

2.1.2 Tøyning

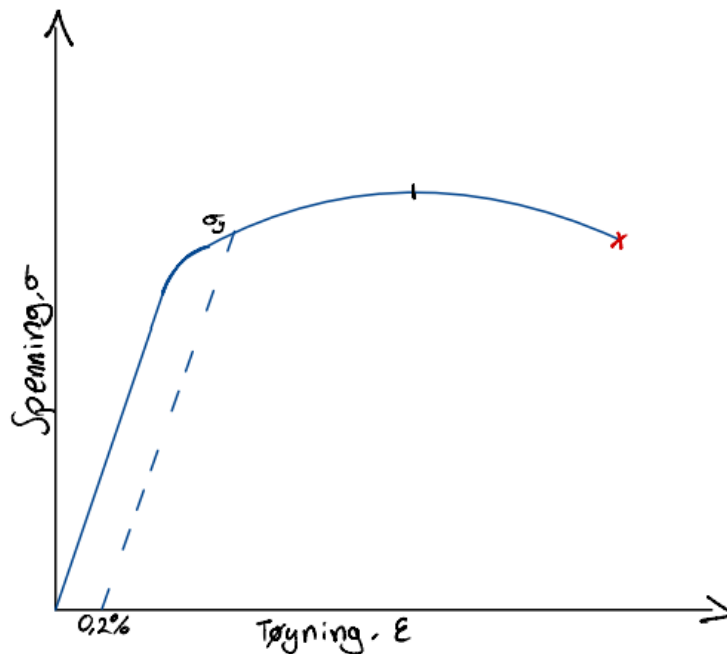
Med økende spenning og belastning på et material vil det deformeres. Graden av deformasjon er det en kaller tøyning eller relativ forlengelse, ε [3]. Deformasjonen kan skje som resultat av kompresjon, rotasjon og forlengelse. Tøyninger i enten kompresjon eller forlengelser defineres med formelen:

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

I og med at lengde deles på lengde er tøyning en symbol-løs enhet. Likevel brukes gjerne mm/mm eller % når tall for tøyning skal oppgis. Gjerne som input til diverse eksperimentelle tester av materialer.

2.1.3 Spenning – tøyningsdiagram

Et materials forhold mellom spenning og tøyning kan bestemmes ved å gjøre en strekk- eller kompresjonstest. Med data samlet inn fra testene beregner man spenning og tøyning for å kunne videre studere materialverdiene. Resultatene generaliseres slik at de kan brukes uten å skulle ta hensyn til geometrien av prøvestaven [4]. Disse verdiene kan så bli plottet i et spenning-tøyningdiagram slik som i Figur 1.



Figur 1 - Skisse av spenning-tøyning diagram.

Hvis en last er statisk eller forandres sakte med tid og er lastet jevnt over et tverrsnitt, kan de mekaniske egenskapene bestemmes ved hjelp av en spenning-forlengelse test [3]. Strekkprøve er den vanligste formen for spenning-forlengelse test [3]. Et prøvestykke er deformert gradvis med en jevnt stigende last til brudd.

2.1.4 Elastisk deformasjon

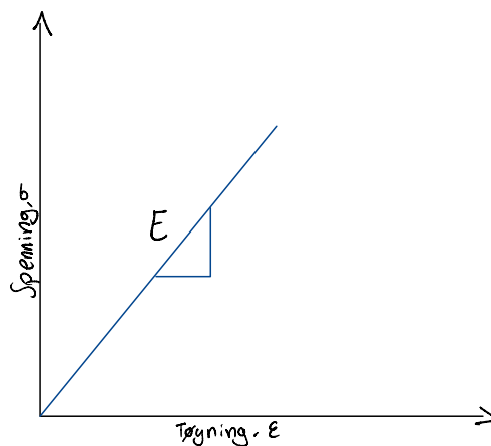
Materialer utsatt for relativt lave nivå av belastninger vil oppleve en fullstendig reversibel deformasjon. Det er dette som kalles elastisk deformasjon. Graden til hvilken en struktur deformeres er avhengig av størrelsen av elastisitetsmodulen til det spesifikke materialet. Elastisitetsmodulen, også kalt E-modulen eller Youngs modulus, er et materialets forhold mellom fasthet og tøyning, og er unikt fra materiale til materiale [5]. Den forteller om et materiales evne til å motstå elastisk deformasjon. Sprø materialer vil ha større E-modul enn mer elastiske materialer. I et spenning-tøyningsdiagram er den elastiske deformasjonen stort sett representert av en stigende lineær linje opp til enten brudd ved sprø materialer, eller flytepunktet der deformasjonen går fra reversibel til irreversibel. Dette kalles plastisk deformasjon. Elastisitetsmodulen er definert som:

$$E \equiv \frac{\text{aksiell spenning}}{\text{aksiell def ormasjon}} = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

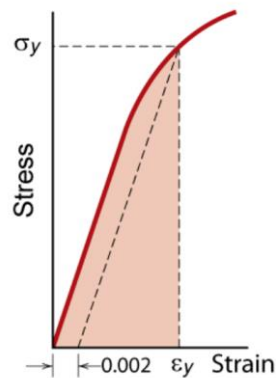
Denne formelen kan skrives om for å tydeligere vise at spenning og tøyning er proporsjonal med hverandre gjennom forholdet:

$$\sigma = E\epsilon$$

Dette er kjent som Hooke's lov og beviser proporsjonalitet innen det elastiske området av tøyningen.



Figur 2 - Skisse av elastisitetsmodulen.

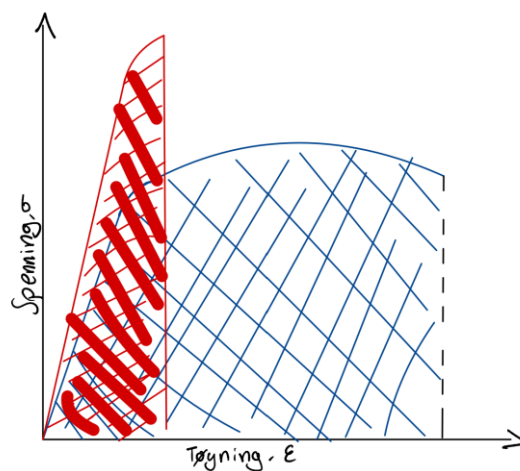


Figur 3 - Motstandsdyktighetsmodulen. [3].

Arealet under den elastiske deformasjonen kalles for motsatsdyktighet-modulen. Forteller hvor mye tøyingsenergi per enhet volum et materiale kan absorbere uten permanent deformasjon [4].

2.1.5 Plastisk deformasjon

Opplever et materiale nok spenning vil det overstige sin elastiske grense. Materialets deformasjon er ikke lenger elastisk. Deformasjonen er permanent. Dette kalles plastisk deformasjon. Ulike materialer har ulik plastisitet. Plastisitet beskriver et fast materiales evne til å gjennomgå plastisk deformasjon[3]. Sprø materialer har veldig lav plastisitet og bryter veldig fort etter elastisk deformasjon. Duktile materialer er mer motstandsdyktig på å absorbere energi i plastisk deformasjon. Dette er veldig tydelig i analyse av et materiales seighetsmodul. Regner man ut arealet under en spenning-tøyingskurve kan man finne ut hvor mye energi per enhet volum et materiale kan absorbere før det bryter [4].



Figur 4 - Skisse av seighetsmodul for et sprøtt (rød) og et duktilt (blå) materiale. Basert på figur 6.13, [3]

2.1.6 Sann spenning og sann tøyning

Ofte forholder ingeniører seg kun til ingeniørspenning og ingeniørtøyning. Problemet med dette er at arealet til materialstavene ikke forblir det samme gjennom en hel strekk- eller kompresjonstest. Det tverrgående arealet til et legeme som strekkes vil redusere. Forholdet mellom denne tverrrealendringen og lengdeendringen kalles for Poissons tall og defineres som:

$$\nu = - \frac{\frac{\Delta d}{d_0}}{\frac{\Delta l}{l_0}} = \frac{\varepsilon_{\text{tverrsnitt}}}{\varepsilon_{\text{langsgående}}}$$

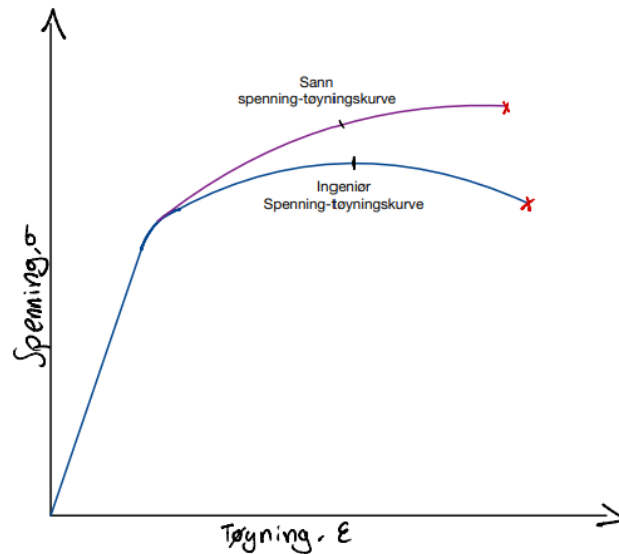
Sann spenning og sann tøyning tar bedre hensyn til dette. Sann spenning er definert som:

$$\sigma_T = \frac{F}{A_i} = \sigma(1 + \varepsilon)$$

Sann tøyning er definert som:

$$\varepsilon_T = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon)$$

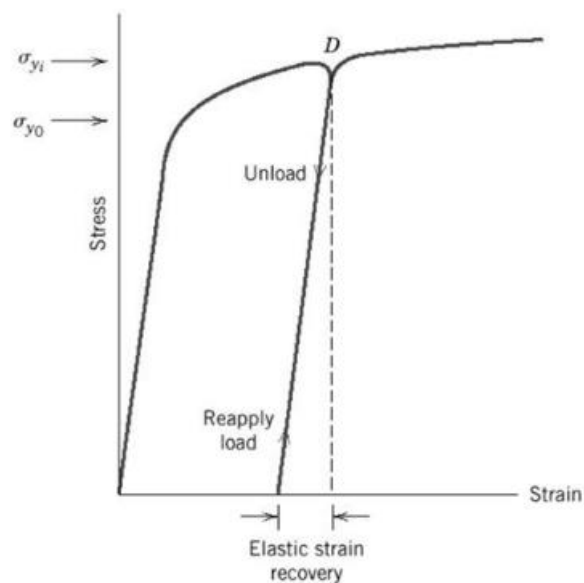
I Figur 5 ser en at en sann spenning-tøyningskurve fortsetter å stige helt til brudd. Dette står i kontrast til en ingeniørspenning-tøyningskurve som når et definert toppunkt med maksimal spenning. Dette er fordi det momentane arealet er tatt i betraktning. En ser også at kurvene er omtrent lik i det elastiske området. Skal man forholde seg til det lineære elastiske området er det teknisk sett ikke nødvendig å regne om til sann spenning og sann tøyning. Ingeniører forholder seg ofte kun til dette området, som er årsaken til navnet *ingeniørspenning* og *ingeniørtøyning*.



Figur 5 - Skisse av et sann spenning - sann tøyning diagram

2.1.7 Herding

Fjernes lasten som deformerer en struktur, vil en liten del av den totale deformasjon bli hentet inn igjen som elastisk tøyning [3]. Strekkherding er et fenomen der et duktilt material blir hardere og sterkere etter det blir utsatt for plastisk deformasjon, men blir mindre duktilt [3]. I diagrammet nedenfor blir en struktur plastisk deformert med en spenning på σ_{yi} og så blir kraften avlastet. For å plastisk deformere strukturen ytterligere må den bli utsatt for en spenning større enn σ_{yi} . Spenning mindre enn σ_{yi} vil resultere i elastisk deformasjon.



Figur 6 - Illustrasjon av herdingsprosess. [3].

2.2 Eksperimentell metode

Dette delkapittelet informerer om både det eksperimentelle utstyret som ble brukt og prosessen for gjennomføringen av eksperimentene. Standarden ASTM E606/606M [2] ble fulgt under utførelsen av disse eksperimentene. ASTM E606/606M inneholder standardiserte verdier som brukes til strekktester for utmatting. I denne studien ble både strekktester og lavsyklus utmattingstester utført ved hjelp av denne standarden.

2.2.1 Strekkprøve

Strekktesting er en av de mest vanlige metodene for å samle inn data om prøvematerialets egenskaper. Under strekktesting blir prøvestavene utsatt for en gradvis økning av spenning og deformasjon, ofte til brudd oppstår [3]. Materialstavene som brukes har stort sett et sirkulært tverrsnitt, men rektangulære eksemplarer er også mulig. Prøvestavene innsnevres mot midten slik at deformasjonen er konsentrert mot midten. Dette kalles «halsing».

Med resultatene fra strekktester er det vanlig å regne ut spenning (σ) og tøyning (ϵ) for så å plote disse mot hverandre i en spenning-tøyningskurve. Disse kan igjen regnes om til sann spenning og sann tøyning om en mener dette er nødvendig. Sann spenning og sann tøyning gir mer presise tall og en mer presis graf lenger ut i den plastiske deformasjonen i en strekkprøve. Om en fokuserer på den elastiske tøyningen er dette ikke like nødvendig, men kan være greit likevel.

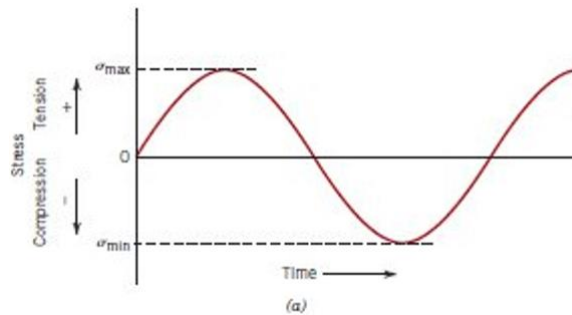
Data som samles inn fra strekkprøvene vil bli brukt til å bestemme en passende strekkrekkevidde for å kunne gjennomføre lavsyklus-utmattingstesten.

2.2.2 Lavsyklus utmatting

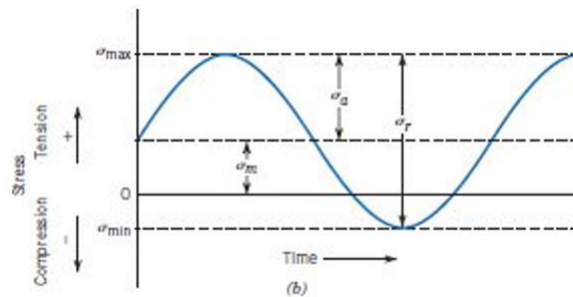
Sykliske utmattinger deles inn i tre hovedkategorier. Den første er «reversert spenningssyklus», se Figur 7. Denne gjelder for sykliske spenninger som veksler mellom positive maksimalspenninger (σ_{\max}) og negative minimalspenninger (σ_{\min}) [3]. Spenningen kan representeres av grafen til en sinusfunksjon. Spenningen har en symmetrisk, lik amplitude på begge sider av gjennomsnittaksen som er lik 0.

Den andre kategorien kalles for «repeterende spenningssyklus», se Figur 8, og kan med et raskt blikk på Figur 8 nedenfor minne om en reversert spenningssyklus. Forskjellen ligger i det at grafen ikke er symmetrisk rundt spenningsaksens nullnivå.

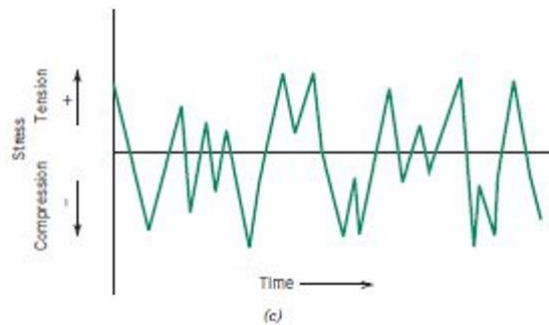
Den siste formen for syklisk utmattelse er en tilfeldig syklisk prosess, illustrert i Figur 9. Spenningen varierer både opp og ned i et uforutsigbart mønster.



Figur 7 - Reversert spenningsyklus. [3].



Figur 8 - Repeterende spenningsyklus. [3].



Figur 9 - Tilfeldig spenningsyklus. [3].

I Figur 8 er flere parametere med på å beskrive kurven. Hele kurven er sentrert rundt gjennomsnittet av maksimum spenning og minimum spenning [3], *gjennomsnittsspenning* σ_m :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}.$$

Spenningsrekkevidden σ_r er definert som spenningsrekkevidden mellom σ_{max} og σ_{min} :

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} .$$

Spenningsamplituden σ_a er en halv av spenningsrekkevidden:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} .$$

Til slutt er formelen for *spenningsraten* R som er minimumsspenning delt på maksimalspenning:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{maks}} .$$

Utmatningsprøver imiterer en av disse sykliske utmatningsmønstrene som skjer i naturen. Høysyklus utmatting er en form for utmatting forårsaket av små tøyninger innenfor det elastiske området [6]. Det kreves et veldig høyt antall belastningssykluser for at materialet skal bryte. Lavsyklusutmatting krever færre sykluser før brudd, derav navnet «lavsyklus». Skillet mellom høysyklisk og lavsyklisk utmatting regnes å ligge på 10 000 sykluser, men avhenger av materialeegenskapene til metallet[7]. Årsaken til at det lavere antallet sykluser er at spennings amplitude er stor nok til å skape plastisk deformasjon. Dette herder stålet og gjør det hardere og mer mottakelig til bruddanning. Lavsyklusutmatting foregår ved lav frekvens og høy spenningsamplitude [6].

Målet med lavsyklusutmattingstester er å forstå hvordan et materiale vil oppføre seg i en konstruksjon utsatt for gjentatte belastninger. Disse testene hjelper ingeniører med å evaluere materialenes konstruksjonsytelse, levetid og pålitelighet. Levetid er særlig viktig for å unngå unødige feil og skader.

