

Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Fakultet for miljøvitenskap og teknologi
Institutt for matematiske realfag og teknologi

Masteroppgåve 2015
30 stp

Bøyeforsøk på massivtrebjelkar

Bending tests on Cross Laminated Timber beams

Olav Øvstebø

Samandrag

CLT elementa blir i dag nytta i hovudsak som bærande og ikkje bærande plater og skiver til vegg, tak og golv. Det er og fullt mogleg å nytta CLT som bjelkar belasta i planet. Krysslegginga av sjikta førar til lik kryp og svelling både langs med bjelkespennet og på tvers av bjelkespennet. Dimensjonsstabilitet til CLT bjelken auker og gjere CLT bjelken mindre utsatt for oppsprekking. Samtidig er det mulig å ta opp større strekkrefter tvers på bjelkespennet med dei kryssande sjikta samanlikna med konstruksjonstre- og limtre bjelkar. Sjølv om det lastbærande tverrsnittet er redusert langs med bjelkespennet har CLT bjelkar stor bøyestyrke.

CLT bjelker er utfordrane å prosjektera fordi det ikkje finnes nokon generell berekningsmodell og det er usikkert kva karakteristiske eigenskapar ein skal bruke til CLT bjelkane. Bøyeforsøk på to ulike bjelketverrsnitt er utført i denne oppgåva for å bestemme karakteristiske eigenskapar til CLT bjelkar. Resultata indikerar at ein kan nytta ein høgare fasthetsklasse på bjelken enn den fasthetsklassen den er bygd opp av.

Abstract

CLT elements are mainly used as planar components in load-bearing applications, such as wall, floor and wall elements. It is also fully possible to use CLT as beams loaded in plane. The transversal layers leading to equal creep and swelling both along with beam span and across the beam. Dimensional stability to the CLT beam increases and makes CLT beam less prone to cracks. And able to transfer large tension forces across the beam span with the transversal layers comparing with solid wood and glulam. Even if the load-bearing cross-section is reduced along with the beam, CLT has shown high bending strength.

CLT beams is challenging to design because the lack of a general design model. Also it is uncertain what strength and stiffness values one should use for CLT beams. Bending tests on two different beam cross sections is performed in this thesis to determine the distinctive characteristics of the CLT beams. The results indicate that one can benefit a higher strength grade of the beam than the strength grade that is made up of.

INNHALDSFORTEGNELSE

Kapittel 1: Innføring	3
1.1 Bakgrunn	3
1.2 Mål og problemstilling	4
1.3 Oversikt over oppgåva	4
1.4 Generell skildring av krysslåst massivtre	5
1.5 Produksjon av CLT	6
Kapittel 2: Litteraturgjennomgang	8
2.1 Tre i konstruksjon	8
2.2 Bjelketeori	11
2.3 Rådane praksis	12
2.4 Tidligere arbeid	12
Kapittel 3: Materialer og forsøk	13
3.1 Generelt	13
3.2 Val av bjelkar	14
3.3 Forsøksbjelker	15
3.4 Registrering og merking	17
3.5 Deformasjonsforsøk	18
3.6 Bruddforsøk	21
3.7 Densitet og fuktmåling	22
Kapittel 4: Resultater	23
4.1 Fukttinnhald og densitet	23
4.2 Deformasjon	24
4.3 Bøyestyrke	26
4.4 Dimensjonar	28
Kapittel 5: Diskusjon	29
5.1 Bøyestivhet	29
5.2 Bøyefasthet	31
5.3 Bedømming av bjelkar	32
5.4 Forsøka	32
5.5 Andre betrakningar	33
Kapittel 6: Konklusjon	34
Referanser	35

Kapittel 1: Innføring

1.1 Bakgrunn

Bygningselementer av krysslåst massivtre (CLT) er nokså nytt på den norske marknaden, og interessa er aukande. CLT er trebord som er satt saman i fleire sjikt. Sjikta er lagde 90 grader i forhold til kvarandre og samanføyd med lim slik at dei dannar store byggelement. CLT kan brukast i alle typar bygg, og har opna opp for bygging av nye former for trekonstruksjoner. Tradisjonelt har tre som bygningsmateriale blitt brukt til bustadhus og andre mindre bygningar, men CLT muliggjer i tillegg bygging av fleiretassjes bustad- og kontorbygg med trevirke som bærnde konstruksjonsmateriale. CLT ble utvikla på 1990-talet for å utnytta kantbord frå sagbruk og har i dag ein samla produksjon i Europa over 500.000m³ per år (Brandner 2013).

Bygging med CLT har fått aukende merksam frå arkitektar og byggherrer for arkitektoniske, estetiske og miljømessige forhold (trefokus). Dette av fleire årsaker. Bruk av CLT i bygg kan gi eit spennande formspråk. CLT er ein fornybar ressurs som krev lite energi å framstilla (2008b). Elementa er pre-fabrikkerte og klargjorte til montering, noko som gir kort byggetid og dermed bygg som blir tidlig tette. Låg egenvekt forenkler handtering og transport frå fabrikk til byggeplass.

CLT elementa blir i dag nytta i hovudsak som bærnde og ikkje bærnde plater og skiver til vegg, tak og golv. Det er og fullt mogleg å nytta CLT som bjelker belasta i planet. Krysslåsting av sjikta førar til lik kryp og svelling både langs med bjelkespennet og på tvers av bjelkespennet. Dimensjonsstabilitet til CLT bjelken auker og gjere CLT bjelken mindre utsatt for oppsprekking. Samtidig er det mulig å ta opp større strekkrefter tvers på bjelkespennet med dei kryssande sjikta samanlikna med konstruksjonstre- og limtre bjelkar. Det gjere det mogleg å nytta CLT bjelker i situasjonar der ein normalt vil forsterke eller auke dimensjonen til konstruksjonstre- og limtre bjelkar.

Dette er imidlertid blitt lite gjort hittil. Muligens skyldast dette at CLT bjelker er utfordrane å prosjektera fordi det ikkje finnes nokon generell berekningsmodell. Sjikta som ligg parallelt med bjelkespennet gir bøyestyrke, medan dei kryssande sjikta gir styrke tvers på bjelkespennet. Sjølv om det lastbærnde tverrsnittet er redusert langs med bjelkespennet har forsøk utført av Flaig og Blaß (2014) vist at CLT bjelkar har stor bøyestyrke samanlikna med konstruksjonstre og limtre. Flaig og Blaß har i sitt arbeid antyda ein sterk positiv effekt på bøyestyrken med ein auke i antall bord i sjikta som ligg parallelt med bjelkespennet og antal sjikt parallele sjikt.

Tidligere har Bejtka (2011) kome fram til at antal bord i sjikta som ligg parallelt med bjelkespenntet bør holdast til eit minimum. Bejtka presenterar faktorar som kan nyttast for å bestemme bøyepening og stivhetsverdiar til CLT bjelkar. Tilsvarende faktorar for bøyestyrke blir foreslått av Flaig og Blas, men i motsatt retning. Det er derfor nødvendig å undersøke området nærmere. Det vil i denne oppgåva bli gjort forsøk for å bestemme kva for bøyestyrke og bøyestivhet som bør velgas til CLT bjelkar.

Bruk av CLT som bjelker vil kunne opne opp nye moglegheiter for CLT-produentar. Ein slik type bjelke vil kunne konkurrera med andre trebaserte bjelker som heiltre og limtre. Spesielt i tilfeller der krefter verkar tvers på bjelkespenntet. Bruk av CLT bjelkar kan både vere enklare, ein kan sleppe å forsterke utsatte områder, og økonomisk gunstig. Produzenten kan bruka eigne bjelkar i bygninger reist med CLT og få en estetisk likhet. Ikkje minst kan kappet frå pre-fabrikkering skapa ein meirverdi som bjelkar.

1.2 Mål og problemstilling

Utgangspunktet for denne oppgåva var å finne ut korleis ein kan utføra berekningar for krysslimte massivtrebjelkar belastet i planet. Etter å ha undersøkt dette nærmare, viste det seg at det ikkje fantes nokon klare berekningsmodellar. Det er forsøkt å besvara to spørsmål i denne oppgåva.

- Kva karakteristisk bøyefasthet og E-modul skal nyttast til CLT bjelker lasta i planet?
- Har bjelkehøgda innverknad på dei karakteristiske eigenskapane til bjelken?

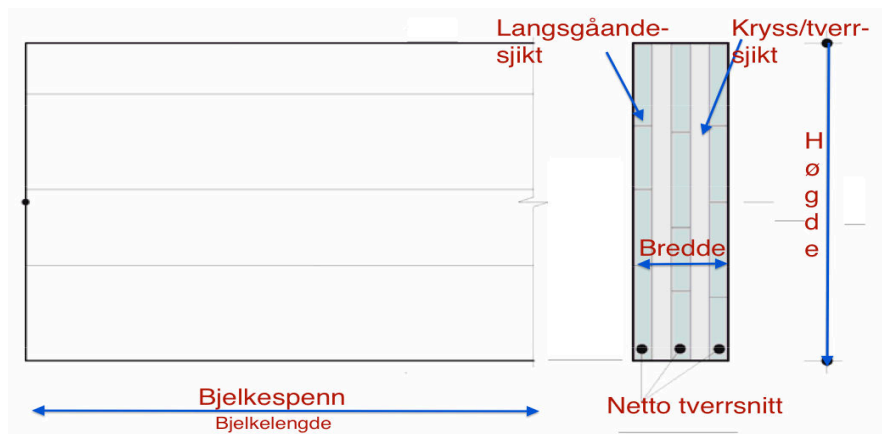
Ved fullskala bøyeforsøk vil det bli undersøkt bøyestyrke og bøyestivhet til bjelkane. Bøyeforsøka vil bli utført etter standardiserte metodar.

1.3 Oversikt over oppgåva

Oppgåva er delt opp i seks kapittel med delkapitler. Videre i dette kapitle kjem ein innføring i CLT. Dette er for at lesar skal bli kjend med produktet og korleis det vert laga. Lesarar med kjennskap til CLT kan gå direkte til kapittel 2. Kapittel 2 inneheld litteraturgjennomgang om tre, bjelketeori, rådande praksis og tidligare arbeid. I kapittel 3 er materiale og metode beskrevet. Der er det ein beskrivelse av forsøksbjelkane og utvelgelse av desse. Vidare i kapittel 3 er utførelsen av forsøka forklart. Alle resultatata er presentert i kapittel 4.

Kvart delkapittel framstiller sine resultat i tabellar og figurar. I diskusjonkapittelet er resultatane vurdert etter same mønster som i resultatkapittelet. Desse fem kapitla utgjør hovuddelen av oppgåva, og avsluttes med ein konklusjon i kapittel 6.

Gjennom heile oppgåva er det forsøkt å vere konsistent med beskrivelsar og uttrykk. Dei viktigaste beskrivande uttrykka for CLT bjelker er satt på Figur 1 under. Langsgåande sjikt består av trebord som ligg parallelt med bjelkelengden. I krysssjiktet ligg treborda 90 grader på bjelkelengden og følgeleg 90 grader på treborda i langsgåande sjikt. Netto tverrsnitt er summen av dei langsgåande sjikta i bjelketverrsnittet, heile det farga området.



