



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2017 30 stp
Institutt for matematiske realfag og teknologi

En undersøkelse av plastmaterialer ved lave temperaturer og metodeutvikling for å måle materialegenskapene

A study of plastic materials at low temperatures
and the development of methods to measure
material properties

John Strande

Maskin, prosess- og produktutvikling

Forord

Denne prosjektoppgaven er gjennomført som en del av masterprogrammet i maskin, prosess- og produktutvikling ved Institutt for matematiske realfag og teknologi ved NMBU. Prosjektoppgaven er gjennomført vårsemesteret 2017 og omfatter 30 studiepoeng. Veiledere under arbeidet har vært Johan Andersen og Aage Elias Kollen.

Oppgaven har vært å få en oversikt og innsikt i materialer særlig termoplast og armerte herdeplaster og hvordan egenskapene til disse materialene endrer seg under forskjellige temperaturforhold. I denne oppgaven er det fokusert på veldig lave temperaturer mellom 0°C og ned mot -70°C. Oppgaven omfatter også å utrede testmetoder og utføre tester og simuleringer på termoplast og armerte herdeplaster for å kartlegge styrkeegenskapene til ulike plastmaterialer ved lave temperaturområder.

Jeg valgte denne oppgaven fordi jeg synes den var annerledes enn de fleste oppgavene jeg har skrevet tidligere. Gjennom studiet har de fleste prosjektoppgaver handlet om å utvikle og designe et nytt produkt og gjøre beregningsanalyser. I denne oppgaven var det mer rent fokus på materialer og materialegenskaper og hvordan disse egenskapene påvirkes ved forskjellige temperaturer og omgivelser. Materialer og læren om materialer er også et fagfelt som hele tiden er sentralt og aktuelt. Alt vi omgir oss med og bruker i hverdagen av for eksempel verktøy, produkter og transportmidler er laget av forskjellige materialer alt etter hvilke materialegenskaper det er behov for. Derfor vil læren om materialer og videre forskning på materialer alltid være et veldig relevant og viktig fagområde både i dag og i fremtiden.

Prosjektoppgaven har gitt meg et innblikk og en dypere forståelse av materiallære og hvordan man tester hvordan ulike plastmaterialer oppfører seg ved forskjellige temperaturområder. Under gjennomføringen av prosjektoppgaven har jeg tilegnet meg nye kunnskaper og mer erfaring både når det gjelder det teoretiske om materialer og plastmaterialer, og det praktiske gjennom utføringen av forsøk, tester og simuleringer.

En stor takk rettes til mine veiledere Johan Andersen og Aage Elias Kollen for god veiledning og hjelp under arbeidet med denne oppgaven. I tillegg rettes det en stor takk til de ansatte på strekkprøvelaboratoriet ved Høgskolen i Oslo og Akershus og de ansatte på verkstedet ved NMBU for god hjelp under det praktiske arbeidet.

John Strande

Sammendrag

Innenfor materiallære er det mange materialer og fagområder man kan fordype seg i. Materialer som jern, stål, aluminium, kopper og glass er materialer som har vært i bruk i lang tid. Jern, stål, kopper og glass ble oppdaget og har blitt brukt i flere tusen år før vår tidsregning, mens aluminium er et relativt nytt materiale som ble oppdaget på attenhundretallet. Når det gjelder plastmaterialer og syntetiske polymerer, er dette et relativt nytt fagområde innenfor materiallæren. Plastmaterialer ble ikke oppdaget før på slutten av attenhundretallet og hadde en betydelig utvikling utover på nittenhundretallet. Siden plastmaterialer er nyoppdagete og nye materialer i forhold til materialhistorien, vil det føre til at forskningsfeltet og studien av plastmaterialer ikke har kommet like langt i forhold til eldre materialer som stål og jern. Derfor er studien og forskningen på plastmaterialer og polymerer et viktig felt for fordypning, både nå og for fremtiden.

Et felt det er forsket lite på er studien av hvordan egenskapene til plastmaterialer endrer seg ved veldig lave temperaturer. Målet med prosjektoppgaven ble å finne informasjon om de mest brukte termoplastene i verden, polyetylen, polypropylen og polyvinylklorid i tillegg til armerte herdeplaster, og finne metoder for å teste disse plastmaterialene ved lave temperaturer. Den valgte løsningsmetoden ble å modellere 3D-modeller av virkelige rør og prøvestykker i CAD-programmet SolidWorks, og deretter kjøre simuleringer der rørene og prøvestykkene ble utsatt for forskjellige krefter, trykk og lave temperaturområder. I tillegg har det blitt utført strekktester på materialer som polyetylen og glassfiber på strekkprøvelaboratoriet hos Høgskolen i Oslo og Akershus. Resultatene fra simuleringene og de praktiske forsøkene har blitt sammenlignet med den utredede teorien om plastmaterialer ved lave temperaturer og konklusjonen ble at teorien stemte godt overens med simuleringene og de praktiske forsøkene. Generelt ser man at en lavere temperatur fører til en økning i E-modulen til plastmaterialet, slik at det blir både hardere og stivere. Konsekvensen av et hardere og stivere plastmateriale er at tøyningen i materialet reduseres. I tillegg blir plastmaterialet mer sprøtt og det blir mer utsatt for potensiell sprekkvekst som kan lettere føre til svikt og brudd i materialet.

I tillegg til teori, forsøk og simuleringer er det også gjort en utredning for plastindustrien, den petrokjemiske industrien, ytre forhold som påvirker plastindustrien, analyse av prisutviklingen til forskjellige plastmaterialer og en prognose for den videre utviklingen av plastmaterialer og plastindustrien.

Abstract

Within materials science, there are many materials and disciplines one can immerse oneself in. Materials such as iron, steel, aluminum, copper and glass are materials that have been in use for a long time. Iron, steel, copper and glass were discovered and have been used for thousands of years before our era, while aluminum is a relatively new material that was discovered in the nineteenth century. Regarding plastic materials and synthetic polymers, this is a relatively new field in materials science. Plastics were not discovered until the late nineteenth century and had a significant development in the twentieth century. Since plastics are newly discovered and new materials in relation to the history of materials, it will cause the field of research and study of plastic materials to not have come as far in relation to older materials such as steel and iron. Therefore, the study and research on plastics and polymers are an important area of specialization, both now and for the future.

A field that lacks research is the study of how the properties of plastic materials is changing at very low temperatures. The objective of the assignment was to find information about the most widely used thermoplastics in the world, polyethylene, polypropylene and polyvinyl chloride in addition to reinforced thermosetting plastics, and find methods to test these plastic materials at low temperatures. The selected solution method was to model 3D models of real pipes and test specimens in the CAD program SolidWorks, and then run simulations where the pipes and test specimens were exposed to different forces, pressures and low temperature ranges. In addition, tensile tests have been carried out on materials such as polyethylene and fiberglass at the tensile testing laboratory at Høgskolen i Oslo og Akershus. The results of the simulations and the tests have been compared with the investigated theory of plastic materials at low temperatures and the conclusion was that the theory coincided with the simulations and the tests. Generally, it is seen that a lower temperature leads to an increase in the modulus of elasticity of the plastic material, so that it is both harder and stiffer. The consequence of a harder and stiffer plastic material is that the strain in the material is reduced. In addition, the plastic material becomes more brittle and it becomes more susceptible to potential crack growth that can easily cause failure and fracture of the material.

In addition to theory, experiments and simulations it is also conducted a study of the plastics industry, the petrochemical industry, external factors affecting the plastics industry, the analysis of price trends for various plastic materials and a prognostication for the further development of plastic materials and the plastics industry.

Innholdsfortegnelse

FORORD	I
SAMMENDRAG	II
ABSTRACT	III
INNHALDSFORTEGNELSE	IV
FIGURLISTE	VII
TABELLISTE	XIV
1. INNLEDNING	1
1.1 BAKGRUNN.....	1
1.2 PROBLEMSTILLINGER	2
1.3 MÅLSETTINGER OG BEGRENSNINGER.....	2
1.3.1 Hovedmål.....	2
1.3.2 Delmål.....	3
1.3.3 Begrensninger.....	3
1.4 KVALITETSSIKRING	3
1.4.1 Kvalitetssikring rapport	3
1.4.2 Kvalitetssikring produkt.....	3
1.5 LØSNINGSVERKTØY	4
1.5.1 Prosjektstyring	4
1.5.2 Målinger	4
1.5.3 Tekstbehandling.....	4
1.5.4 Dataverktøy.....	4
1.6 SYMBOLER OG TERMINOLOGI.....	5
1.7 PROSJEKTPLANLEGGING	6
1.8 FORMLER	8
2. TEORETISK GRUNNLAG	9
2.1 GENERELL MATERIALLÆRE	9
2.2 OPPVARMING OG NEDKJØLING AV MATERIALER	12
2.3 MATERIALER VED LAVE TEMPERATURER.....	13
2.3.1 Sprøtt brudd.....	13
2.3.2 Eksisterende teori om termoplast i kulde	14
2.4 TESTING AV MEKANISKE EGENSKAPER.....	15
2.4.1 Strekk- og trykktester og andre tester.....	15
2.4.2 Ringstivhet.....	16
2.5 POLYMERER.....	18
2.5.1 Oppbygning	18
2.5.2 Mekaniske egenskaper til polymerer.....	22
2.5.3 Identifisering av plastmaterialer	27
2.6 TERMOPLASTER.....	28
2.6.1 PE (polyetylen, LDPE og HDPE)	28
2.6.2 PP (polypropylen).....	30
2.6.3 PVC (polyvinylklorid)	33
2.7 FIBERARMERTE PLASTMATERIALER (KOMPOSITTER)	35

3. UNDERSØKELSE OG DRØFTING AV FORSØKS- OG TESTMETODER FOR PLASTMATERIALER VED LAVE TEMPERATURER	36
3.1 VALGT LØSNING	39
3.1.1 Valgt løsning for simuleringsforsøk	39
3.1.2 Valgt løsning for de praktiske forsøke	39
3.1.3 Verktøy, løsningsmetode og tilpasninger for gjennomføring av simuleringsforsøk.....	40
3.1.4 Verktøy, løsningsmetode og tilpasninger for gjennomføring av de praktiske forsøke....	41
3.2 GJENNOMFØRING AV FORSØK OG SIMULERINGER.....	44
3.2.1 Generell fremgangsmåte (praktiske forsøk).....	45
3.2.2 Generell fremgangsmåte (simulering i SolidWorks).....	52
3.3 MULIGE FEILKILDER VED TESTINGEN	60
4. RESULTATER.....	62
4.1 RESULTATER FRA SIMULERINGSFORSØKENE AV 3D-MODELLERTE RØR	62
4.1.1 Tabeller	62
4.1.2 Tøyningsplot	65
4.2 RESULTATER FRA SIMULERINGSFORSØKENE AV STREKKTETER.....	69
4.2.1 Tabeller	69
4.2.2 Tøyningsplot	71
4.3 RESULTATER FRA DE PRAKTISKE FORSØKENE	75
4.3.1 Last og tøyningsdiagrammer fra strekktestene.....	75
4.4 ANALYSE AV RESULTATER OG SAMMENLIKNING MED TEORI	81
4.4.1 Analyse av simuleringsresultatene	81
4.4.2 Analyse av resultatene fra de praktiske forsøkene (strekktester)	89
4.4.3 Oppsummering fra analysene av resultatene.....	94
5. PLASTINDUSTRIEN, DEN PETROKJEMISKE INDUSTRIEN, YTRE FORHOLD, PRISUTVIKLING OG PROGNOSE.....	95
5.1 PLASTINDUSTRIEN OG TILHØRENDE MARKEDSDATA.....	95
5.2 DEN PETROKJEMISKE INDUSTRIEN	102
5.3 YTRE FORHOLD	104
5.3.1 Politikk og krav fra myndigheter	104
5.3.2 Lover, regler og juridiske forhold	104
5.3.3 Makro- og mikroøkonomiske forhold	105
5.3.4 Teknologiske nyvinninger og innovasjon	105
5.3.5 Miljø- og klimamessige krav	106
5.3.6 Sosiale og kulturelle forhold	106
5.4 ANALYSE AV PRISUTVIKLINGEN TIL PLASTMATERIALER.....	107
5.4.1 Prisutviklingen til HDPE (high-density polyetylen).....	108
5.4.2 Prisutviklingen til LDPE (low-density polyetylen).....	109
5.4.3 Prisutviklingen til PP (polypropylen)	110
5.4.4 Prisutviklingen til PVC (polyvinylklorid)	111
5.4.5 Konklusjon fra prisutviklingsanalysen.....	111
5.5 PROGNOSE AV PLASTINDUSTRIEN	114
6. DISKUSJON, PROSESSEVALUERING OG OPPSUMMERING.....	115
6.1 DISKUSJON OG OPPSUMMERING	115
7. KONKLUSJON	116
7.1 VIDERE ARBEID.....	117
8. LITTERATURREFERANSER.....	118

9. VEDLEGG	122
9.1 PRØVESTYKKER (ASTM D638).....	122
9.2 MÅLSATT SKISSE AV TYPE 1 (ASTM D638).....	123
123	
9.3 MÅLSATT SKISSE AV TYPE 2 (ASTM D638).....	124
9.4 IDENTIFISERINGSSKJEMA FOR ULIKE PLASTMATERIALER.....	125

Figurliste

Figur 1-1 – Nye plastrør som skal frakte forskjellige gasser og væsker. [1].....	2
Figur 2-1 - Spennings- og tøyingsdiagram for et typisk stålmateriale. [2].....	10
Figur 2-2 - Forskjellige typer materialer med forskjellige materialegenskaper. Fra venstre: gummistriker, stål og glass. [3] [4] [5].....	10
Figur 2-3 – Typiske strekkprøvemaskiner og et frysekammer som står på strekkprøvelaboratoriet ved Høgskolen i Oslo og Akershus. [16].....	15
Figur 2-4 - Sektordiagram som viser de mest brukte polymerene. Her ser man at polyetylen (HDPE, LDPE), polypropylen (PP) og polyvinylklorid (PVC) utgjør nesten 70% av polymermarkedet. [18]	18
Figur 2-5 – Eksempel på hvordan strukturformelen til en polymer ser ut. Her vises strukturformelen til polyvinylklorid (PVC). I R-gruppen ligger kloratomet (Cl). "n" benevner utvidelsen av strukturformelen (antall molekyler i rekka). [19].....	19
Figur 2-6 – Illustrasjon som viser de forskjellige strukturene til termoplaster, elastomerer og herdeplaster. [14]	20
Figur 2-7 - Illustrasjon som viser de forskjellige typene kjedestrukturene man har i ulike polymerer. a) Lineær struktur, b) forgreinet struktur, c) krysslinket struktur, d) nettverksstruktur. [20]	21
Figur 2-8 - Illustrasjon av amorf struktur og forskjellige krystallinske strukturer til polymerer. [14].....	21
Figur 2-9 - Illustrasjon av isotaktisk og syndiotaktisk konfigurasjon. [15]	22
Figur 2-10 - E-modulkurve for et amorft plastmateriale. Her er T_g glasstransisjonstemperaturen og T_f flytetemperaturen. [14].....	24
Figur 2-11 - E-modulkurve for et krystallinsk plastmateriale. Her er T_g glasstransisjonstemperaturen og T_m den krystallinske smeltetemperaturen. [14].....	24
Figur 2-12 – Et spennings- tøyingsdiagram for en typisk termoplast. [22].....	26
Figur 2-13 - Spennings- tøyingsdiagrammer for plastmaterialer. Venstre: amorft plastmateriale. Høyre: semi-krystallinsk plastmateriale. [22]	26
Figur 2-14 - Identifiseringsskjema for ulike plastmaterialer. [23].....	27
Figur 2-15 - Strukturformelen til polyetylen som består kun av karbon- og hydrogenatomer. "n" benevner utvidelsen av strukturformelen (antall molekyler i rekka). [24]	28

Figur 2-16 - Strukturformelen til polypropylen som består av karbon- og hydrogenatomer i tillegg til en metyl-gruppe (CH_3). "n" benevner utvidelsen av strukturformelen (antall molekyler i rekka). [26]	30
Figur 2-17 - Strukturformelen til polyvinylklorid som består av karbon- og hydrogenatomer i tillegg til et kloratom (Cl) i R-gruppen. "n" benevner utvidelsen av strukturformelen (antall molekyler i rekka). [19].....	33
Figur 2-18 - Forskjellige typer glassfibre. Mikrokuler, opphakkert eller vevd. [28]	35
Figur 3-1 - En profesjonell maskin for testing av ringstivheten. [29].....	36
Figur 3-2 - Lavtemperatur fryserer fra ThermoFisher, som kan holde en temperatur på ned mot $-86^{\circ}C$. [30] [31]	37
Figur 3-3 - Trykktank med flytende nitrogen og frysekammer på strekkprøvelaboratoriet ved Høgskolen i Oslo og Akershus.	37
Figur 3-4 - Eksempel på en strømningssimulering av et rør i «SolidWorks Flow Simulation». [32]	40
Figur 3-5 - Eksempel på simulering av krefter og trykk på en trykktank i «SolidWorks Simulation». [33]	40
Figur 3-6 - De forskjellige prøvestykkene med tilhørende krav til tykkelse som skal brukes for å strekkteste plastmaterialer. Type 1 og type 2 ble valgt som prøvestykker for strekktestene. [35] [34].....	41
Figur 3-7 - Bilde som viser skjøtene før det ble boret hull og festet med bolter.	42
Figur 3-8 - Bilde som viser skjøtene og prøvestykket etter det er boret hull og festet med bolter.....	42
Figur 3-9 - Bearbejdede prøvestykker med borede hull slik at man kan feste de til skjøtene med bolter. Øverst og nederst: glassfiber. Midten: polyetylen (plast).....	43
Figur 3-10 - Bilde som viser de opprinnelige glassfiberprøvene og de bearbejdede prøvestykkene av glassfiber og polyetylen.	45
Figur 3-11 - Ferdig lagde og monterte skjøter som skal festes til prøvestykkene.	46
Figur 3-12 - Ferdig lagde og monterte skjøter som skal festes til prøvestykkene.	46
Figur 3-13 - Bilde som viser boring av hull i prøvestykkene slik at de kan festes med bolter til skjøtene.	47
Figur 3-14 - Bilde av skjøtene ovenfra med fastmonterte prøvestykker etter det ble boret hull og festet med bolter.	48

Figur 3-15 - Bilde av skjøtene fra siden med fastmonterte prøvestykker etter det ble boret hull og festet med bolter.	48
Figur 3-16 - Prøvestykke med de fastmonterte skjøtene klare til å kjøles ned og strekktestes. En digital temperaturstyringsenhet brukes for å sette den temperaturen man ønsker i frysekammeret og som i tillegg viser den nåværende temperaturen i frysekammeret.	49
Figur 3-17 - En egen trykktank med flytende nitrogen brukes for å kjøle ned frysekammeret.	49
Figur 3-18 - Lukket frysekammer med prøvestykke fastmontert til skjøtene. Endene på skjøtene stikker ut av frysekammeret og er festet til prøvebakkene slik at det kan strekkes til prøvestykket går i brudd.	50
Figur 3-19 - Avlesning og lagring av resultatdataene blant annet last- og tøyingsverdier.....	51
Figur 3-20 - Ødelagte prøvestykker som har blitt strukket til de har gått i brudd.....	51
Figur 3-21 - Tegning og modellering av rørene i SolidWorks. [35]	53
Figur 3-22 - Oppsett av simuleringen. a) valg av innvendig trykk, b) valg av meshingen, c) valg av materialet til 3D-modellen, d) valg av temperatur for 3D-modellen. [35]	54
Figur 3-23 - Kjøring av simuleringen og plotting av for eksempel spenningen. Plottet fargelegger modellen etter en fargeskala i forhold til hvor høy eller lav spenningen er. [35].....	55
Figur 3-24 - Dimensjonene til forskjellige prøvestykker i henhold til ASTM D638 standarden. I standarden er det anbefalt å bruke «Type 1» eller «Type 2» sine dimensjoner for strekktesting av plastmaterialer. [34]	56
Figur 3-25 - Tegning av det 3D-modellerte prøvestykket. [35].....	57
Figur 3-26 - Ekstruderingen av det 3D-modellerte prøvestykket. [35].....	57
Figur 3-27 – Spesifisering av opplagere, krefter, temperatur og materialegenskaper. [35]	58
Figur 3-28 - Ferdig kjørt simulering og plotting av for eksempel tøyningen. Plottet fargelegger modellen etter en fargeskala i forhold til hvor høy eller lav verdien til det man analyserer er. [35]	59
Figur 3-29 – Komponenter og utstyr som kan virke som feilkilder og bidra til unøyaktige målinger og resultater når man utfører strekktester.....	61
Figur 4-1 - Tøyingsplottet til HDPE-røret ved 20°C. [35].....	65
Figur 4-2 - Tøyingsplottet til HDPE-røret ved -70°C. [35].....	65

Figur 4-3 - Tøyningsplottet til PE-røret ved 20°C. [35].....	66
Figur 4-4 - Tøyningsplottet til PE-røret ved -70°C. [35].....	66
Figur 4-5 - Tøyningsplottet til PP-røret ved 20°C. [35].....	67
Figur 4-6 - Tøyningsplottet til PP-røret ved -70°C. [35]	67
Figur 4-7 - Tøyningsplottet til PVC-røret ved 20°C. [35]	68
Figur 4-8 - Tøyningsplottet til PVC-røret ved -70°C. [35]	68
Figur 4-9 – Tøyningsplottet til prøvestykket laget av HDPE ved 20°C. [35]	71
Figur 4-10 – Tøyningsplottet til prøvestykket laget av HDPE ved -70°C. [35].....	71
Figur 4-11 - Tøyningsplottet til prøvestykket laget av PE ved 20°C. [35].....	72
Figur 4-12 - Tøyningsplottet til prøvestykket laget av PE ved -70°C. [35]	72
Figur 4-13 - Tøyningsplottet til prøvestykket laget av PP ved 20°C. [35].....	73
Figur 4-14 - Tøyningsplottet til prøvestykket laget av PP ved -70°C. [35]	73
Figur 4-15 - Tøyningsplottet til prøvestykket laget av PVC ved 20°C. [35]	74
Figur 4-16 - Tøyningsplottet til prøvestykket laget av PVC ved -70°C. [35]	74
Figur 4-17 - Last og tøyningsdiagram fra strekktesten med polyetylen ved -30°C (forsøk 1).	75
Figur 4-18 - Last og tøyningsdiagram fra strekktesten med polyetylen ved -50°C (forsøk 1).	75
Figur 4-19 - Last og tøyningsdiagram fra strekktesten med polyetylen ved -30°C (forsøk 2).	76
Figur 4-20 - Last og tøyningsdiagram fra strekktesten med polyetylen ved -50°C (forsøk 2).	76
Figur 4-21 - Last og tøyningsdiagram fra strekktesten med gul glassfiber ved -30°C (forsøk 1).	77
Figur 4-22 - Last og tøyningsdiagram fra strekktesten med gul glassfiber ved -50°C (forsøk 1).	77
Figur 4-23 - Last og tøyningsdiagram fra strekktesten med gul glassfiber ved -30°C (forsøk 2).	78
Figur 4-24 - Last og tøyningsdiagram fra strekktesten med gul glassfiber ved -50°C (forsøk 2).	78
Figur 4-25 - Last og tøyningsdiagram fra strekktesten med gul glassfiber ved -30°C (forsøk 3).	79

Figur 4-26 - Last og tøyingsdiagram fra strekktesten med gul glassfiber ved -50°C (forsøk 3).	79
Figur 4-27 - Last og tøyingsdiagram fra strekktesten med svart glassfiber ved -30°C (forsøk 1).	80
Figur 4-28 - Last og tøyingsdiagram fra strekktesten med svart glassfiber ved -50°C (forsøk 1).	80
Figur 4-29 - Diagram som viser E-modulen, maks. og min. spenningen og maks. og min. von-mises spenningen mot temperaturen for HDPE-røret. [35].....	81
Figur 4-30 - Diagram som viser maks. og min. tøyningen mot temperaturen for HDPE-røret. [35]	81
Figur 4-31 - Diagram som viser E-modulen, maks. og min. spenningen og maks. og min. von-mises spenningen mot temperaturen for PE-røret. [35]	82
Figur 4-32 - Diagram som viser maks. og min. tøyningen mot temperaturen for PE-røret. [35]	82
Figur 4-33 - Diagram som viser E-modulen, maks. og min. spenningen og maks. og min. von-mises spenningen mot temperaturen for PP-røret. [35]	83
Figur 4-34 - Diagram som viser maks. og min. tøyningen mot temperaturen for PP-røret. [35]	83
Figur 4-35 - Diagram som viser E-modulen, maks. og min. spenningen og maks. og min. von-mises spenningen mot temperaturen for PVC-røret. [35].....	84
Figur 4-36 - Diagram som viser maks. og min. tøyningen mot temperaturen for PVC-røret. [35].....	84
Figur 4-37 – Diagram som viser hvordan E-modulen til de forskjellige plastmaterialene øker i forhold til temperaturen.....	85
Figur 4-38 - Diagram som viser hvordan tøyningen til de forskjellige plastmaterialene synker i forhold til temperaturen. [35]	86
Figur 4-39 - Diagram som viser hvordan tøyningen utvikler seg i forhold til temperaturen til de forskjellige plastmaterialene. [35].....	87
Figur 4-40 - Diagram som viser hvordan spenningen øker i forhold til temperaturen for de forskjellige plastmaterialene. [35]	88
Figur 4-41 - Last og tøyingsdiagram for polyetylen sammenlignet ved -30°C og -50°C.	90
Figur 4-42 - Last og tøyingsdiagram for polyetylen sammenlignet ved -30°C og -50°C.	90

Figur 4-43 - Last og tøyingsdiagram for gul glassfiber sammenlignet ved -30°C og -50°C.	91
Figur 4-44 - Last og tøyingsdiagram for gul glassfiber sammenlignet ved -30°C og -50°C.	92
Figur 4-45 - Last og tøyingsdiagram for gul glassfiber sammenlignet ved -30°C og -50°C.	92
Figur 4-46 - Last og tøyingsdiagram for svart glassfiber sammenlignet ved -30°C og -50°C.	93
Figur 4-47 - Eksempler på sprekkevekst og brudd i plastrør på grunn av sprøhet og utmatting i plastmaterialet. [38] [39].....	94
Figur 4-48 - Eksempel på PVC-rør som har blitt sprøtt og gått i brudd. [40].....	94
Figur 5-1 - Illustrasjon som viser en oversikt over inndelingen av de mest populære plastmaterialene inn i termoplaster og herdeplaster. Blå: Termoplaster. Oransje: Herdeplaster. [41]	95
Figur 5-2 - Verdensproduksjonen og den europeiske produksjon av plastmaterialer fra 2005 til 2015. Tallene er oppgitt i millioner tonn produsert plast. [41].....	96
Figur 5-3 - Den globale distribusjonen av plastproduksjonen i verden. [41].....	97
Figur 5-4 - Dette diagrammet viser de plastmaterialene som det var størst etterspørsel etter i Europa for årene 2013, 2014 og 2015. [41].....	98
Figur 5-5 - Dette diagrammet viser de landene i Europa som hadde størst etterspørsel etter plastmaterialer for årene 2013, 2014 og 2015. [41]	99
Figur 5-6 - Hovedbruksområdene til forskjellige etterspurte plastmaterialer for Europa i 2015. [41]	100
Figur 5-7 - Etterspørselen etter plastmaterialer sortert etter plasttype og bruksområde for EU i 2015. [41]	101
Figur 5-8 - Illustrasjon av de trinnvise prosessene i den petrokjemiske industrien. [42].....	103
Figur 5-9 - Prisutviklingen til forskjellige undertyper av HDPE (high-density polyetylen) fra 1997 til 2017. Prisen er oppgitt i USD (amerikanske dollar) per pund (cents/lb.). [43].....	108
Figur 5-10 - Prisutviklingen til forskjellige undertyper av LDPE (low-density polyetylen) fra 1997 og 1989 til 2017. Prisen er oppgitt i USD (amerikanske dollar) per pund (cents/lb.). [43]	109

Figur 5-11 - Prisutviklingen til forskjellige undertyper av PP (polypropylen) fra 1997 til 2017. Prisen er oppgitt i USD (amerikanske dollar) per pund (cents/lb.). [43]	110
Figur 5-12 - Prisutviklingen til forskjellige undertyper av PVC (polyvinylklorid) fra 1997 til 2017. Prisen er oppgitt i USD (amerikanske dollar) per pund (cents/lb.). [43]	111
Figur 5-13 - Graf som viser månedlig gjennomsnittlig spotpris (Brent Blend hovedklassen) på olje fra 1987 til 2016. [44]	112
Figur 5-14 - Prisene på de forskjellige plastmaterialene. [43]	112

Tabelliste

Tabell 1-1 - Symboler og tilhørende forklaring og enhet.....	5
Tabell 1-2 - Arbeidsplan	6
Tabell 1-3 - Gantt diagram som viser fremdriftsplanen for arbeidet.	7
Tabell 2-1 – Viktige og sentrale verdier som beskriver egenskapene til polyetylen. [25].....	28
Tabell 2-2 - Sentrale verdier som beskriver egenskapene til polypropylen. [25]	30
Tabell 2-3 - Sentrale verdier som beskriver egenskapene til polyvinylklorid. [25].....	33
Tabell 3-1 – Plastrør og de tilhørende dimensjonene som ble brukt som referanse for de 3D-modellerte rørene. [36] [37]	53
Tabell 4-1 - Trykk, E-modul og spennings- og tøyingsverdier fra simuleringen av HDPE-røret. [35]	62
Tabell 4-2 - Trykk, E-modul og spennings- og tøyingsverdier fra simuleringen av PE-røret. [35]	62
Tabell 4-3 - Trykk, E-modul og spennings- og tøyingsverdier fra simuleringen av PP-røret. [35]	63
Tabell 4-4 - Trykk, E-modul og spennings- og tøyingsverdier fra simuleringen av PVC-røret. [35].....	63
Tabell 4-5 - Beregning av lengdeendringen til plastrør når temperaturen går fra 20°C til -25°C. [25] [37] [36]	63
Tabell 4-6 - Beregning av lengdeendringen til plastrør når temperaturen går fra 20°C til -70°C. [25] [37] [36]	64
Tabell 4-7 - Påsatt kraft, E-modul i tillegg til spennings- og tøyingsverdier fra simuleringen av strekktesten med prøvestykket laget av HDPE. [35]	69
Tabell 4-8 - Påsatt kraft, E-modul i tillegg til spennings- og tøyingsverdier fra simuleringen av strekktesten med prøvestykket laget av PE. [35]	69
Tabell 4-9 - Påsatt kraft, E-modul i tillegg til spennings- og tøyingsverdier fra simuleringen av strekktesten med prøvestykket laget av PP. [35]	70
Tabell 4-10 - Påsatt kraft, E-modul i tillegg til spennings- og tøyingsverdier fra simuleringen av strekktesten med prøvestykket laget av PVC. [35].....	70
Tabell 4-11 - Prosentøkning i E-modulen til de forskjellige plastmaterialene.....	86
Tabell 4-12 - Prosentnedgang i maks. og min. tøyningen til de forskjellige plastmaterialene. [35]	87

1. Innledning

1.1 Bakgrunn

Materialer og læren om materialer er og blir et viktig fagfelt både nå og for fremtiden. Alt vi omgir oss med og bruker i verden av produkter, konstruksjoner, transportmidler, verktøy osv. er laget av forskjellige materialer og er nøye utvalgt i forhold til de krav til materialegenskaper som er satt. Dette gjør materiallære til et veldig allsidig og bredt fagfelt som angår nesten alle områder i samfunnet. Forskning og videre utvikling av nye materialer er også i stadig utvikling hvor man får frem nye kombinasjoner av egenskaper som man ikke hadde tidligere. Utvikling av materialer på mikro- og nanonivå er også et viktig fagfelt som også stadig er i utvikling og som har stor betydning innenfor materialvitenskap, fysikk, kjemi, biologi og medisin.

Når det gjelder materialer laget av plast har dette blitt en egen industri og et eget fagfelt. I de senere tiårene har plastmaterialer og syntetiske plastprodukter blitt bedre utviklet og blir masseprodusert og distribuert i storskala som inngår i mange produkter. Forskning og utvikling av nye og bedre plastmaterialer har gjort at plast har fått et bredt bruksområde og blir ofte valgt fremfor andre materialer.

Plastmaterialer har ikke bare positive sider, men har også sine ulemper. Plastmaterialer har generelt lav styrke i forhold til tradisjonelle materialer som stål og tre. Derfor velges ofte plast bort når det stilles høye krav til styrke som i konstruksjoner av fagverk og bygninger. Plastmaterialer anvendes oftere der det kreves lavere styrke, lav vekt og høy formbarhet. Plastmaterialer er også billigere enn mange andre materialer og velges ofte for å redusere kostnadene. Det finnes også mer avanserte og dyrere plastmaterialer som er tilsatt tilsetningsstoffer som gjør plasten sterkere og hardere. Dette gjør at spesielle typer av plast kan anvendes der det er behov for høy styrke.

Plastmaterialer brukes som konstruksjonsmateriale i mange forskjellige produkter og er derfor utsatt for forskjellige omgivelser og temperaturer. Ofte er plast brukt til å lage rør som frakter forskjellige typer gasser eller væsker. Dette er fordi plast er både billigere og mer vedlikeholdsfritt enn for eksempel stål. Disse rørene ligger ofte nedgravd i omgivelser som kan ha forskjellige temperaturer. Rørene kan for eksempel ligge i ørkenen og plastmateriale som rørene er laget av kan komme opp i 40-50°C. I motsetning kan rørene ligge i Norge, Svalbard eller Antarktis og plastmaterialene kan utsettes for ekstreme lave temperaturer, ned mot -70°C. På grunn av de store temperaturskjellene som plastmaterialer kan være utsatt for er det viktig å se på hva som skjer med egenskapene til plastmaterialer ved forskjellige temperaturer. Med tanke på klimaet i Norge i tillegg til områder som Svalbard, Island og Antarktis, er forskning, kunnskap og testing på plastmaterialer utsatt for lave temperaturer et viktig forskningsfelt.

En industri som bruker mye rør til frakting av gass og væsker er olje- og gassindustrien. Mye utstyr, rør og konstruksjoner av både plastmaterialer og andre materialer utsettes for ekstreme temperatur- og værforhold og det må derfor settes krav til forskning og kunnskap om hvordan egenskapene til forskjellige materialer blir påvirket ved forskjellige omgivelser og temperaturer. Olje- og gassindustrien bygger ut og beveger seg etter der det finnes olje og gass og dette kan være på veldig kalde og polare områder. Derfor er forskning og kunnskap om hvordan plastmaterialer og andre materialer oppfører seg ved lave temperaturer et viktig felt for forskning og fordypning.



Figur 1-1 – Nye plastrør som skal frakte forskjellige gasser og væsker. [1]

1.2 Problemstillinger

- Hvordan er oppbygningen og strukturen til termoplaster som HDPE, LDPE, PP og PVC i tillegg til fiberarmerte plastmaterialer og hvordan påvirker forskjellige temperaturer i temperaturområde fra 0 til -70°C egenskapene til de forskjellige termoplastene?
- Hvordan egenskapene til materialer som termoplaster og fiberarmerte plastmaterialer blir påvirket av kulde?
- Hvilke metoder for testing av E-modul, tøyning og andre egenskaper til plastmaterialer og plastrør har man?
- Hvilke faktorer påvirker produksjonen og prisen på plastmaterialer, og hvordan vil plastindustrien og plastmaterialer utvikle seg videre?

1.3 Målsettinger og begrensninger

1.3.1 Hovedmål

Undersøkelse, litteratursøk og oppsummering av hva som finnes i eksisterende litteratur og akademiske tekster om termoplaster ved lave temperaturer. Undersøkelse av metoder for å teste og måle E-modul, tøyning og andre egenskaper til plastrør og prøvestykker laget av termoplastene HDPE, LDPE, PP og PVC, i tillegg til fiberarmerte plastmaterialer ved lave temperaturer. Analysere og drøfte resultatene som oppstår på grunn av eventuelle forsøk, tester og simuleringer og videre rapportere resultatene på en oversiktlig og ryddig måte.

1.3.2 Delmål

- Utredning for nedkjøling/oppvarming av materialer.
- Utrede metoder for å teste styrke og mekaniske egenskaper til termoplaster.
- Finne informasjon om oppbygningen og strukturen til termoplastene PEHD, PELD, PP og PVC i tillegg til fiberarmerte plastmaterialer.
- Analyse av testmetoder for å finne mulige feilkilder.
- Utredning av plan og oppskrift for gjennomføringen av forsøk, tester og simuleringer slik at man enkelt kan repetere disse uten feil.
- Analysere resultatene fra forsøkene og sammenlikne de med eksisterende litteratur og teori.
- Utrede en undersøkelse for ulike forhold som påvirker plastindustrien, en analyse av prisutviklingen for plastmaterialer og en generell prognose for plastindustrien.
- Analysere og diskutere resultatene jeg har kommet frem til og oppsummere dette i en konklusjon.

1.3.3 Begrensninger

Denne prosjektoppgaven er begrenset på grunn av tidsbegrensing og fordi omfanget til plastmaterialer og materiallære er såpass stort. Det er også begrenset hvor mye jeg går inn på teoretiske temaer som utmatting og sprekkvekst siden dette er veldig omfattende fagområder med mye teori.

Når det gjelder oppbygningen og strukturen til plastmaterialer har jeg gitt en beskrivelse og forklaring på termoplastene HDPE, LDPE, PP og PVC i tillegg til fiberarmerte plastmaterialer, men ikke gått i detalj når det gjelder den kjemiske prosessen i hvordan de blir produsert.

Det er utført forenklede simuleringsanalyser i "SolidWorks Simulation" (simuleringsprogramvare), inkludert modellering og innmating av riktige verdier for styrkeegenskaper, temperatur, trykk og krefter til de forskjellige plastmaterialene. I tillegg har det blitt utført praktiske forsøk på strekkprøvelaboratoriet ved Høgskolen i Oslo og Akershus.

1.4 Kvalitetssikring

1.4.1 Kvalitetssikring rapport

Denne rapporten er kvalitetssikret og har gått gjennom flere korrekturlesinger og ryddet opp i når det gjelder språk, innholdsfortegnelse, referanser, figur- og tabellnummerering, henvisninger, sidetall og utregninger.

1.4.2 Kvalitetssikring produkt

Kravspesifikasjonene og de praktiske forsøkene er diskutert i samråd med hovedveileder og tilleggsveileder på jevnlig møter. Jeg har brukt de standardene og fremgangsmåtene som veileder og tilleggsveileder har anbefalt og jeg har tilegnet meg den informasjonen jeg kan hente fra veiledere, litteratur, internett og andre kilder.

1.5 Løsningsverktøy

1.5.1 Prosjektstyring

Det er utredet og utarbeidet en arbeidsplan i Microsoft Excel og et Gantt diagram som viser den planlagte fremdriften. Gantt diagrammet viser omfanget av arbeidet som er fordelt utover den tiden jeg har til rådighet. Arbeidsplanen skal gi en oversikt over arbeidsoppgavene i prosjektet og de tidsfrister jeg gitt meg selv. Ved å bruke en arbeidsplan har dette bidratt til å organisere arbeidet og gitt meg en god oversikt over den tiden jeg har hatt til rådighet.

1.5.2 Målinger

De oppgitte verdiene av blant annet tøyning, spenning og E-modul, er hentet fra SolidWorks sitt simuleringsprogram som automatisk beregner verdier ut i fra programmets egne matematiske modeller basert på fysikkens lover. Målingene og resultatene fra de praktiske forsøkene er målt og avlest fra utstyret som er brukt på strekkprøvelaboratoriet ved Høgskolen i Oslo og Akershus.

1.5.3 Tekstbehandling

Prosjektrapporten har blitt skrevet i tekstbehandlingsverktøyet Microsoft Word. I tillegg har jeg benyttet regneark i Microsoft Excel til å lage arbeidsplan, grafer, diagrammer, behandle resultatdata og gjøre beregninger.

1.5.4 Dataverktøy

- Microsoft, Word (Tekstbehandling)
- Microsoft, Excel (Regneark, beregninger, diagrammer og arbeidsplan)
- CES, Edupack (Materialdata)
- Adobe, Photoshop (Bildebehandling og bilderedigering)
- Dassault Systèmes, SolidWorks (Simulering av termoplastrør og strekktester)

1.6 Symboler og terminologi

Tabell 1-1 - Symboler og tilhørende forklaring og enhet.

Symbol	Forklaring	Enhet
F	Kraft	N
E	E-modul	MPa
σ	Spenning	MPa
ε	Tøyning	-
L	Lengde	mm
A	Areal	mm^2
T	Temperatur	°C
T_g	Glasstransisjonstemperatur	°C
T_m	Smeltetemperatur	°C
t	Tid	Sek/min
k	Varmeoverføringsrate	-
T_a	Temperatur til omgivelser	
T_0	Starttemperaturen til objektet	
d_y	Ytre diameter	mm
d_i	Indre diameter	mm
d_n	Nominell diameter	mm
d_m	Midlere diameter	mm
S_R	Ringstivhet	kN/m^2
γ	Nedbøyning/deformasjon	mm
e	Veggtykkelse	mm
C	Spesifikk varmekapasitet	$J/g^\circ C$
SDR	Standard dimensjonsforhold	-
α	Temperaturutvidelseskoeffisient	K^{-1}
ΔL	Lengdeendring	mm
l_0	Opprinnelig lengde	mm
ΔT	Temperaturendring	°C
l_1	Ny lengde	mm
Δd	Endring i diameter	mm
d_1	Ny diameter	mm
d_0	Opprinnelig diameter	mm
I	Treghetsmomentet	mm^4

1.7 Prosjektplanlegging

I denne prosjektoppgaven har jeg valgt å bruke en arbeidsplan og et Gantt diagram for å lage en oversikt og for å kartlegge fremdriften av arbeidet. I tabellen har jeg listet opp arbeidsaktivitetene i riktig rekkefølge og hvor lang tid som er satt av for hver arbeidsaktivitet.

Tabell 1-2 - Arbeidsplan

Aktivitet	Uke	Varighet
Oppstart	2-4	2 uker
Undersøkelse og gjennomgang av teori og formelverk	2-4 og 4-6	4 uker
Utrede en innledning og bakgrunn	2-4 og 4-6	4 uker
Utrede problemstillinger, mål og kvalitetssikring	2-4 og 4-6	4 uker
Oppvarming og nedkjøling av materialer	4-6 og 6-8	4 uker
Utredning om materialer i kulde og eksisterende teori	6-8, 8-10 og 10-12	6 uker
Eksisterende teori om plastmaterialer i kulde	6-8, 8-10 og 10-12	6 uker
Utrede for oppbygningen og egenskapene til plastmaterialer	8-10, 10-12 og 12-14	6 uker
Utrede en oversikt over ulike plastmaterialer	8-10, 10-12 og 12-14	6 uker
Metodeutvikling og vurdering av testmetoder	10-12 og 12-14	4 uker
Utrede resultater og analyse av testresultater	14-16	2 uker
Utredning av plastindustrien, den petrokjemiske industrien, ytre forhold, prisutvikling og prognose	14-16 og 16-18	4 uker
Diskusjon og prosessevaluering	16-18	2 uker
Konklusjon og anbefalinger	16-18	2 uker
Slutføring, redigering og utskrift	18-20	2 uker
Innlevering	18-20	2 uker

Tabell 1-3 - Gantt diagram som viser fremdriftsplanen for arbeidet.

Uke	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20
Aktivitet									
Oppstart									
Undersøkelse og gjennomgang av teori og formelverk									
Utrede en innledning og bakgrunn									
Utrede problemstillinger, mål og kvalitetssikring									
Oppvarming og nedkjøling av materialer									
Utredning om materialer i kulde og eksisterende teori									
Eksisterende teori om plastmaterialer i kulde									
Utrede for oppbygningen og egenskapene til plastmaterialer									
Utrede en oversikt over ulike plastmaterialer									
Metodeutvikling og vurdering av testmetoder									
Utrede resultater og analyse av testresultater									
Utredning av plastindustrien, den petrokjemiske industrien, ytre forhold, prisutvikling og prognose									
Diskusjon og prosessevaluering									
Konklusjon og anbefalinger									
Slutføring, redigering og utskrift									
Innlevering									

1.8 Formler

Nr.	Formel	Beskrivelse
1	$\sigma = E \cdot \varepsilon$	Hookes lov
2	$T(t) = T_a + (T_0 - T_a) \cdot e^{-kt}$	Newtons lov om avkjøling
3	$F_0 = 250 \cdot 10^{-6} \cdot d_n \cdot L$	Prelast
4	$S_R = \frac{E \cdot I}{D_m^3}$	Generell ringstivhetsformel
5	$I = \frac{e^3}{12}$	Tregghetsmoment til rørvegg
6	$S_R = (0,0186 + 0,025 \frac{y}{d_i}) \cdot \frac{F}{L \cdot y} \cdot 10^6$	Ringstivhet
7	$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T$	Lengdeendring til rør
8	$P_{maks} = \frac{2 \cdot \sigma_{flyt} \cdot e}{d_y}$	Barlows lov (maksimal trykkkapasitet til rør)
9	$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_1 - l_0}{l_0}$	Generell tøyingsformel
10	$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{d_1 - d_0}{d_0}$	Generell tøyingsformel for rør

2. Teoretisk grunnlag

Når det gjelder det teoretiske grunnlaget for materiallære, plastmaterialer og materialer utsatt for lave temperaturer skal dette virke som et fundament og en forberedelse til de forsøk og simuleringer som skal gjennomføres. Innledningsvis begynner det med en generell innføring om læren og teorien om materialer før det går mer detaljert inn på plastmaterialer og polymerer. Etter hvert skal det undersøkes og utredes for metodeutviklingen og vurderingen av hvilke forsøksmetoder som er aktuelt slik at man på en praktisk måte kan utsette termoplaste for lave temperaturer og måle forskjellige styrke- og materialeegenskaper til de forskjellige termoplastene ved de forskjellige temperaturene.

2.1 Generell materiallære

Det første og viktigste man kommer inn på innenfor fasthetslæren og materiallære er Hookes lov. Denne fysiske loven virker som et utgangspunkt for fasthetslæren og beskriver forholdet mellom spenning, E-modul og elastisk tøyning.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

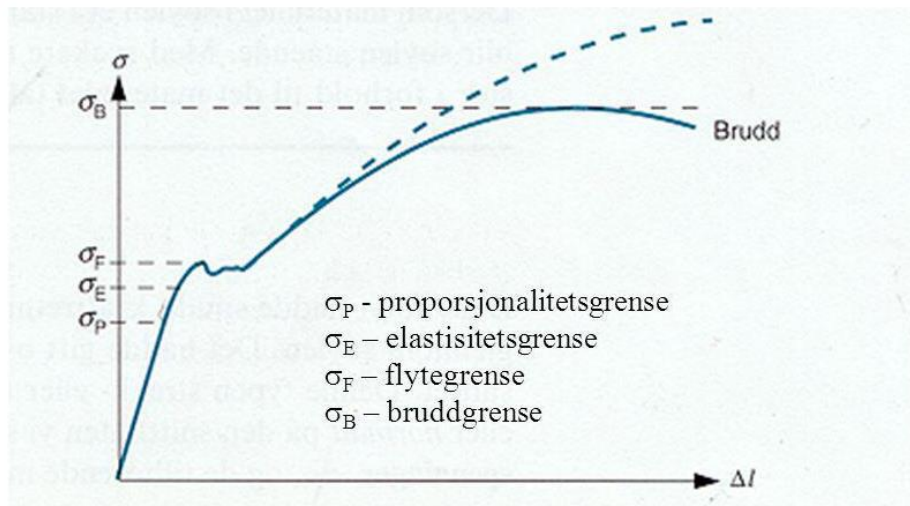
Ut i fra formelen ser man at spenningen er en funksjon av E-modulen og den elastiske tøyningen. Hookes lov er egentlig bare en førsteordens lineær tilnærming av elastiske legemer som blir utsatt for krefter. Denne loven gjelder derimot bare til en viss grense. Etter hvert som materialet utsettes for større krefter vil materialet til slutt ikke tåle mer, verken når det gjelder strekk eller trykk. Materialet vil da til slutt få en permanent forlengelse eller deformasjon og materialet vil da oppleve flyt og til slutt brudd. Ofte er flytegrensen til et materiale en veldig viktig verdi som forteller noe om hvor mye spenning et materiale tåler før det fører til en permanent forlengelse eller deformasjon.

Med andre ord gjelder Hookes lov kun i området under proporsjonalitetsgrensen. Dette området kalles det elastiske området eller proporsjonalitetsområdet og det er her materialet går tilbake til sin opprinnelige form etter å ha vært utsatt for spenninger.

Spenningen oppgis i $\frac{N}{mm^2}$, dvs. hvor mye kraft som utøves per areal.

E er elastisitetmodulen og er forholdet mellom fastheten og forlengelsen til materialet. Jo høyere E-modul, desto stivere er materialet. E-modul oppgis i *Mpa*.

ε er den elastiske tøyningen eller deformasjon og er forholdet mellom endringen i lengde og den opprinnelige lengden. $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$



Figur 2-1 - Spennings- og tøyingsdiagram for et typisk stålmateriale. [2]

Som illustrert i figur 1 ser man et spennings- og tøyingsdiagram for et typisk stål- eller metallmateriale. Egenskapene til forskjellige materialer illustreres ofte med et slikt diagram og viser hvor elastisk eller uelastisk et materiale er og når det begynner å flyte eller gå i brudd. Ulike materialer vil ha forskjellige kurver hvor noen materialer er duktile og elastiske, mens andre materialer er sprø og uelastiske. Et veldig duktilt og elastisk materiale er en gummistrikk hvor forlengelsen og tøyningen er stor under lav spenning. Et veldig sprøtt og uelastisk materiale kan for eksempel være glass hvor det er liten forlengelse og tøyning ved høye spenninger, og går fort i brudd som vil komme fort og plutselig. Når det gjelder metaller og særlig stål er tøyningen veldig elastisk til å begynne med, men etter hvert når det går over flytegrensen vil man få en permanent plastisk deformasjon og til slutt brudd.



Figur 2-2 - Forskjellige typer materialer med forskjellige materialegenskaper. Fra venstre: gummistrikk, stål og glass. [3] [4] [5]

For plastmaterialer og polymerer kan de tilhørende spennings- og tøyingsdiagrammene variere veldig avhengig av temperatur, tid, trykk i tillegg til de gasser og væsker de er omgitt av. Her er metaller og andre materialer mer stabile og mindre påvirket av disse faktorene slik at kurvene varierer mindre.

Under normal romtemperatur har plastmaterialer og polymerer viskoelastiske egenskaper som betyr at de kan oppføre seg både som et flytende eller viskøst materiale og som et elastisk materiale. Et viskøst materiale er for eksempel honning som vil endre form og få en permanent deformasjon når det blir utsatt for en spenning. Et elastisk materiale derimot vil gå tilbake til sin opprinnelige form etter å ha blitt utsatt for en spenning. Når et materiale har både viskøse og elastiske egenskaper som plastmaterialer og polymerer, vil deformeringen være avhengig av hvor lenge de blir utsatt for en spenning. Selv om polymerer har både viskøse og elastiske egenskaper kan det likevel oppstå flyt når spenningen blir for høy, slik at de får deformasjoner, forlengelser og til slutt brudd på lik linje med stålmaterialer.

Når temperaturen går under romtemperatur og mot kuldegrader vil polymerer vise uelastiske egenskaper. Videre testing og utføring av forsøk med termoplast i kulde må til for å finne mer nøyaktige og avgjørende resultater om egenskapene til polymerer ved lave temperaturer. En generell innføring i teori om oppvarming og nedkjøling av materialer og hvordan dette påvirker egenskapene til materialer vil også være et godt utgangspunkt for å finne informasjon om egenskapene til polymerer ved lave temperaturer.

2.2 Oppvarming og nedkjøling av materialer

Når man skal undersøke egenskapene til plastmaterialer og polymerer ved lave temperaturer er det et godt utgangspunkt å undersøke faktorer som avgjør hvor raskt materiale blir nedkjølt og som avgjør materiales evne til å holde på varmen. Når man har et varmt objekt i kaldere omgivelser vil varmen bli overført fra det varme objektet til de kaldere omgivelsene. De ulike varmeoverføringstypene man har er da enten konduksjon, konveksjon eller stråling hvor alle tre kan opptre samtidig. Konduksjon er når varmen overføres ved direkte kontakt mellom to objekter. Konveksjon er når varmen overføres i form av bevegelse av atomer og molekyler i en gass eller væske. Stråling er overføring av varme i form av bølger eller partikler. For solide materialer og plastmaterialer vil varmeoverføringen skje hovedsakelig ved konduksjon.

Det er mange faktorer som avgjør hvor fort et objekt blir nedkjølt (varme avgitt) eller varmet opp (varme tilført). Dette kan være hvordan formen og størrelsen på objektet er som henger sammen med hvor stort areal som er i kontakt med luften rundt objektet. Det kan være egenskapene til luften rundt som lufttrykk, luftfuktighet og strømninger osv. Den termiske konduktiviteten samt den spesifikke varmekapasiteten til materialet som objektet er laget av er kanskje det som er mest avgjørende for hvor fort objektet blir nedkjølt eller varmet opp. Termisk konduktivitet er en konstant som angir materiales evne til å lede varme ved termisk konduksjon betegnes med symbolet k og angis med SI-enheten W/mK (Watt per meter kelvin). Spesifikk varmekapasitet for et materiale angir dets evne til å ta opp varme eller forholdet mellom varme som tilføres og den tilhørende temperaturstigningen.