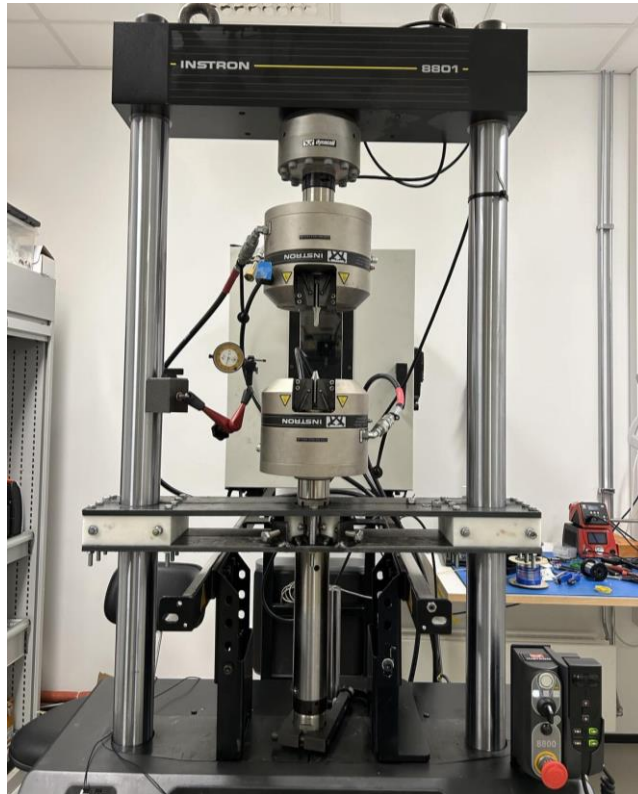
2.2.3 Utstyret

I dette kapitlet vil alt utstyret som ble benyttet i den eksperimentelle delen av studien bli presentert.

INSTRON Model 8801

Maskinen som ble benyttet til utførelsen av testene i denne studien var en INSTRON Model 8801. Dette er en servo-hydraulisk maskin som er spesielt utviklet for ulike typer utmattelsestester. Maskinen er konstruert for å strekke eller komprimere testprøvene med en konstant hastighet, samtidig som den måler og registrer ulike parametere, som for eksempel belastningen og tøyningen eller kompresjonen til enhver tid under forsøket. Maskinen kan

stilles inn med forskjellige parametere, som for eksempel maksimal kraft, tøyning eller kompresjon.



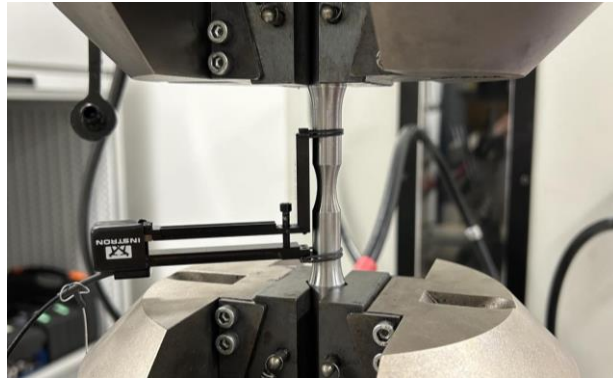
Figur 10 - INSTRON Model 8801

Ekstensometer

Ekstensometre er små apparater som brukes til å måle mekanisk deformasjon på objekter som gjennomgår ulike type tester, for eksempel strekk-, kompresjons- bøyelighets- og andre mekaniske tester [8]. Ekstensometre blir mye brukt i både lavsyklus og høysyklus utmattningstester, og det finnes flere varianter av ekstensometre, alle med litt forskjellige bruksområder. De kan i hovedsak deles inn i to kategorier: ekstensometre som direkte berører materialet som testes, såkalte «contact extensometers», og ekstensometre som måler fra avstand uten behov for berøring, «non-contact extensometers». Begge typer måler endring i avstand mellom to punkter.

Ekstensometre som fysisk festes på materialet har ofte en bestemt test lengde. «Clip-on» ekstensometre er en billig og veldig ofte brukt variant. Det er en slik som har blitt brukt i våre eksperimenter. Disse er mest vanlig for strekktester med under 50% beregnet strekning [9]. Ved tøyninger høyere enn dette kan ekstensometeret knekke. For noen tester er det viktig at ekstensometeret henger fast helt frem til materialets brudd, men ved å tilpasse for mekaniske stopp kan man redusere ekstensometerets overbelastning og dermed unngå at den knekker.

Ikke-kontakt ekstensiometre er dyrere, men mer allsidig. De er ikke begrenset av en maks test lengde, de egner seg veldig godt til testing i temperaturkammer eller tester på material i væsker [9]. Det finnes også temperaturmålede ekstensiometre som man fysisk fester på materialet.



Figur 11 - "Clip on" ekstensiometer.

En utfordring knyttet til bruk av håndfestete ekstensiometre er nettopp det å feste enhetene skikkelig til testobjektet. Det er vanskelig, særlig uten litt øving, å skånsomt feste de uten å dra litt i enten ekstensiometeret eller testsubjektet. Start avstanden mellom de to festepunktene kan være litt upresise om dette ikke gjøres riktig. Også basert på hvilken måte ekstensiometeret festes, med strikk, fjær, osv., kan overflaten av materialet deformeres om det er mykt. Til testene i denne studien ble det tatt i bruk strikk. Da er utfordringen mer det å få strikket skikkelig rundt strekkstaven slik at spenningen er fordelt likt gjennom strikket og det ikke hopper av underveis i strekktesten.

Materialets deformasjon skjer både langs den aksiale akse og tverraksen. Derfor blir også et tverraksialt «clip-on» ekstensiometer tatt i bruk. Disse er ofte brukt til å måle Poisson's tall og tverrsnittets deformasjon [10]. Denne typen ekstensiometer holder seg på plass ved hjelp av en fjær som presser klypen sammen rundt testsubjektet. Kantene er avrundet for å ikke påvirke materialets overflate for mye. Konseptet bak denne typen ekstensiometer er det samme som nevnt tidligere. Den måler endring i avstand mellom to punkter. Ekstensiometeret er robust og tåler helt fint å henge på materialet helt til brudd



Figur 12 - Tverraksial "clip-on" ekstensometer. [10].

Stavene

Stavene som benyttes i studien er produsert av varmvalset stål, og kan deles inn i fire ulike typer. Blant disse er det fem standard strekkstaver (prøvestaver), samt 34 staver med ulike forhold mellom radiusen av kurven (R) i timeglass-delen og diameteren (d) på det tynneste partiet (R/d). Av de 34 timeglassformede stavene er det åtte staver med R/d -forhold på 4, atten staver med et R/d -forhold på 6, og åtte staver med et R/d -forholdet 8. Årsaken til at det er flere staver av R/d -forholdet 6 er at det er gjennomsnittet av alle sammen, og de kan da brukes til å prøve seg fram basert på utregnet bruddsyklus, før stavene skal utsettes for lavsyklusutmattning. Det er vanskelig å beregne når de forskjellige stavene vil bryte i denne type eksperiment, derfor er det nødvendig med noen få eksemplarer å teste med i starten.

Stavene har blitt tegnet i Creo og følger ASTM E606/E606M [2] sine retningslinjer.

2.2.4 Creo Parametric

Creo Parametric er en Computer-Aided Design (CAD) programvare. CAD er en måte å digitalt lage 2D tegninger og 3D modeller av produkter og deler som produseres verden over [11]. Denne programvaren brukes til å modellere strekkstavene og prøvestavene som skal gjennom strekk-test og utmattelses test i eksperiment.

2.2.5 Microsoft Excel

Alle resultatene fra eksperimentene blir lagret i Excel filer. Excel filene inneholder flere kolonner med data: sekunder, last, maskin forskyvning, og ekstensiometer forskyvning. Excel blir brukt til å sammenligne resultat fra eksperiment med simulering. Excel brukes også til å lage en tilnærmet modell av spenning-tøyning kurven oppnådd av strekkstavene.

2.3 Simulering

Finite Element Method (FEM) er en numerisk prosedyre som brukes til å oppnå løsninger på ulike problemer innen ingeniør fag. Stress analyser, varme overføring, væske strømnings og elektromagnetiske er eksempler på problemer FEM kan brukes til å analysere [12]. I FEM analyser blir den aktuelle delen som skal analyseres delt opp i små biter som kalles element. Disse elementene er oppbygget av et gitt antall noder. Dette kapitlet vil forklare om FEM-programvaren som brukes, hva programvaren gjør og hvorfor den er nyttig.

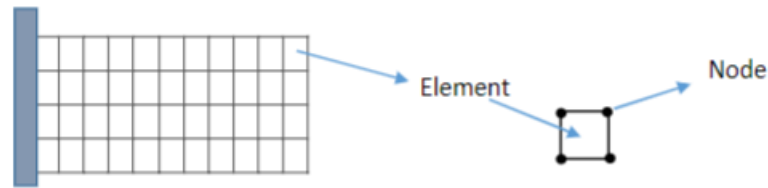
2.3.1 Finite Element Method opprinnelse og ANSYS

Den moderne utviklingen av FEM begynte på 1940 tallet innen feltet struktur dimensjonering [13]. Arbeid av Hrennikoff i 1941 og McHenry i 1943, som begge brukte tok i bruk en 1-dimensjonal linje delt opp i element for å finne spenninger i en kontinuerlig søyle/bar [13]. I 1943 foreslo Courant å sette opp løsningen for spenninger i varierende form [13]. Han introduserte delvis interpolasjon funksjoner over triangulære underområder som utgjorde hele område som en metode til å oppnå en tilnærmet numerisk løsning [13]. I 1947 utviklet Levy fleksibilitet/kraft metoden, og i 1953 kan en anta at stivhet/forskyvning metoden kunne være et reelt alternativ til å analysere statiske overflødige fly-strukturer [13]. Hans likninger ble krevende å utføre for hånd, og hans metode ble først populær da datamaskiner kapabel til å utføre arbeidet i høy hastighet[13].

ANSYS er en FEM programvare først utgitt i 1971 [12]. ANSYS er et omfattende Finite Element programvare som inneholder mer enn 100.000 linjer med kode [12]. ANSYS er kapabel til å utføre statiske, dynamiske, varme overføring, væske strømnings og elektromagnetiske analyser, og har vært en av de ledende Finite Element Analyse programvarene i over 30 år [12]. I dag brukes ANSYS i en rekke ingeniør felt; romfart, bil industri, elektronikk og atomkraft [12]. ANSYS er et kraftig og imponerende verktøy som kan brukes til å løse en rekke problemer [12].

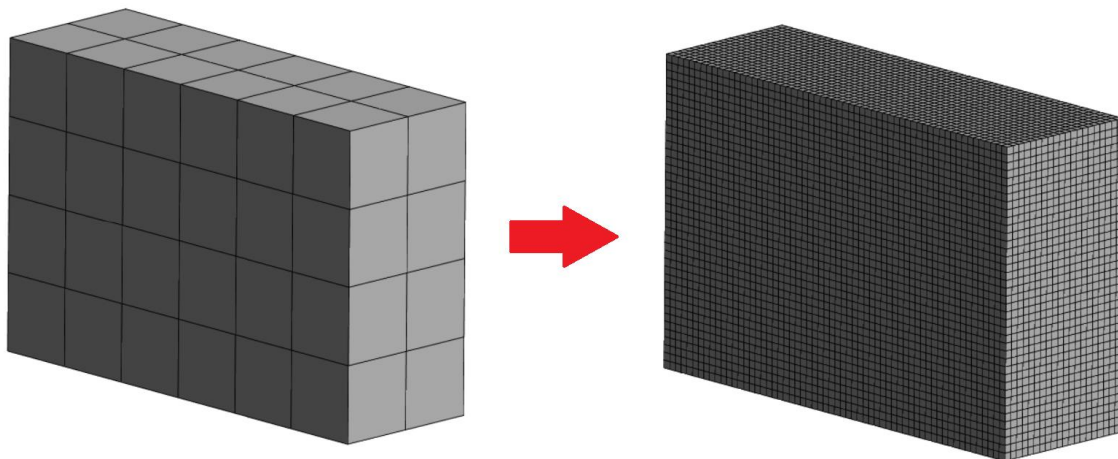
2.3.2 Element og mesh

Mesh er et viktig begrep for å forstå hvordan FEM løser problemer. I FEM deler en inn den aktuelle geometrien som skal analyseres inn i mindre deler. Disse delene er kalt «element». Hvert element har et gitt antall punkt i hjørnene og sidene kalt «noder». Denne inndelingen er kalt mesh. I figur (13) nedenfor er illustrasjon av mesh, element og node.



Figur 13 - Mesh bestående av element og noder, hentet fra forelesningsnotat fra emnet FEM [14].

En kan konfigurere meshen til å påvirke resultatene en vil få av analysen. Grovt mesh vil ha lavere antall element og noder som vil resultere i mindre nøyaktig resultat, men vil redusere tiden programvaren bruker til å simulere problemet. Fint mesh består av høyt antall element og noder, som gir mer nøyaktig resultat, men som øker tiden programvaren bruker på å simulere problemet.

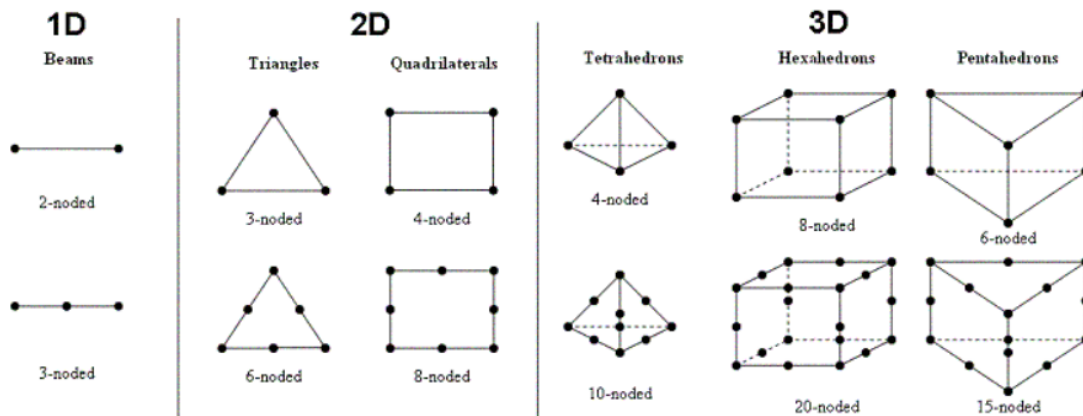


Figur 14 - 30x20x10 mm geometri med grov 5 mm mesh (t.v.) og fin 0,5 mm mesh (t.h.).

Statistics		Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	349	<input type="checkbox"/> Nodes	205441
<input type="checkbox"/> Elements	48	<input type="checkbox"/> Elements	48000

Figur 15 - Korresponderende antall element og noder i henhold til grovt og fint mesh.

Element type kan variere og påvirker antall noder geometrien har. De vanligste element typene er triangulære eller rektangulære. Elementene kan også være i 1D, 2D eller 3D. Hvis elementene har noder i hjørnene kalles det et lineært element eller første orden. Hvis det er noder i hjørnene og sidene kalles det kvadratisk element eller sekundær orden.



Figur 16 - Element type og ulike dimensjoner, hentet fra forelesningsnotat fra emnet FEM [14].

En type 2D element er aksesymmetrisk element. Aksesymmetrisk element brukes når det er symmetri med hensyn til geometri og last/grensebestemmelser i henhold til en av aksene til geometrien [13]. I ANSYS er det alltid y-aksen i det globale koordinat systemet en tar hensyn til [12].

2.3.3 Steg i FEM

Kapittel Normalt i en spenning-analyse av en struktur vil ingeniøren søke å fastslå forskyvninger og spenninger gjennom strukturen som er i likevekt og utsatt for noen gitte krefter [13]. I komplekse strukturer er det krevende å løse slike problem med konvensjonelle metoder, og da er FEM er nødvendig [13]. Kapittel 3.2 vil presentere steg i FEM brukt for å løse denne oppgaven.

3. Fremgangsmåte

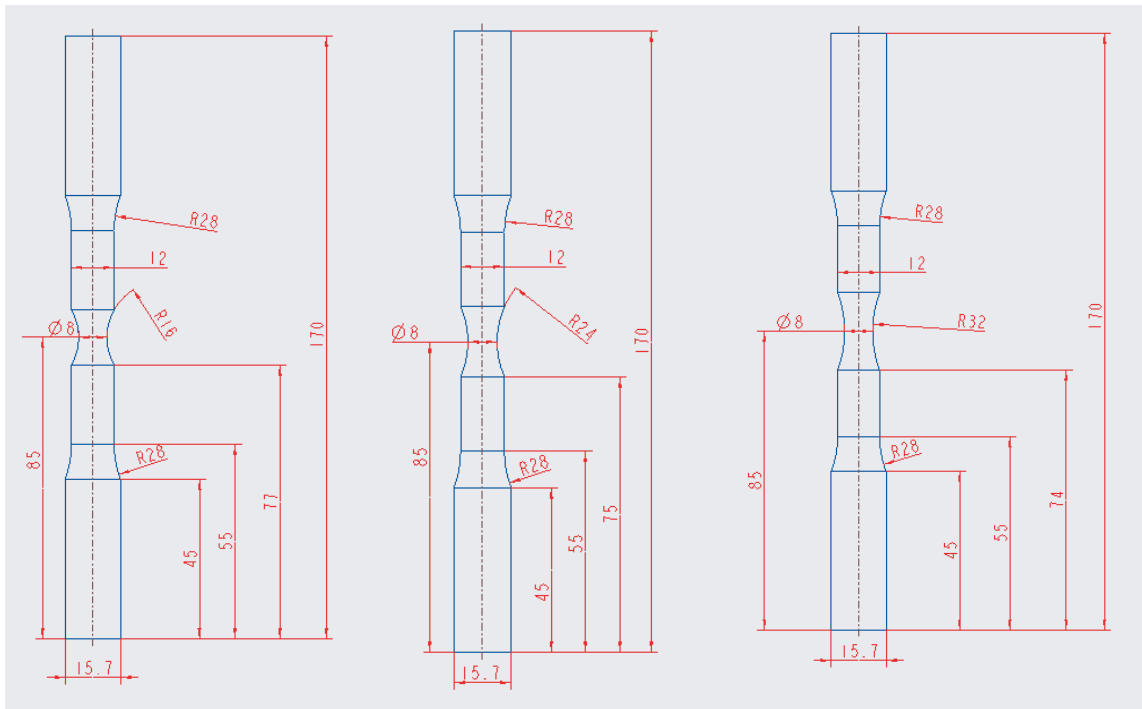
I dette kapittelet presenteres en grundig fremgangsmåte slik at leseren forstår hva som er gjort og kan gjenta prosjektet. Fremgangsmåte for lab eksperiment og ANSYS simulering vil bli presentert.

