

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP



Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet ved Universitet for Miljø- og Biovitenskap (UMB) ved Instituttet for Matematiske realfag og Teknologi (IMT) i samarbeid med Norsk Treteknisk Institutt. Masteroppgaven tilsvarer et arbeidsomfang på 30 studiepoeng.

Oppgaven bygger videre på arbeidet Alvdis Hardeng gjennomførte i sin masteroppgave *"Bæreevne for punklast av bjelker og svill under trykk tvers på fiber"* våren 2011 (Hardeng, 2011). Veilederen vår ved UMB er Nils Ivar Bovim. Høsten 2011 fikk Bovim forespørsel fra Norsk Treteknisk Institutt om et videre arbeid i problemstillingen med trykk tvers på fiber. Målet var da først og fremst å få et bedre statistisk grunnlag for arbeidet som ble gjort i Alvdis Hardengs masteroppgave. Dette gav utgangspunktet for denne masteroppgaven.

Å skrive masteroppgave har vært spennende og utfordrende og vi merket tidlig at selve problemstillingen trykk tvers på fiber er noe som engasjerer mange og har blitt en stor utfordring for treindustrien. Å få være med på referansegruppemøte "Eurocode 5 – en utfordring for treindustrien" var interessant og forstod at implementeringen av den Europeiske standarden har ført til en del utfordringer.

Vi ønsker og takke alle som har bidratt i arbeidet med masteroppgaven. Særlig til vår veileder ved UMB Nils Ivar Bovim som kan det meste som er verdt å vite om trevirke og trekonstruksjoner og er og har vært i arbeidet med masteroppgaven en stor ressursperson som vi ikke kunne vært foruten. Bovim har vært veldig viktig i arbeidet med analysen av testresultatene og presentasjonen av disse.

Andreas Flø ved UMB som har vært en enormt god ressursperson i forbindelse med fotogrammetrien og arbeidet med bildeanalysen. Flø har stilt opp hver gang vi har trengt hjelp med fotogrammetrien, enten det har vært oppsett og dataproblemer eller nå mot slutten hvor han måtte lage et nytt analyseprogram for å tolke de mer enn en million bilder vi har tatt av prøvestykkene

Sigurd Eide ved Norsk Treteknisk Institutt for god veiledning.

Kjell Ingar Myrdal og Kjell Lindrupsen ved laboratoriet på treteknisk

Og alle andre ved treteknisk for god hjelp på alle måter, vil likevel rette en spesiell takk til Kjellerne som lot oss invadere laboratoriet sitt med alt utstyret vårt og samtidig hjalp oss med å bygge om den ene testmaskinen så den passet til vårt formål.

Materialene til testing i limtre ble skaffet fra Moelven, materialene i heltre fra Treteknisk. Prikkene til forsøkene ble produsert ved Profil & Dekor AS, en takk til Erik Enge for stort engasjement.

Metallstykkene til testingen ble produsert ved bestilling på det mekaniske verkstedet ved IMT. Takk til Bjørn Brenna.

Treteknisk, Oslo den 01.06.2012

Morten Moseng

David Hagle

Sammendrag

I denne masteroppgaven er det sett på problematikken ved trykk tvers på fiber i materialer av lim- og heltre. Ved innføringen av den nye trestandarden Eurocode 5 med nye beregningsmetoder og reduserte fasthetsegenskaper, har dette medført utfordringer for treindustrien. Dette har først og fremst ført til en dyrere byggeprosess, men også til mer eller mindre frustrasjon. Derfor er det skapt et ønske om en enklere og mer nøyaktig beregningsmetode for bæreevnen ved trykk tvers på fiber.

Fagmiljøene har ikke enest om noen felles modell eller fremgangsmåte. De mange forslagene for løsning rundt problematikken baserer seg på forsøk og erfaringer eller analytiske metoder for lastfordelingen.

Oppgaven er bestående av to forskjellige metoder, laboratorieforsøk og fotogrammetri. Laboratorieforskene er utført ved testing av forskjellige svillemodeller og bjelkeoppsett. Med variasjoner innen lengde og tverrsnittsdimensjoner for hel- og limtrematerialer. Fotogrammetrien er utført ved hjelp av kameraer som tar bilder av prøvestykkene under testing. Prøvestykkene er påsatt et rutenett av prikker som blir videre analysert etter testingen.

Det var behov for å finne en bedre og mer nøyaktig måte for å påføre prikker på prøvestykkene for fotogrammetrien. Disse prikkene er nødvendige for å kunne måle deformasjoner og tøyninger ved hjelp av bildeanalysen. Det ble prøvd flere metoder og man endte opp med prikker skåret ut av selvklebende vinylfolie arrangert i et rutenett klart for montering på prøvestykkene.

Det var også behov for nye trykkplater med ulike mål og utstyr til testmaskinene. Disse ble tegnet i et 3D program og produsert på et mekanisk veksted. Trykkplatene er laget med variasjon i bredde, avrundede eller skarpe kanter, med eller uten rotasjon. Det har blitt sett mye på sammenhengen mellom ulike trykkplater. Ved sammenligning av prøveresultatene med svillete trykk er det liten eller ikke nevneverdig forskjell mellom trykkplater med avrundet eller skarp kant. For trykkplater med eller uten rotasjon om en akse var forskjellen enda mindre.

Ved testing er deformasjoner målt med elektroniske målere under lastpåføringen. For alle prøvestykker er det gjennomført fotogrammetri for å kunne registrere tøyningene som oppstår i trematerialene under belastning med trykk tvers på fiber. Det er samlet inn en stor mengde data som det er vanskelig å behandle. Det er derfor et behov for å utvikle et analyseprogram som klarer å håndtere datamengdene på en mer rasjonell måte.

Forskene i laboratoriet har vist at bæreevnen til trevirke øker med størrelsen på prøvestykket, dette kommer av bidraget fra hengekøyeeffekten og randeffekter. Forsøkene i laboratoriet er utført med tilstrekkelig lange prøvestykker da ingen av prøvestykkene med unntak av ett sprakk opp ut mot enden. Det har også blitt visuelt observert at spredningsvinkelen er større enn det man tidligere har antatt. Dette gir en positiv effekt ved at trykkbelastningen fordeler seg over et større areal eller volum av trevirket.

Helningen i det lineære området er vurdert i arbeidsdiagrammene og funnet relativt konstante med prøveoppsett for sviller med trykkbelastning midt på.

Abstract

In this master thesis the main focus has been the problem regarding compression perpendicular to the grain for glulam and softwood materials. The introduction of Eurocode 5 in Norway with its new methods of calculation and reduced strength properties, this has resulted in challenges for the wood industry. This has primarily resulted in a more expensive building process, but also more or less frustration. It created a desire for a simpler and more precise method of calculating the bearing capacity at compression perpendicular to the grain.

The academic societies have not managed to agree on a common model or approach. The many proposals for the solution to the issue based on experiments and experiences and or analytical methods for load distribution.

The thesis is composed of two different methods, laboratory experiments and photogrammetry. The laboratory testing was performed by testing different sill and beam setup, with variations in the length and cross-sectional dimensions of glulam and softwood materials. Photogrammetry is performed by using cameras that take pictures of the test specimens during testing. The samples are equipped with a grid of dots that are further analyzed after testing.

There was a need to find a better and more accurate way to apply the dots on the test specimens for the photogrammetry. These dots are necessary for measuring deformation and strain distribution using image analysis. It was tried several different methods and we ended up with spots cut out of adhesive vinyl foil arranged in a grid ready for mounting on the test specimens.

There was also a need for new pressure plates with different measurements and equipment compatible with the test machines. These were drawn in a 3D program and produced a mechanical workshop. Pressure plates are made with variations in width, rounded or sharp edges, with or without rotation. It has been seen much on the relationship between different pressure plates. By comparing test results with sill pressure there is little or no appreciable difference between the pressure plates with rounded or sharp edge. For plates with or without rotation the difference is even smaller.

By testing the deformations was measured with electronic gauges under load application. For all specimens there was used photogrammetry to record strain distribution that occurs in wood materials under load with compression perpendicular to the grain. It is collected a large amount of data that are difficult to calculate. It is therefore a need to develop an analysis program that can manage the volumes of data in a more rational manner.

The experiments in the laboratory have shown that the carrying capacity of the timber increases with the size of the specimen, this is the contribution of the rope effect and boundary effects. The experiments in the laboratory are performed with sufficient length on the specimens as no specimens tested except one cracked up towards the end. It has also been visually observed that the scattering angle is larger than previously thought. This gives a positive effect in that the pressure load is distributed over a larger surface area or volume of the wood material.



Innholdsfortegnelse

Terminologi.....	vi
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling.....	2
1.3 Avgrensninger.....	2
1.4 Verktøy	2
1.5 Oppsettet i oppgaven	3
2 Teori	4
2.1 Trevirkets anatomi.....	4
2.2 Hvilke faktorer virker inn på fasthetsegenskapene til trevirket	5
2.3 Trykkfastheten til trevirket	5
2.3.1 ASTM - metoden.....	5
2.3.2 CEN – metoden.....	6
2.3.3 Prosentavvik - metoden.....	6
2.3.4 Definisjonen av $f_{c,90}$ ut fra densiteten til trevirket	7
2.4 Bruddgrense- eller bruksgrensetilstanden	7
2.5 Styrkefaktoren $k_{c,90}$	8
2.6 Metoder for bestemmelse bæreevnen.....	9
2.6.1 Beregning i henhold til NS 3470: 1999.....	9
2.6.2 Blass og Görlacher modellen med utgangspunkt i Madsens modell.....	11
2.6.3 Leijtens forslag for beregning av $k_{c,90}$ våren 2011	13
2.6.4 Modellen til Van der Put	15
2.6.5 Alvdis Hardengs hypotese for beregning av inntrykning i bruksgrensetilstanden	16
2.6.6 Alvdis Hardengs forslag til beregning i bruddgrensetilstanden	17
3 Metode.....	18
3.1 Forberedelser.....	18
3.1.1 Merkesystemet ("prikkene")	18
3.1.2 Fremstilling av trykkplater	21
3.2 Trevirket	23
3.2.1 Densitet	24
3.2.2 Fuktighet.....	25
3.3 Laboratorieforsøk	26



3.3.1	Oppsett til laboratorieforskene	26
3.3.2	Randbetingelser og sensorer	28
3.3.3	Feilkilder i laboratorieforskene	31
3.4	<i>Fotogrammetri</i>	32
3.4.1	Generelt om fotogrammetri	32
3.4.2	Bruk av fotogrammetri i oppgaven	32
3.4.3	Tøyninger ut ifra fotogrammetri	35
3.4.4	Feilkilder ved fotogrammetrien	36
4	Resultater og diskusjon	38
4.1	<i>Densiteten og fuktigheten til trevirket</i>	38
4.1.1	Densitet og fukt	38
4.2	<i>Laboratorieforskene</i>	40
4.2.1	Arbeidsdiagram serie B3	40
4.2.2	Arbeidsdiagram serie B4	42
4.2.3	Arbeidsdiagram serie B5	44
4.2.4	Arbeidsdiagram serie B6	46
4.2.5	Arbeidsdiagram serie B7	48
4.2.6	Arbeidsdiagram serie B8	50
4.2.7	Arbeidsdiagram serie B9	52
4.2.8	Arbeidsdiagram serie B10	54
4.2.9	Arbeidsdiagram serie D1 – Tosidig trykk midt på, ingen understøttelse	56
4.2.10	Arbeidsdiagram serie E1 – Tosidig trykk mot ende, ingen understøttelse	58
4.2.11	Arbeidsdiagram serie F2 – Ensidig trykk mot ende, full understøttelse	61
4.2.12	Arbeidsdiagram serie F3 – Ensidig trykk mot ende, full understøttelse	64
4.2.13	Arbeidsdiagram serie G3 – Opplagt som en "fritt opplagt bjelke"	67
4.2.14	Arbeidsdiagram serie G4 – Opplagt som en "fritt opplagt bjelke"	70
4.2.15	Arbeidsdiagram serie H1 – Opplagt som en "fritt opplagt bjelke" (ser her på oppleggene)	73
4.2.16	Sammenligning av resultater	76
4.2.17	Fotogrammetri – tøyninger i trevirket	79
4.2.18	Vurdering av k-stivheten	84
4.2.19	Trykkfastheten i forhold til densitet og fuktighet	86
5	Konklusjon	88



Instituttet for Matematiske realfag og Teknologi

5.1	<i>Konklusjon</i>	88
5.2	<i>Forslag til videre arbeid og utvikling av forsøkene</i>	89
6	Referanser	91
7	Vedlegg.....	93
7.1	<i>Skriftlige vedlegg</i>	93
	Vedlegg A – Forsøksplan.....	93
	Vedlegg B – Sammenligning av resultater	93
7.2	<i>Elektroniske vedlegg</i>	93
	Vedlegg A – Forsøksplan.....	93
	Vedlegg B – Sammenligning av resultater	93
	Vedlegg C – Densitetsprøver	93
	Vedlegg D – Data fra testmaskinene	93
	Vedlegg E – Data fra fotogrammetri	93
	Vedlegg F – Resultater ved testing	93
	Vedlegg G – Spenning def analyse.....	93
	Vedlegg H – Bilder	93
	Vedlegg I – Tegninger	93
	Vedlegg J – PDF – versjon av masteroppgaven.....	93



Terminologi

Referanser – Standarder

Eurocode 5	Eurocode 5 (EC5) NS-EN 1995-1-1: Prosjektering av trekonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger.
Limtrestandarden	NS-EN 1194 Trekonstruksjoner – Limtre- Fasthetsklasser og bestemmelse av karakteristiske verdier.
NS-EN 338	Konstruksjonstrevirke – Fasthetsklasser.
NS-EN 408	Trekonstruksjoner – Konstruksjonstre og limtre – Bestemmelse av noen fysiske og mekaniske egenskaper.
Tidligere Trestandarden	NS 3470-1 Prosjektering av trekonstruksjoner. Beregnings- og konstruksjonsregler. Del 1: Allmenne regler.

Ord og uttrykk

”Trykk tvers av fiber”	Trykk vinkelrett tvers av fiber
Acurator 23 og Dartec	Testmaskiner fra MTS som benyttes på laboratoriet ved Norsk Treteknisk Institutt
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEN	Comité Européen de Normalisation - European Committee for Standardisation, Europeisk standardiserings organisasjon.
CIB W18	International Council for Research and Innovation in Building and Construction – Working Commission W18 – Timber Structures.
Douglas Fir	”Douglas gran” bartre, mest utbredt i Nord-Amerika
Kolvsprek	Ringsprek en sprek som følger årringen i større eller mindre omkrets om margen. Ofte stor utstrekning i lengderetningen. (Foslie, 1998)
Kvaelomme	Åpning mellom årringer, oftest fylt med kva. Kvaelommen dannes mellom barken og veden, men blir etter hvert som treet vokser liggende lenger inn i veden. Har sjelden styrkemessig betydning, men flyter ved varme eller belastning. (Foslie, 1998)
S.P.F	Spruce – Pine – Fir (Gran – Furu – Edelgran) samlet betegnelse for lyst konstruksjonstrevirke benyttet i Nord-Amerika.



Treteknisk	Norsk Treteknisk Institutt
------------	----------------------------

Symboler, enheter, størrelser og indekser

A, A_{ef}	Areal, effektivt areal
b	Bredde
c	Compression - trykk
c/c	Senteravstand
F, P	Kraft eller last
$f_{c,90}$	Trykkfasthet på tvers av fibre
FMP	Fibermetningspunkt
h_0, h_e	Opprinnelig høyde, effektiv høyde
$k_{c,90}$	Styrkefaktoren,
k_{mod}	Fasthetsfaktor for klima- og lastvarighetklasse
l, l_{ef}	Lengde, effektiv lengde
m, m_0	Masse, masse i absolutt tørr tilstand
max	Maksimalverdi
t	Tykkelse
u	Sammentrykning eller trefuktigheten.
V, v_f	Volum, volum i rå tilstand
β	Total volumkrymping i %
γ_M	Materialfaktor
ρ, ρ_k, ρ_{12}	Densitet, karakteristisk densitet, densiteten ved gitt fuktighet.
σ	Spenning

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Norge har lange tradisjoner ved bruk av trevirke i konstruksjoner. De eldste nåværende trekonstruksjonene er flere av stavkirkene i Norge. Bruken av tre som byggemateriale har utviklet seg de siste årene og man ser ikke bare bruken av tre i småhus. Særlig bruken av tre i broer og i fleretasjers bygninger har blitt mer aktuelt. Vi ser også at det i det nye operabygget i Bjørvika er utstrakt bruk av trevirke innendørs, hvor man fra aulaen beveger seg gjennom barken og yteveden før man ender opp inne i storsalen som er kjerneveden. Utviklingen fører til at man setter et større fokus på de fysiske og mekaniske egenskapene til trevirket og her kommer ofte problematikken rundt trykk tvers på fiber inn.

Ved implementering av den nye Europeiske trestandarden NS-EN1995-1-1 som tar erstatter den tidligere Norske trestandarden NS 3470-1:1999, har det oppstått en del utfordringer i forhold til nye krav og dimensjoneringsregler.

Dette har medført utfordringer for trelastindustrien i Norge. Derfor ble det besluttet å opprette en arbeidsgruppe i 2010, med representanter fra blant annet treindustrien, SINTEF, UMB og Norsk Treteknisk Institutt for å diskutere og imøtekomme de nye kravene og eventuelt komme med forslag til enklere og mer ingeniørspråklig formelverk i Eurocode 5.

Selve problematikken rundt trykk tvers på fiber har vært aktuell på CIB-W18 konferansene de siste årene, dette har vekket mange fagpersoner og har ført til en rekke modeller og forslag til løsninger rundt problematikken. Tre er et ikke-homogent materiale og det er vanskelig å lage gode analytiske modeller i tillegg til de forskjellige modeller for bæreevne og karakteristiske kapasitetsberegninger.

I Figur 1 under ser man utviklingen av de karakteristiske verdiene for trykk tvers på fiber i heltre de siste årene. Reduksjonen i karakteristiske trykkfastheten skyldes innføringen av NS-EN 338, verdien ble over halvert i fra 5,3 N/mm² til 2,5 N/mm². Med reduserte fastheter ($f_{c,90,k}$) og lavere styrkefaktor ($k_{c,90}$) etter innføringen av Eurocode 5 fører dette til at modellene anses som mindre tilfredsstillende, dette medfører et høyere materialforbruk og dyrere trekonstruksjoner. Det er aktuelt og finne nye eller andre modeller å benytte for beregning av trykk tvers på fiber. Erfaringer ved bruk av beregninger i henhold NS 3470 i over 20 år viser at det er en modell som fungerer.

Standard	Versjon	Fasthetsklasse	f_{c90k} N/mm ²
NS 3470	3.utg. 1979	T24	4,0
NS 3470	4.utg. 1989	C24	7,0
NS 3470	5.utg. 1999	C24	5,3
NS-EN 338	2003	C24	2,5

Figur 1 Oversikt over karakteristiske verdier fra 1979 frem til nå, (Eide, Nore, & Aasheim, 2011).

1.2 Problemstilling

Bakgrunnen for oppgaven er å videreføre arbeidet i masteroppgaven *”Bæreevne for punktlast av bjelker og svill under trykk tvers på fiber”*, av Alvdis Hardeng (Hardeng, 2011). Det er et ønske fra treindustrien og fagmiljøene å undersøke de nåværende beregningsmetodene. Det er gjort mye arbeid rundt problematikken tidligere. Allikevel ser man et behov for mer forskning, særlig ved hjelp av fotogrammetri for å kunne observere og bekrefte de faktiske tøyningene i trevirket ved belastning tvers på fiber.

Målet ved oppgaven er:

- Ved hjelp resultater fra egne laboratorieforsøk og bruk av fotogrammetri, vurdere de nåværende beregningsmetodene og modeller for bæreevnen til trevirket ved trykk tvers på fiber.
- Utvikle en bedre metode for å fremstille og påføre prikker for fotogrammetrien for å sikre et godt resultat.
- Tegne og produsere nye trykkplater med eksakte mål for enkelere oppsett og mer nøyaktig testing.

1.3 Avgrensninger

Det er valgt å gjennomføre 15 serier med forsøk av ulike typer bjelke og svilleoppsett. Seriene blir gjennomført med mellom 10 og 15 prøver, totalt 186 prøvestykker med:

- variasjoner innen heltre
- variasjoner innen limtre
- varierende dimensjoner på trykkplate
- fast eller rotasjon i trykkplate og opplegg
- avrundet kant eller skarp kant på trykkplatene

For øvrige detaljer refereres det til forsøksplanen.

Det har blitt gjennomført fotogrammetri for alle sville- og bjelkeprøvene, dette for å kunne registrere tøyningene og trykkfordelingen som oppstår i trevirke under trykkbelastning.

Antall prøvestykker er valgt for å kunne tilsvare et arbeid på 30 studiepoeng.

1.4 Verktøy

Laboratoriet til Norsk Treteknisk Institutt er benyttet under testingen av alle prøvestykkene. Fotogrammetri har blitt benyttet tidligere i prosjekter ved UMB og har blitt utviklet videre under testingen i denne masteroppgaven. Ved å benytte klebende prikker med en bedre nøyaktighet under testingen har dette medført til en enklere og bedre analyse.

For analyse og presentering av resultater er det benyttet Microsoft Excel 2007 og Excel 2010. Bildeanalysen er gjennomført ved hjelp av Tordivel Scorpion 8, programmet er spesialisert på 2D og 3D bildeanalyse.

Før produksjon av trykkplatene måtte de tegnes i SolidWorks (SolidWorks, 2011).

1.5 Oppsettet i oppgaven

Samtlige tabeller, bilder og figurer har fått benevnelse figur med nummerering i oppgaven. Formlene som er benyttet har fått samme type nummerering som figurene og står opp til venstre i forhold til formelen. Samtlige bilder og flere av tabellene og grafene ligger ved som elektronisk vedlegg.



Figur 2 Prøvestykkene ferdig kappet og klare for grunning og påføring av prikker.

2 Teori

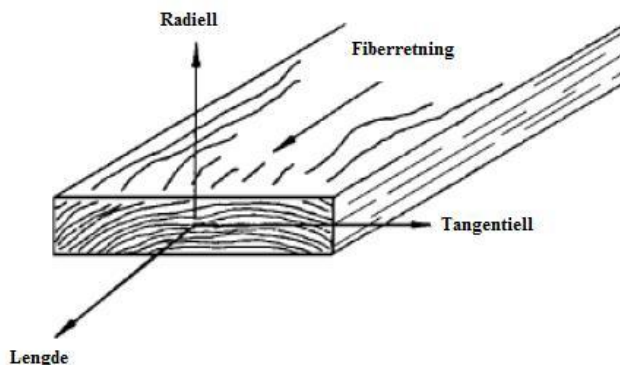
Det forutsettes at leseren av oppgaven har en grunnleggende forståelse i treteknologi om treets anatomiske og mekaniske egenskaper. Oppgaven bygger videre på arbeidet Alvdis Hardeng gjennomførte i sin masteroppgave fra våren 2011 (Hardeng, 2011) og legger grunnlaget for det videre arbeidet som denne oppgaven vil innebefatte.

For mer utdypende litteratur anbefales: *Principles of Wood Science and Technology* av Franz F. P. Kollmann og Jr. Wilfred A. Côté (Kollmann & Côté) og *Treets oppbygning og vedanatomi* av Bohumil Kucera (Kucera, 1998). For mer utdypende litteratur om trekonstruksjoner og trekonstruksjonsteknikk anbefales boka *Trekonstruksjoner del 1* av Petter Aune (Aune, 1992). Denne litteraturen er benyttet videre i oppgaven samt notater og materiell utdelt ved forelesninger i følgende fag ved UMB: TRE 200 - Treteknologi I (Vestøl & Høibø, 2011), TRE 300 – Treteknologi (Vestøl & Høibø, 2011), TBA 290 – Trekonstruksjonsteknikk (Bovim, 2011), TBA 320 - Konstruksjonsteknikk III Bygg (Bovim, 2011).

2.1 Trevirkets anatomi

Trevirke har forskjellige egenskaper i de ulike akseretningene: radiell retning, tangentiell retning og i lengderetningen. Dette medfører store variasjoner i de fysiske egenskapene til trevirket, særlig med tanke på fukt- og temperaturegenskapene.

Ser man på krymping og svelling i de forskjellige akseretningene er det stor variasjon, dette skyldes orienteringen av trefibrene. I tangentiell retning kan man anta en total krymping på 8% mens i lengderetningen en totalkrymping på bare 0,3%, krymping i radiell retning er omtrent halvparten av den totale krympingen i tangentiell retning. Den samme tendensen gjelder når man skal se på de mekaniske egenskapene til trevirket. I NS-EN 338 er de karakteristiske verdiene for henholdsvis trykk parallelt med fiberretningen og trykk vinkelrett på fiberretningen oppgitt til 21 N/mm^2 og $2,5 \text{ mm}^2$ for konstruksjonstrevirke klasse C24. Dette er etter NS-EN 1194 testmetode basert på testing av små prøvestykker med belastning over hele tverrsnittet.



Figur 3 Trevirkets akseretninger.

I forhold til et aksesystem ser man som oftest x-retning i trevirkets lengderetning, y-retning i trevirkets tangentiell retning og z-retning i trevirkets radiell retning ut fra tverrsnittets senter.

2.2 Hvilke faktorer virker inn på fasthetsegenskapene til trevirket

Fuktighetsinnholdet til konstruksjonstrevirket har innvirkning på fasthetsegenskapene en nedre grense ligger ved fibermetningspunktet ved et fuktighetsinnhold på omtrent 25 – 30 % for trevirke av gran og furu. Med stigende fasthet ved avtagende fuktighet under fibermetningspunktet.

Densiteten er den sikreste måten å definere fasthetsegenskapene, høy densitet medfører høye fasthetsegenskaper. Densitet og årringbredde er avhengig av hverandre, densiteten til konstruksjonstrevirke av gran og furu vil variere med årringbredden, tettere årringer medfører en høyere densitet.

Densiteten for et stykke tre er ikke konstant den vil variere med fuktigheten til trevirket. For at begrepet densitet skal ha noen mening, må det angis ved hvilken fuktighet den gjelder. Vanlig er å benytte: Tørrdensitet, basisdensitet, rådensitet eller densiteten ved den gjeldende fuktigheten.

Kvist har stor innflytelse på fasthetsegenskapene, kvisten skaper fiberforstyrrelser og fører til dårligere egenskaper særlig på strekkfastheten. Virkningen av kvisten er avhengig av enkeltkvisters størrelse og plasseringen i tverrsnittet eller kvistgrupper. Fast eller frisk kvist er å foretrekke i forhold til løs eller død kvist. Ved trykk tvers på fiber fører kvist som oftest til forhøyede fasthetsverdier. Fungerer som en slags armering i trevirket.

Fiberhelning, temperatur, sprekker, belastningsvarighet og utmatting er andre faktorer som spiller inn på fasthetsegenskapene. I oppgaven kommer vi først og fremst å fokusere på densitet, kvist og fuktighet.

2.3 Trykkfastheten til trevirket

Det er flere metoder som kan benyttes for å komme frem til trykkfastheten til trevirket.

Internasjonalt er det CEN – metoden og ASTM – metoden som benyttes mest. Det finnes også flere alternative metoder for å bestemme trykkfastheten. Blant annet SKANORM (Kucera, 1992) og metoder i limtrestandarden NS-EN 1194 og NS-EN 408. I Europa har man besluttet å benytte den vitenskapelige metoden ved å teste og finne de faktiske verdiene til trevirket. Dette har de gjort ved å teste over hele prøvestykkets areal "block-test", for deretter å regne seg frem til de faktiske verdiene i en praktisk brukssituasjon.

2.3.1 ASTM - metoden

I denne testmetoden, ASTM D143-09, benytter man feilfrie prøvestykker av heltre med dimensjon (50 x 50x 150 mm). Dette for å simulere oppsettet med bjelke eller svill fullt understøttet av vegg eller fundament med lastpåføring fra en kvadratisk flate.

Lasten påføres gjennom en 50 mm bred stålplate i øvre del av prøvestykket med rett vinkel og lik avstand til endene på prøvestykket. Prøvestykket blir plassert slik at lasten blir påført gjennom

stålplaten slikt at lasten påføres parallelt med åringene til prøvestykket. Kontinuerlig lastpåføring gjennom hele testen, med en hastighet på 0,305 mm/min.

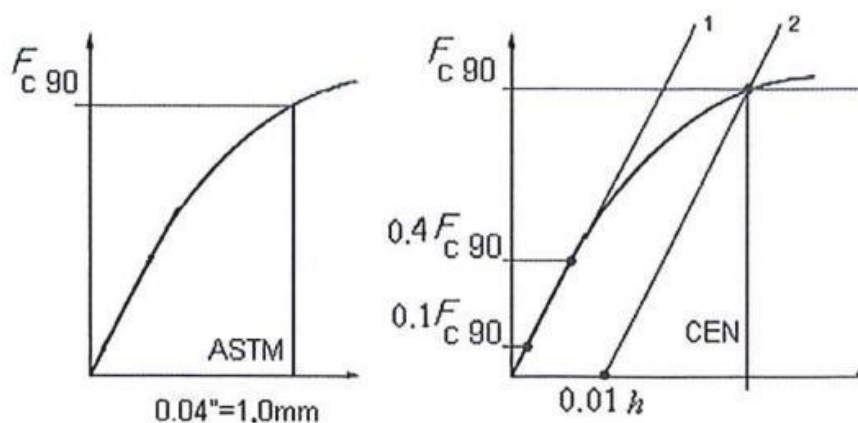
Last og inntrykkingskurven skal gå til inntrykkingen er på minst 2,5 mm og avsluttes. Trykket måles mellom lasteflatene. Prøven veies umiddelbart før testing og det tas ut fukt- og densitetsprøve i nærheten der lasten ble påført. Denne testmetoden er benyttet fra begynnelsen av 1926-tallet, og er mye benyttet i USA og Canada.

2.3.2 CEN – metoden

I begynnelsen av 1990 - årene med en stadig forening og samarbeid i det europeiske markedet førte til at den Comité Européen de Normalisation (CEN) måtte utarbeide en helhetlig Europeisk Standard.

For konstruksjonstrevirke er testmetoden fra standarden NS-EN 408. I forhold til ASTM-metoden har denne testmetoden et helt annet utgangspunkt. Prøvestykket blir i denne testmetoden påført last over hele prøvestykkets overflate en såkalt ("block test"). Prøvestykkets dimensjoner for heltre er 45x70x90mm. Denne prøvemethoden refererer til de faktiske fysiske materialegenskapene til trevirket og ikke til de typiske bruk eller bruksområder. Den vitenskapelige modellen som er implementert i Eurocode 5 benytter materialegenskapene til å bestemme kapasiteten for en hver praktisk situasjon i kontrast til den teknologiske metoden i ASTM-D143.

Siden selve testmetoden er så forskjellig er det ikke særlig overraskende at det blir så uforenlige resultater fra ASTM- og CEN-metoden.



Figur 4 ASTM og CEN – metoden for beregning av $f_{c,90}$ (Leijten, Larsen, & Van der Put, 2010).

I henhold til EN408, bestemmes $F_{C,90,max}$ ved å bruke resultatene i kraft- og deformasjonsdiagrammet. Fremgangsmåten er ved å finne $0,1F_{C,90,max}$ og $0,4F_{C,90,max}$ og bestemme hvor disse verdiene skjærer kraft og deformasjonskurven. Man trekker en rett linje mellom disse punktene (linje 1). Linje 2 finnes ved at man parallellforskyver linje 1 langs deformasjonsaksen til verdien tilsvarer $0,01h_0$, linjen trekkes fra $F=0$, der linje 2 skjærer deformasjonskurven finnes $F_{C,90,max}$. Hvis verdien $F_{C,90,max}$ er innenfor toleransegrensen 5% av $F_{C,90,max,est}$ kan verdien benyttes, hvis ikke må prosedyren repeteres slik at verdien er innenfor toleransekravene.

2.3.3 Prosentavvik - metoden

Denne metoden søker punktet på arbeidskurven hvor helningen er størst i det elastiske området. Helningen bestemmes ved å legge en regresjonslinje i punktet med størst helning. Lengden på

regresjonslinjen er den som gir minst kvadratavvik. Kurven parallellforskyves for å fjerne unøyaktigheter i begynnelsen av arbeidskurven. Denne metoden er et alternativ til NS-EN408 metoden som starter ved $0,1F_{c,90}$. Hvis grafen er litt ruskete i starten kan man få gale resultatert da linjen må starte så langt nede og det er her prosentavvik-metoden kommer til sin rett ved at den tar utgangspunkt i punktet med størst helning (Bovim, Veiledningsmøte UMB, 2012).

2.3.4 Definisjonen av $f_{c,90}$ ut fra densiteten til trevirket

I første utgaven av styrkeklasser for konstruksjonstrevirke, EN 338: 1995 ble den karakteristiske trykkfastheten $f_{c,90,k}$ definert med utgangspunkt fra EN 384: 1995 *Konstruksjonstrevirke – Bestemmelse av karakteristiske verdier for mekanisk egenskaper og densitet*. $F_{c,90,k}$ blir i EN 384: 1995 beregnet som $0,015 \cdot \rho_k$ (karakteristisk densitet) av trelast kvaliteten. Denne beregningen mente Gehri (Gehri, 1997) medførte for høye karakteriske verdier i forhold til en testing gjennomført i forhold til EN 1193: 1998 for limtre. Hvor trykkraften påføres over hele prøvestykkets overflate ("block-test"). Gehri refererer til en rekk tyske og internasjonale forsøk og anbefaler at trykkfastheten defineres som halvparten, altså:

Formel 1

$$f_{c,90,k} = 0,007 \cdot \rho_k$$

Dette ble tatt hensyn til i den reviderte utgaven av EN 338: 2003 og EN 384: 2004.

I artikkelen til (Damkilde, Hoffmeyer, & Pedersen, 1998) kommer de frem til ved forsøk i henhold til EN 1193 ("block test") til omtrent samme verdier som Gehri, og anbefaler trykkapasiteten til:

Formel 2

$$f_{c,90,k} = 0,006 \cdot \rho_k$$

2.4 Bruddgrense- eller bruksgrensetilstanden

I Eurocodene er det et skille mellom bruddgrense og bruksgrensetilstanden. I bruddgrensetilstanden vil et brudd føre til kollaps av hele konstruksjonen eller deler av den. I bruksgrensetilstanden ser man på overskridelser ved uakseptabelt store nedbøyninger visuelt eller funksjonelt.

Metodene ved å finne $f_{c,90}$, medfører ingen kollaps, men medfører kun store deformasjoner. Det ble foreslått av Thelandersson og Mårtensson (Thelandersson & Mårtensson, 1997) at dette kunne være et bruddkriterium i bruksgrensetilstanden. Selv med lavere sikkerhetsfaktorer i bruksgrensetilstanden ville dette ført til at mange detaljer i vanlig bindingsverksbygninger ikke lenger ville være akseptable.

I brudd- og bruksgrensetilstanden blir lastkapasitet beregnet i henhold til NS-EN 1995 med last og sikkerhetsfaktorer fra NS-EN-1990 og NS-EN 1991.

Ser man på bruksgrensetilstanden er det mer eller mindre opp til konstruktøren og byggherren og avgjøre hvor store deformasjoner som er akseptable. Hvis man antar deformasjoner på 1% eller

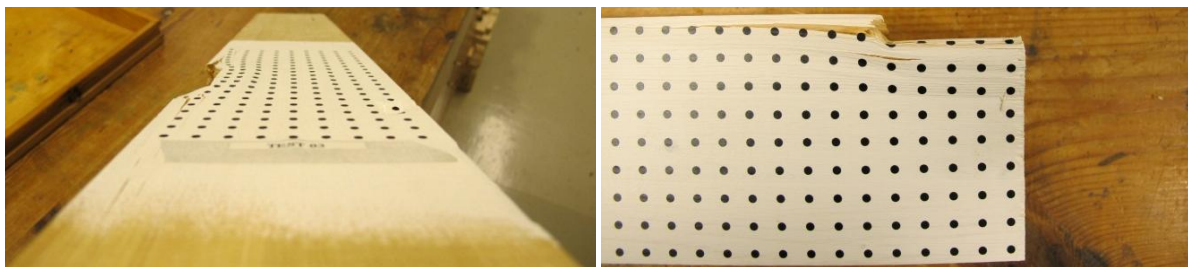
kanskje til og med 10% av en typisk svill på 48 mm vil ikke dette medføre alvorlige konsekvenser eller et kritisk brudd. Selv bevegelser fra krymping eller svelling kan medføre store variasjoner i tverrsnittet. Riberholt (Riberholt, 2000) mente at deformasjoner på for eksempel 5 mm i tynne trekomponenter fører til ødelagte fibre og en total kollaps av strukturen i trevirket og kan føre til ukontrollerte deformasjoner. For tykkere trekomponenter vil et deformasjonskrav medføre verdier som er langt lavere enn de faktisk maksimalt tillatte spenningene.

Stort sett er bruksgrenselasten ofte omtrent halvparten av bruddgrenselasten og det er ofte antatt at deformasjonen som skulle oppstå i bruksgrensetilstand er akseptable, når en kontroll i bruddgrensetilstanden er gjennomført.

2.5 Styrkefaktoren $k_{c,90}$

Bakgrunnen for styrkefaktoren $k_{c,90}$ er den såkalte "hengekøyeeffekten", og tar hensyn til last konfigurasjonen, muligheten for splitting av trevirket og graden av deformasjon forårsaket av trykkraften. Beregningen av $k_{c,90}$ er mye omdiskutert tema og en rekke forslag til beregning er foreslått gjennom mange år.

Siden fibre i trevirket er orientert i lengderetning vil man ved konsentrerte punktlaster tvers på fibre få et bidrag fra de nærliggende trefibre, verdien varierer fra 1,0 og oppover. Når verdien er større enn 1,0 vil man få en økning av den beregnede styrken til trevirket. Ved endetrykk vil det kun være "hengekøyeeffekt" fra en side, det er derfor viktig å ha tilstrekkelig avstand fra ende, for å kunne oppnå full hengekøyeeffekt.



Figur 5 Hengekøyeeffekten ved trykk midt på prøvestykket. Figur 6 Hengekøyeeffekten mot ende av prøvestykket.



Figur 7 Hengekøyeeffekten under testing, tilfelle G3.

2.6 Metoder for bestemmelse bæreevnen

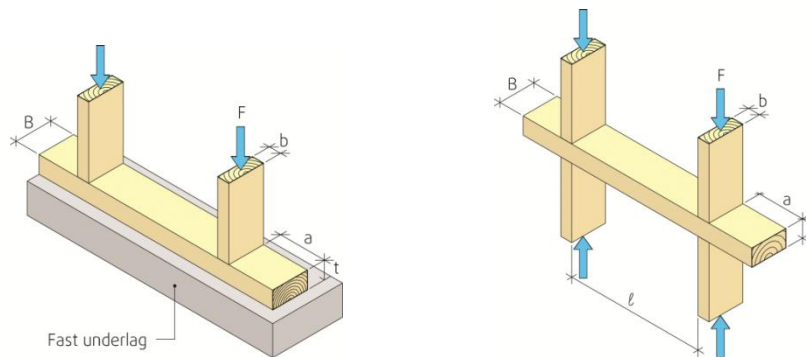
Det har de siste 20 årene er det utviklet en rekke forslag for beregning av trykk tvers på fiber. Modellene videre i oppgaven viser flere måter å definere og beregne seg frem til en løsning på problemet.

Det har i løpet av 2011 vært oppe flere forslag til løsning rundt trykk tvers på fiber problematikken ved "Eurocode en utfordring for treindustrien" møtene i Norge. Det har også kommet forslag til nye beregningsmetoder fra Europa, hvor Leijten fra det tekniske universitetet i Eindhoven har fremmet flere forslag.

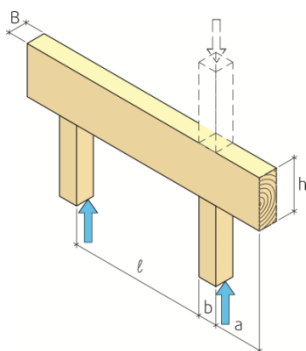
2.6.1 Beregning i henhold til NS 3470: 1999

I Norge ble det i 2012 sendt ut en anbefaling utarbeidet av Treteknisk, Sintef Byggforsk og UMB, der en anbefaler at beregningsreglene for trykk tvers på fiberretning fra NS 3470 fortsatt kan benyttes.

For sviller og bjelker kontrolleres bare trykkspenninger i bruddgrensetilstanden. Man anser ikke kontroll i bruksgrensetilstanden som nødvendig.



Figur 8a og b, sviller.



Figur 9, bjelker, sperrer, takstoler.

Beregnet trykkspenningen, $\sigma_{c,90}$, ved last i bruddgrensetilstanden på belastet areal er begrenset til følgende:

Formel 3

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}$$

Hvor:

Formel 4

$$\sigma_{c,90,d} \leq \frac{F_{c,90,d}}{A}$$

Formel 5

$$f_{c,90,d} = f_{c,90,k} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_m}$$

Konstruksjonstrevirke Trykkfasthet $f_{c,90,k}$			
Fasthetsklasse			
C14	C18	C24	C30
4,3	4,8	5,3	5,7

Figur 10 Karakteristiske trykkfasthet, $f_{c,90,k}$, på tvers av fibrene, for konstruksjonstrevirke.

Limtre Trykkfasthet $f_{c,90,k}$						
Limtreklasse, kombinert limtre				Limtreklasse, homogent limtre		
L40c	GL28c	GL32c	GL36c	GL28h	GL32h	GL36h
5,3	5,3	5,7	6,3	5,3	5,7	6,3

Figur 11 Tabell Karakteristisk trykkfasthet, $f_{c,90,k}$ på tvers av fibrene for limtrevirke.

De karakteristiske verdiene i Figur 10 og Figur 11 er basert på testing utført på lengre prøvestykker, etter ASTM-D143. Og er de samme karakteristiske verdiene som ble benyttet i NS 3470:1999.

Konfigurasjon (Fig. 1 og 2)	k_{c90} for $l < 150$ mm	k_{c90} for $l > 150$ mm	
		$a \geq 100$ mm	$a < 100$ mm
$b \geq 150$ mm	1,0	1,0	1,0
$150 > b \geq 15$ mm	1,0	$1 + \frac{150 - b}{170}$	$1 + \frac{a(150 - b)}{17000}$
$15 \text{ mm} > b$	1,0	1,80	$1 + \frac{a}{125}$

Figur 12 Tabell faktor $K_{c,90}$ for lastkonfigurasjon.

For en lastsituasjon som vist i figurene over hvor $a < h$, skal verdiene i formlene halveres.

2.6.2 Blass og Görlacher modellen med utgangspunkt i Madsens modell

Denne modellen benyttes i den nåværende utgaven av Eurocode 5 og tar utgangspunkt i flere modeller, blant annet modellen Borg Madsen kom frem til (Madsen, Leijten, Gehri, Mischler, & Jorissen, 2000), Blass og Görlacher (Blass & Görlacher, 2004) utvikler videre sin egen modell. Med utgangspunkt i formelen til Madsen lager de et uttrykk ved å omskrive formelen:

Formel 6

$$F_{ult} = A \cdot b \cdot l + C \cdot b$$

→

Formel 7

$$F_{ult} = A \cdot b \cdot \left(l + \frac{C}{A} \right)$$

A og C er konstanter og varierer med deformasjon og treslag, b er kontaktbredden vinkelrett på fibrene og l er lengden parallelt med fibrene. I forhold til fastsatt deformasjon kom Madsen frem til at uttrykket C/A er omtrent 30mm. Blass benytter denne verdien videre og setter denne som tillegg til pålastningsbredden.

Madsen gjennomførte forsøk på Douglas fir (Douglas gran) og S.P.F. (konstruksjonstrevirke) for å finne de beste konstantene A, B og C ved å benytte formelen:

Formel 8

$$Kapasitet = A \cdot areal + B \cdot parallelt + C \cdot vinkelrett$$

Under analysen viste det seg at bidraget fra effekten parallelt var liten i forhold til effekten vinkelrett. Madsen valgte derfor å gå bort fra dette bidraget (B) videre i analysen og kun benytte konstantene A og C, som i seg selv ble et enklere uttrykk. Dette gav utgangspunktet til Formel 6.

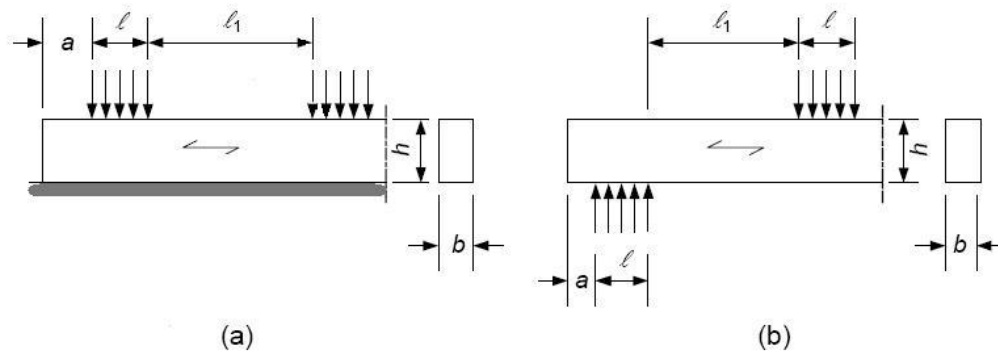
Blass og Görlacher antar en lastfordeling under 45° og følgende formel i bruddgrensetilstanden må være kontrollert:

Formel 9

$$f_{c,90,d} \geq \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}}$$

A_{ef} er beregnet på følgende måte: $A_{ef} = (l + \min\{a_{left}; l; 30 \text{ mm}\} + \min\{a_{right}; l; 30 \text{ mm}\}) \cdot b$

I tillegg til dette uttrykket er det en forutsetning at lastspredningslinjen fra nærliggende last ikke krysser andre lastspredningslinjer og tilfredsstiller følgende $l_1 \geq 2h$ og belastingslengden parallelt med fibrene ikke overstiger 400 mm.



Figur 13 Fra punkt 6.1.5 i NS-EN 1995.

I bruksgrensetilstanden setter Blass og Görlacher opp følgende uttrykk, se Formel . Setter materialfaktoren til 1,0 og innfører fasthetsfaktoren k_{mod}

Formel 5

$$\frac{f_{c,90,k}}{k_{mod}} \leq \frac{F_{c,90,d}(serv.)}{A_{ef}}$$

Formelen kan også omskrives og benyttes i bruddgrensetilstanden:

Formel 10

$$f_{c,90,d} \cdot k_{c,90} \leq \frac{F_{c,90,d}(ult.)}{A_{ef}}$$

For å beskrive en bruddgrensetilstand med en bruksgrensetilstand mener Blass og Görlacher at en modifikasjonsfaktor $k_{c,90}$ må til. Verdien settes til 1,75 på grunnlag av testingen av limtre, ut fra maksimalverdien til følgende uttrykk:

Formel 11

$$k_{c,90} = k_{mod} \cdot \gamma_M$$

For heltre setter de $k_{c,90}$ til 1,5 siden orienteringen av årringene kan føre til uønsket opptreden i forhold til limtre.

For bruddgrense settes $k_{c,90}$ alltid til 1,0. For heltre og limtre reduseres $k_{c,90}$ med 0,25 for sviller i bruksgrensetilstanden, argumentet er at det oppstår større totale deformasjoner i sviller enn ved oppleggssituasjoner.

Ut fra artikkelen ser det ut til at mye mangler teoretisk dokumentasjon.

2.6.3 Leijtens forslag for beregning av $k_{c,90}$ våren 2011

Leijtens forslag for å erstatte punkt 6.1.5 i Eurocode 5, forutsetningene bygger på metoder som blant annet er utviklet tidligere av T.A.C.M. Van der Put, beskrevet i artikkelen fra 2008 (Van der Put, 2008) og resultater som har kommet frem fra oppgaven til masterstudenten De Leier i 2010.

Følgende uttrykk skal være tilfredsstillt:

Formel 12

$$\sigma_{c,90} \leq k_{c,90} f_{c,90,d}$$

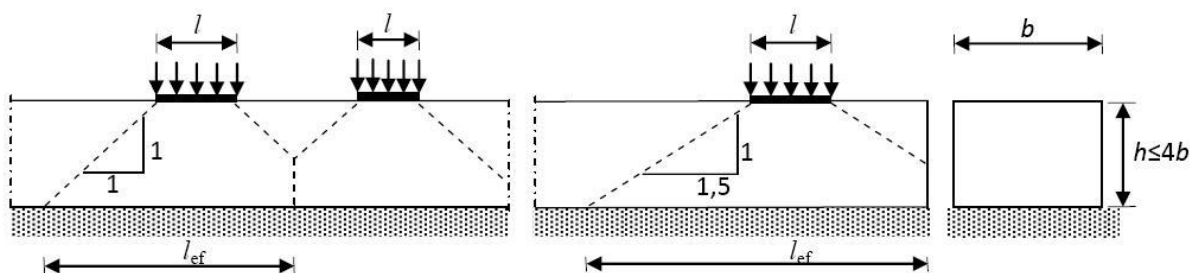
Med $k_{c,90}$ beregnet på følgende måte:

Formel 13

$$k_{c,90} = \min \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\frac{l_{ef}}{l}} \\ 4 \end{array} \right.$$

For å finne $k_{c,90}$ benyttes den effektive lengden l_{ef} etter spenningsfordelingen parallelt med fibre, l er lengden til lastflaten parallelt med fibre.

For sviller finnes l_{ef} ved å danne en lastspredningslinje fra kanten av lastflaten til underlaget, helningen på lastspredningslinjen er koblet avhengig av deformasjonen som tillates i svillen. Ved små deformasjoner på 4 % av høyden på svillen kan lastspredningslinjen ha et forhold 1:1 for store deformasjoner på 10% kan man sette helningen til 1:1,5 for lastspredningslinjen. Dette er kun undersøkt på bartrær. Den effektive lengden begrenses av enden på svillen eller eventuelt andre lastspredningslinjer.



Figur 14 Effektiv lengde ved full understøttelse (Leijten A. , 2011).

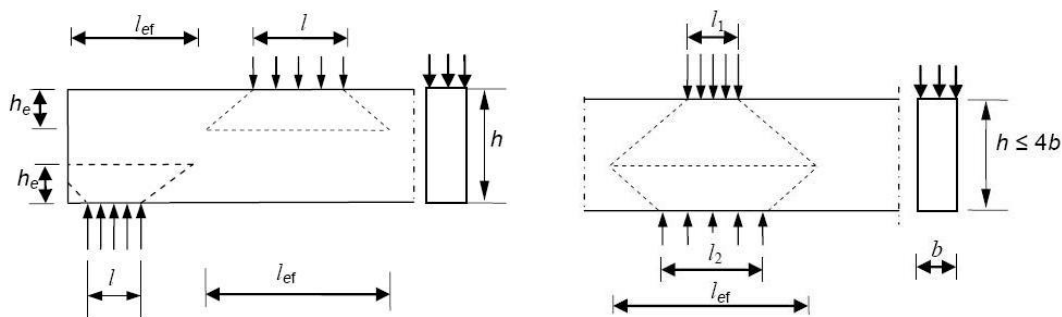
For sviller med en høyde $h \leq 4b$ vil den effektive høyden h_e være like den aktuelle høyden, for alle andre tilfeller skal den effektive høyden bestemmes på følgende måte:

Formel 14

$$h_e = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,35h \\ 140\text{mm} \end{array} \right.$$

Bakgrunnen for uttrykket er masteroppgaven til De Leier (2010) som ble vurdert og beskrevet i artikkelen til Jorissen (Jorissen, Leijten, & de Leijer, 2010), hvor det konkluderes med at det bærende arealet er begrenset av 35% av bjelke høyden eller et maksimum på 140 mm. Resultatet er basert på numeriske og optiske teknikker benyttet i De Leiers masteroppgave. Det er kun gjennomført forsøk på bartrær og kan ennå ikke bekreftes i forhold til løvtrær.

Eksempel på begrensning satt av den effektive høyden i Figur 15 og figur 12



Figur 15 og Figur 16 Hvordan å definere effektiv høyde og lengde ved bjelke og trykk fra begge sider (Leijten A. , 2011).

For trekomponenter med en høyde $h \leq 4b$, med last fra begge sider, skal den effektive lengden beregnes på følgende måte i Figur 15 og 16.

Formel 15

$$k_{c,90} = \min \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{0,5 + \frac{B + l_2}{2l_1}} \\ 4 \end{array} \right.$$

I beregning av $k_{c,90}$ benyttes B som settes til $2h$ for en lastspredningslinje med en helning 1:1, for en helning 1:1,5 settes B til $3h$. l_1 er lengden til den korte lasteflaten og l_2 er lengden til den lengste lasteflaten for lastetilfelle med last på begge sider.

2.6.4 Modellen til Van der Put

Teorien bygger på en likevektsmodell av T.A.C.M Van der Put, beskrevet i artikkelen "*Derivation of the bearing strenght perpendicular to the grain of locally loaded blocks*" (Van der Put, 2008) og benytter en likevektsmodell og antar en lineær elastoplastisk oppførsel for å bestemme spredningsvinkelen, med helning på henholdsvis forholdet 1:1 (45°) og forholdet 1:1,5 (34°). Van der Put bestemte dermed den viktige spredningsvinkelen analytisk.

Uttrykket er som følger:

Formel 16

$$\frac{F_d}{b \cdot l} = k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}$$

Hvor $k_{c,90}$ er:

Formel 17

$$k_{c,90} = \sqrt{\frac{l_{ef}}{l}} = \sqrt{\frac{l + 3h}{l}}$$

For bjelker med trykk fra begge sider er uttrykket som følger:

Formel 18

$$k_{c,90} = \sqrt{0,5 + \frac{3h + l_s}{2l}}$$

I dette tilfellet er l lengden på den korteste lastflaten og l_s lengden på den lengste lastflaten.

I artikkelen til Larsen (Larsen, Leijten, & Van der Put, 2008), går de igjennom flere modeller og tidligere forsøk for å bestemme bæreevnen tvers på fiber. Artikkelen konkluderer med at Van der Puts - modell er den mest nøyaktige og pålitelige i forhold til den nåværende modellen i Eurocode 5. Den nåværende modellen til Blass og Görlacher varierer stort mellom konservative eller noen ganger utrygge resultater. Modellen til Blass og Görlacher mangler også muligheten til å variere med bjelke høyden, last konfigurasjonen og deformasjon. Artikkelen anbefaler dermed at nåværende modell i Eurocoden erstattes av Van der Puts – modell.

2.6.5 Alvdis Hardengs hypotese for beregning av inntrykning i bruksgrensetilstanden

Bakgrunnen for Alvdis hypotese for beregning av inntrykning i bruksgrensetilstanden er at man må beskrive bæreevnen på en alternativ metode. Man deler opp situasjonen i hvor stor inntrykning som oppnås eller hvor stor inntrykning som tillates. En metode for å finne dette er å finne helningen til arbeidsdiagrammet i det lineære området, den såkalte k -stivheten. k -stivheten ser på sammenhengen mellom trykkspenningen og inntrykningen ved trykkplaten.

Hypotesen beskriver at inntrykningsberegningene for svill og bjelker er lik ved midtlast. Dette skyldes at den initielle spenningen er lik. For sviller med endelast må disse behandles separat, siden k -stivheten fra Hardengs forsøk er omtrent $\frac{1}{3}$ av k -stivheten til bjelker og sviller med midtlast. Følgende uttrykk beskriver situasjonen ved midtlast:

Formel 19

$$u = \frac{\sigma}{k - \text{stivhet}}$$

Sammenhengen mellom trykkspenningen (σ) og inntrykningen (u) i underkant av trykkplaten i det lineære området.

Grunnlaget for hypotesen er at alle arbeidsdiagrammene for prøvestykkene er analysert og k -stivheten er funnet i Hardengs oppgave. k -stivheten er vurdert lik for både lav og høy bjelke og svill siden den initielle spenningen er lik ved lasttilfelle midt på. CEN-metoden er benyttet for å finne den lineære tilpasningen for å beregne verdien av k -stivhet. Tabellen under viser k -stivheten for de 66 forsøkene som ble gjennomført.

Tilfelle	A1	B1	B2	G1	G2	F1
k -stivhet	2,736	4,995	4,821	4,564	3,982	1,444

Figur 17 Verdier for k -stivhet i N/mm^3 (Hardeng, 2011).

A1 er en "block test", B1 og B2 er sviller med midtlast, F1 er svill med endelast, G1 og G2 er henholdsvis lav og høy bjelke.

Gjennomsnittlig k -stivhet for sviller og bjelker med punktlast midt på er beregnet til $4,59 \text{ N/mm}^3$. Uttrykket kan da benyttes for å finne inntrykningen ved punktlast midt på i bruksgrensetilstanden:

Formel 20

$$u = \frac{\sigma}{4,59}$$

Lasttilfeller som trykk fra begge sider ved ende og midt på er ikke vurdert i hypotesen, siden testing ikke er gjennomført for disse tilfellene.

2.6.6 Alvdis Hardengs forslag til beregning i bruddgrensetilstanden

Det er foreløpig ikke funnet noe uttrykk for kontroll i bruddgrensetilstanden, men Hardeng kom med forslag for løsning ut fra uttrykket i hypotesen for beregning av inntrykning i bruksgrensetilstanden. To forslag ble gjeldende.

Den første metoden er å utarbeide en reduser k-stivhet for bestemmelse av bruddlasten, forslaget er at man reduserer k-stivheten for brukslast med $\frac{2}{3}$ eller $\frac{1}{2}$. En reduksjon på $\frac{2}{3}$ av k-stivheten vil være sikrere enn halvparten av k-stivheten selv om denne følger arbeidsdiagrammet bedre. Bestemmelsen av bruddlasten vil da komme frem i skjæringspunktet mellom arbeidslinjen og den reduserte k-stivheten. Metoden er ikke testet ut videre, men antar å gi relativt lave verdier for bruddspenningen.

Den andre metoden for bestemmelse av bruddlasten er å finne et krav for inntrykningen, som vil gi høyere bruddspenninger og bedre utnyttelse av arbeidslinjen. Siden forsøkene med punktlast midt på har en fast stigende arbeidslinje vil man alltid være sikret mot total kollaps. Forslaget til Hardeng er derfor å droppe materialfaktorer og i stede benytte en 20 % - fraktil for beregning av $f_{c,90,d}$.

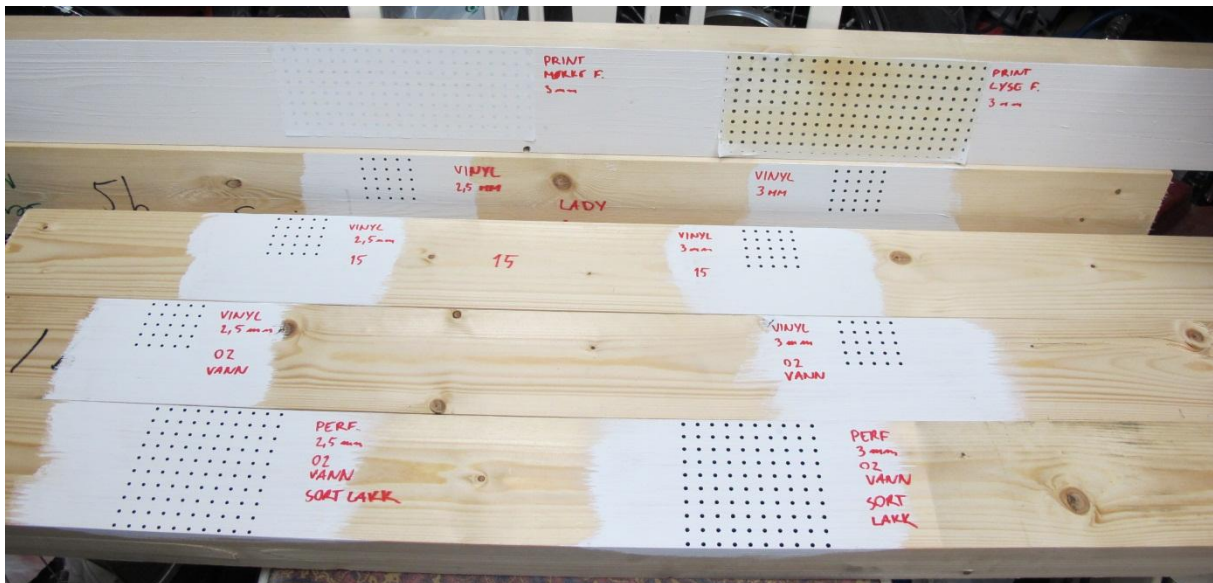
3 Metode

3.1 Forberedelser

3.1.1 Merkesystemet ("prikkene")

Fra tidligere forsøk fikk vi vite at vi måtte finne en bedre og enklere måte å påføre prikker på prøvestykkene. For det første var det å finne en mer effektiv måte å påføre prikkene, det andre var å få bedre presisjon på prikkene.

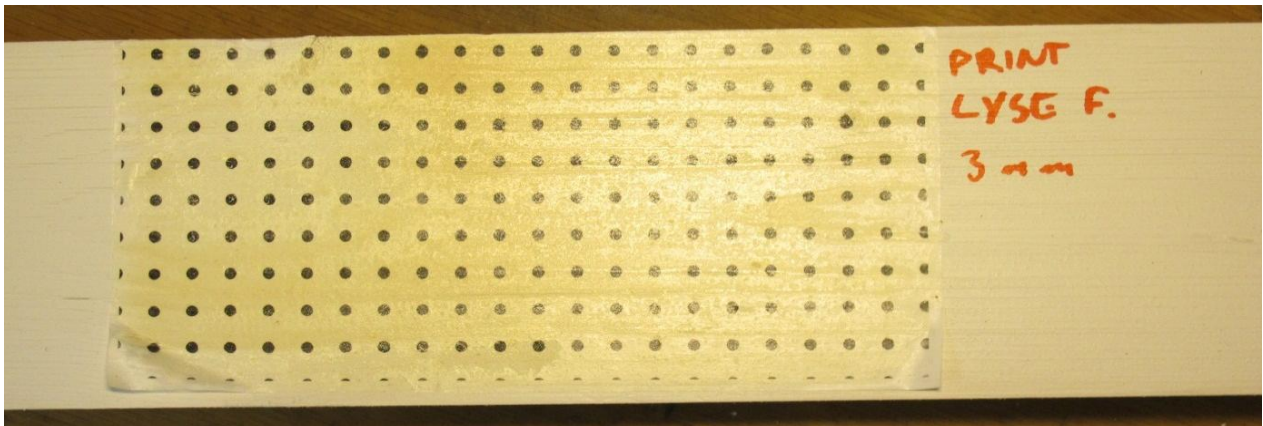
Ved tidligere forsøk har man benyttet en "prikkmal" (stålplate med hull) og penn/tusj for å merke alle prikkene på prøvestykkene. Det er en meget tidkrevende prosess og nøyaktigheten blir ikke alltid like god. Fargen fra pennen flyter ut og medfører at prikkene ikke blir sirkulære, dette fører så til at bildeanalysen blir vanskeligere da analysen søker etter senter av prikkene.



Figur 18 Prøver klargjort for testing av prikker med forskjellig grunning og metode for påføring av prikkene.

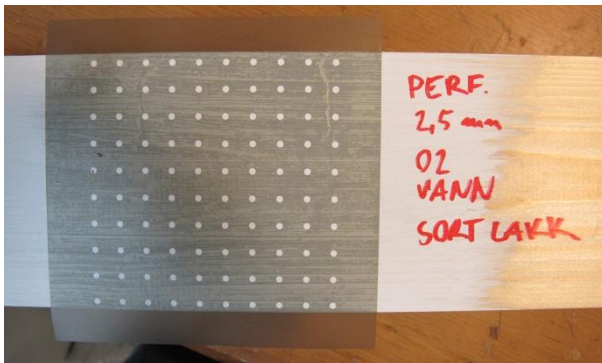
Vi prøvde flere forskjellige metoder for å påføre prikkene:

- Strykemerker for tekstiler, både for mørke og lyse tekstiler. Dette er ark man putter i en vanlig fargeprinter og man printer ut prikkene, det er kun der man har printet på prikkene det blir farge når man stryker merket, det resterende blir transparent og man må derfor grunne prøvestykket med hvit maling for å få god nok kontrast. Det er to problemer med denne metoden og det ene er at prikkene ikke blir gode nok, de ser litt porøse ut og det andre er at man må ha så høy temperatur for å stryke på merkene at malingen under blir brun og da mister man kontrasten.

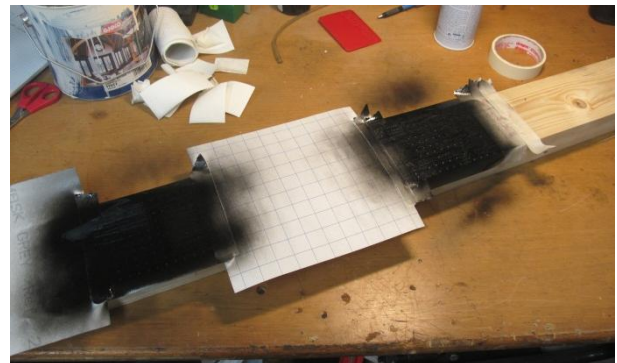


Figur 19 Strykemerker for tekstiler, printet med 3 mm prikker.

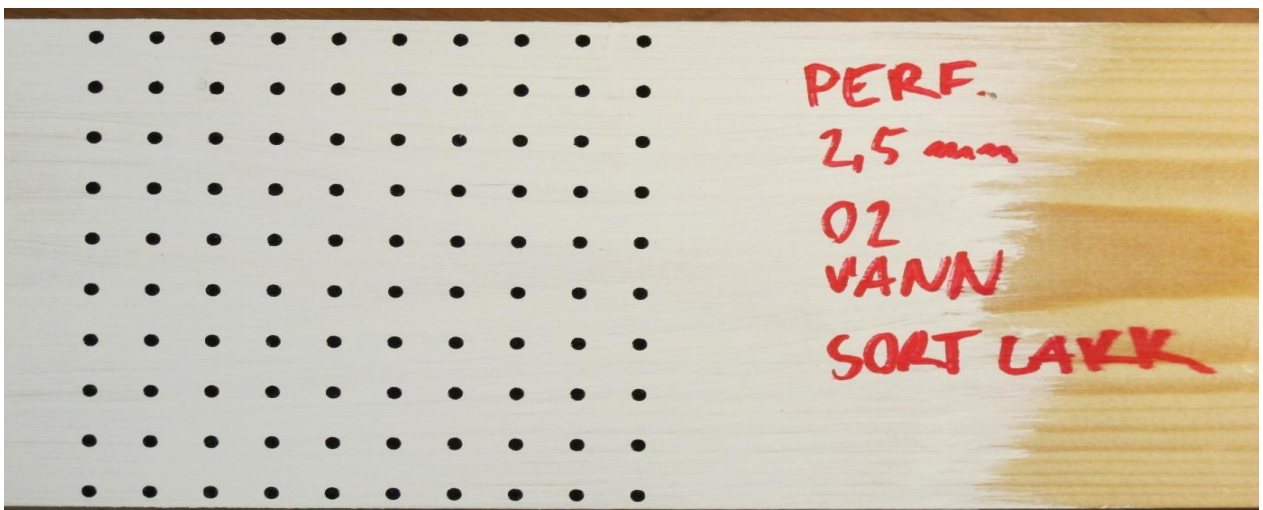
- Vinylfolie med litt svakt lim som er lett avtakbart, hvor det ble skåret ut sirkler som ble fjernet og vi satt da igjen med mal full av hull. Malen kunne klistres på en ferdig malt prøvestykkene før vi sprayet den med sort hobbymaling. Dette gav et meget godt resultat, men er en omstendelig og grisete måte å gjøre det på. Det blir en veldig intens lukt i lokalet man jobber i samtidig som det fort kan bli en del søl. I tillegg må prøvestykkene tørke en god stund før de kan benyttes eller stables oppå hverandre.



Figur 20 Prikkmalen i vinylfolie.

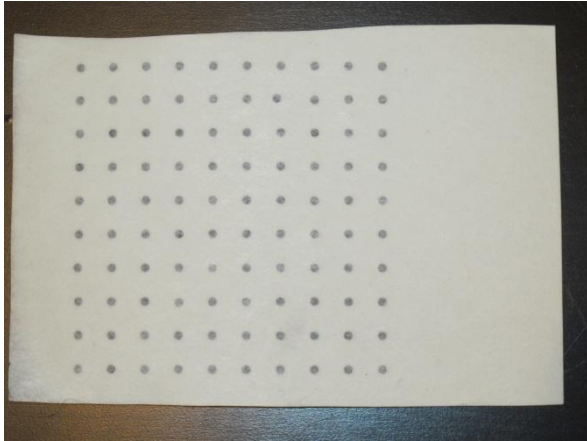


Figur 21 Spraymaling av prøvestykkene.

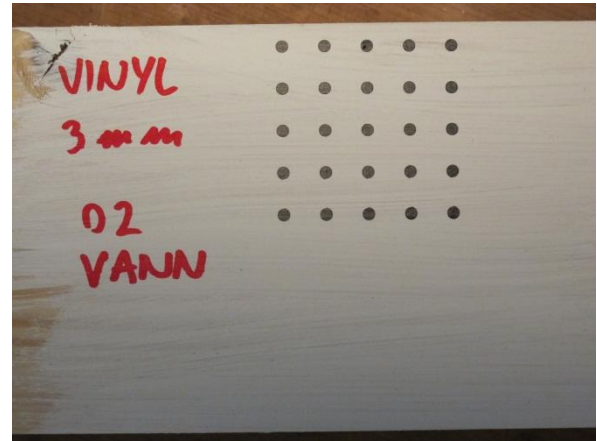


Figur 22 Bra resultat etter spraymaling, men tidkrevende.

- Den siste metoden vi prøvde var også vinylfolie, men denne gangen med sterkere lim. Dette er samme type folie som benyttes til å dekorere blant annet biler og lignende. Folien vi brukte var matt sort for ikke å gi gjenskinn på bildene. Også her ble det skåret ut sirkler med høy presisjon men denne gangen fjernet vi det rundt og satt igjen med ett ark med mange prikker med lik senteravstand. Deretter ble det lagt på et selvklebende applikeringspapir over alle prikkene som gjorde at vi kunne fjerne dekkpapiret under prikkene og klistre disse på prøvestykkene. Limet på vinylfolien er sterkere enn limet på applikasjonspapiret som gjør at prikkene blir sittende igjen på prøvestykket når applikasjonspapiret rives av.



Figur 23 Påføring av klebende prikker.



Figur 24 Prikker med 3mm diameter ble undersøkt.



Figur 25 Applikeringspapiret trekkes av og prikkene sitter igjen på prøvestykket.

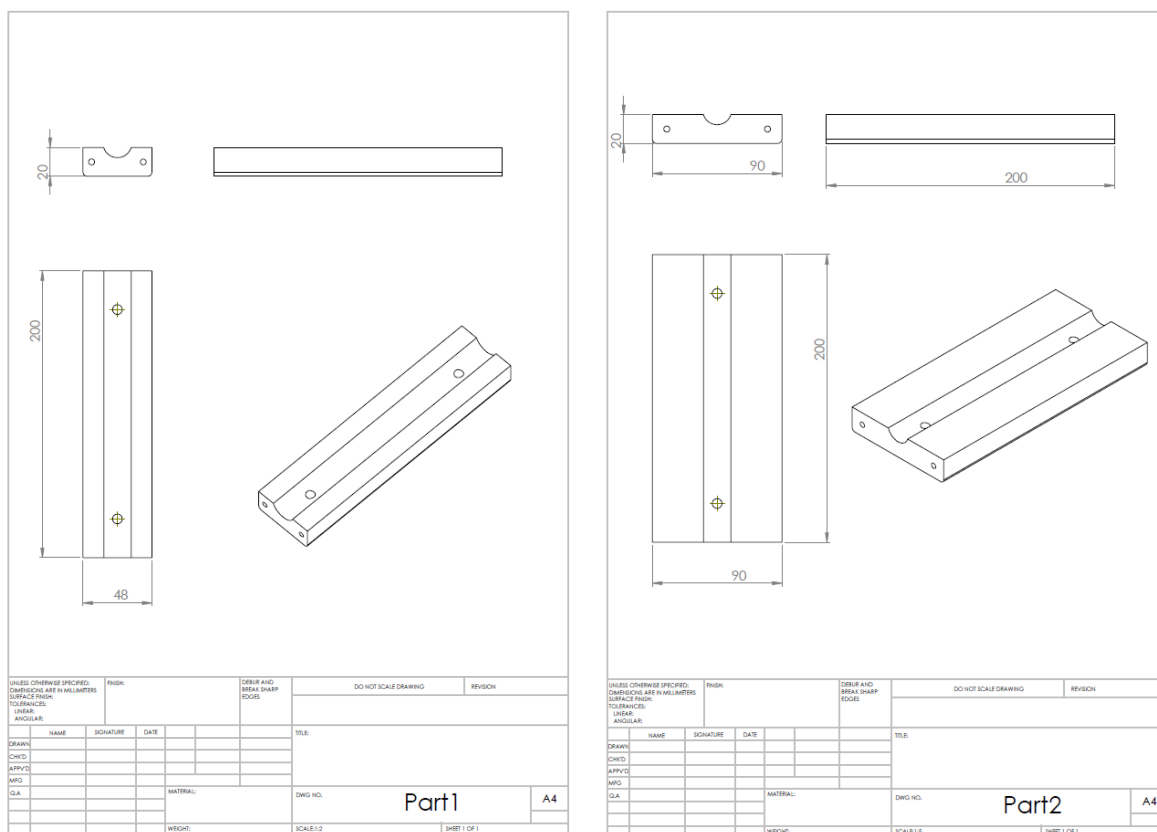
Vi testet flere forskjellige malingstyper som grunning, både vannbaserte og oljebaserte med glans fra 40 (halvblank) og helt ned i 02 (matt).

Vi undersøkte også størrelsen av prikkene og testet med diameter på 2,5 og 3mm. Ved testing av prøvestykkene var det opplagt at prikker med 2,5 mm var de prikkene som var best egnet. Ved testing av prøvestykkene ble de ulike variasjonene av prikker og maling vurdert. Vi valgte den matte med glans 02 da denne ikke ga noe gjenskinn på bildene og ga god vedheft for vinylfolien i alternativet med selvklebende prikker.

3.1.2 Fremstilling av trykkplater

For å kunne gjennomføre testingen trengte vi flere forskjellige trykkplater av stål. Vi trengte plater av ulik bredde med forskjellig opplagring og avrundet eller skarp kant. Disse delene måtte også tilpasses testmaskinene på treteknisk. Det var ingen deler med riktige mål tilgjengelig og disse måtte derfor produseres på det mekaniske verkstedet på UMB.

Før delene kunne produseres i en CNC fres måtte de tegnes i SolidWorks (SolidWorks, 2011) før de kunne programmeres inn i fresen. Totalt trengte vi å få produsert 12 deler, samt bestille en del bolter for å kunne montere delene sammen. For så å montere disse på testmaskinene på Treteknisk. Delene er produsert i S355 stål og boltene er av kvalitet 8.8 og 12.9.

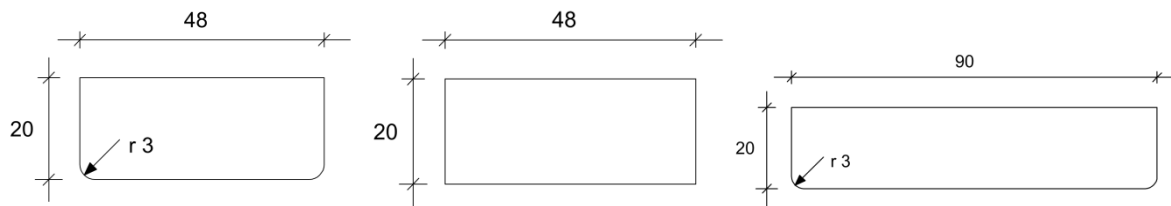


Figur 26a og b Trykkplate henholdsvis 48 mm og 90 mm bredde (SolidWorks).

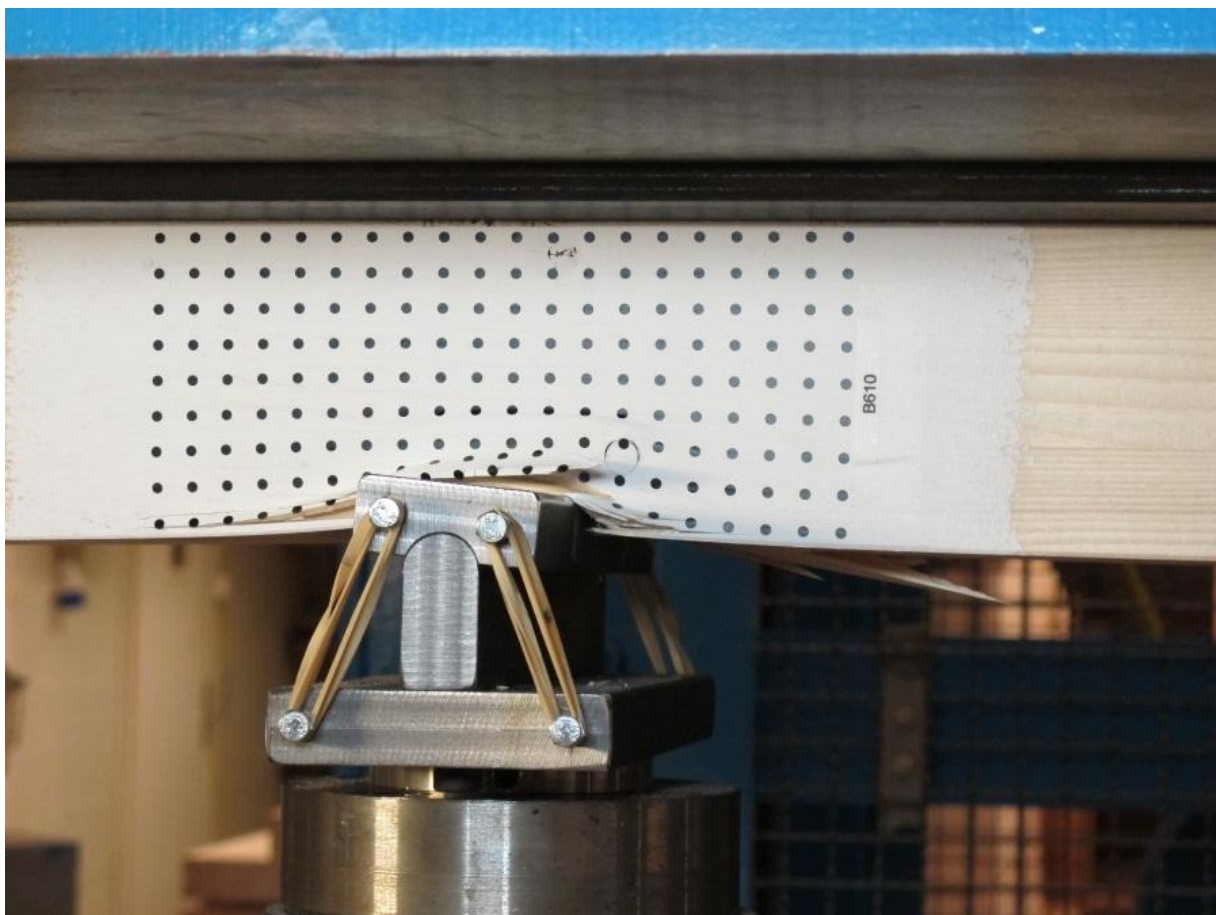
Delene ble laget med like mål så de passer om hverandre og de samme delene passer på begge testmaskinene på Treteknisk. De passer ikke til testmaskinen på UMB per tidspunkt, men ved å lage en overgang skal de kunne benyttes der også. Noen av trykkplatene trengte vi to stykker av ved testing av tosidig trykk, dog er ikke disse like da det er ulike fester oppe og nede på Dartec testmaskinen.

Den største delen en stålplate på 180 · 1200 · 5 mm med 4 festebolter, delen kan kun benyttes på Treteknisk da denne er spesialtilpasset til Dartec maskinen. Platen er til for å dekke over et hull i senter og en langsgående skinne på det øvre klembordet. De resterende delene er laget av 20 mm flattstål og alle er 200 mm lange. Det er laget trykkplater med 48 og 90 mm bredde med skarp og

avrundet kant, den avrundete kanten har en radius på 3 mm. Noen av trykkplatene ble også laget for å kunne rotere om en akse.



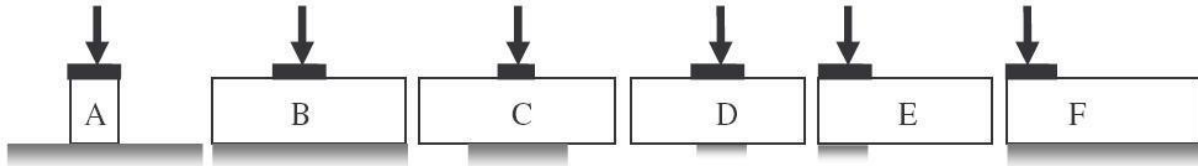
Figur 27a, b og c Trykkplater med avrundet og skarp kant med bredde 48 og 90mm.



Figur 28 Prøvestykke B610. Rotasjon om en akse i trykkplaten under testing av prøvestykke.

3.2 Trevirket

Det var i prosjektet ønskelig med prøvestykker med varierende dimensjoner og testing i ulike laststilfeller. Figur 29 viser en oversikt over aktuelle laststilfeller. Det er gjennomført testing av prøvestykker i laststilfelle B, D, E og F, i tillegg kommer testing av prøvestykker som bjelke med faste eller roterbare opplegg. For detaljert forsøksplan refereres det til vedlegg A.



Figur 29 Laststilfeller, (Larsen, Leijten, & Van der Put, 2008).

I forsøket er det benyttet prøvestykker i heltre og limtre. Heltre materialene ble plukket ut fra klimalaboratoriet til Treteknisk, det var rester fra tidligere tester med dimensjoner $48 \cdot 198 \text{ mm}$. Heltre materialene var fingerskjøtt virke med trelastkvalitet C24 og C30, fingerskjøten ble kappet bort. Forskjell i kvalitet er en fordel for å få en bredere variasjon i forsøkene. Heltre materialene var relativt godt klimatisert etter lagring i klimarom ved 20°C med relativ fuktighet på 65%.

Store deler av materialene i limtre måtte bestilles fra Moelven. Limtre med kvalitet L40C i dimensjoner $90 \cdot 405 \text{ mm}$, (bestående av 9 lameller) og $90 \cdot 90 \text{ mm}$ (bestående av 3 lameller), ble mottatt i 3000 mm lengder. Det var noen få lengder igjen fra Hardengs tester med kvalitet GL32C. Disse ble tatt med videre i forsøkene uten videre skille mellom trelastkvalitetene.

Det var ønskelig med prøvestykker med andre dimensjoner under testingen, limtre med dimensjon $90 \cdot 90 \text{ mm}$ ble splittet til bredde på omtrent 43 mm . For heltre ble dimensjon $48 \cdot 198 \text{ mm}$ splittet til dimensjon $48 \cdot 90 \text{ mm}$ for testing av lav svill.

For testing er det ofte ønskelig med feilfrie prøvestykker for å få best mulig resultat. For denne testingen har fokus vært å få naturlig variasjon både når det gjelder densitet, fukt og de andre egenskapene til trevirket. Dette for å kunne simulere hva som først og fremst skjer i en faktisk brukssituasjon.

Etter mottak ble trematerialene kappet i de forhåndsbestemte lengder. Trematerialene ble så strølagt for klimatisering i klimarom. Prøvestykkene lå omtrent 5 uker til klimatisering før testing. Etter kapping ble prøvestykkene nummerert fortløpende. Lengden på prøvestykkene varierer fra 980 mm for svillene til 1500 mm for bjelkene.

3.2.1 Densitet

Densiteten til trevirket har stor innvirkning på styrken og fastheten til trevirket. Densiteten er avhengig av mange faktorer, særlig årringbredden til trevirket, hos bartrær vil en økende årringbredde medføre en lavere densitet. Densiteten varierer med andelen vårved i trevirket, vårved har tynnere cellevegg og vil dermed ha lavere densitet i forhold til sommerveden.

Densitet kan brukes i mange varianter, mest vanlige er:

- Tørrdensitet
- Basisdensitet
- Rådensitet
- Densiteten ved gjeldende trefuktighet

Densiteten (ρ) beregnes ved å se på forholdet mellom massen og volumet. For å finne basisdensiteten til trevirket benytter man følgende formel:

Formel 21

$$\rho_{0,f} = \frac{m_0}{v_f}$$

I formelen er m_0 massen i tørrtilstand og v_f volumet i rå tilstand. Ut fra dette uttrykket kan man regne seg frem til den gjeldende fuktigheten, som i vårt tilfelle er valgt til 12% ($\rho_{12,12}$) ved å benytte følgende formel, hentet fra Treteknisk håndbok (Treteknisk, 2009):

Formel 22

$$\rho_{12,12} = \frac{100 - \frac{12\beta}{FMP} \cdot 1,12}{100 - \beta} \cdot \rho_{0,f}$$

I formelen er β den totale volumkrympingen i prosent, FMP er fibermetningspunktet i vår testing er det benyttet trevirke av gran og fibermetningspunktet er satt til 30%.

Densitetsprøvene ble gjennomført i to omganger, ved kapping og klargjøring av prøvestykkene i riktige lengder ble det tatt ut densitetsprøver. For en oversikt over variasjonen i densitet for trematerialene. Dette var nyttig for det videre arbeidet og ga grunnlaget for god variasjon i densitet for testseriene. Det ble tatt ut to densitetsprøver for hver 3000 mm lengde. Bredden på densitetsprøvene var omkring 20 mm.

Omtrent umiddelbart etter testing ble det tatt ut nye densitetsprøver så tett som mulig opp mot området trykkplaten har virket. Det ble tatt hensyn til eventuelle fingerskjøter, slik at densiteten i gjennom hele tverrsnittet under trykkplaten ble målt. For limtrebjelkene ble densiteten for hver enkelt lamell kontrollert, for så senere og kunne midle verdiene for det området som er påvirket av trykkraften.

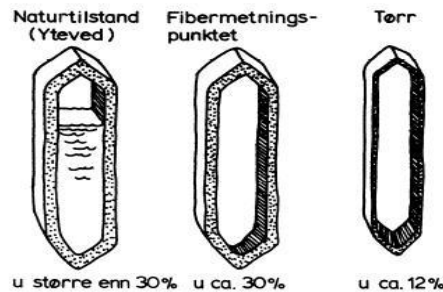
Densitetsprøvene skal i utgangspunktet være kvistfrie, uten tegn til deformasjoner eller skader, det viste seg under utkapping av densitetsprøvene å være svært vanskelig å få alle prøver kvistfrie.

Massen til densitetsprøvene ble så målt på en elektronisk vekt *Mettler PM 4600* med nøyaktighet på $\pm 0,01$ gram, volumet ble målt med elektronisk skyvelære av type *Mitutoyo* med en nøyaktighet på $\pm 0,03$ mm. Ved måling ble verdiene registrert direkte til regneark i Excel på datamaskinen. Densitetsprøvene ble så lagt i varmeskap med temperatur $103 \pm 2^\circ\text{C}$ i minimum 24 timer.

3.2.2 Fuktighet

Som nevnt tidligere i teoridelen krymper og sveller trevirket under fibermetningspunktet. Fibermetningspunktet varierer med treslag og oppstår idet alt fritt vann i cellehulrommene er fordampnet og vannet i celleveggen begynner å forlate celleveggstrukturen.

For å finne volumkrympingen slår man ofte sammen verdien for den totale krympingen fra de forskjellige retningene til trevirket. For gran ligger den totale volumkrympingen på omtrent 12%



Figur 30 Krymping av cellene i trevirket (Treteknisk, 2009).

Trevirket er et hygroskopisk materiale og vil over tid tilpasse trefuktigheten til en likevektsfuktighet i forhold til klimaet trevirket befinner seg i. Klimaet vil si forholdet mellom temperaturen og den relative luftfuktigheten. Man finner trefuktigheten (u) ved å benytte tørke-/veiemetoden:

Formel 23

$$u = \frac{\text{råvekt} - \text{tørrvekt}}{\text{tørrvekt}} \cdot 100\%$$

Fuktprøvene ble gjennomført i samme prosedyre sammen med densitetsprøvene og verdiene ble registrert i regneark i Excel på datamaskinen.

3.3 Laboratorieforsøk

3.3.1 Oppsettet til laboratorieforsøkene

Under forsøkene ble det benyttet to forskjellige testmaskiner. I den ene maskinen, Dartec, ble alle svill- og endetrykk prøvestykkene testet mens i spenngulvet hvor selve trykksylinderen heter Acurator 23 ble bjelkene testet. Programvaren i begge maskinene er Station Manager og testprogrammet er TestWorks 4. Begge maskinene har en maksimal trykkraft på 100 kN og står i laboratoriet på Treteknisk.

Trykksylinderen Acurator 23 har et bevegelig ledd i toppen og er ikke fastholdt i noen retninger. Trykksylinderen henger i en bjelke over prøvestykkene og trykker nedover på prøvene. Her ble det benyttet deformasjonsmålere for å kunne måle nedbøyningene samt inntrykningen i prøvestykket ved opplagg.



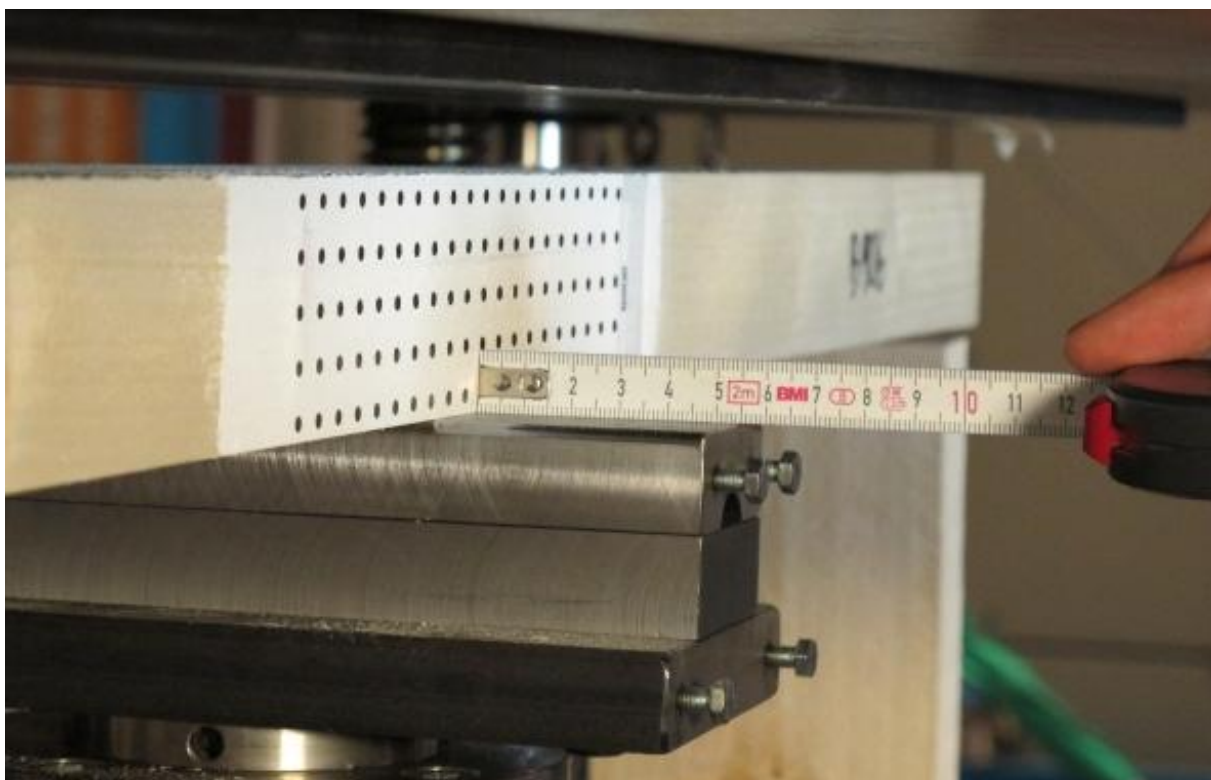
Figur 31 Oppsett for testing av bjelker, i dette tilfellet G3 - serien. Til høyre i bildet ser man datamaskinen som ble brukt ved fotogrammetrien og bak denne kan man skimte kamerastativet og kameraene samt en lyskilde.

Opplagringen i Dartec er motsatt da trykksylinderen her er plassert i underkant av prøvestykket og trykker dette oppover mot et bevegelig klembord som kan justeres for å kunne tillate ulike dimensjoner på prøvestykkene. Alle prøvene her ble derfor kjørt opp ned uten at det har noen betydning for den videre analysen av resultatene. Det er noe dødgang i maskinen og det blir nedbøyning av klembordet under testing som gjør at det blir noe unøyaktige målinger og dette blir korrigert i analysen ved hjelp av data fra 6 prøvestykker som ble testet med deformasjonsmålere for å kunne kalibrere bort svakhetene i maskinen.



Figur 32 Svilletrykk av prøvestykke B402 i Dartec testmaskinen.

Alle prøvestykkene ble klargjort for fotogrammetri og merket på ulike steder for å forenkle plasseringen i testmaskinen. Avstanden til kameraene er meget viktig da disse ikke har autofokus og vi målte derfor avstanden nøyaktig hver gang for å opprettholde god fokus.



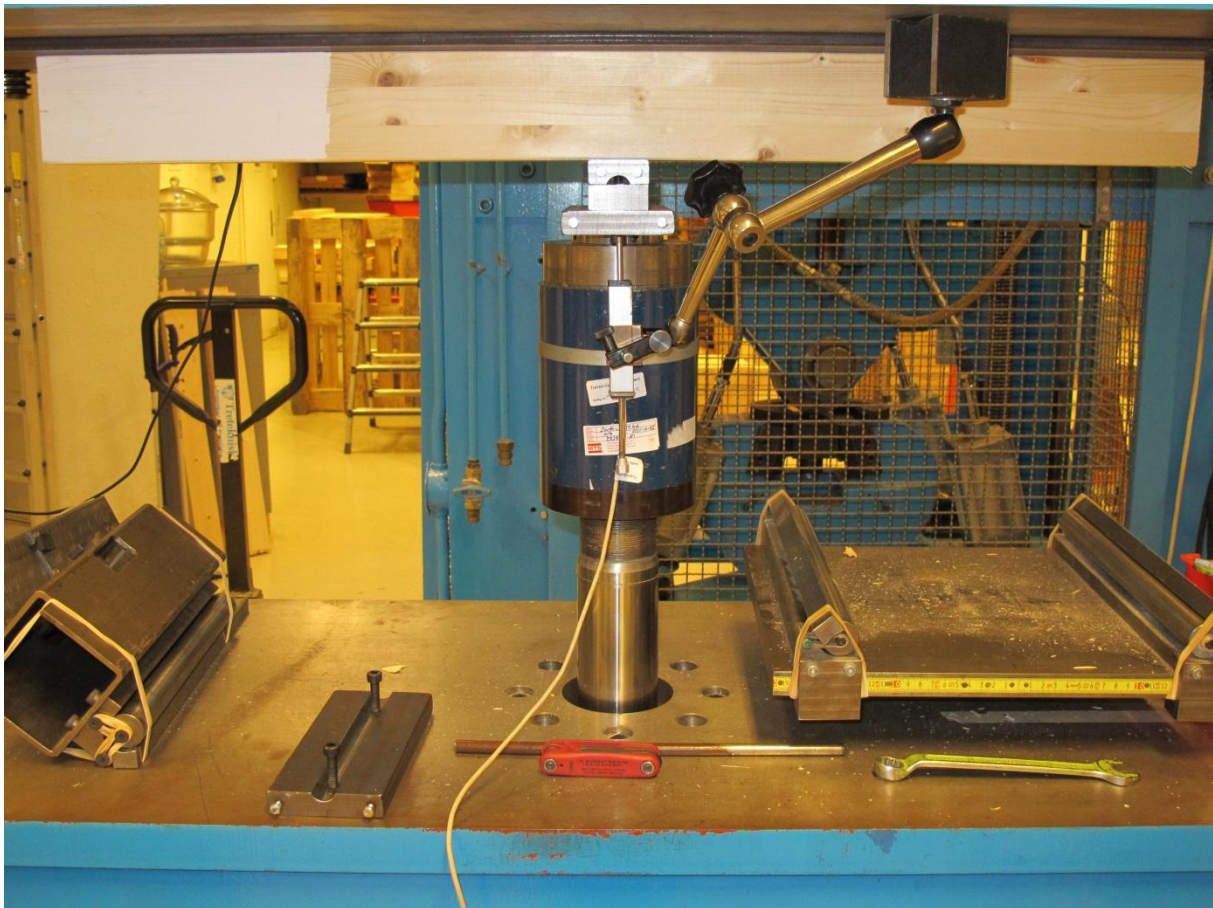
Figur 33 Nøyaktig plassering av prøvestykke før testing.

Prøvestykkene ble kjørt med varierende hastighet/trykkpålasting avhengig av bredde og høyde, samt bredden på trykkplaten (e) som ble benyttet. Prøvene ble kjørt til en deformasjon på 25 mm eller til maks kraft på maskinen som i begge tilfeller var 100 kN. Prøvetiden lå mellom 15 min og 25 min. Prøvestykkene ble kjørt lenge for i ettertid å kunne beregne fasthet i de ulike grensetilstandene.

3.3.2 Randbetingelser og sensorer

Serie B3-B10, D1, E1 og F2-F3 ble testet på Dartec testmaskinen hvor B3-B10 og F2-F3 ble utført som svilletrykk med full understøttelse mens D1 og E1 ble utført som tosidig trykk uten understøttelse.

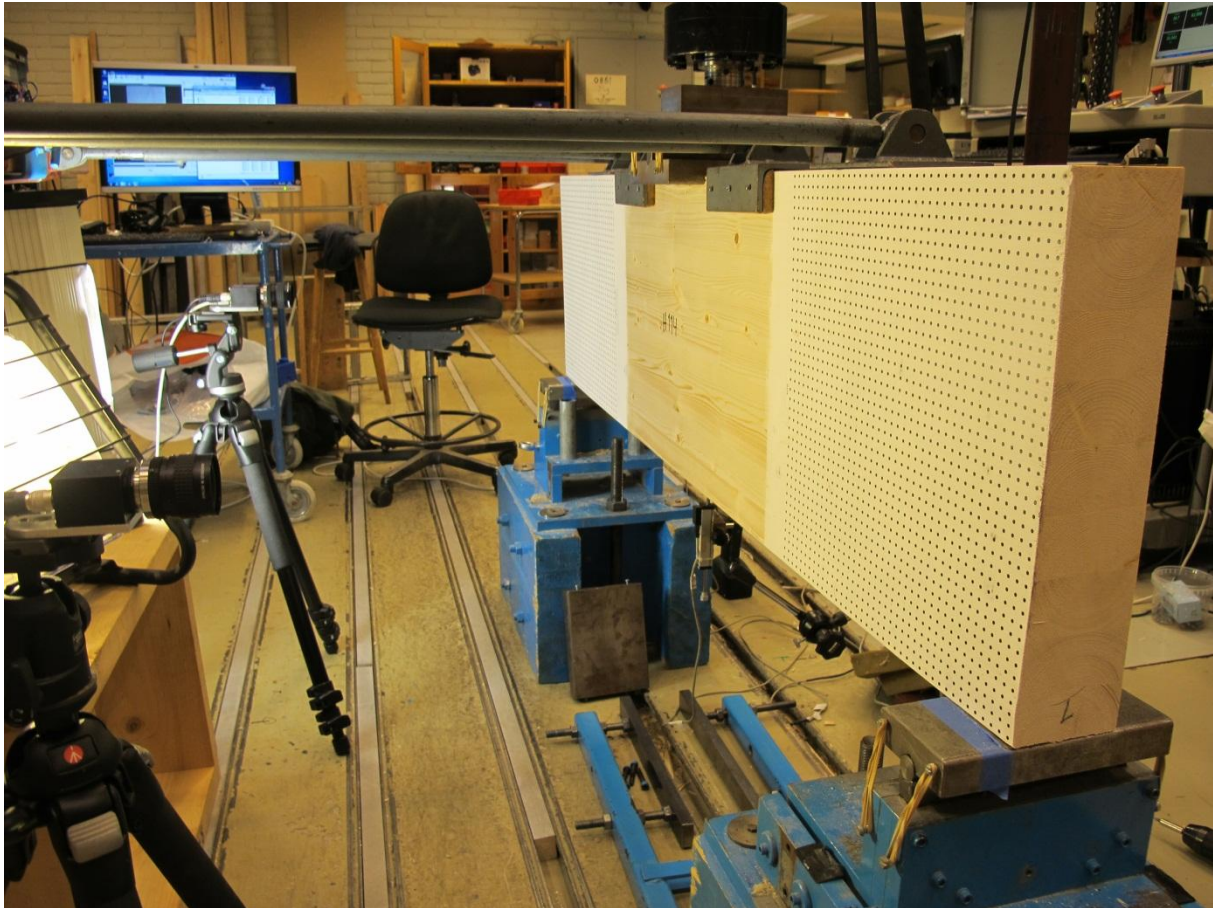
Det ble brukt to forskjellige deformasjonsmålere under testingen, begge er av merke Novotechnik og kan maksimalt registrere deformasjoner på henholdsvis 50 mm og 11,5 mm. Nøyaktigheten er på $\pm 0,02$ mm. På Dartec testmaskin ble deformasjonsmålerne brukt til å kjøre noen kalibreringsprøver for å kunne dokumentere dødgang og svikt i maskinen under testing. Disse dataene ble brukt for å kalibrere dataene og grafene fra testingen. Deformasjonsmåleren ble montert med magnetfot i klembordet.



Figur 34 Oppsett ved kalibrering.

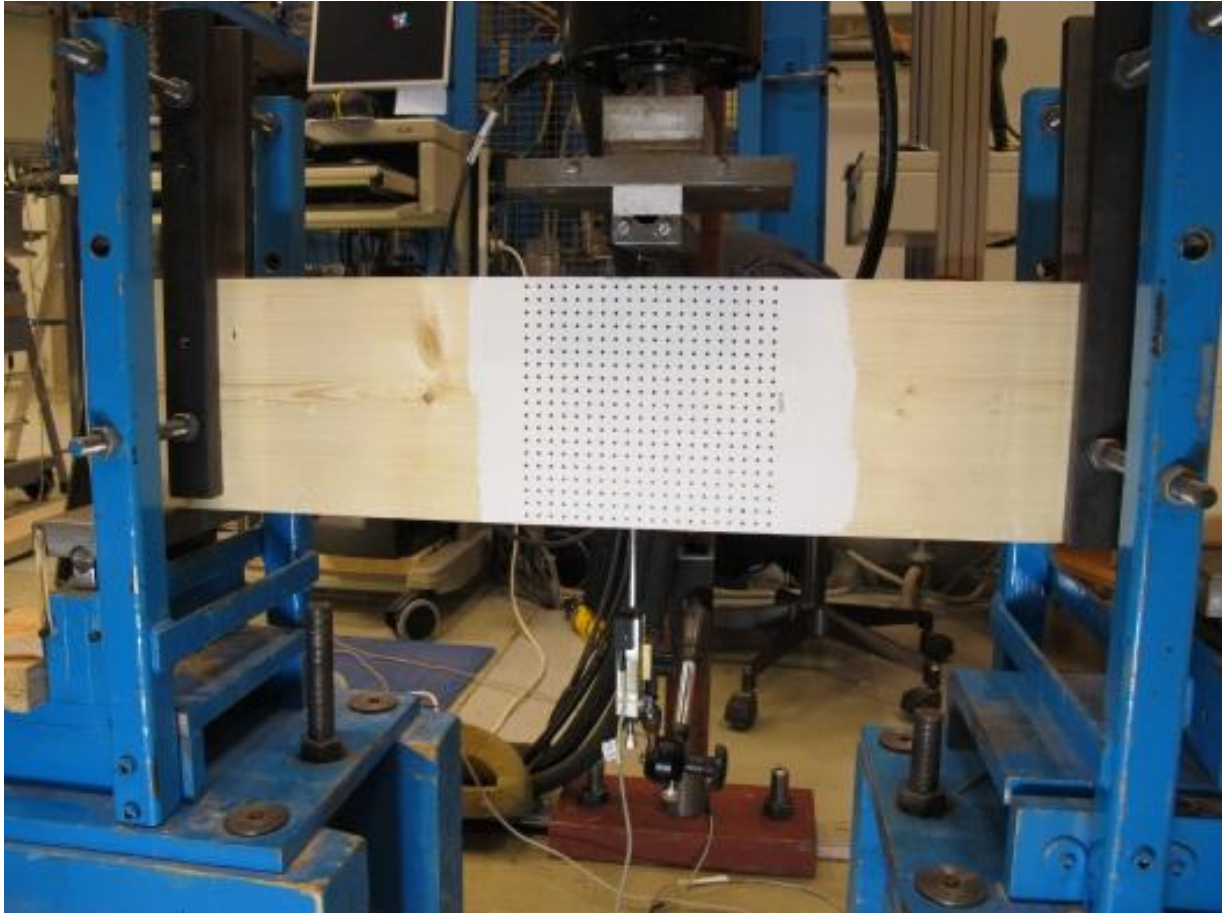
Instituttet for Matematiske realfag og Teknologi

Serie G3, G4 og H1 ble testet på spenn gulvet hvor alle ble testet som en fritt opplagt bjelke. Det ble brukt to opplegg, ett i hver ende av bjelken hvor det ene er et fastlager og det andre er et glidelager. I serie G3 og G4 så vi på området hvor belastningen ble pålastet i senter mens i serie H1 fokuserte vi på oppleggene hvor det ene opplegget var fast og det andre var roterbart.



Figur 35 Prøvestykke H114. Oppsett ved testing av H1 - serien, med fast- og glidelager.

På spenn gulvet ble deformasjonsmålerne brukt til å måle nedbøyningen av bjelkene samt å måle deformasjon ved endeoppleggene. Deformasjonsmåleren som måler nedbøyningen i senter av bjelken rett under trykksylinderen ble festet med en magnetfot i en av søylene som holder trykksylinderen oppe, denne er boltet fast i betonggulvet og gir derfor et godt referansepunkt.



Figur 36 Oppsett for bjelke, G3 - serien.

Deformasjonsmålerne ved hvert opplegg måtte skrues fast i prøvestykket for å kunne måle deformasjonen i hele tverrsnittet Figur 37. Det ble benyttet stenger av aluminium som forlengelse av deformasjonsmålerne, disse ble festet med braketter som gir tilnærmet null friksjon, det ble sjekket at stengene kunne bevege seg fritt etter montering og før testkjøringen. Disse deformasjonsmålerne ble montert over senter på oppleggene og eventuelle avvik ved disse målingene vil være minimale og vi kan derfor se bort fra de. Det viste seg senere at disse målingene ikke var nødvendige for å løse problemstillingen i oppgaven og ble derfor ikke brukt videre i analysen av resultatene.



Figur 37 Deformasjonsmåler ved oppleggene i tilfelle G3, G4 og H1.

Ved hvert opplegg var det gaffellagring for å hindre rotasjon av bjelken i lengderetning og for å hindre at den kunne "velte". Alle prøvestykkene ble belastet med en punktlast midt på og kontaktflaten mellom prøvestykket og trykkplaten er lik bredden av prøvestykket x bredden av trykkplaten.

3.3.3 Feilkilder i laboratorieforsøkene

Det er ikke mulig å gjøre hver eneste test på en identisk måte, men testingen og randbetingelser er utført i henhold til normer. Små avvik i testoppstillingen kan fremdeles ha forekommet.

Da utstyret ble kalibrert og oppsettet kontrollert mellom hver test kan vi se bort i fra eventuelle måleavvik på utstyret.

3.4 Fotogrammetri

3.4.1 Generelt om fotogrammetri

Fotogrammetri er faget, vitenskapen og den indirekte måleteknikken som brukes når en ved hjelp av fotografiske eller digitale bilder observerer og bestemmer egenskaper som for eksempel beliggenhet, form, størrelse og identitet for avbildet terreng eller andre gjenstander. Selve ordet "fotogrammetri" er satt sammen fra gresk *fos* - lys, *grafein* - skrive, tegne og *metron* – mål (Andersen, 1999).

Formel 24

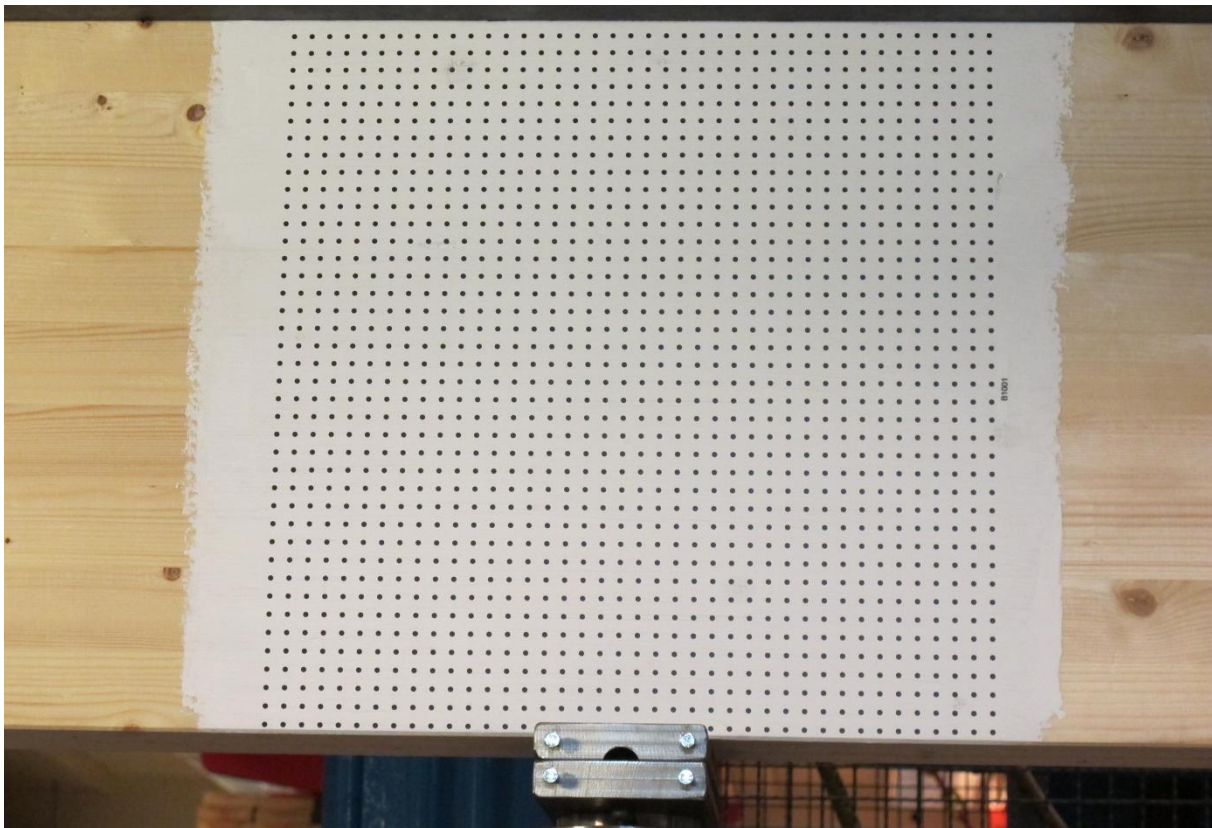
$$\frac{\text{størrelse i bilde}}{\text{kamerakonstanten}} = \frac{\text{størrelse i virkelighet}}{\text{avstand til objektet}}$$

Metoden brukes til bestemmelse av geometriske egenskaper som form, størrelse og beliggenhet til objektet som er fotografert. Spesielt i kartleggingshensyn er metoden ideell, da man ved hjelp av flyfotografering kan innhente data på en effektiv måte og kan komme til områder som er vanskelig tilgjengelig eller farlig å bevege seg i. Fotogrammetri kan også brukes i mindre skala; metoden er i økende bruk innenfor forskning, bygningskonstruksjon og rehabilitering av bygg. En god romlig oppløsning på bildene er en forutsetning for god nøyaktighet på målingene (Dick 2003). Ofte kan det være nødvendig å se på gjennomsnitt av flere målinger for å oppnå god nok nøyaktighet.

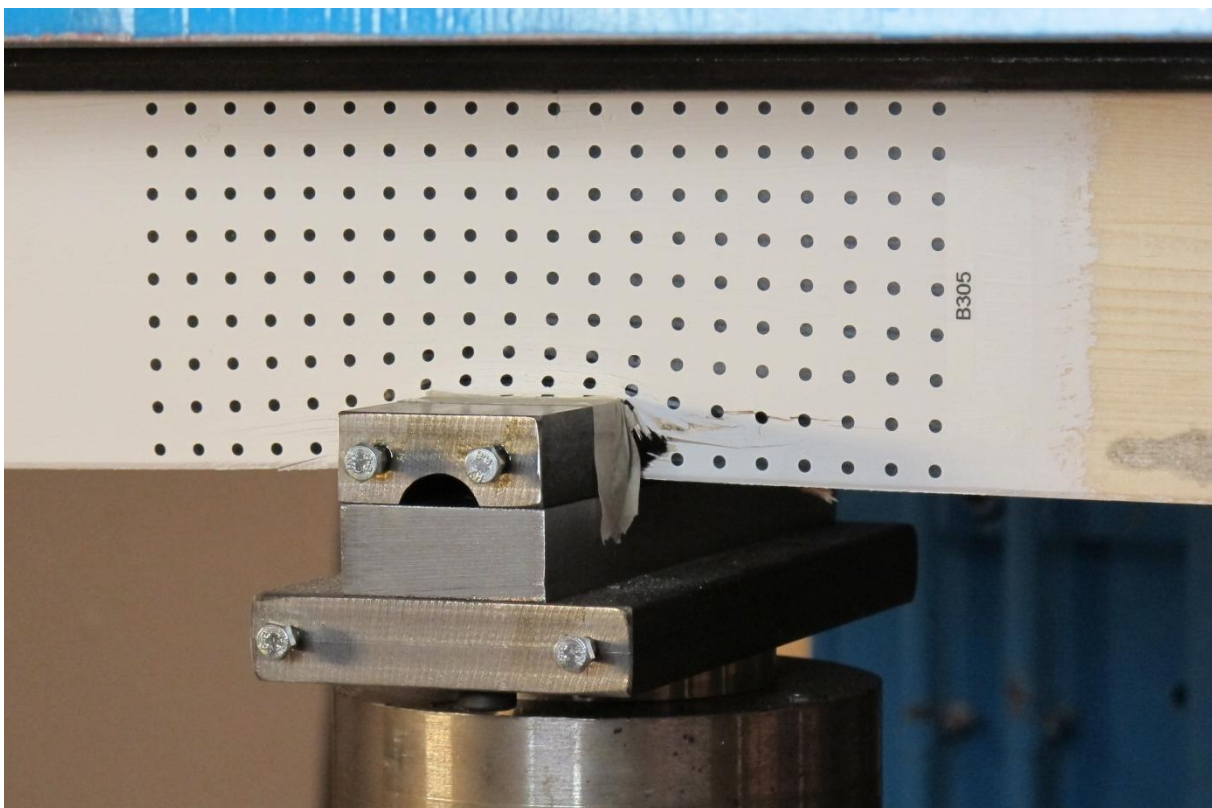
Bildematching handler om å finne det samme fysiske punktet i to forskjellige bilder. Plasseringen av objektet defineres med bildekoordinater. Matching av bilder kan gjøres automatisk eller manuelt, ved å se på bilde. Automatisk matching gjøres ved hjelp av dataprogram som finner bildekoordinatene til det valgte objektet i bildene. Dette gjøres gjennom algoritmer for utvelgelse av punkter. Søkeområdet begrenses etter antatt plassering av punktene man er interessert i. I arealbasert matching sammenlignes gråtoneverdiene i bildene for å finne det samme område. Likhetene for gråtonene beregnes og området som er likest blir valgt. (Hardeng 2011)

3.4.2 Bruk av fotogrammetri i oppgaven.

Hensikten med fotogrammetri i denne masteroppgaven er ved bilder å kunne registrere og bestemme trykkfordeling og tøyninger i trevirket under forsøk med trykk tvers på fiber. Dette gjøres ved å foreta gjentatte målinger av rutenettet med prikker på prøvestykkene i et bilde for så å gjøre det samme med neste bilde og da registrere eventuelle forflytning av punktene. Dette suppleres med tradisjonelle målinger med deformasjonsmålere og data fra testmaskinen. Prøvene ble først grunnet med vannbasert hvit matt maling med glans 02 og påført selvklebende sorte prikker av vinylfolie for å skape god kontrast.

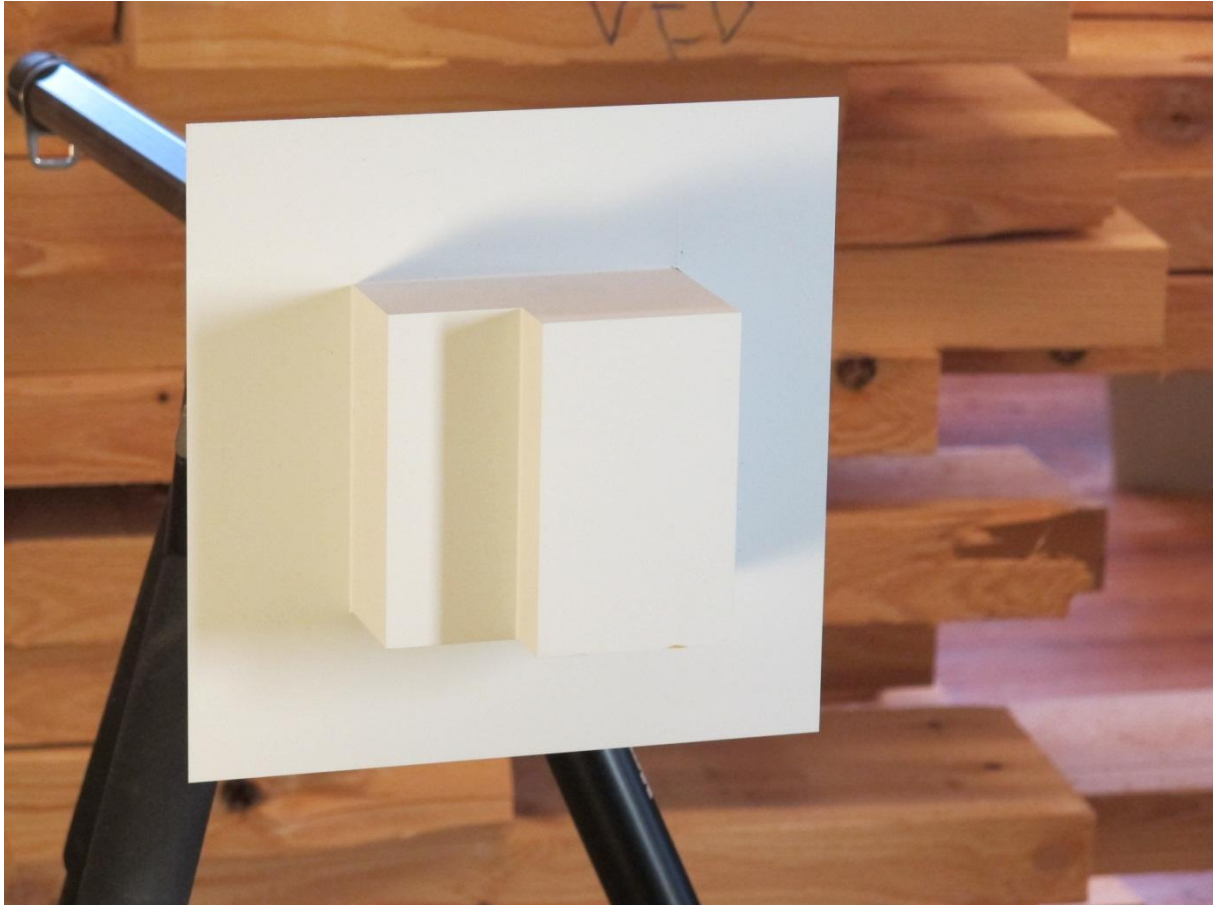


Figur 38 Fotogrammetri for limtresvill B1001.



Figur 39 Limtresvill B305 under testing.

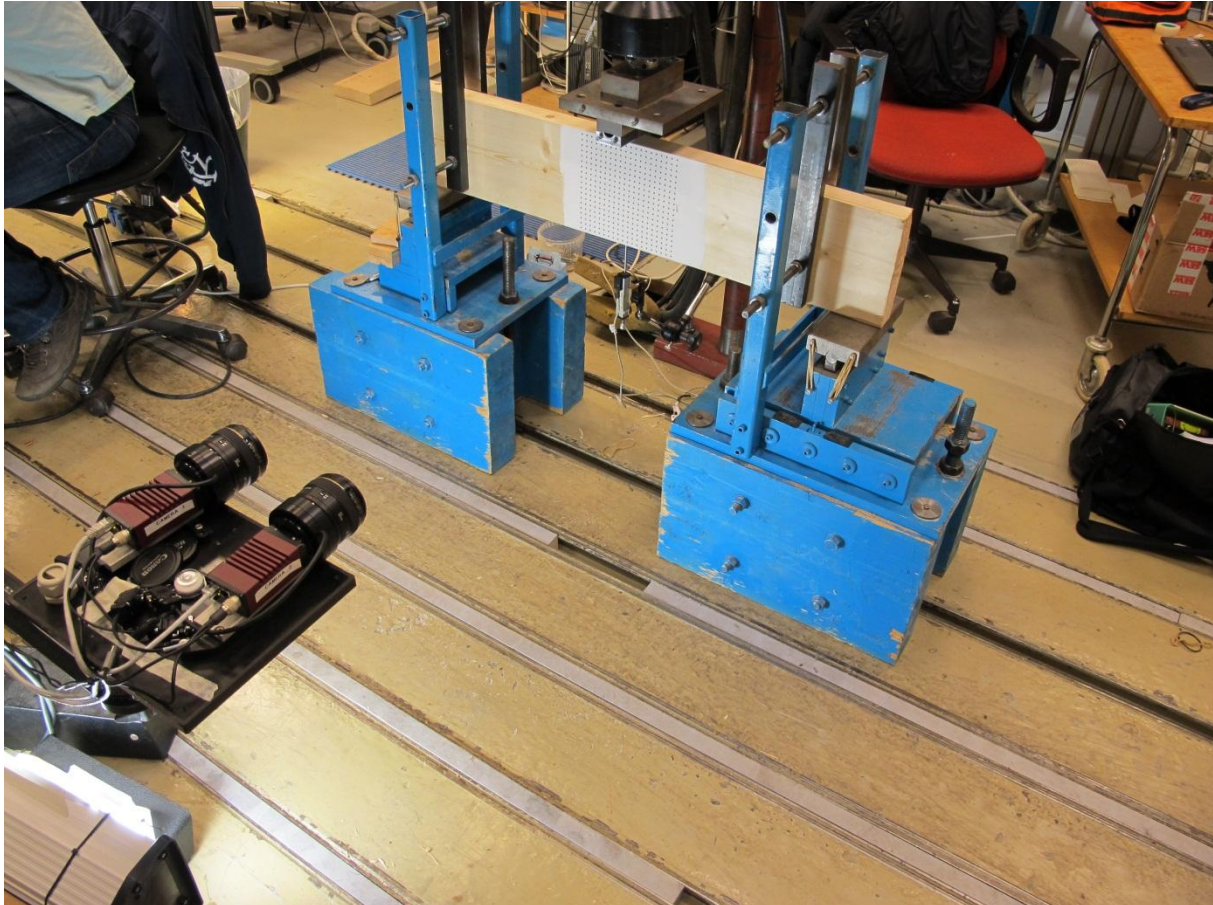
Senteravstanden mellom prikkene er 10 mm i vertikal og horisontal retning og de har en diameter på 2,5 mm. I den påfølgende bildeanalysen ser man på hvordan prikkene beveger seg relativt i forhold til hverandre under belastning av prøvestykket. Reell forflytning finnes ved bruk av en kalibreringskloss med kjente mål som vi tok bilde av først, denne har en forhøyning midt på som er nødvendig ved 3D analyse hvor vi måler forflytning om 3 akser (x , y , z).



Figur 40 Kalibreringskloss med kjente mål for kalibrering av kameraene.

Det ble benyttet to kameraer plassert med en vinkel på hverandre for å kunne måle deformasjoner om 3 akser. Kameraene som ble benyttet er fra Allied Vision Technologies og disse ble montert på egnet kamerastativ hvor platen med kameraene enkelt kan justeres om alle akser i tillegg til å tiltes. Man kan også endre vinkelen mellom kameraene, dette er nødvendig for å kunne justere avstanden til det man tar bilde av og at begge kameraene fortsatt tar bilde av det samme. Hvert av kameraene tok 5 bilder i sekundet og disse ble sendt via en ethernet kabel til en datamaskin hvor bildene ble lagret. Her kunne vi også stille alle parametre ved bildene og bestemme hvor mange bilder vi skulle ta i sekundet, maksimalt 14 bilder per kamera per sekund. Det ble benyttet to arbeidslamper med lysstoffrør for å forhindre at vi fikk et brennpunkt på prøvestykkene som vi kunne fått med kraftigere lamper.

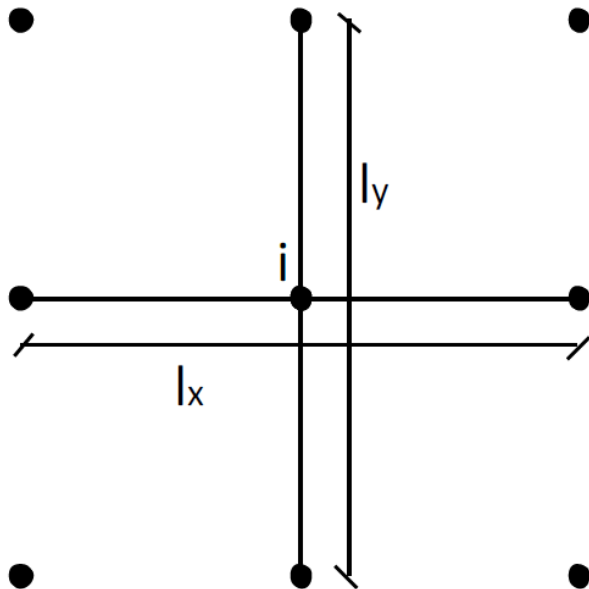
Under testing av prøvestykkene i H – serien benyttet vi andre kameraer uten mulighet for å kunne måle deformasjonen om 3 akser. Kameraene ble fastmontert på justerbare stativer og plassert i riktig avstand til prøvestykket. Bildene fra kameraene ble overført på samme metode som tidligere nevnt. Kameraene er noe eldre og gir noe dårligere bilde enn de kameraene vi har benyttet i de øvrige seriene.



Figur 41 Test 11, fokusering og klargjøring av kameraene før testing.

3.4.3 Tøyninger ut ifra fotogrammetri

Tøyning er en geometrisk, dimensjonsløs størrelse. Tøyning måler forskyvningen mellom to punkter innenfor et legeme og uttrykkes gjerne som en matematisk fraksjon (brøk/prosentandel) eller på vektorform. Man bruker også matriser eller polar form for å uttrykke tøyning. Tøyning er en viktig komponent innenfor fasthetslære når man betrakter deformasjon. Relasjonen mellom spenning som en funksjon av tøyning og elastisitetsmodul er uttrykt ved Hookes lov. For å kunne beregne tøyninger må man ha et mål, i dette tilfellet lengden før og etter endringen. I dette tilfellet så man på endringen i prikkenes plassering mellom hvert bilde.



Figur 42 Aksekors som viser hvordan man finner tøyningene.

Ut fra data fra fotogrammetriresultatene var det mulig å regne ut tøyninger i x- og y-retning og skjærtøyninger på grunnlag av tøyningsregistreringen. Tøyningene ble regnet ut ved hjelp av et aksekors til fem noder hvor tøyningene regnes mellom nodene i ytterkant(Figur 42). Hvis nodene i ytterkant (for eksempel i gridet) ikke er blitt registrert, brukes midtnoden. Beregningen er hele tiden blitt midlet over bildene fra node 1 (startnoden) til node i for en bedre fremstilling. Alle tøyningsresultatene blir i utgangspunktet negative da referansepunktet er satt øverst i venstre hjørne ved bildeanalysen. Beregningsfilen er fremstilt av Nils Ivar Bovim (Hardeng, 2011).

3.4.4 Feilkilder ved fotogrammetrien

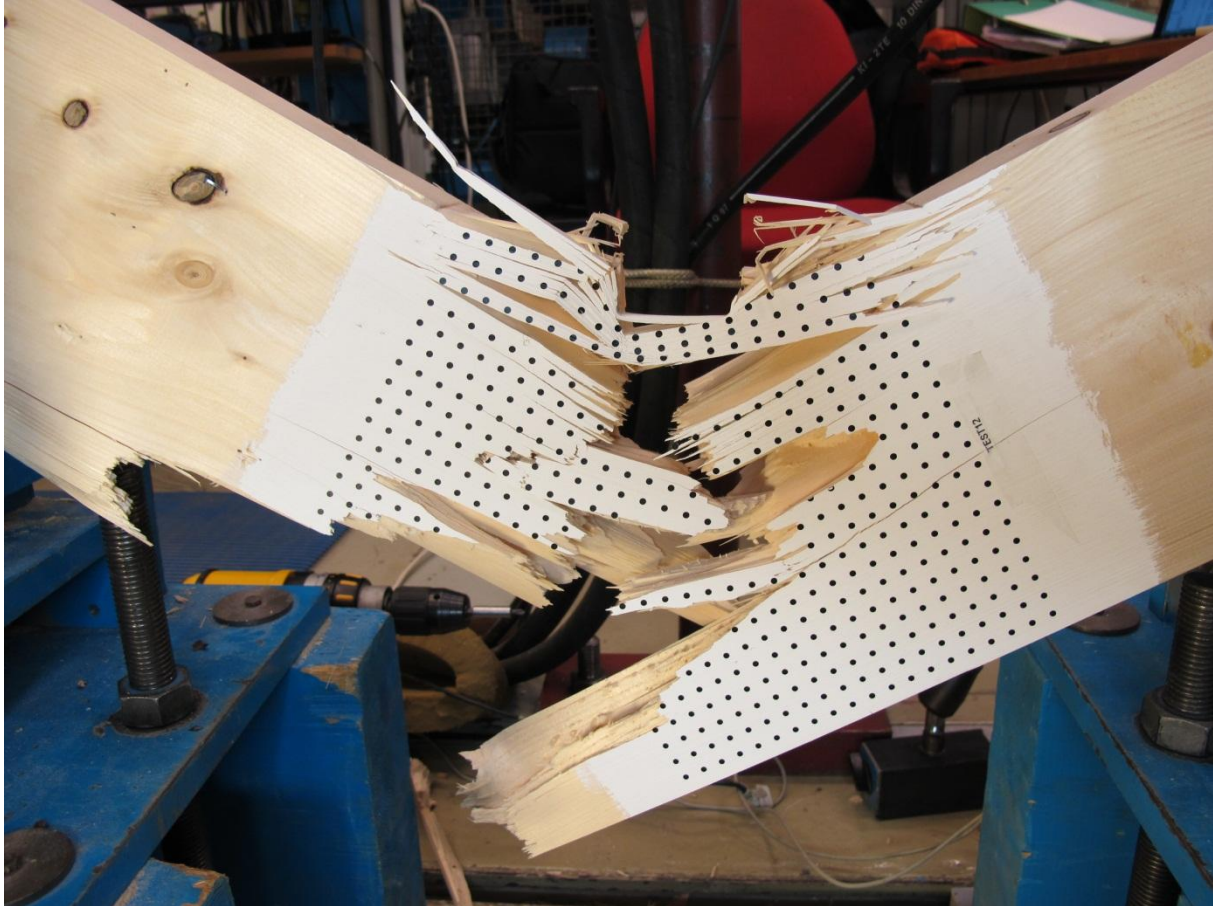
I starten av testingen oppstod det ofte problemer med at programmet stoppet under bildetakning av prøvestykkene. En del av prøvene mangler kontinuerlig bildeserier fra start til slutt. Dette ble fikset på og fungerte godt på resten av seriene.

Et annet problem er å synkronisere klokken til testmaskinen og tidspunktene bildene er tatt. Dette er for å kunne synkronisere lastnivået i forhold til tøyningene som oppstår.

Under bildeanalysen har prikkene vist seg å være enklere å finne enn tidligere. Prikkene av selvklebende folie er mer nøyaktige enn prikker laget med tusj og prikkmal. Problemet oppstår først ved store deformasjoner, fibre i trematerialet knuses og prikkene forsvinner inn i prøvestykket. Dette medfører at prikkene hopper ut og forsvinner fra bildeanalysen.

Prikkene er klebet til trevirket og har god vedheft, ingen prikker har falt av under testing av prøvestykkene. Kun ved skraping eller slag etter testing har prikker falt av. Det kan ha oppstått små forskyvninger av prikkene under testing, forskyvningene er vurdert neglisjerbare. Alle prøvestykkene er grunnet med hvit maling og har fjernet forstyrrelser som kvist fra analysen, allikevel har det oppstått problemer med prøvenummermerkingen vår som enkelte ganger ble observert som prikker.

Bildeanalysen er meget tidkrevende og krever mye manuelt arbeid, vi har dessverre kun tatt et lite utdrag av alle prøvene det er gjennomført fotogrammetri.



Figur 43 Her ser vi testbjelke nr 12 som har blitt kjørt litt for langt. Her vil det typisk være problemer med prikker som blir borte, blant annet.

4 Resultater og diskusjon

4.1 Densiteten og fuktigheten til trevirket

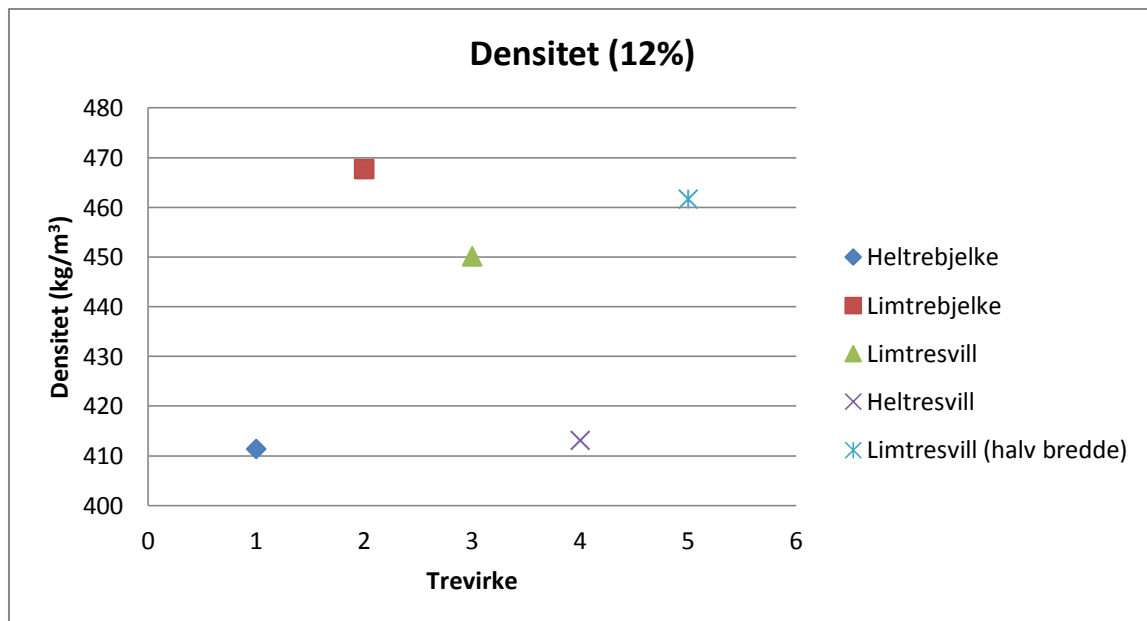
4.1.1 Densitet og fukt

Figur 44 viser en oversikt over gjennomsnittlig fuktighet og den korrigerte densiteten. For materialene i heltre var variasjonen i densitet størst og varierte fra laveste verdi på 320 kg/m^3 til 509 kg/m^3 . Dette ble lagt merke til under kapping av densitetsprøvene, årringbredden varierte stort mellom prøvene. Årsaken kan også være kombinasjonen av styrkeklasse C24 og C30. Men verdien på 320 kg/m^3 ligger ganske lavt selv for C24 materiale å være. Det positive er å kunne få med den naturlige variasjonen under testingen av trykk tvers på fiber.

	Densitet (kg/m^3) ved 12 % fuktighet	Fuktighet (%)
Heltrebjelke	411	14,4
Limtrebjelke	468	13,0
Limtresvill	450	14,2
Heltresvill	413	14,4
Limtresvill (1/2 bredde)	462	13,6

Figur 44 Gjennomsnittlig korrigert densitet og fuktighet.

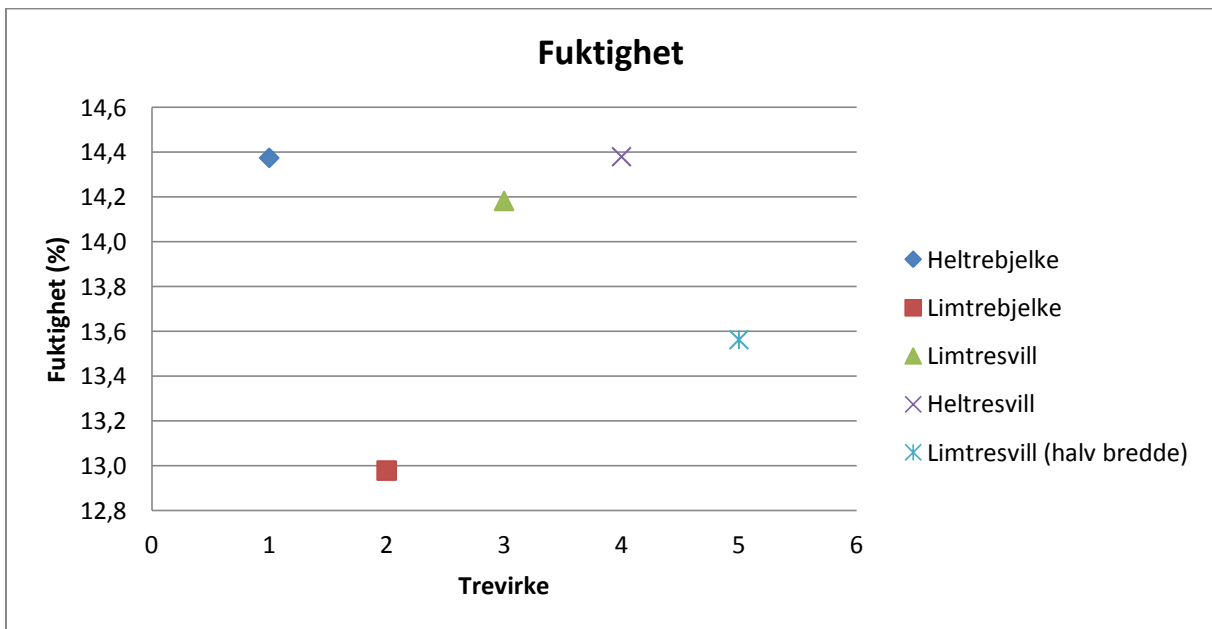
Variasjonen mellom materialene i limtre er mindre, hvor densiteten til limtrebjelkene var høyest og fuktigheten lavest. For korreksjon av densitet i forhold til fuktighet er (Formel 22) brukt. I Figur 45 under er de gjennomsnittlige korrigerte densitetsverdiene vist grafisk.



Figur 45 Gjennomsnittlig korrigert densitet ved 12% for alle densitetsprøvene.

Enkelte av densitetsprøvene inneholder kvist og medfører en forhøyet densitetsverdi som har innvirkning på den gjennomsnittlige densiteten. Enkelte av densitetsprøvene ble plukket ut på grunn av feilmåling av volumet. For bestemmelse av densiteten er Formel 22 benyttet, samme korreksjonsfaktor er benyttet for materialene i limtre og heltre.

For bestemmelse av fuktighet til trevirket er Formel 23 benyttet, resultatene fra fuktprøvene varierer fra 11,2 % til 15,7 %. Selv når trematerialene etter mottak fra Moelven Limtre lå strølagt for klimatisering i over 5 uker. Dette viser at tiden det tar for trevirket å nå likevektsfuktigheten er en langsom prosess. En grafisk oversikt for gjennomsnittlige fuktighetsverdier er vist i figur under.



Figur 46 Gjennomsnittlig fuktighet for aller densitetsprøver.

Gjennomsnittlige verdier for fukt- og densitetsprøver fra limtre er innenfor normalen, og tilsvarer "god densitet". For heltre ligger den gjennomsnittlige verdien for densitet noe lavere og regnes som "middels densitet".

4.2 Laboratorieforsøkene

For beregning av bruddspenningen og bruddlasten er metode i henhold til CEN benyttet, beskrevet i NS-EN 408. Ved å benytte den lineære tilpasningen er k-stivheten beregnet for alle prøvestykker.

4.2.1 Arbeidsdiagram serie B3

Trykkplate: $b = 48$, skarp kant

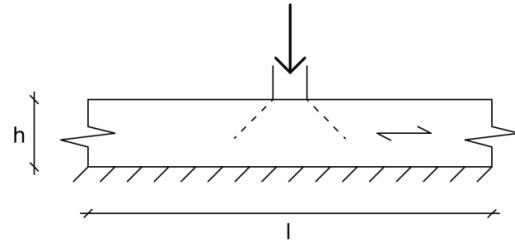
Limtre L40C

$b = 90$

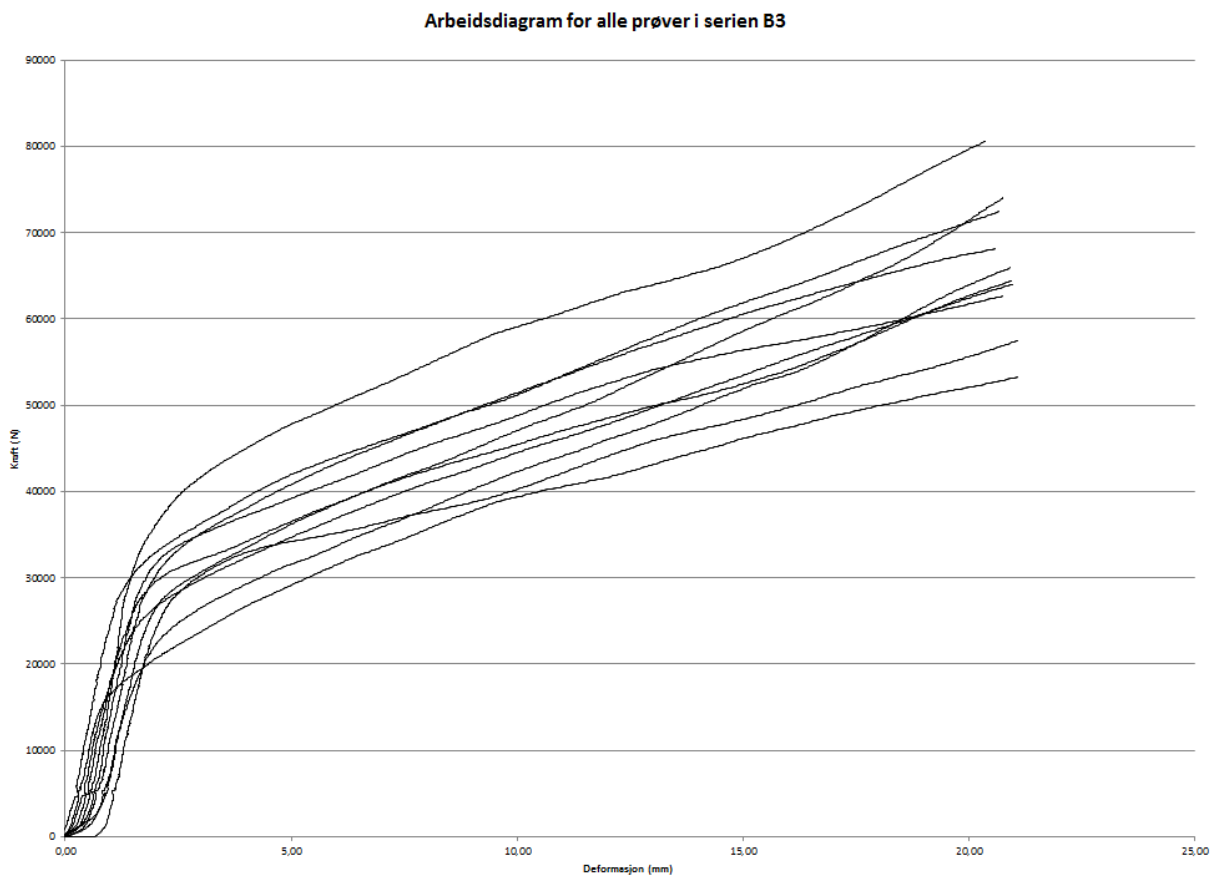
$h = 90$

$l_{\text{tot}} = 980$

Antall prøver: 10



Figur 47 Prøveoppsett for serie B3.



Figur 48 Arbeidsdiagram for serie B3.

Ingen av prøvene i serien B3 sprakk opp ut mot enden noe som tyder på at lengden på prøvestykket er tilstrekkelig for å kunne tåle full lastutbredelse. For prøvene i serie B3 lå gjennomsnittlig bruddlast på 31,1 kN og bruddspenningen lå på 7,36 N/mm².



Figur 49 Prøvestykke B303, meget tydelig utbuling av trefibrene ved trykkplaten.

Arbeidslinjene stiger etter proposjonalitetsgrensen og dette kommer av randeffektene. Trykkplaten forårsaker knusning av fibrene ut mot kanten av trykkplaten, dette gir skråstilling av fibrene. De skråstilte fibrene er med på å holde igjen ved hengekøyeeffekten og bidrar til økt effekt såfremt det er nok urørt trevirke til siden for lastpåføringen. Denne effekten er noe redusert her da trykkplaten har skarp kant i forhold til serie B4 hvor trykkplaten har avrundet kant.



Figur 50 Prøvestykke B307 under testing, ved belastning beveger prøvestykkets ender seg opp fra underlaget.

Den varige inntrykningen på prøvene i serie B3 er varierende selv om alle prøvene ble kjørt til en inntrykning på ca 20 mm. Dette varierer med hvilke bidrag man fikk av hengekøyeeffekten og densiteten.

4.2.2 Arbeidsdiagram serie B4

Trykkplate: $b = 48$, avrundet kant

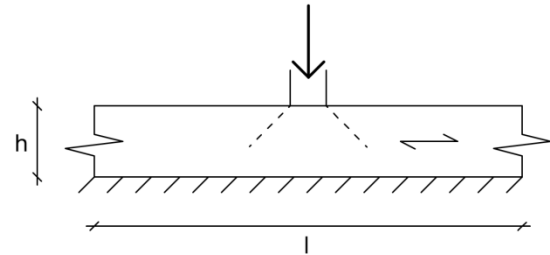
Limtre L40C

$b = 90$

$h = 90$

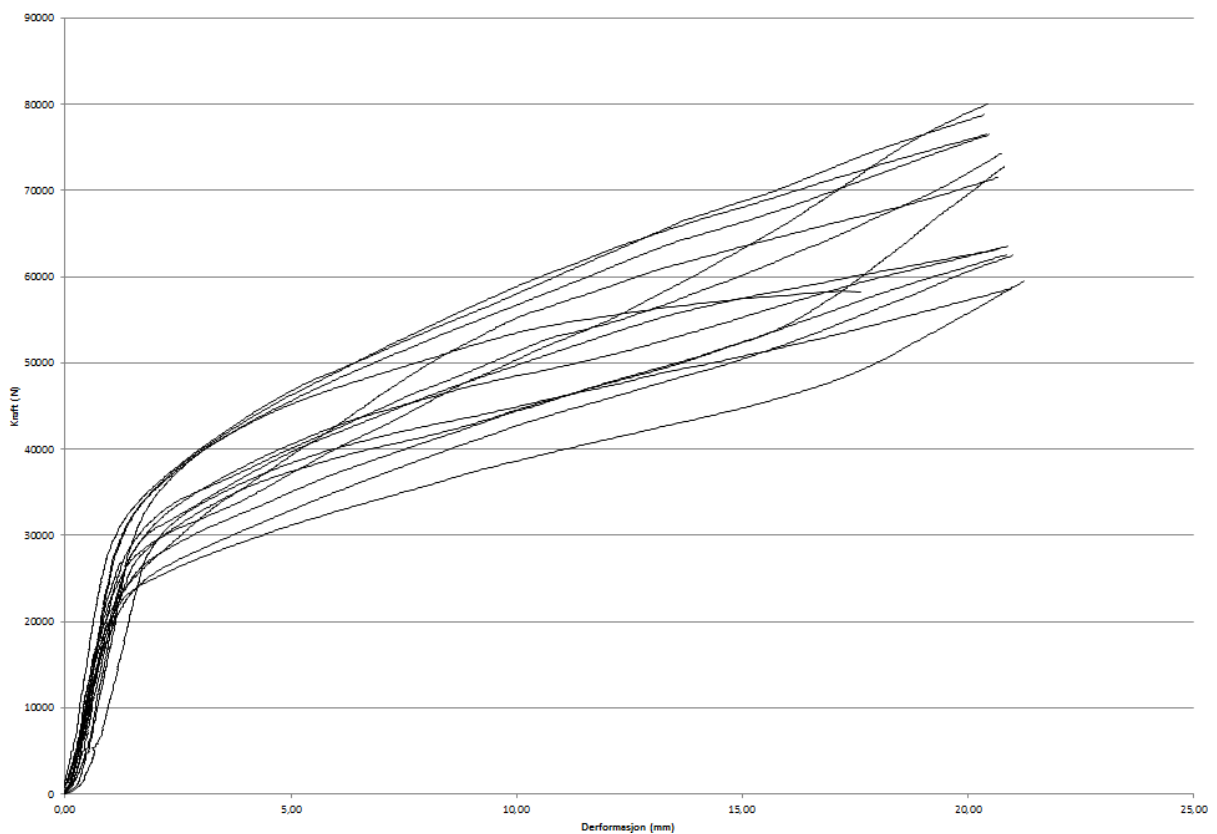
$I_{\text{tot}} = 980$

Antall prøver: 15



Figur 51 Prøveoppsett for serie B4.

Arbeidsdiagram for alle prøver i serien B4



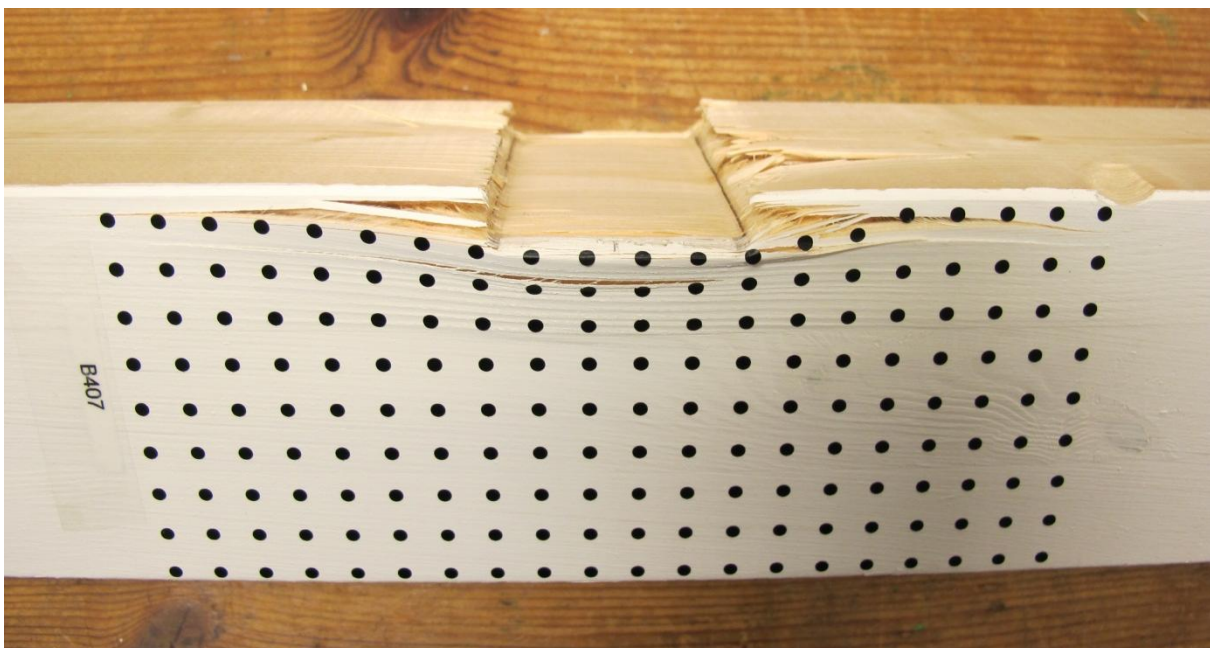
Figur 52 Arbeidsdiagram for serie B4.

Ingen av prøvene i serien B4 sprakk opp ut mot enden noe som tyder på at lengden på prøvestykket er tilstrekkelig for å kunne tåle full lastutbredelse. For prøvene i serie B4 lå gjennomsnittlig bruddlast på 32,3 kN og bruddspenningen lå på $7,64 \text{ N/mm}^2$



Figur 53 Prøvestykke B405, med en tydelig tendens for spredningsvinkelen.

Arbeidslinjene stiger etter proporsjonalitetsgrensen og dette kommer av randeffektene. Trykkplaten forårsaker knusning av fibrene ut mot kanten av trykkplaten, dette gir skråstilling av fibrene. De skråstilte fibrene er med på å holde igjen ved hengekøyeeffekten og bidrar til økt effekt såfremt det er nok urørt trevirke til siden for lastpåføringen. Denne effekten er noe bedre her da trykkplaten har avrundet kant i forhold til f.eks. serie B3 hvor trykkplaten har skarp kant. Den maksimale kraftutnyttelsen øker med ca 4% i forhold til serie B3. Dette gjelder både for bruddlast og bruddspenning.



Figur 54 Prøvestykke B407 med hengekøyeeffekt, ingen klare tegn til spredningsvinkel.

Den varige inntrykningen på prøvene i serie B4 er varierende selv om alle prøvene ble kjørt til en inntrykning på ca 20 mm. Dette varierer med hvilke bidrag man fikk av hengekøyeeffekten og densiteten.

4.2.3 Arbeidsdiagram serie B5

Trykkplate: $b = 90$, avrundet kant

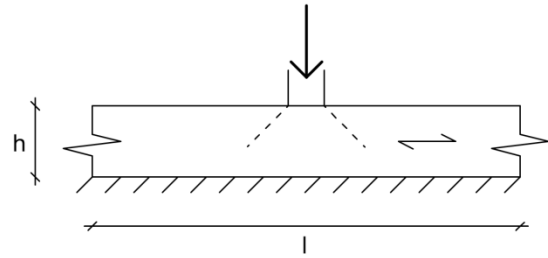
Limtre L40C

$b = 90$

$h = 90$

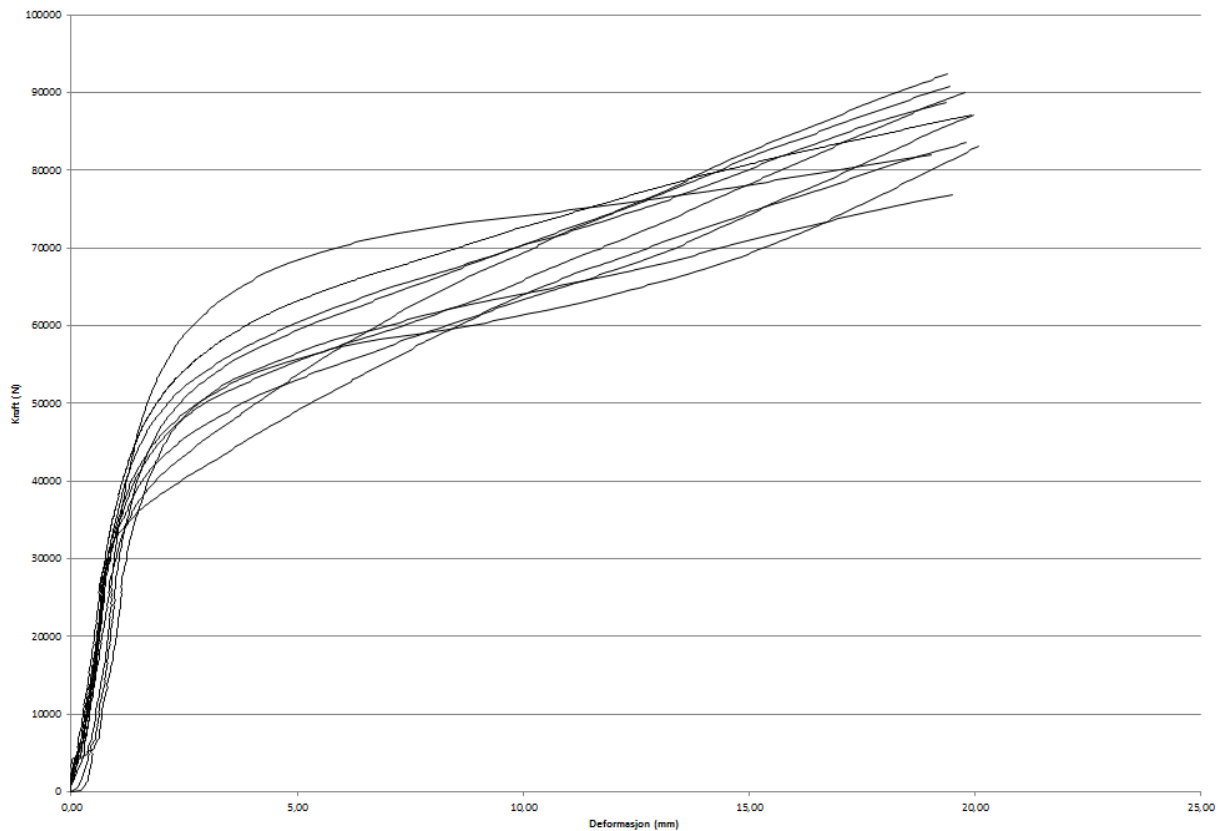
$I_{\text{tot}} = 980$

Antall prøver: 10



Figur 55 Prøveoppsett for serie B5.

Arbeidsdiagram for alle prøver i serien B5



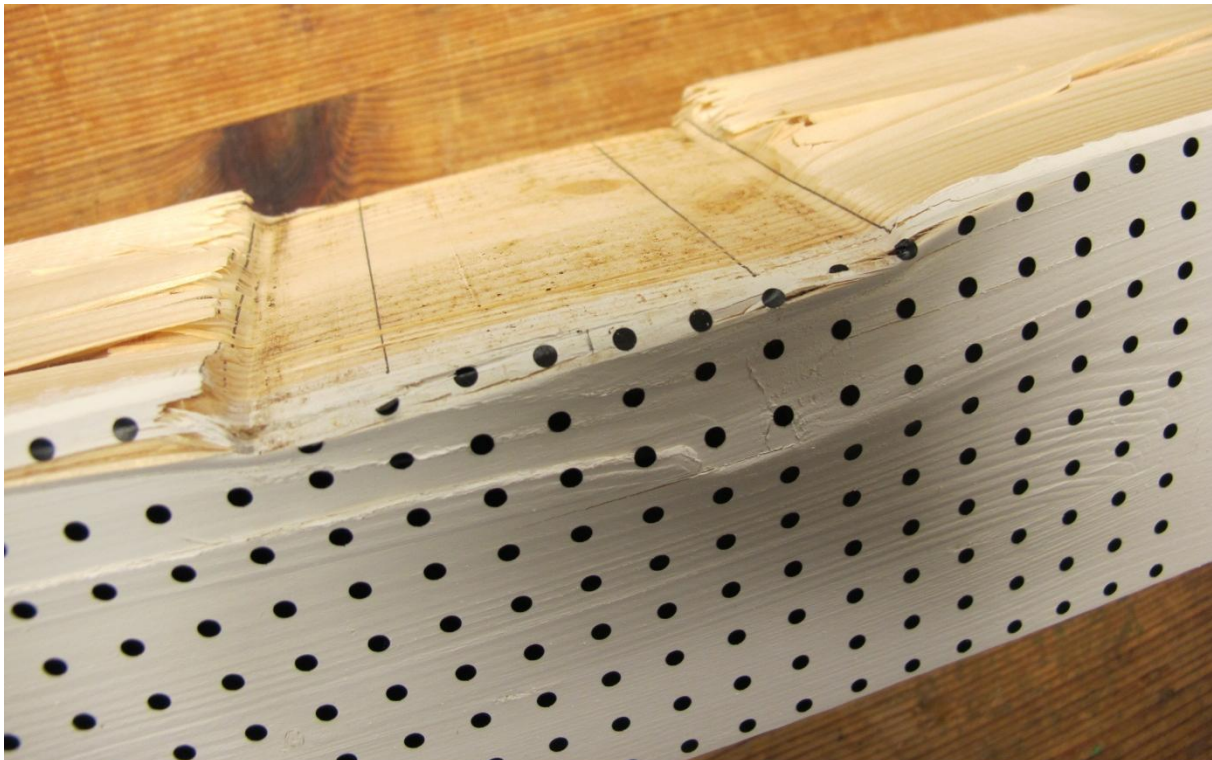
Figur 56 Arbeidsdiagram for serie B5.

Ingen av prøvene i serien B5 sprakk opp ut mot enden noe som tyder på at lengden på prøvestykket er tilstrekkelig for å kunne tåle full lastutbredelse. For prøvene i serie B5 lå gjennomsnittlig bruddlast på 49,1 kN og bruddspenning på $6,19 \text{ N/mm}^2$. Her ser vi at når vi øker trykkplatearealet med 87,5% fra 48 mm bredde til 90mm i forhold til serie B4 øker gjennomsnittlig bruddlast bare med ca 52%. Når vi ser på bruddspenningen synker denne i forhold til serie B4 da den er 81% av verdien i serie B4.



Figur 57 Prøvestykke B510 etter testing.

Arbeidslinjene stiger etter proposjonalitetsgrensen og dette kommer av randeffektene. Trykkplaten forårsaker knusning av fibrene ut mot kanten av trykkplaten, dette gir skråstilling av fibrene. De skråstilte fibrene er med på å holde igjen ved hengekøyeeffekten og bidrar til økt effekt såfremt det er nok urørt trevirke til siden for lastpåføringen. Denne effekten er god her da trykkplaten har avrundet kant.

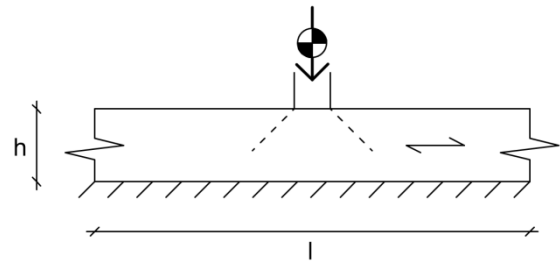


Figur 58 Prøvestykke B501, kvist i området under trykkplaten skaper forstyrrelser.

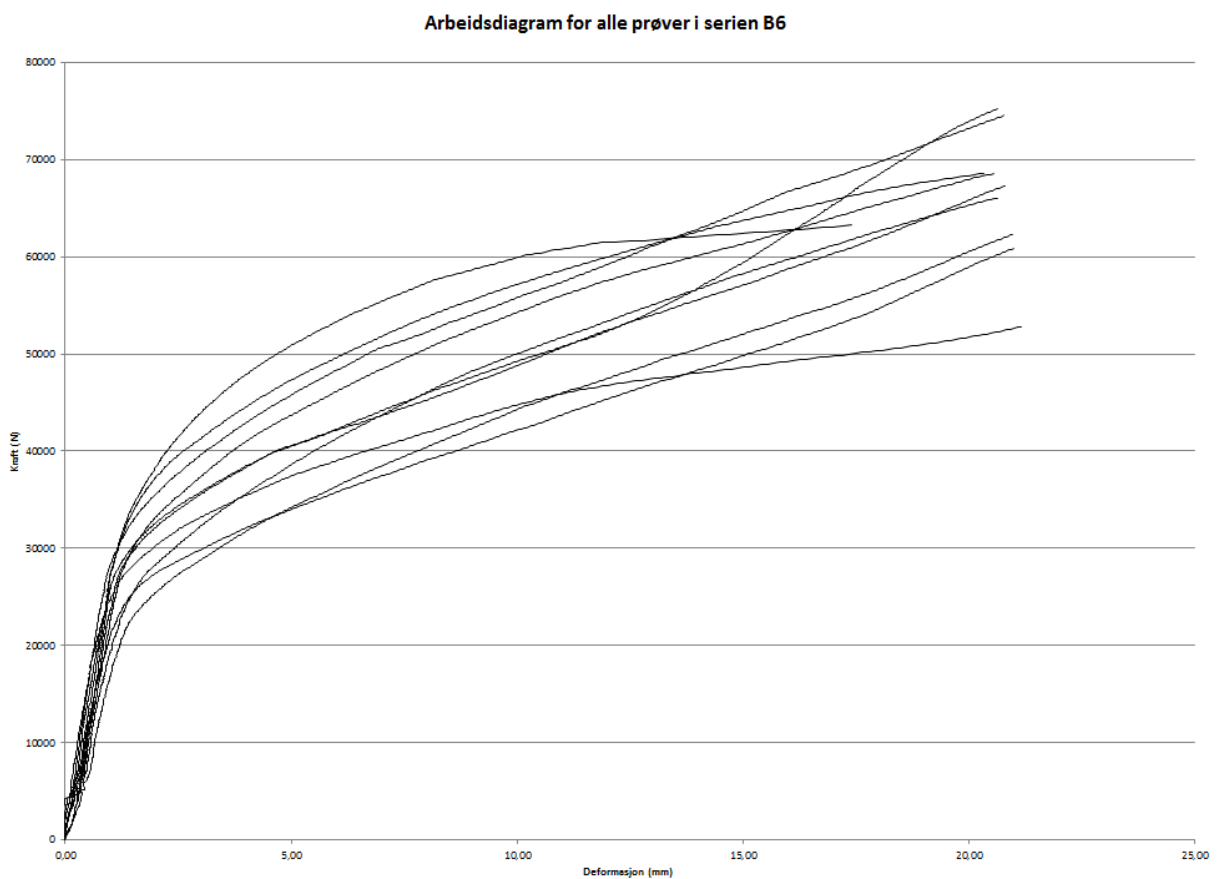
Den varige inntrykningen på prøvene i serie B5 er varierende selv om alle prøvene ble kjørt til en inntrykning på ca 20 mm. Dette varierer med hvilke bidrag man fikk av hengekøyeeffekten og densiteten.

4.2.4 Arbeidsdiagram serie B6

Trykkplate: $b = 48$, avrundet kant med rotasjon
 Limtre L40C
 $b = 90$
 $h = 90$
 $l_{\text{tot}} = 980$
 Antall prøver: 10



Figur 59 Prøveoppsett for serie B6.



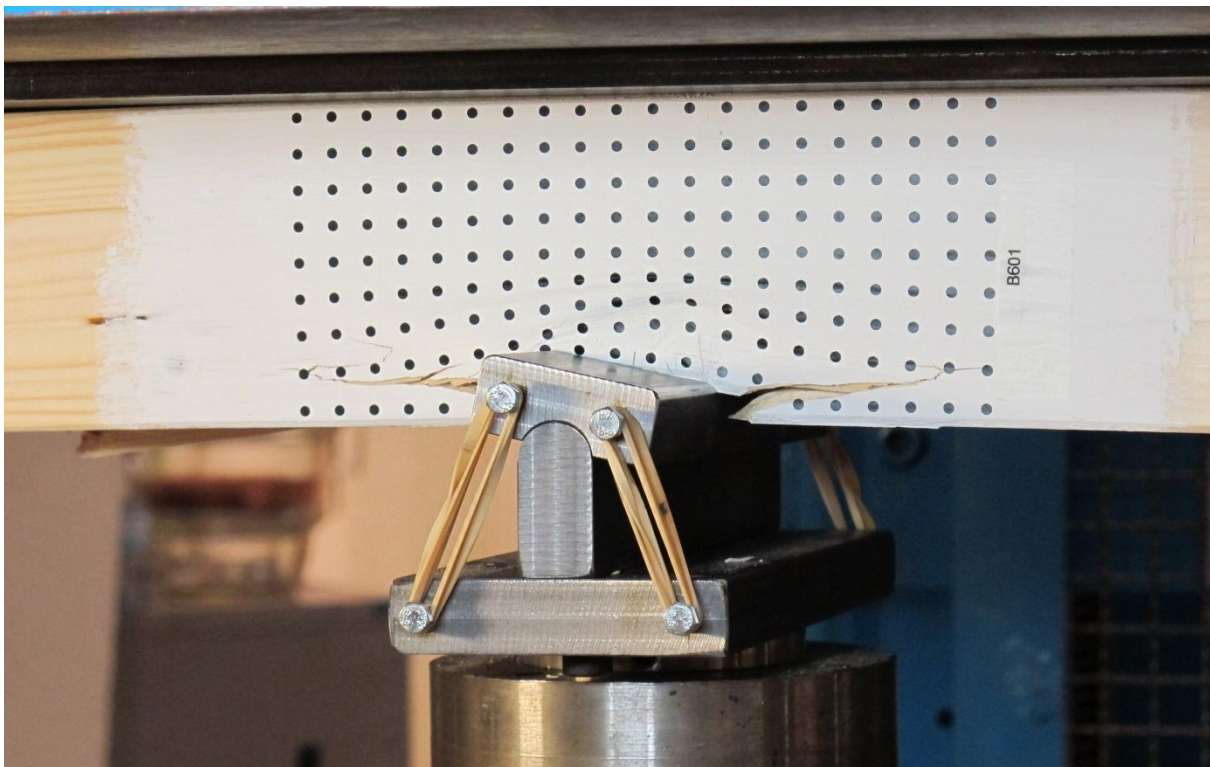
Figur 60 Arbeidsdiagram for serie B6.

Ingen av prøvene i serien B6 sprakk opp ut mot enden noe som tyder på at lengden på prøvestykket er tilstrekkelig for å kunne tåle full lastutbredelse. For prøvene i serie B6 lå gjennomsnittlig bruddlast på 33,5 kN. Her ser vi at når vi tillater trykkplaten å rotere om en akse øker maksimal bruddlast med ca 4% i forhold til serie B4. Gjennomsnittlig bruddspenning ligger på $7,93 \text{ N/mm}^2$, denne øker også med 4% i forhold til serie B4.



Figur 61 Prøvestykke B604, man ser tydelig hvordan trykkplaten roterer og går skjevt inn i trevirket.

Arbeidslinjene stiger etter proposjonalitetsgrensen og dette kommer av randeffektene. Trykkplaten forårsaker knusning av fibrene ut mot kanten av trykkplaten, dette gir skråstilling av fibrene. De skråstilte fibrene er med på å holde igjen ved hengekøyeffekten og bidrar til økt effekt såfremt det er nok urørt trevirke til siden for lastpåføringen. Denne effekten er god her da trykkplaten har avrundet kant. Effekten av at trykkplaten kan rotere om en akse kan gi en positiv effekt, men kan også gi uheldige effekter da trykkplaten vil bli "stående" der trevirket har høy fasthet men vil trykkes veldig ned der trevirket har lav fasthet.

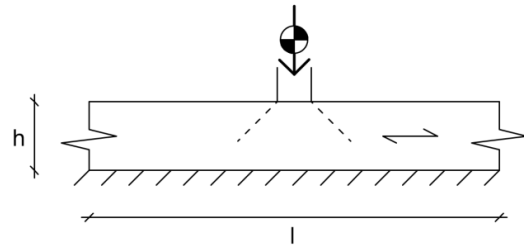


Figur 62 Prøvestykke B601, mye rotasjon av trykkplaten under testing.

Den varige inntrykningen på prøvene i serie B6 er varierende selv om alle prøvene ble kjørt til en inntrykning på ca 20 mm. Dette varierer med hvilke bidrag man fikk av hengekøyeffekten og densiteten.

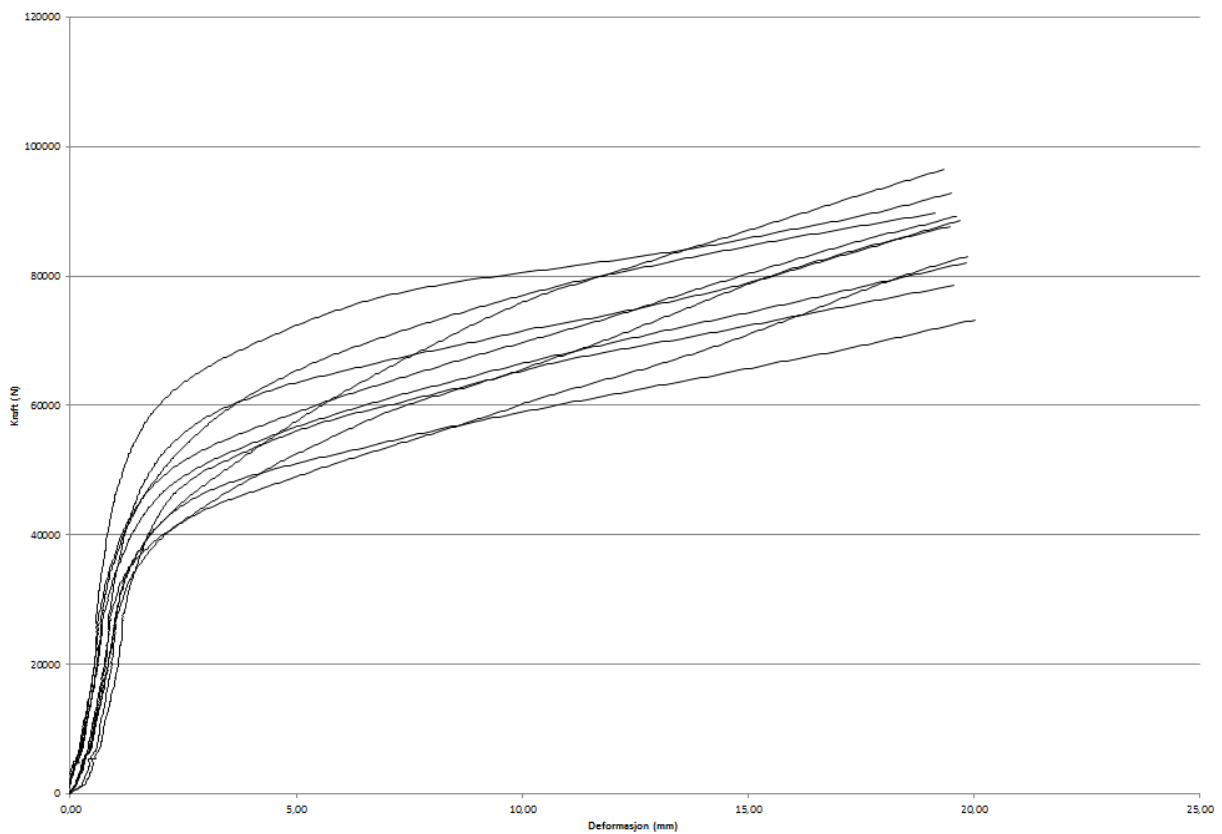
4.2.5 Arbeidsdiagram serie B7

Trykkplate: $b = 90$, avrundet kant med rotasjon
 Limtre L40C
 $b = 90$
 $h = 90$
 $l_{\text{tot}} = 980$
 Antall prøver: 10



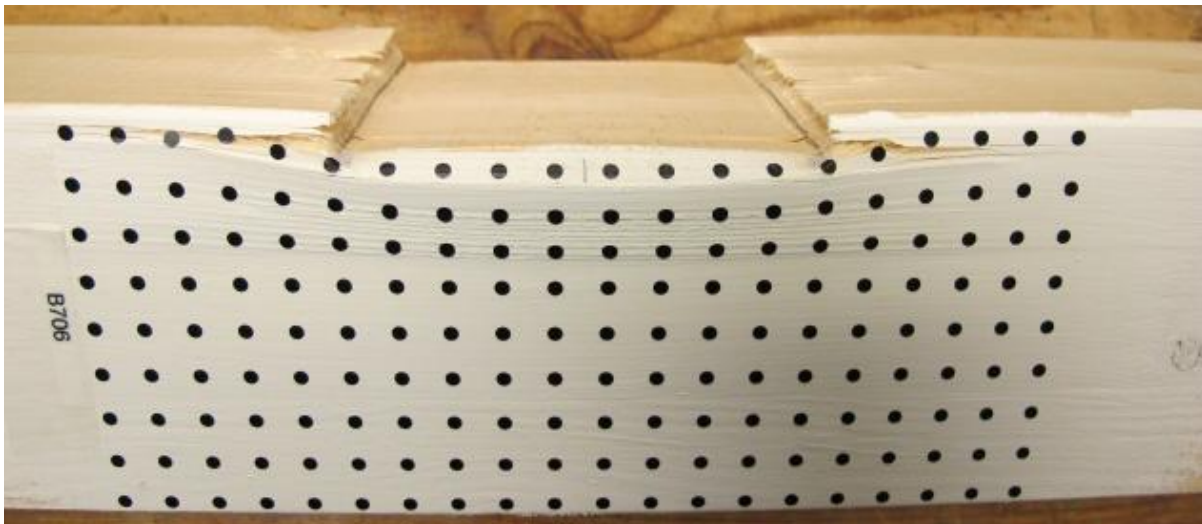
Figur 63 Prøveoppsett for serie B7.

Arbeidsdiagram for alle prøver i serien B7



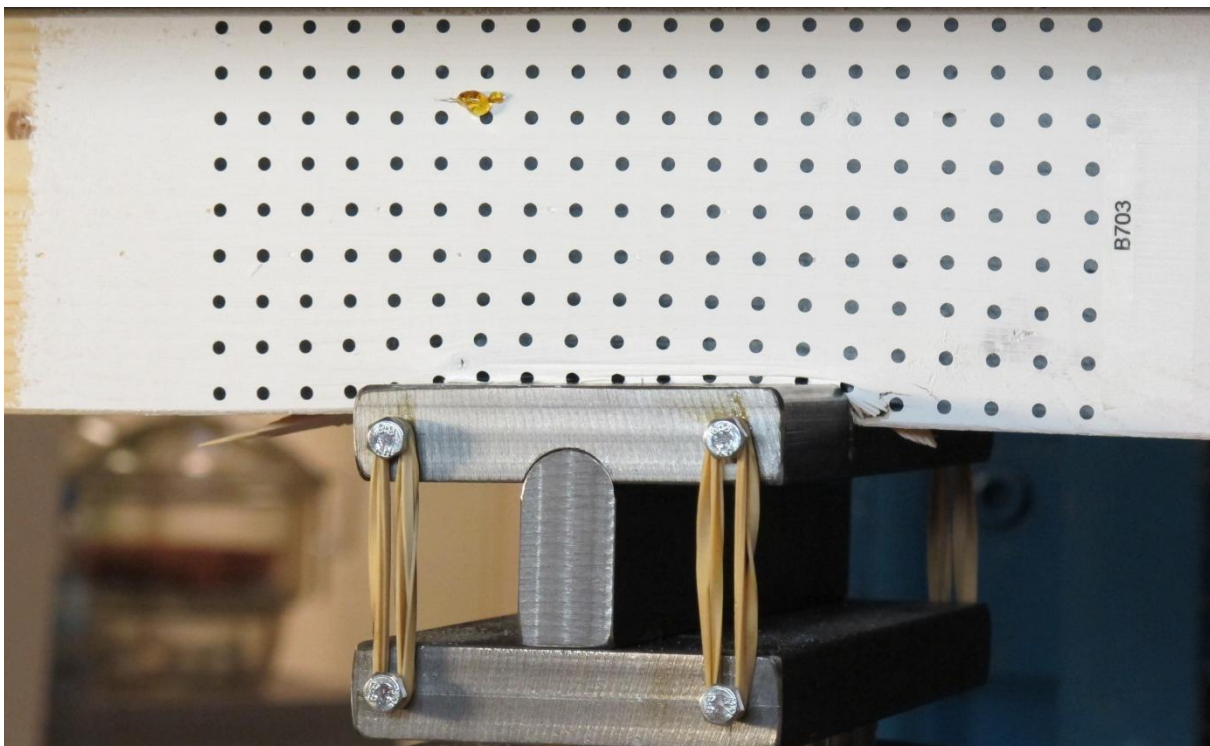
Figur 64 Arbeidsdiagram for serie B7.

Ingen av prøvene i serien B7 sprakk opp ut mot enden noe som tyder på at lengden på prøvestykket er tilstrekkelig for å kunne tåle full lastutbredelse. For prøvene i serie B7 lå gjennomsnittlig bruddlast på 49,5 kN og gjennomsnittlig bruddspenning lå på 6,24 N/mm². Her ser vi at når vi tillater trykkplaten å rotere om en akse er gjennomsnittlig maksimal kraftutnyttelse tilnærmet identisk i forhold til serie B5.



Figur 65 Prøvestykke B706, etter testing.

Arbeidslinjene stiger etter proporsjonalitetsgrensen og dette kommer av randeffektene. Trykkplaten forårsaker knusning av fibrene ut mot kanten av trykkplaten, dette gir skråstilling av fibrene. De skråstilte fibrene er med på å holde igjen ved hengekøyeeffekten og bidrar til økt effekt såfremt det er nok urørt trevirke til siden for lastpåføringen. Denne effekten er god her da trykkplaten har avrundet kant. Effekten av at trykkplaten kan rotere om en akse kan gi en positiv effekt her, men kan også gi uheldige effekter da trykkplaten vil bli "stående" der trevirket har høy fasthet men vil trykkes veldig ned der trevirket har lav fasthet.

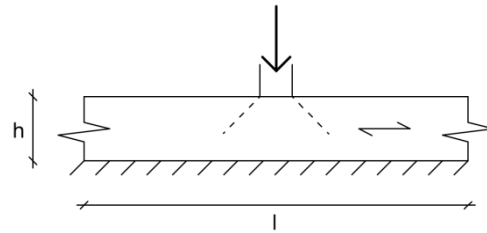


Figur 66 Prøvestykke B703 under testing, splintring ved trykkplaten og liten kvaelomme kan føre til problemer med bildeanalysen.

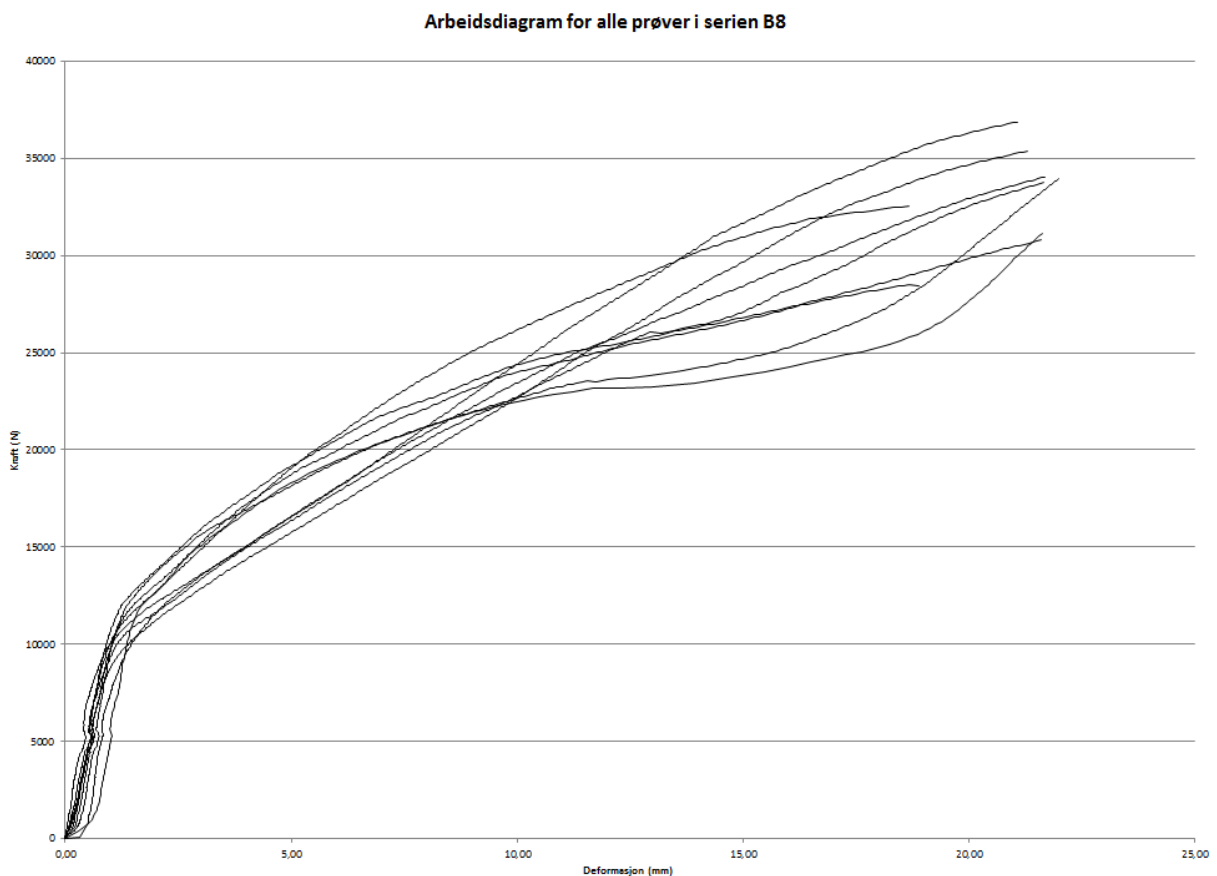
Den varige inntrykningen på prøvene i serie B7 er varierende selv om alle prøvene ble kjørt til en inntrykning på ca 20 mm. Dette varierer med hvilke bidrag man fikk av hengekøyeeffekten og densiteten.

4.2.6 Arbeidsdiagram serie B8

Trykkplate: $b = 48$, avrundet kant
 Limtre L40C
 $b = 45$ (90x90 limtre halv bredde)
 $h = 90$
 $I_{tot} = 980$
 Antall prøver: 10

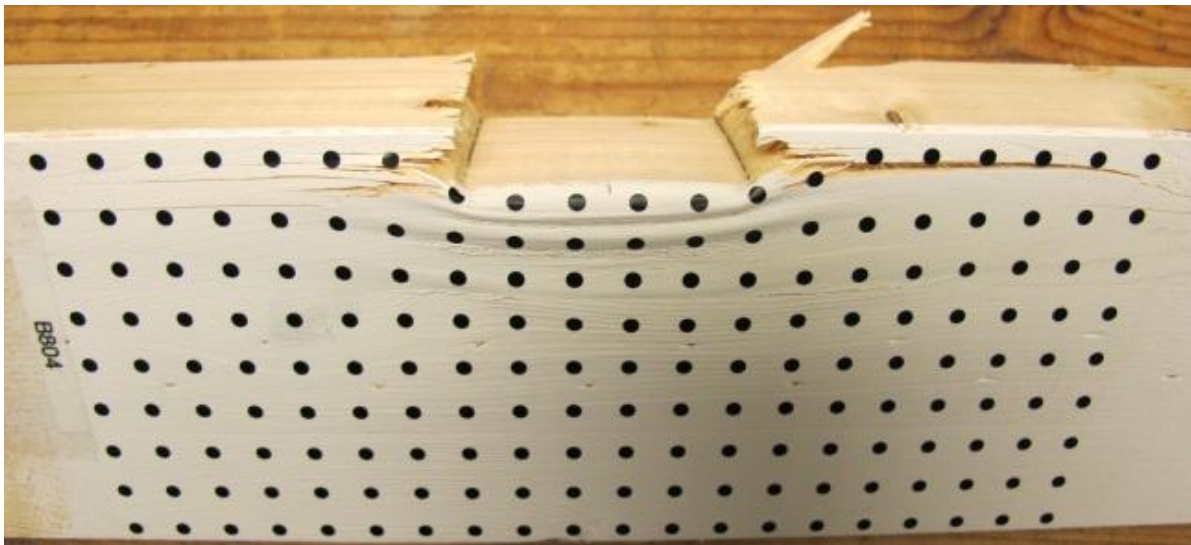


Figur 67 Prøveoppsett for serie.



Figur 68 Arbeidsdiagram for serie B8.

Ingen av prøvene i serien B8 sprakk opp ut mot enden noe som tyder på at lengden på prøvestykket er tilstrekkelig for å kunne tåle full lastutbredelse. For prøvene i serie B8 lå gjennomsnittlig bruddlast på 13,0 kN og gjennomsnittlig bruddspenning på 6,27 N/mm². Her ser vi at når vi halverer bredden på prøvestykket reduseres maksimal kraftutnyttelse i forhold til serie B4 ned til 40 %. Dette tyder på at bredden til prøvestykket har noe effekt på kapasiteten. Dette har med randeffekter å gjøre som tydeligvis ikke går så langt inn i trevirket og dermed gjør smale tverrsnitt mere sårbare enn brede.



Figur 69 Prøvestykke B804 med tydelig hengekøyeeffekt.

Arbeidslinjene stiger etter proposjonalitetsgrensen og dette kommer av randeffektene. Trykkplaten forårsaker knusning av fibrene ut mot kanten av trykkplaten, dette gir skråstilling av fibrene. De skråstilte fibrene er med på å holde igjen ved hengekøyeeffekten og bidrar til økt effekt såfremt det er nok urørt trevirke til siden for lastpåføringen. Denne effekten er god her da trykkplaten har avrundet kant.

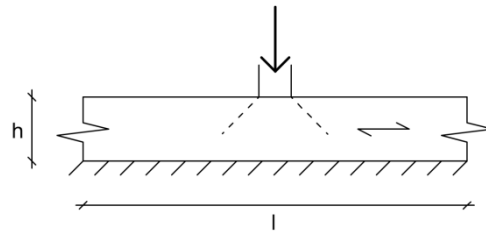


Figur 70 Prøvestykke B805 under testing, prøvestykket bøyes på grunn av lastpåføringen.

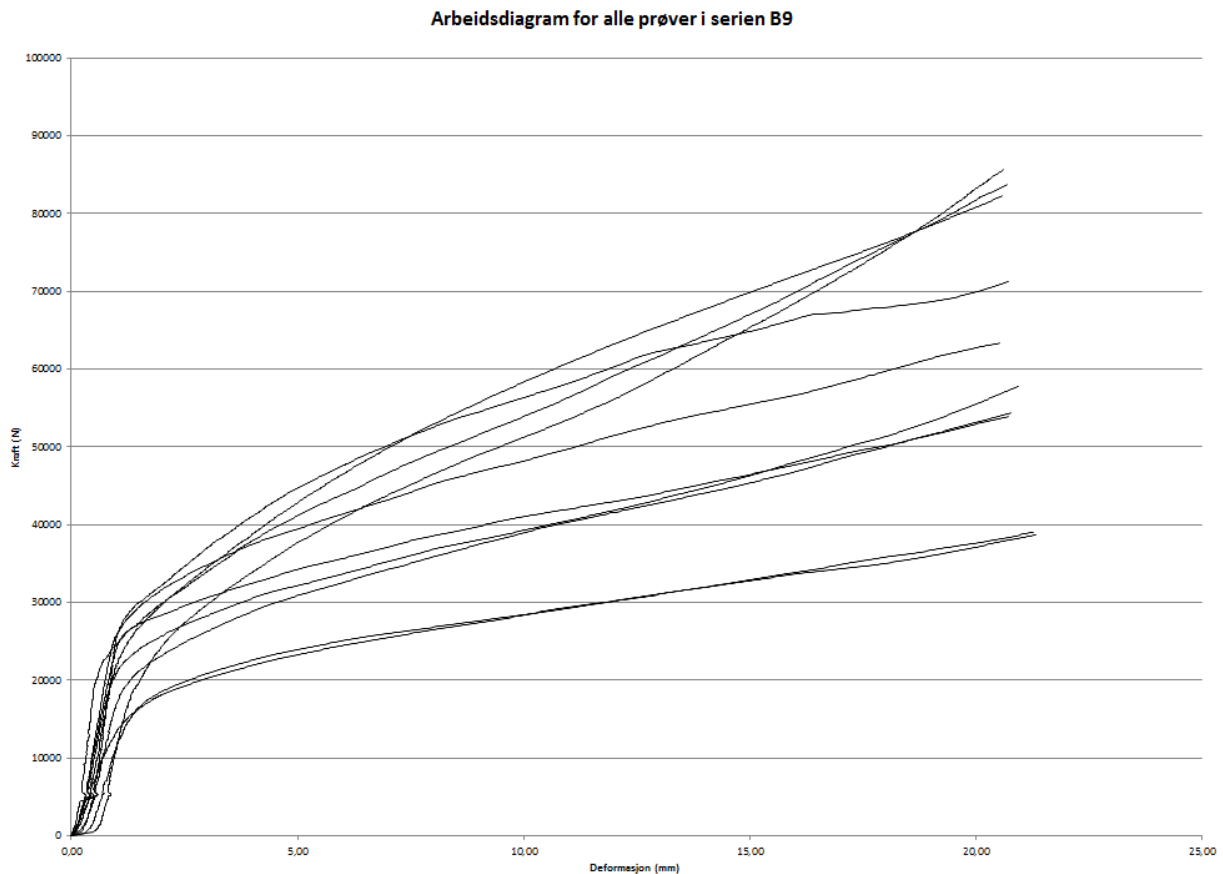
Den varige inntrykningen på prøvene i serie B8 er varierende selv om alle prøvene ble kjørt til en inntrykning på ca 20 mm. Dette varierer med hvilke bidrag man fikk av hengekøyeeffekten og densiteten.

4.2.7 Arbeidsdiagram serie B9

Trykkplate: $b = 48$, avrundet kant
 Heltre C24/C30
 $b = 90$
 $h = 48$
 $I_{tot} = 980$
 Antall prøver: 10

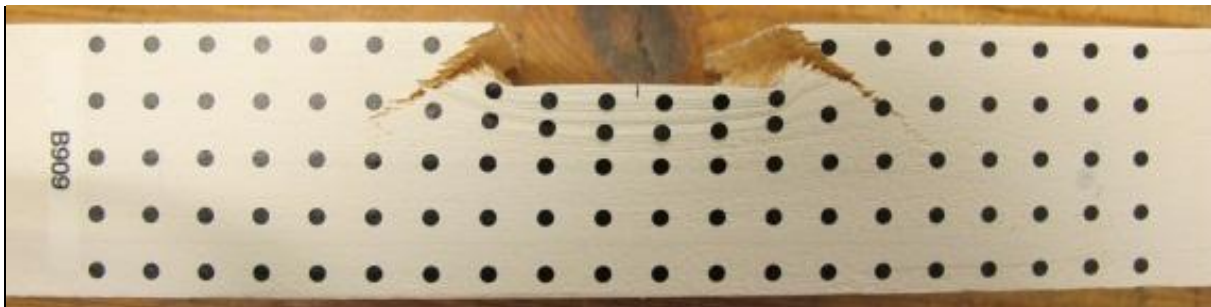


Figur 71 Prøveoppsett for serie B9.



Figur 72 Arbeidsdiagram for serie B9.

Ingen av prøvene i serien B9 sprakk opp ut mot enden noe som tyder på at lengden på prøvestykket er tilstrekkelig for å kunne tåle full lastutbredelse. For prøvene i serie B9 lå gjennomsnittlig bruddlast på 24,9 kN og gjennomsnittlig bruddspenning lå på $5,75 \text{ N/mm}^2$. Her ser vi at når vi halverer høyden på prøvestykket reduseres bruddlasten til 77% av serie B4 og bruddspenningen reduseres til 75% av serie B4. Dette forteller oss at deformasjonene er ganske lokale og at høyden på prøvestykket ikke har så stor effekt på kapasiteten.



Figur 73 Prøvestykke B909, med tydelig spredningsvinkel.

Arbeidslinjene stiger etter proporsjonalitetsgrensen og dette kommer av randeffektene. Trykkplaten forårsaker knusning av fibrene ut mot kanten av trykkplaten, dette gir skråstilling av fibrene. De skråstilte fibrene er med på å holde igjen ved hengekøyeeffekten og bidrar til økt effekt såfremt det er nok urørt trevirke til siden for lastpåføringen. Denne effekten er god her da trykkplaten har avrundet kant.



Figur 74 Prøvestykke B902 før testing.

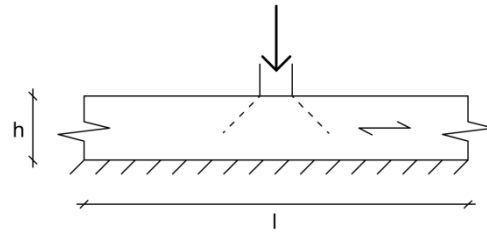


Figur 75 Prøvestykke B902 under testing.

Den varige inntrykningen på prøvene i serie B9 er varierende selv om alle prøvene ble kjørt til en inntrykning på ca 20 mm. Dette varierer med hvilke bidrag man fikk av hengekøyeeffekten og densiteten.

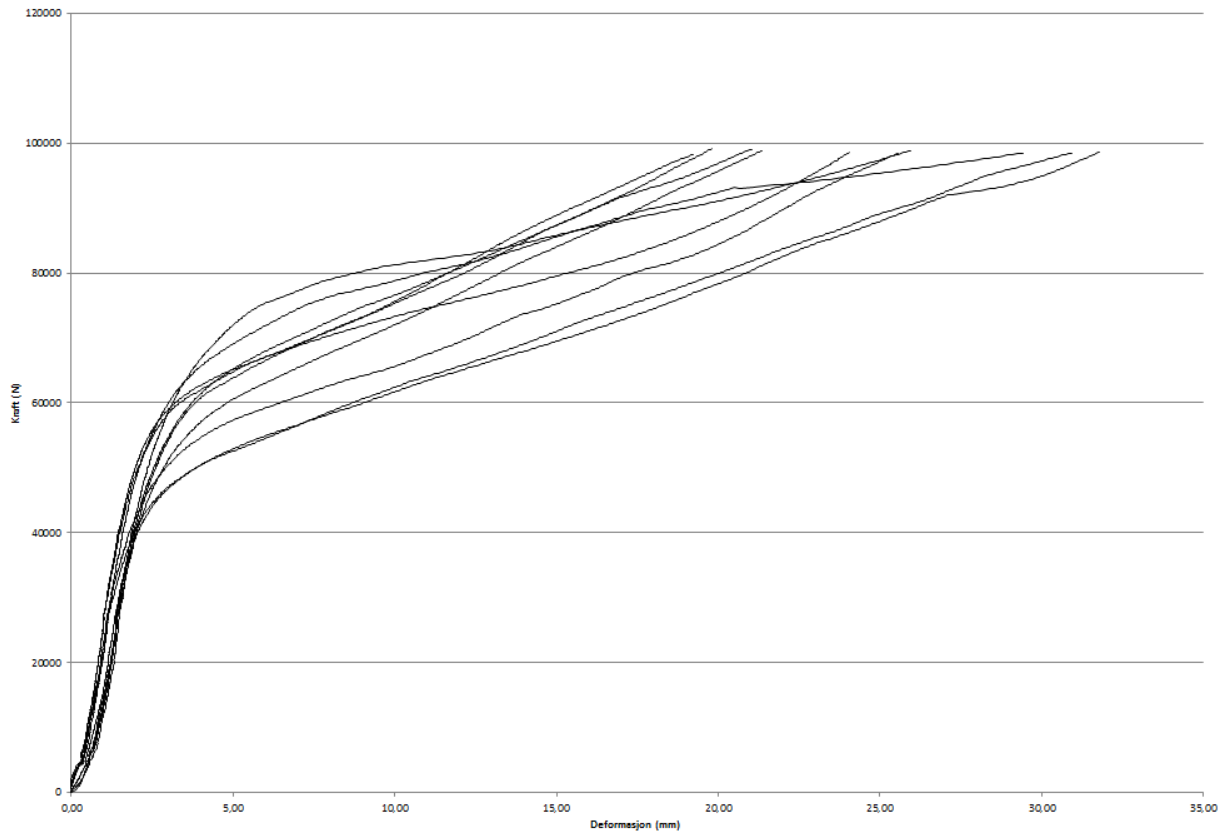
4.2.8 Arbeidsdiagram serie B10

Trykkplate: $b = 90$, avrundet kant
 Limtre L40C
 $b = 90$
 $h = 405$
 $I_{tot} = 980$
 Antall prøver: 10



Figur 76 Prøveoppsett for serie B10.

Arbeidsdiagram for alle prøver i serien B10



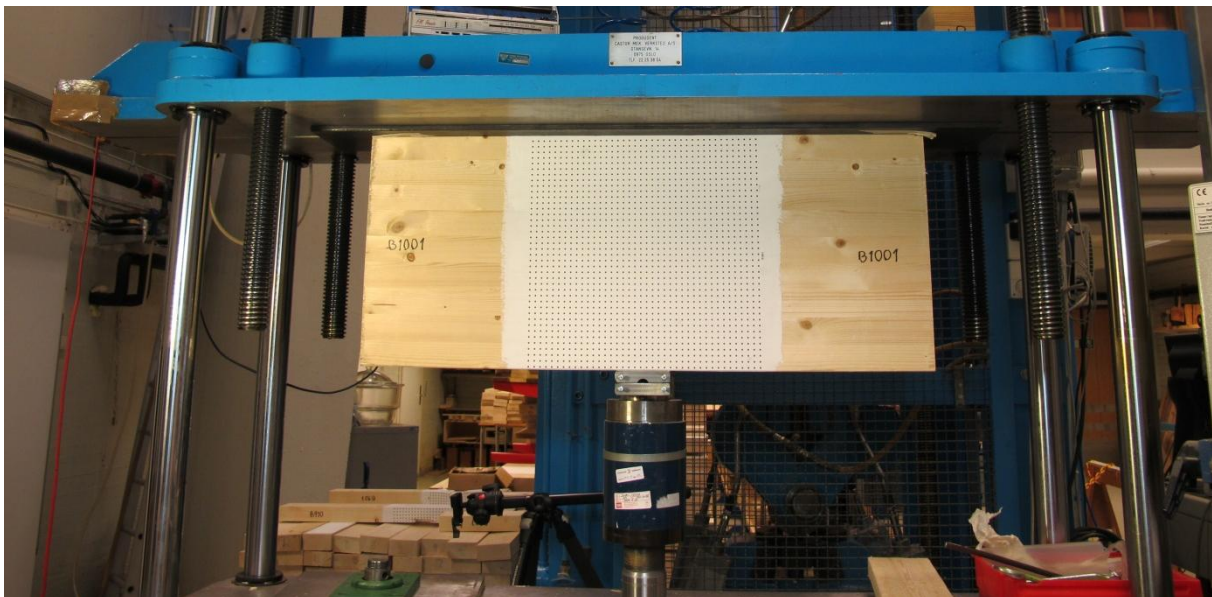
Figur 77 Arbeidsdiagram for serie B10.

Kun en av prøvene i serien B10 sprakk opp ut mot enden, likevel er det naturlig å anta at lengden på prøvestykket er tilstrekkelig for å kunne tåle full lastutbredelse siden kun en av prøvene sprakk opp. For prøvene i serie B10 lå gjennomsnittlig bruddlast på 66,3 kN og gjennomsnittlig bruddspenning på 8,24 N/mm². Hvis vi sammenligner bruddlasten med serie B5 som har samme bredde på trykkplaten ser vi at serie B10 har 35% høyere bruddlast og 33% høyere bruddspenning. Hvis vi sammenligner bruddspenningen med serie B4 er den bare 8% høyere, dette forteller oss at tøyningene i trevirket er veldig lokale og at høyden på prøvestykket ikke har nevneverdig effekt.



Figur 78 Prøvestykke B1001, kvist i området trykkplaten har virket fører ofte til splintring av trevirket.

Arbeidslinjene stiger etter proporsjonalitetsgrensen og dette kommer av randeffektene. Trykkplaten forårsaker knusning av fibrene ut mot kanten av trykkplaten, dette gir skråstilling av fibrene. De skråstilte fibrene er med på å holde igjen ved hengekøyeeffekten og bidrar til økt effekt såfremt det er nok urørt trevirke til siden for lastpåføringen. Denne effekten er god her da trykkplaten har avrundet kant.

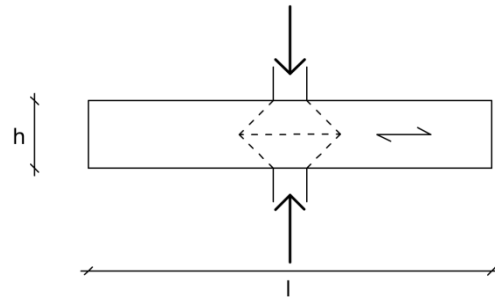


Figur 79 Prøvestykke B1001 under testing.

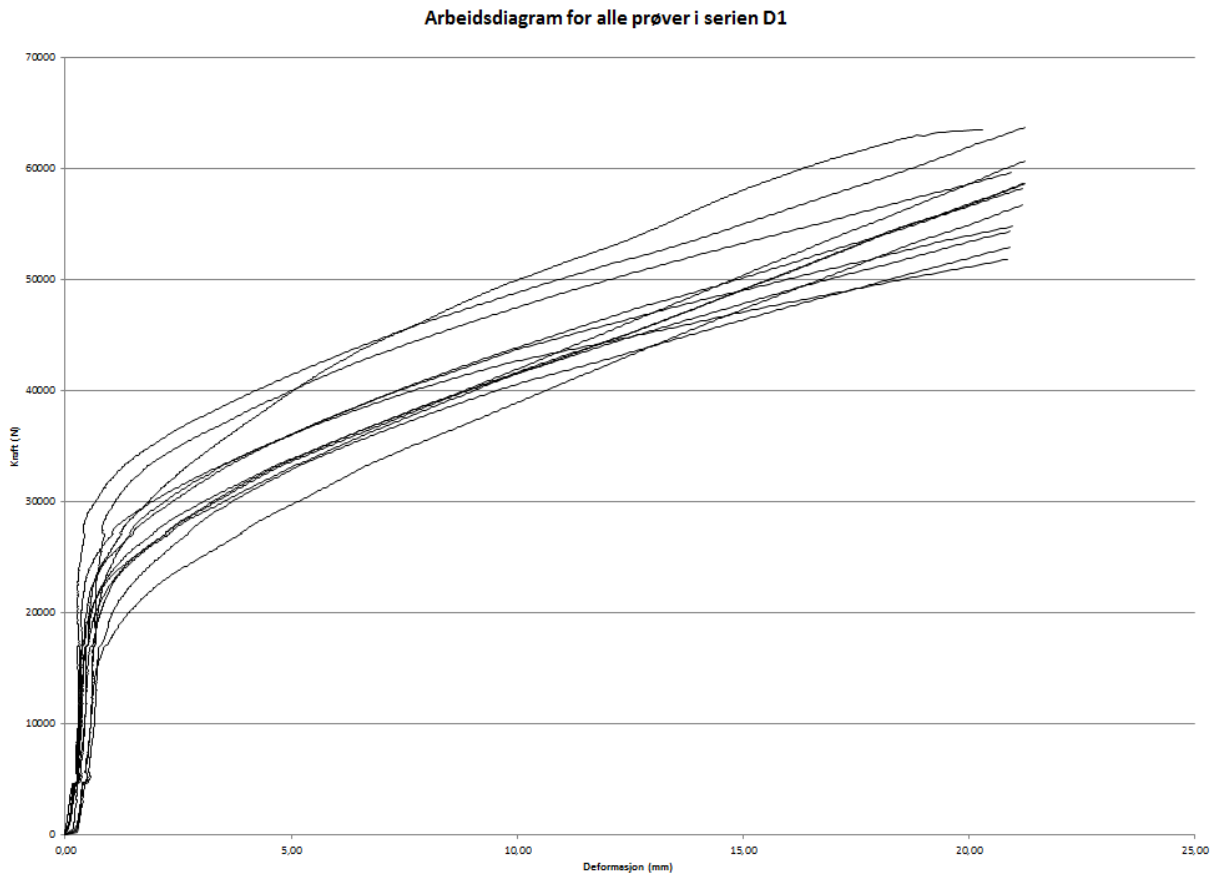
Den varige inntrykningen på prøvene i serie B10 er varierende, både fordi de ikke ble kjørt til samme inntrykning da vi nådde maksimal trykkraft på testmaskinen og fordi dette varierer med hvilke bidrag man fikk av hengekøyeeffekten og densiteten.

4.2.9 Arbeidsdiagram serie D1 – Tosidig trykk midt på, ingen understøttelse.

Trykkplate: $b = 48$, avrundet kant
 Limtre L40C
 $b = 90$
 $h = 90$
 $I_{tot} = 980$
 Antall prøver: 12

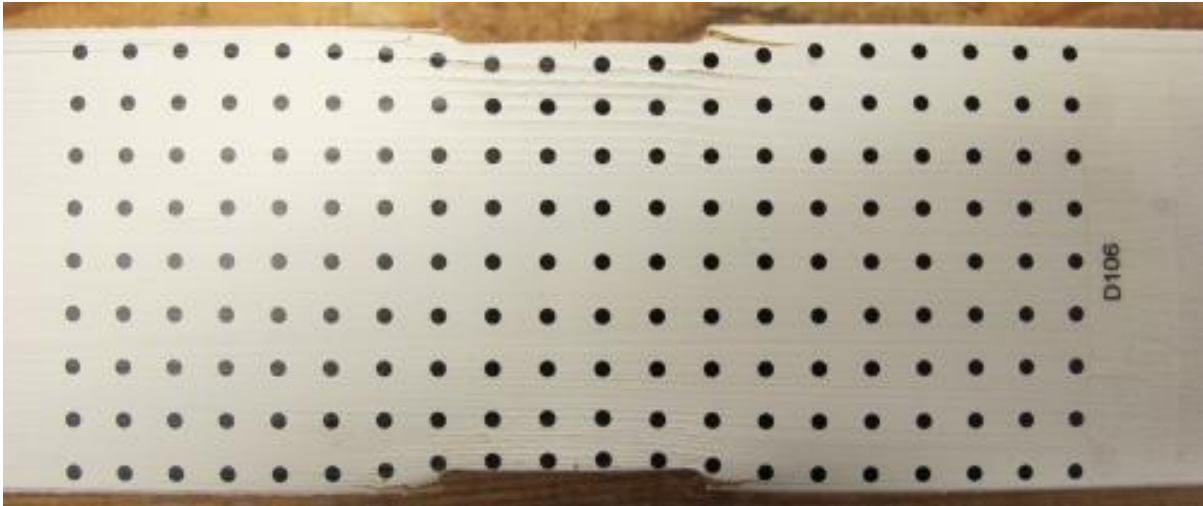


Figur 80 Prøveoppsett for serie D1.



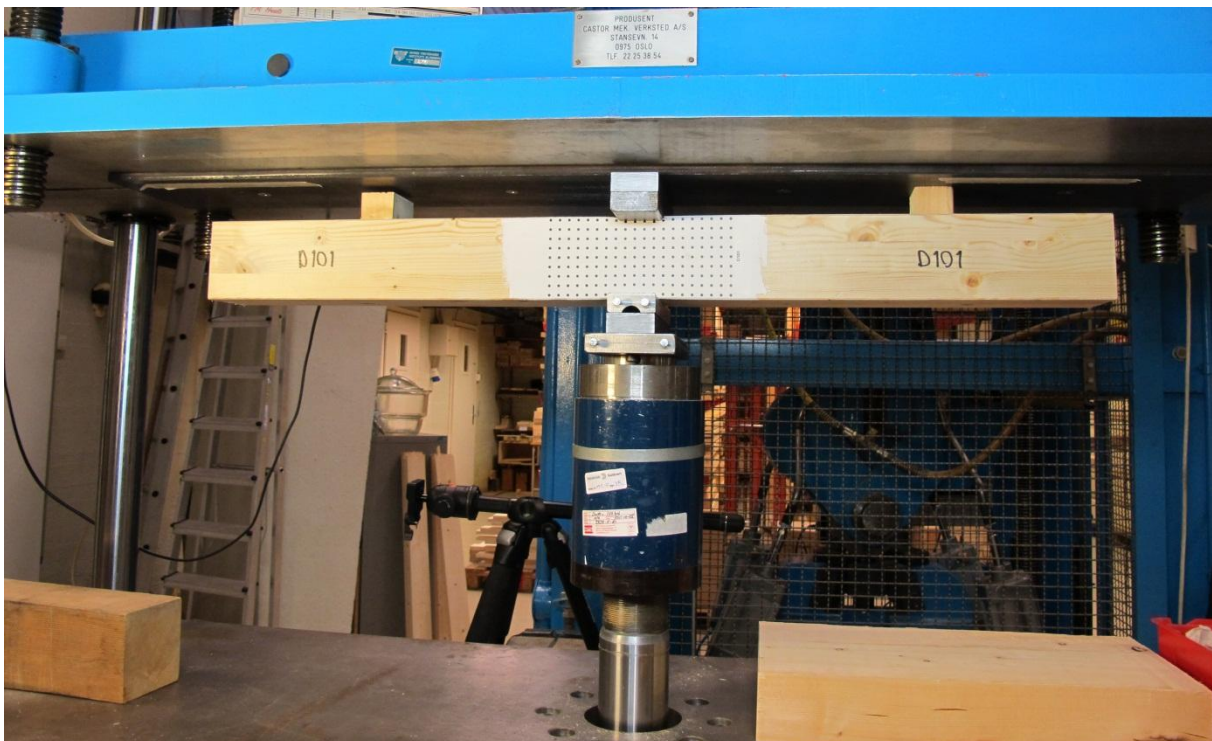
Figur 81 Arbeidsdiagram for serie D1.

Ingen av prøvene i serien D1 sprakk opp ut mot enden noe som tyder på at lengden på prøvestykket er tilstrekkelig for å kunne tåle full lastutbredelse. For prøvene i serie D1 lå gjennomsnittlig bruddlast på 27,3 kN og bruddspenning lå på $6,50 \text{ N/mm}^2$. Her ser vi at vi får lavere kapasitet for samme tverrsnitt når vi sammenligner med ensidig svilletrykk og serie B4. Serie D1 ender opp med en verdi som er 85% av serie B4.



Figur 82 Prøvestykke D106 etter testing.

Arbeidslinjene stiger etter proposjonalitetsgrensen og dette kommer av randeffektene. Trykkplaten forårsaker knusning av fibrene ut mot kanten av trykkplaten, dette gir skråstilling av fibrene. De skråstilte fibrene er med på å holde igjen ved hengekøyeeffekten og bidrar til økt effekt såfremt det er nok urørt trevirke til siden for lastpåføringen. Denne effekten er god her da trykkplatene har avrundet kant.

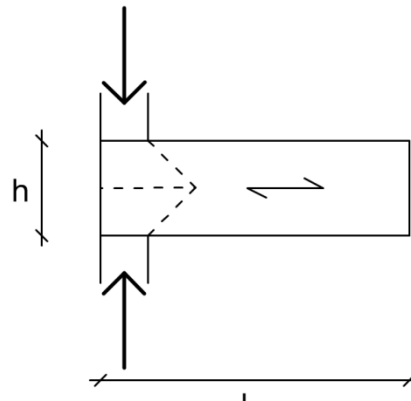


Figur 83 Prøvestykke D101, under testing.

Den varige inntrykningen på prøvene i serie D1 er varierende selv om alle prøvene ble kjørt til en inntrykning på ca 20 mm. Dette varierer med hvilke bidrag man fikk av hengekøyeeffekten og densiteten.

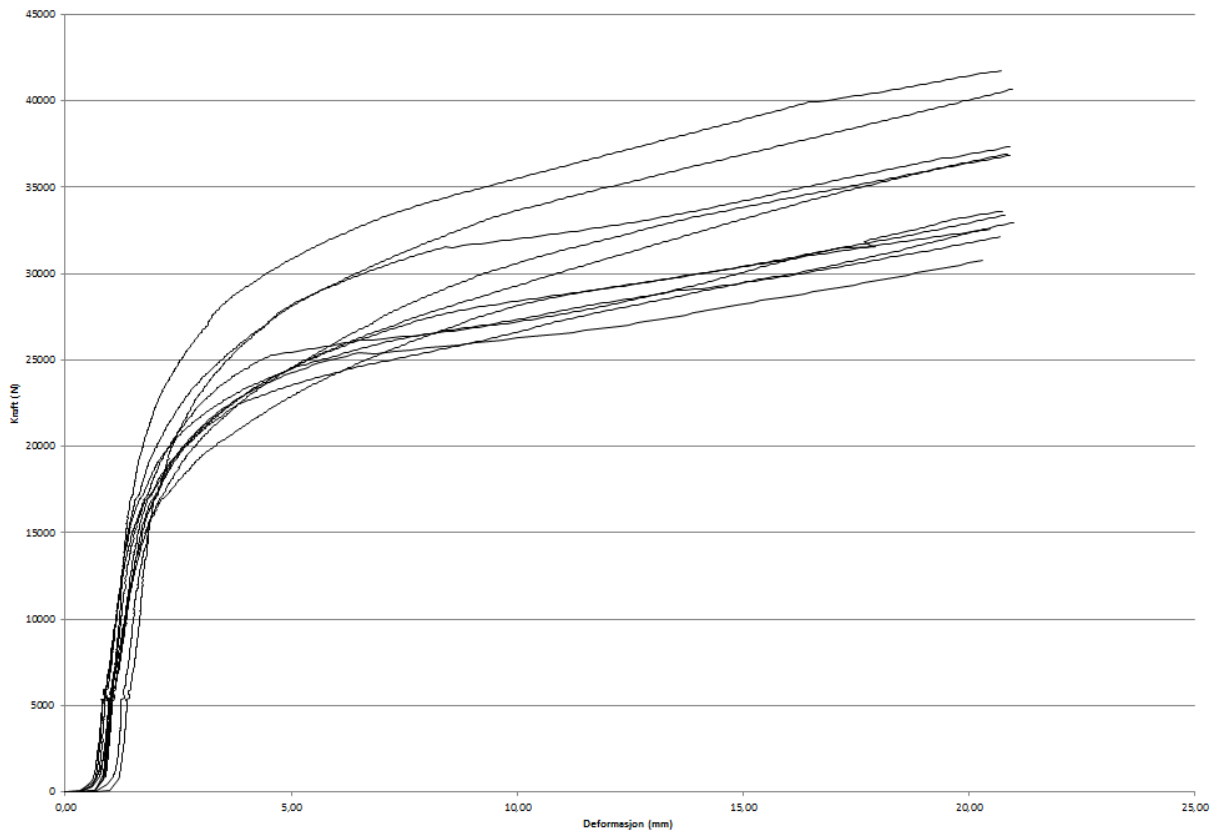
4.2.10 Arbeidsdiagram serie E1 - Tosidig trykk mot ende, ingen understøttelse.

Trykkplate: $b = 48$, avrundet kant
 Limtre L40C
 $b = 90$
 $h = 90$
 $I_{tot} = 980$
 Antall prøver: 14



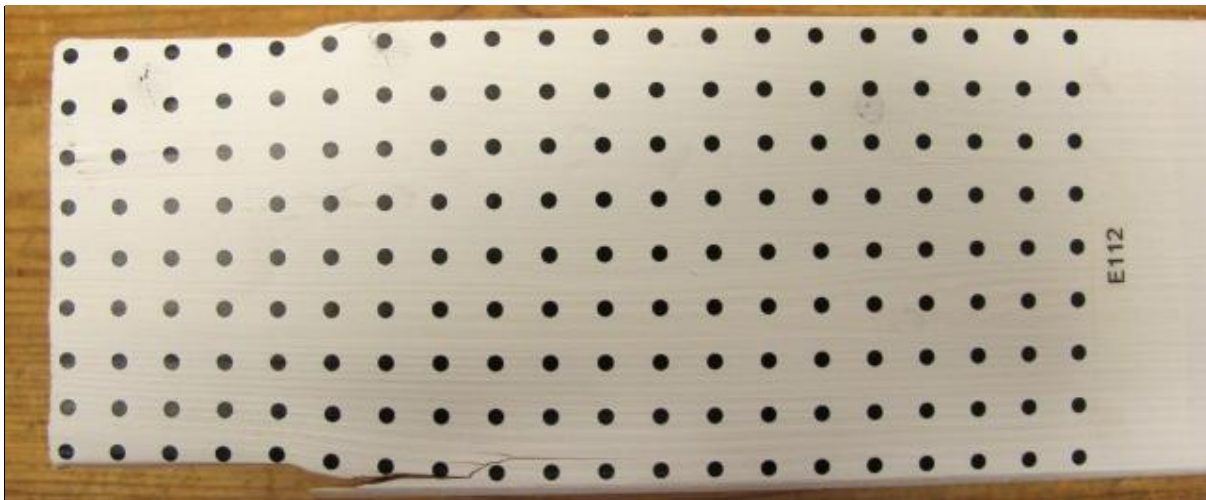
Figur 84 Prøveoppsett for serie E1.

Arbeidsdiagram for alle prøver i serien E1



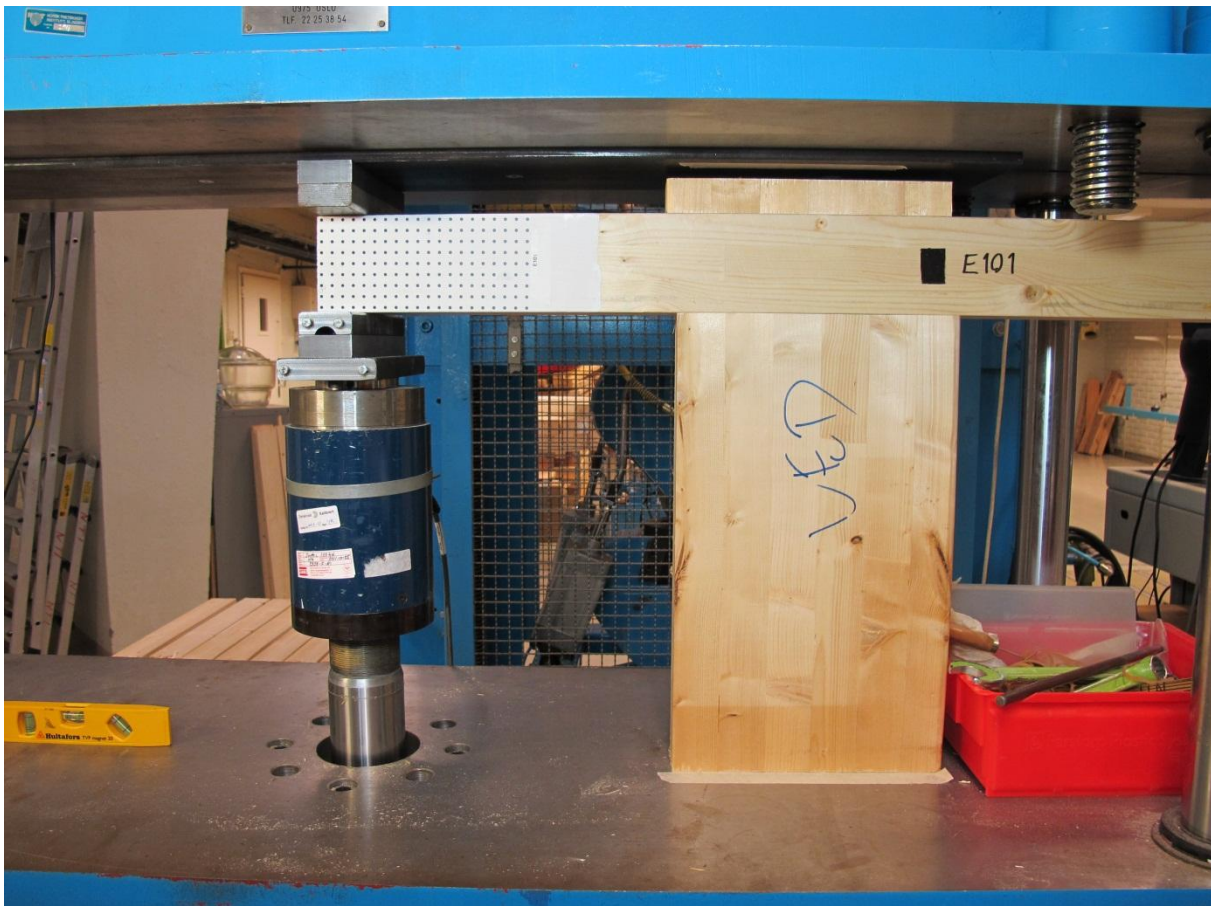
Figur 85 Arbeidsdiagram for serie E1.

Ingen av prøvene i serien E1 sprakk opp ut mot enden noe som tyder på at lengden på prøvestykket er tilstrekkelig for å kunne tåle full lastutbredelse. For prøvene i serie E1 lå gjennomsnittlig bruddlast på 21,0 kN og bruddspenning lå på $4,96 \text{ N/mm}^2$. Her ser vi at vi får betydelig lavere kapasitet for samme tverrsnitt når vi sammenligner med tosidig trykk midt på. Serie E1 ender opp med en verdi som er 76% av serie D1 og 65% av serie B4 for begge verdier. Det forteller oss hvor mye hengekøyeeffekten og nærliggende trevirke til belastningen har å si.

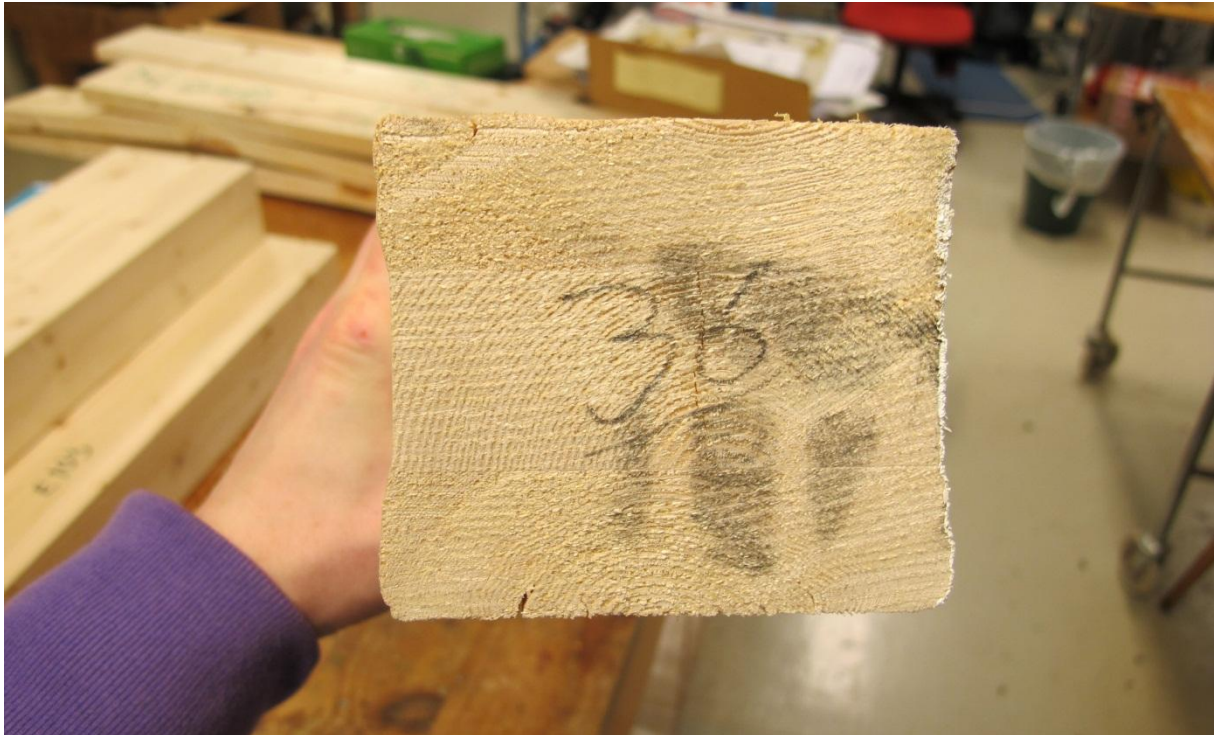


Figur 86 Prøvestykke E112 etter testing.

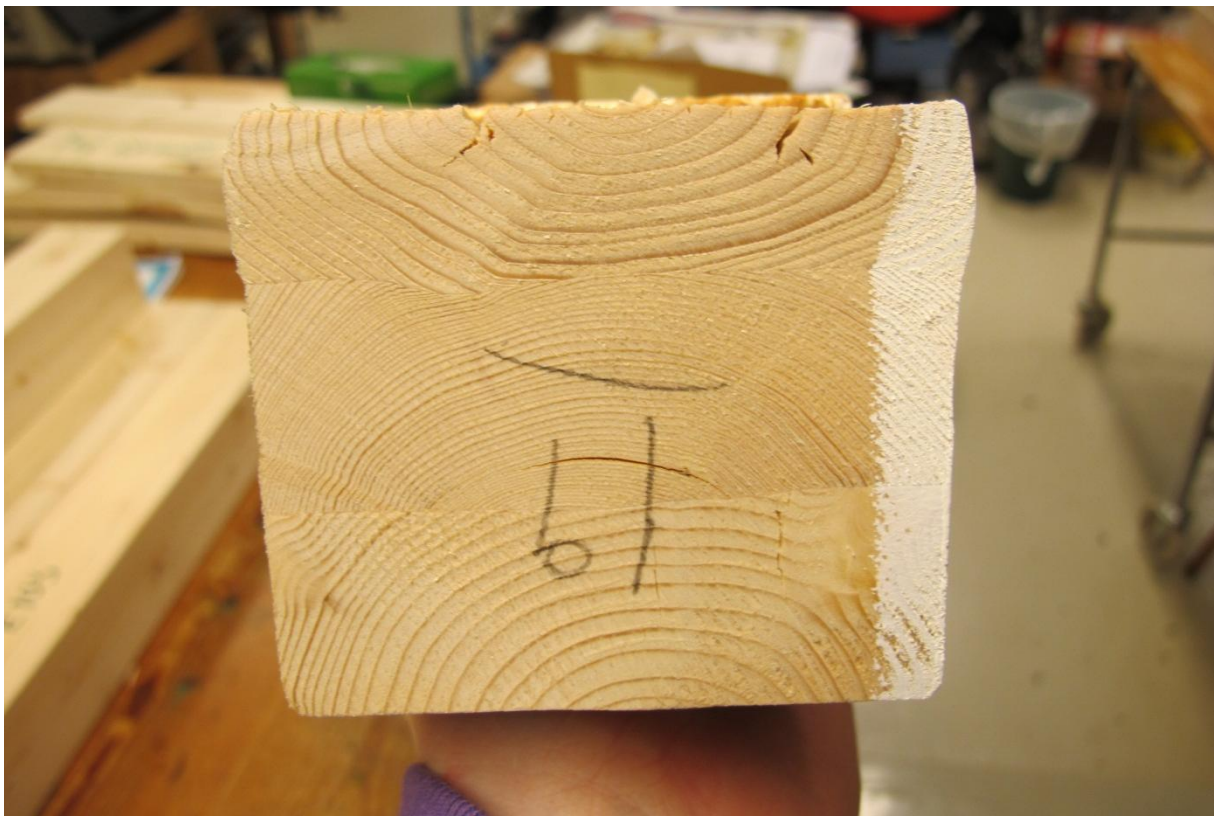
Arbeidslinjene stiger etter proporsjonalitetsgrensen og dette kommer av randeffektene. Trykkplaten forårsaker knusning av fibrene ut mot kanten av trykkplaten, dette gir skråstilling av fibrene. De skråstilte fibrene er med på å holde igjen ved hengekøyeeffekten og bidrar til økt effekt såfremt det er nok urørt trevirke til siden for lastpåføringen. Denne effekten er god her da trykkplatene har avrundet kant. Dog skjer dette kun på den ene siden av trykkplaten grunnet at trykkplaten er plassert helt ut mot enden av prøvestykket.



Figur 87 Prøvestykke E101 under testing.



Figur 88 Prøvestykke E106 etter testing, deformasjonen fører til utbuling, men liten påvirkning av midt lamellen.

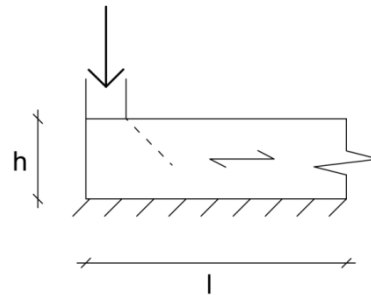


Figur 89 Prøvestykke E105 etter testing, variasjoner i densitet og kvist gir utslag.

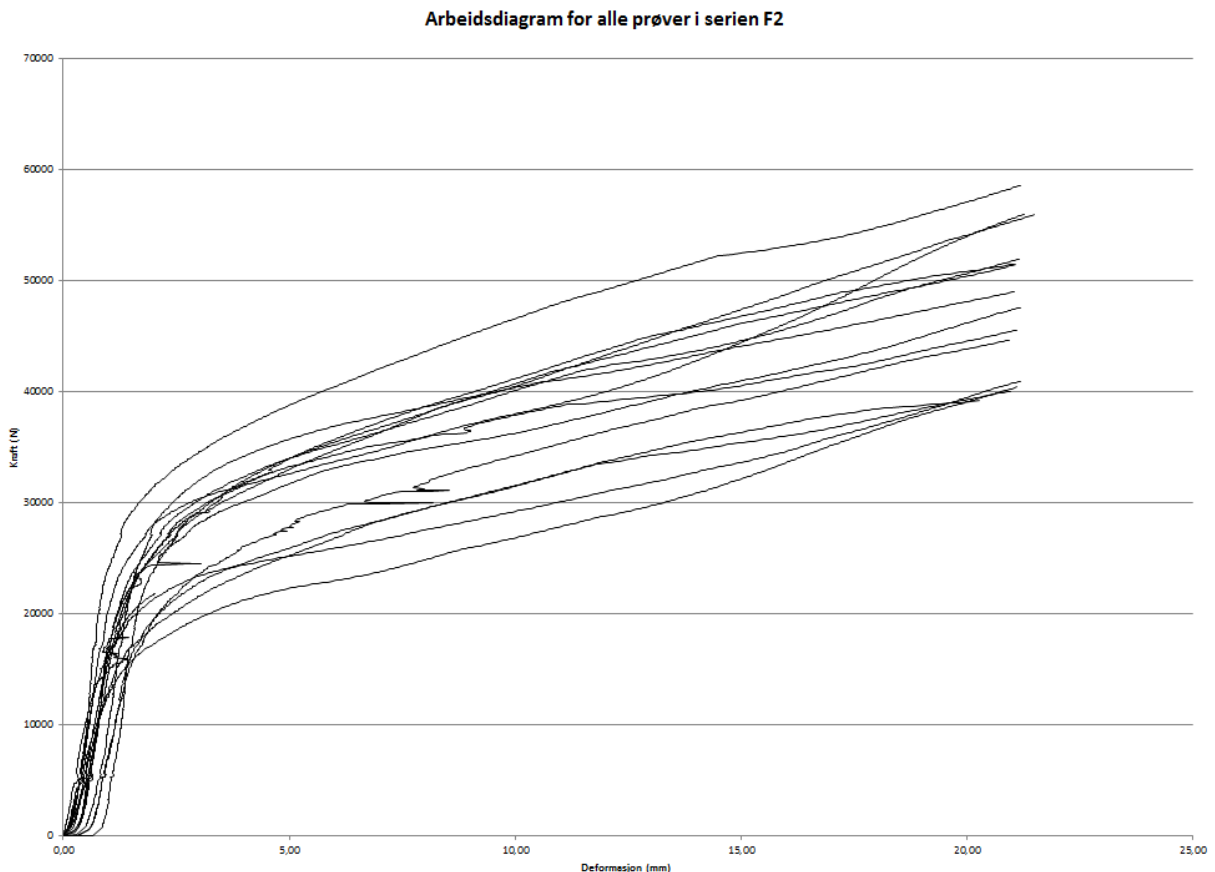
Den varige inntrykningen på prøvene i serie E1 er varierende selv om alle prøvene ble kjørt til en inntrykning på ca 20 mm. Dette varierer med hvilke bidrag man fikk av hengekøyeeffekten og densiteten.

4.2.11 Arbeidsdiagram serie F2 – Ensidig trykk mot ende, full understøttelse.

Trykkplate: $b = 48$, skarp kant
 Limtre L40C
 $b = 90$
 $h = 90$
 $I_{tot} = 980$
 Antall prøver: 15

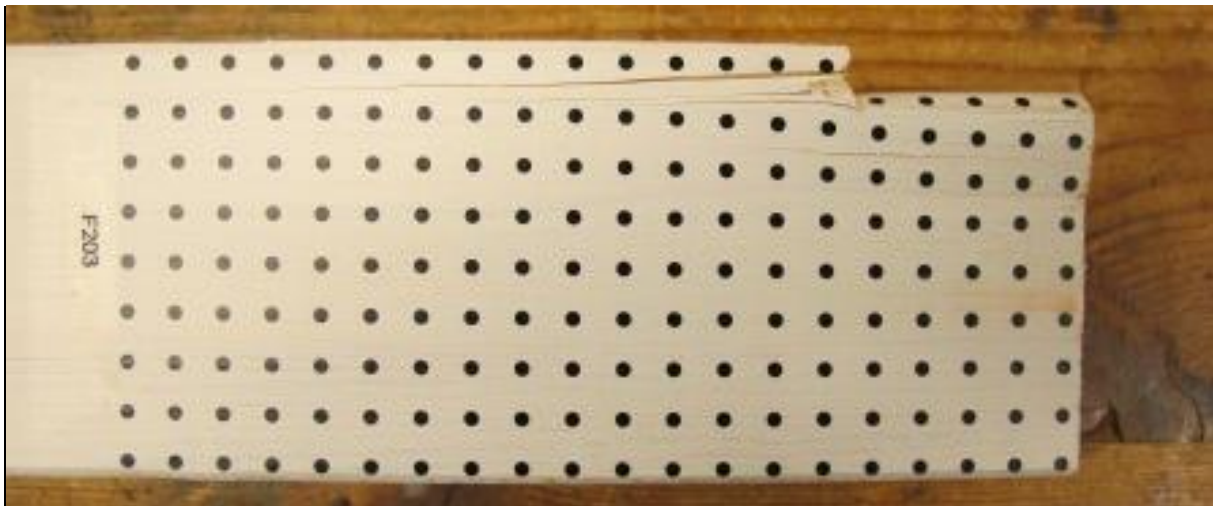


Figur 90 Prøveoppsett for serie F2.



Figur 91 Arbeidsdiagram for serie F2.

Ingen av prøvene i serien F2 sprakk opp ut mot enden noe som tyder på at lengden på prøvestykket er tilstrekkelig for å kunne tåle full lastutbredelse. For prøvene i serie F2 lå gjennomsnittlig bruddlast på 25,5 kN og bruddspenningen lå på $6,02 \text{ N/mm}^2$. Her ser vi at vi får høyere kapasitet for samme tverrsnitt når vi sammenligner med tosidig trykk mot ende i serie E1. Serie F2 ender opp med en verdi som er 21% høyere enn serie E1, men den er ikke helt på høyde med hverken serie D1 eller B4. Serie F2 ender på en verdi som er 93% av serie D1 og 79% av serie B4. Det forteller oss hvor mye hengekøyeeffekten og nærliggende trevirke til belastningen har å si.

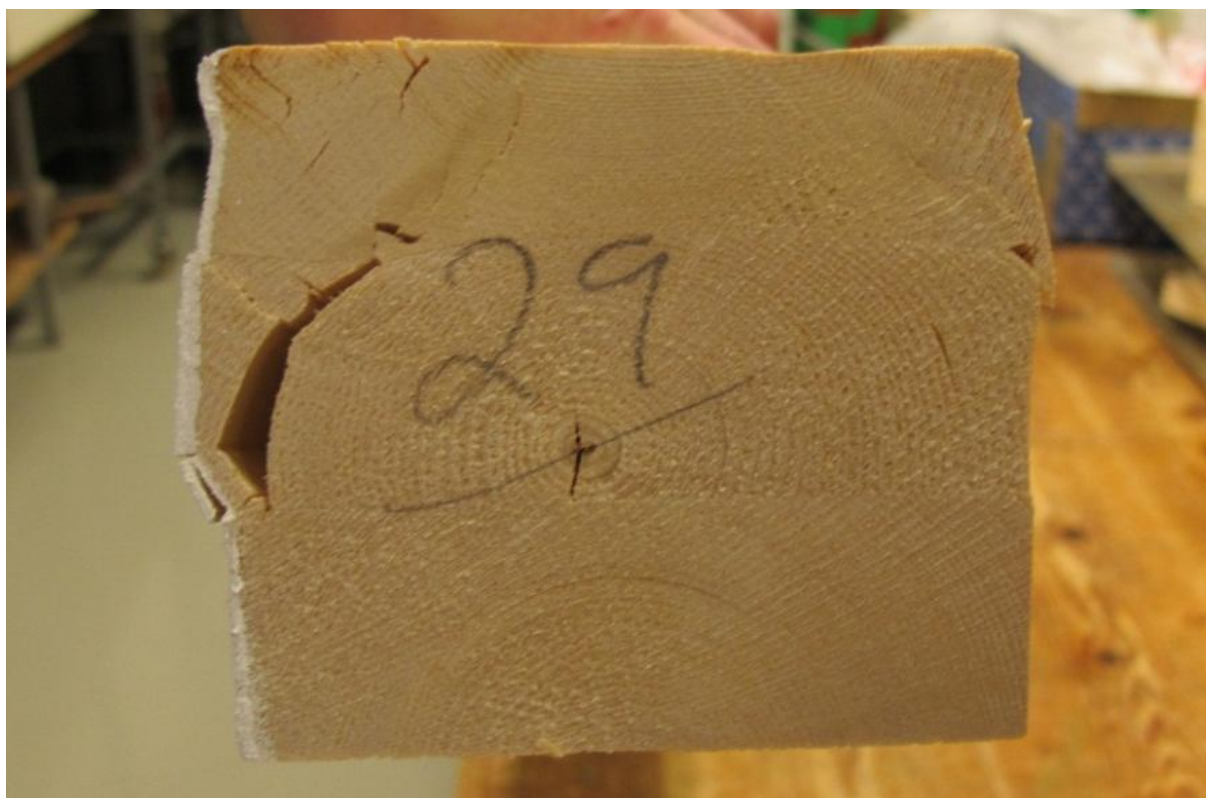


Figur 92 Prøvestykke F203 etter testing.

Arbeidslinjene stiger etter proporsjonalitetsgrensen og dette kommer av randeffektene. Trykkplaten forårsaker knusning av fibre ut mot kanten av trykkplaten, dette gir skråstilling av fibre. De skråstilte fibre er med på å holde igjen ved hengekøyeeffekten og bidrar til økt effekt såfremt det er nok urørt trevirke til siden for lastpåføringen. Denne effekten er noe lavere her da trykkplaten har skarp kant. Dog skjer dette kun på den ene siden av trykkplaten grunnet at trykkplaten er plassert helt ut mot enden av prøvestykket.



Figur 93 Prøvestykke F203 etter testing, tegn til kolvsprekk og mye oppsprekking, men lite innvirkning på lamellen i midten.

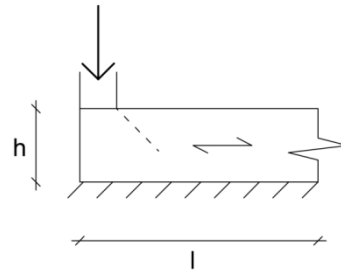


Figur 94 Prøvestykke F207, kvist i ytterste lamell har ført til utpressing og kolvsprekk i midtlamellen. Her ser vi effekten av om man legger et trestykke eller svill med marg opp eller marg ned. Ved å legge med marg ned får man mulighet for at "hjørnene" sklir av som i midtlamellen her.

Den varige inntrykningen på prøvene i serie F2 er varierende selv om alle prøvene ble kjørt til en inntrykning på ca 20 mm. Dette varierer med hvilke bidrag man fikk av hengekøyeffekten og densiteten.

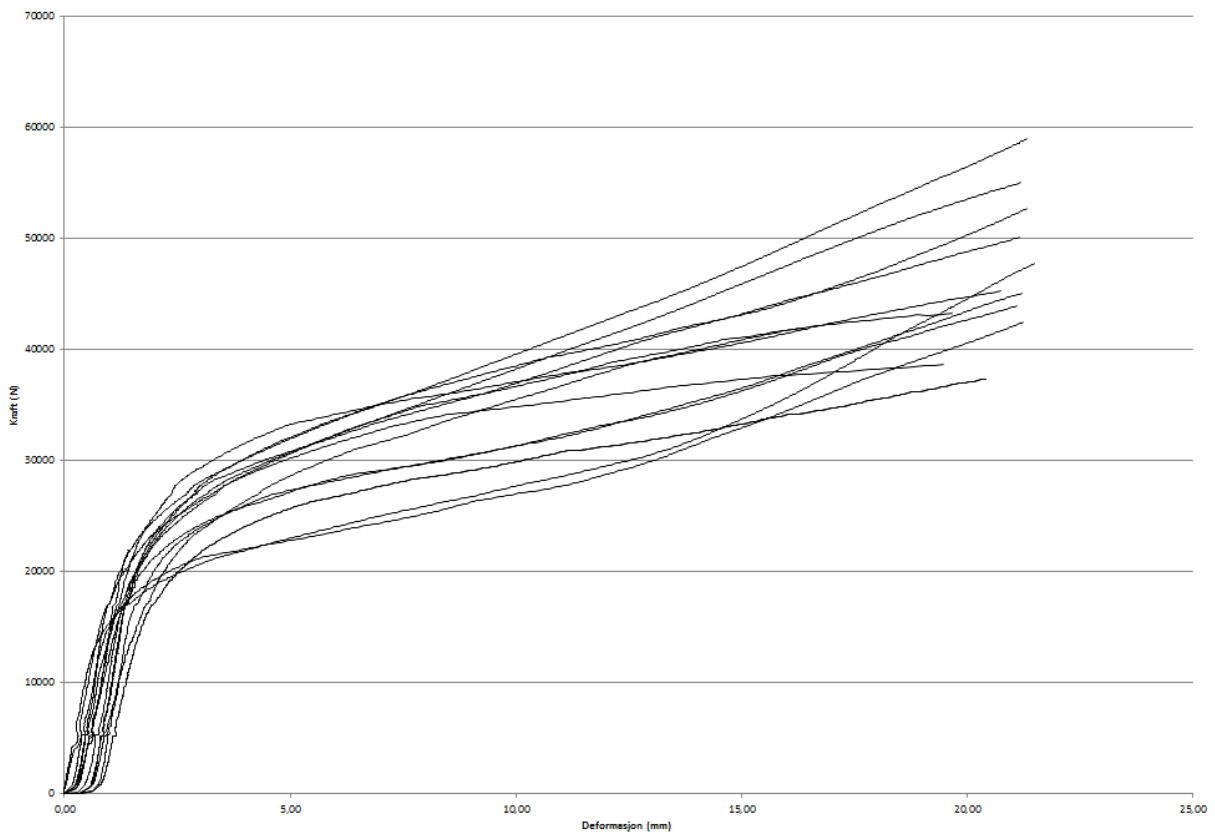
4.2.12 Arbeidsdiagram serie F3 – Ensidig trykk mot ende, full understøttelse.

Trykkplate: $b = 48$, avrunde kant
 Limtre L40C
 $b = 90$
 $h = 90$
 $I_{tot} = 980$
 Antall prøver: 15



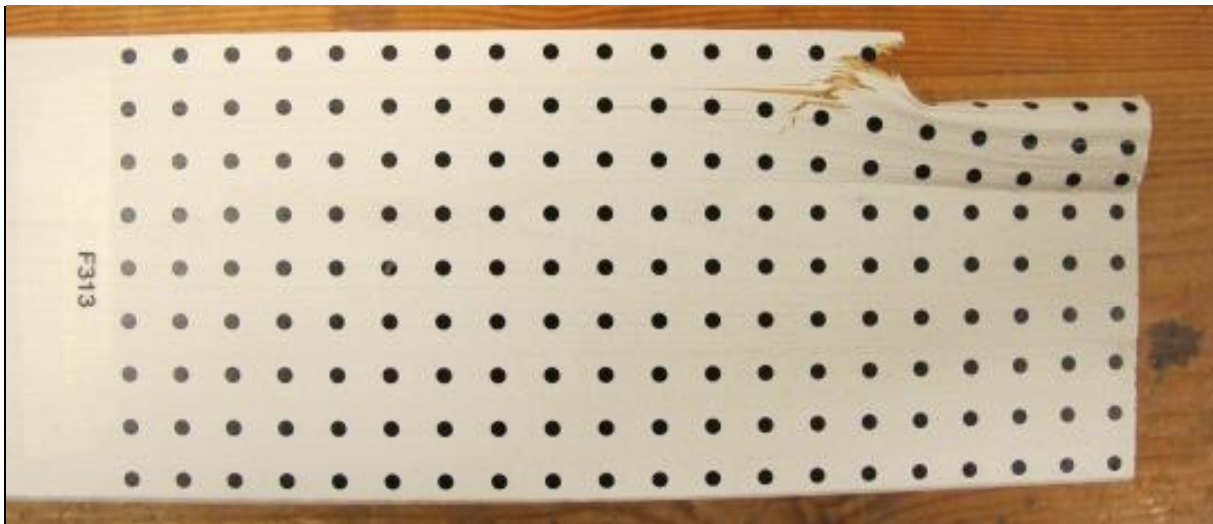
Figur 95 Prøveoppsett for serie F3.

Arbeidsdiagram for alle prøver i serien F3



Figur 96 Arbeidsdiagram for serie F3.

Ingen av prøvene i serien F3 sprakk opp ut mot enden noe som tyder på at lengden på prøvestykket er tilstrekkelig for å kunne tåle full lastutbredelse. For prøvene i serie F3 lå gjennomsnittlig bruddlast på 24,0 kN og bruddspenningen lå på $5,67 \text{ N/mm}^2$. Her ser vi at vi får snaut lavere kapasitet, 94%, for samme tverrsnitt når vi sammenligner med serie F2 som har samme oppsett men skarp kant på trykkplaten. Serie F3 ender opp med en verdi som er 14% høyere enn serie E1, men den er ikke helt på høyde med hverken serie D1 eller B4. Serie F3 ender på en verdi som er 87% av serie D1 og 74% av serie B4. Det forteller oss hvor mye hengekøyeeffekten og nærliggende trevirke til belastningen har å si.



Figur 97 Prøvestykke F313 etter testing, se at deformasjonene følger ytre lamell.

Arbeidslinjene stiger etter proporsjonalitetsgrensen og dette kommer av randeffektene. Trykkplaten forårsaker knusning av fibrene ut mot kanten av trykkplaten, dette gir skråstilling av fibrene. De skråstilte fibrene er med på å holde igjen ved hengekøyeeffekten og bidrar til økt effekt såfremt det er nok urørt trevirke til siden for lastpåføringen. Denne effekten er god her da trykkplatene har avrundet kant. Dog skjer dette kun på den ene siden av trykkplaten grunnet at trykkplaten er plassert helt ut mot enden av prøvestykket.



Figur 98 Prøvestykke F313, deformasjonen oppstår lokalt, liten påvirkning av lamellen i midten.

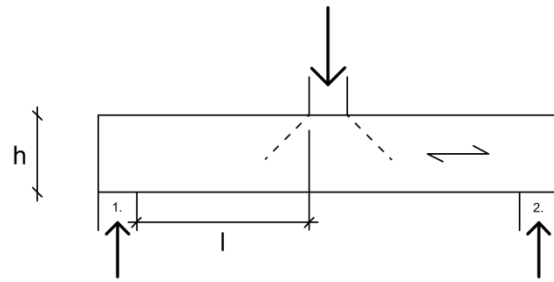


Figur 99 Prøvestykke F308, i midten er det liten påvirkning.

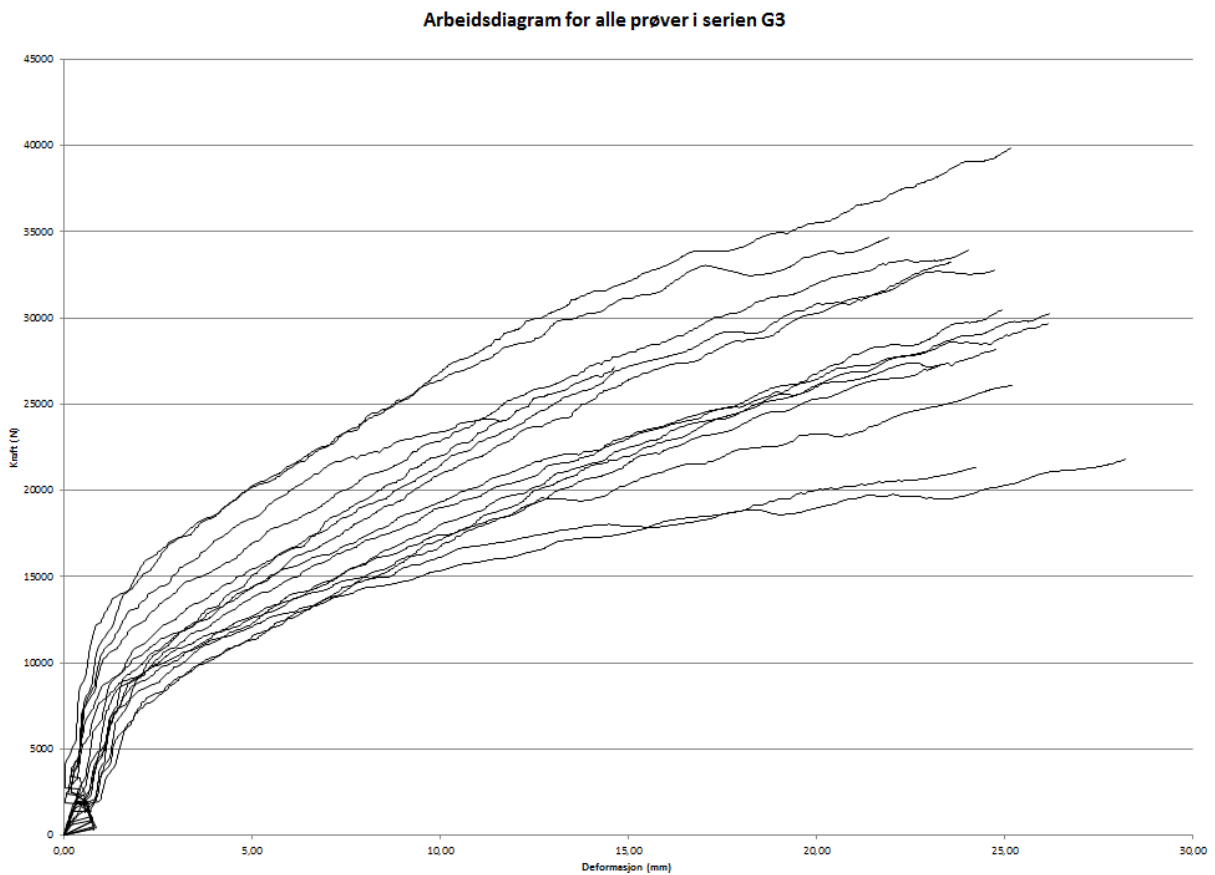
Den varige inntrykningen på prøvene i serie F3 er varierende selv om alle prøvene ble kjørt til en inntrykning på ca 20 mm. Dette varierer med hvilke bidrag man fikk av hengekøyeeffekten og densiteten.

4.2.13 Arbeidsdiagram serie G3 – Opplagt som en "fritt opplagt bjelke"

Trykkplate: $b = 48$, avrunde kant
 Heltre C24/C30
 $b = 48$
 $h = 198$
 $l = 376$
 $I_{tot} = 980$
 $c/c = 890$
 Antall prøver: 15

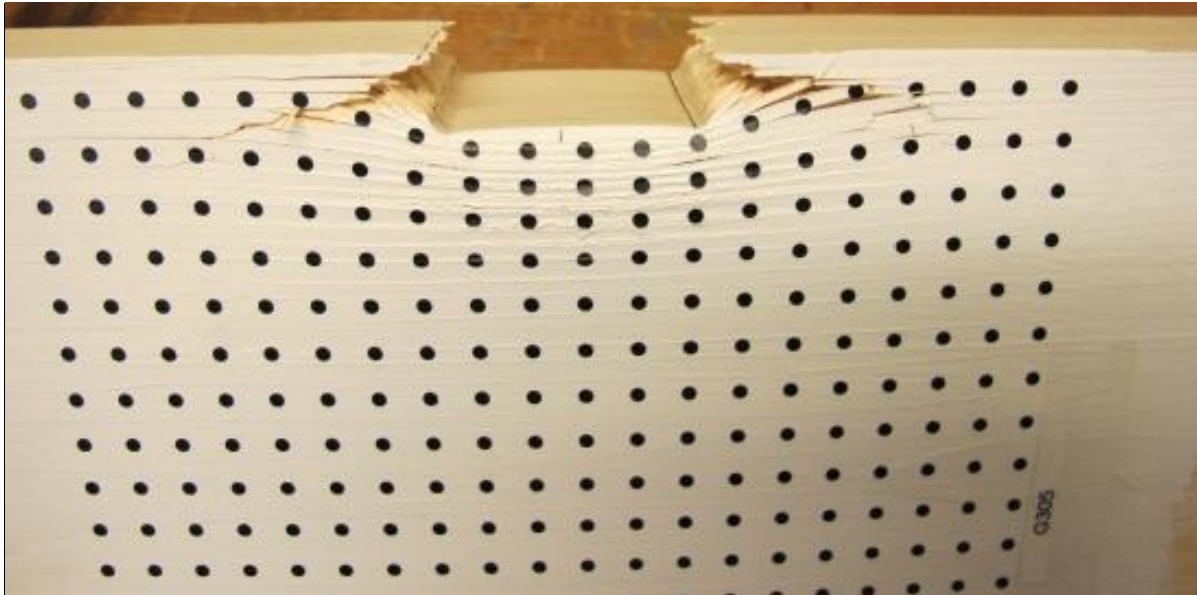


Figur 100 Prøveoppsett for serie G3.



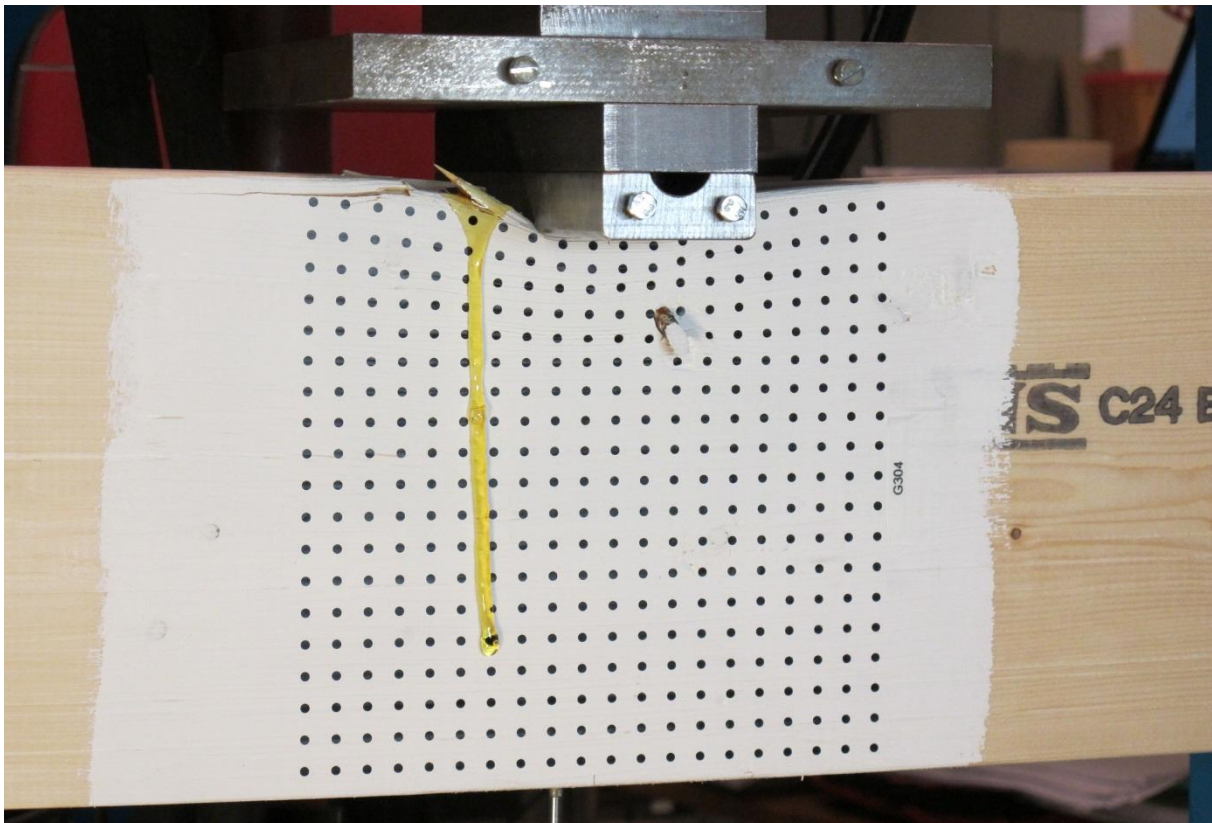
Figur 101 Arbeidsdiagram for serie G3.

Ingen av prøvene i serien G3 sprakk opp ut mot enden noe som tyder på at lengden på prøvestykket er tilstrekkelig for å kunne tåle full lastutbredelse. For prøvene i serie G3 lå gjennomsnittlig bruddlast på 12,8 kN og bruddspenningen lå på $5,63 \text{ N/mm}^2$.



Figur 102 Prøvestykke G305, en lavere spredningsvinkel enn tidligere observert.

Arbeidslinjene stiger etter proporsjonalitetsgrensen og dette kommer av randeffektene. Trykkplaten forårsaker knusning av fibre ut mot kanten av trykkplaten, dette gir skråstilling av fibre. De skråstilte fibre er med på å holde igjen ved hengekøyeeffekten og bidrar til økt effekt såfremt det er nok urørt trevirke til siden for lastpåføringen. Denne effekten er god her da trykkplaten har avrundet kant.



Figur 103 Prøvestykke G304 under testing, stor kvaelomme som renner ut og en død kvist blir skjøvet ut under testingen.



Prøvene i serie G3 ble kjørt til like før brudd og ble derfor kjørt til ulik grad av deformasjon og nedbøyning, av denne grunn vil den varige inntrykningen på prøvene i serie G3 være varierende. Dette varierer også med hvilke bidrag man fikk av hengekøyeffekten og densiteten.

I Figur 102 som viser prøve nummer G305 ser vi en meget lav spredningsvinkel for trykkfordelingen. Dette er den laveste vi har observert men felles for alle er at spredningsvinkelen er større enn det man tidligere har regnet med. De fleste har ligget rundt 33-34 grader og det tilsvarer en helning på ca 1:1,5. Det er mulig at man i fremtiden klarer å finne denne vinkelen ved hjelp av fotogrammetri men det har desverre ikke vært mulig for oss å finne denne annet enn på prøvestykker hvor vinkelen kommer visuelt tydelig frem. En større spredningsvinkel gir et større areal eller volum under trykkplaten som belastningen kan fordele seg på. Dette gir god effekt ved trykk midt på prøvestykket men får redusert effekt ved trykk mot ende da man kun får denne effekten på en side.

4.2.14 Arbeidsdiagram serie G4 – Opplagt som en "fritt opplagt bjelke"

Trykkplate: $b = 90$, avrundet kant

Limtre L40C

$b = 90$

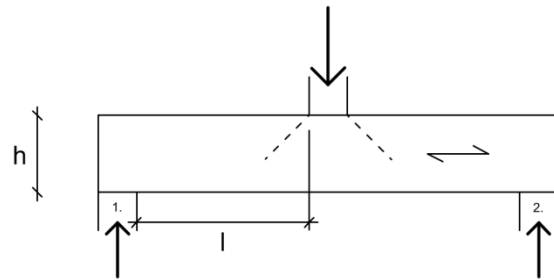
$h = 405$

$l = 605$

$I_{tot} = 1480$

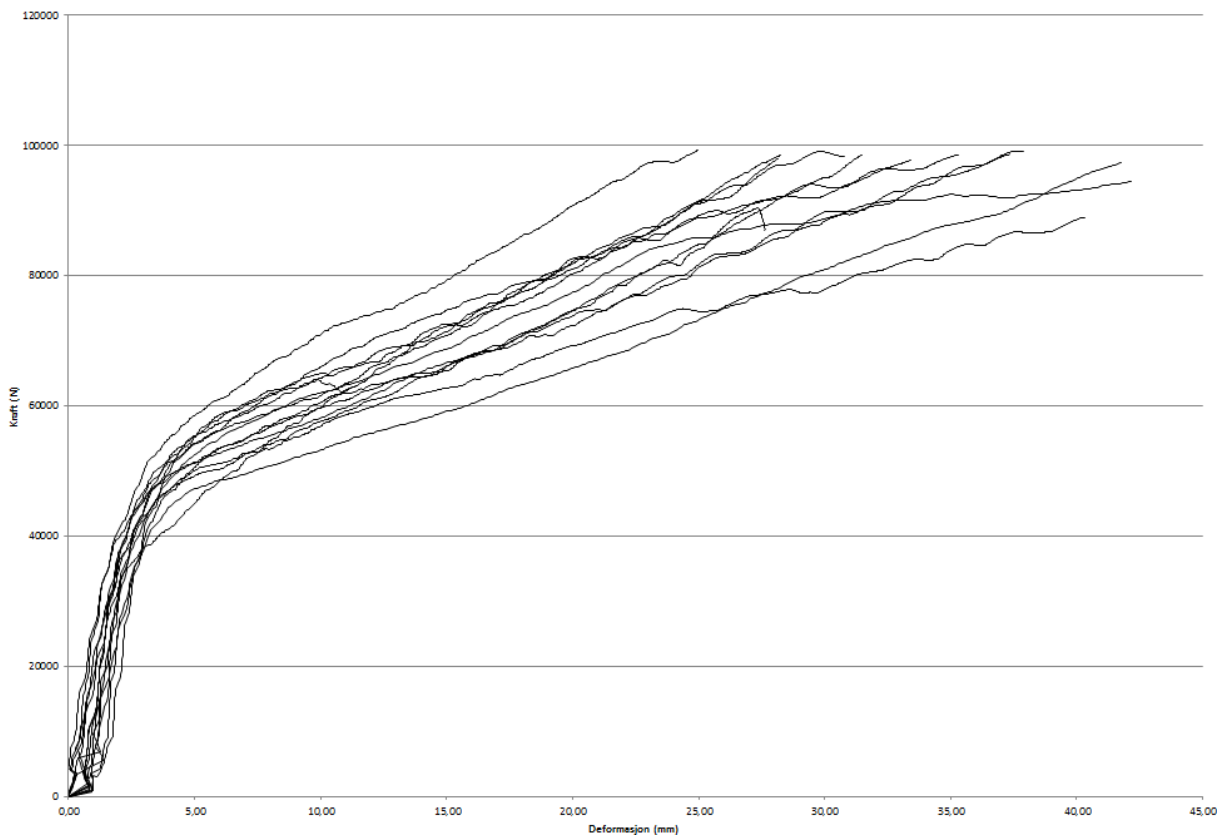
$c/c = 1330$

Antall prøver: 15



Figur 104 Prøveoppsett for serie G4.

Arbeidsdiagram for alle prøver i serien G4



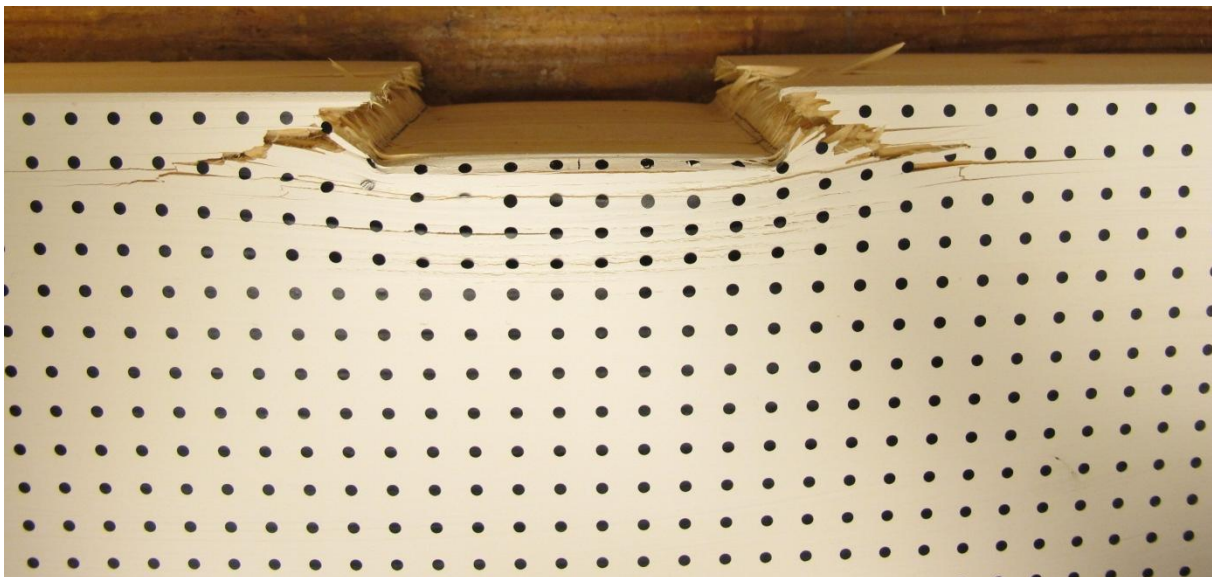
Figur 105 Arbeidsdiagram for serie G4.

Ingen av prøvene i serien G4 sprakk opp ut mot enden noe som tyder på at lengden på prøvestykket er tilstrekkelig for å kunne tåle full lastubredelse. For prøvene i serie G4 lå gjennomsnittlig maksimal kraftutnyttelse på 56,8 kN og bruddspenningen lå på $7,09 \text{ N/mm}^2$.



Figur 106 Prøvestykke G407 etter testing, mye splintring av trevirket i området rundt trykkplaten.

Arbeidslinjene stiger etter proporsjonalitetsgrensen og dette kommer av randeffektene. Trykkplaten forårsaker knusning av fibrene ut mot kanten av trykkplaten, dette gir skråstilling av fibrene. De skråstilte fibrene er med på å holde igjen ved hengekøyeeffekten og bidrar til økt effekt såfremt det er nok urørt trevirke til siden for lastpåføringen. Denne effekten er god her da trykkplatene har avrundet kant.



Figur 107 Prøvestykke G410, lite splintring og en klar tendens for spredningsvinkelen.

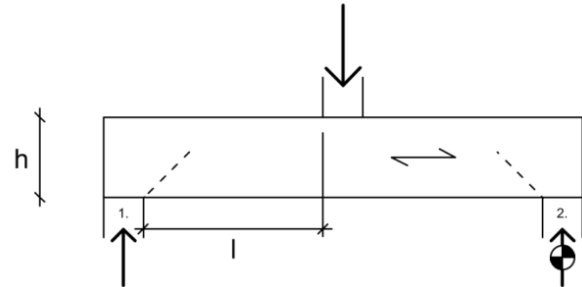


Figur 108 Prøvestykke G411, kvist under trykkplaten fører til forstyrrelser og oftest til høyere fasthet.

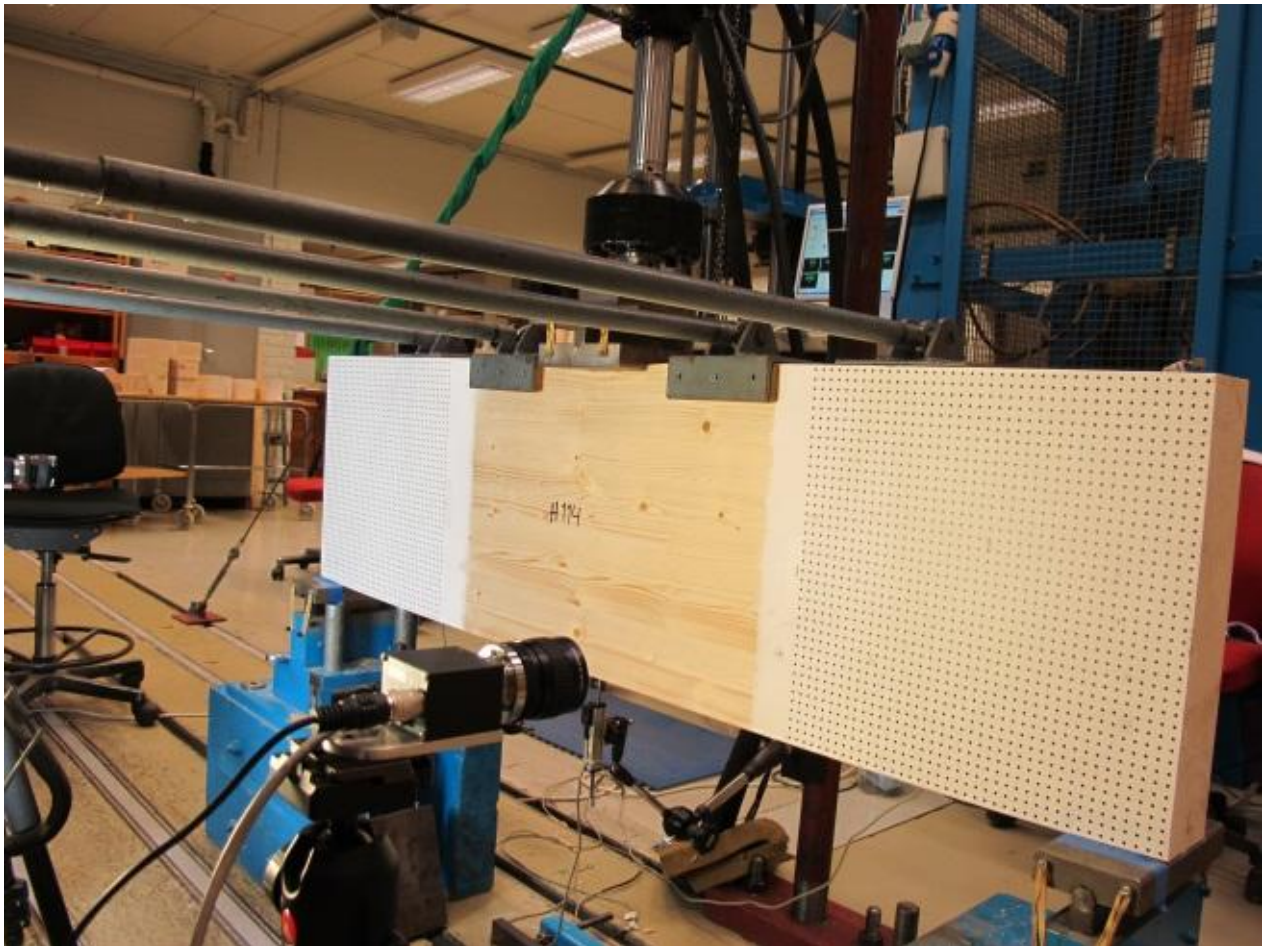
Prøvene i serie G4 ble kjørt til maksimal kapasitet på testmaskinen som er 100 kN, årsaken til at snittet ligger på 98 er at et par av prøvene ble stoppet like før dette da de begynte å skli ut av oppleggene. Den varige inntrykningen på prøvene i serie G3 er varierende og dette varierer med hvilket bidrag man fikk av hengekøyeffekten og densiteten.

4.2.15 Arbeidsdiagram serie H1 – Opplagt som en "fritt opplagt bjelke" (ser her på oppleggene)

Trykkplate: $b = 90$, avrundet kant med og uten rotasjon
 Limtre L40C
 $b = 90$
 $h = 405$
 $l = 605$
 $l_{\text{tot}} = 1480$
 $c/c = 1390$
 Antall prøver: 15

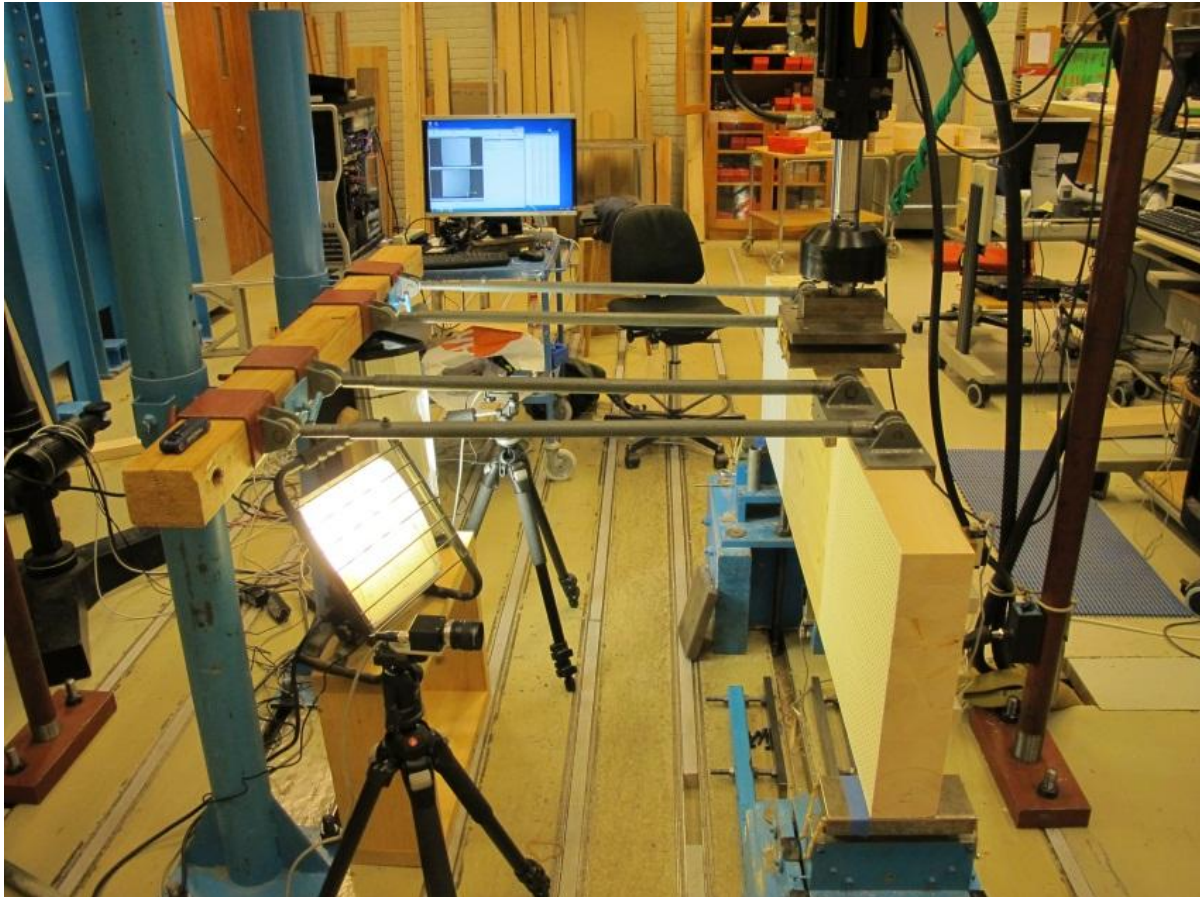


Figur 109 Prøveoppsett for serie H1.



Figur 110 Prøvestykke H114 under testing.

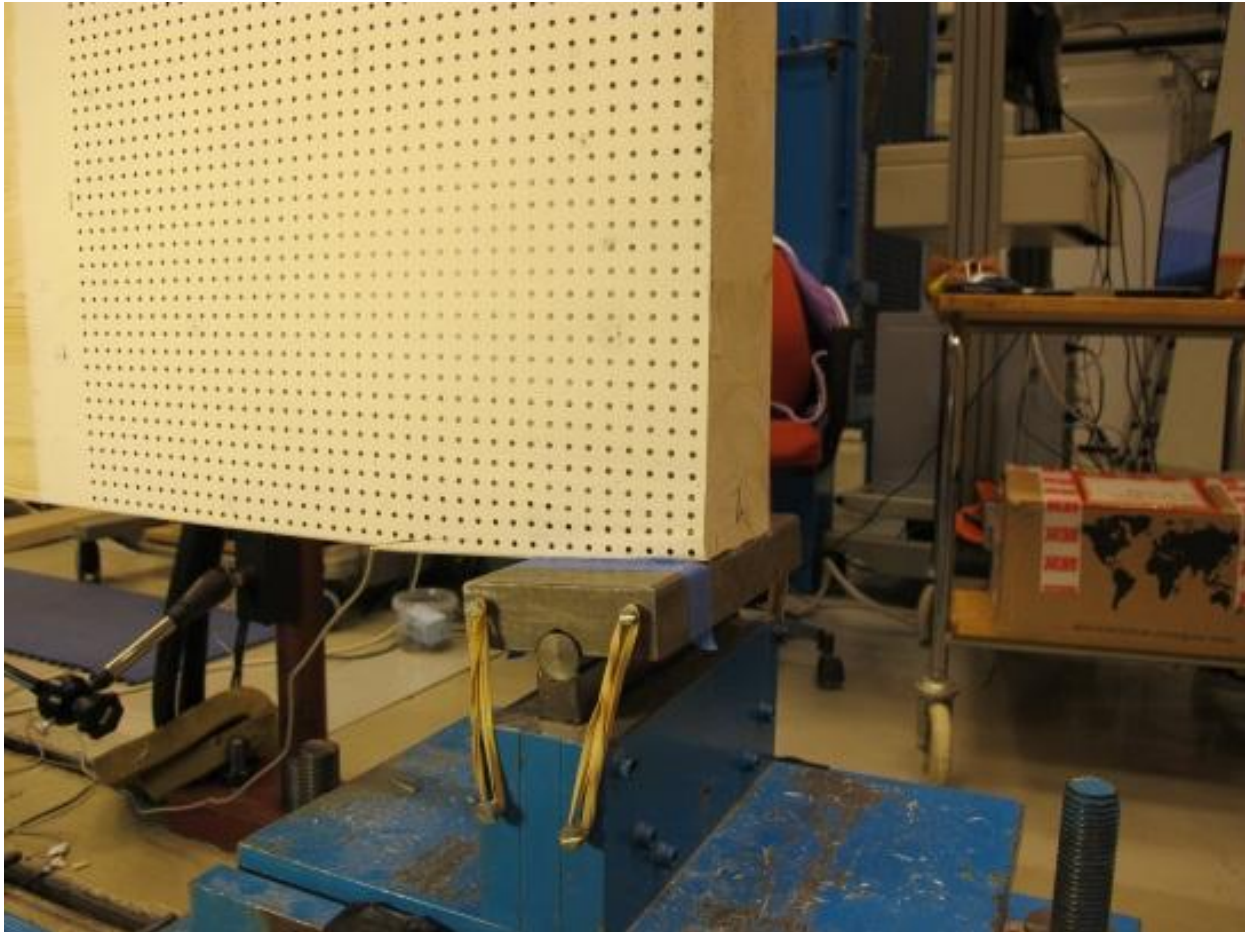
Her har vi ikke noe arbeidsdiagram da vi ikke hadde nok data for å kunne lage en analyse. Her burde man nok hatt en lengre bjelke for å få tydeligere nedbøyning for å få en reell forskjell på de to oppleggene. Man kunne også vurdert å ikke plassere opplagringene helt ut mot enden men ha et lite overheng for å unngå alt for store deformasjoner i trevirket.



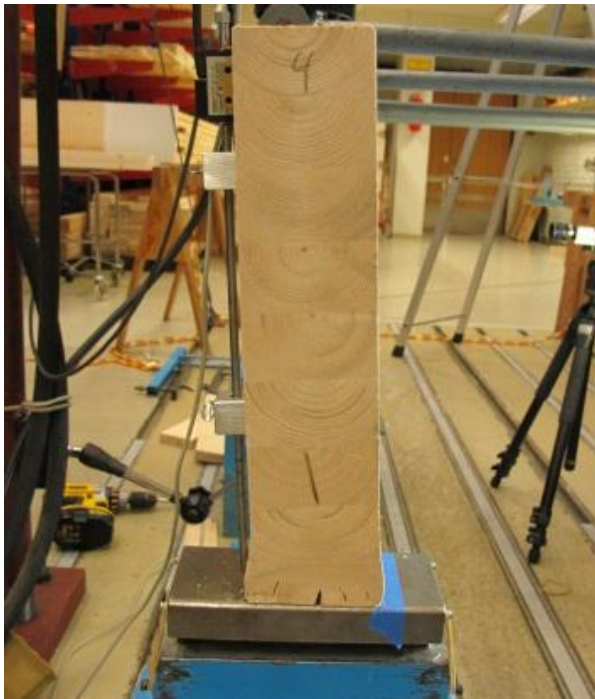
Figur 111 Testing av bjelke i serie H1, her ser man tydelig stagene som ble brukt for å forhindre vipping av prøvestykket siden gaffellagring ikke kunne benyttes.

Dette var en bjelke som var vanskelig å teste da vi ikke kunne bruke gaffellagring i endene på grunn av at vi skulle ta fotogrammetri av begge oppleggene. Istedet ble det benyttet fire justerbare stag montert på en limtrebjelke som igjen var montert på to stålsøyler boltet fast i gulvet. Dette fungerte akseptabelt, men det var vanskelig å hindre at bjelken vippet ut. Dette blir forsterket av at trykksylinderen ikke er fastholdt sideveis.

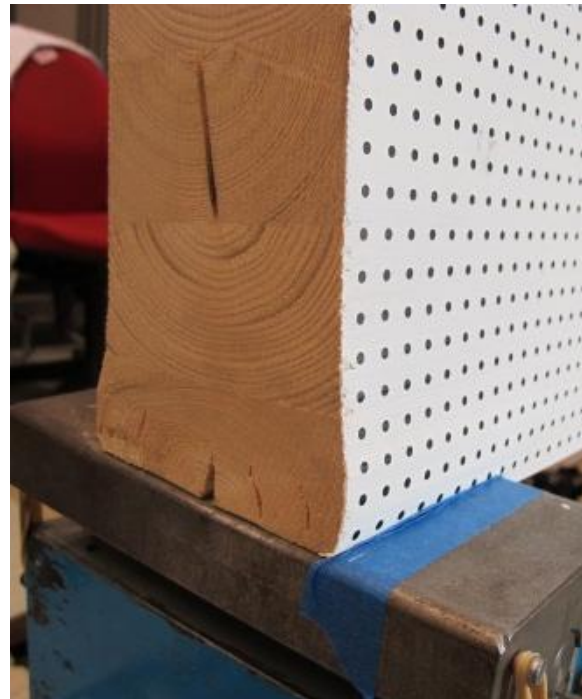
Det viste seg i ettertid når vi skulle begynne med analysen vi ikke hadde tilstrekkelig med data for å analysere prøvene i denne serien. Blant annet måtte deformasjonsmålerne ved oppleggene demonteres underveis i testingen da deformasjonene ble for store. Hadde man hatt lengre deformasjonsmålere kunne det nok fungert. Det er også behov for flere deformasjonsmålere enn det som er tilgjengelig på Treteknisk.



Figur 112 Deformasjon ved endeopplegg, prøvestykke H114.



Figur 113 Prøvestykke H113, vipping.



Figur 114 Prøvestykke H113, deformasjon ved opplegg.

4.2.16 Sammenligning av resultater

Vi har sett en del på hvilke effekter de forskjellige prøveoppsettene har hatt på bruddlast, bruddspenning og spenning ved 1, 2, 3, 4, 5, 10 og 15 mm deformasjon, og sett disse resultatene opp mot hverandre. Vi har laget tabeller for alle kombinasjoner i samtlige serier for nevnte situasjoner og disse ligger ved i sin helhet i vedlegg B. Her viser vi tabellene for bruddlast og bruddspenning samt en samling av de mest aktuelle sammenligningene av resultater.

Alle verdier er regnet ut ved å ta horisontal serie delt på vertikal serie. Verdiene er i prosent men er ikke ganget opp med 100 så 1,92 betyr 192% og 0,52 betyr 52% osv. Det er ikke alle sammenligninger som det er aktuelt eller praktisk mulig å bruke, men vi synes dette er en fin måte å fremstille dataene på da alle mulige kombinasjoner er med og man kan da enkelt bruke de man selv ønsker.

Bruddlast (kraft)																			
H/V	Svilletrykk ensidig midt på, L40C											Tosidig trykk midt		Tosidig trykk ende		Ensidig trykk ende		Fritt opplagt bjelke	
	90x90						45x90 høy	90x48 lav	90x405	90x90	90x90	90x90 L40C		48x198	90x405				
	48 skarp	48 rund	90 rund	48 rund	90 rund	48 rund	48 rund	90 rund	48 rund	48 rund	48 rund	48 skarp	48 rund	48 rund	90 rund				
				rotasjon	Rotasjon														
B3	1,00	1,04	1,58	1,08	1,59	0,42	0,80	2,13	0,88	0,67	0,82	0,77	0,41	1,83					
B4	0,96	1,00	1,52	1,04	1,54	0,40	0,77	2,06	0,85	0,65	0,79	0,74	0,40	1,76					
B5	0,63	0,66	1,00	0,68	1,01	0,26	0,51	1,35	0,56	0,43	0,52	0,49	0,26	1,16					
B6	0,93	0,96	1,46	1,00	1,48	0,39	0,74	1,98	0,81	0,63	0,76	0,71	0,38	1,69					
B7	0,63	0,65	0,99	0,68	1,00	0,26	0,50	1,34	0,55	0,42	0,51	0,48	0,26	1,15					
B8	2,40	2,49	3,78	2,59	3,82	1,00	1,92	5,11	2,10	1,62	1,96	1,85	0,99	4,38					
B9	1,25	1,30	1,97	1,35	1,99	0,52	1,00	2,67	1,10	0,84	1,02	0,96	0,52	2,29					
B10	0,47	0,49	0,74	0,51	0,75	0,20	0,37	1,00	0,41	0,32	0,38	0,36	0,19	0,86					
D1	1,14	1,18	1,80	1,23	1,82	0,48	0,91	2,43	1,00	0,77	0,93	0,88	0,47	2,08					
E1	1,48	1,54	2,34	1,60	2,36	0,62	1,19	3,16	1,30	1,00	1,21	1,14	0,61	2,71					
F2	1,22	1,27	1,93	1,32	1,94	0,51	0,98	2,60	1,07	0,82	1,00	0,94	0,50	2,23					
F3	1,30	1,35	2,05	1,40	2,07	0,54	1,04	2,77	1,14	0,88	1,06	1,00	0,54	2,37					
G3	2,42	2,52	3,83	2,61	3,86	1,01	1,94	5,17	2,13	1,64	1,99	1,87	1,00	4,43					
G4	0,55	0,57	0,86	0,59	0,87	0,23	0,44	1,17	0,48	0,37	0,45	0,42	0,23	1,00					

Figur 115 Sammenligning av alle verdier i alle serier ved bruddlast.

Bruddspenning																			
H/V	Svilletrykk ensidig midt på, L40C											Tosidig trykk midt		Tosidig trykk ende		Ensidig trykk ende		Fritt opplagt bjelke	
	90x90						45x90 høy	90x48 lav	90x405	90x90	90x90	90x90 L40C		48x198	90x405				
	48 skarp	48 rund	90 rund	48 rund	90 rund	48 rund	48 rund	90 rund	48 rund	48 rund	48 skarp	48 rund	48 rund	90 rund					
				rotasjon	Rotasjon														
B3	1,00	1,04	0,84	1,08	0,85	0,85	0,78	1,12	0,88	0,67	0,82	0,77	0,76	0,96					
B4	0,96	1,00	0,81	1,04	0,82	0,82	0,75	1,08	0,85	0,65	0,79	0,74	0,74	0,93					
B5	1,19	1,23	1,00	1,28	1,01	1,01	0,93	1,33	1,05	0,80	0,97	0,92	0,91	1,14					
B6	0,93	0,96	0,78	1,00	0,79	0,79	0,72	1,04	0,82	0,63	0,76	0,71	0,71	0,89					
B7	1,18	1,22	0,99	1,27	1,00	1,00	0,92	1,32	1,04	0,79	0,96	0,91	0,90	1,14					
B8	1,17	1,22	0,99	1,27	1,00	1,00	0,92	1,31	1,04	0,79	0,96	0,90	0,90	1,13					
B9	1,28	1,33	1,08	1,38	1,09	1,09	1,00	1,43	1,13	0,86	1,05	0,99	0,98	1,23					
B10	0,89	0,93	0,75	0,96	0,76	0,76	0,70	1,00	0,79	0,60	0,73	0,69	0,68	0,86					
D1	1,13	1,17	0,95	1,22	0,96	0,96	0,88	1,27	1,00	0,76	0,93	0,87	0,87	1,09					
E1	1,48	1,54	1,25	1,60	1,26	1,26	1,16	1,66	1,31	1,00	1,21	1,14	1,13	1,43					
F2	1,22	1,27	1,03	1,32	1,04	1,04	0,95	1,37	1,08	0,82	1,00	0,94	0,93	1,18					
F3	1,30	1,35	1,09	1,40	1,10	1,11	1,01	1,45	1,15	0,88	1,06	1,00	0,99	1,25					
G3	1,31	1,36	1,10	1,41	1,11	1,11	1,02	1,46	1,16	0,88	1,07	1,01	1,00	1,26					
G4	1,04	1,08	0,87	1,12	0,88	0,88	0,81	1,16	0,92	0,70	0,85	0,80	0,79	1,00					

Figur 116 Sammenligning av alle verdier i alle serier ved bruddspenning.

Instituttet for Matematiske realfag og Teknologi

Her har vi samlet noen av de mer aktuelle sammenligningene for samtlige nivåer av deformasjon for enklere å kunne få oversikt. Noen av verdiene ved 1 mm deformasjon avviker fra de resterende resultatene, dette kommer av at det er helt i starten av testingen og at verdien da kan bli kunstig lav. Hvis nevneren er veldig lav får vi et høyt resultat. Bruddverdiene skiller seg også ut da brudd i alle tilfeller inntraff lenge før 15 mm deformasjon var oppnådd, snittverdien for alle prøver i alle serier er 3,09 mm.

Deforimasjon i mm		1	2	3	4	5	10	15	Brudd
Beskrivelse	Serie								
Avrundet kant / skarp kant midt på	B4/B3	1,53	1,10	1,07	1,07	1,07	1,06	1,04	1,04
Avrundet kant / skarp kant mot ende	F3/F2	0,80	0,91	0,93	0,93	0,94	0,93	0,94	0,94
Trykk midt på / trykk mot ende, skarp kant	B4/F2	1,50	1,30	1,27	1,27	1,29	1,36	1,40	1,27
Trykk midt på / trykk mot ende, avrundet kant	B4/F3	1,87	1,43	1,36	1,36	1,38	1,46	1,48	1,35
Fast trykkplate / Roterbar trykkplate 48 mm bredde	B4/B6	0,88	0,96	0,96	0,96	0,96	0,98	1,01	0,96
Fast trykkplate / Roterbar trykkplate 90 mm bredde	B5/B7	1,01	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99
Ensidig trykk / tosidig trykk, midt på 48 mm trykkplate	B4/D1	0,88	1,10	1,11	1,12	1,13	1,15	1,16	1,17
Ensidig trykk / tosidig trykk, mot ende 48 mm trykkplate	F3/E1	2,31	1,18	1,14	1,12	1,12	1,15	1,21	1,14
48 mm trykkplate / 90 mm trykkplate	B4/B5	1,24	1,26	1,26	1,27	1,29	1,38	1,42	1,23
Høy / lav	B10/B4	0,47	0,74	0,83	0,84	0,82	0,76	0,73	1,08
Høy / lav	B10/B5	0,59	0,93	1,04	1,06	1,07	1,05	1,04	1,33
Høy / lav	B10/B8	0,54	0,90	0,96	0,94	0,91	0,79	0,75	1,31
Høy / lav	B10/B9	0,52	0,89	0,98	0,98	0,96	0,87	0,83	1,43

Figur 117 Sammenligning av gitte serier ved ulike deformasjoner.

Avrundet kant / skarp kant midt på B4/B3

Vi ser hvis vi sammenligner skarp og avrundet kant på trykkplatene ved trykk midt på svill at det er lite forskjell i kapasitet. Avrundet kant gir bare 4% høyere verdi enn prøvene med skarp kant på trykkplaten. Det er her viktig å merke seg at trykkplaten er i stål og vil derfor ikke "føyse" seg som trevirke vil gjøre i samme situasjon. Vi hadde trodd det ville være større forskjell i verdiene da vi antok at fibrene ville kuttes fortere og at vi derfor ville fått redusert bidrag fra hengekøye effekten og tilstøtende trevirke. Vi ser også at verdiene holder seg stabile for alle grader av deformasjon.

Avrundet kant / skarp kant mot ende F3/F2

Vi ser hvis vi sammenligner skarp og avrundet kant på trykkplatene ved trykk ved ende at det er lite forskjell i kapasitet. Avrundet kant gir faktisk 6% lavere verdi enn prøvene med skarp kant på trykkplaten. Dette er stikk motsatt av hva vi ville trodd og har ingen god forklaring på hvorfor prøvene med skarp kant har høyere verdi. Siden det var veldig lite som skilte i prøvene med trykk midt på (B3 og B4) og de hadde tilnærmet lik densitet (458,44 og 458,93) er det naturlig å tro at det er den noe høyere densiteten i serie F2, 458,16 mot 447,50 i serie F3 som gjør at den kommer bedre ut enn serie F3. Vi hadde også her trodd at det ville være større forskjell i verdiene. Vi ser også her at verdiene holder seg stabile for alle grader av deformasjon.

Trykk midt på / trykk mot ende, skarp kant B4/F2

Hvis vi ser på sammenhengen mellom trykk midt på svill og trykk mot ende av svill med skarp kant på trykkplaten får serie B4 med trykk midt på 27% høyere verdi enn serie F2 med trykk mot ende. Denne verdien holder seg stabil ved deformasjoner på 2-5 mm men stiger ved 10 og 15 mm deformasjon. Årsaken til at serie B4 får høyere verdi enn serie F2 kommer av at sistnevnte serie kun får bidrag fra hengekøye effekten og tilstøtende trevirke på en side.

Trykk midt på / trykk mot ende, avrundet kant B4/F3

Hvis vi ser på sammenhengen mellom trykk midt på svill og trykk mot ende av svill med avrundet kant på trykkplaten, får serie B4 med trykk midt på 35% høyere verdi enn serie F3 med trykk mot ende. Denne verdien holder seg relativt stabil ved deformasjoner på 2-5 mm men stiger ved 10 og 15 mm deformasjon. Årsaken til at serie B4 får høyere verdi enn serie F3 kommer av at sistnevnte serie kun får bidrag fra hengekøyeffekten og tilstøtende trevirke på en side.

Fast trykkplate / Roterbar trykkplate 48 mm bredde B4/B6

Hvis vi sammenligner resultatene for fastholdt trykkplate i serie B4 og trykkplate som kan rotere om en akse i serie B6, begge trykkplater med 48 mm bredde og avrundet kant ser vi at serie B4 får 6% lavere verdi enn serie B6 som har rotérbar trykkplate. Vi ser her at det ikke gir nevneverdig effekt å ha et roterbart opplegg, man kan evt risikere at konstruksjonsdelen sklir av.

Fast trykkplate / Roterbar trykkplate 90 mm bredde B5/B7

Hvis vi sammenligner resultatene for fastholdt trykkplate i serie B5 og trykkplate som kan rotere om en akse i serie B7, begge trykkplater med 90 mm bredde og avrundet kant ser vi at serie B5 får 1% lavere verdi enn serie B7 som har rotérbar trykkplate. Her er det enda mindre forskjell og vi kan da i enda tydeligere ordlag si at det ikke gir nevneverdig effekt å ha et roterbart opplegg, man kan evt risikere at konstruksjonsdelen sklir av.

Ensidig trykk / tosidig trykk, midt på 48 mm trykkplate B4/D1

Når vi ser på forskjellen på serie B4 med ensidig trykk midt på og serie D1 med tosidig trykk midt på ser vi at serie B4 får 17% høyere verdi enn serie D1. Dette sannsynligvis av at ved tosidig trykk treffer de to sonene med tøyninger hverandre og påvirker hverandre slik at vi får dårligere kapasitet for det gitte tverrsnittet.

Ensidig trykk / tosidig trykk, mot ende 48 mm trykkplate F3/E1

Når vi ser på forskjellen på serie F3 med ensidig trykk midt på og serie E1 med tosidig trykk midt på ser vi at serie F3 får 14% høyere verdi enn serie E1. Dette kommer av at ved tosidig trykk treffer de to sonene med tøyninger hverandre og påvirker hverandre slik at vi får dårligere kapasitet for det gitte tverrsnittet. Her ser vi at det er en sammenheng mellom ensidig og tosidig trykk på ende og midt på da verdiene er tilnærmet like.

48 mm trykkplate / 90 mm trykkplate B4/B5

Hvis vi sammenligner serie B4 med 48 mm trykkplate med serie B5 med 90 mm trykkplate, begge med avrundet kant ser vi at serie B4 har en verdi som er 23% høyere enn serie B5. Dette forteller oss at hengekøyeffekten og tilstøtende trevirke spiller en stor rolle når vi øker bredden på trykkplaten og spenningen synker.

Høy vs lav, flere serier

Hvis vi ser på kapasiteten til trevirke ved svilleteykn og ulik høyde på prøvestykkene må vi være veldig bevisst på hva vi sammenligner da vi rett over beviste at det er stor forskjell på 48 mm og 90 mm trykkplate. I Figur 117 er det listet opp fire alternative sammenligninger men det er kun B10/B5 som er direkte sammenlignbare da begge har 90 mm trykkplate. Det er fullt mulig å gjøre mange sammenligninger, flere enn de vi har nevnt her, men det er viktig å sammenligne sammenlignbare tall så man ikke sammenligner fugl og fisk.

4.2.17 Fotogrammetri – tøyninger i trevirket

Under forsøkene er det utført fotogrammetri på alle prøvestykker, analysen er en meget tidkrevende prosess så det er kun et utvalg fra testseriene som er analysert. Ved analyse av fotogrammetriresultatene kan vi se mer på hvordan tøyningene fordeler seg i prøvestykkene under belastning tvers på fiber.

Grafene er illustrert i 3D, x- og y-aksene på grafene samsvarer med de retningene som er beskrevet i teoridelen for trevirket. Z-aksen beskriver størrelsen på tøyningene.

For analysen er det tøyningene i y-retningen som er mest aktuelle, det er også disse tøyningene som har kommet fram best fra analysen. Under testing ble det observert at trevirket ikke kun fikk deformasjoner i den retningen kraften virker. Dette er skillet mellom aktive og passive deformasjoner, hvor aktive deformasjoner følger retningen til kraften og passive deformasjoner er orientert vinkelrett på retningen kraften virker (Vestøl, Elastisk deformasjon av tre). Dette kom tydelig frem for prøvene med endetrykk og trykk fra begge sider.



Figur 118 Aktive og passive deformasjoner på prøvestykke E101.



Figur 119 Aktive og passive deformasjoner på prøvestykke E101.

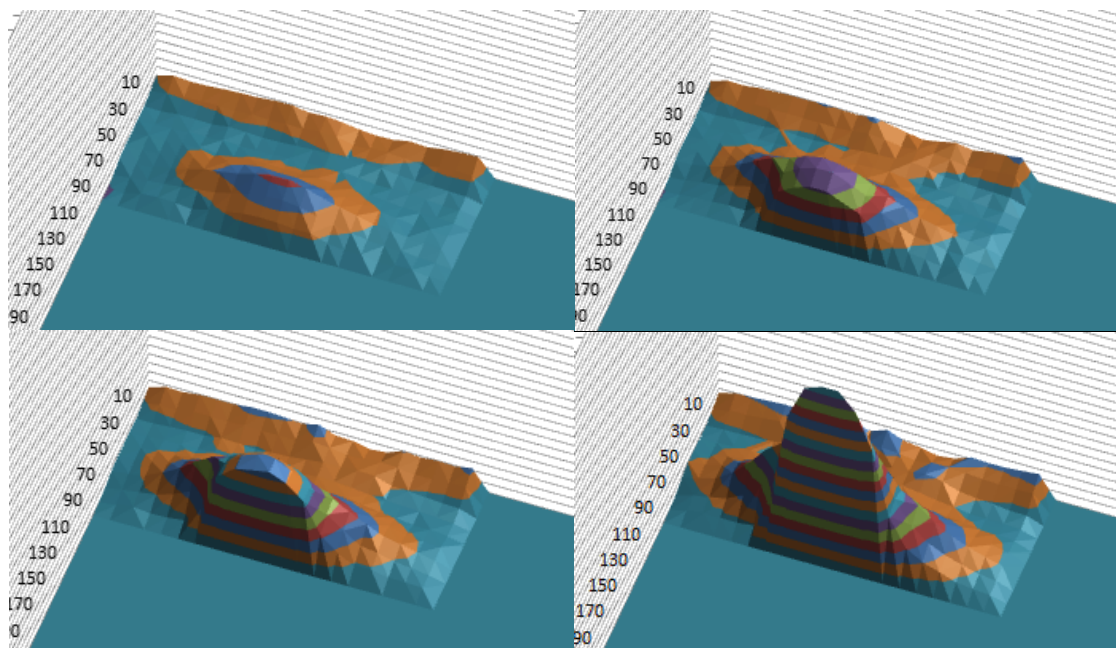
Tøyning - B – serien

Samtlige prøvestykker har en lengde på 980 mm med full understøttelse. Det forventes variasjoner på de forskjellige tilfellene. Bredden på trykkplaten vil tenkelig få innvirkning på spredningen og selve konsentrasjonen av lasten. Prøvestykker med rotasjon vil trolig få tøyningstopper med høye spenningskonsentrasjoner ved mye rotasjon under testingen. Siden hele høyden på prøvene er analysert forventes det at det registreres små tøyninger i nedre del hvor prøvestykket presses mot det kontinuerlige underlaget. Tøyningene vil øke med økende lastnivå og forventer at det i den laveste svillen med en høyde på 48 mm (B9) oppstår tøyninger i hele prøvestykkets høyde. For prøvestykkene med høyde 405 mm (B10), som er testet som svill med full understøttelse, forventes det kun deformasjoner relativt lokalt under trykkplaten, med små tøyninger i bunnen hvor prøvestykket presses mot den kontinuerlige understøttelsen.

Prøvestykkene er av limtre med lameller på 30 mm tykkelse, det kan forventes at det observeres skille eller overganger mellom de forskjellige lamellene. Dette ble observert under testing i D-, E- og F – seriene hvor det var store deformasjoner på lamellene som direkte ble påvirket av trykkplaten, de andre lamellene var stort sett upåvirket.

I serie B3-B8 ble det benyttet et rutenett på 9*20 prikker, totalt 180 prikker per prøvestykke for fotogrammetrien. I serie B9 ble det benyttet et rutenett på 5*20 prikker, totalt 100 prikker per prøvestykke. I serie B10 ble det benyttet et rutenett på 40*40 prikker, totalt 1600 prikker per prøvestykke.

Serie B3 er svill testet med 48 mm bred trykkplate med skarpkant. Skarp kant ser ut til å ha liten innvirkning på tøyningene i prøvestykket.



Figur 120 Her ser vi tydelig at det registreres små tøyninger på baksiden av prøvestykket hvor det presses mot underlaget. Vi ser også tydelig hvordan tøyningene utvider og fordeler seg ved økende belastning.

Tøyning – D – serien

I serie D1 er det testet limtre med 3 lameller med lastpåvirkning fra 2 begge sider, med samme bredde på trykkplaten over og under. Det er aktuelt å se om tøyingsfordelingene fra hver side går inn i hverandre eller hvordan tøyingsfordelingen utvikler seg. Her ble det benyttet et rutenett på 9*20 prikker, totalt 180 prikker per prøvestykke for fotogrammetrien.

Tøyning – E – serien

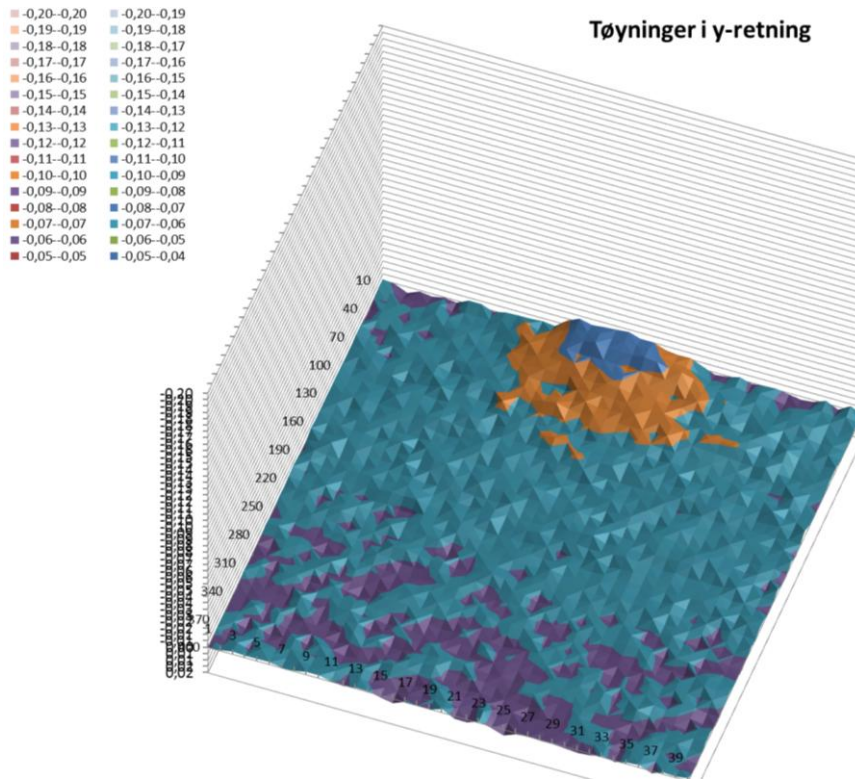
I serie E1 er det testet med nesten samme prosedyre som i serie D1, forskjellen er at i dette tilfellet er testingen utført mot enden av prøvestykket. Her ble det benyttet et rutenett på 9*20 prikker, totalt 180 prikker per prøvestykke for fotogrammetrien.

Tøyning – F – serien

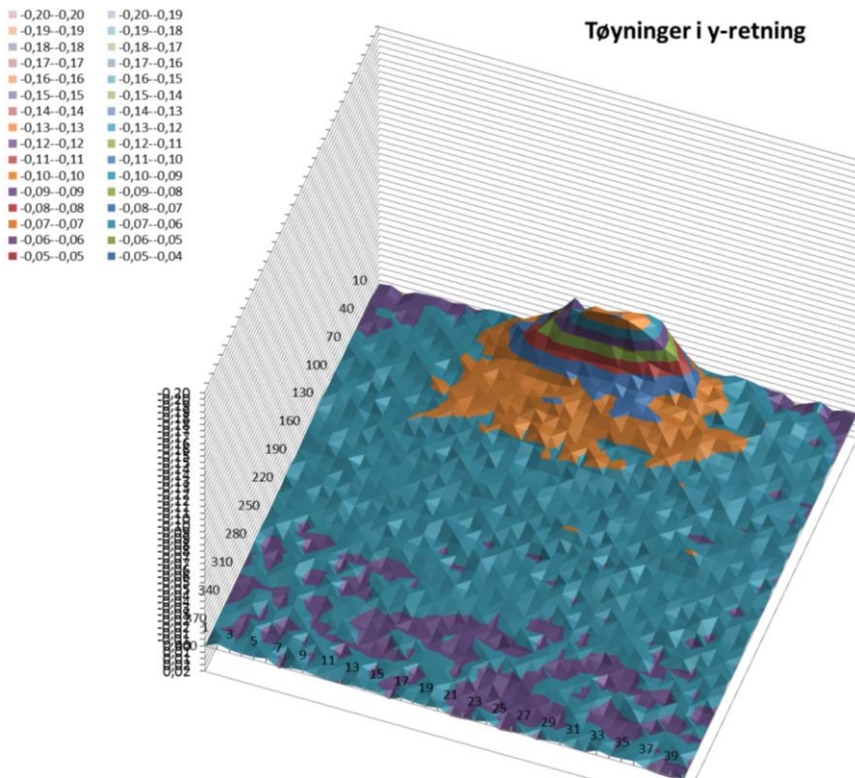
Vi har utført to serier (F2 og F3) under testing av dette tilfellet med svill hvor lasten virker på enden. Variasjonen mellom F2 og F3 er om det er skarp kant eller avrundet kant på trykkplaten, bredden er den samme med 48 mm. I begge serier ble det benyttet et rutenett på 9*20 prikker, totalt 180 prikker per prøvestykke for fotogrammetrien.

Tøyning – G – serien

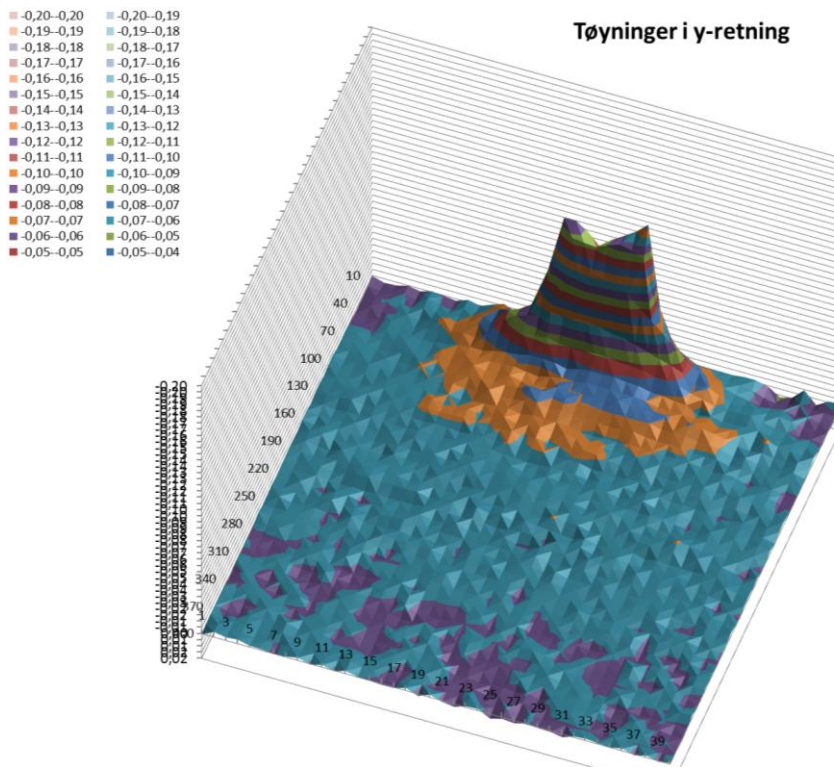
Vi har to serier, G3 med 48*198 mm heltre C24/C30 og G4 med 90*405 mm L40C limtre. Samtlige prøvestykker har en lengde på 1480 mm lagt opp som en fritt opplagt bjelke. I serie G3 ble det benyttet et rutenett på 19*20 prikker, totalt 380 prikker per prøvestykke for fotogrammetrien. I serie G4 ble det benyttet et rutenett på 40*40 prikker, totalt 1600 prikker per prøvestykke. Det forventes variasjoner på de forskjellige tilfellene. Bredden på trykkplaten vil tenkelig få innvirkning på spredningen og selve konsentrasjonen av lasten. Siden hele høyden på prøvene er analysert forventes det at det registreres små tøyninger i underkant av bjelken hvor det vil oppstå strekk. Tøyningene vil øke med økende belastning.



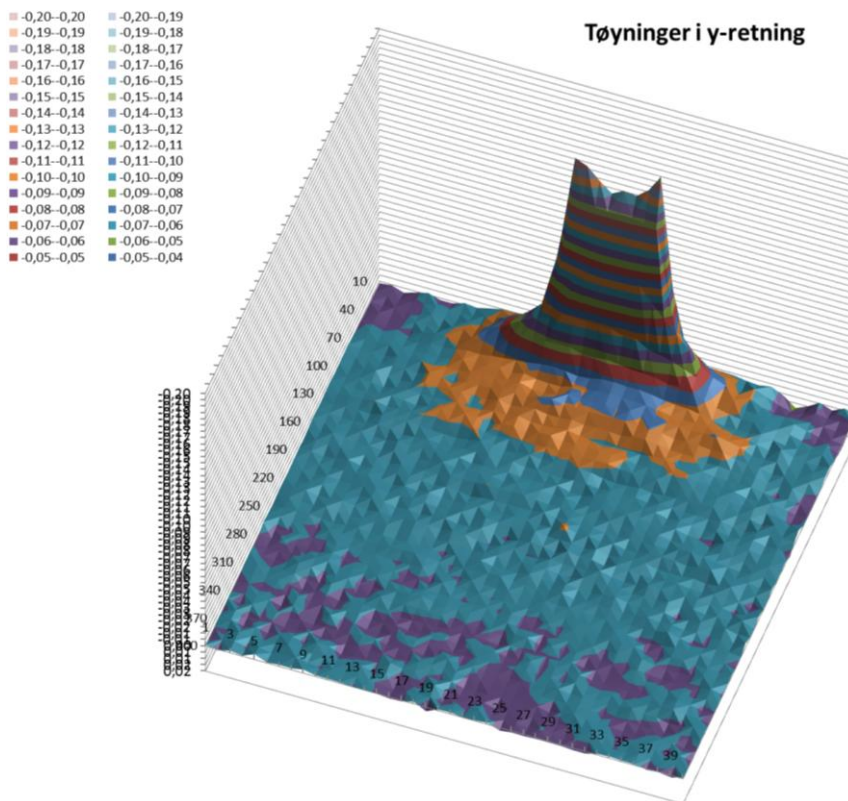
Figur 121 Her ser vi prøveestykke G401 i et tidlig stadi av pålastingen. Vi ser hvor trykkplaten trykker i området med orange og blå farge. Vi ser også noen små tøyninger i underkant av bjelken grunnet strekkpåkjenning.



Figur 122 Her har belastningen økt noe mer og vi ser at tøyningene i området rundt trykkplaten har økt, men vi ser samtidig at tøyningen opptrer lokalt. Vi ser små tøyninger øverst i hvert hjørne og det kan komme av hengekøyeeffekten men i dette tilfellet er det



Figur 123 Her ser vi at situasjonen er mye den samme som i forrige graf, men tøyningene ved trykkplaten har økt ytterligere.



Figur 124 Her ser vi at tøyningene rundt trykkplaten har økt igjen, vi ser også at det er større tøyninger ut mot kantene av trykkplaten enn det det er midt under.

Vi har ikke fått analysert flere resultater fra fotogrammetrien da det ikke eksisterer gode programmer for å analysere resultatene. Det finnes et program som har blitt brukt tidligere, men dette klarer ikke å håndtere de enorme datamengdene fra vår testing. Vi har av denne grunn utsatt masteroppgaven i påvente av et analyseverktøy som må lages, og i skrivende stund har det gått nesten 3 uker siden den opprinnlig fristen for oppgaven gikk ut og vi har fortsatt ikke fått noe program vi kan bruke. Vi har nå ingen mulighet til å vente lenger men håper dataene vi har samlet inn kan benyttes senere og at vi da kan få ut noen gode resultater.

4.2.18 Vurdering av k-stivheten

Figur 125 viser en tabell over gjennomsnittlige verdier for k - stivheten Alvdig Hardeng kom frem til i sin masteroppgave våren 2011. Samme tabell er gjengitt i teoridelen i punkt 2.6.5.

Ved sammenligning av B – seriene ser man at k – stivheten ligger noe høyere i seriene gjennomført i løpet av våren 2012. Mulige forklaringer kan være selve testmetoden med oppsettet, lengden på prøvestykkene og en annen type trykkplate enn hva som ble benyttet under testing våren 2011. Kalibreringskurven som er benyttet kan også føre til noe høyere verdier. Kalibreringskurven er beregnet ved å finne deformasjonene i testmaskinen med kalibreringsprøvestykker og trekke fra differansen på de aktuelle prøvestykkene.

Verdier for k - stivhet						
Tilfelle	A1	B1	B2	G1	G2	F1
Hardeng 2011	2,736	4,995	4,821	4,564	3,982	1,444

Figur 125 K - Stivhet Hardeng 2011.

Etter en statistisk analyse sammenstilte Hardeng k-stivheten for prøvene fra B- og G-seriene og fant et uttrykk som kunne benyttes for kontroll i bruksgrensetilstanden (Formel 20). Med en gjennomsnittlig verdi for serie B og G på $4,59 \text{ N/mm}^3$.

Verdier for k - stivhet								
Tilfelle	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
Moseng & Hagle 2012	5,443	5,630	5,694	5,794	5,926	5,103	5,899	3,934

Figur 126 K - stivhet, fra B - serien.

Ved å sammenligne resultatene fra testingen våren 2012 kan man se at verdiene for G3 og G4 ligger noe lavere enn for Hardengs resultater. Årsakene kan være flere, men selve oppsettet og metoden benyttet under testing kan være noe forskjellig fra det Hardeng benyttet, så resultatene er ikke direkte sammenlignbare. Ved å benytte gjennomsnitt for prøver fra serie B3 til B10 og fra serie G3 og G4 får man en gjennomsnittlig k – stivhet på $4,83 \text{ N/mm}^3$, som er en noe høyere verdi enn hva Hardeng kom frem til.

Verdier for k - stivhet					
Tilfelle	E1	F2	F3	G3	G4
Moseng & Hagle 2012	5,807	5,838	4,685	2,409	2,465

Figur 127 K - stivhet fra de øvrige seriene.

Instituttet for Matematiske realfag og Teknologi

Ser man på k-stivheten for prøvestykkene i serie E1, F2 og F3 er resultatene noe uventet. K-stivheten er høyere enn det man kunne forvente. Årsaken kan være selve metoden som er benyttet under testing. Ved å sammenligne for serie F2 og F3 med serie F1 fra Hardeng, er det verdier som er meget forskjellig.

For verdier fra serie E1 er k – stivheten noenlunde lik verdien til k – stivheten til F2. Begge tilfellene har trykk på ende, E1 har trykk fra begge sider. Under testing ble det observert varierende inntrykning av lamellene i serie E1. Det kan forklares ved at k – stivheten blir relativt lik på grunn av at inntrykningen oppstår på siden av limtresvillen hvor er lavest i E1 – serien. Verdiene fra serie D1 er ikke tatt med da de var unormalt høye.

Setter man for eksempel på et typisk trykkspenningsnivå på $3,5 \text{ N/mm}^2$ får man ved bruk av Hardengs formel for beregning i bruksgrensetilstanden:

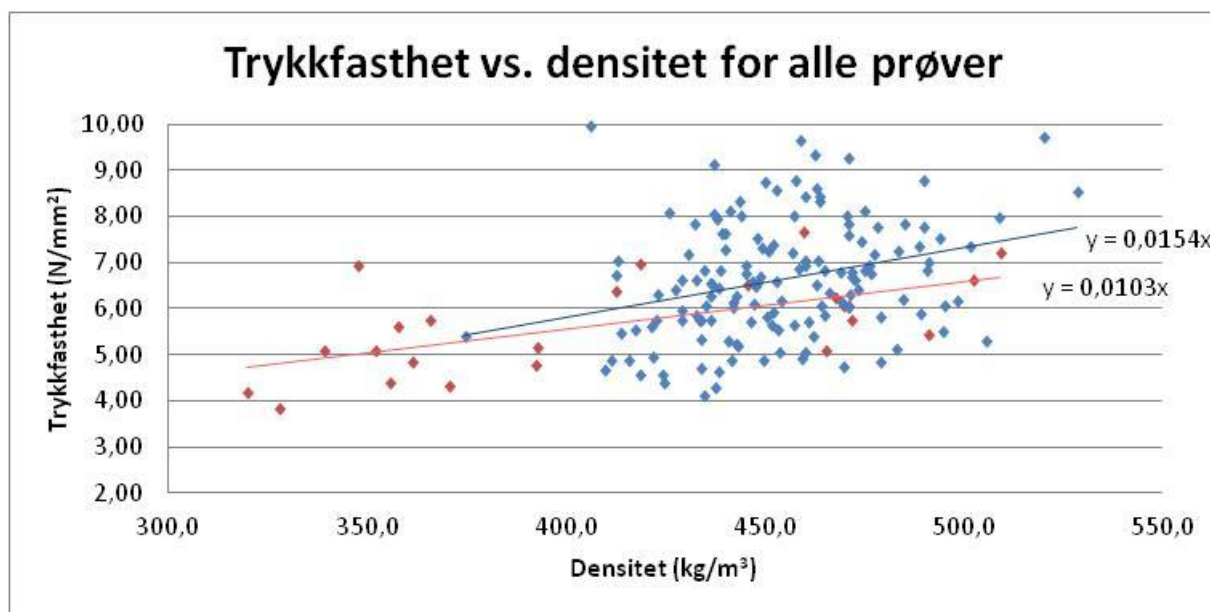
Formel 25

$$u = \frac{\sigma}{4,71}$$

Ved å benytte gjennomsnittlig verdi for k – stivheten for sviller og bjelker med last midt på fra B1 til B10 og G1 til G4, oppnår man en inntrykning på 0,74 mm.

4.2.19 Trykkfastheten i forhold til densitet og fuktighet

Det er kjent at trykkfastheten øker ved økende densitet. Forholdet mellom trykkfastheten og densitet for heltre og er illustrert i Figur 128. En lineær trendlinje viser forholdet mellom densitet og trykkfasthet for både heltre og limtre. Den bekrefter allerede kjent teori. Det totale antall prøver er 166 prøver, hvor 25 prøver er av heltre og vises med rød indikator. For enkelte av prøvene oppstod det feilmålinger enten av volumet eller under testing, prøvene ble dermed utelatt for videre analyse. Prøvene fra H-serien er også utelatt.

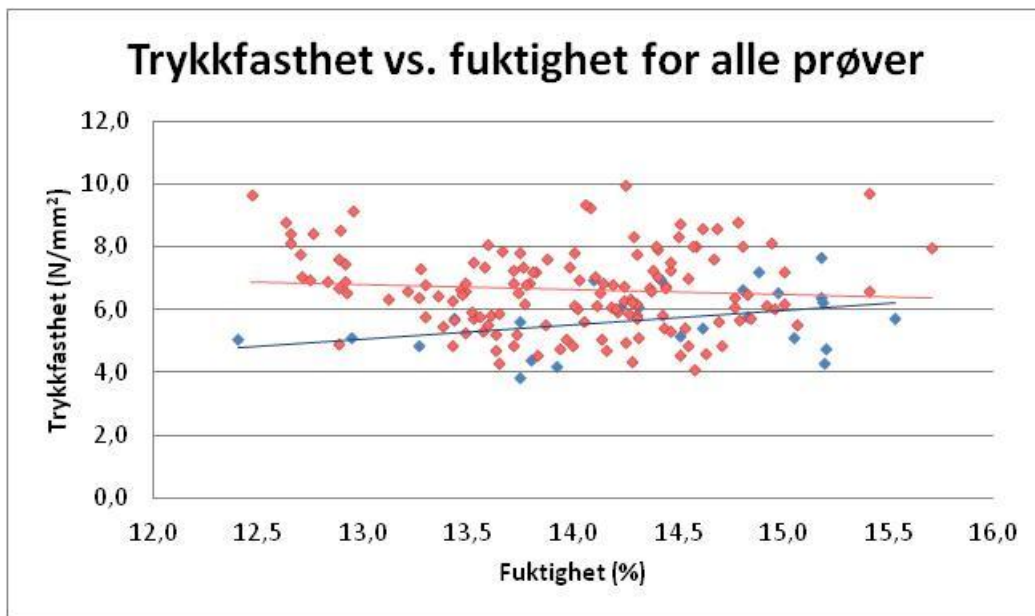


Figur 128 Forholdet mellom trykkfasthet og densitet.

Trendlinjen viser for limtre en tendens som tilsvare tidligere forhold mellom trykkfastheten og densiteten for testing i henhold til EN 384: 1995. Hvor $f_{c,90,k}$ ble beregnet ved $0,015 \cdot \rho_k$ (karakteristisk densitet). Dette ble påpekt av Gehri og i artikkelen til Damkilde. Hvor de benytter samme metode, men da testing over hele prøvestykkets overflate ("Block-test") og Damkilde anbefaler en verdi på $0,006 \cdot \rho_k$. I diagrammet har vi benyttet verdier fra alle prøvestykkene og har ikke tatt hensyn til skille mellom hvilken måte lasten blir påført. For heltre er antallet prøver 25 og antallet er noe lavt til å kunne gi god signifikans. Det er stor variasjon for densiteten på heltre, men det er en viss tendens på trendlinjen som antatt.

Testingen er ikke gjennomført på små, feilfrie prøvestykker hvor man tar hensyn til hvilken retning kraften blir påført i forhold til orienteringen til åringene. Prøvestykkene har store feil og forstyrrelser som påvirker trykkfastheten, blant annet kvist som kan medføre meget høye verdier for trykkfastheten, viser seg på prøver med trykkfasthet opp mot 10 N/mm^2 .

I teorien vil økt fuktinnhold medføre en lavere trykkfasthet, vel å merke i området under fibermetningspunktet. I Figur 129 er forholdet mellom trykkfasthet og fuktigheten illustrert, ut fra trendlinjen er det en liten tendens som bekrefter teorien for prøvene i limtre (rød indikator). For prøvene av heltre er det motsatt og stemmer ikke i forhold til teorien (blå indikator). Årsaken kan igjen forklares av at det ikke er benyttet feilfrie prøvestykker og at 25 prøvestykker er for lite til å kunne oppnå god nok signifikans.



Figur 129 Forholdet mellom trykkfasthet og fuktighet.

5 Konklusjon

5.1 Konklusjon

Under arbeidet med denne oppgaven har vi tilegnet oss mye kunnskap om trevirke som materiale generelt. Vi har lært mye om å arbeide i et laboratorium og analyse av resultater. Vi har sett mulighetene ved fotogrammetri og hvilket stort potensiale dette har som et analyseverktøy i fremtidig testing.

Resultatene fra forsøkene utført i laboratorium og bildeanalysen viser tydelig at tøyning for svill og bjelke opptrer lokalt. Ved testing er det observert at forskjellen mellom trykkplater med avrundet eller skarp kant gir liten variasjon på trykkfastheten både ved testing av prøvestykker midt på og mot ende. Trykkfastheten i forhold til trykkplate med eller uten rotasjon gir ingen nevneverdig forskjell. Dette gjelder både ved 48 mm og 90 mm bredde på trykkplatene.

Forskjell i bredde på trykkplaten har innvirkning på trykkfastheten. Ved å halvere bredden på trykkplaten, halveres ikke trykkfastheten. Dette har med bidraget fra de nærliggende trefibrene til trykkplaten samt randeffekter.

De få resultatene fra bildeanalysen viser også at området med tøyning varierer med høyden på prøvestykket men det er ikke en direkte sammenheng mellom høyden på prøvestykket og størrelsen på området som er utsatt for tøyning. I en lav svill kan effekten påvirke hele høyden av svillen og derfor en større relativ del av høyden enn for en høy bjelke eller svill hvor kun en del av høyden er påvirket. Resultatene viser også at spredningsvinkelen i trevirket er større enn det man har antatt tidligere og en større spredningsvinkel gir et større areal eller volum av trevirket som trykket fordeler seg på.

De nye selvklebende prikkene i ferdigproduserte rutenett har gjort selve påføringen av prikkene lettere og mer nøyaktig samtidig som resultatet ble meget bra. Det var lett for analyseprogrammet å finne prikkene samt at ingen av prikkene falt av under testing. Metoden kan trygt anbefales videre.

Vi ser av forsøkene i laboratoriet og den etterfølgende bildeanalysen at inntrykningen i prøvestykkene, både for svill og bjelker fører til knusning av fibrene i nærheten av trykkplaten. Fiberknusningen øker ved økende lastnivå, denne fiberknusningen fører til retningsendring av fibrene i nærheten av trykkplaten. Dette gir sitt opphav til hengekøyeeffekten som gjør at bæreevnen til trevirket vil øke ved økende lastnivå såfremt det er nok urørt virke i nærheten av trykkplaten. Prøvene med belastning mot ende vil få redusert hengekøyeeffekt da disse prøvestykkene kun får denne effekten på den ene siden av trykkplaten.

Resultater fra fukt- og densitetsprøver viser sammenhengen mellom trykkfastheten og bekrefter kjent teori ved at trykkfastheten øker med økende densitet og trykkfastheten øker ved avtagende trefuktighet under fibermetningspunktet for materialer i limtre.

Ved å sammenligne helningen i det lineære området (k -stivheten) ser vi at prøveoppsett med sviller med belastning midt på gir relativt konstante verdier. K – stivheten får noe høyere verdier en hva som ble beregnet av Hardeng våren 2011.

5.2 Forslag til videre arbeid og utvikling av forsøkene

Det vil være interessant med flere labforsøk med flere prøvestykker for å kunne få et større statistisk grunnlag innenfor hver serie. En større naturlig variasjon i densitet vil være å foretrekke men dette er vanskelig å kontrollere, og særlig med limtre da dette bestilles fra fabrikk uten mulighet til å styre kvaliteten.

Det er veldig viktig å få på plass gode analyseprogrammer for dataene som samles inn ved bruk av fotogrammetri så man får glede av dem. Det er enorme datamengder som skal behandles og det krever gode programmer og maskiner. Vi har samlet inn ca 6 TB med bilder som skal behandles og det sier seg selv at dette krever et godt analyseprogram.

Det kunne være interessant ved 3D analyse av bildene å hatt et sett til med kameraer bak prøvestykket også for å få med seg alle tøyninger og bevegelser som forekommer under testing. Det er viktig å bruke nok deformasjonsmålere og testingen kunne med fordel vært gjort på trelaben på UMB. Det er nok en mer nøyaktig maskin og det er flere deformasjonsmålere tilgjengelig der. Ulempen med testmaskinen på UMB er de to søylene som vil gjøre fotogrammetrien vanskeligere, men dette er sikkert mulig å finne en løsning på.

Vi fikk veldig godt resultat med prikkene skåret ut av vinylfolie, men dette er en relativt kostbar prosess. Hvis denne metoden skal brukes i fremtiden bør det vurderes innkjøp av en printer som kan skjære i folie og gjøre dette selv. Printeren i selv selv er ikke spesielt dyr. Et annet alternativ vi ikke fikk prøvd ut er å printe rett på prøvestykkene, det kan gi et bra resultat og grunningen og påføringen av prikkene går i en operasjon. Dette er imidlertid en meget kostbar printer så her vil det nok lønne seg å få jobben gjort eksternt.

Setter opp punktvis hvilke tiltak som kan gjennomføres for å gjøre fotogrammetri enklere og bedre:

- Burde hatt flere lys som også kunne monteres på kamerastativ eller lignende for enkel flytting og justering av høyden
- Platen med kameraene burde hatt en bedre måte å finjustere på, for eksempel skruer med hjul man kan skru på.
- Finne en bedre måte å måle seg til at kameraene står vinkelrett på prøvestykket, eventuelt at senter mellom kameraene står vinkelrett på prøvestykket når man bruker to kameraer.
- De små kameraene kunne godt hatt en dâselibell på hvert kamera for enkel justering/nivellering.

Setter opp punktvis hva som fungerte bra under fotogrammetrien:

- Prikkene skåret ut av matt sort selvklebende folie fungerte meget godt.
- Etter at vi demonterte de eksterne harddiskene og satte disken rett i datamaskinen fungerte det bra, før det fylte vi opp disken med bilder fortere enn vi klarte å skrive det til de eksterne harddiskene.

Viktig å stille inn programmet så det ikke tar 14 bilder i sekundet med hvert kamera før de sendes til datamaskinen. Datamaskinen velger da ut hvilke 5 bilder fra hvert kamera som blir brukt, vel og merke hvis det er 5 bilder i sekundet man ønsker. Men på sikt må det fikses sånn at man kan kjøre på full hastighet og vi kunne også trengt å kjøre med 4 kameraer samtidig for å kunne få 3D måling på to steder samtidig. Dette gjaldt for vår del serie H1 hvor vi så på oppleggene og ikke der vi påførte belastningen. Dette er også aktuelt hvis man ønsker å ta fotogrammetri av begge sider av et prøvestykke under testing.

Bra å feste en liten merkelapp med prøvenummeret rett ved siden av prikkene så den blir med på alle bildene, da er det ingen tvil om hvilken prøvestykke hvert bilde hører til hvis det skulle bli noe tull med lagringen. Vi benyttet en vanlig labelmarker med 6 mm høyde på lappene og hvit bakgrunn. Disse lappene ble litt blanke så de fikk refleksjon og det var vanskelig å lese nummeret. Vi tok derfor en stripe med Scotch magic tape som er matt over merkelappen og dette løste problemet.

Det kan oppstå problemer med bildeanalysen ved at analyseverktøyet tolker merkelappen for nummerering som prikker, en tilstrekkelig avstand (20mm) til prikkene må vurderes for å unngå at merkelappen tolkes som prikker.

Under hele oppgaven har vi erfart at man aldri kan ta ting for gitt og at man aldri kan kontrollsjekke mange nok ganger. Det er viktig med god oppfølging gjennom hele oppgaven, men særlig ved oppsett av prøveplan og oppstart av testing. En rekke "barnesykdommer" kan oppdages og rettes i en tidlig fase av testingen.

6 Referanser

- Andersen, Ø. (1999). *Orientering i stereoinstrument*. Institutt for kartfag, NLH.
- ASTM International. (2009). *ASTM-D143; Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*. ASTM International.
- Aune, P. (1992). *Trekonstruksjoner, Del 1*. Trondheim: Tapir forlag.
- Blass, H. J., & Görlacher, R. (2004). *Compression perpendicular to the grain*. World Conference on Timber Engineering, Finland.
- Bovim, N.-I. (2011). *Forelesninger UMB - TBA 290 - Trekonstruksjonsteknikk*.
- Bovim, N.-I. (2011). *Forelesninger UMB - TBA 320 - Konstruksjonsteknikk III*.
- Bovim, N.-I. (2012). *Veiledningsmøte UMB*.
- Damkilde, L., Hoffmeyer, P., & Pedersen, T. N. (1998). *Compression strenght perpendicular to grain of structural timber and glulam*.
- Eide, S., Nore, K., & Aasheim, E. (2011). *Compression perpendicular to the grain - the Norwegian approach*, CIB - W18 / 44 Alghero, Italy. Norsk Treteknisk Institutt.
- Foslie, M. (1998). *Sortererhåndboka*. Oslo: Norsk Treteknisk Institutt.
- Gehri, E. (1997). *Timber in compression perpendicular to the grain*.
- Hardeng, A. (2011). *Bæreevne for punktlast av bjelker og svill under trykk tvers på fiber*. Masteroppgave. Universitetet for Miljø- og Biovitenskap.
- Jorissen, A., Leijten, A., & de Leijer, B. (2010). *The bearing strenght of timber beams on discrete supports*. Nelson, New Zealand: CIB-W18/43-6-1.
- Kollmann, F. F., & Côté, W. A. *Principles of Wood Scienes and Technology*. Springer.
- Kucera, B. (1992). *Skandinaviske normer for testing av små feilfrie prøver av heltre*. Norwegian Forest Research Intitute.
- Kucera, B. (1998). *Treets oppbygning og vedanatomi*. Ås: Norsk institutt for skogforskning.
- Larsen, H. J., Leijten, A. J., & Van der Put, T. A. (2008). *The Design Rules in Eurocode 5 for Compression Perpendicular to the Grain - Continius and semi continius supported Bbeams*. St. Andrews, Canada: CIB-W18/41-6-3.
- Leijten, A. (2011, April). Proposal to replace EN 1995-1-1: 6.1.5 Compression perpendicular to grain.
- Leijten, A., Franke, S., Quenneville, P., & Gupta, R. (2012, Feb.). Bearing Strength Capacity of Continius Supported Timber Beams: Unified Approach for Test Methods and Structural Design Codes. *Journal of Structural Engineering / Volume 138 / 266-273*.

- Leijten, A., Larsen, H., & Van der Put, T. (2010). Structural design for compression strength perpendicular to the grain of timber beams. *Construction and Building Materials* 24. , ss. 252-257.
- Madsen, B., Leijten, A., Gehri, E., Mischler, A., & Jorissen, A. (2000). *Behaviour of Timber Connections*. Vancouver, Canada.
- Norsk Standard. (1999). *NS 3470-1. Prosjektering av trekonstruksjoner. Beregnings- og konstruksjonsregler. Del 1: Allmenne regler.*
- Norsk Standard. (1999). *NS-EN 1194:1999 Trekonstruksjoner - Limtre - Fasthetsklasser og bestemmelse av karakteristiske verdier.*
- Norsk Standard. (2010). *NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:2010. Eurocode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger.*
- Norsk Standard. (2009). *NS-EN 338: 2009. Konstruksjonstrevirke - Fasthetsklasser.*
- Norsk Standard. (2010). *NS-EN 408:2010. Trekonstruksjoner. Konstruksjonstre og limtre. Bestemmelse av noen fysiske og mekaniske egenskaper.*
- Riberholt, H. (2000). *Compression perpendicular to the grain of wood. Documentation of the strength. Cowi-report August 2000.*
- SolidWorks. (2011). SolidWorks 2011 x64 SP2.
- Thelandersson, S., & Mårtensson, A. (1997). *Design Principles for Timber in Compression Perpendicular to the Grain, CIB-W18/30-20-1, Vancouver, Canada.*
- Treteknisk. (2009). *Treteknisk Håndbok*. Norsk Treteknisk institutt.
- Van der Put, T. (2008). *Derivation of the bearing strenght perpendicular to the grain of locally loaded timber blocks .Holz Roh Werkst 66: 409-417.*
- Vestøl, G. *Elastisk deformasjon av tre*. UMB, Institutt for naturforvaltning.
- Vestøl, G., & Høibø, O. A. (2011). *Forelesninger UMB - TRE 200 - Treteknologi I.*
- Vestøl, G., & Høibø, O. A. (2011). *Forelesninger UMB - TRE 300 - Treteknologi.*



7 Vedlegg

7.1 Skriftlige vedlegg

Vedlegg A - Forsøksplan

Vedlegg B - Sammenligning av resultater

7.2 Elektroniske vedlegg

Vedlegg A - Forsøksplan

Vedlegg B - Sammenligning av resultater

Vedlegg C - Densitetsprøver

Vedlegg D - Data fra testmaskinene

Vedlegg E - Data fra fotogrammetri

Vedlegg F - Resultater ved testing

Vedlegg G - Spenning def analyse

Vedlegg H - Bilder

Vedlegg I - Tegninger

Vedlegg J - PDF - versjon av masteroppgaven

Vedlegg A – Forsøksplan

Hensikt: Med utgangspunkt i tidligere utførte tester ønsker man å gjøre forsøk med større prøvestykker for å kunne dokumentere hvilken spredningsvinkel og spredningsfordeling trykk tvers på fiber har i testsituasjoner som best mulig beskriver det faktiske forhold trevirke blir utsatt for i konstruksjoner i Norge. Størrelsen på prøvestykkene er valgt for å være sikre på at man unngår oppsprekking mot endene som er tegn på at trevirkets kapasitet får bidrag fra trevirke langt unna den faktiske belastningen. Det vil bli benyttet fotogrammetri på samtlige prøver.

Forsøksplanen følger det kartesiske aksesystem der x-aksen følger trefibrenes lengderetning, y-aksen følger tangenten til årringene og z-aksen går radielt ut fra senter av tverrsnittet.

Materialer:

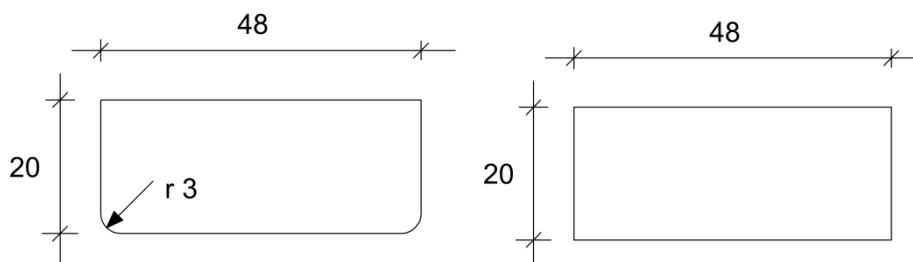
- Heltre og limtre. Bruker kvalitet C24 og C30 for heltre for å få god variasjon i densiteten og L40C for limtre.
- Forsøksrigg for bjelker og for sviller. Testet blir utført i laboratoriet til NTI (Norsk Treteknisk Institutt).
- Databehandlingsprogram for analyse og etterarbeid.
- Primer/maling for grunning av trematerialer for fotogrammetri
- Ferdig utskårete prikker av vinylfolie.
- Merkemateriell
- 4 stillbildekameraer.
- Lyskilder for fotogrammetri.
- Bildeanalyseprogram (Tordivel Scorpion 8) for behandling av bildene.

Utførelse:

- Testene kjøres lenge for å kunne få store nok deformasjoner, for så å kunne sette bruddkriteriene i etterkant.
- Fiberretningen følger lengderetningen og prøvestykkene testes med liggende lameller (bredden tilsvarer radiell retning).
- Det blir tatt bilder med to kameraer av gangen og 5 bilder i sekundet med hvert kamera under testingen.

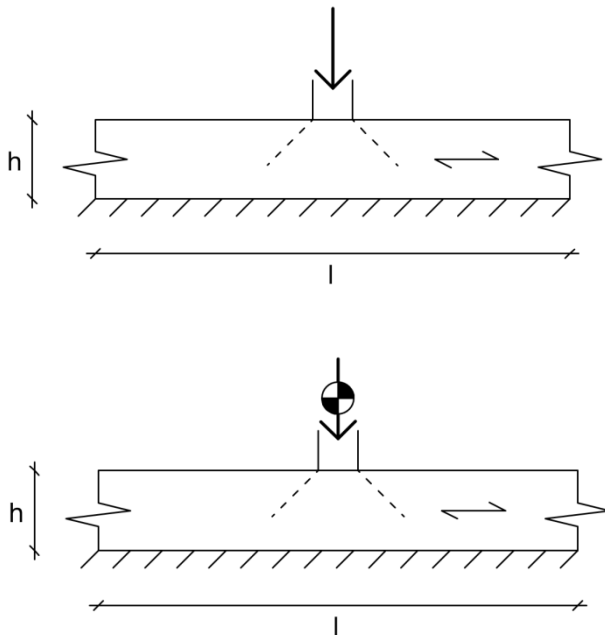
Trykkplater:

Samtlige trykkplater har en lengde på 200mm, tykkelse på 20mm og med bredder på 48mm eller 90mm. De har enten skarp eller avrundet kant med en radius på 3mm.



Figurer:

- Mål er i mm
- Kraftutbredelsen er stiplet og vinkelen er antatt.

B – Ensidig trykk midt på, full understøttelse. Med og uten rotasjon.

- B3: Trykkplate: $b = 48$, skarp kant
Antall prøver: 10
- B4: Trykkplate: $b = 48$, avrundet kant
Antall prøver: 15
- B5: Trykkplate: $b = 90$, avrundet kant
Antall prøver: 10
- B6: Trykkplate: $b = 48$, avrundet kant med rotasjon
Antall prøver: 10
- B7: Trykkplate: $b = 90$, avrundet kant med rotasjon
Antall prøver: 10

B3-B7:

Limtre L40C

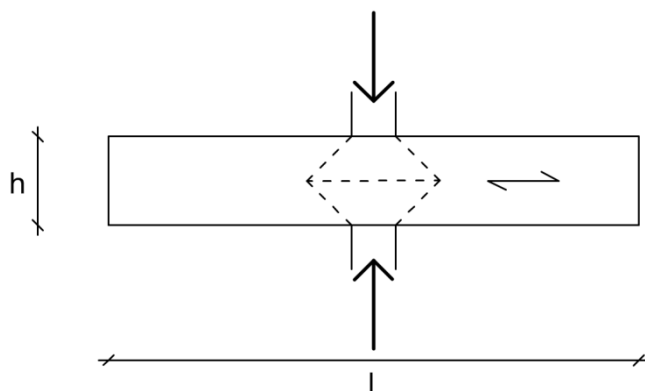
 $b = 90$ $h = 90$ $l_{\text{tot}} = 980$

- B8: Trykkplate: $b = 48$, avrundet kant
Limtre L40C
 $b = 45$ (90x90 limtre halv bredde)
 $h = 90$
 $l_{\text{tot}} = 980$
Antall prøver: 10

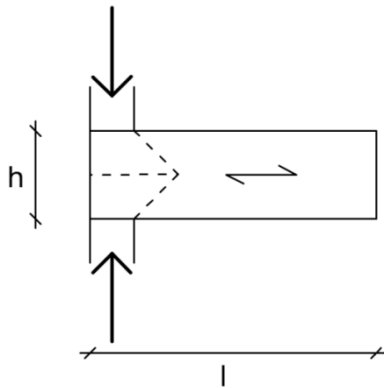
B9: Trykkplate: $b = 48$, avrundet kant
 Heltre C24/C30
 $b = 90$
 $h = 48$
 $I_{\text{tot}} = 980$
 Antall prøver: 10

B10: Trykkplate: $b = 90$, avrundet kant
 Limtre L40C
 $b = 90$
 $h = 405$
 $I_{\text{tot}} = 980$
 Antall prøver: 10

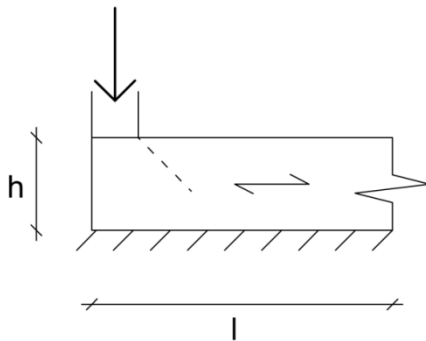
D – Tosidig trykk midt på, ingen understøttelse.



D1: Trykkplate: $b = 48$, avrundet kant
 Limtre L40C
 $b = 90$
 $h = 90$
 $I_{\text{tot}} = 980$
 Antall prøver: 12

E – Tosidig trykk mot ende, ingen understøttelse.

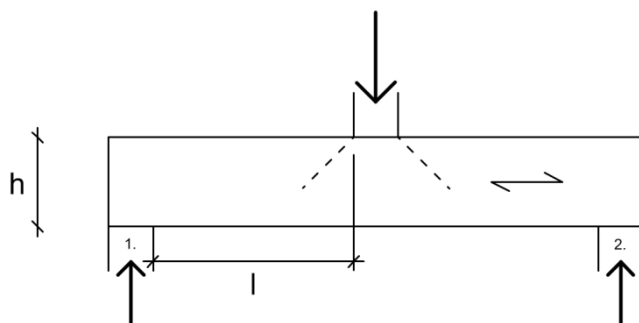
- E1: Trykkplate: $b = 48$, avrundet kant
Limtre L40C
 $b = 90$
 $h = 90$
 $I_{\text{tot}} = 980$
Antall prøver: 14

F – Ensidig trykk mot ende, full understøttelse.

- F2: Trykkplate: $b = 48$, skarp kant
Antall prøver: 15
F3: Trykkplate: $b = 48$, avrundet kant
Antall prøver: 15

F2-F3:
Limtre L40C
 $b = 90$
 $h = 90$
 $I_{\text{tot}} = 980$

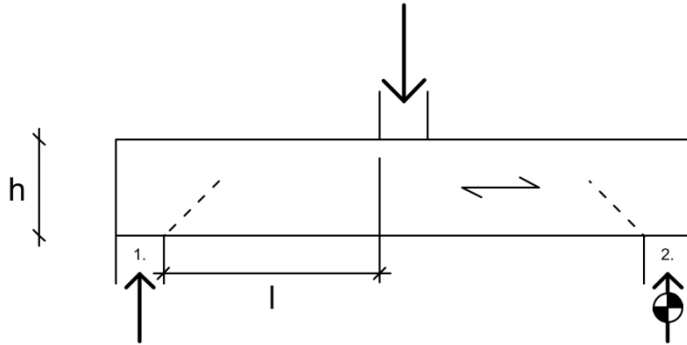
G- Bjelke: Opplagt som en "fritt opplagt bjelke".



G3: Trykkplate: $b = 48$, avrundet kant
 Heltre C24/C30
 $b = 48$
 $h = 198$
 $l = 376$
 $I_{\text{tot}} = 980$
 $c/c = 890$
 Antall prøver: 15

G4: Trykkplate: $b = 90$, avrundet kant
 Limtre L40C
 $b = 90$
 $h = 405$
 $l = 605$
 $I_{\text{tot}} = 1480$
 $c/c = 1330$
 Antall prøver: 15

H- Bjelke: Opplagt som en "fritt opplagt bjelke". (ser her på oppleggene)



- H1: Trykkplate: $b = 90$, avrundet kant med og uten rotasjon
 Limtre L40C
 $b = 90$
 $h = 405$
 $l = 605$
 $l_{tot} = 1480$
 $c/c = 1390$
 Antall prøver: 15

Prøveoppsett master Morten og David 2012

Prøvestykke	Trykkplate(r)		Kant		Trykkplate		Antall prøver	Lengde per prøve [mm]	Total lengde [m]				
	b [mm]	l [mm]	Skarp	Avrundet	Rotasjon	Fast			Heltre 48x90	heltre 48x198	limtre 90x405	limtre 90x90	Limtre 45x90
B3	48	200	X			X	10	1000					10
B4	48	200		X		X	15	1000					15
B5	90	200		X		X	10	1000					10
B6	48	200		X	X		10	1000					10
B7	90	200		X	X		10	1000					10
B8	48	200		X		X	10	1000					10
B9	48	200		X		X	10	1000	10				
B10	90	200		X		X	10	1000			10		
D1	48	200		X		X	15	1000					15
E1	48	200		X		X	15	1000					15
F2	48	200	X			X	15	1000					15
F3	48	200		X		X	15	1000					15
G3	48	200		X		X	15	1000		15			
G4	90	200		X		X	15	1500			22,5		
H1	90	200		X	X	X	15	1500			22,5		
Sum							190		10	15	55	115	10



Vedlegg B – Sammenligning av resultater

Sammenligning av gjennomsnittlig bruddlast og bruddspenning samt gjennomsnittlig spenning ved 1, 2, 3, 4, 5, 10 og 15 mm deformasjon for alle serier. Alle verdier er regnet ut ved å ta horisontal serie delt på vertikal serie. Verdiene er i prosent men er ikke ganget opp med 100 så 1,92 betyr 192% og 0,52 betyr 52% osv. Det er ikke alle sammenligninger som det er aktuelt eller praktisk mulig å bruke, men vi synes dette er en fin måte å fremstille dataene på da alle mulige kombinasjoner er med og man kan da enkelt bruke de man selv ønsker.

Bruddlast (kraft)																
H/V	Svilletrykk ensidig midt på, L40C										Tosidig trykk midt	Tosidig trykk ende	Ensidig trykk ende		Fritt opplagt bjelke	
	90x90					45x90 høy	90x48 lav	90x405	90x90	90x90	90x90 L40C		48x198	90x405		
	48 skarp	48 rund	90 rund	48 rund	90 rund	48 rund	48 rund	90 rund	48 rund	48 rund	48 skarp	48 rund	48 rund	90 rund		
	rotasjon		Rotasjon													
	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	D1	E1	F2	F3	G3	G4		
B3	1,00	1,04	1,58	1,08	1,59	0,42	0,80	2,13	0,88	0,67	0,82	0,77	0,41	1,83		
B4	0,96	1,00	1,52	1,04	1,54	0,40	0,77	2,06	0,85	0,65	0,79	0,74	0,40	1,76		
B5	0,63	0,66	1,00	0,68	1,01	0,26	0,51	1,35	0,56	0,43	0,52	0,49	0,26	1,16		
B6	0,93	0,96	1,46	1,00	1,48	0,39	0,74	1,98	0,81	0,63	0,76	0,71	0,38	1,69		
B7	0,63	0,65	0,99	0,68	1,00	0,26	0,50	1,34	0,55	0,42	0,51	0,48	0,26	1,15		
B8	2,40	2,49	3,78	2,59	3,82	1,00	1,92	5,11	2,10	1,62	1,96	1,85	0,99	4,38		
B9	1,25	1,30	1,97	1,35	1,99	0,52	1,00	2,67	1,10	0,84	1,02	0,96	0,52	2,29		
B10	0,47	0,49	0,74	0,51	0,75	0,20	0,37	1,00	0,41	0,32	0,38	0,36	0,19	0,86		
D1	1,14	1,18	1,80	1,23	1,82	0,48	0,91	2,43	1,00	0,77	0,93	0,88	0,47	2,08		
E1	1,48	1,54	2,34	1,60	2,36	0,62	1,19	3,16	1,30	1,00	1,21	1,14	0,61	2,71		
F2	1,22	1,27	1,93	1,32	1,94	0,51	0,98	2,60	1,07	0,82	1,00	0,94	0,50	2,23		
F3	1,30	1,35	2,05	1,40	2,07	0,54	1,04	2,77	1,14	0,88	1,06	1,00	0,54	2,37		
G3	2,42	2,52	3,83	2,61	3,86	1,01	1,94	5,17	2,13	1,64	1,99	1,87	1,00	4,43		
G4	0,55	0,57	0,86	0,59	0,87	0,23	0,44	1,17	0,48	0,37	0,45	0,42	0,23	1,00		

Figur 1 Sammenligning av alle verdier i alle serier ved bruddlast.

Bruddspenning																
H/V	Svilletrykk ensidig midt på, L40C										Tosidig trykk midt	Tosidig trykk ende	Ensidig trykk ende		Fritt opplagt bjelke	
	90x90					45x90 høy	90x48 lav	90x405	90x90	90x90	90x90 L40C		48x198	90x405		
	48 skarp	48 rund	90 rund	48 rund	90 rund	48 rund	48 rund	90 rund	48 rund	48 rund	48 skarp	48 rund	48 rund	90 rund		
	rotasjon		Rotasjon													
	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	D1	E1	F2	F3	G3	G4		
B3	1,00	1,04	0,84	1,08	0,85	0,85	0,78	1,12	0,88	0,67	0,82	0,77	0,76	0,96		
B4	0,96	1,00	0,81	1,04	0,82	0,82	0,75	1,08	0,85	0,65	0,79	0,74	0,74	0,93		
B5	1,19	1,23	1,00	1,28	1,01	1,01	0,93	1,33	1,05	0,80	0,97	0,92	0,91	1,14		
B6	0,93	0,96	0,78	1,00	0,79	0,79	0,72	1,04	0,82	0,63	0,76	0,71	0,71	0,89		
B7	1,18	1,22	0,99	1,27	1,00	1,00	0,92	1,32	1,04	0,79	0,96	0,91	0,90	1,14		
B8	1,17	1,22	0,99	1,27	1,00	1,00	0,92	1,31	1,04	0,79	0,96	0,90	0,90	1,13		
B9	1,28	1,33	1,08	1,38	1,09	1,09	1,00	1,43	1,13	0,86	1,05	0,99	0,98	1,23		
B10	0,89	0,93	0,75	0,96	0,76	0,76	0,70	1,00	0,79	0,60	0,73	0,69	0,68	0,86		
D1	1,13	1,17	0,95	1,22	0,96	0,96	0,88	1,27	1,00	0,76	0,93	0,87	0,87	1,09		
E1	1,48	1,54	1,25	1,60	1,26	1,26	1,16	1,66	1,31	1,00	1,21	1,14	1,13	1,43		
F2	1,22	1,27	1,03	1,32	1,04	1,04	0,95	1,37	1,08	0,82	1,00	0,94	0,93	1,18		
F3	1,30	1,35	1,09	1,40	1,10	1,11	1,01	1,45	1,15	0,88	1,06	1,00	0,99	1,25		
G3	1,31	1,36	1,10	1,41	1,11	1,11	1,02	1,46	1,16	0,88	1,07	1,01	1,00	1,26		
G4	1,04	1,08	0,87	1,12	0,88	0,88	0,81	1,16	0,92	0,70	0,85	0,80	0,79	1,00		

Figur 2 Sammenligning av alle verdier i alle serier ved bruddspenning.

Instituttet for Matematiske realfag og Teknologi

Spenning ved 1 mm deformasjon															
H/V	Svilletrykk ensidig midt på, L40C									Tosidig trykk midt	Tosidig trykk ende	Ensidig trykk ende		Fritt opplagt bjelke	
	90x90					45x90 høy	90x48 lav	90x405	90x90	90x90	90x90 L40C		48x198	90x405	
	48 skarp	48 rund	90 rund	48 rund	90 rund	48 rund	48 rund	90 rund	48 rund	48 rund	48 skarp	48 rund	48 rund	90 rund	
			rotasjon	Rotasjon											
	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	D1	E1	F2	F3	G3	G4	
B3	1,00	1,53	1,24	1,74	1,23	1,34	1,40	0,72	1,74	0,35	1,02	0,82	0,92	0,50	
B4	0,65	1,00	0,81	1,13	0,80	0,88	0,92	0,47	1,14	0,23	0,67	0,53	0,60	0,33	
B5	0,81	1,24	1,00	1,41	0,99	1,09	1,14	0,59	1,41	0,29	0,83	0,66	0,75	0,41	
B6	0,58	0,88	0,71	1,00	0,71	0,77	0,81	0,42	1,00	0,20	0,59	0,47	0,53	0,29	
B7	0,81	1,25	1,01	1,41	1,00	1,09	1,14	0,59	1,42	0,29	0,83	0,67	0,75	0,41	
B8	0,74	1,14	0,92	1,29	0,92	1,00	1,05	0,54	1,30	0,26	0,76	0,61	0,69	0,37	
B9	0,71	1,09	0,88	1,24	0,88	0,96	1,00	0,52	1,24	0,25	0,73	0,58	0,66	0,36	
B10	1,38	2,11	1,70	2,40	1,70	1,85	1,94	1,00	2,41	0,49	1,41	1,13	1,27	0,69	
D1	0,57	0,88	0,71	1,00	0,70	0,77	0,80	0,42	1,00	0,20	0,59	0,47	0,53	0,29	
E1	2,82	4,32	3,48	4,90	3,46	3,78	3,96	2,04	4,92	1,00	2,88	2,31	2,60	1,42	
F2	0,98	1,50	1,21	1,70	1,20	1,31	1,37	0,71	1,71	0,35	1,00	0,80	0,90	0,49	
F3	1,22	1,87	1,51	2,12	1,50	1,64	1,71	0,88	2,13	0,43	1,25	1,00	1,12	0,61	
G3	1,09	1,66	1,34	1,89	1,33	1,46	1,52	0,79	1,89	0,39	1,11	0,89	1,00	0,55	
G4	1,99	3,05	2,46	3,46	2,44	2,67	2,79	1,44	3,47	0,71	2,03	1,63	1,83	1,00	

Figur 3 Sammenligning av alle spenningsverdier i alle serier ved 1 mm deformasjon.

Spenning ved 2 mm deformasjon															
H/V	Svilletrykk ensidig midt på, L40C									Tosidig trykk midt	Tosidig trykk ende	Ensidig trykk ende		Fritt opplagt bjelke	
	90x90					45x90 høy	90x48 lav	90x405	90x90	90x90	90x90 L40C		48x198	90x405	
	48 skarp	48 rund	90 rund	48 rund	90 rund	48 rund	48 rund	90 rund	48 rund	48 rund	48 skarp	48 rund	48 rund	90 rund	
			rotasjon	Rotasjon											
	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	D1	E1	F2	F3	G3	G4	
B3	1,00	1,10	0,87	1,14	0,88	0,91	0,91	0,81	1,00	0,65	0,84	0,77	0,69	0,61	
B4	0,91	1,00	0,80	1,04	0,80	0,83	0,83	0,74	0,91	0,59	0,77	0,70	0,63	0,56	
B5	1,15	1,26	1,00	1,31	1,01	1,04	1,05	0,93	1,15	0,75	0,97	0,88	0,79	0,70	
B6	0,88	0,96	0,76	1,00	0,77	0,80	0,80	0,71	0,88	0,57	0,74	0,67	0,60	0,54	
B7	1,14	1,25	0,99	1,30	1,00	1,03	1,04	0,93	1,14	0,74	0,96	0,87	0,78	0,70	
B8	1,10	1,21	0,96	1,26	0,97	1,00	1,00	0,90	1,10	0,72	0,93	0,84	0,76	0,68	
B9	1,10	1,20	0,96	1,25	0,96	1,00	1,00	0,89	1,10	0,71	0,93	0,84	0,75	0,67	
B10	1,23	1,35	1,07	1,40	1,08	1,12	1,12	1,00	1,23	0,80	1,04	0,94	0,84	0,75	
D1	1,00	1,10	0,87	1,14	0,88	0,91	0,91	0,81	1,00	0,65	0,84	0,77	0,69	0,61	
E1	1,54	1,69	1,34	1,76	1,35	1,40	1,40	1,25	1,54	1,00	1,30	1,18	1,06	0,94	
F2	1,18	1,30	1,03	1,35	1,04	1,08	1,08	0,96	1,18	0,77	1,00	0,91	0,81	0,73	
F3	1,31	1,43	1,14	1,49	1,15	1,19	1,19	1,06	1,31	0,85	1,10	1,00	0,90	0,80	
G3	1,46	1,60	1,27	1,66	1,28	1,32	1,33	1,19	1,46	0,95	1,23	1,12	1,00	0,89	
G4	1,63	1,79	1,42	1,86	1,43	1,48	1,49	1,33	1,63	1,06	1,38	1,25	1,12	1,00	

Figur 4 Sammenligning av alle spenningsverdier i alle serier ved 2 mm deformasjon.



Instituttet for Matematiske realfag og Teknologi

Spenning ved 3 mm deformasjon															
H/V	Svilletrykk ensidig midt på, L40C									Tosidig trykk midt	Tosidig trykk ende	Ensidig trykk ende		Fritt opplagt bjelke	
	90x90					45x90 høy	90x48 lav	90x405	90x90	90x90	90x90 L40C		48x198	90x405	
	48 skarp	48 rund	90 rund	48 rund	90 rund	48 rund	48 rund	90 rund	48 rund	48 rund	48 skarp	48 rund	48 rund	90 rund	
			rotasjon	Rotasjon											
	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	D1	E1	F2	F3	G3	G4	
B3	1,00	1,07	0,85	1,11	0,86	0,92	0,90	0,88	0,96	0,69	0,84	0,78	0,70	0,71	
B4	0,94	1,00	0,80	1,04	0,80	0,86	0,84	0,83	0,90	0,64	0,79	0,73	0,65	0,66	
B5	1,18	1,26	1,00	1,31	1,01	1,08	1,06	1,04	1,13	0,81	0,99	0,92	0,82	0,84	
B6	0,90	0,96	0,76	1,00	0,77	0,83	0,81	0,79	0,86	0,62	0,76	0,70	0,63	0,64	
B7	1,17	1,25	0,99	1,30	1,00	1,07	1,05	1,03	1,12	0,80	0,98	0,91	0,81	0,83	
B8	1,09	1,16	0,93	1,21	0,93	1,00	0,98	0,96	1,04	0,75	0,92	0,85	0,76	0,77	
B9	1,11	1,19	0,94	1,23	0,95	1,02	1,00	0,98	1,06	0,76	0,94	0,87	0,77	0,79	
B10	1,13	1,21	0,96	1,26	0,97	1,04	1,02	1,00	1,09	0,78	0,96	0,89	0,79	0,80	
D1	1,04	1,11	0,89	1,16	0,89	0,96	0,94	0,92	1,00	0,72	0,88	0,82	0,73	0,74	
E1	1,46	1,56	1,24	1,62	1,25	1,34	1,31	1,28	1,40	1,00	1,23	1,14	1,02	1,03	
F2	1,19	1,27	1,01	1,32	1,02	1,09	1,07	1,05	1,14	0,82	1,00	0,93	0,83	0,84	
F3	1,28	1,36	1,08	1,42	1,09	1,17	1,15	1,13	1,22	0,88	1,08	1,00	0,89	0,91	
G3	1,43	1,53	1,22	1,59	1,23	1,32	1,29	1,27	1,37	0,99	1,21	1,12	1,00	1,02	
G4	1,41	1,50	1,20	1,57	1,21	1,29	1,27	1,24	1,35	0,97	1,19	1,10	0,98	1,00	

Figur 5 Sammenligning av alle spenningsverdier i alle serier ved 3 mm deformasjon.

Spenning ved 4 mm deformasjon															
H/V	Svilletrykk ensidig midt på, L40C									Tosidig trykk midt	Tosidig trykk ende	Ensidig trykk ende		Fritt opplagt bjelke	
	90x90					45x90 høy	90x48 lav	90x405	90x90	90x90	90x90 L40C		48x198	90x405	
	48 skarp	48 rund	90 rund	48 rund	90 rund	48 rund	48 rund	90 rund	48 rund	48 rund	48 skarp	48 rund	48 rund	90 rund	
			rotasjon	Rotasjon											
	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	D1	E1	F2	F3	G3	G4	
B3	1,00	1,07	0,84	1,11	0,84	0,94	0,91	0,89	0,95	0,70	0,84	0,78	0,71	0,74	
B4	0,94	1,00	0,79	1,04	0,79	0,88	0,86	0,84	0,89	0,65	0,78	0,73	0,67	0,69	
B5	1,19	1,27	1,00	1,33	1,01	1,13	1,09	1,06	1,14	0,83	1,00	0,93	0,85	0,88	
B6	0,90	0,96	0,75	1,00	0,76	0,85	0,82	0,80	0,85	0,63	0,75	0,70	0,64	0,66	
B7	1,18	1,26	0,99	1,32	1,00	1,12	1,08	1,06	1,13	0,82	0,99	0,93	0,85	0,87	
B8	1,06	1,13	0,89	1,18	0,90	1,00	0,97	0,94	1,01	0,74	0,89	0,83	0,76	0,78	
B9	1,10	1,17	0,92	1,22	0,92	1,03	1,00	0,98	1,04	0,76	0,92	0,86	0,78	0,81	
B10	1,12	1,20	0,94	1,25	0,95	1,06	1,02	1,00	1,07	0,78	0,94	0,88	0,80	0,83	
D1	1,05	1,12	0,88	1,17	0,89	0,99	0,96	0,94	1,00	0,73	0,88	0,82	0,75	0,78	
E1	1,44	1,53	1,20	1,60	1,21	1,36	1,31	1,28	1,37	1,00	1,20	1,12	1,03	1,06	
F2	1,20	1,27	1,00	1,33	1,01	1,13	1,09	1,06	1,14	0,83	1,00	0,93	0,85	0,88	
F3	1,28	1,36	1,07	1,42	1,08	1,21	1,17	1,14	1,22	0,89	1,07	1,00	0,91	0,94	
G3	1,40	1,49	1,17	1,56	1,18	1,32	1,28	1,25	1,33	0,97	1,17	1,09	1,00	1,03	
G4	1,35	1,44	1,13	1,51	1,14	1,28	1,24	1,21	1,29	0,94	1,13	1,06	0,97	1,00	

Figur 6 Sammenligning av alle spenningsverdier i alle serier ved 4 mm deformasjon.

Instituttet for Matematiske realfag og Teknologi

Spenning ved 5 mm deformasjon															
H/V	Svilletrykk ensidig midt på, L40C									Tosidig trykk midt	Tosidig trykk ende	Ensidig trykk ende		Fritt opplagt bjelke	
	90x90					45x90 høy	90x48 lav	90x405	90x90	90x90	90x90 L40C		48x198	90x405	
	48 skarp	48 rund	90 rund	48 rund	90 rund	48 rund	48 rund	90 rund	48 rund	48 rund	48 skarp	48 rund	48 rund	90 rund	
			rotasjon	Rotasjon											
	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	D1	E1	F2	F3	G3	G4	
B3	1,00	1,07	0,82	1,11	0,83	0,97	0,92	0,88	0,95	0,69	0,83	0,77	0,73	0,74	
B4	0,94	1,00	0,77	1,04	0,78	0,91	0,86	0,82	0,89	0,65	0,78	0,73	0,69	0,69	
B5	1,21	1,29	1,00	1,35	1,01	1,17	1,12	1,07	1,15	0,84	1,00	0,94	0,89	0,90	
B6	0,90	0,96	0,74	1,00	0,75	0,87	0,83	0,79	0,85	0,62	0,75	0,70	0,66	0,66	
B7	1,20	1,28	0,99	1,33	1,00	1,16	1,10	1,05	1,13	0,83	0,99	0,93	0,88	0,88	
B8	1,03	1,10	0,85	1,15	0,86	1,00	0,95	0,91	0,98	0,71	0,86	0,80	0,76	0,76	
B9	1,09	1,16	0,90	1,21	0,91	1,05	1,00	0,96	1,03	0,75	0,90	0,84	0,80	0,80	
B10	1,14	1,21	0,94	1,26	0,95	1,10	1,05	1,00	1,08	0,79	0,94	0,88	0,84	0,84	
D1	1,06	1,13	0,87	1,17	0,88	1,02	0,97	0,93	1,00	0,73	0,87	0,82	0,78	0,78	
E1	1,45	1,54	1,19	1,61	1,21	1,40	1,33	1,27	1,37	1,00	1,20	1,12	1,06	1,07	
F2	1,21	1,29	1,00	1,34	1,01	1,17	1,11	1,06	1,14	0,84	1,00	0,94	0,89	0,89	
F3	1,29	1,38	1,06	1,43	1,08	1,25	1,19	1,13	1,22	0,89	1,07	1,00	0,95	0,95	
G3	1,36	1,45	1,12	1,51	1,13	1,32	1,25	1,20	1,29	0,94	1,13	1,05	1,00	1,00	
G4	1,36	1,45	1,12	1,50	1,13	1,31	1,25	1,19	1,28	0,94	1,12	1,05	1,00	1,00	

Figur 7 Sammenligning av alle spenningsverdier i alle serier ved 5 mm deformasjon.

Spenning ved 10 mm deformasjon															
H/V	Svilletrykk ensidig midt på, L40C									Tosidig trykk midt	Tosidig trykk ende	Ensidig trykk ende		Fritt opplagt bjelke	
	90x90					45x90 høy	90x48 lav	90x405	90x90	90x90	90x90 L40C		48x198	90x405	
	48 skarp	48 rund	90 rund	48 rund	90 rund	48 rund	48 rund	90 rund	48 rund	48 rund	48 skarp	48 rund	48 rund	90 rund	
			rotasjon	Rotasjon											
	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	D1	E1	F2	F3	G3	G4	
B3	1,00	1,06	0,77	1,08	0,78	1,03	0,92	0,81	0,92	0,63	0,78	0,73	0,80	0,69	
B4	0,94	1,00	0,72	1,02	0,74	0,97	0,87	0,76	0,87	0,60	0,74	0,68	0,75	0,65	
B5	1,30	1,38	1,00	1,41	1,02	1,34	1,20	1,05	1,20	0,83	1,02	0,95	1,04	0,90	
B6	0,93	0,98	0,71	1,00	0,73	0,95	0,86	0,75	0,86	0,59	0,72	0,67	0,74	0,64	
B7	1,28	1,36	0,98	1,38	1,00	1,31	1,18	1,03	1,18	0,81	1,00	0,93	1,02	0,88	
B8	0,97	1,03	0,75	1,05	0,76	1,00	0,90	0,79	0,90	0,62	0,76	0,71	0,77	0,67	
B9	1,08	1,15	0,83	1,17	0,85	1,11	1,00	0,87	1,00	0,69	0,84	0,79	0,86	0,74	
B10	1,24	1,31	0,95	1,33	0,97	1,27	1,14	1,00	1,14	0,78	0,97	0,90	0,99	0,85	
D1	1,08	1,15	0,83	1,17	0,85	1,12	1,00	0,88	1,00	0,69	0,85	0,79	0,86	0,75	
E1	1,58	1,68	1,21	1,70	1,24	1,62	1,46	1,27	1,46	1,00	1,23	1,15	1,26	1,09	
F2	1,28	1,36	0,98	1,38	1,00	1,32	1,18	1,03	1,18	0,81	1,00	0,93	1,02	0,88	
F3	1,38	1,46	1,06	1,48	1,08	1,42	1,27	1,11	1,27	0,87	1,07	1,00	1,10	0,95	
G3	1,25	1,33	0,96	1,35	0,98	1,29	1,16	1,01	1,16	0,80	0,98	0,91	1,00	0,86	
G4	1,45	1,54	1,11	1,57	1,14	1,49	1,34	1,17	1,34	0,92	1,13	1,06	1,16	1,00	

Figur 8 Sammenligning av alle spenningsverdier i alle serier ved 10 mm deformasjon.



Instituttet for Matematiske realfag og Teknologi

Spenning ved 15 mm deformasjon															
H/V	Svilletrykk ensidig midt på, L40C									Tosidig trykk midt	Tosidig trykk ende	Ensidig trykk ende	Fritt opplagt bjelke		
	90x90						45x90 høy	90x48 lav	90x405	90x90	90x90	90x90 L40C		48x198	90x405
	48 skarp	48 rund	90 rund	48 rund	90 rund	48 rund	48 rund	90 rund	48 rund	48 rund	48 rund	48 skarp	48 rund	48 rund	90 rund
			rotasjon	Rotasjon											
	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	D1	E1	F2	F3	G3	G4	
B3	1,00	1,04	0,74	1,04	0,74	1,02	0,92	0,77	0,90	0,58	0,75	0,70	0,81	0,65	
B4	0,96	1,00	0,71	0,99	0,71	0,97	0,88	0,73	0,86	0,56	0,71	0,67	0,77	0,62	
B5	1,36	1,42	1,00	1,41	1,01	1,38	1,25	1,04	1,22	0,79	1,01	0,95	1,09	0,89	
B6	0,97	1,01	0,71	1,00	0,72	0,98	0,89	0,74	0,87	0,56	0,72	0,68	0,78	0,63	
B7	1,34	1,40	0,99	1,39	1,00	1,37	1,24	1,03	1,21	0,78	1,00	0,95	1,08	0,88	
B8	0,98	1,03	0,73	1,02	0,73	1,00	0,91	0,75	0,88	0,57	0,73	0,69	0,79	0,64	
B9	1,08	1,13	0,80	1,12	0,81	1,10	1,00	0,83	0,97	0,63	0,81	0,76	0,87	0,71	
B10	1,30	1,36	0,96	1,35	0,97	1,32	1,20	1,00	1,17	0,76	0,97	0,92	1,05	0,85	
D1	1,11	1,16	0,82	1,15	0,83	1,13	1,03	0,85	1,00	0,65	0,83	0,78	0,90	0,73	
E1	1,72	1,79	1,26	1,78	1,28	1,74	1,58	1,32	1,54	1,00	1,28	1,21	1,38	1,12	
F2	1,34	1,40	0,99	1,39	1,00	1,36	1,24	1,03	1,20	0,78	1,00	0,94	1,08	0,87	
F3	1,42	1,48	1,05	1,47	1,06	1,44	1,31	1,09	1,28	0,83	1,06	1,00	1,15	0,93	
G3	1,24	1,29	0,91	1,29	0,92	1,26	1,15	0,95	1,11	0,72	0,93	0,87	1,00	0,81	
G4	1,53	1,60	1,13	1,59	1,14	1,56	1,42	1,18	1,38	0,89	1,14	1,08	1,24	1,00	

Figur 9 Sammenligning av alle spenningsverdier i alle serier ved 15 mm deformasjon.

Her har vi samlet noen av de mer aktuelle sammenligningene for samtlige nivåer av deformasjon for enklere å kunne få oversikt.

Deformasjon i mm		1	2	3	4	5	10	15	Brudd
Beskrivelse	Serie								
Avrundet kant / skarp kant midt på	B4/B3	1,53	1,10	1,07	1,07	1,07	1,06	1,04	1,04
Avrundet kant / skarp kant mot ende	F3/F2	0,80	0,91	0,93	0,93	0,94	0,93	0,94	0,94
Trykk midt på / trykk mot ende, skarp kant	B4/F2	1,50	1,30	1,27	1,27	1,29	1,36	1,40	1,27
Trykk midt på / trykk mot ende, avrundet kant	B4/F3	1,87	1,43	1,36	1,36	1,38	1,46	1,48	1,35
Fast trykkplate / Roterbar trykkplate 48 mm bredde	B4/B6	0,88	0,96	0,96	0,96	0,96	0,98	1,01	0,96
Fast trykkplate / Roterbar trykkplate 90 mm bredde	B5/B7	1,01	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99
Ensidig trykk / tosidig trykk, midt på 48 mm trykkplate	B4/D1	0,88	1,10	1,11	1,12	1,13	1,15	1,16	1,17
Ensidig trykk / tosidig trykk, mot ende 48 mm trykkplate	F3/E1	2,31	1,18	1,14	1,12	1,12	1,15	1,21	1,14
48 mm trykkplate / 90 mm trykkplate	B4/B5	1,24	1,26	1,26	1,27	1,29	1,38	1,42	1,23
Høy / lav	B10/B4	0,47	0,74	0,83	0,84	0,82	0,76	0,73	1,08
Høy / lav	B10/B5	0,59	0,93	1,04	1,06	1,07	1,05	1,04	1,33
Høy / lav	B10/B8	0,54	0,90	0,96	0,94	0,91	0,79	0,75	1,31
Høy / lav	B10/B9	0,52	0,89	0,98	0,98	0,96	0,87	0,83	1,43

Figur 10 Sammenligning av gitte serier ved ulik deformasjon.

Her er tallene vi brukte for å sammenligne verdiene i tabellene på de foregående sidene. Tallene er hentet ut fra excelarkene med grafene.

	Spenning ved gitt deformasjon							
	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	10 mm	15 mm	brudd
B301	3,90	4,89	5,62	6,33	6,90	9,32	10,92	4,87
B302	1,74	5,29	6,29	6,95	7,50	10,03	12,33	6,14
B303	1,61	6,29	7,28	7,93	8,58	11,15	13,90	7,26
B304	3,32	7,49	8,32	8,81	9,28	11,57	13,37	8,14
B305	4,15	7,01	7,62	8,09	8,65	10,76	12,43	7,38

Instituttet for Matematiske realfag og Teknologi

B306	2,72	7,15	8,32	9,01	9,65	12,10	14,64	8,32
B307	5,81	7,81	8,60	9,31	9,94	12,19	14,37	8,03
B308	0,78	5,66	7,16	7,79	8,10	9,52	11,45	7,24
B309	4,27	6,30	7,05	7,66	8,21	10,54	12,67	6,52
B310	3,94	8,59	9,89	10,68	11,33	14,02	15,89	9,73
Snitt	3,22	6,65	7,61	8,26	8,82	11,12	13,20	7,36
B401	4,39	6,93	7,76	8,41	8,84	10,54	12,39	7,28
B402	6,74	8,47	9,48	10,32	11,05	13,74	16,26	8,59
B403	5,95	8,40	9,46	10,25	10,96	13,95	16,12	8,77
B404	4,67	6,53	7,20	7,75	8,28	10,50	12,40	6,68
B405	4,79	5,93	6,48	6,94	7,37	9,15	10,59	5,95
B406	6,12	8,39	9,40	10,15	10,80	13,45	15,72	8,75
B407	5,29	6,95	7,54	8,09	8,78	11,91	14,95	7,03
B408	5,17	7,63	8,38	8,94	9,53	12,19	14,30	7,99
B409	2,59	6,90	7,95	8,58	9,07	10,63	12,01	8,09
B410	4,43	6,09	6,70	7,27	7,78	10,11	11,92	6,19
B411	5,01	6,51	7,58	8,44	9,27	13,06	15,03	6,55
B412	4,79	7,44	8,35	9,02	9,61	11,49	13,11	8,01
B413	3,99	8,17	9,37	10,12	10,69	12,65	13,59	9,27
B414	4,59	7,31	8,03	8,74	9,39	11,78	13,64	7,63
B415	5,55	7,58	8,38	8,99	9,47	12,01	14,51	7,77
Snitt	4,94	7,28	8,14	8,80	9,39	11,81	13,77	7,64
B501	4,65	6,43	7,16	7,63	7,98	9,18	10,20	6,75
B502	4,23	5,70	6,33	6,69	7,00	8,31	9,86	5,83
B503	4,46	6,20	6,86	7,28	7,61	8,90	10,12	6,60
B504	4,15	4,84	5,31	5,77	6,19	8,09	9,41	4,89
B505	3,79	5,13	5,72	6,24	6,74	8,71	10,34	5,40
B506	3,53	5,95	6,71	7,17	7,51	8,90	10,31	6,62
B507	4,35	5,82	6,41	6,79	7,04	7,76	8,75	6,12
B508	4,00	6,84	7,79	8,32	8,65	9,36	9,88	7,62
B509	4,17	5,43	5,98	6,40	6,69	8,00	9,39	5,66
B510	2,50	5,55	6,44	6,84	7,13	8,12	8,96	6,41
Snitt	3,98	5,79	6,47	6,91	7,26	8,53	9,72	6,19
B601	6,44	9,09	10,41	11,34	12,06	14,21	14,80	9,96
B602	4,56	6,71	7,64	8,43	9,12	11,84	13,79	7,05
B603	5,59	7,60	8,41	9,06	9,59	11,54	13,49	7,93
B604	5,34	7,86	8,85	9,70	10,35	12,86	14,53	8,34
B605	3,97	6,02	6,81	7,50	8,09	10,47	12,31	6,43
B606	5,86	7,18	7,87	8,40	8,88	10,60	11,53	7,20
B607	6,71	8,40	9,36	10,13	10,82	13,18	15,29	8,61
B608	4,99	6,51	7,08	7,62	8,07	10,01	11,83	6,61
B609	6,11	7,70	8,45	9,08	9,57	11,64	14,02	7,84



Instituttet for Matematiske realfag og Teknologi

B610	6,46	8,83	9,78	10,55	11,22	13,55	15,11	9,35
Snitt	5,60	7,59	8,47	9,18	9,78	11,99	13,67	7,93
B701	5,81	7,60	8,29	8,73	9,11	10,13	10,81	7,85
B702	4,31	5,83	6,44	6,81	7,15	8,39	9,38	6,02
B703	4,20	6,58	7,33	7,73	8,03	9,02	9,96	7,19
B704	4,57	6,25	7,15	7,79	8,25	9,72	10,66	6,61
B705	2,23	5,49	6,30	6,70	7,06	8,24	9,12	6,33
B706	3,39	4,97	5,56	5,87	6,17	7,60	8,94	5,33
B707	3,72	4,99	5,57	6,09	6,57	8,20	9,85	5,24
B708	3,24	5,28	6,03	6,66	7,25	9,58	10,97	5,84
B709	4,71	6,16	6,73	7,11	7,44	8,81	10,16	6,31
B710	3,44	5,27	5,88	6,20	6,45	7,44	8,31	5,74
Snitt	3,96	5,84	6,53	6,97	7,35	8,71	9,82	6,24
B801	2,39	6,06	7,26	8,06	8,78	10,83	11,40	6,79
B802	4,73	6,69	7,65	8,29	8,88	11,10	12,08	6,94
B803								
B804	5,18	6,71	7,76	8,56	9,31	11,87	13,04	6,78
B805	3,56	5,57	6,48	7,23	7,95	11,71	15,19	5,72
B806	4,27	5,43	6,26	6,99	7,67	11,02	14,42	5,55
B807	4,49	5,62	6,44	7,21	7,89	10,97	13,08	5,76
B808	4,77	5,80	6,49	7,16	7,92	11,19	13,58	5,82
B809	4,82	6,07	7,12	8,17	9,13	12,52	14,82	6,40
B810	4,75	6,39	7,44	8,42	9,18	11,74	13,04	6,63
Snitt	4,33	6,04	6,99	7,79	8,52	11,44	13,40	6,27
B901	5,04	6,90	8,00	8,98	9,93	13,52	16,18	6,63
B902	5,61	6,57	7,09	7,52	7,92	9,50	10,76	6,38
B903	4,85	5,95	6,56	7,08	7,45	9,09	10,73	5,62
B904	3,93	5,36	6,09	6,67	7,15	9,02	10,50	5,16
B905	5,69	6,93	7,85	8,78	9,53	12,48	15,51	6,08
B906	3,09	4,21	4,70	5,08	5,39	6,57	7,64	3,85
B907	2,56	5,62	6,88	7,84	8,71	11,85	15,10	5,45
B908	5,95	7,32	8,06	8,69	9,14	11,16	12,84	6,94
B909	2,64	4,30	4,82	5,23	5,55	6,60	7,60	4,20
B910	5,88	7,44	8,55	9,50	10,30	13,00	14,98	7,21
Snitt	4,52	6,06	6,86	7,54	8,11	10,28	12,18	5,75
B1001	1,83	5,17	6,80	7,63	8,11	9,51	10,85	8,77
B1002	3,32	6,26	7,35	7,80	8,11	9,13	9,90	8,43
B1003	1,50	5,03	6,74	7,54	7,92	9,35	10,84	8,53
B1004	1,60	4,95	6,37	7,08	7,52	8,95	10,45	8,11
B1005	3,25	6,10	7,27	7,72	8,07	9,43	11,08	8,44

Instituttet for Matematiske realfag og Teknologi

B1006	2,63	5,07	5,85	6,27	6,58	7,66	8,64	6,92
B1007	1,75	5,32	7,28	8,29	8,95	10,09	10,65	9,64
B1008	2,66	6,03	7,46	8,16	8,60	9,80	10,64	9,15
B1009	1,97	4,89	5,80	6,24	6,50	7,73	8,80	6,94
B1010	2,86	5,27	6,27	6,80	7,14	8,17	9,36	7,46
Snitt	2,34	5,41	6,72	7,36	7,75	8,98	10,12	8,24
D101	6,03	7,25	8,06	8,76	9,42	11,80	13,72	7,04
D102	5,19	6,16	6,84	7,40	7,87	9,68	11,15	6,08
D103	5,90	6,79	7,44	7,99	8,44	10,25	11,50	6,56
D104	4,56	5,77	6,59	7,20	7,68	9,50	10,84	5,87
D105	6,30	7,08	7,59	8,02	8,45	10,29	11,75	6,85
D106	5,50	6,39	6,98	7,46	7,91	9,80	11,77	6,14
D107								
D108	5,43	6,17	6,79	7,28	7,75	9,74	11,50	5,91
D109	6,60	8,06	8,79	9,38	9,86	11,69	12,90	8,04
D110	4,14	5,25	5,86	6,45	6,98	9,15	11,11	5,14
D111	6,94	7,98	8,54	9,03	9,46	11,24	12,62	8,00
D112	5,26	6,19	6,84	7,36	7,85	9,72	11,47	5,90
Snitt	5,62	6,65	7,30	7,85	8,33	10,26	11,85	6,50
E101	0,91	4,07	4,99	5,45	5,74	6,22	6,69	4,88
E102								
E103	1,34	3,85	4,59	5,04	5,42	6,67	7,20	4,38
E104	1,14	4,04	4,95	5,46	5,80	6,94	7,85	4,87
E105	1,35	4,36	5,31	5,80	6,02	6,44	7,11	4,95
E106	0,20	3,92	4,86	5,43	5,83	7,28	8,05	4,74
E107	0,02	4,04	5,49	6,19	6,69	7,60	8,13	5,66
E108	1,34	5,27	6,29	6,91	7,29	8,40	9,21	6,07
E109	1,80	4,17	4,98	5,45	5,79	6,71	7,17	4,63
E110	0,83	4,19	4,93	5,34	5,56	6,29	6,96	4,71
E111	1,71	4,45	5,13	5,51	5,78	6,46	6,95	4,86
E112	1,63	4,69	5,62	6,17	6,61	7,92	8,68	5,30
E113								
E114	1,79	5,20	6,00	6,50	6,82	7,73	8,24	5,71
E115	0,81	3,91	4,88	5,46	5,82	6,96	7,71	4,69
Snitt	1,14	4,32	5,23	5,75	6,09	7,05	7,69	5,03
F201	3,45	5,70	6,56	7,02	7,39	8,46	9,56	5,77
F202	3,91	6,03	6,88	7,51	8,05	9,76	11,10	6,58
F203	3,47	6,05	7,00	7,56	7,89	9,00	9,64	6,85
F204	2,29	6,64	7,58	8,10	8,47	9,56	10,44	7,50
F205	1,70	4,61	5,59	6,19	6,61	8,11	9,30	5,41
F206	4,80	6,63	7,18	7,47	7,72	8,98	10,51	6,84
F207	4,02	5,91	6,82	7,32	7,80	9,56	11,20	6,21



Instituttet for Matematiske realfag og Teknologi

F208	1,65	4,61	5,38	5,80	6,12	7,46	8,37	5,21
F209	0,76	5,61	6,89	7,56	8,04	9,61	10,90	6,84
F210	4,03	6,23	7,17	7,66	8,06	9,50	10,56	6,76
F211	2,97	4,09	4,65	5,03	5,28	6,37	7,62	4,11
F212	3,92	5,05	5,54	5,78	5,96	6,91	7,95	4,91
F213	3,07	4,46	5,12	5,59	5,97	7,46	8,61	4,58
F214	5,69	7,44	8,19	8,72	9,18	11,03	12,42	7,52
F215	3,73	5,14	5,74	6,29	6,79	8,46	9,47	5,29
Snitt	3,30	5,61	6,42	6,91	7,29	8,68	9,84	6,02
F301	0,82	4,07	5,13	5,69	6,07	7,07	7,89	5,06
F302	1,43	4,75	5,65	6,14	6,45	7,38	8,63	5,48
F303	2,06	5,34	6,30	6,85	7,24	9,02	10,83	6,03
F304	3,32	5,31	6,16	6,79	7,23	8,67	9,72	5,63
F305	1,97	5,54	6,47	6,94	7,29	8,74	10,20	6,26
F306	4,07	5,56	6,24	6,76	7,14	8,25	8,83	5,75
F307	3,56	4,55	5,02	5,20	5,39	6,38	7,79	4,58
F308	0,82	4,07	5,12	5,69	6,07	7,07	7,88	5,06
F309	2,98	5,08	5,77	6,16	6,46	7,47	8,64	5,53
F310	4,05	5,83	6,64	7,13	7,57	9,37	11,23	6,05
F311	1,58	4,37	5,60	6,21	6,76	8,39	9,65	5,54
F312	3,26	5,92	6,93	7,47	7,86	8,76	9,60	6,73
F313	3,63	4,43	4,87	5,17	5,42	6,52	7,95	4,31
F314	2,56	5,43	6,55	7,13	7,59	9,12	10,19	6,17
F315	3,52	6,10	7,05	7,54	7,87	8,98	10,11	6,83
Snitt	2,64	5,09	5,97	6,46	6,83	8,08	9,28	5,67
G301	2,01	4,02	5,03	5,77	6,56	9,58		5,76
G302	1,03	3,25	3,97	4,51	4,94	7,33	9,41	4,86
G303	4,41	5,41	6,29	6,79	7,48	10,08	12,34	6,26
G304	5,06	6,88	7,69	8,27	9,05	11,78	13,89	7,67
G305	3,37	4,01	4,51	4,93	5,24	6,66	7,62	4,31
G306	2,54	3,99	4,70	5,11	5,52	7,57	8,84	5,09
G307	3,80	4,58	5,18	5,67	6,37	8,52	10,14	5,10
G308	2,20	3,65	4,26	4,88	5,34	7,83	9,77	5,11
G309	1,74	4,30	5,11	5,73	6,30	9,19	11,59	5,76
G310	2,96	4,80	5,54	6,16	6,75	9,40	11,91	6,08
G311	1,59	3,22	3,94	4,53	5,09	7,56	9,68	4,77
G312	2,09	3,88	4,44	5,10	5,51	7,06	7,84	4,39
G313	1,62	4,09	4,85	5,48	6,11	8,39	10,23	5,75
G314	5,43	6,42	7,41	8,01	8,71	11,58	13,86	6,96
G315	4,68	5,94	6,77	7,58	8,18	10,41	11,74	6,53
Snitt	2,97	4,56	5,31	5,90	6,48	8,86	10,63	5,63

Instituttet for Matematiske realfag og Teknologi

G401								
G402	2,36	4,67	5,69	6,15	6,37	7,22	8,30	6,70
G403	1,11	3,97	5,47	6,32	6,76	7,68	8,84	7,23
G404	1,52	4,67	5,78	6,42	6,75	8,02	9,01	7,36
G405	0,71	3,75	5,49	6,44	6,88	7,93	8,13	7,60
G406	0,40	2,23	5,08	6,20	6,86	8,08	9,03	7,77
G407	1,50	4,00	4,77	5,13	5,63	7,46	8,91	6,36
G408	1,44	4,45	5,85	6,49	6,90	8,23	9,32	7,37
G409	0,44	3,21	4,89	5,81	6,29	7,43	8,23	7,05
G410	2,00	4,51	5,29	5,86	6,13	7,16	8,21	6,53
G411	3,12	5,14	6,25	6,88	7,31	8,85	9,91	7,86
G412	0,94	3,29	4,77	5,53	5,89	6,63	7,37	6,29
G413	1,20	3,86	5,32	6,07	6,55	7,75	8,60	7,32
G414	2,74	4,34	5,37	5,87	6,24	7,10	7,83	6,49
G415	3,21	4,99	5,69	6,15	6,43	7,58	8,76	7,52
Snitt	1,62	4,08	5,41	6,09	6,50	7,65	8,60	7,10

	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	10 mm	15 mm	brudd
Serie B3	3,22	6,65	7,61	8,26	8,82	11,12	13,20	7,36
Serie B4	4,94	7,28	8,14	8,80	9,39	11,81	13,77	7,64
Serie B5	3,98	5,79	6,47	6,91	7,26	8,53	9,72	6,19
Serie B6	5,60	7,59	8,47	9,18	9,78	11,99	13,67	7,93
Serie B7	3,96	5,84	6,53	6,97	7,35	8,71	9,82	6,24
Serie B8	4,33	6,04	6,99	7,79	8,52	11,44	13,40	6,27
Serie B9	4,52	6,06	6,86	7,54	8,11	10,28	12,18	5,75
Serie B10	2,34	5,41	6,72	7,36	7,75	8,98	10,12	8,24
Serie D1	5,62	6,65	7,30	7,85	8,33	10,26	11,85	6,50
Serie E1	1,14	4,32	5,23	5,75	6,09	7,05	7,69	5,03
Serie F2	3,30	5,61	6,42	6,91	7,29	8,68	9,84	6,02
Serie F3	2,64	5,09	5,97	6,46	6,83	8,08	9,28	5,67
Serie G3	2,97	4,56	5,31	5,90	6,48	8,86	10,63	5,63
Serie G4	1,62	4,08	5,41	6,09	6,50	7,65	8,60	7,10

KAPASITETEN TIL TREVIRKE VED TRYKK TVERS PÅ FIBER

The capacity of wood for compression perpendicular to the grain

Morten Moseng og David Hagle

Universitetet for miljø- og biovitenskap

Institutt for matematiske realfag og teknologi

Masteroppgave 30 stp. 2012