En viktig og sentral lov som kan anvendes for å finne temperaturen til et objekt som er utsatt for en omgivelse med en gitt temperatur i en gitt tid, er Newtons lov om avkjøling. [6]

$$T(t) = T_a + (T_0 - T_a) \cdot e^{-kt}$$

Her er temperaturen til objektet uttrykt som en funksjon av tiden. T_a er temperaturen til omgivelsene og T_0 er starttemperaturen til objektet. Konstanten k er varmeoverføringsraten til det materialet som objektet er laget av. [6]

Det er viktig å understreke at Newtons lov om avkjøling ikke er helt nøyaktig og gjenspeiler ikke nødvendigvis hva som vil skje under virkelige forhold. For eksempel kan varmeoverføringsraten k til et materiale være veldig unøyaktig fordi denne varierer avhengig av temperaturen. Man kan finne varmeoverføringsraten til materialer ved forskjellige temperaturer ved hjelp av forsøk og tester, men dette krever både mye tid, ressurser og utstyr. Varmeoverføringsraten k vil derfor ikke bli fastslått ved hjelp av forsøk og tester i denne prosjektoppgaven.

2.3 Materialer ved lave temperaturer

Forskning og kunnskap om materialers egenskaper ved både høye og lave temperaturer blir bare mer og mer aktuelt. Flyindustrien, romfartsindustrien og olje- gassindustrien har behov for både kunnskap og forskning innen læren om materialer ved forskjellige temperaturer. Det vil også være behov for nyskaping og innovasjon av nye og unike materialer som kombinerer nye og bedre egenskaper enn før og som tåler enda mer ekstreme temperaturer.

Mye av den gjenværende oljen og gassen på jorden i dag ligger i områder som Arktis og andre polare områder. Dette gjør at det blir enda større behov for å bygge ut konstruksjoner og utstyr med materialer som må tåle ekstreme lave temperaturer. Dette kan for eksempel være skip som skal frakte olje og gass. Det kan også være rør- og ledningssystemer som skal frakte olje og gass eller olje- og gassplattformer i polare sjøområder som skal bore og pumpe opp olje- og gass.

Typisk for materialer som er utsatt for lave temperaturer er at materialet blir veldig hardt og sprøtt. Når materialet blir sprøtt er det veldig stor fare for at det går fort i brudd. Dette kalles for sprøbrudd og vil si at materialet svikter på grunn av rask og uventet utvikling og forplantning av sprekker. Dette er ofte tilfellet med stål ved lave temperaturer hvor stålet får redusert sin bruddseighet som vil si at stålet tåler mindre deformasjoner før det bryter sammen. [7]

Når det gjelder plastmaterialer og termoplaster ved lave temperaturer vil de også bli sprøere og hardere. Plasten blir mer sensitiv for slag og deformasjoner og vil derfor være mer utsatt for sprekkevekst og brudd. Derfor er det viktig at rør av termoplast som er utsatt for lave temperaturer ikke blir utsatt for unødvendige slag og spenninger. [8] [9] [10] [11] [7] [12]

2.3.1 Sprøtt brudd

Sprøtt brudd er en type brudd hvor det er veldig lite flyt og plastisk deformasjon i materialet før bruddet oppstår. Ofte sier man at et materiale er sprøtt når det oppstår brudd før materialet har oppnådd en deformasjon på 5%. [13]

Som nevnt vil materialer ved lave temperaturer få økt sannsynlighet og risiko for sprøtt brudd. Sprøtt brudd skjer veldig fort og uventet, og er nesten umulig å forutse. Dette gjør at ved lave temperaturer vil sprøtt brudd bli til en veldig farlig bruddtype som man må dimensjonere mot. Dette gjøres ved å bruke en høyere sikkerhetsfaktor enn normalt slik at man har en høy sikkerhet som forhindrer at materialet går i brudd. [13]

2.3.2 Eksisterende teori om termoplast i kulde

Det er lite informasjon, litteratur og eksisterende teori om plastmaterialer ved lave temperaturer. Derimot finnes det mer teori om hvordan plastmaterialer oppfører seg ved høye temperaturer og ved smeltepunktet.

Når polymerer brukes under glasstransisjonstemperaturen T_g er materialet hardt, sprøtt og glassaktig [7]. I denne tilstanden vil materialet oppleve liten forlengelse og deformasjon når det er utsatt for spenning. Når polymerer går over glasstransisjonstemperaturen vil materialet bli mykt og det vil sige mye mer. Blant polymerer vil glasstransisjonstemperaturen variere veldig. Når temperaturen går over glasstransisjonstemperaturen vil sekundærbindingene som holder kjedene sammen i polymeren bli svakere, og kjedene vil kunne skli i forhold til hverandre og vil føre til signing i materialet [14].

Det er mye forskning og eksisterende litteratur om lavtemperaturfysikk og materialers egenskaper i kryogeniske temperaturer. Kryogenisk eller på engelsk "cryogenic" er studien og læren om hvordan forskjellige materialer oppfører seg i temperaturer under -180°C og ned mot det absolutte nullpunkt ($-273,15^{\circ}\text{C}$). På dette forskningsfeltet har man funnet ut at styrkeegenskapene til plastmaterialer endres seg i stor grad ved en reduksjon i temperaturen. Blant annet øker E-modulen og strekkfastheten i tillegg til at forlengelsen før brudd blir betydelig redusert. Når det gjelder krystallinitetsgraden (dvs. i hvor stor grad molekykjedene ligger parallelt i forhold til hverandre) til materialer ved kryogeniske temperaturer blir dette testet med en strekktest. En høyere grad av krystallinitet vil føre til en lavere strekkfasthet og mindre forlengelse før brudd. [7] [14] [10] [12] [8] [9] [11] [15]

Kort oppsummert ser man fra eksisterende litteratur og teori at plastmaterialer blir hardere og stivere, og får en høyere E-modul ved lave temperaturer. Strekkfastheten øker også betydelig i tillegg til at forlengelsen og deformasjonen før brudd reduseres. En høyere grad av krystallinitet i materialet fører til en reduksjon i strekkfastheten og forlengelsen før brudd.

2.4 Testing av mekaniske egenskaper

2.4.1 Strekk- og trykktester og andre tester

Det finnes flere måter å teste de mekaniske egenskapene til materialer. Det typiske er å bruke enten en strekktest, trykktest eller en skjær- og torsjonstest. Ofte brukes en strekktest fordi dette er den enkleste og mest praktiske metoden for å finne ut noe om de mekaniske egenskapene til det materialet man tester.

Ved en strekktest finner man kurven som viser spenning mot tøyning som viser blant annet spenning-tøyningspunktet hvor materialet går i brudd. I tillegg vil kurven vise flytegrensen, proporsjonalitetsgrensen og elastisitetensgrensen til materialet som testes. Strekktesten utføres ved å feste en prøvestav eller en prøve av materialet i en maskin hvor prøven blir strukket med en gradvis økende kraft inntil til prøven knekker og går i brudd. Vanligvis vil spenning-tøyningskurven bli automatisk plottet på en datamaskin som viser spenningen (σ) på y-aksen og tøyningen (ϵ) på x-aksen. På enden av spennings-tøyningskurven vil man også se ved hvilken spenning og tilhørende tøyning materialet har sviktet og gått i brudd.



Figur 2-3 – Typiske strekkprøvemaskiner og et frysekammer som står på strekkprøvelaboratoriet ved Høgskolen i Oslo og Akershus. [16]

En trykktest gjøres på samme måte som en strekktest, men materialprøven presses sammen i stedet for at den strekkes. Ved en trykktest blir tøyningen negativ fordi opprinnelige lengde blir større enn lengden ved sammentrykking. Også kraften og tilhørende spenning blir også negativ fordi kraften er motsatt rettet. Trykktester benyttes der man vil se hvordan materialet oppfører seg ved stor sammentrykking.

Det er også mulighet for å teste hvor mye materialet tåler av skjærkrefter og torsjonskrefter i tillegg til moment, bøyning, tøyning og deformasjon, men slike materialtester er mer omfattende og krever mer avansert utstyr.

2.4.2 Ringstivhet

Når man skal se på tilfellet med rør laget av ulike termoplaste som er utsatt for omgivelser med lave temperaturer, kan ringstivheten være en viktig mekanisk egenskap. Ringstivheten er et mål på hvor stivt eller hvor stor motstand et rør har mot deformasjon.

For å måle ringstivheten tar man en prøve av et rør og plasserer det mellom to plater og påfører en vertikal kraft på den øverste platen. Deretter måler man hvor mye røret deformerer seg i den vertikale retningen. Mer presist er ringstivheten et mål på hvor mye kraft som må til for at det skal oppstå en vertikal nedbøyning på 3% [17].

Når det gjelder krav til platene som plasseres på røret er det viktig at platene er laget av et hardt og sterkt materiale slik at røret tar opp mesteparten av kraften som blir påført. Bredden på platene skal være minimum bredden til kontaktflaten med røret i tillegg til 25 mm [17]. Lengden på platene skal være minimum lengden til røret [17].

Andre krav til utregning av ringstivhet er at man tar gjennomsnittet av tre målinger fra tre ulike rørprøver. Når diameteren er mellom 200 mm og 500 mm kreves det 4 lengdemålinger av rørene hvor den minste lengden ikke skal understige 0,9 ganger den største lengden [17]. Gjennomsnittslengden skal være 300 mm +/- 10 mm når nominell diameter er på 1500 mm eller mindre [17]. Gjennomsnittslengden skal være $0,2 \cdot d_n$ når nominell diameter er på 1500 mm eller mer [17].

Når det gjelder krav til omgivelsestemperatur der testen skal foregå er det viktig at rørprøvene oppbevares i minimum 24 timer under normal romtemperatur eller i den temperaturen de skal testes i [17].

Når det gjelder hvor nye eller gamle rørprøvene er det ikke satt noen spesielle krav, men er en faktor som har innvirkning på plastrørens egenskaper. For eksempel vil stivheten øke jo eldre rørene er. Dette fører til at rørene blir mer motstandsdyktige mot trykk på både innsiden og utsiden. Når det gjelder egenskapen til å motstå slag (slagfastheten) vil denne reduseres jo eldre plastrørene er, noe som kan merkes på PVC-rør som har en veldig lav slagfasthet fra før av. Hvis plastrørene er utsatt for store temperaturendringer og korrosjon over tid vil dette også redusere slagfastheten og bør derfor unngås. Lagring av plastrør ute i direkte sollys bør også unngås fordi dette vil føre til unødvendig sprøhet og slitasje av plastrørene.

Når det kommer til selve utregningen av ringstivheten har man behov for noen nødvendige nøkkelverdier. Dette er ytre diameter til røret (d_y), indre diameter til røret (d_i), nominell diameter (d_n), veggtykkelsen til røret (e), kraften (F), vertikal deformasjon (y) og rørlengden (L) [17]. Ved hjelp av disse verdiene kan man regne ut ringstivheten (S_R).

Før man skal regne ut ringstivheten må man sette på en prelast som er en liten kraft (F_0) man setter på platen før selve testingen begynner. Prelasten bestemmes av rørets diameter. Hvis indre diameter er mindre eller lik 100 mm, skal prelasten settes til 7,5 N [17]. Hvis indre diameter er større enn 100 mm, skal prelasten regnes ut etter denne formelen [17]:

$$F_0 = 250 \cdot 10^{-6} \cdot d_n \cdot L$$

Den generelle ringstivhetsformelen til alle rør er [17]:

$$S_R = \frac{E \cdot I}{d_n^3}$$

Her er I treghetsmomentet til rørveggen [17]:

$$I = \frac{e^3}{12}$$

Setter man inn I inn i ringstivhetsformelen, får man [17]:

$$S_R = \frac{E \cdot e^3}{12 \cdot d_n^3}$$

Løser med hensyn på E , siden det er E -modul til plastrørene vi skal finne:

$$E = \frac{S_R \cdot 12 \cdot d_n^3}{e^3}$$

Ringstivheten og E -modulen er ukjente. Ringstivheten kan man regne ut med følgende formel [17]:

$$S_R = (0,0186 + 0,025 \frac{y}{d_i}) \cdot \frac{F}{L \cdot y} \cdot 10^6$$

Deformasjonen y er deformasjonen for å oppnå 3 % deformasjon av rørets indre diameter. Da skal $\frac{y}{d_i} = 0,03$. F er oppgitt i kilonewton som da blir lasten i kg multiplisert med tyngdekraften og 10^{-3} . Ringstivheten kommer da ut i kN/m^2 . Formelen blir da:

$$S_R = (0,0186 + 0,025 \frac{y}{d_i}) \cdot \frac{F}{L \cdot y} \cdot 10^3$$

Ofte er plastrør oppgitt med noe som heter SDR (standard dimensjonsforhold) som er et standard forholdstall mellom den utvendige diameteren d_y som er delt på veggtykkelsen e .

Lengden til plastrør blir oppgitt ved normal romtemperatur på 20°C. Når røret blir varmet opp vil det utvide seg og det vil trekke seg sammen når det blir avkjølt. Formelen for lengdeendringen blir da:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T$$

ΔL er lengdeendringen, α er temperaturutvidelseskoeffisienten, L_0 er opprinnelig lengde og ΔT er temperaturendringen. Blir røret avkjølt vil ΔT være negativ og blir røret varmet opp vil ΔT være positiv.

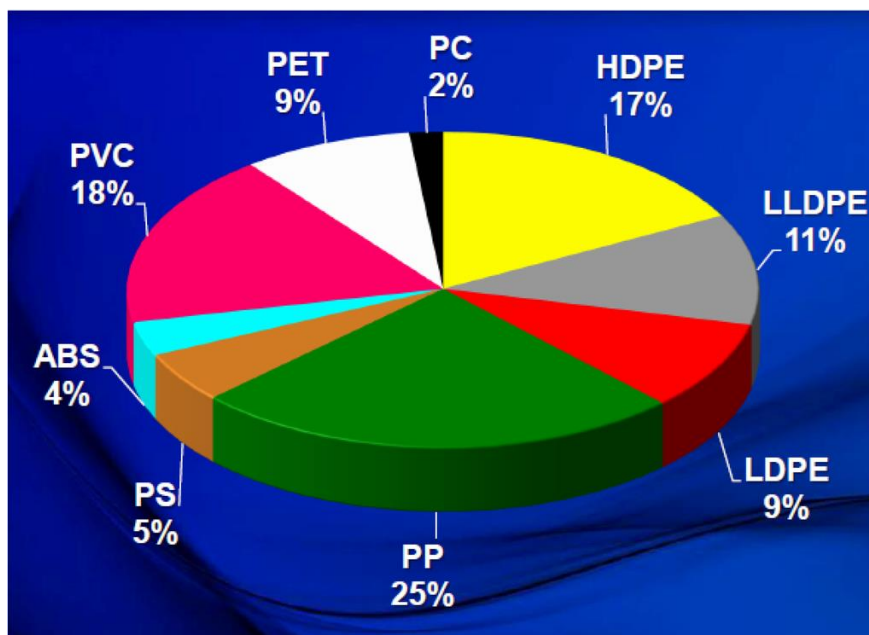
2.5 Polymerer

Polymerer er materialer som består av en repeterende strukturell enhet av molekyler med kovalent binding (binding som oppstår på grunn av deling av elektroner mellom atomene), men kan også være sekundære bindinger (Van der Waalsbindinger) [14] [15]. Polymerer er ikke kun plastmaterialer, men kan også finnes som naturlige stoffer [14]. Eksempler på naturlige polymerer er DNA og proteiner [14]. Moderne vitenskapelig forskning har ført til en utvikling av polymerer som har ført til nye og flere versjoner av syntetiske polymerer. På grunn av den hurtige utviklingen av syntetiske polymerer har det blitt mange bruksområder der syntetiske plastmaterialer brukes i stor grad i stedet for tradisjonelle materialer. Dette er fordi syntetiske polymerer har en kombinasjon av forskjellige egenskaper som kan være mer optimalt og billigere i forhold til andre og mer tradisjonelle materialer. Dette kan være egenskaper som høy formbarhet, gode støtabsorberende egenskaper, lav vekt i tillegg til en lav pris som gjør syntetiske polymerer til et attraktivt materiale på markedet.

2.5.1 Oppbygning

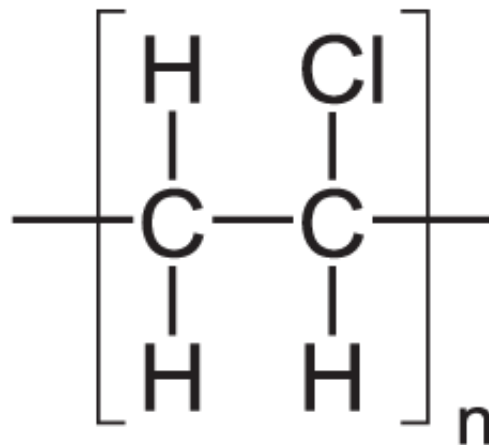
Polymerer består av en repeterende struktur av karbon. Karbonet ligger tett pakket sammen og ligger etter hverandre i kjeder. Polymerer er organiske materialer siden de inneholder karbon og ofte også hydrogen. Ulike typer polymerer blir delt opp i forskjellige grupper ettersom hvordan karbonkjedene henger sammen. Disse gruppene er naturlige polymerer, herdeplaster, elastomerer og amorge- og semikrystallinske termoplaster. De forskjellige gruppene har forskjellige bindinger mellom karbonkjedene som vil påvirke egenskapene og oppførselen til de forskjellige polymerene. [14] [15]

Polymerene jeg i stor grad skal se nærmere på er de som går under gruppen termoplaster og er polyetylen, polypropylen og polyvinylklorid. Disse termoplastene er de mest vanlige og etterspurte plasttypene på markedet, og har mange ulike bruksområder.



Figur 2-4 - Sektordiagram som viser de mest brukte polymerene. Her ser man at polyetylen (HDPE, LDPE), polypropylen (PP) og polyvinylklorid (PVC) utgjør nesten 70% av polymermarkedet. [18]

Polyetylen, polypropylen og polyvinylklorid blir laget gjennom en prosess som heter polymerisasjon eller polymerisering. Dette er en prosess hvor monomere enkle molekyler slutter seg sammen og danner tre-dimensjonale lange molekylkjeder. Dette skjer under høyt trykk, høy temperatur og ofte ved hjelp av flere katalysatorer. Ved produksjon av for eksempel polyetylen vil ethylenmonomere fra ethylengass slutte seg sammen til en lang molekylkjede ved hjelp av en katalysator. Polymerer vil for det meste bestå av flere grupper av karbon og hydrogen som i tillegg er bundet til en R-gruppe som kan variere. Polymermolekylene er ofte kategorisert som makromolekyler og kan ha veldig høy vekt siden de har såpass lange kjeder med flere tusen atomer. Lengden på kjeden og antall atomer som finnes i et polymermolekyl påvirker egenskapene til polymeren. Jo lengre kjeder og flere atomer, desto sterkere og stivere blir polymeren. [15] [14]

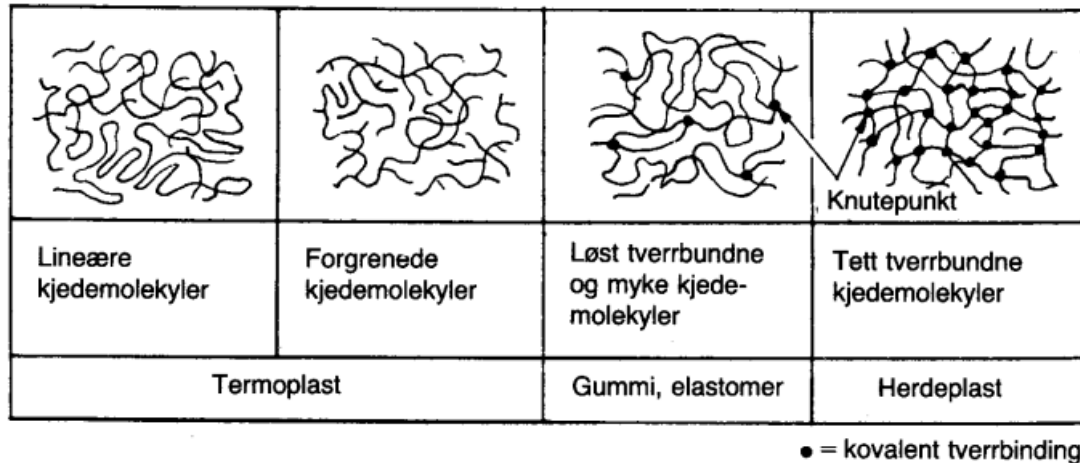


Figur 2-5 – Eksempel på hvordan strukturformelen til en polymer ser ut. Her vises strukturformelen til polyvinylklorid (PVC). I R-gruppen ligger kloratomet (Cl). "n" benevner utvidelsen av strukturformelen (antall molekyler i rekka). [19]

Molekylene og atomene til polymerer er hovedsakelig bundet sammen av sekundære bindinger eller Van der Waalsbindinger. I tillegg finnes det primærbindinger som er: ioniske, kovalente og metalliske bindinger. Disse primærbindingene er sterkere enn de sekundære bindingene og påvirker i stor grad hvordan ulike plastmaterialer oppfører seg under ulike forhold. Videre skal vi se litt nærmere på hvilke typer plastmaterialer de forskjellige bindingene oppstår i. [15] [14]

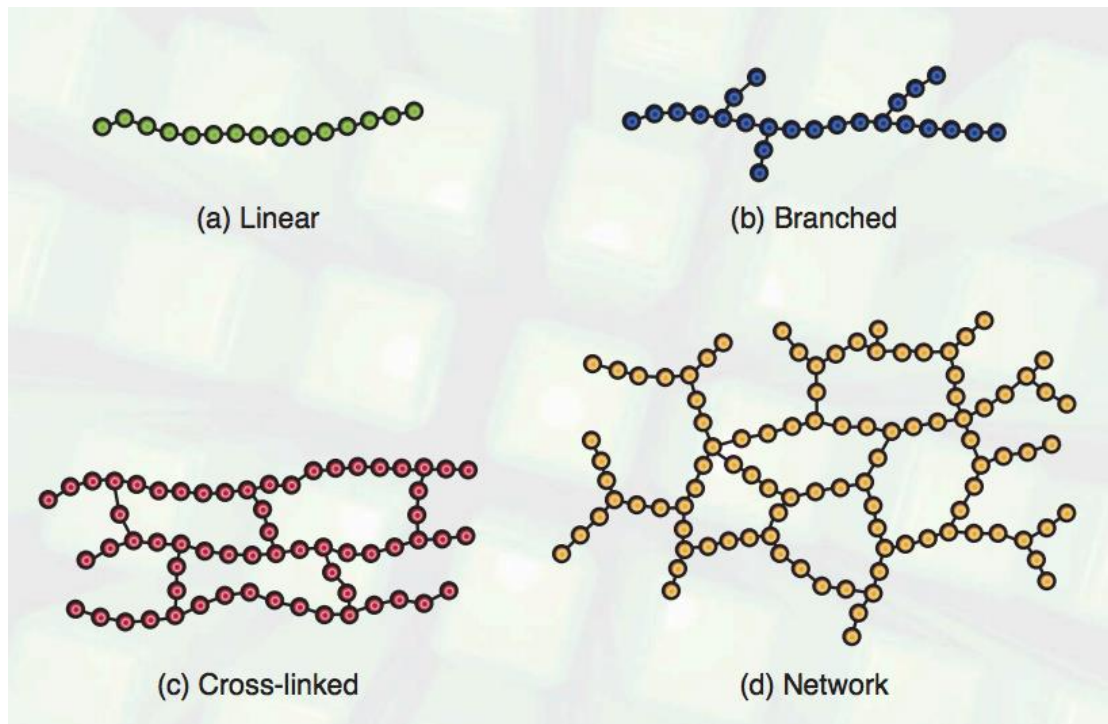
Som nevnt kan polymerer deles inn i blant annet termoplaster og herdeplaster. I termoplastiske plastmaterialer er det hovedsakelig de sekundære bindingene som holder molekylene sammen. Sekundære bindinger er svake bindinger som oppstår på grunn av atomære eller molekulære dipoler. Når termoplast varmes opp brytes de sekundære bindingene, slik at det blir flytende og plastisk. Når termoplast avkjøles vil de sekundære bindingene bli gjenoppbygget og vil ha de samme materialegenskapene som før. Denne prosessen er fullstendig reversibel og kan repeteres så lenge temperaturen ikke blir for høy. Dette gjør at termoplast blir et veldig fleksibelt materiale som kan smeltes og formes på nytt. Termoplast kan også sveises hvis det er behov for det. [14]

I herdeplaster holdes molekylene sammen ved hjelp av tverrbindinger. Det vil si at molekylene i en herdeplast har en krysset nettverksstruktur med et tredimensjonalt nettverk. Tverrbindinger er enten kovalente eller ioniske bindinger som virker som primærbindinger i tillegg til de sekundære bindingene. Når tverrbindingene brytes vil herdeplasten ikke bli plastisk og flytende, men føre til at materialet bryter sammen og ødelegges. Dette gjør at herdeplast ikke kan smeltes og formes på nytt. Herdeplast kan heller ikke sveises på grunn av den høye temperaturen som vil bryte tverrbindingene. [14]

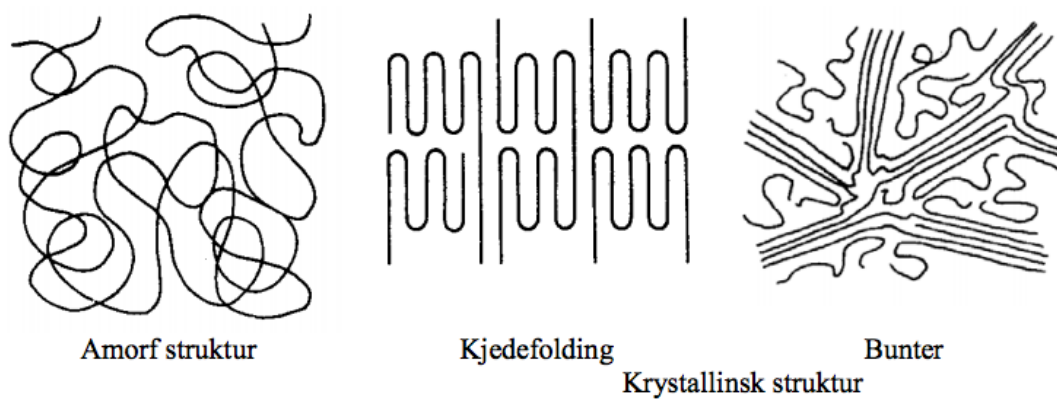


Figur 2-6 – Illustrasjon som viser de forskjellige strukturene til termoplaster, elastomerer og herdeplaster. [14]

Polymerer kan også ha amorfe og/eller krystallinske strukturer. Amorf struktur vil si at molekykjedene ligger uordnet og har ingen bestemt struktur. Krystallinsk struktur vil si at molekykjedene ligger ordnet i en bestemt struktur. Man kan si at polymerer med krystallinsk struktur har molekykjeder som følger et bestemt mønster. Polymerer kan også ha en kombinasjon av både amorfe og krystallinske strukturer som kalles for semi-krystallinsk struktur. Polymerer med semi-krystallinske struktur har krystallinske regioner spredt inn i det amorfe materialet. For polymerer er det vanlig å måle graden av krystallinitet som måler i hvor stor grad molekykjedene ligger ordnet og i en bestemt struktur. Krystallinitetsgraden varierer i polymerer, men kan gå fra å være helt amorf (ingen struktur) til 95 % krystallinitet. Polymerer med en lineær og ordnet struktur har en høyere grad av krystallinitet, mens polymerer med en forgreinet eller krysslinket struktur vil ha en mindre grad av krystallinitet. Derfor har herdeplaster en lavere grad av krystallinitet og er mer amorfe fordi molekylene har en krysset nettverksstruktur med tverrbindinger som gir en uordnet struktur. Termoplastene har en lineær struktur og er mindre amorfe som gir en høyere grad av krystallinitet. [14] [15] [20]

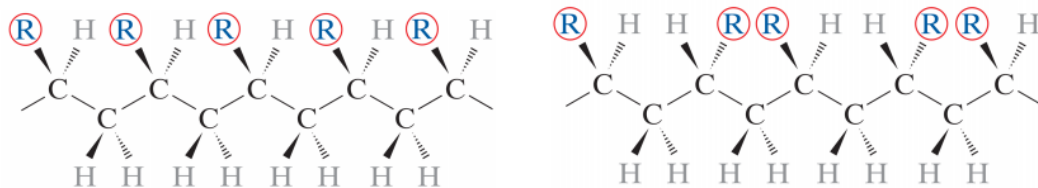


Figur 2-7 - Illustrasjon som viser de forskjellige typene kjedestrukturere man har i ulike polymerer. a) Lineær struktur, b) forgreinet struktur, c) krysslignet struktur, d) nettverksstruktur. [20]



Figur 2-8 - Illustrasjon av amorf struktur og forskjellige krystallinske strukturer til polymerer. [14]

Polymerer har også en egenskap som heter taktisitet. Taktisitet betyr at atomene er lenket sammen på samme måte, men har forskjellig romanordning. I en isotaktisk konfigurasjon er alle R-gruppene plassert på samme måte. I en syndiotaktisk konfigurasjon sitter R-gruppene på annenhver side av kjeden. I en ataktisk konfigurasjon sitter R-gruppene tilfeldig plassert. Taktisiteten har mye å si for egenskapene til polymerer fordi plasseringen og romanordningen av R-gruppene påvirker graden av krystallisering. Polymerer med en ataktisk konfigurasjon vil ha en veldig lav eller ingen grad av krystallinitet, mens polymerer med en isotaktisk eller syndiotaktisk konfigurasjon vil ha en høyere grad av krystallinitet fordi det er mer orden og struktur i molekylkjeden. [15]



(a) Isotaktisk konfigurasjon: Alle R-gruppene plassert på samme måte. (b) Syndiotaktisk konfigurasjon: R-gruppene sitter på annenhver side av kjeden.

Figur 2-9 - Illustrasjon av isotaktisk og syndiotaktisk konfigurasjon. [15]

2.5.2 Mekaniske egenskaper til polymerer

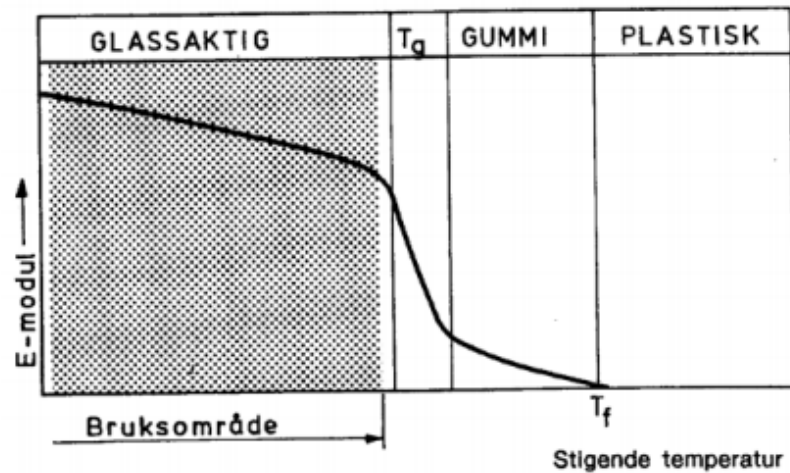
Når vi så på oppbygningen av polymerer, spesielt termoplast, så vi at molekylene og atomene hovedsakelig var bundet sammen av sekundære bindinger som også kalles for Van der Waalsbindinger, oppkalt etter den nederlandske fysikeren Johannes van der Waals. Dette er bindinger som oppstår mellom molekyler på grunn av at det oppstår dipoler. En dipol vil si at det er en negativ og en positiv pol som oppstår fordi noen atomer trekker mer på elektroner enn andre. Elektronene utgjør den negative ladningen og atomkjernene den positive ladningen. På denne måten blir en ende på molekylet positiv og den andre enden negativ. På grunn av forskyvningen av ladningen til atomene og molekylene vil dette føre til at det oppstår atomære og molekyllære krefter som holder atomene og molekylene sammen. Sekundære bindinger eller Van der Waalsbindinger kan sammenlignes med for eksempel flere magneter som holdes sammen fordi den negative enden til en magnet tiltrekker den positive enden til en annen magnet og motsatt.

En annen egenskap til polymerer er graden av polymerisering som er gjennomsnittlig antall monomeriske enheter per polymerkjede. Er polymeriseringsgraden høyere vil det være flere monomeriske enheter per polymerkjede som fører til at polymeret blir sterkere i tillegg til at det får en tykkere/seigere konsistens på grunn av at det får en høyere viskositet.

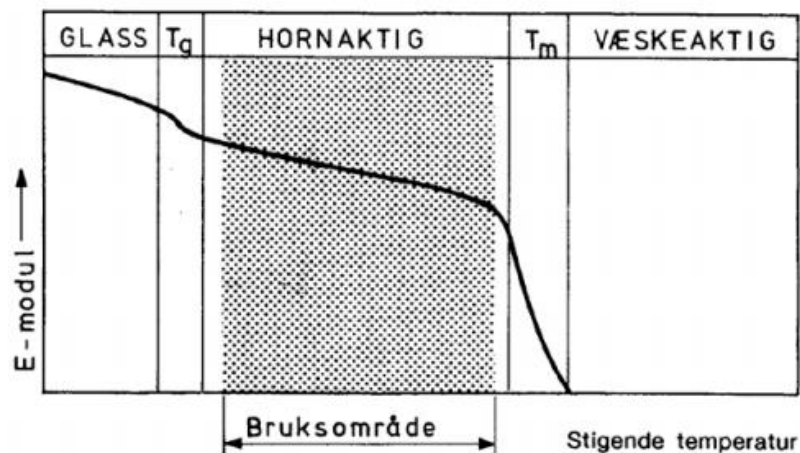
Krystallinitetsgraden til ulike polymerer påvirker også hvordan de oppfører seg og hvilke egenskaper de har. Blant annet øker tettheten og smeltetemperaturen jo høyere krystallinitetsgraden er. En høyere krystallinitetsgrad fører også til mindre deformasjon før brudd som vil si at materialet blir sprøere.

Viktige egenskaper for å karakterisere ulike polymerer og også andre materialer er å måle smeltetemperaturen T_m og glasstransisjonstemperaturen T_g . Glasstransisjonstemperaturen er en temperaturgrense hvor materialet er hardt, sprøtt og glassaktig under grensen [14]. Øker man temperaturen over glasstransisjonstemperaturen vil energien føre til at svingningene i atomene og molekylene er sterkere enn sekundærbindingene og materialet vil gå over i en tilstand som gjør at molekylene glir i forhold til hverandre. Dette gjør at materialet blir duktilt og plastisk, og kan enkelt formes. Denne duktile og plastiske tilstanden opptrer kun mellom glasstransisjonstemperaturen og smeltetemperaturen [14]. Fortsetter man å varme opp materialet til over smeltetemperaturen vil sekundærbindingene brytes ned og materialet blir flytende. Dette gjelder da kun for termoplaster som kun har svake sekundærbindinger og ikke sterkere primærbindinger slik som herdeplaster. Polymerer kan også ha flere glasstransisjonstemperaturer som symboliseres med en eller flere apostrofer T'_g [14]. Ved disse temperaturgrensene skjer det fremtredende endringer i egenskapene til materialet som for eksempel endringer i E-modul, hardhet, volum, viskositet osv. [14]. Disse temperaturgrensene er mindre vanlig å bruke og er mindre spesifikke, og er mer temperaturintervaller enn bestemte temperaturgrenser [14].

Når det gjelder plastmaterialer vil de endre sin tilstand avhengig av om termoplasten har amorf eller krystallinsk struktur og hvilke temperaturgrenser de er innenfor eller utenfor. Tilstandene kan være en glassaktig tilstand hvor materialet er hardt og sprøtt (under glasstransisjonstemperaturen), en gummiaktig tilstand hvor materialet er mer mykt og formbart (mellom glasstransisjonstemperaturen og smeltetemperaturen) eller en væsketilstand hvor materialet blir helt flytende (over smeltetemperaturen). Et amorf plastmateriale hvor molekylkjedene ligger uordnet, brukes gjerne i den glassaktige tilstanden hvor materialet er hardt og sprøtt. Dette er fordi over glasstransisjonstemperaturen blir materialet for mykt og gummiaktig, og sammenbindingskreftene blir for svake til at man kan bruke det som konstruksjonsmateriale. Et krystallinsk plastmateriale hvor materialet har mer eller mindre molekylene ordnet i krystallitter, brukes gjerne i den gummiaktige/hornaktige tilstanden. Dette er fordi de krystallinske områdene bestemmer egenskapene til materialet og glasstransisjonstemperaturen har ikke like stor innvirkning på E-modulen. Temperaturintervallet som blir bruksområdet til et krystallinsk plastmateriale blir da mellom glasstransisjonstemperaturen T_g og smeltetemperaturen T_m , og det er her plastmaterialet vil være seigt og sterkt. [14]



Figur 2-10 - E-modulkurve for et amorph plastmateriale. Her er T_g glasstransisjonstemperaturen og T_f flytetemperaturen. [14]



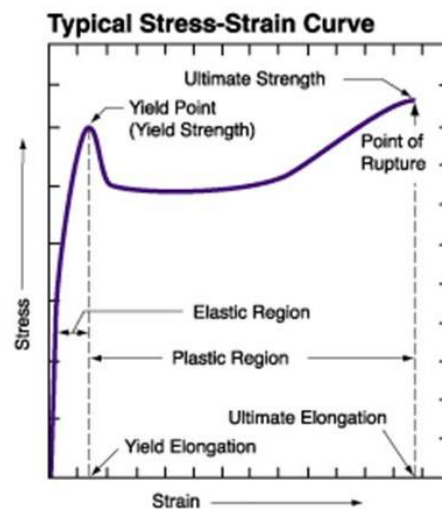
Figur 2-11 - E-modulkurve for et krystallinsk plastmateriale. Her er T_g glasstransisjonstemperaturen og T_m den krystallinske smeltetemperaturen. [14]

Når polymerer og plastmateriale blir testet i et spennings-tøyningsdiagram vil det vise at de har viskoelastiske egenskaper. Et materiale har elastiske egenskaper hvis det går tilbake til sin opprinnelige form etter å ha blitt utsatt for en deformasjon. Når et materiale har viskøse egenskaper vil det ikke gå tilbake til sin opprinnelige form etter å ha blitt utsatt for en deformasjon. Viskoelastiske egenskaper vil da si at materialet har både elastiske og viskøse egenskaper og hvordan materialet blir deformert er avhengig av hvor lenge det blir utsatt for en spenning (tidsavhengig) og temperaturen. Den tidsavhengige deformasjonen som følge av påført spenning og temperaturen kan defineres som signing i materialet. Ved lave temperaturer vil signingen i materialet være vesentlig mindre enn over glasstransisjonstemperaturen hvor materialet vil oppleve mer signing. En annen viktig faktor som påvirker signing i polymerer er graden av krystallinitet. En høyere grad av krystallinitet vil føre til at det kreves en høyere temperatur for at polymeren skal oppleve signing. [15]

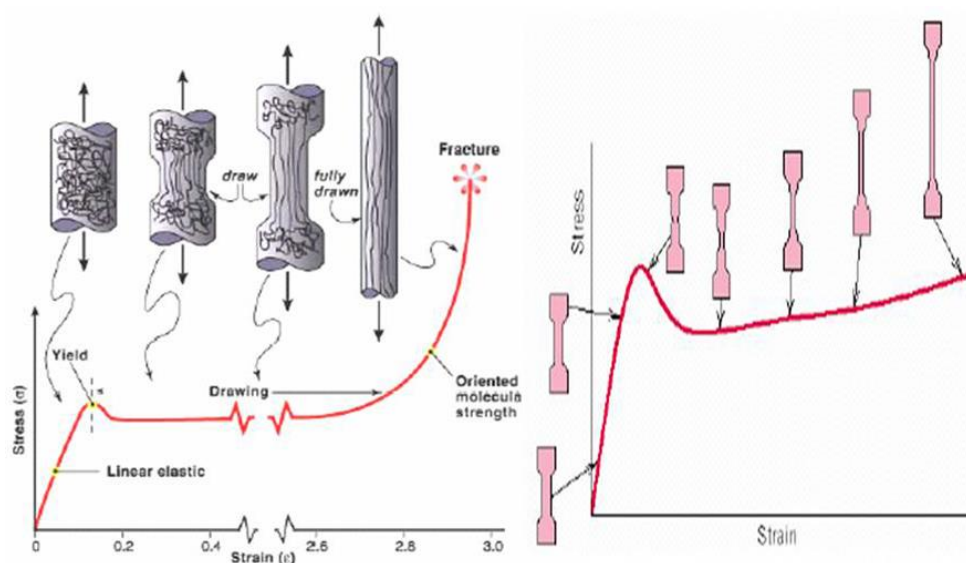
Molekylene og atomene til polymerer holdes sammen av de sekundære bindingene eller Van der Waalsbindinger. Når polymerer blir utsatt for en spenning og fører til en resulterende deformasjon vil sekundærbindingene utsettes for kreftene som følge av spenningen. Elastisiteten til polymerer som beskriver reaksjonene i bindingene mellom molekylene i polymerkjeden, kan deles inn i noe som heter entropi- og energielastisitet. Energielastisiteten forekommer både i de amorfe og krystallinske områdene i polymerer og beskriver reaksjonene mellom bindingene i molekyllkjeden. Energielastisitet forekommer i polymerer når temperaturen er under glasstransisjonstemperaturen. Da vil bindingene bli forlenget når man påfører en spenning og polymeren vil gå tilbake til sin opprinnelige form når spenningen blir fjernet. Ved glasstransisjonstemperaturen og høyere temperaturer vil elastisiteten gå over til entropielastisitet. Entropielastisiteten forekommer kun i de amorfe områdene til polymerer og er derfor avhengig av hvor amorft eller krystallinsk polymeren er. I de amorfe områdene er det mindre struktur og orden hvor polymeren består av mange forviklede molekyllkjeder. Når det da blir påført en spenning vil de forviklede molekyllkjedene rettes ut. Når spenningen fjernes vil kjedene gå tilbake til en høyere grad av forvikling og vil dermed få en høyere grad av entropi. Når det forekommer både energielastisitet og entropielastisitet i materialet blir materialet elastisk deformert. Fortsetter man å påføre en høyere spenning vil deformasjonen av materialet komme til et punkt hvor sekundærbindingene svikter og man vil få plastisk deformasjon eller brudd i materialet. En høyere temperatur og nærmere man er smeltetemperaturen desto mer deformasjon tåler materialet før det går til brudd. Når plastisk deformasjon begynner i materialet vil bindingen brytes slik at molekyllkjedene kan bevege seg fritt. I noen polymerer vil en nedbryting av bindingene føre til at molekyllkjedene ikke kan bevege seg fritt som fører til at det kreves mer energi for å fortsette den plastiske deformasjonen. På en annen side vil dette føre til at det oppstår indre friksjon og varme fra den plastiske deformasjonen som bidrar til å øke nedbrytningen med mindre det er et varmetap. [21] [15] [14]

Når polymerer blir påført stor nok spenning vil det oppnå sin flytegrense. I en typisk strekktest strekker man materialet forbi flytegrensen til det oppstår plastisk deformasjon og til slutt brudd. Når man strekker polymerer vil molekyllkjedene strekkes parallelt med strekkretningen. Desto flere molekyllkjeder som ligger parallelt med strekkretningen, jo mer av kraften vil bli tatt opp av molekyllkjedene som vil føre til at styrken øker. Likevel vil små feil i materialet som sprekker og inneslutninger føre til at et eventuelt brudd vil oppstå. Ved en slik strekktest vil reduksjonen i arealet på grunn av at materialet blir smalere og lengre ved strekking, bidra til en større sannsynlighet for at materialet går i brudd. [14] [15]

Deformasjonsprosessen ovenfor finner sted i amorfe plastmaterialer og ved strekking av et amorft plastmateriale vil påvirkningen og deformasjonen foregå i det amorfe området i materialet. Når plastmaterialet får en høyere grad av krystallinitet vil man få to deler med deformasjon. Den første delen av deformasjonen skjer i de amorfe områdene og det er disse områdene som blir påvirket først. Etter hvert blir de krystallinske områdene påvirket av deformasjon og disse områdene blir delt inn i mindre blokker ved at de krystallinske kjedene gradvis orienterer seg etter strekkraftretningen. Ved økende forlengelse og deformasjon av polymeren vil den strekkes ut og det vil oppstå en smal "hals" (necking på engelsk) i materialprøven. Plastmaterialer og polymerer med en høyere grad av krystallinitet har en større sannsynlighet for å inneholde materialfeil, urenheter og sprekker hvor den høye tettheten og ordnede strukturen "presser" ut ujevnheter og feil i materialet. Spesielt i overgangsområdet på grensen mellom det krystallinske og amorfe området vil det være fare for materialfeil og ujevnheter som bidrar til en større sannsynlighet for at materialet går i brudd. [22]



Figur 2-12 – Et spennings- tøyingsdiagram for en typisk termoplast. [22]



Figur 2-13 - Spennings- tøyingsdiagrammer for plastmaterialer. Venstre: amorft plastmateriale. Høyre: semi-krystallinsk plastmateriale. [22]

2.5.3 Identifisering av plastmaterialer

I dagens moderne samfunn benyttes det mange forskjellige typer plastmaterialer til ulike formål. Det kan derfor være hensiktsmessig å vite hvordan man går frem for å identifisere ulike plastmaterialer man har med å gjøre i dagliglivet, uten behov for avansert laboratorieutstyr. Herdeplaster og termoplast kan enkelt skilles ved at termoplasten kan varmes opp som fører til at den mykner og kan formes på nytt, mens herdeplaster ikke mykner og vil brytes ned og bli ødelagt ved oppvarming. Dette er en enkel test for å identifisere termoplast og herdeplast, men videre testing og identifiseringsmetoder må til for å finne nøyaktig hva slags type plastmateriale man har med å gjøre. Videre skal vi se på trinnene i hvordan man identifiserer et plastmateriale. [23]

Som nevnt er første trinn i identifiseringsprosessen å varme opp en prøve av et plastmateriale. Hvis plastprøven smelter eller mykner kan man identifisere det som en termoplast, smelter den ikke så er det en herdeplast. Hvis du har identifisert en termoplast er neste trinn å sjekke om det flyter eller ikke. Hvis det ikke flyter må man tenne på plastprøven for å se om den enten brenner, ikke brenner eller om flammen slukker seg selv. Videre må man se på om plastprøven drypper eller ikke drypper. Så må man kombinere ved å se på flammefargen, lukten og røykeegenskapene. [23]

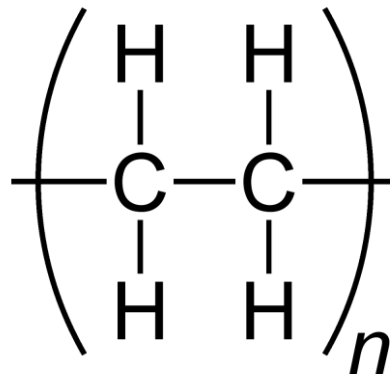
Hvis du har identifisert en herdeplast må man tenne på plastprøven og se på om det brenner eller om flammen slukker seg selv. Videre må man kombinere og identifisere flammefarge, lukt, røykeegenskaper i tillegg til å se på andre egenskaper som sprekkdannelse, svelling, hvor fort plasten smelter/drypper og hvor lenge plasten brenner osv. [23]

				Plastmateriale	Flammefarge	Lukt	Røyk/andre egenskaper	Hastighet	
mykner	flyter	selvslukkende	drypper	PE	blå, gul spiss	stearin/parafin	smelter og drypper	fort	
				PP	blå, gul spiss	sterkere enn PE	smelter og drypper	fort	
				PA	blå, gul spiss	brent ul/hår		sakte	
				PSU	oransje	svovel	sort, sotende røyk	fort	
				PC	oransje/gul	fenol	sort, sotende røyk	sakte	
				PPO	gul-oransje	fenol		sakte	
				PVC	gul, grønn kant	stikkende saltsyre	hvit røyk	sakte	
				ABS	gul	syrlig	sort, sotende røyk	middels	
				POM	blå	sterk formaldehyd	ingen røyk	sakte	
				CA	gul	eddik	sort, sotende røyk	middels	
	flyter ikke	brenner	brenner ikke	drypper	CAB	gul, blå spiss	harsk smør	litt røyk med sot	middels
					CP	gul	brent sukker	litt sort røyk	fort
					PS	gul	styren	tett, sotende, sort røyk	fort
					TPE	gul, blå kant	svidd gummi	sort, sotende røyk	fort
					CN	svak gul	kamfer	brenner helt opp	fort
					PUR	gul	eple	litt sort røyk	fort
					PFEP		brent hår		
					CTFE		acetalsyre		
					PTFE		brent hår		
					PVF		acetalsyre		
mykner ikke	selvslukkende	brenner	drypper ikke	DAP	gul	svak fenol	sort røyk		
				MF	gul, blå spiss	fisk	sveller, sprekker		
				PF	gul	fenol	slukker ikke alltid		
				UF	gul, turkis kant	formaldehyd	sveller, sprekker		
				Polyester	gul, blå kant	styren	sort sotende røyk		
				SI	lys gul	ingen	fortsetter å brenne		
				EP	gul	fenol	sort røyk		

Figur 2-14 - Identifiseringsskjema for ulike plastmaterialer. [23]

2.6 Termoplaster

2.6.1 PE (polyetylen, LDPE og HDPE)



Figur 2-15 - Strukturformelen til polyetylen som består kun av karbon- og hydrogenatomer. "n" benevner utvidelsen av strukturformelen (antall molekyler i rekka). [24]

Polyetylen er en polymer som kategoriseres som en termoplast med en kjemisk struktur som vist i figur 2-14. Polyetylen er en veldig enkelt polymer som består kun av en repeterende molekylstruktur av etylenmonomerer (C_2H_4) som kun består av karbon- og hydrogenatomer. [15] [14] [9]

Tabell 2-1 – Viktige og sentrale verdier som beskriver egenskapene til polyetylen. [25]

Egenskap	Verdi	Benevning
E-modul	6210 - 8960	MPa
Flytegrense	19,7 – 31,9	MPa
Forlengelse ved brudd	200 - 800	%
Strekkfasthet	20,7 – 44,8	MPa
Spesifikk varmekapasitet	1,81 – 1,88	J/g°C
Spesifikt tyngdepunkt	0,91 – 0,96	kg/m ³
Termisk konduktivitet	0,403 – 0,435	W/m/°C
Temperaturutvidelseskoeffisient	126 - 198	10 ⁻⁶ · K ⁻¹
Strekkmodul	1060 - 1090	MPa

Polyetylen er den polymeren som har enklest struktur og som også er det mest produserte og benyttede plastmaterialet i verden. Fordelen med bruk av polyetylen og plastmaterialer generelt er at de har en høyere motstandsdyktighet mot korrosjon og kjemiske stoffer. Materialer som for eksempel jern og stål er i motsetning til plastmaterialer mye mer utsatt for slike typer slitasje og vil brytes ned fortere. Dette gjør at polyetylen har mange forskjellige bruksområder og kan anvendes til produksjon av mange forskjellige typer produkter. Polyetylen brukes til å fremstille for eksempel plastposer, leketøy, emballasje, innpakning og flasker osv. [15] [14] [9]

Når det gjelder polyetylen finnes det mange forskjellige typer som er utviklet til forskjellige bruksområder. For polyetylen skiller man gjerne mellom to typer. Den ene typen har en lav tetthet som heter "low-density" eller "low-density polyethylene" (LDPE). LDPE har normalt en tetthet under $0,93 \text{ g/cm}^3$. Den andre typen har en høyere tetthet og heter "high-density" eller "high-density polyethylene" (HDPE). HDPE har i motsetning til LDPE, en tetthet over $0,93 \text{ g/cm}^3$. LDPE har en lav tetthet og styrke, og brukes derfor til å fremstille enkle produkter som emballasje og plastposer. HDPE har en høy tetthet, styrke og stivhet, og brukes til å fremstille produkter hvor det er behov for en høyere styrke og motstandsdyktighet mot slitasje. HDPE brukes derfor til å fremstille produkter som rør, leketøy og deler til biler og kjøretøy. Den høye tettheten og molekylære vekten til HDPE gjør at strekkfastheten blir fire ganger større enn LDPE. Også slagseigheten til HDPE er også vesentlig høyere enn LDPE og gjør HDPE til et veldig slagbestandig plastmateriale. Derimot vil slagseigheten reduseres hvis temperaturen synker ned mot kuldegradene. Når temperaturen kryper under mellom -70°C og -85°C vil HDPE bli veldig sprøtt og liten belastning skal til før det oppstår brudd i materialet. Det vil si at den anbefalte brukstemperaturen til HDPE er helst litt over -85°C eller -70°C . Polyetylens egenskaper er bestemt av strukturen og oppbygningen. Det vil si at polyetylens semi-krystallinske struktur i tillegg til at det har viskøse og elastiske egenskaper, bestemmer polyetylens egenskaper ved forskjellige temperaturer. I tillegg har man materialeegenskaper som taktisitet og den molekylære vekten til hvert molekyl. Når det gjelder forskjellen i graden av krystallinitet mellom HDPE og LDPE er det en ganske signifikant forskjell. HDPE har en krystallinitetsgrad på ca. 75% og LDPE ligger på ca. 40%. Dette gjør LDPE til en mer amorf termoplast med mindre grad av orden og struktur, enn HDPE. Polyetylen har en normal glasstransisjonstemperatur på ca. -20°C , men kan variere drastisk avhengig av materialeegenskapene og omgivelsene, og kan komme helt ned mot -120°C [25]. Den sekundære glasstransisjonstemperaturen til polyetylen ligger på ca. -105°C [25]. Polyetylens smeltetemperatur varierer et sted mellom 120°C og 138°C , tatt i betraktning at det er en ganske høy grad av krystallinitet [25]. Når det gjelder sprøtemperaturen til HDPE, ligger denne på et sted mellom -73°C og -156°C [25]. Sprøtemperaturen vil si den temperaturen hvor halvparten av materialet har oppnådd sprøtt brudd ved en gitt belastning. Polyetylen med en høy grad av krystallinitet som HDPE, vil ha egenskaper som bevarer den krystallinske strukturen og styrken, selv ved store endringer i temperaturen. Derimot vil egenskaper som flytegrense og bruddgrensen variere i større grad når temperaturen endres. E-modulen til polyetylen avhenger i stor grad av tettheten. Derfor vil HDPE som har en høyere tetthet, både være sterkere og stivere enn LDPE. Polyetylen vil også oppleve signing og deformasjon ved små belastninger i romtemperatur. Polyetylen er det polymeret som vil sige mest sammenlignet med polypropylen og polyvinylklorid. [15] [14] [9]

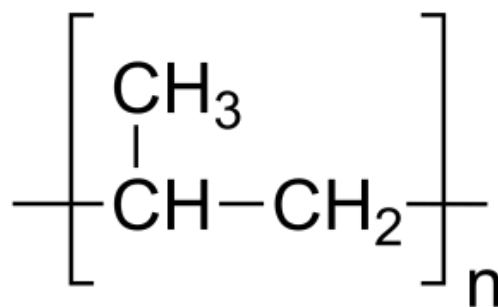
I et spennings-tøyningsdiagram for polyetylen vil man se at kurven er noenlunde lineær i det elastiske området helt til man når flytegrensen. Her får kurven et lite knekk før den fortsetter å stige. Kurvens stigning og økningen i spenningen skyldes at molekylene orienterer seg etter kraftretningen og bidrar til å styrke materialet.

HDPE og LDPE kan videre sorteres inn i flere undertyper for å tilfredsstille og dekke de forskjellige bruksområdene som stiller forskjellige krav til materialegenskaper. De varierende kravene til materialegenskaper kan for eksempel være: styrke, smeltetemperatur, glasstransisjonstemperatur, flytegrense, bruddgrense, viskoelastiske egenskaper, signing og estetiske egenskaper osv. Forskjellige eksempler på utviklede undertyper av polyetylen er: high eller ultra molecular weight (UHMWPE), acrylic polymer, very low-density (VLDPE), linear low-density (LLDPE) og ethylene-vinyl acetate polymer (EVA). [15] [14] [9]

Følger man identifiseringsprosessen og skjemaet for å identifisere plastmaterialer, vil man se ved påtenning og oppvarming av polyetylen at det vil mykne, smelte og dryppe fort. Flammen vil ha en blå farge med en gulaktig spiss og lukten vil minne om brent stearin eller parafin. Det må understrekes at lukten skal ha en svakere intensitet og skal ikke lukte like sterkt som polypropylen. [23]

2.6.2 PP (polypropylen)

Polypropylen er en polymer som kan kategoriseres som en termoplast med en metyl-gruppe i R-gruppen og har en kjemisk struktur som vist i figur 14. En metyl-gruppe vil si at R-gruppen inneholder et CH_3 molekyl i tillegg til karbon- og hydrogenatomer. [15] [14] [9]



Figur 2-16 - Strukturformelen til polypropylen som består av karbon- og hydrogenatomer i tillegg til en metyl-gruppe (CH_3). "n" benevner utvidelsen av strukturformelen (antall molekyler i rekka). [26]

Tabell 2-2 - Sentrale verdier som beskriver egenskapene til polypropylen. [25]

Egenskap	Verdi	Benevning
E-modul	896 – 1550	MPa
Flytegrense	20,7 – 37,2	MPa
Forlengelse ved brudd	100 - 600	%
Strekkfasthet	27,6 – 41,4	MPa
Spesifikk varmekapasitet	1,87 – 1,96	J/g°C
Spesifikt tyngdepunkt	0,90 – 0,91	kg/m ³
Termisk konduktivitet	0,113 – 0,167	W/m/°C
Temperaturutvidelseskoeffisient	122 - 188	10 ⁻⁶ · K ⁻¹
Strekkmodul	1140 - 1550	MPa

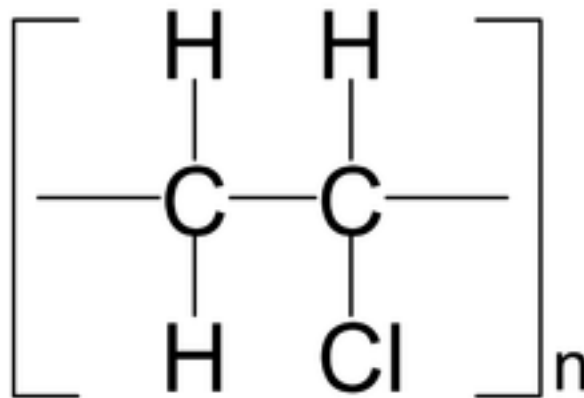
Termoplasten polypropylen er en polymer som har både en amorf og en krystallinsk molekylstruktur (semi-krystallinsk struktur). Polypropylen er en relativt billig og sterk termoplast og kan brukes til alt fra emballasje til bruk i klær som fibre. Polypropylen benyttes i produksjon av klær og undertøy fordi fibre som lages fra polypropylen ikke opptar fuktighet og vil heller transportere fuktigheten som kommer fra svette og vann til et ytre tekstillag som gjør at fuktigheten avgis til luften i stedet for. Dette gjør at man lettere holder seg tørr og varm for eksempel når man trener eller hvis man ferdes i regnvær. Polypropylen har altså en veldig god evne til å motstå absorbering av vann og fuktighet. Polypropylen har også gode styrkeegenskaper i forhold til egenvekten som gjør det til et sterkt, stivt, hardt og lett materiale. Disse styrkeegenskapene gjør at PP tåler utmatting godt og tåler mye belastning før det oppstår et utmattingsbrudd. Når det gjelder angrep fra bakterier og kjemiske stoffer har også PP en veldig høy motstandsdyktighet. Polypropylen har også sine negative sider og innebærer høy termisk ekspansjon, en lav resistans mot UV-stråling og er generelt mindre brukt enn polyvinylklorid og polyetylen. Likevel er polypropylen et materiale som stadig blir tatt mer i bruk og etterspørselen fortsetter å øke betraktelig. Andre bruksområder og produkter som polypropylen brukes til er for eksempel møbler, barneleker og bildeler. [15] [14] [9]

Polypropylen blir kategorisert i to forskjellige typer: copolymer og homopolymer. En homopolymer er polymerisert ved hjelp av kun en type molekyl (monomer). Det vil si at molekylkjeden består en repeterende struktur av en type molekyl og det samme stoffet. Homopolymerer har dårlige styrkeegenskaper ved lave temperaturer, men relativt gode styrkeegenskaper ved høye temperaturer. En copolymer er polymerisert ved hjelp av to eller flere typer molekyler (monomerer). Det vil si at flere enkle molekyler av to eller flere forskjellige typer, slutter seg sammen til lange kjeder og danner en copolymer. Copolymerer har en mer avansert og kostbar produksjonsprosess enn homopolymerer. [15] [14] [9]

Følger man identifiseringsprosessen og skjemaet for å identifisere plastmaterialer, vil man se ved påtenning av polypropylen at det vil smelte og dryppe i tillegg til å ha en blå flamme med en gul spiss. Det vil også lukte en blanding av brent stearin og parafin. Hvis man følger identifiseringskjemaet ser man at polyetylen har nesten akkurat de samme egenskapene når det gjelder flammefarge, lukt og andre egenskaper som drypping og smelting. Dette er fordi polypropylen og polyetylen har en veldig lik oppbygning hvor begge består av kjeder av hydrokarboner som er lineære. I polypropylen vil den tilhørende metyl-gruppen CH_3 gjøre at det blir litt sterkere og stivere enn polyetylen. Den økte styrken til polypropylen gjør at smeltetemperaturen, strekkfastheten og flytegrensen er vesentlig høyere enn polyetylen. Polypropylen på sin side har lineære molekylkjeder, men som er ordnet i et fast krystallinsk mønster med noen forgrenede og amorfe områder. Derfor er polypropylen klassifisert som en polymer med en semi-krystallinsk struktur. Krystalliniteten til polymerer eller materialer er ikke fast bestemt fra den opprinnelige strukturen til molekylene, men kan for eksempel økes ved å varme opp materialet eller polymeret og deretter raskt avkjøle det igjen. [15] [14] [9]

Polypropylens egenskaper bestemmes av en rekke faktorer som kan variere veldig i forhold til det individuelle polypropylen-materialet man har med å gjøre. De varierende faktorene som avgjør egenskapene til polypropylen kan være graden av krystallinitet, taktisiteten, vekten til molekylene og antall copolymerer. En faktor som skiller polyetylen fra polypropylen er at massetettheten endrer seg etter graden av krystallinitet for polyetylen, men ikke for polypropylen. Polypropylen har en uavhengig tetthet på ca. $0,9 \text{ g/cm}^3$ som gjør det til et veldig lett plastmateriale, men som samtidig har relativt gode styrkeegenskaper. Når det gjelder forskjellige faseovergangstemperaturer som glasstransisjonstemperaturen så kan den variere fra -20°C til 20°C [25]. Den vanlige glasstransisjonstemperaturen for polypropylen er på ca. -25°C og den sekundære glasstransisjonstemperaturen ligger på ca. -254°C [25]. Smeltetemperaturen for den krystallinske delen av polypropylen varierer mellom 160°C og 170°C [25]. Sprøtemperaturen er også en viktig verdi for å beskrive egenskapene til et materiale og er den temperaturen hvor halvparten av materialet har oppnådd sprøtt brudd ved en gitt belastning. Polypropylens sprøtemperatur varierer i et temperaturområde mellom -40°C og 15°C og endrer seg avhengig av molekylkjedens oppbygning, det vil si om polymeren er homopolymer eller copolymer [25]. Polypropylen vil oppleve signing som er typisk for viskoelastiske materialer. Det vil si at materialet langsomt deformeres avhengig av tid, temperatur og belastning. Polypropylen har en høyere motstandsevne mot signing enn polyetylen. PVC eller polyvinylklorid derimot, har en enda høyere motstandsevne mot signing enn polypropylen. Det vil si at signingsmodulen til polypropylen har en høyere verdi enn polyetylen, mens polyvinylklorid har den høyeste signingsmodulen og siger minst av de tre polymerene. [15] [14] [9]

2.6.3 PVC (polyvinylklorid)



Figur 2-17 - Strukturformelen til polyvinylklorid som består av karbon- og hydrogenatomer i tillegg til et kloratom (Cl) i R-gruppen. "n" benevner utvidelsen av strukturformelen (antall molekyler i rekka). [19]

Polyvinylklorid er en termoplastisk polymer med et kloratom (Cl) i R-gruppen. Den kjemiske strukturen er som vist i figur 16 og viser at molekylene i PVC vil bestå av karbon-, hydrogen og klor. PVC fremstilles ved polymerisering av vinylklorid. Kloratomet i et PVC-molekyl utgjør 57% av vekten til molekylet, som gjør at man får mer masse per produserte enhet av PVC. Den økte molekylære vekten gjør at PVC får nye og forskjellige egenskaper enn andre polymerer. De unike egenskapene til PVC innebærer god kjemisk resistans, at det er rigid og hardt, at det er brannsikkert og at det er relativt billig. PVC har derfor mange bruksområder i samfunnet og brukes til produksjon av mange forskjellige produkter. Eksempler på produkter som er laget av PVC er leketøy, trampoliner, hageslanger, isolasjon i elektriske ledninger og takrenner. [15] [14] [9]

Som sagt har kloratomet i PVC-molekylet en større masse enn karbon- og hydrogenatomene, men kloratomet er også negativt ladet. Den negative ladningen til kloratomet gjør at det oppstår polare bindinger mellom kloratomet og karbonatomet. De negative polene fører til at andre kloratomer frastøtes og vil bidra til en uordnet struktur. Dette gjør at PVC hovedsakelig ikke blir et materiale med krystallinsk struktur, men heller et amorf materiale uten fast struktur og orden i molekylkjeden. [15] [14] [9]

Tabell 2-3 - Sentrale verdier som beskriver egenskapene til polyvinylklorid. [25]

Egenskap	Verdi	Benevning
E-modul	2140 - 4140	MPa
Flytegrense	35,4 – 52,1	MPa
Forlengelse ved brudd	11,9 - 80	%
Strekkfasthet	40,7 – 65,1	MPa
Spesifikk varmekapasitet	1,36 – 1,44	J/g°C
Spesifikt tyngdepunkt	1,3 – 1,58	kg/m ³
Termisk konduktivitet	0,147 – 0,293	W/m/°C
Temperaturutvidelseskoeffisient	100 - 150	10 ⁻⁶ · K ⁻¹
Strekkmodul	2400 - 4100	MPa

PVC er produsert i hovedsakelig to typer. Den ene typen heter rigid PVC (RPVC) og den andre heter fleksibel PVC (flexible PVC). Rigid PVC brukes i rør og konstruksjoner som krever høy styrke. Fleksibel PVC produseres ved å tilsette tilsetningsstoffer i produksjonsprosessen som gjør PVC mykere og mer fleksibelt. Ofte brukes ftalater som ftalsyrer og estere. En mykere versjon av PVC brukes som isolasjon av elektriske ledninger, i oppblåsbare produkter, i fleksible rørsystemer og kan også erstatte mange produkter som er laget av gummi. Ofte er det vanlig å tilsette flere ulike stoffer i produksjonsprosessen av PVC for å få frem de materialegenskapene man er ute etter. Dette er fordi ren PVC er hardt og sprøtt. Slike tilsetningsstoffer kan bidra til å gjøre PVC stabiliserende, plastifiserende, smørende, fleksibelt og mykt. [15] [14] [9]

PVC har eksistert i lang tid og primitive former av PVC kan spores tilbake til 1850-tallet. Den kommersielle og moderne produksjonen av PVC økte betydelig i årene mellom slutten av første verdenskrig og starten av andre verdenskrig. I dagens samfunn har PVC en rekke bruksområder og de mest populære produktene er rør, klær, ledningsisolasjon og leketøy. [15] [14] [9]

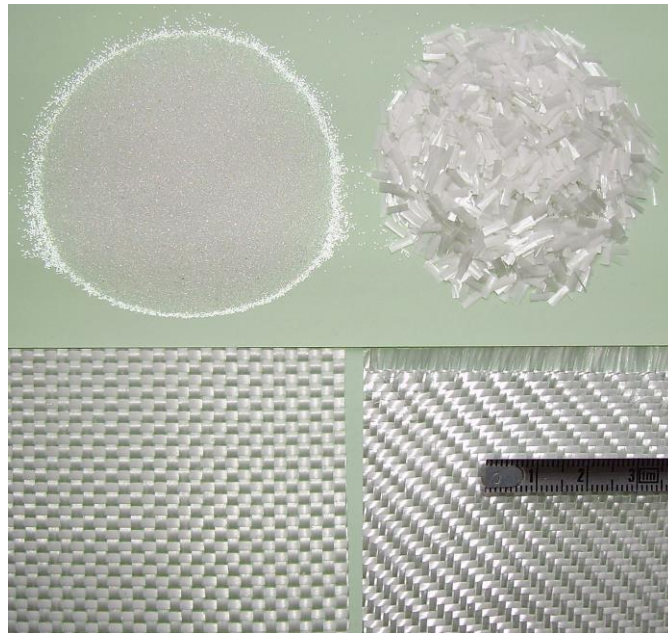
Siden PVC er en amorf termoplast vil bindingene mellom molekyllkjedene være Van der Waalsbindinger eller sekundære bindinger. PVC er både stivere, sterkere og mindre elastisk enn PP og PE. Dette innebærer at E-modulen for PVC har en høyere verdi enn PP og PE. PVC har også som nevnt en høyere vekt på grunn av kloratomene i molekyllkjeden. Likevel kan forskjellige tilsetningsstoffer gjøre at PVC får veldig like egenskaper som PE eller PP. Det at man kan "skreddersy" og tilpasse PVC ved å tilsette forskjellige stoffer, gjør PVC til veldig brukervennlig og fleksibelt plastmateriale. [15] [14] [9]

Når det gjelder temperaturene for ulike faseoverganger så avhenger disse temperaturene i stor grad av hva slags type PVC-materialet man har med å gjøre. For vanlig PVC er glasstransisjonstemperatur på 82°C og den sekundære glasstransisjonstemperaturen på -25°C [25]. Smeltetemperaturen varierer fra ca. 100°C til 260°C avhengig av materialegenskapene [25]. [15] [14] [9]

PVC har en ataktisk romfordeling av R-gruppene, der R-gruppene sitter tilfeldig plassert i hvert molekyl. Dette innebærer at kloratomene er plassert tilfeldig for hvert molekyl i kjeden. I noen typer PVC-materialer kan det også være en syndiotaktisk konfigurasjon, der R-gruppene er plassert på annenhver side av kjeden. Hvis det er en syndiotaktisk konfigurasjon av R-gruppene, vil PVC ha en høyere grad av krystallinitet. [15] [14] [9]

2.7 Fiberarmerte plastmaterialer (kompositter)

En annen viktig type plastmaterialer er de som er forsterket og armert med fibermaterialer også kalt for kompositter. I disse plastmaterialene er det ofte snakk om å forsterke platen med små og tynne fibre. Fibrene kan være laget av forskjellige typer materialer, men det mest vanlige er å bruke fibre laget av glass, karbonfiber, aramid eller basalt. Disse fibrene kan produseres i forskjellige typer og kan anordnes med plastmaterialet på forskjellige måter. De mest brukte anordningsmetodene for fibrene er tilfeldig anordnet, pressing av tilfeldig anordnede fibre til en tynn matte (Chopped Strand Mat) eller veving av fibrene til en vevd matte. [27]



Figur 2-18 - Forskjellige typer glassfibre. Mikrokuler, opphakknet eller vevd. [28]

Når det gjelder selve plastmaterialet i armerte plastmaterialer er dette som oftest en herdeplast som for eksempel epoxy, polyester resin eller vinylester. En herdeplast herder og stivner når den utsettes for varme eller blir tilsatt en herder. [27]

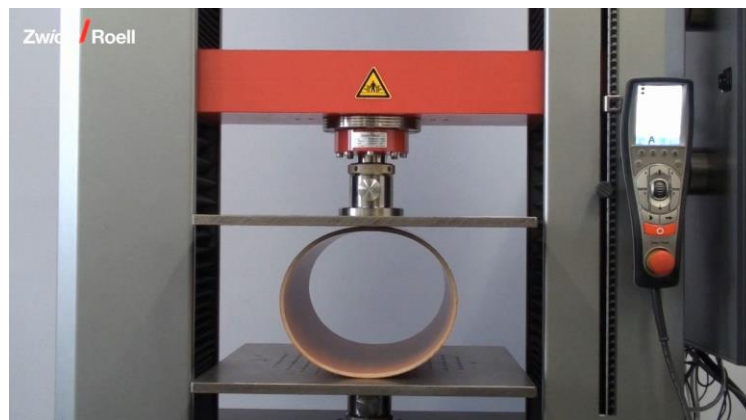
Fiberarmerte plastmaterialer har mange bruksområder der høy styrke, lav vekt og høy resistans mot kjemikalier og korrosjon er ønskelig. Fiberarmerte plastmaterialer er også billige å produsere der både platen og fibrene er billige å produsere. Noen av ulempene med fiberarmerte plastmaterialer er lav termisk resistans og høy termisk ekspansjonskoeffisient. Dette gjør at fiberarmerte plastmaterialer har lav resistans mot varme og veldig høye temperaturer. Noen kjente fiberarmerte plastmaterialer er glassfiber, karbonfiber og plastmaterialer som er armert med kevlar (aramid) fibre som brukes blant annet i skuddsikre vester og hjelmer. [27]

3. Undersøkelse og drøfting av forsøks- og testmetoder for plastmaterialer ved lave temperaturer

I dette kapitlet er det beskrevet forskjellige forsøks- og testmetoder som er brukt i tidligere forsøk, tester og beskrevet i forskningslitteratur på termoplastrør og termoplaster ved lave temperaturer. Det vil bli gjennomgått hva slags utstyr og materialer som kreves, i tillegg til en beskrivelse av de aktuelle testmetodene og de tilhørende trinnene i testprosessen og potensielle feilkilder.

En praktisk forsøksmetode for å teste rør laget av forskjellige termoplaster, er å regne ut ringstivheten. Ringstivheten er som sagt et mål på hvor stivt eller hvor stor motstand et rør har mot deformasjon og som med stor sannsynlighet vil endre seg når temperaturen synker. Ringstivhetsmetoden innebærer å bruke to like plater med røret liggende i mellom platene og deretter påtrykke en kraft på den øverste platen. Ofte vil det være nødvendig med utstyr som kan holde de to platene parallelle ved påtrykking av kraften på den øverste platen, for å unngå en feil belastningssituasjon. Testutstyret og platene må også dimensjoneres mot høy belastning og vekt slik at røret oppnår en tilstrekkelig deformasjon og tilfredsstillende nedbøyningskravet på 3%. Dette innebærer at den øverste platen må designes og dimensjoneres for å holde flere lodd eller vekter. Platene bør også være laget av et hardt og sterkt materiale, slik at røret tar opp så mye som mulig av den påtrykte kraften. [17]

Det finnes mye profesjonelt utstyr og maskiner ute på markedet som er lagd spesifikt for å teste ringstivheten og styrken til rør. Slikt utstyr er både kostbart og dyrt, men kan gi veldig nøyaktige målinger og verdier for styrkeegenskapene til rør laget av ulike materialer. Maskiner og mer kostbart utstyr er å foretrekke hvis det stilles krav til sikkerhet. Da må i så fall rørene dimensjoneres riktig i forhold til sikkerhetsmessige faktorer. Hvis det er snakk om å teste styrkeegenskapene til rør på et mindre profesjonelt nivå, kan man gjøre det billigere ved å bygge sitt eget utstyr og måle nedbøying manuelt. Dette kan for eksempel gjøres ved å bygge et rammeverk i tre eller sveise sammen deler av stål eller aluminium.



Figur 3-1 - En profesjonell maskin for testing av ringstivheten. [29]

For å senke temperaturen til plastrør og plastmaterialer er det mest aktuelt å bruke spesialfrysere eller frysekammere som brukes til forskjellige typer forsøk, testing og forskning i tillegg til at de brukes i kjemi- og medisinrelaterte områder i samfunnet. Det finnes flere produsenter som spesialiserer seg på frysere som skal holde en ultra-lav temperatur (ultra low-temperature). Kjente produsenter er for eksempel ThermoFisher, LABRepCo og Vestfrost Solutions. Dagens frysekammere kan holde en temperatur på ned mot -86°C . Profesjonelle frysekammere er kostbare og som oftest er det kun bedrifter, organisasjoner, sykehus, laboratorier og utdannings- og forskningsinstitusjoner som har disse til disposisjon. Mange frysere går på strøm og bruker varmepumpeprinsippet for å kjøle seg ned, men ofte brukes det også et slags isolert kammer i kombinasjon med flytende nitrogen eller lignende som pumpes inn i kammeret.



Figur 3-2 - Lavtemperatur frysere fra ThermoFisher, som kan holde en temperatur på ned mot -86°C . [30] [31]



Figur 3-3 - Trykktank med flytende nitrogen og frysekammer på strekkprøvelaboratoriet ved Høgskolen i Oslo og Akershus.

En annen aktuell testmetode er å forsegle prøvestykkene av rørene på begge ender ved sveising og deretter sette rørene under trykk. Trykket i røret kan økes ved å borre et hull i røret og sette inn en type ventil som er påkoblet en slange. Slangen må deretter kobles til en type kompressor eller trykkøkingsutstyr som kan øke trykket inne i røret. Det er viktig at rørene forsegles og tettes fullstendig slik at det ikke er noen form for lekkasje som kan føre til trykktap. Deretter kan man måle utvidelsen av diameteren til røret med strekkklapper på grunn av det innvendige trykket. Videre kan man bruke verdiene til å beregne hvordan styrkeegenskapene til forskjellige rør av ulike plastmaterialer påvirkes ved forskjellige temperaturområder. Før man øker trykket i rørene er det viktig å beregne det maksimale trykket som rørene tåler, slik at man forhindrer at rørene ryker på grunn av for høyt trykk. Det maksimale trykket som et plastrør tåler er avhengig av flytespenningen til rørmateriale, veggtykkelsen til røret og den ytre diameteren til røret.

Den siste og mest tradisjonelle metoden å teste materialer på er å gjøre en strekk- eller trykktest som er nærmere forklart i kapittel 2.4.1. Testen innebærer å strekke eller trykke sammen en prøve av et materiale til det går i brudd, som ofte er gjort i en maskin som automatisk plottet spennings-tøyningskurven. På denne måten kan man enkelt finne spenningsverdier som flytegrensen, bruddgrensen, proporsjonalitetsgrensen og elastisitetsgrensen til materialer. Når det gjelder testing av forskjellige plastmaterialer ved lave temperaturer, kan man eventuelt bruke en strekk- eller trykktest kombinert med en nedkjøling av plastmaterialet ved hjelp av et frysekammer. For å få så nøyaktige testresultater som mulig, er det viktig at plastmaterialet holder den temperaturen det skal testes ved. Det blir derfor viktig å forhindre en eventuell oppvarming av plastmaterialet ved en kraftig nedkjøling.

Uansett hvilken testmetode man velger og om man skal teste rørene profesjonelt med avanserte maskiner og utstyr, om man gjør simuleringer ved hjelp av programvare eller om man bruker sitt eget utstyr, så vil det være nødvendig med en identifiseringsprosess for å identifisere hvilken termoplast man har med å gjøre. For å gjøre dette kan man bruke identifiseringsskjemaet i figur 13. Termoplaster skal myknes ved oppvarming og videre skal man se om platen flyter, om den brenner, ikke brenner eller selvslukker og til slutt om den drypper eller ikke. Videre identifiserer man flammefarge, lukt, røyk og andre egenskaper for å finne ut det eksakte plastmateriale man har med å gjøre. Hvis man har oppgitt hva slags type plastmateriale de forskjellige plastrørene er laget av fra produsenten, vil det ikke være nødvendig med en identifisering av plastmaterialet.

Polyetylen skal mykne ved oppvarming, skal flyte, har en blå flammefarge med gul spiss, lukter stearin/parafin og drypper raskt. Polypropylen har helt like egenskaper som polyetylen når det gjelder identifiseringsprosessen, bortsett fra at lukten av stearin/parafin skal være hakket sterkere enn hos polyetylen. Polyvinylklorid derimot skal mykne, skal ikke flyte, skal ha en selvslukkende flamme, skal ikke dryppe, skal ha en gul flammefarge med grønn kant, lukter stikkende saltsyre og skal ha en hvit røyk. [23]

3.1 Valgt løsning

3.1.1 Valgt løsning for simuleringsforsøk

Ved nedkjøling av plastrør er det mest interessante og relevante å se på hvordan påføring av indre krefter påvirker tøyningen av materialet og utvidelsen av rørets diameter i tillegg til de opptredende spenningene i materialet som gir grunnlag for å beregne elastisitetsmodulen. Ringstivheten er også viktige egenskaper som endrer seg til en viss grad ved endring av temperaturen, men er et mindre viktig mål i temperaturområdet fra 20°C til -70°C. Derfor er vil den mest aktuelle testmetoden når det gjelder simulering, bli å øke trykket i 3D-modellerte plastrør ved hjelp av et simuleringsprogram og deretter måle den tilhørende utvidelsen av diameteren (tøyningen) til røret. På bakgrunn av verdiene man får fra målingene kan man beregne de opptredende spenningene og tøyningene i røret. Videre kan man bruke dette til å analysere hvordan tøyningen og spenningen i rør laget av forskjellige typer plastmaterialer påvirkes ved lave temperaturområder.

I tillegg vil det også være relevant å se på tradisjonelle strekktester som kan også simuleres ved hjelp simuleringsprogramvare. Her vil det være også være snakk om å 3D-modellere et prøvestykke og deretter sette på krefter ved forskjellige temperaturområder. Ut i fra simuleringene kan man da finne relevante spennings- og tøyningsverdier og analysere hvordan egenskapene til plastmaterialer påvirkes ved de ulike temperaturområdene.

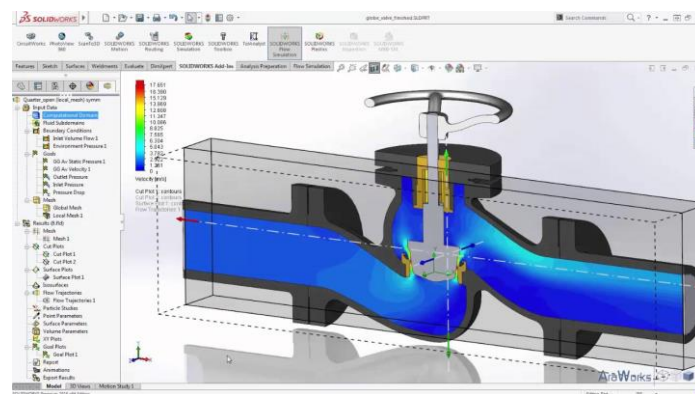
3.1.2 Valgt løsning for de praktiske forsøke

Når det gjaldt å teste plastmaterialer ved lave temperaturer ved hjelp av praktiske forsøk, ble det utforsket to typer løsninger. I utgangspunktet hadde vi planlagt å gjøre et praktisk forsøk hvor vi skulle sette trykk på forskjellige plastrør og måle tøyningen med strekkklapper. Denne løsningen ble skrinlagt fordi det ble for farlig å sette trykk på rør som potensielt kunne eksplodere hvis trykket ble for høyt. Alternativet ble å utføre strekktester av forskjellige termoplaster og fiberarmerte plastmaterialer på strekkprøvelaboratoriet ved Høgskolen i Oslo og Akershus. Grunnen til at testingen skulle foregå på Høgskolen i Oslo og Akershus var fordi de hadde tilgang til både et frysekammer som kunne kjøle ned prøvene til ca. -30°C til -50°C og en strekkprøvemaskin som kunne brukes samtidig for å finne informasjon om plastmaterialenes egenskaper ved lave temperaturer.

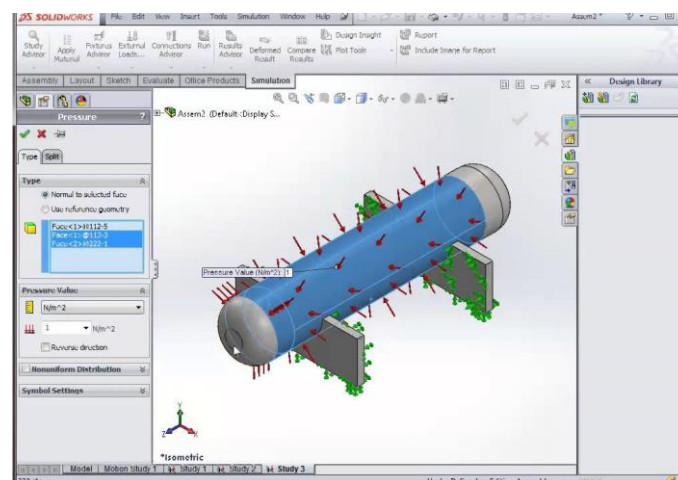
3.1.3 Verktøy, løsningsmetode og tilpasninger for gjennomføring av simuleringsforsøk

For å gjennomføre den valgte testmetoden har jeg valgt å benytte meg av simuleringsprogrammet som er innebygd i «SolidWorks». «SolidWorks» er en kraftig og effektiv CAD-programvare for modellering og simulering av 3D-modeller som representerer virkelige rør. Ved å modellere nøyaktige modeller av rørene og sette inn riktige verdier for temperatur, trykk, materialegenskaper og krefter vil man få resultater som gjenspeiler med stor nøyaktighet det som vil skje i virkeligheten. For at man skal få så nøyaktige resultater som mulig blir det viktig å fastsette og sette inn de riktige verdiene for temperatur, trykk, materialegenskaper og krefter siden resultatene fra simuleringene er basert på disse variablene. I tillegg er det også viktig å tegne modellene til rørene nøyaktig og bruke dimensjoner og mål fra virkelige rør som referanse, slik at man får en mest mulig riktig og realistisk 3D-modell av plastrørene.

Når det gjelder simuleringen av tradisjonelle strekktester er det viktig at man 3D-modellerer et prøvestykke med riktige dimensjoner i forhold til aktuelle standarder og det materialet man tester. Det er også viktig å sette inn riktige verdier for opplagere, krefter, temperaturer og materialegenskaper slik at man får så nøyaktige resultater som mulig.



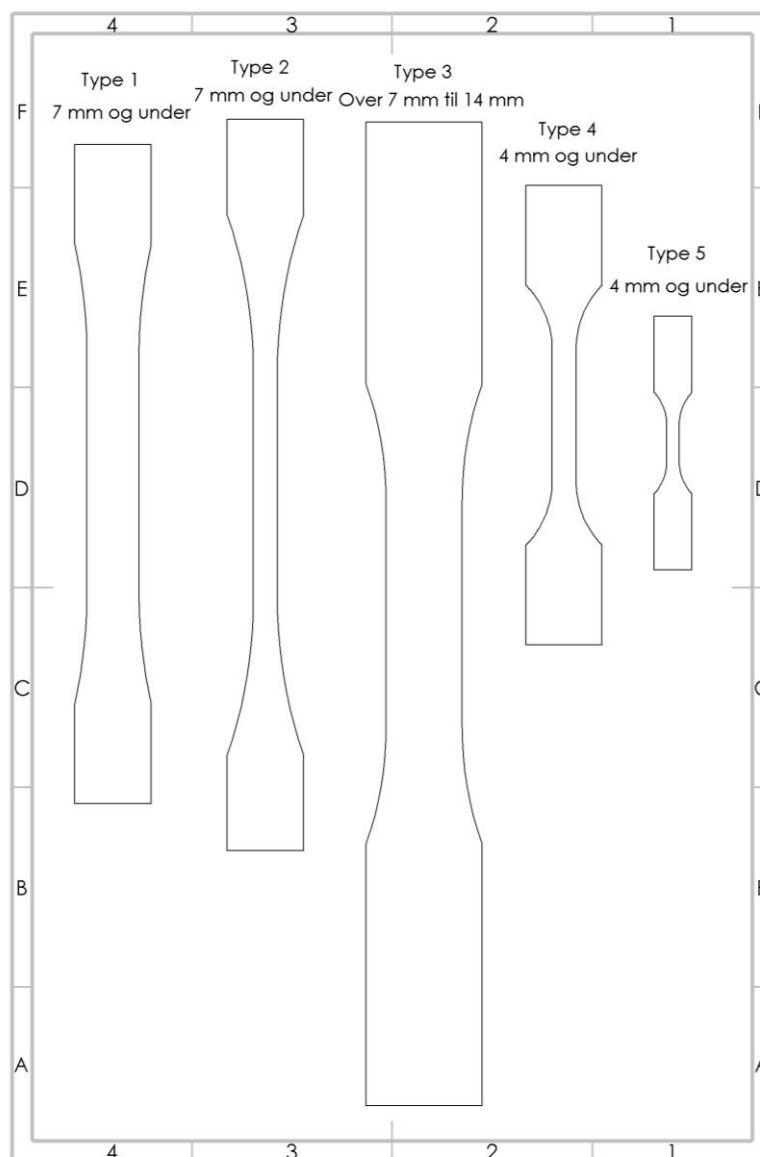
Figur 3-4 - Eksempel på en strømningssimulering av et rør i «SolidWorks Flow Simulation». [32]



Figur 3-5 - Eksempel på simulering av krefter og trykk på en trykktank i «SolidWorks Simulation». [33]

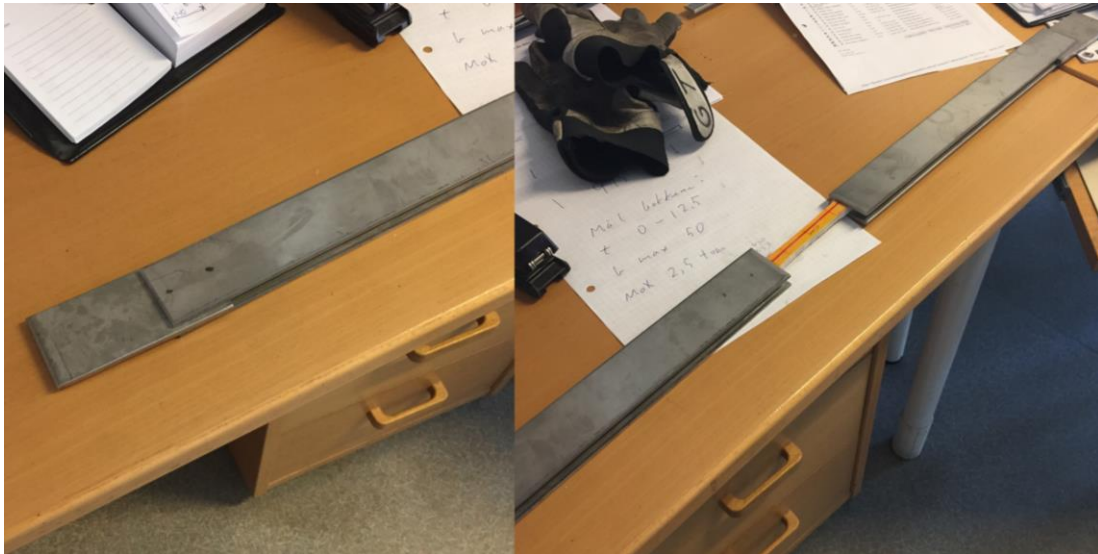
3.1.4 Verktøy, løsningsmetode og tilpasninger for gjennomføring av de praktiske forsøke

For å kunne gjennomføre strekktestene brukte vi materialer som vi fikk levert fra tilleggsveileder Aage Kollen. Materialene vi fikk var hovedsakelig glassfiberarmerte herdeplaster og termoplasten polyetylen. Materialprøvene ble bearbeidet med maskiner på verkstedet slik at de fikk riktige dimensjoner i forhold til ASTM (American Society for Testing and Materials) D638 standarden. Vi valgte å lage type 1 og type 2 fra materialprøvene, der kravet til materialtykkelsen var ca. 5-7 mm. Glassfiberprøvene hadde allerede en tykkelse på ca. 5-7 mm, mens polyetylenprøvene måtte bearbeides for å få en tykkelse på ca. 5-7 mm. Etter bearbeidingen av materialene til ferdig prøvestykker skulle prøvestykkene kjøles ned og strekktestes ved hjelp av frysekammeret og strekkprøvemaskinen på Høgskolen i Oslo og Akershus. [34]



Figur 3-6 - De forskjellige prøvestykkene med tilhørende krav til tykkelse som skal brukes for å strekkteste plastmaterialer. Type 1 og type 2 ble valgt som prøvestykker for strekktestene. [35] [34]

Når vi besøkte strekkprøvelaboratoriet hos Høgskolen i Oslo og Akershus, fant vi ut at vi måtte gjøre noen tilpasninger før vi kunne utføre strekktestene. Det viste seg at prøvebakkene ikke fikk plass i kuldekammeret som betyr at de måtte være på utsiden. Prøvestykkene ble da for korte og måtte derfor skjøtes. Løsningen ble å lage en innretning på verkstedet som skjøtet prøvestykkene ved hjelp av stålplater og bolter. Vi tenkte i utgangspunktet at skjøtene skulle festes til prøvestykket ved å klemme to stålplater til prøvestykket ved hjelp av bolter på siden av prøvestykket, men vi var usikre på om dette var tilstrekkelig som feste. Derfor valgte vi å bore hull og sette bolter tvers igjennom prøvestykkene og stålplatene for å være sikre på at prøvestykkene ikke skled ut av skjøtene under strekktestingen.



Figur 3-7 - Bilde som viser skjøtene før det ble boret hull og festet med bolter.



Figur 3-8 - Bilde som viser skjøtene og prøvestykket etter det er boret hull og festet med bolter.



Figur 3-9 - Bearbeidede prøvestykker med borede hull slik at man kan feste de til skjøtene med bolter. Øverst og nederst: glassfiber. Midten: polyetylen (plast).

3.2 Gjennomføring av forsøk og simuleringer

For å finne maksimalt trykk som et rør tåler bruker man Barlows lov. I formelen er σ_{flyt} flytespenningen til rørmaterialet, e er veggtykkelsen til røret og d_y er den utvendige diameteren til røret.

$$P_{maks} = \frac{2 \cdot \sigma_{flyt} \cdot e}{d_y}$$

Ved å sette inn dimensjonene til plastrøret og flytegrensen til materialet vil man få en verdi som beskriver den maksimale innvendige trykk-kapasiteten til røret. Ved å regne ut maksimal trykk-kapasitet til de forskjellige rørene, kan man lettere unngå å sette på for høyt trykk på rørene man tester.

Når man trykksetter forskjellige rør og utfører strekktester vil det også være behov for å måle utvidelsen av diameteren til rørene. Dette kan gjøres i praksis ved å sette på en eller flere strekkklapper på rørene som vil utvide seg samtidig med utvidelsen av røret. Målingene man gjør med strekkklappene gir da verdier for å beregne tøyningen til røret. Hvis man tester rør i et simuleringsprogram og utfører strekktester i for eksempel SolidWorks, vil verdier for tøyning og spenning automatisk regnes ut. Når man utfører strekktester i en strekkprøvemaskin vil maskinen bruke måleinstrumenter og strekkklapper for å regne ut forskyvningen og tøyningen ved en gitt last og spenning. Som tidligere beskrevet kan tøyningen uttrykkes på følgende måte:

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

Her er l_1 ny lengde man får ved strekking, l_0 opprinnelig lengde og Δl differansen mellom l_1 (ny lengde) og l_0 (opprinnelig lengde). Dette uttrykket for tøyningen gjelder når man strekker en prøve av et materiale. Man tar da lengden man får ved strekking, trekker fra den opprinnelige lengden og deler på den opprinnelige lengden.

Når det gjelder utvidelsen av rør blir dette også tøyning på samme måte, bare at man får en ny diameter i forhold til den opprinnelige diameteren. Uttrykket for tøyning av rør kan da uttrykkes på følgende måte:

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{d_1 - d_0}{d_0}$$

Her er d_1 den nye diameteren man får ved trykksetting av røret, d_0 er opprinnelig diameter til røret og Δd er differansen mellom d_1 (ny diameter) og d_0 (opprinnelig diameter). Her beregner man på samme måte ved å ta den nye diameteren, trekke fra den opprinnelige diameteren og dele på den opprinnelige diameteren.

3.2.1 Generell fremgangsmåte (praktiske forsøk)

1. Første steg for å kunne utføre strekktestene var å bearbeide og maskinere ut materialprøvene av glassfiber og polyetylen slik at de tilfredsstilte de kravene som er satt til prøvestykkene ifølge ASTM D638 standarden. Her valgte vi å bruke type 1 og 2 som krever en materialtykkelse på 7 mm eller under.



Figur 3-10 - Bilde som viser de opprinnelige glassfiberprøvene og de bearbeidede prøvestykkene av glassfiber og polyetylen.

- Etter besøket på strekkprøvelaboratoriet hos Høgskolen i Oslo og Akershus fant vi ut at vi måtte forlenge prøvestykkene og skjøte de. Skjøter til prøvestykkene ble laget ved hjelp av stålplater som det ble boret hull i og festet sammen med bolter.

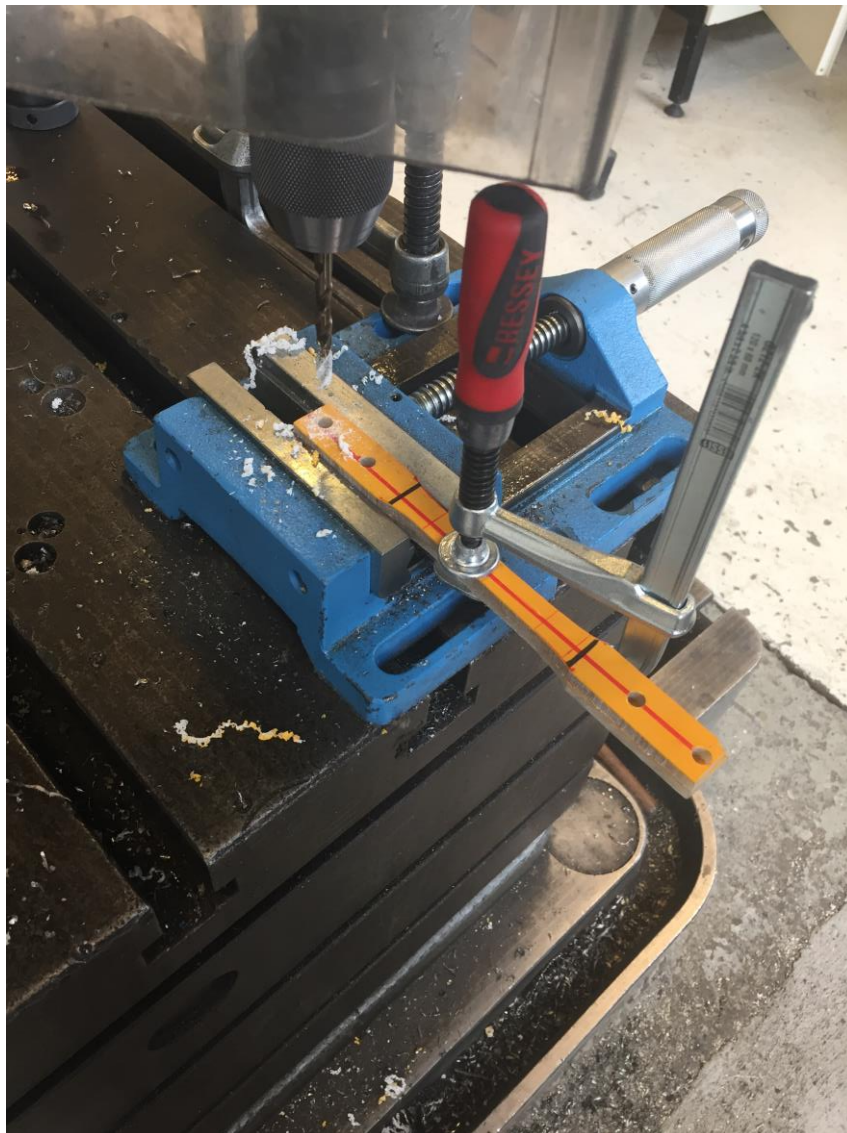


Figur 3-11 - Ferdig lagde og monterte skjøter som skal festes til prøvestykkene.



Figur 3-12 - Ferdig lagde og monterte skjøter som skal festes til prøvestykkene.

3. I tillegg til å lage skjøtene måtte det bores hull i prøvestykkene, slik at de kunne festes og boltes fast til skjøtene. Hullene ble boret med boremaskinen på verkstedet.



Figur 3-13 - Bilde som viser boring av hull i prøvestykkene slik at de kan festes med bolter til skjøtene.

4. Etter at det ble boret hull i prøvestykkene kunne de festes tilstrekkelig til skjøtene med både bolter og muttere.

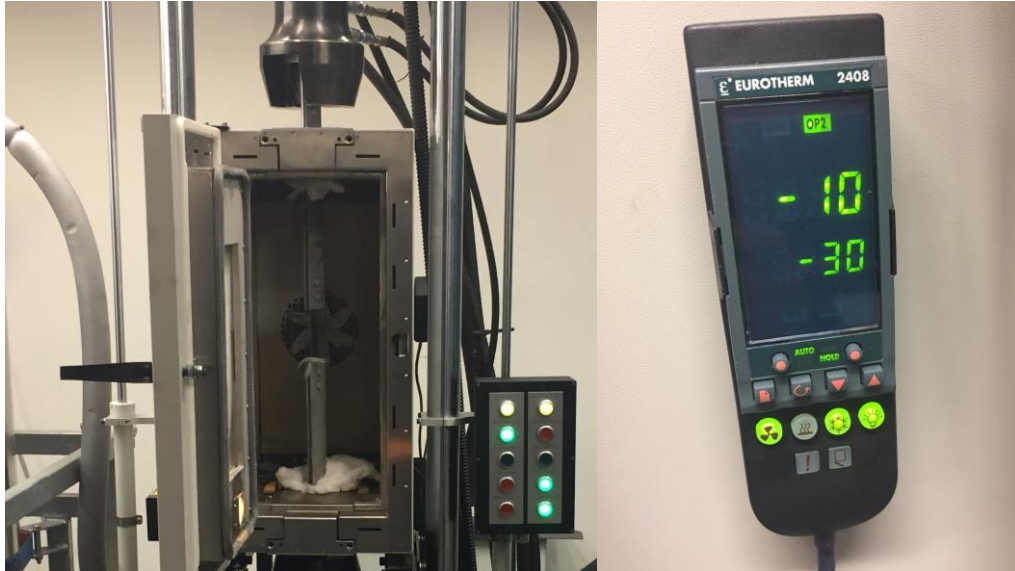


Figur 3-14 - Bilde av skjøtene ovenfra med fastmonterte prøvestykker etter det ble boret hull og festet med bolter.



Figur 3-15 - Bilde av skjøtene fra siden med fastmonterte prøvestykker etter det ble boret hull og festet med bolter.

- Deretter ble prøvestykkene med de fastmonterte skjøtene plassert i frysekammeret slik at de tilstrekkelig kunne kjøles ned før strekktesten begynte. Vi valgte å strekkteste både prøvestykkene av glassfiber og polyetylen ved to forskjellige temperaturer. Først gjorde vi strekktester ved -30°C og deretter -50°C for å se hvordan materialeegenskapene endret seg.



Figur 3-16 - Prøvestykke med de fastmonterte skjøtene klare til å kjøles ned og strekktestes. En digital temperaturstyringsenhet brukes for å sette den temperaturen man ønsker i frysekammeret og som i tillegg viser den nåværende temperaturen i frysekammeret.

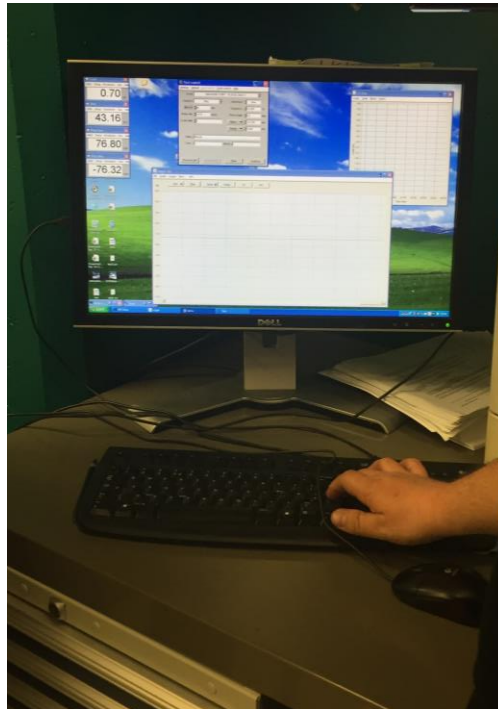


Figur 3-17 - En egen trykktank med flytende nitrogen brukes for å kjøle ned frysekammeret.



Figur 3-18 - Lukket frysekammer med prøvestykke fastmontert til skjøtene. Endene på skjøtene stikker ut av frysekammeret og er festet til prøvebakkene slik at det kan strekkes til prøvestykket går i brudd.

6. Til slutt når strekkprøvemaskinen hadde påført nok strekkraft til at prøvestykket hadde gått i brudd, kunne vi lese av og analysere resultatdataene som maskinen hadde målt under strekktesten og finne nøyaktig informasjon om materialegenskapene som for eksempel tøyingsverdier ved en gitt belastning eller spenning.



Figur 3-19 - Avlesning og lagring av resultatdataene blant annet last- og tøyingsverdier.



Figur 3-20 - Ødelagte prøvestykker som har blitt strukket til de har gått i brudd.

3.2.2 Generell fremgangsmåte (simulering i SolidWorks)

Når man utfører simuleringer ved hjelp av et simuleringsprogram, kan det være fort gjort å glemme hva simuleringen faktisk simulerer i virkeligheten. For å få en innsikt og oversikt over hvordan testmetoden faktisk foregår og utføres i praksis, og som simuleringene er basert på, er det beskrevet en trinnvis fremgangsmåte for både trykksetting og nedkjøling av rør i praksis.

1. Forsegle og tette rørene ved å sveise på endelokk. Her kan det eventuelt være nødvendig med en grundigere sjekk for å teste at rørene er helt tette slik at man unngår trykktap.
2. Forberede og tilpasse rørene slik at man kan sette på det aktuelle trykket. En del modifisering av røret må kanskje til og kan innebære blant annet å drille hull, sette inn ventil og slange, og koble slangen på kompressoren/trykkøkingsutstyret osv.
3. Forberede frysekammeret slik at det holder den aktuelle temperaturen som rørene skal kjøles ned til. En temperatur på ned mot ca. -70°C er en aktuell og realistisk temperatur for å simulere virkningen av kulde på forskjellige plastrør. Det kan også være aktuelt å foreta flere tester ved ulike temperaturområder for å få en innsikt i hvilken retning forsøket går i og hvilke temperaturområder som er kritiske. Frysekammeret må i så fall stilles inn på korrekt temperatur i forhold til den temperaturen man ønsker at rørene skal kjøles ned til.
4. Før man setter rørene inn i frysekammeret kan det være hensiktsmessig å foreta en kontrolltest av rørene ved romtemperatur. Man kan for eksempel sette på et trykk og se på tøyningen og spenningen til rørene ved for eksempel 20°C . Ved å gjøre dette kan man lettere sammenligne og se hvilken effekt lave temperaturer har på rør av ulike materialer og dimensjoner.
5. Sette prøvestykkene av de forskjellige rørene inn i frysekammeret. Det er viktig at rørene får tilstrekkelig med tid til å kjøle seg ned, slik at man ikke risikerer å ta ut rørene av frysekammeret for tidlig. Tar man rørene ut av frysekammeret for tidlig, kan dette medføre at rørene ikke har den korrekte temperaturen som man ønsker å teste rørene ved og man får unøyaktige verdier fra målingene med strekkklappene.
6. Etter at rørene har fått tilstrekkelig med tid til å kjøle seg ned tar man ut røret man ønsker å teste og setter på det aktuelle trykket. Det kan være hensiktsmessig å ta kun ut det røret som skal trykkes fra frysekammeret, slik at de andre rørene ikke blir varmet opp og forblir nedkjølt. Det er viktig at man setter på et trykk som er lavere enn det maksimale trykket som rørene tåler, for å unngå at materialet går i brudd eller at røret sprekker og blir ødelagt. Når man har oppnådd det riktige trykket, leser man av verdiene fra målingene med strekkklappen og gjør de nødvendige beregningene for å finne tøyningen til røret. Videre kan man bruke tøyningen og E-modulen til rørmaterialet for å finne den opptredende spenningen i røret.