3.1 Lab Eksperiment

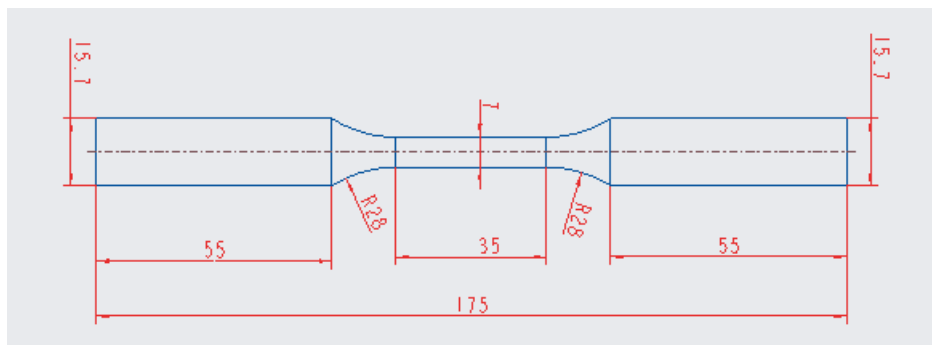
Lab eksperimentet er delt i to: strekk-test og syklisk utmatting. Før lab eksperimentene begynner, må en modellere og bestille prøvestavene, og gjøre forberedelser til å effektivisere gjennomføringen av lab eksperimentene. Dette kapittelet vil forklare om nettopp dette.

3.1.1 Modellering

Prøvestavene ble modellert i Creo Parametric etter standarden ASTM E606 E606M [2].



Figur 17 – Tegning for R32, R48 og R64 staver, dimensjoner i mm.



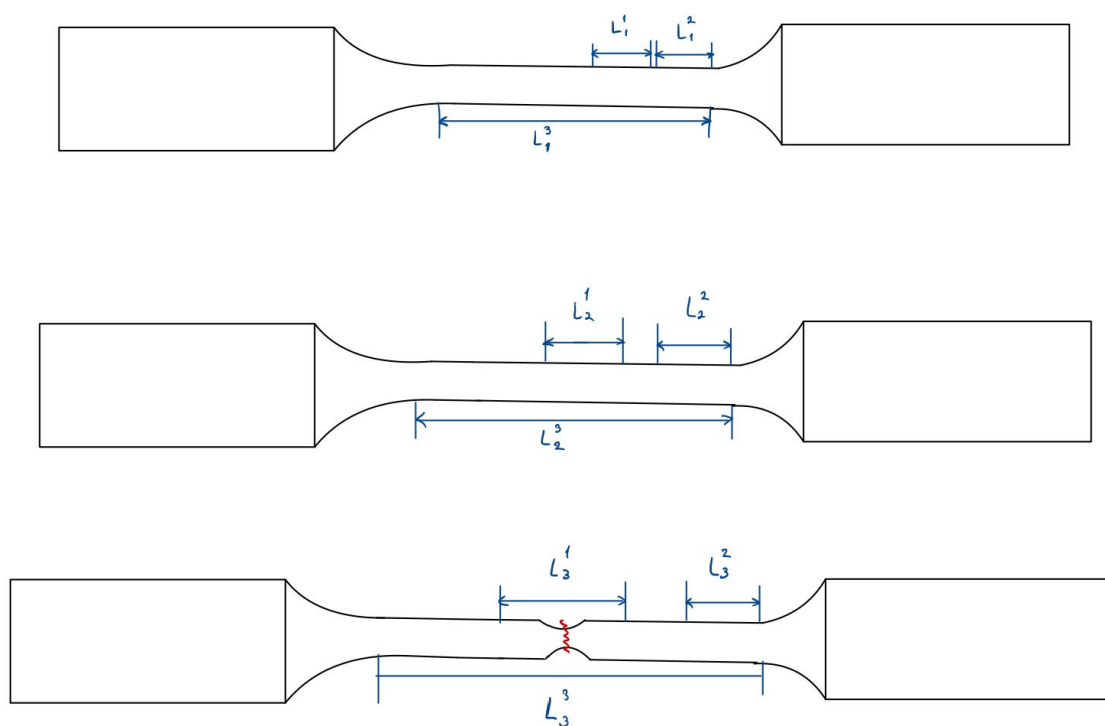
Figur 18 – Tegning av strekkstav, dimensjoner i mm.

3.1.2 Strekk-test

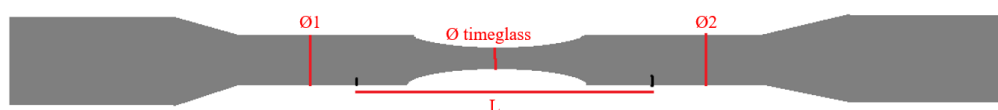
Først utfører man strekk-testen på strekkstavene. Maskinen brukt til testen var en INSTRON Model 8801. Etter en stav var montert i maskinen ble det festet et ekstensometer med en målelengde på 25 mm. Det var dette ekstensometeret ble brukt til å måle tøyningen, ikke maskinen selv. Det finnes forskjellige måter å feste ekstensometre, men til disse testene ble det brukt strikk. Med strikk er det viktig å montere ekstensometeret slik at stikkene ikke ryker eller hopper av under testen.

Diameteren til alle timeglass-stavene ble målt på tre punkter før strekktesten startet. En måling der staven er tynnast, altså i midten av «timeglasset», $\varnothing_{\text{timeglass}}$, og så to punkter på hver side av «timeglasset», \varnothing_1 og \varnothing_2 . Dette er illustrert i Figur 20. To staver fra R32, R48 og R64 variantene ble testet. Samme ekstensometer med målelengde på 25 mm ble brukt til disse

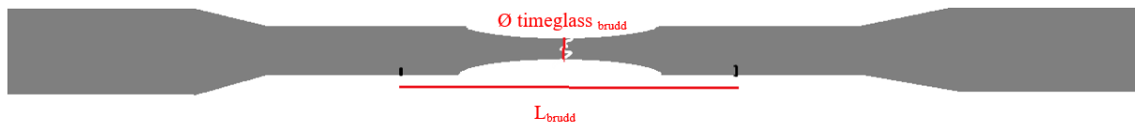
forsøkene, men også et tverrgående ekstensometer ble festet i timeglasset for å måle endringen i tverrsnittet. Dette er fordi tøyningen foregår på det tynneste punktet i staven. For disse stavene er det som sagt i midten av timeglasset. Timeglassdesignet gjør den unik fra de første prøvestavene ved at den ikke opplever samme uniforme tøyning som prøvestavene. Prøvestavene har et rett og jevnt tøyingsområde, og går gjennom en uniform tøyning fram til toppunktet i spenning-tøyningkurven der halsingen starter. Timeglassfasongen fungerer derimot som en forhåndsletet halsing. Tøyningen vil derfor starte i midten av timeglasset med en gang. For å bestemme den aktuelle tøyningen i dette området brukes et tverrekstensiometer til å måle den tverrgående tøyningen. Ved hjelp av Appendix X2 [2] regnes den tverrgående tøyningen om til langsgående tøyning.



Figur 19 - Skisse av en prøvestav gjennom en strekkprøve.



Figur 20 - Skisse av timeglass-stav før strekkprøve. Med oppmerkinger.



Figur 21 - Skisse av timeglass-stav før strekkprøve. Med oppmerkinger.

3.1.3 Lav syklus utmatting test

Før selve utmattingseksperimentene kan begynne er det nødvendig å innhente informasjon om materialstavenes egenskaper. Det er nødvendig å vite omtrent ved hvilken tøyning staven går over til å oppleve plastisk deformasjon. Videre må det også bestemmes tøyninginput til de forskjellige stavene. Hensikten med strekkprøvene er blant annet å lage en spenning-tøyningsskurve basert dataen samlet av tverrekkstensometret, og definere et arbeidsområde der den sykliske utmattingen skal foregå. Dette er tidligere snakket om i forrige delkapittel.

Når disse utregningene er gjort er det klart for utmattingsstestene. Diameteren til stavene er målt på tre ulike steder, samme måte som i strekktesten. Stavene monteres i den hydrauliske maskinen, og et langsgående ekstensometer festes. Til disse testene er det ikke behov for det tverrgående ekstensometeret. Inne på INSTRON sin egne programvare oppgis det at staven skal strekkes til akkurat etter flytegrensen. Dette hentes fra spenning-tøyningsskurven funnet ved hjelp av Appendix X2. Herfra strekkes og komprimeres testeksemplaret ved en frekvens på to hertz (Hz). Tøyningen velges for hver stav. Tøyningen ble valgt basert på hvor nært tusen sykluser det var mulig å nå. Utmattingen var tøyningbasert. I dette studiet blir ekstensometeret brukt registrere tøyningen, slik at maskinen presist kan utføre utmattingen med samme tøyning hver syklus.

Fem staver av typen R48 ble tatt i bruk helt i starten til å prøve fram og se at ting fungerer etter kalibreringen. Grunnen til at det var disse stavene som ble tatt i bruk er at de er et gjennomsnitt av alle stavene som skal testes.

3.2 ANSYS

Når FEM brukes til å forutsi styrke eller oppførsel til et produkt kalles det FE simulering. Normalt sett er FEM delt inn i 9 steg:

- Definer problem,
- Lage model (1D/2D/3D),
- Importer til simulering program (ANSYS),
- Definer material,
- Definer grensebestemmelser,

- Definer last,
- Meshing (type, størrelse, orden og figur),
- Kjør simulering, og
- Sjekk og presenter resultater.

3.2.1 Definer problem

Å planlegge er viktig for å gjøre simuleringen effektiv. Når en kjører simuleringer er tid penger, og dårlig planlegging kan resultere i ekstrem dårlig utnyttelse av tid. I dette prosjekter er det to mål; simulere strekk-test og utmattelse-test. For å kunne sammenligne resultatene fra ANSYS med resultater fra eksperiment må en definere et material ut fra eksperiment data oppnådd på laboratoriet, slik at materialet har lik oppførsel i simulering som i virkeligheten. Planlegge hvordan modellen skal designes (symmetri, 1D/2D/3D) og visualisere problemet for å strømlinje prosessen.

3.2.2 Lage modell

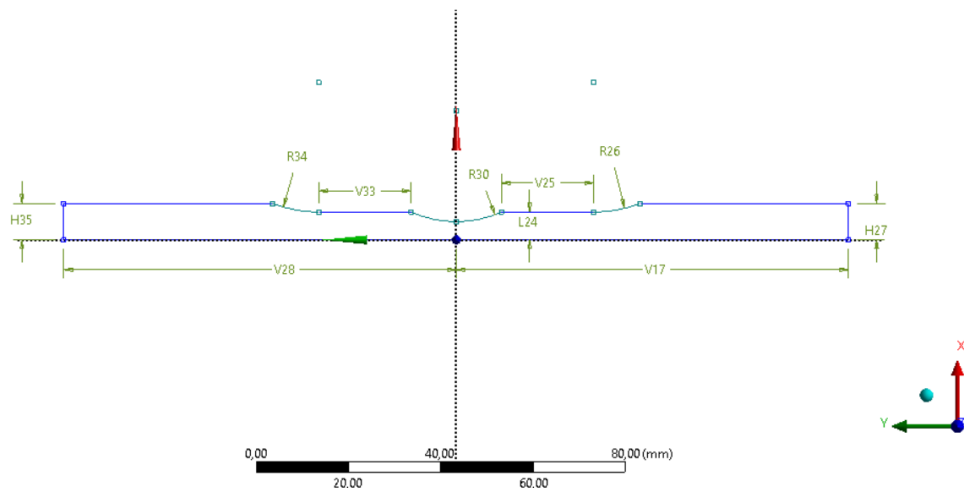
Modeller kan lages i ANSYS sine egne CAD program (design modeller, Spaceclaim, Discovery) eller importere fra annet CAD program (Creo Parametric). I dette prosjektet er aksesymmetrisk element brukt for å redusere tiden programvaren bruker på å løse problemet, og geometrien er laget i ANSYS sitt CAD program designmodeller. Under «avanserte analyse innstillinger» i geometri innstillinger må en bytte til 2D analyse [15] for å løse aksesymmetrisk problem. Nedenfor i figur (22) ser en utdrag av innstillinger.

12	Advanced Geometry Options	
13	Analysis Type	2D
14	Compare Parts On Update	No

Figur 22 - Utdrag av geometri innstillinger, ANSYS.

Dette er fordi geometrien i en aksesymmetrisk modell er 2D. I ANSYS er det alltid Y-aksen i det globale koordinatsystemet geometrien dreies rundt i en aksesymmetrisk modell [15]. Under kan en se eksempel av tegning til R48 prøvestaven. Tegningen har tatt hensyn til Y-aksen som modellen dreies om. Når tegningen er ferdig, velger en surface body (2D).

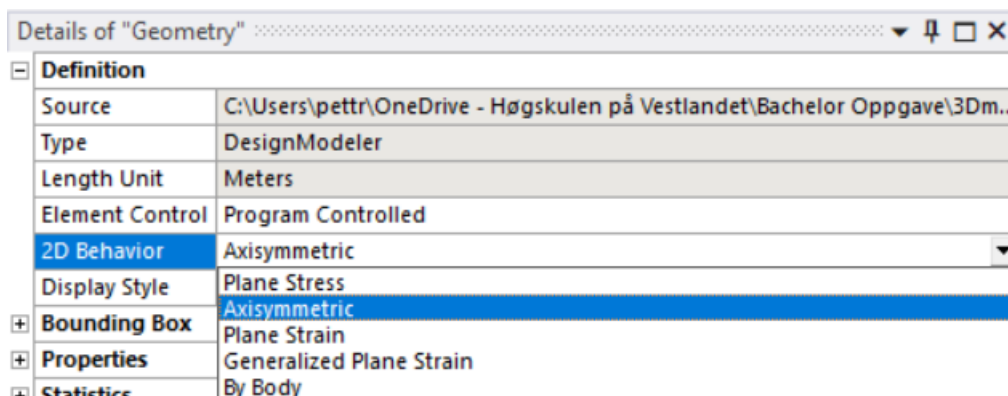
Under lab eksperimentene blir ekstensiometer brukt for å måle hvor mye prøvestavene forlenges i et gitt område. For å gjenta dette i ANSYS simuleringen blir to punkt lagt til i modellen. Ved å bruke split edge verktøyet i designmodeller, kan punkt legges til som korresponderer med hvor ekstensiometeret biter prøvestaven. Slik kan en oppnå resultater i ANSYS som ligner på resultatene fra ekstensiometeret.



Figur 23 - Sketch av R48 strekkstav.

3.2.3 Importer til simulering program

I denne oppgaven er modulen «Static Structural» brukt. Siden det er planlagt å bruke aksesymmetrisk element, må en endre 2D oppførselen til modellen til aksesymmetri [16]. Dette kan endres under geometri innstillinger, under valget definisjon og videre 2D oppførsel.



Figur 24 - Geometri innstillinger i static structural modulen.

3.2.4 Definer material

Strukturen som analyseres er avhengig av egenskapene til materialet som er tildelt. Materialet som tildeles er definert utfra resultatene fra strekk-testen. Resultatene fra eksperimentene kommer i Excel (2.2.5). Dataene fra strekkprøvene må konverteres til sann spenning og sann tøyning. ANSYS har et bibliotek av standard materialer med bestemte egenskaper. I denne oppgaven er «konstruksjon stål» brukt, og egenskap for herding er lagt til. En kurve for herding defineres ut fra eksperiment resultatene av prøvestavene. Hensikten er at denne kurven skal følge kurven til sann spenning-sann tøyning kurven fra eksperiment. Kurven er regnet ut med modifisert voce likning [17]:

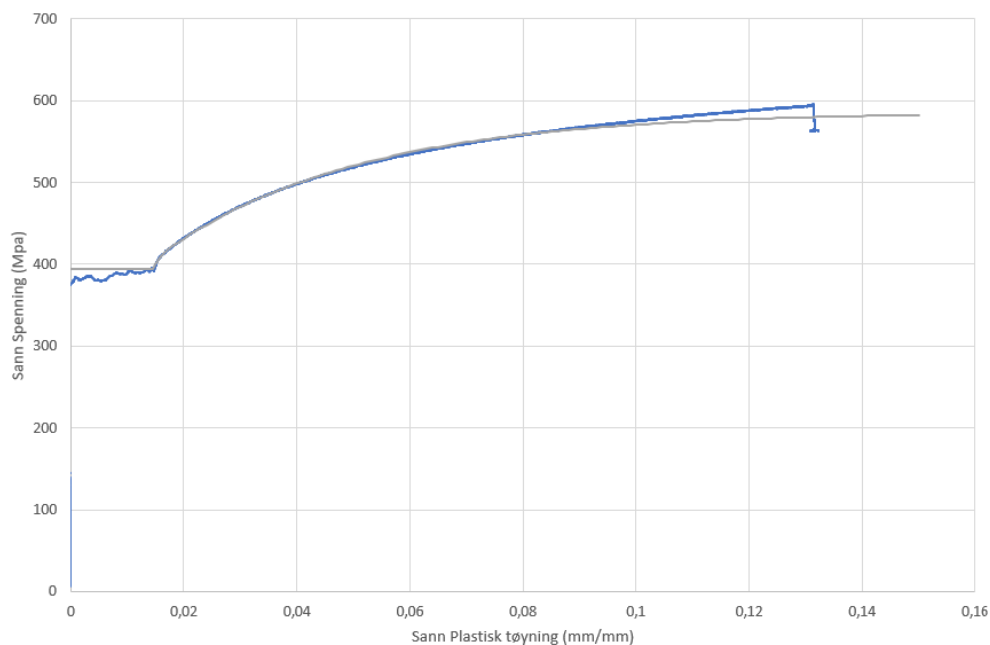
$$\sigma_{\epsilon p} = \sigma_{ys}, \epsilon_p \leq \epsilon_0$$

$$\sigma_{\epsilon p} = \sigma_{ys} + \sum_{i=1}^n Q_i (1 - e^{-C_i(\epsilon_p - \epsilon_0)}), \epsilon_p > \epsilon_0$$

der σ_{ys} flytegrensen målt fra eksperiment. ϵ_0 er plastisk tøyning på slutten av flytegrensen. Q_i og C_i er konstanter oppnådd fra eksperimental data ved å bruke minste kvadraters metode. Ved å bruke $n=2$ passet voce likningen eksperiment data bra. Parameterne til voce likningen ble kalibrert ved å minimere den følgende feil ved å bruke problemløser i Excel [17]:

$$Feil = \sum_{i=1}^k (\sigma_i - \sigma^*(\epsilon_{pi}))^2$$

der σ_i er målt sann spenning i data punkt i, og $\sigma^*(\epsilon_{pi})$ er kalkulert spenning ved plastisk tøyning i data punkt i. k er totalt antall punkt data. Nedenfor i figur (25) er sann spenning-sann tøyning kurve fra eksperiment og beregnet kurve med voce likning. Nedenfor i tabell (1) er parametere som ble brukt til å beregne kurven.



