



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2016 30 stp.
Institutt for matematiske realfag og teknologi

Termoplast ved lave temperaturer, en undersøkelse og metodeutvikling for testing av ringstivhet og E-modul

Thermoplastics at low temperatures, a research
and development of a method for testing the
ring stiffness and modulus of elasticity

Simen Stusvik Haug
Industriell økonomi

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet og gjennomført ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU), ved Institutt for matematiske realfag og teknologi (IMT) innenfor studieretningen industriell økonomi. Omfanget av oppgaven er på 30 studiepoeng, og den er skrevet våren 2016.

Oppgaven og hele prosessen rundt har vært meget spennende, men også krevende helt fra starten av. Denne oppgaven har, akkurat som jeg ønsket, gitt meg en dypere forståelse av materiallære og testing av mekaniske egenskaper, og særlig hvordan ulike termoplaste oppfører seg ved ulike forhold. Den har i tillegg kombinert et bredt spekter av ferdigheter og kunnskaper som har blitt tilegnet gjennom studieløpet, både praktiske og teoretiske. Oppførselen til plastmaterialer ved lave temperaturer finnes det ganske lite informasjon om, og det har derfor vært interessant å jobbe med et område det ikke finnes altfor mye informasjon om fra før.

Først og fremst vil jeg takke min hovedveileder ved NMBU, Johan Andersen, og tilleggsveileder Aage Kollen. Samtalene og hjelpen jeg har fått har vært veldig nyttige og uvurderlige. Hjelp med utvikling av metode, teorispørsmål og generell støtte har blitt satt stor pris på.

I tillegg vil jeg rette en oppmerksomhet til blant annet avdelingsingeniør Gunnar Torp og de andre ved mekanisk verksted ved IMT, som alltid har hjulpet til hvis jeg har hatt bruk for hjelp til utskjæring av plater og lån av diverse verkstedutstyr. Øyvind Lund, Lars Opseth og resten ved SKP, senter for klimaregulert planteforskning, ved NMBU har bidratt med utlån av frysekammer brukt til gjennomføring av forsøk i oppgaven.

Jeg har også i løpet av oppgavegjennomføringen snakket med og fått gode råd av flere ansatte ved IMT. Jeg vil til slutt takke andre medstudenter for god støtte underveis i oppgaveskrivingen, og det gode samholdet har kommet godt med underveis i masterjobbingen.

Ås, den 11. mai 2016

Simen Stusvik Haug

Sammendrag

I materialteknologiens univers finner man mye informasjon om mange materialer, ved veldig forskjellige forhold. Om plastmaterialer vet man veldig mye om oppførselen ved høye temperaturer, men hvordan de oppfører seg ved lave temperaturer er det vanskeligere å finne informasjon om. Hvordan plastmaterialer, og da i dette tilfellet de enkleste polymerene, oppfører seg ved temperaturer på ned mot 75 minusgrader er det ikke gjort veldig mye forskning på. Dette er kunnskap som kan være meget nyttig nå og fremover, og både i olje- og flyindustrien vil den kunnskapen være etterspurt.

I denne sammenheng hadde tilleggsveileder Aage Kollen et forslag på en masteroppgave som omhandlet nettopp dette, som jeg fant meget spennende. Målsettingen med denne oppgaven ble da å gjøre en undersøkelse av termoplast ved lave temperaturer, og utvikle en metode for å teste ringstivheten og E-modulen til rør laget av polymerene PP, PE og PVC.

Oppgaven startet med en undersøkelse av hva som fantes av litteratur omkring egenskapene til termoplast ved lave temperaturer, i tillegg til generell informasjon om både materiallære og plastmaterialer. Det viste seg at enkelte studier av disse egenskapene hadde blitt gjennomført før, blant annet en undersøkelse av polymerer ved kryogeniske temperaturer. Der var funnene at enkelte av polymerene øker E-modulen med ca. 300 % ved veldig lave temperaturer [26]. En annen studie viste at HDPE doblet E-modulen ved en senkning av temperaturen fra 0 °C til -50 °C [29].

En metode for å fysisk teste ringstivheten og E-modulen, og endringene av disse ved lave temperaturer, ble utviklet, og standarden EN ISO 9969:2007 ble lagt til grunn så langt det var mulig. Testutstyr ble bygget i mekanisk verksted ved NMBU, og fire termoplastrør laget av HDPE, PE, PP og PVC ble testet ved hjeå av frysekammere ved Senter for Klimaregulert Planteforskning (SKP).

Det viste seg at ved en endring av temperaturen fra romtemperatur til -25 °C ble E-modulen til rørene laget av PE, PP og PVC nesten doblet, mens HDPE-røret bare opplevde en mindre økning. Ved ytterligere senkning av temperaturen til -72 °C økte E-modulen enda mer, og for de tre førstnevnte rørene var denne økningen på mellom 166 % og 204 %. HDPE-røret økte E-modulen med bare 36 % i forhold til ved romtemperatur. Disse resultatene stemte godt overens med hva som ble funnet i eksisterende litteratur, selv om feilkildene ved testingen utført i denne oppgaven kunne være store.

En økonomisk analyse ble også gjennomført, hvor det hovedsakelig ble sett på hvilke makroøkonomiske faktorer som påvirker både plastproduksjonsindustrien og prisen på polymerene. Det viser seg at plastindustrien kan virke å oppleve en litt flatere vekst, men at etterspørselen ikke stiger nok til at prisene vil øke. En prediksjon av fremtidige plastpriser er vanskelig å gjennomføre, da særlig den usikre oljeprisen har stor innvirkning på plastprisene.

Abstract

In the universe of material science, you can find a lot of information about many materials, under very different conditions. We know much about the behavior of thermoplastics at high temperatures, but not as much about how they behave at low temperatures. It is hard to find good information about how polymers and plastics in general behave at temperatures as low as 75 degrees below zero. Knowledge about this can be very useful in many industries, especially the oil and aerospace industry.

With this in mind, Aage Kollen, the additional supervisor for this thesis, had a suggestion on a master's thesis that dealt with this kind of information. The objective was to do a research on the behavior of thermoplastics at low temperatures, and develop a method to test the ring stiffness and modulus of elasticity, and the change of these properties, at low temperatures for pipes made of the polymers polyethylene (PE), polypropylene (PP) and polyvinyl chloride (PVC).

The process started with searching for information about the mechanical behavior of materials in general and thermoplastics at low temperatures, in addition to more information in general of both thermoplastics and ways of testing the properties. It turned out that some research had been done before, including a book written about polymers at cryogenic temperatures. The findings in the book were that some of the polymers increased their modulus of elasticity with about 300 % at very low temperatures [26]. Another study showed that the polymer PEHD doubled its modulus of elasticity when the temperature dropped from 0 °C to -50 °C [29].

A method to test physically the ring stiffness and modulus of elasticity, and the changes of these properties at low temperatures, was developed with the help of the standard EN ISO 9969:2007. The test equipment was built at the workshop at NMBU, and four thermoplastic pipes made of HDPE, PE, PP and PVC were tested using the freezing chambers at the Center for Climate Regulated Plant Research (SKP).

It turned out that changing the temperature from room temperature to -50 °C almost doubled the modulus of elasticity of the pipes made of PE, PP and PVC, while the pipe made of HDPE only experienced a smaller increase of the modulus of elasticity. By further lowering the temperature to -72 °C, the modulus of elasticity increased even more. The increase of the modulus of elasticity was between 166 % and 204 % for the pipes made of PE, PP and PVC compared to room temperature, while the increase for the HDPE pipe was only 36 %. These results coincided with what was found in the existing theory about thermoplastics at low temperatures, even though the way of testing was questionable.

An economic analysis of the plastic production industry was also conducted, as well as an analysis of the polymer price in the future. The macroeconomic factors affecting the plastic industry and the polymer prices were evaluated. The conclusion of the analysis was that the plastics industry could seem to be experiencing a slightly flatter growth, but the demand does not increase enough to make the polymer prices increase further. A prediction of the future plastic prices is difficult to implement, with especially the oil price having a huge impact on polymer prices.

Innholdsfortegnelse

Forord	i
Sammendrag	ii
Abstract	iii
Innholdsfortegnelse	iv
Figurliste	vi
Tabelliste	vii
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstillinger	2
1.3 Målsetting og begrensninger	3
1.3.1 Hovedmål	3
1.3.2 Delmål	3
1.3.3 Antakelser.....	3
1.3.4 Begrensninger.....	3
1.3 Kvalitetssikring (rapport og testutstyr).....	4
1.4 Løsningsverktøy	4
1.5 Symboler og terminologi.....	5
1.6 Oppbygging av oppgaven.....	6
2 Teoretisk grunnlag	8
2.1 Hookes lov.....	8
2.2 Elastisitetsteori	9
2.3 Oppvarming og nedkjøling av materialer.....	10
2.4 Materialer i kulde	11
2.4.1 Sprøbrudd.....	12
2.5 Testing av mekaniske egenskaper	13
2.6 Ringstivhet.....	13
2.7 Polymerer	16
2.7.1 Oppbygning	16
2.7.2 Mekaniske egenskaper til polymerer.....	18
2.7.3 Identifisering av plastmateriale	22
2.8 Polypropylen (PP)	23
2.9 Polyetylen (PE).....	25
2.10 Polyvinylklorid (PVC)	27
2.11 Eksisterende teori om termoplast i kulde	28

3	Metodeutvikling	31
3.1	Konseptdrøfting.....	31
3.2	Valgt løsning	32
3.3	Testgjennomføring	33
3.3.1	Generell fremgangsmåte.....	33
3.3.2	Case 1	36
3.3.2	Case 2	37
3.3.3	Case 3	38
3.4	Mulige feilkilder ved testingen.....	39
3.5	CAD-presentasjon	41
3.5.1	Konstruksjonstegninger	41
3.5.2	3D-bilde.....	42
4	Resultater.....	43
4.1	Resultater fra forsøkene.....	43
4.1.1	Case 1	43
4.1.2	Case 2	45
4.1.3	Case 3	48
4.2	Analyse av resultater og sammenlikning med eksisterende teori.....	50
5	Økonomisk analyse	53
5.1	Makroøkonomiske faktorer	53
5.2	Kostnadsvurdering.....	58
5.3	Prediksjon	60
6	Diskusjon og konklusjon.....	61
6.1	Diskusjon.....	61
6.2	Konklusjon	65
6.3	Videre arbeid	65
7	Litteraturreferanser	68
8	Vedlegg	72

Figurliste

Figur 1-1:	Plastrør i forskjellige farger og dimensjoner.....	2
Figur 1-2:	Valgt koordinatsystem.....	6
Figur 2-1:	Spennings-tøyingsdiagram, oversikt over plastisk og elastisk område.....	8
Figur 2-2:	Spennings-tøyingsdiagram for tre ulike materialer.....	9
Figur 2-3:	Nedfryste materialer på et skip i Arktis.....	12
Figur 2-4:	Oversikt over den relative bruken av ulike plastmaterialer.....	17
Figur 2-5:	Forskjellen mellom amorf og semi-krystallinsk struktur.....	18
Figur 2-6:	Ulike tilstander til en amorf termoplast.....	20
Figur 2-7:	Ulike tilstander til en krystallinsk termoplast.....	20
Figur 2-8:	Hvordan et amorf plastmateriale deformerer seg før brudd.....	21
Figur 2-9:	Hvordan et semi-krystallinsk plastmateriale deformerer seg før brudd.....	22
Figur 2-10:	Oppbyggingen til et PP-molekyl.....	23
Figur 2-11:	Oppbyggingen til et PE-molekyl.....	25
Figur 2-12:	Oppbyggingen til et PVC-molekyl.....	27
Figur 2-13:	Spennings-tøyingsdiagram for PPT ved 27 °C.....	29
Figur 2-14:	Spennings-tøyingsdiagram for PPT ved -225 °C.....	30
Figur 2-15:	Sammenlikning av E-modul for ulike plastmaterialer ved ulike temperaturer...30	
Figur 3-1:	Enkel illustrasjon av hvordan kreftene virker på platene og røret.....	31
Figur 3-2:	Foto av ferdigbygget testutstyr.....	33
Figur 3-3:	Frysekammer ved SKP, brukt til å fryse ned plastrørene til -72 °C.....	34
Figur 3-4:	Foto av hvordan høydemålinger foregår.....	36
Figur 3-5:	Foto av måling av deformasjon med påført last i romtemperatur utenfor frysekammeret.....	38
Figur 3-6:	Foto av frostrøyk og temperaturindikator på fryseskap.....	39
Figur 3-7:	Tegning av utstyret i SolidWorks, sett forfra.....	41
Figur 3-8:	Tegning av utstyret i SolidWorks, sett fra siden.....	41
Figur 3-9:	Tegning av utstyret i SolidWorks, sett skrått nedenfra.....	41
Figur 3-10:	3D-bilde av testutstyret, sett skrått ovenfra.....	42
Figur 4-1:	Grafisk fremstilling av økning i E-modul ved synke temperatur.....	51
Figur 5-1:	Den globale plastproduksjonen siden 1950.....	55
Figur 5-2:	Andel av den globale plastbruken.....	55
Figur 5-3:	Prisutvikling for PVC på det amerikanske markedet.....	58
Figur 5-4:	Prisutvikling og prediksjon for PE på det europeiske markedet.....	59
Figur 6-1:	Prosentvis endring i E-modul sammenliknet med romtemperatur.....	64
Figur 8-1:	Testutstyr sett forfra og fra siden.....	72
Figur 8-2:	Vertikale støtter på testutstyret.....	73
Figur 8-3:	Horisontale plater i bunnen og til lastpåføring.....	74
Figur 8-4:	Horisontale støtter på testutstyret.....	75

Tabelliste

Tabell 1:	Symbolliste.....	5
Tabell 2:	Mekaniske egenskaper til PP.....	23
Tabell 3:	Mekaniske egenskaper til PE.....	25
Tabell 4:	Mekaniske egenskaper til PVC.....	27
Tabell 5:	Dimensjoner til de testede plastrørene.....	35
Tabell 6:	Lengdeendring til plastrørene ved -25 °C.....	37
Tabell 7:	Lengdeendring til plastrørene ved -72 °C.....	38
Tabell 8:	Høydemålinger før last, case 1.....	43
Tabell 9:	Ønskede målinger etter last, case 1.....	43
Tabell 10:	Høydemålinger etter last, case 1.....	44
Tabell 11:	Høydemålinger før last, case 2.....	45
Tabell 12:	Ønskede målinger etter last, case 2.....	46
Tabell 13:	Høydemålinger etter last, case 2.....	46
Tabell 14:	Høydemålinger før last, case 3.....	48
Tabell 15:	Ønskede målinger etter last, case 3.....	48
Tabell 16:	Høydemålinger etter last, case 3.....	48
Tabell 17:	Sammenlikning av ringstivhet ved ulike temperaturer.....	50
Tabell 18:	Sammenlikning av E-modul ved ulike temperaturer.....	50
Tabell 19:	Økning i E-modul i forhold til ved romtemperatur.....	51
Tabell 20:	Oppnådd deformasjon ved testing.....	52

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Materialer laget av plast har i de senere tiårene blitt viktigere og blitt tatt i bruk, og i dag er plastindustrien enorm. Særlig de siste 60 årene har bruken av syntetisk fremstilte plastprodukter blitt kommersialisert og skutt fart, etter at man før i tiden brukte materialer laget av naturlige plaststoffer funnet i naturen, som cellulose og skjellakk. Nye og forbedrede plaststoffer og nye produksjonsmåter har gjort at plastmaterialer har fått et mye større bruksområde enn tidligere, og plastprodukters lave massetetthet i forhold til andre vanlige materialer gjør at de stadig oftere blir valgt.

Produksjonsstart for noen av de mest brukte polymerene som polystyren (PS), polyvinylklorid (PVC), polyetylen (PE), lavkrystallinsk (LDPE) var i mellomkrigsårene, mens produksjonen av andre polymerer som polypropylen (PP), høykrystallinsk (HDPE) og polykarbonat (PC) ble påbegynt på 1950-tallet. Den årlige vekstraten for plastproduksjonen lå lenge på 13 % per år, men har i det nye årtusenet flatet ut litt, mye på grunn av en allerede veldig høy produksjon [1].

Den største ulempen til plast og plastprodukter i forhold til andre materialer som metall og tre har vært, og er fortsatt, lav styrke og generelt dårligere mekaniske egenskaper, slik at ved bygging av konstruksjoner og produkter med krav til høy styrke har man heller valgt de tradisjonelle materialene. Ved lavere krav til styrke har man derimot foretrukket plast hovedsakelig på grunn av lav pris, lav vekt og høy formbarhet. Utvikling i bruk av tilsetningsstoffer og nye produksjonsmetoder har derimot endret på en del av disse egenskapene, og man kan nå finne flere mer avanserte plastprodukter som er mye sterkere og hardere enn hva man tidligere har opplevd. Det er forsket mye på hvordan både plastmaterialer og andre materialer oppfører seg ved høye temperaturer, da kunnskap om dette er svært nyttig til mange formål. Det er derimot ikke forsket veldig mye på hvordan plastmaterialer oppfører seg ved lavere temperaturer. Med de klimatiske forholdene vi har her i Norge, inkludert andre norske territorier som Svalbard og deler av Antarktis, er kunnskap om dette høyst nødvendig. For eksempel olje- og gassproduksjonen krever store mengder utstyr og konstruksjoner av forskjellige materialer, og mye av det er plast. Utbyggingen av denne sektoren beveger seg stadig nordover på kloden, til kalde og polare områder hvor temperaturen kan synke til langt under 50 minusgrader, og i denne sammenheng er det nødvendig å opparbeide seg mest mulig kunnskap om hvordan materialene som brukes oppfører seg.

En metode for å forsøke å tilegne seg mer kunnskap på dette området ble funnet, og ved hjelp av testing av ringstivhet etter standarden EN ISO 9969:2007 kan man på en forholdvis enkel måte teste ringstivheten og dermed finne E-modulen til plastrør. Lite informasjon om tidligere forøk ble funnet, så om testingen var gjennomførbar var på forhånd usikkert.



Figur 1-1: Plastrør i forskjellige farger og dimensjoner [2]

1.2 Problemstillinger

- Hvordan er de ulike polymerene, og i særlig grad PP, PE og PVC, bygget opp og hvordan påvirker dette egenskapene?
- Hvordan blir materialer generelt og termoplastmaterialer påvirket av lave temperaturer?
- Hvordan tester man de mekaniske egenskapene til materialer og plastrør? Både ved hjelp av mer avansert utstyr, og ved hjelp av enkle verktøy man selv kan finne.
- Hva er ringstivhet, og hvordan måles den?
- Hvordan måle E-modul, og hvilke faktorer endrer den?
- Hva påvirker prisen på plastmaterialer, og hvordan vil denne utvikle seg i fremover?

1.3 Målsetting og begrensninger

1.3.1 Hovedmål

Undersøke hva som finnes i eksisterende litteratur om egenskapene til termoplast ved lave temperaturer, før det utvikles en metode for å teste ringstivheten og E-modulen til termoplastrør ved lave temperaturer. Videre analysere resultatene som det kommes fram til, og gi en forklaring på disse.

1.3.2 Delmål

- Utrede kort om Hookes lov, elastisitetsteori og nedkjøling/oppvarming av materialer.
- Drøfte testing av mekaniske egenskaper, og forklare testing av ringstivhet.
- Kartlegge oppbyggingen til plastmaterialer, og da med fokus på de tre polymerene PP, PE og PVC, og hvordan dette påvirker egenskapene.
- Drøfte metodeutvikling, materialvalg og hvilke feilkilder man har.
- Tegne testutstyret i SolidWorks, vise 3D-bilder og illustrere hvordan testingen blir gjennomført.
- Bestemme gjennomføringen av testingen, og anvisningen for å kunne øke reproduserbarheten av forsøkene.
- Sammenlikne resultatene av testingen med eksisterende teori på området.
- Gjennomføre en PESTEL-analyse for plastproduksjonsindustrien, og en kostnadsvurdering for plast.
- Diskutere resultatene man har kommet frem til, og på bakgrunn av dette komme frem til en konklusjon.

1.3.3 Antakelser

Det er gjort en antakelse om at fiberretningen til plastrørene ikke har hatt noen innvirkning på deformasjonen og ringstivheten. Særlig for komposittmaterialer har fiberretningen mye å si, slik at røret er sterkere i noen retninger enn andre, men for plastrør som i dette tilfellet er laget av PP, PE og PVC har dette ikke blitt tatt med i beregningen.

1.3.4 Begrensninger

Det kunne blitt skrevet mye mer om denne oppgaven, men på grunn av begrenset tid og oppgavens størrelsesorden måtte det kuttes ned på en del områder. Feilkilder ved selve testingen av plastrørene og utstyret er beskrevet under punkt 3.3.

Denne oppgaven vil ikke gå dypt inn på utmatting, sprekkvekst og bruddteori, bortsett fra litt teori om sprøbrudd og hva som skjer i polymerene før brudd. Utmatting og bruddteori er et relativt omfattende område, og det ville i så fall gått litt utenfor rammene av denne oppgaven.

Når det gjelder teori om plast og polymerer vil jeg ikke beskrive detaljert hvordan plast blir produsert, eller den kjemiske prosessen polymerene går gjennom. En kort forklaring av den kjemiske oppbyggingen til de tre testede polymerer er det jeg strekker meg til.

En annen begrensning er at det ikke vil bli kjørt FEM-analyser. Idéen var først å gjennomføre analyser og spenningsanalyser i Ansys WorkBench. Hovedproblemet med dette er at i programmet ligger E-modulen inne for de ulike polymerene bare ved romtemperatur, og man vil ikke ved en simulering i Ansys WB kunne finne ut hvordan rørene oppfører seg ved de aktuelle testtemperaturene. Man kunne ha manuelt lagt inn ulike E-moduler ved ulike temperaturer for de forskjellige polymerene, og lagd grafer som viste endringen i disse. Men dette er også noe man kan gjøre i Microsoft Excel og andre programmer.

1.3 Kvalitetssikring (rapport og testutstyr)

Denne rapporten er gått gjennom flere ganger for korrekturlesing og opprydding i språket. Referanser, figurnummerering, tabellnummerering og sidetall er dobbeltsjekket, og utregninger er blitt gått gjennom flere ganger.

Som et ledd i kvalitetssikringen av plastrørene gjennomføres også en flammetest for identifisering av plastrørene. Identifiseringsprosedyren blir senere beskrevet i kapittel 2.7.3, og i vedlegg 2.

Testutstyret, som trematerialer og skruer, er blitt diskutert og funnet ut av i samråd med veiledere og andre ansatte på NMBU og på Maxbo Ås. Plastrørene som er blitt testet har blitt levert av Biobe AS gjennom tilleggsveileder Aage Kollen.

Videre drøfting av kvalitetssikringen til testutstyret blir tatt opp i kapittel 3.4. Det er ved testutstyret og testgjennomføringen at kvalitetssikringen er lavest, slik at det blitt viet et eget kapittel til akkurat det.

1.4 Løsningsverktøy

Microsoft Office 2013:

Microsoft Word 2013 har blitt brukt til tekstbehandling, mens Microsoft Excel 2013 har blitt brukt til en enkel oversikt og fremdrift gjennom oppgaveperioden. MS Excel har også blitt brukt til utregning av resultater, som ringstivhet og elastisitetsmodul, i tillegg til utarbeiding av grafer vist i oppgaven.

CES Edupack 2015:

CES Edupack er et verdensledende ressursopplagsverk for materialdata. Programmet har blitt brukt til å hente oppdaterte materialverdier for PP, PE og PVC, i tillegg til innhenting av generell informasjon om disse tre polymerene.

SolidWorks 2015:

SolidWorks er et av de mest brukte CAD- (computer-aided design) og CAE-programmene (computer-aided engineering). CAD vil si teknisk tegning ved hjelp av databaserte programvarer, som gir illustrative skisser av modeller man lager. CAE vil si at man kan utføre ulike simuleringer, som spenningsanalyse og væskeflytsimulering i dataprogrammet.

SolidWorks 2015 blir brukt til å lage arbeidstegninger og 3D-figurer av modellen som brukes til testingen, i tillegg til målsatte skisser av de ulike delene som inngår i modellen.

1.5 Symboler og terminologi

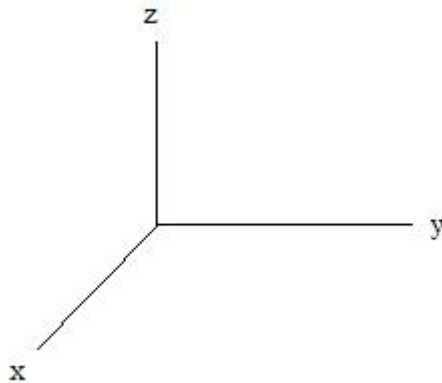
Følgende terminologi er blitt satt opp i symbolliste i tabell 1:

Tabell 1: Symbolliste

Symbol	Forklaring	Enhet
F	Kraft	MPa
E	E-modul	MPa
σ	Spenning	MPa
ε	Tøyning	-
L	Lengde	mm
L_i	Lengde før endring	mm
A	Areal	mm^2
A_i	Areal før endring	mm^2
γ_w	Endring i tykkelse	-
γ_l	Endring i lengde	-
T	Temperatur	$^{\circ}C$
t	Tid	sek/min
k	Varmeoverføringsrate	-
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
y	Nedbøying/deformasjon	mm
e	Veggtykkelse	mm
C	Spesifikk varmekapasitet	$J/g^{\circ}C$
SDR	Standard dimensjonsforhold	-
α	Temperaturutvidelseskoeffisient	K^{-1}

Koordinatsystem

Følgende koordinatsystem blir brukt i denne oppgaven, hvor nøytralaksen er satt i xy-planet. Ved testingen av vertikal deformasjon vil denne deformasjonen da være i z-planet.



Figur 1-2: Valgt koordinatsystem

1.6 Oppbygging av oppgaven

Kapittel 1 inneholder en oversikt over bakgrunn, problemstillinger, kvalitetssikring og en generell oversikt over verktøy og symboler som blir brukt i oppgaven.

Kapittel 2 tar for seg det teoretiske grunnlaget for oppgaven, og starter først med beskrivelser av generell materialvitenskapsteori. De viktigste lovene og teoriene for å kunne betrakte både hovedproblemet i denne oppgaven og liknende oppgaver blir forsøket beskrevet på en kortfattet og lett forståelig måte. Ringstivhet og standarden som blir fulgt blir forklart, før det gis en innføring i de tre polymerene som blir undersøket i denne oppgaven. Til slutt i kapitlet blir det gjennomgått hva som finnes av eksisterende teori omkring egenskapene til termoplast ved lave temperaturer.

Kapittel 3 handler om metodeutviklingen, der det først drøftes hvordan man kan løse problemstillingen ved hjelp av verktøyene og utstyret man har tilgjengelig, før det blir beskrevet hvordan det har blitt løst. En detaljert beskrivelse av hvordan testingen vil foregå blir videre forklart, og hvordan testingen blir oppdelt. Potensielle feilkilder blir gått gjennom, før tegninger og skisser av det planlagte testutstyret blir presentert.

Kapittel 4 inneholder de faktiske resultatene fra testingen som har blitt gjennomført, og en analyse av disse tallene. Videre blir undersøkelser av hva som finnes av eksisterende teori på området sammenliknet med funnene ved testingen.

Kapittel 5 tar for seg økonomidelen i denne oppgaven. Fokus blir lagt på de makroøkonomiske faktorene som påvirker plastproduksjonsindustrien, gjennom en PESTEL-

analyse. En kostnadsvurdering blir også gitt, sammen med en prediksjon av hvordan prisene vil endre seg.

Kapittel 6 forsøker å skape en diskusjon rundt hva som er studert i oppgaven, og gi et svar på spørsmålene som er stilt innledningsvis. Ut ifra diskusjonen og analysen av resultatene blir det trukket konklusjoner. Potensielt videre arbeid blir belyst, og det blir kort forklart hva man både kan forbedre og hva man kan gjøres annerledes i et eventuelt senere arbeid.

2 Teoretisk grunnlag

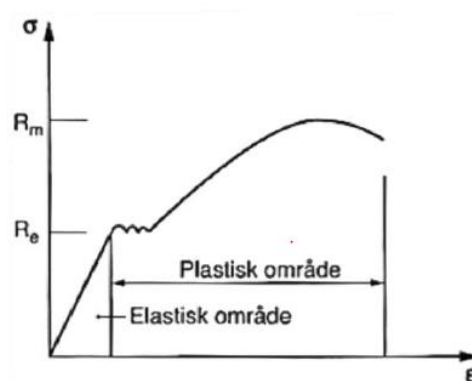
Det teoretiske grunnlaget er ment for å gjøre leseren kjent med teori som kommer til bruk ved gjennomgangen av de praktiske forsøkene og resultatene fra disse. Det begynner med generell teori om materialer, før teorien blir mer spisset inn mot polymerene som blir studert i denne oppgaven, og hvordan testingen av disse vil foregå. Det blir også tatt for seg hva som finnes av eksisterende teori på området.

2.1 Hookes lov

En av viktigste fysiske lovene når det gjelder studien av faste materialer er Hookes lov, og elastisitetsteorien tar utgangspunkt i denne formelen. På den enkleste formen ser Hooke lov slik ut:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Den sier at spenningen er en funksjon av elastisitetsmodulen og tøyningen/deformasjonen. Den sier også at deformasjonen av et elastisk legeme er proporsjonal til spenningen man utøver på legemet. Men dette gjelder derimot bare innenfor et visst område, siden legemet vil oppleve flyt eller brudd ved høyere spenning enn den tåler. Hookes lov gjelder med andre ord bare under proporsjonalitetsgrensen (σ_p) til materialet, og dette området kalles proporsjonalitetsområdet til legemet. Dette vises på figur 2-1, hvor proporsjonalitetsområdet er der hvor materialet er elastisk.



Figur 2-1: Spennings-tøyningsdiagram, oversikt over plastisk og elastisk område [3]

Spenningen σ i Hookes lov er kraft per areal, og angis oftest som N/mm^2 . E er elastisitetsmodulen til materialet som undersøkes, og er forholdet mellom fasthet og

forlengelse. Den sier noe om materialets motstandsevne mot elastisk deformasjon, og kalles ofte for stivheten til materialet.

ϵ , deformasjonen eller tøyningen, er forholdet mellom lengdeendring og opprinnelig lengde, og vil for et isotropisk materiale (når materialet har samme egenskaper i alle retninger) defineres av Poissons likning:

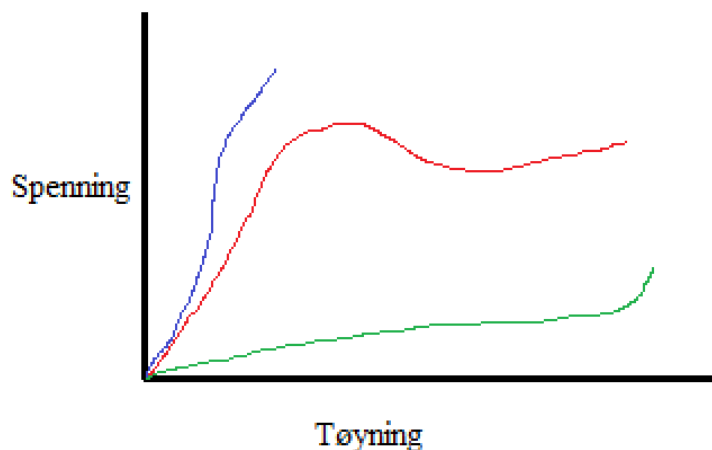
$$V = \gamma_w/\gamma_l \quad (2)$$

Formel 2 beskriver forholdet mellom endringen i tykkelse (γ_w) og endringen i lengde (γ_l), og γ er for mange isotropiske materialer, som stål, lik 0,3.

2.2 Elastisitetsteori

Den mekaniske oppførselen til materialer illustreres gjerne i et spenning-tøynings-diagram. På y-aksen vises spenningen, mens på x-aksen vises tøyningen. Ulike materialer vil ha ulik oppførsel i et slikt diagram, og de skiller seg hovedsakelig gjennom hvor sprø eller duktile de er.

Figur 2-2 viser tre ulike oppførsler et materiale kan ha når det blir utsatt for spenning, avhengig av materialtype:



Figur 2-2: Spennings-tøynings-diagram for tre ulike materialer

Den første blå kurven viser spenning-tøynings-oppførselen for et veldig sprøtt materiale. Bruddet vil komme dramatisk og plutselig, mens materialet blir elastisk tøyd.

Den andre røde kurven viser oppførselen som veldig mange metaller har. Tøyningen på starten er elastisk, før materialet går over til flyt og man får en plastisk deformasjon før brudd.

Den tredje grønne kurven viser en ren elastisk deformasjon. Det vil si at deformasjonen er stor selv ved lav spenning, og er typisk for gummiaktige materialer.

Forskjellen mellom de mekaniske egenskapene til polymerer og for eksempel metaller er at polymerers egenskaper er mye mer sensitive til faktorer som temperatur, tid og de kjemiske omgivelsene, noe som gjør at de vil ha annerledes kurver i diagrammene. Polymerene oppfører seg på flere ulike måter i et spenning-tøynings-diagram avhengig av disse faktorene, mens metaller har mer like oppførsler i diagrammene.

Ved lave temperaturer har polymerer hovedsakelig elastiske egenskaper. Det vil si at ved påført spenning og tilhørende deformasjon vil materialet gå tilbake til sin opprinnelige form (så lenge materialet ikke har gått til brudd). Grunnet lite forskning på polymerer ved nettopp lave temperaturer er det en fordel å først se på de viskoelastiske egenskapene ved normale temperaturer, og så sammenlikne dette med hvordan disse egenskapene vil endre seg når temperaturen synker.

Polymerer er i utgangspunktet viskoelastiske materialer, og kan oppføre seg som flytende materialer (viskøse) eller som harde (elastiske) materialer. Under normale omstendigheter, det vil si ved romtemperatur, har polymerer viskoelastiske egenskaper som er en blanding av viskøs og elastisk oppførsel.

Plastmaterialer har også ved romtemperatur noe som kalles elastoviskøse egenskaper. Det vil si at det i tillegg til de viskoelastiske egenskapene kan oppstå flyt i materialet når spenningen blir stor nok, noe som gjør at materialet ikke går tilbake til sin opprinnelige form etter påført spenning, men opplever en varig deformasjon [5].

Under testingen senere i oppgaven passer man også på å skille mellom korttids E-modul og langtids E-modul, eller krypmodul som det også kalles. Korttids E-modul referer til den initiale elastiske responsen som materialer utviser ved påført spenning, hvor man da ikke tar hensyn til viskøse komponentene. Langtids E-modul er i utgangspunktet et bedre mål på hvor mye et materiale tåler, da gjerne ved konstant spenning over tid. Den tar også hensyn til den viskoelastiske responsen som materiale opplever. Her er det også avgjørende hvor stor grad av siging materialet opplevet. Man kan se på det som at korttids E-modul er en tidsavhengig egenskap, mens langtids E-modul er en tidsuavhengig egenskap. Ved lave temperaturer vil mange materialer bli såpass sprøe og ha hovedsakelig en elastisk oppførsel, slik ved lave temperaturer vil disse to E-modulene være ganske like [6].

2.3 Oppvarming og nedkjøling av materialer

Under testingen av plastrørene ved lave temperaturer får man bruk for å vite noe om materialets evne til å holde på temperaturen. Ved situasjoner når man har et varmere eller kaldere objekt i kaldere eller varmere omgivelser, så vil varmeoverføringen mellom objektet være tilnærmet proporsjonal til temperaturdifferansen [7]. Varmeoverføring skjer enten ved konduksjon, konveksjon eller stråling, eller en kombinasjon av alle tre, men for solide materialer som plast er det konduksjon som er ansvarlig for den største varmeoverføringen.

Det er vanskelig å sette opp en matematisk formel for hvor fort et objekt mister varmen hvis det er kaldt, eller hvor fort det blir varmt igjen hvis det først har blitt fryst ned. Det er mange faktorer som avgjør, og en tenkt kurve for temperatur versus tid ville heller ikke vært lineær, men proporsjonalt stigende eller synkende. Faktorer som avgjør hastigheten til kulde- eller varmetapet er arealet og formen til objektet, hvordan luften rundt objektet er (luftfuktighet, lufttrykk, bevegelse av luften), masse, spesifikk varmekapasitet og den termiske konduktiviteten til materialet til objektet er laget av.

Newtons lov om avkjøling er en forenklet metode man kan bruke for å avgjøre hva temperaturen er etter en viss tid, og de ukjente da er enten temperauten T eller tiden t . Formelen er avhengig av at man har riktig konstant k for materialet man undersøker, hvor k er varmeoverføringsraten.

Formelen er på generell form slik:

$$\frac{dT}{dt} = -k (T - T_a) \quad (3)$$

Og løsningen på den ser slik ut:

$$T(t) = T_a + (T_0 - T_a) e^{-kt} \quad (4)$$

Hvor $T(t)$ er temperaturen etter tiden t , T_a er temperaturen til omgivelsene og T_0 er temperaturen til materialet [8].

Det må legges til at dette er en forenklet prediksjon på hva temperaturen kommer til å være etter en viss tid, og det er knyttet stor usikkerhet til verdien k . Denne er stort sett oppgitt ved normal romtemperatur, og vil ha en annen verdi ved andre temperaturer. Det aller beste hadde vært å selve finne varmeoverføringsraten eksperimentelt, ved å for eksempel finne ut hvor lang tid det tar å kjøle ned objektet 10 grader. En eksakt k -verdi blir ikke prioritert å finne i denne oppgaven, grunnet mangel på adekvat utstyr. Hvilken benevning tiden t har avgjøres også av hvordan man måler k . Om man måler avkjøling per minutt vil t være oppgitt i minutter.

2.4 Materialer i kulde

Viktigheten av å kunne forstå oppførselen til materialer i kulde blir viktigere og viktigere. For eksempel i fly- og romfartsindustrien vil man oppleve veldig lave temperaturer, men i Norges tilfelle er det mest aktuelt på grunn av at oljeindustrien beveger seg stadig nordover hvor lave temperaturer er vanlig. Det blir anslått at 30 % av gjenværende gass og 13 % av gjenværende olje befinner seg i Arktis [9]. På noen av de nordligste oljefeltene er det allerede bygget med materialer som skal tåle ned mot minus 60 grader °C, og på skip som seiler i de nordlige

havområdene på jorden opplever til tider bitende kulde, som* vist på figur 2-3. På mange materialer, som metaller og tre, er det gjort mye forskning på hvordan de oppfører seg ved lave temperaturer.



Figur 2-3: Nedfrysede materialer på et skip i Arktis [9]

Hovedeffekten ved nedkjøling av et materiale er at det blir sprøere og hardere. Sprøbrudd, som er den mest vanlige bruddtypen ved lave temperaturer, skje plutselig uten at man får noe forvarsel om det. Særlig stål kan oppleve et dramatisk fall i bruddseighet. Strekkfastheten og flytegrensen vil derimot øke for de fleste metaller ved temperaturer ned til $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ [10].

Stål har også det problemet at det gjerne må sveises sammen når det blir brukt i ulike konstruksjoner, og vil i den sammenheng ha en høy hastighet på både oppvarming og nedkjøling. Dette vil føre til en større risiko for sprekkdannelser, som også er vanskelige å oppdage på forhånd.

For termoplastrør vil slagfastheten reduseres jo lavere temperatur det er. Den vil derimot gå tilbake til sitt vanlige nivå igjen ved oppvarming. Derfor er det slik at hvis man skal jobbe med plastrør, for eksempel legge dem ned i jorden ved lavere omstendigheter, viktig å være varsom og passe på behandlingen av disse på grunn av den lavere slagfastheten [11].

2.4.1 Sprøbrudd

Den største faren når materialer blir utsatt for spenning ved lave temperaturer er, som tidligere nevnt, stor risiko for sprøbrudd. Problemet med sprøbrudd er at det skjer så plutselig, og det er nesten umulig å vite på forhånd akkurat når det kommer til å inntreffe. Av denne grunn er man gjerne ekstra påpasselig ved dimensjonering i lave temperaturer, og man benytter seg gjerne av en høyere sikkerhetsfaktor.

Et sprøbrudd kjennetegnes ved at det er brudd hvor det er veldig lite plastisk flyt i forkant av bruddet. Et sprøbrudd vil også kjennetegnes ved at retningen til bruddbevegelsen er vinkelrett

på krafttreningen. Man definerer et sprøtt materiale som de materialene som opplever brudd før de har oppnådd en deformasjon på 5 % [12].

2.5 Testing av mekaniske egenskaper

Når man skal teste spenning-deformasjon for materialer, har man tre vanlige tester: strekk-, trykk- og skjærttest [13]. Førstnevnte er utvilsomt den mest vanlige, og er også den enkleste å få til.

Ved strekktesten finner man enten bruddegenskapene som er viktige for design av materialer, eller hvor stor tøyning materialet vil oppleve ved en bestemt spenning. Den utføres ved å feste et kompakt rør i en maskin i hver ende, hvor røret så blir strukket med en gradvis økende unilateral kraft frem til det knekker. Dataene blir så plottet på en datamaskin, med en graf som viser tøyning ε versus påført kraft F . Ved hjelp av Hookes lov finner man dermed spenningen σ .

Ved en strekktest finner man tøyningen ved å se på endringen Δl av lengden til røret. Δl vil være l_i minus l_0 . Tøyningen ε på sin side blir da Δl delt på l_0 . Tøyningen vil ikke ha noen benevnelse, men av praktiske hensyn bruker man ofte mm per mm (mm/mm) eller meter per meter (m/m).

Trykktesten utføres på samme måte som strekktesten, bortsett fra at her blir røret presset sammen. Denne testen er ikke like vanlig som strekktesten, fordi den er litt vanskeligere å utføre. I denne testen blir tøyningen negativ siden l_0 er større enn l_i , og da blir naturligvis også spenningen og i tillegg den påførte kraften negativ. Trykktester blir brukt når man ønsker informasjon om akkurat hvordan materialer oppfører seg under konstant stort trykk, eller hvis materialet går fort til sprøbrudd ved strekk.

Skjær- og torsjonstester er også en mulighet for testing av mekaniske egenskaper, men disse er langt mindre brukt.

2.6 Ringstivhet

Rør blir gjerne klassifisert etter ringstivhet. Ringstivhet er kort forklart et rørs motstand mot deformasjon.

Test av ringstivhet blir ifølge standarden EN ISO 9969:2007 [14] utført ved hjelp av to plater pluss en del av et rør som skal ligge mellom platene. Kraften eller vekten blir plassert oppå den øverste platen, og man måler så den vertikale deformasjon til røret.

De verdiene man trenger til dette er ytre diameter til røret (d_y), indre diameter til røret (d_i), veggtykkelse til røret (e), kraften (F), vertikal deformasjon (y) og lengde av røret (L). Gjennom dette kan man måle ringstivheten S_R .

Ringstivheten blir regnet ut som en funksjon av den nødvendige kraften som produserer en vertikal nedbøyning av røret på 3 %.

Disse platene man legger under og oppå røret må være harde og sterke nok til at de ikke bøyer seg eller blir deformert i stor grad, slik at det hovedsakelig bare er røret som tar opp kraften.

Bredden på platene skal ifølge standarden ikke være mindre enn kontaktflaten med røret pluss 25 mm, og lengden skal være minst like stor som lengden til røret.

I utgangspunktet er det et krav at man tester tre rørbiter, og tar gjennomsnittet av disse. Men på grunn av begrenset tilgang på rørbiter i denne testen må antall rørbiter avvikes fra. Ved diameter på mellom 200 mm og 500 mm kreves det at man foretar 4 ulike lengdemålinger av rørene, og den minste målte lengden skal ikke være mindre enn 0,9 ganger den største målte lengden.

Kravet til lengden på rørbiterne man skal teste deles inn i to:

- Ved nominell diameter på 1500 mm eller mindre, skal gjennomsnittslengden være (300 +/- 10 mm).
- Ved nominell diameter på 1500 mm eller mer, skal gjennomsnittslengden være minst $0,2 d_n$.

Når det gjelder temperatur og ytre forhold er det fordelaktig om testeksemplarene oppbevares i romtemperaturen eller den temperaturen det skal testes i, i minst 24 timer før testingen.

Aldring er også en faktor som påvirker plastrør på forskjellige måte. Noen mekaniske egenskaper vil endres over tid, uten at de nødvendigvis er negative. En av egenskapene som påvirkes er stivhet, og stivheten øker ved aldring. Dermed vil kapasiteten mot både trykket på utsiden og innvendig trykk øke med tid, noe som kan ses på som en positiv endring.

Slagfasthet derimot vil reduseres med tid. PVC-rør har fra før av lavere slagfasthet enn PP og PE, og derfor vil man merke det bedre på PVC-rør at slagfastheten reduseres.

Temperaturrendringer og påvirkning fra været er noen av faktorene som påvirker slagfastheten over tid i negativ grad. Lengden på lagring av rørene har ingen spesiell grense, men lagring ute i direkte sollys bør unngås over lengre tid [10].

Før man legger på kraften for å oppnå riktig kraft F , skal man også gjennomføre en prelast-fase hvor man legger en liten kraft F_0 på platen før selve testingen settes i gang. Denne prelast-kraften avhenger av størrelsen på diameteren til røret. Hvis den indre diameteren d_i er mindre enn eller lik 100 mm, skal F_0 være 7,5 kN. Hvis d_i er større enn 100 mm, bestemmes F_0 av følgende formel:

$$F_0 = 250 \cdot 10^{-6} d_n \cdot L \quad (5)$$

Formelen for ringstivheten til alle typer rør, hentet fra «Produktinformasjon ringstivheter S_R » [15] er:

$$S_R = \frac{E \cdot I}{D_m^3} \quad (6)$$

Hvor $I = \frac{e^3}{12}$, som er rørveggenes treghetsmoment.

Dette gir dermed:

$$S_R = \frac{E \cdot e^3}{12 D_m^3} \quad (7)$$

Det er E-modulen til plastrørene man er ute etter å finne, så da setter man opp likningen med E-modulen som den ukjente:

$$E = \frac{S_R \cdot 12 D_m^3}{e^3} \quad (8)$$

Man må passe på å sette inn E-modulen i kN/m^2 . Det er i tillegg korttidsverdier for rørmaterialets E-modul man her skal bruke.

Siden det er E-modulen som sammen med ringstivheten er de ukjente, finner man først ringstivheten S_R . For å finne S_R , oppgitt i kilonewton per kvadratmeter, bruker man følgende formel, hentet fra EN ISO 9969:2007:

$$S_R = \left(0,0186 + 0,025 \frac{y}{d_i} \right) \cdot \frac{F}{L \cdot y} \cdot 10^6 \quad (9)$$

Deformasjonen y er her den deformasjonen som kreves for å oppnå en deformasjon på 3 % av rørets indre diameter, det vil si at $\frac{y}{d_i}$ skal være 0,03. F er kraften, her oppgitt i kilonewton, som blir regnet ved å multiplisere lasten i kg med tyngdekraften og 10^{-3} . Dermed blir den senere brukte formelen seende slik ut:

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

Plastrør blir ofte oppgitt i en dimensjon som kalles SDR, for eksempel SDR10. SDR står for standard dimensjonsforhold, og er et forholdstall. Det regnes ut ved å dele den utvendige diameteren d_y med veggtykkelsen.

Lengden til rør blir oppgitt ved normal romtemperatur på 20 °C. Når røret blir enten avkjølt eller oppvarmet vil det krympe eller utvide seg så lenge det ikke finnes noen fysiske hindringer. Formelen for hvor stor lengdeforskjell det blir er [7]:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \quad (11)$$

Hvor ΔL er lengdeendringen, α er temperaturutvidelseskoeffisienten, L_0 er opprinnelig lengde og ΔT er temperaturendringen. Hvis man legger røret i en kaldere temperatur enn romtemperaturen vil ΔT være negativ, og man vil da få en negativ lengdeendring.

2.7 Polymerer

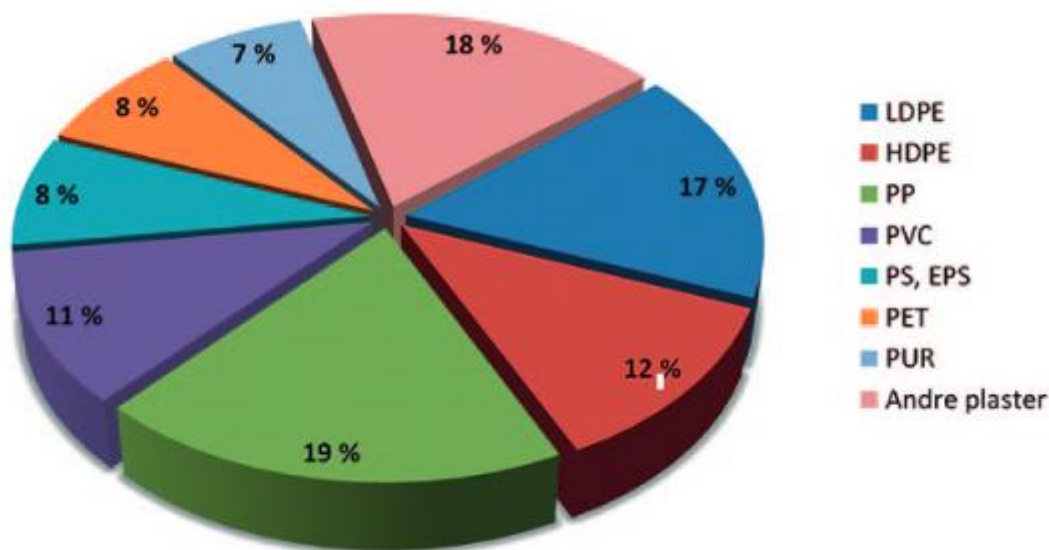
Mange polymerer finner man naturlig i naturen, og har vært brukt som materiale i århundrer. Moderne vitenskapelig forskning og utvikling har ført til at man har kunnet forstå oppbyggingen av disse polymerne, og videreutvikle disse til utallige nye syntetiske polymerer. På noen bruksområder har deler av metall og tre blitt byttet ut med nyutviklede syntetiske polymerer.