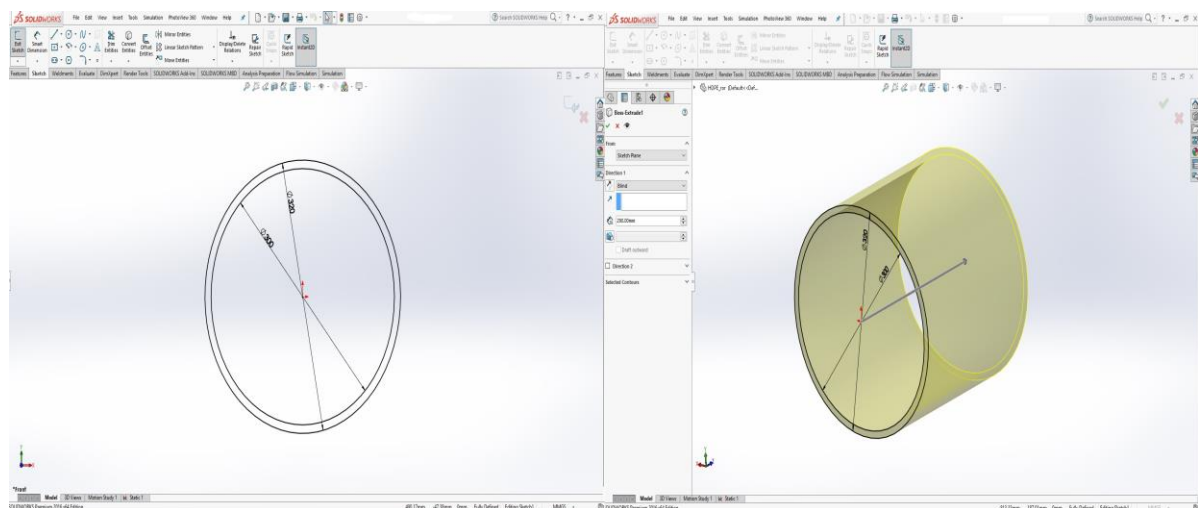
7. Når man har testet alle rørene i praksis og funnet de tilhørende spennings- og tøyningsverdiene ved forskjellige temperaturområder, kan man se på sammenhengen mellom spennings- og tøyningsverdiene, og endringen i temperatur. Man kan da få en bedre forståelse og innsikt i hvor stor eller liten grad ulike temperaturområder påvirker spenningen i rørene og derfor også styrkeegenskapene til rør av forskjellige materialer.

Videre er det beskrevet en trinnvis fremgangsmåte for modelleringen og simuleringen av rørene i SolidWorks. Resultatene som fremkommer fra simuleringene av rørene vil bli videre presentert og analysert under kapitelet for resultater. Når det gjelder temperaturinndelingen har jeg valgt å teste rørene ved tre temperaturer: 20°C, -25°C og -70°C. Det innvendige trykket i røret har jeg satt i forhold til den beregnede trykk-kapasitet til det aktuelle røret som testes.

1. Første trinn var å tegne og modellere rørene. Dimensjonene og målene som ble brukt under modelleringen er basert på virkelige rør fra produsenter som Biobe AS og Pipe Life Norge. I tabellen under ser man de forskjellige plastrørene med de tilhørende dimensjonene og målene som ble brukt som referanse for tegning og modellering av rørene.

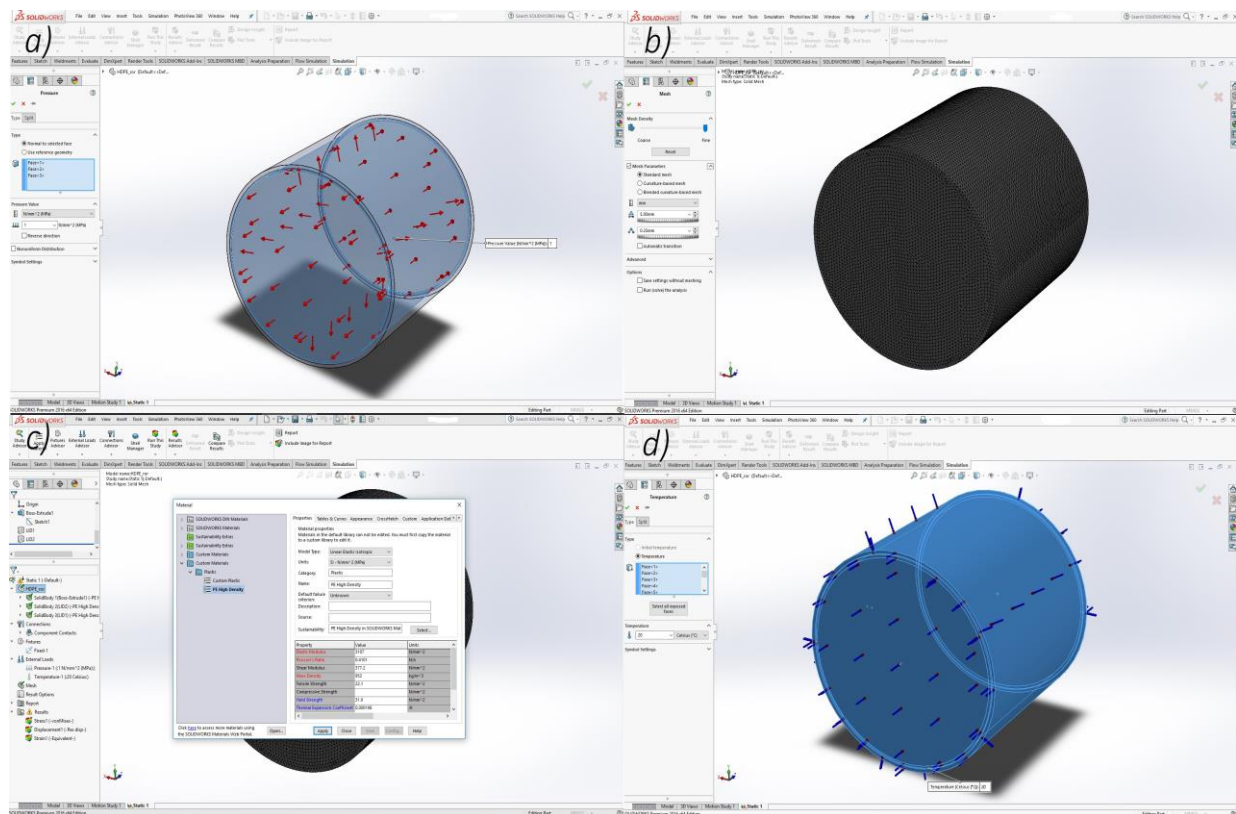
Tabell 3-1 – Plastrør og de tilhørende dimensjonene som ble brukt som referanse for de 3D-modellerte rørene. [36] [37]

Rør nr.	Plastmateriale	Ytre diameter (d_y)	Veggtykkelse (e)	Indre diameter (d_i)	Nominell diameter (d_n)	Lengde (L)	SDR (d_y/e)
1	HDPE	320 mm	10 mm	300 mm	310 mm	290 mm	32
2	PE	250 mm	10 mm	230 mm	240 mm	300 mm	25
3	PP	200 mm	8 mm	184 mm	192 mm	290 mm	25
4	PVC	110 mm	6 mm	98 mm	104 mm	300 mm	18,33



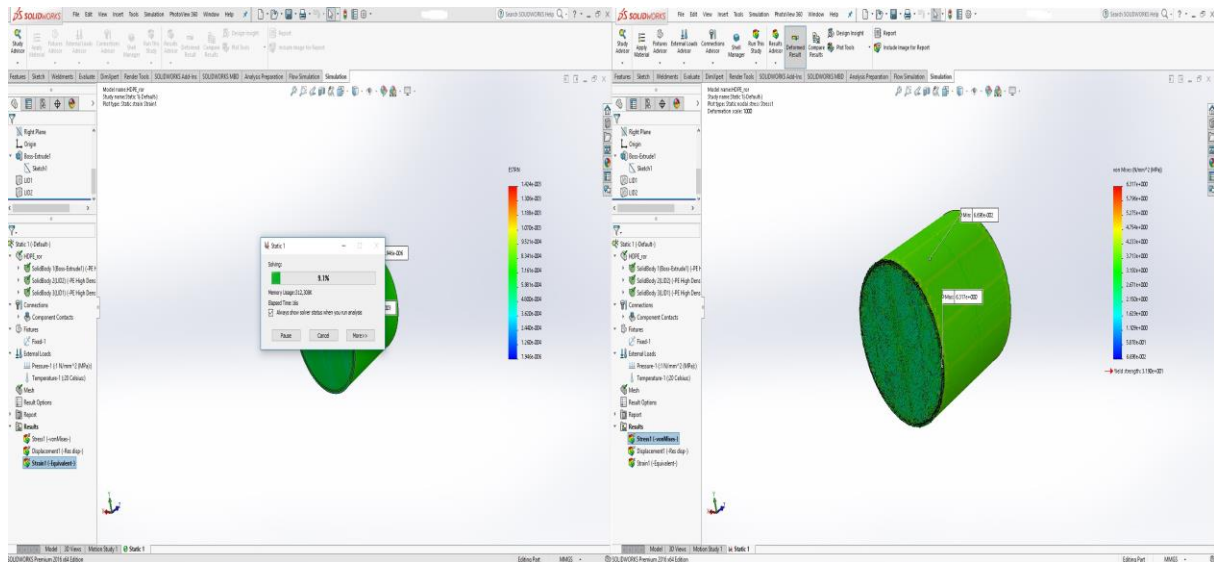
Figur 3-21 - Tegning og modellering av rørene i SolidWorks. [35]

2. Når rørene var ferdig modellert og tegnet, begynte forberedelsene til simuleringen. Her må man opprette en ny simuleringsstudie og spesifisere materialet til 3D-modellen, riktig trykk innvendig i røret, temperaturen til rørene, opplagere og krefter. I tillegg må man velge en meshing av 3D-modellen som sier noe om hvor mange biter modellen deles opp i. En høyere meshing deler 3D-modellen opp i flere biter som gir bedre og mer realistiske simuleringer og resultater, men krever mer arbeid av datamaskinen og tar lengre tid å prosessere. Til slutt kjører man simuleringen hvor datamaskinen prosesserer dataene og kommer frem til resultatene.



Figur 3-22 - Oppsett av simuleringen. a) valg av innvendig trykk, b) valg av meshingen, c) valg av materialet til 3D-modellen, d) valg av temperatur for 3D-modellen. [35]

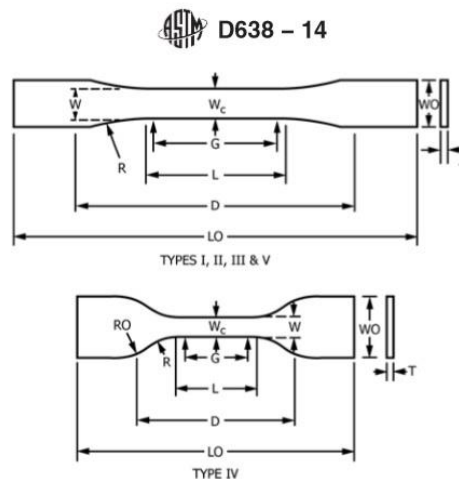
3. Når alle verdier og variabler er lagt inn kan man til slutt kjøre simuleringen. Etter at dataene er prosessert og simulert kan man videre konstruere ulike plot for å analysere det man er interessert i å se på. Normal- og skjærspenninger, deformasjoner, utmatting, og tøyninger kan plottes og analyseres på forskjellige områder i 3D-modellen. Videre kan man analysere sammenhengen mellom temperaturen og materialets spennings- og tøyningsverdier og få en innsikt i hvordan styrkeegenskapene til plastrør endres ved lave temperaturer.



Figur 3-23 - Kjøring av simuleringen og plottting av for eksempel spenningen. Plottet fargelegger modellen etter en fargeskala i forhold til hvor høy eller lav spenningen er. [35]

Når det gjelder 3D-modelleringen og simuleringen av strekktester vil dette foregå som en normal strekktest, men i stedet for å gjøre den manuelt i en strekkmaskin vil den foregå i SolidWorks sin simuleringsprogramvare. Når det gjelder temperaturinndelingen har jeg også her valgt å gjøre simuleringene av strekktestene ved: 20°C, -25°C og -70°C. Den påsatte kraften på prøvestykket er satt til 1000 N som tilsvarer ca. 100 kg.

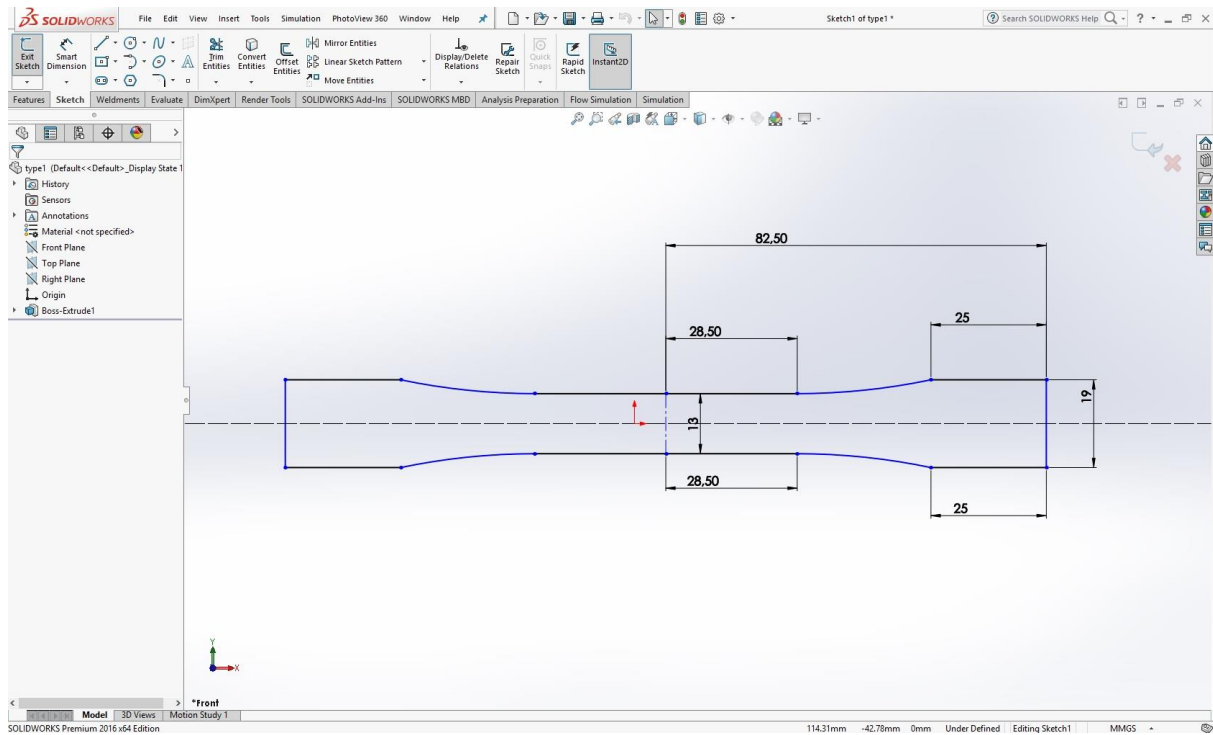
1. Første trinn var å tegne og 3D-modellere et prøvestykke i SolidWorks. For å finne de riktige dimensjonene og målene for prøvestykket har jeg brukt ASTM (American Society for Testing and Materials) D638 standarden og funnet de aktuelle dimensjonene for prøvestykket som er ment for strekktesting av plastmaterialer.



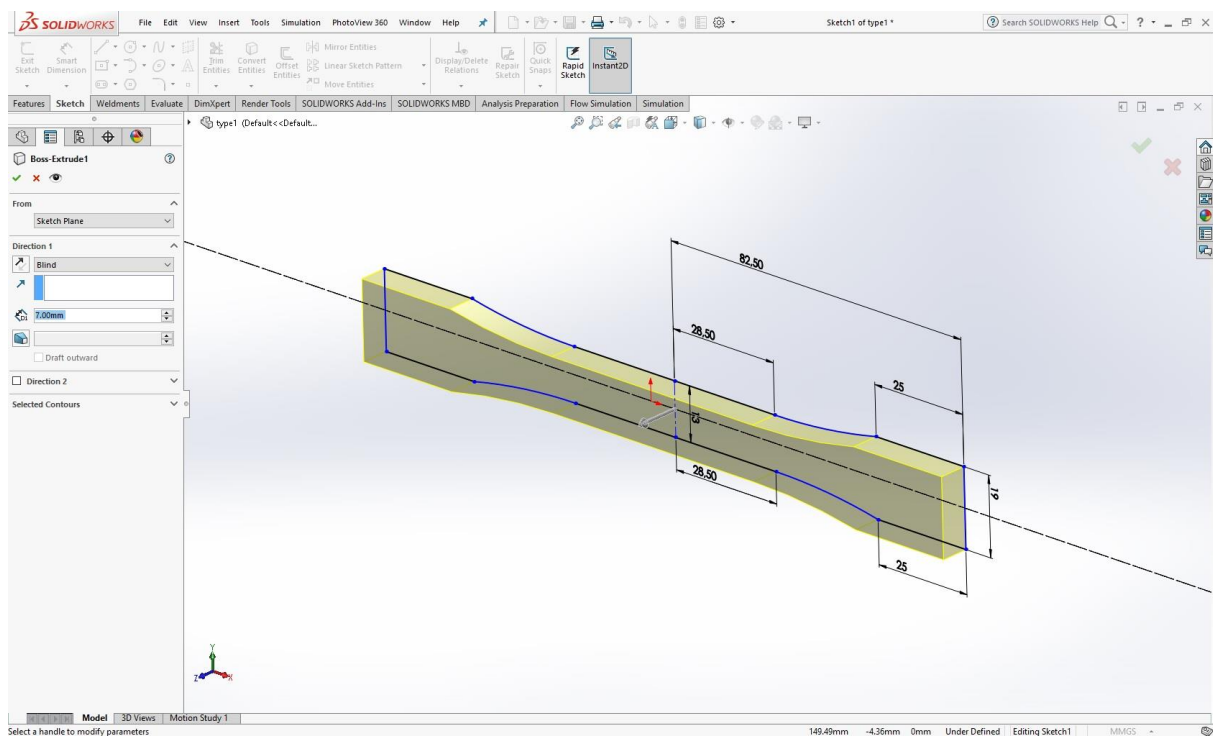
Specimen Dimensions for Thickness, T , mm (in.)^A

Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^B	Type V ^{C,D}	
W —Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	± 0.5 (± 0.02) ^{B,C}
L —Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	± 0.5 (± 0.02) ^C
WO —Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
WO —Width overall, min ^G	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
LO —Length overall, min ^H	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G —Gage length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	± 0.25 (± 0.010) ^C
G —Gage length ^I	...	...	...	25 (1.00)	...	± 0.13 (± 0.005)
D —Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^J	25.4 (1.0)	± 5 (± 0.2)
R —Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	± 1 (± 0.04) ^C
RO —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	± 1 (± 0.04)

Figur 3-24 - Dimensjonene til forskjellige prøvestykker i henhold til ASTM D638 standarden. I standarden er det anbefalt å bruke «Type 1» eller «Type 2» sine dimensjoner for strekktesting av plastmaterialer. [34]

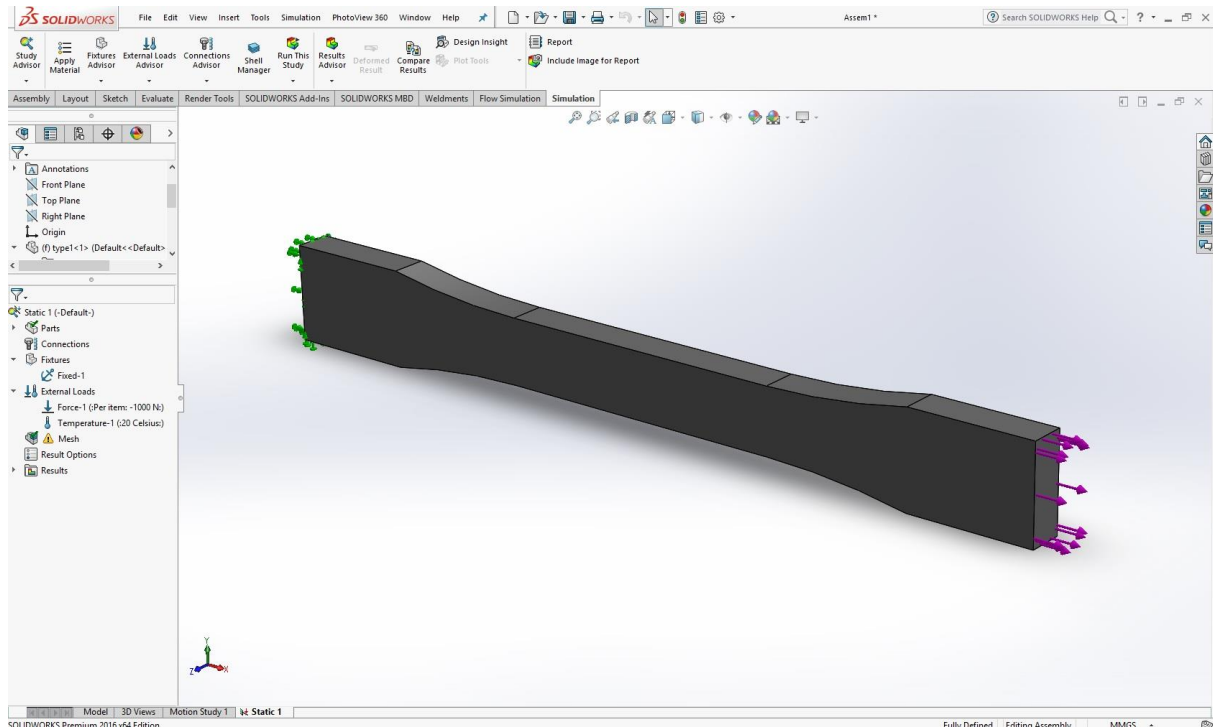


Figur 3-25 - Tegning av det 3D-modellerte prøvestykket. [35]



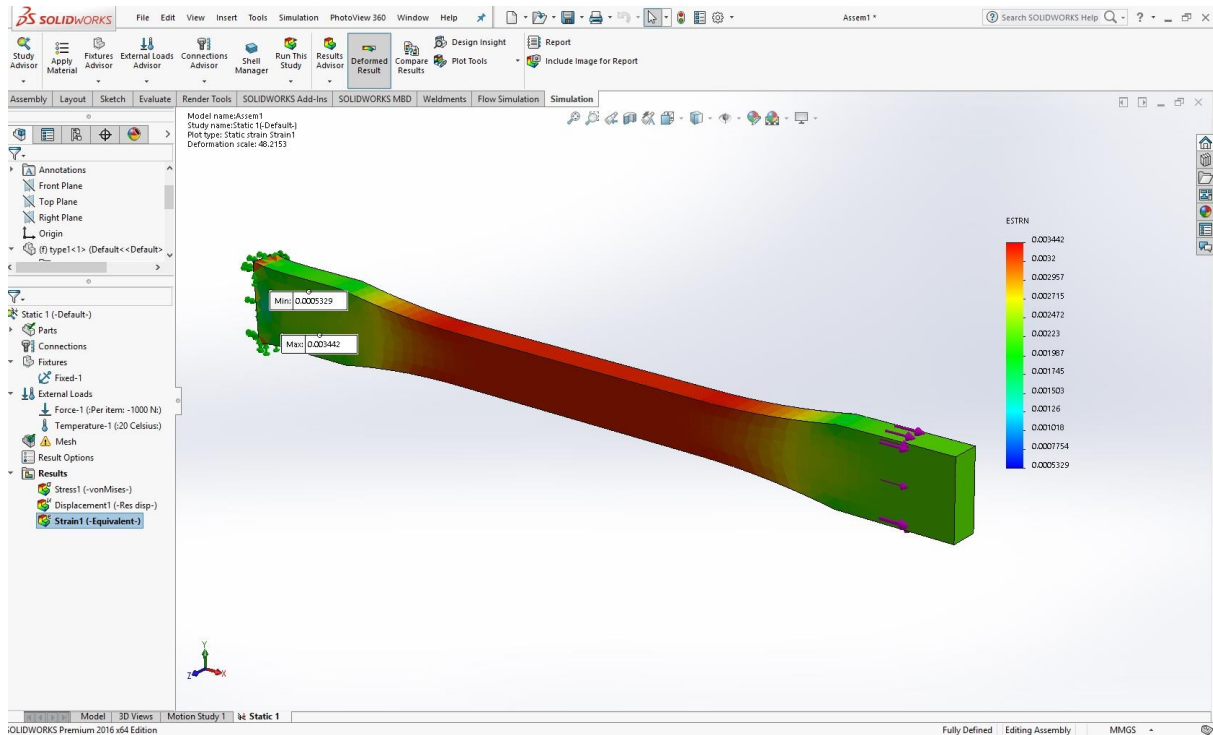
Figur 3-26 - Ekstruderingen av det 3D-modellerte prøvestykket. [35]

2. I neste trinn må man spesifisere materiale, materialegenskaper, krefter, opplagere og temperaturer på 3D-modellen i simuleringen. Den påsatte kraften er som sagt satt til 1000 N og temperaturen til prøvestykket er satt til 20°C, -25°C og -70°C for hver simulering av en strekktest. I tillegg må man velge en meshing av 3D-modellen som forklart tidligere. Til slutt kjører man simuleringen hvor datamaskinen prosesserer dataene og kommer frem til resultatene.



Figur 3-27 – Spesifisering av opplagere, krefter, temperatur og materialegenskaper. [35]

3. Til slutt kan man kjøre simuleringen for å oppnå resultater og verdier. Her kan man også konstruere ulike plot alt etter hva man ønsker å analysere. Alt fra spenninger, deformasjoner og tøyninger kan plottes og analyseres for å se hvilken effekt ulike temperaturområder har på de forskjellige plastmaterialene.



Figur 3-28 - Ferdig kjørt simulering og plottning av for eksempel tøyningen. Plottet fargelegger modellen etter en fargeskala i forhold til hvor høy eller lav verdien til det man analyserer er. [35]

3.3 Mulige feilkilder ved testingen

Når man skal kjøle ned og trykksette rør i tillegg til å utføre strekktester både når det gjelder i praksis og ved hjelp av datasimuleringer, kan det være en mengde feilkilder som kan forårsake unøyaktige målinger og resultater. En feilkilde kan være at de sveiste endene kan være sveist unøyaktig, som kan føre til at forseglingen av rørene ikke er tett. Dette kan føre til trykktap og man vil få unøyaktige og feil spennings- og tøyningmålinger når man setter på et innvendig trykk. En simulering ved hjelp av programvare vil i dette tilfellet være mindre sensitiv for slike feilkilder, siden man enkelt kan tette 3D-modellen og kvalitetssikre den ved hjelp av innebygde verktøy i programvaren. En annen feilkilde i praksis kan være at man leser av feil trykk eller at trykkøkingsutstyret viser feil trykk. Her vil også en datasimulering bidra til mer nøyaktige trykkverdier, siden man kan legge inn nøyaktig den trykkverdien man ønsker på et område i 3D-modellen. Det samme gjelder måling av tøyningen og spenning ved hjelp av strekkklapper og måleinstrumenter. Strekkklappene eller måleinstrumentene kan være defekt og kan oppgi feil eller en unøyaktig tøyningsverdi. Tilsvarende vil en datasimulering beregne tøyningen ved hjelp programvarens innebygde matematiske modeller og det vil prinsipielt være umulig for programvaren å beregne og oppgi feil tøyningsverdier, men hvor nøyaktige verdiene er i forhold til virkeligheten er en annen sak. Kort sagt kan man oppsummere med at bruken av simuleringsprogrammer er mer effektivt, økonomisk, fleksibelt, tidsbesparende og mer nøyaktig enn utføring av praktiske forsøk.

Men det er ikke kun positive sider ved å benytte simuleringsprogrammer som SolidWorks. Noen av svakhetene og ulempene til simuleringsprogrammer er at, som navnet tilsier, kun simulerer verden ved hjelp av matematiske tilnærminger og bruker kun antatte verdier og formler som er basert på de fysiske lovene om verdenen vår. Selv om dagens moderne simuleringsprogrammer er nøyaktige og kan simulere de fysiske lovene til verdenen vår på en presis og god måte, er det fortsatt ingen fullverdig erstatning for hva som vil faktisk skje i den virkelige verden ved bruk av praktiske forsøk. Derfor brukes simuleringsprogrammer som et fleksibelt tilleggsverktøy for å forutse og simulere virkelige hendelser og scenarier. En annen svakhet er at simuleringsprogrammer krever en datamaskin som kan prosessere og behandle dataene raskt nok. Derfor må det ofte investeres i en relativt ny og rask datamaskin som har tilstrekkelig prosesseringskraft til å behandle og kjøre simuleringene. I tillegg må også selve simuleringsprogrammet kjøpes inn og utviklerne av simuleringsprogrammet krever ofte at man må kjøpe dyre tidsbegrensede lisenser for at man skal få tilgang til og kunne bruke programmet.

Når det gjelder de praktiske strekktestene i en strekkprøvemaskin, kan det også være en mengde feilkilder. I vårt tilfelle måtte vi skjøte prøvestykkene i tillegg til å bore og bolte tvers igjennom for å feste prøvestykkene til skjøtene. Hvis boltene ikke er festet tilstrekkelig og dratt til med riktig moment, kan dette bidra til feil kraftfordeling som kan bidra til at det blir spenninger og sprekkvekst i hullet. Dette kan til slutt føre til brudd i feil del av prøvestykket eller i boltene som vil føre til at strekktesten vi bli mislykket. Det kan også finnes feilkilder relatert til frysekammeret, nitrogentanken, temperaturmålere og andre måleinstrumenter. Frysekammeret kan for eksempel ikke være isolert godt nok eller temperaturmålere kan vise feil temperatur i frysekammeret. Det kan også være feil forbundet med trykk tanken med flytende nitrogen og tilhørende ventiler som kan føre til ujevn tilførsel av nitrogen til frysekammeret. Dette kan bidra til at prøvestykkene ikke blir tilstrekkelig nedkjølt og kan ha en feil temperatur når man utfører strekktester. Måleinstrumenter som måler tøyning, last og spenning kan også ha feil og vise unøyaktige verdier. En annen feilkilde kan også være at prøvestykkene man tester kan ha en unøyaktig form og geometri, i tillegg til sprekker og overflatefeil. Andre feilkilder kan være feil relatert til programvaren som en datamaskin bruker for å starte, kontrollere og behandle data og informasjon fra strekkprøvemaskinen.



Figur 3-29 – Komponenter og utstyr som kan virke som feilkilder og bidra til unøyaktige målinger og resultater når man utfører strekktester.

4. Resultater

Her presenteres resultatene fra simuleringene som ble gjort på rørene i SolidWorks. Verdiene er hentet fra SolidWorks sine egne beregninger og simuleringmetoder som er basert på de innlagte verdiene for materialegenskapene, temperaturen til rørene, påsatt trykk i rørene og rørdimensjonene. De innlagte verdiene som har blitt brukt i simuleringene av rørene er opplyst i resultattabellene nedenfor i kapittel 4.1.

I resultattabellene ser man en oversikt over testresultatene fra simuleringene med de forskjellige plastrørene. I tabellene ser man blant annet en oversikt over beregnet maksimal trykk-kapasitet til rørene, påsatt trykk, E-modulen ved den aktuelle temperaturen i tillegg til minimums- og maksimumsverdier for spenningen, von-mises spenningen og tøyningen.

4.1 Resultater fra simuleringforsøkene av 3D-modellerte rør

4.1.1 Tabeller

Tabell 4-1 - Trykk, E-modul og spennings- og tøyningsverdier fra simuleringen av HDPE-røret. [35]

HDPE			
Temperatur	20°C	-25°C	-70°C
Maks. trykk (P_{maks}) [bar]	20	20	20
Trykk (P) [bar]	10	10	10
E-modul (E) [Mpa]	3107	3707	4683
Maks. spenning (σ , Von-Mises) [Mpa]	1,8	1,8	1,8
Min. spenning (σ , Von-Mises) [Mpa]	0,05965	0,05965	0,05965
Maks. spenning ($\sigma=E*\epsilon$) [Mpa]	1,4394731	1,4394281	1,4395542
Min. spenning ($\sigma=E*\epsilon$) [Mpa]	0,027733082	0,027732067	0,027732726
Maks. tøyning (ϵ)	0,0004633	0,0003883	0,0003074
Min. tøyning (ϵ)	0,000008926	0,000007481	0,000005922

Tabell 4-2 - Trykk, E-modul og spennings- og tøyningsverdier fra simuleringen av PE-røret. [35]

PE			
Temperatur	20°C	-25°C	-70°C
Maks. trykk (P_{maks}) [bar]	25	25	25
Trykk (P) [bar]	12,5	12,5	12,5
E-modul (E) [Mpa]	1110	2100	3074
Maks. spenning (σ , Von-Mises) [Mpa]	1,71	1,71	1,71
Min. spenning (σ , Von-Mises) [Mpa]	0,0002088	0,0002088	0,0002088
Maks. spenning ($\sigma=E*\epsilon$) [Mpa]	1,12332	1,12392	1,1238544
Min. spenning ($\sigma=E*\epsilon$) [Mpa]	0,122544	0,122556	0,12256038
Maks. tøyning (ϵ)	0,001012	0,0005352	0,0003656
Min. tøyning (ϵ)	0,0001104	0,00005836	0,00003987

Tabell 4-3 - Trykk, E-modul og spennings- og tøyningsverdier fra simuleringen av PP-røret. [35]

PP			
Temperatur	20°C	-25°C	-70°C
Maks. trykk (P_{maks}) [bar]	30	30	30
Trykk (P) [bar]	15	15	15
E-modul (E) [Mpa]	1510	2669	3598
Maks. spenning (σ , Von-Mises) [Mpa]	4,228	4,228	4,228
Min. spenning (σ , Von-Mises) [Mpa]	0,002115	0,002115	0,002115
Maks. spenning ($\sigma=E*\epsilon$) [Mpa]	1,6912	1,6910784	1,69106
Min. spenning ($\sigma=E*\epsilon$) [Mpa]	0,225292	0,22531698	0,22530676
Maks. tøyning (ϵ)	0,00112	0,0006336	0,00047
Min. tøyning (ϵ)	0,0001492	0,00008442	0,00006262

Tabell 4-4 - Trykk, E-modul og spennings- og tøyningsverdier fra simuleringen av PVC-røret. [35]

PVC			
Temperatur	20°C	-25°C	-70°C
Maks. trykk (P_{maks}) [bar]	60	60	60
Trykk (P) [bar]	30	30	30
E-modul (E) [Mpa]	1256	2428	2826
Maks. spenning (σ , Von-Mises) [Mpa]	4,043	4,043	4,043
Min. spenning (σ , Von-Mises) [Mpa]	0,006534	0,006534	0,006534
Maks. spenning ($\sigma=E*\epsilon$) [Mpa]	2,755664	2,75578	2,7556326
Min. spenning ($\sigma=E*\epsilon$) [Mpa]	0,531916	0,5319748	0,5318532
Maks. tøyning (ϵ)	0,002194	0,001135	0,0009751
Min. tøyning (ϵ)	0,0004235	0,0002191	0,0001882

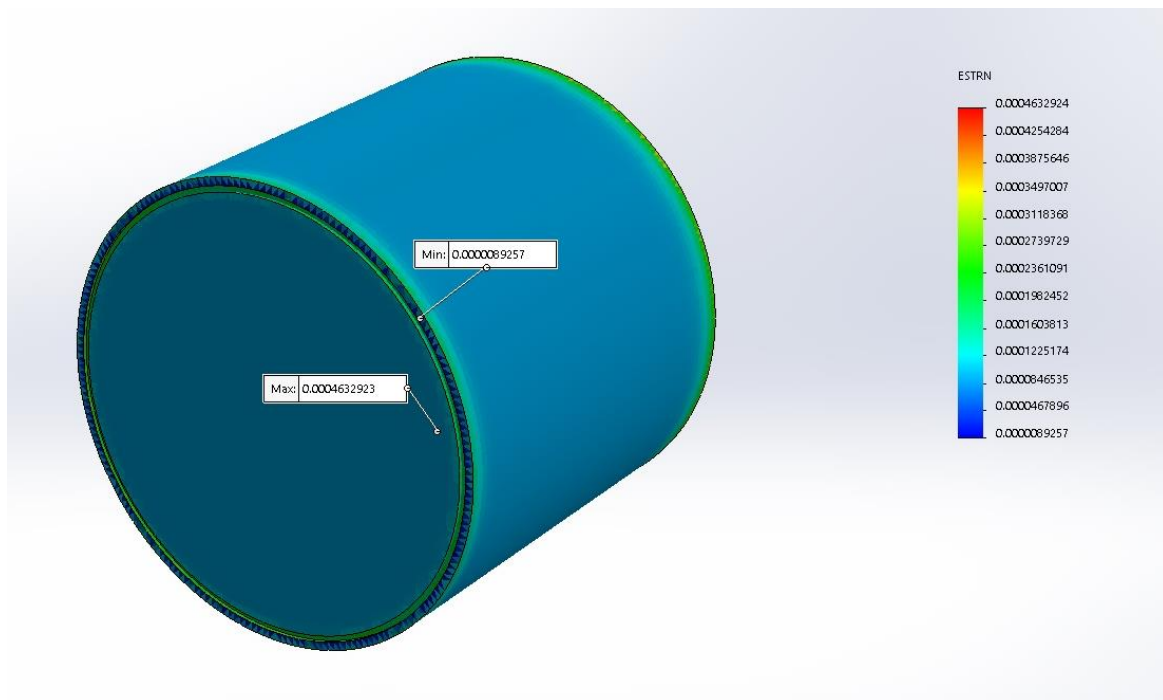
Tabell 4-5 - Beregning av lengdeendringen til plastrør når temperaturen går fra 20 °C til -25 °C. [25] [37] [36]

Rør nr.	Plastmateriale	α	L_0	ΔT (-25°C -20°C)	ΔL
1	HDPE	126 – 198 [$10^{-6}K^{-1}$]	290 mm	-45K	-2,58 mm
2	PE	126 – 198 [$10^{-6}K^{-1}$]	300 mm	-45K	-2,67 mm
3	PP	122 – 188 [$10^{-6}K^{-1}$]	290 mm	-45K	-2,45 mm
4	PVC	100 – 150 [$10^{-6}K^{-1}$]	300 mm	-45K	-2,03 mm

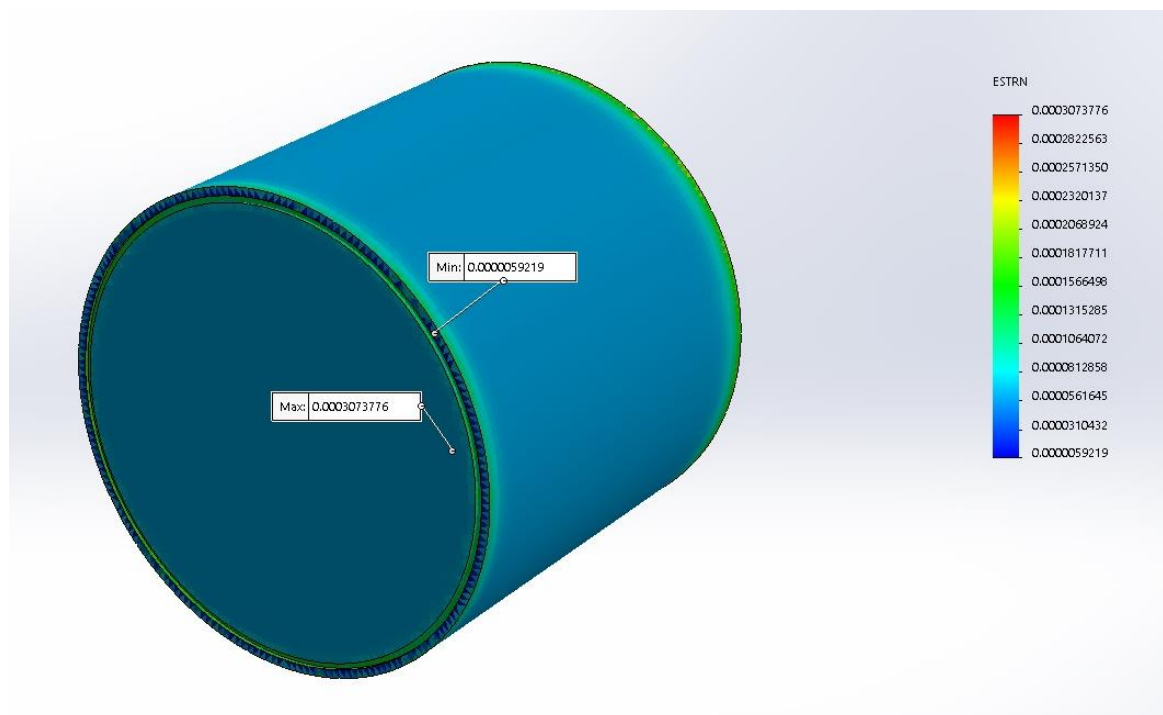
Tabell 4-6 - Beregning av lengdeendringen til plastrør når temperaturen går fra 20 °C til -70 °C.
[25] [37] [36]

Rør nr.	Plastmateriale	α	L_0	ΔT (-70°C -20°C)	ΔL
1	HDPE	126 – 198 [$10^{-6}K^{-1}$]	290 mm	-90K	-5,17 mm
2	PE	126 – 198 [$10^{-6}K^{-1}$]	300 mm	-90K	-5,35 mm
3	PP	122 – 188 [$10^{-6}K^{-1}$]	290 mm	-90K	-4,91 mm
4	PVC	100 – 150 [$10^{-6}K^{-1}$]	300 mm	-90K	-4,10 mm

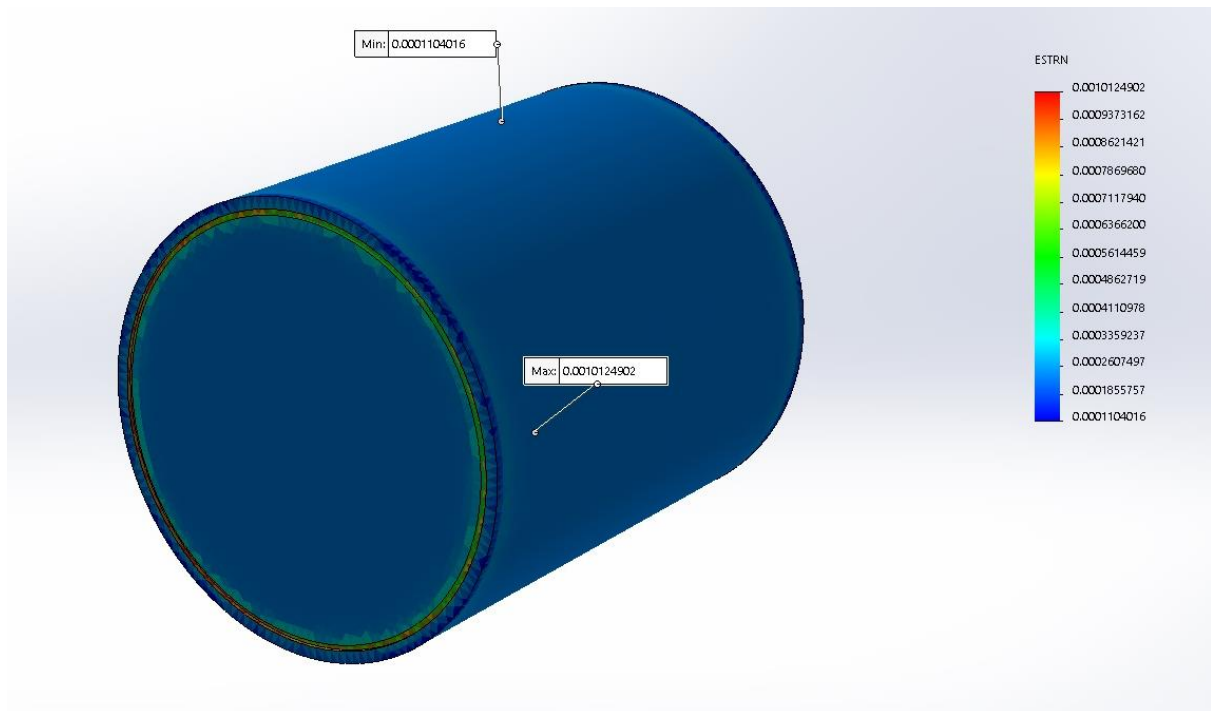
4.1.2 Tøyningsplot



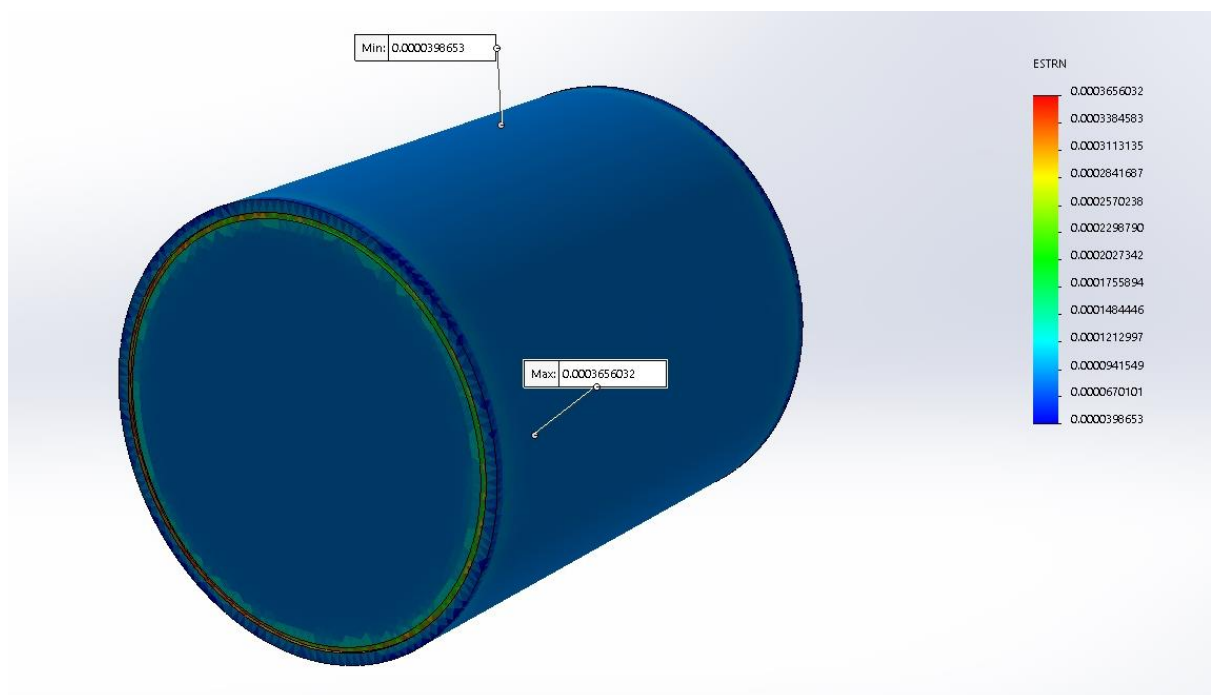
Figur 4-1 - Tøyningsplottet til HDPE-røret ved 20°C. [35]



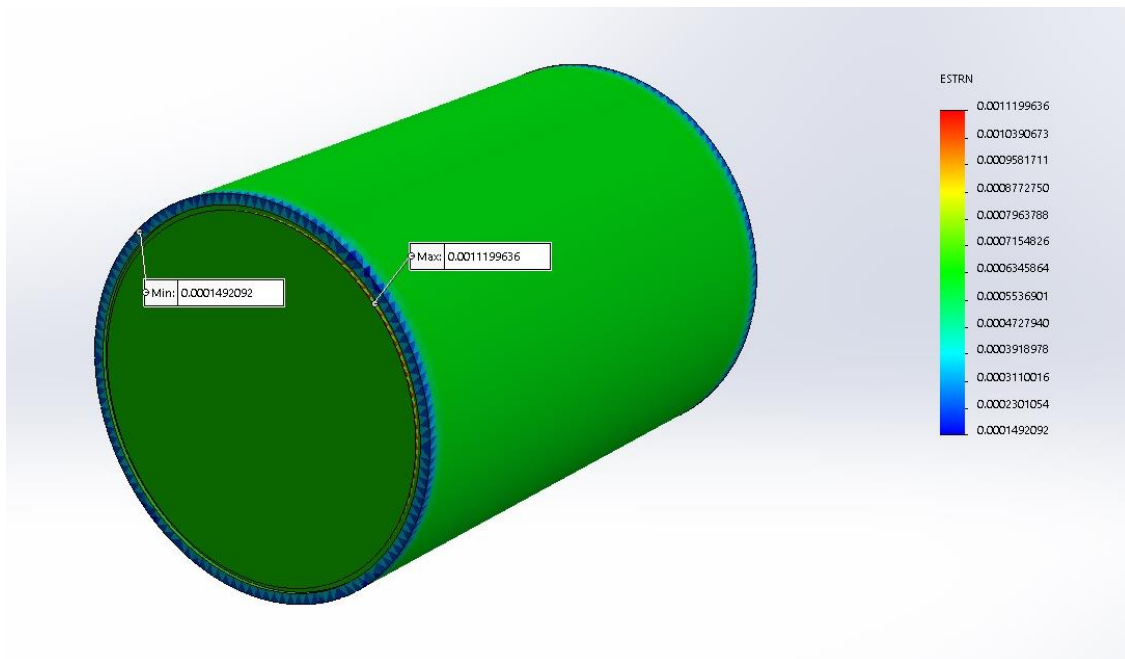
Figur 4-2 - Tøyningsplottet til HDPE-røret ved -70°C. [35]



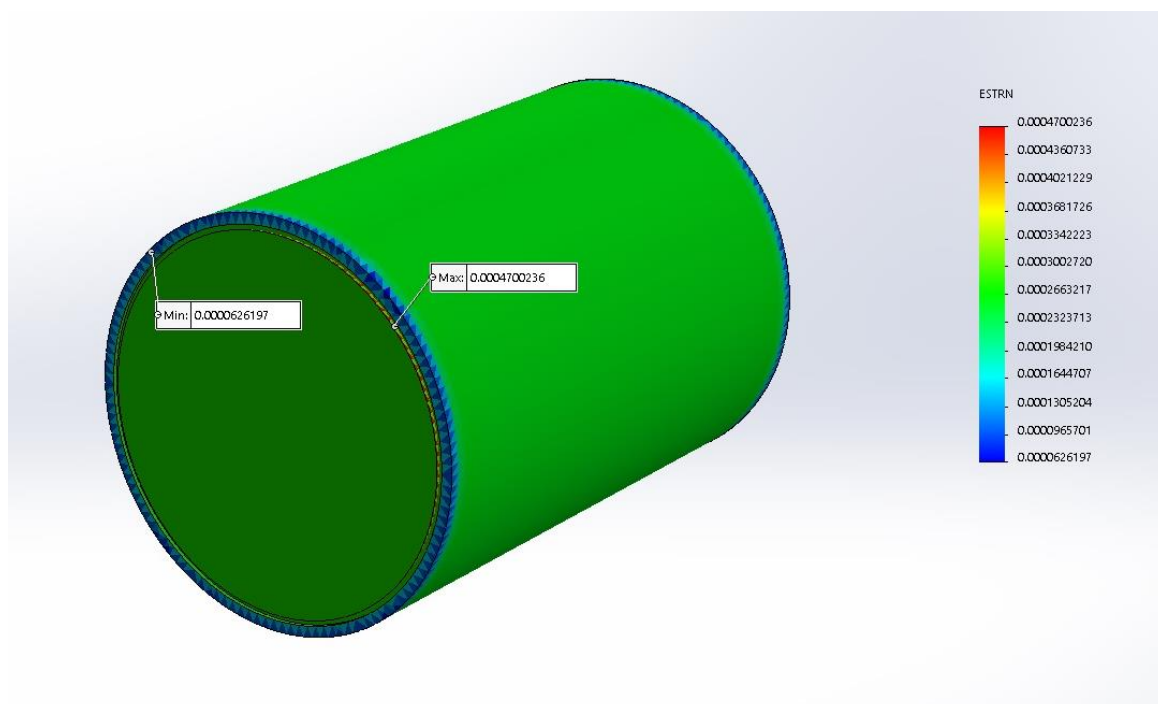
Figur 4-3 - Tøyningsplottet til PE-røret ved 20°C. [35]



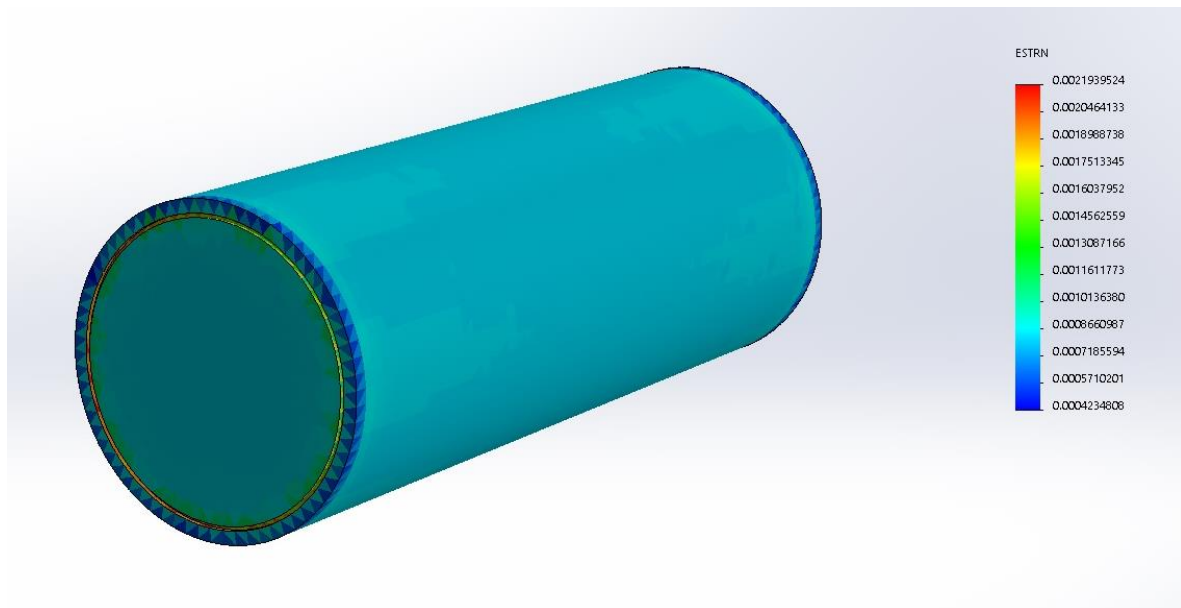
Figur 4-4 - Tøyningsplottet til PE-røret ved -70°C. [35]



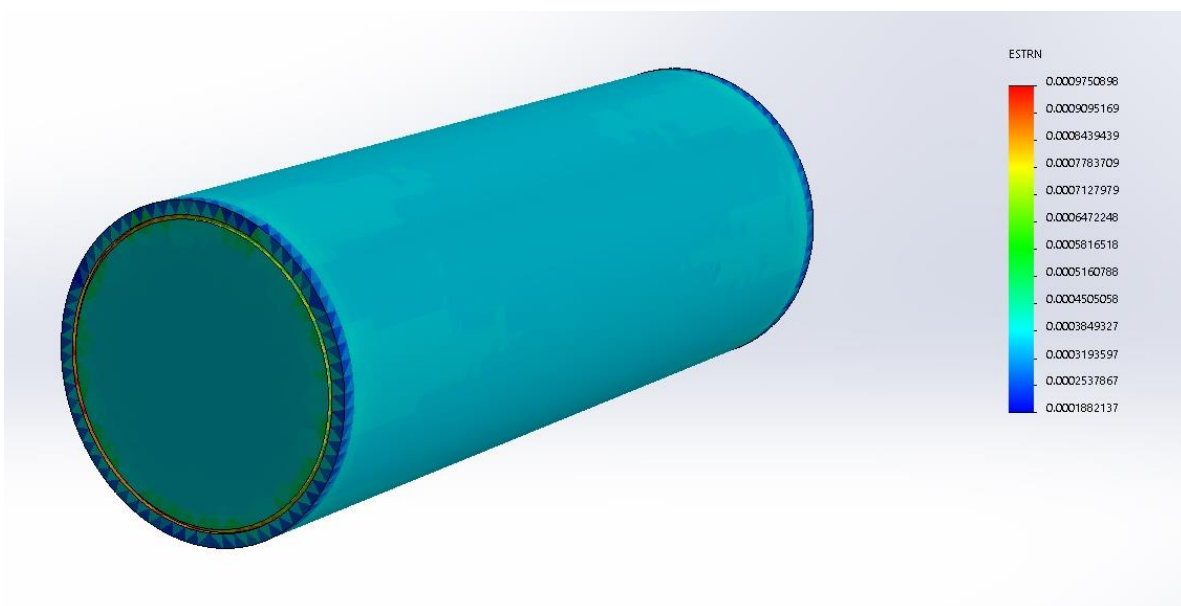
Figur 4-5 - Tøyningsplottet til PP-røret ved 20°C. [35]



Figur 4-6 - Tøyningsplottet til PP-røret ved -70°C. [35]



Figur 4-7 - Tøyningsplottet til PVC-røret ved 20°C. [35]



Figur 4-8 - Tøyningsplottet til PVC-røret ved -70°C. [35]

4.2 Resultater fra simuleringsforsøkene av strekktester

4.2.1 Tabeller

Tabell 4-7 - Påsatt kraft, E-modul i tillegg til spennings- og tøyningsverdier fra simuleringen av strekktesten med prøvestykket laget av HDPE. [35]

HDPE			
Temperatur	20°C	-25°C	-70°C
Påsatt kraft [N]	1000	1000	1000
E-modul (E) [MPa]	3107	3707	4683
Maks. spenning (σ , Von-Mises) [MPa]	16,74	110,81	258,71
Min. spenning (σ , Von-Mises) [MPa]	1,62	0,61	0,71
Maks. spenning ($\sigma=E*\epsilon$) [MPa]	10,70	75,66	178,60
Min. spenning ($\sigma=E*\epsilon$) [MPa]	1,66	0,86	1,15
Maks. tøyning (ϵ)	0,003442	0,02041	0,03813
Min. tøyning (ϵ)	0,0005329	0,0002318	0,0002453
Tøyning i midten (ϵ)	0,003325	0,002787	0,002206

Tabell 4-8 - Påsatt kraft, E-modul i tillegg til spennings- og tøyningsverdier fra simuleringen av strekktesten med prøvestykket laget av PE. [35]

PE			
Temperatur	20°C	-25°C	-70°C
Påsatt kraft [N]	1000	1000	1000
E-modul (E) [MPa]	1110	2100	3074
Maks. spenning (σ , Von-Mises) [MPa]	12,46	68,83	180,24
Min. spenning (σ , Von-Mises) [MPa]	0,62	1,20	0,21
Maks. spenning ($\sigma=E*\epsilon$) [MPa]	10,74	46,64	124,50
Min. spenning ($\sigma=E*\epsilon$) [MPa]	0,94	2,60	0,86
Maks. tøyning (ϵ)	0,009673	0,02221	0,0405
Min. tøyning (ϵ)	0,0008478	0,001234	0,0002807
Tøyning i midten (ϵ)	0,009497	0,00502	0,003429

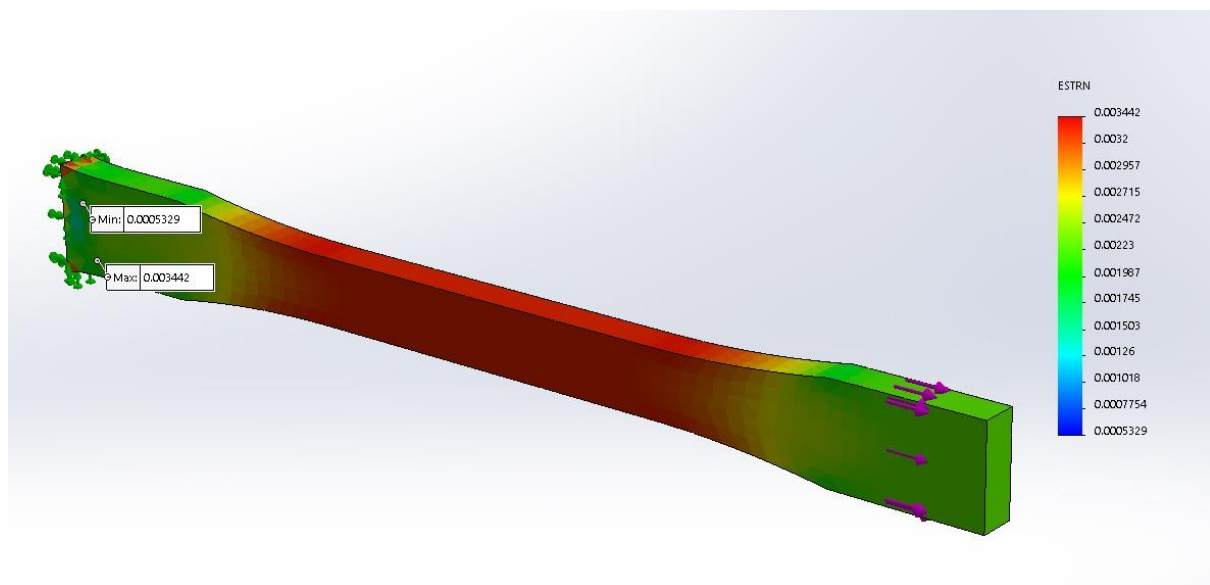
Tabell 4-9 - Påsatt kraft, E-modul i tillegg til spennings- og tøyningsverdier fra simuleringen av strekktesten med prøvestykket laget av PP. [35]

PP			
Temperatur	20°C	-25°C	-70°C
Påsatt kraft [N]	1000	1000	1000
E-modul (E) [MPa]	1510	2669	3598
Maks. spenning (σ , Von-Mises) [MPa]	11,27	74,80	184,61
Min. spenning (σ , Von-Mises) [MPa]	5,21	0,88	0,56
Maks. spenning ($\sigma=E*\epsilon$) [MPa]	7,50	28,60	73,33
Min. spenning ($\sigma=E*\epsilon$) [MPa]	3,80	1,91	0,65
Maks. tøyning (ϵ)	0,004945	0,01071	0,02038
Min. tøyning (ϵ)	0,002497	0,000715	0,0001802
Tøyning i midten (ϵ)	0,004852	0,002745	0,002036

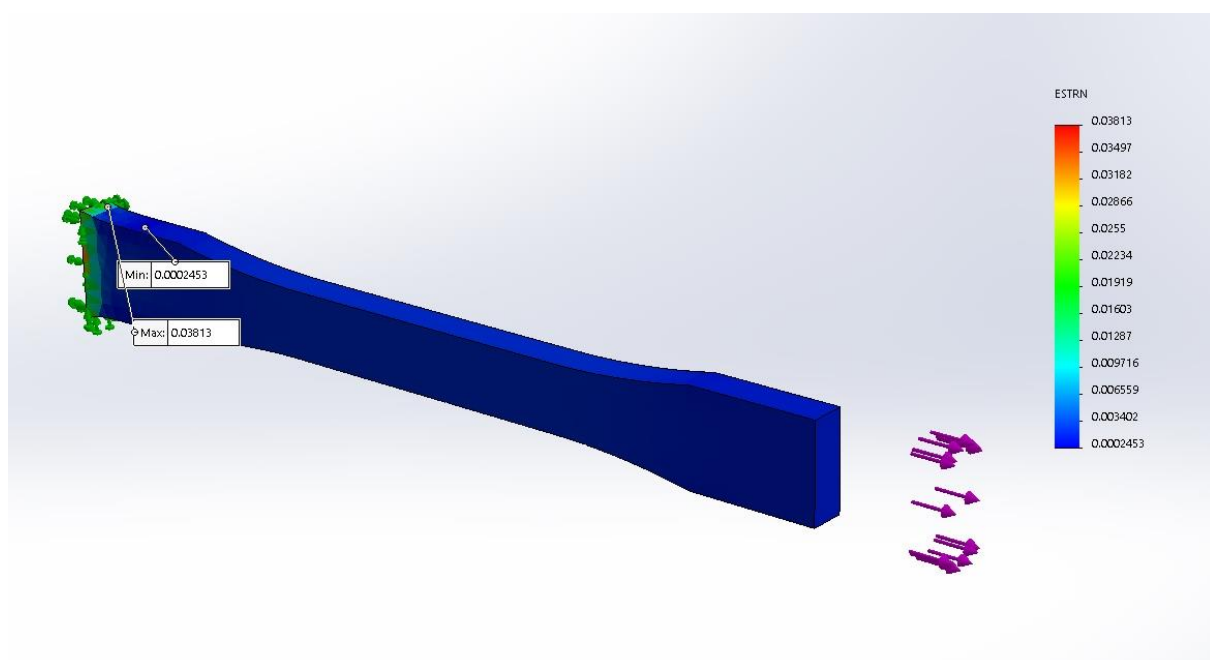
Tabell 4-10 - Påsatt kraft, E-modul i tillegg til spennings- og tøyningsverdier fra simuleringen av strekktesten med prøvestykket laget av PVC. [35]

PVC			
Temperatur	20°C	-25°C	-70°C
Påsatt kraft [N]	1000	1000	1000
E-modul (E) [MPa]	1256	2428	2826
Maks. spenning (σ , Von-Mises) [MPa]	12,11	55,76	116,11
Min. spenning (σ , Von-Mises) [MPa]	0,80	0,87	0,56
Maks. spenning ($\sigma=E*\epsilon$) [MPa]	10,32	36,90	78,87
Min. spenning ($\sigma=E*\epsilon$) [MPa]	1,80	3,01	0,76
Maks. tøyning (ϵ)	0,008213	0,01519	0,02791
Min. tøyning (ϵ)	0,001432	0,001238	0,0002694
Tøyning i midten (ϵ)	0,008064	0,004171	0,003584

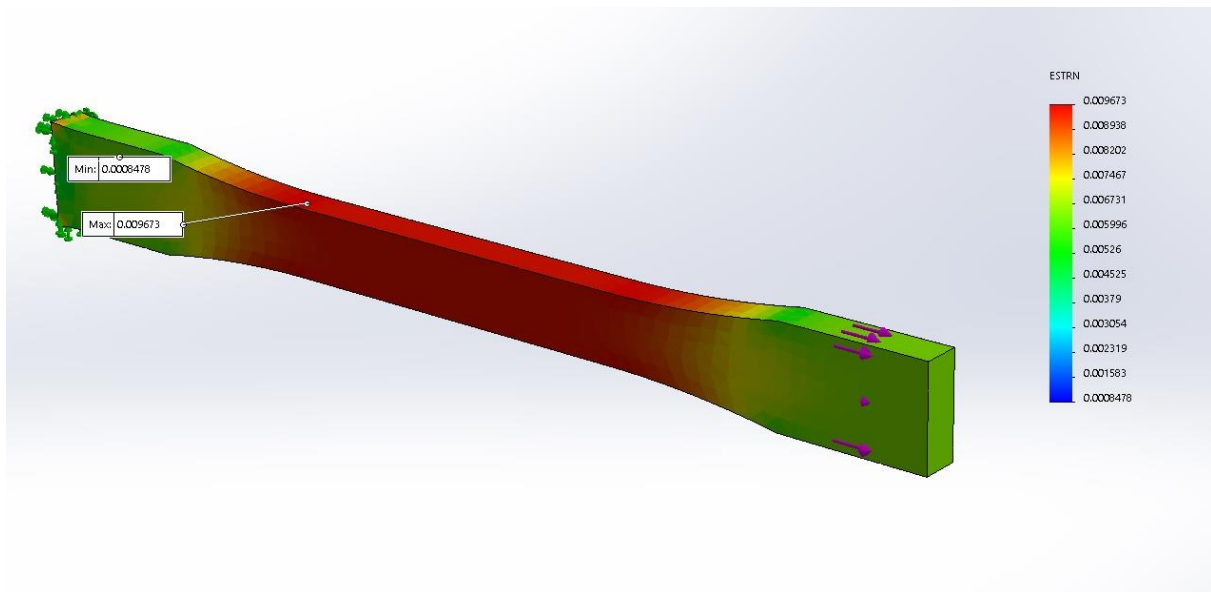
4.2.2 Tøyningsplot



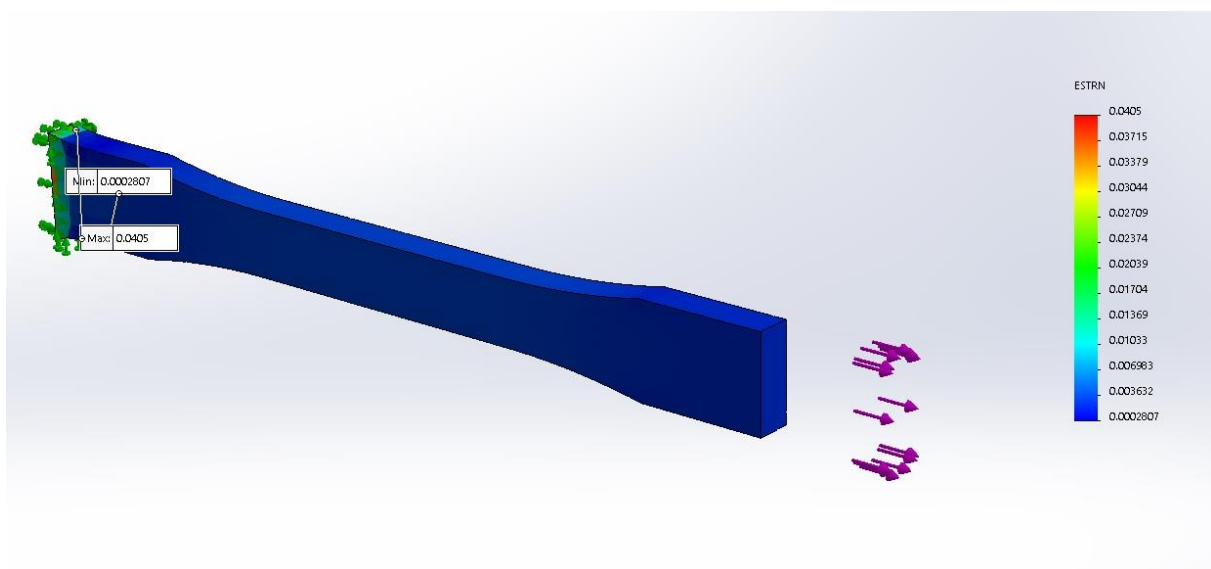
Figur 4-9 – Tøyningsplottet til prøvestykket laget av HDPE ved 20°C. [35]



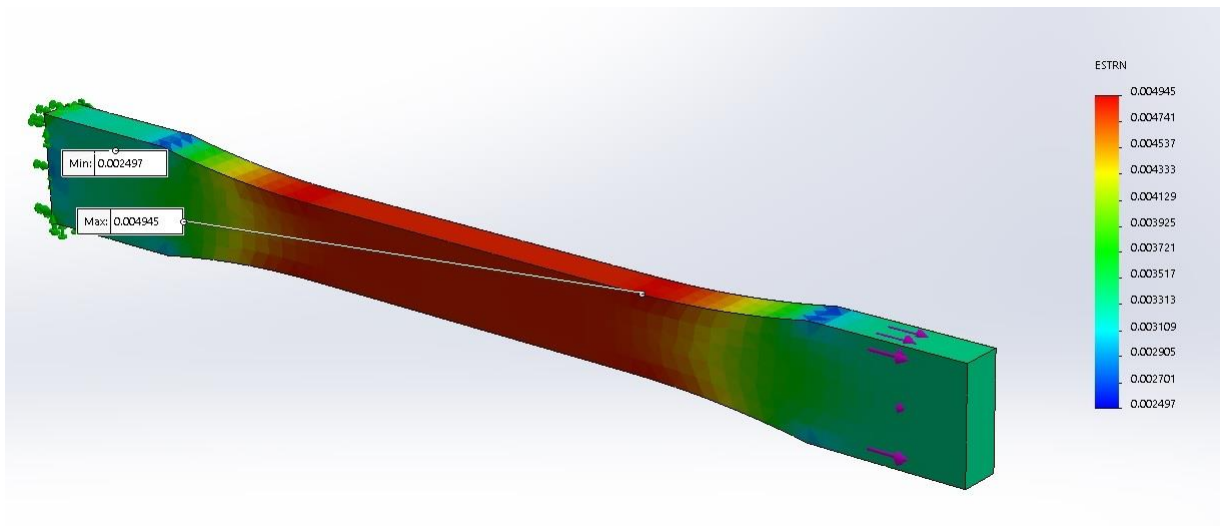
Figur 4-10 – Tøyningsplottet til prøvestykket laget av HDPE ved -70°C. [35]



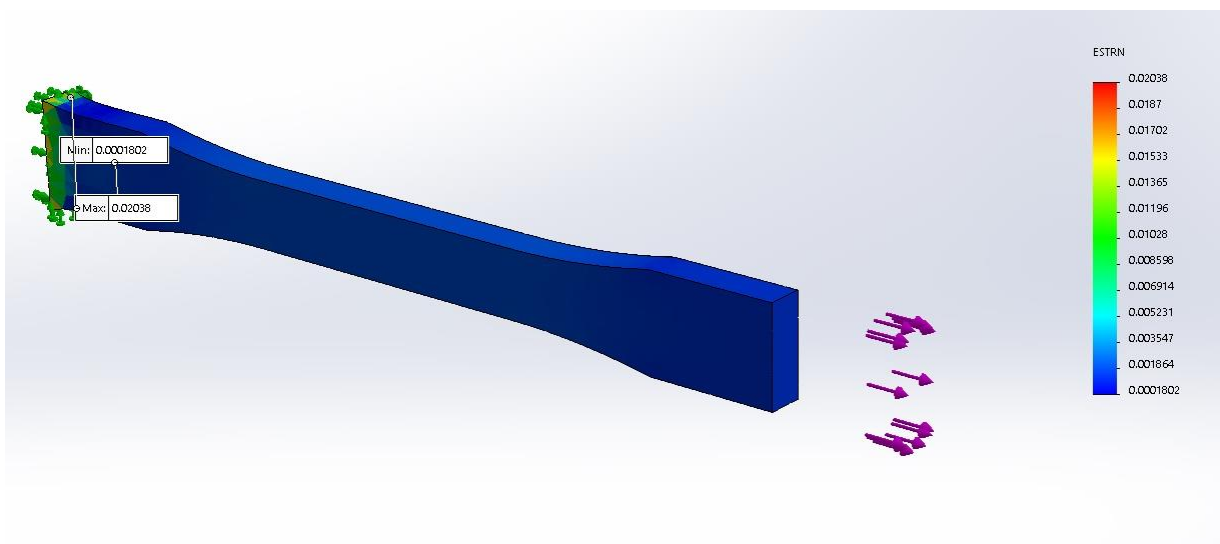
Figur 4-11 - Tøyningsplottet til prøvestykket laget av PE ved 20°C. [35]



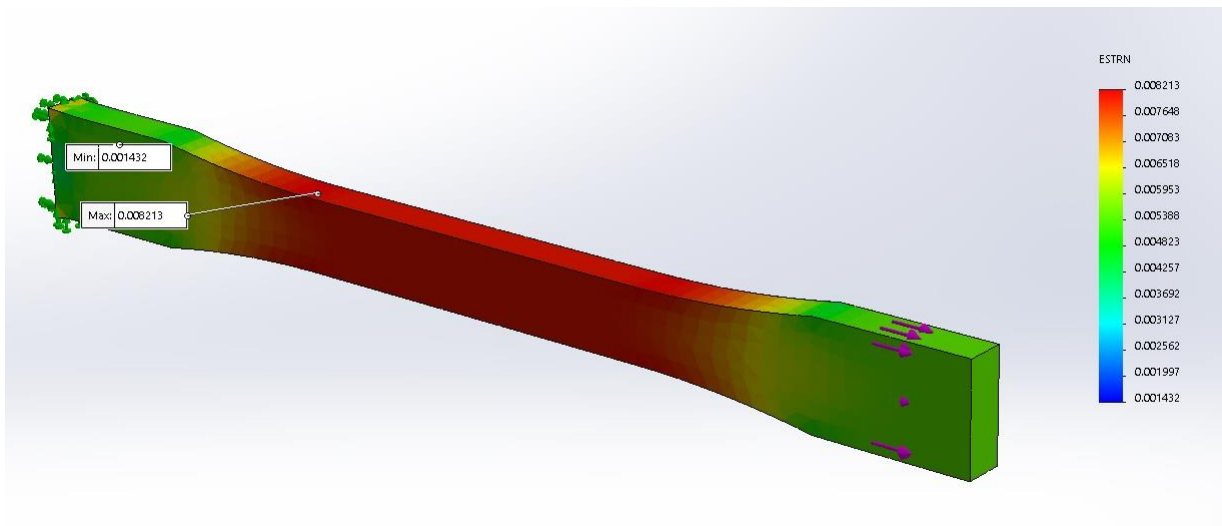
Figur 4-12 - Tøyningsplottet til prøvestykket laget av PE ved -70°C. [35]



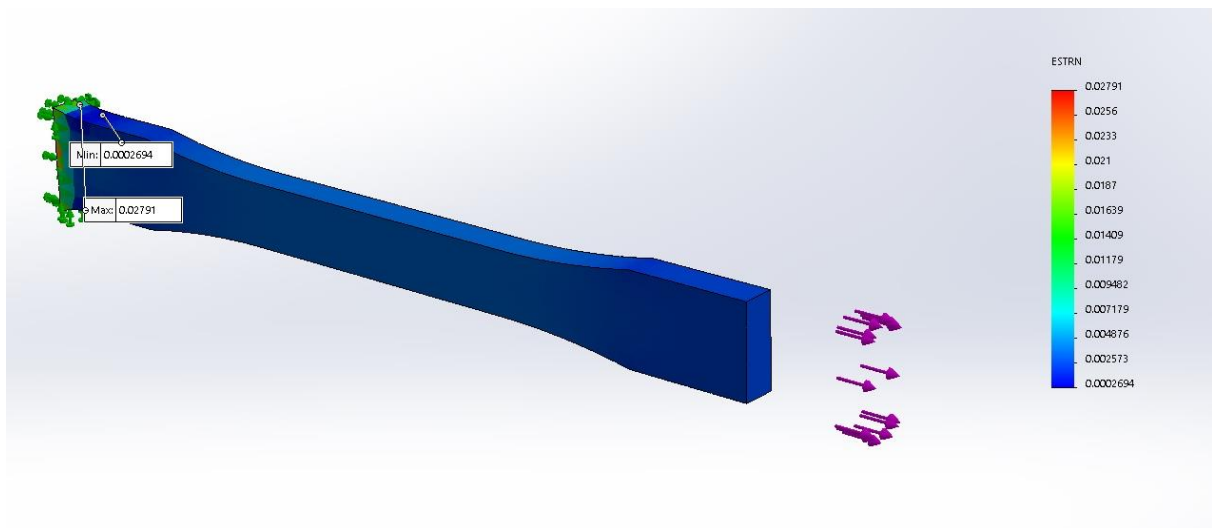
Figur 4-13 - Tøyningsplottet til prøvestykket laget av PP ved 20°C. [35]



Figur 4-14 - Tøyningsplottet til prøvestykket laget av PP ved -70°C. [35]



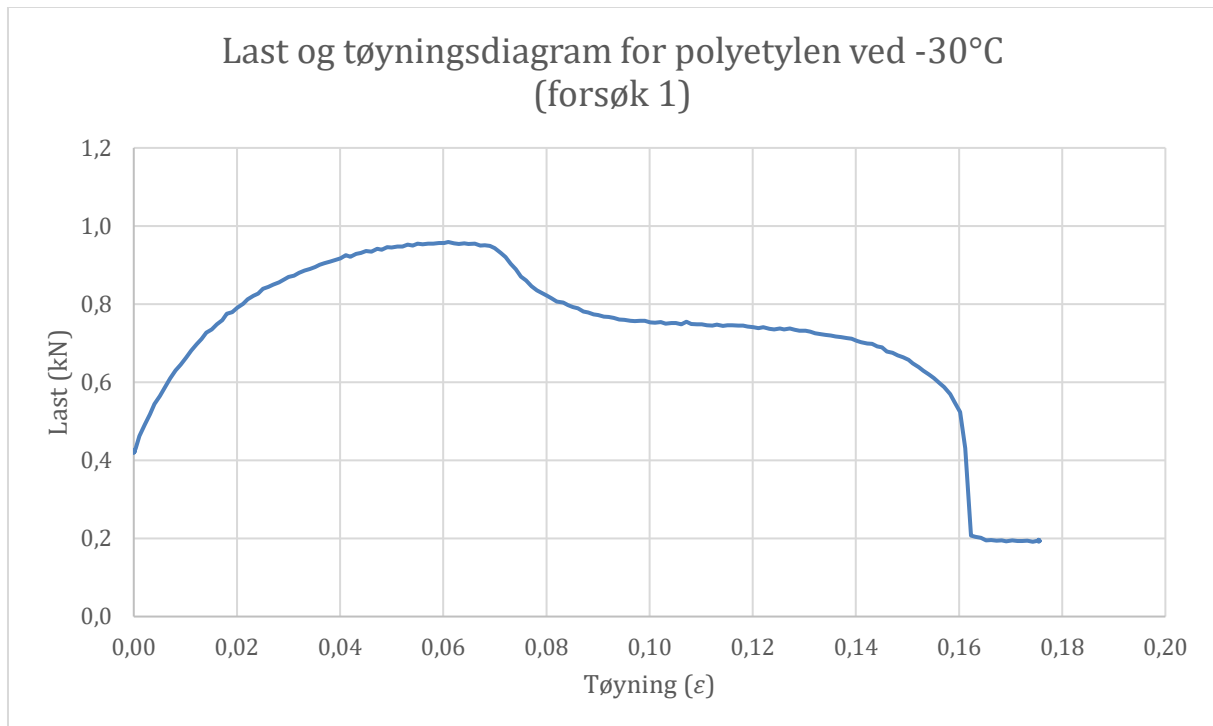
Figur 4-15 - Tøyningsplottet til prøvestykket laget av PVC ved 20°C. [35]



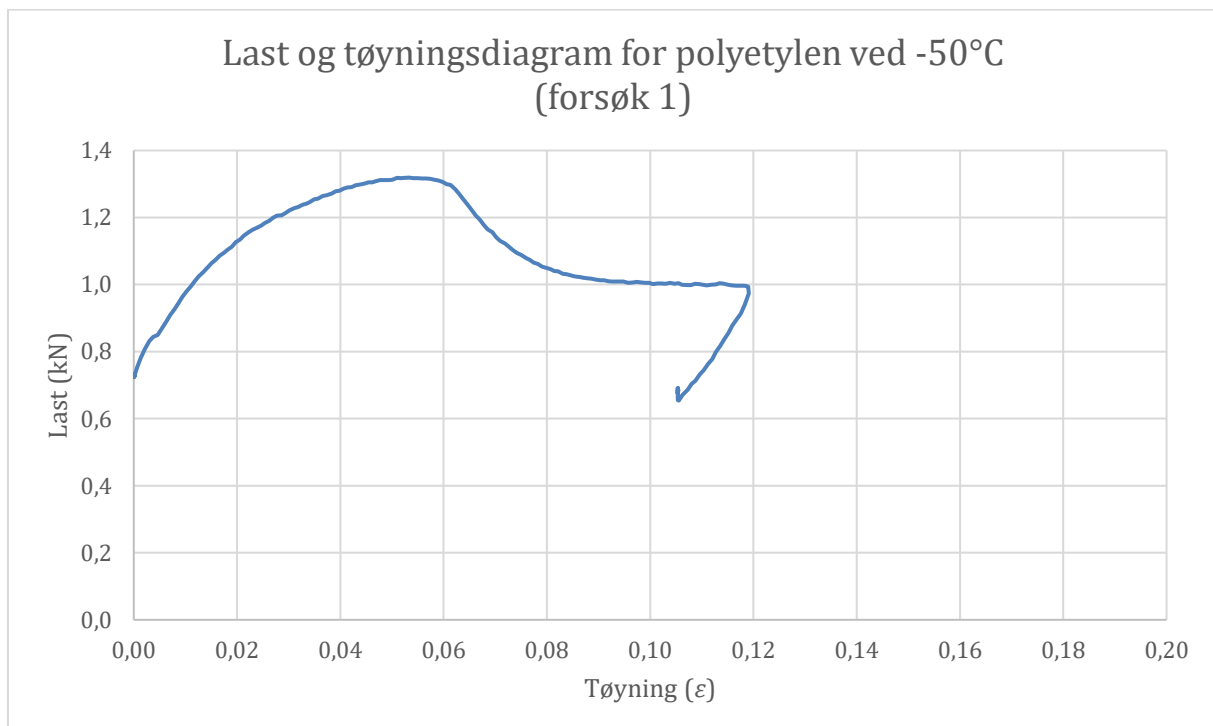
Figur 4-16 - Tøyningsplottet til prøvestykket laget av PVC ved -70°C. [35]

4.3 Resultater fra de praktiske forsøkene

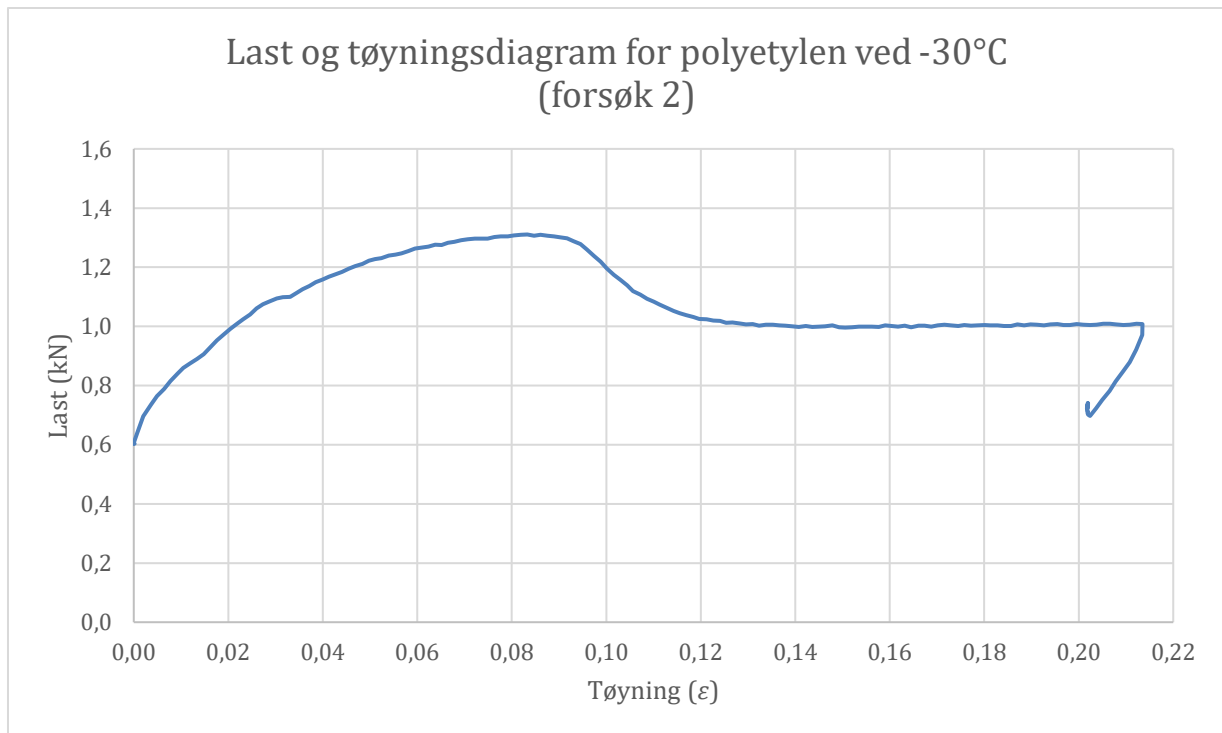
4.3.1 Last og tøyningsdiagrammer fra strekktestene



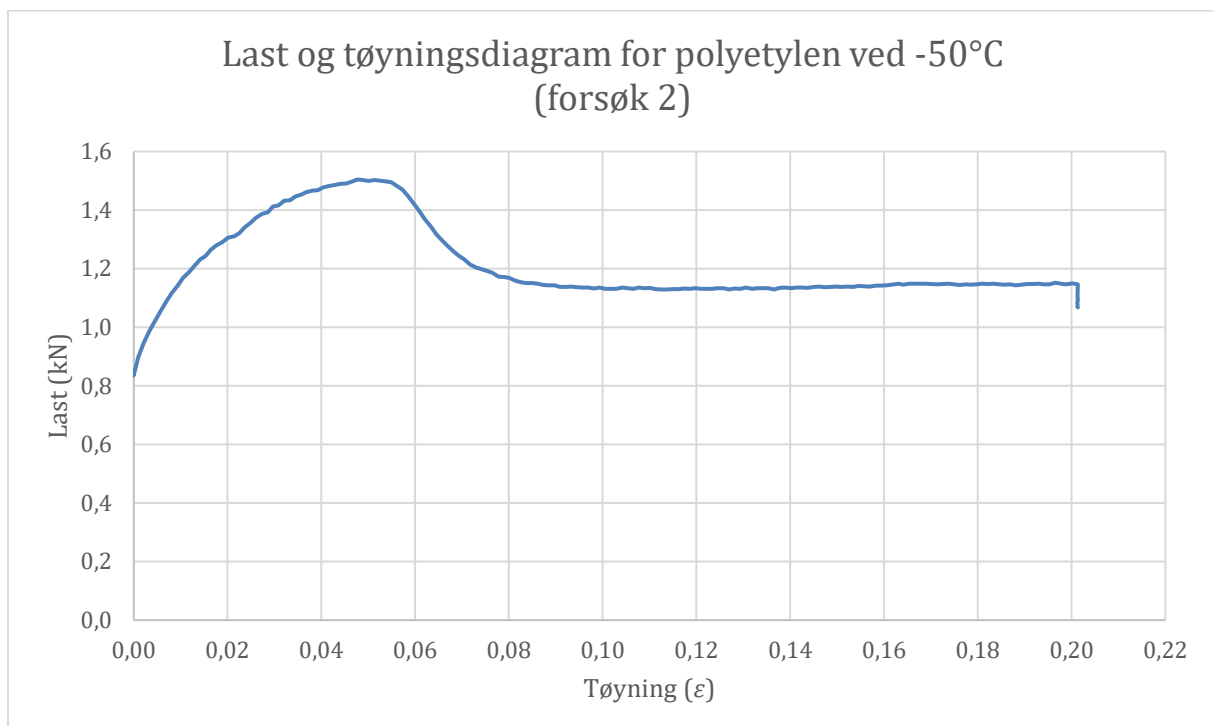
Figur 4-17 - Last og tøyningsdiagram fra strekktesten med polyetylen ved -30°C (forsøk 1).



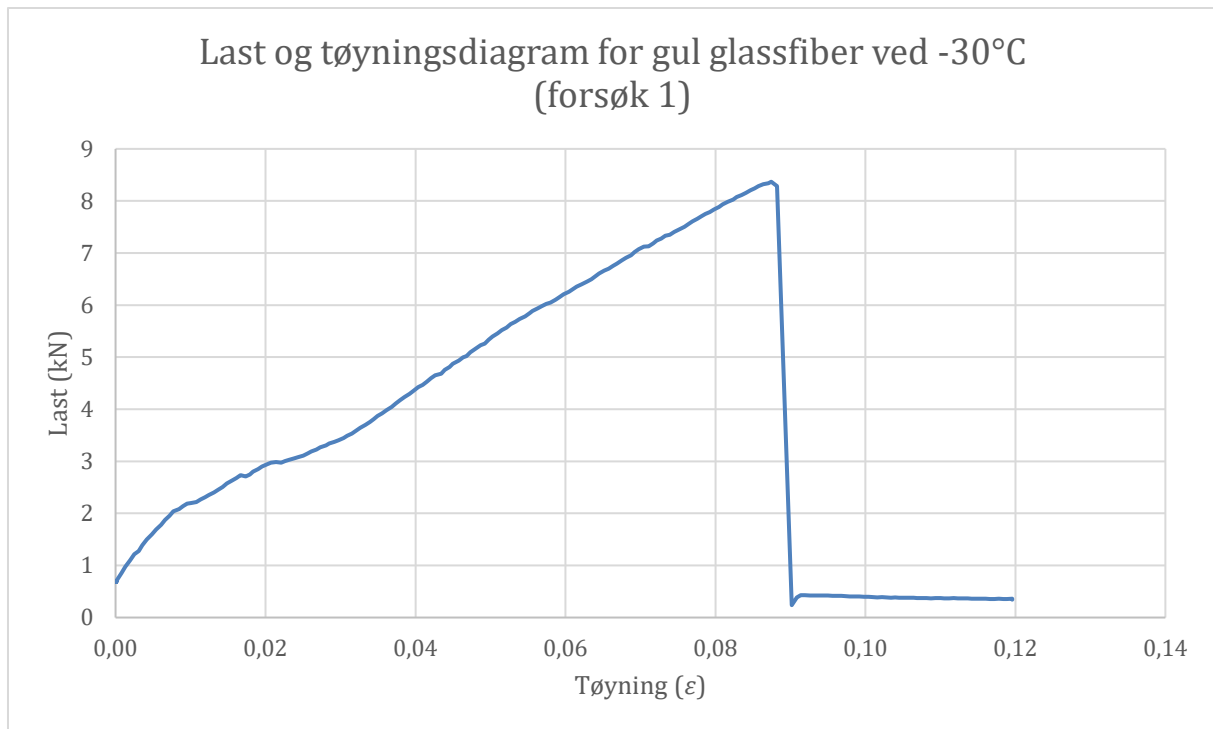
Figur 4-18 - Last og tøyningsdiagram fra strekktesten med polyetylen ved -50°C (forsøk 1).



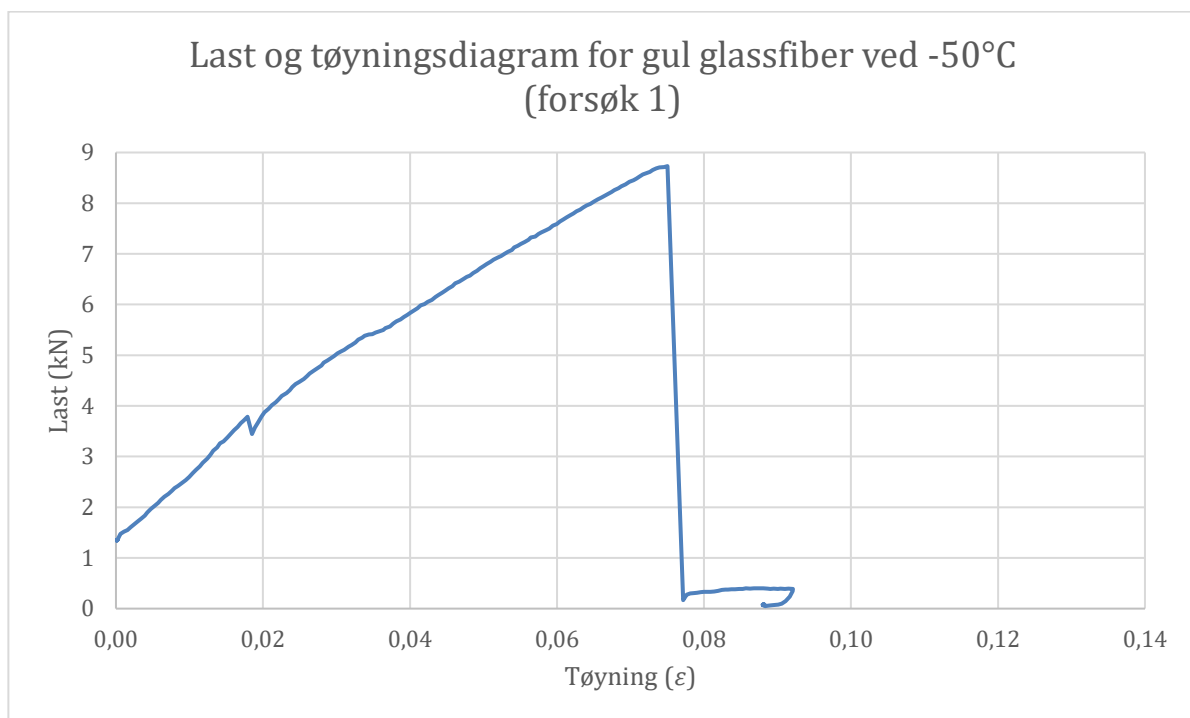
Figur 4-19 - Last og tøyningsdiagram fra strekktesten med polyetylen ved -30°C (forsøk 2).



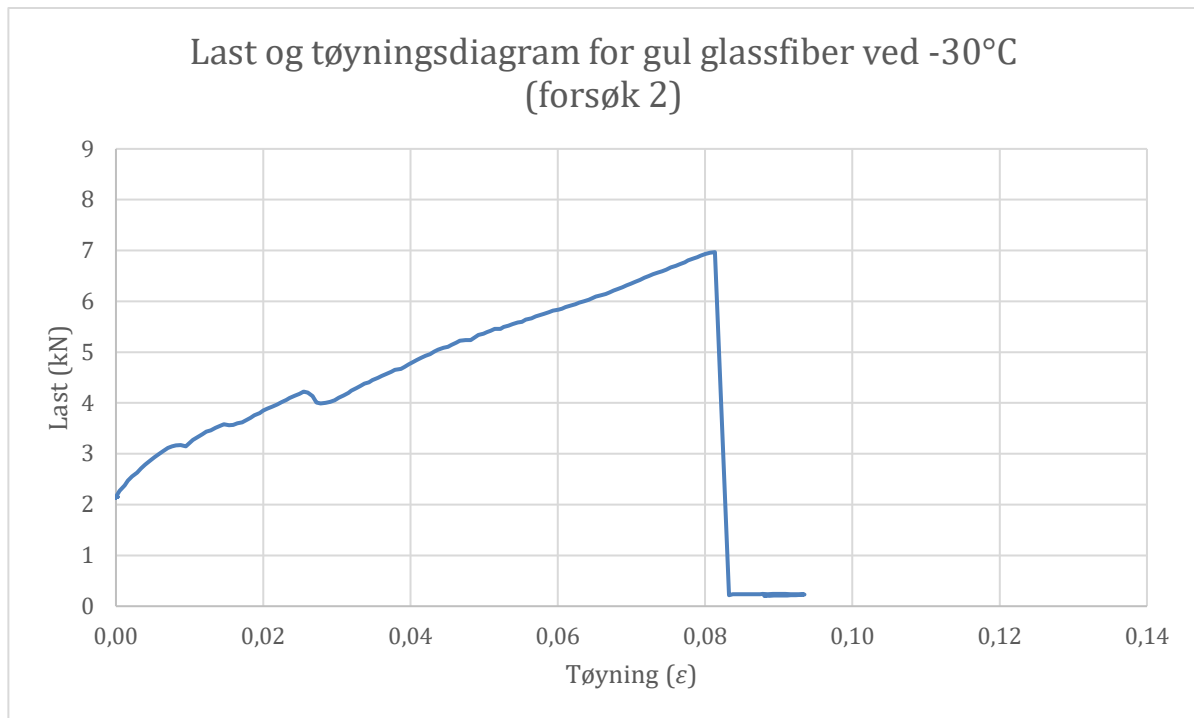
Figur 4-20 - Last og tøyningsdiagram fra strekktesten med polyetylen ved -50°C (forsøk 2).



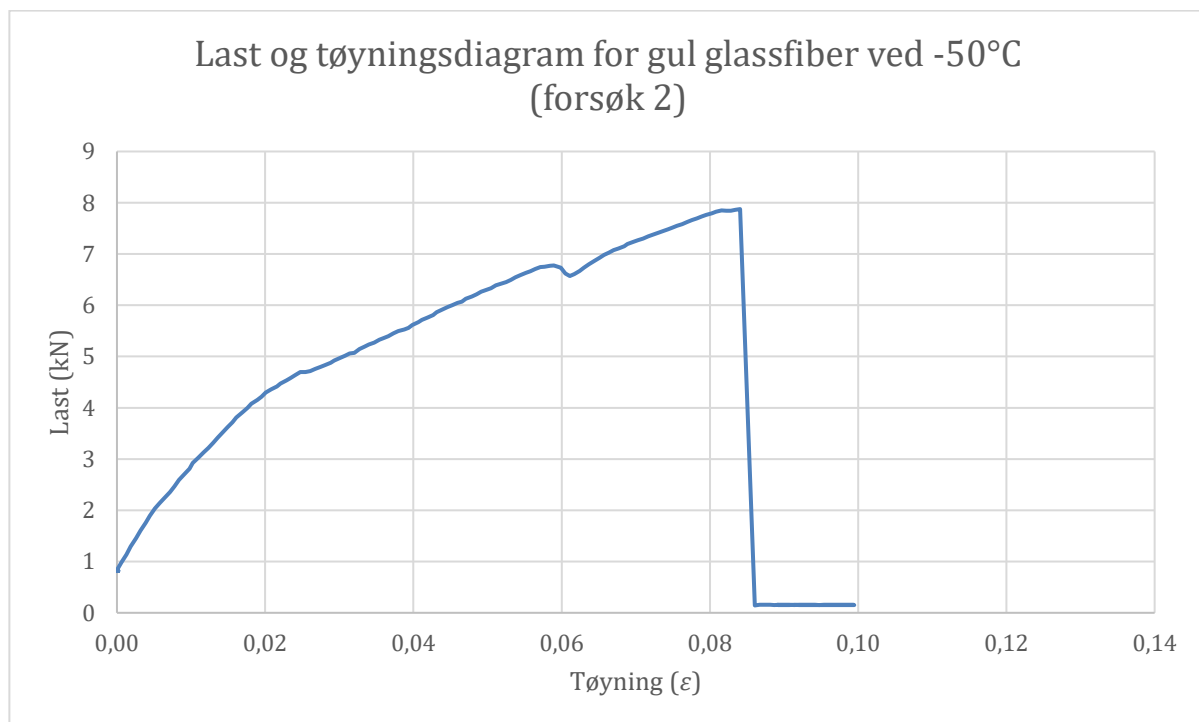
Figur 4-21 - Last og tøyningsdiagram fra strekktesten med gul glassfiber ved -30°C (forsøk 1).



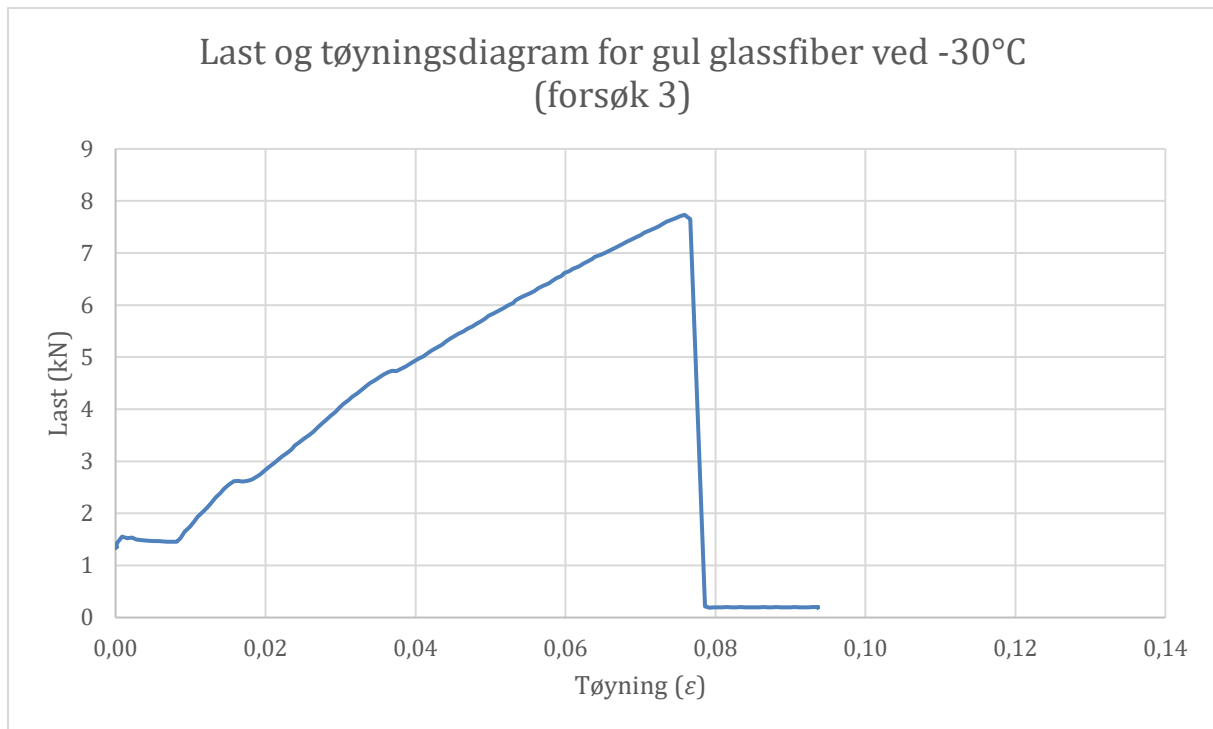
Figur 4-22 - Last og tøyningsdiagram fra strekktesten med gul glassfiber ved -50°C (forsøk 1).



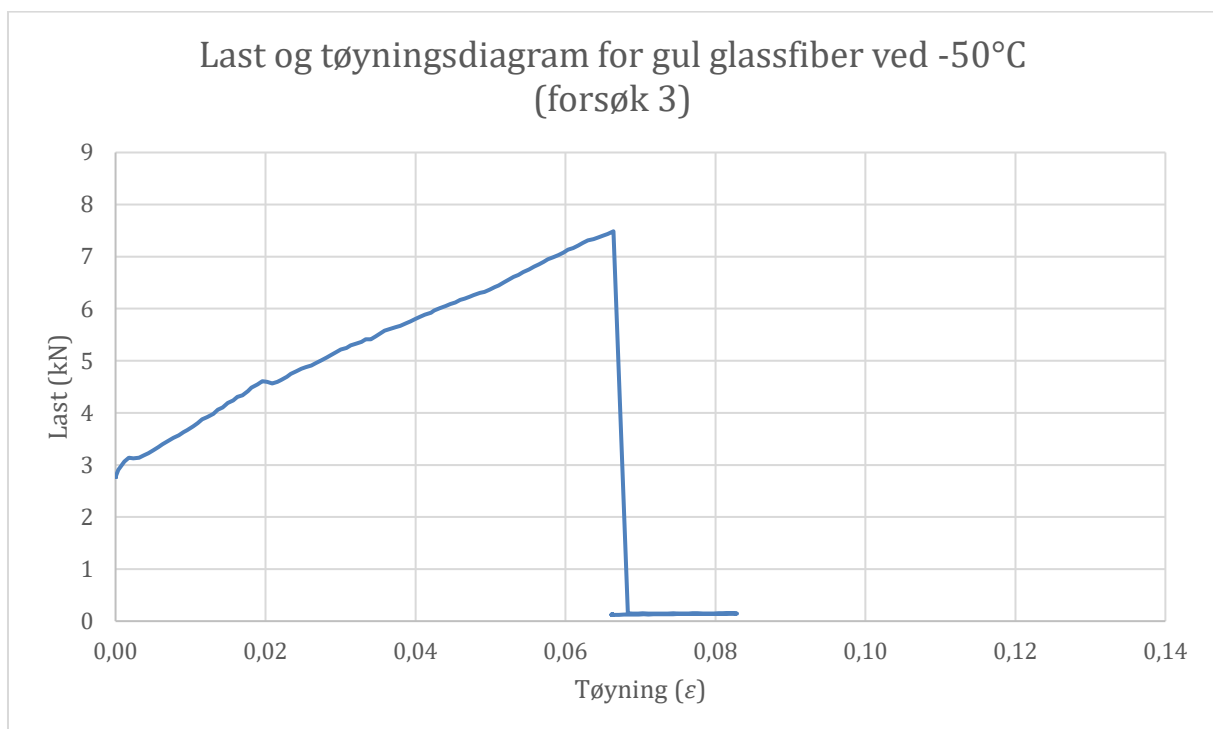
Figur 4-23 - Last og tøyningsdiagram fra strekktesten med gul glassfiber ved -30°C (forsøk 2).



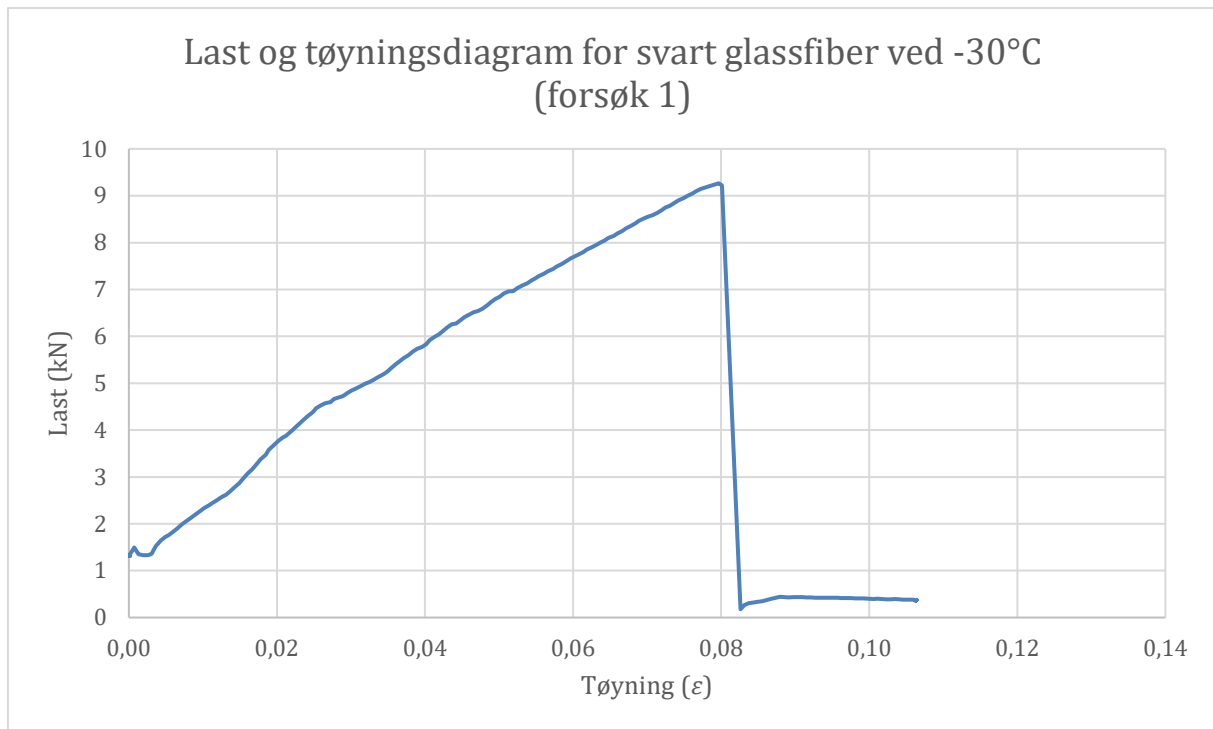
Figur 4-24 - Last og tøyningsdiagram fra strekktesten med gul glassfiber ved -50°C (forsøk 2).



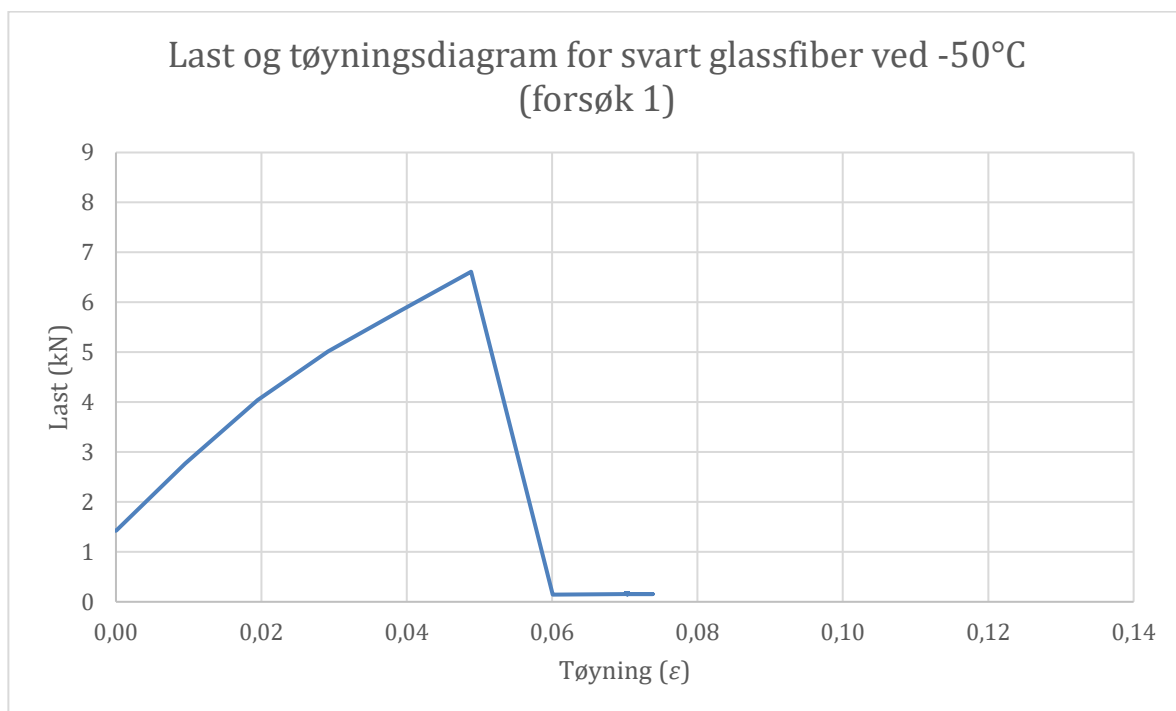
Figur 4-25 - Last og tøyningsdiagram fra strekktesten med gul glassfiber ved -30°C (forsøk 3).



Figur 4-26 - Last og tøyningsdiagram fra strekktesten med gul glassfiber ved -50°C (forsøk 3).



Figur 4-27 - Last og tøyningsdiagram fra strekktesten med svart glassfiber ved -30°C (forsøk 1).

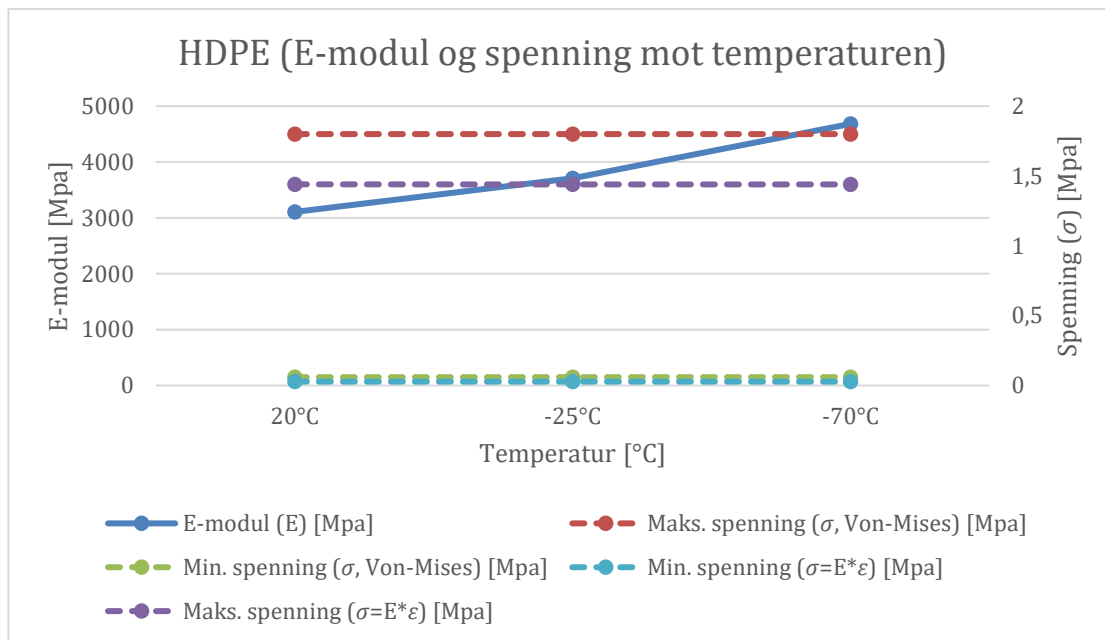


Figur 4-28 - Last og tøyningsdiagram fra strekktesten med svart glassfiber ved -50°C (forsøk 1).

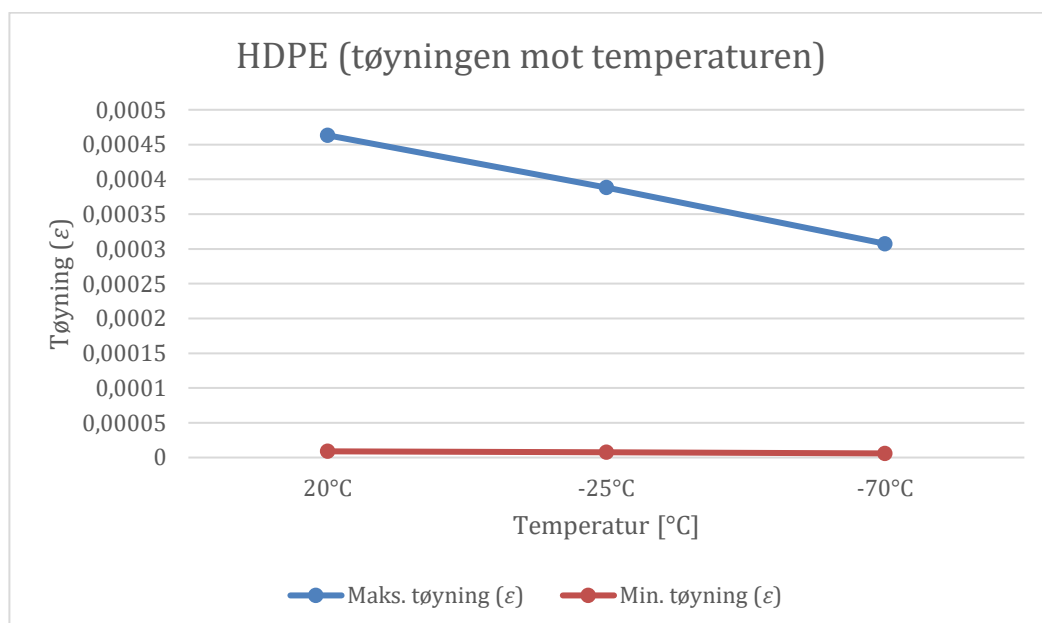
4.4 Analyse av resultater og sammenlikning med teori

4.4.1 Analyse av simuleringsresultatene

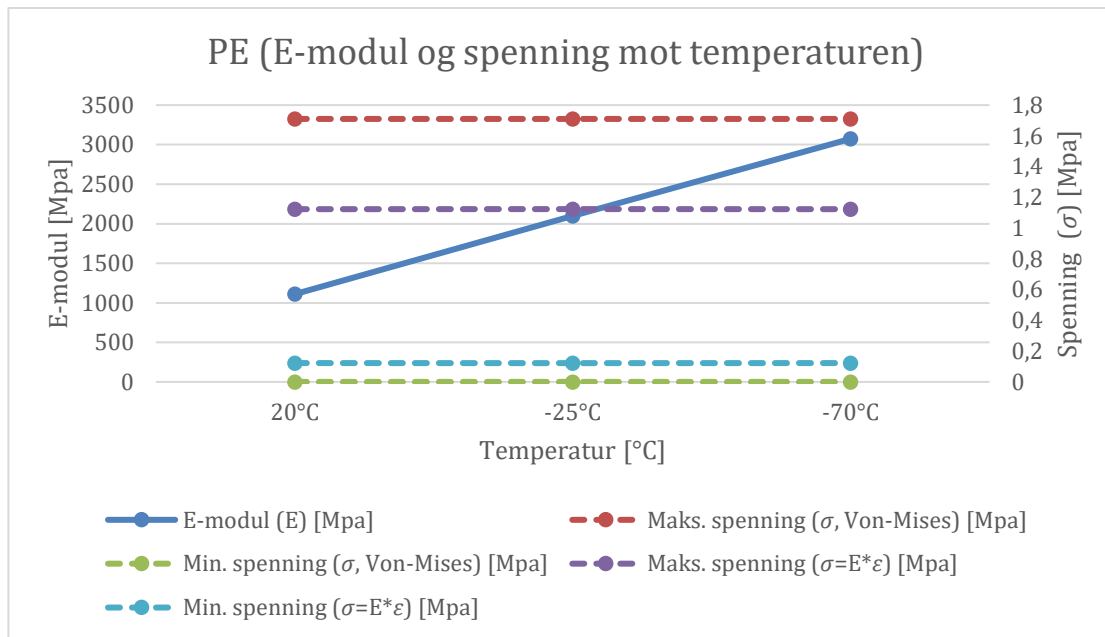
For å få en bedre oversikt og tydeliggjøre hvilken retning testresultatene har beveget seg i, har jeg videre valgt å visualisere resultatene av simuleringene i forskjellige grafer og diagrammer. På denne måten ser man lettere «trenden» og utviklingen til hvordan egenskaper som tøyning, E-modul og spenning til de forskjellige plastmaterialene endrer seg i forhold til temperaturen.



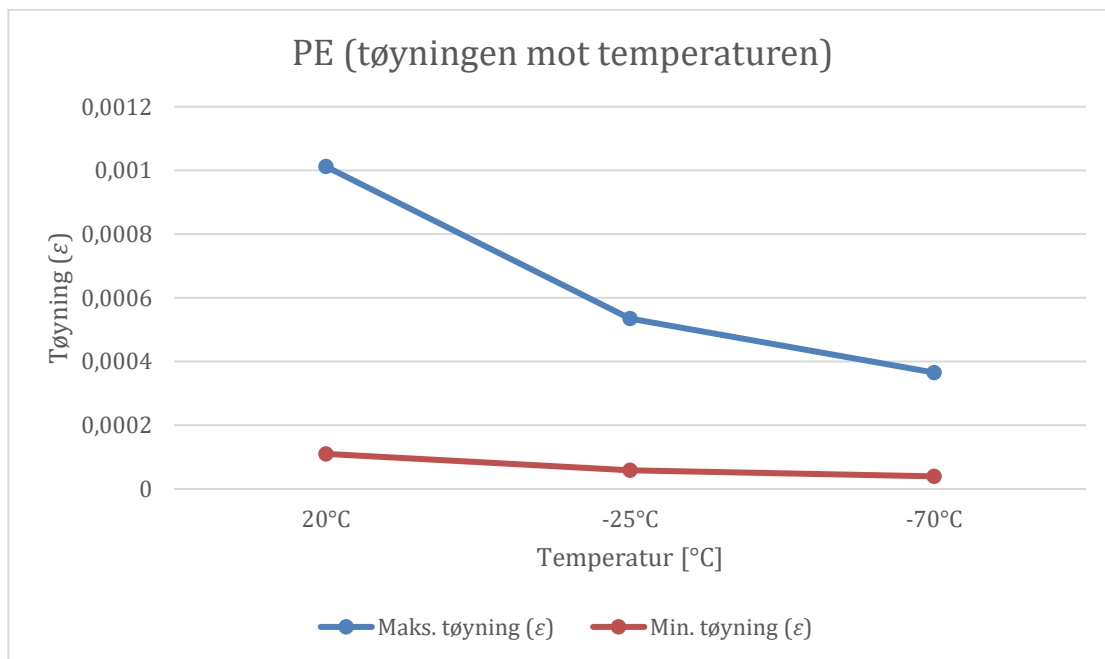
Figur 4-29 - Diagram som viser E-modulen, maks. og min. spenningen og maks. og min. von-mises spenningen mot temperaturen for HDPE-røret. [35]



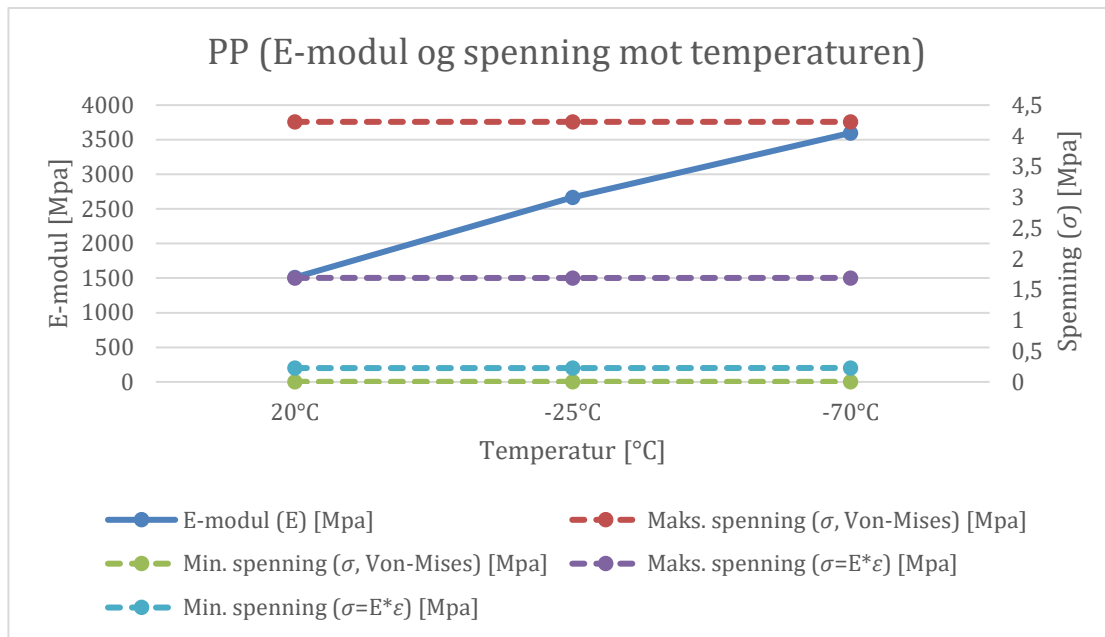
Figur 4-30 - Diagram som viser maks. og min. tøyningen mot temperaturen for HDPE-røret. [35]



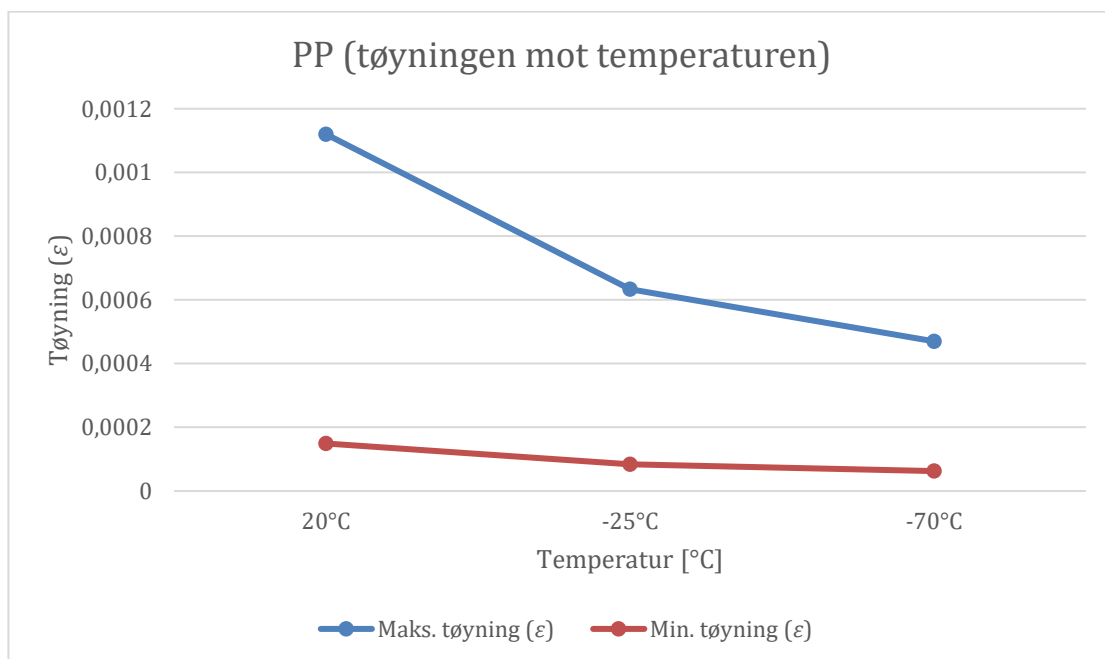
Figur 4-31 - Diagram som viser E-modulen, maks. og min. spenningen og maks. og min. von-mises spenningen mot temperaturen for PE-røret. [35]



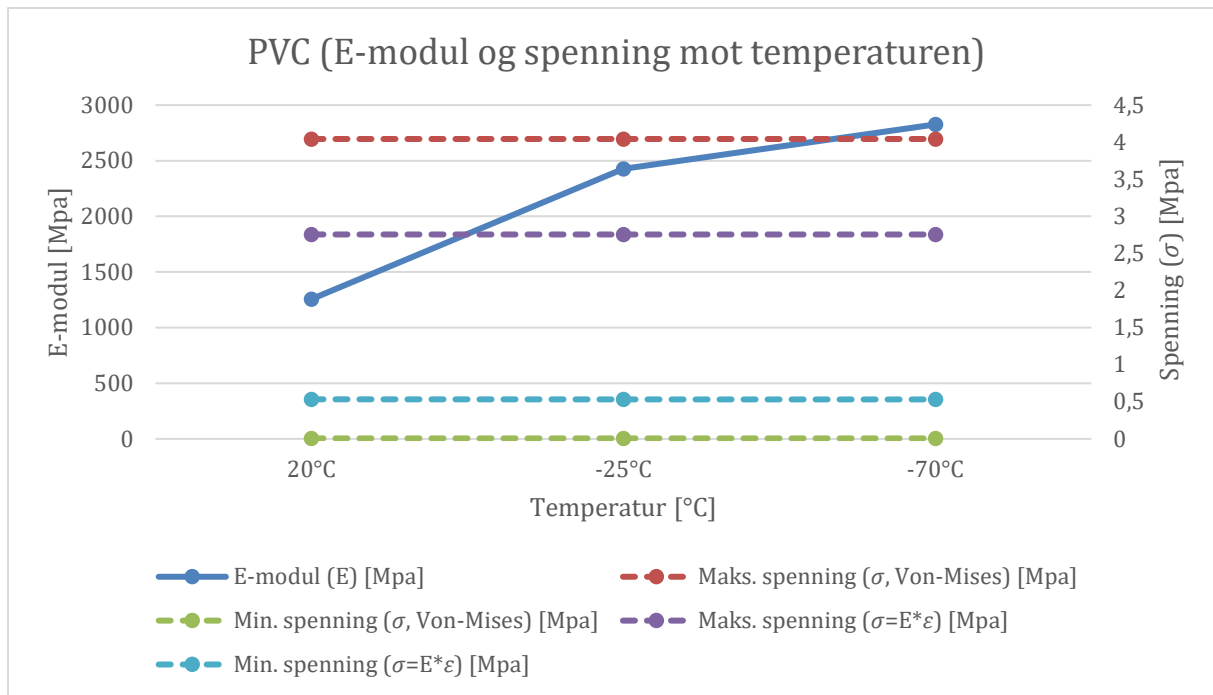
Figur 4-32 - Diagram som viser maks. og min. tøyningen mot temperaturen for PE-røret. [35]



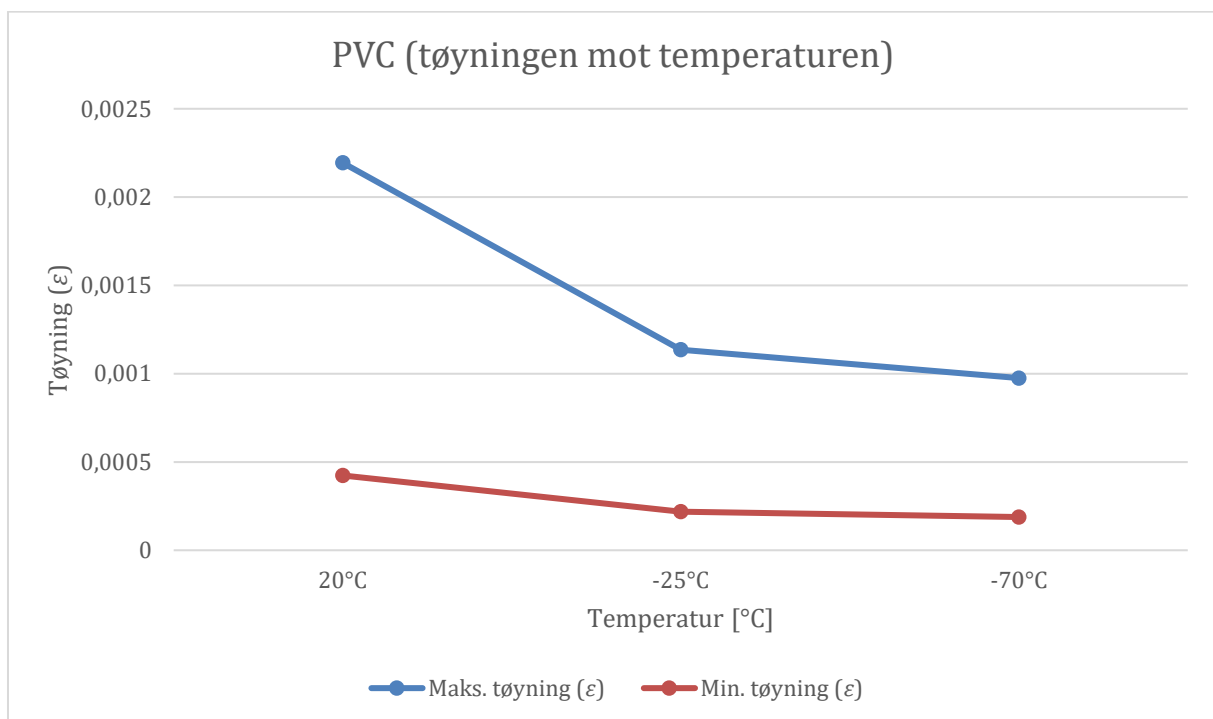
Figur 4-33 - Diagram som viser E-modulen, maks. og min. spenningen og maks. og min. von-mises spenningen mot temperaturen for PP-røret. [35]



Figur 4-34 - Diagram som viser maks. og min. tøyningen mot temperaturen for PP-røret. [35]



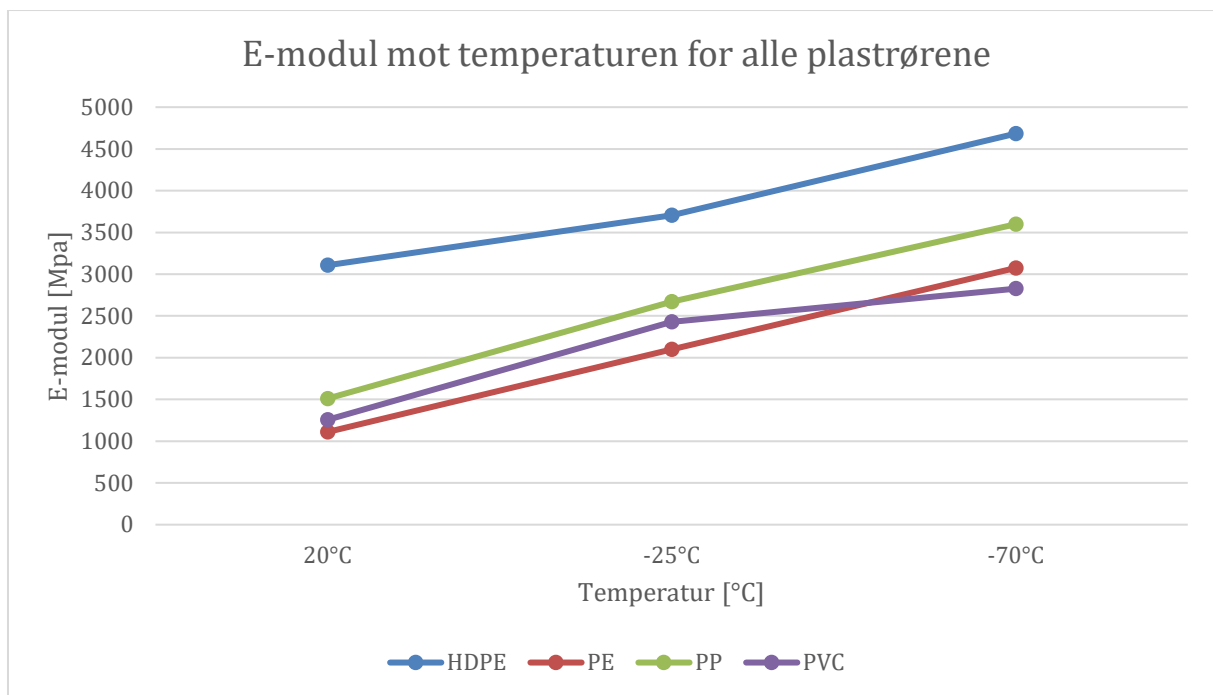
Figur 4-35 - Diagram som viser E-modulen, maks. og min. spenningen og maks. og min. von-mises spenningen mot temperaturen for PVC-røret. [35]



Figur 4-36 - Diagram som viser maks. og min. tøyningen mot temperaturen for PVC-røret. [35]

Hvis man analyserer diagrammene ovenfor vil man se at alle plastmaterialene som de forskjellige rørene er laget av følger en felles «trend». Fellestrekkene er at E-modulen til plastmaterialene øker ved en reduksjon i temperaturen. Dette innebærer at materialet blir stivere, mindre elastisk og det kreves en høyere spenning for å få tøyning og deformasjon i materialet. En økning i E-modulen kan også indikere at slagseigheten og bruddseigheten synker som kan indikere at plasten blir sprøere. Et sprøere materiale vil kunne føre til at sprekker lettere kan forplante seg i materialet som kan i verste fall føre til et sprøtt brudd hvis spenningen blir stor nok.

For å se økningen i E-modulen mer tydelig, er det vist et diagram nedenfor som viser hvordan E-modulen til alle plastmaterialene endrer seg i forhold til temperaturen.



Figur 4-37 – Diagram som viser hvordan E-modulen til de forskjellige plastmaterialene øker i forhold til temperaturen.

Som man kan tolke ut i fra diagrammet ser man at HDPE har høyest E-modul, etterfulgt av PP, PVC og PE. Når temperaturen synker fra 20°C til -25°C, øker E-modulen til PVC mest, etterfulgt av PE, PP og HDPE. Når temperaturen synker ytterligere fra -25°C til -70°C, er økningen i E-modul mindre signifikant, men i dette temperaturområdet øker likevel E-modulen til PE mest, etterfulgt av PP, HDPE og PVC.

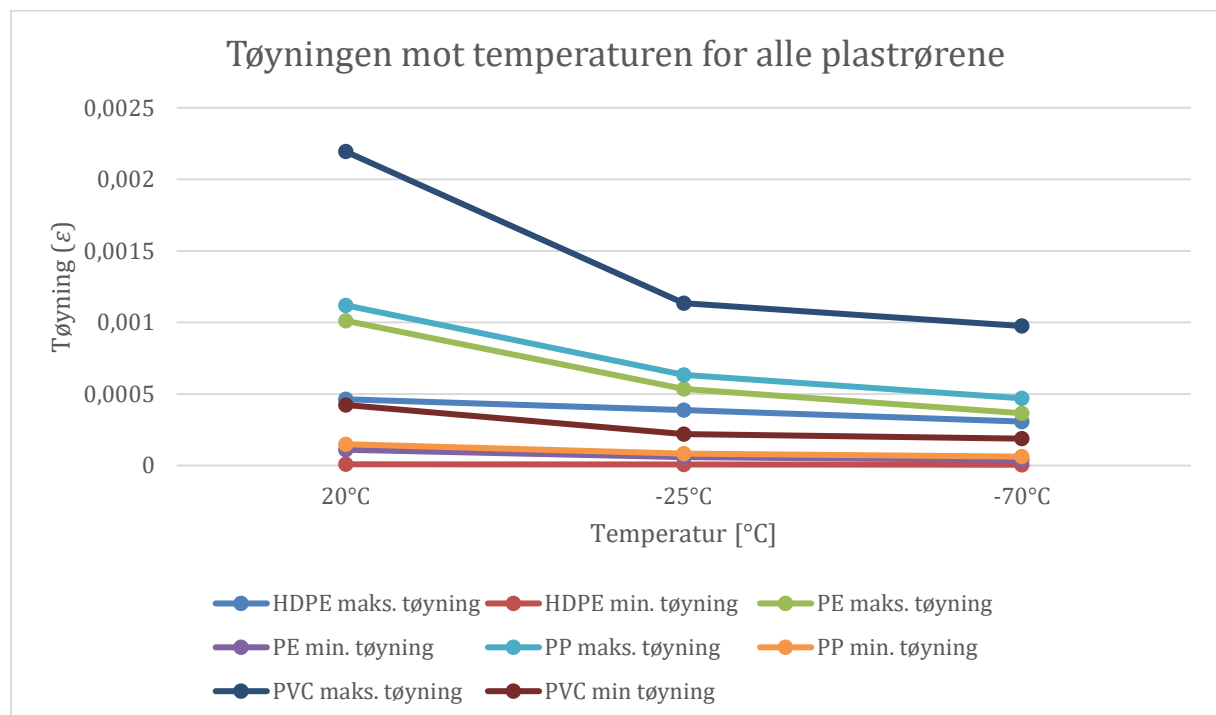
For å gjøre det mer oversiktlig er den prosentvise økningen i E-modulen for de forskjellige plastmaterialene i temperaturområdene 20°C til -25°C og -25°C til -70°C, vist i en tabell nedenfor.

Tabell 4-11 - Prosentøkning i E-modulen til de forskjellige plastmaterialene.

Prosentøkning i E-modul				
Temperaturområde	HDPE	PE	PP	PVC
20°C til -25°C	19,31 %	89,19 %	76,75 %	93,31 %
-25°C til -70°C	26,27 %	46,38 %	34,81 %	16,39 %

Basert på resultatdiagrammene ovenfor, vil man også analysere seg fram til at tøyningen til plastmaterialene reduseres når temperaturen synker. Dette kan forklares med økningen i E-modulen når temperaturen synker. Materialet blir dermed stivere og hardere som forhindrer materialet å få like mye tøyningen og deformasjon som det fikk ved høyere temperaturer.

For å se nedgangen i tøyningen til alle plastmaterialene mer tydelig, er det vist et diagram nedenfor som viser hvordan tøyningen reduseres når temperaturen synker.



Figur 4-38 - Diagram som viser hvordan tøyningen til de forskjellige plastmaterialene synker i forhold til temperaturen. [35]

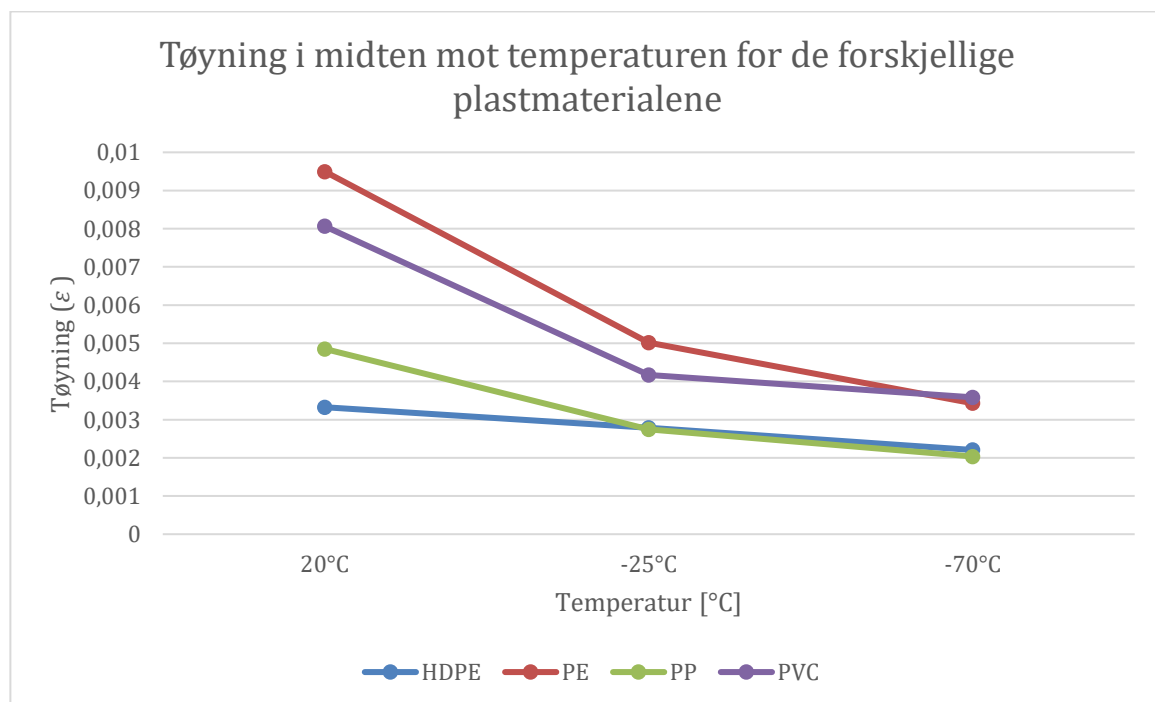
Som man kan tolke ut i fra diagrammet ser man at PVC opplever mest tøyning, etterfulgt av PP, PE og HDPE. I temperaturområdet fra 20°C til -25°C er nedgangen i tøyningen størst hos PVC, etterfulgt av PE, PP og HDPE. Ved en ytterligere nedkjøling i temperaturområdet fra -25°C til -70°C er nedgangen i tøyningen mindre signifikant, men i dette temperaturområdet er likevel nedgangen i tøyningen størst hos PE, etterfulgt av PP, HDPE og PVC.

For å gjøre det mer oversiktlig er den prosentvise nedgangen i tøyningen for de forskjellige plastmaterialene i temperaturområdene 20°C til -25°C og -25°C til -70°C, vist i en tabell nedenfor.

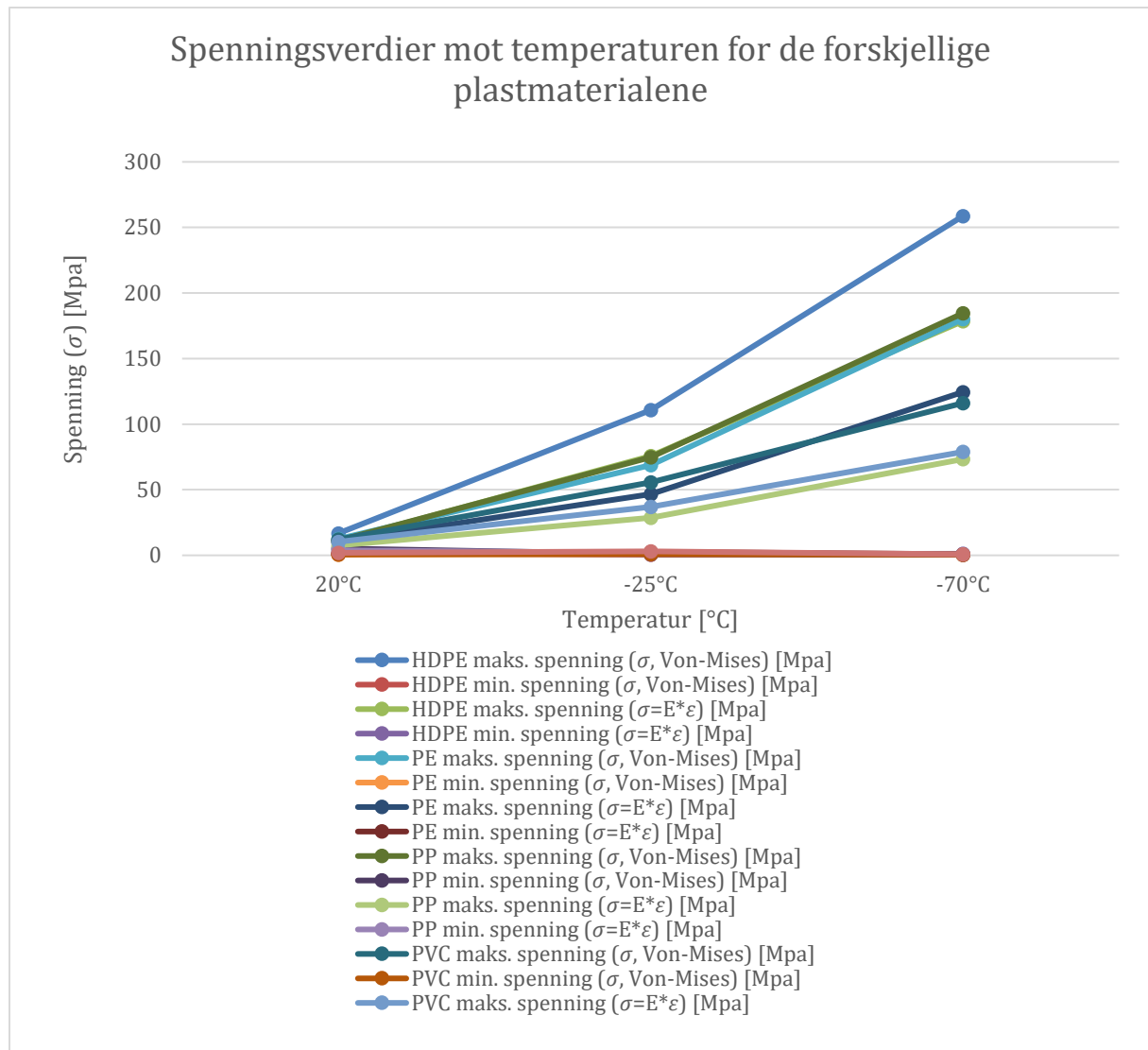
Tabell 4-12 - Prosentnedgang i maks. og min. tøyningen til de forskjellige plastmaterialene. [35]

Prosentnedgang i maks. og min. tøyning				
Temperatur-område	HDPE	PE	PP	PVC
20°C til -25°C	16 %	47 %	43 %	48 %
-25°C til -70°C	21 %	32 %	26 %	14 %

Når det gjelder simuleringsforsøkene av strekktester utført ved forskjellige temperaturområder, kan man ut i fra spennings- og tøyningsverdiene i tillegg til tøyningsplottene se at en reduksjon i temperaturen fører til en reduksjon i tøyningen, men fører samtidig til en økning i E-modulen og spenningen. Dette igjen tyder på at de forskjellige plastmaterialene blir hardere, stivere og antakelig sprøere. For at det skal bli lettere å se utviklingen av spennings- og tøyningsverdiene i forhold til temperaturen, er det vist diagrammer som plottes spennings- og tøyningsverdiene mot temperaturen til de forskjellige plastmaterialene.



Figur 4-39 - Diagram som viser hvordan tøyningen utvikler seg i forhold til temperaturen til de forskjellige plastmaterialene. [35]

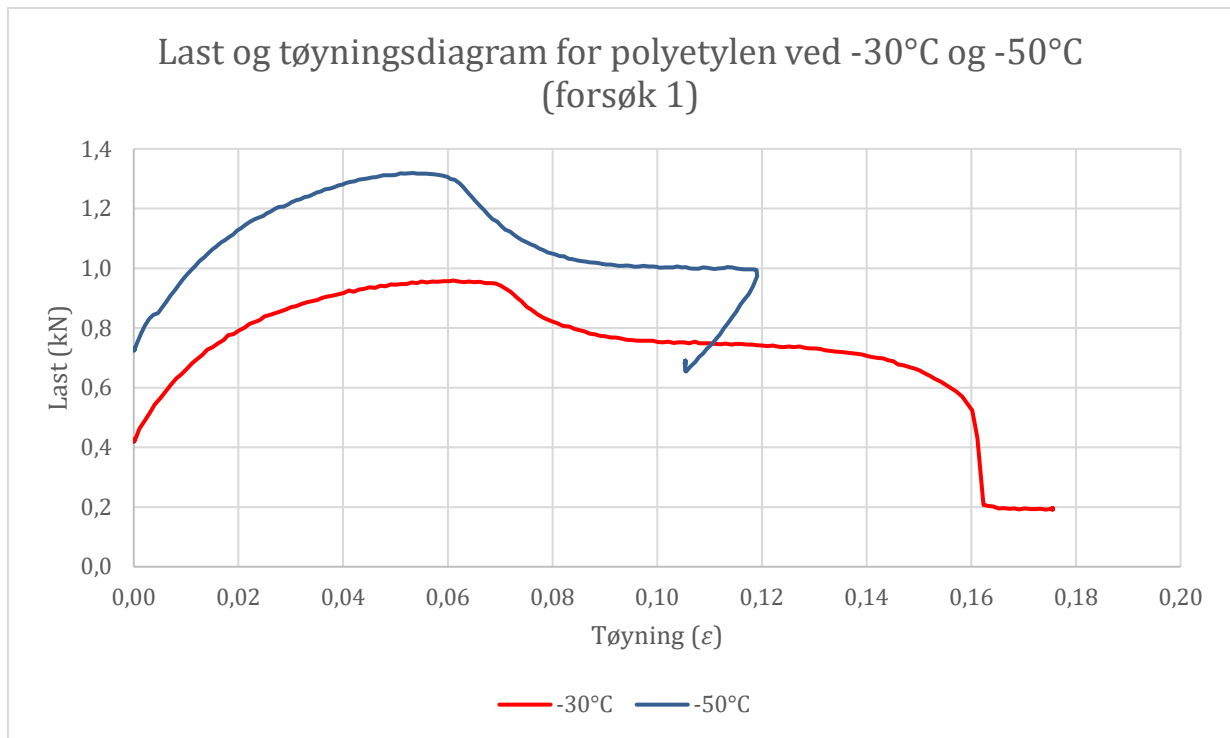


Figur 4-40 - Diagram som viser hvordan spenningen øker i forhold til temperaturen for de forskjellige plastmateriale. [35]

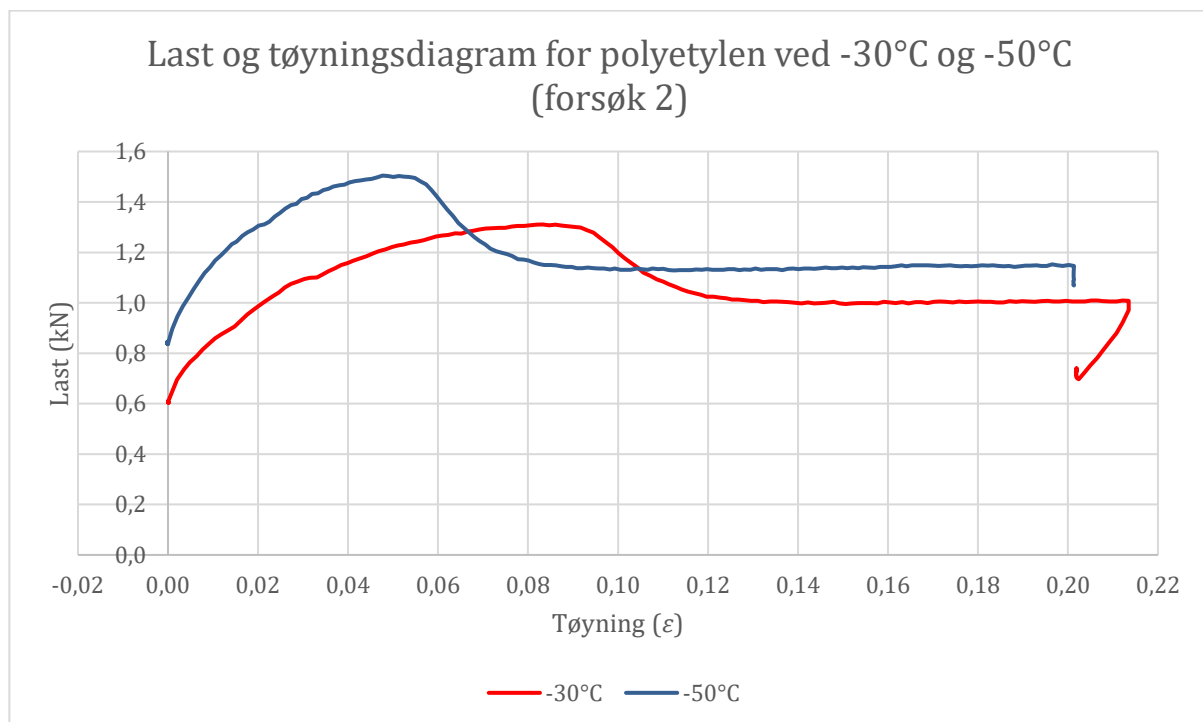
4.4.2 Analyse av resultatene fra de praktiske forsøkene (strekktester)

Det må tas i betraktning at de praktiske strekktestene er utsatt for mange feilkilder som kan gi unøyaktige og upresise måleresultater. De last og tøyningsskurvene som har store hakk og bråe endringer i lasten er antakelig prøvestykker som har gått i brudd ved hullet der bolten sitter og disse kurvene er derfor ikke nøyaktige og gjenspeiler ikke nødvendigvis de faktiske materialegenskapene. Det må også tas i betraktning at ikke alle prøvestykkene var helt identiske og det var også variasjon i nedkjølingstiden til hvert prøvestykke. Til tross for dette har måleresultatene gitt mye nyttig informasjon angående hvordan materialegenskapene til plastmaterialer endrer seg ved en reduksjon i temperaturen.

Når det gjelder resultatene og de tilhørende last og tøyningssdiagrammene fra strekktestene som har blitt utført på glassfiber og polyetylen ved Høgskolen i Oslo og Akershus, ser man den samme trenden som ved simuleringsforsøkene. Hvis man sammenligner last og tøyningssdiagrammene for polyetylen, ser man at kurvene fra -30°C til -50°C blir brattere og endrer seg raskere i tillegg til at kurven forflytter seg lenger opp. Dette betyr at det kreves en høyere last for å få den samme tøyningen som i praksis betyr at elastisitetsmodulen øker. En høyere elastisitetsmodul vil si at materialet blir mindre elastisk i tillegg til at det blir hardere og stivere. Forflytningen av hele kurven oppover vil si at materialet tåler en høyere kraft og last før det går i brudd, men man ser samtidig at ved -50°C går materialet i brudd ved en lavere tøyning enn ved -30°C . Ved -30°C går polyetylenprøvene i brudd ved 16% tøyning og ved -50°C går den i brudd ved 12% tøyning. Når det gjelder maksimum last så tåler polyetylenprøvene ved -30°C nesten 1 kN, mens ved -50°C tåler de vesentlig høyere last på 1,5 kN. I tillegg ser man også at ved -50°C går kurven rett ned og går plutselig i brudd, mens ved -30°C er kurven mer jevn og flater ut. Dette kan tyde på at ved en lavere temperatur så blir polyetylen både hardere, stivere og mer sprøtt som lettere kan vil føre til sprekkvekst og plutselige brudd ved en lavere tøyning.

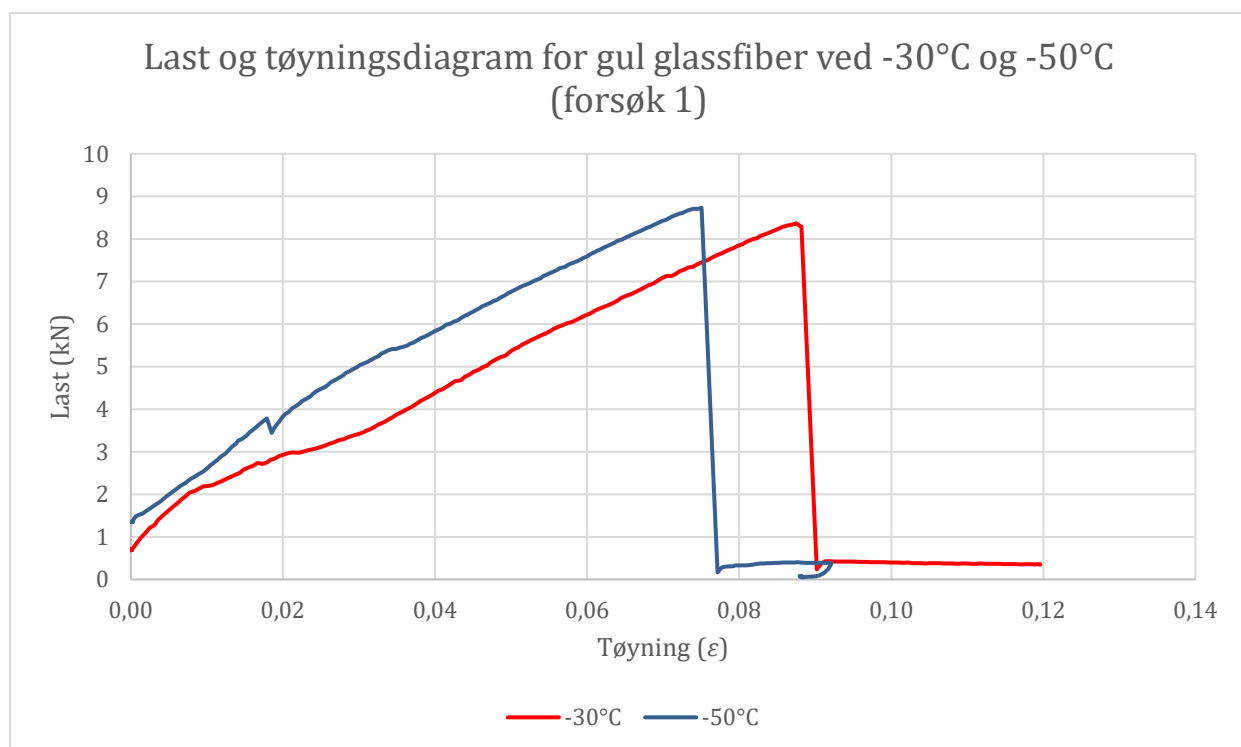


Figur 4-41 - Last og tøyningsdiagram for polyetylen sammenlignet ved -30°C og -50°C.

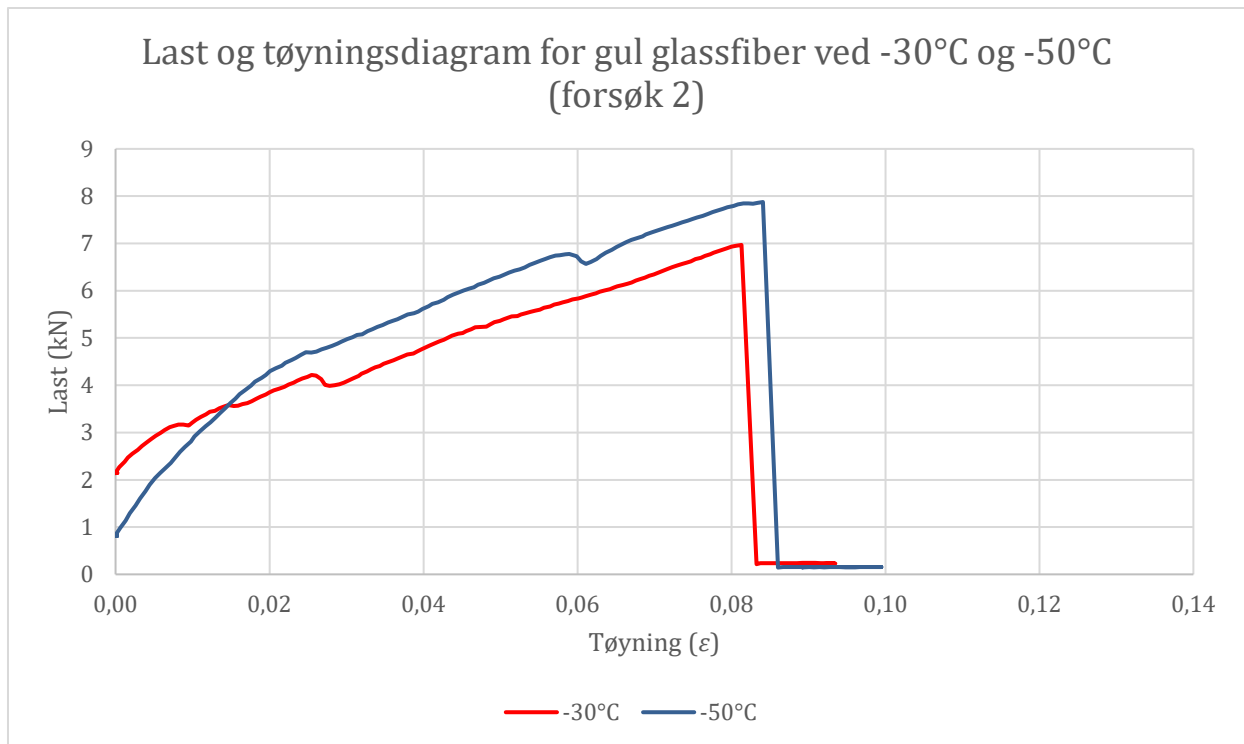


Figur 4-42 - Last og tøyningsdiagram for polyetylen sammenlignet ved -30°C og -50°C.

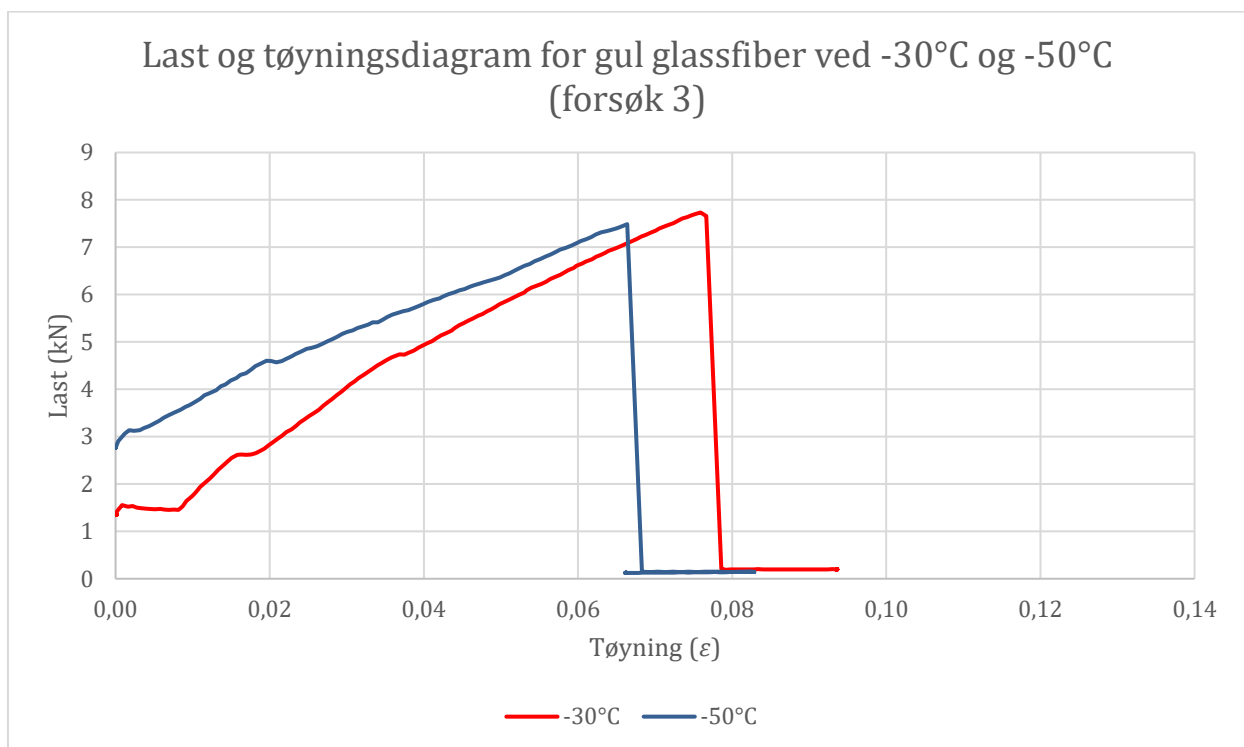
Hvis man sammenligner last og tøyningsdiagrammene fra strekktestene på glassfiber, ser man også at kurven blir brattere og endrer seg raskere som vil si at det kreves en høyere last for å få den samme tøyningen når temperaturen endrer seg fra -30°C til -50°C . Dette betyr igjen at elastisitetsmodulen øker og glassfiberen blir hardere og stivere. Glassfiberprøvene tåler vesentlig mer last enn polyetylenprøvene på grunn av glassfibrene som betydelig forsterker og armerer herdeplasten. Ved -30°C tåler de gule glassfiberprøvene ca. 7,0 kN til litt over 8,0 kN, mens ved -50°C tåler de en litt høyere last på 7,5 til nesten 9,0 kN. Selv om lastekapasiteten øker ved en reduksjon i temperaturen på grunn av at materialet blir stivere og mindre elastisk, så ser man samtidig at en lavere temperatur fører til at glassfiberprøvene går i brudd ved en lavere tøyning. Hvis man ser på kurven rett før bruddet skjer, ser man at ved -50°C så skjer bruddet i glassfiberprøven raskt og plutselig, mens ved -30°C er det en jevnere overgang til bruddet. Dette tyder på samme måte som med polyetylenprøvene at glassfiberen blir mer sprø, mindre elastisk og blir mer utsatt for sprekker og plutselige brudd når temperaturen synker. Når det gjelder de svarte glassfiberprøvene ser man ut i fra last og tøyningsdiagrammene at ved en lavere temperatur øker lastekapasiteten, bruddovergangen blir mindre jevn og de går plutselig i brudd. Kurvene blir også brattere slik at det kreves en høyere last for å få en tøyning og forskyvning i materialet, som vil si at elastisitetsmodulen øker og at glassfiberen blir mer stiv, uelastisk og sprø.



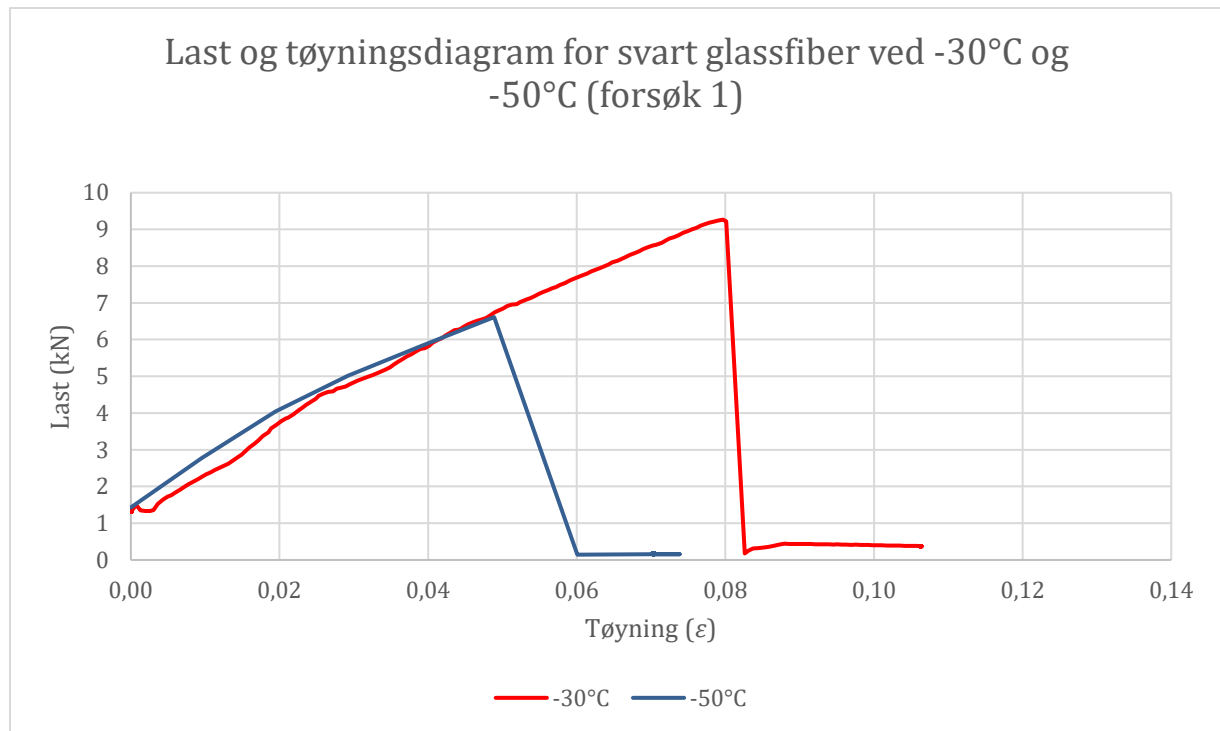
Figur 4-43 - Last og tøyningsdiagram for gul glassfiber sammenlignet ved -30°C og -50°C .



Figur 4-44 - Last og tøyingsdiagram for gul glassfiber sammenlignet ved -30°C og -50°C.



Figur 4-45 - Last og tøyingsdiagram for gul glassfiber sammenlignet ved -30°C og -50°C.



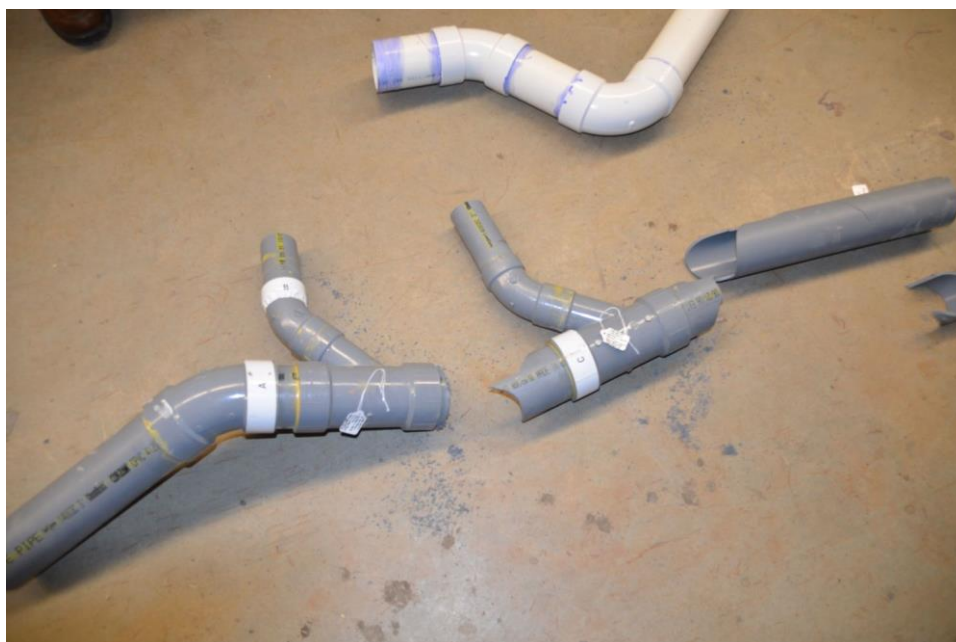
Figur 4-46 - Last og tøyningsdiagram for svart glassfiber sammenlignet ved -30°C og -50°C.

4.4.3 Oppsummering fra analysene av resultatene

Med utgangspunkt i analysen som er gjort ut i fra diagrammene, prosenttabellene og resultattabellene, ser man at det er en klar sammenheng mellom E-modulen, tøyningen og spenningen til plastmaterialer når temperaturen endres. De plastmaterialene som hadde størst økning i E-modul på grunn av en lavere temperatur, var også de som hadde størst reduksjon i tøyningen og størst økning i spenningen. Kort sagt vil dette si at jo stivere og hardere plastmaterialet blir på grunn av en lavere temperatur, desto mindre tøyning, deformasjon og signing opplever plastmaterialet. En lavere tøyning og høyere E-modul kan også indikere at materialet blir sprøere og hardere, der både slagseigheten og bruddseigheten kan ha blitt redusert betydelig. Dette betyr at plastmaterialer kan være mer utsatt for sprekkevekst og utmatting ved lave temperaturer, som kan til slutt føre til et sprøtt brudd hvor plastmaterialet svikter brått og uventet. På grunnlag av analysen av resultatene fra simuleringene og de praktiske forsøkene, ser man at de stemmer godt overens med den utredede litteraturen og teorien om plastmaterialer ved lave temperaturer.



Figur 4-47 - Eksempler på sprekkevekst og brudd i plastrør på grunn av sprøhet og utmatting i plastmaterialet. [38] [39]



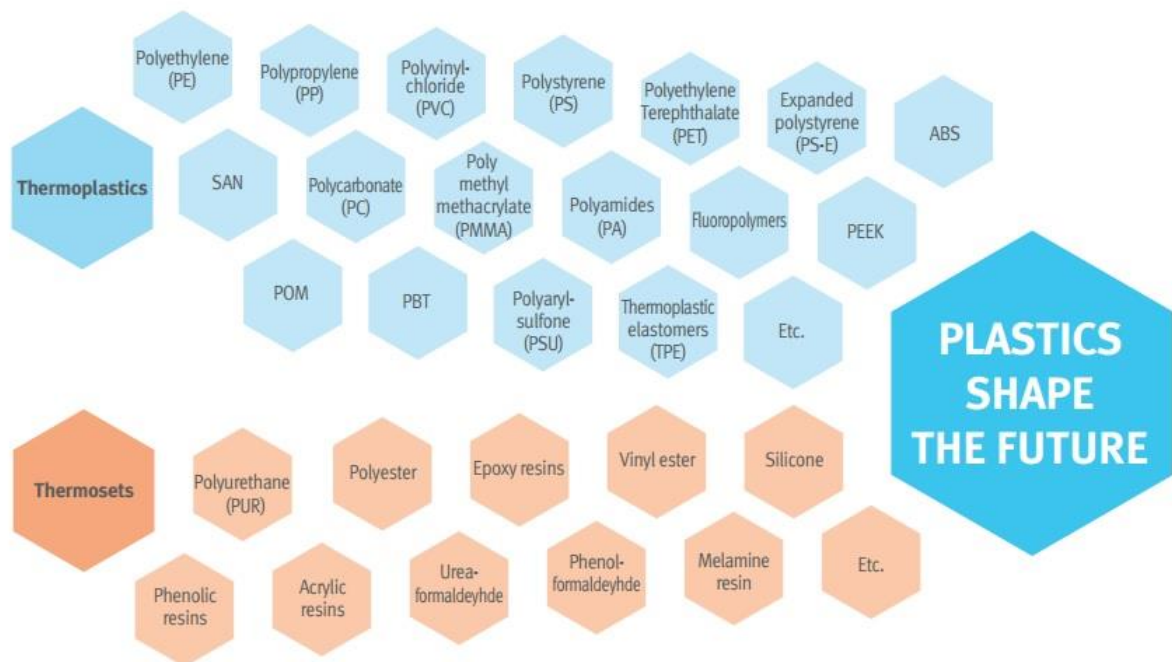
Figur 4-48 - Eksempel på PVC-rør som har blitt sprøtt og gått i brudd. [40]

5. Plastindustrien, den petrokjemiske industrien, ytre forhold, prisutvikling og prognose

For å få et bredere perspektiv og dypere innsikt i produksjonen av syntetiske polymerer og den tilhørende industrien, er det i dette kapittelet utredet for de komponentene i samfunnet som styrer og påvirker både produksjonen, tilbudet, etterspørselen og prisen på plastmaterialer. I tillegg finnes det også ytterligere forhold som påvirker plastindustrien som det skal utredes for videre i dette kapittelet. I tillegg er det utredet for den petrokjemiske industrien og de prosesser og metoder som benyttes for å produsere ulike kjemiske forbindelser som inngår i produksjonen av plastmaterialer.

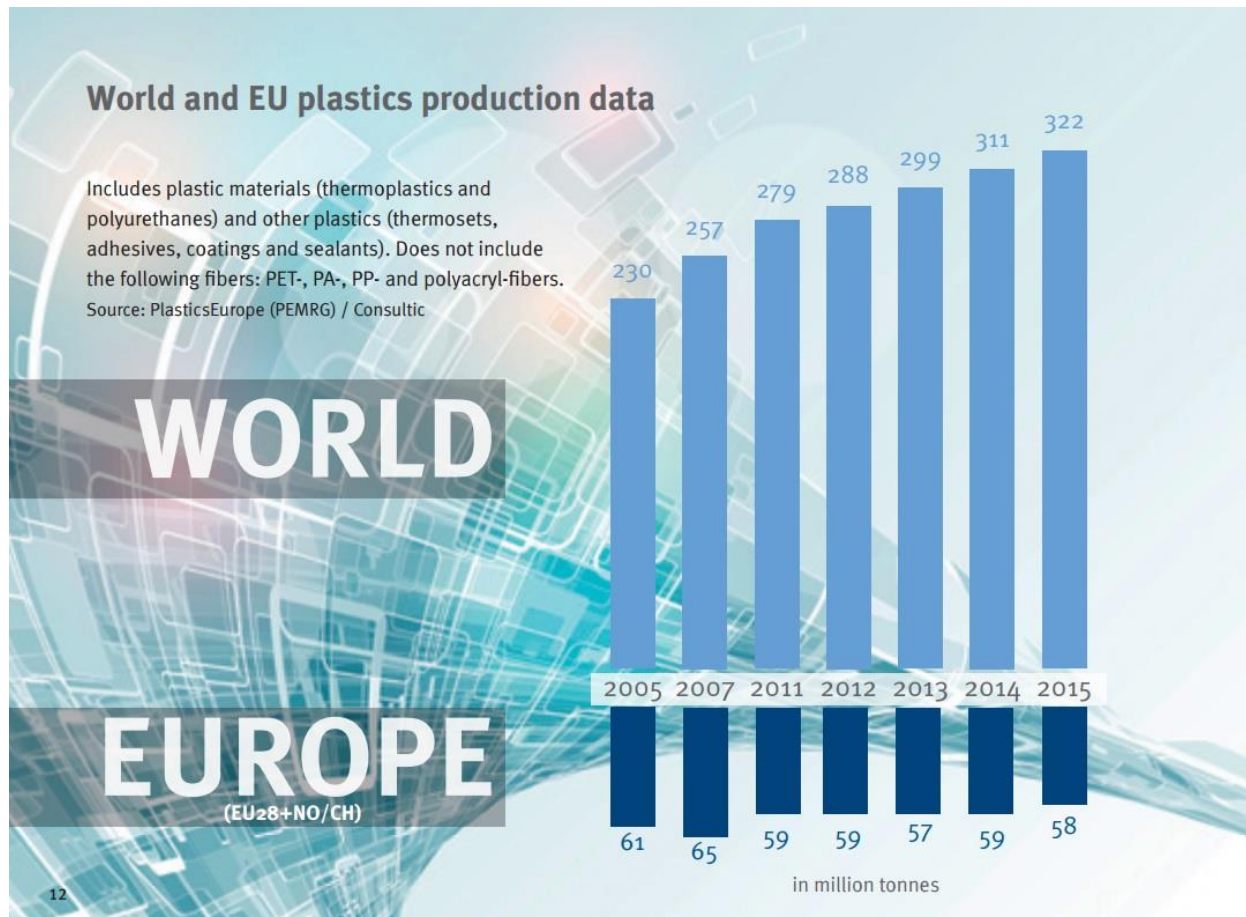
5.1 Plastindustrien og tilhørende markedsdata

Videre følger det noen illustrasjoner og diagrammer for å få en oversikt over plastindustrien og statistikk over både produksjonen og forbruket av plastmaterialer, i tillegg til tilbudet og etterspørselen etter plastmaterialer på verdensbasis.



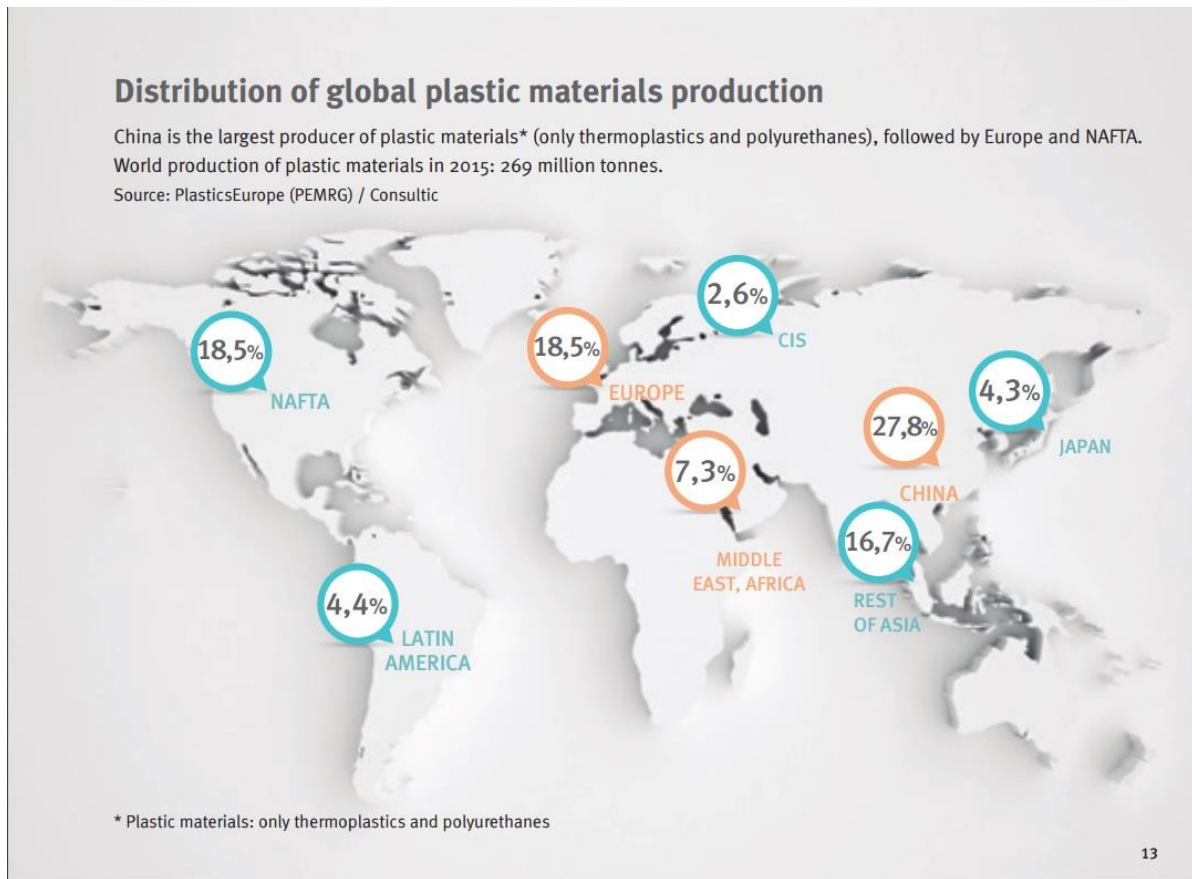
Figur 5-1 - Illustrasjon som viser en oversikt over inndelingen av de mest populære plastmaterialene inn i termoplaster og herdeplaster. Blå: Termoplaster. Oransje: Herdeplaster. [41]

Som man ser i figur 5-1 er polyetylen, polypropylen og polyvinylklorid blant de mest populære og mest brukte termoplaster i verden.



Figur 5-2 - Verdensproduksjonen og den europeiske produksjon av plastmaterialer fra 2005 til 2015. Tallene er oppgitt i millioner tonn produsert plast. [41]

I figur 5-2 kan man se at verdensproduksjonen av plastmaterialer har økt betydelig for hvert år fra 2005 til 2015. Når det gjelder den europeiske produksjonen ser man at det ikke noen store svingninger i produksjonen, men at den har holdt seg noenlunde jevnt. Grunnen til at Europa har hatt en laber økning i sin produksjon av plastmaterialer kan skyldes at mye av plastproduksjonen foregår i andre lavkostland i Asia, som for eksempel Kina. Etterspørselen etter plastmaterialer i Europa vil da bli dekket via import av plastmaterialer fra Kina og andre lavkostland, og vil føre til at det blir et mindre behov for å øke den Europeiske produksjonen av plastmaterialer.



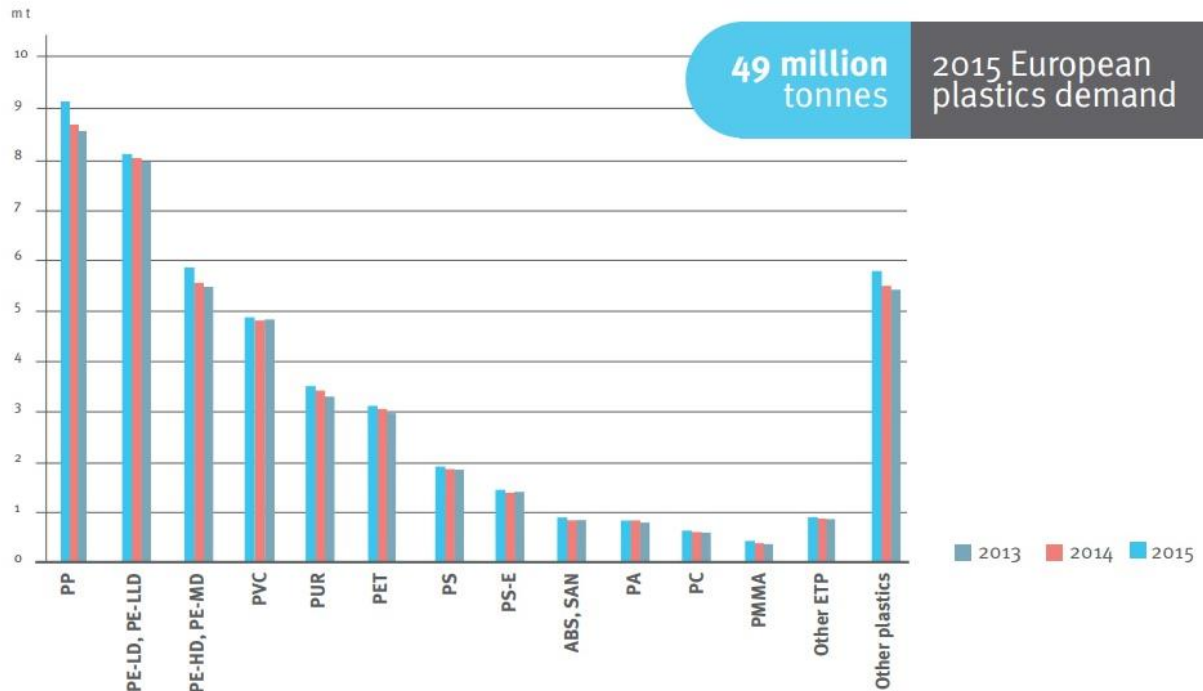
Figur 5-3 - Den globale distribusjonen av plastproduksjonen i verden. [41]

I figur 5-3 ser man at Kina er den største produsenten av plastmaterialer, etterfulgt av Europa og NAFTA-landene (The North American Free Trade Agreement). NAFTA-landene inkluderer USA, Canada og Mexico og NAFTA-avtalen sikrer fri handel mellom disse landene. Videre følger resten av Asia, Midtøsten, Latin-Amerika, Japan og Russland.

Plastic materials EU demand per polymer

European plastics demand includes plastic materials (thermoplastics and polyurethanes) and other plastics (thermosets, adhesives, coatings and sealants). Does not include the following fibers: PET-, PA-, PP- and polyacryl-fibers.

Source: PlasticsEurope (PEMRG) / Consultic / myCeppi



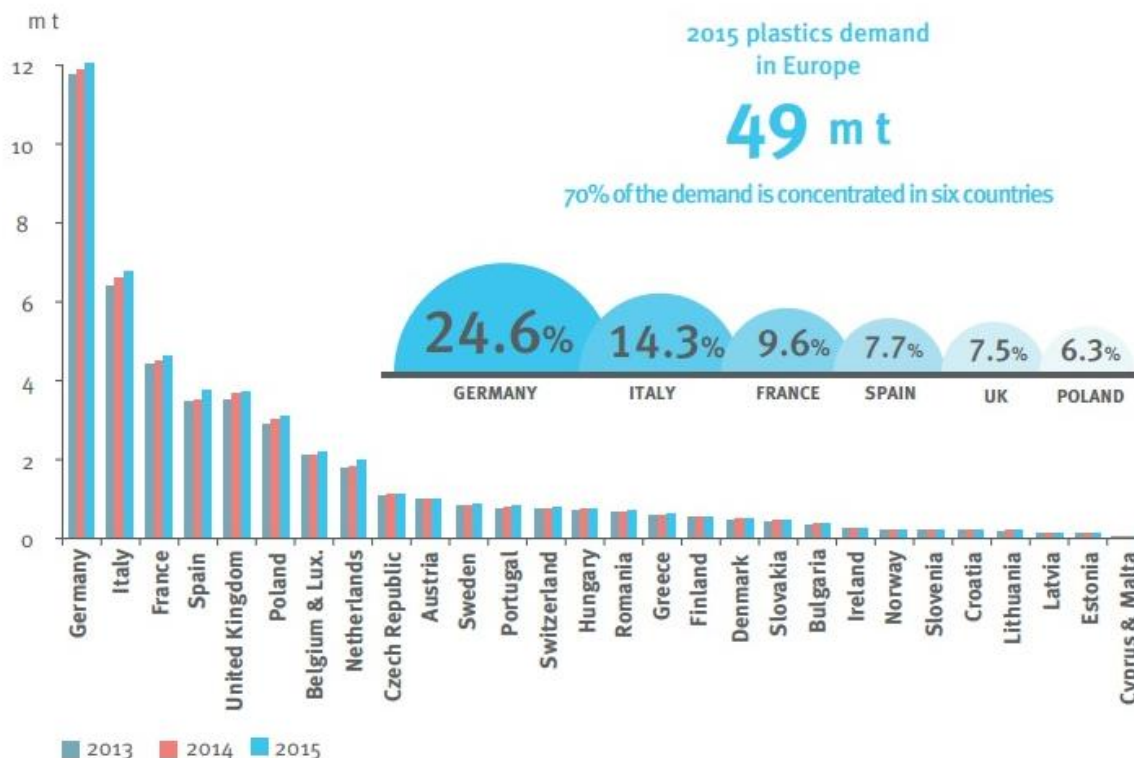
Figur 5-4 - Dette diagrammet viser de plastmaterialene som det var størst etterspørsel etter i Europa for årene 2013, 2014 og 2015. [41]

I figur 5-4 ser man at polypropylen, polyetylen og polyvinylklorid var de plastmaterialene som det har vært størst etterspørsel etter for hvert av årene, etterfulgt av PUR (polyurethane), PET (polyethylene terephthalate), PS (polystyrene), PS-E (polystyrene, expandable), ABS (acrylonitrile butadiene styrene resin), PA (polyamides), PC (polycarbonate), PMMA (polymethyl methacrylate), ETP (engineering thermoplastics) og andre plastmaterialer.

Plastic materials EU demand per country

European plastic demand includes plastic materials (thermoplastics and polyurethanes) and other plastics (thermosets, adhesives, coatings and sealants). Does not include the following fibers: PET-, PA-, PP- and polyacryl-fibers.

Source: PlasticsEurope (PEMRG) / Consultic / myCeppi



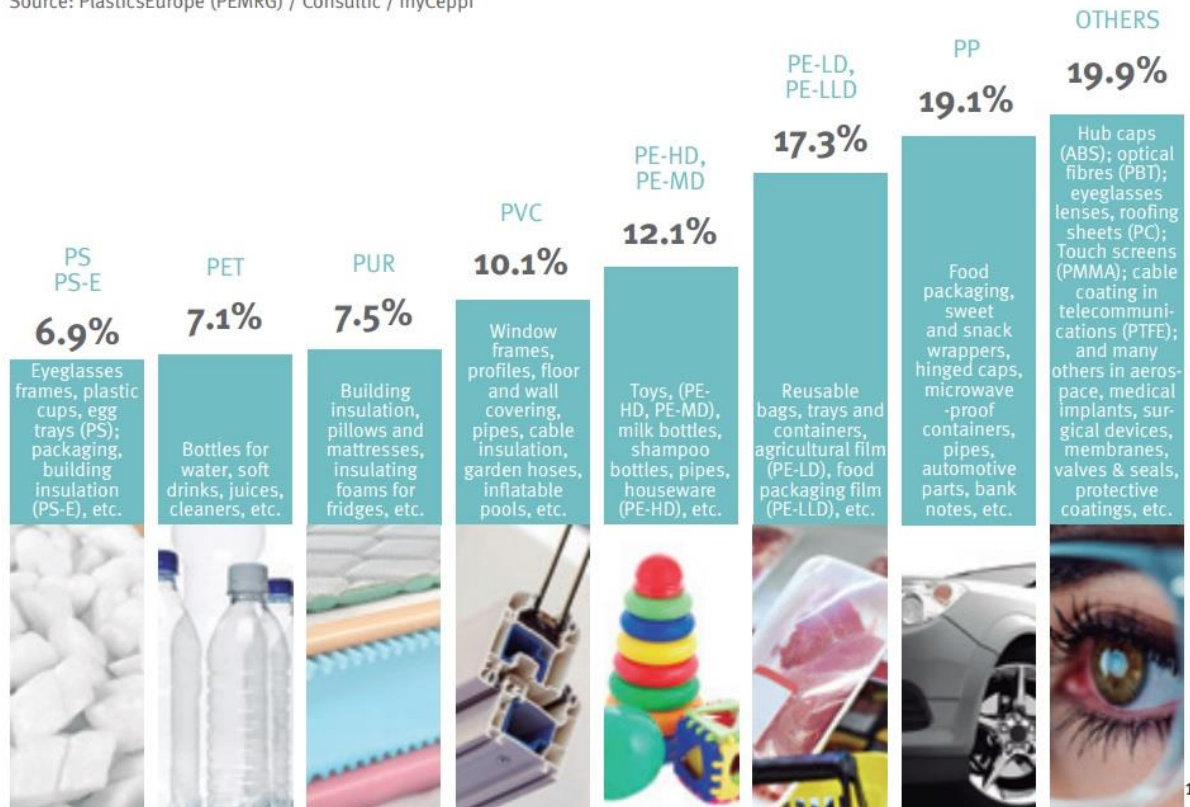
Figur 5-5 - Dette diagrammet viser de landene i Europa som hadde størst etterspørsel etter plastmaterialer for årene 2013, 2014 og 2015. [41]

I figur 5-5 ser man at de seks landene i Europa som hadde den største etterspørselen etter plastmaterialer var: Tyskland, Italia, Frankrike, Spania, Storbritannia og Polen. Samlet vil disse seks landene stå for 70% av etterspørselen etter plastmaterialer i Europa. Mer spesifikt er den prosentvise fordelingen for de seks landene fordelt slik: 24,6% for Tyskland, 14,3% for Italia, 9,6% for Frankrike, 7,7% for Spania, 7,5% for Storbritannia og 6,3% for Polen.

Plastic materials main fields of applications

European plastics demand (EU-28+NO/CH) by polymer type 2015.

Source: PlasticsEurope (PEMRG) / Consultic / myCeppi



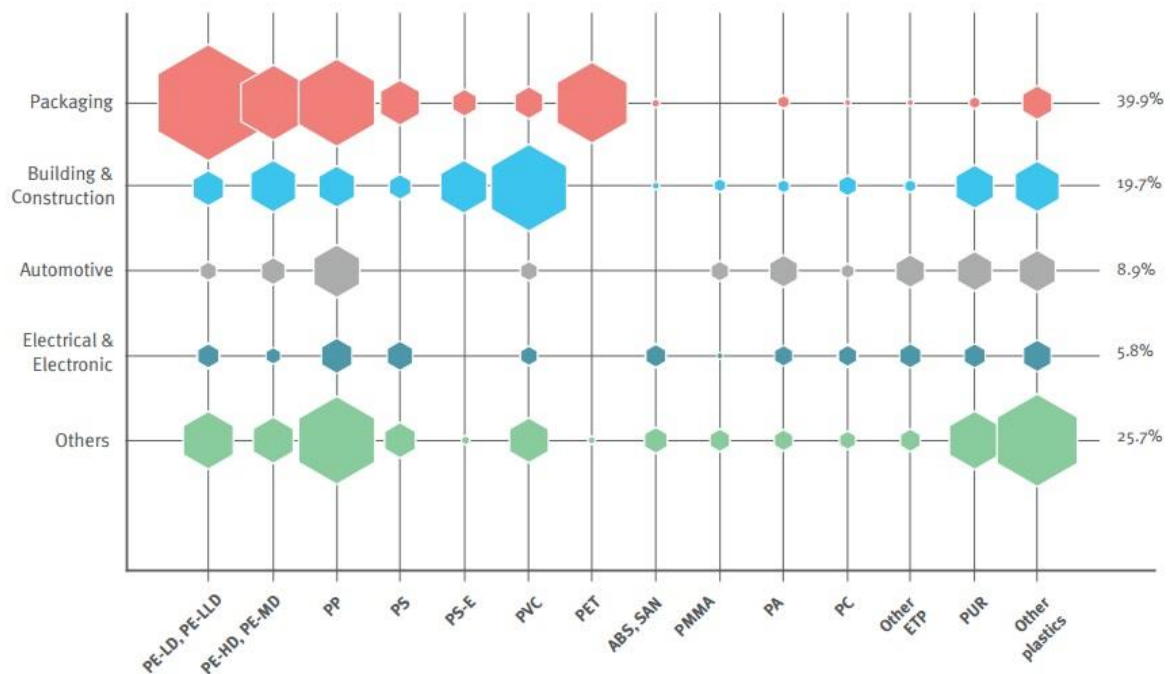
Figur 5-6 - Hovedbruksområdene til forskjellige etterspurte plastmaterialer for Europa i 2015. [41]

I figur 5-6 ser man også at plasttyper som polypropylen, polyetylen og polyvinylklorid brukes i de største bruksområdene for plastmaterialer. Polypropylen og er blant den mest etterspurte og brukes i blant annet matemballasje, innpakning, beholdere, rør, bildeler og pengesedler. Andre plasttyper som ABS (acrylonitrile butadiene styrene resin), PBT (polybutylene terephthalate), PC (polycarbonate), PTFE (polytetrafluoroethylene) og PMMA (polymethyl methacrylate) har også høy etterspørsel og brukes i blant annet bilfelger, fibre, briller, linser, berøringsskjermer, ledningsisolasjon og romfartsutstyr, medisinsk utstyr. PE-LD (Polyethylene, low density) og PE-LLD (polyethylene, linear low density) brukes til blant annet plastposer, plastbeholdere, landbruksplast i tillegg til emballasje og innpakning for matindustrien. PE-HD (polyethylene, high density) og PE-MD (polyethylene, medium density) er en stivere og hardere plasttype som brukes til blant annet leketøy, flasker, sjampoflasker, rør og verktøy for husholdningen. PVC (polyvinyl chloride) er en veldig stiv og hard plasttype som brukes til vindusrammer, rør og rørsystemer, ledningsisolasjon, hageslanger og oppblåsbare basseng og leketøy.

Plastics demand by polymer and market segment

European plastics demand (EU-28+NO/CH) by polymer type 2015.

Source: PlasticsEurope (PEMRG) / Consultic / myCeppi



Figur 5-7 - Etterspørselen etter plastmaterialer sortert etter plasttype og bruksområde for EU i 2015. [41]

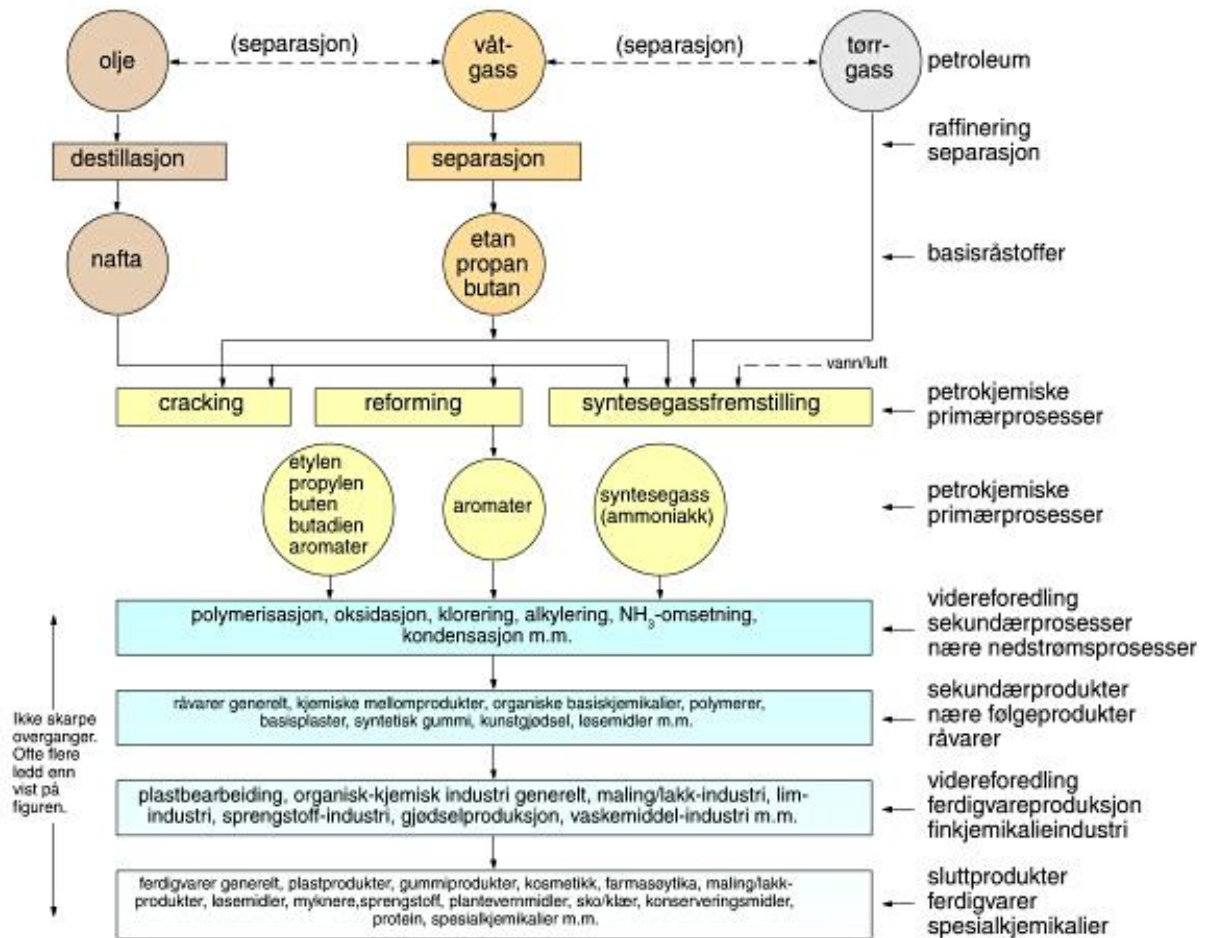
Ut i fra figur 5-7 ser man at 39,9% står for emballasjemarkedet og i dette markedet inngår plastmaterialer som PE-LD (polyethylene, low density), PE-LLD (polyethylene, linear low density), PE-HD (polyethylene, high density), PE-MD (polyethylene, medium density), PP (polypropylene) og PET (polyethylene terephthalate). Bygg og anleggsmarkedet står for 19,7% av plastmarkedet og her inngår bruk av plastmaterialer som PVC (polyvinyl chloride), PS-E (polystyrene, expandable), PE-HD (polyethylene, high density), PE-MD (polyethylene, medium density) og PUR (polyurethane). Bilmarkedet står for 8,9% av det totale plastmarkedet og her er det brukt mest PP (polypropylene), PUR (polyurethane), ETP (engineering thermoplastics) og PA (polyamides). Videre står elektronikkbransjen og elektromarkedet for 5,8% av plastmarkedet og det er brukt PP (polypropylene), PS (polystyrene), PUR (polyurethane), PE-LD (polyethylene, low density) og PE-LLD (polyethylene, linear low density). For andre bruksområder brukes det for det meste PP (polypropylene), PUR (polyurethane), PVC (polyvinyl chloride), PS (polystyrene), PE-HD (polyethylene, high density), PE-MD (polyethylene, medium density), PE-LD (polyethylene, low density), PE-LLD (polyethylene, linear low density) og andre plasttyper.

5.2 Den petrokjemiske industrien

Materialene som inngår i produksjonen av plastmaterialer kommer i stor grad fra den petrokjemiske industrien. Dette er en industrigren fra oljeindustrien som fremstiller kjemiske stoffer og produkter fra både olje og naturgass. De kjemiske sluttproduktene fra petrokjemisk industri kan også inngå i produksjonen av blant annet syntetisk gummi, lakk og malingsprodukter, frostvæsker og rengjøringsmidler. Om lag 4% av den samlede produksjonen av olje og gass på verdensbasis går til den petrokjemiske industrien, resten går vanligvis til bruk som energi i form av drivstoff, strøm og varme (diesel, bensin, drivstoff til fly, fyringsolje, olje- og gasskraftverk og varmekraftverk). [42]

Ved petrokjemisk fremstilling, viderefører man primærproduktene fra olje- gassindustrien. Petroleumsprodukter som olje, våt-gass og tørr-gass destilleres og separeres i blant annet etan, propan og butan i tillegg til nafta. Etan, propan og butan foredles videre ved hjelp av petrokjemiske primærprosesser som «cracking» og syntesegassfremstilling. Nafta går videre til en petrokjemisk prosess som heter katalytisk reforming. «Cracking» er en petrokjemisk fremstillingsprosess som innebærer oppvarming av olje under høyt trykk. Når molekylene i oljen varmes opp vil dette føre til en løsrivning og oppspaltning i nyere lettere molekyler med kortere kjeder. Syntesegassfremstilling er den petrokjemiske prosessen som fremstiller ammoniakk, metanol og olefiner fra naturgass (metan). Katalytisk reforming er prosessen for å omdanne destillatet fra oljen kalt raffinert nafta, til høyokttan flytende reformatprodukter. [42]

Både cracking, katalytisk reforming og en kombinasjon av ulike petrokjemiske fremstillingsprosesser brukes for å produsere blant annet de kjemiske forbindelsene etylen, propen og vinylklorid som videre anvendes i polymeriseringen og produksjonen av polyetylen (PE), polypropylen (PP) og polyvinylklorid (PVC). [42]



Figur 5-8 - Illustrasjon av de trinnvise prosessene i den petrokjemiske industrien. [42]

5.3 Ytre forhold

Plastindustrien er styrt av ulike samfunnsmessige forhold hvor for eksempel etterspørselen, tilbudet og prisen til plastmaterialer kan påvirkes i stor grad. Eksempler på ytterligere forhold som kan påvirke plastindustrien er:

- Politikk og krav fra myndigheter
- Lover, regler og juridiske forhold
- Makro- og mikroøkonomiske forhold (tilbud og etterspørsel)
- Teknologiske nyvinninger og innovasjon
- Miljø- og klimamessige krav
- Sosiale og kulturelle forhold

5.3.1 Politikk og krav fra myndigheter

Politikk og krav fra myndighetene omhandler i stor grad hvilke beslutninger politikere, statsledere og myndighetene tar eller har tatt som kan påvirke ulike forhold i plastindustrien. Her kan for eksempel skattepolitikken som myndighetene fører ha en innvirkning på prisen på plastmaterialer. Myndighetene kan ilegge en avgift eller skatt på plastmaterialer eller de kan straffe bedrifter som bedriver forurensende produksjon av plast med bøter og avgifter. Myndighetene har også valget om import av plastmaterialer fra utlandet skal ilegges tollavgift og hvor høy tollavgiften skal være. Hvor høy tollavgift myndighetene velger på import av plastmaterialer fra utlandet påvirker i stor grad hvor stor konkurranse den norske plastindustrien får. En annen faktor påvirker plastindustrien i det aktuelle landet er hvor selvforsynt landet er med olje og gass, og i hvor stor grad myndighetene støtter og bidrar med midler til olje- og gassindustrien i tillegg til den petrokjemiske industrien.

5.3.2 Lover, regler og juridiske forhold

Plastindustrien og plastproduserende bedrifter må også handle i overensstemmelse med de gjeldene lover, regler og avtaler som både gjelder i det aktuelle landet og på tvers av landegrensene. Dette kan være lover og regler som regulerer mengden plast en bedrift kan produsere, de kjemiske forbindelsene som tillates i plastproduksjon, i tillegg til krav som sikrer en miljøvennlig og bærekraftig produksjon av plast. Andre juridiske forhold som plastindustrien må tilpasse seg er ulike klima- og handelsavtaler som er avtalt i samarbeidsallianser mellom ulike land.

5.3.3 Makro- og mikroøkonomiske forhold

Siden plastmaterialer er laget av kjemiske forbindelser fra olje- gass og den petrokjemiske industrien, vil prisen på plastmaterialer i stor grad styres av olje- og gassprisene. Olje- og gassprisene vil videre styres av tilbudet og etterspørselen etter olje og gass. Hvis det er lite olje- og gass på markedet, vil som regel prisen øke på grunn av en økning i etterspørselen. Hvis det er for mye olje- og gass på markedet, vil det bli et overskudd av olje- og gass og prisen vil avta på grunn av en nedgang i etterspørselen. Oljeprisen styres ikke kun av tilbudet og etterspørselen, men kan også påvirkes av politiske beslutninger og avgjørelser. For eksempel kan et olje- og gassproduserende land velge å øke eller redusere sin produksjon av olje og gass, og kan på denne måten aktivt kontrollere og påvirke mengden olje og gass på markedet. Hvis et land velger å holde tilbake sin produksjon av olje- og gass, vil dette bidra til et lavere tilbud av olje- og gass og etterspørselen vil øke som igjen vil føre til at prisen øker. Det motsatte skjer hvis landet velger å øke sin produksjon av olje og gass. Da vil det bli et større tilbud av olje og gass, etterspørselen reduseres og prisen på olje og gass vil avta. Et lands økonomi kan også påvirke plastindustrien med i hvor stor grad plastbedrifter får midler og ressurser til å holde sin produksjon i gang. Jo bedre økonomien i det aktuelle landet er, desto mer midler og ressurser kan bevilges til plastindustrien og både tilbudet og etterspørselen etter plast vil øke. Svingninger i valuta kan også ha en stor betydning for inntektene til plastproduserende bedrifter. En lokal svekking av valutaen til det landet som den plastproduserende bedriften befinner seg i, fører til økte inntekter fra eksport og salg av plastmaterialer til utlandet. Motsatt vil en lokal styrking av valutaen føre til lavere eksportinntekter for den plastproduserende bedriften. Grunnen til dette er fordi når bedriften selger en vare til utlandet vil bedriften få betalt i utenlandsk valuta og bedriften må da veksle om til norske kroner. Prisen på plastmaterialer kan også være avhengig av økonomien internt i bedriften. Hvis bedriften går bra og får nok inntekter til å dekke kostnadene vil prisen på plast avta. Det motsatte skjer hvis bedriften går dårlig og blir nødt til å øke prisen på produktene sine for å få nok inntekter til å dekke kostnadene. Andre bedriftsinterne forhold som bidrar til presse prisen på plast oppover kan være krav om høyere lønnsnivå, flere goder for de ansatte og generelt høyere kostnader.

5.3.4 Teknologiske nyvinninger og innovasjon

Plastindustrien påvirkes også av den teknologiske utviklingen innenfor syntetiske materialer. Det foregår en kontinuerlig utvikling og forskning hvor det potensielt kan forskes fram og oppdages nye materialer og syntetiske polymerer som kan ha nye og forbedrede egenskaper enn tidligere. Det kan også utvikles nye og forbedrede produksjonsmetoder som kan være mer effektive, miljøvennlige, energibesparende og kostnadsbesparende for en plastproduserende bedrift. I tillegg kan man utvikle og finne nye og forbedrede metoder når det gjelder infrastrukturen, organiseringen, distribusjonen og transporten internt i bedriften. En kontinuerlig forbedring og utvikling av plastmaterialer kan føre til at plast i større grad erstatter andre materialer. På lang sikt vil dette bety at plastindustrien vil vokse seg større og vil etter hvert kunne utkonkurrere andre materialer som tre, stål og aluminium.

5.3.5 Miljø- og klimamessige krav

I dagens samfunn har bevaring av miljøet, naturen, klimaet og jordens ressurser hatt et økende fokus. Derfor er det også en kontinuerlig utvikling av materialer og tilhørende produksjonsmetoder som både kan være mer miljø- og klimavennlig, og som bevarer jordens ressurser på en bærekraftig måte. Innenfor plastindustrien er det også et fokus på å utvikle mer miljøvennlige plastmaterialer. I tillegg er det også gjort forsøk og forskning på å utvikle en biologisk nedbrytbar plast som kan bidra til å forhindre forurensning og skade av dyreliv i naturen. Ulempen er at det er knyttet mye utviklingskostnader til å utvikle et biologisk nedbrytbart plastmateriale som betyr at prisen på en slik plasttype vil bli relativt høy. Spørsmålet blir da om et slikt nedbrytbart plastprodukt vil slå an på plastmarkedet og om det vil bli lønnsomt nok. En god grunn til å satse på utviklingen av alternative og mer miljø- og klimavennlig plastmaterialer, er at man blir uavhengig av å bruke olje, gass og petrokjemiske produkter til produksjon av plast. Olje- og gass er en begrenset ressurs som vil til slutt bli oppbrukt og da kan det være hensiktsmessig å forberede og utvikle alternative materialer og tilhørende produksjonsmetoder. Likevel tyder det på at produksjonen av olje- og gass vil vedvare og fortsette i flere titalls år fremover.

5.3.6 Sosiale og kulturelle forhold

I dagens samfunn er det mange sosiale og kulturelle komponenter som påvirker plastindustrien. For eksempel har det økte fokuset og bevisstheten rundt miljøet og klimaet ført til et «grønnere» og mer miljøbevisst samfunn. Dette gjør at flere blir mer klar over hvilke industrier og komponenter i samfunnet som bidrar til de negative virkningene på miljøet og klimaet. Plastindustrien er dessverre en av de industriene som har en negativ effekt på miljøet, klimaet og naturen. Dette er på grunn av plastindustriens nære tilknytning til olje- og gassindustrien som allerede er en veldig miljøforurensende industri. Dette vil si at plastindustrien indirekte finansierer og støtter videre olje- og gassutvinning. Dette gjør at fossile brensler vil bli mer tilgjengelig på markedet som vil føre til at flere vil kjøpe og forbruke fossile brensler. En konsekvens av dette er at det vil bli mer forurensning av miljøet i tillegg til at den globale oppvarmingen øker. Plastmaterialer er også kritisert for å forurense og forøple naturen siden plast vanligvis ikke er biologisk nedbrytbart. Dette gjør at plastavfall blir liggende i naturen og vil utgjøre en fare for naturlig dyreliv i tillegg til at det ødelegger mye av gleden av å bevege seg i urørte naturomgivelser og friluftsområder. Plastmaterialer kan også inneholde mange giftige og miljøfarlige kjemiske stoffer som kan true og forgifte mennesker, dyr og planter. Polyvinylklorid er et plastmateriale som ofte er tilsatt ulike tilsetningsstoffer som kan være farlig for både miljø, natur og levende organismer. Dette bidrar til at samfunnet kan oppleve enkelte plastmaterialer som en fare og risiko for både helse, miljø og liv. Konsekvensen av dette er at myndigheter og politikere kan aktivt arbeide for å forby og regulere bruken av plastmaterialer.

Når det gjelder de positive påvirkningene fra mennesker med ulike kulturer i samfunnet, så kan man se at det moderne samfunnet i større grad blir et «bruk og kast» samfunn. Et «bruk og kast» samfunn vil innebære et samfunn som i større grad forbruker og kjøper nye produkter, i stedet for å forsøke å reparere ødelagte og defekte produkter. Det vil si at det vil bli et økende behov for en masseproduksjon av billige og resirkulerbare plastmaterialer som kan brukes i for eksempel emballasje, beholdere, leker, kjøkkenredskap, elektronikk, og verktøy. Også utviklingen av utviklingsland som vil bidra til en høyere levestandard i disse landene, vil også føre til en høyere etterspørsel etter plastmaterialer fordi de vil få introdusert nye produkter hvor plast i stor grad inngår som materiale.

5.4 Analyse av prisutviklingen til plastmaterialer

Som nevnt er produksjonen av plastmaterialer i stor grad avhengig av olje- og gassindustrien via den petrokjemiske industrien. Derfor vil også prisene på plastmaterialer endre seg i takt med prisene på olje- og gass. Dette er fordi når plastbedriftene kjøper sine kjemiske produkter fra den petrokjemiske industrien som igjen produserer sine produkter fra olje- og gassindustrien, vil en økning i olje- og gassprisene føre til at den petrokjemiske industrien blir nødt til å øke sine priser for å dekke sine kostnader. Plastbedriftene blir da nødt til å kjøpe dyrere kjemiske produkter fra den petrokjemiske industrien. For å kunne opprettholde inntektene og produksjonen av sine plastprodukter, må derfor plastbedriftene også øke prisene på sine plastprodukter for å kompensere for de økte kostnadene fra kjøp av dyrere kjemiske produkter fra den petrokjemiske industrien.

Prisene på plast varierer også etter hvilket land og marked man kjøper på. Det kinesiske og asiatiske plastmarkedet er det største og billigste på grunn av at de har et høyt produksjonsvolum og billig arbeidskraft, mens plastmarkedet i USA og vesten har høyere priser på grunn av høyere produksjonskostnader knyttet til et høyere lønnsnivå i tillegg til at de har et lavere produksjonsvolum. En annen faktor som påvirker prisen på plastmaterialer i mindre grad er produksjonsmetoden og den spesifikke undertypen til plastmaterialet. De forskjellige produksjonsmetodene kan blant annet være støping i former, ekstrudering gjennom ulike profiler eller rulling ut i tynne filmer som kan rulles sammen til ruller.

Videre følger det grafer som viser endringen i prisen over tid til blant annet HDPE (high-density polyetylen), LDPE (low-density polyetylen), PP (polypropylen) og PVC (polyvinylklorid).

5.4.1 Prisutviklingen til HDPE (high-density polyetylen)

RESIN: HDPE

RESIN GRADE: Blow Molding Homopolymer (Dairy)

VOLUME: Annual volumes greater than 20 million pounds.



RESIN: HDPE

RESIN GRADE: Blow Molding Copolymer(HIC)

VOLUME: Annual volumes greater than 20 million pounds.



RESIN: HDPE

RESIN GRADE: Drums

VOLUME: Annual volumes greater than 20 million pounds.



RESIN: HDPE

RESIN GRADE: Injection GP

VOLUME: Annual volumes greater than 20 million pounds.



Figur 5-9 - Prisutviklingen til forskjellige undertyper av HDPE (high-density polyetylen) fra 1997 til 2017. Prisen er oppgitt i USD (amerikanske dollar) per pund (cents/lb.). [43]

Ut i fra figur 5-9 ser man at prisen på de forskjellige HDPE-typene har hatt en generell økning over tid, men samtidig har det vært store svingninger i prisen. Prisen var i 1997 ca. 0,50 USD/pund. Videre økte prisen betydelig fra 1997 til midten av 2008 inntil det kom et skikkelig fall i prisen fra litt over 1,00 USD/pund til 0,60 USD/pund. Prisfallet i 2008 kan skyldes den store finanskrisen i høsten 2008 hvor store deler av det internasjonale finansmarkedet og verdensøkonomien kollapset som førte til at oljeprisen falt. Når oljeprisen faller vil også prisen på plastmaterialer falle som tidligere forklart. Videre steg prisen til litt over en dollar igjen med noen mindre svingninger før prisen falt i 2016 igjen til ca. 0,60 USD/pund. Fra starten av 2016 og frem til i dag har prisen steget til ca. 0,75 USD/pund som tilsvarer ca. 14 NOK/kg.

5.4.2 Prisutviklingen til LDPE (low-density polyetylen)

RESIN: LDPE

RESIN GRADE: Injection GP

VOLUME: Annual volumes of about 2 million to 5 million pounds.



RESIN: LDPE

RESIN GRADE: Injection Lid Resin

VOLUME: Annual volumes greater than 20 million pounds.



RESIN: LDPE

RESIN GRADE: Extrusion Coating paper

VOLUME: Annual volumes greater than 20 million pounds.



RESIN: LDPE

RESIN GRADE: Extrusion Film liner

VOLUME: Annual volumes greater than 20 million pounds.



Figur 5-10 - Prisutviklingen til forskjellige undertyper av LDPE (low-density polyetylen) fra 1997 og 1989 til 2017. Prisen er oppgitt i USD (amerikanske dollar) per pund (cents/lb.). [43]

Ut i fra figur 5-10 ser man at kurvene følger samme trend som for prisutviklingen til HDPE. På samme måte som for HDPE begynte prisen på litt over 0,50 USD/pund. Prisen øker jevnt frem til 2008 før det skjer et voldsomt fall i prisen fra ca. 1,20 USD/pund til 0,70 USD/pund. Prisen stiger jevnt til 1,25 USD/pund frem til slutten av 2014, før prisen faller kraftig til ca. 0,75 USD/pund. Videre har prisen steget til ca. 0,90 USD/pund frem til i dag som tilsvarer ca. 16,81 NOK/kg.

5.4.3 Prisutviklingen til PP (polypropylen)

RESIN: PP

RESIN GRADE: Homopolymer Injection GP

VOLUME: Annual volumes greater than 20 million pounds.



RESIN: PP

RESIN GRADE: Extrusion Film

VOLUME: Annual volumes greater than 20 million pounds.



RESIN: PP

RESIN GRADE: Random Copolymer Injection

VOLUME: Annual volumes greater than 20 million pounds.



RESIN: PP

RESIN GRADE: Random Copolymer Blow molding

VOLUME: Annual volumes greater than 20 million pounds.



Figur 5-11 - Prisutviklingen til forskjellige undertyper av PP (polypropylen) fra 1997 til 2017. Prisen er oppgitt i USD (amerikanske dollar) per pund (cents/lb.). [43]

Ut i fra figur 5-11 ser man at priskurven for polypropylen ser litt annerledes enn for HDPE og LDPE. Man ser at det er færre svingninger i prisen fra 1997 til 2008, mens etter 2008 varierer prisen i større grad sammenlignet med priskurvene til HDPE og LDPE. Dette kan tyde på at polypropylen ikke er et like populært plastmateriale som polyetylen som fører til større variasjon i tilbudet, etterspørselen og prisen til polypropylen. Til tross for dette følger priskurven til polypropylen likevel den samme trenden som HDPE og LDPE gjør når det gjelder de kraftige svingningene i prisen. Prisen på polypropylen var i 1997 litt under 0,50 USD/pund og i 2017 er prisen på ca. 0,75 USD/pund som tilsvarer ca. 14 NOK/kg.

5.4.4 Prisutviklingen til PVC (polyvinylklorid)

RESIN: PVC

RESIN GRADE: Suspension Resin Injection GP

VOLUME: Annual volumes greater than 20 million pounds.



RESIN: PVC

RESIN GRADE: Suspension Resin Pipe grade

VOLUME: Annual volumes greater than 20 million pounds.

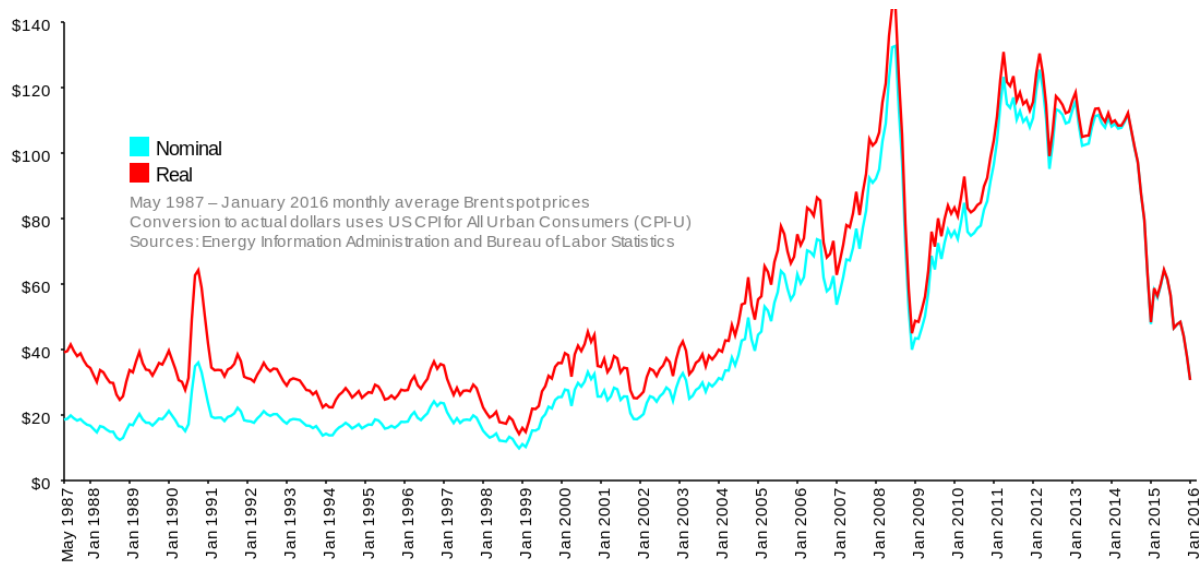


Figur 5-12 - Prisutviklingen til forskjellige undertyper av PVC (polyvinylklorid) fra 1997 til 2017. Prisen er oppgitt i USD (amerikanske dollar) per pund (cents/lb.). [43]

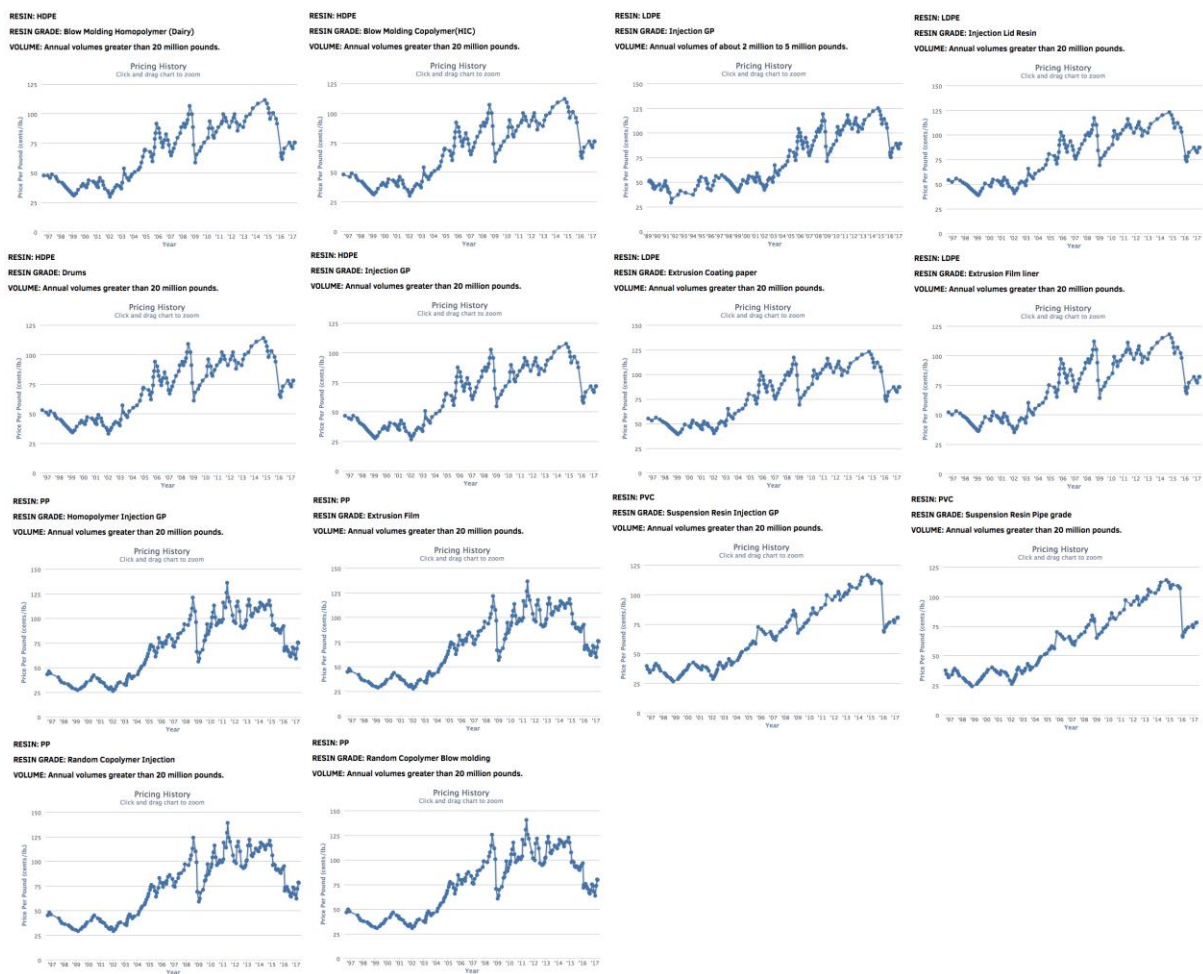
Ut i fra figur 5-12 ser man at priskurven til polyvinylklorid har mindre variasjon og færre markante svingninger i forhold til HDPE, LDPE og PP sine priskurver. Dette kan tyde på at PVC har en mer stabil etterspørsel hvor det er et konstant behov for å bruke PVC i produksjonen av for eksempel vann- og avløpsrør, rørsystemer, ledningsisolasjon, hageslanger, leketøy og diverse verktøy. Selv om det er mindre variasjon og færre svingninger i priskurven til PVC, kan man se at den følger fortsatt den generelle trenden som alle priskurvene viser. Prisen på polyvinylklorid var i 1997 ca. 0,40 USD/pund og i 2017 er prisen på ca. 0,80 USD/pund som tilsvarer ca. 14,92 NOK/kg.

5.4.5 Konklusjon fra prisutviklingsanalysen

Som man kan tolke ut i fra priskurvene til HDPE, LDPE, PP og PVC ser man at det har vært store variasjoner og svingninger i prisen til disse plastmaterialene. Likevel kan man også se at priskurvene til de forskjellige plastmaterialene følger en felles trend. Denne felles trenden har opphav fra svingninger i verdensøkonomien, finansmarkedet, olje- og gassprisen i tillegg til tilbudet og etterspørselen etter plastmaterialer. For å se tydeligere korrelasjonen og sammenhengen mellom oljeprisen og plastprisene, har jeg sammenlignet oljeprisen og plastprisene ved hjelp av en graf over oljeprisen og grafer over de ulike plastprisene.



Figur 5-13 - Graf som viser månedlig gjennomsnittlig spotpris (Brent Blend hovedklassen) på olje fra 1987 til 2016. [44]



Figur 5-14 - Prisene på de forskjellige plastmaterialene. [43]

Hvis man sammenligner figur 5-13 og 5-14 kan man tydelig se at det er en sammenheng og korrelasjon mellom oljeprisen og prisene på de forskjellige plastmaterialene. Dette bekrefter at plastindustrien har en veldig nær tilknytning til olje- og gassindustrien og påvirkes i stor grad av svingningene i oljeprisen. Dette var som forventet siden plastmaterialer produseres fra kjemiske produkter som kommer fra oljeindustrien og den petrokjemiske industrien. Dette gjør at plastbedrifter blir veldig avhengig av å kjøpe inn produkter fra oljeindustrien og den petrokjemiske industrien. En eventuell prisoppgang eller prisnedgang på petrokjemiske produkter vil da påvirke kostnadsnivået til plastbedriften og må da prise sine plastprodukter der etter.

Videre ut i fra analysen kan man også konkludere med at HDPE og PP er de to billigste plastmaterialene som begge ligger på ca. 14 NOK/kg. De to dyreste plastmaterialene er LDPE og PVC som ligger henholdsvis på ca. 16,81 NOK/kg og ca. 14,92 NOK/kg.

5.5 Prognose av plastindustrien

Plastindustrien er allerede en stor industri og det produseres millioner av tonn plastmaterialer hvert år. Når det gjelder å forutse den videre utviklingen til plastindustrien må man se på de faktorer som i stor grad påvirker plastindustrien. Disse faktorene innebærer blant annet de ytre forholdene som politiske krav og krav fra myndigheter, regler og juridiske lover, økonomiske faktorer som tilbud og etterspørsel, teknologisk innovasjon og utvikling, miljø- og klimakrav, i tillegg til samfunn og kultur.

En faktor som kan bidra til å forhindre en positiv vekst av plastindustrien er det økende miljø- og klimafokuset. På grunn av dette vil det antakelig bli iverksatt flere miljø- og klimakrav med tanke på at samfunnet og verden blir mer bevisst på den negative påvirkning vi har på miljøet og klimaet. Plastindustrien blir da særlig utsatt siden produksjonen av plastmaterialer indirekte finansierer og støtter positivt opp mot olje- og gassindustrien og økningen i bruk av fossile brensler. I tillegg er plastmaterialer kjent for å forsøple naturen og ødelegge for plante- og dyrelivet på grunn av at plastmaterialer normalt ikke er biologisk nedbrytbare, noe som kan bidra til flere miljømessige begrensninger og krav fra myndigheter, statsledere, politikere og samfunnet.

En utvikling av plastindustrien man kan se allerede i dag er at produksjonen av plast i økende grad forflytter seg fra Europa, USA og vesten til lavkostland i Asia som for eksempel Kina. I disse landene er det flere mennesker og billigere arbeidskraft slik at man enklere kan masseprodusere plastmaterialer. Dette fører til at de generelle produksjonskostnadene synker og plastmaterialer kan produseres med en lavere kostnad per masseenheter sammenlignet med andre vestlige land. Dette gjør at land i Asia med en voksende økonomi blir mer konkurransedyktige og tar over produksjonen av ikke bare plastmaterialer, men også elektronikk og klær.

Man vil antakelig også se en videre teknologisk utvikling av plastindustrien med tanke på innovasjon og nyvinning av nye og bedre plastmaterialer med nye eller nye kombinasjoner av egenskaper. Siden miljø- og klimafokuset øker vil det antakelig også bli et økende fokus på å utvikle mer miljøvennlige og nedbrytbare plastmaterialer. Dette kan bidra til å snu den negative holdningen som samfunnet ofte har til plastmaterialer og gjøre plast til nyttige, miljøvennlige og bærekraftige materialer i stedet for å ha en motsatt effekt.

Når det gjelder den videre prisutviklingen til plastmaterialer har det blitt påvist at olje- og gassindustrien i tillegg til olje- og gassprisene i stor grad påvirker og bestemmer prisene på ulike plastmaterialer. I tillegg har man tilbudet og etterspørselen etter de forskjellige plastmaterialene, der et lavt tilbud og høy etterspørsel øker prisen på plastmaterialer, mens et høyt tilbud og lav etterspørsel reduserer prisen på plastmaterialer. Også den økende forflytningen av plastindustrien til Kina og andre lavkostland i Asia, fører til at prisen på plastmaterialer presses nedover.

6. Diskusjon, prosessevaluering og oppsummering

Funn, trender og sammenhenger fra analyser av testresultatene, prisutviklingen og plastindustrien vil bli tatt opp til diskusjon og oppsummert i forhold til fremsatt teori, problemstillingene og delmålene som ble presentert innledningsvis. Også konklusjoner og oppsummeringer fra analysene vil bli fremsatt og tatt opp til diskusjon, og vil virke som et grunnlag for evalueringen som kan bidra til forbedringer og til det videre arbeidet.

6.1 Diskusjon og oppsummering

Innledningsvis ble det fastsatt ulike målsettinger og problemstillinger som ble brukt som utgangspunkt for oppbygningen av innholdet i prosjektoppgaven. Det er utredet en undersøkelse og oppsummering av eksisterende litteratur og teori som omhandler plastmaterialer og plastrør, og de tilhørende egenskapene ved forskjellige temperaturer. Oppbygningen, strukturen og egenskapene til de mest brukte termoplastene i verden HDPE, LDPE og PVC i tillegg til armerte plastmaterialer, har også blitt gjennomgått. Det er også utført simuleringer i SolidWorks på ulike 3D-modellerte termoplastrør i tillegg til strekktester ved forskjellige temperaturer, som har gitt resultater og verdier for materialegenskapene til de ulike plastmaterialene som tøyning, spenning og E-modul. Resultatene og verdiene fra simuleringene og de praktiske forsøkene ble videre sammenlignet med eksisterende litteratur og teori om plastmaterialer. Videre har det blitt utredet for plastindustrien og tilhørende markedsdata, den petrokjemiske industrien, ytre forhold som påvirker plastindustrien, analyse av prisutviklingen til plastmaterialer og en prognose av den fremtidige utviklingen til plastindustrien.

De utførte simuleringene på de 3D-modellerte termoplastrørene i SolidWorks, de simulerte strekktestene og de praktiske strekktestene ved Høgskolen i Oslo og Akershus, har virket som et grunnlag for å beregne og måle tøyingsverdier, spenningsverdier, elastisitetsmodul og andre materialegenskaper som kan videre analyseres og sammenlignes med den eksisterende teorien om plastmaterialer ved lave temperaturer. Her viste det seg at resultatene fra simuleringene og praktiske forsøkene stemte godt overens med den utredede litteraturen og teorien. Det er også utredet for mulige feilkilder og unøyaktigheter ved å anvende både simuleringsprogramvarer og praktiske forsøk. Her ble konklusjonen at simuleringsprogrammer er mer nøyaktige, pålitelig og er mindre utsatt for feilkilder enn virkelige forsøk. Likevel er en simulering kun basert på matematiske modeller og fysiske lover som fører til at simuleringsprogrammer aldri vil bli en fullverdig erstatning for virkelige tester og forsøk.

Utredningen av ytre forhold har gitt bedre innsikt i de faktorer i samfunnet som påvirker plastindustrien, plastproduksjonen og plastprisene. Analysen av prisutviklingen til ulike plastmaterialer viser at det er en sammenheng og korrelasjon mellom olje- og gassprisene og plastprisene. Dette viser hvor avhengig og nær tilknytning det er mellom olje- og gassindustrien, den petrokjemiske industrien og plastindustrien. Det har også blitt utarbeidet en prognose av den fremtidige utviklingen til plastindustrien. I prognosen ser man at ytre faktorer som politiske krav og krav fra myndigheter, regler og juridiske lover, økonomiske faktorer som tilbud og etterspørsel, teknologisk innovasjon og utvikling, miljø- og klimakrav i tillegg til samfunn og kultur, er med på å forme og styre den videre utviklingen av plastmaterialer og plastindustrien.

7. Konklusjon

Hovedproblemstillingen og hovedmålet til prosjektoppgaven var å teste og oppnå resultater i forhold til hvordan egenskapene til plastmaterialer og ulike termoplaste som HDPE, LDPE, PP og PVC i tillegg til armerte plastmaterialer, endret seg ved en reduksjon i temperaturen. I oppbygningen av de ulike termoplastene og teorien om polymerer er det beskrevet hvordan egenskaper som glasstransisjonstemperaturen, smeltetemperaturen, krystalliniteten og molekylkjedestrukturen kan påvirke hvordan de forskjellige termoplastene reagerer og oppfører seg ved endringer i temperaturen. Innføringen i den eksisterende teorien om plastmaterialers egenskaper og oppbygning har virket som et grunnlag for å kunne utføre praktiske forsøk og simuleringer. Resultatene som har oppstått som følge av de praktiske forsøkene og simuleringene har videre blitt analysert, drøftet og oppsummert i forhold til om de stemte overens med den fremsatte teorien.

Ut ifra de simuleringsforsøkene, resultatene og de tilhørende analysene ble konklusjonen at en reduksjon i temperaturen vil føre til at alle plastmaterialer får en økning i E-modulen, som gjør at plastmaterialene blir stivere, hardere og tåler en høyere belastning. Dette fører til at det blir mindre tøyning i plastmaterialene som kan tyde på at de blir sprøere. Et sprøtt materiale vil lettere kunne svikte og bryte sammen på grunn av faren for sprekkvekst som kan føre til et sprøtt brudd, hvis spenningen blir for høy. Det blir derfor ekstra viktig at forbrukere av plastmaterialer blir opplyst om egenskapene til plastmaterialer ved forskjellige temperaturområder, som kan bidra til å øke bevisstheten rundt de konsekvensene og farene som kan oppstå ved å anvende og utsette plastmaterialer for lave temperaturer. En videre forskning, fordykning og opplysning om plastmaterialers egenskaper ved forskjellige temperaturer, men også krefter, trykk, slag og spenninger, kan bidra til en positiv effekt når det gjelder helse, miljø og sikkerhet i samfunnet der plastmaterialer anvendes.

Når det gjelder prognosen av plastindustrien så viser den de faktorer som er med på å bestemme den videre fremtidige utviklingen til plastmaterialer og den tilhørende plastindustrien. Her er det veldig vanskelig å spå hva som vil skje, men forhåpentligvis vil plastindustrien bli mer miljø- og klimavennlig ved å utvikle et biologisk nedbrytbart plastmateriale. I tillegg vil det antakelig skje en teknologisk utvikling som kan gi nye og bedre plastmaterialer med nye og forbedrede egenskaper. Utviklingen av olje- og gassindustrien, den petrokjemiske industrien, utviklingen av olje- og gassprisene i tillegg til fremtidige politiske beslutninger tatt av statsledere og myndigheter, er kanskje de viktigste faktorene som har mest å si for den videre utviklingen av plastindustrien.

7.1 Videre arbeid

Plastmaterialer og syntetiske polymerer er et bredt fagfelt som kontinuerlig er i utvikling. Plastindustrien er en stor industri hvor det produseres flere millioner tonn plastmaterialer hvert år. Det kreves derfor en kontinuerlig fordypning og forskning når det gjelder oppbygning, utvikling, innovasjon, produksjon, distribusjon, testing og kvalitetssikring av plastmaterialer.

Utover å teste elastisitetsmodulen, tøyningen og spenningen kunne det vært interessant å se nærmere på bruddseigheten og slagseigheten til plastmaterialer ved lave temperaturer, som kunne fortalt noe om forplantningen av sprekker og hvor mye plastmaterialet tåler før det går til brudd. Et annet viktig videre arbeid kunne vært å se på andre faktorer enn temperatur som kan påvirke egenskapene til plastmaterialer. Dette kan for eksempel være varierende faktorer som for eksempel krefter, spenninger, slag og trykk som kan føre til forskjellige deformasjoner, tøyninger og spenninger i plastmaterialer. Særlig syklisk belastning og utmatting på plastmaterialer ved forskjellige temperaturer kunne vært et interessant og spennende tema.

Et annet viktig felt for videre arbeid kunne vært å se på de viskøse egenskapene og signingen til plastmaterialer som blant annet varierer både med temperaturen og tiden. På grunn av disse viskoelastiske egenskapene til plastmaterialer kunne det vært interessant å se på hvordan for eksempel en rask temperaturendring av plastmaterialer påvirker materialeegenskapene. Også en videre fordypning og forskning på hva som skjer i de kjemiske bindingene og molekyl- atomstrukturen til plastmaterialer ved endringer i temperaturen, i tillegg til en eventuell påføring av krefter, spenninger, slag og trykk, kunne vært et interessant videre forskningsarbeid på plastmaterialer.

8. Litteraturreferanser

- [1] «Bilde av blå plastrør,» [Internett]. Available: <http://a1sewercleaning.com/tag/sewer-replacement/> .
- [2] «Bilde av spennings- tøyingsdiagram,» [Internett]. Available: http://images.slideplayer.no/8/2046139/slides/slide_9.jpg.
- [3] «Bilde av gummistrikk,» [Internett]. Available: [http://raja.scene7.com/is/image/Raja/products/gummistrikk-brun_OFF_NO_0994.jpg?image=M_STRIKK01_O_G_NO\\$default\\$](http://raja.scene7.com/is/image/Raja/products/gummistrikk-brun_OFF_NO_0994.jpg?image=M_STRIKK01_O_G_NO$default$).
- [4] «Bilde av aluminium,» [Internett]. Available: [http://www.productionmachining.com/cdn/cms/186326832%20\(1\).jpg](http://www.productionmachining.com/cdn/cms/186326832%20(1).jpg).
- [5] «Bilde av knust glass,» [Internett]. Available: <https://tracepersiko.files.wordpress.com/2012/06/shattered-glass-wallp-long-goodbye.png>.
- [6] «Newtons lov om avkjøling,» [Internett]. Available: <http://www.ugrad.math.ubc.ca/coursedoc/math100/notes/diffeqs/cool.html> .
- [7] I. Martinez, «Forskningsrapport om materialers egenskaper ved forskjellige temperaturområder. (Thermal effects on materials),» [Internett]. Available: <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/ot1/Thermal%20effects%20on%20materials.pdf>.
- [8] S.-Y. Fu, «Forskningsrapport om kryogene egenskaper til polymermaterialer (Cryogenic Properties of Polymer Materials),» [Internett]. Available: http://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument/9783642353345-c2.pdf?SGWID=0-0-45-1383606-p174739565.
- [9] W. D. Callister og D. G. Rethwisch, Materials Science and Engineering, Ninth Edition.
- [10] D. K. Hechtel, «Forskningsrapport om bruk av plastmaterialer ved kryogeniske temperaturer (Design considerations for the use of plastic materials in cryogenic environments),» [Internett]. Available: <https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Technical-Resources/Technical-Resources/Plastic-Materials-in-Cryogenic-Environments>.
- [11] «Low Temperature Properties of Polymers (Zeus Industrial Products),» [Internett]. Available: http://www.appstate.edu/~clementsjs/polymerproperties/plastics_low_temp.pdf.

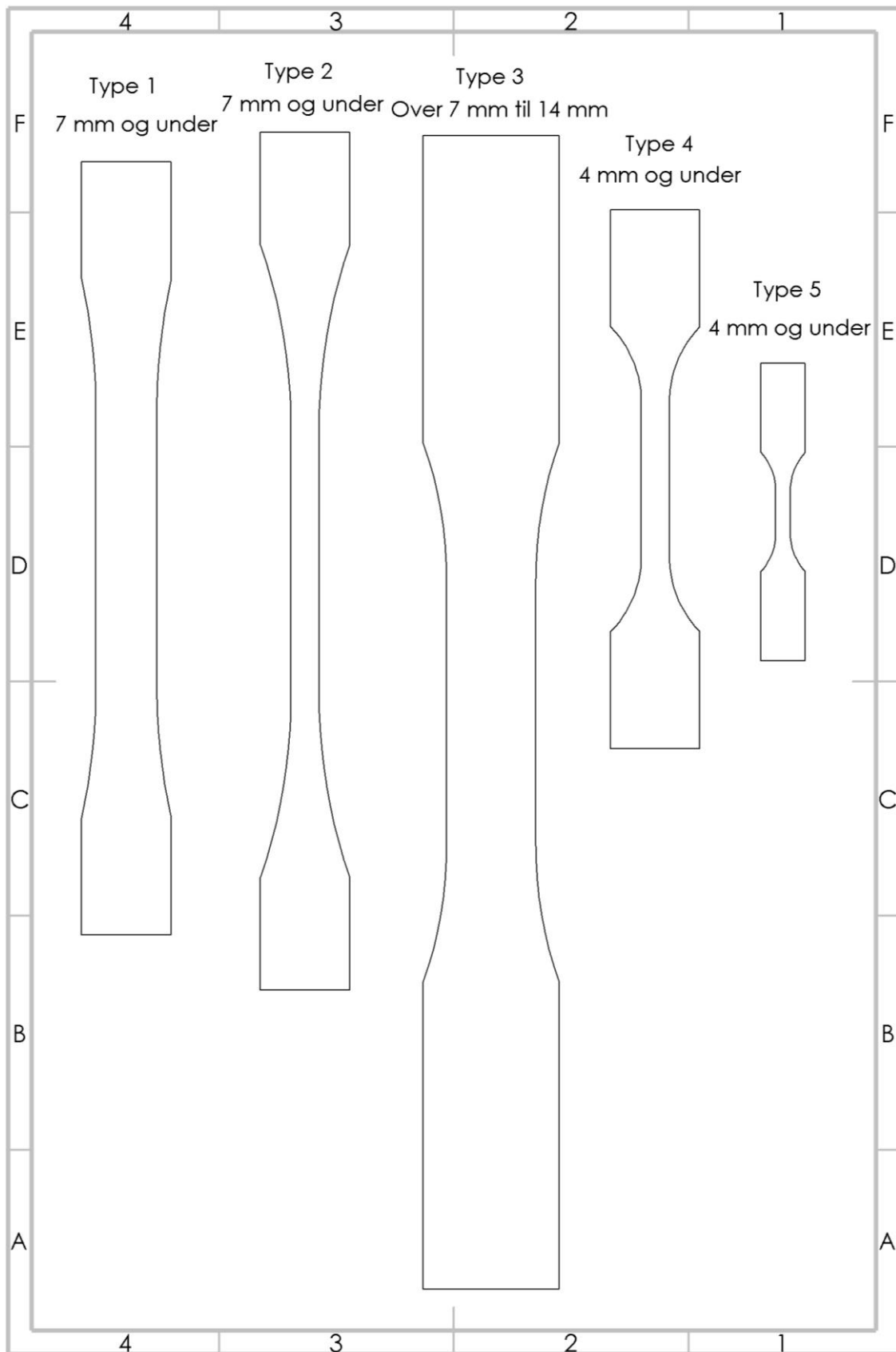
- [12] I. Perepechko, «Forskningsrapport om egenskapene til polymerer ved lave temperaturer (Low-Temperature Properties of Polymers),» [Internett]. Available: <https://books.google.no/books?id=kjovBQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=no>.
- [13] «Sprøbrudd SNL,» [Internett]. Available: <https://snl.no/spr%C3%B8brudd> .
- [14] H. Johansen, «Plastmaterialer (kompendium høgskolen i Gjøvik),» [Internett]. Available: http://www.ansatt.hig.no/henningj/materialteknologi/Skriftserien/ML_Plastmaterialer_nr.10.pdf.
- [15] NTNU, «Kompendium, materialteknologi,» [Internett]. Available: <http://folk.ntnu.no/gauteoh/courses/TMT4185Materialteknologi/Kompendium.pdf> .
- [16] «Bilde av strekkprøvemaskin fra Høgskolen i Oslo og Akershus,» [Internett]. Available: http://www.iu.hio.no/bygglab/Strekklab/utstyr/Utstyr_metall.htm#strekkm.
- [17] B. Standard, «BS EN ISO 9969:2016 - Thermoplastics pipes — Determination of ring stiffness».
- [18] «Bilde av sektordiagram, mest brukte polymerer,» [Internett]. Available: http://www.mdpi.com/materials/materials-07-05069/article_deploy/html/images/materials-07-05069-g004-1024.png.
- [19] «Bilde av strukturformel (Polyvinylklorid),» [Internett]. Available: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/67/Polyvinylchloride-repeat-2D-flat.png/220px-Polyvinylchloride-repeat-2D-flat.png> .
- [20] «Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.,» [Internett]. Available: https://www3.nd.edu/~manufact/MPEM_pdf_files/Ch10.pdf.
- [21] «Chapter Outline: Characteristics, Applications, and Processing of Polymers,» [Internett]. Available: <http://people.virginia.edu/~lz2n/mse209/Chapter15c.pdf>.
- [22] «Termoplastdiagrammer,» [Internett]. Available: <http://www.kazuli.com/UW/4A/ME534/lexan2.htm> .
- [23] «Identifiseringskjema for ulike plastmaterialer,» [Internett]. Available: http://www.loyresearchgroup.com/uploads/1/0/2/2/10227236/new_id_chart_.pdf.
- [24] «Bilde av strukturformel (polyetylen),» [Internett]. Available: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f7/Polyethylene-repeat-2D-flat.png>.
- [25] m. i. Granta, «CES EduPack».
- [26] «Bilde av strukturformel (polypropylen),» [Internett]. Available: <http://spectra-offset.no/wp-content/uploads/2013/10/Polypropylene-300x193.png>.

- [27] «Informasjon om fiberarmerte plastmaterialer,» [Internett]. Available: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=polymer_matrix_composites_introduction.
- [28] «Bilde av forskjellige typer glassfiber,» [Internett]. Available: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1a/Glass_reinforcements.jpg.
- [29] «Bilde av apparat for testing av ringstivhet,» [Internett]. Available: https://www.zwick.com/-/media/images/video_vorschaubilder/191_determination_of_ring_flexibility.jpg.
- [30] «Thermofisher, lavtemperatur fryserer,» [Internett]. Available: <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/905>.
- [31] «Bilde av thermofisher fryseskap,» [Internett]. Available: <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/TSX600D>.
- [32] «Bilde av en strømningssimulering i SolidWorks,» [Internett]. Available: <https://i.ytimg.com/vi/eVBdG60rUX8/maxresdefault.jpg>.
- [33] «Bilde av simulering av trykktank i SolidWorks,» [Internett]. Available: <https://i.ytimg.com/vi/C4nhVqLVgqk/maxresdefault.jpg>.
- [34] A. S. f. T. a. M. International, «ASTM D638 - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics».
- [35] D. Systèmes, «SolidWorks 2016».
- [36] «Pipe Life Norge,» [Internett]. Available: <http://www.pipelife.no/no/>.
- [37] «Biobe AS Norge,» [Internett]. Available: <http://www.biobe.no/>.
- [38] «Bilde av brudd i plastrør,» [Internett]. Available: <http://hdpefailures.com/UT1.jpg>.
- [39] «Bilde av brudd i PVC-rør,» [Internett]. Available: <https://media.licdn.com/mpr/mpr/AAEAAQAAAAAAAAAfmAAAAJGE3NzY3MmM2LTMzOWMtNDRjMS1iNDc2LWNiNDc3MjZMmFmYQ.png>.
- [40] «Bilde av PVC-rør som har blitt sprøtt og gått i brudd,» [Internett]. Available: <https://static1.squarespace.com/static/570bc277b09f95abd701c1a3/570d499fd51cd4afef3bccb7/573710e1b654f9749a512a55/1463229272576/CPVC+Drain+Pipe.jpg?format=1500w>.
- [41] «Plastics – the Facts 2016 - An analysis of European plastics,» [Internett]. Available: http://www.plasticseurope.org/documents/document/20161014113313-plastics_the_facts_2016_final_version.pdf.
- [42] S. n. leksikon, «SNL, petrokjemi,» [Internett]. Available: <https://snl.no/petrokjemi>.

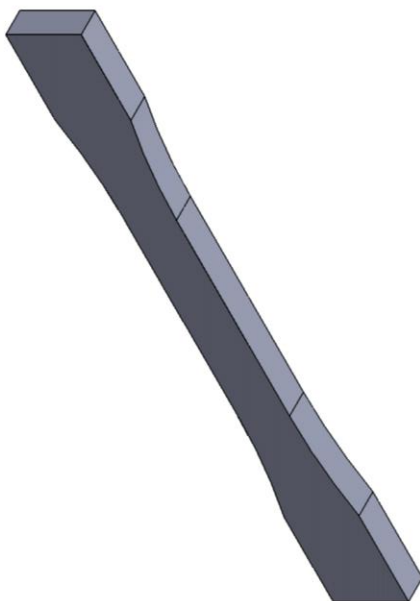
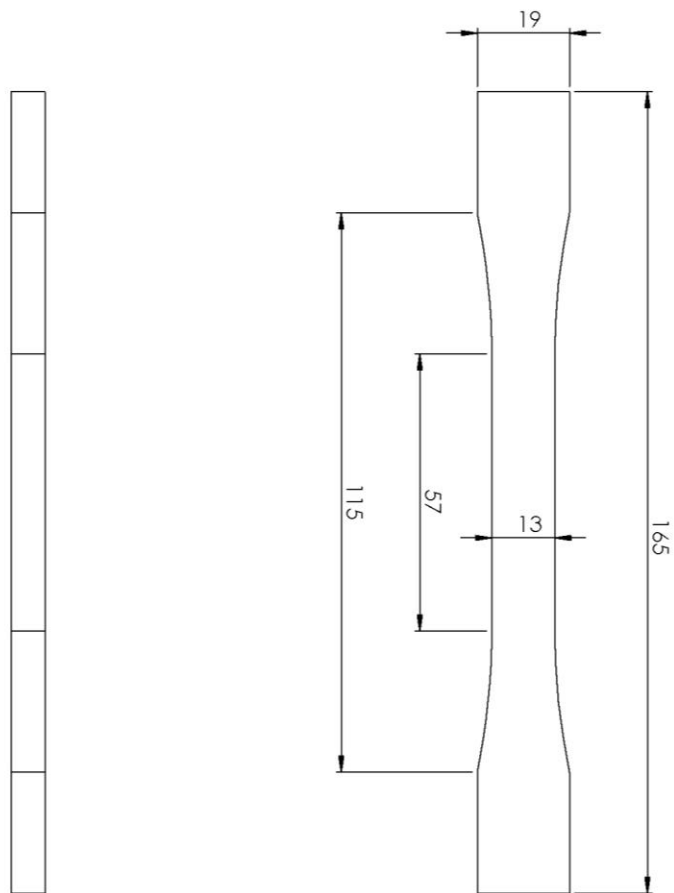
- [43] «Plastics News,» [Internett]. Available: <http://www.plasticsnews.com/>.
- [44] «Graf over oljeprisen (Brent Blend hovedklassen),» [Internett]. Available: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0f/Brent_Spot_monthly.svg.
- [45] P. A. Tipler og G. Mosca, *Physics For Modern Scientists and Engineers, Sixth Edition*, W. H. Freeman and Company, 2008.
- [46] S. Norge, «NS-EN1778:1999, Karakteristiske verdier for sveiste konstruksjoner i termoplast. Bestemmelse av tillatte spenninger og moduler for utforming av utstyr i termoplast,» Standard Norge.
- [47] B. Standard, «BS-EN-ISO1167-1:2006, Thermoplastics pipes, fittings and assemblies for the conveyance of fluids - Determination of the resistance to internal pressure. Part 1: General Method. Part 2: Preparation of pipe test pieces. Part 3: Preparation of components,» British Standard.
- [48] «Oppdagelsen av polyetylen,» [Internett]. Available: <http://www.edn.com/electronics-blogs/edn-moments/4410771/Polyethylene-synthesis-is-discovered--again--by-accident--March-27--1933>.

9. Vedlegg

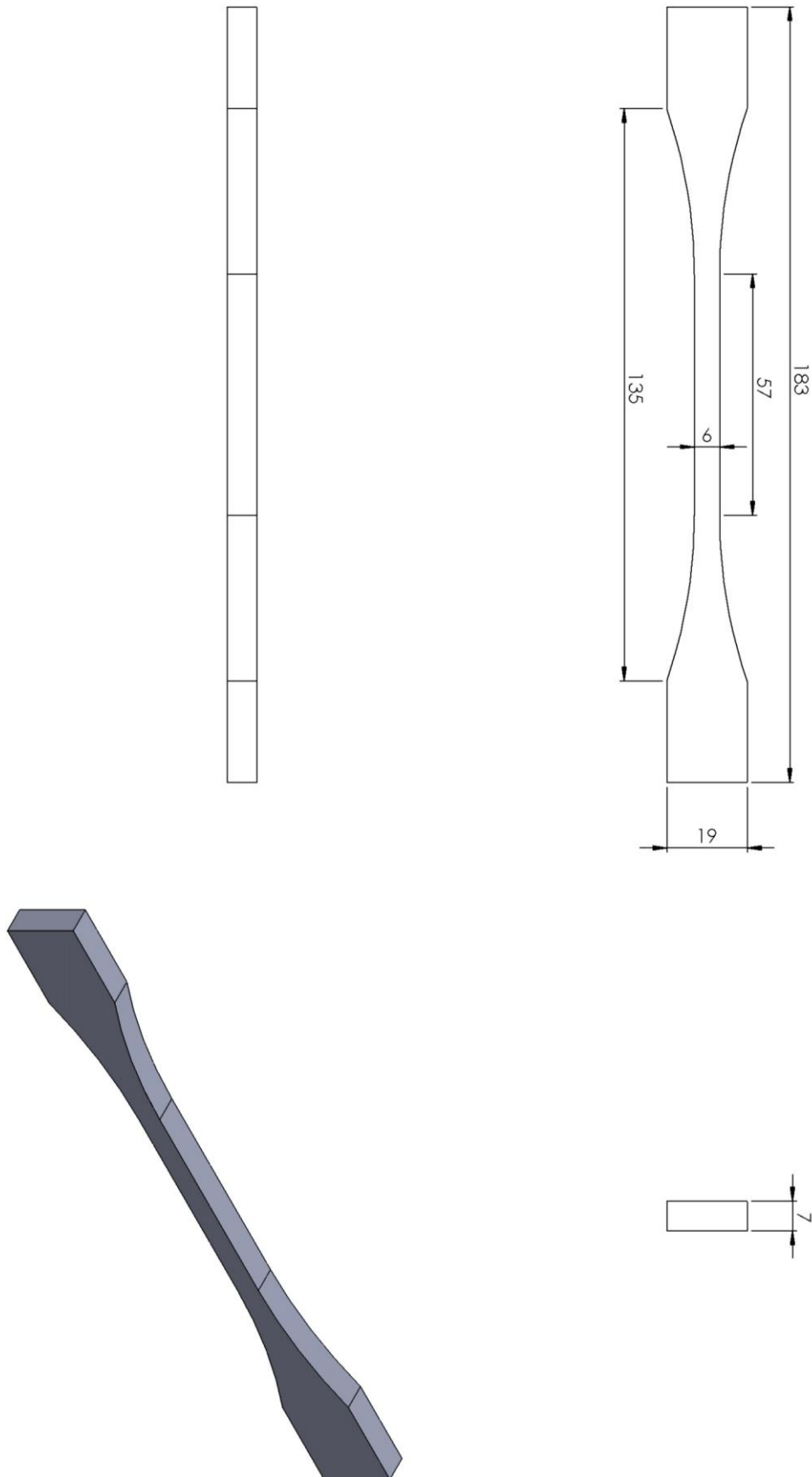
9.1 Prøvestykker (ASTM D638)



9.2 Målsatt skisse av type 1 (ASTM D638)



9.3 Målsatt skisse av type 2 (ASTM D638)



9.4 Identifiseringsskjema for ulike plastmaterialer

				Plastrmateriale	Flammefarge	Lukt	Røyk/andre egenskaper	Hastighet
mykner ikke	flyter	selvslukkende	drypper	PPO	gul-oransje	fenol	sort, sotende røyk	sakte
				PC	oransje/gul	fenol	sort, sotende røyk	sakte
				PVC	gul, grønn kant	fenol	sort, sotende røyk	sakte
				ABS	gul	syrlig	sort, sotende røyk	middels
				POM	blå	sterk formaldehyd	ingen røyk	sakte
				CA	gul	eddik	sort, sotende røyk	middels
	flyter ikke	brenner ikke	drypper	CP	gul, blå spiss	harsk smør	litt røyk med sot	middels
				PS	gul	brent sukker	litt sort røyk	fort
				TPE	gul, blå kant	styren	tett, sotende, sort røyk	fort
				CN	svak gul	svidd gummi	sort, sotende røyk	fort
				PUR	gul	kamfer	brenner helt opp	fort
				PFEF	gul	eple	litt sort røyk	fort
mykner	selvslukkende	brenner ikke	drypper	CTFE		acetalsyre		
				PTFE		brent hår		
				PVF		acetalsyre		
				DAP	gul	svak fenol	sort røyk	
				MF	gul, blå spiss	fisk	sveller, sprekker	
				PF	gul	fenol	slukker ikke alltid	
	brenner	brenner ikke	drypper	UF	gul, turkis kant	formaldehyd	sveller, sprekker	
				Polyester	gul, blå kant	styren	sort sotende røyk	
				SI	lys gul	ingen	fortsetter å brenne	
				EP	gul	fenol	sort røyk	



Norges miljø- og biovitenskapelig universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway