

## Trykkskjøt i limtre

*En undersøkelse av hvordan trykkapasiteten  
reduseres ved å innføre en skjevhetvinkel*

Steinar Halvorsen Berg  
Rune Iversen  
Kristian Heim Råum  
Gunstein Skomedal

Bachelor i ingeniørfag - bygg  
Innlevert: Mai 2018  
Veileder: Leif Erik Storm

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for vareproduksjon og byggingsteknikk

Oppgavens tittel:  <b>Trykkskjøt i limtre</b>  <i>En undersøkelse av hvordan trykkapasiteten reduseres ved å innføre en skjevhetvinkel</i>	Dato: [16.05.18] Antall sider: [60] Sider vedlegg: [30]		
	Masteroppgave:		Bacheloroppgave: X
Navn: Steinar Halvorsen Berg, Rune Iversen, Kristian Heim Råum og Gunstein Skomedal			
Veileder: Leif Erik Storm			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/ veiledere: Johannes Veie i Statens Vegvesen			

Denne rapporten har som hensikt å undersøke hvordan trykkapasiteten i en trykkskjøt av limtre, reduseres ved å innføre en skjevhetvinkel. Formålet med rapporten er å gi oppdragsgiveren Statens vegvesen en indikasjon på toleransekrav til denne vinkelen. Undersøkelsen tar for seg en løsning hvor trykket tas direkte mellom komponentene i skjøten, uten bruk av bindemidler som akrylmørtel.

Metoden som er benyttet i rapporten er en kombinasjon av laboratorieforsøk og FEM-analyse. Resultatene innhentet fra forsøket ble benyttet til å danne en teoretisk FEM-modell.

På bakgrunn av våre funn, konkluderes det med at en skjevhetvinkel opp til og med 1,0 grader kan anses som akseptabelt. Det ble observert en tilnærmet lineær sammenheng mellom en økende skjevhetvinkel og reduksjon i trykkapasitet.

#### Stikkord:

Trykkapasitet
Skjevhetvinkel
FEM-analyse
Skjøt
Limtre

Title:  <b>Pressure joint in glue laminated timber</b>  <i>An investigation of how the compressive capacity is reduced, by introducing an angle of inclination.</i>	Date: [16.05.18] Pages: [60] Appendices pages: [30]		
	Master thesis:		Bachelor thesis
Participants: Steinar Halvorsen Berg, Rune Iversen, Kristian Heim Råum and Gunstein Skomedal			
Supervisor: Leif Erik Storm			
External supervisor / employer: Johannes Veie from the Norwegian Public Roads Administration			

This report aims to investigate how the compressive capacity of a pressure joint in glulam, is reduced by introducing an angle of inclination. The purpose of the report is to give the employer the Norwegian Public Roads Administration, an indication of tolerance requirements for this angle. The study addresses a solution where the pressure is taken directly between the components in the joint, without the use of binding agents such as acrylic mortar.

The method used in the thesis is a combination of laboratory experiments and FEM analysis. The results obtained from the experiments were used to form a theoretical FEM-model.

Based on our findings, it is concluded that an angle of inclination up to and including 1,0 degrees can be considered acceptable. An approximately linear correlation was observed between an increasing inclination angle and reduction in compressive capacity.

**Keywords:**

Compressive capacity
Angle of inclination
FEM-analysis
Joint
Glulam

# Forord

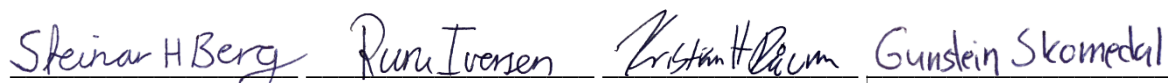
Denne bacheloroppgaven er skrevet som avsluttende oppgave ved studieretningen ingeniørfag bygg, konstruksjonsteknikk ved NTNU i Gjøvik.

Bruken av tre som byggemateriale har økt betraktelig de siste årene, og det trengs stadig mer kompetanse på dette området. På bakgrunn av dette mener gruppen at denne oppgaven er både interessant og fremtidsrettet.

Vi ønsker å takke vår veileder ved NTNU i Gjøvik, Leif Erik Storm for god oppfølging og veiledning gjennom hele prosessen. Vi vil også rette en takk til Johannes Veie i Statens vegvesen som har vært oppdragsgiver og en god faglig veileder gjennom hele oppgaven. Videre vil vi takke Treteknisk institutt i Oslo som har gitt oss muligheten til å gjennomføre våre forsøk på en god måte. Vi vil takke Wiggo Berg ved Moelven Limtre AS med bistand til tilvirkningen av materialene som er benyttet i oppgaven. Til slutt vil vi rette en takk til Terje Bokalrud som har bidratt til det metodiske arbeidet og FEM-analyse, Marthin Landgraff for gode faglige diskusjoner og Bjørn Olav Hogstad for assistanse med det statistiske arbeidet.

Vi vil nevne at alle gruppe-medlemmene i denne oppgaven har bidratt likt med utformingen og gjennomførelse av oppgaven.

Gjøvik 16. mai 2018

  
Steinar Halvorsen Berg      Rune Iversen      Kristian Heim Råum      Gunstein Skomedal

# Figurliste

Figur 1.1 – Detaljtegning av skjøt. Gjengitt med tillatelse av Johannes Veie i SVV .....	3
Figur 2.1 – Prinsippskisse av nettverksbuebru .....	6
Figur 2.2 – Moment i buer med vertikale stag og skråstag (Bell, 2017, s 622). Figuren er gjengitt med tillatelse fra Bell .....	6
Figur 2.3 – Fagverksbru over Lågen – Foto: Rune Iversen .....	7
Figur 2.4 – Detaljtegning (Burkart, 2016). Gjengitt med tillatelse fra Hauke Burkart i SVV... ..	8
Figur 2.5 – Skjevhetvinkel med en vilkårlig vinkel $\alpha$ .....	9
Figur 2.6 – Stålplatens kontaktareal med eksentrisitet.....	9
Figur 2.7 – Element med nodeplassering .....	14
Figur 3.1 – Grafisk fremstilling av variabler som påvirker trykkapasiteten .....	16
Figur 3.2 – Dimensjoner av prøvestykke 0,0 grader .....	17
Figur 3.3 – Prøvestykke med skjevhetvinkel – Foto: Rune Iversen .....	19
Figur 3.4 – Bilde av testoppsett før testing – Foto: Rune Iversen.....	19
Figur 3.5 – Prøvestykke før testing .....	21
Figur 3.6 – Illustrasjon av brudd .....	22
Figur 3.7 – Elementstørrelse, kraftpåsetting og grensebetingelser .....	27
Figur 4.1 – Arbeidsdiagram 0,0 grader .....	29
Figur 4.2 – Arbeidsdiagram 0,5 grader .....	30
Figur 4.3 – Arbeidsdiagram 1,0 grader .....	31
Figur 4.4 – Arbeidsdiagram 1,5 grader .....	32
Figur 4.5 – Arbeidsdiagram 2,0 grader .....	33
Figur 4.6 – Arbeidsdiagram 2,5 grader .....	34
Figur 4.7 – Arbeidsdiagram 3,0 grader .....	35
Figur 4.8 – Arbeidsdiagram 3,5 grader .....	36
Figur 4.9 – Arbeidsdiagram 4,0 grader .....	37
Figur 4.10 – Fuktighetsinnhold .....	38
Figur 4.11 – Densitet .....	38
Figur 4.12 – Gjennomsnittlig trykkapasitet av de ulike skjevhetvinklene .....	39
Figur 4.13 – 5 %-fraktil av de ulike skjevhetvinklene.....	39
Figur 4.14 – Grafisk fremstilling av konfidensintervallet.....	40
Figur 5.1 – Beregning av middelvei .....	41
Figur 5.2 – Trykkspenning 0,0 grader .....	42
Figur 5.3 – Tverrstrekspenning 0,0 grader .....	43
Figur 5.4 – Skjærspenning 0,0 grader .....	44
Figur 5.5 – Kombinerte spenninger 0,0 grader .....	45
Figur 5.6 – Trykkspenninger ved 1,0 grader .....	46
Figur 5.7 – Tverrstrekspenninger ved 2,0 grader .....	48
Figur 5.8 – Skjærspenninger ved 3,0 grader .....	50
Figur 5.9 – Kombinerte spenninger ved 4,0 grader.....	51

# Tabelliste

Tabell 3.1 – Viser skjevhetvinklene som ble testet, samt antall prøvestykker .....	20
Tabell 3.2 – Materialelegenskapene til FEM-modellen .....	25
Tabell 4.1 – Trykkapasitet 0,0 grader .....	29
Tabell 4.2 – Statistiske data 0,0 grader .....	29
Tabell 4.3 – Trykkapasitet 0,5 grader .....	30
Tabell 4.4 – Statistiske data 0,5 grader .....	30
Tabell 4.5 – Trykkapasitet 1,0 grader .....	31
Tabell 4.6 – Statistiske data 1,0 grader .....	31
Tabell 4.7 – Trykkapasitet 1,5 grader .....	32
Tabell 4.8 – Statistiske data 1,5 grader .....	32
Tabell 4.9 – Trykkapasitet 2,0 grader .....	33
Tabell 4.10 – Statistiske data 2,0 grader .....	33
Tabell 4.11 – Trykkapasitet 2,5 grader .....	34
Tabell 4.12 – Statistiske data 2,5 grader .....	34
Tabell 4.13 – Trykkapasitet 3,0 grader .....	35
Tabell 4.14 – Statistiske data 3,0 grader .....	35
Tabell 4.15 – Trykkapasitet 3,5 grader .....	36
Tabell 4.16 – Statistiske data 3,5 grader .....	36
Tabell 4.17 – Trykkapasitet 4,0 grader .....	37
Tabell 4.18 – Statistiske data 4,0 grader .....	37
Tabell 4.19 – Konfidensintervall for de ulike skjevhetvinklene.....	40
Tabell 5.1 – Kritiske spenningsverdier ved 0,0 grader .....	42
Tabell 5.2 – Kritiske spenningsverdier ved 1,0 grader .....	46
Tabell 5.3 – Kritiske spenningsverdier ved 2,0 grader .....	47
Tabell 5.4 – Kritiske spenningsverdier ved 3,0 grader .....	49
Tabell 5.5 – Kritiske spenningsverdier ved 4,0 grader .....	50

# Innholdsfortegnelse

Forord .....	iv
Figurliste.....	v
Tabelliste .....	vi
Innholdsfortegnelse .....	vii
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn .....	1
1.2 Problemstilling.....	2
1.3 Begrensninger og forutsetninger .....	2
1.4 Definisjoner og forkortelser.....	4
1.5 Disposisjon .....	5
2 Teoretisk grunnlag.....	6
2.1 Noen bruksområder .....	6
2.1.1 Nettverksbuebru .....	6
2.1.2 Fagverksbru .....	7
2.2 Akrylmørtel .....	7
2.3 Variabler som påvirker trykkapasiteten.....	8
2.3.1 Skjevhetvinkel .....	8
2.3.2 Limtrekvalitet GL30c .....	10
2.3.3 Fuktighet.....	10
2.3.4 Densitet.....	11
2.4 Ulike spenningstilstander .....	11
2.4.1 Trykk parallelt med fiberretningen .....	11
2.4.2 Radielle spenninger .....	12
2.4.3 Skjær.....	12
2.4.4 Knekking .....	13
2.5 FEM-analyse.....	14
2.5.1 Basiselement.....	14
2.5.2 Elementstørrelse .....	15
3 Metode.....	16
3.1 Valg av variabler .....	16

3.2	Oppbygging av prøvestykker.....	17
3.2.1	Tilvirkning av prøvestykker.....	18
3.2.2	Lim som ble benyttet.....	18
3.3	Hva ble målt under forsøket.....	18
3.4	Hvordan forsøket ble utført.....	19
3.4.1	Bruddkriterier.....	21
3.4.2	Fuktighets- og densitetsmålinger.....	22
3.5	Statistiske beregninger.....	22
3.5.1	5 %-fraktil.....	22
3.5.2	Korrelasjon- og regresjonsanalyse.....	23
3.5.3	Konfidensintervall.....	24
3.6	FEM-analyse.....	25
3.6.1	Forutsetninger.....	26
3.6.2	Årsaken til forutsetningene.....	26
3.6.3	FEM-modellen.....	26
3.7	Feilkilder.....	27
4	Analyse og resultat fra laboratoriet.....	29
4.1	Trykkapasitet 0,0 grader.....	29
4.2	Trykkapasitet 0,5 grader.....	30
4.3	Trykkapasitet 1,0 grader.....	31
4.4	Trykkapasitet 1,5 grader.....	32
4.5	Trykkapasitet 2,0 grader.....	33
4.6	Trykkapasitet 2,5 grader.....	34
4.7	Trykkapasitet 3,0 grader.....	35
4.8	Trykkapasitet 3,5 grader.....	36
4.9	Trykkapasitet 4,0 grader.....	37
4.10	Fuktighets- og densitetsmålinger.....	38
4.10.1	Fuktighetsinnholdet.....	38
4.10.2	Densitet.....	38
4.11	Oppsummering av resultater.....	39
4.11.1	Gjennomsnittlig trykkapasitet.....	39
4.11.2	5 %-fraktil per serie.....	39
4.11.3	Konfidensintervall for de ulike skjehetsvinklene.....	40



5	Analyse og resultat av FEM-Analyse.....	41
5.1	Resultater 0,0 grader.....	42
5.2	Resultater 1,0 grader.....	46
5.3	Resultater 2,0 grader.....	47
5.4	Resultater 3,0 grader.....	49
5.5	Resultater 4,0 grader.....	50
6	Diskusjon og konklusjon.....	52
6.1	Diskusjon av metode og utførelse .....	52
6.2	Diskusjon av resultater .....	53
6.2.1	Innledning og låste variabler .....	53
6.2.2	Testserie 0,0 grader .....	53
6.2.3	Testserie 0,5- og 1,0 grader .....	54
6.2.4	Testserier over 1,0 grader.....	54
6.3	Konklusjon.....	55
6.4	Forslag til videre arbeid.....	55
7	Litteraturliste .....	57
	Vedlegg .....	60



# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

En økende trend er at det oppføres stadig flere bruer i limtre. Ifølge Bast og Tveter (2017) er noe av grunnen til dette, at myndighetene setter strengere krav til å dimensjonere mer bærekraftige konstruksjoner, for å minske karbonfotavtrykket. Dette bidrar til at nasjonale og globale klimamål kan oppnås. Trevirke er et fornybart materiale som binder klimagassen CO<sub>2</sub>, noe som gjør det til et foretrukket byggemateriale. Ved konstruering av bruer er det ofte store spenn som må dekkes, i den forbindelse er det vanlig å skjøte sammen flere komponenter for å danne ønsket spenn på brukonstruksjonen.

Ifølge sivilingeniør Harald Liven ved Moelven Limtre AS, har limtrekomponentene tidligere blitt behandlet manuelt, med mindre presisjon enn med Computer Numerical Control (CNC) maskiner. Ved manuell behandling og montering kan unøyaktigheter oppstå, noe som kan føre til at kontaktarealet i skjøten ikke blir tilfredsstillende. Dette har tidligere blitt løst med at det legges en fuge i skjøten, som støpes ut med en type akrylmørtel for å sikre kontakt mellom de to komponentene, og derav god trykkfordeling. Denne forbindelsen kombineres med slisseplater for å ta skjærkreftene, og dybler for å ta strekkreftene.

Statens vegvesen (SVV) ønsker å gå bort fra løsningen med akrylmørtel, da den har flere negative egenskaper. Blant annet kan en kombinasjon av forbindelsesmidler, ifølge Dyken, (2017) skape en kryptformasjon som gir omlagring av trykkrefter til dyblene i forbindelsen. Dette kan føre til at dyblene mister sin evne til å ta strekkrefter. Videre mener Dyken (2017) at akryl er ømfintlig mot sollys, og det ytterste laget vil kunne brytes ned over tid.

SVV mener moderne CNC maskiner kan kutte nøyaktig, slik at utstøpning av skjøten ikke lenger vil være nødvendig. Trykket kan dermed tas opp direkte, tre mot stålplate. SVV ønsker å avklare hvilke toleransekrav som bør stilles til kontaktarealet mellom stålplaten og trevirket, slik at trykkapasiteten til skjøten ikke reduseres. Rapporten vil på grunnlag av dette undersøke hvordan en skjevhetvinkel i skjøten, virker inn på skjøtens trykkapasitet.

## 1.2 Problemstilling

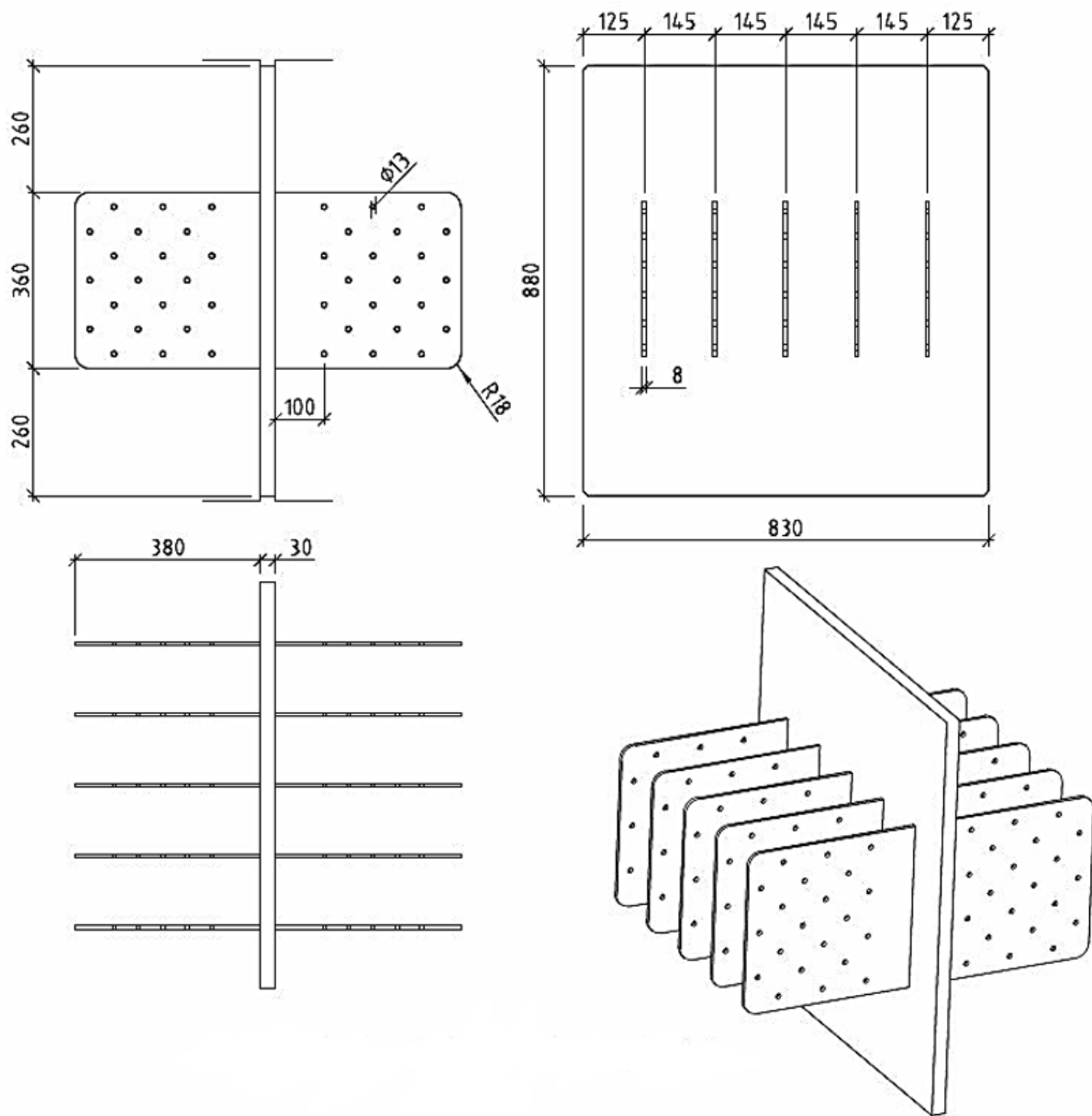
Etter samtale med seniorrådgiver Åge Holmestad ved Moelven limtre AS, har gruppen blitt opplyst om at moderne produksjonsutstyr tilvirker trevirket med en maksimal skjevhetvinkel på 0,1 grader. Det er fortsatt viktig for SVV å undersøke hva som skjer dersom vinkelen er større enn dette, fordi det kan oppstå unøyaktigheter ved blant annet montasje av bruen. På bakgrunn av dette tar rapporten utgangspunkt i følgende problemstilling:

*«Rapporten har som hensikt å undersøke hvordan trykkapasiteten i en trykkskjøt reduseres, ved å innføre en skjevhetvinkel, for deretter å komme med forslag til hvilke toleransekrav som bør stilles til denne vinkelen.»*

## 1.3 Begrensninger og forutsetninger

Det er mange ulike krefter som opptrer i en skjøt. Som oftest er det både skjær-, moment-, trykk- og strekkrefter skjøten blir dimensjonert for. Denne rapporten tar kun for seg hvordan de lokale trykkreftene påvirker skjøtens trykkapasitet, og ser ikke på det globale systemet. Vanligvis blir slisseplatene benyttet for å ta opp skjærkreftene, og dybler for å ta strekkreftene.

Rapporten undersøker situasjonen tre mot stålplate, og hvilken effekt en skjevhetvinkel har på trykkapasiteten til en slik type forbindelse. En detaljtegning av en slik forbindelse er vist i figur 1.1. Det undersøkes kun en side av forbindelsen. Det blir ikke tatt høyde for mulige situasjoner hvor det oppstår skjevhetvinkler på begge sider av skjøten.



Figur 1.1 – Detaljtegning av skjøt. Gjengitt med tillatelse av Johannes Veie i SVV

## 1.4 Definisjoner og forkortelser

<b>CNC</b>	Computer Numerical Control – Maskin som bruker informasjon fra datamaskiner til å utføre forskjellige oppgaver, som for eksempel kutting med vannskjærer, laserkutter eller enkel båndsag (Brauti, 2011).
<b>EK5</b>	NS-EN 1995 – Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner.
<b>FEM</b>	Finite Element Method.
<b>Node</b>	Sammenkoblingspunkt mellom elementene i en FEM-analyse.
<b>Singularitet</b>	Ett punkt hvor spenningene er uendelig høye, og ikke presentabelt for reell tolkning. Forekommer hvor det er elementer med større påkjenning, enn de virkelig er belastet for.
<b>Skjevheitsvinkel</b>	En uønsket unøyaktighet i limtrekomponenten i form av en vinkel større enn null grader.
<b>Slisseplater</b>	Plater som slisses inn i limtrekomponentene hovedsakelig for å ta skjærkrefter. Brukes ofte sammen med dybler i en skjõt.
<b>SVV</b>	Statens vegvesen.

## 1.5 Disposisjon

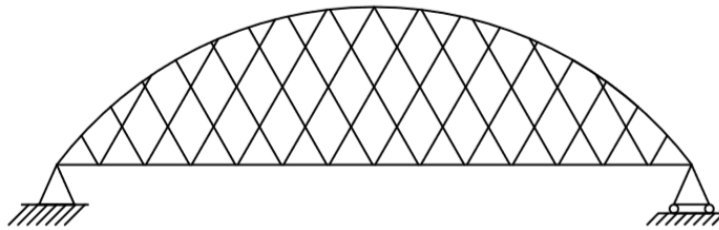
- Kapittel 2: Presenterer kort bruksområder, tar for seg teori knyttet til trykkapasiteten hos limtre, og forskjellige bruddtilstander som kan oppstå. Kapitlet tar også for seg grunnleggende teori om Finite Element Method (FEM)-analyse.
- Kapittel 3: Beskriver valg av undersøkelsesobjekter og en redegjørelse for metoden som er benyttet i rapporten. Beskriver også metoden for de statistiske beregningene.
- Kapittel 4: Grafisk presentasjon og analyse av resultatene fra tester utført i laboratoriet.
- Kapittel 5: Grafisk presentasjon og analyse av resultatene fra beregningene i FEM-analysen.
- Kapittel 6: Diskuterer metodevalg, utførelse, resultater, konklusjon og forslag til videre arbeid.

## 2 Teoretisk grunnlag

### 2.1 Noen bruksområder

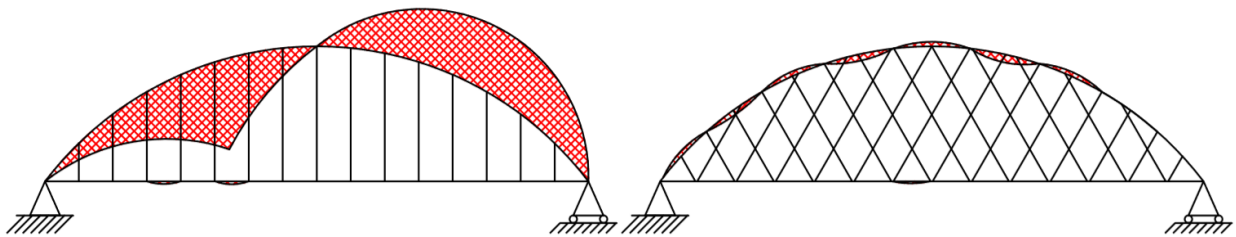
#### 2.1.1 Nettverksbuebru

En nettverksbuebru har skråstilte strekkstag, der de fleste hengestagene krysser hverandre minimum to ganger (Tveit, 2014), som illustrert i figur 2.1. Bruer av denne typen blir som oftest dimensjonert for aksialkrefter i stedet for moment, som er vanlig for løsninger med kun vertikale stag.



Figur 2.1 – Prinsippskisse av nettverksbuebru

Måten de skrå stagene er satt opp på, gjør at store skjevlaster opptas bedre, enn med den vertikale løsningen. Dette fører til at momentene blir betydelig redusert (Bell, 2017). Figur 2.2 illustrerer forskjellen i moment mellom en bue med vertikale strekkstag til venstre og skråstilte stag til høyre.



Figur 2.2 – Moment i buer med vertikale stag og skråstag (Bell, 2017, s 622). Figuren er gjengitt med tillatelse fra Bell



## 2.1.2 Fagverksbru

Fagverksbruer er satt sammen av staver i et trekantmønster slik at stavene får vekselvis trykk- og strekkrefter. Stavene i over- og undergurt er oftest parallelle med hverandre eller utformet som et parabelfagverk. Derfor blir fagverksbruene ofte kalt parallellfagverk eller parabelfagverk, etter gurtenes form (Øderud og Nordahl, 2017). Figur 2.3 viser en slik fagverksbru.



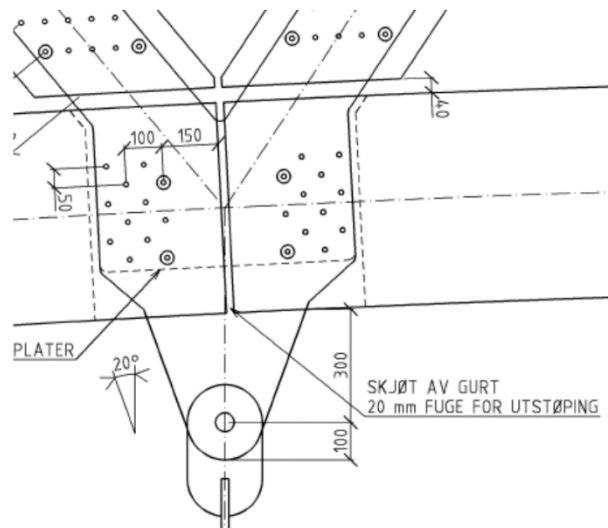
*Figur 2.3 – Fagverksbru over Lågen – Foto: Rune Iversen*

Noen av fordelene med fagverksbruer er at de gjør det mulig å bygge med større spennvidder, og med mindre tverrsnittdimensjoner, enn ved massive bjelkekonstruksjoner. Bæresystemet blir også mer materialøkonomisk på grunn av at stavene utnyttes på rent trykk eller strekk (Dyken, 2017). Skjøter i en fagverksbru med lange spenn er nødvendig og forekommer ofte flere steder i bruene. Det er som oftest stor trykkraft i overgurtene, sikring av trykkfordelingen i disse skjøtene er derfor viktig.

## 2.2 Akrylmørtel

Som nevnt innledningsvis, kan det ved manuell behandling av trevirket oppstå unøyaktigheter. Det har vært vanlig praksis å benytte en dybelforbindelse som tar egenvekten, kombinert med en spalte på 20-40 mm mellom komponentene. Denne spalten støpes ut med akrylmørtel, for å oppnå full trykkapasitet. Ved bruk av denne metoden jevnes eventuelle unøyaktigheter i skjøten ut. Det blir benyttet fugemasselister for å hindre at akrylmørtel trenger inn til slisseplatene. Årsaken til dette, er at dersom mørtelen kommer i kontakt med

dyblene, kan det føre til at de tar opp noe av trykkreftene. Dette er ikke ønskelig, da dyblenes primæroppgave er å ta opp strekkreftene. Denne egenskapen kan ifølge Dyken (2017) bli svekket dersom de blir påkjent av et stort trykk. I figur 2.4 vises en detaljtegning av en typisk forbindelse hvor akrylmørtel er støpt inn mellom komponentene.



Figur 2.4 – Detaljtegning (Burkart, 2016). Gjengitt med tillatelse fra Hauke Burkart i SVV

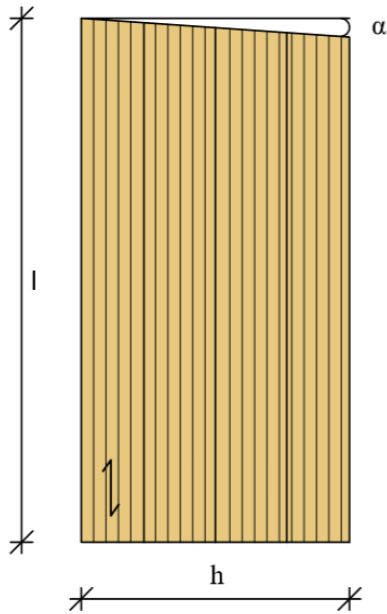
Bruken av akrylmørtel var mer vanlig før i tiden, da produksjonsutstyret ikke var like nøyaktig som med CNC maskiner. Dyken (2017) forklarer at trykkreftene prinsipielt kan overføres ved direkte kontakt. Dette setter imidlertid høye krav til nøyaktighet både ved tilvirkning og montering av komponentene. Løsningen med stålplate som vist i figur 1.1, er designet for å ta opp trykket direkte. I neste kapittel vil faktorene som virker inn på trykkapasiteten i en slik type forbindelse undersøkes nærmere.

## 2.3 Variabler som påvirker trykkapasiteten

### 2.3.1 Skjevheitsvinkel

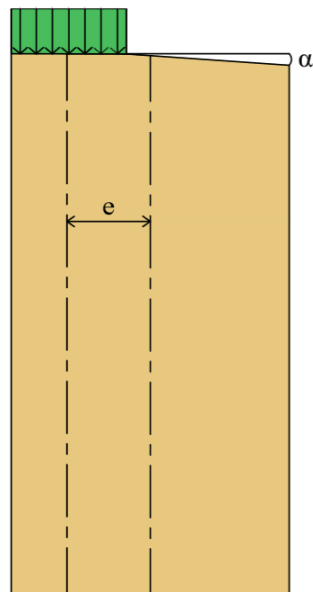
Siden problemstillingen i denne rapporten er å undersøke hvordan trykkapasiteten reduseres dersom skjevheitsvinkelen øker, er det essensielt å definere hva denne vinkelen er.

Skjevheitsvinkelen er definert som en vinkel  $\alpha$ , større enn null grader som vist i figur 2.5.



Figur 2.5 – Skjevhetsvinkel med en vilkårlig vinkel  $\alpha$

Ved å innføre skjevhetsvinkelen, vil stålplaten kontaktaareal variere. Dette er arealet stålplaten belaster ettersom trevirket gradvis knuses, som vist i figur 2.6. Dersom belastningen påføres gradvis vil dette kontaktaareal øke, og til slutt vil stålplaten få full kontakt med trevirket. Dette kontaktaareal kan skape problemer, i form av et eksentrisitetsmoment. Det påfølgende momentet gjør at faren for tverrstrekk blir forsterket, og blir nærmere forklart i kapittel 2.4.2.



Figur 2.6 – Stålplaten kontaktaareal med eksentrisitet

### 2.3.2 Limtrekvalitet GL30c

Ifølge Bell (2017) finnes det to typer limtrebjelker. Disse er betegnet henholdsvis som homogent- og kombinert limtre. Ved produksjon av homogent limtre, benyttes det lameller med samme kvalitet gjennom hele tverrsnittet og angis med forkortelsen GLxxh, hvor «xx» er bjelkens karakteristiske fasthet gitt i N/mm<sup>2</sup>.

Kombinert limtre er den andre typen limtrebjelke, og her brukes det forskjellig kvalitet igjennom tverrsnittet. Det vanligste er å benytte bedre kvalitet i de ytterste lamellene, enn i de indre (Bell, 2017). Denne typen limtrebjelker er angitt med forkortelsen GLxxc, og GL30c er medlem av nettopp denne gruppen.

En typisk oppbygging av et GL30c tverrsnitt kan være at det benyttes C30 i øvre og nedre sjettedel av høyden, mens det benyttes C24 i den resterende delen av tverrsnittet (Bell, Liven og Norske limtreprodusenters forening, 2015, s. 7). Påkjeningen er normalt størst ved de ytterste lamellene. Det blir derfor benyttet bedre kvalitet her.

### 2.3.3 Fuktighet

En av faktorene som spiller inn på trevirkets fysiske egenskaper, og derfor trykkapasiteten er fuktighet. Fukt blir målt i prosent, og er definert som forholdet mellom massen til det tørre trevirket og vannet. Dette forholdet er vist i formel 2.1, hvor  $m_0$  er massen til det tørre trevirket og  $m_\omega$  er massen til det fuktige trevirket (Bell, 2017, s. 51).

$$\omega = \frac{m_\omega - m_0}{m_0} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

Bell (2017, s. 77) forklarer videre at egenskapene til tre endres i liten grad når fuktigheten er under 12 %. Treets egenskaper endres betydelig frem til fibermetningspunktet, men relativt lite etter dette. Det har blitt gjort forsøk av små feilfrie prøver av gran, hvor resultatene viste hvordan fasthetene i de forskjellige retningene ble påvirket. Dette viste at det var en stor endring i fasthetene bare ved å se på fuktinnholdet. For hver prosent fuktinnholdet øker over tolv, reduseres strekkfastheten både på tvers av- og langs med fiberretningen omtrent 2,5 %. Når det gjelder trykkfastheten, endres denne på samme måte med omtrent 5 %, ved samme fuktøkning. Stivheten blir ikke påvirket i like stor grad. E-modulen i fiberretningen endres omtrent 1,5 %, ved samme økning i fuktinnhold.

### 2.3.4 Densitet

Densiteten er definert etter formel 2.2, og er en fysisk egenskap hos trevirke. Parameteren inngår i mange av de mekaniske egenskapene til treet, og er viktig for trykkapasiteten. Ifølge Bell (2017, s 63) øker trykkfastheten lineært med økende densitet. Densiteten til selve treet, altså celleveggene, er på omtrent  $1500 \text{ kg/m}^3$  i tørr tilstand. Det som reduserer densiteten til trevirke er hulrommene. Antall hulrom varierer og dermed varierer også densiteten fra tre til tre. Densiteten angis vanligvis for trevirke med 12 % fuktinnhold. Her påvirkes altså både massen og volumet av fuktinnholdet (SINTEF Byggforsk, 2015).

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (2.2)$$

## 2.4 Ulike spenningstilstander

I dette kapittelet blir de mest aktuelle spenningstilstandene forklart. Det blir også forklart hvordan NS-EN 1995 – Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner (EK5), håndterer de forskjellige tilstandene.

### 2.4.1 Trykk parallelt med fiberretningen

EK5 setter krav til hvor store de opptredende trykkspenningene kan være i forhold til trykkapasiteten, og formel 2.3 må være oppfylt. Denne baserer seg imidlertid på at elementet utsettes for spenninger i bare en av hovedaksenes retning, og at fiberretningen er parallell med elementets lengde (Standard Norge, 1995, s. 35).

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (2.3)$$

Her er venstre side opptredende trykkspenning og høyre side er dimensjonerende trykkapasitet. Den dimensjonerende trykkapasiteten bestemmes blant annet på grunnlag av trevirkets karakteristiske fastheter. Karakteristisk trykkfasthet for limtre av kvalitet GL30c er ifølge NS 14080, satt til  $24,5 \text{ N/mm}^2$  (Standard Norge, 2013, s.23).

## 2.4.2 Radielle spenninger

I buer eller krumme bjelker som er påkjent av et moment vil det ifølge Bell (2017) oppstå radielle spenninger. Dersom det oppredende momentet prøver å «rette ut» buen, vil det forekomme strekkspenninger på tvers av fibre, noe som er kritisk fordi trevirke har svært dårlige egenskaper på tvers av fibre. Dette kommer tydelig frem ved at den karakteristiske fastheten i denne retningen er kun  $0,5 \text{ N/mm}^2$ , for limtre av kvalitet GL30c (Standard Norge, 2013, s.23). Den dimensjonerende tverrstrekkspenningen i buer er definert i formel 2.4. Denne formelen er ifølge Bell (2017) basert på enkle likevektbetraktninger av et buelement.

$$\sigma_{t,90,d} = 1,5 \frac{M_d}{bhr_{mid}} \quad (2.4)$$

Ved dimensjonering av buer er det vanlig at skjær og moment opptrer i de samme snittene. Formel 2.4 viser at et oppredende moment bidrar til at det oppstår strekkspenninger på tvers av fiberretningen. Disse spenningene må tilfredsstille kravet fra EK5 som vist i formel 2.5 (Standard Norge, 1995, s. 45).

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} + \frac{\sigma_{t,90,d}}{k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d}} \leq 1 \quad (2.5)$$

## 2.4.3 Skjær

Skjær med en spenningskomponent i fiberretningen, skal ifølge EK5 oppfylle betingelsen i formel 2.6. I formelen er venstre side oppredende skjærspenning, mens høyre side er dimensjonerende skjærfasthet (Standard Norge, 1995).

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (2.6)$$

Standard Norge (1995) påpeker at det kan oppstå sprekker på langs av trevirket. Dette blir tatt høyde for med en  $k_{cr}$  faktor som reduserer bredden, slik at det kun er den effektive bredden som er igjen. For limtre er denne  $k_{cr}$  faktoren 0,8. Største skjærspenning i tverrsnittet beregnes etter formel 2.7, og gjelder for rektangulære tverrsnitt.

$$\tau_d = \frac{3V_d}{2b_{eff}h} \quad (2.7)$$

Ifølge Bell (2017) er skjærspenningenes parvise opptreden i ett gitt punkt lik i begge retninger. I tillegg må skjærspenningen variere parabolisk over høydeplanet, slik at den maksimale spenningen oppstår i nøytralaksen til bjelken. Det er i prinsippet to forskjellige måter hvordan skjærbrudd vil oppstå. Den ene er som avskjæring av fibre, og den andre som en forskyvning langs fibre.

Videre beskriver Bell (2017) at avskjæringsfastheten på tvers av fibre er større enn skjærfastheten langs fibre. Skjærbrudd vil derfor skje som et forskyvningsbrudd langs fibre. Ved forskyvningsbrudd beveger en del av bjelken seg, i forhold til en annen del. Ettersom skjærspenningen er størst ved nøytralaksen i høydeplanet, er det naturlig å anta at øvre del forskyver seg horisontalt i forhold til nedre del i tverrsnittet.

#### 2.4.4 Knekking

Knekking blir et spenningsproblem ved at det oppstår et moment i søylen, dersom det er formfeil i søylen og/eller eksentrisiteter i lastpåføringen. Ifølge Bell (2017, s 173) er det i den virkelige verden ikke mulig å oppdrive matematisk rette søyler. Det er også vanskelig å unngå eksentrisiteter i forbindelse med lastpåføringen. Formavvik på søylen og eksentrisiteter vil påføre søylen et moment. Dette vil føre til en større utbøying, som igjen fører til et større moment.

Den totale utbøyingen kan ifølge Bell (2017) deles opp i to bidrag. Det ene kommer fra formfeilen på søylen og blir ofte kalt  $\delta_0$ . For en søyle av limtre antas dette til å være  $L/500$  (Bell, Liven og Norske limtreprodusenters forening, 2015, s. 74). Det andre bidraget kommer fra tilleggsutbøyingen som lasten forårsaker, ofte betegnet som  $\delta_P$ . For å bestemme denne utbøyingen må det benyttes en ikkelineær beregning. Ifølge Bell (2017) baserer en ikkelineær beregning seg på, en ikkelineær sammenheng mellom kraft og forskyvning. For å løse problemer av denne typen kan såkalt 2. ordens teori benyttes for de fleste praktiske formål. Denne baserer seg på likevekt i deformert geometri og små forskyvninger. I formel 2.8 er det vist et eksempel på hva som menes med små forskyvninger, hvor  $\phi$  er oppgitt i radianer. Dersom det er snakk om store forskyvninger, må det benyttes en 3. ordens teori.

$$\phi \approx \tan \phi = \frac{\Delta}{L} \rightarrow \Delta = L\phi \quad (2.8)$$

EK5 baserer seg på statiske beregninger etter lineær teori, altså 1. ordens teori. På grunn av dette tas de ikkelineære effektene hensyn til ved å bruke såkalte «korreksjonsfaktorer» som er basert på doktorgradsarbeidet til Hans Blass (Bell, 2017, s. 173). Trykkfastheten reduseres ved å multiplisere den med disse faktorene. Til en komponent påkjent av kombinerte trykk- og bøyepenninger må kravene i formel 2.9 og formel 2.10 tilfredsstilles (Standard Norge, 1995, s. 41).

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0 \quad (2.9)$$

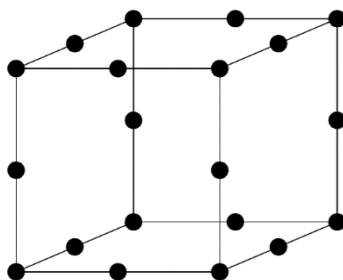
$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0 \quad (2.10)$$

## 2.5 FEM-analyse

Ansys Mechanical APDL har verktøyene til å utføre en god styrkeanalyse. Med dette programmet kan det simuleres både ytre og indre påkjenninger. Disse belastningene vises i form av spenningsbilder eller forskyvninger. Inne i programmet kan det hentes ut de aktuelle spenningsbildene som er av interesse (Ansys, 2018).

### 2.5.1 Basiselement

Hjelpesfunksjonen i Ansys Mechanical APDL (2018) forklarer at basiselementet SOLID 186 er et kubisk element med 20 noder. Dette elementet benyttes i 3-dimensjonale analyser, hvor nodene er plassert som i figur 2.7. Resultatet fra analysen gir både lokale spenninger og forskyvninger. Basiselementet har kun tre frihetsgrader. Det vil si at nodene alminnelig kun vil bli fastholdt mot translatoriske bevegelser, med mindre annet blir modellert.



Figur 2.7 – Element med nodeplassering



## **2.5.2 Elementstørrelse**

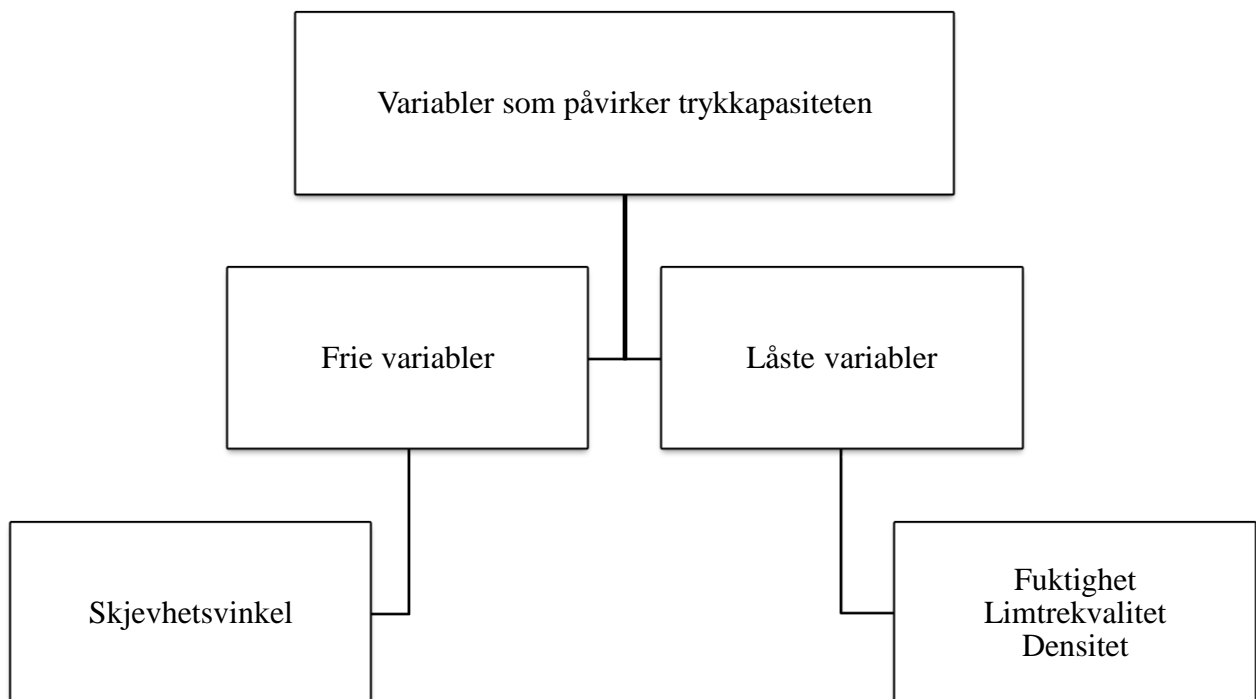
Oppførselen av hvert element mener Bell (2009) er definert av antall frihetsgrader i knutepunktene. Som nevnt i kapittel 2.5.1 er det tre slike frihetsgrader for dette basiselementet. Elementstørrelsen bestemmer avstanden mellom nodene. For å få en god analyse bør elementstørrelsen varieres i flere tilfeller, slik at den mest optimale blir benyttet i den endelige analysen. Ved bruk av store avstander mellom nodene, vil disse bli hardt belastet, slik at singulariteter lettere oppstår. Derfor er det viktig for analysen at riktig elementstørrelse blir benyttet.

# 3 Metode

Metodekapittelet vil ta for seg valget av metoden i rapporten. Formålet med kapittelet er å vise hva vi har gjort, og hvorfor vi har valgt denne metoden å belyse problemstillingen på. Det er viktig å påpeke at FEM-analysen og prøvestykkene fra laboratoriet, ikke kan direkte sammenliknes. FEM-analysens formål er å gi en indikasjon på hvor i prøvestykket de kritiske spenningene forekommer.

## 3.1 Valg av variabler

Det er spesielt fire variabler som skiller seg ut i vurderingen av hva som påvirker trykkapasiteten i limtrekomponenter, disse er vist i figur 3.1. De nevnte variablene er forklart i kapittel 2.3. Videre i rapporten undersøkes variabelen «skjevhetvinkel» nærmere.

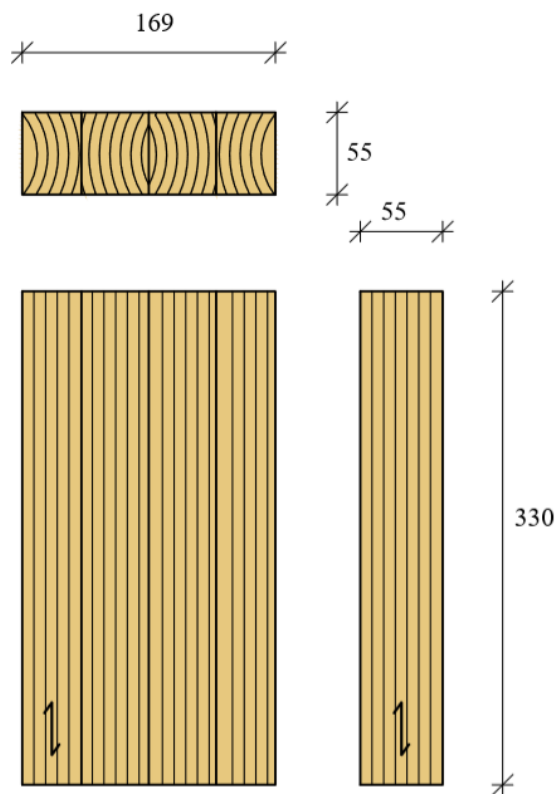


Figur 3.1 – Grafisk fremstilling av variabler som påvirker trykkapasiteten

Tre av de fire variablene ble forsøkt å holde så like som mulig, slik at de påvirket undersøkelsen av skjevhetvinkelen i minst mulig grad. Limtrekvaliteten ble satt til GL30c av gran, på alle forsøket og i FEM-analysen. Fuktighets- og densitetsmålingene vises i kapittel 4.10, og varierer generelt i svært liten grad. Skjevhetvinkelen er derfor den eneste frie variabelen.

## 3.2 Oppbygging av prøvestykker

Det ble benyttet såkalte «prøvestykker» i forsøket. Dette var mindre deler av en større limtrebjelke som ble kuttet i deler, for å danne grunnlaget for forsøket. På grunn av en begrensning i testmaskinen på 500 kN, var det behov for å tilvirke prøvestykkene deretter. Tverrsnittet på prøvestykkene ble gitt et høyde- og breddeforhold på 169 mm og 55 mm. Årsaken til dette valget var å få dannet prøvestykker som ble presset til brudd med den maskinen vi hadde tilgjengelig. Prøvestykker med dette arealet ville ved maksimal last gi en trykkspenning på  $53,79 \text{ N/mm}^2$ , ved et prøvestykke med 0,0 grader. Denne spenningen ble antatt å være høy nok til å gi et brudd basert på hva GL30c tåler parallelt med fibre, som vist i kapittel 2.4.1. Endelig valg av dimensjoner for prøvestykkene er vist i figur 3.2.



Figur 3.2 – Dimensjoner av prøvestykke 0,0 grader

Lengden på 330 mm ble valgt på bakgrunn av standardiserte krav i NS-EN 408. Standarden stiller krav til at lengden av prøvestykket skal være minst seks ganger større, enn den minste av bredden og høyden (Standard Norge, 2010, s.22).

### **3.2.1 Tilvirkning av prøvestykker**

Tilvirkning av prøvestykkene ble utført ved Moelven Limtre under kontrollerte forhold, dette for at dimensjonene skulle bli mest mulig korrekte. Bjelken som ble benyttet hadde et bredde-, høyde- og lengdeforhold på 136 mm, 180 mm og 5500 mm. Bjelken ble først splittet, slik at effektiv lengde på de nye bjelkene ble elleve meter. Deretter ble bjelkene høvlet til det ønskede tverrsnittet ble oppnådd. Anretningsutstyr ble benyttet for å holde prøvestykkene på plass under kuttingen. Det ble benyttet en kappsag for å tilvirke skjevhetvinkelen.

### **3.2.2 Lim som ble benyttet**

Limet som ble benyttet til å produsere limtrebjelken var av typen 1247 Melamin-Urea-Formaldehyd-lim. Limet blir benyttet for bærende trekonstruksjoner og skjøting, hvor det stilles høye krav til limlengde, limvann og værbestandighet. Limtypen oppfyller kravene i NS-EN 301 for limtype en og to innenfor klimaklasse 1, 2 og 3 (Standard Norge, 2017). For mer informasjon om limtype og herding, se vedlegg A.

## **3.3 Hva ble målt under forsøket**

Forsøket ble gjennomført ved Norsk Treteknisk institutt i Oslo. Et prøvestykke med skjevhetvinkel er vist i figur 3.3. Målet med å utføre forsøket var å anskaffe et godt datagrunnlag, for videre analyse av sammenhengen mellom trykkapasiteten og skjevhetvinkelen. Dataene som ble målt på laboratoriet er vist punktvis nedenfor:

- Kraft [kN]
- Tid [s]
- Forflytning av stålplaten [mm]
- Fuktighet [%]
- Densitet [ $\text{kg/m}^3$ ]



*Figur 3.3 – Prøvestykke med skjevhetvinkel – Foto: Rune Iversen*

### **3.4 Hvordan forsøket ble utført**

Forsøket ved Treteknisk ble gjennomført onsdag 7. mars 2018. Maskinen som ble benyttet var av type WOLP 500kN, NTI 3007, og er avbildet i figur 3.4. Utfyllende informasjon om maskinen finnes i vedlegg B.



*Figur 3.4 – Bilde av testoppsett før testing – Foto: Rune Iversen*

Skjevhetvinklene som ble innført på prøvestykkene er vist i tabell 3.1. Det ble tilvirket til sammen 32 prøvestykker. Av disse ble 27 benyttet under testingen, mens fem ble benyttet som såkalte «dummies». En dummy er et prøvestykke som ikke hadde de egenskapene som gruppen ønsket, og hadde som eneste formål å bekrefte at brudd var mulig for testene.

Tabell 3.1 – Viser skjevhetvinklene som ble testet, samt antall prøvestykker

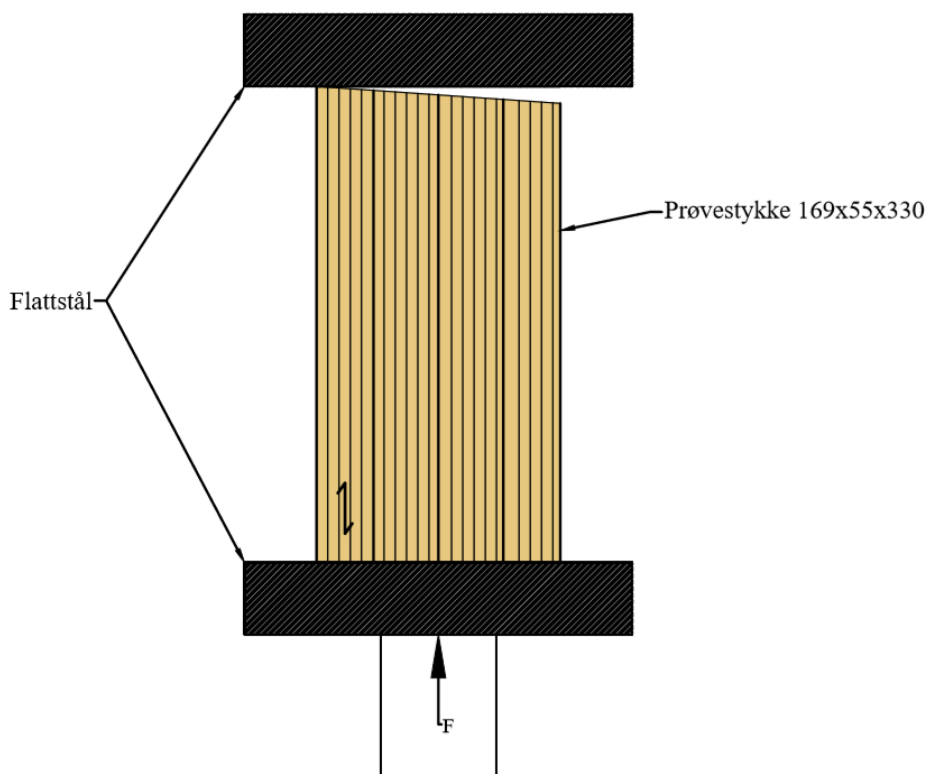
Skjevhetvinkel	Antall prøvestykker
0,0°	7
0,5°	3
1,0°	3
1,5°	3
2,0°	3
2,5°	3
3,0°	3
3,5°	4
4,0°	3

Testene ble gjennomført i serier på tre prøvestykker per skjevhetvinkel. Kraften ble påført med 100 kN/min, slik at maksimal kraft ble oppnådd etter  $360 \pm 120$  sekunder. Dette ble gjort for å tilfredsstille kravet i 15.2 i NS-EN 408 (Standard Norge, 2010, s.23).

Veiledning for bruk av maskinen ble gjort av ansatte ved Treteknisk for de fire første testene, deretter kunne gruppen hovedsakelig utføre testene selv, med bistand fra Treteknisk. Testene ble filmet for å gjøre det mulig å analysere testene i ettertid.

Selve testen ble utført ved at prøvestykkene ble presset sammen som vist i figur 3.5. Når alle testene var gjennomført ble Excel filer med data overlevert til gruppen fra Treteknisk.

Testforholdene hos Treteknisk har alltid relativ fuktighet 65 % og en temperatur på 20 ° C, noe som er ideelle testforhold i henhold til standard NS-EN 408 (Standard Norge, 2010, s. 8).



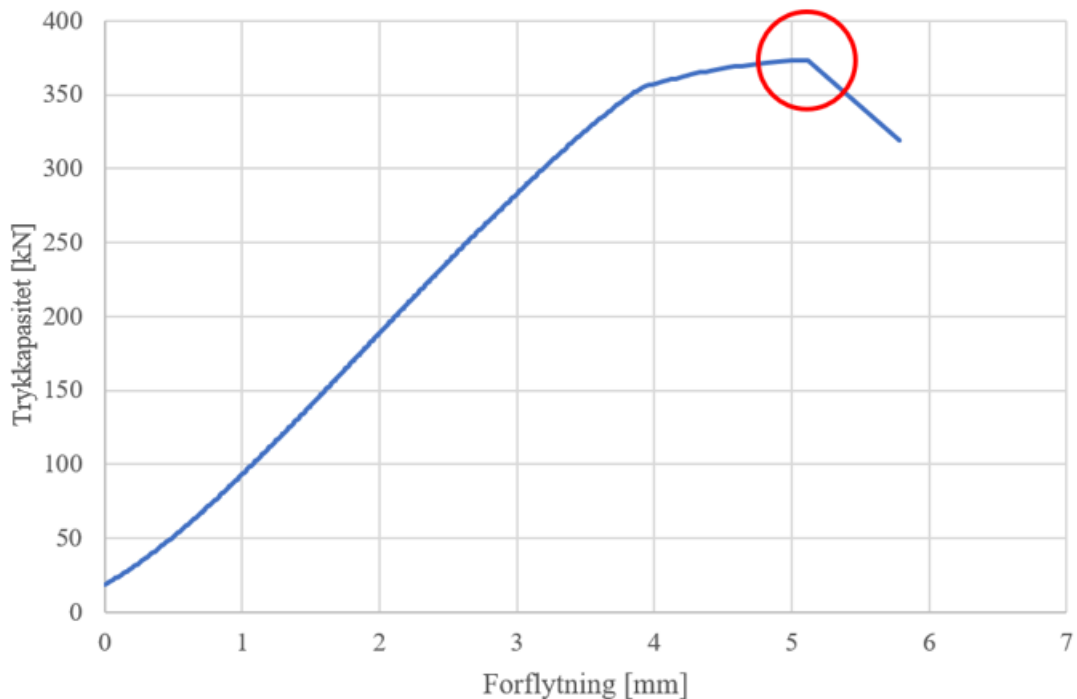
Figur 3.5 – Prøvestykke før testing

### 3.4.1 Bruddkriterier

For å analysere når brudd oppstod, var det viktig å definere hva som ble tolket som brudd. Brudd ble definert som øyeblikket prøvestykket ga fullstendig etter, og ikke hadde noen bæreevne igjen. Det vil si at alle mindre brudd og sprekker ble sett på som forløpere til brudd. Hvert prøvestykkets trykkapasitet ble derfor målt til å være kraften ved endelig brudd.

Testmaskinen som ble benyttet krevde at det var kontakt mellom prøvestykket og stålplaten før testen kunne starte. På bakgrunn av dette ble det valgt å sette en konstant startkraft på 20 kN, for alle testene. Det vil si at forflytningen av stålplaten som er den horisontale akse i arbeidsdiagrammet, vist i figur 3.6, begynner ved denne kraften. Forflytning før dette ble ansett som justering av maskinen i forhold til kontakt med prøvestykket.

Arbeidsdiagrammene viser tydelig hvor bruddene oppstår. Det er hvor stålplaten forflytning øker drastisk, og den påførte kraften gir etter. Prøvestykkenes trykkapasitet ble angitt av denne kraften. En illustrasjon av hvordan et slikt brudd kan observeres er vist i figur 3.6.



Figur 3.6 – Illustrasjon av brudd

### 3.4.2 Fuktighets- og densitetsmålinger

De største restene som var igjen etter at prøvestykkene ble presset til brudd, ble veid og lagt i en tørkeovn. Dette for å måle fuktigheten til hvert enkelt prøvestykke. Tørkeovnen holdt en temperatur på 90-100 °C. Etter et døgn i tørkeovnen ble restene veid på nytt. Forskjellen i vekt viste fuktreduksjonen, som beregnet etter formel 2.1. Data fra fuktmålingene er vist i figur 4.10.

Det ble utført densitetsmålinger på samtlige tester bortsett fra de to første. Årsaken til dette var en misforståelse mellom gruppen og de ansatte på Treteknisk. Formel 2.2 ble benyttet for å beregne densiteten ved 12 % fuktighet, og resultatene fra målingene er vist i figur 4.11.

## 3.5 Statistiske beregninger

### 3.5.1 5 %-fraktil

Karakteriske verdier på kapasiteter blir som oftest beregnet ved hjelp av det såkalte 5 %-fraktilet. Gruppen ønsket å få en kritisk oppfatning av hvordan skjevhetvinkelen påvirker trykkapasiteten til skjøten. Ved hjelp av 5 %-fraktilet ble det beregnet kapasitetsverdier for de ulike skjevhetvinklene. Dette ble også gjort for å få et bedre grunnlag for diskusjon og analyse.



Beregningene baserer seg på NS-EN 14358, kapittel 3. Ifølge denne skal styrkeparametere antas som logaritmisk normalfordelt, med mindre dataene tydelig viser at de er normalfordelt (Standard Norge, 2016 s. 5). På bakgrunn av våre data, har vi ingen forutsetning for å hevde at dataene er noe annet enn logaritmisk normalfordelt. Vi velger derfor å følge standardens henvisning her.

Det logaritmiske gjennomsnittet ble beregnet etter formel 3.1 og standardavviket etter formel 3.2.  $m_1$ ,  $m_2$  og  $m_3$  antas å være uavhengige, der  $m_n$  er de tre testene i de ulike testseriene. 5 %-fraktilet ble bestemt etter formel 3.4, der  $k_s(n)$  er en faktor som tar hensyn til hvor mange tester det er per testserie (Standard Norge, 2016, s. 6). Denne hjelpestørrelsen blir beregnet med formel 3.3. Beregninger på prøvestykkene med 0,0 grader finnes i vedlegg C.

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln m_i \quad (3.1)$$

$$s_y = \max \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln m_i - \bar{y})^2}, 0,05 \right\} \quad (3.2)$$

$$k_s(n) = \frac{6,5n+6}{3,7n-3} \quad (3.3)$$

$$m_{k,\ln} = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) \quad (3.4)$$

### 3.5.2 Korrelasjon- og regresjonsanalyse

Korrelasjon er ifølge Løvås (2015, s 155) det gjensidige forhold mellom to variabler.

Korrelasjonskoeffisienten gir en verdi mellom -1 og 1. Absoluttverdien til denne forteller hvor sterk lineær sammenheng det er mellom de to variablene. Ved hjelp av formel 3.5 til 3.7 ble det utregnet hjelpestørrelser, for utregningen av den endelige korrelasjonen i formel 3.8. Korrelasjonen ble beregnet for gjennomsnittet og 5 %-fraktilet, hvor verdiene ble henholdsvis -0,87 og -0,86. Disse verdiene tilsier at det er en god lineær sammenheng mellom de to variablene: trykkapasitet og skjevhetvinkel. Det ble derfor valgt å illustrere denne sammenhengen med en lineær regresjonslinje. Beregning av korrelasjonen finnes i vedlegg D.

$$s_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.5)$$

$$s_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.6)$$

$$s_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (3.7)$$

$$r = \frac{s_{xy}}{\sqrt{s_{xx}} \sqrt{s_{yy}}} \quad (3.8)$$

Formen på regresjonslinjen er etter formel 3.9, der  $\alpha$  er en konstant som sier hvor regresjonslinjen krysser y-aksen. Stigningstallet  $\beta$  til funksjonen sier noe om trykkkapasiteten øker eller reduseres (Løvås, 2015).

$$y = \alpha + \beta x \quad (3.9)$$

Det ble benyttet minste kvadratisk metode for å finne stigningstallet  $\beta$ . Beregningen av  $\beta$  er vist i formel 3.10.

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.10)$$

Skjæringspunktet  $\alpha$  ble regnet ut etter formel 3.11, der  $\bar{y}$  og  $\bar{x}$  er gjennomsnittsverdien av hver enkelt av de ulike variablene. Til slutt ble verdien til  $\alpha$  satt inn i regresjonsfunksjonen i formel 3.9:

$$\alpha = \bar{y} - \beta \bar{x} \quad (3.11)$$

### 3.5.3 Konfidensintervall

Ifølge Løvås (2015) er et konfidensintervall et område på tallinjen som vil inneholde den ukjente parameteren med stor sikkerhet. Konfidensintervallet er basert på et punktestimat, som for eksempel et gjennomsnitt, og et konfidensnivå. Konfidensnivået forteller hvor sikkert

det er at den ukjente parameteren havner i konfidensintervallet. Konfidensintervallet gir en god indikasjon på hvordan flere testserier av samme type ville utspilt seg, og ble satt til 90%.

Metoden som er benyttet heter Cox metoden, og tar for seg beregning av konfidensintervall ved logaritmisk beregning (Olsson, 2005). Logaritmisk gjennomsnitt og standardavvik ble beregnet henholdsvis etter formel 3.1 og formel 3.2. Disse verdiene ble satt inn i formel 3.12, hvor  $z$  er  $\alpha/2$ -fraktilet til en standard normalfordeling. Konfidensintervallet ble beregnet som vist i tabell 4.19. Beregning av konfidensintervall for tilfellet med 0,0 grader finnes i vedlegg E.

$$\bar{Y} + \frac{s^2}{2} \pm z \sqrt{\frac{s^2}{n} + \frac{s^4}{2(n-1)}} \quad (3.12)$$

### 3.6 FEM-analyse

Programmet som ble benyttet for analysen het Ansys Mechanical APDL. FEM-analysen ble benyttet for å finne de kritiske spenningene som førte til brudd. Dette gjorde det mulig å se hvor eventuelle brudd ville forekomme i prøvestykket, ved de forskjellige skjevhetvinklene. For å finne den mest korrekte kombinasjonen av basiselement, elementstørrelse og kraftpåsetting til å analysere forsøket, ble det utført tolv forskjellige analyser ved tilfellene 0,0- og 2,0 grader skjevhetvinkel. Dette ga ett godt utgangspunkt til å velge metode for å analysere resultatene.

Materialet ble gitt de karakteristiske egenskapene til GL30c som vist i tabell 3.2 (Standard Norge, 2013, s. 23). Det ble undersøkt tilfellene med 0,0-, 1,0-, 2,0-, 3,0- og 4,0 graders skjevhetvinkel, fordi dette ga en god indikasjon på spenningsbildet, ved økende skjevhetvinkel. Etersom programmet opererer med N/m<sup>2</sup> må verdiene opphøyes i 10<sup>6</sup>.

Tabell 3.2 – Materialeegenskapene til FEM-modellen

Materialegenskap	Verdi (N/m <sup>2</sup> )
<b>E</b> <sub>90,mean</sub>	3e8
<b>E</b> <sub>0,mean</sub>	1.3e10
<b>G</b> <sub>0,mean</sub>	6.5e8

### **3.6.1 Forutsetninger**

Resultatene fra laboratorieforsøket ble benyttet som utgangspunkt til FEM-analysen. For å gjennomføre analysen måtte det derfor gjøres noen viktige forutsetninger. Disse er nevnt punktvis nedenfor:

- Forenkling i modellen
- Forflytningen av stålplaten var 0 mm ved 20 kN
- Trykkraften som ble påsatt var 200 kN
- Gjennomsnittlig forflytningsverdi ble benyttet

### **3.6.2 Årsaken til forutsetningene**

Forenklinger i modellen ble gjort for å gjennomføre FEM-analysen. Materialet i analysen er homogent, slik at kvist og årringer ikke forekommer. Under forsøket ble fibrene øverst i prøvestykket knust. Dette kunne ikke modelleres i programmet, derfor ble det knuste volumet neglisjert i analysen.

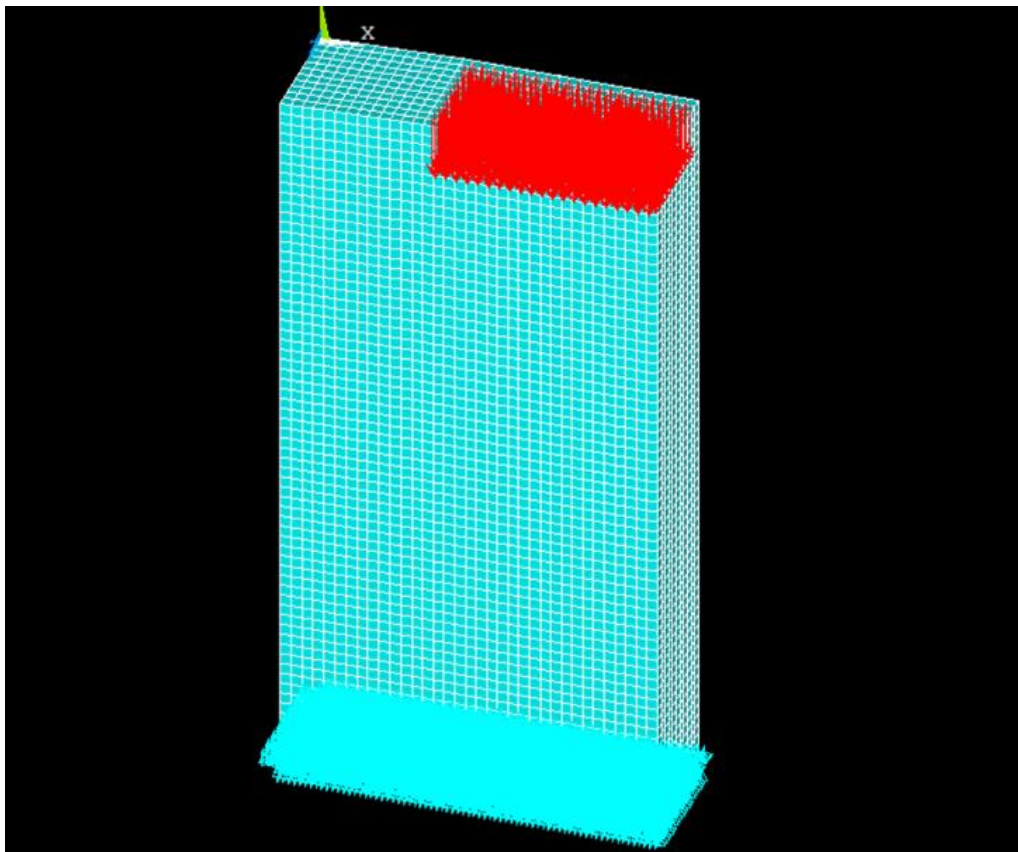
I analysen ble alle prøvestykkene belastet med lik kraft, denne ble satt til 200 kN.

Spenningene som oppstod ved denne kraften er de som er fremstilt i analysen. Ved denne kraften varierte prøvestykkets kontaktareal i takt med endring av skjevhetvinkelen, for de forskjellige tilfellene. Siden programmet som nevnt ikke har mulighet til å modellere fiberknusning, ble det valgt å benytte en alternativ modell som neglisjerer det knuste volumet før 200 kN. Stålplatens kontaktareal ble beregnet ved å se på hver testseries gjennomsnittlige forflytningsverdi ved 200 kN belastning. Beregningsmetoden for kontaktarealet er nærmere forklart i vedlegg F.

### **3.6.3 FEM-modellen**

Basiselementet som ble benyttet var SOLID 186, som ga en god analyse av lokale spenninger. Elementstørrelsen som ble benyttet var 5 mm. Ved å gjennomføre analysen med et så fint nettverk, ble sannsynligheten for singularitet redusert. Dette er nærmere forklart i kapittel 2.5. Prøvestykkenes størrelse ble modellert, slik at de var tilnærmet like som under forsøket. Det vil si at bredde-, høyde- og lengdeforholdet var likt. I vedlegg G vises det til kommandolistene til de forskjellige analysene som ble gjennomført.

Figur 3.7 viser elementstørrelsen, plasseringen av krefter og grensebetingelser for tilfellet med skjevhetsvinkel 2,0 grader. Grensebetingelsene er plassert i bunnen av prøvestykket, slik at det er godt fastholdt, mens det røde feltet på figuren indikerer hvor trykkreftene er plassert. For å unngå singulariteter, har trykkreftene blitt plassert på alle nodene på kontaktarealet, utenom de på randen.



*Figur 3.7 – Elementstørrelse, kraftpåsetting og grensebetingelser*

### **3.7 Feilkilder**

Feilkilder som kan forekomme ved utføring av laboratorieforsøk må vurderes. Alle prøvestykkene kommer fra samme limtrebjelke, og bør derfor ha relativt like egenskaper. Det som kan påvirke resultatet er eventuelle kvister som er plassert ugunstig i prøvestykkene. Menneskelig feil kan forekomme, men sannsynligheten anses som liten, da vi fikk god opplæring i bruk av testmaskinen. En annen feilkilde kan være at skjevhetsvinklene ikke ble tilvirket på nøyaktig måte. Angående det statistiske grunnlaget, er det basert på tre tester per serie. Det statistiske grunnlaget kunne vært styrket ved å utføre flere tester.

Det var laboratorieforsøket som lå til grunn i FEM-analysen. Ettersom det kun ble utført tre tester per testserie, var det en stor sannsynlighet for at eventuelle feil i trevirket kunne påvirke resultatene nevneverdig.

Kvaliteten av limtre som ble benyttet under laboratorieforsøket, kan ha vært bedre enn materialegenskapene som ble benyttet i FEM-analysen. Konsekvensen av dette kan være at spenningene i FEM-analysen var høyere, enn de som oppstod i forsøket.

# 4 Analyse og resultat fra laboratoriet

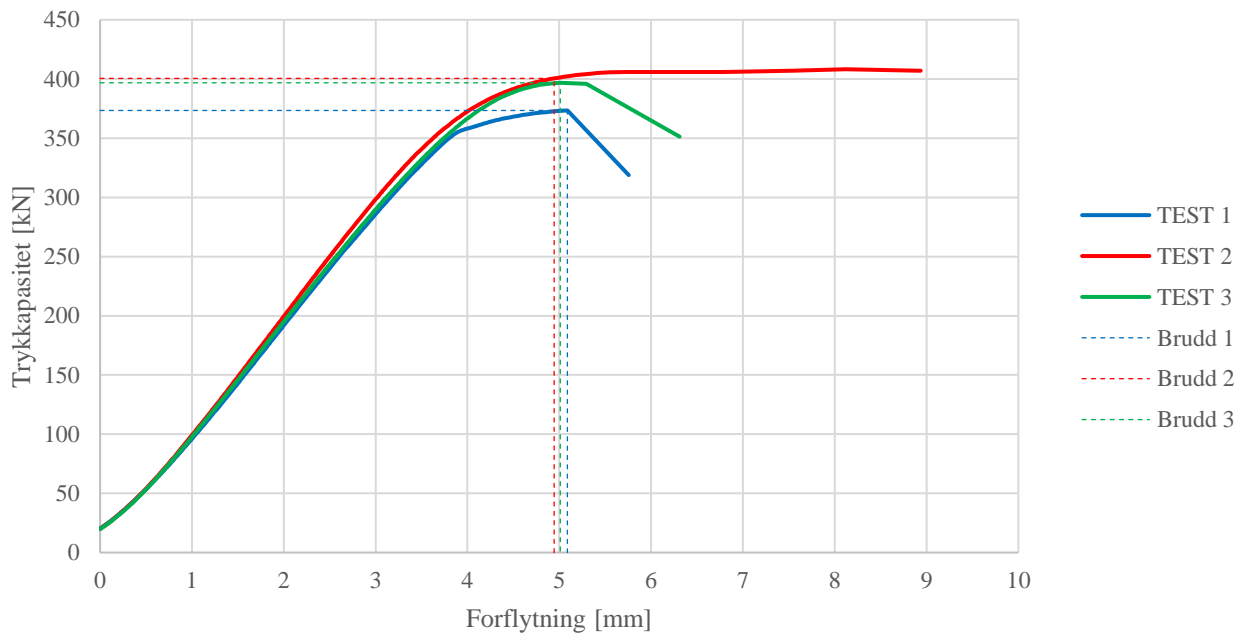
## 4.1 Trykkapasitet 0,0 grader

I denne testserien var det ingen skjevheitsvinkel mellom stålplaten og prøvestykket. Bruddene som oppstod var trolig rene trykkbrudd. Brudd oppstod ved kraft som vist i tabell 4.1.

Trykkspenningene som oppstod da prøvestykkene ble presset til brudd var henholdsvis: 40,18 N/mm<sup>2</sup>, 43,09 N/mm<sup>2</sup> og 42,69 N/mm<sup>2</sup>. Målt trykkapasitet er vist grafisk i figur 4.1, og statistiske data er vist i tabell 4.2. Gjennomsnittlig trykkapasitet ble 390,26 kN.

Tabell 4.1 – Trykkapasitet 0,0 grader

Prøvestykke	Trykkapasitet
1	373,43 kN
2	400,53 kN
3	396,81 kN



Figur 4.1 – Arbeidsdiagram 0,0 grader

Tabell 4.2 – Statistiske data 0,0 grader

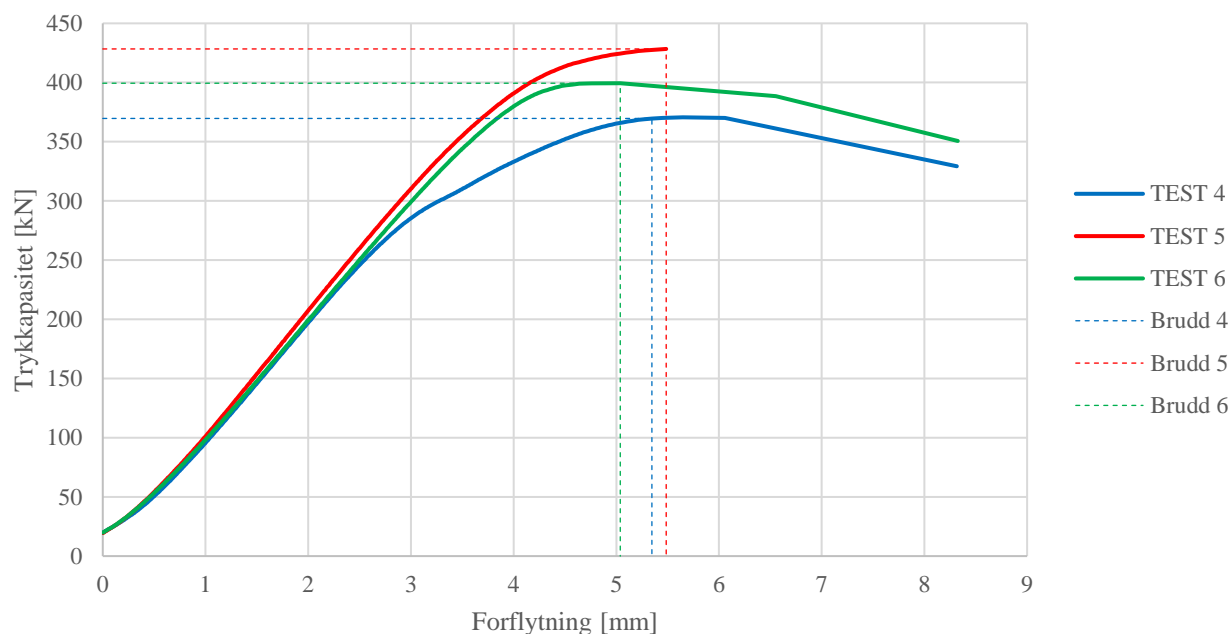
<b>Fukt</b>	$\omega$	9,9 %
<b>Densitet</b>	$\rho$	388 kg/m <sup>3</sup>
<b>Gjennomsnitt</b>	$\bar{y}$	390,26 kN
<b>5 %-Fraktil</b>	$m_{k,ln}$	333,23 kN

## 4.2 Trykkapasitet 0,5 grader

Dette var den første testserien hvor stålplaten og prøvestykket ikke hadde full kontaktflate fra starten av. Målt trykkapasitet var relativt lik som for 0,0 grader og er vist i tabell 4.3 samt grafisk i figur 4.2. Statistiske data er vist i tabell 4.4. Gjennomsnittlig trykkapasitet ble 399,18 kN.

Tabell 4.3 – Trykkapasitet 0,5 grader

Prøvestykke	Trykkapasitet
4	369,70 kN
5	428,39 kN
6	399,44 kN



Figur 4.2 – Arbeidsdiagram 0,5 grader

Tabell 4.4 – Statistiske data 0,5 grader

<b>Fukt</b>	$\omega$	10,2 %
<b>Densitet</b>	$\rho$	434,7 kg/m <sup>3</sup>
<b>Gjennomsnitt</b>	$\bar{y}$	399,18 kN
<b>5 %-Fraktil</b>	$m_{k,ln}$	315,9 kN

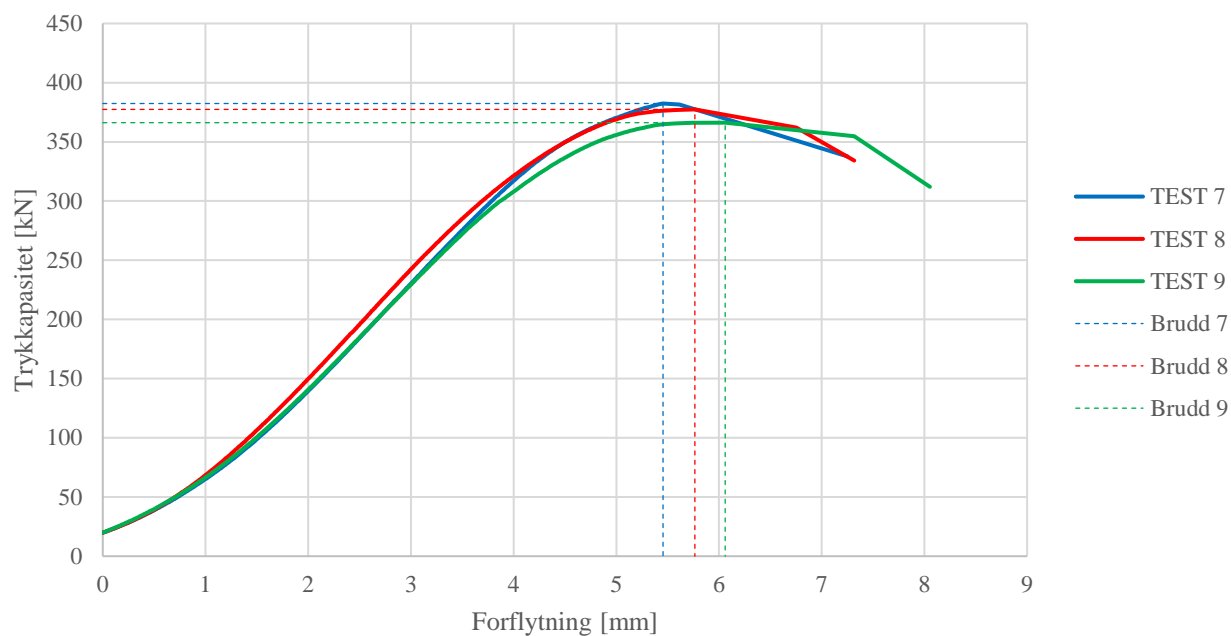


### 4.3 Trykkapasitet 1,0 grader

Bruddene som oppstod var relativt identiske med de to første testseriene. Målt trykkapasitet er vist i tabell 4.5 og i figur 4.3 grafisk. Statistiske data er vist i tabell 4.6. Gjennomsnittlig trykkapasitet ble 375,34 kN.

Tabell 4.5 – Trykkapasitet 1,0 grader

Prøvestykke	Trykkapasitet
7	382,39 kN
8	377,43 kN
9	366,21 kN



Figur 4.3 – Arbeidsdiagram 1,0 grader

Tabell 4.6 – Statistiske data 1,0 grader

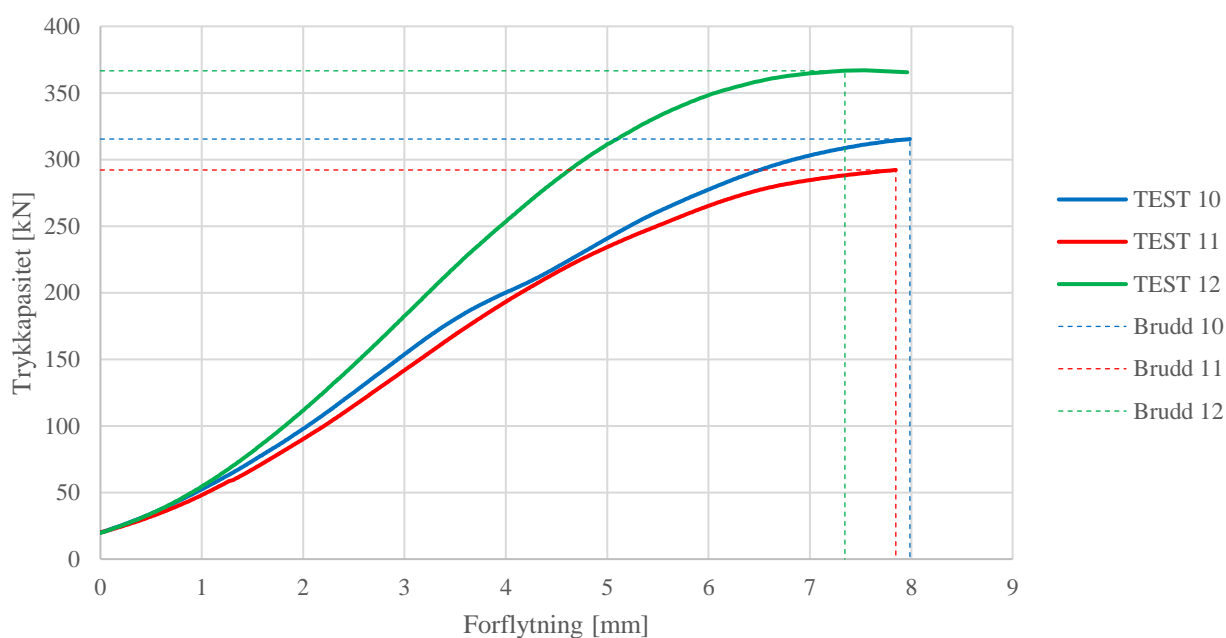
<b>Fukt</b>	$\omega$	10,9 %
<b>Densitet</b>	$\rho$	417,3 kg/m <sup>3</sup>
<b>Gjennomsnitt</b>	$\bar{y}$	375,34 kN
<b>5 %-Fraktil</b>	$m_{k,ln}$	320,59 kN

## 4.4 Trykkapasitet 1,5 grader

Dette var den første testserien hvor det kunne observeres sprekker langs fiberretningen av prøvestykket. Dette ble observert på test nummer ti. Målt trykkapasitet vises i tabell 4.7 og i figur 4.4 grafisk. Statistiske data er vist i tabell 4.8. Gjennomsnittlig trykkapasitet ble 324,72 kN.

Tabell 4.7 – Trykkapasitet 1,5 grader

Prøvestykke	Trykkapasitet
<b>10</b>	315,40 kN
<b>11</b>	292,15 kN
<b>12</b>	366,61 kN



Figur 4.4 – Arbeidsdiagram 1,5 grader

Tabell 4.8 – Statistiske data 1,5 grader

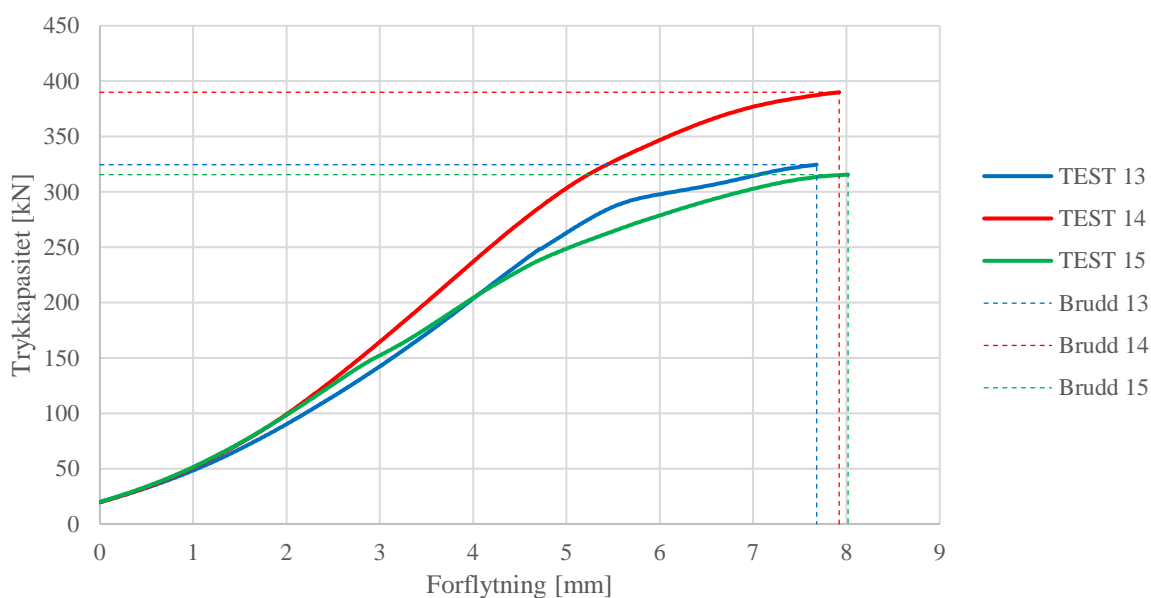
<b>Fukt</b>	$\omega$	10,2 %
<b>Densitet</b>	$\rho$	418,7 kg/m <sup>3</sup>
<b>Gjennomsnitt</b>	$\bar{y}$	324,72 kN
<b>5 %-Fraktil</b>	$m_{k,ln}$	224,67 kN

## 4.5 Trykkapasitet 2,0 grader

Ulike typer bruddforløp oppstod i denne testserien. De fleste langs fiberretningen, noe som trolig førte til en tidligere kollaps. Målt trykkapasitet er vist i tabell 4.9, grafisk i figur 4.5 og statistiske data i tabell 4.10. Gjennomsnittlig trykkapasitet ble 324,72 kN.

Tabell 4.9 – Trykkapasitet 2,0 grader

Prøvestykke	Trykkapasitet
<b>13</b>	324,58 kN
<b>14</b>	390,00 kN
<b>15</b>	315,56 kN



Figur 4.5 – Arbeidsdiagram 2,0 grader

Tabell 4.10 – Statistiske data 2,0 grader

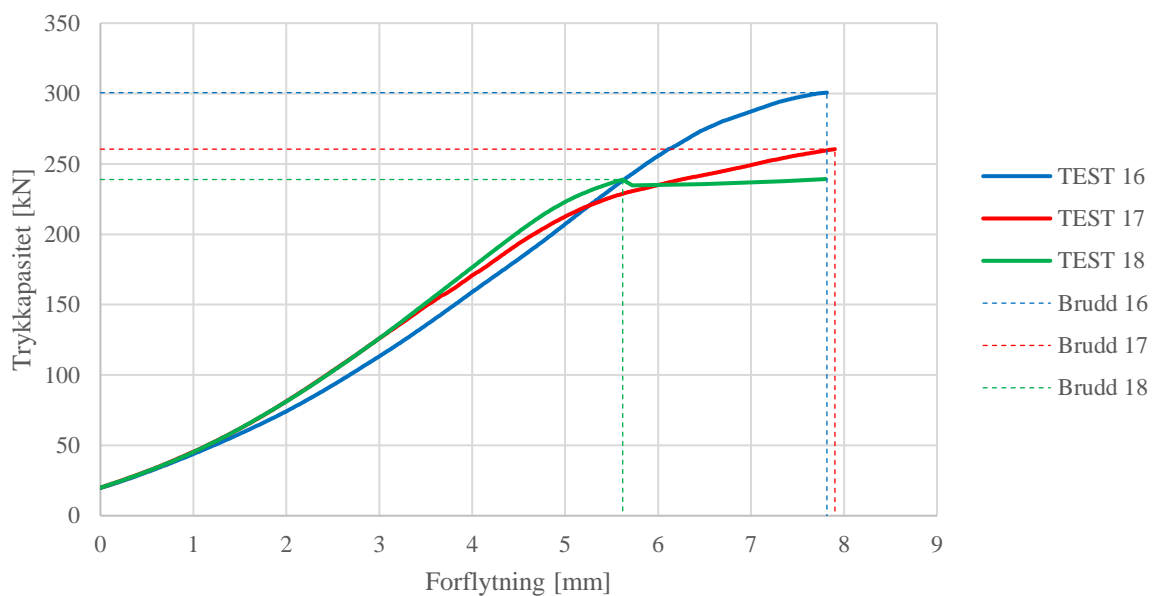
<b>Fukt</b>	$\omega$	9,9 %
<b>Densitet</b>	$\rho$	416,3 kg/m <sup>3</sup>
<b>Gjennomsnitt</b>	$\bar{y}$	324,72 kN
<b>5 %-Fraktil</b>	$m_{k,ln}$	237,95 kN

## 4.6 Trykkapasitet 2,5 grader

Tilløp til brudd langs fiberretningen, ble observert på samtlige prøvestykker. Målt trykkapasitet er vist i tabell 4.11 og i figur 4.6 grafisk. Statistiske data er vist i tabell 4.12. Gjennomsnittlig trykkapasitet ble 266,66 kN.

Tabell 4.11 – Trykkapasitet 2,5 grader

Prøvestykke	Trykkapasitet
<b>16</b>	300,63 kN
<b>17</b>	260,46 kN
<b>18</b>	238,89 kN



Figur 4.6 – Arbeidsdiagram 2,5 grader

Tabell 4.12 – Statistiske data 2,5 grader

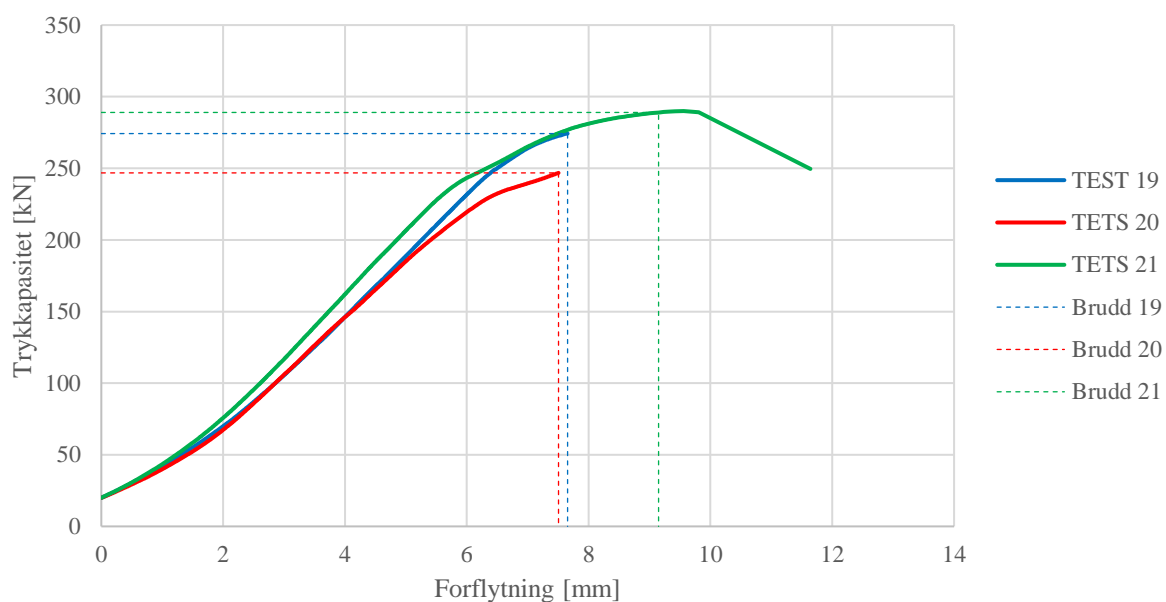
<b>Fukt</b>	$\omega$	10,2 %
<b>Densitet</b>	$\rho$	423,3 kg/m <sup>3</sup>
<b>Gjennomsnitt</b>	$\bar{y}$	266,66 kN
<b>5 %-Fraktil</b>	$m_{k,ln}$	184,14 kN

## 4.7 Trykkapasitet 3,0 grader

Tydelige brudd tvert i fiberretningen ble observert. Målt trykkapasitet er vist i tabell 4.13 og grafisk i figur 4.7. Statistiske data er vist i tabell 4.14. Gjennomsnittlig trykkapasitet ble 270,02 kN.

Tabell 4.13 – Trykkapasitet 3,0 grader

Prøvestykke	Trykkapasitet
<b>19</b>	274,26 kN
<b>20</b>	246,81 kN
<b>21</b>	289,00 kN



Figur 4.7 – Arbeidsdiagram 3,0 grader

Tabell 4.14 – Statistiske data 3,0 grader

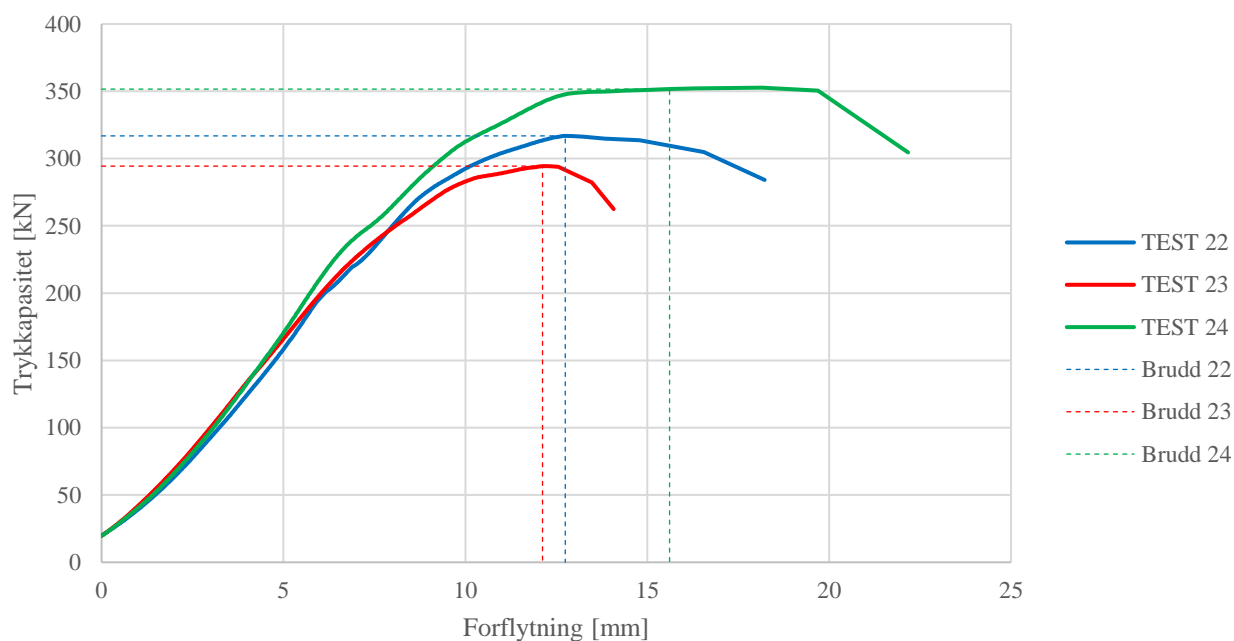
<b>Fukt</b>	$\omega$	9,8 %
<b>Densitet</b>	$\rho$	429,7 kg/m <sup>3</sup>
<b>Gjennomsnitt</b>	$\bar{y}$	270,02 kN
<b>5 %-Fraktil</b>	$m_{k,ln}$	209,18 kN

## 4.8 Trykkapasitet 3,5 grader

Dette var den nest største skjevheitsvinkelen som ble testet, også her ble det observert tverrbrudd. Målt trykkapasitet er vist i tabell 4.15, grafisk i figur 4.8 og statistiske data er vist i tabell 4.16. Gjennomsnittlig trykkapasitet ble 320,96 kN.

Tabell 4.15 – Trykkapasitet 3,5 grader

Prøvestykke	Trykkapasitet
22	316,87 kN
23	294,40 kN
24	351,62 kN



Figur 4.8 – Arbeidsdiagram 3,5 grader

Tabell 4.16 – Statistiske data 3,5 grader

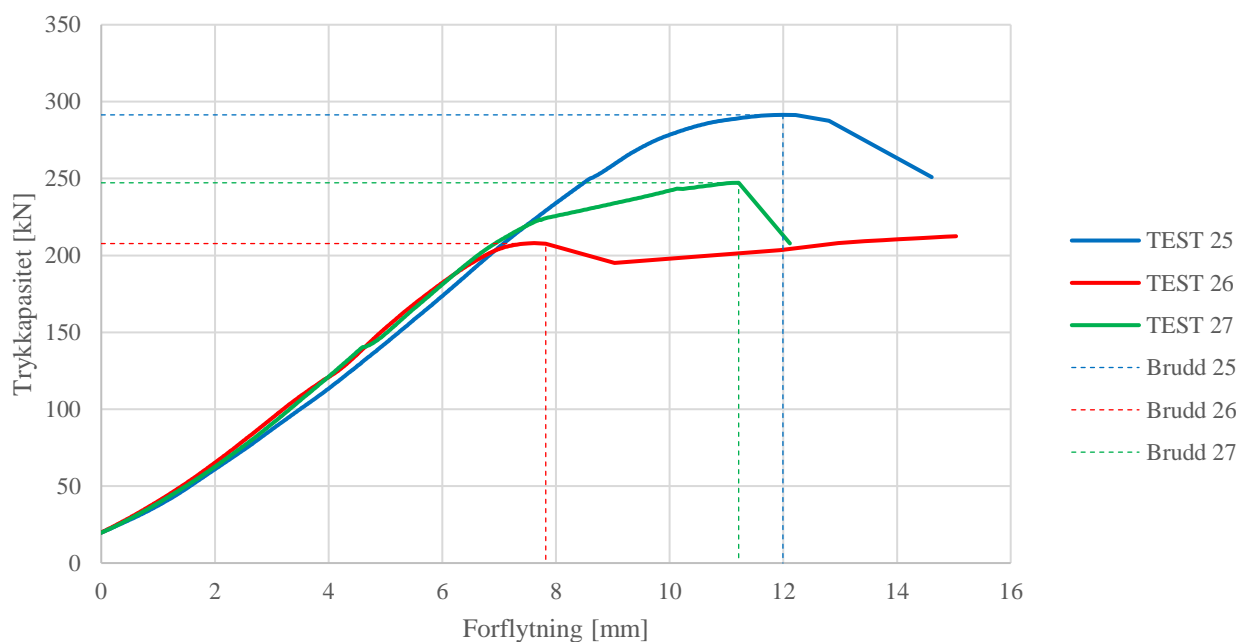
<b>Fukt</b>	$\omega$	10,1 %
<b>Densitet</b>	$\rho$	409,7 kg/m <sup>3</sup>
<b>Gjennomsnitt</b>	$\bar{y}$	320,96 kN
<b>5 %-Fraktil</b>	$m_{k,ln}$	241,66 kN

## 4.9 Trykkapasitet 4,0 grader

For den største skjevheitsvinkelen som ble testet, var de fleste brudd veldig tydelige. Målt trykkapasitet er vist i tabell 4.17, grafisk i figur 4.9 og statistiske data er vist i tabell 4.18. Gjennomsnittlig trykkapasitet ble 248,79 kN.

Tabell 4.17 – Trykkapasitet 4,0 grader

Prøvestykke	Trykkapasitet
25	291,40 kN
26	207,73 kN
27	247,25 kN



Figur 4.9 – Arbeidsdiagram 4,0 grader

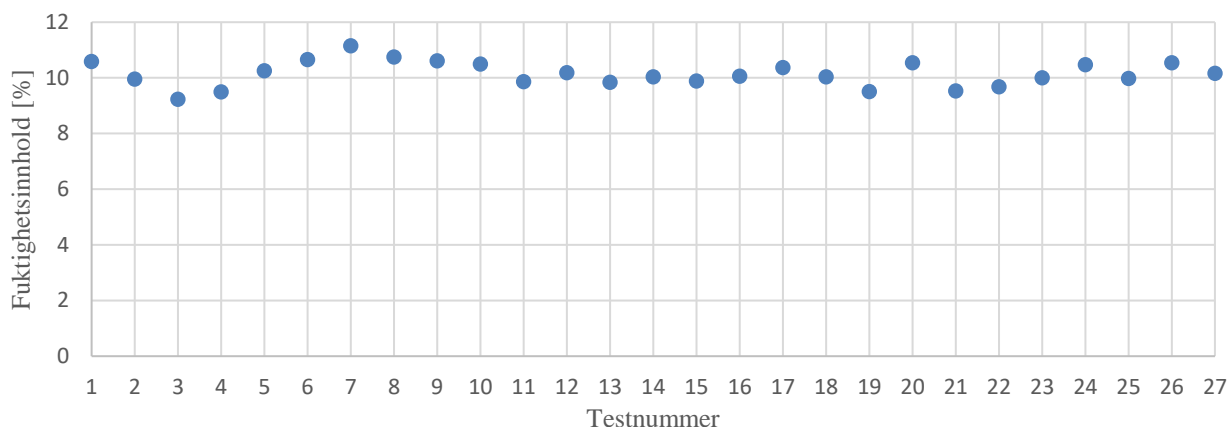
Tabell 4.18 – Statistiske data 4,0 grader

<b>Fukt</b>	$\omega$	10,2 %
<b>Densitet</b>	$\rho$	414,3 kg/m <sup>3</sup>
<b>Gjennomsnitt</b>	$\bar{y}$	248,79 kN
<b>5 %-Fraktil</b>	$m_{k,ln}$	144,60 kN

## 4.10 Fuktighets- og densitetsmålinger

### 4.10.1 Fuktighetsinnholdet

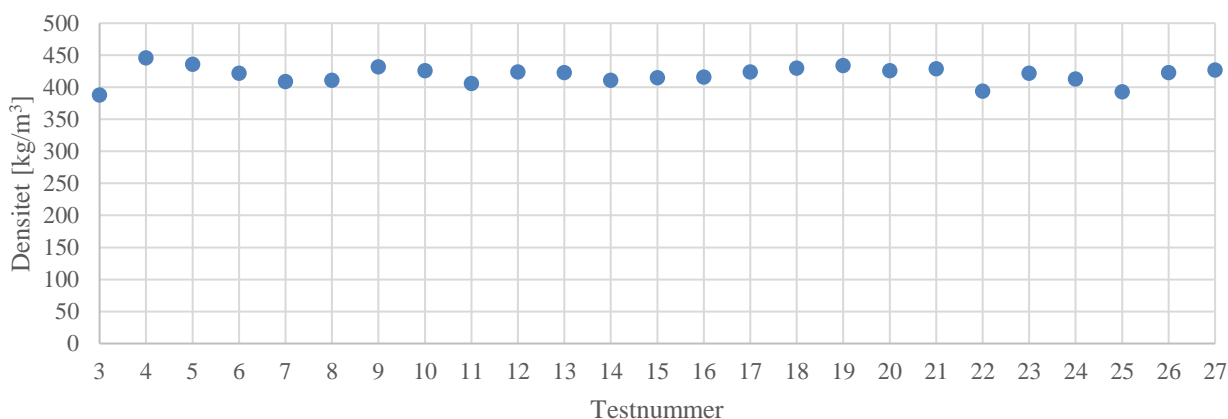
Fuktighetsinnholdet i hvert enkelt prøvestykke er fremstilt i figur 4.10, og beregnet etter formel 2.1. Som det kan observeres holder alle prøvestykkene seg godt under 12 % fuktighet, og de kan derfor betegnes som tørre.



Figur 4.10 – Fuktighetsinnhold

### 4.10.2 Densitet

Densiteten fra målingene er vist i figur 4.11. Det kan observeres at omtrent alle målingene ligger nærme den karakteristiske verdien for GL30c som er  $390 \text{ kg/m}^3$  (Standard Norge, 2013, s. 23). Det kan også observeres at målingene varierer lite.



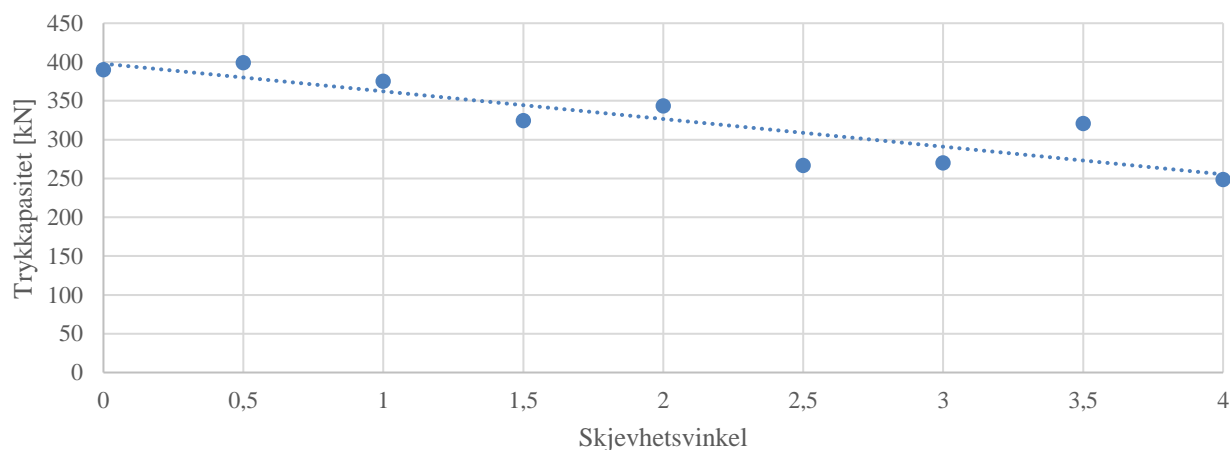
Figur 4.11 – Densitet



## 4.11 Oppsummering av resultater

### 4.11.1 Gjennomsnittlig trykkapasitet

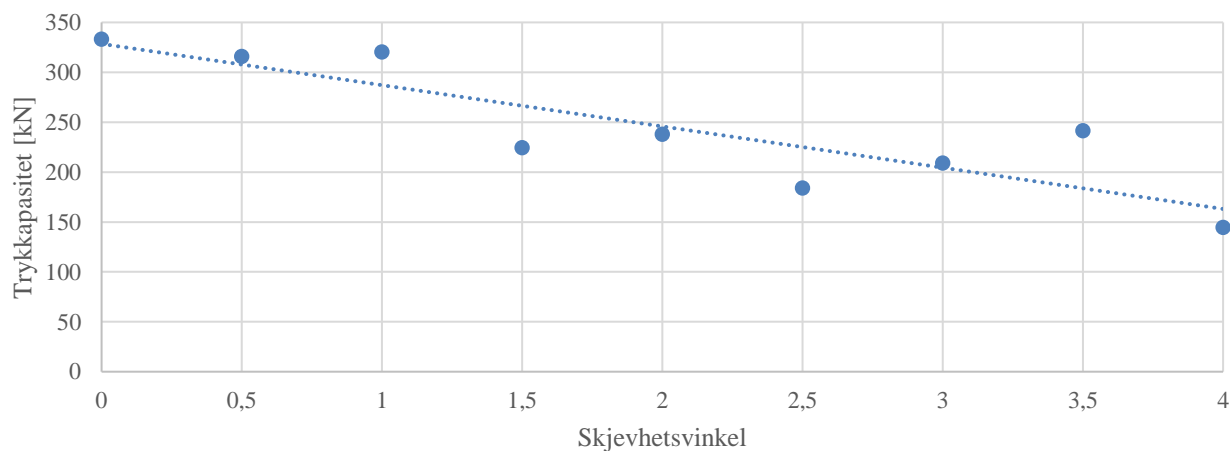
Figur 4.12 fremstiller gjennomsnittlig brudd for hver av de syv testseriene. Det ble beregnet en lineær regresjonslinje etter formel 3.9, med skjevhetensvinkel og trykkapasitet som variabler. Linjen viser en lineær reduksjon i trykkapasiteten, ettersom skjevhetensvinkelen øker.



Figur 4.12 – Gjennomsnittlig trykkapasitet av de ulike skjevhetensvinklene

### 4.11.2 5 %-fraktil per serie

5 %-fraktilet av de ulike gradene er fremstilt i figur 4.13, med en tilhørende lineær regresjonslinje etter formel 3.9, med skjevhetensvinkel og trykkapasitet som variabler. Linjen viser også her en reduksjon i trykkapasitet, når skjevhetensvinkelen øker.



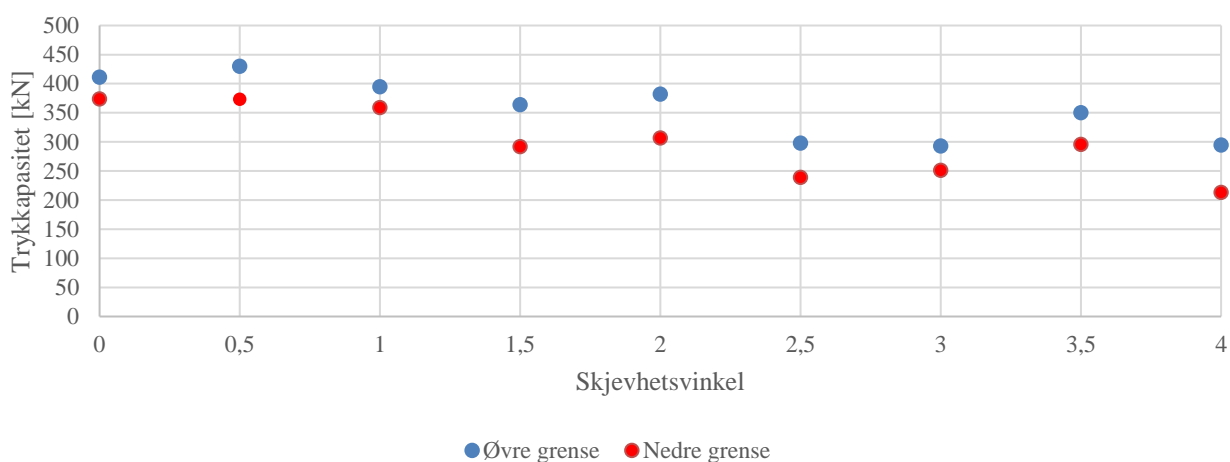
Figur 4.13 – 5 %-fraktil av de ulike skjevhetensvinklene

### 4.11.3 Konfidensintervall for de ulike skjevheitsvinklene

Tabell 4.19 og figur 4.14 illustrerer konfidensintervallet for de ulike skjevheitsvinklene etter formel 3.12. Det kan tydes at fra 0,0 grader til 1,0 grader er trykkapasiteten tilnærmet konstant, derimot får den en stor reduksjon etter dette.

Tabell 4.19 – Konfidensintervall for de ulike skjevheitsvinklene

Grader	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Øvre grense	411,07	429,73	394,95	364,10	382,36	298,10	292,76	350,28	294,85
Nedre grense	373,79	373,27	359,14	291,78	307,00	238,89	251,39	295,65	213,16



Figur 4.14 – Grafisk fremstilling av konfidensintervallet

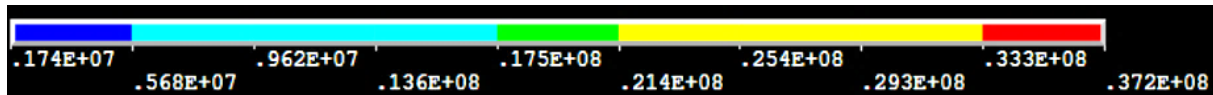
## 5 Analyse og resultat av FEM-Analyse

Det var viktig å skille singulariteter og reelle spenninger, da resultatene skulle tolkes. På figurene gjelder dette de røde eller eventuelt blå områdene øverst på modellen. Resultatene fra FEM-analysen tar for seg et spenningsbilde i ett gitt øyeblikk under testingen.

Spenningsene av betydning er trykkspenning, tverrstrekkspenning, skjærspenning og kombinerte spenninger. Innledningsvis for hver skjevheitsvinkel er det en tabell med kritiske spenninger. Alle analysene med skjevheitsvinkel ble belastet på høyre del av modellen.

For tilfellet med 0,0 grader vil alle spenningsbildene bli vist, mens for de andre tilfellene vises kun et spenningsbilde. De resterende spenningsbildene er gjengitt i vedlegg H til K. De kritiske spenningene er beregnet som middelverdien for øvre og nedre grense av fargekoden spenningen gjelder for. Denne metoden er vist via et eksempel i figur 5.1, hvor gjennomsnittsspenningen i det grønne feltet blir beregnet og omgjort til  $N/mm^2$ .

$$\bar{\sigma} = \left( \frac{0,175 \cdot 10^8 + 0,214 \cdot 10^8}{2} \right) \frac{N}{m^2} = 0,194 \cdot 10^8 \frac{N}{m^2} = 19,4 \frac{N}{mm^2}$$



Figur 5.1 – Beregning av middelverdi

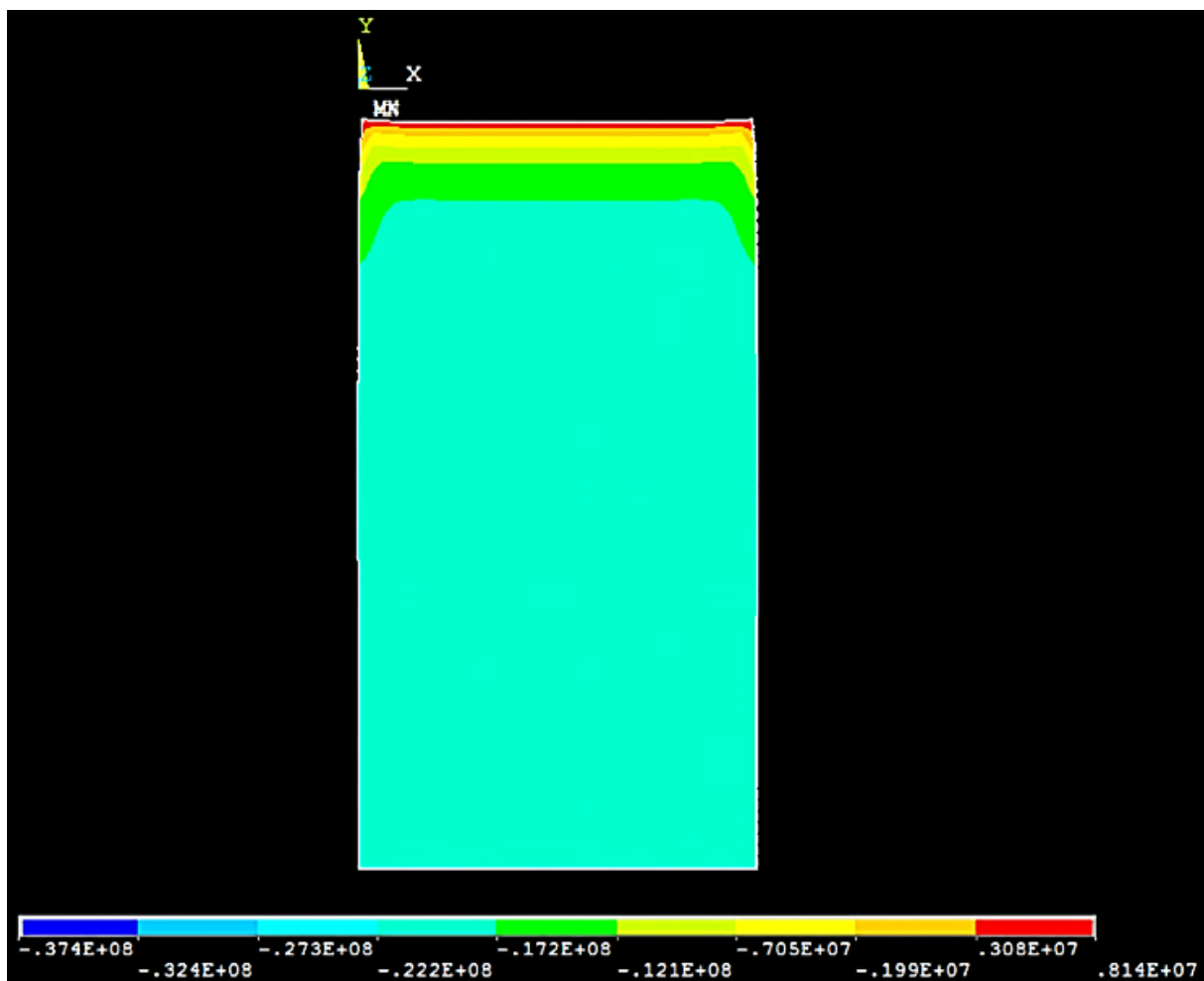
## 5.1 Resultater 0,0 grader

Tabell 5.1 – Kritiske spenningsverdier ved 0,0 grader

Spenningstype	Kritiske spenningsverdier
Trykk	24,7 N/mm <sup>2</sup>
Tverrstrekk	0,51 N/mm <sup>2</sup>
Skjær	0,00 N/mm <sup>2</sup>
Kombinerte spenninger	27,3 N/mm <sup>2</sup>

### Trykkspenning:

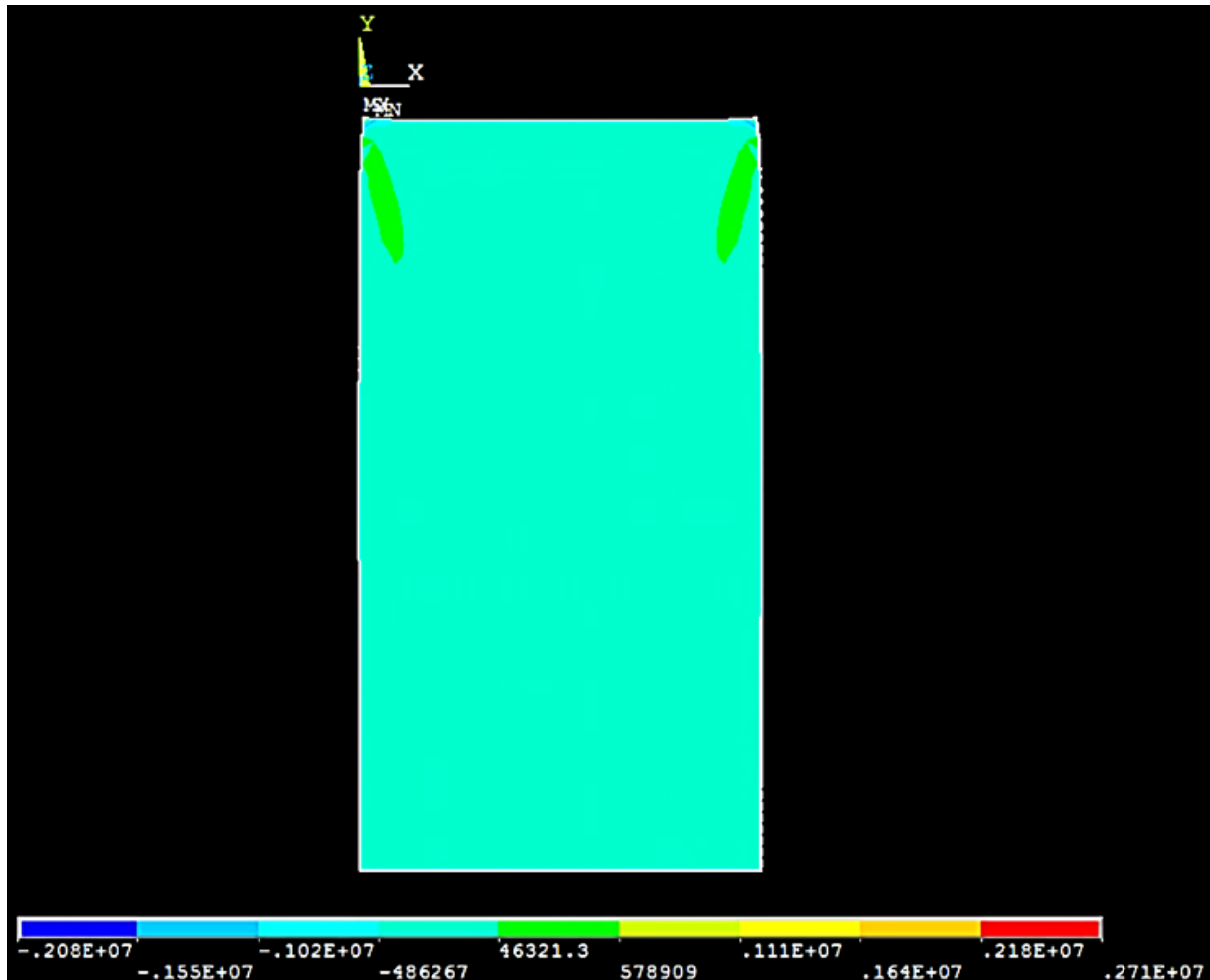
Fordelingen av trykkspenningen ved 0,0 grader var jevnt fordelt, ettersom det var fullstendig kontakt mellom prøvestykket og stålplaten. Trykkspenningen var i størrelsesorden 24,7 N/mm<sup>2</sup>, noe som omtrent lik den karakteristiske trykkkapasiteten til GL30c. Trykkspenningen er vist i figur 5.2.



Figur 5.2 – Trykkspenning 0,0 grader

### Tverrstrekk:

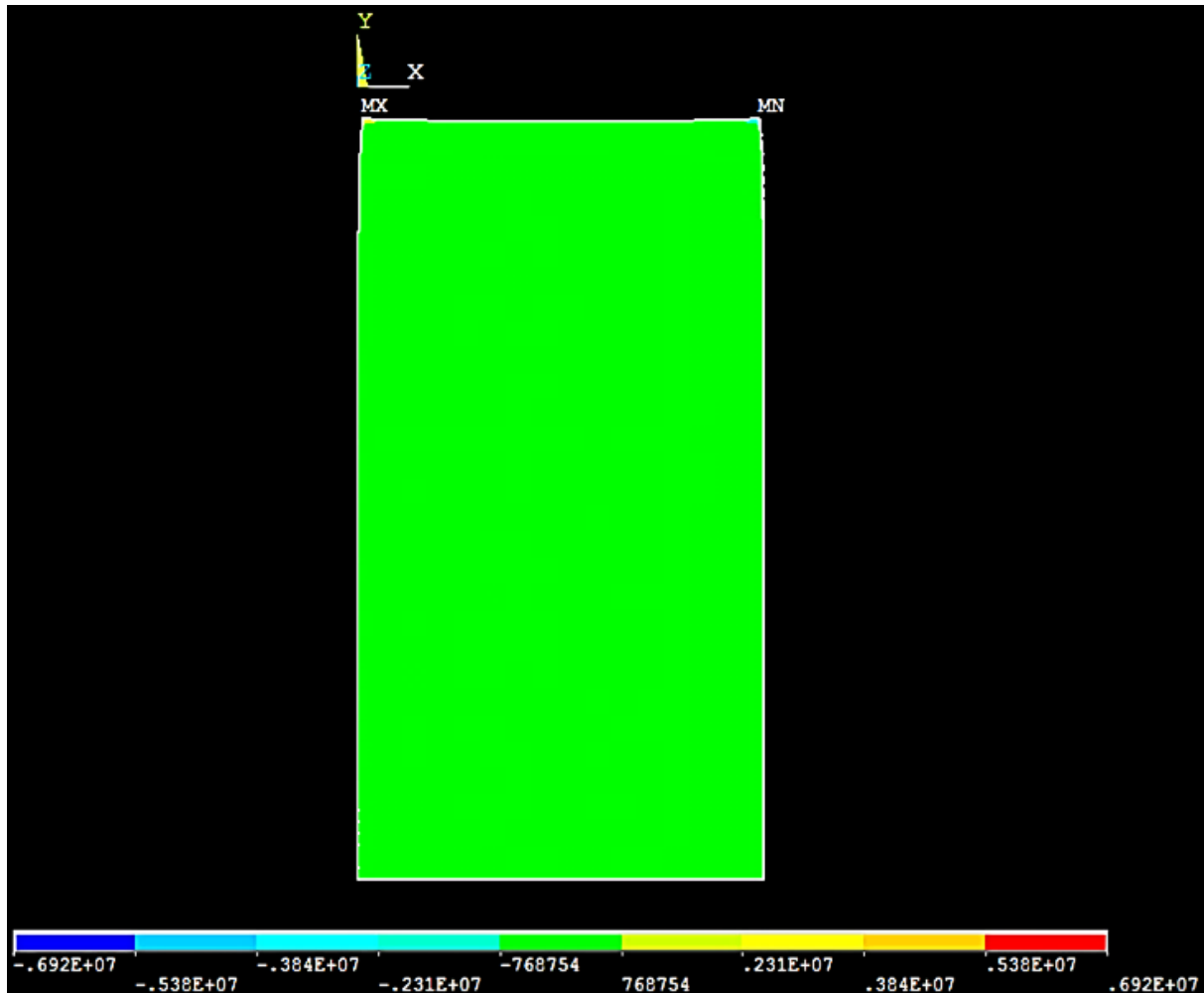
Den kritiske spenningen på denne modellen befant seg i de grønne feltene, hvor det oppstod en strekkspenning i størrelsesorden  $0,51 \text{ N/mm}^2$ . Tverrstrekkspenningen er vist i figur 5.3.



Figur 5.3 – Tverrstrekkspenning 0,0 grader

### Skjærspenning:

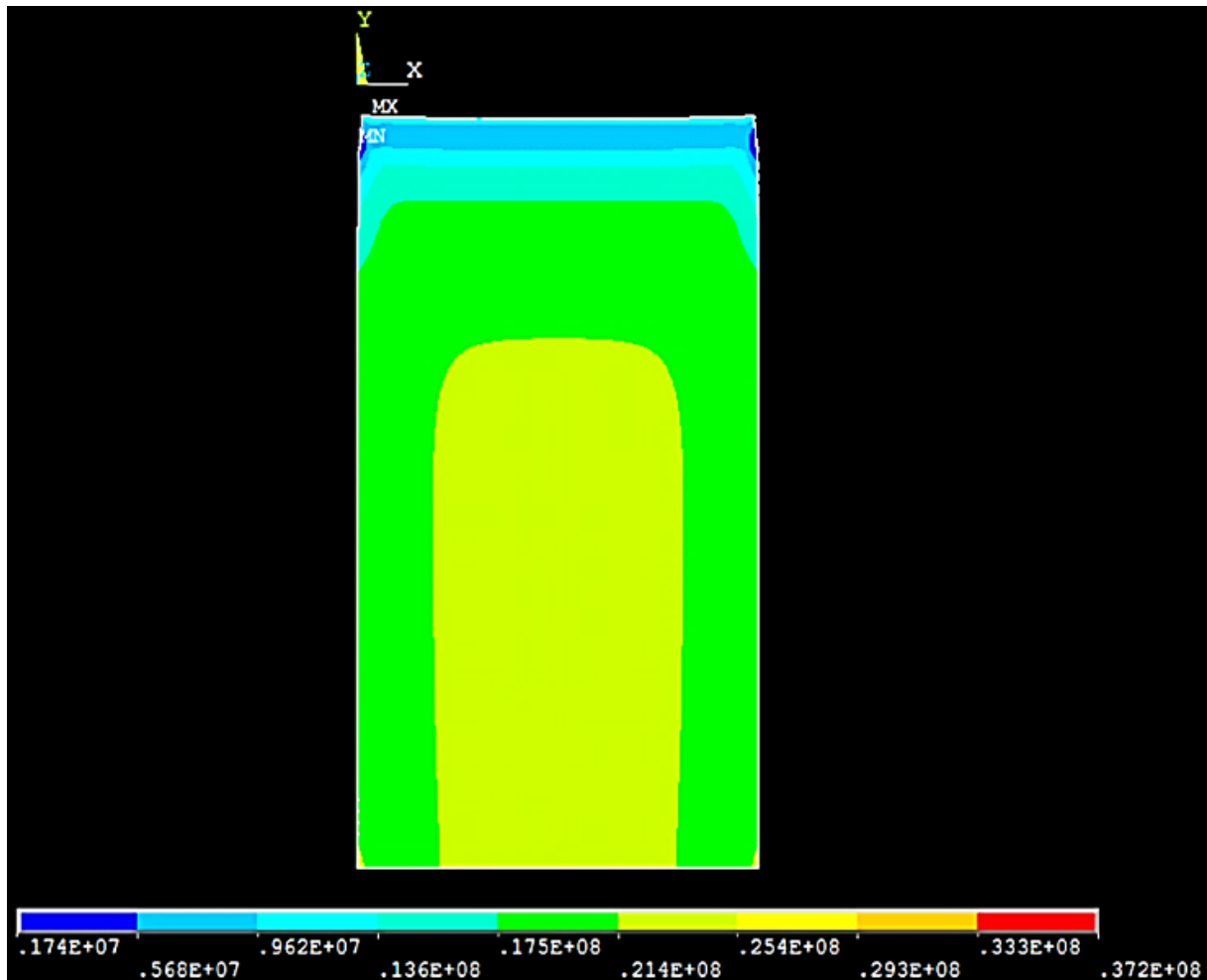
Skjærspenningen var tilnærmet lik null, for dette tilfellet. Det grønne området intervall var fra  $-0,76$  til  $0,76$  N/mm<sup>2</sup>. Skjærspenningen er vist i figur 5.4.



Figur 5.4 – Skjærspenning 0,0 grader

### Kombinerte spenninger:

De største kombinerte spenningene kan observeres i det gule området. I dette området var spenningene  $27,3 \text{ N/mm}^2$ . Dette spenningsbildet gir en god indikasjon på hvor brudd vil oppstå, ettersom det trolig var et rent trykkbrudd under forsøket. De kombinerte spenningene er vist i figur 5.5.



Figur 5.5 – Kombinerte spenninger 0,0 grader

## 5.2 Resultater 1,0 grader

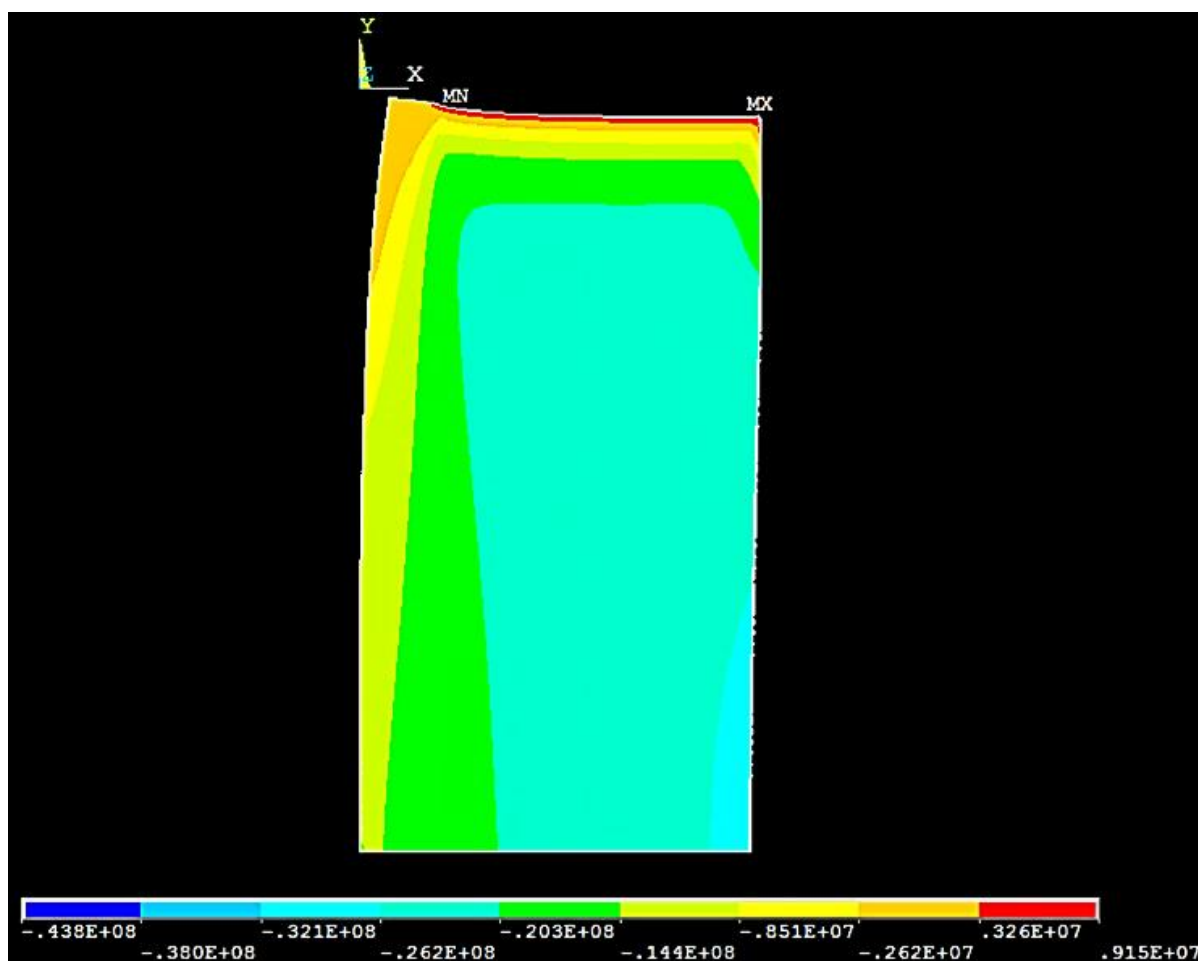
Spenningsbildene for 1,0 grader finnes i vedlegg H. Belastningsarealet var 55 mm × 151 mm

Tabell 5.2 – Kritiske spenningsverdier ved 1,0 grader

Spenningstype	Kritiske spenningsverdier
Trykk	29,1 N/mm <sup>2</sup>
Tverrstrekk	0,55 N/mm <sup>2</sup>
Skjær	0,70 N/mm <sup>2</sup>
Kombinerte spenninger	31,6 N/mm <sup>2</sup>

### Trykkspenning:

Her var det ikke full kontaktflate, det kan tydelig vises på elementet at de høye trykkspenningene er ned mot det høyre hjørnet. For denne skjevhetensvinkelen var den maksimale trykkspenningen på 29,1 N/mm<sup>2</sup>. Dette var en økning lokalt på 17 % i forhold til 0,0 grader. Trykkspenningen er vist i figur 5.6.



Figur 5.6 – Trykkspenninger ved 1,0 grader



**Tverrstrekk:**

Det kritiske tverrstrekket oppstod øverst på elementet, i overgangen mellom belastet areal og ubelastet areal. Den kritiske tverrstrekkspenningen var  $0,55 \text{ N/mm}^2$ .

**Skjærspenning:**

Det grønne feltet på figuren indikerer hvor kritisk skjærspenning oppstod. Skjærspenningen var på  $0,70 \text{ N/mm}^2$ . Mesteparten av prøvestykket hadde omtrent ingen skjærspenning.

**Kombinererte spenninger:**

Spenningsbildet viser at den kritiske spenningen oppstod samme sted som maksimal trykkspenning. Verdien på spenningen var  $31,6 \text{ N/mm}^2$ , og var en økning på 15 % i forhold til tilfellet med 0,0 grader.

## 5.3 Resultater 2,0 grader

Spenningsbildene for 2,0 grader finnes i vedlegg I. Belastningsarealet var  $55 \text{ mm} \times 105 \text{ mm}$ .

Tabell 5.3 – Kritiske spenningsverdier ved 2,0 grader

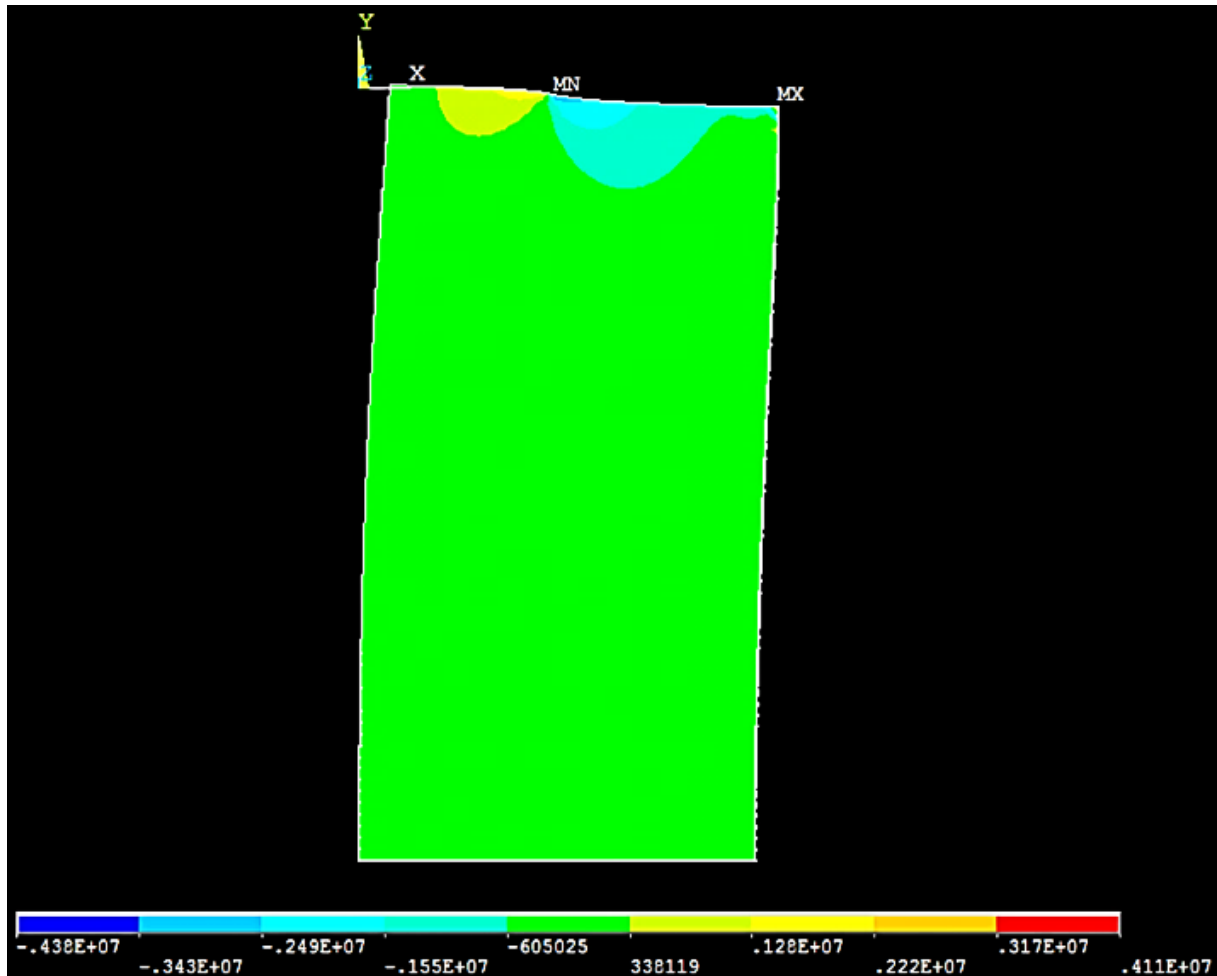
Spenningstype	Kritiske spenningsverdier
Trykk	$42,1 \text{ N/mm}^2$
Tverrstrekk	$0,81 \text{ N/mm}^2$
Skjær	$1,93 \text{ N/mm}^2$
Kombinererte spenninger	$45,8 \text{ N/mm}^2$

**Trykkspenning:**

For 2,0 grader var maksimal trykkspenning  $42,1 \text{ N/mm}^2$ . Denne økningen skyldtes trolig at kontaktarealet var redusert. Her var det en økning på 70 % fra tilfellet med 0,0 grader.

**Tverrstrekk:**

Den kritiske spenningen hadde økt til  $0,81 \text{ N/mm}^2$ . Tverrstrekket er vist i figur 5.7.



Figur 5.7 – Tverrstrekkspenninger ved 2,0 grader

### Skjærspenning:

Den kritiske spenningen oppstod under enden av kraftpåføringen, i det grønne feltet. Denne spenningen var  $1,93 \text{ N/mm}^2$ , mens resterende del av modellens skjærspenning var omtrent null. Her var det ingen positiv skjærspenning mot kanten av elementet, slik det var i tilfellet med 1,0 grader.

### Kombinerte spenninger:

De maksimale kombinerte spenningene oppstod nederst i det høyre hjørnet, og hadde en verdi på  $45,8 \text{ N/mm}^2$ . Dette var en økning på 67 % i forhold til tilfellet med 0,0 grader.

## 5.4 Resultater 3,0 grader

Spenningsbildene for 3,0 grader finnes i vedlegg J. Belastningsarealet var 55 mm × 98 mm.

Tabell 5.4 – Kritiske spenningsverdier ved 3,0 grader

Spenningstype	Kritiske spenningsverdier
<b>Trykk</b>	45,1 N/mm <sup>2</sup>
<b>Tverrstrekk</b>	1,06 N/mm <sup>2</sup>
<b>Skjær</b>	2,21 N/mm <sup>2</sup>
<b>Kombinerte spenninger</b>	49,1 N/mm <sup>2</sup>

### Trykkspenning:

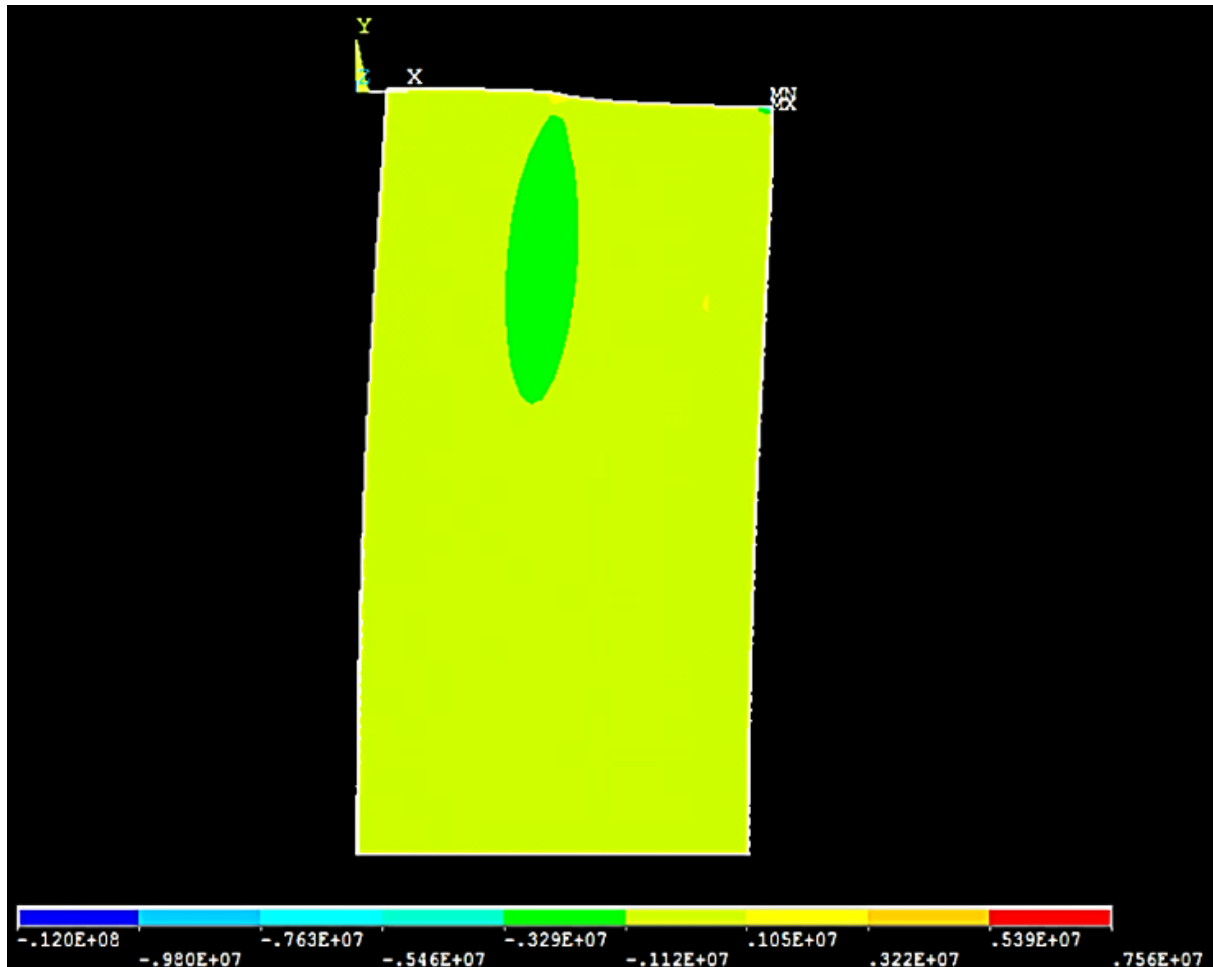
Den kritiske trykkspenningen hadde økt til 45,1 N/mm<sup>2</sup>, noe som er en økning på 128 % fra tilfellet med 0,0 grader.

### Tverrstrekk:

Den kritiske tverrstrekkspenningen hadde økt til 1,06 N/mm<sup>2</sup>, som er 112 % mer enn limtreets karakteristiske kapasitet.

### Skjærspenning:

Den kritiske verdien hadde her økt til 2,21 N/mm<sup>2</sup>. I resten av modellen var spenningen omtrent null, slik som i de foregående tilfellene. Skjærspenningen er vist i figur 5.8.



Figur 5.8 – Skjærspenninger ved 3,0 grader

#### Kombinererte spenninger:

Den kritiske kombinerte spenningen hadde økt til  $49,1 \text{ N/mm}^2$ , som var en økning på 7,2 %, i forhold til tilfellet med 2,0 grader.

## 5.5 Resultater 4,0 grader

Spenningsbildene for 4,0 grader finnes i vedlegg K. Belastningsarealet var  $55 \text{ mm} \times 94 \text{ mm}$ .

Tabell 5.5 – Kritiske spenningsverdier ved 4,0 grader

Spenningstype	Kritiske spenningsverdier
Trykk	$47,2 \text{ N/mm}^2$
Tverrstrekk	$1,26 \text{ N/mm}^2$
Skjær	$2,40 \text{ N/mm}^2$
<b>Kombinererte spenninger</b>	<b><math>51,4 \text{ N/mm}^2</math></b>

**Trykkspenning:**

Dette var det mest kritiske tilfellet som ble analysert. Den kritiske trykkspenningen var  $47,2 \text{ N/mm}^2$ . Denne spenningen oppstod på samme sted som de foregående tilfellene.

**Tverrstrekkspenning:**

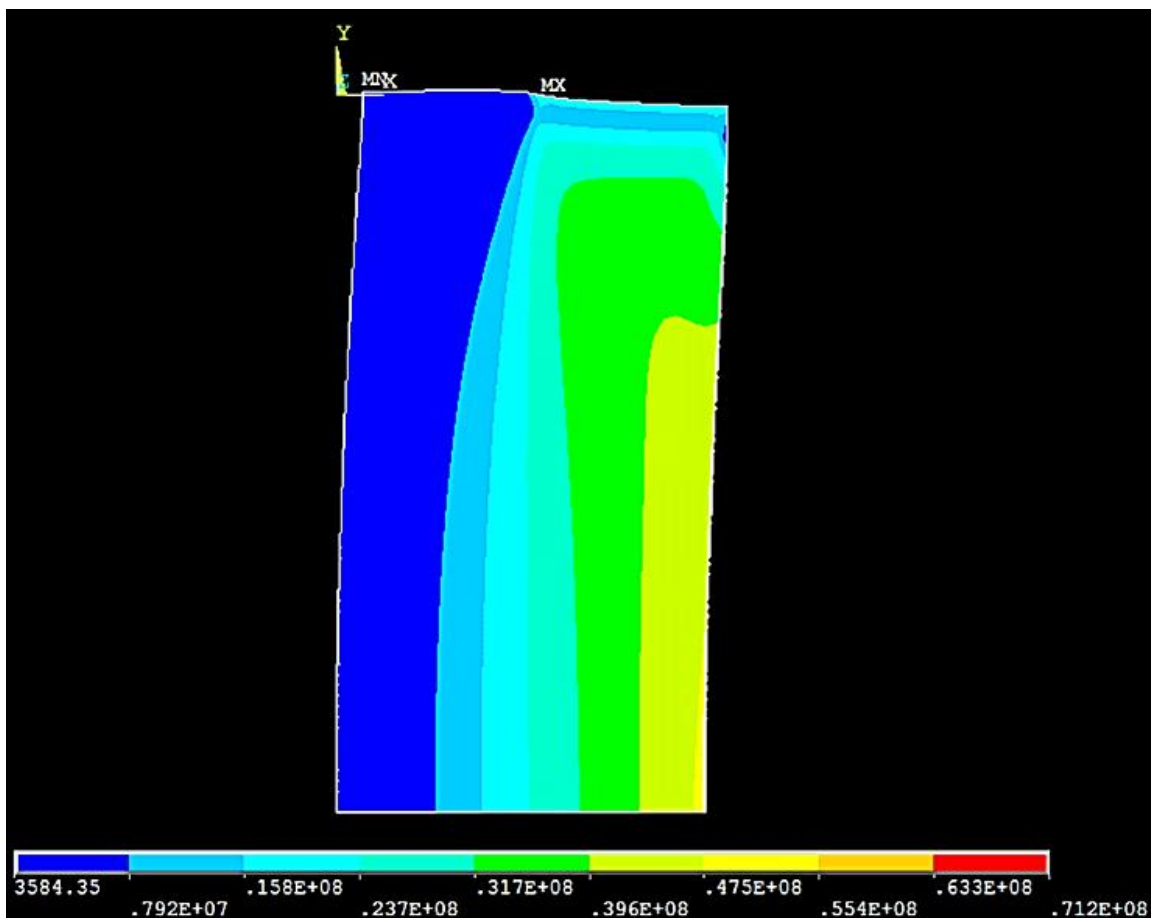
Den kritiske verdien hadde økt til  $1,26 \text{ N/mm}^2$ , som var en økning på 147 % fra tilfellet med 0,0 grader.

**Skjærspenning:**

Den kritiske spenningen var  $2,40 \text{ N/mm}^2$ , som var en økning på 54 % fra tilfellet med 1,0 grader.

**Kombinerte spenninger:**

Den kritiske spenningen var nederst ved høyre hjørnet, og hadde en verdi på  $51,4 \text{ N/mm}^2$ . Dette er en økning på 88,3 % i forhold til tilfellet med 0,0 grader. De kombinerte spenningene er vist i figur 5.9.



Figur 5.9 – Kombinerte spenninger ved 4,0 grader

# 6 Diskusjon og konklusjon

## 6.1 Diskusjon av metode og utførelse

På bakgrunn av oppgaven gitt fra Statens vegvesen, valgte vi å gjennomføre laboratorietester og FEM-analyse. Gruppen anså denne metoden som velegnet for å besvare problemstillingen på en god måte. Metoden gjorde også at dette studiet er etterprøvbart med de forutsetningene som ble lagt i grunn.

Forsøket ble gjennomført med ni forskjellige skjevheitsvinkler, med til sammen 27 prøvestykker. Antall prøvestykker ble valgt av gruppen på bakgrunn av økonomi- og tidsbegrensninger. Gruppen er klar over at studiet burde vært utført med et større antall tester, for å styrke reliabiliteten til dataene. Selv om antall tester er relativt lavt mener vi at rapporten gir en god indikasjon på sammenhengen mellom skjevheitsvinkelen og trykkapasiteten.

FEM-analyse ble benyttet for å få bedre oversikt av hvilke spenninger som oppstod i prøvestykkene. Det er mulig at det finnes dataprogrammer som er bedre egnet for å illustrere forsøket på en mer korrekt måte. Programmer som kan analysere fiberknusning og testforløpet med et tidsaspekt ville vært å foretrekke. Vi mener likevel at vår analyse gir et godt bilde av spenningene som oppstår ved de forskjellige skjevheitsvinklene.

Forutsetningene som ble benyttet i FEM-analysen er beskrevet i kapittel 3.6.1 og dette gir igjen en god forutsetning for etterprøvbart.

Dataene fra forsøket og FEM-analysen ble videre benyttet for å analysere trykkapasiteten til de forskjellige prøvestykkene. De ble også benyttet som statistisk grunnlag. Forutsetningene for innhenting og tolkning av data fra forsøket er beskrevet i kapittel 3.

Selve forsøksmodellen som danner utgangspunktet for denne rapporten kan også diskuteres. Det er mulig at slisseplater og dybler spiller en rolle for trykkapasiteten til skjøten, ved at de muligens tar opp noe av kreftene. I kapittel 6.4 foreslår derfor gruppen at forsøk med alle komponenter i skjøten undersøkes nærmere.

## 6.2 Diskusjon av resultater

### 6.2.1 Innledning og låste variabler

For å undersøke sammenhengen mellom en skjevhetsvinkel og effektene den har på trykkkapasiteten, ble det først vurdert hvilke variabler som var aktuelle for trevirkets trykkkapasitet. Disse variablene er forklart i kapittel 2.3. For å undersøke skjevhetsvinkelen som fri variabel, ble det forsøkt å holde de andre så like som mulig. Gruppens hypotese var at trykkkapasiteten ville reduseres lineært, med økende skjevhetsvinkel.

For å holde de låste variablene så like som mulig, ble alle prøvestykker tilvirket av en og samme bjelke, i limtrekvalitet GL30c. Når det gjelder fuktighet er det vist i kapittel 2.3.3, at trevirkets egenskaper ikke endres nevneverdig, dersom fuktnivået holdes under 12 %. Ingen av våre målinger viste at fuktnivået var over denne verdien. Denne variabelen anses derfor som låst.

Densiteten på de ulike prøvestykkene er vist i figur 4.11. Målingene viser en generelt liten spredning, og alle bortsett fra en har høyere verdi, enn den karakteriske verdien som er  $390 \text{ kg/m}^3$  (Standard Norge, 2013, s. 23). Densiteten på testene med 0,5- og 1,0 grader var henholdsvis 46,7- og 29,3  $\text{kg/m}^3$  høyere, enn ved 0,0 grader. Det er viktig å påpeke at det er stor usikkerhet i densitetsmålingen utført på denne testserien, da det kun ble utført en måling. Likevel kunne det observeres at densiteten varierte svært lite på de forskjellige testene, ettersom prøvestykkene kom fra samme bjelke. Det anses derfor som lite troverdig at trykkkapasiteten ble påvirket nevneverdig av dette. Derfor blir denne også vurdert som låst.

### 6.2.2 Testserie 0,0 grader

Testserien med 0,0 grader målte trykkkapasitet godt over det som var antatt på forhånd, basert på de karakteristiske verdiene. Trolig var det rene trykkspenninger som forklart i kapittel 2.4.1, som gjorde at brudd oppstod. Dette er ytterligere styrket av FEM-analysen som ble utført for denne testserien. Denne viste at det var nesten enerådende trykkspenninger som oppstod. Figur 5.5 viser de kombinerte spenningene for dette tilfellet, og bruddene forekom mest sannsynlig i det gule området.

### 6.2.3 Testserie 0,5- og 1,0 grader

De første testseriene med skjevheitsvinkel, henholdsvis 0,5- og 1,0 grader, målte høyere trykkapasitet enn forventet. Dette kommer tydelig frem ved gjennomsnittsmålingene, og den tilhørende regresjonslinjen, vist i figur 4.12. En av grunnene til at disse testseriene målte høy trykkapasitet, kan være at det ble gjennomført et relativt lavt antall tester i forsøket. Dette øker sannsynligheten for at de respektive prøvestykkene var av relativt høy kvalitet. En annen mulig forklaring er at det var færre forekomster av kvist i disse prøvestykkene, enn i de andre testseriene. Kombinerte spenninger fra FEM-analysen viser en økning på kun 15 % fra tilfellet med 0,0 grader, som vist i vedlegg H.

De resterende statistiske beregningene viser også at trykkapasiteten opp til 1,0 grader, ble lite redusert. Konfidensintervallet viser en reduksjon i nedre grense på kun 14,6 kN, fra tilfellet med 0,0- til 1,0 grader. 5 %-fraktilen som ble beregnet for de samme tilfellene, viser en reduksjon på 13 kN.

### 6.2.4 Testserier over 1,0 grader

For testseriene med skjevheitsvinkel over 1,0 grader, ble det observert en tydelig reduksjon i trykkapasiteten. Denne reduksjonen er godt fremstilt ved de statistiske beregningene. Beregningen av 5 %-fraktilen viser en reduksjon i trykkapasiteten på 95,9 kN, fra tilfellet med 1,0- til 1,5 grader. For det samme tilfellet, gir konfidensintervallets nedre grense en reduksjon på 67,3 kN.

En forklaring på at bruddene oppstod tidligere i testseriene over 1,0 grader, kan være at det ble knust mye trevirke før stålplaten fikk direkte kontakt. Dette fører til at stålplaten angriper med en eksentrisitet som vist i figur 2.6. Kapittel 2.4.4 påpeker at dette kan føre til at bøyespenninger oppstår, i tillegg til trykkspenninger. Selv om det er snakk om en rett komponent i dette tilfellet, kan det diskuteres i om det også opptrer tverrstrekk på grunn av bøyespenningene, som vist i kapittel 2.4.2. Med dette tatt til betraktning, gir det en indikasjon på at eksentrisiteten reduserer trykkapasiteten.

Gjennom FEM-analysen kommer det frem en økning i henholdsvis trykk- og kombinerte spenninger, for tilfellet med 2,0 grader. Økningen i de kombinerte spenningene ved 2,0 grader var 67 % i forhold til 0,0 grader. Her var trykkspenningen 71 % over karakteristisk verdi. Denne spenningen oppstod nede i det høyre hjørnet på modellen, vist i vedlegg I. FEM-



analysen antyder at det nevnte området er kritisk for trykk- og kombinerte spenninger, for samtlige skjevhetvinkler over 0,0 grader.

For skjevhetvinkler over 2,0 grader, ble prøvestykkene presset til brudd mye tidligere enn for tilfellet med 0,0 grader. Her oppstod det tydelige bruddforløp i form av sprekk i- eller på tvers av fiberretningen. Dette kan bety at bruddet oppstod av andre årsaker enn trykkspenningene. Gjennom FEM-analysen vises det at tverrstrekket ved 4,0 graders skjevhetvinkel ble 1,26 N/mm<sup>2</sup>, noe som overstiger den karakteristiske kapasiteten med 152 %. Skjærspenningene som oppstod, kan trolig ha bidratt til sprekkene langs fiberretningen. Beregning av 5 %-fraktilen gir en verdi på 144,6 kN, for tilfellet med 4,0 grader. Dette tilsvarer en reduksjon på 56,6 % fra 0,0 grader.

### **6.3 Konklusjon**

Hensikten med denne rapporten har vært å undersøke om en skjevhetvinkel i en trykkskjøt i limtre svekker trykkapasiteten. På grunnlag av dette skal rapporten komme med en indikasjon på hva som kan være en akseptabel skjevhetvinkel. Med våre resultater lagt til grunn, har gruppen kommet frem til følgende konklusjon:

Det er en tilnærmet lineær sammenheng mellom skjevhetvinkel og trykkapasiteten i en trykkskjøt i limtre. Trykkapasiteten reduseres lite til og med 1,0 grader, men en skjevhetvinkel større enn dette reduserer trykkapasiteten betydelig. Dette gir en indikasjon på at skjevhetvinkler til og med 1,0 grader, kan anses som akseptable for en løsning med tre mot stålplate.

### **6.4 Forslag til videre arbeid**

Det er flere spenninger og faktorer som spiller inn i en skjøt. Det kunne vært interessant å utføre forsøk med en skjøt, som inneholder alle komponentene. På denne måten blir det også undersøkt effekten av de andre kreftene som oppstår i en slik skjøt.

Videre er det mulig å utføre en mer omfattende FEM-analyse med et program som kan analysere forsøket gjort i denne rapporten med et tidsperspektiv. For eksempel er det mulig å analysere hvilken effekt kvister og uregelmessigheter i trevirket, har på trykkapasiteten.

Eksentrisiteten som oppstår i skjøten er noe som kan undersøkes nærmere. Et forslag kan være å gjøre en vurdering av hvilke «tilleggs-utbøyninger» som bør legges til grunn, i en modell hvor det regnes med 2. ordens effekter.

## 7 Litteraturliste

Ansys. (2018) *Ansys Mechanical APDL*. (Versjon 17.2) [dataprogram].

Ansys. (2018) *Structural analysis for every application and experience level*. Tilgjengelig fra: <https://www.ansys.com/products/structures> (Hentet: 20. april 2018)

Bast, M. og Tveter, J. (2017) *Prosjektering av en nettverksbuebro i tre*. Trondheim: NTNU.

Tilgjengelig fra:

[https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2470895/17633\\_FULLTEXT.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2470895/17633_FULLTEXT.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (Hentet: 20. mars 2018).

Bell, K. (2009) *Elementmetoden, Store Norske Leksikon*. Tilgjengelig fra:

<https://snl.no/elementmetoden> (Hentet: 20. april 2018)

Bell, K. (2017) *Dimensjonering av Trekonstruksjoner*. 1. Utg. Bergen: Fagbokforlaget.

Bell, K., Liven, H. og Norske limtreprodusenters forening. (2015) *Limtreboka*. Bergen: John Grieg Norske limtreprodusenters forening.

Brauti, O. (2011) *Prosjektering og oppføring av kompleks bygningsstruktur i tre ved hjelp av parametrisk DAK og CNC*. Masteroppgave. NMBU. Tilgjengelig fra:

[https://buildingsmart.no/sites/buildingsmart.no/files/2011\\_umb\\_olav\\_brauti.pdf](https://buildingsmart.no/sites/buildingsmart.no/files/2011_umb_olav_brauti.pdf) (Hentet: 22. mars 2018)

Burkart, H. (2016) *Inspeksjonserfaring på trebruer*. (nr. 468). Lillehammer: Statens vegvesen.

Tilgjengelig fra:

[https://www.vegvesen.no/\\_attachment/1378721/binary/1111830?fast\\_title=Nr++468+Inspeksjonserfaring+p%C3%A5+trebruer+region+%C3%B8st.pdf](https://www.vegvesen.no/_attachment/1378721/binary/1111830?fast_title=Nr++468+Inspeksjonserfaring+p%C3%A5+trebruer+region+%C3%B8st.pdf) (Hentet: 03. mai 2018)

Dyken, T. (2017) *Trebruer*. (442). Oslo: Statens Vegvesen. Tilgjengelig fra:

[https://www.vegvesen.no/fag/teknologi/bruer/nyhetsarkiv/\\_attachment/1915659?\\_ts=15cd3c27ac8&fast\\_title=SVV+rapport+422+Trebruer.pdf](https://www.vegvesen.no/fag/teknologi/bruer/nyhetsarkiv/_attachment/1915659?_ts=15cd3c27ac8&fast_title=SVV+rapport+422+Trebruer.pdf) (Hentet: 16. februar 2018)

Løvås, G, G. (2015) *Statistikk for universiteter og høyskoler*. 3. Utg. Oslo: Universitetsforlag AS.

Olsson, U. (2005) *Confidence Intervals for the Mean of a Log-Normal Distribution*.

Tilgjengelig fra:

<https://amstat.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10691898.2005.11910638#.Wuw0Z4huZPY>

(Hentet: 03. mai 2018)

SINTEF Byggforsk (2015) *Trevirke. Treslag og materialeegenskaper*. Tilgjengelig fra:

[https://www.byggforsk.no/dokument/578/trevirke\\_treslag\\_og\\_materialeegenskaper](https://www.byggforsk.no/dokument/578/trevirke_treslag_og_materialeegenskaper) (Hentet:

22. februar 2018)

Standard Norge (1995) *NS-EN 1995-1-1 Prosjektering av trekonstruksjoner Del 1-1:*

*Allmenne regler og regler for bygninger*. Tilgjengelig fra:

<http://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=436137> (Hentet: 20. januar 2018)

Standard Norge (2010) *NS-EN 408 Trekonstruksjoner - Konstruksjonstre og limtre -*

*Bestemmelse av noen fysiske og mekaniske egenskaper*. Tilgjengelig fra:

<http://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=592329> (Hentet: 13. februar 2018)

Standard Norge (2013) *NS-EN 14080 Trekonstruksjoner - Limtre og limt laminert heltre –*

*Krav*. Tilgjengelig fra:

<http://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=866055> (Hentet: 03. mars 2018)

Standard Norge (2016) *NS-EN 14358 Trekonstruksjoner - Beregning og verifisering av*

*karakteristiske verdier*. Tilgjengelig fra:

<http://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=832910> (Hentet 24. februar 2018)

Standard Norge (2017) *NS-EN 301 Lim av fenolplast og aminoplast for bærende*

*trekonstruksjoner - Klassifisering og ytelseskrav*. Tilgjengelig fra:

<http://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=961736> (Hentet: 25. april 2018)

Tveit, P. (2014) *The Network Arch*. Agder: UiA. Tilgjengelig fra:  
<https://home.uia.no/pert/data/The%20Network%20Arch%2019-08-2014.pdf> (Hentet: 01.  
mars 2018)

Øderud, H. T. og Nordahl, R. S. (2017) *Bro, Store Norske Leksikon*. Tilgjengelig fra:  
<https://snl.no/bro> (Hentet: 16. mars 2018)

# Vedlegg

Vedlegg A – Limtype .....	61
Vedlegg B – Kalibrering trykkmaskin .....	68
Vedlegg C – Beregninger av 5 %-fraktil.....	71
Vedlegg D – Beregning av korrelasjon .....	72
Vedlegg E – Beregning av konfidensintervall .....	73
Vedlegg F – Beregning av kontaktareal .....	74
Vedlegg G – Kommandoliste FEM-analyse .....	75
Vedlegg H – Spenningsbilder 1,0 grader .....	78
Vedlegg I – Spenningsbilder 2,0 grader .....	81
Vedlegg J – Spenningsbilder 3,0 grader.....	84
Vedlegg K – Spenningsbilder 4,0 grader .....	87
Vedlegg L – Densitetsberegninger .....	90

# Vedlegg A – Limtype

Produkt information



Casco Adhesives

## MELAMIN-UREA-FORMALDEHYD LIM 1247 MED HÄRDARE 2526

1247 med flytande Härdare 2526 används för tillverkning av bärande träkonstruktioner, fingerskarvning, blocklimningar. Rekommenderas vid limningar inom träbearbetande industri, där stora krav ställs på en ljus limfog samt limfogens vatten- och väderbeständighet.

1247 med Härdare 2526 är godkänt enligt EN 302 del 1 och 4 samt är godkänd enligt EN 301 för tillverkning av bärande träkonstruktioner av NTI, Norge och CTBA i Frankrike.

Limsystemet är också testat och godkänt av MPA, Tyskland enligt DIN 68141 och uppfyller kraven för limning av bärande träkonstruktioner enligt DIN 1052.

1247 med härdare 2526 är också godkänt av BULgb (06/2662), Belgien

1247 med Härdare 2526 är godkänt av ovan nämnda institut att användas vid separat applicering av lim och härdare, men är också godkänt som limblandning. Vid separat applicering får endast Casco Adhesives Separat Strängspridare 6230 användas.

### EGENSKAPER

Typ	1247 Melamin-Urea-Formaldehyd-lim
Leveransform	1247 flytande 2526 flytande
Kulör	1247 vit/opak 2526 vit
Viskositet	Brookfield LVT sp. 4, 12 rpm, vid 25°C 1247 ca 15 000 mPas vid leverans 2526 ca 2 200 mPas vid leverans
Densitet	1247 ca 1250 kg/m <sup>3</sup> 2526 ca 1070 kg/m <sup>3</sup>

Datum: 2006-02-02

Ersätter: 2005-10-04

Orsak till ändring: Godkännande av BULgb, Belgien.

Casco Adhesives AB  
P.O. Box 11538  
SE-100 81 Stockholm  
Sweden  
Phone +46 8 743 40 00  
Fax +46 8 643 16 07  
Org.No. 556004-6311

**1247  
Härdare 2526**

<b>Torrhalt</b>	1247 ca 63%
<b>pH:</b>	1247 ca 10 2526 ca 1,7
<b>Flampunkt</b>	1247 eller 2526 - över 100°C, ej brandfarlig
<b>Fri formaldehyd</b>	1247 ca 0,5%

**ÖVRIGA DATA**

**Limfogens egenskaper** 1247 med Härdare 2526 uppfyller kraven enligt EN 301 (för limtyp I och II, serviceklass 1, 2, 3), EN 391, EN 392 och DIN 68141.

**Lagringstid** 1247 4 mån vid +20°C i väl sluten förpackning.  
2526 4 mån vid +20°C i väl sluten förpackning.

Viskositeten ökar under lagring. Ökningen går snabbare i slutet av lagringstiden. Högre temperatur förkortar lagringstiden. Vid 30°C är lagringstiden ca hälften mot lagring vid 20°C.

**Lagringstemperatur** Lämpligaste lagringstemperatur är ca 20°C för båda produkterna. Lim bör inte lagras i temperaturer under +10°C och härdaren får inte lagras under +18°C. Båda produkterna bör inte lagras över +30°C. Under kortare tid (t ex under transport) kan temperaturer under +10°C och över +30°C accepteras för båda produkterna.

Om produkterna frusit kan de inte tinas upp och användas på grund av inträffade förändringar av deras egenskaper.

**Fuktkänslighet** Ingen.

**BRUKSANVISNING**

**Appliceringsredskap** Casco Adhesives Separat Strängspridare 6230 när lim och härdare appliceras var för sig. I andra fall kan valsspridare eller annan strängspridare användas.

---

Datum: 2008-02-02

Ersätter: 2005-10-04

Orsak till ändring: Godkännande av BUIgb, Belgien.

2(7)



**1247**  
**Härdare 2526**

<b>Blandningsförhållande</b>	1247	100 viktsdelar
	2526	50-100 viktsdelar

Noggrannheten i vikten för härdaren är  $\pm 2$  viktsdel både när lim och härdare appliceras separat och när produkterna appliceras som limblandning.

Vi rekommenderar en användningstemperatur på 17-25°C.

**Trävirkets temperatur**

Lamellerna skall lagras så att de vid limningen håller en lägsta temperatur av 20°C.

**Bruktid**

Bruktiden är den tid under vilken blandningen av lim och härdare kan användas.

Om 1247 och Härdare 2526 används som limblandning är brukstiden vid 20°C ca 15 minuter med 50 viktsdelar härdare och ca 8 minuter med 100 viktsdelar härdare.

När lim och härdare används separat är brukstiden ingen begränsande faktor eftersom lim och härdare inte blandas förrän de appliceras på de träytor som skall sammanfogas.

**Fuktkvot**

8-15%. Vid limträproduktion är 10-12% lämpligast.

**Träbearbetning**

För bästa resultat fordras väl bearbetade ytor som inte legat för länge. Vid limning av limträ krävs att ytorna hyvlas noggrant. Limning måste ske inom 24 timmar efter hyvling.

**Limmängd**

För produktion av limträ rekommenderas en limspridning av ca 300 g/m<sup>2</sup> enkelsidigt. En minskning av limmängden, t.ex. vid mycket korta väntetider, får endast göras tillsammans med Casco Adhesives tekniske rådgivare och beror på produktionsparametrarna för produktionslinjen ifråga. Denna optimering förutsätter att de satta parametrarna följs och att en fortlöpande kontroll av limningskvaliteten görs genom delaminerings-provningar. Vid HF-limningar rekommenderas en limmängd av 250-350 g/m<sup>2</sup> enkelsidigt.  
Vid andra applikationer: 150-300 g/m<sup>2</sup>.

---

Datum: 2006-02-02

Erställer: 2005-10-04

Orsak till ändring: Godkännande avBUTgb, Belgien.

3(7)

**1247**  
**Härdare 2526**

Väl bearbetade ytor och kort väntetid fordrar mindre limmängd än ojämna ytor och lång väntetid. Svårlimmade eller hårda träslag kan erfordra dubbelspridning, ca 250 g/m<sup>2</sup> på varje sida.

**Väntetid**

Väntetid är tiden mellan limspridning och då objektet sätts under press. Väntetiden består av en öppen och en slutna väntetid. Den öppna väntetiden är tiden mellan limmets applicering och hopläggning av delarna som ska limmas.

Den slutna väntetiden är tiden mellan hopläggning av delarna som ska limmas och då presstrycket anbringas. Presstrycket måste anbringas medan limmet fortfarande är klabbigt.

Väntetiden är beroende av limspridning, appliceringsmetod, temperatur och relativ fuktighet i arbetslokalen, träslag, fuktkvot i träet etc. Väntetiden och presstiden förlängs när limspridningen är hög, temperaturen i arbetslokalen är låg, relativa fuktigheten i luften är hög och träet långsamt absorberar vattnet i limmet.

Vid specifika arbetsförhållanden ska vår tekniker rådfrågas.

**Slutna väntetid**

I tabellen nedan anges ungefärlig slutna väntetid i minuter med enkelsidig spridning och separatapplicering för mjuka träslag som t.ex gran. De värden som anges i tabellen är riktvärden.

<b>Enkelsidig limspridning med</b>	<b>400 g/m<sup>2</sup></b>
<b>50 viktsdelar härdare (gran)</b>	
Temperatur	20°C
Maximitid, minuter	80
Minimitid, minuter	5
<b>Enkelsidig limspridning med</b>	<b>400 g/m<sup>2</sup></b>
<b>100 viktsdelar härdare (gran)</b>	
Temperatur	20°C
Maximitid, minuter	50
Minimitid, minuter	5

När lim och härdare används blandade förkortas den slutna väntetiden med ca 25%.

**Öppen väntetid**

Den öppna väntetiden är ungefär hälften av den slutna.

Datum: 2008-02-02

Ersätter: 2005-10-04

Orsak till ändring: Godkännande avBUtgB, Belgien.

4(7)

**1247**  
**Härdare 2526**

**Presstemperatur**

Lägsta presstemperatur är +20°C.

**Presstryck**

Vid limträstillverkning är det erforderliga presstrycket beroende på lamellernas tjocklek och träslag.

Vid separat applicering av lim och härdare måste lägsta presstryck vara 0,8 N/mm<sup>2</sup> oberoende av lamelltjocklek för att säkerställa en jämn blandning mellan lim och härdare och att maximal tjocklek på limfogen är 0,3 mm.

När limblandning används erfordras ett presstryck av 0,6 – 0,8 MPa vid en lamelltjocklek av 33 mm för mjukt trä, medan en lamelltjocklek av 45 mm fordrar 0,8 – 1,0 MPa. Ju tjockare lamell man använder desto högre presstryck krävs. Hårda träslag erfordrar minst 1,0 MPa.

För övriga limningar är det erforderliga presstrycket:  
Min. 0,5 MPa för mjuka träslag.  
Min. 1,0 MPa för hårda träslag

**Presstid**

1247 med Härdare 2526 kan användas från +20°C och uppåt.

Presstiden bestäms bl.a. av limfogens tjocklek och temperatur, luftens och verkets temperatur. Nedanstående tabell är vägledande:

**För lim:härdare 100:50 viktsdelar**

<u>Limfogens temperatur</u>	<u>Presstid</u>
20°C	3¼ tim.
30°C	1¼ tim.

**För lim:härdare 100:100 viktsdelar**

<u>Limfogens temperatur</u>	<u>Presstid</u>
20°C	3 tim.
30°C	1¼ tim.

De givna presstiderna fastställs i EN 302-6 och hänför sig till pressning av raka balkar med en fuktkvot av 12%. Vid limning av böjda balkar eller av trä med högre fukthalt måste presstiderna förlängas.

Datum: 2006-02-02

Ersätter: 2005-10-04

Orsak till ändring: Godkännande av BÜTgb, Belgien.

5(7)

**1247**  
**Härdare 2526**

Då man har en tunn limfog (ca 0,1 mm) eller mindre limmängd (ca 250 g/m<sup>2</sup>) kan oftast presstiderna förkortas än som nämnts ovan. En förkortning av presstiderna kan endast ske i samråd med vår tekniske rådgivare, med nedan angivna ledtider,

**För lim:härdare 100:50 viktsdelar**

<u>Limfogens temperatur</u>	<u>Presstid</u>
20°C	2 tim.
30°C	1 tim

**För lim:härdare 100:100 viktsdelar**

<u>Limfogens temperatur</u>	<u>Presstid</u>
20°C	65 minuter
30°C	45 minuter

Presstiderna relateras till produktionen av raka balkar med en fuktkvot på ca 12 %. Vid limning av böjda balkar eller av trä med högre fukthalt eller större limmängd måste presstiderna förlängas. Detta sker i samråd med vår tekniske rådgivare.

Då presstiderna är kortare än det som fastställts i EN 302-6 måste limfogens maximala tjocklek kontrolleras och limningskvaliteten skall fastställas genom delaminerings-test inom ramen för den interna produktionskontrollen.

Vid temperaturer över 30°C ges minimipresstiden av vår tekniske rådgivare i varje enskilt fall.

**Efterhärdning**

Efter presstidens slut har limfogen en sådan hållfasthet att vidarebearbetning kan ske. Den fulla hållfastheten uppnås först efter en viss efterhärdningstid som är beroende av den vid tillverkningen använda presstiden,

presstemperaturen samt den temperatur som använts vid efterhärdningen.

Om presstemperaturen i fogen är 20°C kan den erforderliga efterhärdningstiden vid 20°C uppgå till 3 dygn. Vid efterhärdning vid högre temperaturer än 20°C ändras den erforderliga efterhärdningstiden och måste ovillkorligen anges av vår tekniske rådgivare.

---

Datum: 2008-02-02

Ersätter: 2005-10-04

Orsak till ändring: Godkännande avBUTgb, Belgien.

6(7)

1247  
Härdare 2526

**Rengöring**

Det är lätt att tvätta ur Casco Adhesives Separat Strängsridare 6230 innan lim och härdare har torkat. Redskap tvättas med varmt vatten innan limmet hunnit härda.

**HÄLSA OCH MILJÖ**

Limmet innehåller små mängder fri formaldehyd och härdaren myrsyra. Lim och härdare får därför inte komma i kontakt med hud och ögon. Lim och härdare på huden tvättas bort med tvål och vatten.

För information i miljöfrågor vid användning av produkten samt hantering av lim/härdarspill och limtvättvatten refererar vi till **Säkerhetsdatabladet**, avsnitten "Fysikaliska och Kemiska egenskaper" samt "Avfallshantering" eller kontaktar ni Casco Adhesives miljörådgivare.

Före användning av produkten skal Säkerhetsdatabladet finnas tillgängligt och informationen i detta noga beaktats.

**ENDAST FÖR YRKESMÄSSIG ANVÄNDNING.**

**FÖRE ANVÄNDNING AV DENNA PRODUKT TILL ANNAT ÄNDAMÅL ÄN OVAN, BER VI ER KONTAKTA OSS.**

Informationerna är baserade på laboratorieutredningar och lång praktisk erfarenhet. Uppgifterna är orienterande och avser att hjälpa förbrukaren att finna den lämpligaste arbetsmetoden. Eftersom förbrukarens produktionsförhållanden ligger utanför vår kontroll, kan vi inte ansvara för arbetsresultat påverkade av lokala omständigheter. I varje enskilt fall rekommenderas provning och kontinuerlig kontroll.

---

Datum: 2008-02-02

Ersätter: 2005-10-04

Orsak till ändring: Godkännande av BÜTgb, Belgien.

7(7)

# Vedlegg B – Kalibrering trykkmaskin



## Calibration Certificate

Issued by an Accredited Calibration Laboratory



Date  
2017-10-30

Calibration Certificate number  
5375-F-R1

Page  
1 of 3

### Calibration of force measuring system

<b>Customer</b>	Name	Norsk Treteknisk Institutt		
	Department	Material Lab		
	Contact	Kjell Ingar Myrdal		
	Address	Forkningsveien 3B		
	Postal address	NO-0371 OSLO		
<b>System</b>	System	Wolp 500kN		
	System ID	NTI 3012		
	Location	Provhall		
	Manufacturing year	0		
	Conditioner	FT 60	Serial no	L/O 2 - J2A
	Channel	Force	Serial no	Com
	Readout	FT60		
<b>Measuring instrument</b>	Description	L/C 500kN, NTI 3007 T Å r h		
	Manufacturer	MTS Systems		
	Manufacturing year	1998	Serial no	415370
	Model	661.23F-01		
<b>Type of readout:</b>	Digital display			
<b>Standard</b>	SS-EN ISO 7500-1:2004			
<b>MTS Procedure:</b>	FS-CA 2122		Service order: 810021995	
<b>Range</b>	<b>Full scale</b>	500 kN		
	<b>Range to which the assessment applies</b>	100	to 0 kN to 500 kN	compression tension
<b>Classification</b> (with Total Uncertainty taken into account)	<b>As Found</b>	Compression	Class	N/A
		Tension	Class	1
	<b>As Adjusted</b>	Compression	Class	N/A
		Tension	Class	N/A

MTS Systems Norden AB

Jan Börjesson

Issued by and responsible for calibration

2017-10-18

Calibration date

This report may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the issuing laboratory.



# Calibration Certificate

Issued by an Accredited Calibration Laboratory



**Date**  
2017-10-30

**Calibration Certificate number**  
5375-F-R1

**Page**  
3 of 3

**Calibration equipment**

Force proving instrument

Interface 500kN L/C

LC255194

Recalibrate before (yyyy-mm-dd)
2018-07-06

**ACS**

Interface 9840 Low level amp

DI90118

2018-08-01
------------

DMM Fluke 189

DM79530252

2018-08-01
------------

Bridge simulator

ST1361

2018-07-28
------------

Temperature probe

TT81520007

2018-07-28
------------

**Uncertainty**

The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor  $k=2$ , which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%. The standard uncertainty of measurement has been determined in accordance with the EA Publication EA4/02.

The long term stability of the calibrated object is not included in the reported expanded uncertainty of measurement.

**Terminology**

Symbols and their meanings

Symbol	Unit	Meaning
$a$	%	Relative resolution of the force indicator of the testing machine
$b$	%	Relative repeatability error of the force-measuring system of the testing machine
$f_0$	%	Relative zero error of the force-measuring system of the testing machine
$q$	%	Relative accuracy error of the force-measuring system of the testing machine
$r$	kN	Resolution of the force indicator of the testing machine
$v$	%	Relative reversibility error of the force-measuring system of the testing machine
$F$	kN	True force indicated by the force-proving instrument with increasing test force
$F_1, F_2, F_3$	kN	Measured value test force
$F_r$	kN	Average test force

**Calibration results only applies to the calibrated items**

**Traceable**

Accredited calibration of measuring and test equipment assures that the measurements are traceable to national and international standards.  
 Reference loadcells and all other equipment are calibrated by MTS Metrology (Mpls, USA), accredited by A2LA with certificate no: 1044.01



## Vedlegg C – Beregninger av 5 %-fraktil

Beregning for 5%-fraktil for 0,0 grader:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln m_i \rightarrow \frac{\ln(373,43) + \ln(400,53) + \ln(396,81)}{3} = 5,97$$

$$s_y = \max \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln m_i - \bar{y})^2} \\ 0,05 \end{array} \right.$$

$$\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\frac{(\ln(373,43) - 5,97)^2 + (\ln(400,53) - 5,97)^2 + (\ln(396,81) - 5,97)^2}{3-1}} = 0,038 \\ 0,05 \end{array} \right.$$

$\rightarrow 0,05$

$$k_s(n) = \frac{6,5n + 6}{3,7n - 3} \rightarrow \frac{6,5 \times 3 + 6}{3,7 \times 3 - 3} = 3,15$$

$$m_{k,\log} = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) \rightarrow e^{(5,97 - 3,15 \times 0,05)} = 333,23$$

## Vedlegg D – Beregning av korrelasjon

Beregning av korrelasjon av gjennomsnittet:

$$s_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = (0,0 - 2,0)^2 + \dots + (4,0 - 2,0)^2$$

$$s_{xx} = 15,0$$

$$s_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = (390,26 - 326,59)^2 + \dots + (248,79 - 326,59)^2$$

$$s_{yy} = 24861,44$$

$$s_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) =$$

$$\rightarrow (0,0 - 2,0)(390,26 - 326,59) + \dots + (4,0 - 2,0)(248,79 - 326,59)$$

$$s_{xy} = -534,62$$

$$r = \frac{s_{xy}}{\sqrt{s_{xx}}\sqrt{s_{yy}}} = \frac{-534,62}{\sqrt{15,0}\sqrt{24861,44}} = -0,87$$

Beregning av korrelasjon av 5 %-fraktillet:

$$s_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = (0,0 - 2,0)^2 + \dots + (4,0 - 2,0)^2$$

$$s_{xx} = 15,0$$

$$s_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = (333,23 - 245,77)^2 + \dots + (144,60 - 245,77)^2$$

$$s_{yy} = 34158,48$$

$$s_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) =$$

$$\rightarrow (0,0 - 2,0)(333,23 - 245,77) + \dots + (4,0 - 2,0)(144,60 - 245,77)$$

$$s_{xy} = -620,30$$

$$r = \frac{s_{xy}}{\sqrt{s_{xx}}\sqrt{s_{yy}}} = \frac{-620,30}{\sqrt{15,0}\sqrt{34158,48}} = -0,86$$

# Vedlegg E – Beregning av konfidensintervall

Beregning av konfidensintervall for 0,0 grader:

$$\bar{Y} + \frac{s^2}{2} \pm z \sqrt{\frac{s^2}{n} + \frac{s^4}{2(n-1)}}$$

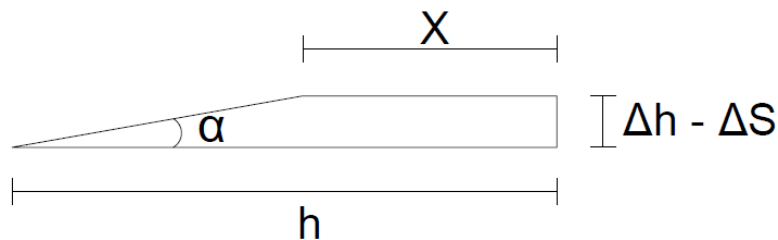
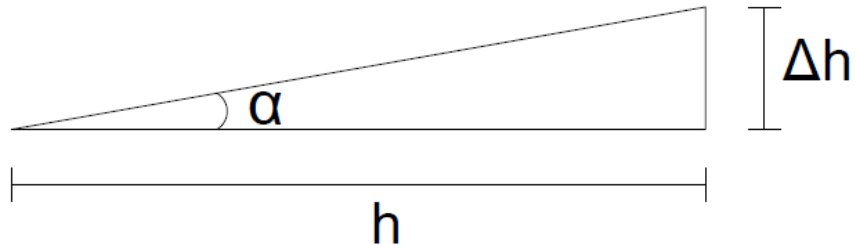
$$\emptyset G, \ln = 5,97 + \frac{0,05^2}{2} + 1,645 \sqrt{\frac{0,05^2}{3} + \frac{0,05^4}{2(3-1)}} = 6,018$$

$$\emptyset G = e^{6,018} = 411,07$$

$$NG, \ln = 5,97 + \frac{0,05^2}{2} - 1,645 \sqrt{\frac{0,05^2}{3} + \frac{0,05^4}{2(3-1)}} = 5,923$$

$$NG = e^{5,923} = 373,79$$

## Vedlegg F – Beregning av kontaktareal



Vinkel	h	Δ h	Δ s	x
1.0	169	2.9499	2.2361	150,9
2.0	169	5.9016	3.6718	105.1
3.0	169	8.8569	5.1673	98.6
4.0	169	11.8176	6.6031	94.4

Δ s er gjennomsnittsflytningen for alle tre testene for den gitte vinkelen, gitt en kraft på 200 000 N.

x er lengden av kontaktarealet.

$$\Delta h = h \cdot \tan(\alpha)$$

$$x = h - \left( \frac{\Delta h}{\tan(\alpha)} - \frac{\Delta s}{\tan(\alpha)} \right)$$

# Vedlegg G – Kommandoliste FEM-analyse

For 0.0 grader

```
Preferences → Structural
/units,si
Et,1,186
Blc4,0,-0.33,0.169,0.33,0.055
Esize,0.005
Vmesh,all
Nsel,s,loc,y,-0.33,-0.331
D,all,all
Allsel
Nsel,s,loc,y,0.00,0.01
Picked entities → unselect nodes
→ (Fjerne ytterranden)
F,all,fy,-193.61 (1033 noder)
Allsel
```

For 1.0 grader

```
Preferences → structural
/units,si
Et,1,186
K,1,0,0,0
K,2,0,0,0.055
K,3,0.01809,0.0007138,0
K,4,0.01809,0.0007138,0.055
K,5,0,-0.33,0
K,6,0.01809,-0.33,0
K,7,0.01809,-0.33,0.055
K,8,0,-0.33,0.055
v,1,2,4,3,5,8,7,6
k,9,0.169,0.0007138,0.055
k,10,0.169,0.0007138,0
k,11,0.169,-0.33,0.055
k,12,0.169,-0.33,0
v,3,4,9,10,6,7,11,12
lsel,s,loc,z,0.001,0.05499
lplot
lesize,all,,,11
allsel
esize,0.005
vmesh,all
asel,s,area,,11
asel,a,area,,6
nsla,r,1
d,all,all
allsel
asel,s,area,,7
nsla,r,1
Select → entities → unselect nodes
→ (Fjerne ytterranden)
f,all,fy,-254.77 (785 noder)
allsel
modmsh,detach
nummrg,node
```

For 2.0 grader

```
Preferences → Structural
/units,si
Et,1,186
K,1,0,0,0
K,2,0,0,0.055
K,3,0.06385,0.0022298,0.055
K,4,0.06385,0.0022298,0
K,5,0,-0.33,0
K,6,0,-0.33,0.055
K,7,0.06385,-0.33,0.055
K,8,0.06385,-0.33,0
V,1,2,3,4,5,6,7,8
K,9,0.169,0.0022298,0
K,10,0.169,0.0022298,0.055
K,11,0.169,-0.33,0.055
K,12,0.169,-0.33,0
V,4,3,10,9,8,7,11,12
lsel,s,loc,z,0.001,0.05499
lplot
lesize,all,,11
allsel
esize,0.005
vmesh,all
asel,s,area,,11
asel,a,area,,6
nsla,r,1
d,all,all
allsel
asel,s,area,,7
nsla,r,1
Select → entities → unselect nodes
→ (Fjerne ytterranden)
f,all,fy,-302.57 (661 noder)
allsel
modmsh,detach
nummrg,node
```

For 3.0 grader

```
Preferences → structural
/units,si
et,1,186
K,1,0,0,0
K,2,0,0,0.055
kplot
K,3,0.0704,0.0036696,0
K,4,0.169,0.0036696,0
K,5,0.169,0.0036696,0.055
K,6,0.0704,0.0036696,0.055
k,7,0,-0.33,0
k,8,0,-0.33,0.055
k,9,0.0704,-0.33,0
k,10,0.0704,-0.33,0.055
k,11,0.169,-0.33,0
k,12,0.169,-0.33,0.055
v,7,8,10,9,1,2,6,3
kplot
v,9,10,12,11,3,6,5,4
vplot
lsel,s,loc,z,0.001,0.05499
lplot
lesize,all,,11
allsel
esize,0.005
vmesh,all
eplot
asel,s,area,,1
asel,a,area,,7
nsla,r,1
d,all,all
allsel
asel,s,area,,11
nsla,r,1
Select → entities → unselect nodes
→ (Fjerne ytterranden)
f,all,fy,-333.89 (599 noder)
allsel
modmsh,detach
nummrg,node
```

For 4.0 grader

Preferences → Structural

/units,si

Et,1,186

K,1,0,0,0

K,2,0,0,0.055

K,3,0.07457,0.0052145,0.055

K,4,0.07457,0.0052145,0

K,5,0,-0.33,0

K,6,0,-0.33,0.055

K,7,0.07457,-0.33,0.055

K,8,0.07457,-0.33,0

K,9,0.169,0.0052145,0.055

K,10,0.169,0.0052145,0

K,11,0.169,-0.33,0.055

K,12,0.169,-0.33,0

V,1,2,3,4,5,6,7,8

v,4,3,9,10,8,7,11,12

lsel,s,loc,z,0.001,0.05499

lplot

lesize,all,,,11

allsel

esize,0.005

vmesh,all

eplot

asel,s,area,,6

asel,a,area,,11

nsla,r,1

d,all,all

allsel

asel,s,area,,7

nsla,r,1

Select → entities → unselect nodes

→ (Fjerne ytterranden)

f,all,fy,-352.11 (568 noder)

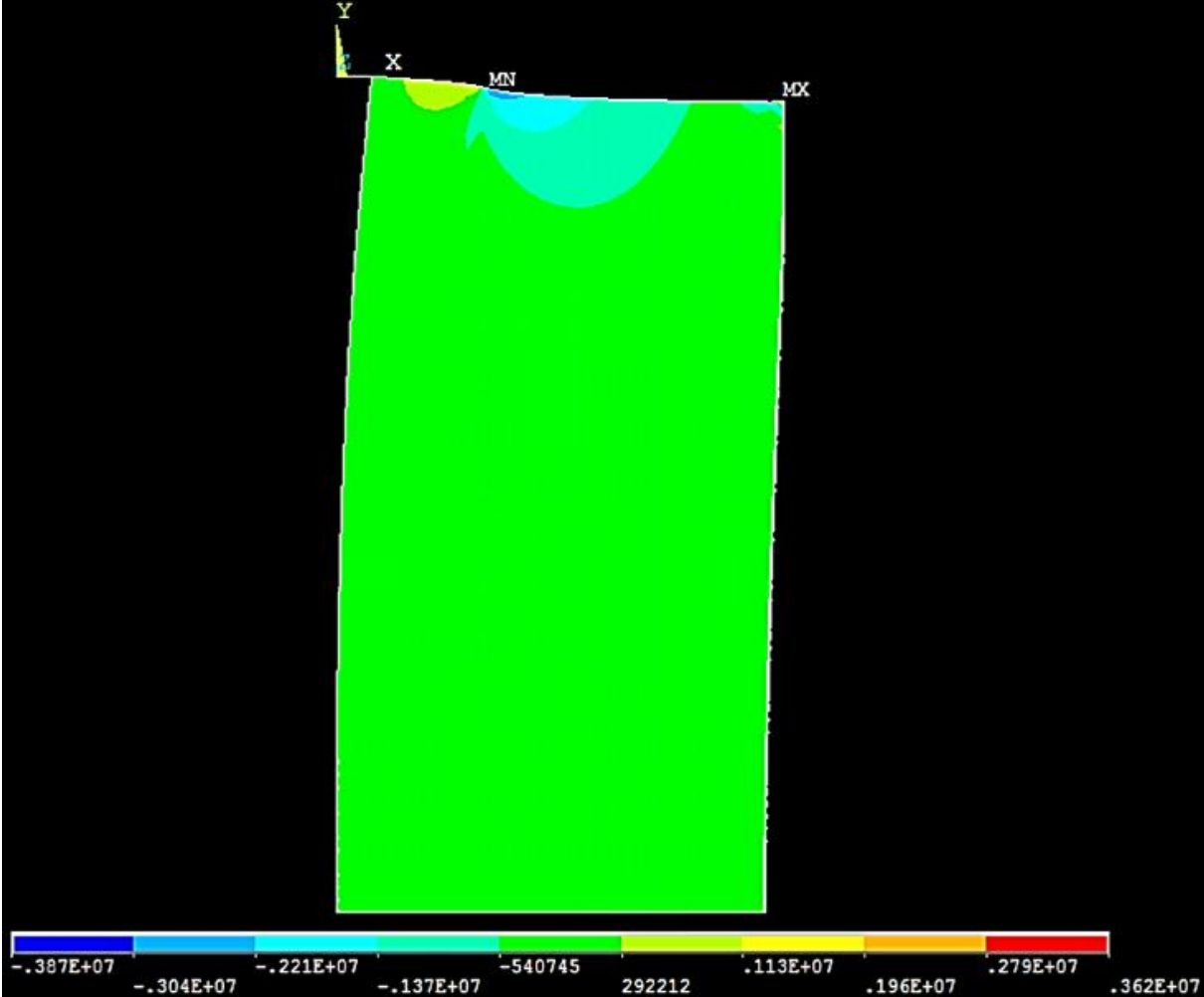
allsel

modmsh,detach

nummrg,node

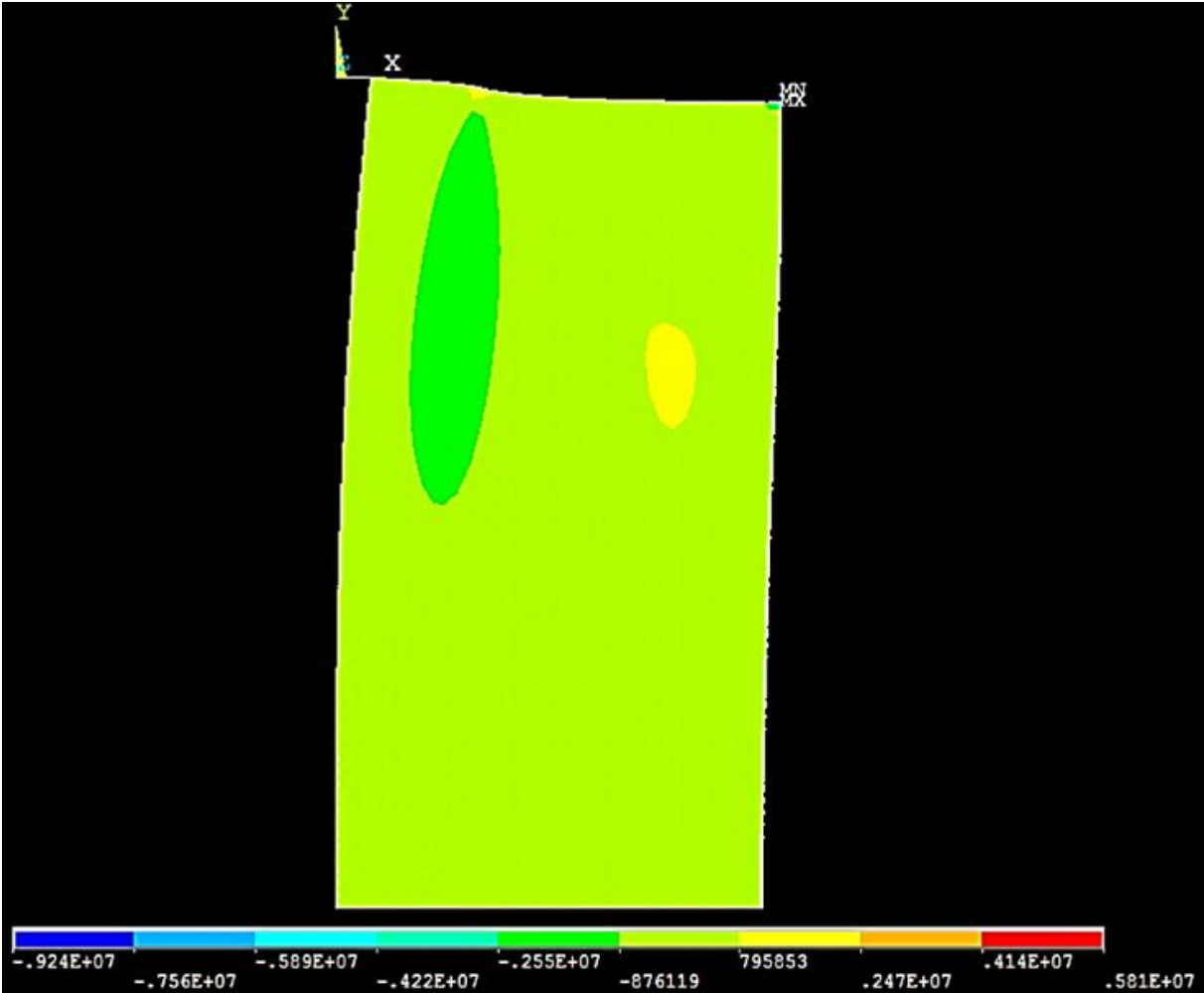
# Vedlegg H – Spenningsbilder 1,0 grader

Tverrstrekkspenning:

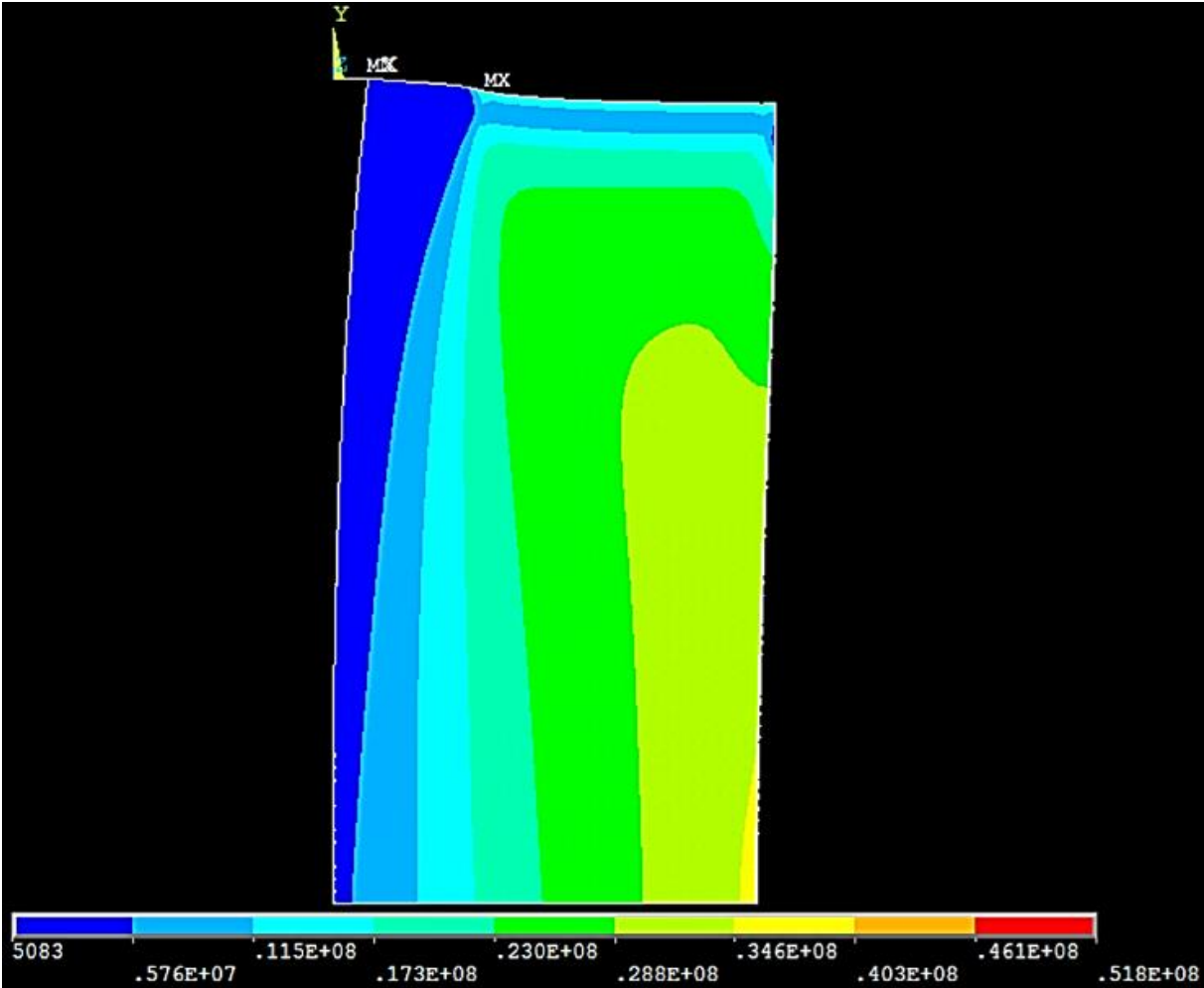




Skjærspenning:

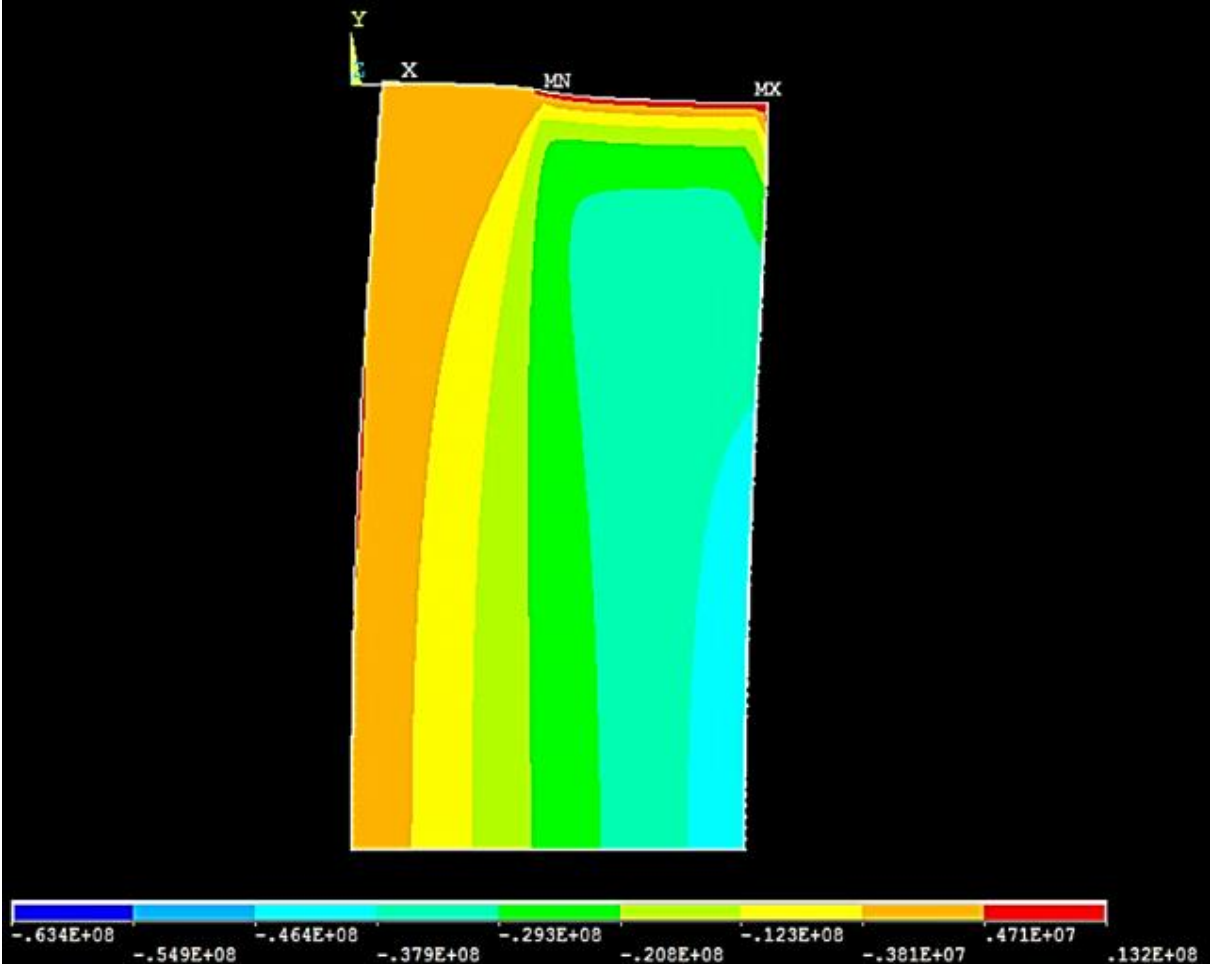


**Kombinerte spenninger:**

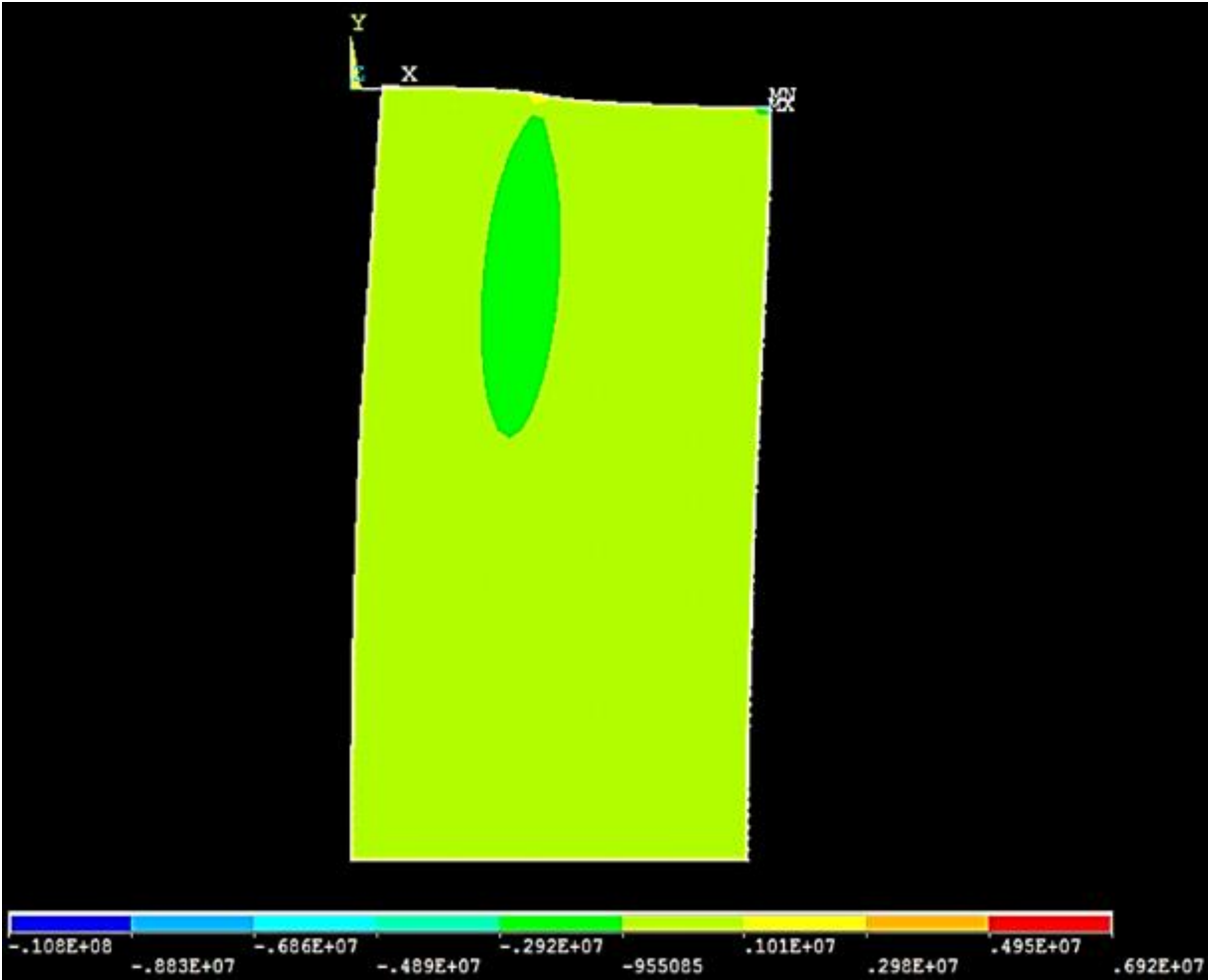


# Vedlegg I – Spenningsbilder 2,0 grader

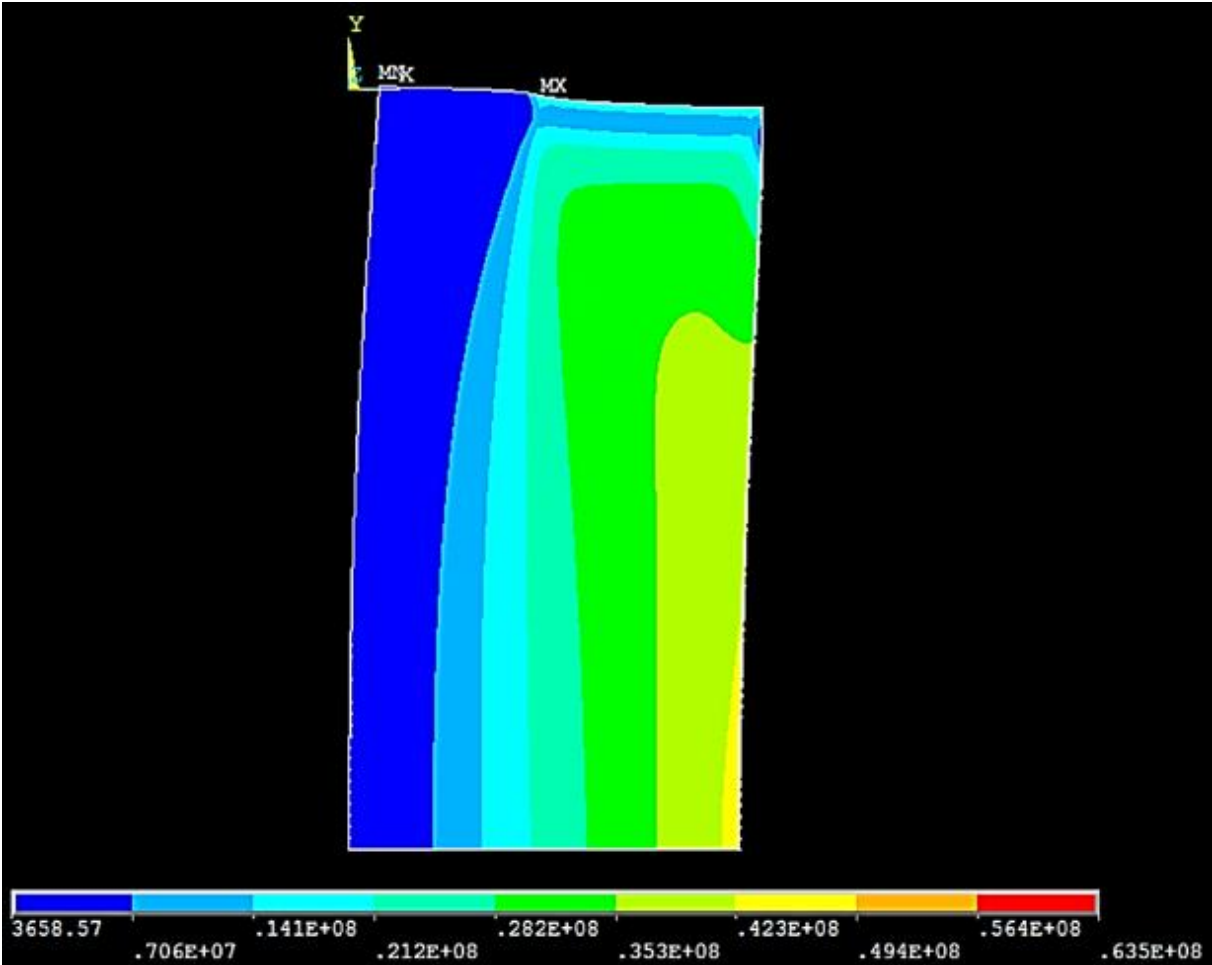
Trykkspenning:



Skjærspenning:

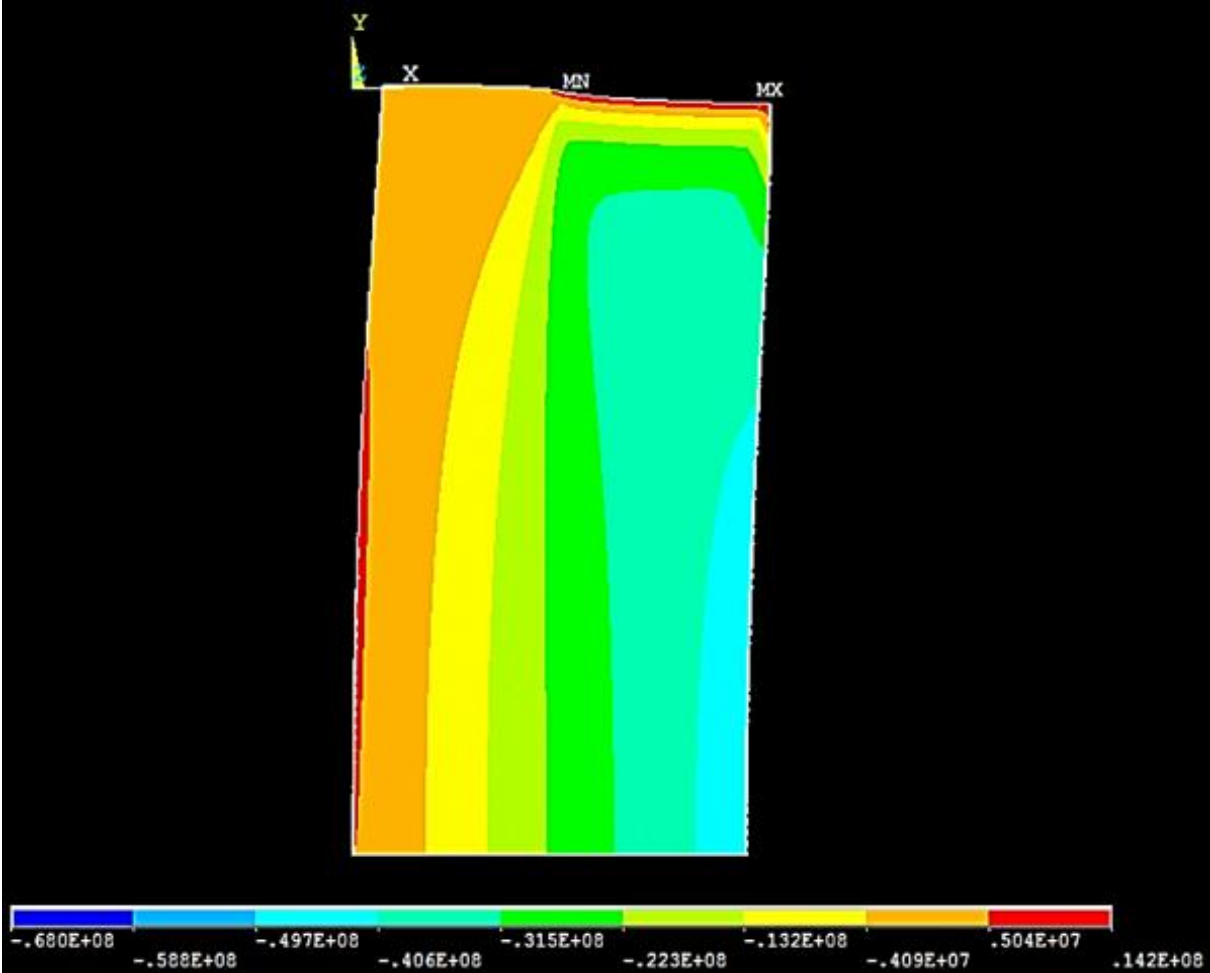


Kombinerte speninger:

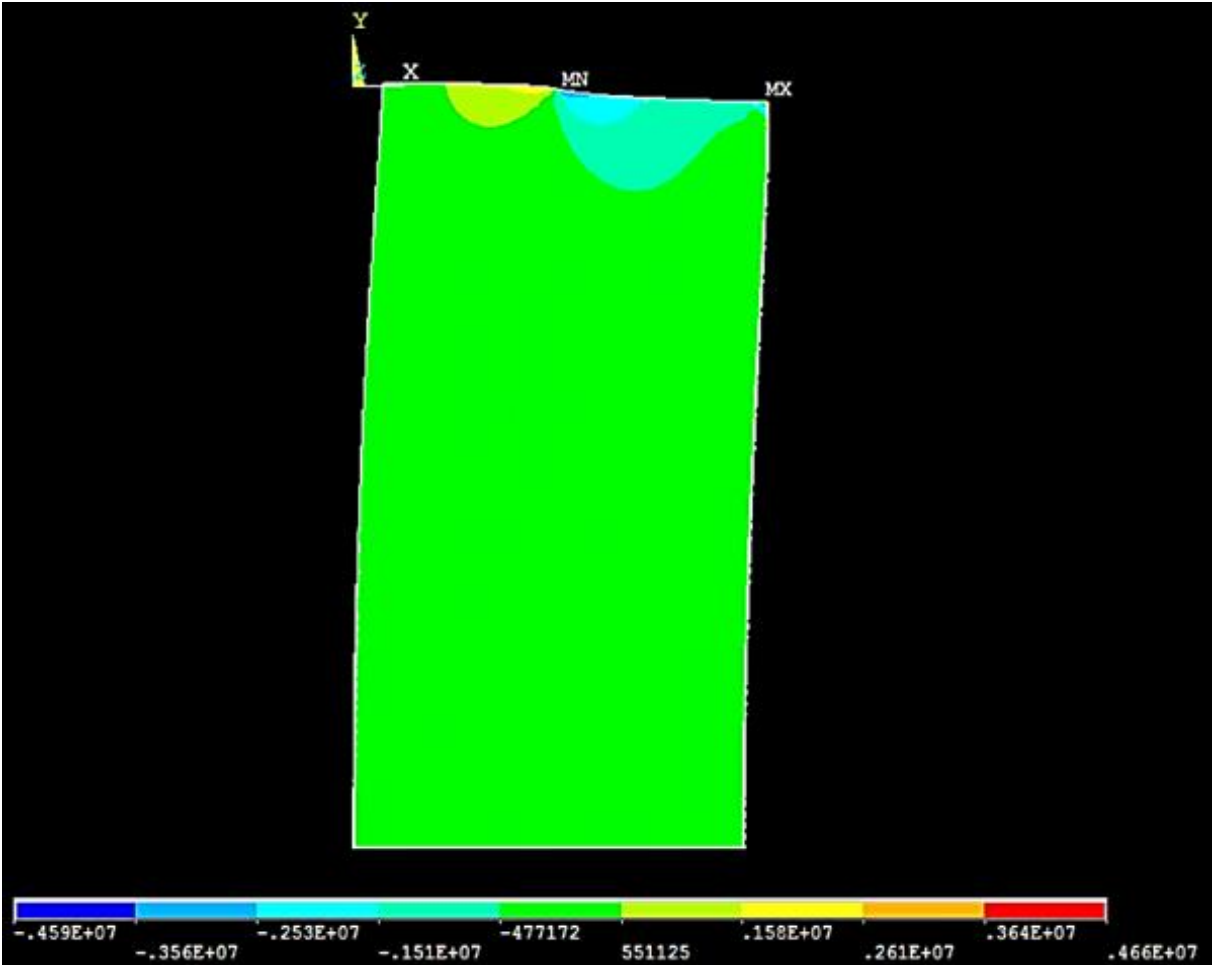


# Vedlegg J – Spenningsbilder 3,0 grader

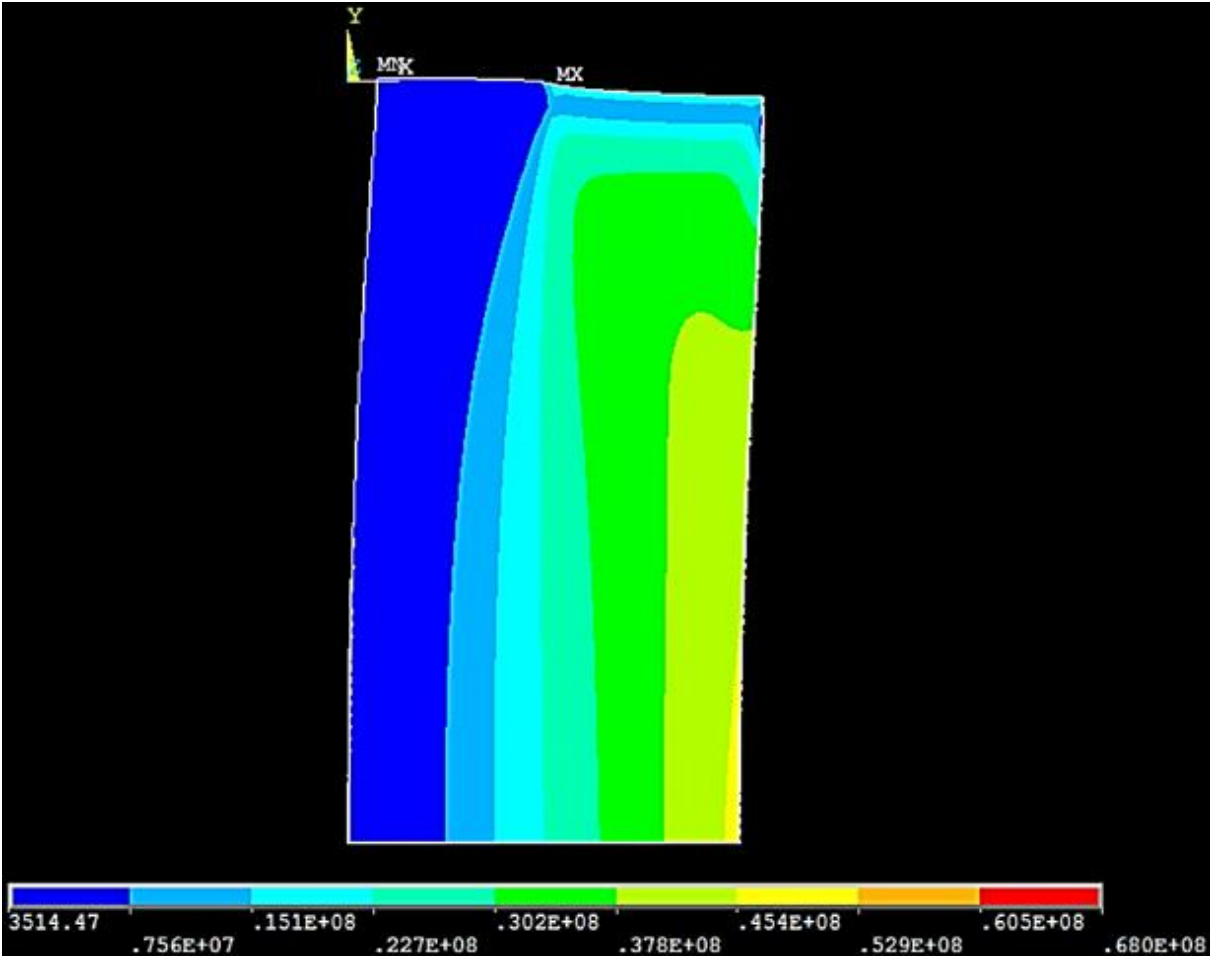
Trykkspenninger:



Tverrstrekkspenning:



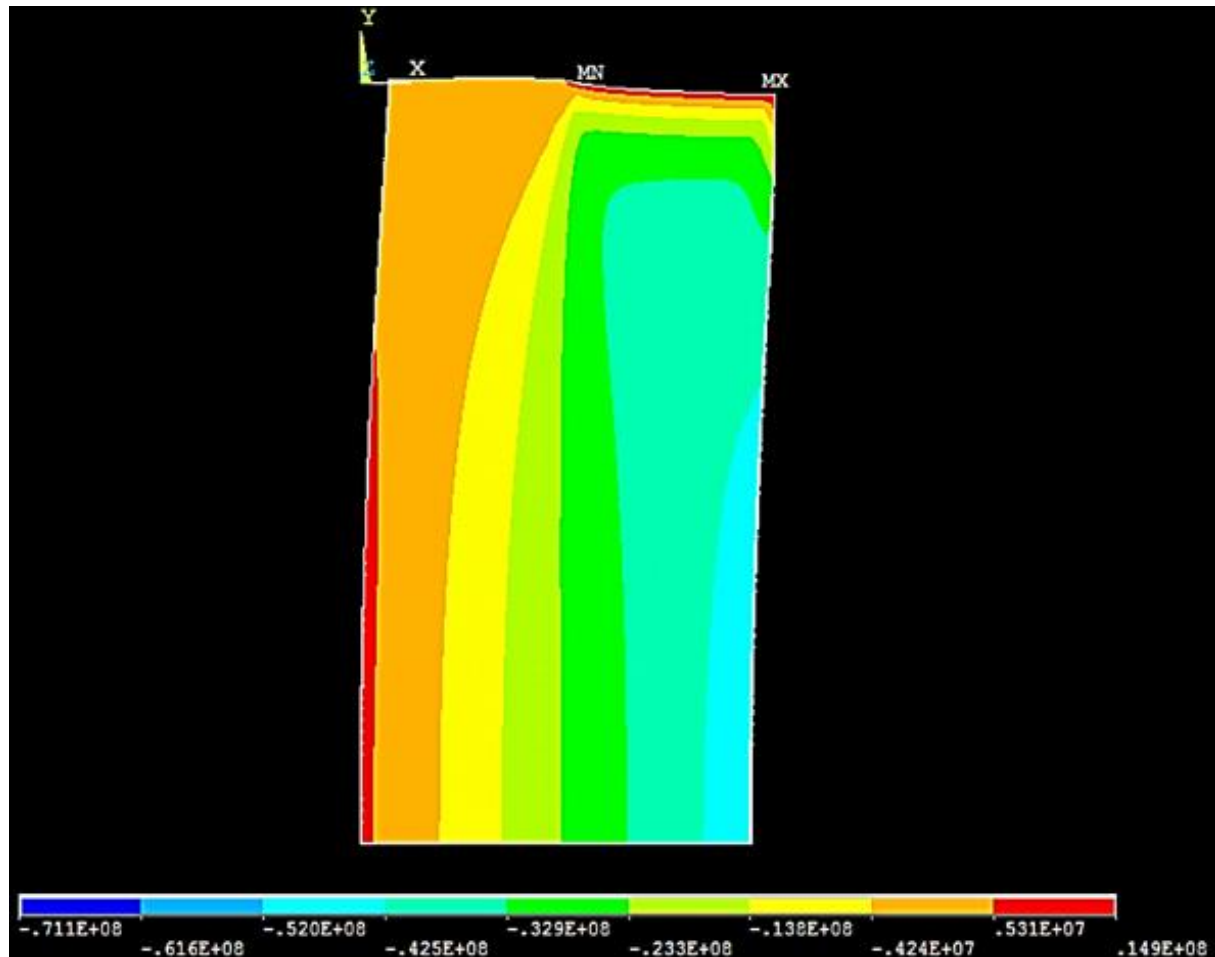
Kombinerte spenninger:



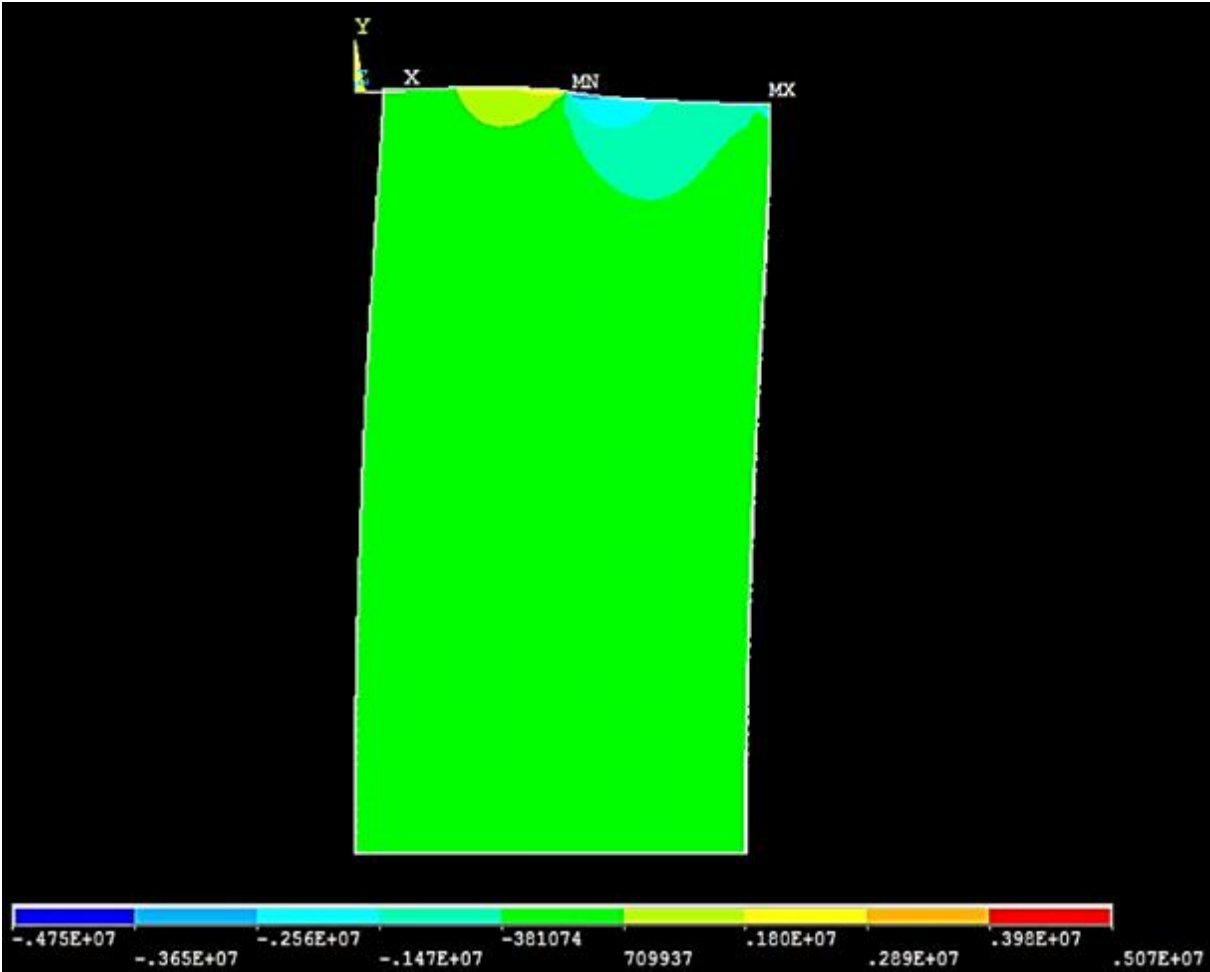


# Vedlegg K – Spenningsbilder 4,0 grader

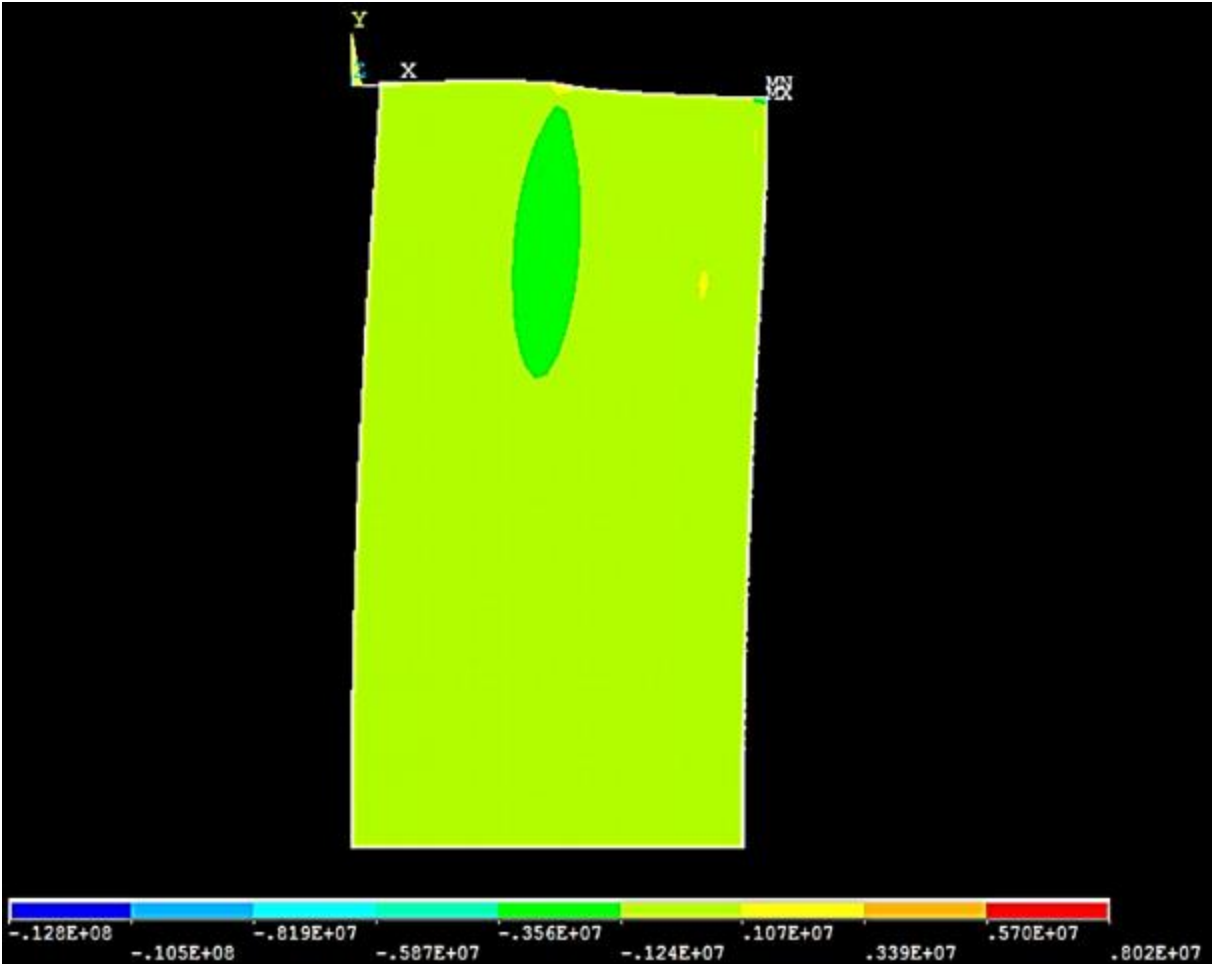
Trykkspenning:



Tverrstrekkspenning:



Skjærspenning:



# Vedlegg L – Densitetsberegninger

Norsk Treteknisk Institutt Mekanisk Prøvelaboratorium		PM 809 Fila navn: PM 809 v2.r12z		Treslag:	Gran											
Densitetsberegning for forskjellige treslag		Revidert av: PL Utarbeidet av: PL		Botanisk navn:	<i>Picea abies</i>											
Utgave: 2 Gyldig fra: 2014-11-30		Godkjent av: TS		Total volumkrymping [%]:	12											
Indekser angir aktuelt fuktighetsnivå [%]		Revidert av: FD		Fibermetningspunkt [%]:	32											
Måleverdier inn		Beregnes														
Prøve nr.	m <sub>n</sub> g	m <sub>0</sub> g	l <sub>a</sub> mm	b <sub>a</sub> mm	h <sub>a</sub> mm	u %	V <sub>a</sub> cm <sup>3</sup>	m <sub>q</sub> /V <sub>a</sub> kg/m <sup>3</sup>	m <sub>q</sub> /V <sub>12</sub> kg/m <sup>3</sup>	m <sub>q</sub> /V <sub>15</sub> kg/m <sup>3</sup>	m <sub>q</sub> /V <sub>12</sub> kg/m <sup>3</sup>	m <sub>q</sub> /V <sub>0</sub> kg/m <sup>3</sup>	m <sub>q</sub> /V <sub>a</sub> kg/m <sup>3</sup>	m <sub>q</sub> /V <sub>20</sub> kg/m <sup>3</sup>	m <sub>20</sub> /V <sub>20</sub> kg/m <sup>3</sup>	
1																
2																
3	1322,8	1211,0	332,0	55,0	169,0	9,2	3085,9	392	388	384	435	407	429	377	453	
4	1515,7	1384,3	331,0	55,0	169,0	9,5	3076,6	450	446	441	499	467	493	433	519	
5	1488,0	1349,6	331,0	55,0	169,0	10,3	3076,6	439	436	431	488	456	484	423	508	
6	1445,1	1305,9	331,0	55,0	169,0	10,7	3076,6	424	422	418	473	442	470	410	492	
7	1411,0	1269,4	333,0	55,0	169,0	11,2	3095,2	410	409	404	458	428	456	397	476	
8	1414,4	1277,1	333,0	55,0	169,0	10,8	3095,2	413	411	406	460	430	457	399	479	
9	1485,9	1343,3	333,0	55,0	169,0	10,6	3095,2	434	432	427	484	452	480	419	503	
10	1460,2	1321,5	332,0	55,0	169,0	10,5	3085,9	428	426	421	477	446	473	413	496	
11	1387,3	1262,7	332,0	55,0	169,0	9,9	3085,9	409	406	401	455	425	450	394	473	
12	1450,9	1316,8	332,0	55,0	169,0	10,2	3085,9	427	424	419	475	444	470	412	494	
13	1440,5	1311,4	331,0	55,0	169,0	9,8	3076,6	426	423	418	474	443	468	411	493	
14	1400,0	1272,2	331,0	55,0	169,0	10,0	3076,6	414	411	406	460	430	455	399	478	
15	1414,6	1287,2	331,0	55,0	169,0	9,9	3076,6	418	415	411	465	435	460	403	484	
16	1422,5	1292,4	332,0	55,0	169,0	10,1	3085,9	419	416	411	466	435	461	404	485	
17	1451,4	1315,0	332,0	55,0	169,0	10,4	3085,9	426	424	419	474	444	470	411	494	
18	1469,6	1335,5	332,0	55,0	169,0	10,0	3085,9	433	430	425	481	450	476	417	501	
19	1471,3	1343,6	330,0	55,0	169,0	9,5	3067,4	438	434	429	486	454	480	421	506	
20	1447,8	1309,7	329,0	55,0	169,0	10,5	3058,1	428	426	421	477	446	473	414	496	
21	1451,0	1324,8	329,0	55,0	169,0	9,5	3058,1	433	429	424	481	449	474	417	500	
22	1361,9	1241,7	336,0	55,0	169,0	9,7	3123,1	398	394	390	441	413	436	383	459	
23	1461,2	1328,3	336,0	55,0	169,0	10,0	3123,1	425	422	417	473	442	468	410	492	
24	1433,1	1297,2	336,0	55,0	169,0	10,5	3123,1	415	413	408	463	432	459	401	481	
25	1346,5	1224,3	333,0	55,0	169,0	10,0	3095,2	396	393	388	440	411	435	381	457	
26	1453,8	1315,2	333,0	55,0	169,0	10,5	3095,2	425	423	418	473	443	470	410	492	
27	1461,6	1326,8	332,0	55,0	169,0	10,2	3085,9	430	427	422	478	447	474	415	498	
28																
29																
30																
Middelverdi						10,1	3087	422	419	414	469	439	465	407	488	
Standard avvik								13,9	13,8	13,7	15,5	14,5	15,4	13,4	16,1	
Karakteristisk verdi (normal)								#VERDI!	#VERDI!	#VERDI!	#VERDI!	#VERDI!	#VERDI!	#VERDI!	#VERDI!	
Testing utført av:											Dato:					