Figur 1 Figur med påtegnede beskrivelsar som vert nytta i teksten (fritt redigert frå (Koppelhuber & Pock 2014))

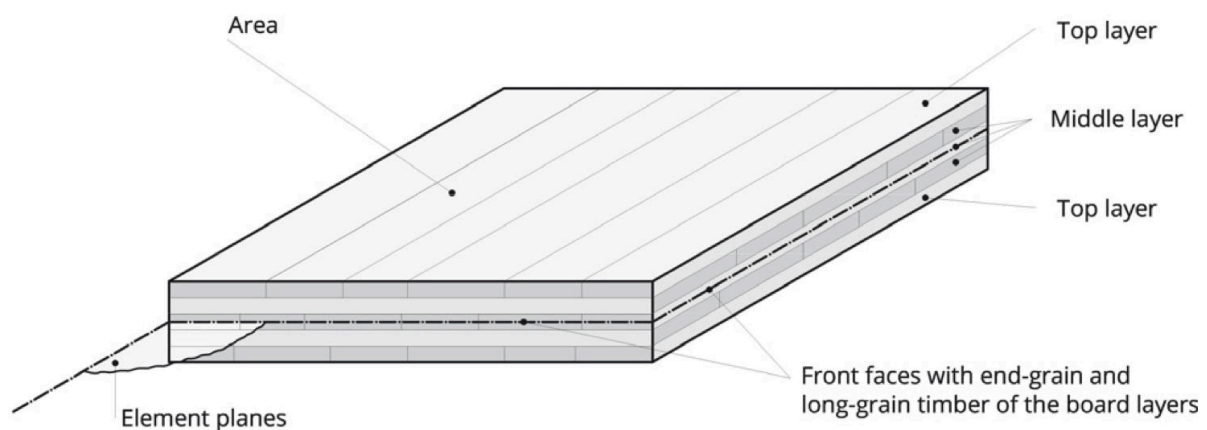
1.4 Generell skildring av krysslått massivtre

Krysslått massivtre er eit solid plateforma bygningselement i tre. Det består av trebord eller trebaserte plater som er lagde lagvis i fleire sjikt samanføyde med lim. Elementa produseras ved å krysslegge sjikta 90 grader i forhold til kvarandre, slik at fiberretningane blir vekselvis parallell og på tvers av lengda til eit rektangulært element, sjå Figur 2 under. Tverrsnittet er bygd opp symmetrisk i forhold til midtsjiktet (Brandner 2013). Antal sjikt varierar typisk frå tre til ni (Karacabeyli et al. 2013).

Størrelse og form på CLT elementene er gitt av begrensingar til produksjonsutstyr, transport og montering. Det som betraktes som standard dimensjon er lengder opp til 16m., bredder opp til 3m. og tykkelse opp til 300mm. (Koppelhuber & Pock 2014). Større dimensjoner kan og produseras. Største kjente dimensjon er nå $30 \times 4,8 \times 0,5\text{m}^3$ (Bejtka 2011; Brandner 2013).

Elementa brukas som bærande eller ikkje-bærande elementer i tak, vegger og golv. Tjukkelse på sjikta og antal sjikt tilpassas bruka av elementet. Massivtreelementer nyttast i alle typar bygg. Eksempel er næringsbygg, bustadhus, fleireetasjes hus, skular og barnehager (Bunkholt 2008b). Elementa gjer bruk av tre mogleg der ein tradisjonelt ville nytta andre bygningsmaterialer som stål eller betong (Chen 2011). Elementa er godt egna til bruk i kombinasjon med andre bygningsmaterialer.

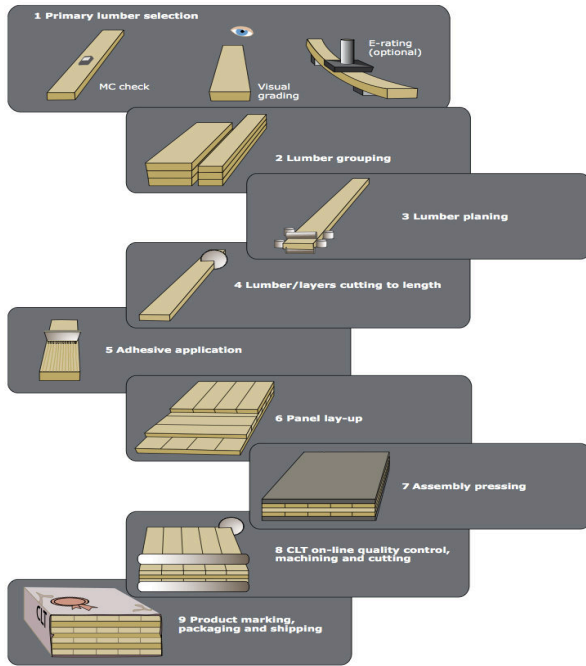
Det er utarbeida ein produkstandard til CLT (Fpr-EN-16351 2015). Den er foreløpig ikkje formelt vedtatt, men ligg inne til avstemming, det siste trinnet før den vert gjeldande. Standarden vil gi reguleringar til produktet, produksjonen av CLT og prestasjonskrav. Blant anna skal kvart element bestå av minimum tre ortogonale sjikt, der minst to av sjiktene er bygd opp av trebord. I element med fire eller fleire sjikt, kan to eller tre sjikt leggast med fiberretninga parallelt. Parallele sjikt kan ha ein tjukkelse opp til 90mm. Dette gjeld både for sjikt av trebord og trebaserte plater (Fpr-EN-16351 2015).



Figur 2 CLT- element med fem sjikt (Koppelhuber & Pock 2014)

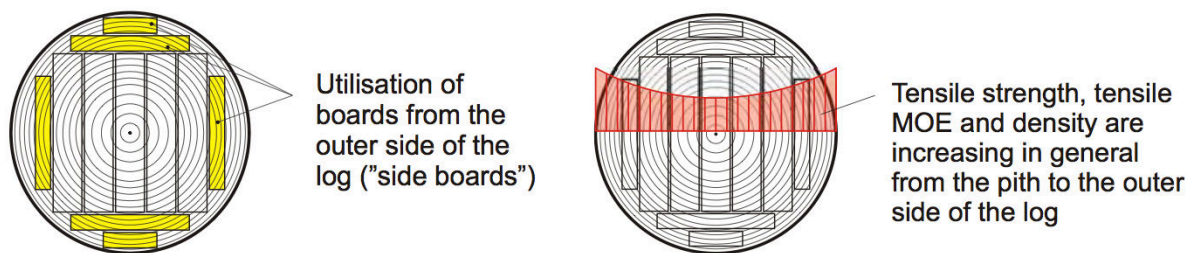
1.5 Produksjon av CLT

Produksjon av CLT elementer følger i hovudsak trinna vist i Figur 3 under, med variasjon frå produsent til produsent. Alle 17 treslag nevnt i (Fpr-EN-16351 2015) kan i prinsippet nyttast til produksjon så lenge ein eigna limtype blir brukt. Det vanligaste er å bruka trelast av gran og furu (Augustin 2008). Dersom ein ønskjar ein tiltallande eksponerte overflater, kan det nyttast andre treslag i yttersjikt. Resirkulert trevirke er i henhold til (Fpr-EN-16351 2015) ikkje tillatt brukt, verken resirkulerte trebord eller resirkulert råstoff i trebaserte plater.



Figur 3 Produksjonstrinna for CLT, frå bord til ferdig element ((Karacabeyli et al. 2013))

Treborda kjem ofte frå kantborda til treet (Brandner 2013; Chen 2011), venstre i Figur 4. Kantborda er lite etterspurd til andre bruksområder og er derfor eit prisgunstig råmateriale. Det har vist seg at kantborda har gode mekaniske eigenskapar. Strekkstyrke, E-modul og densitet aukar normalt frå trekjerna og ut til kanten av trestokken (Kuklik et al. 2008a), til høgre i Figur 4.



Figur 4 Framstilling trestokk og kappmønster til venstre. Høgre viser fordeling av nokon mekaniske eigenskapar gjennom ein trestokk (Kuklik et al. 2008a)

Treborda blir vanlegvis levert teknisk tørka frå sagbruk. Fuktinnhaldet til borda bør vere $12\% \pm 3\%$ (Karacabeyli et al. 2013). Fuktkontroll er med på å minimere utvikling av spenningar i elementet og aukar kvaliteten til limforbindelsen (Bergman 2010).

Borda er sortert etter styrke, vanligvis maskinelt etter EN-14081-1 (2011). Borda tildelast fasthetskklasse etter EN-338 (2009), eller andre spesifikke fasthetsklasser som produsenten nyttar. Dei delene av borda som ikkje møter krava til fasthetsklassen blir kapp bort, og resterande lengder blir fingerskjøyta til lange lameller (lameller=bord+fingerskjøter). Lamellane blir kutta i lengder til bruk i langsgåande eller kryssande sjikt. Tjukkelse til lamellane varierar frå 10 til 45 mm og bredde fra 80 til 240 mm.. Forholdet mellom bredde og tjukkelse bør vera $b:t > 4:1$ (Approvals 2014).

Overflata til lamellane blir planert før påføring av lim. Eit tynt lag blir då fjerna på den overflata som skal limast. Dette er med på å auke dimensjonspresisjonen til lamellane og sikrar betre limforbindelse ((Karacabeyli et al. 2013). Limet skal sørge for ein varig forbindelse mellom sjikta og holde lamellane på plass. Limtypar og limsystem er regulert av EN-301 (2013). Limet blir påført automatisk på enkeltlamellar eller på ferdig utlagte sjikt.

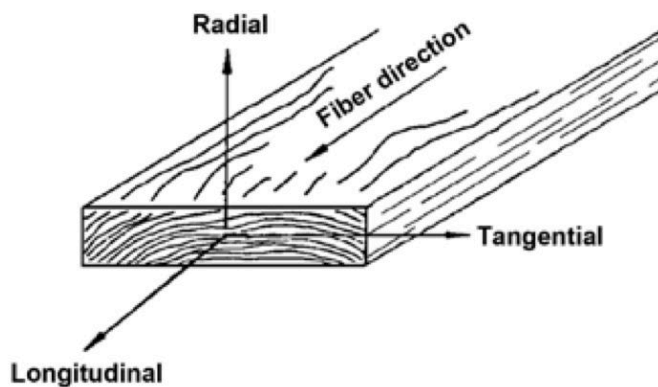
Når elementet er ferdig bygga opp, blir det presset. Målet med å pressa elementet er at trykket frå pressa skal fordela limet jevnt mellom sjikta, og sørge for tilstrekkelig kontakt mellom sjikta til limet er herda (Brandner 2013). Etter å ha vore i pressa blir kantane til elementet skorne reine. Ellers varierer grad av bearbeiding etter kvar elementet skal brukas. Bruk av datakontrollert utstyr gjør det mogleg å forme og tilpasse elementene med med høg presisjon (Bunkholt 2008b). Ein mer utfyllande beskrivelse av produksjonen av CLT elementer finnes blant annet i Brandner (2013).

Kapittel 2: Litteraturgjennomgang

2.1 Tre i konstruksjon

Tre er betrakta som eit ortotropisk materiale, det betyr at materialeegenskapane er ulike i tre retningar vinkelrett på kvarandre, retningar er vist i Figur 5 (Bergman 2010). Ein langsgåande retning som er parallell til fiberretninga, ein radiell som ligger vinkelrett på årringane og ein tangentiell retning som ligg tangentielt i forhold til årringane. Dei geometriske og ortotropiske aksane til trevirket samanfaller sjelden. Radiell og tangetiell retning gis dermed same eigenskapar ved dimensjonering, nevnt tvers fiber. Trevirke til bruk i konstruksjon er styrkesortert i ulike fasthetsklassar. Standarden EN-338 definerer karakteristiske eigenskapar i kvar fasthetskklasse.

Tre har størst styrke i fiberretning. Både strekk- og trykkstyrke er høgare langs fiberretning enn på tvers av fiberretninga (EN-338 2009). Kvalitetsfeil som påverkar fiberretninga er derfor styrkereduserande og avgjørande for styrken til trevirket. Den kvalitetsfeilen som har størst betydning for styrken til trebord er kvistar (Bunkholt 2008a). Kvistar gir fiberforstyrrelser slik at fibrane sin svake retning, tvers fiber, blir overført til den sterke retningen, langs fiber. Fibrane kan også ha eit retningsavvik i forhold til treborda som kommer av naturlig skjevhet i fibrane (Bunkholt 2008a). Andre kvalitetsfeil som påverker styrken er trykkved, sprekker, årringbredde og biologiske skader (Bunkholt 2008a).



Figur 5 Trebord med aksebeskrivelse ((Bergman 2010))

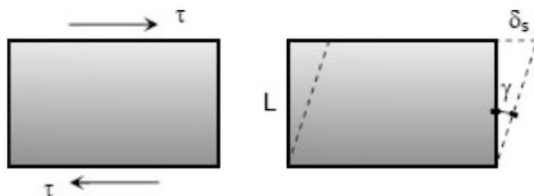
For å dimensjonera trevirke etter nyttar ein lineær- elastisk teori (EN-1995-1-1 2010), og antar at trevirket oppfører seg lineær-elastisk. Elastisitet impliserer at deformasjon frå belastning forsvinner heilt når belastninga er fjerna. Det lineær- elastiske forholdet gjeld opp til eit maksimalt spenningsnivå, over dette oppstår det plastisk tøyning eller brudd (Bergman 2010). Elastisk teori tar ikkje høyde for kvalitetsfeil i trematerialet, likevel gir teorien tilstrekkelige resultater både til berekning av stivhet og styrke (Kuklik et al. 2008b).

Eit proporsjonalt forhold mellom spenning og tøyning (Hooke's lov) kan uttrykkas med (1).

$$\sigma = S * \epsilon \quad (1)$$

Der σ = spenning, kraft/areal [N/mm^2], ϵ = tøyning [mm/mm] og S = elastisitetskoeffisient [N/mm^2]. Det er derfor nødvendig å fastsetta dei ulike elastisitetskoeffisientane til trevirke. Det trengs totalt 9 uavhengige elastisitetskoeffisientar for å beskrive dei elastiske eigenskapene til trevirke. Til å linke tøyning og elastisitetskoeffisient brukes det ein materialkonstant, modul. Til dimensjonering er det spesielt tre modular som blir nytta.

Elastisitettsmodulen E , spenning og tøyning i samme retning (E -modul). Indeks 0 og 90 blir brukt for å beskrive retning, henholdsvis langs fiber og tvers fiber. Skjærmodul, G , er skjærspenning og skjærtøyning i det same planet (G -modul). Illustrasjon av skjærtøyning er vist i Figur 6. Ein forklaring av skjærtøyning er vregning av trevirket slik at det endrar form. I fasthetsklassesstandarden EN-338 (2009) finnes desse som E -modul langs fiber ($E_{0,mean}$), E -modul tvers fiber ($E_{90,mean}$) og skjærmodul ($G_{0,mean}$).



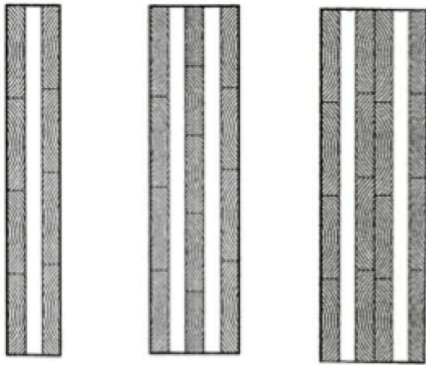
Figur 6 Illustrasjon av skjærtøyning $G=\tau/\gamma$

Fasthetsverdiane ein del variasjon i fasthetsverdiane til treprodukter. I (JCSS 2006) blir det tilråda å nytta CoV til karakteristisk E -modul på 13% for enkeltbord. (JCSS 2006). Tilsvarende er det tilråda å nytta 13% CoV på karakteristisk E -modul til limtre som eit heilt element (JCSS 2006).

Den fasthetsklassen borda er styrkesort til i EN-338 (2009), gir fasthetsverdiar som gjelder ved referanseforhold. Referanseforhold er 20 grader celsius og relativ fuktighet lik 65%. Det tilsvarende er eit fuktinnhald på rundt 12% i trematerialet (EN-384 2010). Tre er eit hygroskopisk materiale, det vil seie at det tar opp fukt frå omgivnaden. Fuktinnhaldet i tre vil variera då det søker å finne likevekt mellom relativ fuktighet i tilliggande luft. Tre har eit metningspunkt der eit høgare fuktinnhald ikkje endrar dimensjonen eller fasthetsverdiar til treet (Bergman 2010). Ved fuktinnhold lågare enn metningspunktet, krymper tre når det mister fukt og sveller når det opptar fukt. Svelling er størst i tangentiell retning, omtrent halvdelen i radiell og kun i mindre grad langs fiber. Fasthetsverdiane til treet auker generelt når treet mister fuktighet ned til ein maksimalverdi for så å tape fasthet ved ytterligere tørking. Dei største endringane skjer for fasthetsverdiar i fiberretning (Bergman 2010).

2.2 Bjelketeori

Bjelkar er lange og slanke (lengde > 4*høyde) konstruksjonsdeler som tar opp laster vinkelrett på lengdeaksen. Bjelkar er blant dei viktigaste komponentane i berande konstruksjonar (Hibbeler 2011).



Figur 7 - CLT bjelketverrsnitt med tre og fem sjikts symmetrisk oppbygging og seks sjikt med dobbelt midtsjikt.

Klassisk bjelketeori nyttas til lineær- elastiske materialar for å identifisera spenningar. Bjelketeorien gir ved å ta utgangspunkt i deformasjonen av bjelken, spenningsfordelinga i bjelketverrsnittet. Ein tar ein del av bjelken utsatt for rein bøyning, der skjærkreftene er lik null. Det forutsettes at bjelken har symmetrisk tverrsnitt om ein vertikalakse og antar at plane tverrsnitt forblir plane og normalt på lengdeaksen under bøyning (Hibbeler 2011). Deformasjon gir ein bue på bjelken med kompresjon på toppen av bjelken og strekk i botn av bjelken. Mellom desse vil det være eit område som verken har kompresjon eller strekk og heller ingen tøyning. Denne kallast nøytralaksen og er heile flaten gjennom bjelken. Ved å bruke forholdet mellom bøyemomentet og buen gir det et uttrykk for spenninga i form av det påførte bøyemomentet.

$$\sigma_m = \frac{M * y}{I} = \frac{M}{W} \quad (2)$$

Der σ_m = bøyepening i avstand y [N/mm²], M = moment [Nmm], y = avstand frå nøytraltakse [mm], I = treghetsmoment [mm⁴] og $W = I / y$ [mm³]. Dette gir ei spenningsfordeling som går lineært frå null i nøytralaksen til eit maksimum i bjelkens ytterfiber.

Uttrykk (2) er framrekna uten referanser til materialets eigenskaper eller materialvariasjon i tverrsnittet, kun at tverrsnittet er uniformt (likt) og geometrisk konstant gjennom lengdeaksen (Hibbeler 2011).

2.3 Rådane praksis

CLT er per i dag ikkje inkludert i harmoniserte europeiske standarden. Produktstandarden FprEN-16351 ligg til formell godkjenning og det arbeidas med inkludering av CLT i Eurokode 5 (Koppelhuber & Pock 2014). Forskriftsmessig bruk av CLT skjer i dag med nasjonal- eller europeisk teknisk godkjenning. Ein Teknisk Godkjenning tilfredstiller forskrifta om dokumentasjon av byggevarer for produkter som ikkje er dekkja av harmoniserte standarder (2014). Ein teknisk godkjenning inneholder blant anna produktbeskrivelse, bruksområde og produktegenskaper.

CLT elementa frå ulike produsentar er i dag svært like sjølv om dei ikkje er dekkja av ein produktstandard. Karakteristiske eigenskapar og prosjekteringsmetodar gitt i tekniske godkjenningar varierar i større grad enn produkta. Og for dei fleste produkta manglar det prosjekteringsmetodar for bruk av CLT bjelker lasta i planet. I meir generelle verk, eksempelvis CLT Handbook (Karacabeyli et al. 2013) og Handbook 1- Timber structures (Kuklik et al. 2008a) blir det kort fortalt at passende modellar må utviklas for prosjektering av CLT bjelkar.

2.4 Tidligare arbeid

Det er lite publisert data som omhandlar massivtre bjelkar. Det første arbeidet på CLT-bjelker kom frå Bejtka (2011)(tidligste funn av forfatter). Bejtka utførte ein mulighetsstudie for bruksområder til CLT-bjelkar saman med DLT- bjelkar (diagonal laminated beams). Bøyeforsøk på 60 bjelker, 24 CLT og 36 DLT ble brukt til å vurdere bjelkens eigenskapar. Resultata blei brukt til å utvikla ein datamodell basert på elementmetode til å simulere stivhet og styrke til CLT bjelkar. Modellen Bejtka nytta var ein solid modell med faste knutepunkt til å forbinde sjikta. Han nytta faste materialeigenskapar for heile modellen. Dermed fekk han ikkje med seg variasjon i lamellar og mellom lamellar. For begge bjelketypar blei det så gjort ein parameterstudie på antal langsgåande bord i høgden, forhold mellom bredden på borda og total tjukkelse. Bejtka foreslår å minimere antal langsgåande bord i høgden for både CLT og DLT bjelker for aukastivhet og bøyestyrke.

I motsetning til Bejtka viser Flaig & Blas (2014) i sine resultater ein positiv effekt ved å auke antal langsgåande bord i høgden på bøyestyrken. Flaig & Blas tar utgangspunkt i ein datamodell som opprinnelig er laga for limtre. Datamodellen blir justert til CLT geometri og dei tilførrar ein algoritme for bøyestyrke av lamellar. Ved hjelp av monte-carlo simulering blir materialeigenskapane tildelt små seksjonar av kvar lamell.

På den måten fangar modellen opp den naturlege variasjonen som finnes i trevirke. Gjennom bøyeforsøk av 60 CLT bjelker blir den nye datamodellen verifisert. Resultata frå modellen antyder ein motsatt størrelseseffekt for CLT-bjelker, altså ein auke i bøyestyrke med aukande bjelkehøgde.

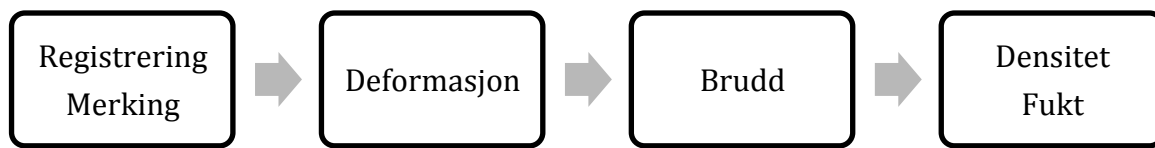
Bejtka (2011) fokuserte i størst grad på bøyestivheten til bjelkene medan Flaig & Blaß (2014) gjorde betraktningar primert av bøyestyrken til CLT bjelken. Verken Bejtka (2011) eller Flaig & Blaß (2014) kom fram til ein generell berekningsmodell.

Ein utfordringen med CLT bjelker er at skjærdeformasjonen ikkje bare avhenger av skjærdeformasjon i dei enkelte treborda, men og frå rotasjon og forskyvning i limflatene mellom sjikta (Flaig & Blaß 2013). Flaig og Blaß (2013) har presentert ein G-modul som inkluderar den ekstra skjærdeformasjonen i CLT bjelker som dei kallar $G_{eff,CLT}$. $G_{eff,CLT}$ avhenger av bredden på lamellane og bjelkens oppbygging.

Kapittel 3: Materialer og forsøk

3.1 Generelt

Fastsettelse av karakteristiske eigenskaper er regulert i standarder. Ved standardisert firepunkts bøyeforsøk på CLT bjelkane er det valgt å måle referanseegenskaper som gjeld for konstruksjonstre (EN-384 2010). Referanseegenskapar er bøyestivhet, bøyestyrke og densitet. Forsøka er utført etter metoder beskrevet i standarden EN-408, "Trekonstruksjoner- Konstruksjonstre og limtre - Bestemmelse av noen fysiske og mekaniske eigenskaper". EN-408 er i overensstemmelse med forsøksmetodar i den kommande produktstandarden Fpr-EN-16351. Til analyse av forsøksresultata er følgande antakelsar etter Fpr- EN-16351 brukt. Limflatane som forbinder langsgåande og tverrgåande sjikt er faste. Spenninga er berekna med lineær- elastisk teori. For tverrgåande sjikt er $E_{90,mean} = 0 \text{ N/mm}^2$. CLT bjelker er testa i to forsøksserier med ulik bjelkehøgde for å sjå etter høgdeeffekter. Forsøka har følgd punkt 8, 9 og 19 i EN-408. Alle forsøka i denne oppgåva blei utført i juni 2015 på trelaboratoriet ved Norges miljø-biovitenskapelige universitet (NMBU) av undertegna. Hovudtrinna i bøyeforsøket er vist i Figur 8. Først blei bjelkane registrert og markert. Det blei så målt deformasjon på bjelkane av påført belastning i to punkter. Deretter blei bjelkane påført belastning til brudd og belastning målt. Avslutningsvis blei det skore ut prøvestykker for måling av densitet og fuktinnhald.



Figur 8 Oversikt over trinna i forsøket. Først registrering av forsøksbjelken og markering. Det ble så målt deformasjon på bjelken av påført belastning i to punkter. Deretter blei bjelkene påført belastning til brudd. Avslutningsvis blei det skore ut prøvestykker for måling av densitet og fuktinnhold.

3.2 Val av bjelkar

Målet med forsøka var å bestemme karakteristiske verdier til CLT bjelkane. Omfanget på dette arbeidet er for lite til å kunne fastslå generelle verdier gyldige for alle typar CLT bjelker. Samtidig var ønske om å sjå etter høgdeeffekter som kunne påverka verdiane til CLT bjelker. Det blei derfor prøvd å velge ut bjelketverrsnitt som kunne svara på problemstillinga. Karakteristiske verdier skal framreknas etter metodar i (EN-14358 2007). Størrelsen på forsøksserien blei bestemt med bakgrunn i anbefalingar i (Fpr-EN-16351 2015). Der er det gitt antal bjelkar for ulike oppbyggingar av CLT for bestemmelse karakteristiske verdier i planet.

Først blei det undersøkt om det var ytre begrensingar som det måtte tas hensyn til. Dimensjonen til bjelkane i bøyeforsøka er gitt ved eit høgde - lengde forhold. Bjelkelengden skal vere 19 gonger bjelkehøgden, men kan reduseras til minimum 16 gonger bjelkehøgden (EN-408 2012). Forsøksbjelkane måtte velgas innføre dette dimensjonskravet for å få standariserte forsøk.

CLT elementene som bjelkane skulle skjærast frå er, begrenset av trevirkets lengde, opp til 5400mm. lange. Bjelkehøgde på 337mm. kunne da velgas innføre minimum tillatt høgde-lengde forhold. Ved å følge tilrådinga på 19 gonger bjelkehøgde gav det 284mm. bjelkehøgde. Bjelkehøgde her tilsvarer elementbredden i produksjonen, denne er 1220mm. og dermed ingen begrensande faktor. Utstyret på trelaboratoriet ved NMBU blei kontrollert med hensyn til dimensjonar, alle desse ytre måla låg innføre kapasitetar i trelaboratoriet.

Det blei først vurdert bjelker med likt antal sjikt, med ulik bjelkehøgde. Bjelkehøgden skulle følge bredden på borda i sjikta. Ein forsøksserie med 2 bord høge bjelkar og ein forsøksserie med 3 bord høge bjelkar. Det ville kunne svare på spørsmålet om høgdeeffekt på CLT bjelkar. Dette viste seg vanselig å framdrive av ulike årsaker. Først og fremst skjer maskinell kapping med litt ulikt startpunkt på elementene. Dette kunne la seg gjøre med manuell kapping, men med litt unøyaktig dimensjon på treborda eller plassering i elementet ville det føre til delvis kappede bord.

Bredden på borda i langsgående sjikt var 120mm.. Då det ikkje var mogleg å få til heile bord blei det bestemt at forsøksbjelkane skulle vere 200mm. og 300mm. høge. Med desse høgdeane ville det gi like mange eller fleire fuger mellom borda som alternativet som først blei vurdert. Og tilsvarande like mange limflater mellom sjikta. På 200mm. ville det minimum bli ei limfuge, og på 300mm. minimum to limfuger mellom borda i langsgående sjikt. Det blei valgt å bruka 10 forsøksbjelker til kvart bjelketverrsnitt. I tillegg 1-3 bjelkar til kvart tverrsnitt for sikkerhetskyld i tilfelle det blei utført feil under forsøka. Forsøksbjelkane er beskrevet i neste delkapittel.

3.3 Forsøksbjelker

Totalt 23 clt-bjelker blei testet i to forsøksserier, L-2 og L-3. Bjelkane i begge forsøksseriane hadde lik oppbygging med fem sjikt. Begge tverrsnitta er vist i Figur 9. Yttersjikt og midtsjikt med fiberretning orientert langs med bjelkeaksen og mellomliggende sjikt med fiberretning 90 grader på bjelkeaksen.

Antal bjelkar og faktisk dimensjon i forsøksseriane var:

- Serie L-2-n: 11 bjelkar med $L \times H \times B = 3560 \times 200 \times 100 \text{ mm}^3$

- Serie L-3-n: 12 bjelkar med $L \times H \times B = 5340 \times 300 \times 100 \text{ mm}^3$



Figur 9 Venstre: tverrsnitt L-3 (300x100mm²). Høgre: tverrsnitt L-2 (200x100mm²).

Produksjonen har foregått på følgende måte. Bjelkane ble ikkje produserte enkeltvis, men er skorne ut av 1220mm breie elementer. Alle fem sjikta består av bord med dimensjon 20 x 122 mm². Borda i langsgående sjikt er fasthetsklasse C24. Borda i kryssjikt er ikkje styrkesortert. Mellom sjikta er det brukt ca. 300 gram lim per m² av typen melaminureaformaldehyd (MUF). Elementa er avslutningsvis er presset med eit trykk på 0,6N/mm².

Bjelkane er skorne ut av elementa fortløpande, uten noko hensyn til bordplassering i sjikta. Det gjere at bredden på borda langs kanten av bjelkane vil varierer frå bjelke til bjelke. Dette vil også vere tilfelle i vanlig produksjon og det blei ikkje gjort noko for å påverka plassering av kuttet i elementa. Serie L-3 er skorne ut med CNC- fres frå fire elementer. Frå kvart av dei fire elementa fekk ein tre bjelker til L-3 og ein bjelke til L-2. Resten av bjelkene til serie L-2 er skorne ut manuelt med sirkelsag på NMBU frå 3 elementer.

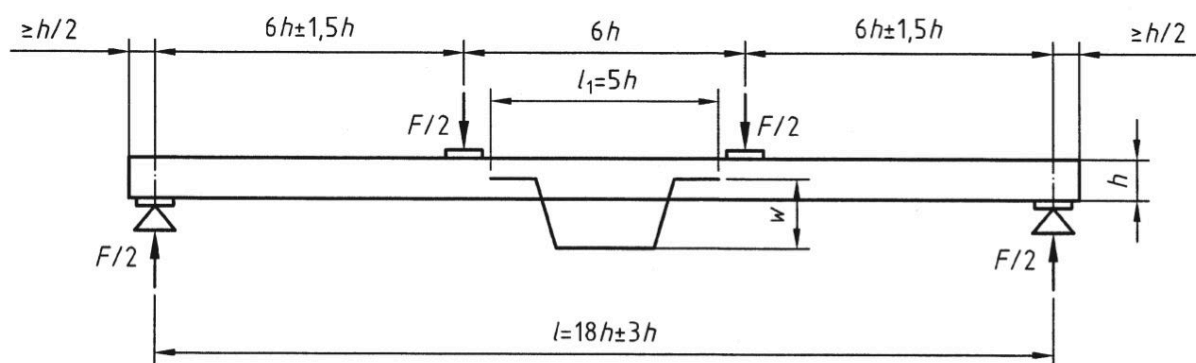
Bjelkar og element blei levert til NMBU utan emballasje mai 2015. Det blei ikkje utført klimatisering av bjelkane før forsøk. Bjelkar er blitt lagra i isolert garasje frå 1-2 månader fram til forsøk, Figur 10. Under forsøka blei det frakta to og tre bjelker om gongen over til trelaboratoriet, der dei blei testa i løpet av ein til tre dagar. Bjelkene blei før forsøka registrert og merket. På kvar bjelke blei det notert kvifor eit massivtreelement dei kom frå, og kva plassering den enkelte bjelke hadde hatt i dei ulike elementene. Det blei notert kva side av bjelken som var utsatt for strekk under bøyning.



Figur 10 Bjelkar og element på lager før forsøk.

3.4 Registrering og merking

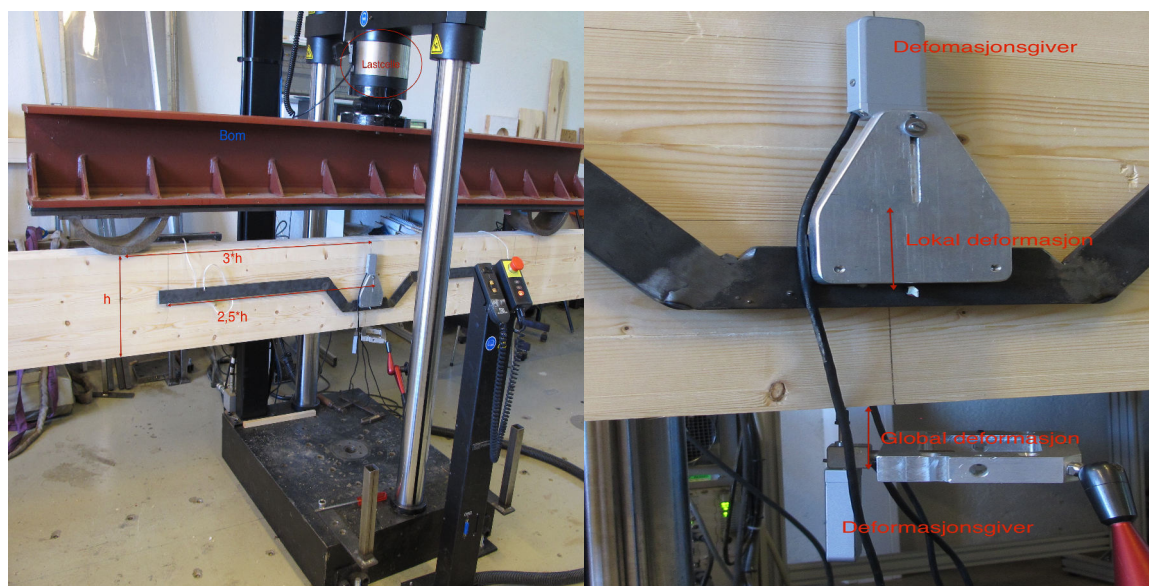
Tverrsnittet til bjelkane blei fastslått ved å berekne middelveidien frå målingar av høgde og breidde tre stader på bjelken. Dei blei målt ein kvart innpå bjelken fra kvar side og i senter av bjelken. Høgden på borda plassert ytterst på strekk, og trykkside blei målt på den eine sida av kvar bjelke. Før bjelken blei plassert i forsøksriggen blei det markert oppleggspunkter, belastningspunkter og stad for plassering av deformasjonsgiverar på bjelkane. Markeringane blei målt ut frå den same enden på alle bjelkane. Deretter blei bjelkane plassert fritt opplagt i forsøksriggen på 120mm. lange stålplater i kvar ende. Begge stålplatene er frie til å rotere, og det eine er fritt til å gli i bjelkens lengderetning. Det er to belastningspunkter i firepunkts bøyeforsøk, desse ligg symmetrisk i forhold til midten av bjelkespenet, Figur 11. Avstanden mellom dei to belastningspunktene var 1800 mm. for serie L-3 og 1200 mm for serie L-2. Mellom opplegg og belastningspunkt var avstanden 1620mm for L-3 og 1080mm for L-2. Markeringane på bjelken sikre korrekt plassering på opplegga og at belastningspunktene traff der dei skulle. Merkene gav og sjanse til å kunne oppdage om det skulle oppstå forskyvningar på utstyret.



Figur 11 Oppsett av fire-punkts bøyeforsøk med avstander og registrering av lokal E-modul (EN-408 2012).

Forsøksriggen som blei nytta består av ei hydraulisk datastyrt lastpresse (Instron) med justerbare opplegg montert på gulvet i laboratoriet, Figur 12. Lastpressa fordeler lasten til to belastningspunkter ved hjelp av en påmontert bom med justerbare belastningspunkter. Belastningspunktene blei nytta direkte på bjelken utan stålplater i mellom for å hindre mogleg inntrykning på bjelken. Mellom lastpressa og bom er det montert ei lastcelle med kapasitet på 300kN som målar kraften som til ei kvar tid blir påført av lastpressa og sender dette til datamaskinen. Styling av lastpressa og alle signaler fra forsøksriggen med tilhøyrande utstyr blei kontrollert og behandla av LabVIEW software.

3.5 Deformasjonsforsøk



Figur 12 Oversiktsbilde av forsøksriggen til venstre med detalj høyre i bilde med deformasjonsmålere.

EN-408 foreslår to ulike metoder for å måle deformasjon i bøyning, lokal og global. I denne oppgåva blei begge måle metodene nytta, som beskrevet i EN-408 (2012) punkt 9 og 10. Lokal deformasjon måles i nøytralaksen i det skjærfrie området mellom belastningspunktene. Området måler fem ganger bjelkehøgden om midten på bjelkespennet, Figur 11. Det blei laga to bøylar i stål med feste til deformasjonsgivar. Tre skruar blei satt i bjelkens nøytralakse på kvar side, to i ytterkant av måleområdet og ein i midten på bjelkespennet. Bøylane blei plassert liggende på skruene i ytterkant slik at deformasjonsgiveren fekk kontakt med den midterste skruen.

Global deformasjon målar den totale deformasjonen til bjelken. Den ble målt med ein deformasjonsgivar under midten av bjelkespennet, Figur 12. Deformasjons-giveren ble montert i ein arm som igjen ble festet til lastpressen med magnet. Dei tre deformasjonsgiverane som blei nytta til registrering av lokal- og global deformasjon var av typen Heidenhain-metro MT med 12mm. vandring og ein nøyaktighet på $\pm 0.2 \mu\text{m}$ i følge databladet. Signala frå deformasjonsgiverane blei mottatt og lagra i LabView saman med data frå lastcella. Første bjelke i kvar forsøksserie blei brukt til å justere belastninga og hastigheten til lastpressa. Belastninga påført under deformasjonsmåling skal i følge EN-408 ikkje overstige 40 prosent av estimert bruddlast eller gjere skade på bjelken. Utan egne erfaringstall frå CLT bjelker, blei bruddlast estimert med verdiar fra Flaig og Blaß (2014). Heile forsøksserie L-3 blei testet ferdig før forsøksserie L-2 blei testet.

Bøyestyrken til langsgående bord blei estimert til 45N/mm^2 og bruddlast til 50kN . Hastigheten til lastpressa blei forsøkt justert slik at ein oppnår bruddlast etter fem minutt. Hastigheten blei satt til 12mm/minutt med E-modul til C24 fra EN-338 (2009). For å unngå skade på bjelken blei L-3-A belasta med 15kN , 30% av estimert bruddlast. Belastninga blei påført kvar bjelke i tre repetisjonar. I første runde blei det ikkje registrert noko målinger. Denne serien blei brukt for å kontrollere at deformasjonsgiverane gav signaler og at utstyret skulle "sette seg". I dei to påfølgande repetisjonane blei data frå deformasjonsgiverne innhentet.

Med data fra L-3-A, blei det for resten av forsøksserien L-3 valgt 18kN belastning og hastighet lik 14mm/minutt . I forsøksserie L-2 blei bjelke L-2-A brukt til å justere hastighet og belastning. Med middelverdier fra forsøksserie L-3, ble L-2-A belastet med $10,5\text{kN}$ og 12mm/minutt . $10,5\text{kN}$ ble beholdt til og med bjelke L-2-3. Fra bjelke L-2-4 ble belastningen endra til 12kN . for å få eit større måleintervall. Hastigheten ble etter L-2-A endra til 10mm/minutt , denne hastigheten ble nyttet til resten av forsøksserien. Etter tre repetisjonar med belastning blei deformasjonsmålerar og anna utstyr fjerna frå bjelkane. Data frå deformasjonmålingane vart så lagra.

Framrekning av lokal E-modul, $E_{m,l}$ og global E-modul $E_{m,g}$ er gjort med bjelketeori med last-deformasjonsdata frå 10% av faktisk bruddlast (F_{\max}) og ikkje estimert bruddlast (F_{est}). Frå kvar deformasjonsmåling, totalt seks per bjelke, er ein K-verdi framrekna med minste kvadraters metode (EN-408 2012). K-verdien er forholdet mellom last og deformasjon i N/mm. Det blei kontrollert at alle K-verdier hadde korrelasjonskoeffisient lik 0,99 eller betre.

Middelverdien til fire K-verdiene er brukt til framrekning av $E_{m,l}$ etter uttrykk (4). Lengden på last-deformasjonsintervallet til K-verdiene varierte ettersom faktisk F_{\max} blei nytta. Med start på 10% gjekk forsøksserie L-2 i snitt opp til $0,3 \cdot F_{\max}$ og i L-3 til $0,33 \cdot F_{\max}$ i snitt. Bjelke L-2-7 manglar data fra last-deformasjon, der er K-verdi tatt frå skjermdump av styringsprogrammet. Den K-verdien inneholder heile deformasjonsintervallet og er ikkje kontrollert for korrelasjon.

$$E_{m,l} = \frac{K_{mid} a l_1^2}{16I} \quad (3)$$

I uttrykk (4) er a = avstand mellom opplegg og lastpunkt, l_1 = måleområde deformasjon, I = treghetsmoment.

Last- deformasjonsintervallet som ble nytta til $E_{m,g}$ gav i fleire tilfeller for låg korrelasjon for global last- deformasjon, spesielt for forsøk L-3. Den totale deformasjonen var større enn deformasjonsgivaren sin vandring på 12mm..

Deformasjongivaren blei derfor plassert litt i underkant av bjelkene. $E_{m,g}$ blei framrekna med det lengste intervallet over $0,1*F_{max}$ som gav korrelasjonskoeffisient lik 0,99 eller bedre. Middelerdien til målingene er brukt i uttrykk (11). Untatt bjelke L-3-A, som har global K-verdi fra kun ein måling som går under $0,1*F_{max}$. Det var nødvendig for å få høg nok korrelasjonskoeffisient.

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(\frac{2}{K_{mid}} - \frac{6a}{5Gb^2h} \right)} \quad (4)$$

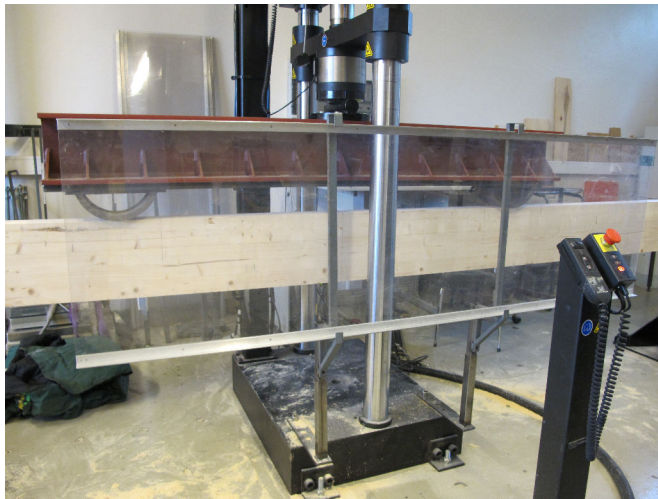
Her er b = bjelkebredde, h = bjelkehøyde, l = bjelkelengde, G = G-modul. Den globale deformasjonen er eit resultat av bøye- og skjærdeformasjon, men $E_{m,g}$ er her framrekna med G-modul lik uendelig (sjå kapittel 2.1). $E_{m,l}$ er målt over eit skjærfritt område mellom lastpunktene og registrerar kun bøyedeformasjon. Ved å bruke forskjellen mellom $E_{m,l}$ og $E_{m,g}$ er det framrekna ein effektiv G-modul, $G_{eff,CLT}$ for heile bjelketverrsnittet. Det er gjort med å justera $G_{eff,CLT}$ til $E_{m,l}$ og $E_{m,g}$ gir same verdier. Dette er kun utført for forsøk L-2.. Det lot seg ikkje gjere med L-3 grunna dei framrekna verdiane for $E_{m,g}$ var høgare enn $E_{m,l}$.

Berekning av 5 %- fraktilane, $f_{m,0,05,EN}$ og $f_{m,5\%,log}$ frå resultatata i forsøka er gjort ved bruk av EN-14358 (2007) og MS excel. EN-14358 gir retningslinjer for berekning av karakteristisk 5%-fraktil for ein prøveserie av trebaserte produkter. Den karakteristiske verdien bestemmes med:

$$E_{m,0,05,EN} = e^{(\bar{y} - k_s s_y)} \quad (5)$$

der m_k = karakteristisk 5%- fraktil, \bar{y} = middelerdi, k_s = fordelingsfaktor, s_y = standardavvik. $f_{m,5\%,log}$ er framrekna i MS excel med funksjonen lognorm.invers. Det er valgt å vise begge 5%-fraktilane.. $f_{m,5\%,log}$ er den faktiske 5%- fraktilen med utgangspunkt i middelerdi og standardavviket. Begge 5%- fraktilane antar at logaritmen til E-modul er normalfordelt (EN-14358 2007).

3.6 Bruddforsøk



Figur 13 Bjelke i forsøksrigg under bruddforsøk

Bruddforsøk er ein destruktiv forsøksmetode der en påfører bjelken belastning til den går i brudd (Figur 13). Ei plate blei satt føre forsøksriggen til beskyttelse frå trefliser. Prosedyre for utførelse forsøk til bestemmelse av bøyestyrke er gitt i EN-408 (2012) punkt 19. Brudd ble definert der lastcella fikk eit tap på 30% av målt maksimal belastning. Hastigheten til lastpressa er den same som ble brukt i deformasjonsforsøka. Forskyvninga til lastpressa og påført belastning blir registrert under forsøket. Alle brudd blei dokumentert med bilde og/eller video.

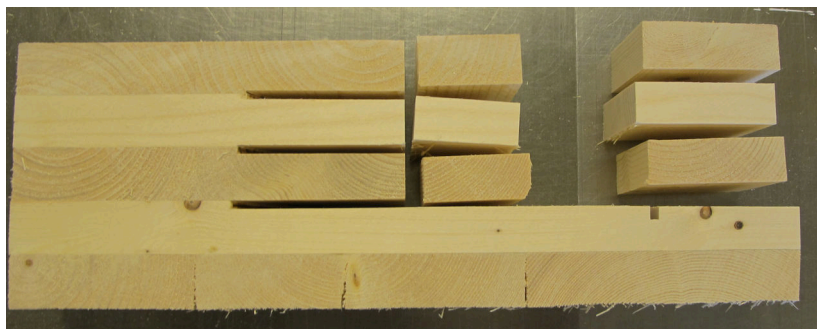
Tid til brudd er rekna fram med hastigheten til lastpressa. Bøyestyrke er bereknet etter bjelketeori for heile tverrsnittet og netto tverrsnitt etter uttrykk (6). Netto tverrsnitt er tverrsnittet til de langsgående bordene. Netto tverrsnitt er ikkje målt, men ved å bruke 60% av målt bjelkebredde.

$$f_{m/m,net} = \frac{a * F_{max}}{2 * W_{t/n}} = \frac{a * F_{max}}{2 * \frac{b_{t/n} * h^2}{6}} \quad (7)$$

Der $W_{t/n}$ = arealtrehetsmomentet i mm^3 (t- total, n- netto).

3.7 Densitet og fuktmåling

Etter at bruddforsøk var utført blei det skore ut små prøvestykker til måling av fuktinnhald og densitet frå kvar bjelke. Prøvestykkka var minimum 20mm i fiberretning og skåret av frå yttersjikt, kryssjikt og midtsjikt. Dei blei skorne ut av bjelken frå nærmaste uskadde område inntil bruddet. Densitet og vekt blei målt før prøvestykkka blei plassert i tørkeskap. Tørkeskapet holdt ein temperatur på 103 grader celsius og prøvane låg i minimum 12 timar. Dei tørre prøvestykkka blei så tatt rett ut frå tørkeskapet og vegne varme etter prosedyre i EN-13183-1 (2002). Frå bjelkane i serie L-3 blei det tatt ut prøvestykker to stader i tverrsnittet, frå øvre tredjedel og midtre tredjedel (Figur 14). Frå bjelke L-3-A og L-3-1 blei det kun tatt ut eit prøvestykke i sjikt 1. For bjelkane i L-2 blei prøvestykkene kun tatt fra midtre tredjedel. Det var ikkje mogleg å få til to tilstrekkeleg store prøvestykker sidan dei skulle takast i eit område utan lim.



Figur 14 Prøvestykker til måling av fuktinnhald og densitet

Fuktinnhaldet for forsøk L-2, blei framrekna med middelveidiar basert på eit prøvestykke frå kvart sjikt. For forsøk L-2 i er det 11 målingar til kvart sjikt. Middelveidiane til forsøk L-3 er framrekna frå to prøvestykker i kvart sjikt. I forsøk L-3 er det fleire målingar per sjikt. Det er for sjikt 1, 22 målingar, i sjikt 2 og 3, 24 målingar for begge. Alle målingane er tatt frå same bjelkesnitt. Det blei ikkje registrert kor på bjelkane snittet blei tatt.

Fuktinnhaldet er framrekna med prosentvis vektendring mellom tørka prøvestykker og ferske prøvestykker (EN-13183-1 2002).

Framrekna densiteten er relativ densitet, bestemt med det fuktinnholdet prøvestykket hadde under måling. Det er målt densitet frå like mange prøvestykker i L-2 og L-3. Det blei ikkje målt densitet på prøvestykkka frå kanten av bjelketverrsnitta i forsøk L-3. Densiteten er framrekna med arkimedes prinsipp:

$$\rho_{relativ} = \frac{Vekt}{Vekt - Vekt nedsunke i vatn} \quad (8)$$

Kapittel 4: Resultater

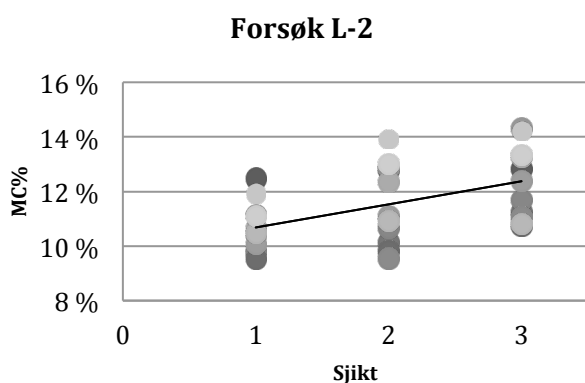
4.1 Fuktinnhold og densitet

I Tabell 1 viser middelerdiar av målt fuktinnhald og densitet til sjikt 1-3, delt i respektive forsøk. Karakteristisk densitet for langsgåande sjikt er $\rho_{k,EN} = 380 \text{ kg/m}^3$.

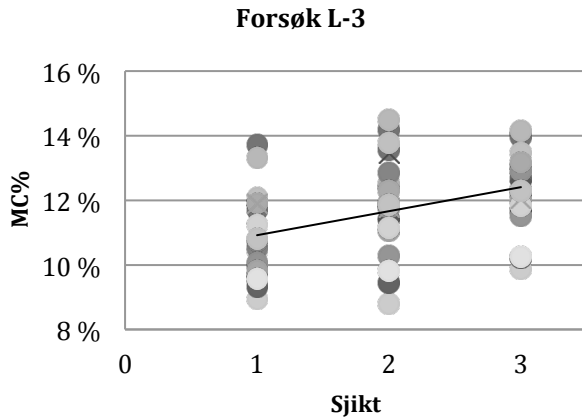
Tabell 1 Middelerdiar til fuktinnhald og densitet fordelt i sjikt fra forsøk L-2 og L-3.

	Forsøk L-2			Forsøk L-3		
	Sjikt nr.			Sjikt nr.		
	1	2	3	1	2	3
Fuktinnhald [%]	10,67	11,56	12,36	10,81	11,88	12,40
Densitet [kg/m^3]	432	457	443	436	460	483

I Figur 15 og Figur 16 er fuktinnhaldet til alle sjikta plotta for kvar bjelke.. Trendlinja er lineær og basert på middelerdiar til kvart sjikt. Forskjellen i middelerdiar for fuktinnhaldet frå ytterkant i sjikt 1 til senter av bjelken i sjikt 3 var 1,7% i L-2 og 1,6% i L-3.



Figur 15 Fordeling av fuktinnhald frå yttersjikt 1, til senter sjikt 3, forsøk L-2. Trendlinja er basert på middelerdiar.



Figur 16 Fordeling av fuktinnhald frå yttersjikt 1, til sentersjikt 3, forsøk L-3. Trendlinja er basert på middelerverdier.

4.2 Deformasjon

Lokal E-modul for heile bjelketverrsnittet og netto bjelketverrsnitt er presentert under i Tabell 2 for alle bjelkane samla. I Tabell 3 lenger ned er resultatata frå deformasjonsforsøka vist for kvar bjelke.

Tabell 2 Middelerverdi, standardavvik, 5 %-fraktil for $E_{m,l}$ og $E_{m,l,net}$ samla for alle forsøksbjelkene.

Alle bjelker		
	$E_{m,l}$	$E_{m,l,net}$
	[N/mm ²]	[N/mm ²]
Middel	7646	12744
St.avvik	654	1090
$E_{m,0,05,EN}$	6479	10798
$E_{m,5\%,log}$	6570	10950

Resultata frå forsøk L-2 står i venstre del av Tabell 3 og resultatata frå forsøk L-3 til høgre. I første kolonne i venstre og høgre del vises bjelkenummeret. $E_{m,l}$ er lokal E-modul for heile bjelketverrsnittet, $E_{m,l,net}$ er lokal E-modul for netto bjelketverrsnitt og $E_{m,g}$ er global E-modul for heile bjelketverrsnittet. Under kvar forsøksserie er det vist middelerverdi for resultatata, standardavvik og 5 %-fraktilar. Resultata frå $E_{m,g}$ i forsøk L-3 gir verdier som ikkje er forventeta. Det ser ut til å skyldast ein systematisk målefeil.

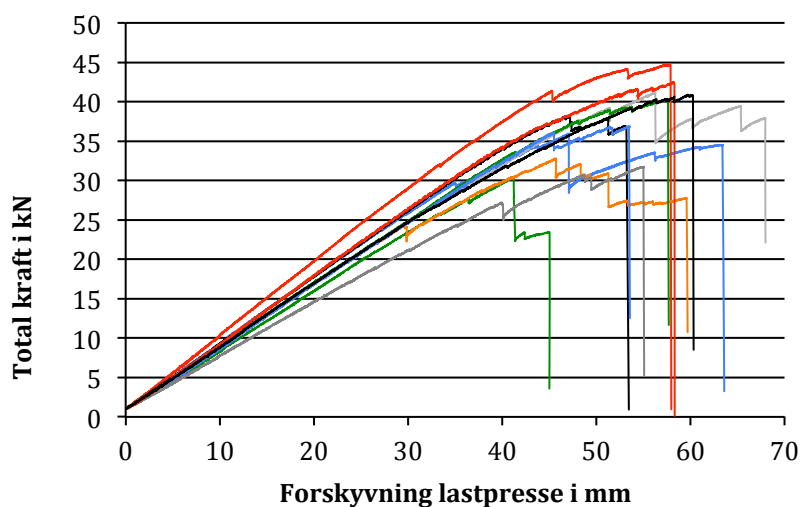
Tabell 3 $E_{m,l}$, $E_{m,l,net}$ og $E_{m,g}$ med middelerdi, standardavvik og 5 %-fraktiler for forsøk L-2 og forsøk L-3.

Forsøk L-2				Forsøk L-3			
Bjelke	$E_{m,l}$	$E_{m,l,net}$	$E_{m,g}$	Bjelke	$E_{m,l}$	$E_{m,l,net}$	$E_{m,g}$
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
L-2-A	7147	11912	6749	L-3-A	8469	14116	9210**
L-2-1	7912	13186	7549	L-3-1	8824	14707	9527
L-2-2	7682	12803	7173	L-3-2	8199	13665	8946
L-2-3	9182	15304	8568	L-3-3	7647	12746	8386
L-2-4	7730	12884	7558	L-3-4	7646	12744	7744
L-2-5	7305	12176	7054	L-3-5	7193	11989	7267
L-2-6	7319	12199	7030	L-3-6	6696	11160	7267
L-2-7*	7343	12239	7019	L-3-7	8054	13423	8556
L-2-8	6661	11103	6079	L-3-8	6998	11664	7577
L-2-9	7926	13210	7468	L-3-9	8370	13951	9214
L-2-10	7404	12340	7011	L-3-10	7256	12094	7612
				L-3-11	6894	11490	7593
Middel	7601	12669	7205	Middel	7687	12812	8334
St.avvik	639	1065	614	St.avvik	693	1155	770
$E_{m,0,05,EN}$	6394	10657	6015	$E_{m,0,05,EN}$	6338	10564	6839
$E_{m,5\%,log}$	6634	11057	6251	$E_{m,5\%,log}$	6603	11006	7132

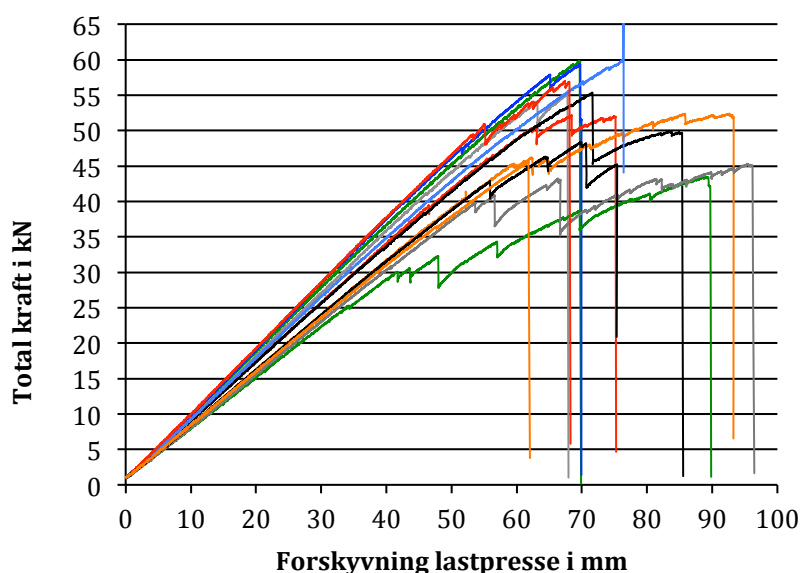
* feil ved måling, framreknet med K-verdier fra heile deformasjonsintervallet. ** framrekna med K-verdi fra en last-deformasjon repetisjon.

4.3 Bøystyrke

Alle bjelkane gikk i bøyebrydd mellom belastningspunkta. Alle bjelkane hadde strekkbrydd i underkant av bjelken. På enkelte bjelkar kunne ein sjå kompresjonsbrydd i toppen av bjelken. Men det er ikkje fastslått om brydda starta i kompresjon- eller strekksone. Middel bøyefasthet, $f_{m,net}$, var 49,8 N/mm². Karakteristisk bøyefasthet, $f_{m,k,EN}$, etter EN-14358 (2007) var 39,3 N/mm². Bryddutviklinga til forsøksbjelkane er vist i Figur 17 og Figur 18. Der er det plotta total kraft i kN. mot forskyvning i lastpressa i mm.. Bryddutviklinga til L-3-7 viste eit kraftig hopp før brydd, den gikk rett opp til 65kN.



Figur 17 L-2 bruddutvikling



Figur 18 L-3 bruddutvikling

Resultata til kvar bjelke er vist i Tabell 4 og er satt opp etter same mønster som Tabell 3. Her er F_{max} bruddlast, f_m er framrekna bøyefasthet for heile bjelketverrsnittet og $f_{m,net}$ er framrekna bøyefasthet for netto bjelketverrsnitt. Parantes bak F_{max} viser tid til brudd for bjelkane. Alle bjelkane oppnådde brudd innanfor intervallet 5 ± 2 minutt. I radene i botn av tabellen er det vist middelvei med standardavvik for kvar forsøksserie. $f_{m,k,EN}$ er karakteristisk bøyefasthet framrekna med EN-14358 (2007) og $f_{m,5\%,log}$ er 5 %-fraktil framrekna med lognormal fordeling, desse er vist i dei to nederste radene.

Tabell 4 F_{max} , f_m og $f_{m,net}$ med middelvei, standardavvik og 5-prosentil for forsøk L-2 og forsøk L-3.

Forsøk L-2				Forsøk L-3			
Bjelke	F_{max} [kN]	f_m [N/mm ²]	$f_{m,net}$ [N/mm ²]	Bjelke	F_{max} [kN]	f_m [N/mm ²]	$f_{m,net}$ [N/mm ²]
L-2-A	30,39(3:26)	24,8	41,3	L-3-A	59,76 (5:47)	32,8	54,8
L-2-1	35,92(4:42)	29,5	49,1	L-3-1	59,39 (4:58)	32,6	54,3
L-2-2	41,12(5:37)	33,8	56,4	L-3-2	55,19 (4:50)	30,1	50,2
L-2-3	44,71(5:45)	36,8	61,3	L-3-3	52,19 (4:52)	28,2	47,1
L-2-4	38,17(4:43)	31,0	51,7	L-3-4	55,39 (5:06)	30,1	50,1
L-2-5	32,75(4:34)	26,5	44,3	L-3-5	52,37(6:07)	28,3	47,3
L-2-6	40,31(5:45)	32,4	54,0	L-3-6	43,46 (6:22)	23,8	39,8
L-2-7	36,88(5:21)	29,9	49,8	L-3-7	65,67 (5:27)	35,8	59,7
L-2-8	31,72(5:28)	25,8	43,1	L-3-8	45,28 (6:47)	24,8	41,4
L-2-9	42,49(5:49)	34,1	56,9	L-3-9	56,93 (4:48)	31,0	51,8
L-2-10	40,88(5:58)	32,9	54,8	L-3-10	48,39 (4:58)	26,4	44,0
L-3-11				L-3-11	45,47 (4:24)	24,7	41,2
Middel	37,76	30,7	51,2	Middel	53,30	29,1	48,5
St.avvik	4,67	3,8	6,3	St.avvik	6,74	3,7	6,1
$f_{m,k,EN}$		23,4	39,0	$f_{m,k,EN}$		22,1	36,8
$f_{m,5\%,log}$		24,7	41,3	$f_{m,5\%,log}$		23,4	39,0

F_{max} bruddlast, f_m bøyestyrke, $f_{m,net}$ netto bøyestyrke,

4.4 Dimensjonar

Tverrsnittsmål til den enkelte bjelke er vist under i Tabell 5. I forsøk L-3 er alle bjelkane skorne av CNC maskin. Det gjeld også for bjelkane L-2-A til L-2-3. Resterande bjelkar i forsøk L-2 er skorne ut manuelt med sirkelsag. I siste kolonne er det vist målt høgde på nedre bord til bjelkane, altså det strekkbelasta bordet under bøyning.

Tabell 5 Målt dimensjon til bjelkane, bredde og høgde. Nedre bord er høgden på strekkbelasta bord i bøyning.

Forsøk L-2				Forsøk L-3			
Bjelke	Bredde [mm]	Høgde [mm]	Nedre bord [mm]	Bjelke	Bredde [mm]	Høgde [mm]	Nedre bord [mm]
L-2-A	99,6	199,7	53,6	L-3-A	99,0	298,7	5,1
L-2-1	98,9	199,7	26,8	L-3-1	98,9	299	111,3
L-2-2	99,3	199,0	26,3	L-3-2	99,4	299	112,3
L-2-3	99,3	199,0	51,7	L-3-3	100,1	299,3	65,5
L-2-4	100,2	199,3	114,1	L-3-4	100,2	298,7	49,6
L-2-5	99,8	200,0	114,9	L-3-5	99,8	299,7	64,7
L-2-6	100,7	200,0	114,4	L-3-6	98,9	299,0	66,6
L-2-7	99,8	200,0	81,9	L-3-7	99,5	299	53,1
L-2-8	99,9	199,3	76,6	L-3-8	98,9	299,3	62,3
L-2-9	100,7	200,0	50,2	L-3-9	99,1	299,7	62,6
L-2-10	100,6	200,0	27,5	L-3-10	99,6	299	6,1
				L-3-11	100,0	299,3	110,2
Middel	99,9	199,6		Middel	99,45	299,1	

Kapittel 5: Diskusjon

5.1 Bøyestivhet

$E_{m,L,net}$ for alle bjelkene fekk middelerdi på 12744 N/mm². Den objektive forskjellen i middelerdien mellom dei to bjelketypane var 1% høgare for L-3. Minste og største verdi blei målt i forsøksserie L-2, med minste lik 11103 N/mm² og høgaste lik 15304 N/mm². Variasjonskoeffisienten (CoV) var størst for L-3 med 9% og 8% for L-2. CoV er standardavvik over middelerdi og gir eit relativt bilete på spredninga i målingane. Alle borda er opprinneleg styrkestortert til fasthetsklassen C24, der $E_{0,mean}$ er 11000 N/mm² (EN-338 2009).

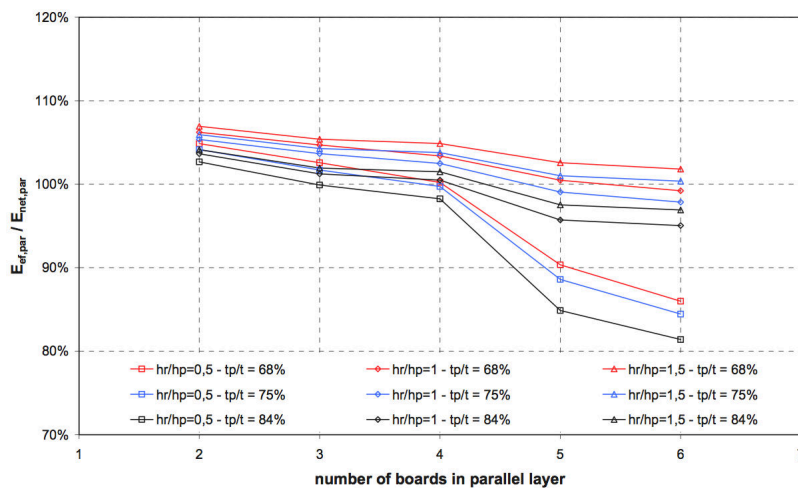
Bord og lamellar i fasthetsklasse C24 blir brukt i langsgåande sjikt av fleire produsentar, blant anna KLH, Binderholz, Agrop Nova, Martinsons, Stora Enso og Haas (Approvals 2011; Approvals 2012; Approvals 2013a; Approvals 2013b; Approvals 2013c; Approvals 2014). I dei ulike produsentanes ETA er bøyestivhet angitt fra 11000-12500 N/mm². Haas, Binderholz og Martinsons sine elementer er gitt E-modul lik 11000 N/mm². Med same basemateriale er Novatop gitt 11600 N/mm² og Stora Enso 12500 N/mm². KLH nyttar seg og av C24, men har ein ytterligere intern sortering. KLH elementa har middel E-modul lik 1200 N/mm² (testresultat var opp mot 12500N/mm²).

Bjelkane Bejtka (2011) utførte forsøk på, bestod av bord i langsgåande sjikt sortert til ein middel E-modul lik 11900 N/mm². Resultata hans for lange CLT bjelkar var 12239 N/mm² (CoV 11%). Flaig og Bläß (2014) fekk blant anna 12858 N/mm² (CoV n.a.) for den bjelketypen som ligg tettast opp til dei som er testa i denne oppgåva. Det blir ikkje rapportert om middel E-modul til lamellane, men dei var sortert til $E_{dyn} \geq 11550$ N/mm².

For å samanlikna resultata i dei to forsøksserieane er det nytta ein T-test. Teststatistikken gav $T_{test} = 0,29 < T_{crit} = 2,07$ på 5% signifikansnivå. Det er brukt logaritmiske verdiar av E-modul, som er antatt normalfordelt i ein two-sample t-test. T-testen evaluerar forskjellen i middelerdien mellom to grupper. Null hypotesen: L-2 = L-3. Teststatistikken frå $E_{m,i}$ gav ingen ikkje grunn til å forkaste null hypotesen om ingen forskjell med 5% signifikansnivå.

Variasjonskoeffisienten for E-modul kan forventas å ligge på 13% av fasthetsverdi både for konstruksjonstre og limtre (JCSS 2006). For alle bjelkane i forsøket her er CoV mellom 8 og 9%. Det kan tyda på ein homoganiseringseffekt i bjelken. Eller at treborda kjem frå eit parti med liten spredning i E-modul. $E_{m,5\%,log}$ for bjelkane er spesielt positivt påverka av låg CoV.

Figur 19 er henta frå (Bejtka 2011) og viser ratio mellom E_{eff} og E_{net} . Ein ratio over 100% tydar at dei langsgåande sjikta fungerer som ein solid sjikt og ein får stivhetsbidrag frå tverrsjikt. Medan ein ratio under 100% tydar at langsgåande sjikt ikkje oppfører seg som eit solid sjikt. Den horisontale aksen er antal bord i langsgåande sjikt. I følge figuren skal dermed stivheten til bjelkar gå ned med ein auke i bord. Utan signifikante verdiar viser resultata her motsatt helning, altså auka stivhet i L-3 i forhold til L-2.



Figur 19 Ratio mellom E_{eff} og E_{net} for lange CLT bjelkar ((Bejtka 2011))

Ved bestemmelse av E-modul for enkeltbord blir verdiane justerte etter fuktinnholdet i trevirke (EN-384 2010). Det er ikkje utført noko justering av resultata her. Forsøksbjelkane hadde ulikt fuktinnhold gjennom tverrsnittet, men i snitt låg det på 11,5%. Det kan vere fornuftig å justere for fuktinnholdet etter (EN-384 2010). Det er må i tilfelle vurderast fuktinnholdet i kvart av dei langsgåande sjikta. Dersom ein bruker ein vekta middelværdi ($2/3 \cdot 10,74 + 1/3 \cdot 12,32$) gir det 0,7% reduksjon av verdiane funnet i forsøka. Det vil gir justert $E_{m,l}$ på 12654 N/mm² som fremdeles er over $E_{0,mean}$.

Måling av $E_{m,l}$ er utført over ein relativ liten del av bjelken. Medan $E_{m,g}$ er målt over heile bjelkespenntet. Resultata til $E_{m,g}$ frå dei to forsøksseriane har stor forskjell. For L-2 $E_{m,g} = 7205$ (CoV 8%) og for L-3 $E_{m,g} = 8334$ (CoV 9%). Det er tydeleg ein systematisk målefeil på serie L-3. Nedbøyinga til bjelker er eit resultat av bøye- og skjærdeformasjon.

Deformasjonen avhenger av bøyestivhet og skjærstivheten til bjelken. (Kuklik et al. 2008a). Med verdiar større enn $E_{m,l}$ er det noko som ikkje er korrekt.

Det har ikkje vore mogleg å identifisera denne feilen. Belastningspunkta eller opplegga kan ha blitt trykt inn i bjelken under måling. Med deformasjonsgiverar til å måle inntrykk kunne det blitt fastslått. Det blei utført akkurat same prosedyre for L-2 der resultata virkar meir sannsynlige, men med bruk av mindre belastning. Det medfører usikkerhet til målingane gjort i L-2.

5.2 Bøyefasthet

Den karakteristiske bøyefastheten til bjelkanes netto tverrsnitt $f_{m,k,EN}$ var $39,3 \text{ N/mm}^2$. Det var her ein objektiv forskjell mellom forsøka i favør til L-2, med 5% høgare karakteristisk bøyefasthet. Maksimal bøyefasthet blei målt til $61,3 \text{ N/mm}^2$ og minimum til $39,8 \text{ N/mm}^2$. CoV var for alle bjelkane 12%. Dette er lågare enn 25% for konstruksjonstre og 15% for limtre som ein finn i JCSS (2006). Det var ingen signifikant forskjell med 5% signifikansnivå ($T_{\text{test}} = 1,03 < T_{\text{crit}} = 2,07$) mellom forsøksseriane.

Fire av dei tolv bjelkane i L-3 gjekk direkte i brudd utan å miste noko kapasitet før F_{max} . Dei andre 8 bjelkane opplevde mindre brudd i før F_{max} . Det illustrerer homoganisering med fleire parallelle sjikt. I det kapasiteten er brutt i eit av borda, er det nabobord som framleis har kapasitet og tar belastninga. I L-2 fekk alle bjelkane mindre brudd før dei nådde F_{max} .

(Flaig & Blaß 2014) foreslår ein systemfaktor for å fange opp homoganiseringa. Den ligg mellom 1,19 og 1,22 for bjelker med to bord i langsgåande sjikt. Den mest konservative systemfaktoren ville i dette tilfellet gitt ein bøyefasthet på $28,5 \text{ N/mm}^2 \ll 39,3 \text{ N/mm}^2$.

Det er naturleg å samanlikna CLT bjelkar med limtre. Spesielt når ein vurderar heile bjelketverrsnittet. I Brunner og Lehmann (2012) er det utført eit firepunkts bøyeforsøk på limtrebjelkar. Seks bjelkar med dimensjon $100 \times 200 \text{ mm}^2$ og seks bjelkar med dimensjon $160 \times 200 \text{ mm}^2$ alle med kvalitet GL24h. Bjelkane i L-2 fekk $f_{m,mean,clt} = 30,7 \text{ N/mm}^2$ (CoV 12%).

Dei første seks bjelkane i Brunner og Lehmann (2012) fekk $f_{m,mean,glulam} = 29,8 \text{ N/mm}^2$ (CoV 21%) og dei 160mm. breie bjelkane $f_{m,mean,glulam} = 34,5 \text{ N/mm}^2$ (CoV 24%). Limtre av GL24h er bygga opp med lamellar av C24 kvalitet i heile tverrsnittet. Den store forskjellen i variasjonskoeffisienten mellom desse forsøka, er mest sannsynleg påverka av prøvestørrelsen.

5.3 Bedømming av bjelkar

Verken bøyestivhet eller bøyefasthet til bjelkane har vist noko signifikant forskjell på dei to bjelketypane. I forhold til fasthetsklasse er resultata over karakteristiske verdiar. Densiteten som er målt ligg over middel densitet i (EN-338 2009), $\rho_{mean} = 420 \text{ kg/m}^3$. For bjelkane i L-2 ligg målingane mellom 432 og 443 kg/m^3 . Målingane utført på bjelkane i L-3 ligg mellom 436 og 483 kg/m^3 . Den karakteristiske densiteten $\rho_{k,EN} = 380 \text{ kg/m}^3$ er og over $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ frå (EN-338 2009). Det er fleire bjelkar som kjem frå det same elementet, men det er ikkje gjort noko betraktning i forbindelse med densitet mellom elementa. Middelerdi for dei langsgående sjikta er 448 kg/m^3 .

Bjelkane blei ikkje klimatiserte før forsøka. Fuktinnhaldet ligg likevel tett til referanseverdi på 12%. Variasjonen mellom sjikta var som forventa, med eit høgare fuktinnhald i senter av bjelken.

Oppbygginga av bjelkane er ikkje hensiktsmessig til bruk som bjelkar. Dei har 40% tverrsjikt, noko som er meir enn i nokon av dei andre arbeida. Der (Bejtka 2011) har 25% og (Flaig & Blaß 2014) med 30% i sine fem sjikts bjelkar. Dei har også bjelkar som er lagde med heile bord og dermed sin opprinnelige fasthetsklasse. Det er utført ein regresjonsanalyse på bredden på borda i strekksona. Den viser ingen forklaringsseffekt, verken på bøyestivhet eller bøyestyrke. Når eit bord er tildelt fasthetsklasse gjeld det for heile tverrsnittet og ikkje for mindre deler av borda. Per definisjon var det kun dei heile borda i bjelkane som var av C24 kvalitet.

5.4 Forsøka

Det tydar på at forsøka har blitt utført korrekt etter valgt metode, med unntak av måling av $E_{m,g}$. Korrelasjonskoeffisientar i framrekning av K-verdiar gav verdiar betre enn 0,99 i alle tilfeller. Det var ein måling der data ikkje blei registrert. Datafila blei lagra etter at forsøket var utført, men mangla innhald. Den relative spredninga i resultata er låg innad i dei ulike forsøka, det visar at ingen store usystematiske feil er gjort.

Måling av $E_{m,g}$ ser ut til å vere ramma av ein systematisk feil. Om det finnes andre systematiske feil i utførelsen, er dei endå ikkje oppdaga.

Dei framrekna resultatata gir verdiar som er fornuftige både med antakelsar gjort på førehand og samanlikna med andre arbeid. Det er ingen data som har gått tapt under eller etter forsøka.

5.5 Andre betrakingar

Sjølv om $E_{m,g}$ for L-3 var feil er likevel resultatata frå L-2 nytta til å framrekna $G_{\text{eff,CLT}}$. Tabell 6 viser $G_{\text{eff,CLT}}$ som er framrekna med forskjellen mellom $E_{m,l}$ og $E_{m,g}$ for forsøk L-2. Det gir middelværdi $G_{\text{eff,CLT}} = 457$ (CoV 27%). Flaig og Blaß (2013) nytta og forskjellen mellom $E_{m,g}$ og $E_{m,l}$ til å finne $G_{\text{eff,CLT}}$. Dei fant $G_{\text{eff,CLT}} = 362$ N/mm² for ein fem sjikts bjelke. Ein jamføring av desse er vanskeleg på grunn av usikkerheten som ligg i målingane gjort i dette arbeidet. G_{Mean} i (EN-338 2009) er 690 N/mm². Tendensen i målinga er likevel at G- modulen har større innverknad på bjelkeformasjon til CLT enn for konstruksjonstre og limtre.

Tabell 6 $G_{\text{eff,CLT}}$ framrekna med forskjellen mellom $E_{m,l}$ og $E_{m,g}$ for prøve L-2.

Forsøk L-2	
Bjelke	$G_{\text{eff,CLT}}$ [N/mm ²]
L-2-A	396
L-2-1	540
L-2-2	360
L-2-3	416
L-2-4	-
L-2-5	668
L-2-6	585
L-2-7	525
L-2-8	227
L-2-9	425
L-2-10	435
Middel	457
St.avvik	125

Kapittel 6: Konklusjon

Det er ved bøyeforsøk fastsatt karakteristisk bøyestyrke og bøyestivhet i to forsøksseriar på ulike bjelketverrsnitt. I forsøk L-2 blei CLT bjelkar med tverrsnitt $100 \times 200 \text{ mm}^2$ og lengde 3560mm. undersøkt. Resultata frå forsøk L-2 var ikkje signifikant forskjellig frå forsøk L-3. Resultata er derfor gjeldande for begge bjelketverrsnitt. I forsøk L-3 blei CLT bjelkar med tverrsnitt $100 \times 300 \text{ mm}^2$ og lengde 5340mm. undersøkt. Alle spenningsberekningar er gjort ved å nytta bjelketeori. Karakteristiske verdiar er framrekna etter (EN-14358 2007) og vist i Tabell 7 under.

Tabell 7 Karakteristiske verdiar frå forsøk oppstilt med konstruksjonstre- og limtre fasthetsklassar

		CLT	C24	C27	GL24h	GL28h
Bøyestyrke	$f_{m,k,EN}$	39,3	24	27	24	28
E-modul	$E_{m,l,net}$	12744	11500	11500	11600	12600
	$E_{m,0,05,EN}$	10798	7700	7700	9600	10500
Densitet	$\rho_{k,EN}$	384	350	370	385	425
	ρ_{mean}	448	420	450	420	460

Det var ikkje tilgong på eigenskapar til dei enkelte treborda CLT bjelkane var bygd opp av, ut over fasthetsklassen. Alle langsgåande bord var av fasthetsklasse C24. Dersom ein samanliknar densitetsmålingane som er utført i oppgåva med karakteristiske verdiar til C24 ligg både 5%-fraktil og middelvei høgare enn C24. Dei målte densitetsverdiene kan leggest til C27 eller GL24h. Det er grunn til å tru at den C24 kvaliteten som er brukt til CLT bjelkane er av høg kvalitet.

Ein jamføring av E-modul gir tilsvarande verdiar som er nytta i GL28h. Det tydar klart på at krysslegginga av sjikta gir eit bidrag til stivheten. Vidare ser ein at bøyestyrken til CLT bjelkane er mykje høgare enn dei oppstilte fasthetsklassane. Det viser effekten av homoganisering som skjer ved tre parallelle sjikt.

CLT bjelkar av C24 kvalitet indikerar at fasthetsklasse GL28h kan nyttast som karakteristiske verdiar på bjelketverrsnitt med lik fem sjikts oppbygging med redusert densitet.

Referanser

- Approvals, E. O. f. T. (2011). ETA-11/0500. *Haas Holzprodukte GmbH*.
- Approvals, E. O. f. T. (2012). ETA-12/0079. *AGROP NOVA a.s.*
- Approvals, E. O. f. T. (2013a). ETA-06/0009. *Binderholz Bausysteme GmbH*.
- Approvals, E. O. f. T. (2013b). ETA-06/0138 *KLH Massivholz GmbH*: 43.
- Approvals, E. O. f. T. (2013c). ETA-13/0684 *Martinsons såg AB*.
- Approvals, E. O. f. T. (2014). ETA-14/0349. *Stora Enso Wood Products OY Ltd*.
- Augustin, M. (2008). Wood Based Panels: Graz University of Technology / AT.
- Bejtka, I. (2011). *Cross (CLT) and Diagonal (DLT) Laminated Timber as Innovative Material for Beam Elements*: KIT Scientific Publ.
- Bergman, R. C., Zhiyong; Carll, Charlie G.; Clausen, Carol A.; Diertenberger, Mark A.; Falk, Robert H.; Frihart, Charles R.; Glass, Samuel V.; Hunt, Christopher G.; Ibach, Rebecca E.; Kretschmann, David E.; Rammer, Douglas R.; Ross, Robert J.; Star. (2010). *Wood Handbook, Wood as an Engineering Material*: Forest Products Laboratory. Wood handbook - Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: 508 p. 2010.
- Brandner, R. (2013). *Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report*. COST Action FP1004, Focus STS–European Conference on Cross-Laminated Timber (CLT). 2-36 s.
- Brunner, M. & Lehmann, M. (2012). BENDING TESTS ON THE CONTINUOUS GLULAM BEAM. *World*, 15: 19.
- Bunkholt, J. A. G. G. A. (2008a). Fokus konstruksjonsvirke. I: Treteknisk, T. A. (red.). *Fokus*.
- Bunkholt, J. A. G. G. A. (2008b). Fokus Massivtre. I: Treteknisk, T. A. (red.). *Fokus*.
- Chen, Y. (2011). *Structural performance of box based cross laminated timber system used in floor applications*: UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA (Vancouver).
- EN-301. (2013). Lim av fenolplast og aminoplast for bærende trekonstruksjoner - Klassifisering og ytelseskrav: Standard Norge.
- EN-338. (2009). Konstruksjonstrevirke.

- EN-384. (2010). Konstruksjonstrevirke - Bestemmelse av karakteristiske verdier for mekaniske egenskaper og densitet: Standard Norge.
- EN-408. (2012). Trekonstruksjoner- Konstruksjonstre og limtre - Bestemmelse av noen fysiske og mekaniske egenskaper: Standard Norge.
- EN-1995-1-1. (2010). Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger: Standard Norge.
- EN-13183-1. (2002). *Fuktinnhold i et virkestykke av skurlast - Del 1: Bestemmelse ved tørkemetode*: Standard Norge.
- EN-14081-1. (2011). EN 14081-1-2005 Styrkesortert konstruksjonstrevirke med rektangulært tverrsnitt.PDF: Standard Norge.
- EN-14358. (2007). Trekonstruksjoner - Beregning av karakteristisk 5 %-fraktil og godkjenningkriterier for en prøveserie: Standard Norge.
- Flaig, M. & Blaß, H. J. (2013). *Shear Strength and Shear Stiffness of CLT beams Loaded in Plane*. Proceedings. CIB-W18 Meeting 46, Vancouver, Canada, 2013, Paper 46-12-3.
- Flaig, M. & Blaß, H. J. (2014). BENDING STRENGTH OF CROSS LAMINATED TIMBER BEAMS LOADED IN PLANE.
- Fpr-EN-16351. (2015). European committee for standardization.
- Hibbeler, R. C. (2011). *Mechanics of Materials*: Pearson Prentice Hall.
- JCSS. (2006). *Joint Probabilistic Model Code. Part 3.05: Resistance Models: Timber. Joint Committee on Structural Safety*.
- Karacabeyli, E., Douglas, B., Staff, F. P. L., Staff, F. & Staff, B. S. L. C. (2013). *CLT Handbook: Cross-Laminated Timber*: Forintek Canada Corporation.
- Koppelhuber, D. D. M. W.-N. D. J. & Pock, D. K. (2014). *Cross-Laminated Timber Structural Design*: pro:holz.
- Kuklik, P., Hansen, A. S., Designing, E. M. f., Structures, T. o. T. & Project, L. d. V. P. (2008a). *Handbook 1 - Timber Structures*.
- Kuklik, P., Hansen, A. S., Designing, E. M. f., Structures, T. o. T. & Project, L. d. V. P. (2008b). *Handbook 2 - Design of Timber Structures According to EC 5*.
- SINTEF. (2014). Teknisk Godkjenning



Noregs miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Postboks 5003
NO-1432 Ås
67 23 00 00
www.nmbu.no