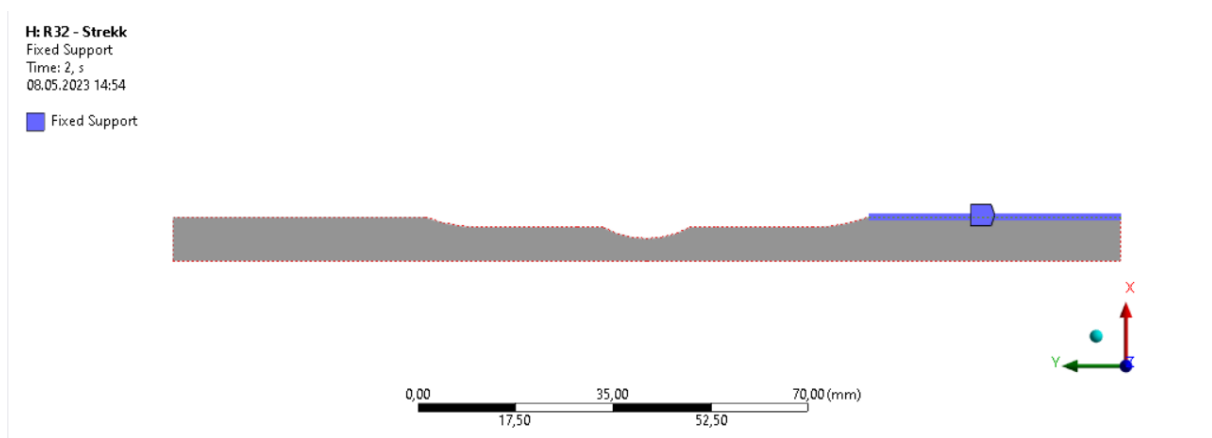
Figur 25 - Sann spenning-sann tøyning kurve (blå) og beregnet kurve med voce likning (grå).

$\sigma_{(ys)}$	393,7
$\epsilon(0)$	0,0146
Q_1	12,0797275236205
C_1	931,992129964075
Q_2	180,690571784918
C_2	28,524995876607

Tabell 1 - Verdier for beregning av modell med Voce likning.

3.2.5 Definer grensebestemmelser

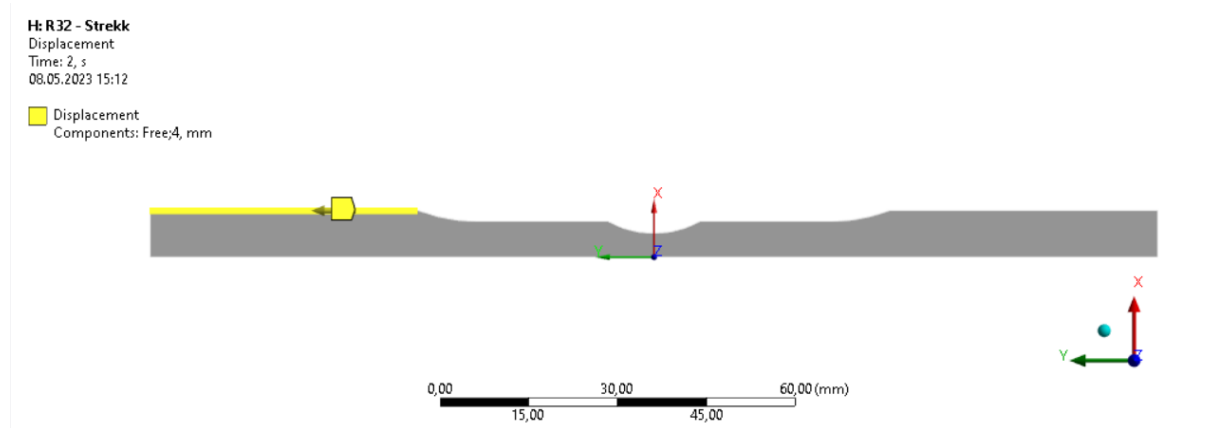
Grensebestemmelser er nødvendig for å simulere et problem i ANSYS. Et legeme i vakuum utsatt for en kraft vil bevege seg i retningen kraften virker. En geometri uten grensebestemmelser som blir utsatt for krefter vil ha lik oppførsel som legemet i vakuum. For å hindre at geometrien en analyserer beveger seg som en helhet introduserer en grensebestemmelser som holder geometrien på plass [13]. I denne oppgaven er ene enden av prøvestavene fast. Siden det er 2D analyse vil si at den ikke kan bevege seg i x- og y-retning, eller rotere rundt x aksen og y aksen. I en oppgave med 3D modell vil den ikke kunne bevege seg i x-, y- og z-retning, eller rotere rundt x-,y-, eller z-aksen. Denne grensebestemmelsen gjaldt for både strekk-test og utmattelse-test.



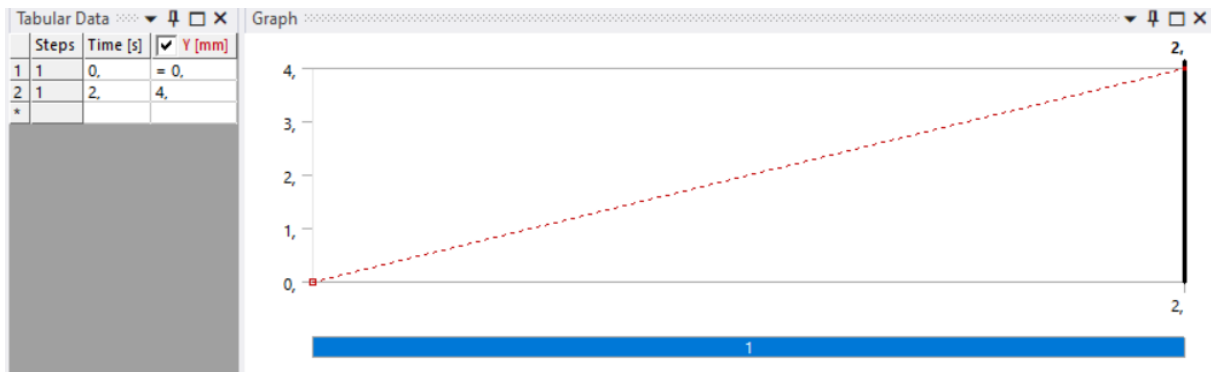
Figur 26 - Blå linje indikerer fast grensebestemmelse.

3.2.6 Definer last

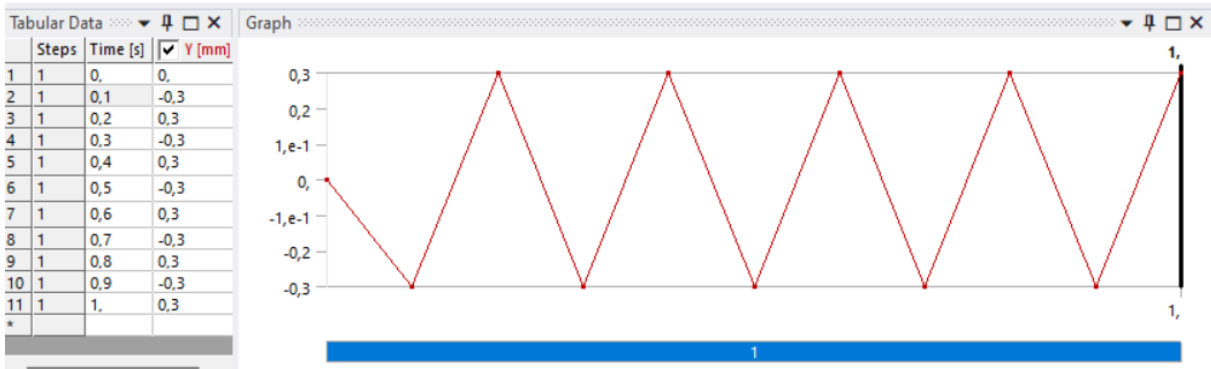
Lasten geometrien skal utsettes for. Kan være kraft, temperatur, trykk. I denne oppgaven er det en del av geometrien som forskyves. Lasten kan defineres som en konstant verdi, en funksjon av tid eller tabell data. Under strekk simulering er det en bestemt verdi. Under utmattelse simulering er verdien basert på data fra tabell. Tabellen lages i ANSYS eller importeres fra Excel. Nedenfor (Figur 27) er geometrien der delen som forskyves er markert i gul, og hvordan forskyvningen fordelt på tiden i strekk simulering og syklisk simulering (Figur 28-29).



Figur 27 - Gul linje indikerer forskyvning, gul pil indikerer retning (positiv y-retning).



Figur 28 - Konstant forskyvning fordelt på tiden (strekk-test).

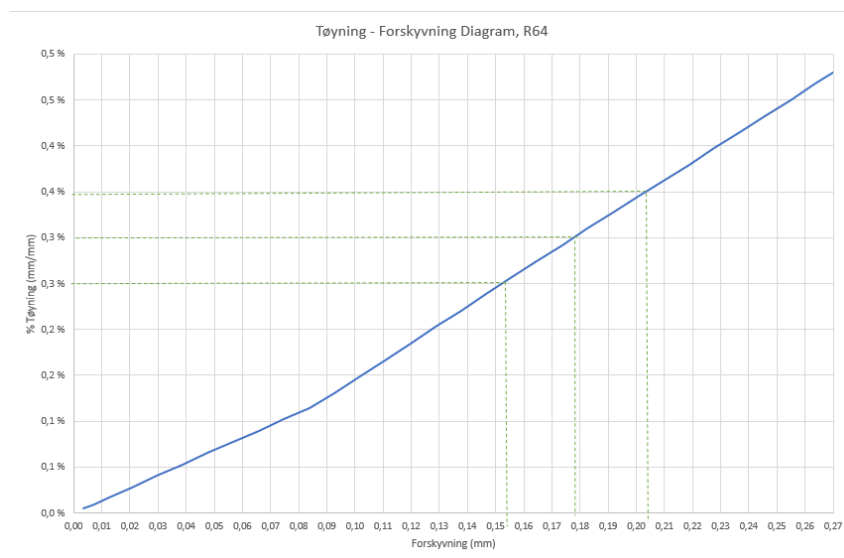


Figur 29 - Forskyvning som veksler mellom positiv og negativ amplitude på 0,3 mm (utmattelse-simulering).

sekunder	mm
0,1	-0,3
0,2	0,3
0,3	-0,3
0,4	0,3
0,5	-0,3
0,6	0,3
0,7	-0,3
0,8	0,3
0,9	-0,3
1	0,3

Tabell 2 - Tabell laget i excel som limes inn i ANSYS.

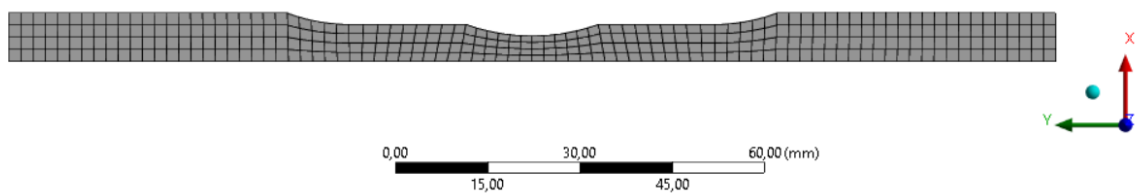
Strekk-testene av R32, R48 og R64 stavene ble simulert med 1,25mm forskyvning. Det er fordi det er innenfor dette tøyningssområde som blir undersøkt i lav-syklus eksperimentet. Amplituden til forskyvningen er funnet grafisk ved å lage et tøyning-forskyvning-diagram av strekk simuleringene av R32, R48 og R64. I figur (30) nedenfor ser en tøyning-forskyvning-diagrammet til R64. Diagram for R32 og R48 ligger vedlagt.



Figur 30 - Tøyning-Forskyvningskurve for R64 stav.

3.2.7 Meshing

Meshing er felles for alle simuleringene. 2mm element størrelse er brukt. Overflate meshing verktøy er brukt for å velge kvadratisk element geometri. Bruk av aksesymmetrisk element fører til 2D element type (2.3.2). Nedenfor i figur (31) er aksesymmetrisk modell av R64 med mesh illustrert.



Figur 31 - 2 mm mesh på R64 stav.

3.2.8 Kjør simulering

Simuleringen ble stor deformasjon innstilling på som vist i figur(33). Analysen ble simulert med 1 step, og substeps ble definert som vist i figur (34).

Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Off
Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	On
Inertia Relief	Off
Quasi-Static Solution	Off

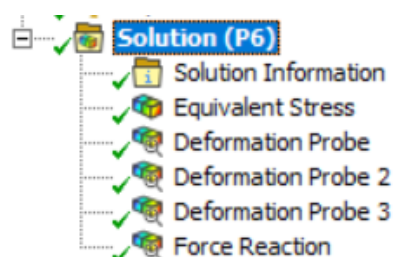
Figur 32 - Large deflection "på", under analyse innstillinger.

Define By	Substeps
Initial Substeps	500,
Minimum Substeps	200,
Maximum Substeps	1000,

Figur 33 – Substeps brukt i simuleringen.

3.2.9 Vurder og presenter resultater

Etter simuleringen er ferdig kan en legge til verdiene en ønsker å undersøke. I figur 34 kan en se hvilke verdier som ble lagt til i analysen. «Deformation probe» simulerte tverrekstensiometer. «Deformation probe 2» og «Deformation probe 3» simulerte ekstensiometer. Equivalent Stress er spenning. «Force reaction» er kraften som brukes for å forskyve ene enden av geometrien.



Figur 34 -Verdier som undersøkes i analysen.

Verdiene ble importert og sammenlignet med eksperiment data i Excel. Nedenfor er et utdrag av Excel ark (tabell 3). Excel filene med resultater fra ANSYS er vedlagt.

L1	L2	L1-L2	Strain	Force	kN
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,02053	0,00391	0,01662	0,00033	6671,10000	6,67110
0,03079	0,00587	0,02493	0,00050	10005,00000	10,00500
0,04106	0,00782	0,03324	0,00066	13338,00000	13,33800
0,05132	0,00978	0,04155	0,00083	16669,00000	16,66900
0,06160	0,01172	0,04987	0,00100	19988,00000	19,98800
0,07235	0,01321	0,05914	0,00118	22516,00000	22,51600
0,08445	0,01340	0,07105	0,00142	22840,00000	22,84000

Tabell 3 - Utdrag fra ANSYS resultat importert til Excel. L1 er deformation probe 2, L2 er deformation probe 3.

4. Resultat

I dette kapittelet vil resultater fra laboratoriet testene og FEM-analyse fra ANSYS presenteres.

4.1 Strekk test

Resultatene fra strekk test i laboratoriet og simulering i ANSYS presenteres i dette delkapittelet.

4.1.1 Lab resultater – Strekk test

I dette kapittelet presenteres resultater oppnådd på laboratoriet.

Som synlig i figur 35 er det liten variasjon i prøvestavene. Under er også en graf som viser ingeniørtøyning mot sann tøyning, figur 36. Tabell 4 viser målene gjort av strekkstavene før og etter utført strekkprøve.

Strekkstav	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	Ø3 (mm)	L (før) (mm)	L (etter) (mm)	Ø (etter) (mm)
1	7,03	7,02	7,02	34,66	46,8	3,51
2	7,02	7,02	7,03	34,2	47,02	3,56
3	6,92	6,91	6,9	34,69	46,91	3,57
4	7,01	7	7,01	34,46	46,82	3,53
5	7,02	7,01	7,01	34,57	47,88	3,43

Tabell 4 - Mål på strekkstav før og etter strekk test

Også to strekktester ble gjennomført på hver av de tre typene timeglass staver. Også disse viste lite variasjon. I figur 37 vises et snitt av de tre stavtypenes kraft-forlengelseskurve. R32 viser dårligst holdbarhet, men krever mest krefter for å deformere. På andre siden av spekteret er R64 som krever minst krefter å deformere, men større holdbarhet.

R32	Ø (timeglass) (mm)	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	L (før) (mm)	L (etter) (mm)	Ø(timeglass etter) (mm)
1	7,97	12,03	12,03	15,98	20,4	4,48
2	8,03	12,04	12,02	16,12	20,14	4,64

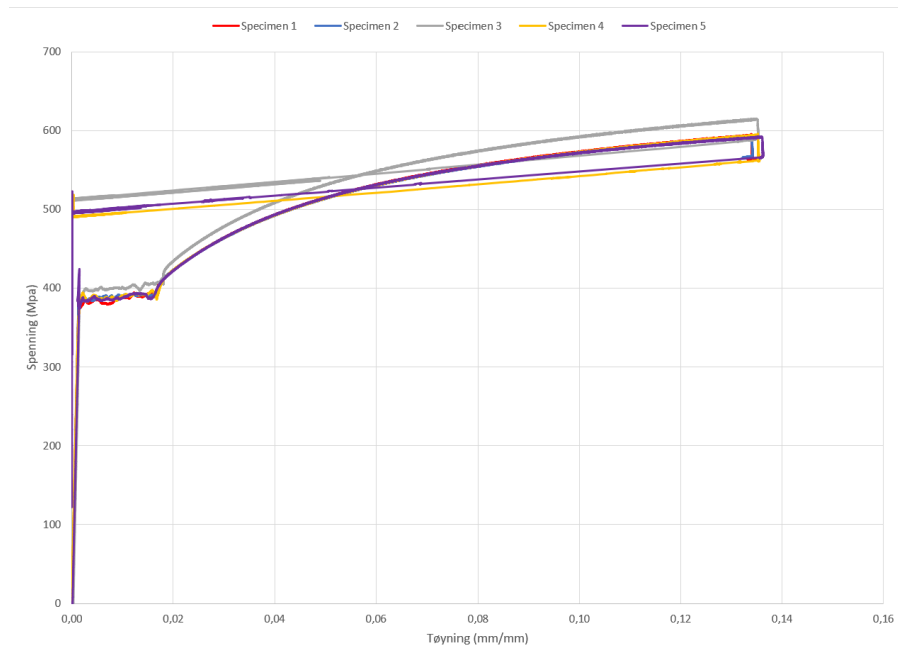
Tabell 5 - Mål på R32-stav før og etter strekk test

R48	Ø (timeglass) (mm)	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	L (før) (mm)	L (etter) (mm)	Ø(timeglass etter) (mm)
1	8,01	11,99	12	19,94	24,37	4,66
2	8	12	11,99	19,56	24,68	4,45

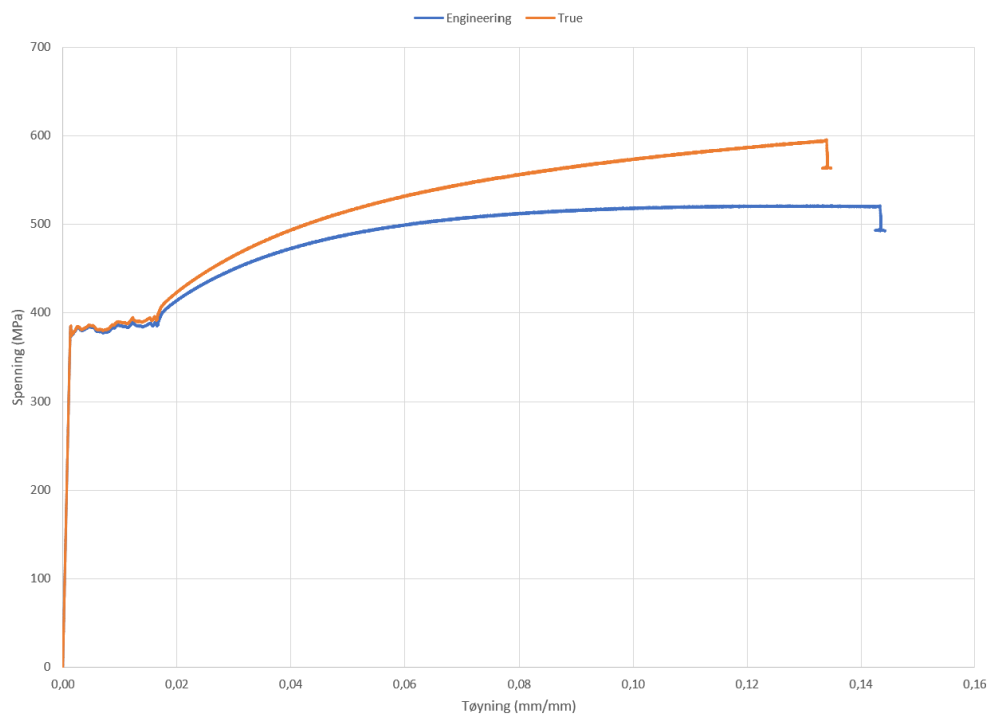
Tabell 6 - Mål på R48-stav før og etter strekk test

R64	Ø (timeglass) (mm)	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	L (før) (mm)	L (etter) (mm)	Ø(timeglass etter) (mm)
1	7,89	11,97	11,97	22,76	28,29	4,45
2	7,88	11,99	11,95	23,04	27,92	4,4

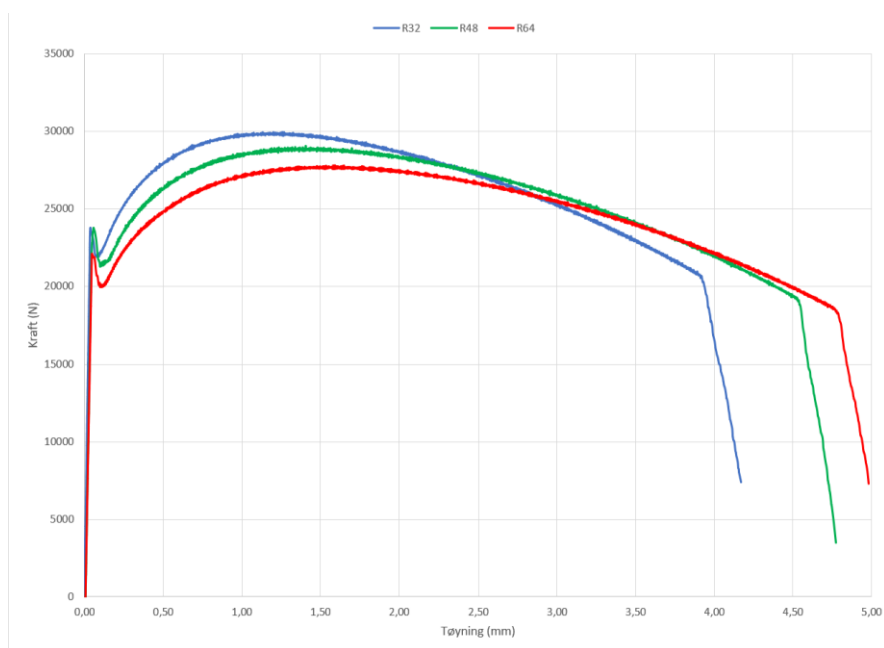
Tabell 7 - Mål på R64-stav før og etter strekk test



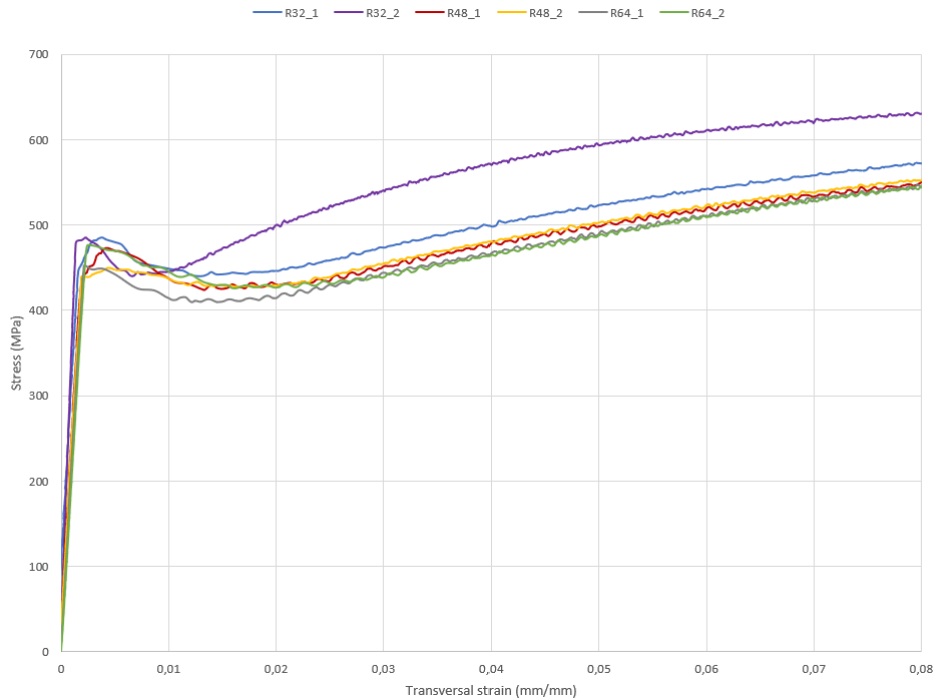
Figur 35 - Spennning-tøyningskurve til prøvestavene.



Figur 36 - Ingeniør kurve og sann kurve til prøvestavene.



Figur 37 - Kraft-forlengelse til prøvestavene.

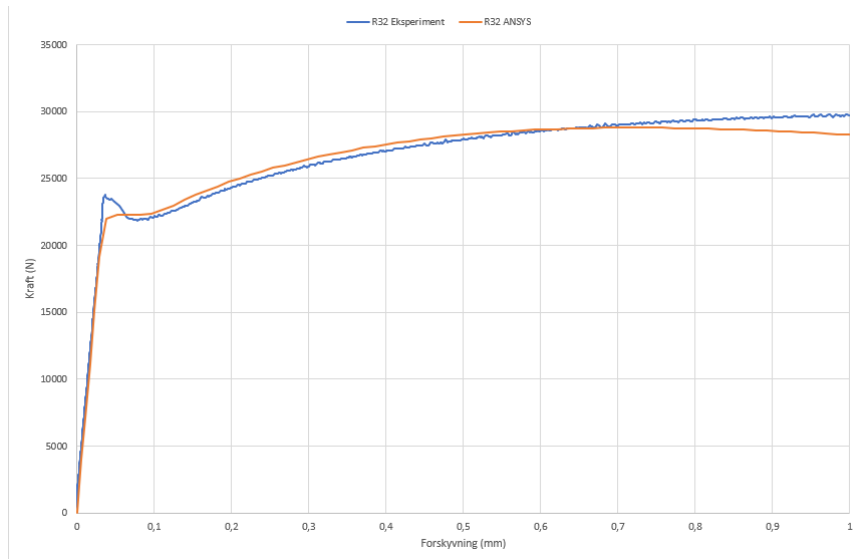


Figur 38 - Omregnet tverraksial spenning-tøyningskurve for timeglass stavene.

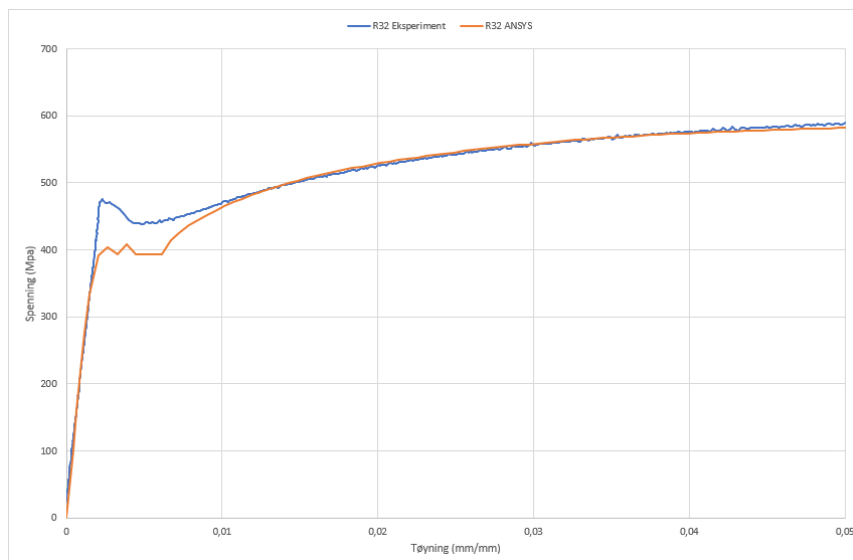
4.1.2 ANSYS – Strekk test

I dette kapitlet presenteres kraft-forlengelse kurve fra simulering og eksperiment, og spenning-tøyning kurve fra simulering og eksperiment. Som en ser nedenfor i Figur (39-44), viser R32 staven minst avvik. Trenden fra simuleringene er at desto mer diameteren øker på timeglass-formede geometrien desto mer avvik får en fra strekk-testen. Excel filer med data til resultatene ligger vedlagt.

R32

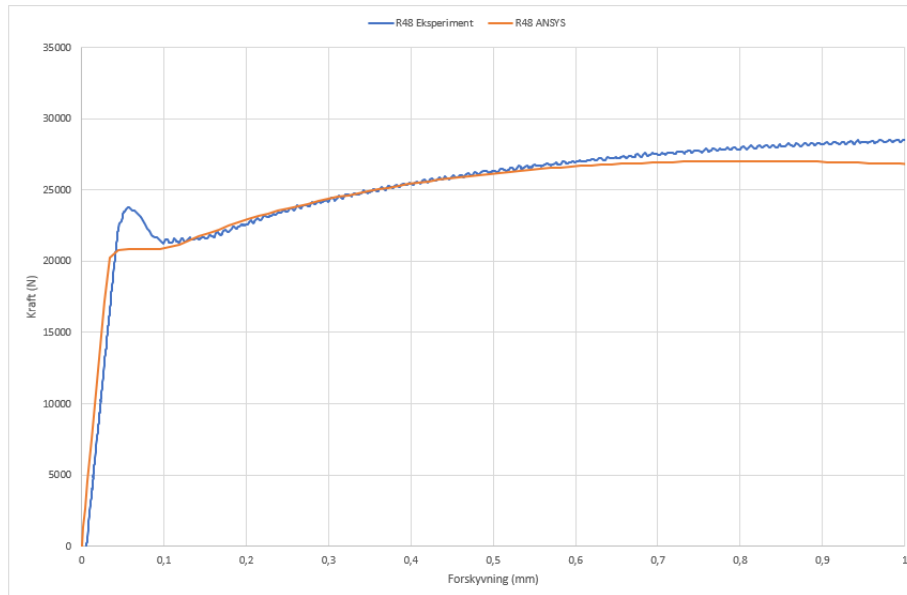


Figur 39 - Kraft-Forlengelsekurve R32.

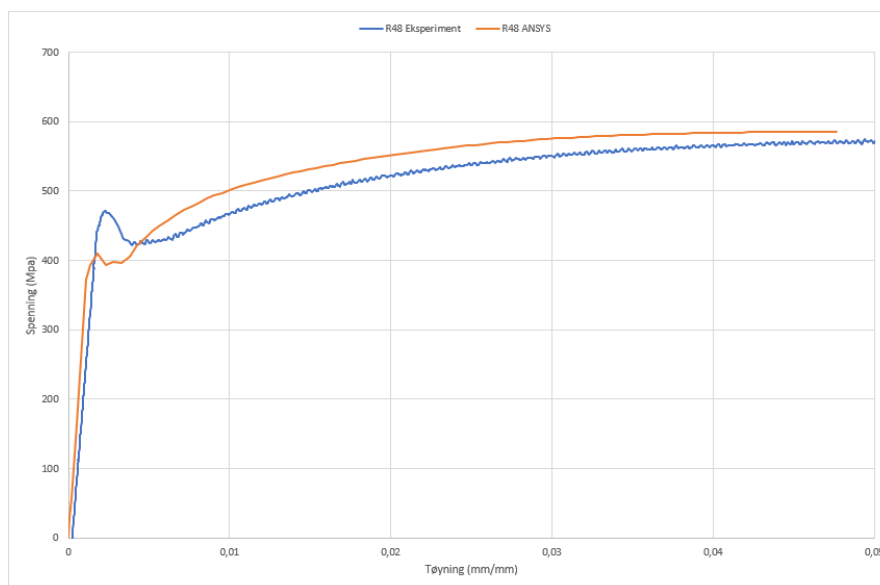


Figur 40 - Spenning-Tøyning kurve R32.

R48

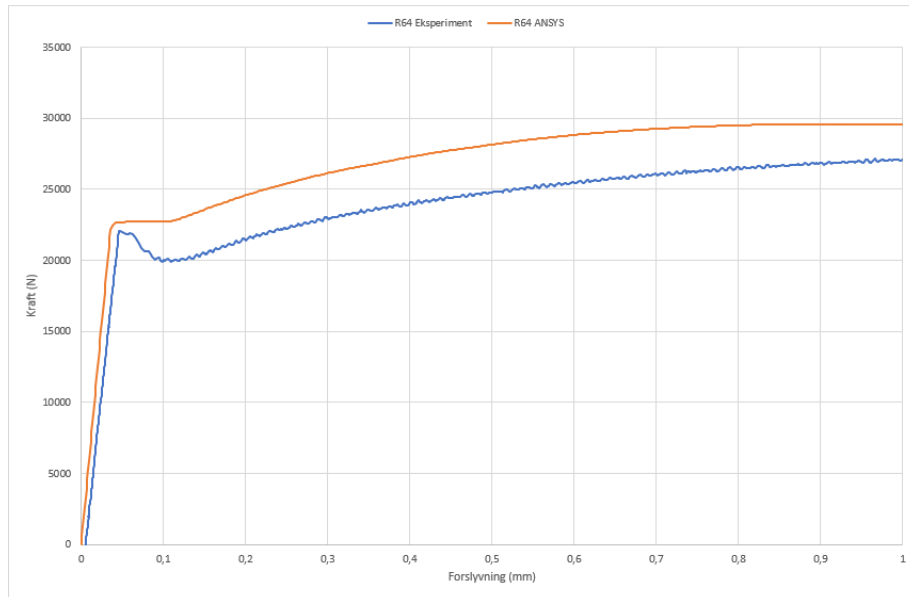


Figur 41 - Kraft-Forskyvning kurve R48.

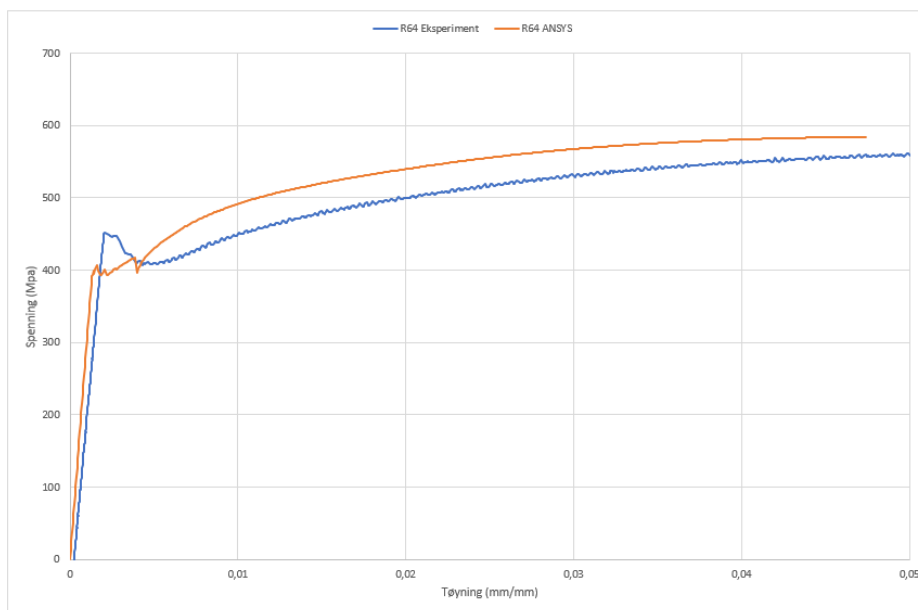


Figur 42 - Spenning-Tøyning kurve R48.

R64



Figur 43 - Kraft-Forskyvning kurve R64.

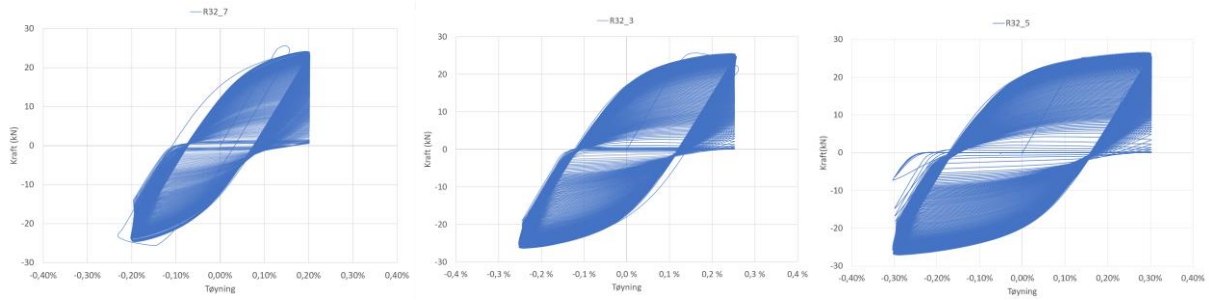


Figur 44 - Spenning-Tøyning kurve R64.

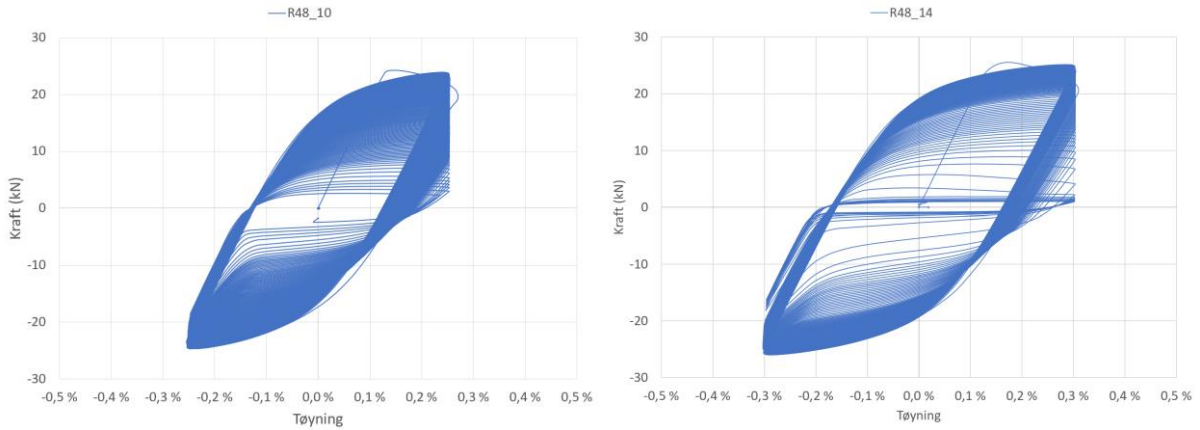
4.2 Lav syklisk utmatting

4.2.1 Lab resultater – Syklisk utmatting

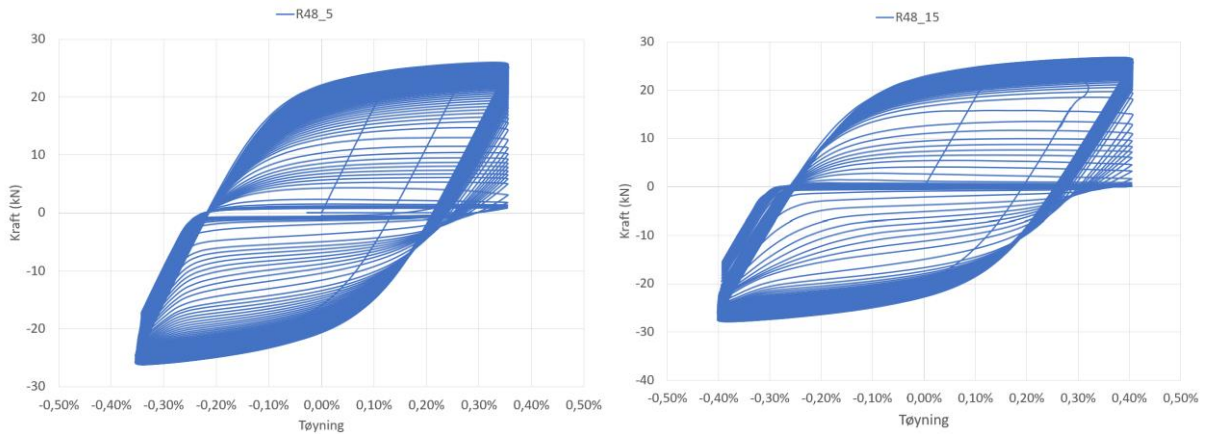
Resultatene fra den lavsykliske utmattingen på lab er presentert under i Figur (45 – 58) og i tabell (8–10).



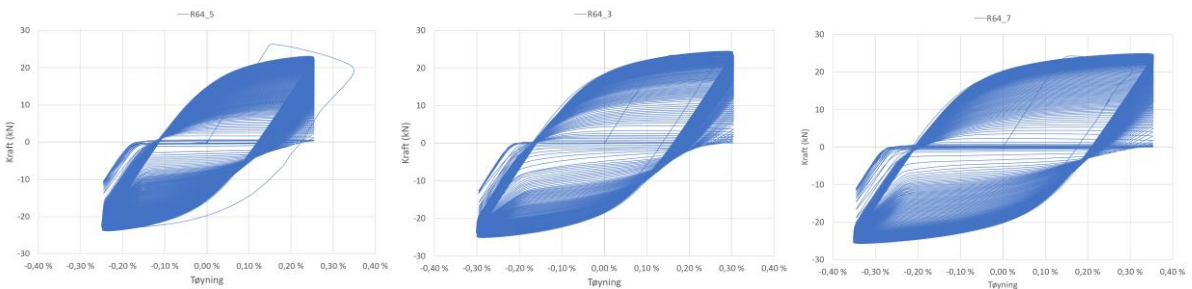
Figur 45 - Kraft-Tøyningkurve for R32 ved 0,20% (t.v.), 0,25% (i.m.) og 0,3% tøyning (t.h.)



Figur 46 - Kraft-Tøyningkurve for R48 ved 0,25% (t.v.) og 0,3% tøyning (t.h.)

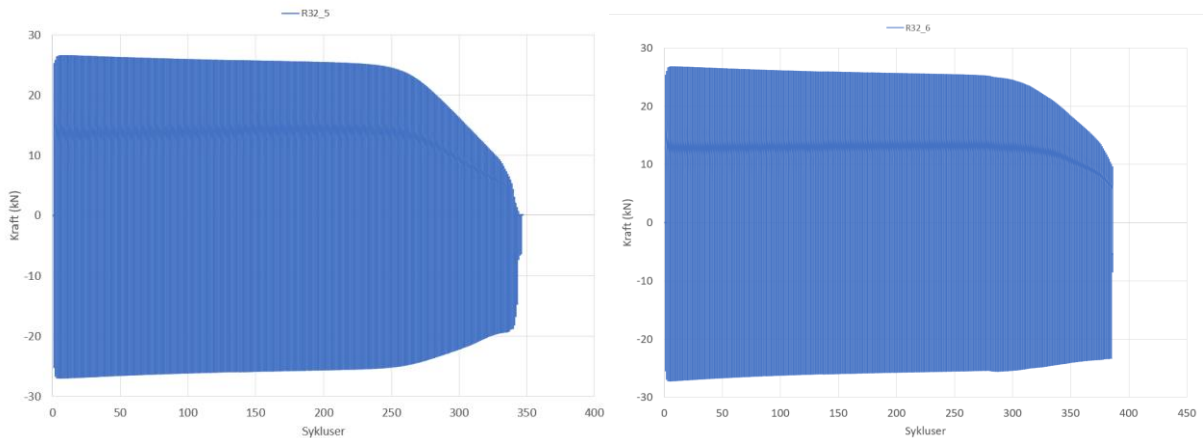


Figur 47 - Kraft-Tøyningkurve for R48 ved 0,35% (t.v.) og 0,4% tøyning (t.h.)

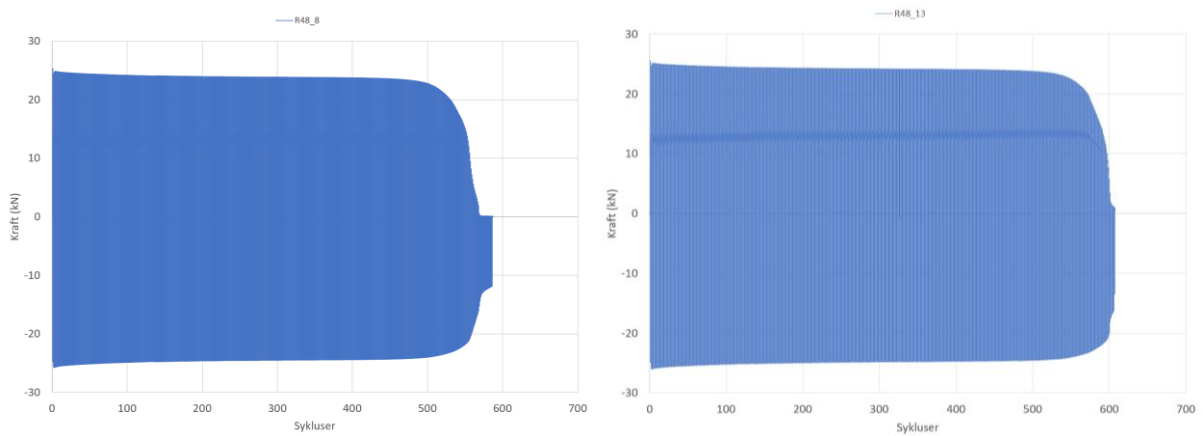


Figur 48 - Kraft-Tøyningkurve for R64 ved 0,25% (t.v.), 0,3% (i.m.) og 0,35% tøyning (t.h.)

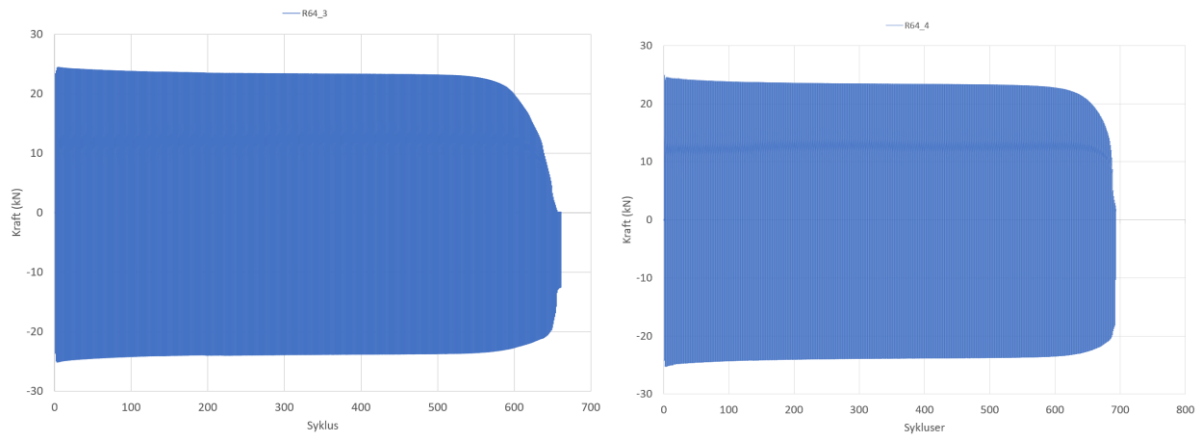
Ettersom testene var tøyingsbasert, var den nødvendige kraften per syklus stadig synkende. I starten skjer dette ved tilsynelatende konstant fart og generelt veldig rolig. Etter hvert som stålet begynner å etablere brudd avtar kreftene betydelig. Både ved kompresjon og strekking blir stålet svakere, men særlig i strekkreftene skjer dette raskt. Altså er ikke kraftreduksjonen symmetrisk. Dette er synlig når antall sykluser plottes mot kraft. Dette er vist i Figur 48-57.



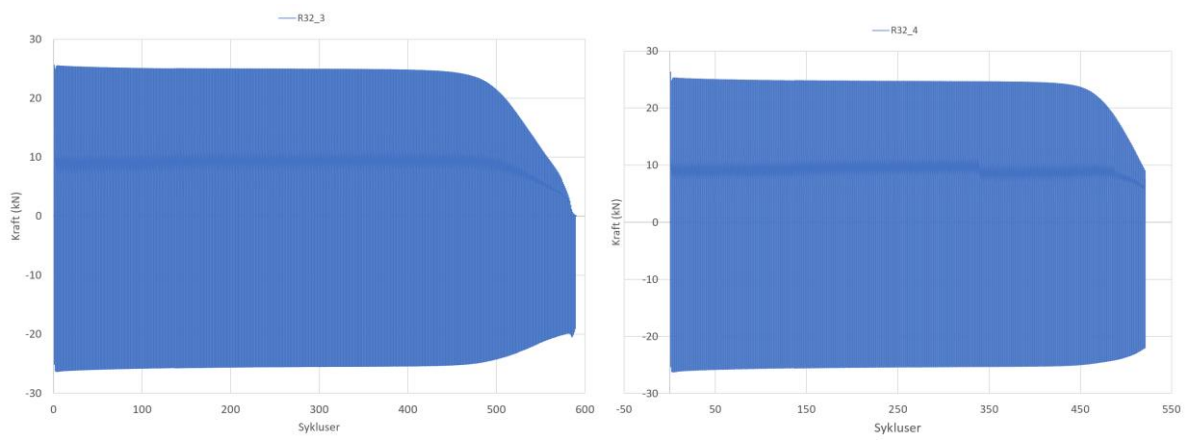
Figur 49 - Kraft-syklus kurve for R32. Tøyning 0,3%



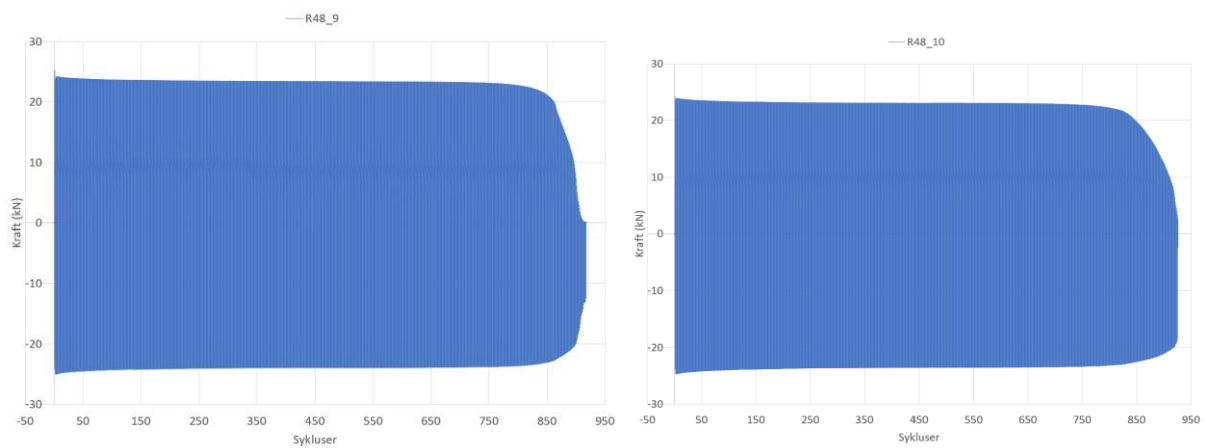
Figur 50 - Kraft-syklus kurve for R48. Tøyning 0,3%



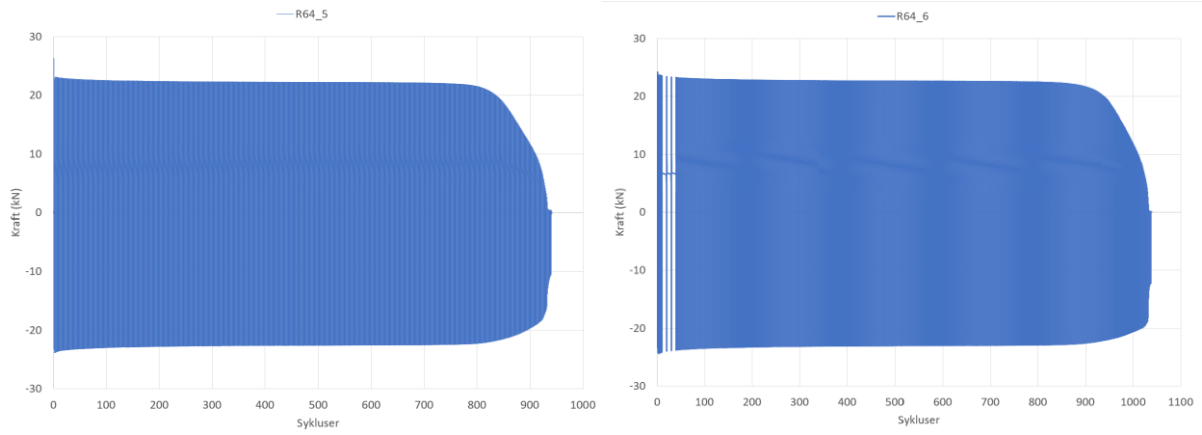
Figur 51 - Kraft-syklus kurve for R64. Tøyning 0,3%



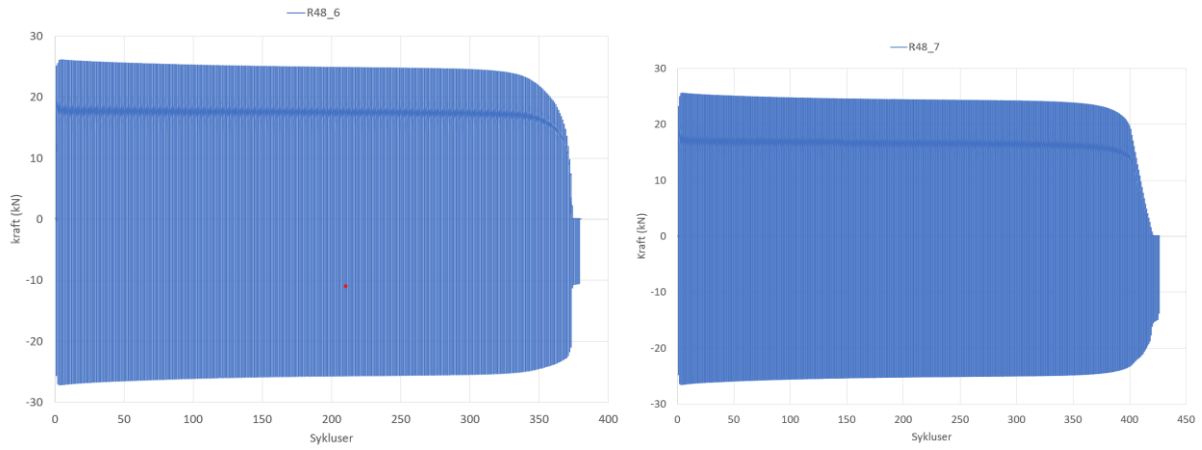
Figur 52 - Kraft-syklus kurve for R32. Tøyning 0,25%



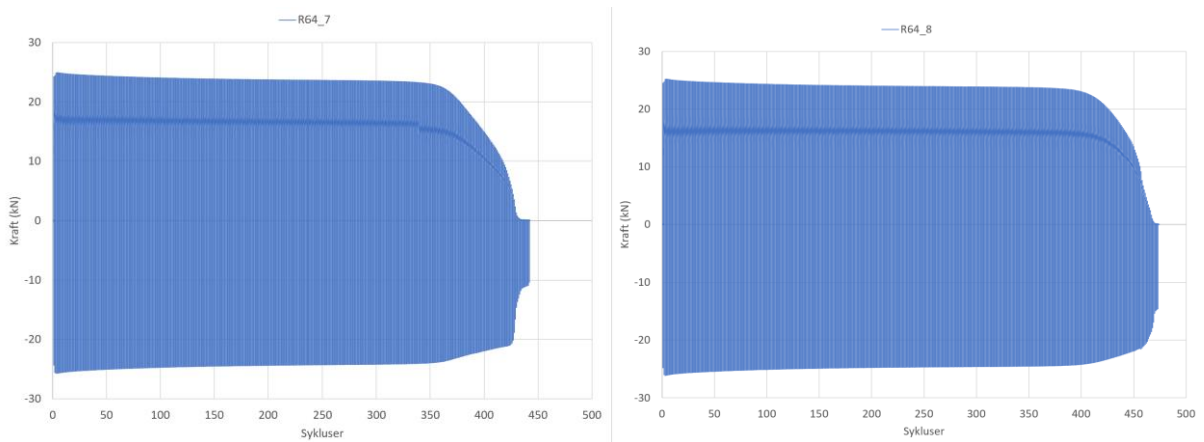
Figur 53 - Kraft-syklus kurve for R48. Tøyning 0,25%



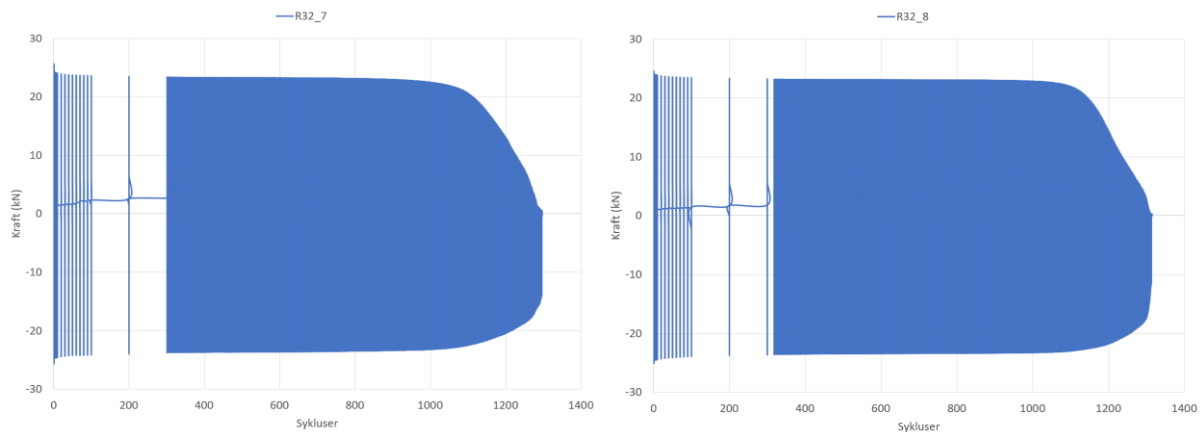
Figur 54 - Kraft-syklus kurve for R64. Tøyning 0,25%



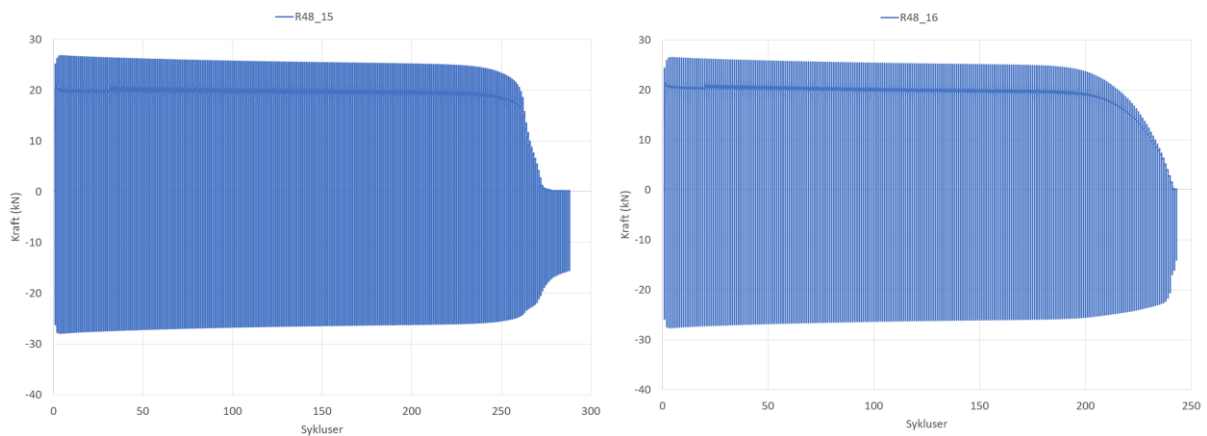
Figur 55 - Kraft-syklus kurve for R48. Tøyning 0,35%



Figur 56 - Kraft-syklus kurve for R64. Tøyning 0,35%



Figur 57 - Kraft-syklus kurve for R32. Tøyning 0,2%



Figur 58 - Kraft-syklus kurve for R48. Tøyning 0,4%

To tester ble utført per tøyningverdi for R32 og R64, mens det ble utført tre til fire tester per tøyningverdi for R48. I tillegg oppstod noen tilfeller der tøyninginput eller annet feilet for noen R48-varianter. Disse testresultatene er ikke inkludert i de presenterte figurene. Imidlertid er alle resultatene oppsummert i Tabell 8, 9 og 10. All data fra testresultatene ble registrert i to separate Excel-filer: en fil der antall sykluser ble logaritmisk registrert og en fil der antall sykluser ble registrert numerisk. For tester som overskred tusen sykluser, ble ikke de innledende syklusene registrert numerisk. I stedet ble dataene kun registrert numerisk fra et spesifikt punkt basert på hvor mange sykluser testen hadde oversteget tusen. Her har det da blitt brukt de logaritmiske dataene i starten av grafen før de numeriske dataene overtar for å fremkalle så mye som mulig av grafen.

R32	Ø (timeglass)	Ø1	Ø2	Input Ekstensometer (%)	Sykluser
3	8	12,05	12,05	0,25	589
4	8,05	12,05	12,05	0,25	520
5	8	12,05	12,1	0,3	346
6	8	12,05	12	0,3	385
7	8,05	12,05	12,1	0,2	1298
8	8,1	12,1	12,1	0,2	1315

Tabell 8 – Lavsyklus utmatting, R32

R48	Ø (timeglass)	Ø1	Ø2	Input Ekstensometer (%)	Input Maskin (mm)	Sykluser
3	8,1	12,1	12		0,35	555
4	8,05	12	12	6		7
5	8,05	12	12	0,35		400
6	8,05	12	12,05	0,35		380
7	8,1	12	12	0,35		426
8	8,1	12	12,05	0,3		587
9	8,05	12	12,05	0,25		917
10	8,05	12	12	0,25		926
11	8,05	12	12,05	0,25		959
12	8	12	12	0,3		3
13	8,05	12,05	12,05	0,3		607
14	8	12	12	0,3		597
15	8	12	12	0,4		288
16	8,05	12	12	0,4		243
17	8	12	12,05	0,4		281
18	8,05	12	12	0,4		248

Tabell 9 – Lavsyklus utmatting, R48

R64	Ø (timeglass)	Ø1	Ø2	Input Ekstensometer (%)	Sykluser
3	8	12	12	0,3	661
4	8	12	12	0,3	693
5	7,95	12	12	0,25	940
6	8,05	12	12	0,25	1038
7	8	12	12,05	0,35	441
8	8,05	12	12	0,35	473

Tabell 10 – Lavsyklus utmatting, R64

Tallene i venstre kolonne er stavnummeret. Ø står for diameter. Blått viser prøverunde. Oransje viser hvilke tester som gikk gale.

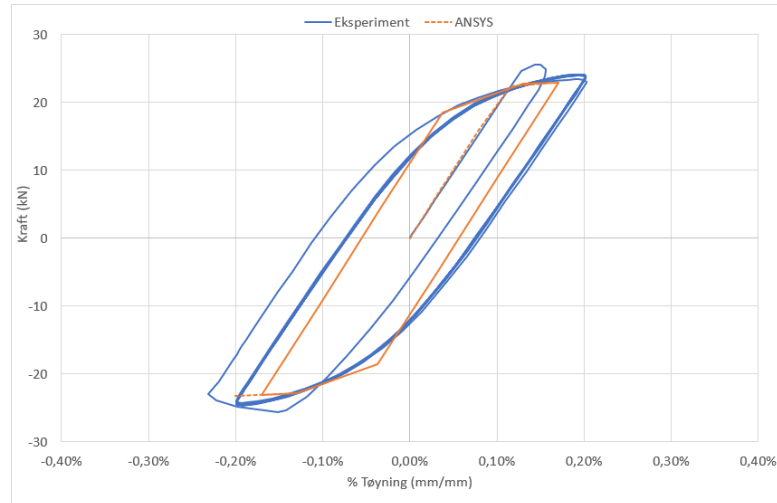
4.2.2 ANSYS – Syklisk utmatting

I dette delkapittelet presenteres resultater fra simuleringen utført i ANSYS. Diagrammene nedenfor viser Kraft-%tøyning for de ulike timeglassprøvestavene. Simuleringene ble gjennomført med 20 sykluser.

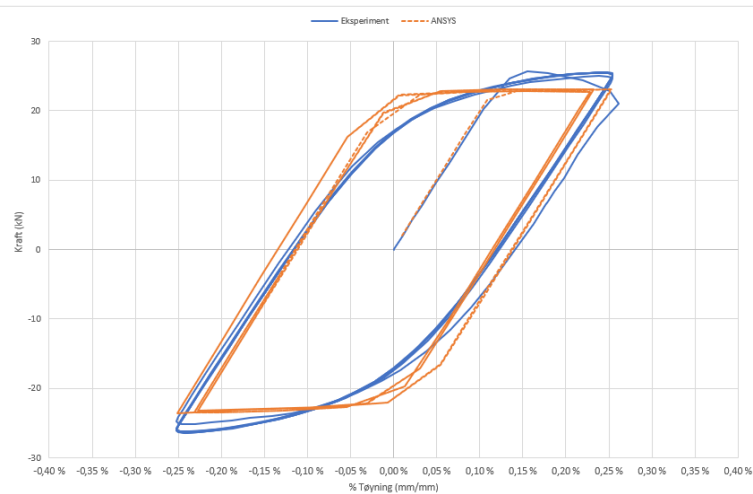
For R32-stavene var det lite variasjon i tøyningen fra syklus til syklus. Den stiplede linjen ser ut som en heltrukken linje, som indikerer en jevn og stabil tøyning gjennom syklusene. På R48- og R64-stavene varierte simuleringen i tøyning fra syklus til syklus, men kraften forble stabil. Simuleringen viser imidlertid at det er en undervurdering av den påførte kraften som

brukes til å strekke og presse prøvestavene. Mengden kraft som simuleres er lavere enn den faktiske kraften som ble målt under eksperimentene. R64 viser mer presis mengde kraft, men fortsatt en liten undervurdering.

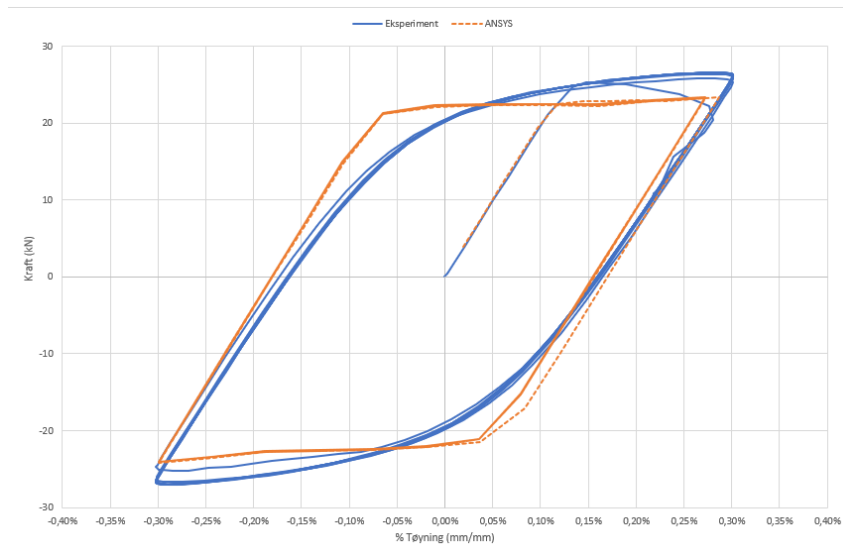
R32



Figur 59 – R32 med 0,2 % tøyning.

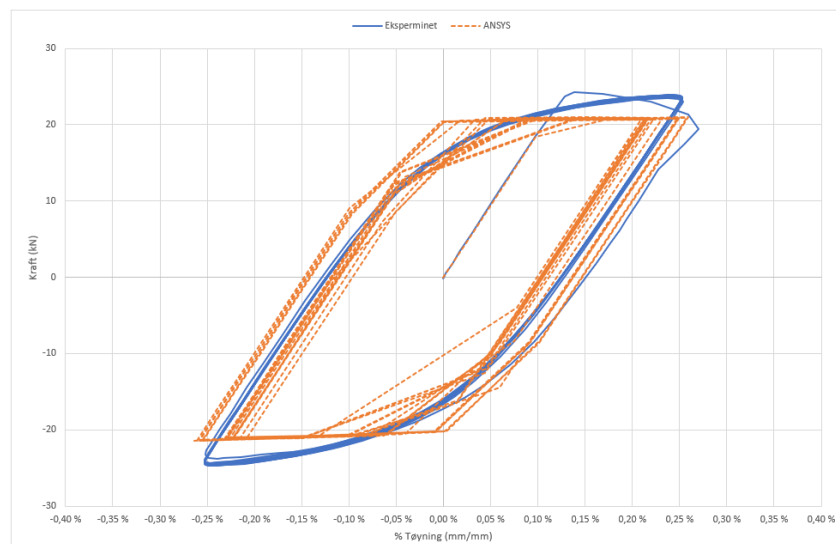


Figur 60 – R32 med 0,25% tøyning.

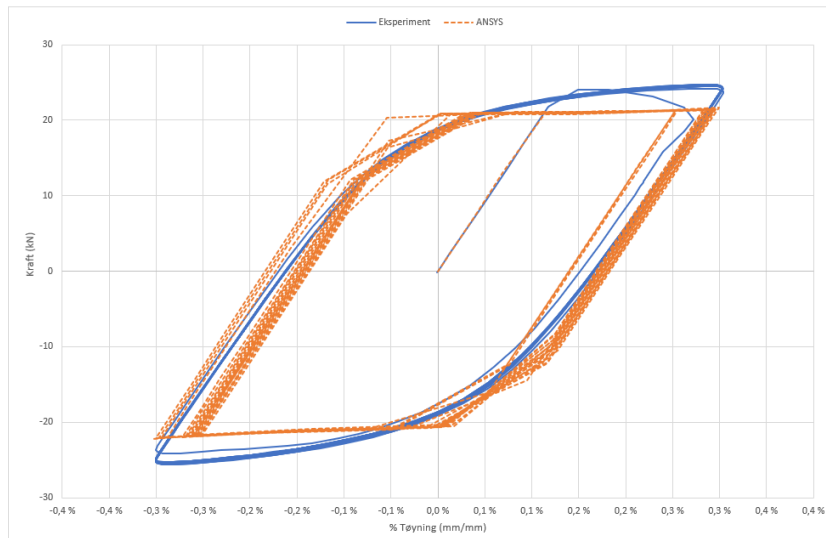


Figur 61 – R32 med 0,3% tøyning.

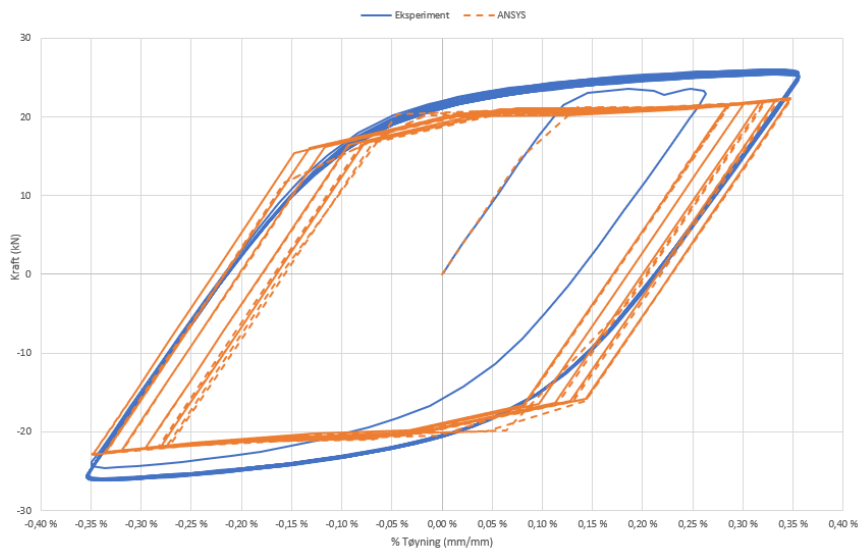
R48



Figur 62 – R48 med 0,25% tøyning.

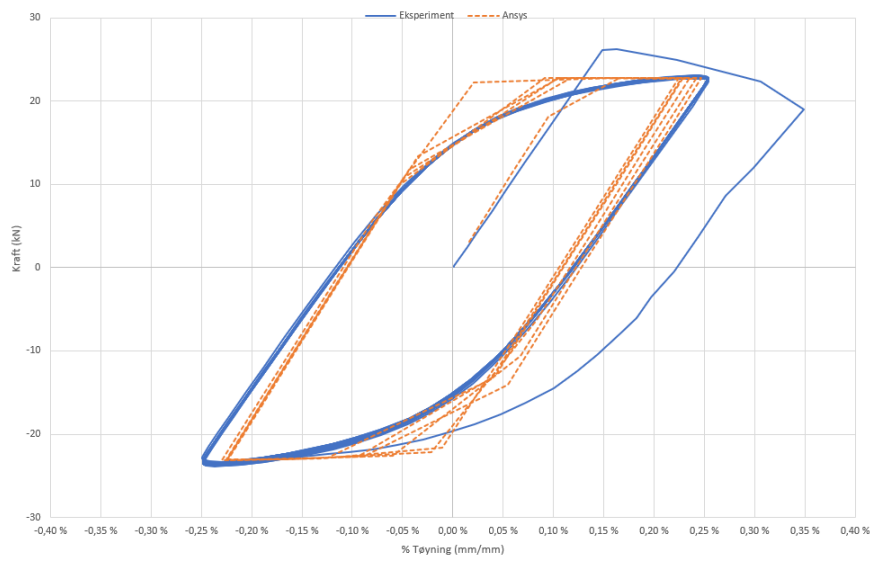


Figur 63 – R48 med 0,3% tøyning.

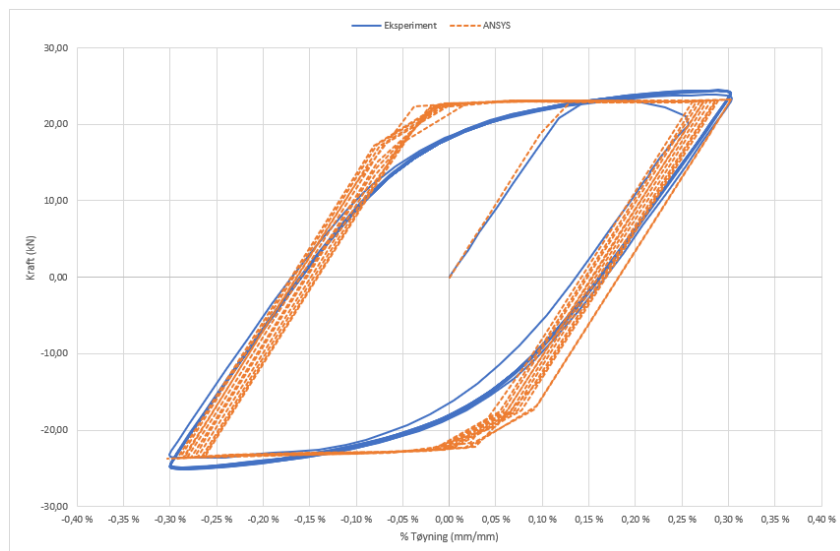


Figur 64 – R48 med 0,35% tøyning.

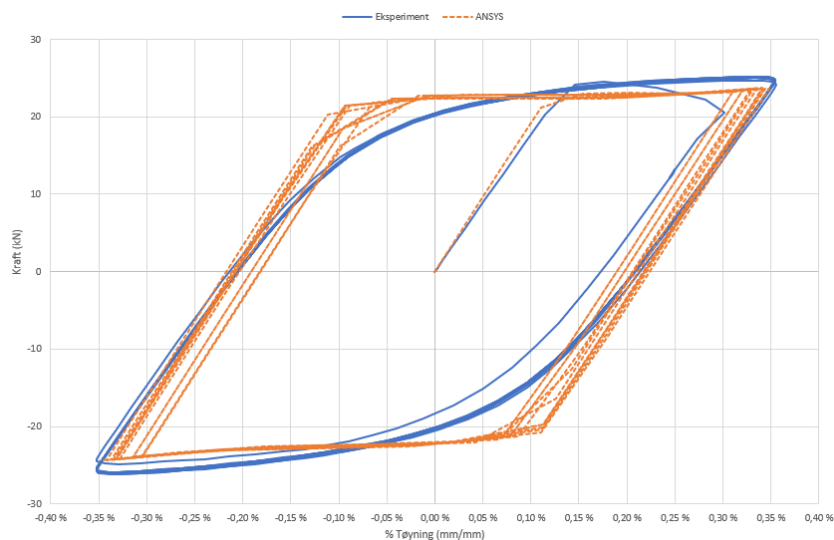
R64



Figur 65 – R64 med 0,25% tøyning.



Figur 66 – R64 med 0,3% tøyning.



Figur 67 – R64 med 0,35% tøyning.

4.3 Kommentarer

Ytterlige analyser og justeringer er nødvendig for å oppnå mer nøyaktig resultat. Simuleringene ble bestemt av forskyvning på ene enden av prøvestavene. Å simulere syklisk utmattelse er en kompleks og krevende oppgave. På grunn av tidsbegrensninger er det kun blitt simulert 20 sykluser.

5. Diskusjon

Målet med oppgaven var å simulere lav syklus utmattelse eksperiment gjennomført i laboratoriet i ANSYS på tre ulike prøvestaver. Simuleringsmodellen er basert på resultater fra strekk-tester. Strekktestene av prøvestavene med timeglass geometri viste noe avvik. Avviket gjenspeiles i simulering av utmattelse da resultatene her også avviker.

Når det kommer til sykluser til brudd og materialets utmattelseslevetid, kan denne studien kun dra fram eksperimentelle resultater. Her er det bare simulert opp til tjue sykluser. Ved videre analyser, bedre materialmodell og tid til å danne bedre kjennskap til FEA programvare, hadde det vært mulig å bedre løse dette. Resultatene viser enn viss korrelasjon med eksperiment. Sammenlignet med tidligere gjennomførte studier om samme tema [18], er resultater oppnådd i denne oppgaven lite pålitelige.

Det er tydelig fra diagrammene og tabellene i kapittel 4.2.1 at R64-varianten tåler flere sykluser med samme tøyninginput sammenlignet med de to andre variantene. En interessant observasjon er også at det er relativt liten forskjell i antall sykluser mellom R64 og R48 ved

en tøyning på 0,25%. Begge disse variantene oppnår omtrent tusen sykluser ved denne tøyningsverdien. R32 derimot oppnår bare litt over halvparten av R64 og R48 sine sykluser med 520 og 589 sykluser. Et lignende mønster er tydelig når man sammenligner de tre stavene ved en tøyning på 0,3%. Videre observeres det også en betydelig større forskjell i antall sykluser mellom de ulike tøyningsverdiene for R32 sammenlignet med R48 og R64. Dette betyr at en mindre endring i tøyningsverdien har større innvirkning på antall sykluser før brudd for R32-varianten. Som tidligere nevnt er det ingen simulerte resultater å sammenligne dette med.

Basert på kunnskapen om at deformasjonen vil oppstå der materialstaven er tynnest, kan en tenke seg fram til at dette skyldes at området der den lokale tøyningen i timeglasstrukturen enkelt kan forekomme, er mindre for R32-stavene sammenlignet med R48- og R64-stavene. Med andre ord er økningen i diameter på hver side av senteret i R32-timeglasset større enn de andre variantene. I tillegg er forskjellen i denne diameterendringen større mellom R32 og R48 enn mellom R48 og R64. Dette er noe som gjerne kunne blitt undersøkt nærmere i en annen studie, men svarer dessverre ikke på problemstillingen vår.

6. Konklusjon

Oppgaven har gått grundig gjennom teori relatert til materialegenskaper, eksperimentelle metoder og bruk av elementmetode (FEM) programvare. En systematisk tilnærming til eksperiment og simulering ble presentert, hvor både oppsettet for simuleringen og gjennomføringen av laboratorieeksperimentet ble beskrevet. En materialmodell basert på eksperiment data ble utviklet med Voce-ligningen og importert til ANSYS. To strekktester ble gjennomført på hver av timeglass-prøvestavene (R32, R48, R64) for å sammenligne eksperimentelle resultater med simuleringene. Resultatene av sammenligningen avdekket visse avvik mellom eksperiment og simulering.

Videre ble det gjennomført eksperimenter og simuleringer av lavsyklisk utmatting ved hjelp av den utviklede materialmodellen. Imidlertid var simuleringene begrenset til kun 20 sykluser. På grunnlag av de oppnådde resultatene konkluderes det med at simuleringene ikke er egnet til å forutsi brudd som oppstår som følge av utmattelse.

Det er likevel gjort interessante funn basert på de eksperimentelle resultatene angående timeglasstrukturens radius og dens virkning på syklisk utmattelsesliv. Imidlertid betraktes disse funnene som mindre relevante for den overordnede problemstillingen.

Oppgaven har dermed gitt innsikt i forskjeller mellom eksperimentelle og simuleringsbaserte tilnærminger, og understreket behovet for ytterligere analyse, forbedret materialmodell og tid til å danne bedre kjennskap til FEM-programvaren.

Referanser

- [1] A. Almar-Næss, «utmattning – teknikk», *Store norske leksikon*. 25. januar 2023. Åpnet: 20. april 2023. [Online]. Tilgjengelig på: https://snl.no/utmattning_-_teknikk
- [2] «Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing». https://www.astm.org/e0606_e0606m-12.html (åpnet 20. april 2023).
- [3] William D. Callister, JR og David G. Rethwisch, *Callisters's Materials Science and Engineering*, bd. 10. Wiley.
- [4] «Mechanical Properties of Materials | MechaniCalc». <https://mechanicalc.com/reference/mechanical-properties-of-materials> (åpnet 11. mai 2023).
- [5] «Elastisitetsmodul», *Wikipedia*. 3. april 2023. Åpnet: 11. mai 2023. [Online]. Tilgjengelig på: <https://no.wikipedia.org/w/index.php?title=Elastisitetsmodul&oldid=23464792>
- [6] Q. Xin, *Diesel Engine System Design*. 2011.
- [7] «Low Cycle Fatigue», *Metal Fatigue Life Prediction*. <https://fatigue-life.com/low-cycle-fatigue/> (åpnet 22. mai 2023).
- [8] *What is an Extensometer?*, (29. november 2022). Åpnet: 24. april 2023. [Online Video]. Tilgjengelig på: https://www.youtube.com/watch?v=_e_mXJ5eyvQ
- [9] «How to Pick the Right Extensometer». <https://www.instron.com/en/resources/how-to/how-to-pick-the-right-extensometer> (åpnet 24. april 2023).
- [10] «Transverse Clip-on Extensometers». <https://www.instron.com/en/products/testing-accessories/extensometers/transverse-clip-on> (åpnet 24. april 2023).
- [11] «What is CAD? | Computer-Aided Design (CAD) | PTC». <https://www.ptc.com/en/technologies/cad> (åpnet 20. mai 2023).
- [12] Saeed Moaveni, *FINITE ELEMENT ANALYSIS Theory and Application with ANSYS Third Edition*, 3. utg. Minnesota State University, Mankato: Pearson Education International, 2008.
- [13] D. L. Logan, *A First Course in the FINITE ELEMENT METHOD*, 5. utg. University of Wisconsin-Platteville: Global Engineering, 2012.
- [14] S. Bikass, «Introduction to finite elements», 10. august 2022.
- [15] «Geometry — Lesson 3», *ANSYS Innovation Courses*. <https://courses.ansys.com/index.php/courses/stresses-in-pressure-vessels/lessons/geometry-lesson-3-10/> (åpnet 22. mai 2023).
- [16] «Physics Setup — Lesson 5», *ANSYS Innovation Courses*. <https://courses.ansys.com/index.php/courses/stresses-in-pressure-vessels/lessons/physics-setup-lesson-5-9/> (åpnet 22. mai 2023).
- [17] R. Gjengedal, F. Ørjan, og V. Heinik, «Prediction of buckling force in hourglass-shaped specimens», *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2021.
- [18] I. K. Huray, «Master thesis Finite element modelling of the low cycle fatigue behavior of steel specimens based on experimental data». 8. mars 2022.

Liste over Figurer

Figur 1 - Skisse av spenning-tøyning diagram.....	3
Figur 2 - Skisse av elastisitetsmodulen.	4
Figur 3 - Motstandsdyktighetsmodulen. [3].	5
Figur 4 - Skisse av seighetsmodul for et sprøtt (rød) og et duktilt (blå) materiale. Basert på figur 6.13, [3].....	5
Figur 5 - Skisse av et sann spenning - sann tøyning diagram.....	7
Figur 6 - Illustrasjon av herdingsprosess. [3].	7
Figur 7 - Reversert spenningssyklus. [3].	9
Figur 8 - Repeterende spenningssyklus. [3].	9
Figur 9 - Tilfeldig spenningssyklus. [3].	9
Figur 10 - INSTRON Model 8801	11
Figur 11 - "Clip on" ekstensiometer.....	12
Figur 12 - Tverraksial "clip-on" ekstensiometer. [9].....	13
Figur 13 - Mesh bestående av element og noder, hentet fra forelesningsnotat fra emnet FEM [13]. ...	15
Figur 14 - 30x20x10 mm geometri med grov 5 mm mesh (t.v.) og fin 0,5 mm mesh (t.h.).	15
Figur 15 - Korresponderende antall element og noder i henhold til grovt og fint mesh.	15
Figur 16 - Element type og ulike dimensjoner, hentet fra forelesningsnotat fra emnet FEM [13].....	16
Figur 17 – Tegning for R32, R48 og R64 staver, dimensjoner i mm.....	17
Figur 18 – Tegning av prøvestav, dimensjoner i mm.....	17
Figur 19 - Skisse av en prøvestav gjennom en strekkprøve.	18
Figur 20 - Skisse av timeglass-stav før strekkprøve. Med oppmerkinger.	18
Figur 21 - Skisse av timeglass-stav før strekkprøve. Med oppmerkinger.	19
Figur 22 - Utdrag av geometri innstillinger, ANSYS.....	20
Figur 23 - Sketch av R48 strekkstav.....	21
Figur 24 - Geometri innstillinger i static structural modulen.	21
Figur 25 - Sann spenning-sann tøyning kurve (blå) og beregnet kurve med voce likning (grå).	22
Figur 26 - Blå linje indikerer fast grensebestemmelse.	23
Figur 27 - Gul linje indikerer forskyvning, gul pil indikerer retning (positiv y-retning).	24
Figur 28 - Konstant forskyvning fordelt på tiden (strek-test).....	24
Figur 29 - Forskyvning som veksler mellom positiv og negativ amplitude på 0,3 mm (utmattelse-simulering).	24

Figur 30 - Tøyning-Forskyvningskurve for R64 stav.....	25
Figur 31 - 2 mm mesh på R64 stav.	26
Figur 32 - Large deflection "på", under analyse innstillinger.	26
Figur 33 – Substeps brukt i simuleringen.....	26
Figur 34 -Verdier som undersøkes i analysen.	26
Figur 35 - Spenning-tøyningsskurve til prøvestavene.	28
Figur 36 - Ingeniør kurve og sann kurve til prøvestavene.....	29
Figur 37 - Kraft-forlengelse til prøvestavene.	29
Figur 38 - Omregnet tverraksial spenning-tøyningsskurve for timeglass stavene.....	30
Figur 39 - Kraft-Forlengelsekurve R32.....	31
Figur 40 - Spenning-Tøyning kurve R32.	31
Figur 41 - Kraft-Forskyvning kurve R48.	32
Figur 42 - Spenning-Tøyning kurve R48.	32
Figur 43 - Kraft-Forskyvning kurve R64.	33
Figur 44 - Spenning-Tøyning kurve R64.	33
Figur 45 - Kraft-Tøyningsskurve for R32 ved 0,20% (t.v.), 0,25% (i.m.) og 0,3% tøyning (t.h.).....	34
Figur 46 - Kraft-Tøyningsskurve for R48 ved 0,25% (t.v.) og 0,3% tøyning (t.h.).....	34
Figur 47 - Kraft-Tøyningsskurve for R48 ved 0,35% (t.v.) og 0,4% tøyning (t.h.).....	34
Figur 48 - Kraft-Tøyningsskurve for R64 ved 0,25% (t.v.), 0,3% (i.m.) og 0,35% tøyning (t.h.).....	34
Figur 49 - Kraft-syklus kurve for R32. Tøyning 0,3%	35
Figur 50 - Kraft-syklus kurve for R48. Tøyning 0,3%	35
Figur 51 - Kraft-syklus kurve for R64. Tøyning 0,3%	36
Figur 52 - Kraft-syklus kurve for R32. Tøyning 0,25%	36
Figur 53 - Kraft-syklus kurve for R48. Tøyning 0,25%	36
Figur 54 - Kraft-syklus kurve for R64. Tøyning 0,25%	37
Figur 55 - Kraft-syklus kurve for R48. Tøyning 0,35%	37
Figur 56 - Kraft-syklus kurve for R64. Tøyning 0,35%	37
Figur 57 - Kraft-syklus kurve for R32. Tøyning 0,2%	38
Figur 58 - Kraft-syklus kurve for R48. Tøyning 0,4%	38
Figur 59 – R32 med 0,2 % tøyning.	40
Figur 60 – R32 med 0,25% tøyning.	40

Figur 61 – R32 med 0,3% tøying.	41
Figur 62 – R48 med 0,25% tøying.	41
Figur 63 – R48 med 0,3% tøying.	42
Figur 64 – R48 med 0,35% tøying.	42
Figur 65 – R64 med 0,25% tøying.	43
Figur 66 – R64 med 0,3% tøying.	43
Figur 67 – R64 med 0,35% tøying.	44

Liste over Tabeller

Tabell 1 - Verdier for beregning av modell med Voce likning.	22
Tabell 2 - Tabell laget i excel som limes inn i ANSYS.	25
Tabell 3 - Utdrag fra ANSYS resultat importet til Excel. L1 er deformation probe 2, L2 er deformation probe 3.	27
Tabell 4 - Mål på strekkstav før og etter strekk test.	27
Tabell 5 - Mål på R32-stav før og etter strekk test.	28
Tabell 6 - Mål på R48-stav før og etter strekk test.	28
Tabell 7 - Mål på R64-stav før og etter strekk test.	28
Tabell 8 – Lavsyklus utmatting, R32.	39
Tabell 9 – Lavsyklus utmatting, R48.	39
Tabell 10 – Lavsyklus utmatting, R64.	39
Tabell 11 - Oversikt over vedlegg.	51

Vedlegg

A	LCF-ANSYS
B	Strekktest-Ansys
C	Voce-Beregninger
D	Tøyning-Foskyvning-Strekkstaver
E	Strek-test, timeglass
F	Oversikt, data lavsyklisk utmatting
G	Lavsyklus – R32
H	Lavsyklus – R48
I	Lavsyklus – R64

Tabell 11 - Oversikt over vedlegg

