

Effekten av temperatur og tøyningshastighet under strekkprøving av varmvalset stål

Lea Brevik Vigouroux

Bacheloroppgave i Havteknologi
Bergen, Norge 2022



Effekten av temperatur og tøyningshastighet under strekkprøving av varmvalset stål

Lea Brevik Vigouroux

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 Lümmer

English title: The effect of temperature and strain rate during
tensile testing of hot-rolled steel

Forfatter, studentnummer: Lea Brevik Vigouroux 585916

Studieprogram: Havteknologi
Dato: Mai 2022
Rapportnummer: IMM 2022-M98
Veileder ved HVL: Ragnar Gjengedal HVL ansatt
Oppdragsgiver: HVL
Oppdragsgivers referanse: Ragnar Gjengedal
Ørjan Fyllingen

Antall filer levert digitalt: 13

Forord og anerkjennelser

Denne bacheloroppgaven er skrevet som en avslutning på min 3-årige bachelorgrad i Havteknologi ved Institutt for Maskin- og Marinfag (IMM) ved Høgskulen på Vestlandet (HVL) i Bergen. Prosjektoppgaven er utgitt av HVL med førsteamanuensis Ragnar Gjengedal som veileder og professor Ørjan Fyllingen som ekstern veileder. Målet med bacheloroppgaven er å undersøke avhengigheten av tøyningshastighet og temperatur under strekkprøving av varmvalset stål.

Jeg vil begynne med å takke for all den gode hjelpen jeg har fått underveis. En stor takk til mine veiledere ved Høgskulen på Vestlandet, Ragnar Gjengedal og Ørjan Fyllingen for engasjementet, oppfølgingen og ikke minst den faglige hjelpen. Jeg vil også takke overingeniør Harald Moen, forskningstekniker Kjetil Gravelseter og avdelingsingeniør Frode Wessel Jansen ved IMM som har hjulpet meg med den eksperimentelle delen av prosjektet på laboratoriet. En stor takk til Fredrik Øsleby for hjelpen jeg har fått underveis.

Lea Brevik Vigouroux

Bergen, 06.05.21

Sammendrag

Undersøkelser for hva et materiale kan tåle og hvordan materialegenskaper påvirkes under ulike situasjoner er fundamentalt ingeniørarbeid. I denne oppgaven skal effekten av tøyningshastighet og temperatur under strekkprøving av varmvalset stål undersøkes. Oppgaven er en eksperimentell oppgave hvor en servo-hydraulisk testmaskin er blitt benyttet for å gjennomføre testene. Ulike dataprogram har blitt brukt for å loggføre dataene og utføre utregninger som vil gi ut informasjon om egenskapene til materialet.

De viktigste observasjonene gjort er at både temperatur og tøyningshastighet under strekkprøving har en effekt på materialet. Det ble oppdaget at prøvestavene som ble testet ved 300 °C røk tidligere og tålte mye mindre spenning enn testene utført ved -46 °C og 22 °C. Det ble også observert at testene utført ved -46 °C øker styrke mye raskere enn ved de andre temperaturene, når materialet blir utsatt for deformasjon. Testene ved denne temperaturen tåler mye høyere spenning og de går over til permanent deformasjon senere enn ved de andre. Tøyningshastighet har også en effekt på resultatene ved at det skjer en endring i styrke og i materialoppførsel ved ulike hastigheter.

Ved hjelp av alle testresultatene er det mulig å lage en oversikt over hvor og ved hvilken tøyningshastighet materialet egner seg best i for å kunne oppnå best mulig utnyttelse av materialet.

Abstract

Studies of what a material can withstand and how material properties are affected during different situations are fundamental engineering work. In this thesis, the effect of strain rate and temperature during tensile testing of hot-rolled steel will be examined. The task is an experimental task where a servo hydraulic test machine has been used to carry out the tests. Various software programs have been used to log the data and to perform calculations that will give information about the characteristics of the material.

The most important observations made is that both temperature and strain rate during tensile testing have an effect on the material. It was discovered that the specimens tested at 300 °C broke earlier and withstood much less stress than the tests performed at -46 °C and 22 °C. It was also observed that the tests performed at -46 °C increase strength much faster than the tests at other temperatures, when the material is exposed to deformation. The tests at this temperature can withstand much higher stress and they switch to permanent deformation later than the other. Strain rate also has an effect on the results off all tests in that there is a change in strength and in the material behavior at different speeds.

With help from all the test results, it is possible to make an overview of where and at what strain rate the material is best suited in order to achieve the best possible utilization of the material.

Innhold

Forord og anerkjennelser	V
Sammendrag	VII
Abstract	VIII
Nomenklatur	XII
1. Innledning	1
1.1 Bakgrunn og motivasjon.....	1
1.2 Målet for oppgaven.....	2
1.3 Disposisjon.....	2
2. Teoretisk bakgrunn	3
2.1 Følsomhet av tøyningshastighet.....	3
2.2 Fenomenet flytegrense.....	3
2.3 Strekkfasthet.....	4
2.4 Elastisitetsmodul (E-modul).....	4
2.5 ArbeidsherdningsekspONENT.....	5
2.6 Deformasjon.....	5
2.6.1 Elastisk deformasjon.....	5
2.6.2 Plastisk deformasjon.....	5
2.7 Arbeidsdiagram.....	6
2.8 Sann spenning og tøyning.....	7
2.9 Materialoppførsel ved temperaturendring.....	8
3. Metode	9
3.1 Teoretisk metode.....	9
3.2 Eksperimentell metode.....	11
3.2.1 Utstyr.....	12
3.2.2 Test ved 22 °C.....	12
3.2.3 Test ved 300 °C.....	14
3.2.4 Test ved -46 °C.....	17
4. Programvareverktøy	20
4.1 Microsoft Office Excel.....	20
4.2 Instron Bluehill Software.....	20
5. Analyse	21
5.1 Dataverktøy.....	21
5.2 Formler.....	23

6. Resultat.....	24
6.1 Eksperimentfunn	24
6.1.1 Tester utført ved 22 °C.....	24
6.1.2 Tester utført ved 300 °C.....	27
6.1.3 Temperatur -46 °C.....	30
6.1.4 Effekten av temperatur ved lik tøyningshastighet.....	32
7. Diskusjon.....	37
8. Konklusjon	39
9. Feilkilder	40
Referanser.....	41
Figurer.....	42
Bilder	42
Tabeller.....	43
Diagrammer.....	43
Formler	44
Vedlegg	45

Nomenklatur

Symboler

F	Kraft	[N]
N	Newton	[N]
A_0	Tverrsnittsareal	[mm ²]
σ	Spenning	[MPa] = [N/mm ²]
ϵ	Tøyning	[mm/mm] = [mm]
σ_T	Sann spenning	[MPa] = [N/mm ²]
ϵ_T	Sann tøyning	[mm/mm]
l_i	Den øyeblikkelige lengde	[mm]
l_0	Den originale lengden før belastning er påført	[mm]
Δ	Delta	
n	ArbeidsherdningsekspONENT	
K	Styrke koeffisient	[MPa] = [N/mm ²]
J	Joule	[J]
°C	Grad celsius	

Forkortelser

MPa	Megapascal
CO ₂	Karbondioksid
S235JRG2	S = konstruksjonsstål; 235 = minimum flytegrense verdi (MPa) for stål med tjukkelse ≤ 16 mm; JR = påvirkningsenergi 27 J ved romtemperatur, G2 = underinndelt kvalitetskarakter
LT	Low temperature (lav temperert)
SMYS	Specified minimum yield strength (spesifisert minimum flytegrense).
Origo	Senter mellom aksene

1. Innledning

1.1 Bakgrunn og motivasjon

Å finne nye energikilder vil være nødvendig for å kunne opprettholde verdens energibehov i fremtiden. Verdens energiforbruk har steget med 50 prosent de siste 20 årene, og utviklingen fortsetter. Fossilt brennstoff som olje, gass og kull, er de verste til å bidra til klimaendringene. Disse energikildene må erstattes om nedbremsing av den globale oppvarmingen skal oppnås. Det finnes flere kilder til fornybar energi. Vindkraft, vannkraft, bølgekraft og solenergi er blant energikilder som er fornybare [1]. Geotermisk energi, også kalt jordvarme, ligger også under denne kategorien. Denne er blant de største potensielle energikildene vi har [2].

Geotermisk energi er energi som er lagret i jorden i form av varme. Denne tilsvarer om lag 35 milliarder ganger av verdens årlige forbruk [3]. For å utvinne denne brukes det et geotermisk kraftverk hvor energien fra jordvarmen utnyttes til å produsere elektrisk energi. Her blir det boret en brønn (produksjonsbrønn) ned til et høytemperaturresevoir. Det er såpass høyt trykk i denne brønnen at varmt vann og damp stiger opp og ledes til kraftstasjonen. I kraftstasjonen brukes det vanndamp til å drive en turbin, mens det varme vannet i væskeform kan brukes til oppvarming. Etter dette ledes vannet tilbake ned til reservoaret via en injeksjonsbrønn. Dette fører til at trykket og vannmengden forblir uendret. Geotermisk energi finnes i hele verden og i praksis er den kun hindret av mangel på teknologi og ressurser for å utnytte den effektivt [2].

Strekking vil være en del av å kunne bore med en kveilet borestreng for å kunne lage tynne borehull. Disse vil kunne senke produksjonskostnadene og utslipp fra eksisterende felt, men det er også en teknologi for å overføre tradisjonell boring til dyp geotermisk boring for å utnytte varme i grunnen. Teknologien har også overføringsverdi ved å brukes til å lete etter mineraler i fjell over eller under vann. Det er derfor nødvendig å utvikle en metode for å kunne undersøke hva materialet tåler ved ulike temperaturer og tøyningshastigheter.

Strekprøving er en testmetode hvor de ulike egenskapene til et materiale undersøkes. Ved hjelp av en servo-hydraulisk testmaskin der en prøvestav blir strukket, kan egenskaper som strekkfasthet, bruddstyrke, maksimale forlengelse før brudd og tverrsnittsarealet måles. Fra disse målingene kan også egenskaper som blant annet elastisitetsmodulen, også kalt E-modul, flytespenning, arbeidsherdningsekspONENTEN og styrkekoEFFISIENTEN K beregnes.

Slike materialegenskaper vil være nødvendig for å kunne hindre deformasjon og brudd under forskjellige situasjoner, slik som for eksempel under boring. Materialets mekaniske oppførsel reflekterer hvordan det vil reagere når det påføres en last eller kraft. Dette er derfor en studie som vil gi ut nyttig og viktig informasjon til fundamentalt ingeniørarbeid [4].

1.2 Målet for oppgaven

Målet for oppgaven er å undersøke avhengigheten av tøyningshastighet og temperatur for å se hvordan dette påvirker materialeegenskapene under strekkprøving av varmvalset stål. Med disse undersøkelsene kan det lages en oversikt over materialeegenskapene ved ulike situasjoner.

Problemstillingen går ut på om ulike temperaturer og tøyningshastigheter vil ha en effekt på materialeegenskapene under strekkprøving, og i så fall hvilken?

1.3 Disposisjon

Opgaven starter med en kort introduksjon av bakgrunnen og motivasjonen for oppgaven, før målet for oppgaven presenteres.

Kapittel 2 består av teoretisk bakgrunn. Her blir teoriene lagt frem for å utføre videre analyser i oppgaven.

Kapittel 3 tar for seg fremgangsmåten som er brukt for å kunne utføre forsøkene på laboratorium.

I kapittel 4 introduseres programvareverktøy som er brukt for å analysere dataene.

Kapittel 5 består av analyse, hvor det blir tatt for seg hvordan dataene har blitt analysert i prosjektet.

Deretter i kapittel 6 legges det frem resultat fra de eksperimentelle funnene.

Kapittel 7 består av diskusjon som tar opp resultater, irregularetter og om videre forskning.

I kapittel 8 presenteres konklusjonen i henhold til resultatene fra undersøkelsen.

Til slutt i kapittel 9 blir feilkilder som er funnet lagt frem.

Avslutningsvis er det listet referanser, figurer, bilder, tabeller, diagrammer, formler og vedlegg.

2. Teoretisk bakgrunn

I dette kapittel presenteres teoretisk bakgrunn som vil gi en relevant forståelse for prosjektet og hvordan den eksperimentelle delen ble gjennomgått.

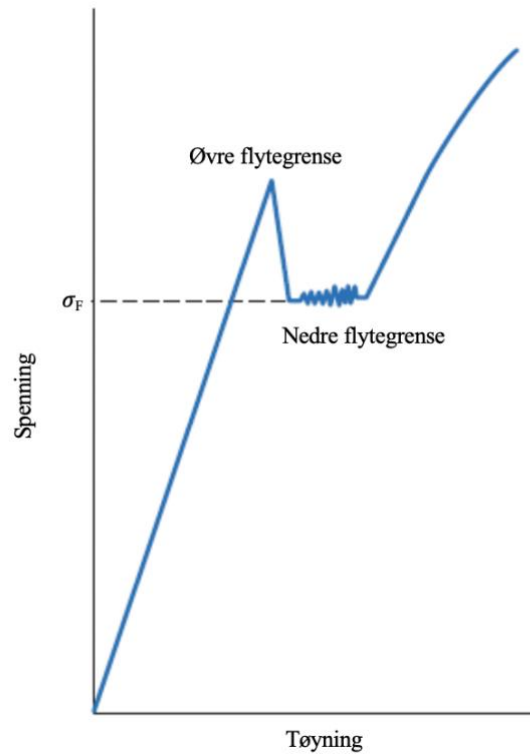
2.1 Følsomhet av tøyningshastighet

Følsomhet av tøyningshastighet, «Strain-rate sensitivity», er en viktig parameter for deformasjonsmekanismen av materialet. Definisjonen av følsomhet av tøyningshastighet er basert på gradvis endring i tøyningshastighet under tester utført ved en fast temperatur og fast mikrostruktur, for å bestemme tilsvarende endring i flytespenning [5].

Ved undersøkelser hvor det er utført strekkprøving med ulike hastigheter, er det mulig å finne ut om materialet er følsomt. Ved tester med ulike hastigheter og ulike resultat, viser dette til at materialet er følsomt mot tøyningshastighet.

2.2 Fenomenet flytegrense

Den elastiske-plastiske overgangen er godt definert og oppstår er fenomenet som kalles for flytegrense. Ved øvre flytegrense initieres plastisk deformasjon med en tilsynelatende reduksjon i spenningen. Den videre deformasjonen svinger svakt med nesten konstant spenningsverdi, som kalles den nedre flytegrensen. Videre stiger spenningen ved en økende tøyning. Flytegrensen er spenningen som markerer overgangen fra elastisk til plastisk deformasjon. Denne grensen er et mål på hvor mye kraft et materiale tåler før det blir varig deformert. Figur 1 viser en representativ spenning-tøyning oppførsel ved noen typer stål, hvor flytegrense blir demonstrert [6].



Figur 1: Fenomenet flytegrense [6].

2.3 Strekkfasthet

Strekkfastheten er den maksimale spenningen som kan måles ved strekkprøving [4]. Dette tilsvarer den maksimale spenningen som kan tåles av en struktur i spenning. Om denne spenningen påføres og opprettholdes, vil det til slutt oppstå brudd [6]. Denne er illustrert i figur 2.

2.4 Elastisitetsmodul (E-modul)

Elastisitetsmodulen, også kalt E-modul, er forholdet av spenning og tøyning når deformasjonen er fullstendig elastisk [6]. E-modulen måler stivheten til materialet og dets motstandsevne mot elastisk deformasjon [7].

2.5 ArbeidsherdningsekspONENT

ArbeidsherdningsekspONENTen, *n-verdien*, for et materiale er et mål på hvor raskt materialet øker styrke når det er utsatt for deformasjon. Forholdet mellom spenning og tøyning kan uttrykkes ved Hollomon's formel:

$$\sigma_T = K\epsilon_T^n \quad (1)$$

Formel 1: Hollomon's formel.

hvor σ_T og ϵ_T er sann spenning og sann tøyning og K og n er koeffisienter. Materialer med høy n-verdi viser til god formbarhet [5]. Formbarhet er definert som graden av deformasjon som kan oppnås i en metallformingsprosess uten å skape en uønsket tilstand, slik som sprekker, halsing og knekking [1].

2.6 Deformasjon

Ved strekkprøving vil det oppstå deformasjon av materialet. Det finnes to ulike former for deformasjon.

2.6.1 Elastisk deformasjon

Elastisk deformasjon er en type deformasjon som ikke er permanent. Dette betyr at materialet vil gå tilbake til sin opprinnelige form når belastningen/spenning blir fjernet [6].

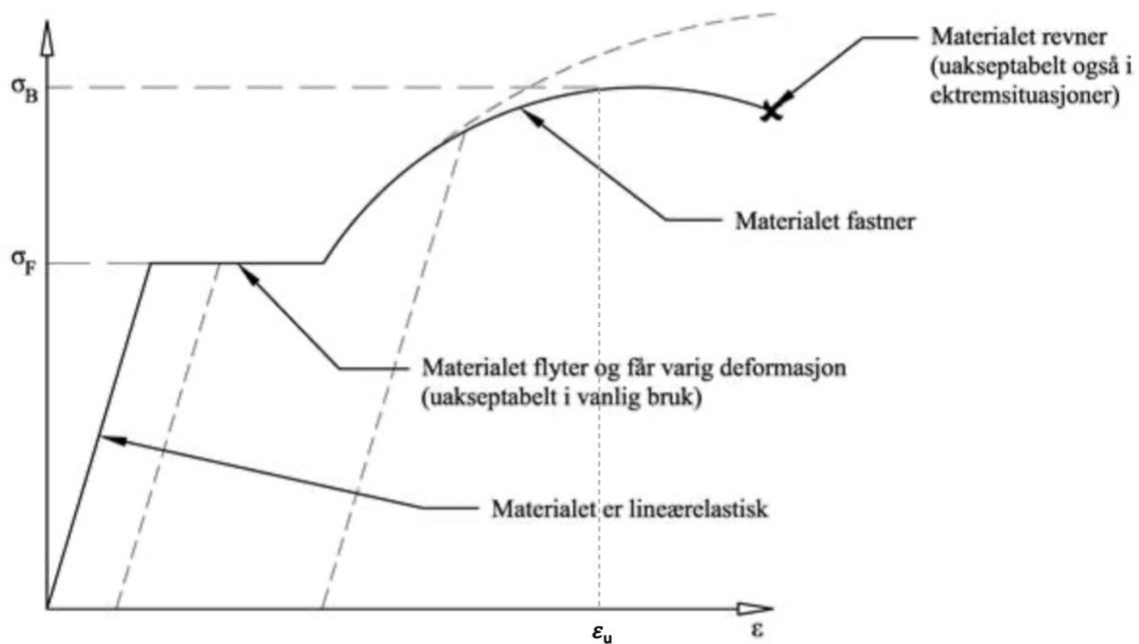
2.6.2 Plastisk deformasjon

Den andre formen for deformasjon er plastisk deformasjon. Denne typen deformasjon er permanent og ikke-reversibel etter at belastningen er fjernet. Denne er ledsaget av permanent atomforskyvning [6].

2.7 Arbeidsdiagram

Prøvens målinger starter ved senter mellom aksene, origo. Den første delen er en lineær sammenheng av spenning og tøyning. I dette området er materialet elastisk, det vil si at den går tilbake til sin opprinnelige form hvis lasten tas bort. Stigningen til linjen er E-modulen til materialet og denne kan regnes ut.

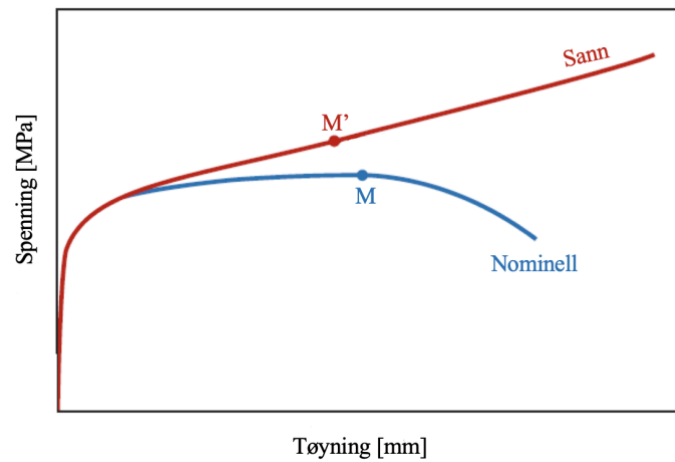
Videre øker spenning, og dette fører til en markant endring, hvor materialet gir etter og mister sin styrke. Her flyter materialet og dette kalles for materialets flytegrense (σ_F). Etter denne grensen er nådd, vil ikke materialet gå tilbake til sin opprinnelige form om belastning tas bort. Når strekkingen fortsetter vil materialet etter hvert fastne og det blir tydelig framstilt i diagrammet at materialet har en del ekstra styrke utover flytegrensen før det revner. Ved den stiplede linjen σ_B er strekkfastheten. Dette er grafens toppunkt. Tøyning ved strekkfastheten (ϵ_u) kalles den uniforme tøyningen. Et typisk arbeidsdiagram for vanlig konstruksjonsstål er illustrert i figur 2.



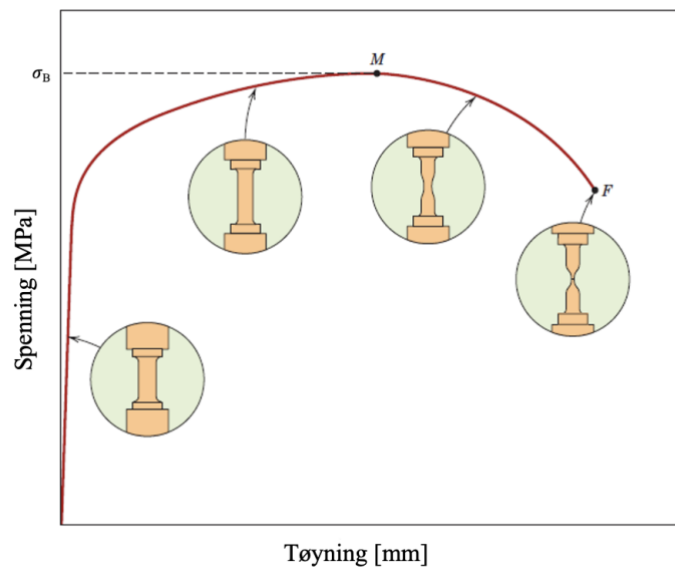
Figur 2: Arbeidsdiagram for vanlig konstruksjonsstål [8].

2.8 Sann spenning og tøyning

Figur 3 viser en sammenligning av oppførselen til en spenning-tøyningskurve og sann spenning-tøyningskurve. Her kan det se ut som materialet blir svakere etter punkt «M», men dette stemmer ikke. Rett før materialet revner, blir prøvens tverrsnitt innsnevret. Dette kalles for «halsing». I figur 4 er dette illustrert. Det er ikke mulig for testmaskinen å måle denne tverrsnittsreduksjonen ved strekkprøving og spenningen blir derfor beregnet med det nominelle tverrsnittsarealet, A_0 .



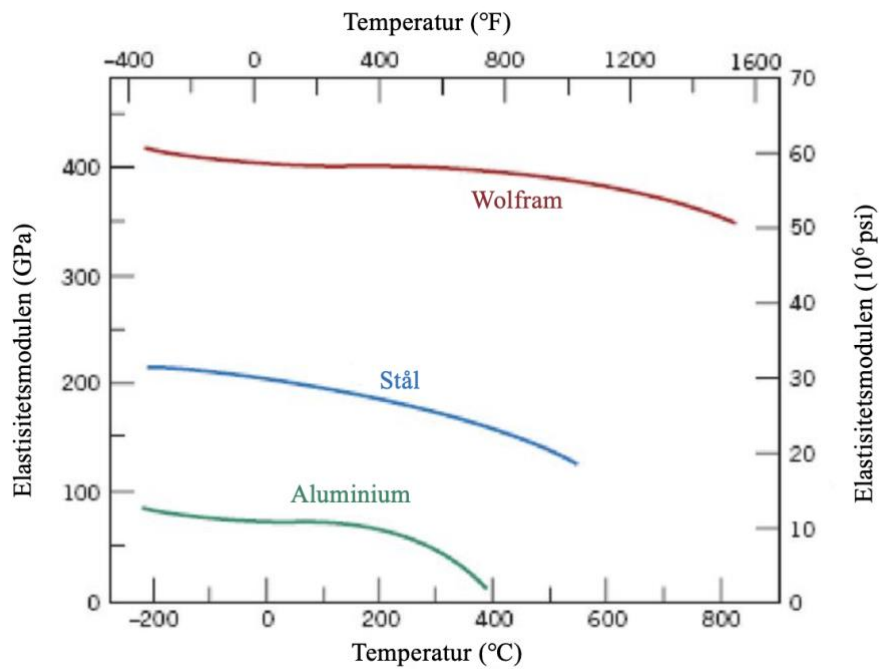
Figur 3: Sammenligning av typisk spenning-tøyning (nominell) og sann spenning-tøyning oppførsel [6].



Figur 4: Typisk spenning-tøyning oppførsel hvor halsing oppstår etter strekkfastheten [6].

2.9 Materialoppførsel ved temperaturendring

Ved økende temperatur, minsker E-modulen, som vist i figur 5, for ulike metaller. Det vil si at materialet sin motstandsevne mot elastisk deformasjon reduseres ved økende temperatur.



Figur 5: Elastisetsmodulen opp mot temperatur [6].

3. Metode

I dette kapittelet presenteres metodene som er brukt for å løse problemstillingen i dette prosjektet. Metodene omfatter teoretisk og eksperimentell metode.

3.1 Teoretisk metode

For å regne ut de forskjellige verdiene til dette prosjektet ble flere relevante formler nyttet. Disse er listet her.

Nominell spenning er gitt ved

$$F = \frac{\sigma}{A_0} \quad (2)$$

Formel 2: Nominell spenning.

hvor F er kraften som blir påført vinkelrett på prøvens tverrsnitt og A_0 er tverrsnittsarealet før noe last er påført.

Sann spenning gitt ved:

$$\sigma_T = \sigma \cdot (1 + \epsilon) \quad (3)$$

Formel 3: Sann spenning.

hvor ϵ er tøyning.

Nominell tøyning er gitt ved:

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4)$$

Formel 4: Nominell tøyning.

hvor l_0 er den originale lengden før det ble påført en last og l_i er den øyeblikkelige lengden. $l_i - l_0$ kan bli angitt som Δl og er deformasjon forlengelsen eller endring i lengde.

Sann tøyning gitt ved:

$$\epsilon_T = \ln(1 + \epsilon) \quad (5)$$

Formel 5: Sann tøyning.

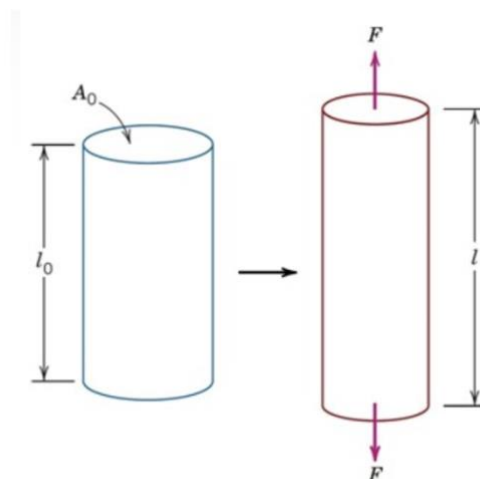
hvor \ln står for «den naturlige logaritmen».

E-modul er gitt ved:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (6)$$

Formel 6: Elastisitetsmodul (E-modul).

Figur 6 illustrer hvordan en strekkbelastning produserer en forlengelse og positiv lineær tøyning.



Figur 6: Skjematisk tegning av forlengelse og tøyning [6].

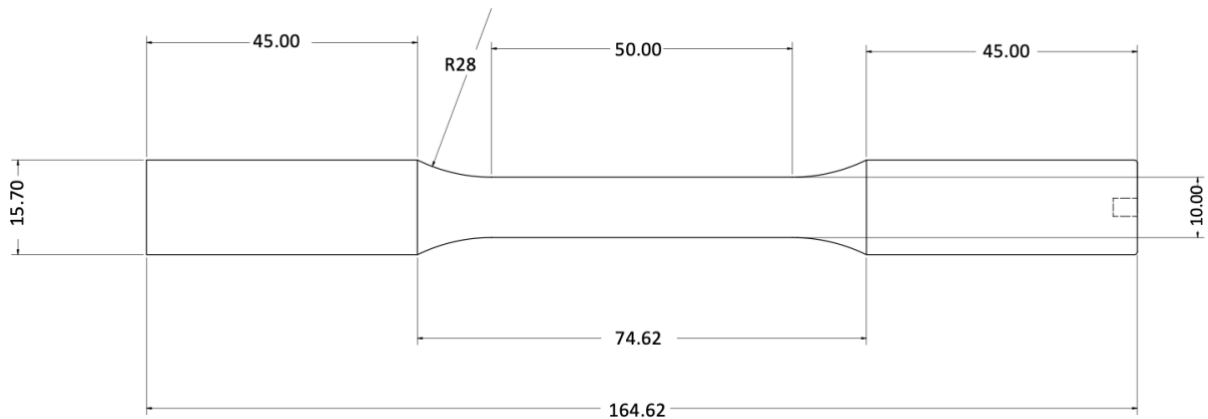
3.2 Eksperimentell metode

Materialet som er brukt i testene er S235JRG2 som er varmvalset,

hvor:

S235 = sveisbart konstruksjonsstål med flytegrense 235 MPa, JR = påvirkningsenergi på 27 J ved romtemperatur, G2 = underinndelt kvalitetskarakter [9].

Testene ble utført av en servo-hydraulisk testmaskin kalt Instron 8800 ved Høgskulen på Vestlandet i Bergen. Denne modellen har forlengede søyler for å kunne benytte et temperaturkammer. Det ble utført totalt 20 tester, hvor 13 av dem var brukbare. Under slike tester er det nødvendig å regne med at ulike feil kan oppstå. Det ble av den grunn produsert flere prøvestaver. Prøvestavenes dimensjoner, oppgitt i millimeter, er illustrert i figur 7.



Figur 7: Arbeidstegning av prøvestavene (millimeter) [10].

3.2.1 Utstyr

Ved eksperimentelle oppgaver slik som strekkprøving, krevers det ulike utstyr. Tabell 1 er en liste over utstyr som ble nyttet under testene på laboratoriet:

Utstyr	Hensikt
Prøvestaver	Utføre testene på
Skyvelære	Måle den minste diameteren på prøvestaven
Ekstensometer	Måle forlengelsen ved strekkprøving
Servo-hydraulisk testmaskin	Utføre strekkprøvene
Dataprogrammet Bluehill	Logging av testene fra maskinen
Temperaturkammer	Utføre tester ved ulike temperaturer
CO ₂ -gass	Kjøle ned temperaturkammeret til -46°C
Stropp	Sikre flasken med CO ₂ -gass
Sveishansker	Beskytte mot frost- og brannskader
Vannrør	Kjøle ned testmaskinen under tester ved 300 °C
Unbrakonøkkel	Stramme grepene rundt prøvestaven manuelt
Nye grep	Egner seg til tester med temperaturer over og under romtemperatur
Gummistrikker	Feste selve ekstensometeret rundt prøvestaven

Tabell 1: Utstyr nyttet under eksperimentene på laboratoriet.

3.2.2 Test ved 22 °C

Det ble utført fem tester med fem ulike tøyningshastigheter ved en temperatur på 22 °C. Ved disse testene ble det brukt en kontroll for å styre maskingrepene rundt prøvestaven. Kontrollen har fire funksjon som er: opp, ned, stramme og løsne. Med en slik kontroll ble utførelsen av testene effektive og mindre krevende for operatøren. Det første som ble gjort før strekkprøvingen var å måle prøvestavens minste diameter ved hjelp av et skyvelære. Diameteren ble ført inn i dataprogrammet hvor den ble brukt til å regne ut stavens tverrsnittsareal (A_0) som resultatene baserer seg på. I dataprogrammet ble også den ønskede tøyningshastigheten ført inn.

Tabell 2 er en oversikt over testene som ble utført ved 22 °C.

Test nr.	Diameter [mm]	Tøyningshastighet [mm/min]
1	9,94	1
2	9,95	10
3	9,96	30
4	9,96	0,1
5	9,94	0,03

Tabell 2: Testene ved 22 °C.

En prøvestav vil ryke ved omtrent 20 mm forlenging. Det var derfor mulig å regne ut hvor lang tid en test ville ta før brudd ville oppstå. Under testingen ble det brukt et ekstensometer for å måle forlengingen av prøvestykket. Denne ble festet til prøvestaven ved hjelp av to gummistrikker. Før testene kunne starte, måtte nålen i ekstensometeret fjernes. Denne nålen sørger for at målingene starter ved null (bilde 1). Ekstensometeret som ble brukt under dette prosjektet har en maksimal målelengde på 5 mm. Rett før denne forlengelsen ble nådd, måtte ekstensometeret derfor fjernes for å ikke ødelegge instrumentet.



Bilde 1: Ekstensometer med nål.

Under testene samlet dataprogrammet målingene i et Excel-dokument i et oversiktlig og strukturert oppsett. Disse målingene ble brukt til videre utregninger i Excel. Testene som ble gjort ved ulike hastigheter vil være nyttig for å kunne se hvordan tøyningshastighet vil påvirke materialet.

3.2.3 Test ved 300 °C

Å gjennomføre tester med høy temperatur vil være relevant for utvinning av geotermisk energi. Temperaturen stiger vanligvis med 20-40 °C per km nedover i grunnen og det er derfor gunstig å utføre tester med en så høy temperatur for å undersøke hvordan materialet vil oppføre seg i en slik situasjon [3].

Ved testene på 300 °C ble det utført fire tester med fire ulike tøyningshastigheter. Det ble bestemt at testene med de laveste hastighetene (0,03 mm/min og 0,1 mm/min) ikke skulle bli utført ved denne temperaturen. Tabell 3 er en oversikt over testene som ble gjort.

Test nr.	Diameter [mm]	Tøyningshastighet [mm/min]
1	9,92	1
2	9,87	10
3	9,84	30
4	9,81	100

Tabell 3: Tester ved 300 °C.

Testene ble utført inni et temperaturkammer slik det er vist i bilde 2. Temperaturkammeret kan stilles inn på ønsket temperatur og deretter kan strekkprøving foregå på innsiden. De originale grepene på testmaskinen tåler ikke denne temperaturen og disse ble derfor byttet ut med nye grep som ville tåle den utvalgte temperaturen, 300 °C. De nye grepene måtte strammes manuelt med en unbrakonøkkel. Det var derfor viktig å stramme boltene godt til slik at grepene ikke ville glippe under testingen. Om glipp skulle oppstå, ville dette gi ut feil data som vil påvirke resultatet.

Ekstensometeret kunne ikke bli brukt under testing ved 300 °C siden det ikke er designet for temperaturer over 200 °C. Det ble derfor benyttet maskinforlengelsen til å regne ut tøyning hos disse testene. Uten ekstensometer blir nøyaktigheten for målingene lavere, og dette må tas i betraktning i resultatene.

Da temperaturkammeret var ved sin gitte temperatur, ble det nødt å vente 15 minutter slik at det var sikkert at prøvestaven hadde oppnådd samme temperatur, før testen kunne starte.



Bilde 2: Temperaturkammer.

Under testingen ble det oppdaget at de forlengende søylene utenfor temperaturkammeret fikk en temperatur tilsvarende den som er inni. For å kunne kjøle disse ned, ble det montert vannrør ved øvre og nedre søyle til de neste testene (bilde 3). Vannet i rørene sirkulerte jevnt gjennom søylene og ut i en sluk.



Bilde 3: Vannrør brukt for nedkjøling av maskinen.

Da samtlige tester var fullført måtte boltene løsnes for å få ut prøvestaven. Det var derfor viktig å benytte sikkerhetsutstyr som sveisehansker for beskyttelse mot brannskader, når testene skulle tas ut av maskinen.

3.2.4 Test ved -46 °C

I NORSOK STANDARD M-630 «Material data sheets and element data sheets for piping» som på norsk betyr «Materialdatablad og elementdatablad for rørføring», er dette oppført:

Carbon steel type 235LT

carbon steel with SMYS ≤ 275 MPa and impact tested at -46 °C,

hvor

carbon steel er karbonstål, LT står for low temperature (lav temperert), 235 står for minimums flytegrenseverdi (MPa) for stål med tjukelse ≤ 16 mm, SMYS står for «specified minimum yield strength» (spesifisert minimum flytegrense) [11].

Det ble derfor bestemt ut ifra denne standarden å kjøre tester ved -46 °C i dette prosjektet.

Det ble utført fire tester ved -46 °C. Ved disse ble det også bestemt at tester med de laveste hastighetene (0,03 mm/min og 0,1 mm/min) ikke skulle kjøres. Tabell 4 viser en oversikt over testene som ble gjort ved denne temperaturen.

Test nr.	Diameter [mm]	Tøyningshastighet [mm/min]
1	9,86	1
2	9,84	10
3	9,92	30
4	9,85	100

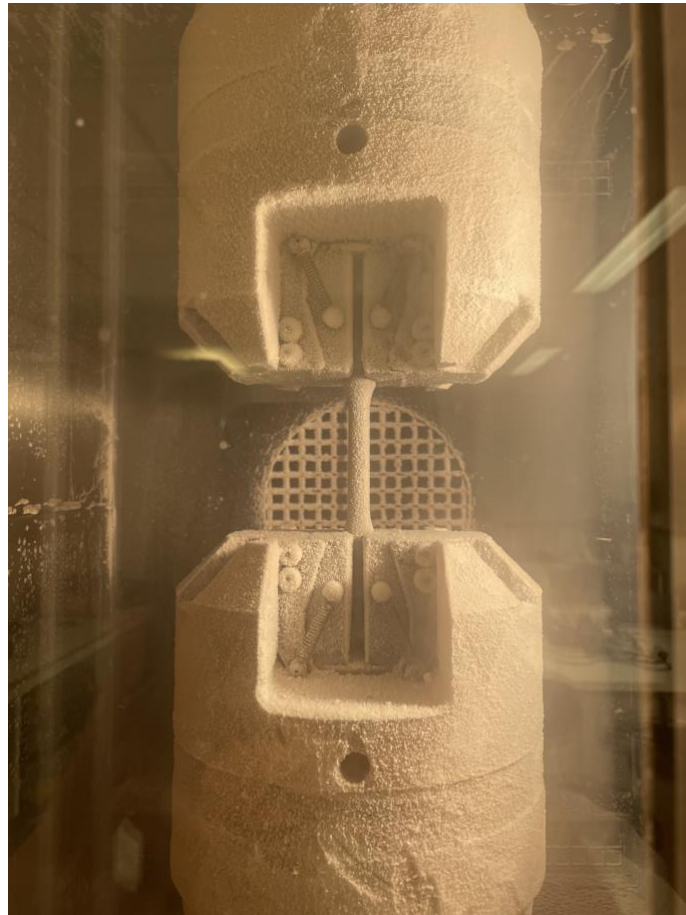
Tabell 4: Tester ved -46 °C.

For tester ved -46°C ble det tilkoblet en flaske med CO_2 -gass for å kjøle ned prøvestavene slik det er vist i bilde 4. De samme grepene som ble brukt ved testene på 300°C ble også nyttet ved disse testene, siden de egner seg bedre for denne temperaturnedgangen. Det tilgjengelige ekstensometeret er ikke designet for temperaturer under -80°C , men det ble likevel valgt å ikke bruke ekstensometeret under testene. Det ble derfor nødvendig å benytte maskinforlengelsen for å regne ut tøyningene ved disse prøvene og nøyaktigheten for målinger er derfor lavere her.



Bilde 4: Flaske med CO_2 -gass.

Det var også viktig å bruke beskyttelse (sveisehandsker) siden en slik lav temperatur kan gi alvorlige frostskeer ved hudkontakt. Figur 12 viser en test ved -46°C inni temperaturkammeret.



Bilde 5: Prøvestav inni temperaturkammeret ved -46 °C.

Ved alle disse testene kan effekten av tøyingshastighet og temperatur undersøkes. Det forventes å finne en forskjell i utregningen ved testene som er utført med ulik hastighet, og tester med samme hastighet, men ved ulik temperatur.

4. Programvareverktøy

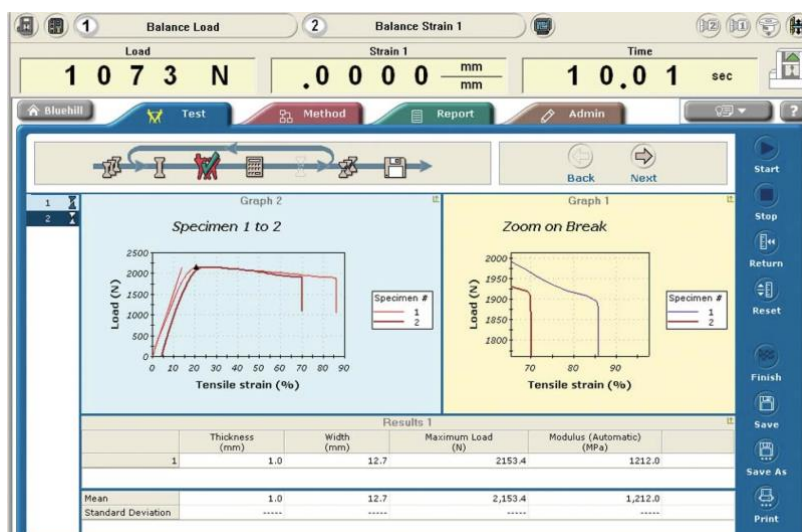
I denne seksjonen presenteres de ulike programvarene som ble benyttet under undersøkelsene.

4.1 Microsoft Office Excel

Det er benyttet Microsoft Office Excel, eller «Excel», til å gjennomføre beregninger. Denne programvaren er basert på regneark hvor det kan gjennomføres beregninger i form av matematiske problemer, analysere informasjon og behandle lister og talldata i regneark eller nettsider [12].

4.2 Instron Bluehill Software

Instron Bluehill er et programvareverktøy som er benyttet i dette prosjektet. Dette programmet logget målinger av testen som ble utført av selve maskinen, Instron 8800. Målingene som ble utført var tid, last, maskinforlengelse og ekstensometerforlengelse. Ved hjelp av disse dataene ble det mulig å gjøre videre utregninger for testene [13]. Figur 13 viser programmet under strekktesting.



Figur 8: Instron Bluehill under strekktesting [13].

5. Analyse

I dette kapittelet gjennomførelsen av analysen presenteres.

5.1 Dataverktøy

Programvaren, Bluehill, som målte strekkprøvene, satte sammen et Excel-ark for hver prøve som ble utført. I disse arkene ble målinger av tid, last, maskinforlengelse og ekstensometerforlengelse oppgitt. Det ble også oppgitt tverrsnittsareal, ekstensometerets lengde og prøvestavens målelengde som ble brukt til utregninger. Alle disse målingene gjorde det mulig å regne ut spenning, sann spenning, tøying og sann tøying. Fra disse ble det laget diagrammer for å visualisere hvordan materialet oppførte seg gjennom strekkingen slik det er vist i diagram 1. Her er det en brå stopp ved 0,2 mm tøying siden ekstensometer ble tatt bort.

For å finne strekkfastheten, ble den maksimale spenningsverdien funnet. Den uniforme tøyingen ble også funnet her. Dette er tøying ved strekkfastheten. Deretter ble den øvre flytespenning funnet. Denne er den maksimale spenning i startfasen av grafen. Den nedre flytespenning ble funnet ved å regne gjennomsnittet av flyteplataet, som er den fasen hvor spenningen nesten er konstant.

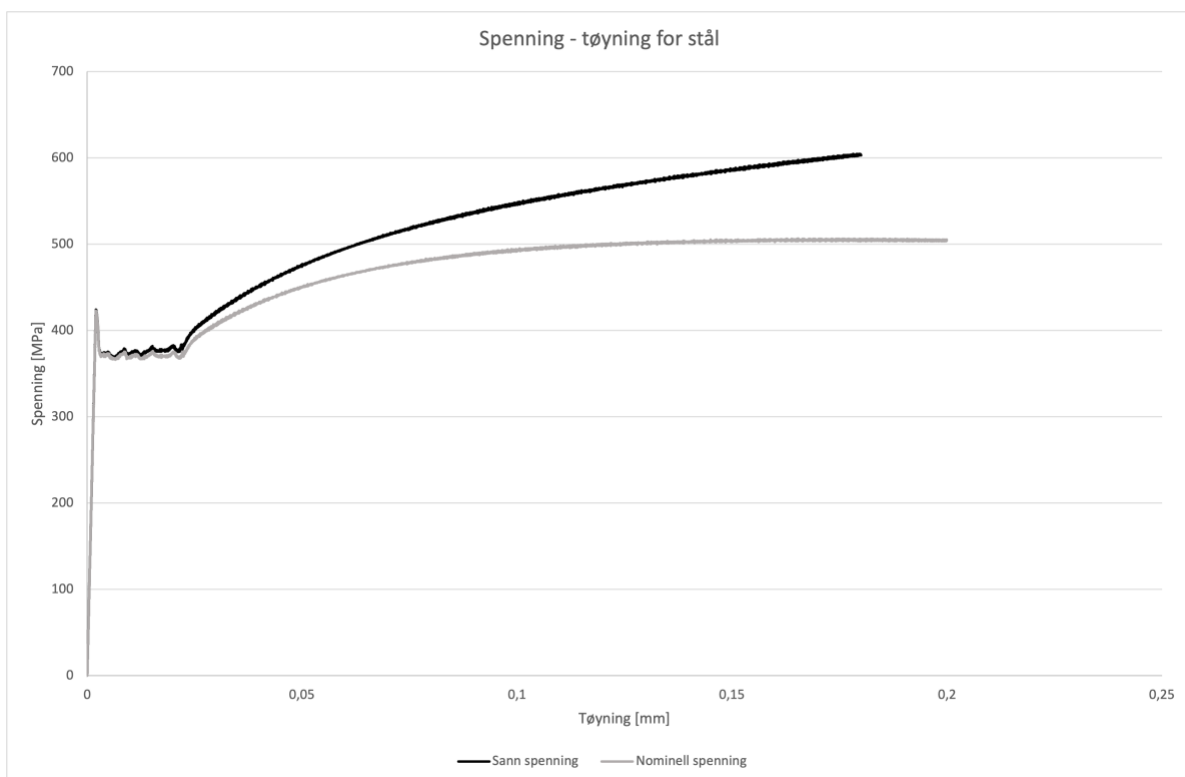


Diagram 1: Spenning-tøying for stål ved 1 mm/min (22 °C).

Den naturlige logaritmen av sann spenning og sann tøyning, etter nedre flytegrense og opp til toppunktet, ble også beregnet for å finne arbeidsherdningsekspONENTEN. Av disse verdiene ble det laget enda et diagram der det ble satt inn en trendlinje. Trendlinjens formel ble oppgitt, $y=ax+b$, hvor a er arbeidsherdningsekspONENTEN og styrkekoEFFISIENTEN $K=exp(b)$. Diagram 2 viser hvordan arbeidsherdningsekspONENTEN «n» og styrkekoEFFISIENTEN «K» ble funnet i Excel ved 22 °C og en hastighet på 0,03 mm/min.

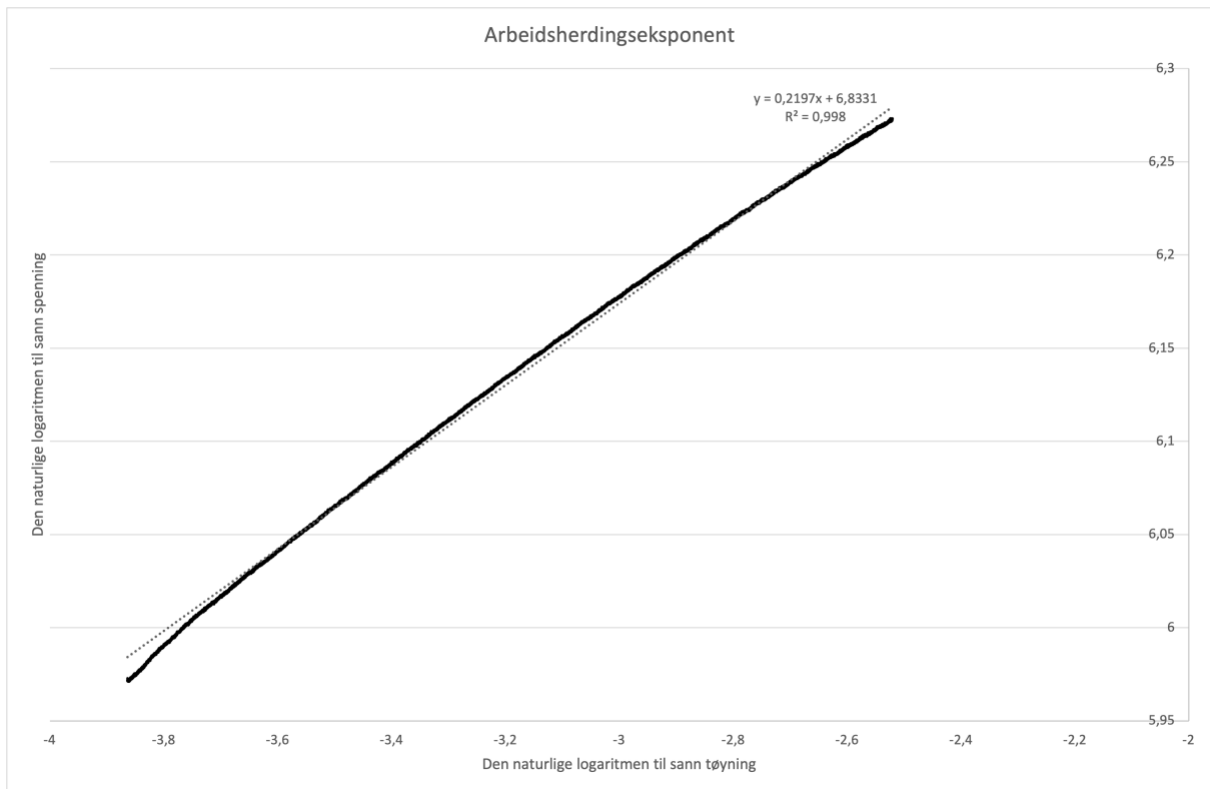


Diagram 2: Hvordan arbeidsherdningsekspONENTEN ble funnet.

Da tøyning skulle regnes ble ekstensometerforlengelsen dividert på ekstensometerets lengde, som er 25 mm. Ved testene som ble utført uten ekstensometer ble tøyning regnet ut med maskinforlengelsen dividert på stavens målelengde, som er 50 mm.

5.2 Formler

Tabell 5 viser til formlene som ble brukt til andre utregninger gjennom prosjektet.

Spenningen ble regnet ut med hjelp av ligning (2).

Sann spenning med hjelp av ligning (3).

Tøyning med ligning (4).

Sann tøyning med ligning (5).

E-modulen med ligning (6).

Spenning	$\sigma = \frac{F}{A_0}$	(2)
Sann spenning	$\sigma_T = \sigma \cdot (1 + \epsilon)$	(3)
Tøyning	$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$	(4)
Sann tøyning	$\epsilon_T = \ln(1 + \epsilon)$	(5)
E-modul	$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon}$	(6)

Tabell 5: Formler nyttet i prosjektet.

hvor σ er spenning, F er last, A_0 er det nominelle tverrsnittet, σ_T er sann spenning, l_0 er den originale lengden før det ble påført en last på staven, l_i er den øyeblikkelige lengden, Δl er endring i lengde, ϵ_T er sann tøyning, \ln er den naturlige logaritmen, E er elastisitetsmodulen (E-modul), $\Delta \sigma$ er endring i spenning og $\Delta \epsilon$ er endring i tøyning.

6. Resultat

I dette kapittelet skal de eksperimentelle resultatene presenteres.

6.1 Eksperimentfunn

De ulike resultatene skal presenteres i de følgende seksjonene ved hjelp av tabeller, grafiske illustrasjoner og bilder.

6.1.1 Tester utført ved 22 °C

I følgende seksjon presenteres resultatene fra testene ved 22 °C. Tabell 6 lister opp resultatene og det blir observert en variasjon i disse. Det er ingen mønster som følges etter stigende tøyningshastighet.

Tøyningshastighet [mm/min]	E-modul [MPa]	Strekfasthet [MPa]	Øvre flytespenning [MPa]	Nedre flytespenning [MPa]	n (arbeidsherdings- eksponent)	K (styrke- koeffisient) [MPa]
0,03	197 387	489,443	420,572	374,001	0,220	928,063
0,1	206 159	512,701	391,309	376,445	0,198	874,367
1	207 444	506,711	423,734	371,236	0,188	839,327
10	203 493	541,282	496,970	412,170	0,109	672,431
30	206 491	531,404	479,249	404,627	0,181	872,620

Tabell 6: Sammenligning av testene ved 22 °C.

Forlengelsen av testene ved 22 °C ble, som nevnt i kap.3.2.2., målt ved hjelp av et ekstensometer. Instrumentet må fjernes ved 5 mm forlengelse for å ikke ødelegge det. Dette resulterte i at tøyningen stopper ved 0,2 mm, selv om staven nødvendigvis ikke har røket enda slik det kan observeres i diagram 3.

Ved testen på 0,03 mm/min ville det ta rundt 11 timer før prøvestaven røk. Testen ble derfor gjennomført i løpet av natten. Siden ekstensometeret ikke kan strekke seg mer enn fem millimeter, måtte denne fjernes i løpet av kvelden. Dermed ble grafen og ekstensometer målingen mye kortere enn hos de andre målingene. Til tross for dette ble det likevel brukt ekstensometer forlengelsen ovenfor maskinforlengelsen siden denne er den har høyest målenøyaktighet.

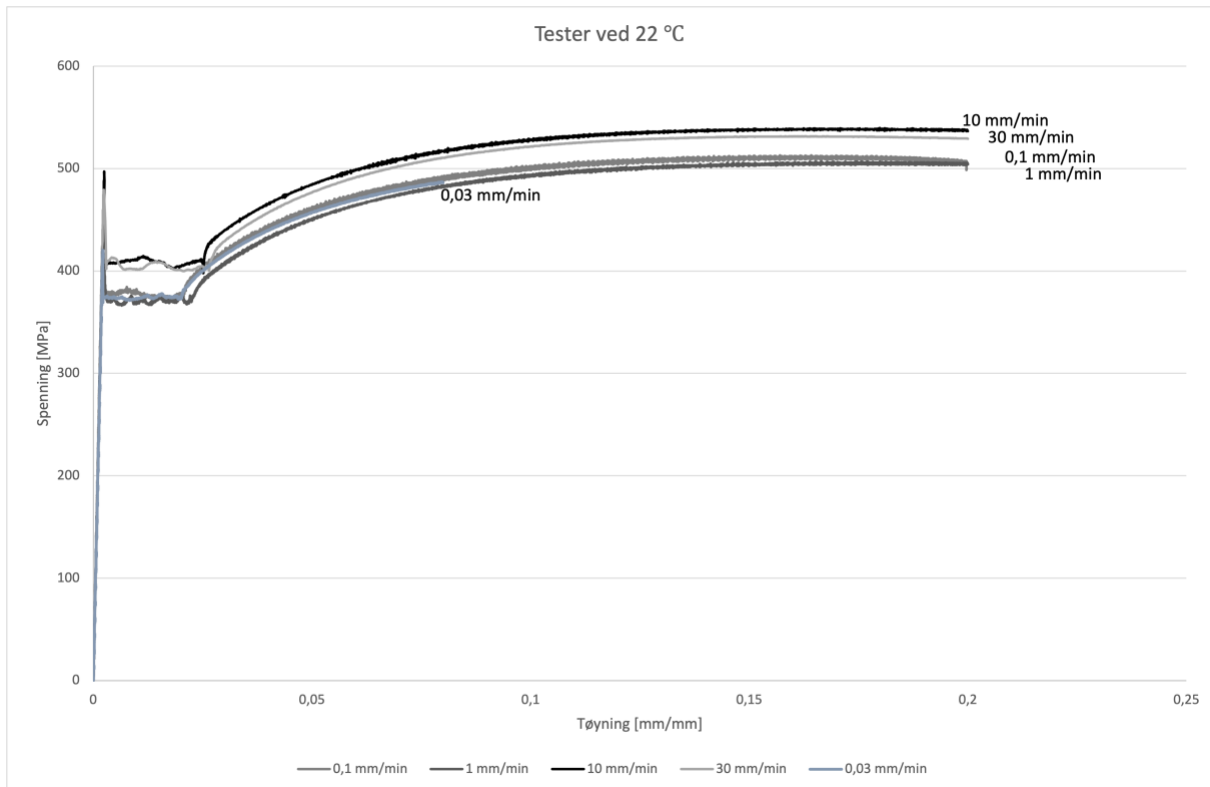


Diagram 3: Diagram av testene ved 22 °C.

Tabell 7 viser en sammenligning av de uniforme tøyningene ved 22 °C ved ulike tøyningshastigheter.

Tøyningshastighet [mm/min]	0,3	0,1	1	10	30
Uniform tøyning [mm]	0,083	0,150	0,176	0,165	0,165

Tabell 7: Tøyning ved 22 °C.

Bilde 5 er et bilde av prøvestavene etter brudd i stigende rekkefølge etter tøyningshastighet nedover.



Bilde 6: Prøvestavene etter brudd (22 °C).

6.1.2 Tester utført ved 300 °C

I denne seksjonen skal resultatene fra testene ved 300 °C presenteres. Merk at E-modulen ikke er inkludert i testene uten ekstensometer (300 °C og -46 °C), siden tester uten ekstensometer ikke gir ut nøyaktige målinger for dette. I tabell 8 er resultatene fra testene på 300 °C oppført. Her er det mulig å tyde et mønster ved strekkfasthet og øvre- og nedre flytespenning. Ved strekkfastheten og den nedre flytespenning er det en reduksjon desto raskere testene blir utført. Ved den øvre flytespenningen er det en økning i resultatene når hastigheten øker.

Tøynings- hastighet [mm/min]	Strekfasthet [MPa]	Øvre flytespenning [MPa]	Nedre flytespenning [MPa]	n (arbeidsherdings- eksponent)	K (styrke- koeffisient) [MPa]
1	522,998	285,548	271,785	0,256	981,910
10	508,347	302,944	276,281	0,234	923,158
30	505,308	324,021	297,631	0,241	937,484
100	489,659	326,719	306,833	0,250	943,881

Tabell 8: Sammenligning av testene ved 300 °C.

Fra diagram 4 kommer det frem at tøyning ved brudd reduseres for hver test desto raskere tøyningshastigheten er.

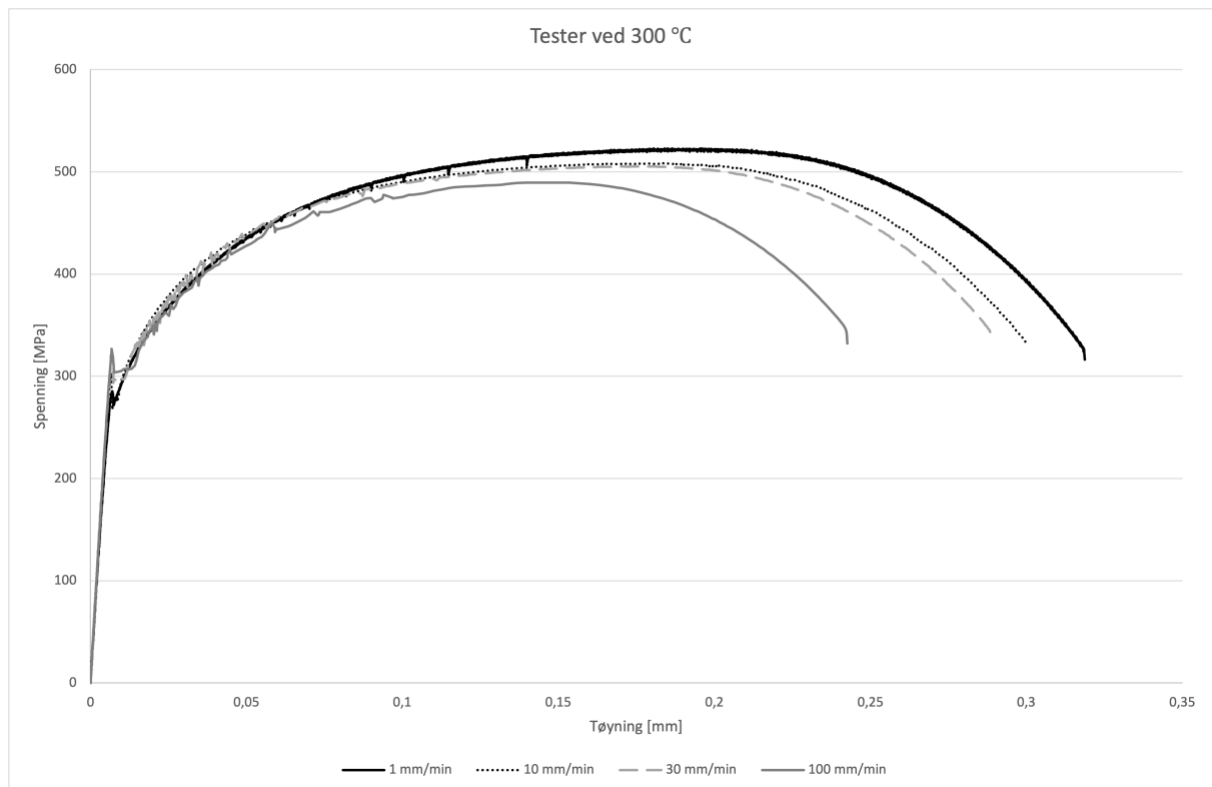


Diagram 4: Diagram av testene ved 300 °C.

Den uniforme tøyningen blir også redusert fra lav til høyere hastighet. I tabell 9 er disse verdiene oppført.

Tøyningshastighet [mm/min]	1	10	30	100
Tøyning ved brudd [mm]	0,319	0,300	0,289	0,243
Uniform tøyning [mm]	0,185	0,184	0,177	0,147

Tabell 9: Tøyning ved 300 °C.

Ved høyere hastighet er det en klar reduksjon i tøyning ved brudd. Dette vil medføre at materialet har en lavere toleranse desto høyere tøyningshastigheter og prøvestaven vil bryte tidligere. I bilde 6 kan prøvestavene etter brudd observeres. Disse er plassert i stigende rekkefølge etter hastighet nedover.



Bilde 7: Prøvestavene etter brudd (300 °C).

6.1.3 Temperatur -46 °C

Denne seksjonen presenterer resultatene fra testene ved -46°C. E-modulen er ikke inkludert i resultatene, siden ekstensometeret ikke var benyttet under testene. Tabell 10 viser resultatene som er blitt hentet og beregnet. Ifølge denne er det en økning ved strekkfastheten, øvre- og nedre flytespenning og styrkekoefisienten K desto høyere tøyningshastigheten er.

Tøyningshastighet [mm/min]	Strekkfasthet [MPa]	Øvre flytespenning [MPa]	Nedre flytespenning [MPa]	n (arbeidsherdings-eksponent)	K (styrke-koefisient) [MPa]
1	565,868	496,544	410,703	0,245	1 023,21
10	572,768	512,470	442,253	0,246	1 042,10
30	574,366	529,871	460,805	0,259	1 076,21
100	582,707	525,358	463,490	0,253	1 079,55

Tabell 10: Sammenligning av testene ved -46 °C.

Diagram 5 visualiserer endringer ved testene gjort ved temperaturen -46 °C. Det observeres en tydelig reduksjon i tøyning ved brudd fra lav til høyere hastighet. Testene på 30 mm/min og 100 mm/min ligger omtrent likt. Ifølge grafene ryker testen på 30 mm/min før den på 100 mm/min.

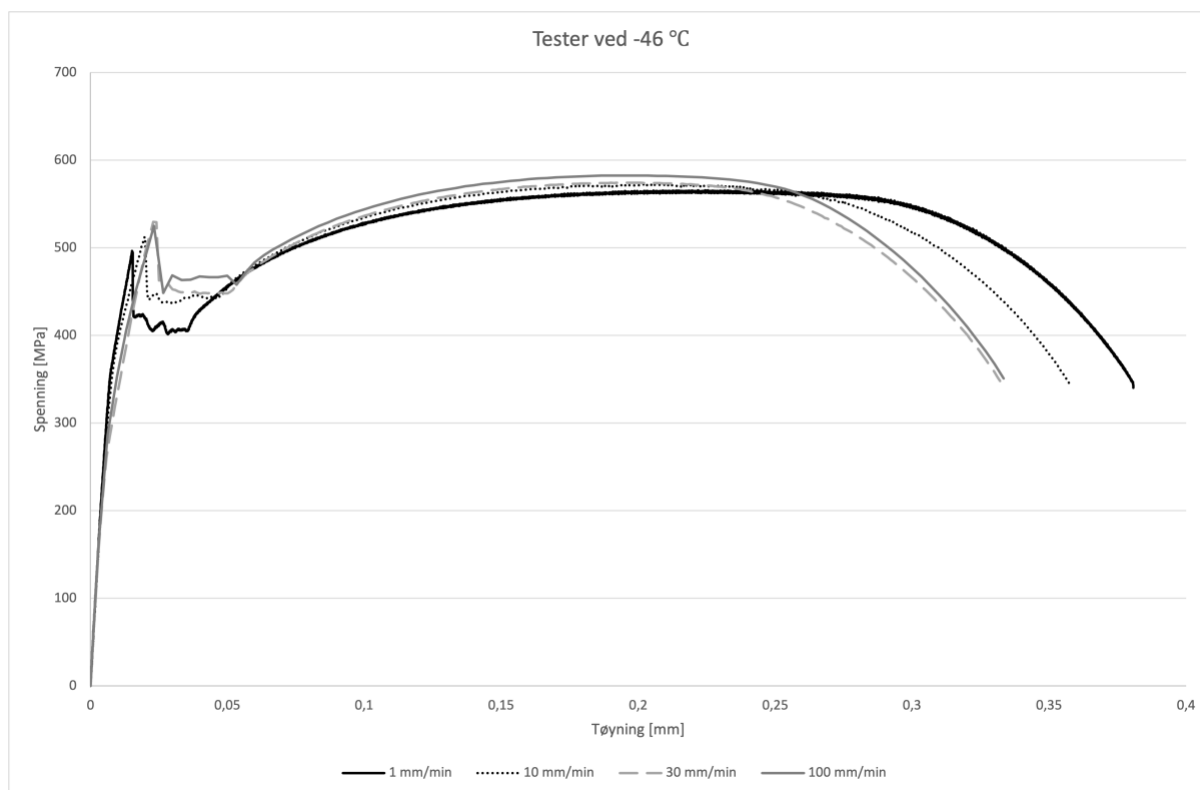


Diagram 5: Diagram av testene ved -46 °C.

I tabell 11 er tøyingsverdiene for tøyning ved brudd og den uniforme tøyningen ført opp.

Tøyingshastighet [mm/min]	1	10	30	100
Tøyning ved brudd [mm]	0,381	0,357	0,332	0,333
Uniform tøyning [mm]	0,224	0,203	0,195	0,197

Tabell 11: Tøyning ved -46 °C.

Bilde 7 viser er bilde av prøvestavene etter brudd i stigende rekkefølge etter hastighetene nedover.



Bilde 8: Prøvestavene etter brudd (-46 °C).

6.1.4 Effekten av temperatur ved lik tøyningshastighet

Når testene ved ulike temperaturer blir satt opp mot hverandre er det en tydelig forskjell i resultatene. Som vist i tabell 12 er det en klar reduksjon i øvre- og nedre flytespenning når det går fra tester ved lavest til høyest temperatur. Tabellen viser også en høyere verdi for arbeidsherdingssekspONENTEN n , styrkekoEFFISIENTEN K og strekkfastheten ved -46 °C og 300 °C .

1 mm/min					
Temperatur (°C)	Strekkfasthet [MPa]	Øvre flytespenning [MPa]	Nedre flytespenning [MPa]	n (arbeidsherdings- eksponent)	K (styrke- koeffisient) [MPa]
-46	565,868	496,544	410,964	0,358	1 164,45
22	506,711	423,734	371,236	0,188	839,327
300	522,998	285,548	271,714	0,326	1 037,01

Tabell 12: Effekten av temperatur ved 1 mm/min.

Diagram 6 er en spenning-tøyningsskurve for tester kjørt med en hastighet på 1 mm/min ved ulike temperaturer. Merk at målingene ved tester på 22 °C stopper ved 0,2 mm siden de er målt med ekstensometer. Testen ved 300 °C har den minste forlengelsen. Dette kan observeres i figur 22 som blir presentert senere i rapporten.

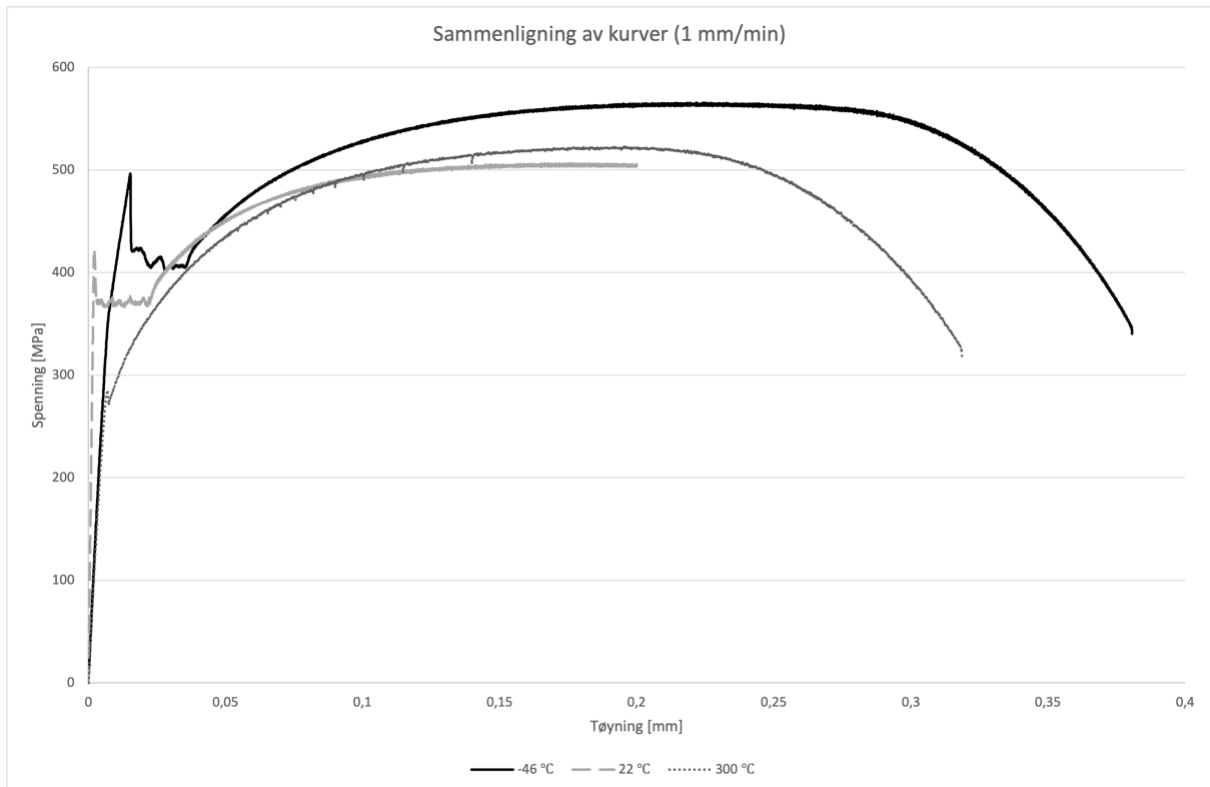


Diagram 6: Sammenligning av kurver ved 1 mm/min.

Ved høyere hastigheter er resultatene annerledes. I tabell 13 og 14 har testene med høyest temperatur lavere verdier for strekkfasthet og øvre- og nedre flytespenning. Her oppstår det en reduksjon fra -46 °C til 300 °C. Resultatene for arbeidsherdningsekspONENTEN og K fortsetter i samme mønster hvor verdiene ved høyeste og laveste temperatur er størst.

10 mm/min					
Temperatur (°C)	Strekfasthet [MPa]	Øvre flytespenning [MPa]	Nedre flytespenning [MPa]	n (arbeidsherdings- eksponent)	K (styrke- koeffisient) [MPa]
-46	572,768	512,470	442,899	0,358	1 177,90
22	541,282	496,970	412,170	0,109	672,431
300	508,347	302,944	275,503	0,300	979,948

Tabell 13: Effekten av temperatur ved 10 mm/min.

Diagram 7 representerer en kurvesammenligning med hastigheten 10 mm/min ved ulike temperaturer.

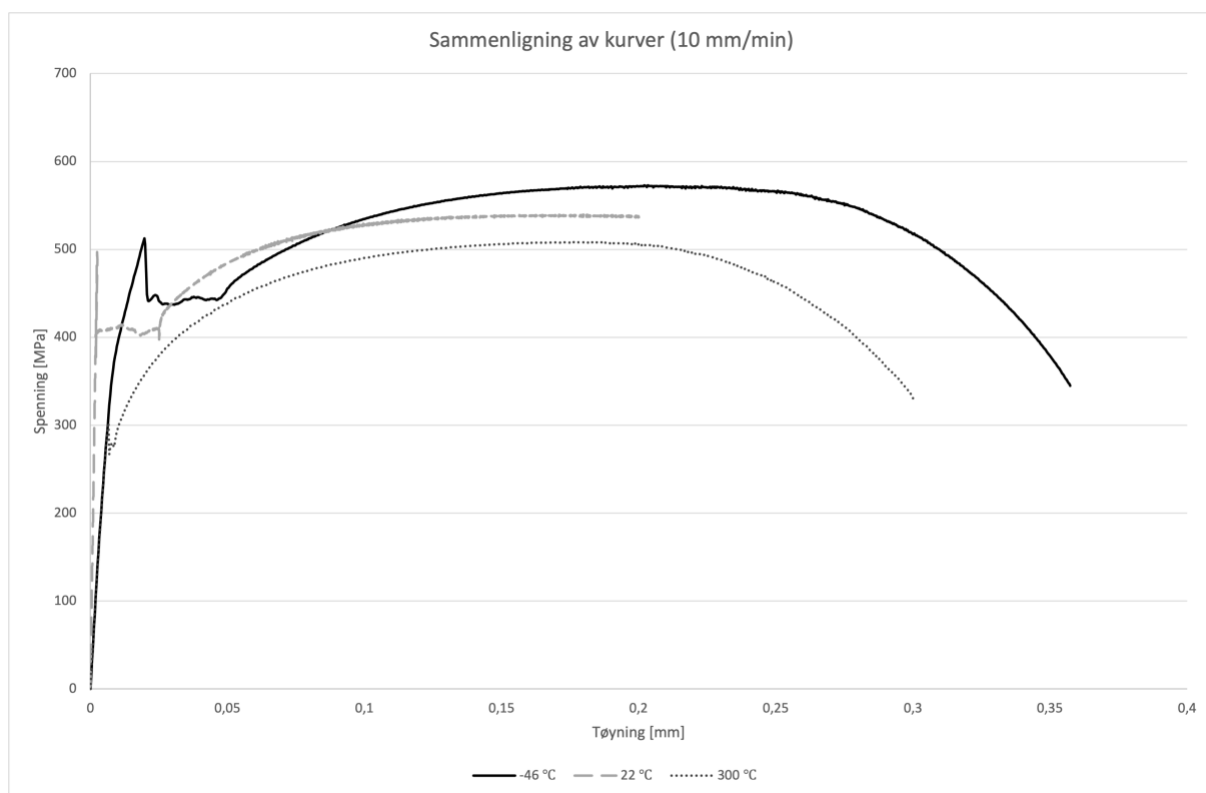


Diagram 7: Sammenligning av kurver ved 10 mm/min.

30 mm/min					
Temperatur (°C)	Strekfasthet [MPa]	Øvre flytespenning [MPa]	Nedre flytespenning [MPa]	Arbeidsherdings- eksponent (n)	K (styrke- koeffisient) [MPa]
-46	574,366	529,871	451,083	0,364	1193,33
22	531,404	479,249	404,627	0,181	872,620
300	505,308	324,021	297,958	0,305	984,467

Tabell 14: Effekten av temperatur ved 30 mm/min.

Diagram 8 viser en sammenligning av kurver av testene ved 30 mm/min ved ulike temperaturer.

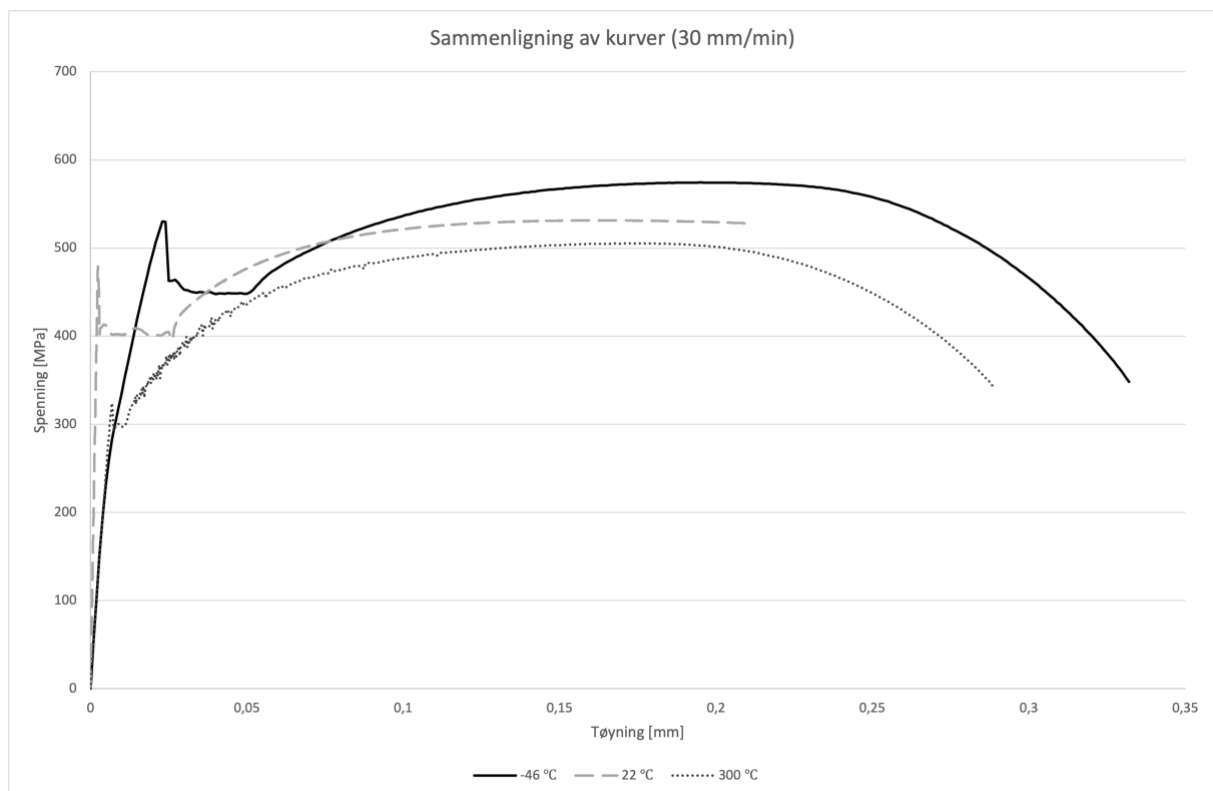




Diagram 8: Sammenligning av kurver ved 30 mm/min.

Bilde 8 viser prøvestaver gjennomført ved ulik tøyingshastighet ved forskjellige temperaturer. Det er en klar forskjell i lengdene til prøvestykkene. Det blir observert at testene ved temperatur på 300 °C har minst forlenging av alle prøvestykkene. Denne ulikheten er veldig tydelig på bildene og i diagrammene vist tidligere.

		
Testene ved 1 mm/min i stigende temperatur.	Testene ved 10 mm/min i stigende temperatur.	Testene ved 30 mm/min i stigende temperatur.

Bilde 9: Sammenligning av prøvestavene ved en gitt tøyingshastighet etter brudd.

7. Diskusjon

Ved strekkprøving utført med ulike tøyningshastigheter og temperaturer er det ønsket å finne ut om disse parameterne har noe effekt på materialets egenskaper og i så fall hvilken effekt. Testene vil gi ut relevant data som vil være med på å lage en oversikt over hvordan materialet oppfører seg under testene. Utrekninger og prosessering av data vil være med på å kunne gi en grunnleggende forståelse på hva materialet kan utsettes for og i hvilket miljø det egner seg best i. Ifølge resultatene har undersøkelsen gitt svar på at forskjellige tøyningshastigheter og temperatur vil ha en effekt på materialeegenskapene til stål.

I startfasen ble det gjort vurderinger av hvor mange tester som skulle utføres, hvilke hastigheter og ved hvilke temperaturer. Det er viktig å ha nok ulike hastigheter for å ha et godt grunnlag til å kunne sammenligne resultatene. Temperaturer ble valgt etter det som er relevant for boring og utvinning av geotermisk energi med tanke på miljøet nedover i jordskorpen. Resultatene ender opp med å gi ut et bredt spekter av informasjon som både viser avhengigheten av tøyningshastighet og temperatur.

Svakheter med resultatene var utregninger utført uten måling utført ved hjelp av ekstensometer. Det ble ikke brukt ekstensometer under testene ved -46 °C og 300 °C . Dette vil derfor gi ut resultater med mye mindre målenøyaktighet enn ved testene med ekstensometer. Ekstensometeret er designet for temperaturer mellom -80 °C og 200 °C . Det ble likevel valgt å ikke bruke instrumentet ved begge temperaturene. Resultatene ville ikke bli like nøyaktige, men det ble konkludert at det var mer gunstig å kjøre med en høyere temperatur enn 200 °C for å få en større temperaturforskjell. Dette ville egne seg bedre for å kunne undersøke effekten av temperaturer i dette prosjektet.

I analysen ble det oppdaget at kurvene ikke startet ved eksakt null i aksene (x- og y-aksen). Dette er ikke gunstig for en spenning-tøyningsskurve. Dette kan lett skje under strekkprøving ettersom det er mange faktorer som vil spille inn og må tas til betraktning under slike tester. Det ble derfor bestemt at det skulle utføres kalibreringer av dataene for nominell spenning og tøyningen for at verdiene og kurvene skulle starte ved null i origo. Videre ble de kalibrerte dataene nytt til å regne ut sann spenning og tøyning. Kalibreringene ble utført i Excel. En slik kalibrering ble gjennomført ved å subtrahere de to første verdiene i kolonnen med hverandre, som resulterte i null. Videre ble den andre verdien subtrahert med den først, så den tredje med den første, og dette ble gjentatt nedover i kolonnene for spennings- og tøyningverdiene.

I resultatene er det noen irregulariteter. Disse kan ha sammenheng mellom ulike tøyningshastigheter og ulike temperaturer. Det ble forventet å finne et mønster i svarene ved økende tøyningshastighet, men dette var ikke tilfellet. Her er det mye varierende resultater. Denne variasjonen kan enten ha skyldes av dårlig utførelse av testen, eller så skjer det av naturlig årsaker. Testene ved $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ hadde derimot et mønster i resultatene, utenom resultatene fra arbeidshardingsekspONENTEN, da denne var varierende.

Om dette forsøket skulle blitt gjentatt vil det være gunstig å benytte et ekstensometer kapabelt til å operer innenfor hele spekteret av temperaturer som er benyttet. Målingene blir mye mer nøyaktig og gir ut de mest korrekte resultatene. For videre forskning bør det nyttes et ekstensometer som er designet for en mye høyere temperaturforskjell enn det som er blitt brukt under eksperimentene i dette prosjektet. Det bør også forsikres at prøvestavene installeres med likt moment for hver test når maskinen bruker manuelle grep.

8. Konklusjon

Målet med oppgaven var å undersøke effekten av tøyningshastighet og temperatur under strekkprøving av varmvalset stål.

De viktigste resultatene er at både temperatur og tøyningshastighet har en effekt på materialet under strekkprøving. Dette kommer frem i tabeller og visualiseringen i diagrammene. Det som ble oppdaget var at prøvestavene utført ved 300 °C røk mye tidligere enn de ved -46 °C og 22 °C. Dette resultatet ble observert ved hjelp av grafer og tabeller hvor resultatene fra testene ble sammenlignet.

Det har også blitt observert at styrkekoefisienten og arbeidsherdningsekspONENTEN er størst ved -46 °C. Dette betyr at tester utført ved -46 °C øker styrke raskere enn hos testene ved de andre temperaturene når materialet blir utsatt for deformasjon. Testene ved denne temperaturen har også størst strekkfasthet og øvre- og nedre flytegrense. Dette betyr at materialet tåler en mye høyere spenning før den blir varig deformert, enn ved de andre testene

Det blir observert at forskjellige tøyningshastigheter har en effekt på resultatene ved at det skjer en endring i styrke og i materialoppførsel ved ulike hastigheter. Dette vil si at ved en bestemt hastighet oppfører materialet seg bedre enn ved andre hastigheter. Dette er relevant innenfor boreteknologien for å kunne velge en hastighet som er best egnet og under hvilke forhold materialet presterer best.

9. Feilkilder

Under de ulike testene ble det oppdaget forskjellige feilkilder som kunne hatt innvirkninger på utregninger og resultater. Disse adresseres her.

Da prøvestykkenes diameter skulle måles med et skyvelære, var det denne verdien som skulle skrives inn i dataprogrammet. Siden denne diameteren er med på å regne ut tverrsnittsarealet som brukes ved utregning av spenningen, er det viktig å være nøye og sørge for at den minste diameteren ble målt. Det kan likevel oppstå avvik under målingene, men disse er uunngåelige og vil ikke ha et alvorlig utfall.

Ved testene som ble utført uten ekstensometer ble tøyning regnet ut med maskinforlengelsen. Dette er ikke like nøyaktig som tøyning regnet ut med ekstensometerforlengelsen og vil derfor gi unøyaktige resultater.

Da det ble oppdaget at maskinen trengte kjøling ved testene ved 300 °C, ble det koblet til rør med vann for å kjøle ned stengene. Vannet i stengene kunne da være med på å bidra til større vekt på selve prøvestaven. Dette førte til en mulighet for påvirket resultat.

Da det ble byttet til nye grep, måtte disse strammes manuelt for hånd. Det var derfor viktig å stramme godt slik at ikke grepene ville glippe under testene. Om glipp skulle oppstå, ville dette gi ut feil målinger, som igjen kan gi ut feil resultat.

Ved utregning, ble det gjort kalibreringer for å få spenning- og tøyningresultatene til å starte på null. Dette ble gjort for å få nøyaktige og et mer korrekt resultat. Det var viktig å gjøre kalibreringer på alle testene og ikke bare noen utvalgte. Dette er for at alle skal starte ved samme utgangspunkt. Det kan også ha blitt gjort feilkalibrering som påvirker resultater.

Referanser

- [1] WWF Verdens Naturfond, «Fornybar energi», WWF. <https://www.wwf.no/klima-og-energi/fornybar-energi> (åpnet 30. mai 2022).
- [2] S. Gjermund, «Geotermisk energi – Hva er det? (Strøm.no)», 18. november 2019. <https://xn--strm-ira.no/geotermisk-energi> (åpnet 30. mai 2022).
- [3] N. Spjeldnæs, «geotermisk energi», *Store norske leksikon*. 5. desember 2019. Åpnet: 30. mai 2022. [Online]. Tilgjengelig på: http://snl.no/geotermisk_energi
- [4] Ø. Grøn, «strekkprøving», *Store norske leksikon*. 7. juli 2021. Åpnet: 30. mai 2022. [Online]. Tilgjengelig på: <http://snl.no/strekkpr%C3%B8ving>
- [5] N. J. D. Uijl og L. J. Carless, «3 - Advanced metal-forming technologies for automotive applications», i *Advanced Materials in Automotive Engineering*, J. Rowe, Red. Woodhead Publishing, 2012, s. 28–56. doi: 10.1533/9780857095466.28.
- [6] Callister, JR. William D. og David G. RethWisch, *Materials Science and Engineering*. John Wiley & Sons, 2015.
- [7] INSTRON, «Modulus of Elasticity»; <http://www.instron.com/en/our-company/library/glossary/m/modulus-of-elasticity> (åpnet 30. mai 2022).
- [8] Meccanica, «MECCANICA, statikk og fasthetslære for ingeniører». <http://meccanica.no/fasthet/materialer.htm> (åpnet 30. mai 2022).
- [9] «S235JRG2 Material S235JRG2C+C Equivalent, Meaning, Properties». <https://www.theworldmaterial.com/s235jrg2cc-material/> (åpnet 30. mai 2022).
- [10] Kjetil Gravelsæter, «Arbeidstegning», 14. mars 2022.
- [11] NORSOK STANDARD M-630, «Material data sheets and element data sheets for piping». [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.standard.no/pagefiles/18204/m630u5.pdf>
- [12] Microsoft, «The SpecialCells(xlCellTypeBlanks) VBA function doesn't work as expected - Office», 5. mai 2022. [https://docs.microsoft.com/en-us/office/troubleshoot/excel/specialcells\(xlcelltypeblanks\)-vba-function](https://docs.microsoft.com/en-us/office/troubleshoot/excel/specialcells(xlcelltypeblanks)-vba-function) (åpnet 30. mai 2022).
- [13] INSTRON, «Bluehill 2 Software».

Figurer

Figur 1: Fenomenet flytegrense	4
Figur 2: Arbeidsdiagram for vanlig konstruksjonsstål.....	6
Figur 3: Sammenligning av typisk spenning-tøyning (nominell) og sann spenning-tøyning oppførsel..	7
Figur 4: Typisk spenning-tøyning oppførsel hvor halsing oppstår etter strekkfastheten.....	7
Figur 5: Elastisitetsmodulen opp mot temperatur	8
Figur 6: Skjematisk tegning av forlengelse og tøyning	10
Figur 7: Arbeidstegning av prøvestavene (millimeter)	11
Figur 8: Test ved -46 °C.....	21
Figur 9: Instron Bluehill under strekktesting	20
Figur 10: Oversikt over vedlegg.	45

Bilder

Bilde 1: Ekstensometer med nål.....	13
Bilde 2: Temperaturkammer.	15
Bilde 3: Vannrør brukt for nedkjøling av maskinen.	16
Bilde 4: Flaske med CO ₂ -gass.....	18
Bilde 5: Prøvestav inni temperaturkammeret ved -46 °C.	19
Bilde 6: Prøvestavene etter brudd (22 °C).	26
Bilde 7: Prøvestavene etter brudd (300 °C).	29
Bilde 8: Prøvestavene etter brudd (-46 °C).....	31
Bilde 9: Sammenligning av prøvestavene ved en gitt tøyningshastighet etter brudd.	36

Tabeller

Tabell 1: Utstyr nyttet under eksperimentene på laboratoriet.....	12
Tabell 2: Testene ved 22 °C.....	13
Tabell 3: Tester ved 300 °C.....	14
Tabell 4: Tester ved -46 °C.....	17
Tabell 5: Formler nyttet i prosjektet.....	23
Tabell 6: Sammenligning av testene ved 22 °C.....	24
Tabell 7: Tøyning ved 22 °C.....	26
Tabell 8: Sammenligning av testene ved 300 °C.....	27
Tabell 9: Tøyning ved 300 °C.....	28
Tabell 10: Sammenligning av testene ved -46 °C.....	30
Tabell 11: Tøyning ved -46 °C.....	31
Tabell 12: Effekten av temperatur ved 1 mm/min.....	32
Tabell 13: Effekten av temperatur ved 10 mm/min.....	34
Tabell 14: Effekten av temperatur ved 30 mm/min.....	35

Diagrammer

Diagram 1: Spenning-tøyning for stål ved 1 mm/min (22 °C).....	21
Diagram 2: Hvordan arbeidsherdningsekspONENTEN ble funnet.....	22
Diagram 3: Diagram av testene ved 22 °C.....	25
Diagram 4: Diagram av testene ved 300 °C.....	28
Diagram 5: Diagram av testene ved -46 °C.....	30
Diagram 6: Sammenligning av kurver ved 1 mm/min.....	33
Diagram 7: Sammenligning av kurver ved 10 mm/min.....	34
Diagram 8: Sammenligning av kurver ved 30 mm/min.....	35

Formler

Formel 1: Hollomon's formel.....	5
Formel 2: Nominell spenning.....	9
Formel 3: Sann spenning.....	9
Formel 4: Nominell tøyning.....	9
Formel 5: Sann tøyning.....	10
Formel 6: Elastisitetsmodul (E-modul).....	10

Vedlegg

Vedlegg nr.	Beskrivelse
A	Test ved tøyningshastighet 1 mm/min (22 °C).
B	Test ved tøyningshastighet 10 mm/min (22 °C).
C	Test ved tøyningshastighet 30 mm/min (22 °C).
D	Test ved tøyningshastighet 1 mm/min (300 °C).
E	Test ved tøyningshastighet 10 mm/min (300 °C).
F	Test ved tøyningshastighet 30 mm/min (300 °C).
G	Test ved tøyningshastighet 100 mm/min (300 °C).
H	Test ved tøyningshastighet 1 mm/min (-46 °C).
I	Test ved tøyningshastighet 10 mm/min (-46 °C).
J	Test ved tøyningshastighet 30 mm/min (-46 °C).
K	Test ved tøyningshastighet 100 mm/min (-46 °C).

Figur 9: Oversikt over vedlegg.