Polymerer blir mer og mer brukt som materiale, og muligheten er store pga. forskjellige egenskaper i forhold til andre materialer som metaller og tre. Særlig formbarheten og den lette vekten gjør at materialer av polymerer stadig øker i omfang. For eksempel er lettvektsmaterialer interessant for bil- og luftfartsindustrien hvor vekt spiller en stor rolle, og det at polymerer kan absorbere støt i stor grad spiller også inn.

2.7.1 Oppbygning

Polymerer består av store karbonkjeder som er pakket tett sammen i kjeder. Det vil si at polymerer er organiske siden de inneholder karbonatomer. De fleste inneholder også hydrogenatomer, slik at det da dannes hydrokarbon-molekyler. Man kan klassifisere polymerer i fire grupper, og det er termoplast (amorf og semi-krystallinsk), herdeplast, elastomerer og naturlige polymerer [17]. Forskjellen mellom disse er hvordan karbonkjedene er linket sammen. Sistnevnte har en større grad av krysslanking enn førstnevnte, som ikke har noen særlig krysslanking i det hele tatt. Dette påvirker de mekaniske egenskapene til polymerer i stor grad.

De polymerene jeg skal studere videre er polypropylen, polyetylen og polyvinylklorid, som alle går under kategorien termoplast. Disse er de mest brukte polymerene, og disse tre utgjør til sammen ca. 60 % av det totale polymermarkedet, som illustrert i figur 2-4.



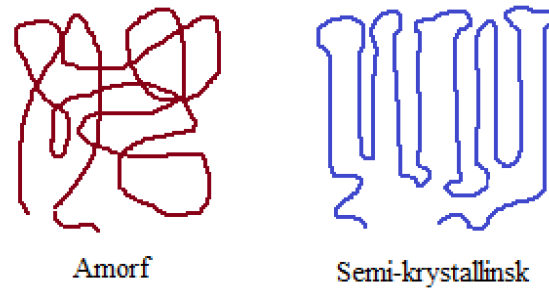
Figur 2-4: Oversikt over den relative bruken av ulike plastmaterialer [17]

De nevnte polymerene har blitt polymerisert fra ethylengass, og blitt omvandlet til de ulike polymerne under riktige betingelser. Polymerisering vil si at monomerene binder seg sammen og danner molekylkjeder. Det blir da dannet flere kjeder av etyhylenmonomerer i dette stadig voksende molekylet. Etter denne prosessen vil de i tillegg til karbon- og hydrogenatomene inneholde en R-gruppe, hvor denne R-en er forskjellig i de tre ulike materialene [18].

Molekylene i polymerene er store i forhold til hydrokarbonmolekylene, og blir ofte referert til som makromolekyler. Molekylene kan ha en meget høy molekylær vekt ved mange lange kjeder. Lengden på disse kjedene kan påvirke polymerenes egenskaper. For eksempel vil smeltetemperaturen, styrken og E-modulen til materialet øke ved en større molekylær vekt.

En annen måte å dele polymerere inn er hvordan type molekylær struktur de har. Den enkleste formen er lineær struktur, og både PP, PE og PVC har denne strukturen. Kjedene er formet i lange rette linjer, og er veldig fleksible. Det at disse har denne strukturen gjør at de blir klassifisert som termoplast. Termoplast har lineære eller forgrenede molekylstrukturer, og materialer av termoplast mykner ved høye temperaturer og stivner ved lave temperaturer. Denne prosessen er samtidig reversibel og kan bli gjentatt, så lenge temperaturen ikke blir altfor høy. Den andre typen plast, herdeplast, har krysset eller nettverks-molekylstrukturer og er generelt hardere og sterkere, men har en irreversibel deformasjon ved oppvarming.

Polymerer kan være amorfe eller krystallinske, og forskjellen mellom disse er illustrert i figur 2-5. Amorfe polymerer har kjeder uten noen spesiell orden, og kan sammenlignes med en kjele med kokt spagetti. Krystallinske polymerer har på sin side kjeder i en perfekt arrangert struktur. Mange polymerer har en semikrystallinsk struktur med både amorfe og krystallinske regioner.



Figur 2-5: Forskjellen mellom amorf og semi-krystallinsk struktur

Man måler gjerne polymerer i grad av krystallinitet. Polymerer kan aldri bli 100 % krystallinske, men de kan oppnå en grad av krystallinitet på ca. 95 %. Polymerer med lineær struktur kan oppnå en høy grad av krystallinitet, mens polymerer med forgrenede strukturer kan ikke oppnå en like stor grad av krystallinitet.

Taktisitet er også noe man skiller polymerene på [17]. Et isotaktisk polymer har alle metyl-gruppene på samme side av hovedkjeden, et syndiotaktisk polymer har metyl-gruppene på begge sidene av kjeden i et fast mønster, mens et ataktisk polymer har metyl-gruppene tilfeldig plassert på begge sidene av kjeden. Hvordan type taktisitet polymerer har påvirker de mekaniske egenskapene til polymerer siden graden av krystallisering påvirkes av taktisiteten. Et ataktisk polymer har vanskelig for å bli krystallisert, mens polymerer som er isotaktiske eller syndiotaktiske har lettere for å bli krystallisert på grunn av at de har en mer regulær struktur og lettere passer sammen med andre kjeder.

Bindingene i polymerer er stort sett sekundære, men også til en viss grad primære. I faste stoffer finner man tre ulike typer primære bindinger, og disse er ioniske, kovalente og metalliske bindinger. Disse er mye sterkere enn de sekundære bindingene man finner i polymerer. De sekundære bindingene, eller van der Waals-krefter som de også blir kalt, finner man mellom atomer eller grupper av atomer, som i seg selv er bundet sammen av primære bindinger. Med andre ord er bindingene mellom monomerene i en polymerkjede sterke kovalente bindinger, som gjør at selve kjedene er en sterk og stabil struktur. Derimot er kjedene bundet sammen med hverandre av svakere Van der Waals-bindinger, og det er noe av grunnen til at polymerer oppfører seg fysisk slik de gjør. Herdeplast og elastomerer kan i tillegg ha en viss grad av kovalente bindinger også mellom kjedene, noe som gjør at materialer av disse polymerene er sterkere enn materialer laget av termoplast.

2.7.2 Mekaniske egenskaper til polymerer

De mekaniske egenskapene til polymerene blir i stor grad styrt av van der Waals-kreftene og de kovalente bindingene innad i atomene. Van der Waals-kreftene oppstår på grunn av atomiske eller molekylære dipoler, det vil si der det finnes en forskjell mellom positive og negative deler av et atom eller molekyl [19].

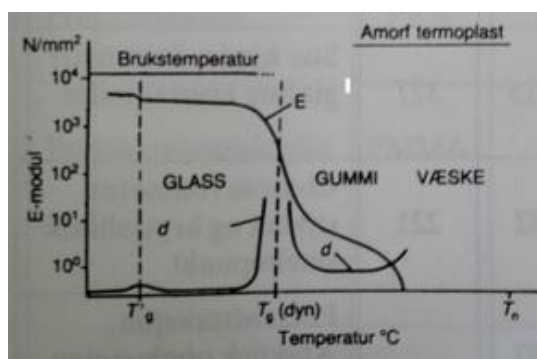
Grad av polymerisering sier noe om forholdet mellom den molekylære vekten til polymeret og den molekylære vekten til den repeterende enheten. En høyere grad av polymerisering gir polymeret høyere viskositet og fører også til at det blir sterkere.

Graden av krystallinitet er også avgjørende for de mekaniske egenskapene til polymerer. En høyere krystallinitetsgrad fører til høyere massetetthet, og en høyere mykningstemperatur. Denne høyere krystallinitetsgraden fører derimot til lavere deformasjon før brudd, og lavere bruddstyrke [20].

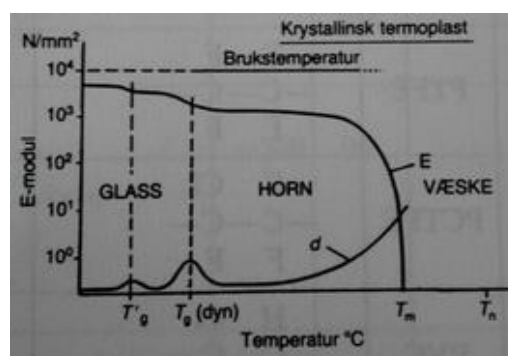
Alle polymerer har en glasstransisjonstemperatur (T_g) og smeltetemperatur (T_m), som varierer fra materiale til materiale. Disse temperaturene er derimot ikke eksakte temperaturer, men heller temperaturintervaller. Ved lave temperaturer blir makromolekylene i polymeret immobile, og materialet blir dermed stivere og sprøere. Ved høyere temperaturer blir molekylene mobile og materialet blir mer mobilt. Glasstransisjonstemperaturen blir også kalt for frysetemperaturen til polymeret, så når temperaturen blir høyere enn T_g øker volumet og materialet blir mykere. Når temperaturen nærmer seg T_m fortsetter volumet å øke, og når temperaturen er nådd ødelegges bindingene og materialet blir amorf og flytende. Flytende polymerer er relativt ubrukelige til de fleste formål (bortsett fra for eksempel maling), men hvis man ønsker å omforme materialene må man varme dem opp til over smeltetemperatur. Kort forklart sier man at hvis temperaturen er over glasstransisjonstemperaturen oppfører polymeret seg hovedsakelig som et sprøtt materiale, nesten som glass. Når temperaturen er mellom glasstransisjonstemperaturen og smeltetemperaturen oppfører polymeret seg mer duktilt, og er mer som et gummiaktig materiale.

Man sier også at polymerer har sekundære glasstransisjonstemperaturer, som skrives T'_g og T''_g . Disse er mindre markerte overganger der spesifikt volum, E-modul osv. endres. Disse temperaturene er derimot mindre markante, og det kan være vanskelig å spesifisere akkurat ved hvilke temperaturer disse overgangene inntreffer [1].

Vi ser på de neste to figurene en oversikt over de ulike tilstandene termoplast kan avhengig av temperaturen. Man ser tydelig at det er et skille rundt glasstransisjonstemperaturen T_g for en amorf termoplast, hvor tilstandene går fra glassaktig til gummiaktig. Det er gjerne den glassaktige tilstanden til en amorf termoplast som er bruksområdet. For en krystallinsk termoplast endrer tilstandene seg hovedsakelig ved smeltetemperaturen, og forskjellen i E-modul når temperaturen er over og under glasstransisjonstemperaturen T_g er mindre. Det er i den hornaktige tilstanden, altså sterk og seig, som er bruksområdet for en krystallinsk termoplast.



Figur 2-6: Ulike tilstander til en amorf termoplast



Figur 2-7: Ulike tilstander til en krystallinsk termoplast

Når polymerer blir testet i vanlige brukstemperaturer vil responsen i et spennings-tøynings-diagram til polymerer ha to forskjellige deler, en elastisk og en plastisk del. Det kan være vanskelig å skille de to, og begge responsene er tidsavhengig. Det vil si at materialet er både viskoelastisk og viskoplastisk.

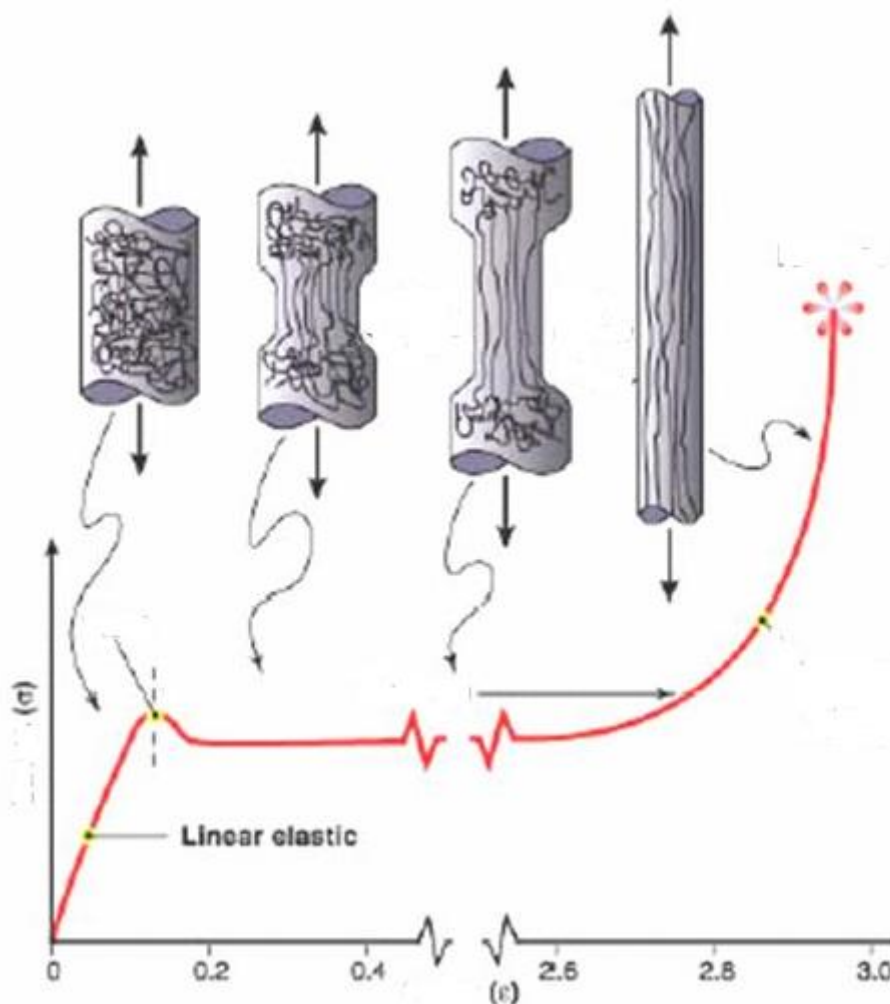
Siging kan defineres som den tidsavhengige endringen i deformasjon ved stegvis endring av påført spenning. Effektene ved siging vil i polymerer være ganske små ved lave temperaturer, mens ved temperaturer over glasstransisjonstemperaturen vil siging igjen bli mer signifikant. Jo mer krystallinsk et polymer er, jo høyere temperatur trengs for at materialet skal oppleve siging, og da gjerne en temperatur en god del høyere enn T_g [4].

Når polymerer blir utsatt for spenning vil de svake Van der Waals-bindingene bli utsatt for den initiale deformasjonen. Elastisiteten kan deles opp i energi- og entropi-elastisitet. Energielastisiteten beskriver reaksjonene i bindingene mellom kjedemolekylene, og gjelder for både de krystallinske og amorfne områdene i polymerene. Ved påført spenning blir bindingene forlenget, og disse går tilbake til deres opprinnelige form når man fjerner spenningen, men med lavere energi-elastisitet. Denne typen elastisitet dominerer når temperaturen er under T_g .

Når temperaturen isteden nærmer seg T_g vil entropielastisiteten dominere. Entropielastisiteten på sin side gjelder bare for de amorfne områdene, og er derfor avhengig av graden av polymerisering. Kort forklart kan man si at et amorft polymer har mange forviklede kjeder når polymeret ikke er utsatt for noen spenning. Når det derimot blir påført en spenning vil disse forviklingene rette seg ut og polymeret vil deformeres. Når spenningen er fjernet igjen vil disse kjedene gå tilbake til et enda mer forviklet mønster, og man har en større grad av entropi [21].

Materialet blir først deformert elastisk, og når denne deformasjonen er fullt oppnådd starter den plastiske deformasjonen. Siden alle de svake bindingene i polymeret er fullt deformerte, så vil et brudd eller plastisk deformasjonen være den eneste løsningen. Jo nærmere temperaturen er T_m , jo større plastisk deformasjon vil materialet oppleve før brudd. Den plastiske deformasjonen starter med at de intermolekylære bindingene ødelegges. Kjedene

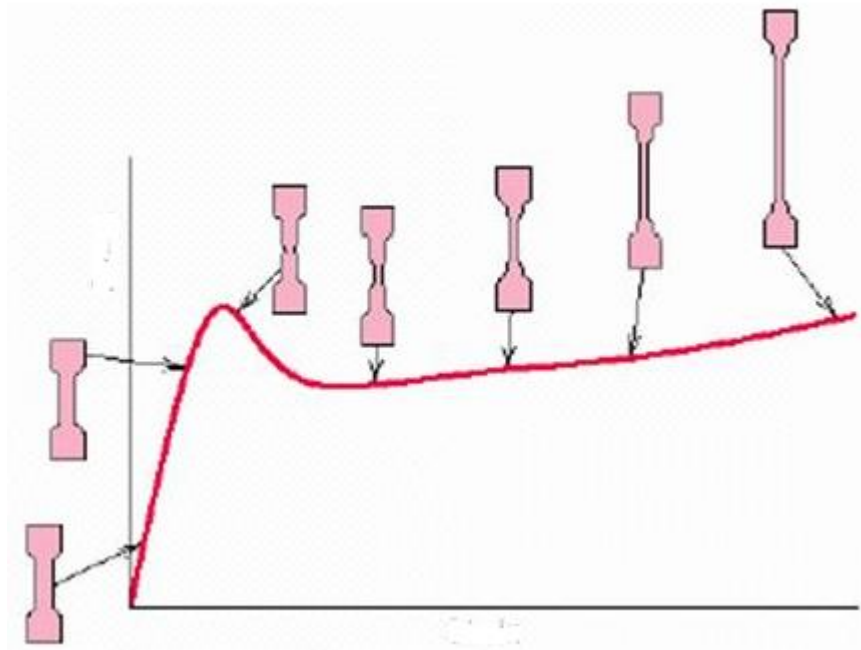
kan dermed bevege seg relativt til hverandre, og det eneste som holder dem sammen er strukturen disse kjedene ligger i polymerene. Det er ikke alltid disse kjedene kan bevege seg fritt i dette mønsteret da de kan støte mot hverandre, slik at energien som kreves for videre deformasjon blir høyere. Denne deformasjonen produserer i tillegg varme, noe som kan øke hastigheten på den plastiske deformasjonen hvis varmen ikke slipper ut siden varmen fører til at materialet utvider seg og øker plassen mellom kjedene. Når flytegrensen til materialet er nådd vil et neck oppstå. Etter hvert som neck-prosessen fortsetter vil kjedene strekke seg i samme retning materialet blir strukket. Jo mer disse ligger i samme retning, jo mer av kraften vil de kovalente kjedene i polymeret ta opp. Dette gjør at styrken øker betraktelig, noe som kan se i strekk-tøynings-diagrammer for polymerer. Området i materialet vil dermed blir sterkere enn delen av materialet som ikke omfattes av denne neck-prosessen. Men på grunn av imperfeksjoner i materialet vil et brudd til slutt oppstå, og særlig reduksjonen av arealet i dette området gjør at bruddet kan oppstå [21], noe som vises i figur 2-8.



Figur 2-8: Hvordan et amorph plastmateriale deformeres seg før brudd [22]

Hele denne prosessen tar hovedsakelig plass i de amorfe områdene i materialet. I semi-krySTALLINSKE polymerer vil man dermed få to forskjellige parallelle deformasjoner i materialet. De amorfe områdene er de som først blir utsatt for deformasjon, mens de

krystallinske områdene deler seg i mindre blokker etter hvert som at kjedene i de krystallinske områdene orienterer seg i kraftretningen, som vist i figur 2-9. Til slutt vil det også her dannes et neck, og den samme prosessen som for de amorfe områdene vil oppstå også her. De krystallinske områdene er mer utsatt for urenheter og imperfeksjoner i materialet, da disse blir presset ut av de krystallinske områdene og hopper seg opp. Derfor er området rett utenfor de krystallinske områdene, og da særlig i overgangsfasen mellom de amorfe og krystallinske områdene i semi-krystallinske materialer, spesielt utsatt for brudd.



Figur 2-9: Hvordan er semi-krystallinsk materiale deformerer seg før brudd [22]

2.7.3 Identifisering av plastmateriale

Man vil ofte i dagligdagse sammenhenger ha behov for å vite hvilket plastmateriale man har med å gjøre. Med kunnskapen man nå har om plast finnes det en lettere metode å identifisere plastmateriale uten å måtte ty til laboratorieundersøkelser eller sporing av produksjonen av materialet. Så lenge man ikke skal kartlegge plastmaterialet grundig kan man bruke metoden som kalles flammetesten for å identifisere plastmaterialet.

Det første steget i flammetesten er å varme opp en bit av platen, og så se om den mykner eller smelter. Hvis den mykner er det en termoplast, hvis ikke er det en herdeplast. I vedlegg 2 finner man bestemmelseskjemaet.

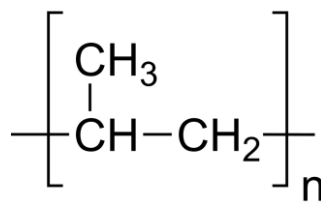
Neste steg er todelt:

1. Hvis plastbiten ikke myknet ved oppvarming tenner man på den. Da ser man på om flammen er selvslukkende eller brenner videre, og man kan til

slutt ved å sjekke hvilken flammefarge det er eller hvordan den brente biten lukter, bestemme materialet.

2. Hvis plastbiten mykner sjekker man først om materialet flyter eller ikke. Om den flyter vet man at materialet enten er PP eller PE. Hvis den ikke flyter tenner man på den i dette tilfellet også, og sjekker om den brenner, ikke brenner eller er selvslukkende. Som på forrige punkt bestemmer man ut ifra flammefargen og lukten hvilket plastmateriale det er.

2.8 Polypropylen (PP)



Figur 2-10: Oppbyggingen til et PP-molekyl [23]

PP har en R-gruppe som er CH_3 , og den kjemiske strukturen er som vist i figur 2-10. PP består av en metyl-gruppe (CH_3) i tillegg til hydrogen- og karbonatomer.

Tabell 2: mekaniske og termiske egenskaper til PP [24]

Egenskap	Verdi	Benevning
Spesifikt tyngdepunkt	0,90 – 0,91	kg/m^3
Strekkmodul	1,14 – 1,55	GPa
E-modul	0,896 – 1,55	GPa
Strekkfasthet	27,6 – 41,4	MPa
Flytegrense	20,7 – 37,2	MPa
Forlengelse ved brudd	100 – 600	%
Spesifikk varmekapasitet	1,87 – 1,96	$\text{J/g}^\circ\text{C}$
Temperaturitvidelseskoeff.	122 – 188	$10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$
Termisk konduktivitet	0,113 – 0,167	$\text{W/m}^\circ\text{C}$

Polypropylen er et semi-krySTALLINSK polymer som ofte blir referert til som lavkostplasten ved ingeniørrelatert bruk. Høy stivhet i forhold til egenvekten er en av de største fordelene til PP. God kjemisk resistans, høy hardhet og godt rustet mot utmattingsbrudd er blant kjennetegnene ved PP. Noen av ulempene er høy termisk ekspansjonskoeffisient, dårlig UV-resistans og dårlig oksidativ resistans. PP er mindre brukt i verden totalt sett enn både PE og PVC, men er forventet å ha den sterkeste veksten av alle de store polymerene [25]. Den typiske bruken av PP er bokser, spann, kapsler, bildeler, møbler, leker osv.

Man har to typer PP: homopolymer og copolymer. Førstnevnte er sterkere og har bedre egenskaper ved høye temperaturer, men styrken reduseres ved temperaturer under null grader. Copolymerer på sin side er dyrere enn homopolymerer, og deles opp i randomisert kopolymer og blokk-copolymer.

Ved den tidligere beskrevet flammetesten vil en PP-bit ha en blå flamme med en gul ende, og vil lukte som et brent stearinlys. Siden massetettheten til PP er under 1 vil den også flyte.

PP har mange likheter med PE, og de består begge av lineære hydrokarbonkjeder. Men på grunn av at PP har en tilhørende metyl-gruppe (CH_3) blir kjedene til PP litt stivere. Det fører til at PP har både høyere smeltepunkt, høyere krystallinsk smeltepunkt, høyere strekkfasthet og høyere flytegrense enn PE.

Polypropylen har lineære molekykjeder som er pakket sammen i en ordnet krystallinsk struktur, men de er delvis forgrenet og imperfekte, slik at man kaller PP et semi-krystallinsk polymer. Graden av krystallinitet avhenger blant annet av den termiske historien til polymeret, hvor annilering eller rask avkjøling gir høyere grad av krystallinitet.

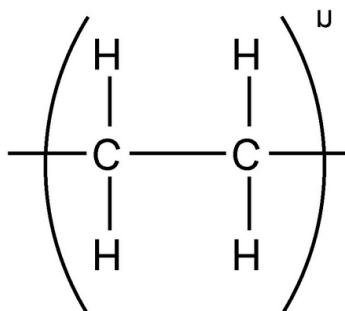
De mekaniske egenskapene til PP er hovedsakelig særlig avhengig av den molekylære vekten, men også isotaktisiteten, graden av krystallinitet og mengden av copolymerer spiller en stor rolle. Massetettheten til PP endrer seg ikke i veldig stor grad etter graden av krystallinitet, noe som er tilfelle for PE. Tettheten er ca. $0,9 \text{ kg/cm}^3$, og PP er dermed blant de letteste polymerene.

Glasstransisjonstemperaturen til PP er på rundt $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, men kan også bli observert ved temperaturer på mellom 0 og 20 plussgrader, da den avhenger av varmeraten. Det krystallinske smeltepunktet til PP er på mellom $160 \text{ }^\circ\text{C}$ og $170 \text{ }^\circ\text{C}$ [1]. Den sekundære glasstransisjonstemperaturen til PP er ifølge Meland (1988) $-254 \text{ }^\circ\text{C}$.

Man har også noe som kalles sprøtemperatur, som er sterkt knyttet til glasstransisjonstemperaturen. Med sprøtemperaturen menes det at 50 % av det materialet oppnår sprøbrudd ved spesifiserte lastforhold. For PP varierer denne temperaturen mellom $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ og $15 \text{ }^\circ\text{C}$ avhengig av om det er homopolymer, randomisert copolymer eller blokkpolymer. PP har altså ganske høy sprøtemperatur, slik at bruk av PP ved lave temperaturer burde vurderes nøye.

PP utviser siging som de fleste andre viskoelastiske materialer, men resistansen mot siging er allikevel en del bedre enn for eksempel PE, som PP har mange likhetstrekk med. Ved samme last og samme tid har PP høyere sige-modul enn PE, men samtidig lavere enn andre amorfe plastmaterialer som PVC.

2.9 Polyetylen (PE)



Figur 2-11: Oppbyggingen til et PE-molekyl [23]

PE har den kjemiske strukturen som er vist i figur 2-9. PE består altså av repeterende enheter av etylen-monomerer, og n -bokstaven på figuren står for hvor mange repeterende enheter det er. PE er altså det enkleste monomeret man har, og består bare av karbon- og hydrogenatomer [13].

Tabell 3: mekaniske og termiske egenskaper til PE [24]

Egenskap	Verdi	Benevning
Spesifikt tyngdepunkt	0,91 – 0,96	kg/m ³
Strekkmodul	1,06 – 1,09	GPa
E-modul	6,21 – 8,96	GPa
Strekkfasthet	20,7 – 44,8	MPa
Flytegrense	19,7 – 31,9	MPa
Forlengelse ved brudd	200 – 800	%
Spesifikk varmekapasitet	1,81 – 1,88	J/g·°C
Temperaturutvidelseskoeff.	126 – 198	10 ⁻⁶ · K ⁻¹
Termisk konduktivitet	0,403 – 0,435	W/m·°C

PE er det mest brukte polymeret i verden, og har blitt produsert i over 80 år. Rør av polyetylen ble tatt i bruk på 1960-tallet, og har blitt brukt mer og mer siden det. Særlig siden polyetylen, i likhet med flere andre polymerer, utviser bedre kjemiske og korrosjonsegenskaper enn rør av stål og jern. Produkter laget av PE er typisk flasker, kanner, bøtter, bæreposer, folie, rør osv. [25].

Man har ulike typer av PE, som produseres på forskjellige måter og blir brukt til ulike formål. Man deler PE inn to hovedtyper: low-density PE (LDPE) og high-density PE (HDPE). LDPE brukes til å lage for eksempel plastposer og innpakkingsmateriale, mens HDPE er stivere og brukes til å lage containere, rør, bildeler osv. LDPE og HDPE kan igjen deles inn i flere ulike typer [20]: linear low-density PE (LLDPE), very-low-density PE (VLDPE), high-molecular-weight PE (HDPE), ultra high-molecular-weight PE (UHMWPE), ethylene-vinyl acetate (EVA) polymer og acrylic polymer. Alle disse typene har forskjellig styrke, forskjellig

smeltepunkt, forskjellig lukt osv. I testen som skal gjennomføres her er det rør av HDPE og PE som vil bli testet.

Ved flammetesten vil PE mykne når det blir varmet opp, og vil i tillegg flyte. Den har også samme farge som PP når den tenes på, men vil i motsetning til PP ikke lukte like sterkt stearin/parafin som PP. Den vil derimot også smelte og dryppe, og brenner ganske fort.

HDPE er både mer rigid og hardere enn LDPE, og har fire ganger høyere strekkfasthet enn LDPE. Dette er særlig på grunn av den høyere molekylære vekten til HDPE. Slagseigheten til HDPE er også veldig høy, og er blant de aller høyeste blant alle termoplastene. Den er derimot ikke like høy ved lavere temperaturer.

Ifølge Vasile, C. Pascu. M. (2005) er den duktile/skjøre temperaturen til HDPE $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, og den minste temperaturen man kontinuerlig kan bruke HDPE er også $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Andre kilder som Meland (1988) mener at den temperaturen ligger på rundt $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$.

PE er et semikrystallinsk og viskoelastisk materiale, og de mekaniske egenskapene er avhengige av struktur, molekylære vekt, taktisitet, temperatur osv. HDPE har en grad av krystallinitet på opp mot ca. 75 %, mens LDPE har en grad av krystallinitet på ned mot 40 %.

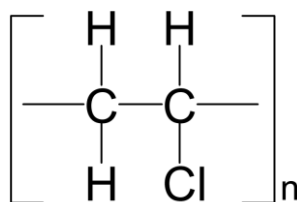
Glasstransisjonstemperaturen til PE er på rundt $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, men kan også bli observert ved temperaturer på mellom -120 og -20 grader, da den avhenger av varmeraten. Det krystallinske smeltepunktet til PE er på mellom $138\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, mens sprøtemperaturen for HDPE ligger på mellom $-156\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$. Den sekundære glasstransisjonstemperaturen til PE er ifølge Meland (1988) $-105\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Den krystallinske fasen i PE bevarer den mekaniske styrken over et stort temperaturintervall. Andre mekaniske egenskaper som bruddstyrke og flytegrense varierer i større grad med temperaturen.

På en spenning-tøyning-diagram, med høy spenning og romtemperatur, vil grafen for et PE-materiale være lineær til å begynne med frem til flytegrensen, før kurven vil oppleve et lite knekk. Etter dette vil kurven gradvis stige igjen, og nå et høyere punkt enn ved knekket. Dette grunnet orienteringen til makromolekylene, som vil styrke materialet. Data fra korttids-spenning-tøyning har begrenset nytte, og langtids-siging og utmatting er viktigere å se på.

E-modulen til PE øker lineært med høyere tetthet, så av denne grunn er HDPE en del stivere enn LDPE. PE vil i stor grad oppleve siging, og selv ved liten påført spenning vil PE oppleve en viss del av siging ved romtemperatur.

2.10 Polyvinylklorid (PVC)



Figur 2-12: Oppbyggingen til et PVC-molekyl [23]

Den kjemiske strukturen til PVC er vist i figur 2-10. PVC har lange kjeder med vinylklorid. R-gruppen til PVC er klor (Cl), så et PVC-molekyl består altså av karbon- hydrogen og kloratomer. I et PVC-molekyl utgjør klor-atomene ca. 57 % av vekten, noe som gjør at PVC får en del andre egenskaper enn andre liknende polymerer som PE [25].

Kloratomene er større enn karbon- og hydrogenatomene, og disse kloratomene har stor elektronegativitet. Bindingene mellom karbon- og kloratomene blir dermed polare. Grunnet disse store negative polene blir det vanskelig å tiltrekke seg andre kloratomer, slik at krystalline områder i PVC vanskelig kan oppnås. Av denne grunn er altså PVC hovedsakelig et amorf polymer.

Tabell 4: mekaniske og termiske egenskaper til PVC [24]

Egenskap	Verdi	Benevning
Spesifikt tyngdepunkt	1,3 – 1,58	kg/m ³
Strekkmodul	2,4 – 4,1	GPa
E-modul	2,14 – 4,14	GPa
Strekkfasthet	40,7 – 65,1	MPa
Flytegrense	35,4 – 52,1	MPa
Forlengelse ved brudd	11,9 – 80	%
Spesifikk varmekapasitet	1,36 – 1,44	J/g·°C
Temperaturutvidelseskoeff.	100 – 150	10 ⁻⁶ · K ⁻¹
Termisk konduktivitet	0,147 – 0,293	W/m/°C

PVC er et av de mest ustabile polymerene av alle polymerene som likevel blir brukt kommersielt, hovedsakelig på grunn av at man har funnet stabiliserende tilsetningsstoffer. Man deler gjerne PVC inn i to hovedtyper: rigid PVC (forkortet RPVC) og fleksibelt PVC. Til PVC er det vanlig å tilsette andre polymerer, fyllstoffer, fargestoffer, og ingredienser som er stabiliserende, myknende, plastifiserende og smørende. Alle disse tilsetningsstoffene påvirker egenskapene til PVC i større og mindre grad, da PVC i sin rene form er hardt og glassklart.

Bruken av PVC har røtter helt tilbake til midten av 1800-tallet og den kommersielle bruken skjøt fart i mellomkrigsårene [25]. I dag brukes PVC til å produsere produkter som rør, plastposer, regntøy, ledninger, leker osv.

PVC har egenskaper som i stor grad blir styrt av van der Waalske krefter mellom kjedene, og sterkere kovalente bindinger mellom atomene, noe som tidligere beskrevet stort sett gjelder for termoplaster.

PVC har en litt høyere E-modul enn PP og PE, og er mindre elastisk. PVC veier også litt mer enn PE og PP, og er i motsetning til de to andre polymerene ikke flytende i vann. Men det er samtidig vanskelig å gi konkrete verdier på disse egenskapene, da PVC har så mange ulike tilsetningsstoffer som påvirker disse.

Glasstransisjonstemperaturen til PVC er på ca. 82 °C, mens smeltepunktet kan variere i veldig stor grad mellom de ulike typene PVC. T_m til PVC sies å ligge mellom 100 °C og 260 °C. Den sekundære glasstransisjonstemperaturen til PVC er ifølge Meland (1988) -25 °C. Den spesifikke varmekapasiteten C til PVC er 0,9 J/g°C.

PVC er for det meste ataktisk, som betyr at kloratomene ligger ganske randomisert på hver side av PVC-kjeden. Den kan også ha en viss grad av synditaktisitet, noe som gjør at PVC får noen prosent krystallinitet, selv om PVC hovedsakelig er et amorft polymer.

Hovedfordelen med PVC er at det er et billig materiale, tar vanskelig fyr, et klart materiale, god kjemisk resistans og relativt hardt og rigid.

2.11 Eksisterende teori om termoplast i kulde

Teori om hvordan plastmaterialer oppfører seg ved lave temperaturer finnes det ikke altfor mye om. I grafer og tabeller om oppførselen til termoplast som man finner i generell litteratur om plastmaterialer er det ofte mye informasjon om hvordan denne endrer seg ved høye temperaturer, og særlig temperaturer rundt smeltepunktet. Noe informasjon om oppførselen ned mot 0 °C finner man også, men sjeldent lenger ned enn det.

Man har sett at polymerer utsatt for spenning når temperaturen er under glasstransisjonstemperaturen vil oppleve liten grad av siging, og at over T_g vil siging-effekten være adskillig mer signifikant. Problemet er at for noen polymerer kan glasstransisjonstemperaturen variere i stor grad, som for eksempel PE hvor T_g kan variere mellom -120 og -20 °C. De sekundære bindingene (Van der Waalske-krefter) som holder kjedene sammen er mindre effektive over glasstransisjonstemperaturen, og derfor kan disse kjedene lettere skli forbi hverandre og siging vil oppstå når temperaturen er høy nok [1]

Brydson, J. A. (1999) skriver i sin bok «Plastics Materials» at ved lave temperaturer som -40 °C vil man for PVC ved høyt aktive initiatorer som alkyboraner øke dannelsen av syndiotaktiske strukturer. Dette vil føre til mer regulære polymerer med mindre forgreninger. Disse polymerene har høyere tetthet og et høyere mykningspunkt. En høyere tetthet vil føre til høyere grad av sprøhet, og disse polymerene blir dermed vanskeligere å prosessere

Sushel Kalia og Shao-Yun Fu har i sin bok «Polymers at Cryogenic Temperatures» skrevet om funn ved forskningen på ulike polymerer ved temperaturer som er enda lavere enn de man

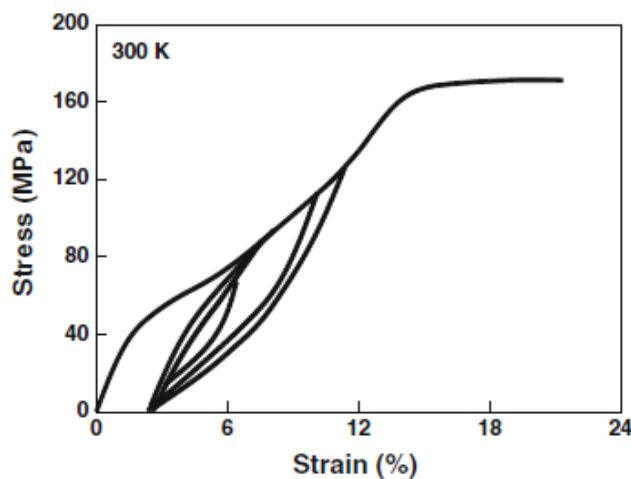
i denne oppgaven tester. Kryogeniske temperaturer vil si temperaturer under -196 C° (77 K), og kryogenikk handler om studien av effektene på materialer ved disse temperaturene [27].

Ifølge Kalia og Fu vil PVC (rigid type) nesten tredoble E-modulen når temperaturen går fra 25 C° til ca. -269 C° , hvor altså E-modulen går fra 110 MPa til 300 MPa . Strekkfastheten vil øke fra $2,3\text{ MPa}$ til $11,6\text{ MPa}$, mens forlengingen før brudd vil reduseres dramatisk. Den vil gå fra 156% forlenging ved 25 C° til $3,6\%$ ved -196 C° , og $2,9\%$ ved -269 C° .

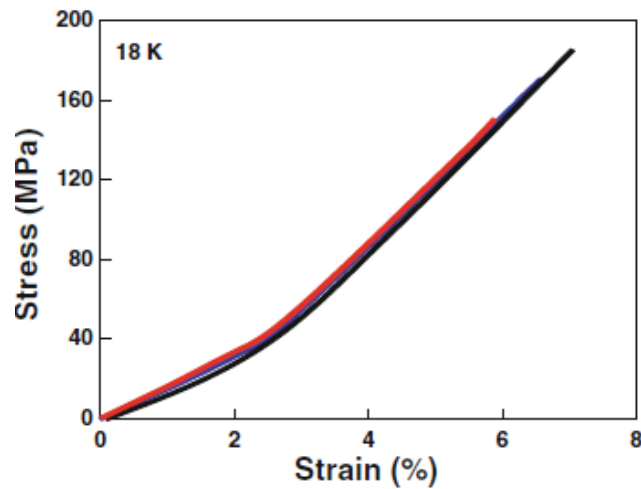
HDPE på sin side øker strekkfastheten fra $2,5$ til $13,5$ ved de samme temperaturene. Forlengingen før brudd reduseres fra 525% ved 25 C° til $4,3\%$ ved -196 C° , og $3,1\%$ ved -269 C° [26].

Kalia og Fu har også testet i hvilken grad krystallinitetsgraden påvirker polymerene ved kryogeniske temperaturer. De har testet et PE-materiale (PEN) [27] med forskjellig grad av krystallinitet i en strekktest. Det viser seg at en høyere grad av krystallinitet fører til en lavere strekkfasthet og mindre deformasjon før brudd enn når krystallinitetsgraden er lavere.

Figurene under viser spennings-tøyningsdiagrammet til et semikrystallinsk polymer som kalles PPT (polytrimethylene terphthalate). PPT har i dette tilfellet en krystallinitetsgrad på ca. 41% , og spenningen på figuren er vist ved sykliske laster. Figur 2-13 viser tøyningen og spenningen ved en temperatur på ca. 27 C° , og man ser at tøyningen går opp til over 20% ved en spenning på ca. 170 MPa . På figur 2-14 temperaturen -255 C° , og man ser at forlengningen er ca. en tredjedel i forhold til ved en temperatur på ca. 27 C° . E-modulen til PPT er ca. dobbelt så stor ved den lave temperaturen som ved den høye.

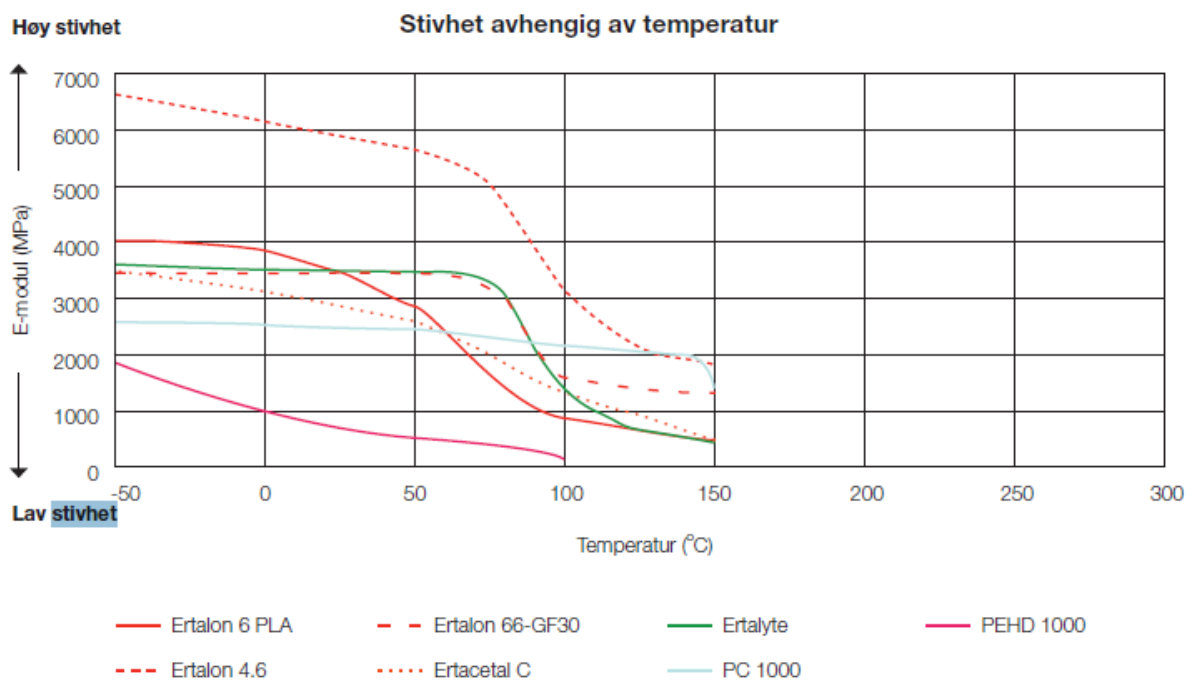


Figur 2-13: Spennings-tøyningsdiagram for PPT ved 27 C° [27]



Figur 2-14: Spennings-tøyningsdiagram for PPT ved -255 °C [27]

Vink Norway AS, en av Norges største plastforhandlere [28], sin brosjyre «Sammenlikning av plast» viser her en oversikt i figur 2-15 over hvordan E-modulen til ulike plastmaterialer endrer seg ved stigende temperaturer. Mange av materialene listet opp i figuren under er mer avanserte plasttyper, som er spesielt laget for å ha høyere stivhet og forbedrede mekaniske egenskaper ved ulike temperaturer. Men man ser at det er vist i grafen hvordan PEHD 1000 endrer seg ved ulike temperaturer. E-modulen går fra nesten 2000 MPa ved -50 °C til rundt 1000 MPa ved 0 °C og ca. 500 MPa ved 50 °C.



Figur 2-15: Sammenlikning av E-modul for ulike plastmaterier ved ulike temperaturer

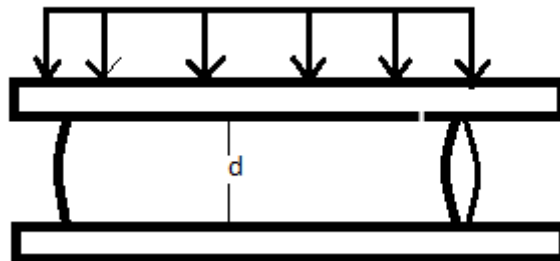
3 Metodeutvikling

Hvordan testingen skal foregå, og hvilke materialer som blir brukt til testgjennomføringen blir drøftet i dette kapittelet. Det blir gått gjennom hvordan man praktisk gjennomfører testingen, i tillegg til at mulige feilkilder blir presentert.

3.1 Konseptdrøfting

Når en måte å teste ringstivheten rørene på skulle bli valgt, var det mange momenter som måtte tas i betraktning. Måten å teste ringstivheten på går som tidligere nevnt ut på å ha to parallelle plater over og under et plastrør, hvor man legger på vekter på den øverste platen. Det var nødvendig med testutstyr som kunne holde røret på plass, og som i tillegg kunne holde på plass den øverste platen oppå plastrøret, uten at den tippet eller skapte for mye friksjon. Flere illustrasjoner og tegninger ble forsøkt tegnet, og en prototype av testutstyret ble laget på verkstedet.

Den øverste platen måtte utformes slik at den kunne ha plass til mange lodd oppå seg, da kraften som må til for å oppnå en stor nok deformasjon av rørene kunne være ganske høy. De loddene som skulle brukes til testingen hadde en diameter på ca. 38 cm, slik at både bredden og lengden til de to platene måtte være større enn det. Hvordan de to platene skulle ligge i forhold til hverandre og røret ses på figur 3-1.



Figur 3-1: Enkel illustrasjon av hvordan kreftene virker på platene og røret

Et annet punkt var om materialene som skulle brukes til testutstyret skulle være i fryseboksene over lenger tid, og således måtte tåle en temperatur ned mot $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$, samtidig som de klarer å holde vekten til loddene og den kraften de fører med seg. Det viste seg allikevel etter hvert at testutstyret ikke skulle kjøles ned til $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$ på grunn av vanskeligheter med måling av deformasjon hvis det skulle blitt realisert. Materialene måtte også være relativt lette å sette sammen selv uten for mye utstyr, og de kunne heller ikke være for kostbare i innkjøp.

Flere alternativer og muligheter ble vurdert, men det letteste og mest praktiske ble vurdert til å være en modell hovedsakelig laget av tre. Riktig tremateriale var også essensielt, og etter

diskusjon med fagpersoner på instituttet om hvilke materialer som både var anbefalt og tilgjengelige på mekanisk verksted, var det beste alternativet å kjøpe trematerialer eksternt.

De mest aktuelle trematerialene var eik og bjørk. Eik er en av de hardeste tresortene, samtidig som det er relativt tørt. Et fuktig treslag ville ha utvidet seg i stor grad ved lavere temperaturer, og kunne dermed ha sprukket opp. Bjørk er billigere og har mange av de samme egenskapene som eik, men ikke like hardt.

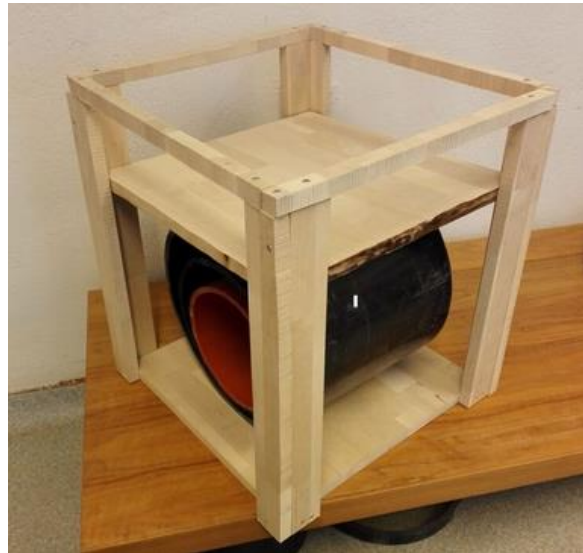
Et annet punkt ved utformingen av testutstyret var hvordan alle trebitene skulle festes sammen til å tåle all lasten som sannsynligvis trengte for å oppnå en høy nok deformasjon. Den ene muligheten var å bruke trelim, men begrensninger både når det gjelder styrke og temperaturbruk var hovedproblemet her.

Alternativet som da stod igjen var treskruer. Det største ankepunktet mot treskruer er at vanlige skruer av jern fort blir veldig sprø ved lavere temperaturer, og kan miste en del av styrken sin. En mulig løsning er å bruke rustfrie skruer, da de har større nikkelinhold som er det som i stor grad gjør at stålet i skruene får en lavere termisk utvidelseskoeffisient og blir mindre sprøtt.

3.2 Valgt løsning

Den valgte løsningen ble som vist i figur 3-2.

Den består av to plater av bjørk på 40x40 cm av, som er de to parallelle platene man trenger for å teste ringstivheten i henhold til standard EN ISO 9969:2007. Den øverste platen blir låst i x- og y- retning ved hjelp av 8 ulike støttebjelker som er festet på sidene av den nederste platen, og er skrudd fast til både den nederste platen og til hverandre med rustfrie skruer. Disse støttebjelkene er igjen festet sammen av mindre trestenger som er skrudd fast på dem horisontalt i xy-planet. Målet er at den øverste platen kan bevege seg så friksjonsfritt som mulig i z-planet, men samtidig ikke så fritt at vektene som blir lagt oppå sammen med plata vil bevege seg i x- og y-retning i noen særlig grad. Dette for å forsikre seg om at all kraften F som blir påført hovedsakelig tas opp av plastrøret, og ikke andre deler av testkonstruksjonen. Noe deformasjon vil selvfølgelig bli tatt opp av begge platene som er under og over røret, men målet er at denne deformasjonen minimeres i størst mulig grad.



Figur 3-2: Foto av ferdigbygget testutstyr

3.3 Testgjennomføring

3.3.1 Generell fremgangsmåte

Først blir rørmaterialene bestemt ved hjelp av flammetesten. I henhold til vedlegg 2 blir rørbittene varmet opp og så lagt i vann, før de blir tent på og man kan bestemme materialet.

Ringstivhetstesting i kulde blir gjennomført med EN ISO 9969:2007 som grunnlag ved at fire forskjellige plastrør blir testet i tre forskjellige temperaturer, som derfor blir delt inn i tre ulike caser. Den første casen er romtemperatur, hvor temperaturen er ca. 20 grader °C. Den andre casen er ved bruk av frysekammer, som vist i figur 3-3, hvor temperaturen først settes til ca. -25 grader °C. Den tredje casen er også ved bruk av frysekammer, hvor temperaturen settes til ca. -72 grader °C.



Figur 3-3: Frysekammer ved SKP, brukt til å fryse plastrørene ned til -72 °C

Utstyr:

- Testmodell laget av tre
- 11 lodd à 20 kg, flere lodd à 2,5 kg
- Tommestokk, linjal og blyant
- Frysekammer
- 4 stk. plastrør

Tabell 5: Dimensjoner til de testede plastrørene

Plastmateriale	Ytre diameter (D_y) i mm	Veggtykkelse (e) i mm	Indre diameter (D_i) i mm	Nominell diameter (D_n) i mm	SDR
HDPE	320	10	300	310	32
PE	250	10	230	240	25
PP	200	8	184	192	25
PVC	110	6	98	104	18,33

Testingen starter med prelastfasen, hvor man først legger på en liten kraft. For PVC-røret blir denne kraften da 7,5 kN, siden D_i er under 100 mm. For de andre tre rørene blir prelastkraften F_0 bestemt av formel 11. HDPE- og PP-røret hadde en lengde på 290 mm, mens de to andre hadde en lengde på 300 mm.

HDPE:

$$F_0 = 250 \cdot 10^{-6} \cdot 310 \cdot 290 = 22,5 \text{ N}$$

PE:

$$F_0 = 250 \cdot 10^{-6} \cdot 240 \cdot 300 = 18 \text{ N}$$

PP:

$$F_0 = 250 \cdot 10^{-6} \cdot 184 \cdot 290 = 13,3 \text{ N}$$

På grunn av ikke veldig mange forskjellig lodd tilgjengelig, blir det lagt på et lodd på 2,5 kg på den øverste platen for alle de ulike plastrørene.

Etter prelastfasen blir den vertikale høyden mellom de to horisontale platene lest av, noe som vil tilsvare den ytre diameteren til plastrøret. Siden den øverste platen ikke ligger 100 % vannrett, og da særlig når det er plassert mange lodd på den, blir det foretatt en avlesing av høyden i alle de fire hjørnene til platen. Blyantstreker med oppmålte høydeangivelser er på forhånd blitt tegnet på de vertikale trestøttene i hvert hjørne på testutstyret, slik at man lettere og kjappere kan se høydeforskjellen etter hvert som loddene blir plassert på den øverste platen. Disse fire høydemålingene blir det så tatt et snitt av, og det er snittet av disse minus veggtykkelsen det skal oppnås en 3 % deformasjon av.

Loddene på 20 kg blir deretter en etter en plassert oppå den øverste platen, samtidig som høydeverdiene i de fire hjørnene blir avlest, som vist i figur 3-4. Tiden brukt på å legge på hvert lodd blir også registrert, slik at man passer på å ha en tilnærmet lik hastighet på påføring

av kraft ved alle testgjennomføringene. Når snittet av de fire høydemålingene etter at loddene er plassert på er lik 97 % av det opprinnelige høydesnittet fratrukket rørtykkelsen, er testen ferdig. Den samlede vekten til alle loddene blir regnet sammen og registrert.

Etter at loddene er tatt av igjen, blir det foretatt en ny høydemåling for å undersøke om plastrøret har opplevd noen plastisk deformasjon. Dette er også for å passe på at plastrørene ikke er varig deformerte før den neste testen, siden det er de samme rørene som blir testet flere ganger i ulike temperaturer.



Figur 3-4: Foto av hvordan høydemålingen foregår

3.3.2 Case 1

Den første testen utføres i romtemperatur, ved ca. 20 grader °C. Målet med denne testen er å finne ut om hele testmetoden fungerer som den skal, da man optimalt sett her skal få samme ringstivhet og E-modul som er blitt beskrevet i teorien om generelle egenskaper til plastmaterialer.

Plastrørene har her på forhånd blitt oppbevart i normal romtemperatur over lenger tid, slik at de ikke er blitt påvirket av ytre forhold før testingen. Rørene vil i tillegg her ikke ha krympet pga. temperaturendringer.

Innsidediameteren av røret blir målt før man legger på prelasten. Etter all den nødvendige lasten for å oppnå ønsket deformasjon blir påført, blir høydene i de fire hjørnene avlest. Til slutt blir all lasten fjernet før det foretas en ny måling av avstanden mellom de to platene for å sjekke at en varig deformasjon av plastrøret ikke er oppnådd.

3.3.2 Case 2

Den andre testen gjennomføres når rørene har en temperatur på ca. $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Plastrørene blir lagt inn i frysekammeret i god tid før testingen gjennomføres, slik at de rekker å oppnå en temperatur på $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Lengdeendringen på rørene blir presentert i tabell 6, etter at man setter inn $\Delta T = -25 - 20 = -45$ i formel 11, samtidig som man henter inn verdier for temperaturutvidelseskoeffisienten fra tabell 2, 3 og 4:

Tabell 6: Lengdeendring til plastrørene ved $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$

HDPE	PE	PP	PVC
-3,05 mm	-3,15 mm	-3,29 mm	-2,63 mm

Som man ser er lengdeendringen såpass marginal, at den ikke vil tatt hensyn til ved senere utregning av ringstivhet og E-modul.

Innsidediameteren til plastrørene vil endre seg til en viss grad når de blir kjølt ned til $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ siden rørtykkelsen vil minske, men denne endringen vil være såpass liten siden veggtykkelsen allerede er liten, i tillegg til at det er vanskeligere å tallfeste denne endringen.

Rørene vil etter nedfrysingen bli tatt ut av frysekammeret en etter en for testingen. Testingen og lastpåføringen vil skje i romtemperatur utenfor fryseboksen, og av den grunn er det viktig å gjennomføre dette så raskt som mulig. Temperaturen til rørene vil øke relativt kjapt etter at de er tatt ut av frysekammeret, så for å minimere feilkilden vil målingene gjennomføres i løpet av kort tid.



Figur 3-5: Foto av måling av deformasjon med påført last i romtemperatur utenfor frysekammeret

3.3.3 Case 3

Den tredje testen gjennomføres når rørene har en temperatur på ca. $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$. Plastrørene blir også her lagt inn i frysekammeret i god tid før testingen gjennomføres, slik at de rekker å oppnå en temperatur på $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Lengdeendringen på rørene blir presentert i tabell 7, etter at man setter inn $\Delta T = -72 - 20 = -92$ i formel 11, samtidig som man henter inn verdier for temperaturutvidelseskoeffisienten fra tabell 2, 3 og 4:

Tabell 7: Lengdeendringer til plastrørene ved $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$

HDPE	PE	PP	PVC
-3,05 mm	-3,15 mm	-3,29 mm	-2,63 mm

Heller ikke her vil det tatt hensyn til ved senere utregning av ringstivhet og E-modul.

Innsidediameteren til plastrørene vil endre seg til en viss grad når de blir kjølt ned til $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$ siden rørtykkelsen vil minske, og her i større grad enn i case 2. Men den er fortsatt ikke stor nok til at denne vil bli tallfestet.

På samme måte som ved case 2 vil rørene etter nedfrysingen bli tatt ut av frysekammeret en etter en for testingen. Testingen og lastpåføringen vil skje i romtemperatur utenfor fryseboksen, og av den grunn er det viktig å gjennomføre dette så raskt som mulig. Temperaturen til rørene vil øke relativt kjapt etter at de er tatt ut av frysekammeret, så for å minimere feilkilden vil målingene gjennomføres i løpet av kort tid. Som vist på bildene nedenfor vil frostrøyk sive ut av frysekammeret ved åpning, og samtidig vil temperaturen i frysekammeret stige litt.



*Figur 3-6: Venstre: frostrøyk når døren til frysekammeret åpnes opp ved $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$.
Høyre: temperaturindikator på frysekammer som viser at temperaturen etter åpning og lukking av døren er $-71,7\text{ }^{\circ}\text{C}$.*

3.4 Mulige feilkilder ved testingen

Hovedproblemet med testingen er knyttet til usikkerheten til målingen, og om hvorvidt resultatene er statistisk signifikante. Hvert plastrør blir bare testet en gang i hver temperatur, og det er i utgangspunktet ikke nok til å trekke noen slutninger. Feil med måleutstyret og/eller de testede plastrørene kan forekomme, og med bare et forsøk blir det vanskelig å utelukke slike eventuelle feilkilder.

Et annet problem med den valgte løsningen er om lasten blir perfekt jevnt fordelt utover røret, eller om noen deler av plastrøret vil oppleve en slags punktlast istedenfor en jevnt fordelt last. Den øverste treplaten oppå røret kan vri litt på seg, slik at lasten blir skjevt fordelt på røret. I tillegg er det også en risiko for at friksjonen mellom den øverste platen som loddene blir lagt på og de vertikale støttene blir for stor, slik at en del av lasten forsvinner i form av friksjonskraft, istedenfor at den blir tatt opp av plastrøret.

Utstyret jeg bruker vil også oppleve sin del av deformasjon, og da er spørsmålet om treplatene vil ta opp for stor del av deformasjonen, når det ideelt sett er plastrøret som burde ta opp det aller meste av deformasjonen. Valget av bjørk som tremateriale er begrunnet i akkurat dette, men som forklart under konseptdrøftingen ville muligens plater av eik vært et enda bedre valg, siden eik er enda hardere enn bjørk.

De fleste plastmaterialer er som sagt duktile ved romtemperatur, og vil oppleve stor deformasjon før brudd. Derimot har de fleste polymerene en glasstransisjonstemperatur som ligger lavere enn dette, slik at ved den laveste temperaturen de ulike polymerene testes i vil det være på forhånd være knyttet usikkerhet til om man vil oppnå den nødvendige deformasjonen på 3 % som kreves ifølge standarden EN ISO 9969:2007. Et alternativ er da å redusere lengden til røret man tester frem til man oppnår en stor nok deformasjon, selv om det ikke er i henhold til standarden.

Plastrørene er blitt levert av Biobe AS, og veggtykkelsen på rørene jeg fikk utlevert var ganske vilkårlige. Altfor tykke vegger vil også bidra til at en stor nok deformasjon blir vanskelig, slik at en mindre veggtykkelse hadde vært lettere å teste.

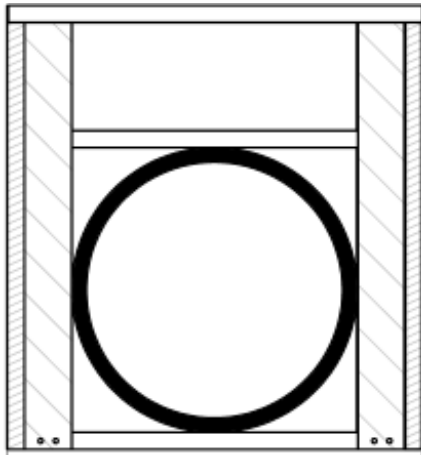
Som forklart ovenfor skulle man ideelt sett hatt flere ulike plastrør å teste, både fordi man da kunne tatt gjennomsnittet av flere forskjellige målinger, og at man da hadde sluppet å teste samme plastrør i ulike temperaturer. På grunn av begrenset tilgang på plastrør var ikke det mulig. Problemer kan da oppstå knyttet til om de testede rørene vil gå tilbake til samme form, eller om det allerede har oppstått noen plastisk deformasjon når de først blir testet. Det skulle helst vært gjennomført flere ulike målinger på samme rør, slik at resultatene hadde blitt mer reliable.

Målingene av deformasjonen til plastrøret må også gjøres manuelt, noe som kan skape problemer for nøyaktigheten. En stor linjal eller tommestokk vil bli brukt, og man skal ifølge standarden helst måle med en nøyaktig på ned mot 0,1 mm. Akkurat det lar seg vanskelig gjøre med linjal eller tommestokk, men målinger ned mot 0,5 mm nøyaktig er mer oppnåelig.

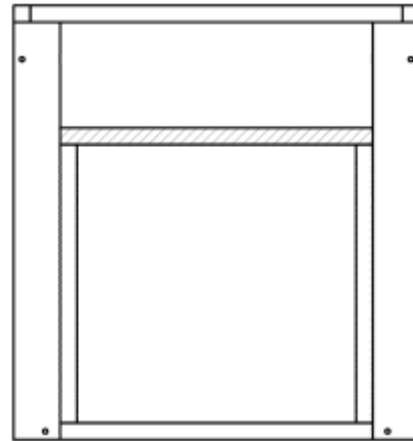
3.5 CAD-presentasjon

3.5.1 Konstruksjonstegninger

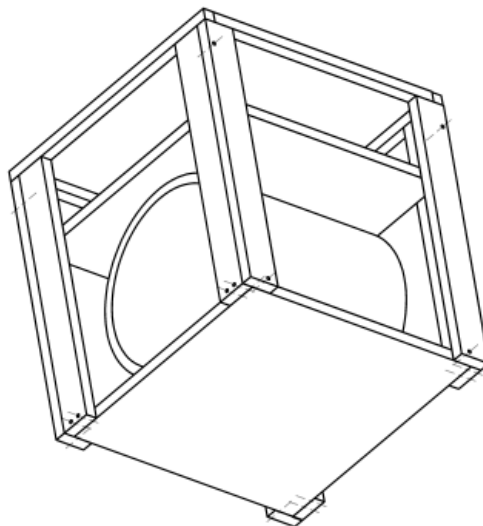
Under følger konstruksjonstegninger laget i SolidWorks. Detaljerte og målsatte skisser av de ulike delene følger i vedlegg 1.



Figur 3-7: Tegning av utstyret fra SolidWorks, sett forfra



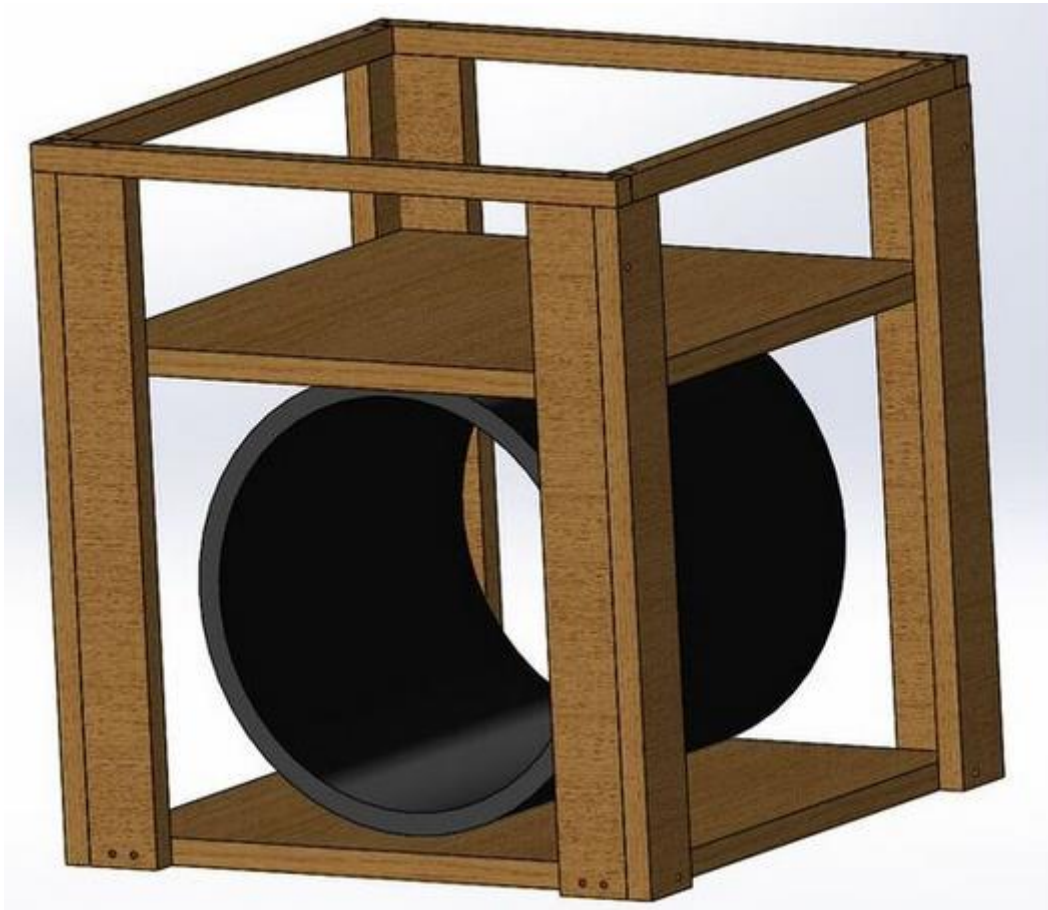
Figur 3-8: Tegning av utstyret i SolidWorks, sett fra siden



Figur 3-9: Tegning av utstyret i SolidWorks, sett skrått nedenfra

3.5.2 3D-bilde

Under følger et 3D-bilde av testutstyret, illustrert med et plastrør plassert i modellen.



Figur 3-10: 3D-bilde av testutstyret, sett skrått ovenfra

4 Resultater

Resultater fra hver case blir presentert i tabellform, før de oppnådde verdiene blir satt inn i formler fra teoridelen. Resultatene fra testingen blir så sammenlignet med det som finnes av eksisterende teori omkring temaet.

4.1 Resultater fra forsøkene

Flammestesten ble først utført for alle fire rørene, hvor en bit fra hvert rør ble varmet opp, tent på og lagt i vann, og identifisert i henhold til vedlegg 2. Resultatet av identifiseringstesten ble at materialet til hvert rør ble verifisert. Gjennom flammestesten får man derimot ikke sjekket om det er et PE- eller HDPE-rør det er snakk, men som forklart i kapittel 2.9 har HDPE høyere E-modul enn PE, så inndelingen av de to rørene ble avgjort ut ifra det.

4.1.1 Case 1

Følgende målinger ble gjort etter prelastfasen, og før det ble lagt på noen flere lodd:

Tabell 8: Høydemålinger før last, case 1

	HDPE	PE	PP	PVC
Hjørne 1 (mm)	318	248	203	110
Hjørne 2 (mm)	319	249	200	110
Hjørne 3 (mm)	316	250	202	109
Hjørne 4 (mm)	316	249	202	109
Snitt (mm)	317,3	249	201,8	109,5

Den neste tabellen viser hvilke målinger som skulle oppnås for å oppnå riktig kraft F . Ønsket snitt er altså den høyden man ønsker å måle etter å ha oppnådd en deformasjon til innsidediameteren på 3 %. Da trekker man to ganger veggtykkelsen fra målingene man gjør mellom platene, og ganger dette med 0,03 for å få ønsket deformasjon.

Tabell 9: Ønskede målinger etter last, case 1

	HDPE	PE	PP	PVC
Ønsket snitt (mm)	308,4	242,1	196,3	106,6
Deformasjon (mm)	8,9	6,9	5,5	2,9

Videre ble det lagt på lodd slik at målingene sammenfalt med ønsket snitt. Hvert lodd på 20 kg ble lagt på med ca. 20 sekunders intervall. Tabellen viser hvor stor last som trengtes for å oppnå dette, sammen med de ulike målingene:

Tabell 10: Høydemålinger etter last, case 1

	HDPE	PE	PP	PVC
Last	120 kg	80 kg	80 kg	100 kg
Hjørne 1 (mm)	306	240	197	108
Hjørne 2 (mm)	313	240	198	105
Hjørne 3 (mm)	304	242	193	104
Hjørne 4 (mm)	308	242	193	107
Snitt (mm)	307,8	241	195,3	106

Dermed kan man finne kraften F , som kan settes inn i formel 10 for ringstivheten. Deformasjonen y som blir satt inn i formelen er forskjellen mellom snittmålingene før og etter lasten.

HDPE:

$$S_R = \left(0,0186 + 0,025 \cdot \frac{9,5}{297,3} \right) \cdot \frac{120 \cdot 9,81}{290 \cdot 9,5} \cdot 10^3 = 8,29 \text{ kN/m}^2$$

PE:

$$S_R = \left(0,0186 + 0,025 \cdot \frac{8}{229} \right) \cdot \frac{80 \cdot 9,81}{300 \cdot 8} \cdot 10^3 = 6,37 \text{ kN/m}^2$$

PP:

$$S_R = \left(0,0186 + 0,025 \cdot \frac{6,5}{185,8} \right) \cdot \frac{80 \cdot 9,81}{290 \cdot 6,5} \cdot 10^3 = 8,11 \text{ kN/m}^2$$

PVC:

$$S_R = \left(0,0186 + 0,025 \cdot \frac{3,5}{97,5} \right) \cdot \frac{100 \cdot 9,81}{300 \cdot 3,5} \cdot 10^3 = 18,22 \text{ kN/m}^2$$

Etter å ha funnet S_R for hvert materiale, settes dette inn i formel 8 for E-modulen. Her er det den nominelle diameteren som brukes, så man trekker veggtykkelsen fra den ytre diameteren for å oppnå denne.

HDPE:

$$E = \frac{8,29 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 310^3}{10^3} = 2964 \text{ MPa}$$

PE:

$$E = \frac{6,37 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 240^3}{10^3} = 1057 \text{ MPa}$$

PP:

$$E = \frac{8,11 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 192^3}{8^3} = 1345 \text{ MPa}$$

PVC:

$$E = \frac{18,22 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 104^3}{6^3} = 1139 \text{ MPa}$$

4.1.2 Case 2

Følgende målinger ble gjort etter prelastfasen etter at rørene hadde blitt fryst ned til $-25 \text{ }^\circ\text{C}$, og før det ble lagt på noen flere lodd. :

Tabell 11: Høydemålinger før last, case 2

	HDPE	PE	PP	PVC
Hjørne 1 (mm)	316	248	194	109
Hjørne 2 (mm)	315	249	195	109
Hjørne 3 (mm)	317	250	196	110
Hjørne 4 (mm)	314	249	198	110
Snitt (mm)	315,5	249	195,8	109,5

Den neste tabellen viser hvilke målinger som skulle oppnås for å oppnå riktig kraft F . Ønsket snitt er altså den høyden man ønsker å måle etter å ha oppnådd en deformasjon til innsidediameteren på 3 %. Da trekker man to ganger veggtykkelsen fra målingene man gjør mellom platene, og ganger dette med 0,03 for å få ønsket deformasjon. Her er det litt større usikkerhet knyttet til hvilken innsidediameterdeformasjon man får, siden rørtykkelsen og diameteren vil krympe litt når røret blir kaldere.

Tabell 12: Ønskede målinger etter last, case 2

	HDPE	PE	PP	PVC
Ønsket snitt (mm)	306,6	242,1	190,4	106,6
Deformasjon (mm)	8,9	6,9	5,4	2,9

Videre ble det lagt på lodd slik at målingene sammenfalt med ønsket snitt. Hvert lodd på 20 kg ble lagt på med ca. 20 sekunders intervall. Tabellen viser hvor stor last som trengtes for å oppnå dette, sammen med de ulike målingene:

Tabell 13: Høydemålinger etter last, case 2

	HDPE	PE	PP	PVC
Last	140 kg	140 kg	140 kg	180 kg
Hjørne 1 (mm)	305	243	191	105
Hjørne 2 (mm)	303	242	189	104
Hjørne 3 (mm)	305	241	191	107
Hjørne 4 (mm)	308	241	189	108
Snitt (mm)	305,3	241,7	190	106

Dermed kan man finne kraften F , som kan settes inn i formel 10 for ringstivheten.

HDPE:

$$S_R = \left(0,0186 + 0,025 \cdot \frac{10,2}{295,5} \right) \cdot \frac{140 \cdot 9,81}{290 \cdot 10,2} \cdot 10^3 = 9,04 \text{ kN/m}^2$$

PE:

$$S_R = \left(0,0186 + 0,025 \cdot \frac{7,3}{229}\right) \cdot \frac{140 \cdot 9,81}{300 \cdot 7,3} \cdot 10^3 = 12,16 \text{ kN/m}^2$$

PP:

$$S_R = \left(0,0186 + 0,025 \cdot \frac{5,8}{179,8}\right) \cdot \frac{140 \cdot 9,81}{290 \cdot 5,8} \cdot 10^3 = 15,85 \text{ kN/m}^2$$

PVC:

$$S_R = \left(0,0186 + 0,025 \cdot \frac{3,5}{97,5}\right) \cdot \frac{180 \cdot 9,81}{300 \cdot 3,5} \cdot 10^3 = 32,79 \text{ kN/m}^2$$

Etter å ha funnet S_R for hvert materiale, settes dette inn i formel 8 for E-modulen:

HDPE:

$$E = \frac{9,04 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 310^3}{10^3} = 3232 \text{ MPa}$$

PE:

$$E = \frac{12,16 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 240^3}{10^3} = 2017 \text{ MPa}$$

PP:

$$E = \frac{15,85 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 192^3}{8^3} = 2629 \text{ MPa}$$

PVC:

$$E = \frac{32,79 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 104^3}{6^3} = 2049 \text{ MPa}$$

4.1.3 Case 3

Følgende målinger ble gjort etter prelastfasen etter at rørene hadde blitt fryst ned til $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$, og før det ble lagt på noen flere lodd:

Tabell 14: Høydemålinger før last, case 3

	HDPE	PE	PP	PVC
Hjørne 1 (mm)	313	246	193	109
Hjørne 2 (mm)	313	247	196	109
Hjørne 3 (mm)	314	248	193	108
Hjørne 4 (mm)	312	247	197	108
Snitt (mm)	313	247	193,8	108,5

Den neste tabellen viser hvilke målinger som skulle oppnås for å oppnå riktig kraft F . Ønsket snitt er altså den høyden man ønsker å måle etter å ha oppnådd en deformasjon til innsidediameteren på 3 %. Da trekker man to ganger veggtykkelsen fra målingene man gjør mellom platene, og ganger dette med 0,03 for å få ønsket deformasjon. Her er det enda større usikkerhet knyttet til hvilken innsidedeformasjon man får, siden rørtykkelsen vil krympe litt når røret blir såpass kaldt som $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabell 15: Ønskede målinger etter last, case 3

	HDPE	PE	PP	PVC
Ønsket snitt (mm)	304,2	240,2	188,5	105,6
Deformasjon (mm)	8,8	6,8	5,3	2,9

Videre ble det lagt på lodd slik at målingene sammenfalt med ønsket snitt. Også her ble hvert lodd på 20 kg lagt på med ca. 20 sekunders intervall. Tabellen viser hvor stor last som trengtes for å oppnå dette, sammen med de ulike målingene:

Tabell 16: Høydemålinger etter last, case 3

	HDPE	PE	PP	PVC
Last	180 kg	200 kg	180 kg	220 kg
Hjørne 1 (mm)	303	240	188	109
Hjørne 2 (mm)	304	238	186	103
Hjørne 3 (mm)	302	239	189	104
Hjørne 4 (mm)	302	241	191	108
Snitt (mm)	302,8	239,5	188,5	106

Dermed kan man finne kraften F , som kan settes inn i formel 10 for ringstivheten.

HDPE:

$$S_R = \left(0,0186 + 0,025 \cdot \frac{10,5}{293}\right) \cdot \frac{180 \cdot 9,81}{290 \cdot 10,5} \cdot 10^3 = 11,3 \text{ kN/m}^2$$

PE:

$$S_R = \left(0,0186 + 0,025 \cdot \frac{7,5}{227}\right) \cdot \frac{200 \cdot 9,81}{300 \cdot 7,5} \cdot 10^3 = 16,94 \text{ kN/m}^2$$

PP:

$$S_R = \left(0,0186 + 0,025 \cdot \frac{5,3}{177,8}\right) \cdot \frac{180 \cdot 9,81}{290 \cdot 5,3} \cdot 10^3 = 22,22 \text{ kN/m}^2$$

PVC:

$$S_R = \left(0,0186 + 0,025 \cdot \frac{2,5}{96,5}\right) \cdot \frac{220 \cdot 9,81}{300 \cdot 2,5} \cdot 10^3 = 55,39 \text{ kN/m}^2$$

Etter å ha funnet S_R for hvert materiale, settes dette inn i formel 8 for E-modulen:

HDPE:

$$E = \frac{11,3 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 310^3}{10^3} = 4039 \text{ MPa}$$

PE:

$$E = \frac{16,94 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 240^3}{10^3} = 2810 \text{ MPa}$$

PP:

$$E = \frac{22,22 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 192^3}{8^3} = 3686 \text{ MPa}$$

PVC:

$$E = \frac{55,39 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 104^3}{6^3} = 3461 \text{ MPa}$$

4.2 Analyse av resultater og sammenlikning med eksisterende teori

Under følger en oversikt over ringstivhetene som ble funnet for de forskjellige rørene ved de ulike temperatuere:

Tabell 17: Sammenlikning av ringstivhet ved ulike temperaturer

	HDPE	PE	PP	PVC
20 °C	8,29 kN/m ²	6,37 kN/m ²	8,11 kN/m ²	18,22 kN/m ²
-25 °C	9,04 kN/m ²	12,16 kN/m ²	15,85 kN/m ²	32,79 kN/m ²
-72 °C	11,3 kN/m ²	16,94 kN/m ²	22,22 kN/m ²	55,39 kN/m ²

At PVC-røret hadde størst ringstivhet er hovedsakelig på grunn av lavere SDR i forhold til de andre rørene. De andre tre rørene hadde mer like ringstivheter på grunn av likere SDR. Man skulle på forhånd anta at HDPE-røret hadde lavest ringstivhet ved romtemperatur grunnet høyest SDR, men samtidig har HDPE såpass høy E-modul at dette da blir utliknet.

I tabell 18 vises en oversikt over E-modulen til de ulike plastrørene ved de forskjellige temperatuere:

Tabell 18: Sammenlikning av E-modul ved ulike temperaturer

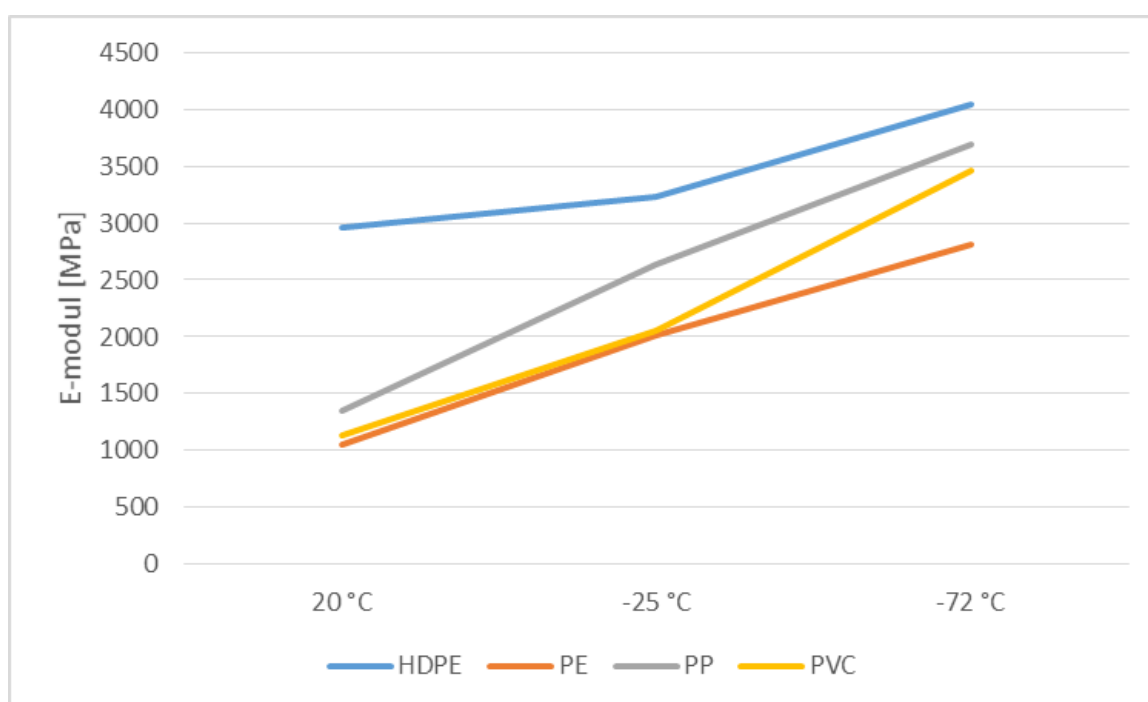
	HDPE	PE	PP	PVC
20 °C	2964 Mpa	1057 MPa	1345 MPa	1139 MPa
-25 °C	3232 MPa	2017 MPa	2629 MPa	2049 MPa
-72 °C	4039 MPa	2810 MPa	3686 MPa	3461 MPa

Man ser tydelig at økningen i E-modul ved lavere temperatur for alle fire rørene er formidabel, men særlig PVC har opplevd en stor økning. HDPE er det materialet som prosentmessig har opplevd minst økning i E-modulen når temperaturen har gått fra 20 °C til -72 °C. Dette vises under hvor man ser en tabell med økningen i E-modul målt i prosent, i forhold til E-modulen ved romtemperaturen:

Tabell 19: Økning i E-modul i forhold til ved romtemperatur

	HDPE	PE	PP	PVC
-25 °C	9 %	91 %	95 %	80 %
-72 °C	36 %	166 %	174 %	204 %

I grafen under er økningen i E-modul illustrert grafisk, og man ser at helningen til kurvene er høyest for PVC, særlig når temperaturen går fra -25 °C -72 °C, mens helningen til kurvene til PP og PE flater ut litt i samme temperaturintervall.



Figur 4-1: Grafisk fremstilling av økningen i E-modul ved synkende temperatur

Man kan allikevel ikke stole helt på disse tallene for ringstivhet og E-modul. Mulige feilkilder er beskrevet i kapittel 3.4, og de manuelle målingene er ikke helt nøyaktige. Et annet problem er at under testingen var det vanskelig å oppnå akkurat korrekt deformasjon ved påført last. Deformasjonen i forhold til den indre diameteren skulle som sagt være 3 %, men i flere av tilfellene var denne deformasjonen litt høyere enn det. I noen få tilfeller av testingen ved den laveste deformasjonen ble det heller ikke oppnådd tilstrekkelig deformasjon. Den oppnådde deformasjonen er allikevel tatt høyde for i utregningen av ringstivheten, da man setter inn verdiene for y/d_i istedenfor å sette inn 0,03 i formel 10.

I tabell 20 vises den oppnådde deformasjonen i prosent:

Tabell 20: Oppnådd deformasjon ved testingen

	HDPE	PE	PP	PVC
20 °C	3,20 %	3,49 %	3,50 %	3,59 %
-25 °C	3,45%	3,19 %	3,23 %	3,59 %
-72 °C	3,58 %	3,30 %	2,98 %	2,59 %

Som man ser er oppnådd deformasjon litt høyere enn ønsket for mange av målingene, og da særlig ved case 1 og case 2. Man ser også at ved -72 °C ble det ikke oppnådd tilstrekkelig deformasjon for PP- og PVC-rørene, og mens for de andre rørene er deformasjon litt større enn ønskelig

For HDPE- og PE-rørene er det oppnådd en ca. like stor deformasjon ved alle de tre casene, slik at sammenlikningen av E-modulene ved de forskjellige temperaturene kan anses som mer reliabel for disse rørene. Ved PP- og PVC-rørene derimot er den oppnådde deformasjonen gradvis mindre ved lavere temperatur, slik at det er grunn til å tro at ved en mer nøyaktig testing ville sammenlikningsreliabiliteten vært enda større.

Skal man sammenlikne de oppnådde resultatene her med hva som er funnet i eksisterende teori, så kan man først se på hva Sushel Kalia og Shao-Yun Fu fant ut om polymerer ved kryogeniske temperaturer. Ett av funnene deres var at PVC økte E-modulen med nesten 300 % når temperaturen gikk fra 25 °C til ca. -269 °C. I denne testingen fant man ut at PVC økte E-modulen ved over 200 % ved -72 °C.

I Kalia og Fu sin studie av materialet PPT fant de også ut at E-modulen ble ca. dobbelt så stor når temperaturen var -255 °C i forhold til ved romtemperatur. Sammenlikningene mellom figur 2-11 og 2-12 viser også at deformasjonen ved samme spenning er ca. tre ganger så høy ved -255 °C som ved romtemperatur. PPT er et materiale som ikke ble testet her, men dette materialet de testet hadde en krystallinitetsgrad på 41 % og er i den sammenheng noe sammenlignbart med de testede polymerene i denne oppgaven. En økning i E-modulen på ca. 200 % er relativt lik som den oppnådde økningen i E-modul til plastrørene av PE, PP og PVC, selv om temperaturen i deres forsøk var betraktelig lavere enn i dette tilfellet.

J. A. Brydson (1999) fant på sin side ut at ved -40 °C vil PVC øke dannelsen av syndiotaktiske strukturer, slik at materialet blir hardere og sprøere. Denne påstanden støtter også resultatet fra testingen i denne oppgaven, hvor man så en stor økning i E-modul til PVC-røret ved case 3 i forhold til case 2, når temperaturen altså gikk fra høyere enn -40 °C til lavere enn -40 °C.

Vink [29] hadde en oversikt over hvordan stivheten til ulike plastmaterialer forandrer seg ved forskjellige temperaturer. Verdiene for E-modulen til HDPE 1000, som er var der 2000 MPa ved -50 °C, rundt 1000 MPa ved 0 °C og ca. 500 MPa ved 50 °C. Selve verdiene var litt annerledes der enn hva som er funnet i denne oppgaven, men man ser at endringen følger noe av det samme mønsteret som er avdekket i denne oppgaven. Noe av grunnen til verdiforskjellene er at HDPE 1000 er en litt annen type av HDPE-materialet enn det som er testet her.

5 Økonomisk analyse

Det blir i dette kapittelet satt fokus på hvilke faktorer som påvirker plastindustrien, og hvordan pris og etterspørsel blir påvirket av dette. En PESTEL-analyse blir gjennomført, før prisene og prisutviklingen diskuteres.

5.1 Makroøkonomiske faktorer

Plast er hovedsakelig produsert av gass- og olje. På 1980 tallet gikk ca. 4 % av verdens oljeproduksjon med til fremstilling av plastmaterialer [1], og i dag sies det at plastproduksjonene beslaglegger 4-8 % av verdens uttak av fossile brensler [31].

Ved produksjon av plast forbrukes ca. 1 kg olje eller gass per kg produsert plast, noe som gir en god pekepinn på hvor stor betydning prisen av olje har for råvareprisene til plast. Plast blir på samme måte som råolje omsatt på børsen, og det er børsprisene her som avgjør prisene på de ulike polymerene.

En PESTEL-analyse [31] er en analyse som brukes for å se nærmere på makroomgivelsene til en virksomhet, i en strategisk sammenheng. Det kan være et nyttig verktøy for å undersøke hvordan utviklingen til et bestemt produkt kommer til å være, da man ser på de samfunnsmessige faktorene som kan være avgjørende for fremtiden. Vanligvis utfører man analysen for et bestemt firma eller forretningsområde i kombinasjon med en analyse med interne faktorer for å kartlegge firmaets konkurranseposisjon i forhold til øvrige firmaer, men den brukes også for å analysere omgivelsene som bedriften eller bedriftene som må forholde seg til. I denne oppgaven ligger fokuset på sistnevnte punkt, og PESTEL-analysen blir utført for plastindustrien som en enhet og for alle plastproduserende virksomheter samlet.

Bokstavene i PESTEL står for følgende:

- P: Political (politiske forhold)*
- E: Economic (økonomiske forhold)*
- S: Sociocultural (sosiokulturelle forhold)*
- T: Technological (teknologiske forhold)*
- E: Environmental (samfunnsforhold)*
- L: Legal (lovmessige/legale forhold)*

Følgende forhold kan være avgjørende for plastindustrien:

Politiske forhold

- Skattepolitikk
- Valutapolitikk
- Politisk stabilitet i de aktuelle landene
- Statlig utbygging/støtte av utvikling av olje- og gassfelt

Økonomiske forhold

- BNP-utvikling
- Oljeprisutvikling
- Inflasjon
- Prisvekst på kjemikalier
- Lønnsvekst i lavkostland

Sosiokulturelle forhold

- Konsum av plastprodukter
- Arbeidsløshet og kjøpekraft
- Økt miljøvernbevissthet
- Befolkningsvekst

Teknologiske forhold

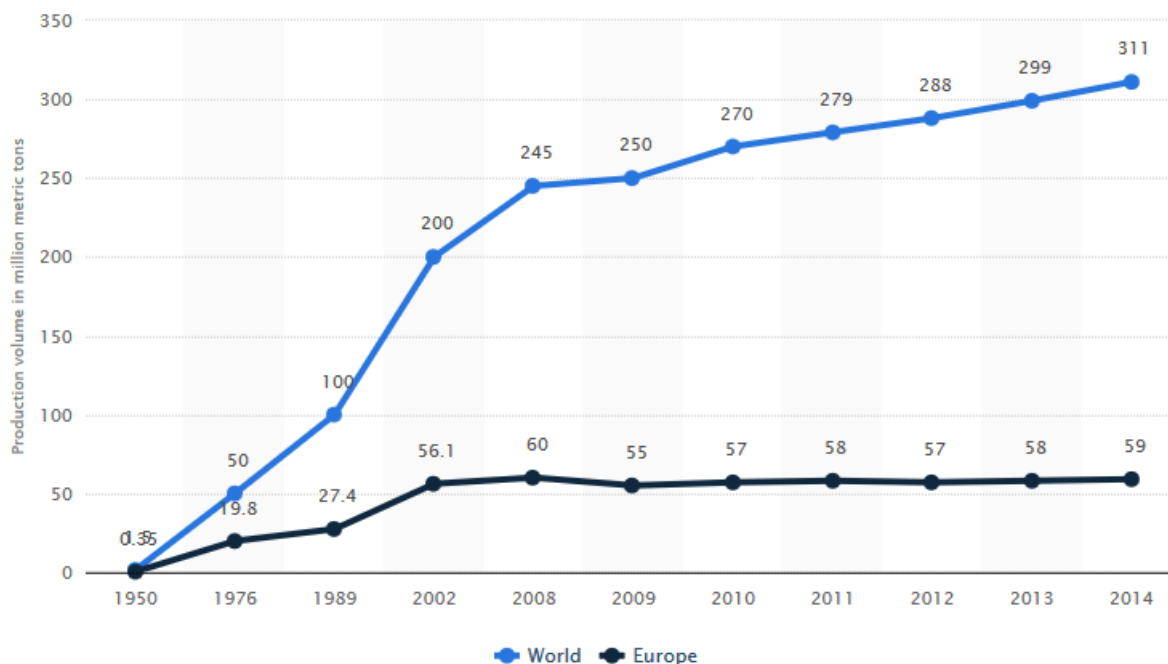
- Utvikling av produksjonsmetoder
- Nye polymerer
- Infrastruktur og transport

Miljømessige forhold

- Gjenvinningsmuligheter av plast
- Utvikling av biopolymerer (nedbrytbar plast)
- Uttømming av olje- og gasslagre
- Miljøvernforeninger

Juridiske forhold

- Klimautslippsavtaler
- Handelsreguleringer
- Nye produksjonskrav



Figur 5-1: Den globale plastproduksjonen siden 1950 [32]

Figur 5-1 viser den årlige produksjonen av plast i millioner tonn per år siden 1950. Som man ser har utviklingen skutt fart helt siden like etter andre verdenskrig, og sammenfaller i tillegg i stor grad med hvordan oljeproduksjonen har vært de siste 60 årene. Produksjonen i Europa har derimot hatt en lavere vekst, og særlig de siste 10-15 årene har produksjonsveksten vært på ca. null. Kina er i dag verdens største plastprodusent, og står for ca. en fjerdedel av den totale plastproduksjonen i verden. USA er også en stor produsent av plast, nesten like stor som Kina, men utviklingen går mer og mer i retning av at USA importerer en større andel av plasten fra Kina.

Når det gjelder forbruk av plast ser oversikten litt annerledes ut:

Vest-Europa (EU + EFTA)	24 %
Nafta (US, Canada, Mexico)	23 %
Kina	15 %
Resten av Asia	16,5 %
Midt-Østen	8 %
Japan	5,5 %
Latin-Amerika	4 %
CIS (Commonwealth of Independent States)	3 %

Figur 5-2: Andel av den globale plastbruken [17]

Ifølge figur 5-2 er det Vest-Europa som sammen med Nord-Amerika er de aller største forbrukerne av plast og plastprodukter, mens bruken er i stor vekst i Kina og andre asiatiske land.

Politiske forhold:

Dagens plastindustri er sterkt knyttet sammen med oljeindustrien, og dagens plastindustri hadde kanskje ikke vært mulig uten petroleumsindustrien. Når oljeprisen stiger vil også kostnadene ved plastproduksjon stige. Politikken styrer på mange måter oljeprisen, og da særlig OPEC (organisasjonen av petroleumseksporterende land). OPEC består av 12 land, og disse landene kontrollerer 30-40 % av verdens oljeproduksjon. Det betyr at disse landene i stor grad er med på å avgjøre verdensproduksjonen og prisen på råolje, da økt produksjon betyr større tilbud og lavere priser. Også politiske avgjørelser som økning av skiferoljeproduksjonen i USA, eller militær intervensjon i Midtøsten-landene påvirker den globale oljeprisen i noen grad.

I land som Storbritannia, som også er en ganske stor plastprodusent, har politiske spørsmål som videre EU-medlemskap betydning for landets plastproduksjon. En eventuell utgang for Storbritannia fra EU-samarbeidet gjør plasthandelen med nabolandene vanskeligere og dyrere, og vil få betydning for landets plastproduksjon [33].

Økonomiske forhold

I perioder der man opplever høykonjunktur (perioder med høyere økonomisk vekst) vil dette påvirke etterspørselen etter plastprodukter og produkter generelt hvor plast er brukt (for eksempel produkter med mye plast som emballasje). Men samtidig kan det også argumenteres for at de typiske plastproduktene ikke er veldig pris- eller inntektselastiske (det vil si etterspørselen etter produktet ikke påvirkes i veldig stor grad av høyere pris eller lavere inntekt blant konsumentene), da en veldig stor del av verdens plast brukes til emballasje til produkter man uansett trenger.

Valutavolatiliteten er også et punkt som er avgjørende for hvert enkelt lands plastproduksjon. Den siste tids styrking av den amerikanske dollaren bidrar for eksempel til økt plastproduksjon i USA grunnet økte eksportinntekter. En eventuell svekkelse av den kinesiske valutaen yuan vil påvirke den totale plastproduksjonen negativt, siden Kina som den største plasteksportøren i verden vil tjene mindre per tonn plast produsert og eksportert.

Visse plastmaterialer trenger forskjellige spesialkjemikalier til produksjonen, og en høy prisvolatilitet på disse påvirker prisen på disse plastmaterialene negativt. Selskaper som driver plastgjenvinning har vært særlig påvirket av de dalende oljeprisene, da de ikke lenger klarer å konkurrere på pris [34].

Oljeprisen er nevnt under punktet politiske forhold, da oljeprisen ofte er veldig påvirket av politiske avgjørelser, men det er like fullt den mest avgjørende økonomiske faktoren.

Bedre lønnsvilkår i lavkostland som Kina vil kunne føre til at plastprisen igjen øker grunnet høyere kostnader på arbeidskraften. Selv om plastproduksjon hovedsakelig er en kapitalintensiv vare, og ikke arbeidsintensiv, bruker man fortsatt en del arbeidskraft slik at når en såpass stor del av verdensproduksjonen befinner seg i Kina og andre lavkostland, kan dette være med på å presse prisene oppover.

Sosiokulturelle forhold

Samfunnet dreier seg for tiden mot et mer og mer miljøbevisst samfunn, og da særlig i vesten. Grønne partier får økt oppslutning både her i landet og i andre land, og flere miljøvernorganisasjoner opplever å bli hørt i større grad. Plastprodukter er på grunn av oljeavhengigheten ikke overraskende utsatt for kritikk blant miljøforkjemperne, og særlig produksjonsfasen og avfallshåndteringen er blitt pekt ut som problemområder [30].

PVC kan være tilsatt flere miljøfarlige stoffer, og det blir mye brukt innenfor bygg og anlegg. Norges Miljøvernforbund har gått inn for en boikott av det mye brukte polymeret [35]

En generell befolkningsøkning vil være med å øke etterspørselen etter plast og plastprodukter, og det gjelder også befolkningsvekst i utviklingsland. Plastmaterialer blir brukt til drikkeflasker, bøtter osv., produkter som blir flittig brukt i de fattigere landene.

Teknologiske forhold

Utviklingen av plast og plastmaterialer har vært veldig stor de siste 50 årene, og mye tyder på at den utviklingen kommer til å fortsette. Man blir stadig mer klar over hvilke karakteristikk plastmaterialer har, og man klarer stadig å utvikle nye og forbedrede materialer gjennom tilsetningsstoffer eller bedre produksjonsmåter. Det kan også bety at plastmaterialer kan utkonkurrere andre materialer som metall, lær, tre osv. på områder hvor tradisjonelt sett har blitt lite brukt.

Nye produksjonsmetoder kan redusere kostnadene forbundet med plastproduksjonen, og gjøre produksjonen mer effektiv. Det gjør også at produksjonsbedrifter kan bli mindre avhengige av arbeidsinnsatsen, og sparer penger på dette.

Miljømessige forhold

De siste 30 årene har forskning på mer miljøvennlige polymerer og plastmaterialet vært mer i utvikling. Særlig biologisk nedbrytbar plast og plast laget av bio-masse har det blitt forsket på den senere tiden. Foreløpig har ikke bioplast noen stor utbredelse, men håpet er at bioplastindustrien kan vokse seg stor på lang sikt. En rapport fra klimaorganisasjonene Zero fra 2011 [17] forteller at bioplast foreløpig utgjør bare 0,22 % av den totale plastproduksjonen. Foreløpig er det hovedsakelig det økonomiske aspektet som hindrer en stor satsning på bio-plast, men en økning i oljeprisen kan igjen gjøre bio-plast mer gunstig og aktuelt.

Det er slik at de fossile brenslene som olje og gass ikke varer evig, slik at en omlegging av plastindustrien vil tvinge seg frem på et eller annet tidspunkt. Allikevel anslår mange at det er oljereserver i minst 50 år til [36] og med stadig nye funn kan reservene vare enda lenger enn det og.

Juridiske forhold

Flere globale klimaavtaler har kommet på plass de senere tiårene, og den nyeste i rekken er Paris-avtalen. Den skal gjelde fra år 2020, og er en avtale alle land er forpliktet til å følge [37]. Den kan ha stor betydning for den globale plastproduksjonen, da alle land er forpliktet til å redusere CO₂-utslippene, og især de rikeste landene. Zero-rapporten melder om at plastproduksjon gir utslipp på ca. 1,1 milliarder tonn CO₂-ekvivalenter, og med den nye Paris-avtalen kan man se seg nødt til å redusere kraftig i den globale plastproduksjonen.

Andre handelsreguleringer og produksjonskrav kan oppstå, som at det blir begrenset hvor mye utslipp man kan ha ved produksjon av plast. Svanemerket har allerede krav til plastproduksjon, og det er at platen ikke inneholder halogenerte materialer. Halogenerte materialer er gjerne flammehemmere som brukes, som kan skape problematisk avfall [43].

5.2 Kostnadsvurdering

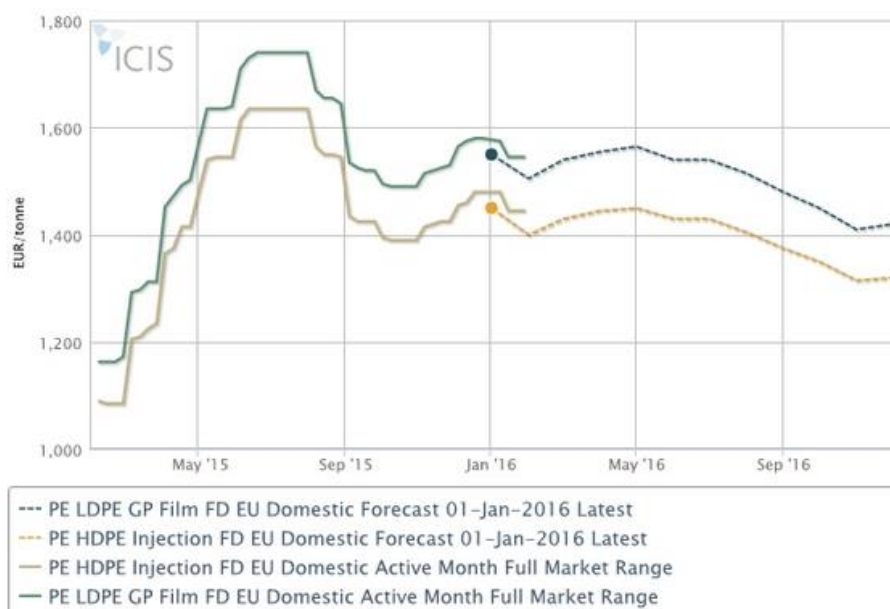
Prisene på PP, PE og PVC er veldig fluktuerende, og er som tidligere nevnt sterkt avhengig av oljeprisen. Særlig det siste året med lave oljepriser har ført til en sterk prisreduksjon på polymerene, selv om prisene nå er på vei opp.

Prisene varierer også avhengig av hvilket marked det handles på. Det kan være forskjell på spot-prisen på det asiatiske markedet og det amerikanske markedet mye på grunn av lavere produksjonspriser, og i Midtøsten kan prisen på PP være nærmere 40 cent (\$) per kg lavere enn i USA. Nedenfor vises grafer som viser prisutviklingen til PE og PVC, hentet fra ICIS (verdens største tilbyder av informasjon om det petrokjemiske markedet):



Figur 5-3: Prisutvikling for PVC på det amerikanske markedet [38]

Figur 5-3 viser prisutviklingen til PVC på det amerikanske markedet det siste året i dollar per tonn, og man ser en sammenheng med hvordan oljeprisutviklingen har vært i verden det siste året. Man ser at prisen til PVC i mars ligger på ca. 660 dollar per tonn.



Figur 5-4: Prisutvikling og prediksjon for PE på det europeiske markedet [39]

Figur 5-4 viser både en oversikt over prisutviklingen til HDPE og LDPE det siste året på det europeiske markedet i euro per tonn, og en prediksjon på hvordan den vil utvikle seg de neste månedene. Det er anslått at prisene vil synke senere i året, selv om oljeprisen er spådd å være på vei opp. Med et forhold på euro/dollar på 1,125 tilsier det at prisen på HDPE i januar var på nesten 1700 dollar per tonn.

Prisen på polypropylen omsatt på børsen i Europa ligger ifølge ICIS på over 1000 € per tonn per april 2016, noe som vil si ca. 1125 dollar per tonn [40].

Ifølge dataprogrammet CES Edupack er prisene på PP 12,50 – 14,2 NOK/kg, PE 12,2 – 13,5 NOK/kg og PVC 11,9 – 13,1 NOK/kg.

Nettsiden Platicnews skriver i januar i år om prisutviklingen til PE, PP og PVC, hvor prisene på PP har økt mens prisene på PE og PVC har sunket. Økningen til PP forklares delvis ut ifra produksjonsproblemer hos de største tilbyderne, noe som har ført til et «selgers marked». Nedgangen i prisen på PP og PVC forklares hovedsakelig med den sterke reduksjonen i oljepris det siste året, selv om bruk av billigere naturgass har redusert betydningen av denne faktoren noe. PVC lider i tillegg av en nedgang i etterspørsel globalt, og siden PVC blir mye brukt i byggeindustrien vil den generelt lavere økonomiske veksten i mange land redusere både etterspørselen og prisene på PVC [41].

5.3 Prediksjon

PESTEL-analysen belyser ulike sider ved plastindustrien som vil ha innvirkning på både det globale produksjonsvolumet og prisutviklingen i fremtiden. De største truslene mot en fortsatt stor vekst i den globale plastproduksjonen er klimarettede tiltak og generell klimaholdning blant forbrukere, oljeprisutvikling og den videre økonomiske veksten i land med sterkt voksende økonomier som Kina og andre sørøst-asiatiske land. Man ser av figur 5-1 at den globale plastproduksjonen har økt jevnt og trutt de siste tiårene, men er på vei til å flate ut til en viss grad. En utflating i produksjonsveksten vil kunne presse plastprisene opp, så lenge etterspørselen ikke reduseres samtidig.

Man ser allerede tegn til at etterspørselen etter PVC synker gradvis i enkelte land som USA og i Europa, særlig på grunn av en nedgang i konstruksjons- og byggeindustrien. Produksjonen holder nå følge med etterspørselen i større grad. Også miljømessige forhold, høye energipriser og en gradvis substitusjon med PE har redusert etterspørselen noe [42]. Som skrevet i kapittel 2.8 er PP det polymeret som opplever størst vekst, og bruken av andre polymerer vil da sannsynligvis reduseres i takt med en økning i bruk av PP.

Om oljeprisen skulle stige i stor grad, til nivået den lå på for noen år siden, vil plastprisen igjen stige. Det vil sannsynligvis presse prisen på PP, PE og PVC til prisene de var på for ett år siden, da for eksempel PE kostet nesten 1800 euro per tonn, mens PVC kostet nesten 900 dollar per tonn.

Hvordan prisene faktisk kommer til å utvikle seg den kommende tiden er svært vanskelig å spå, men på bakgrunn av en mer sannsynlig oljeprisøkning kan man anta at prisene på PP og PE kommer til å stige fremover. Prisen på PVC er litt mer usikker, og man kan tippe at prisen heller vil synke enn stige på grunn av lavere etterspørsel. Etterspørselen på visse markeder synker gradvis allerede, og man blir mer bevisst på PVCs miljømessige ugunstige faktorer.

6 Diskusjon og konklusjon

Funn og analyser fra testingen blir diskutert, og knyttet opp mot spørsmålene som er stilt innledningsvis, i tillegg til teori som er blitt gått gjennom i kapittel 2.

Konklusjoner fra undersøkelsene man har gjort blir fremsatt, og disse blir i tillegg vurdert kvalitetsmessig. Konklusjonen vil i tillegg føre frem til ytterligere informasjon som kan skape nye problemstillinger for fremtidig arbeid.

6.1 Diskusjon

Innledningsvis ble det tatt opp flere ulike spørsmål og problemstillinger, og målet var å kunne finne nok informasjon til å kunne besvare disse spørsmålene i mer eller mindre grad.

Når det gjelder Hookes lov har denne oppgaven blitt utført for å finne den ukjente E-modulen i formel (1). En forutsetning for å kunne bestemme E-modulen er at den oppnådde deformasjonen i forsøkene har holdt seg under proporsjonalitetsgrensen σ_p som er vist i figur 2-1. Om deformasjonen passerer proporsjonalitetsgrensen, og man ikke tar høyde for dette i utregningen av E-modulen, vil man få en feilaktig verdi av denne. Særlig ved testingen i case 1 er dette en større risiko, da som kjent plastmaterialer kan oppleve en stor plastisk deformasjon i forhold til andre materialer ved romtemperatur. Allikevel tydet mye på at proporsjonalitetsgrensen til plastrørene ikke ble passert, og det ble ikke observert noen varig deformasjon av plastrørene med tanke på at testingen av case 2 og case 3 ble gjennomført i ettertid, uten noen synlige fysiske endringer på rørene. Den ytre diameteren ble i tillegg målt når lasten var fjernet etter hvert forsøk, uten at man så noen endring i denne. Den påførte lasten var heller ikke så stor ved case 1 at man kunne forvente noe flyt i plastmaterialene.

Det er antatt her at oppførselen til plastmaterialene testet i denne oppgaven i case 2 og case 3 følger en kurve i et spennings-tøyningsdiagram som har en kort og brå stigning, før materialet hadde gått til brudd ved for høy spenning. I case 3 vil denne kurven være enda brattere enn i case 2, grunnet lavere temperatur som fører til høyere sprøhet og større stivhet til materialet, som igjen fører til lavere deformasjon ved høyere spenning. I case 1 ville materialene ved ytterligere påført last og lengre tid med større sikkerhet oppført seg som både et viskoplastisk og et viskoelastisk materiale. Det er grunn til å tro at hvis tiden ved påføringene av last i case 1 hadde vært lenger, altså at tøyningshastigheten hadde vært lavere, ville E-modulen til rørene vært lavere ved denne temperaturen, siden korttids E-modul stort sett er høyere enn langtids E-modul ved romtemperatur. Men for å bedre kunne sammenlikne E-modulen ved alle tre casene ble tøyningshastigheten holdt relativt konstant, og den viskøse oppførselen som plastmaterialer vanligvis utviser ved romtemperaturer ble forsøkt minimert i størst mulig grad. Dette har også sammenheng med standarden brukt til å regne ut ringstivheten, hvor E-modulen som blir brukt til å regne ut ringstivheten i formel 7 skulle oppgis i korttids E-modul, noe som utelukker den viskøse oppførselen.

Et av problemene ved nedfrysing av rørene i frysekammer og testing utenfor er hvordan materialene ganske hurtig vil varmes opp når forskjellen mellom temperaturen til objektet og omgivelsene er såpass stor. Sannsynligheten er stor for at den reelle temperaturen til rørene

ved testtidspunktet er noen grader høyere enn hva som i denne oppgaven er oppgitt som temperatur. I utgangspunktet skulle case 2 bli gjennomført i et fryserom hvor man kunne foreta alle målingene i den aktuelle temperaturen på $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, men dessverre ble det planlagte fryserommet ødelagt like før testingen skulle foregå. Dette gjorde at også her måtte frysekammerne benyttes, med tilhørende større usikkerhet knyttet til den faktiske temperaturen på rørene ved målingene.

Forskjellen i temperaturendringen vil også være innad mellom rørene, siden visse materialer holder bedre på kulde enn andre. Som beskrevet i kapittel 2.3 er varmeoverføringsraten vanskelig å bestemme, da det er mange faktorer som har en innvirkning. Men man ser at de ulike polymerene har forskjellig termisk konduktivitet, noe som blant annet påvirker de ulike rørenes grad av varmeoverføring ved testingen. Jo lavere den termiske konduktiviteten er, jo bedre isolatorer er de, og holder bedre på kulden. Man ser at særlig PE har høyere termisk konduktivitet enn PP og PVC, noe som kan antyde at førstnevnte vil ha en litt høyere temperatur ved testingen i case 2 og case 3 enn de to andre rørene, og i så måte føre til at stivheten til PE- og HDPE-rørene muligens blir underrapportert til en viss grad i case 2 og case 3.

Testen som her ble gjennomført var etter standarden EN ISO 9969:2007, og det den hovedsakelig tester er ringstivhet i termoplastrør. På grunn av omstendighetene med utstyr og kuldelaboratorier var dette den mest overkommelige måten å gjennomføre testingen ved lave temperaturer på. Andre tester for spenning og tøyning kunne ha blitt gjennomført, blant annet strekktesten hvor man ville fått en mer nøyaktig verdi på spenningen og deformasjonen. I dette tilfellet ville man i så fall måtte tatt enda større hensyn til den gradvise temperaturstigningen i rørene når de blir testet ved romtemperatur etter de var fryst ned, da utstyret forbundet med strekktestingen ikke tåler kulde eller lar seg flytte mye nærmere frysekammerne eller andre potensielle nedfrysingsmuligheter. Selve resultatene fra en slik test hadde nok blitt mer nøyaktig, men temperaturusikkerheten hadde blitt såpass utslagsgivende at det hadde gått på akkord med målsettingen til denne oppgaven.

En annen usikkerhet knyttet til målingen og standarden er deformasjonen man oppnår ved testingen. Ifølge standarden skal den være på 3 %, men tabell 20 viser at den oppnådde deformasjonen i de ulike forsøkene avviker litt fra det. Om utregningen av E-modulen blir påvirket i noen særlig grad av disse avvikene er vanskelig å si.

I den gjennomførte testen er det først og fremst ringstivhet som blir målt ved de praktiske forsøkene. Ringstivhet sier som sagt noe om et rørs motstandsevne mot deformasjon når det blir utsatt for jevnt utvendig trykk eller innvendig undertrykk. Avgjørende for ringstivheten er diameteren og veggtykkelsen, og av den grunn oppgis rør oftest med en SDR som er utvendig diameter delt på veggtykkelse. De testede rørene hadde varierende SDR, med HDPE-røret med høyeste SDR, og PVC-røret med laveste SDR. I utgangspunktet er det slik at jo høyere denne verdien er, jo lavere ringstivhet vil røret ha, noe man delvis ser av resultatene presentert i tabell 17. Ringstivheten sier derimot ikke så mye om materialet røret er laget av, og man kobler derfor ringstivheten med E-modulen gjennom formel 6. Her kommer treghetsmomentet og diameteren inn i bildet, slik at det blir materialets E-modul som blir den avgjørende faktoren. Spørsmålet er også hvilken type E-modul man skal bruke/finne ut. På grunn av termoplast sine viskoelastiske egenskaper må man vurdere om det er korttids E-modulen eller langtids E-modulen/krypmodulen som skal brukes. I den fulgte standarden i denne oppgaven

er det korttids E-modulen som er brukt. Når man utfører beregninger av hvor mye plastrør tåler, eller når man angir en sikkerhetsfaktor for dimensjoneringen, velger man gjerne korttids E-modulene som er litt mer konservative verdier.

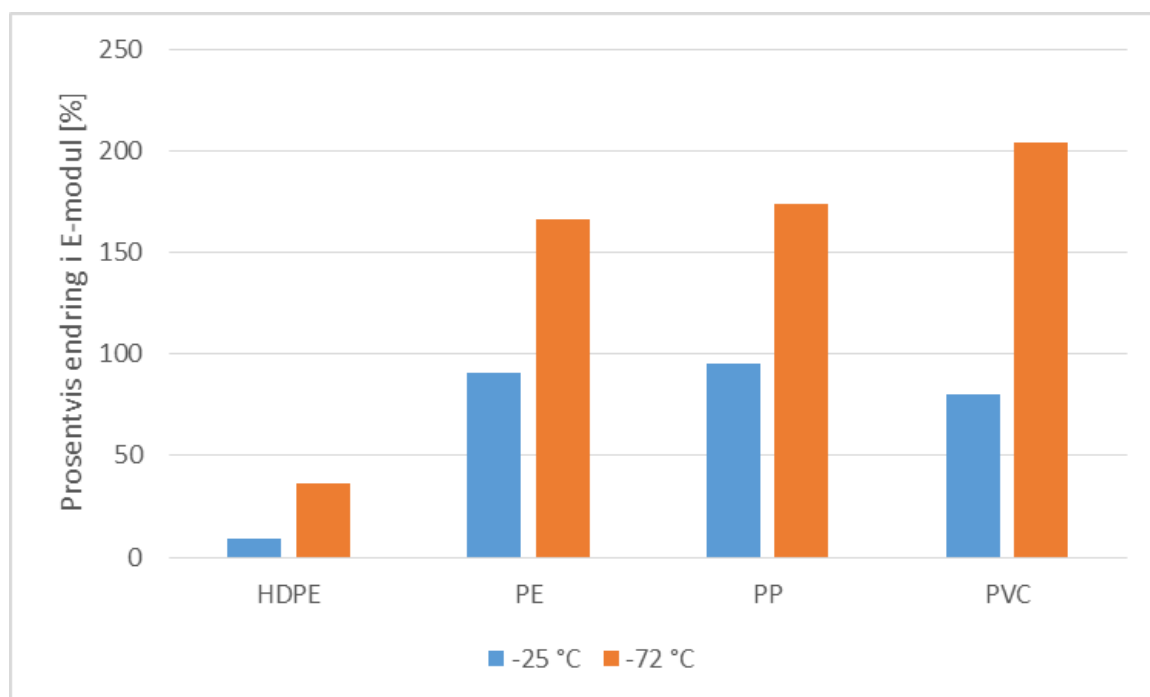
Krypmodulen er mye vanskeligere å finne eller avgjøre, da den avhenger i stor grad av faktorer som tid, temperatur og spenningens størrelse. For termoplast vil korttids E-modul være større enn krypmodulen ved romtemperatur, på grunn av de viskoelastiske egenskapene. Så ved case 1 ville den utregnede E-modulen vært lavere om røret hadde blitt utsatt for spenning over lengre tid, og plastrørene ville tålt mindre spenning over lenger tid enn hva man får inntrykk av ved å se på de utregnede E-modulene i case 1. I case 2 og 3 ville det vært større usikkerhet om krypmodulen ville vært særlig mye større enn korttids E-modulen, og om rørene ville tålt mindre spenning over lengre tid. Det man med mer sikkerhet kan vite er at slagseigheten til plastrørene ved case 2 og case 3 er lavere enn ved case 1.

Ser man på de oppgitte verdiene til E-modulen i tabellene for de ulike polymerene i kapittel 2.8, 2.9 og 2.10 ser man at de utregnede E-modulene i testingen av ringstivhet avviker litt fra disse. E-modulen til PP er i tabell 2 er oppgitt til å være 0,896 – 1,55 GPa, altså 896 – 1550 MPa. Ved testingen ble E-modulen til PP regnet ut i case 1 til å være 1345 MPa. E-modulen til PE i tabell 3 er oppgitt til å være 6,21 – 8,96 GPa, altså 6210 – 8960 MPa. Ved testingen ble E-modulen til HDPE regnet ut i case 1 til å være 2964 MPa, og PE 1057 MPa. E-modulen til PVC i tabell 4 er oppgitt til å være 2,14 – 4,14 GPa, altså 2140 – 4140 MPa. Ved testingen ble E-modulen til PVC regnet ut i case 1 til å være 1139 MPa. Som man ser er de utregnede E-modulene konsekvent litt høyere enn de som er oppgitt i tabellen, og det er som tidligere forklart grunn at det i forsøket ble regnet ut korttids E-modul, mens i tabeller blir langtids E-modulen oppgitt. Størst forskjell er det for HDPE- og PE-røret, noe som kan forklares med at PE har lavere resistans mot siging enn de to andre polymerene.

Oppbygningen av PE, PP og PVC har, som beskrevet i teoridelen, stor betydning for hvordan disse polymerene oppfører seg mekanisk, både ved romtemperatur og ved lave temperaturer. Man har sett at PE og PP er semi-krystallinske polymerer, mens PVC er et amorft polymer. Amorfe polymerer vil som beskrevet i kapittel 2.7.2 oppleve større deformasjon før brudd, og de vil fortare oppleve større endringer enn andre polymerer når temperaturen blir lavere, fordi det gjerne er de amorfe områdene som først blir påvirket av denne temperaturendringen.

Hvis man ser på glasstransisjonstemperaturene til de ulike polymerene ser man en forskjell mellom de semi-krystallinske polymerene PE og PP, og det amorfe polymeret PVC. Glasstransisjonstemperaturen til de to førstnevnte materialene er på under null grader, mens den for PVC er 80 plussgrader. Den sekundære glasstransisjonstemperaturen er henholdsvis -105 °C, -254 °C og -25 °C for de tre polymerene. Dette kan gi noe av forklaringen på E-modulendringen til de ulike plastrørene, hvor man i case 3 testet PVC-røret i en temperatur som var under dets sekundære glasstransisjonstemperatur, noe som førte til størst økning i E-modul. Man kan også til dels se denne sammenhengen mellom PE- og HDPE-rørene, hvor sistnevnte har en høyere tetthet og en høyere grad av krystallinitet som gjør at temperaturendringene vil påvirke egenskapene i mindre grad. Det var i HDPE-røret det ble registrert minst endring i E-modulen ved lavere temperaturer.

I figur 6-1 ser man den prosentvise endringen i E-modul i forhold til hva den var ved romtemperatur for de fire ulike termoplastrørene, som beskrevet i foregående avsnitt. Man legger hovedsakelig merke til den store forskjellen mellom HDPE-røret og de andre, noe som delvis blir forklart av figur 2-7 som viser at E-modul for en krystallinsk termoplast ikke endres i veldig stor grad så lenge temperaturen ikke nærmer seg smeltetemperaturen, i motsetning til amorfe termoplaster hvor E-modulen endres markant ved endringer i temperaturen rundt glasstransisjonstemperaturen. I så måte er resultatene for PE- og PP-rørene litt vanskeligere å forklare, med tanke på at de har lavere grad av krystallinitet enn HDPE-røret, men samtidig ikke er amorfe som PVC-røret.



Figur 6-1: Prosentvis endring i E-modul sammenliknet med romtemperatur

Som diskutert i foregående avsnitt har resultatene av testingen sammenfalt ganske godt med hva man på forhånd trodde om egenskapene og E-modulen til de ulike polymerene. Endringen i stivhet stemte godt overens med det som ble funnet i eksisterende litteratur, og det er således lett å konkludere med funnene som en fasit. Men det knytter seg stor usikkerhet til reliabiliteten til testgjennomføringen, særlig på grunn av at man ikke kan slå fast om målingene var statistisk signifikante eller ikke. Skulle testgjennomføringen vært mer pålitelig burde det vært gjennomført flere ulike målinger av plastrørene i samme lastsituasjon, slik at man med større sikkerhet kunne slått fast at resultatene ikke ble oppnådd ved en tilfeldighet. Mer nøyaktige testmetoder kunne også med fordel vært utviklet, men med det tilgjengelige utstyret og budsjettet lot det seg vanskelig gjennomføre. Allikevel kan man av det begrensede datamaterialet se tendenser, som at ringstivheten og E-modulen øker ved lavere temperaturer, og at de forskjellige polymerene opplever en ulik grad av endring som kan forklares ut ifra oppbygningen av molekylene og de forskjellige glasstransisjonstemperaturene.

6.2 Konklusjon

HDPE, PE, PP og PVC er alle polymerer som får endret sine egenskaper i takt med temperaturendring. Testing av nedfryste plastrør laget av nevnte materialer har vist hvordan ringstivheten og E-modulen til rørene øker ved synkende temperatur.

Eksisterende litteratur viser at polymerer nedkjølt til under glasstransisjonstemperaturen øker strekkfastheten dramatisk, i tillegg til at de reduserer deformasjonen før brudd i stor grad. Det har vist seg at E-modulen blir to til tre ganger høyere når temperaturen blir lav nok, selv om det er individuelle forskjeller mellom de ulike plastmaterialene og at det i tillegg kan avhenge av krystallinitetsgraden.

Forsøkene utført i denne oppgaven støttet disse funnene i eksisterende litteratur. En test av ringstivheten med standarden EN ISO 9969:2007 lagt til grunn ble gjennomført, og selv om det fantes flere feilkilder ble ønskede resultater av testingen oppnådd. Resultatene viste at ringstivheten til de fire testede plastrørene økte med fra 35 % for HDPE til over 300 % for PVC når temperaturen var $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rørene laget av PE og PP økte ringstivheten med 260-280 % ved denne temperaturen i forhold til ved romtemperatur.

Når det gjelder E-modulen økte den særlig når temperaturen var $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$ i forhold til romtemperatur, i større grad enn når temperaturen var $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. For HDPE-røret var økningen av E-modul på bare 9 % når temperaturen gikk fra $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ til $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, mens ved en ytterligere senkning av temperaturen økte E-modulen med 36 %. PVC-røret økte E-modulen med 80 % ved $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ i forhold til ved romtemperatur, mens økningen ved $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$ var 204 %. For PP- og PE-rørene var økningene i E-modul ved $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ henholdsvis 91 % og 95 %, og ved $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$ var økningene 166 % og 174 %. Dette stemte godt overens med hva som ble funnet i eksisterende litteratur, blant annet en studie av Kalia og Fu (2013) som viste at PVC økte E-modulen med ca. 300 % når temperaturen nærmet seg det absolutte nullpunktet.

Med tanke på det økonomiske perspektivet er det vanskelig å kunne predikere hvordan plastproduksjonsindustrien og prisene på plastprodukter vil utvikle seg i fremtiden. Man har oljeprisen og den generelle globale oljeutvinningene som er de mest avgjørende faktorene for den videre utviklingen i industrien, og akkurat dette er det vanskelig å spå noe om. Men man ser allikevel en tendens til at plastetterspørselen flater ut, og at det miljøvennlige aspektet blir fokusert på i større grad. Bioplast er en nisje som kan øke i større grad i fremtiden, både på grunn av miljøfokus og på grunn av en gradvis tømming av de fossile brenslene globalt.

6.3 Videre arbeid

Det er mye videre arbeid man kan gjøre på dette emnet, både i forbindelse med testing av plastmaterialer i kulde generelt, og særlig med tanke på testmetoden som er gjennomført i denne oppgaven. En mulighet er å se mer på den plastiske deformasjonen i plastmaterialene istedenfor hovedsakelig den elastiske, og ta større hensyn til graden av siging i de forskjellige

rørene. Særlig kunne man sett mer må hvordan den vertikale deformasjonen i plastrørene ved påført last hadde vært over lengre tid, både ved romtemperatur og ved temperaturer under null. Da kunne man i større grad fått vist forskjellene i siging ved forskjellige temperaturer, og hvordan materialene endrer seg når det gjelder duktilitet. Dette kunne blitt illustrert ytterligere i spennings-tøynings-diagrammer. Bruk av Maxwell- eller Kelvin-Voigt-modellene til å forklare mer kvalitativt de viskoelastiske egenskapene til polymerer og hvordan disse hadde blitt endret ved lavere temperaturer kunne vært et mulig videre arbeid.

Man kunne også målt endringen i deformasjonen ved en lineær endring i temperaturen. For eksempel hvordan deformasjonen endrer seg ved en konstant last når man gradvis senker temperaturen, og på samme måte sett endringen hvis plastrørene gradvis ble varmet opp fra fryst tilstand. Bruk av termometer for å måle den nøyaktige temperaturen til plastrørene kunne blitt innført, selv om det krever annet utstyr og/eller dataprogrammer.

Et mer aktuelt videre arbeid som bygger videre på denne oppgaven er å se på hvordan stivheten til rørene og deformasjonen hadde endret seg om temperaturen hadde gått opp og ned samtidig som de ble utsatt for kontinuerlig spenning. For eksempel først målt deformasjonen ved romtemperatur, så la lasten ligge på samtidig som temperaturen skrues ned til $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Deretter foreta en ny høydemåling ved denne temperaturen, før man til slutt varmer opp rørene til romtemperatur med den samme lasten, og igjen måler deformasjonen.

Bruk av nøyaktige digitale målinger av deformasjonen ved endring av påført last samtidig som det blir laget grafer, slik som apparatet som brukes ved strekktesten forklart i kapittel 2.5 gjør, hadde gitt mer nøyaktige sammenhenger mellom temperaturforskjellene. Dette krever derimot utstyr som enten må kunne tåle kulde eller som kan plasseres like ved fryserom eller frysekammere.

I formelen for ringstivhet er det en deformasjon på 3 % for innsiden av plastrøret man skal oppnå, men både den ytre diameteren og veggtykkelsen endrer seg når temperaturen synker. En måte å måle disse endringene mer nøyaktig slik at man kunne oppnå en mer presis nødvendig kraft hadde også vært en mulighet å se mer videre på.

Bruddtesting er et område man kan fokusere videre på, og som er særlig relevant med tanke på den virkelige bruken til plastrør. Man ønsker gjerne å undersøke hvor mye last plastrørene kan bli påført før de går til brudd, og videre ut ifra dette anslå riktige sikkerhetsfaktorer. Slagseigheten er en egenskap man vet at gradvis blir lavere ved synkende temperaturer, og det er ofte dette som er avgjørende for at plastmaterialer ikke blir brukt i kalde miljøer i større grad enn det blir. På grunn av den begrensede tilgangen til rør i denne oppgaven ble det vanskelig å sammenlikne bruddstyrken til plastrørene ved ulike temperaturer, og i tillegg måtte testutstyret ha vært litt annerledes for å undersøke dette mer i detalj. Det er allikevel absolutt noe som burde ses nærmere på i et potensielt videre arbeid.

Materialer generelt blir som tidligere beskrevet mer sprø og får større risiko for sprøbrudd når temperaturen blir lav. Callister, W. D og Rethwisch (2011) hevdet at et materiale blir definert som sprøtt når deformasjonen før brudd er maksimum 5 %. Om de testede rørene hadde blitt kvalifisert som sprø ved påføring av ytterligere last hadde vært interessant å se videre på, da det i denne testen bare ble oppnådd en deformasjon på ca. 3 % ved $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Denne oppgaven har i tillegg fokusert mest på selve de mekaniske egenskapene til materialene, uten å gå noe spesielt inn på hva som skjer inni selve materialet. Den kjemiske sammensetningen til materialer er den som endres og avgjør hvordan og hvorfor materialene oppfører seg slik de gjør. Hvordan for eksempel atomene og bindingene endrer når temperaturen synker hadde vært meget interessant å se videre på, men faller langt utenfor rammene til denne oppgaven.

7 Litteraturreferanser

- [1] Meland, Thor (1988). *Plastmaterialer – oppbygging og egenskaper og bearbeiding*. 2. utg. Universitetsforlaget
- [2] Construction Week Online. URL:
<http://www.constructionweekonline.com/pictures/Radius-Systems-Pipes.jpg>
Nedlastet 17.04.16
- [3] Andersen, J., Herø, E., Reiersen, K. & Solheim, O. 2008. *Produksjonsteknikk*. Oslo: Gyldendal Norsk Forlag AS
- [4] Dowling, N. E. 2013. *Mechanical behavior of materials : engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. Pearson Education Limited.
- [5] Ore, Sven. 2009, 15. *Viskoelastisitet*. I Store norske leksikon. URL:
<https://snl.no/viskoelastisitet>
Nedlastet 23.03.16
- [6] ReserchGate. URL:
https://www.researchgate.net/post/What_is_the_different_between_instantaneous_and_equilibrium_modulus
Nedlastet 04.04.16
- [7] Tipler, P. A. Mosca, G. 2008. *Physics for scientists and engineers*, 6. utg. W. H. Freeman and Company
- [8] UBC Mathematics Department – University of British Columbia. URL:
<http://www.ugrad.math.ubc.ca/coursedoc/math100/notes/diffeqs/cool.html>
Nedlastet 15.03.16
- [9] Teknisk Ukeblad. *Slik skal forskerne lage materialer som tåler kulden i Arktis*. URL:
<http://www.tu.no/artikler/slik-skal-forskerne-lage-materialer-som-taler-kulden-i-arktis/223734>
Nedlastet 27.02.16
- [10] Standard.no: *Statoil: Sprøtt stål ved 60 minus*. URL:
<https://www.standard.no/standardisering/suksesshistorier/suksesshistorie-statoil/>
Nedlastet 26.03.16
- [11] Pipelife Norge AS. 2007. *Rørhåndboka*. URL:
http://www.initio.no/filer/pipelife/Dokumenter/Rorhand_alle_KAP.pdf
Nedlastet 05.04.16
- [12] Callister, W. D. Rethwisch, D. G. 2011. *Material Science and Engineering*. 9. utg. s. 225. John Wiley & Sons Pte Ltd
- [13] Callister, W. D. Rethwisch, D. G. 2011. *Material Science and Engineering*. 9. utg. s. 210-214. John Wiley & Sons Pte Ltd
- [14] Thermoplastics pipes - Determination of ring stiffness (EN ISO 9969:2007)

- [15] Saint-Gobain – Vann og avløp. Produktinformasjon Ringstivheter S_R . RI.19
- [16] Civil and Environmental Engineering – University of California, Berkeley. URL: http://www.ce.berkeley.edu/~paulmont/CE60New/review_final.pdf
Nedlastet 03.04.16
- [17] Zero (2007). *Bioplast*. URL: <http://www.zero.no/publikasjoner/Bioplast%20SKJERM.pdf>
Nedlastet 08.03.16
- [18] Callister, W. D. Rethwisch, D. G. 2011. *Material Science and Engineering*. 9. utg. s. 121-133. John Wiley & Sons Pte Ltd
- [19] Østen, Torgrim. 2012. *Validering av materialmodell for polyvinylklorid (PVC)*. Master's Thesis. NTNU - Norwegian University of Science and Technology.
- [20] Vasile, C. Pascu. M. 2005. *Practical Guide to Polyethylene*. s. 5. Rapra Technology Limited.:
- [21] Kjetil Vange. 2012. *Validation of material model for polypropylene (PP)*. Master's thesis, NTNU - Norwegian University of Science and Technology.
- [22] Kazuli: University of Waterloo. 1999-2000. URL <http://www.kazuli.com/UW/4A/ME534/lexan2.htm>
Nedlastet 01.04.16
- [23] Brandrup, J. Immergut, E. H. Grulke, E. A. *Polymer Handbook*. 4. utg. John Wiley & Sons Inc.
- [24] Granta – Material Intelligence. 2015. *CES EduPack*
- [25] Brydson. J. A. 1999. *Plastics Materials*
- [26] Kalia S. og Fu. S. Y (2013). *Polymers at Cryogenic Temperatures*. Springer
- [27] Lorentzen, Gustav. (2009). *Kryogenikk*. I Store norske leksikon. URL: <https://snl.no/kryogenikk>
Nedlastet 29.04.16
- [28] Vink Norway AS. URL: <http://www.vink.no/nb-NO/OM-VINK.aspx>
Nedlastet 17.04.16
- [29] Vink Norway AS. *Plastguiden*. URL: <http://www.vink.no/nb-NO/LAST-NED/Brosjyrer/Plastguiden.aspx>
Nedlastet 17.04.16
- [30] Naturvernforbundet. (2006). *Hva gjør vi med plasten?* URL: http://naturvernforbundet.no/getfile.php/Dokumenter/Rapporter%20og%20faktaark/2006%20og%202005/1_Hva_gjor_vi_med_plasten.pdf
Nedlastet 28.03.16

- [31] Kunnskapssenteret. *PESTEL-analyse*. URL: <http://kunnskapssenteret.com/pestel-analyse/>
Nedlastet 21.04.16
- [32] Statista. *Global Production og Plastics*. URL: <http://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>
Nedlastet 27.02.16
- [33] Plastforum. *Britisk plastindustri er mer usikker på fremtiden* (01.3.16). URL: <http://www.plastforum.no/default.asp?menu=8&id=6162>
Nedlastet 22.03.16
- [34] Plastforum. *Kompleks situasjon øker frykten for materialmangel* (14.04.15). URL: <http://www.plastforum.no/default.asp?menu=8&id=5952>
Nedlastet 22.03.16
- [35] Norges Miljøvernforbund. *Miljøgifter/avfall*. URL: <http://www.nmf.no/underside.aspx?pageId=133>
Nedlastet 03.04.16
- [36] Dagens Næringsliv. *Om 53 år og 4 måneder er verden tom for olje* (02.07.14). URL: <http://www.dn.no/nyheter/energi/2014/07/02/0648/Olje-og-gass/om-53-ar-og-4-maneder-er-verden-tom-for-olje>
Nedlastet 19.02.16
- [37] FN. *Dette er Paris-avtalen* (23.04.16). URL: <http://www.fn.no/Tema/Klima/Klimaforhandlinger/Dette-er-Paris-avtalen>
Nedlastet 25.04.16
- [38] ICIS. *After 11 months US PVC may be rebounding* (05.03.16). URL: <http://www.icis.com/resources/news/2016/03/05/9976339/after-11-months-us-pvc-may-be-rebounding/>
Nedlastet 22.04.16
- [39] ICIS. *Price forecast reports*. URL: <http://www.icis.com/chemicals/channel-info-about/price-forecast-reports/>
Nedlastet 22.04.16
- [40] ICIS. *Europe PP buyers and sellers relaxed in balanced market* (21.04.16). URL: <http://www.icis.com/resources/news/2016/04/21/9990251/europe-pp-buyers-and-sellers-relaxed-in-balanced-market/>
Nedlastet 22.04.16
- [41] Plasticnews. *Polypropylene prices rise in January, PE and PVC decline* (28.01.16). URL: <http://www.plasticsnews.com/article/20160128/NEWS/160129787/polypropylene-prices-rise-in-january-pe-and-pvc-decline>
Nedlastet 23.04.16
- [42] Plastemart. *Capacity utilization of PVC will improve after global economic growth in 2011* (29.10.10). URL: <http://www.plastemart.com/Plastic-Technical->

[Article.asp?LiteratureID=1519&Paper=capacity-utilization-of-pvc-will-improve-after-global-economic-growth-in-2011](http://www.svanemerket.no/miljo/ressursbruk/den-ikke-fornybare-plasten/)

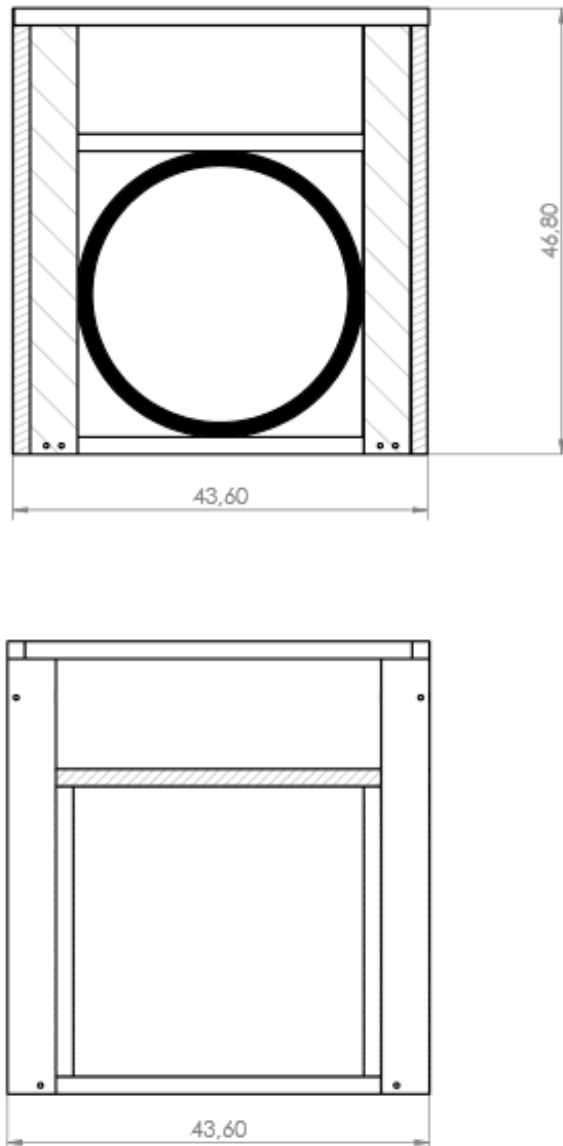
Nedlastet 23.04.16

- [43] Svanemerket. *Den ikke-fornybare plasten* (26.05.12). URL:
<http://www.svanemerket.no/miljo/ressursbruk/den-ikke-fornybare-plasten/>
Nedlastet 02.05.16

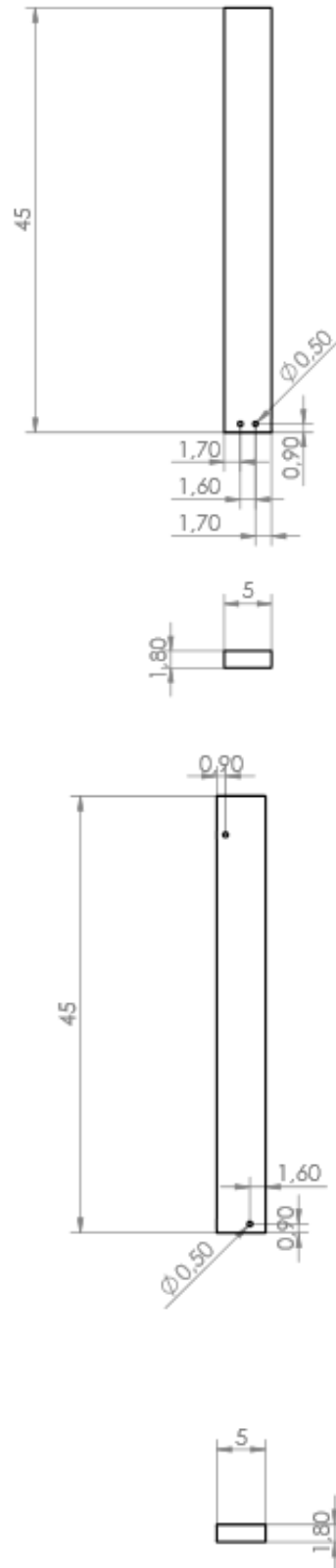
8 Vedlegg

Vedlegg 1

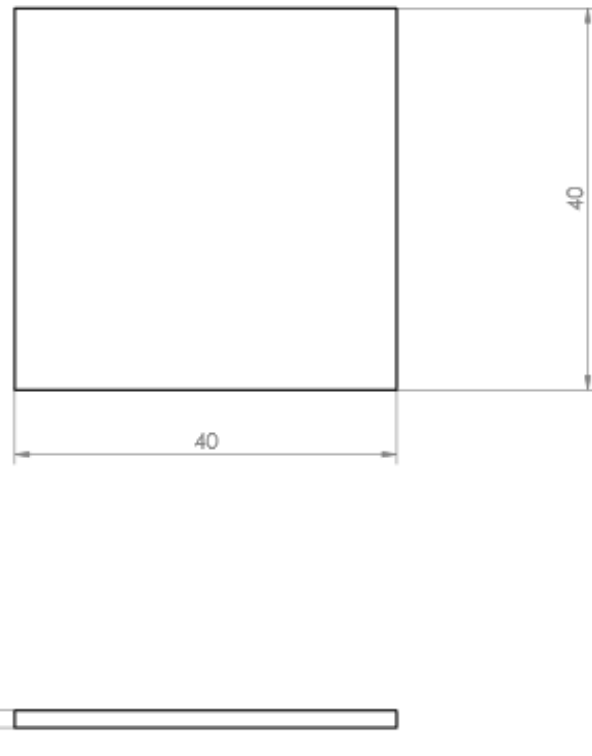
Målsatte skisser av testutstyr:



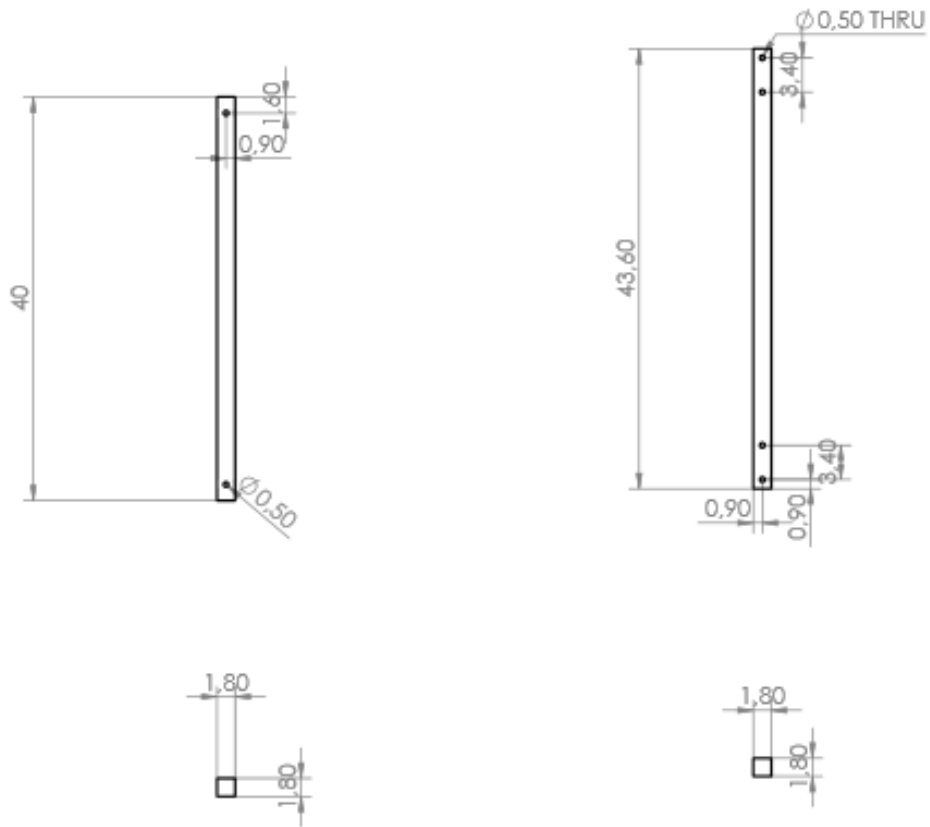
Figur 8-1: Testutstyr sett forfra og fra siden



Figur 8-2: Vertikale støtter på testutstyret



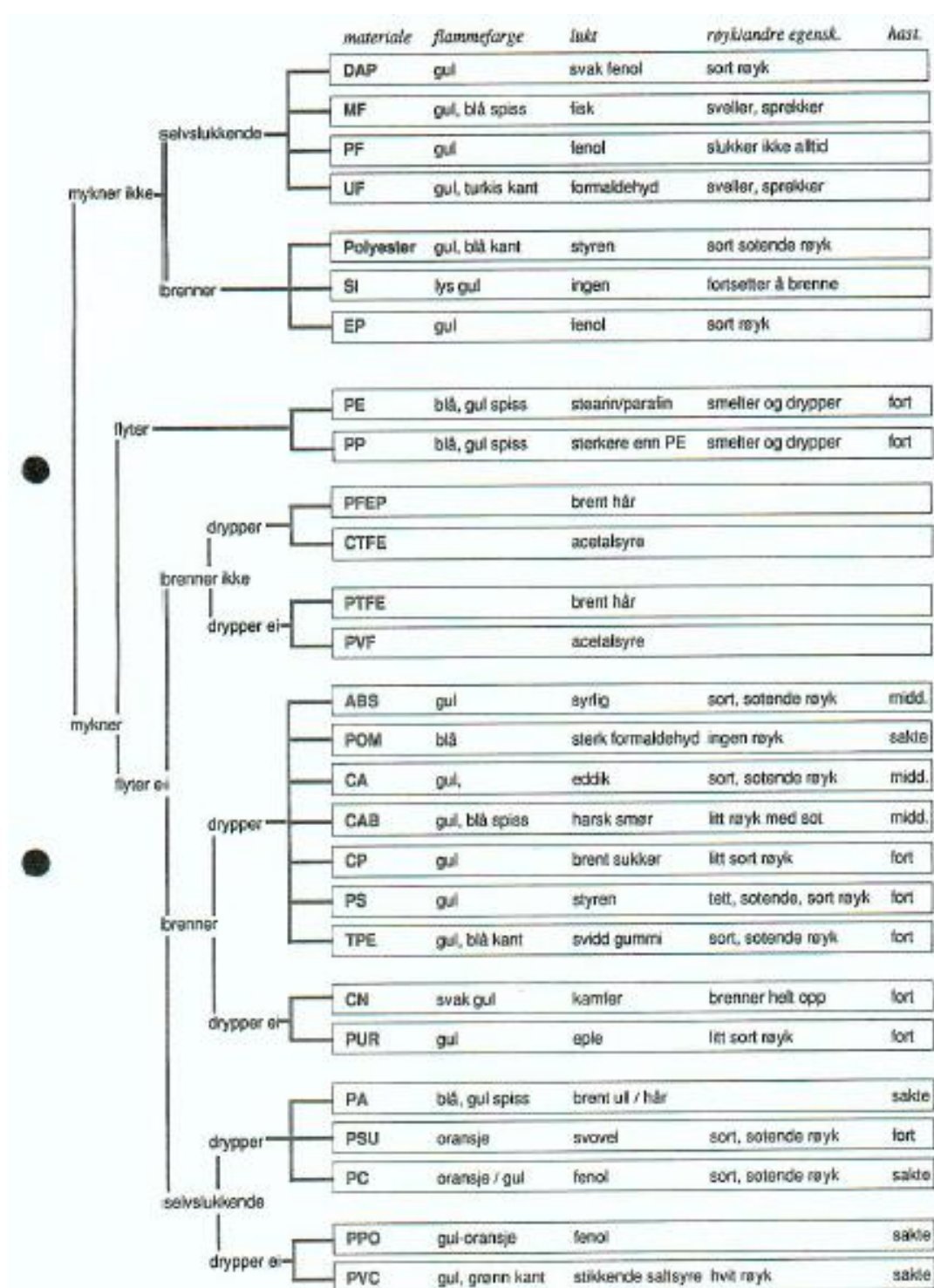
Figur 8-3: Horisontale plater i bunnen og til lastpåføring



Figur 8-4: Horisontale støtter på testutstyret

Vedlegg 2

Skjema for bestemmelse av plastmateriale





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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway