



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2016 30 stp
Institutt for matematiske realfag og teknologi (IMT)

Evaluering av testmetode for verifisering av skjærstivhet i CLT- bjelker lastet i planet

Evaluation of test configuration for deciding the shear
stiffness of CLT-beams loaded in plane

Bjørn Nedberge Klevmark
Byggeteknikk og arkitektur

Forord

Denne masteroppgaven er gjennomført ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, våren 2016, og markerer slutten på min mastergrad i byggeteknikk og arkitektur. Arbeidet utgjør en del av det pågående forskningsprosjektet ”WOOD/BE/BETTER”, finansiert av Norges forskningsråd.

Temaet for oppgaven ble utarbeidet med bakgrunn i den pågående internasjonale forskningen på skjærstivhet i massivtre, samt tilgjengelig materiale ved oppstart. Arbeidet har både vært utfordrende, spennende og lærerikt. Gjennomgang av publiserte forskning har, i kombinasjon med eksperimentielle forsøk, gitt meg en dypere innsikt i massivtreets egenskaper og mekaniske oppførsel.

Jeg ønsker å rette en takk til hovedveileder Anders Bjørnfot for god konstruktiv veiledning, og jeg vil takke stipendiat Anders Nygård som har hjulpet meg med gjennomføringen av forsøkene, og har gitt meg mange solide innspill underveis. Samtidig vil jeg takke Andreas Flø for hjelpen til å sette opp kameraene og analyseprogrammet som er anvendt til å utføre selve målingene.

Bjørn Nedberge Klevmark

Ås, 12. mai 2016

Sammendrag

Denne oppgaven omhandler gjennomføring og evaluering av en firepunkts bøyetest for bjelker av krysslimt massivtre (CLT). For CLT er skjærstivheten ut av planet vel dokumentert, men det er derimot uenigheter rundt oppførselen og stivheten i planet. Det forskes stadig på nye måter å verifisere skjærstivheten i hele elementer. NS-EN 16351 (2015) som setter krav til testprosedyrer for verifisering av egenskaper i CLT, henviser til NS-EN 408 (2010) i tilfeller der krav eller metoder ikke er tilstrekkelig spesifisert. Som et bidrag til kunnskapen og forskningen på området, er det utført en serie eksperimentelle forsøk etter kravene i ”Shear stiffness for cross laminated timber in plane bending test” i NS-EN 16351, der hensikten med studien er å finne ut hvorvidt ”Shear field test method” i NS-EN 408 er egnet til å bestemme skjærstivheten i CLT-bjelker.

Hovedproblemstillingen i denne oppgaven er: *Hvor velegnet er ”shear field test method” i NS-EN 408 til å verifisere skjærstivheten i CLT-bjelker testet etter metoden ”Shear stiffness for cross laminated timber in plane bending test” i NS-EN 16351?*

Resultatene fra gjennomførte forsøk danner oppgavens empiri, som sammen med en helhetlig vurdering og opparbeidet teori, danner grunnlag for å besvare problemstillingen. Det er benyttet kameramålinger til å fange opp deformasjoner i et definert skjærfelt i tverrsnittet. Arbeidet med å analysere resultatene har vært omfattende, men har samtidig gitt et godt grunnlag for å kunne evaluere testmetoden. Av målingene viser det seg at oppførselen i yttersjiktet til CLT-bjolkene ikke representerer rene skjærdeformasjoner alene, og at det er manglende korrelasjon mellom prøvene. Med dette har studien ført til følgende konklusjon; ”Shear field test method” i NS-EN 408 er uegnet til å verifisere skjærstivheten i CLT-bjolkene testet etter ”Shear stiffness for cross laminated timber in plane bending test” i NS-EN 16351. Resultatene gir også grunnlag for å anta at det i alle tilfeller vil være vanskelig å verifisere skjærstivheten i CLT-bjelker ved bruk av denne testmetodikken.

Abstract

The scope of this thesis is to evaluate a four-point bending test for cross laminated timber (CLT) beams. For CLT loaded out of plane, the characteristic values are well agreed, but it is however disagreements about behavior and stiffness in the plane. Research continues on ways to verify the shear stiffness of entire elements. NS-EN 16351(2015), which specifies test procedures for verification of properties in CLT, referring to NS-EN 408(2010) in cases where the claim or methods are not sufficiently specified. As a contribution to the knowledge and research in the field, it conducted a series of experimental trials for the requirements of "Shear stiffness for cross laminated timber in plane bending test" in NS-EN 16351, where the purpose of the study is to determine whether "Shear field test method "in NS-EN 408 may be used to determine the shear stiffness of the CLT-beams.

The main question in this thesis is: How suitable is "shear field test method" in NS-EN 408 for verifying the shear stiffness of CLT-beams tested with the load configuration "Shear stiffness for cross laminated timber in plane bending test" in NS-EN 16351 ?

The results from completed trials form the thesis of empiricism, which together with a comprehensive assessment and gained theory, form the basis for resolving the problem. It's used camera measurements to capture deformations in a defined shear field in the cross section. The work of analyzing the results has been extensive, but has also provided a good basis to evaluate the test method. The measurements show that the behavior of the outer layer of the CLT-beams does not represent pure shear deformations alone, and that there is not much correlation between samples. The study has resulted in the following conclusion; " Shear field test method " in NS-EN 408 is not suitable to measure the shear stiffness of CLT-beams tested according to " Shear stiffness for cross laminated timber in plane bending test " in NS-EN 16351. The results also indicate the difficulties of measuring the shear stiffness of the CLT-beams in all cases where this test method is used.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag	III
Abstract	IV
Figurliste	VI
Tabelliste	VI
Kapittel 1. Innledning	1
1.1 Bakgrunn og hensikt	1
1.2 Problemstilling og omfang	2
1.3 Oppgavens disposisjon	3
Kapittel 2. Teori	5
2.1 Skjærdeformasjon og skjærstivhet	5
2.1.1 Skjærdeformasjon i bjelker	5
2.1.2 Shear field test method (NS-EN 408)	6
2.2 Krysslimt massivtre (CLT)	7
2.3 Skjærstivheten til CLT i planet	8
2.3.1 Representativt utsnitt	8
2.3.2 Likevektsbetraktninger	9
2.3.3 Feilmekanismer og skjærstivhet i CLT-bjelker	10
2.4 Dokumenterte testmetoder for bestemmelse av skjærstivhet til CLT lastet i planet	13
2.4.1 Parametere som påvirker skjærstivhet i CLT	17
Kapittel 3. Metode	18
3.1 Testing av CLT-bjelker etter NS-EN 16351	18
3.1.1 Beskrivelse av prøvematerialet	19
3.1.2 Oppsett av testtrigg	20
3.1.3 Test av bjelkenes stivhet	20
3.1.4 Bruddtest	21
3.1.5 Bestemmelse av fuktinnhold og densitet	22
3.2 Metode for analyse av deformasjoner	23
Kapittel 4. Resultater	25
4.1 Deformasjoner i CLT-bjelker	25
Kapittel 5. Analyse og diskusjon	32
5.1 Variasjon i deformasjoner	32
5.2 Vurdering av målemetoden	34
5.3 Vurdering av lastkonfigurasjon og bjelker	35
5.4 Vurdering av testmetodikk	35
5.5 Oppsummering	36
Kapittel 6. Konklusjon	38
Kapittel 7. Videre arbeid og forslag til ny testtrigg	39
Kapittel 8. Kilder	41
Kapittel 9. Vedlegg	43
Tilleggsmålinger til analyse	43

Figurliste

- Figur 1: Visuell oversikt over gangen i arbeidet (side 3)
- Figur 2: Definisjon av skjærdeformasjon (side 5)
- Figur 3: Bjelke utsatt for skjærspenninger (Side 6)
- Figur 4: Måling av skjærdeformasjon etter NS-EN 408 (Side 6)
- Figur 5: Massivtreets oppbygning (Side 7)
- Figur 6: Uttak av representative elementer fra CLT (Side 8)
- Figur 7: Superposisjon av lastmekanismene i et sub-element (Side 9)
- Figur 8: Indre spenningsfordeling i tre lags CLT-element (Side 9)
- Figur 9: Feilmekanismer i CLT (Side 11)
- Figur 10: Uttak av egendefinerte utsnitt (Side 13)
- Figur 11: Trykktest for skiver (Side 14)
- Figur 12: Diagonal trykktest for skiver (Side 15)
- Figur 13: Oversikt over prøvebjelkenes oppbygning (Side 19)
- Figur 14: Illustrasjon av målt skjærfelt (Side 20)
- Figur 15: Oppsett av testtrigg (Side 20)
- Figur 16: Testtkonfigurasjon (Side 21)
- Figur 17: Uttak av prøvestykker til fukt- og densitetmålinger (Side 22)
- Figur 18: Illustrasjon av målte diagonaler (Side 23)
- Figur 19: Plott av vertikale deformasjoner (Side 24)
- Figur 20: Regresjonsanalyse av måledata (Side 24)
- Figur 21: Spredning av måledata (Side 24)
- Figur 22: Oversikt over målte diagonaler (Side 25)
- Figur 23 – Figur 44 : Grafisk fremstilling av deformasjoner i hver bjelke (Side 26-31)
- Figur 45: Kvadratiske CLT-skiver klare for testing (Side 39)
- Figur 46: Forslag til ny testkonfigurasjon (Side 39)

Tabelliste

- Tabell 1: Gjennomsnittlig fuktinnhold og densitet i de seks prøvestykkene (Side 22)
- Tabell 2: Densitet og fuktinnhold i prøvebjelkene (Side 22)

Kapittel 1. Innledning

Dette kapittelet presenterer oppgavens bakgrunn og relevans, samt problemstilling og forskningsstrategien som er anvendt for å besvare problemstillingen. Det følger også med en oversikt over oppgavens struktur.

1.1 Bakgrunn og hensikt

Krysslimt massivtre, forkortet CLT, er allerede blitt et velkjent byggemateriale, særlig i Europa. Selv om det fortsatt forskes på eksakte egenskaper innenfor materialets fasthet, isolering, lydabsorpsjon og brannmotstand, er massivtre regnet som et solid, miljøvennlig og bestandig materiale. CLT utvider mulighetene for bygging med tre, da materialet er så lett anvendelig, kompakt og solid at det i mange tilfeller kan erstatte betong som byggemateriale i dekker og veggskiver (se Lukacs og Björnfort, 2016). Materialets lave egenvekt kombinert med evnen til å kunne ta opp todimensjonale krefter, er en god grunn til å anvende massivtre i byggeprosjekter. Lav masse, høy stivhet, og god bæreevne gir godt grunnlag for å anvende massivtre i kontorbygg, skoler, haller og mindre hus, men også i bruer med lengre spenn (Brandner, 2013).

Bjelker laget av krysslimt massivtre gir flere fordeler fremfor limtre og konstruksjonstre, grunnet oppbygningen av ortogonale bord. CLT-bjelker får en høy strekkstyrke normalt på bjelkeaksen, som igjen gir den god motstand mot oppsprekking. Derfor vil CLT være foretrukket fremfor limtre i bjelker som er utsatt for strekkspenninger normalt på bjelkeaksen (Flaig og Blaß, 2013). Skjærstyrken til CLT-elementer lastet i planet er betydelig større enn den korresponderende verdien for limtre (Boogensperger, Moosbrugger og Silly, 2010).

For CLT-elementer lastet ut av planet, er det god enighet og samsvar mellom testresultater og karakteristiske verdier. For CLT lastet i planet, er det derimot uenighet rundt egenskapene og oppførselen til materialet. Frem til nå er de sertifiserte egenskapene for skjær i planet kun basert på testing av stivheten i kryssningsområdet mellom to ortogonale bord. Disse testene er godt egnet for å se hva som skjer i de indre mekanismene, men de representerer ikke det fulle bildet av den faktiske skjærstivheten til et helt element (Brandner et al., 2015). Det forskes stadig på nye måter å verifisere stivheten til hele CLT-elementer i planet. Flere metoder er foreløpig utviklet, og selv om mange av dem gir stødige resultater, er det imellom dem betydelige forskjeller i funn av total stivhet.

Det er utviklet en egen standard for krysslimt massivtre, NS-EN 16351 (2015), som nylig ble godkjent høsten 2015. Denne standarden presenterer én metode for å teste skjærstivheten til CLT-bjelker i planet. Metoden heter ”Shear stiffness for cross laminated timber in plane by

bending test”, og finnes i annekset F.4.4 i standarden. Det antydes at skjærdeformasjonen skal utledes ved å måle endringene av diagonaler i tverrsnittet, men det er ikke presentert noen form for målemetode eller utledning av skjærmodul, kun krav til oppsett og symmetri av bjelketesten. Der det er mangel på utfyllende krav og spesifikasjoner, henviser massivtrestandardene konsekvent til bruk av NS-EN 408 (2010), standarden for bestemmelse av egenskaper i konstruksjonstre og limtre. NS-EN 408 presenterer en liknende metode for å teste skjærstivheten i limtrebjelker. Metoden heter ”Shear field test method”, og beskriver fremgangsmåten for å bestemme skjærmodulen i tverrsnittet ved å måle deformasjon i motstående diagonaler i et definert felt på bjelken. Her er det både beskrivelse av målemetode og utledning.

Med dette utgangspunktet, og med tilgjengelig materiale ved utforming av denne oppgaven, er det utført en bjelketest av CLT-bjelker i henhold til kravene og symmetrien i NS-EN 16351, der målemetoden i NS-EN 408 er benyttet til å utlede selve skjærdeformasjonene.

1.2 Problemstilling og omfang

Denne masteroppgaven tar utgangspunkt i det pågående internasjonale forskningsarbeidet med å verifisere skjærstivheten i CLT lastet i planet, og er skrevet for å gi en vurdering av en firepunkts bøyetest som verifiseringsmetode. Målet med oppgaven er å finne ut om ”Shear field test method” i NS-EN 408 egner seg til å verifisere skjærstivheten til CLT bjelker testet etter ”Shear stiffness for cross laminated timber in plane bending test” i NS-EN 16351 (Annex F.4.4), og med det er følgende problemstilling formulert:

Hvor velegnet er ”shear field test method” i NS-EN 408 til å verifisere skjærstivheten i CLT-bjelker testet etter metoden ”Shear stiffness for cross laminated timber in plane bending test” NS-EN 16351?

Problemstillingen besvares ved hjelp av delproblemstillingene under:

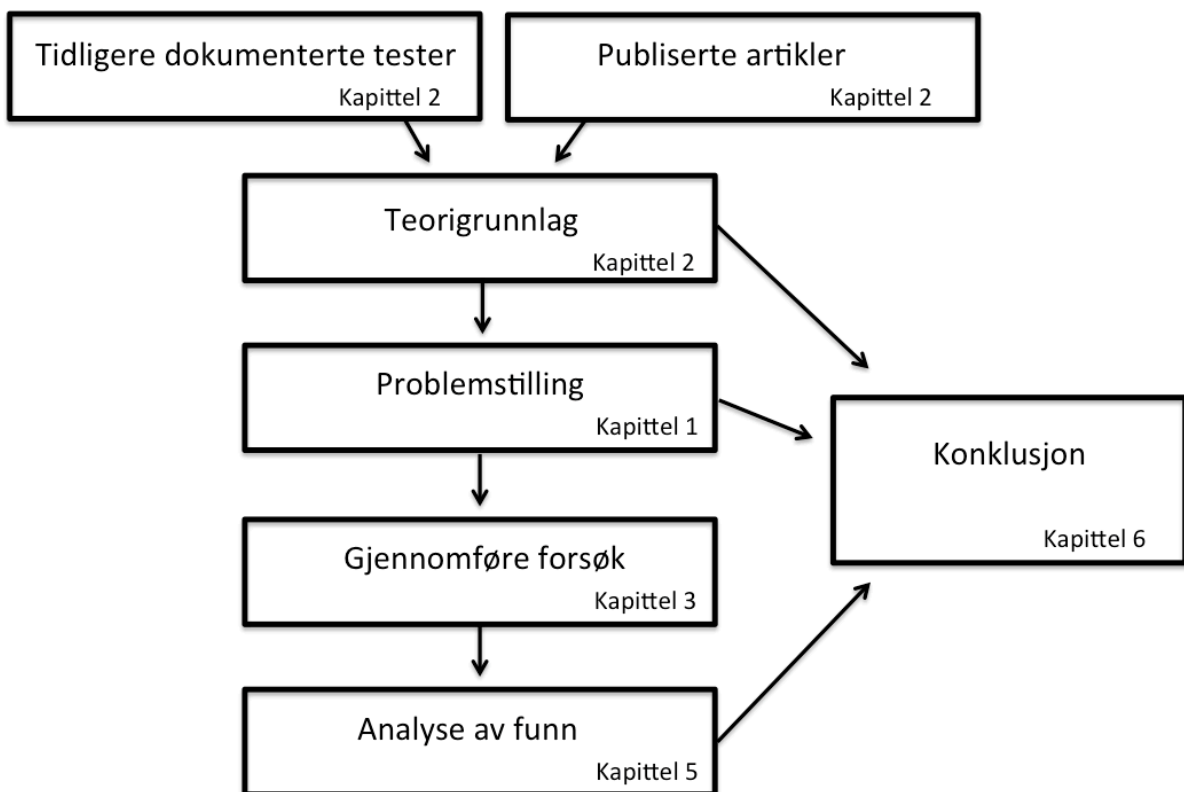
- Hvor ligger utfordringen i å bestemme skjærstivheten til CLT?
- Hvilke metoder finnes for å analysere skjærstivhet i CLT?
- I hvilken grad samsvarer resultatene fra forsøkene med resultater i tidligere dokumenterte testmetoder?
- Hvor kvalifiserte er resultatene fra de gjennomførte forsøkene til å verifisere skjærstivheten i CLT-bjelker?

Denne oppgaven begrenser seg til å se på skjærstivhet i planet. For bjelker blir dette stivheten i den sterke retningen, der de er plassert på høykant og blir belastet med vertikale krefter parallellt med høyderetningen. Arbeidet, sammen med et svar på problemstillingen, vil kunne bidra til økt kunnskap om oppførselen til massivtre utsatt for en kombinasjon av bøyemoment

og skjærkrefter, og gi en indikasjon på hvordan målinger i materialets overflate egner seg for å bestemme skjærstivheten i planet.

1.3 Oppgavens disposisjon

Det er i denne masteroppgaven utført en serie eksperimentelle forsøk, der de tilhørende resultatene danner oppgavens empiri. Testkonfigurasjonen er satt opp i henhold til NS-EN 16351. Kameraanalyse ble valgt som målemetode, da det har vist seg å gi svært nøyaktige resultater under tidligere arbeid, og samtidig gir muligheter for å se analysere målte bevegelser i etterkant. Teorigrunnlaget er basert på tidligere dokumenterte artikler, dokumenterte testmetoder og forskning på området. En samlet vurdering og analyse av gjennomføring, testresultater og beskrevet teori gir grunnlag for å besvare problemstillingen (Se Figur 1).



Figur 1: Visuell oversikt over gangen i arbeidet

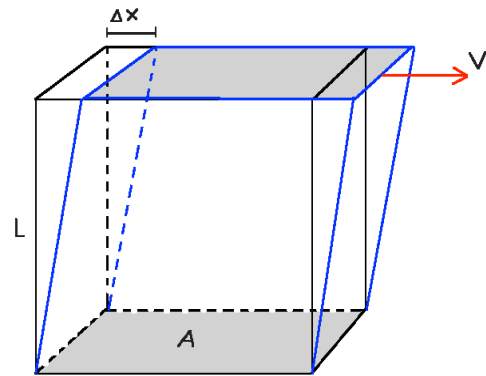
- Kapittel 1 Oppgavens innledning. Her klargjøres rammene for oppgaven gjennom innledning, bagrunn, hensikt og problemstilling. Forskningsstrategien for arbeidet er også presentert.
- Kapittel 2 Her legges teorigrunnlaget for oppgaven. Kapitlet gir innsikt i massivtreets oppbygning og mekaniske egenskaper relatert til skjær, samt dokumenterte testmetoder og parametere som viser seg å påvirke skjærstivhet i massivtre.
- Kapittel 3 Metode. Her er det gitt en grundig beskrivelse av eksperimentelle forsøk og målemetode.
- Testkonfigurasjon: ”Shear stiffness for cross laminated timber in plane by bending test”, NS-EN 16351(2015), Annex F.4.4
- Målemetode: ”Shear field test method”, NS-EN 408(2010)
- Kapittel 4 Resultater. Alle funn som er relevante for å besvare problemstillingen presenteres i dette kapitlet.
- Kapittel 5 Analyse og diskusjon. Her diskuteres funnene i resultatdelen opp mot teorigrunnlaget, målinger og testmetodikk.
- Kapittel 6 Konklusjon. Her presenteres svaret på problemstillingen, med bakgrunn i analyse og diskusjon.
- Kapittel 7 Videre arbeid og forslag til ny testtrigg. Kapitlet tar for seg videre arbeid, og gir en kort innføring i arbeidet som er utført ved siden av denne rapporten, med å utvikle en testtrigg som gir ren skjæroverføring i CLT-skiver.

Kapittel 2. Teori

Dette kapittelet gir en innføring i teorien bak skjærstivheten i CLT, og forklarer hvordan materialet er antatt å oppføre seg under skjærbelastning. Teorien baserer seg hovedsakelig på publiserte vitenskapelige artikler på området. Tre dokumenterte testmetoder er også beskrevet, der det gis innblikk testmetodikken og tilhørende funn.

2.1 Skjærdeformasjon og skjærstivhet

Skjærstivheten til et materiale, også kalt skjærmodulen (G-modul), er definert som skjærspenning per skjærtøyning, og oppgis som regel i N/mm^2 . Den forteller oss hvor mye et materiale blir deformert som følge av påførte skjærkrefter. Dersom man ser på en kvadratisk kube av et vilkårlig materiale utsatt for skjærkraften V , og kuben har høyde L og flateareal A , vil flaten utsatt for skjærkrefter forskyve seg en avstand Δx dersom man antar at den motstående flaten er fast innspent med en motstående skjærkraft. Δx er her kubens skjærdeformasjon (Se Figur 2). Ved ren skjærdeformasjon vil forandringen av materialkuben er volumtro, altså vil volumet i kuben forbli det samme (Hartsuijker og Welleman, 2007).



Figur 2: Skjærdeformasjon av en kube, der nedre flaten er fast innspent mens øvre flaten er fri til å forskyve seg

Skjærmodulen kan dermed bestemmes ved å benytte følgende uttrykk:

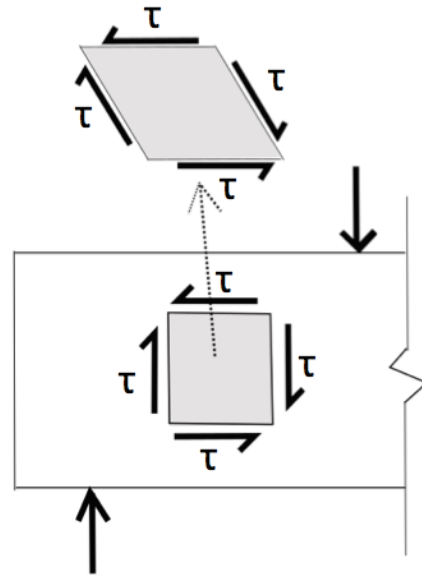
$$G = \frac{\text{skjærspenning}}{\text{skjærtøyning}} = \frac{\frac{V}{A}}{\frac{\Delta x}{L}} = \frac{V \cdot L}{A \cdot \Delta x} \quad (1)$$

2.1.1 Skjærdeformasjon i bjelker

I enhver belastet bjelke vil det oppstå skjærkrefter og tilhørende skjærspenninger. I lange bjelker er det som regel momentet som er dimensjonerende, da skjærdeformasjonene er så små i forhold at de kan ignoreres. For korte og stive bjelker kan derimot skjærkreftene være avgjørende for bæreevnen.

Skjærspenninger i en bjelke fører til skjærdeformasjoner, og man kan igjen betrakte deformasjonene i bjelke ved å se på et kvadratisk todimensjonalt utsnitt av tverrsnittet.

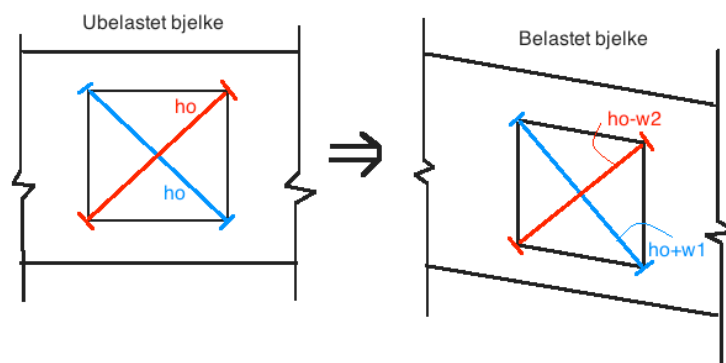
Figur 3 viser et bjelkeutsnitt utsatt for ren skjær. Skjærspenningen τ på siden av utsnittet, kan ikke opptre alene, men alltid i kombinasjon med like store skjærspenninger på de tre andre sidene av kvadratet. Skjærspenningene vil føre til en deformasjon i kvadratet, og det vil derfor forme seg som et parallelogram. I det lineær-elastiske området er det et lineært forhold mellom skjærspenninger og skjærtøyninger. Volumet av utsnittet vil altså forbli det samme i parallelogrammet som i rektangelet. Dette kalles en volumtro forandring. Skjærdeformasjonen defineres som vinkelen til forskyvningen, eller den totale endringen i de to diagonalene fra motstående hjørner i utsnittet (Hartsuijker og Welleman, 2007).



Figur 3: Rektangulært utsnitt av en bjelke utsatt for skjærspenninger

2.1.2 Shear field test method (NS-EN 408)

For å bestemme skjærstivheten til en bjelke av limtre, gir NS-EN 408 (2010) metoden som heter ”shear field test method”. Skjærstivheten utledes fra deformasjonene som oppstår i et kvadratisk definert skjærfelt. Feltet skal være symmetrisk om bjelkens nøytralakse, og endringen i motstående diagonaler måles (Se Figur 4).



Figur 4: Endring i diagonalene i et skjærpåkjent utsnitt av en bjelke. Figuren er utviklet med inspirasjon fra NS-EN 408

I henhold til NS-EN 408, kan bjelkens G-modul bestemmes fra følgende uttrykk:

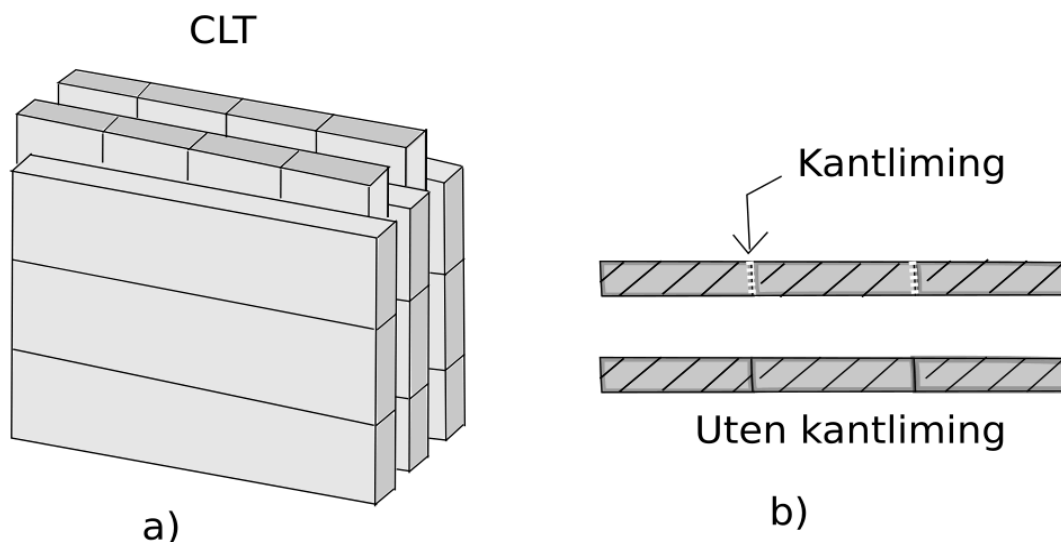
$$G = \left(\frac{3}{2} - \frac{h_0^2}{4h^2} \right) \cdot \frac{h_0}{bh} \cdot \left(\frac{V_2 - V_1}{w} \right) \quad (2)$$

der

- b er bjelkens bredde (*mm*)
- h er bjelkens høyde (*mm*)
- h_0 er lengden på diagonalene før belastning (*mm*)
- $V_2 - V_1$ er økningen i skjærbelastning under lastsyklusen (N)
- w er gjennomsnittet av absoluttveriene til deformasjonene i de to motstående diagonalene (*mm*)

2.2 Krysslimt massivtre (CLT)

Krysslimt massivtre (CLT) er et platelignende tømmerprodukt som er optimalisert for laster i og ut av planet. Platene kan også skjæres ut til bjelker. CLT består av et odde antall lag, gjerne 3, 5, 7 eller mer, der hvert lag (sjikt) er bygget opp med sideliggende planker eller bjelker med fibrene i samme retning (Se Figur 3a). Lagene er limt 90 grader på hverandre, der det ytterste laget ligger med fiberretning 90 grader på neste lags fiberretning (Brandner, 2013).



Figur 3 : a) Oppbygningen av et CLT-element , b) Bord med og uten kantliming

Massivtre produseres som regel i gran, der alle bordene i et element er tilnærmet identiske. I en situasjon der E-modulen ikke er lik for alle bordene i et CLT-element, må tykkelsene justeres slik at ulikheten utjevnes. I dag produseres det kun massivtreelementer der alle bord innehar samme E-modul. Det skilles mellom massivtre med og uten kantliming (Se Figur 3b), da dette påvirker mekanismene som oppstår ved skjærpåkjenning. For massivtre med kantlimte bord er den effektive skjærstivheten tilsvarende skjærstivheten til bordene. Som følge av klimaendringer oppstår det gjerne sprekker i kantlimt massivtre, og den styrkemessige effekten av limingen vil dermed minke. De strukturelle forskjellene mellom limte og ulimte kanter blir derfor betydelig mindre. For å være på den sikre siden, anvendes som regel elementer uten kantliming til verifisering av skjærstivhet. Det har vist seg at skjærstyrken til CLT-elementer lastet i planet, er betydelig høyere enn den styrken for tilsvarende limtre. (Boogensperger, Moosbrugger og Silly, 2010).

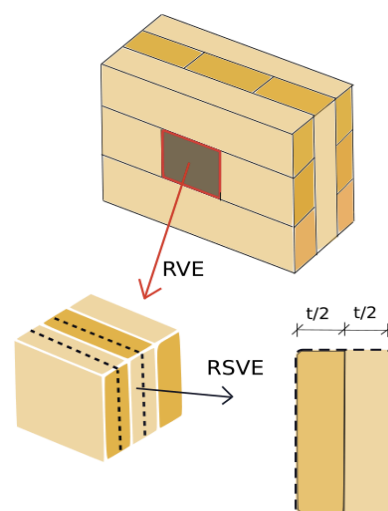
2.3 Skjærstivheten til CLT i planet

Dette delkapittelet presenterer de indre mekanismene i krysslimt massivtre. Her gis det innsikt i representative utsnitt og likevektsbetraktninger, samt feilmekanismer og stivhet i CLT-bjelker. Teorien er hentet fra publiserte artikler på området.

2.3.1 Representativt utsnitt

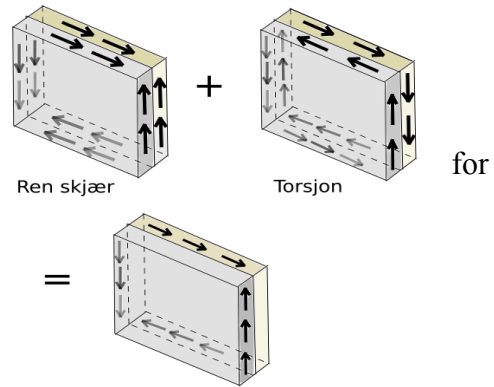
Et representativt utsnitt (RVE) av et CLT-element kan brukes til betraktning av statisk og mekanisk analyse. Tykkelsen til et RVE-element tilsvarer tykkelsen til hele massivtreelementet, derav summen av tykkelsen til bord og mellomliggende avstander eller lim. Dersom tykkelsen og symmetrien er lik for alle lag, og man kun betrakter laster i planet, kan man igjen ta ut et sub-element (RSVE) av det representative elementet (Se Figur 6).

Disse sub-elementene representerer en uendelig sekvens av like lag i CLT-elementets tykkelse, og påvirkes derfor ikke av antall lag i det totale tverrsnittets tykkelse. Geometrien til den indre strukturen i et CLT-element beskrives ved forholdet t/a , der a er bredden til et bord, som er lik bredden til et RSVE-element, og t er tykkelsen til bordene. Disse verdiene, sammen med skjærmodulen, er hovedparametrene for bestemmelse av et CLT-elements skjærstivhet i planet (Boogensperger, Moosbrugger og Silly, 2010).



Figur 6: Uttak av representative elementer, RVE og RSVE, av et CLT-element. Figuren er utviklet med inspirasjon fra Bogensperger (2007)

Skjærkrefter mellom sideliggende RSVE-elementer overføres kun via kontaktflaten mellom bordene (Se Figur 7). Derfor vil kantene langs de sideliggende bordene i hvert lag allis forbli frie speninger (Bogensperger, Moosbrugger og Schickhofer, 2007).

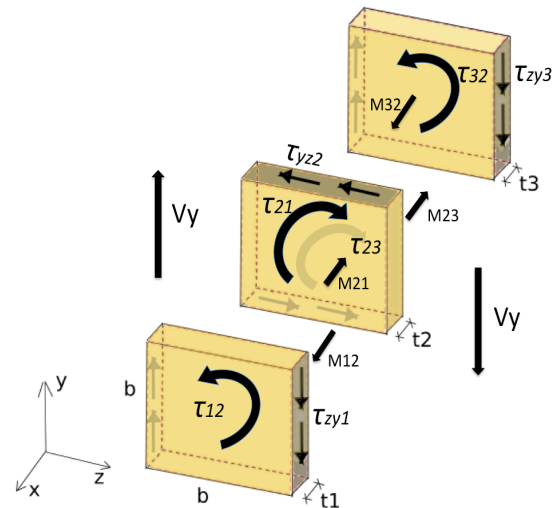


Figur 7: Superposisjon av lastmekanismene i et representativt sub-element, RSVE. Figuren er utviklet med inspirasjon fra Bogensperger (2007)

2.3.2 Likevektsbetrakninger

I et tre lags symmetrisk CLT-element, der tykkelsen på de ytterste lagene er den samme, kan en indre spenninger i planet fremstilles ved hjelp av likevektsbetrakninger (Andreolli, Rigamonti og Tomasi, 2014).

Lagene 1-3 i elementet har henholdsvis tykkelsene t_1 , t_2 og t_3 (Se Figur 8). Alle lagene er kvadratiske, der lengden på sidekantene er uttrykt ved b . Elementet er påført en ytre skjærkraft V_y og fører til skjærspenninger τ_{zy} i y -retning og τ_{yz} i z -retning. Skjærspenningene skaper indre momenter, M , som overføres mellom lagene, og torsjonsspenningen mellom lagene kan fremstilles ved følgende utledning:



Figur 8: Intern spenningsfordeling i et tre lags CLT-element. Figuren er utviklet med inspirasjon fra Andreolli (2014)

Skjærspenningene i de ytre lagene er like, og kan uttrykkes ved kraft per areale:

$$\tau_{zy} = \tau_{zy1} = \tau_{zy3} = \frac{V_y}{b \cdot (t_1 + t_3)} = \frac{V_y}{b \cdot 2 \cdot t_1} \quad (3)$$

Skjærspenningene i det midtre laget blir tilsvarende:

$$\tau_{yz} = \tau_{yz2} = \frac{V_y}{b \cdot t_2} \quad (4)$$

Forholdet mellom ytre og indre lag blir da:

$$\tau_{yz} = \frac{\tau_{zy} \cdot (t1 + t3)}{t2} = \frac{2 \cdot \tau_{zy} \cdot t1}{t2} \quad (5)$$

Indre momenter kan utledes ved skjærspenninger som vrir de enkelte lagene, og kan vises å være like store på begge sider av elementet:

$$M12 = M21 = \tau_{zy} \cdot b^2 \cdot t1 \quad (6)$$

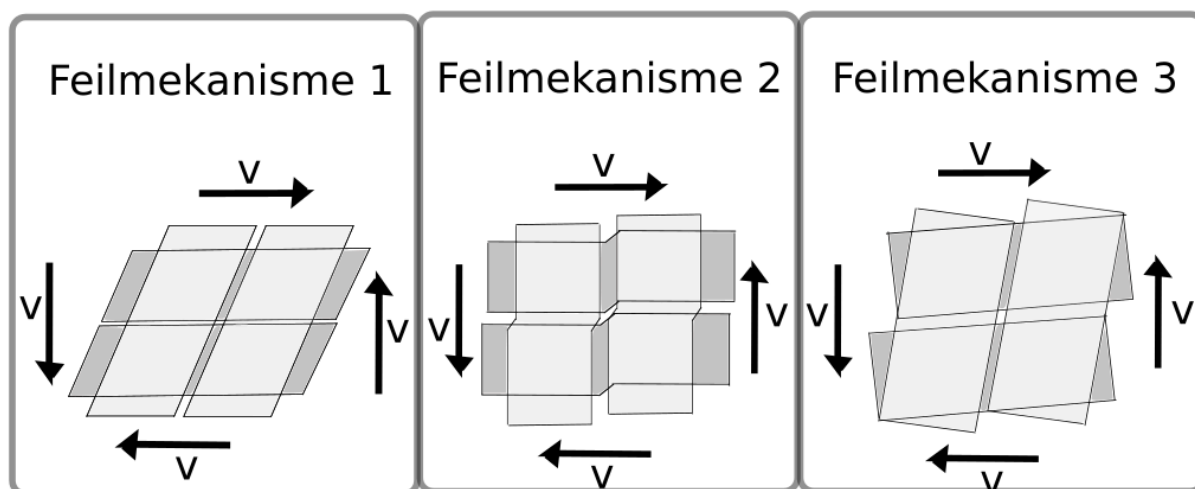
$$M23 = M32 = \tau_{zy} \cdot b^2 \cdot t3 = \tau_{zy} \cdot b^2 \cdot t1 \quad (7)$$

Interne torsjonsspenninger må bli like store for å holde elementet i likevekt, og kan dermed beskrives ved følgende formel:

$$\tau = \tau12 = \tau21 = \tau23 = \tau32 = \frac{M}{W} = \frac{\tau_{zy} \cdot b^2 \cdot t1}{\frac{b^3}{3}} = \frac{3 \cdot \tau_{zy} \cdot t1}{b} \quad (8)$$

2.3.3 Feilmekanismer og skjærstivhet i CLT-bjelker

I en CLT-bjelke lastet i planet vil det, som i alle andre bjelker, oppstå skjærspenninger i bjelken. Det kan antas en konstant fordeling av skjærspenninger over hele tykkelsen til elementet, men i CLT-bjelker der sideliggende bord ikke er kantlimte, kan ikke tykkelsen regnes som konstant gjennom bjelken. I området mellom ulimte sideliggende bord er det ingen fast forbindelse, og her må derfor skjærspenningene være lik null. Skjærkreftene i disse områdene må derfor transporteres gjennom underliggende bord, og følgende må skjærspenningene i området mellom ulimte sideliggende bord bli større enn skjærspenningene mellom bordene ellers. Overføringen av skjærkrefter mellom sjikt som ligger normalt på hverandre vil også føre til skjærspenninger i krysningsområdet mellom ortogonale bord, altså bord som ligger 90 grader på hverandre. Ved å ta begge tilfellene i betraktning kan det utledes tre forskjellige feilmekanismer (Se Figur 9) som danner basis for teoretisk og praktisk utledning av oppførselen for CLT-bjelker og skiver lastet i planet (Flaig og Blaß, 2013).



Figur 9: Feilmekanismer i CLT-bjelker utsatt for snittkrefter V

Feilmekanisme 1 er definert ved skjærfeil parallellt med fiberretningen i det totale tverrsnittet til en bjelke. Feilen oppstår i områder mellom ulimte kanter med like skjærspenninger for lagene i lengderetning og tverretning av bjelken.

Feilmekanisme 2 er definert som skjærfeil normalt på fiberretning i netto tverrsnitt av bjelken. Feilen oppstår i områder som er i kontakt med ulimte kanter som kun har skjærspenninger i bordene normalt på kantene.

Feilmekanisme 3 er definert som skjærfeil i kryssningsområdet mellom ortogonal bundende bord. Feilen oppstår på grunn av torsjon og skjærspenninger i flere retninger som kommer fra overføringen av skjærkrefter mellom sideliggende bord.

Feilmekanisme 3 kan igjen deles opp i følgende tre spenningssituasjoner:

- Skjærspenninger parallellt med bjelkeaksen som kommer av bøyemoment og normalspenninger i langsgående bord
- skjær-torsjonspenninger som oppstår grunnet eksentrisitet mellom senterlinjene til sideliggende bord
- Skjærspenninger normalt på bjelkeaksen i kryssområdene ved opplagre og der lasten er konsentrert med variabelt tverrsnitt, som f.eks der det er skjøter eller hull i tverrsnittet.

Dette gir totalt fem komponenter av skjærspenninger. For å kunne verifisere og designe CLT-bjelker gjennom en analytisk utledning, må alle fem komponentene beregnes. Bindingen mellom forskjellige lag er sterk nok til at man kan regne lagene som en solid enhet. Derfor kan skjærspenninger som oppstår fra feil parallellt og normalt på fiberretningen, som i feilmekanisme 1 og 2, regnes etter "Bernoulli-Euler Beam Teori" ved å ta tykkelsen til de forskjellige lagene i betraktning. Det skiller mellom netto og totalt tverrsnitt, der netto

tverrsnitt er summen av tykkelsen til bord i samme lengderetning, mens totalt tverrsnitt er tykkelsen av hele tverrsnittet til bjelken. De maksimale skjærspenningene i langsgående og tverrgående bord kan dermed regnes ut ved å benytte henholdsvis total tverrsnittstykkelse og netto tverrsnittstykkelse i formelen for skjærspenning, som igjen gir grunnlag for å beregne skjærmodulen til bordene.

Normalkrefter som skyldes endringer i bøyemoment langs bjelkeaksen, og som oppstår fordi langsgående bord ikke er kantlimte, må føres via kryssningsområde mellom langsgående og tverrgående sjikt. For å beregne dette kan det benyttes en modell av en komposittbjelke, der resulterende skjærspenninger τ_{yx} i kryssningsområde finnes ved å se på differensialen av normalkraften per areale i et område mellom to kryssende bord. Eksentrisiteten til normalkreftene i bjelkens senterlinje fører, i tillegg til skjærspenninger langs med bjelkeaksen, til skjær-torsjonspenninger τ_{tor} i bordenes kryssningsområde. Disse kan også utledes av en kompositt bjelke modell. I CLT-bjelker utsatt for last i planet, vil forskyvningen av bordene fra skjærspenninger i kryssningsområdene være lik mellom bundende bord. Skjærspenningene τ_{yx} kan settes inn i uttrykket for skjærforskyvingen γ_{yx} . Skjær-torsjonspenningene, τ_{tor} , kan settes inn i uttrykket for torsjonsforskyvning γ_{tor} .

Gjennom definisjonen $\tau = \gamma \cdot G$, kan den effektive skjærmodulen for skjærdeformasjon i kryssningsområdene regnes ut gjennom følgende uttrykk:

$$G_{eff,CA} = \frac{6 \cdot V}{5 \cdot A_{total} \cdot (\gamma_{tor} + \gamma_{yx})} = \frac{K \cdot b^2}{5} \cdot \frac{n_{ca}}{t_{total}} \cdot \frac{m^2}{(m^2 + 1)} \quad (9)$$

der

K	er glidningsmodul i kryssningsområdene (N/mm^2)
b	er bredden på bordene (mm)
n_{ca}	er antall limfuger mellom ortogonale lag gjennom elementets tykkelse
t_{total}	er den totale tykkelsen til elementet (mm)
m	er antall hele langsgående bord i bjelkens høyde

Skjærmodulen, G_{lam} , til hvert bord kan antas å være konstant, og lik $690 (N/mm^2)$. Summen av skjærdeformasjon i bordene og i kryssningsområdene gir dermed den effektive skjærmodulen for bjelken, og kan regnes ut gjennom følgende uttrykk:

$$G_{eff,CA} = \left(\frac{1}{G_{lam}} + \frac{1}{G_{eff,CA}} \right)^{-1} \quad (10)$$

Uttrykket viser at den effektive skjærstivheten til CLT-bjelker avhenger sterkt av bredden på bordene og sammensetningen av bord. Resultater fra eksperimentelle forsøk viser seg å samsvare godt med denne modellen, og utledningen gir derfor en effektiv og god måte å beregne skjærstivheten til massivtre på (Flaig og Blaß, 2013).

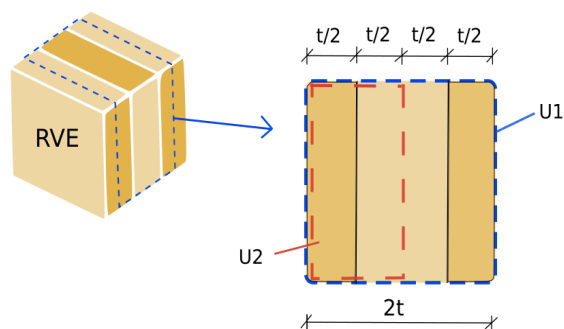
2.4 Dokumenterte testmetoder for bestemmelse av skjærstivhet til CLT lastet i planet

Det forskes stadig på nye metoder for å bestemme skjærstivheten til CLT lastet i planet. Dette delkapittelet tar for seg tre forskjellige testmetoder for hele CLT-elementer, dokumentert i vitenskapelige artikler. Parametere, som gjennom deres arbeide har vist seg å ha stor betydning for skjærstivheten i CLT lastet i planet, er oppsummert i underkapittel 2.4.1.

Testkonfigurasjon for CLT-vegg-elementer under skjærbelastning

Artikkelen ” New test configuration for CLT-wall-elements under shear load” (Bogensperger, Moosbrugget og Schickhofer, 2007), omhandler utviklingen av en ny testmetode for å teste CLT-elementer basert på FEM-analyser.

De testet type utsnitt av et representativt element (RVE) i et FEM-program for å undersøke effekten av randbetingelser i forhold til antall lag i elementet (se Figur 10).



Utsnitt 1 – Tre lag, der det midterste er dobbelt så tykt som de to ytre (U1)

Utsnitt 2 – To like tykke lag (U2), og tilsvarer et RSVE-element

Figur 10: Uttak av utsnitt U1 og U2 fra et RVE-

Til tross for at U1 har to ytre plater som stiver av det midtre laget på hver side, viser FEM-analysen deres at det likevel blir noe tap av total stivhet. De kommer frem til at dette skjer fordi skjærstivheten til et helt RVE-element ikke er relatert til summen av tykkelsene til alle utsnitt U2, men derimot summen av tykkelsen til alle lagene i RVE-elementet, som blir to halve lag bredere enn summen av alle utsnitt U1.

Med denne analysen som utgangspunkt, utformet de testprøvene slik at man unngikk tap av stivhet som et resultat av unødvendig tykkelse. Det ble derfor testet 3-lags CLT-plater, der ytterste laget på hver side av CLT-prøvene hadde halve tykkelsen av det midterste laget. Totalt forsvinner da ett bord tykkelse, men deres numeriske undersøkelser vise at dette har liten innvirkning på CLT-platers stivhet.

Dobbel tykkelse på indre laget vil føre til dobbelt så stor skjærkraft i indre lag i forhold til ytre lag. Parallele bord ble montert med 5 mm avstand for å hindre friksjon. CLT-skivene ble belastet gjennom en stålramme som er limt rundt kantene av prøven. Dette sikrer en jevnt fordelt skjærkraft gjennom prøven. Langs stålrammen ble lasten påført de smale endene av

bordene, og de valgte derfor en hardere kvalitet på bordene langs ytterkantene av skiven for å hindre lokale deformasjoner. Av resultatene ser de at økningen i styrke på disse bordene ikke har noen effekt på total skjærstivhet. De beregnet skjærstivheten ut fra målinger av deformasjoner i diagonalen på skivens overflate.

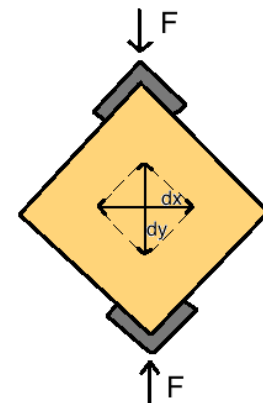
For å kontrollere testresultatene ble det kjørt FEM-analyse av hele CLT-elementet. De foreslår at en faktor på 0,9 bør regnes med i den aktuelle testtriggen for å oppnå resultater som samsvarer med FEM-analysen.

Diagonal trykktest for CLT-skiver

I artikkelen ” Diagonal compression test on cross laminated timber panels” (Andreolli, Rigamonti og Tomasi , 2014) , er det utarbeidet og beskrevet en metode for å teste CLT-skiver i planet.

Med deres teori om at bøyetesten av CLT-bjelker ikke gir et fullt bilde av oppførselen til hvordan CLT oppfører seg, og med ønske om å få et mer visuelt og målbart resultat, utviklet de en metode for å teste styrke- og stivhetsegenskapene til CLT-skiver i planet.

Ved å sette trykkklaster i to motstående diagonaler på kvadratiske skiver kunne dette oppnås (Se Figur 11). Rapporten inneholder resultater fra testing av stivhet og destruktiv test, der bruddmekanismer som resulterer i kollaps er registrert.



Figur 11: Trykktest for skiver. Figuren er utviklet med inspirasjon fra Andreolli (2014)

De kommer frem til at den anvendte riggen gjør det mulig å se direkte skjærbrudd i prøven, i motsetning til en skjær-bøyetest av bjelker, der bøyemomentet gjerne dominerer og fører til brudd. Vertikal og horisontal deformasjon ble målt i kjernen av prøven. Det ble testet fire forskjellige typer av kvadratiske CLT-skiver.

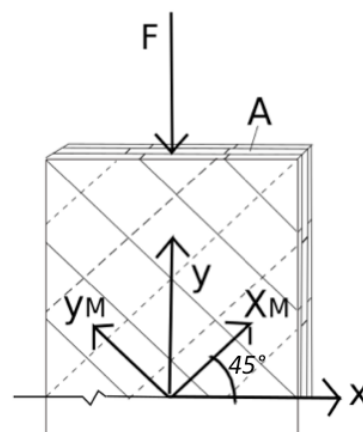
- Skiver med kantlimte bord
- Skiver med kantlimte bord, med sprekker fra krymp
- Skiver uten kantlimte bord
- Skiver uten kantlimte bord, der det er markant avstand mellom bordene

Skjærstivheten ble utledet ved måling av diagonalene i et skjærsenter av prøvens overflate. Testen viste seg å gi direkte resultater, og gjorde det enkelt å ta ut direkte fasthetsverdier av fullskala elementer fra forskjellige leverandører. Samtidig gjorde denne testen det mulig å evaluere den elastiske skjærmodulen. Ulempen med metoden var at det ikke viste seg mulig å fremstille ren skjær over hele tverrsnittet, og at samhandlingen mellom skjær og trykkspenninger som oppsto i midten av prøven måtte derfor evalueres. De kom frem til at man av den grunn er nødt til å benytte seg av en faktor for å korrigere resultatene. Faktoren ble utregnet ved hjelp av Frocht's teori, og definerer det rene skjærbruddet.

Testkonfigurasjon for rektangulære CLT-skiver lastet diagonalt på fiberretningen

Artikkelen ” Shear Properties of Cross Laminated Timber under in-plane load: Test Configuration and Experimental Study” (Brandner et al., 2015), baserer seg på en tidligere utviklet trykktest for CLT-skiver, foreslått av Kreuzinger og Sieder (2013), og inneholder egne testresultater og en videreføring av metoden for å evaluere resultater gjennom vanlig plate teori.

Søyleformede rektangulære prøver med dimensjoner 1500 x 500 med mer, kuttet ut 45 grader på ytterbordenes fiberretning, ble her testet for trykk (Se Figur 12). Trykkkreftene gir en kombinasjon av skjær i planet og trykk i diagonalene av CLT-elementet.



Figur 12: Trykktest for CLT-prøver. Figuren er utviklet med inspirasjon fra Brandner (2015)

Skjærmodulen er bestemt ved hjelp av to tilnærminger.

- Standardmetoden i EN-408(2010)
- Analytisk utledning ved hjelp av matriser.

Begge beregningsmetodene regner skjærmodul via E-modulen til prøven. E_{xM} og E_{yM} er begge hentet fra standardiserte verdier, eller funnet ved testing. Standardmetoden i EN-408 bereger skjærstivheten via deformasjonene i to målte diagonaler.

Analytisk tilnærming

Utledningen er en videreutvikling av tilnærmingen utarbeidet av Kreuzinger og Sieder (2013).

G-modulen utledet de ved hjelp av en fleksibilitetsmatrise og transformasjon.

Uttrykket $\varepsilon = S \cdot \sigma$ kan settes inn i følgende matrise for å beskrive spenninger i planet:

$$S_{xM,yM} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{xM}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{E_{yM}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xM,yM}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Koordinatene X_m og Y_m , som er retningen på bordene, kunne så transformeres til hovedaksene x og y i forhold til påført last. I dette tilfellet er laster påført 45 grader på bordenes lengderetning, og vinkelen blir dermed $360^\circ - 45^\circ = 315^\circ$

$$S_{xM,yM} = \begin{bmatrix} \frac{0,25}{E_{xM}} + \frac{0,25}{E_{yM}} + \frac{0,25}{G_{xM,yM}} & \frac{0,25}{E_{xM}} + \frac{0,25}{E_{yM}} - \frac{0,25}{G_{xM,yM}} & \frac{0,5}{E_{xM}} - \frac{0,5}{E_{yM}} \\ & \frac{0,25}{E_{xM}} + \frac{0,25}{E_{yM}} + \frac{0,25}{G_{xM,yM}} & \frac{0,5}{E_{xM}} - \frac{0,5}{E_{yM}} \\ & & \frac{1}{E_{xM}} + \frac{1}{E_{yM}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

symm.

Kraften F og E-modulen bestemte de via lastdeformasjonene på prøven. Ved å sammenstille likningene $\varepsilon = S \cdot \sigma$ og $\sigma_y = E_y \cdot \varepsilon_y$ fikk de følgende sammenheng:

$$\frac{1}{E_Y} = 0,25 \cdot \left(\frac{1}{E_{xM}} + \frac{1}{E_{yM}} + \frac{1}{G_{xM,yM}} \right) \quad (13)$$

der

E_y er E-modul i y-retning av søylen

E_{xM} og E_{yM} er hhv E-modul i X_m - og X_y -retning av søylen

$G_{xM,yM}$ er G-modulen til prøven

Skjærstivheten til prøvene kunne dermed regnes ut gjennom følgende uttrykk:

$$G_{xM,yM} = \frac{1}{\left(\frac{4}{E_y} - \frac{1}{E_{xM}} - \frac{1}{E_{yM}} \right)} \quad (14)$$

Skjærmodul utregnet ihht EN-408 (2010) viste seg å gi ca 10 % høyere stivhetsverdier enn den analytiske tilnærmingen. De antok at dette skyldes at den vertikale deformasjonen er mye større enn den horisontale, og at ettersom den analytiske tilnærmingen kun tar høyde for vertikal deformasjon, vil dette gi noe lavere stivhet totalt. Utregning ihht standarden ga generelt de mest stabile resultatene, og ble derfor foretrukket som modell for denne testtriggen. De konkluderte med at testmetoden vurderes som pålitelig og effektiv, og at den anbefales videre til implementering i EN-16351.

2.4.1 Parametere som påvirker skjærstivhet i CLT

Effekt av kantlimte bord

Arbeidet til Andreolli, Rigamonti og Tomasi (2014) ga et grunnlag for vurdering av effekten til kantlimte bord. Det viste seg at de kantlimte skivene uten sprekker fra krymp, fikk hele 35 % høyere G-modul enn de andre prøvene. Alle skivene med sprekker fra krymp fikk tilnærmet lik G-modul uavhengig om de var kantlimte eller ei. Skivene med kantlimte bord uten sprekker fra krymp, røk grunnet skjærfeil parallellt med fiberretning i de ytre lagene. For prøver der sprekker fra krymp var til stede, ga resultatene derimot grunnlag for å anta at kantliming av bord ikke har noen betydning for feilmekanismen som oppstår ved brudd, og disse røk enten ved torsjon eller ved skjær normalt på fiberretning. Årsaken til at sprekker fra krymp er avgjørende begrunnes med at kantlimte bord med sprekker vil gi en nokså lik oppbygning og styrke som for skiver uten kantlimte bord. Dette viser, i tilfeller der prøvene ikke inneholder sprekker fra krymp, til en positiv effekt av kantlimte bord (Andreolli, Rigamonti og Tomasi , 2014).

Effekt av bordenes dimensjoner

Brandner et al. (2015) undersøkte effekten av bordenes dimensjoner, og kom frem til at økende tykkelse på bord, da også tilsvarende for hele laget, fører til økt styrke og stivhet i materialet. Det antas at dette skyldes økende mengde tre med større skjærareale og motstand mot oppsprekking.

Av resultatene til Andreolli, Rigamonti og Tomasi(2014) viser det seg at prøver med bredere bord, og dermed lavere verdi av torsjonsspenninger i limflatene, feiler normalt på fiberretning i motsetning til torsjonsbrudd. Dette indikerer at breddene på bordene har stor betydning for feilmekanismen som oppstår ved brudd. Samtidig kan altfor brede bord bli skåret ut nærmere overflaten på stammen ved produksjon, som igjen kan føre til et større antall ujevnheter og/eller sprekker som vil påvirke styrken til bordene.

Kapittel 3. Metode

Metoden gjør rede for det eksperimentelle arbeidet som er utført for å kunne besvare problemstillingen. Den første delen av kapittelet gir en detaljert beskrivelse av anvendte materialer, testoppsettet og gjennomføringen av forsøkene. Den andre delen av kapittelet presenterer målemetoden som er benyttet for å hente ut deformasjoner i bjelkene.

3.1 Testing av CLT-bjelker etter NS-EN 16351

De gjennomførte forsøkene er utført i henhold til testkonfigurasjonen ”Shear stiffness for cross laminated timber in plane by bending test” i NS-EN 16351, Annex F.4.4. Måling av skjærdeformasjoner er utført etter ” Shear field test method” i NS-EN 408. Målingene foretas direkte i et definert område på prøvens overflate, for så å kunne utlede skjærstivheten til prøvematerialet. Kravene til de to standardiserte metodene som sammen utgjør testmetodikken i denne oppgaven, er følgende:

Krav i NS-EN 16351:

- Antall prøverbjelker skal være 12 stk
- Lastkonfigurasjonens symmetri i standarden skal følges
- Mellomrommet mellom ulimte kanter skal plasseres i bjelkens nøytralakse

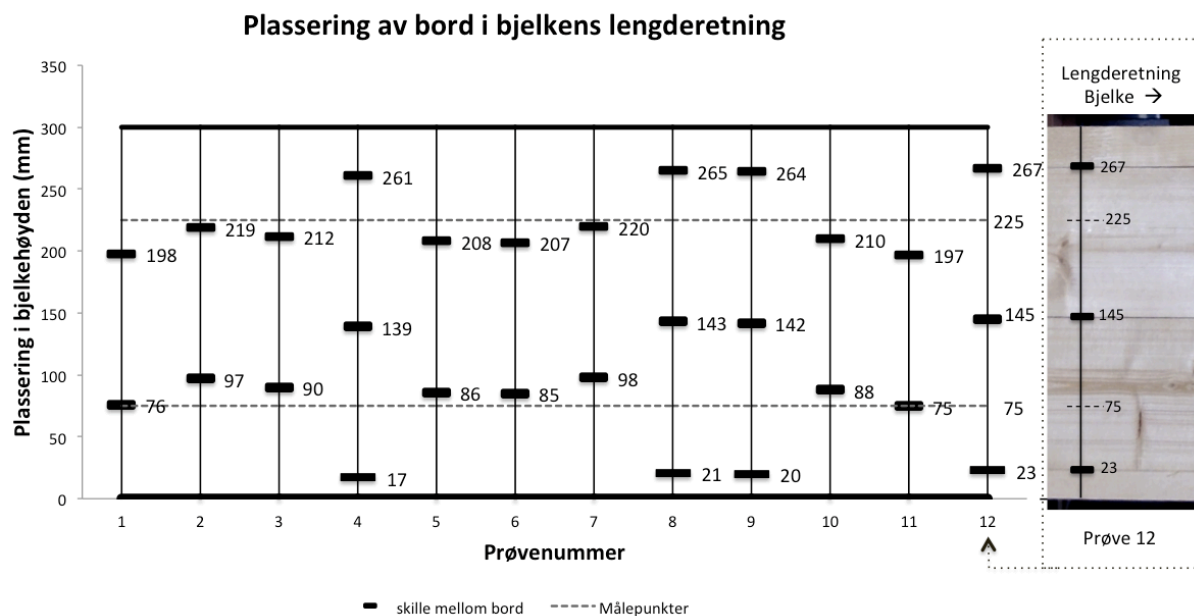
Videre gjelder følgende krav i NS-EN 408:

- Last skal påføres med konstant hastighet, ikke større enn $(0,003 \cdot h)$ mm/s.
- Maksimum last skal ikke overgå 40% av bruddlast eller på noen måte skade prøven.
- Målinger skal utføres i et definert kvadrat på begge sider av prøven, der kvadratet er symmetrisk plassert i forhold til høyden til prøven. Det skal gjøres målinger av endringen i diagonalene til kvadratet.
- Deformasjoner skal måles med en nøyaktighet på 1% eller, for deformasjoner under 2 mm, med en nøyaktighet på 0,002 mm.
- Lastcellen skal kunne måle påsatt kraft med en nøyaktighet på 1%.

Det er ikke funnet noen dokumentert gjennomføring av nøyaktig samme testprosedyre for CLT-bjelker, da med måling av diagonaler i tverrsnittet. Tidligere dokumenterte bøyetester utleder som regel skjærdeformasjon via E-modul og nedbøyning på bjelken. De gjennomførte forsøkene skal derfor kunne gi grunnlag for å vurdere om ” Shear field test method” i NS-EN 408 er egnet til å måle skjærdeformasjoner i CLT-bjelkene som oppfyller kravene i NS-EN 16351. Prøvematerialet er identisk med det som ble anvendt i masteroppgaven ” Bøyeforsøk av massivtrebjelker”, utført av Olav Øvstebø våren 2015. Materialene, produsert av Massiv Lust AS, ble levert til NMBU i 2015, og er blitt lagret vekselvis utendørs og innendørs. Prøvenes fuktinnhold ble registrert ved testing, og forsøkene er utført på trelaboratoriet ved NMBU.

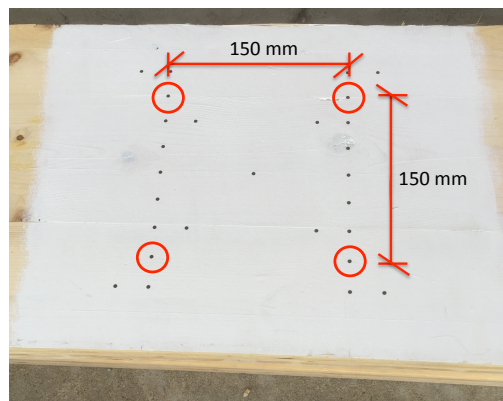
3.1.1 Beskrivelse av prøvematerialet

Prøvebjelkene var manuelt utskåret av ferdiglimte massivtreskiver bestående av fem sjikt, der alle bord i hvert sjikt er plassert side om side uten kantliming. De ytre sjiktene, samt det midterste sjiktet, har langsgående bord med fibrene i bjelkens lengderetning. Det ble klargjort 12 bjelker med lengde 3900 mm, høyde 300 mm og bredde 100 mm. Som følge av at de var utskåret manuelt, er antallet hele langsgående bord varierende over høyden til tverrsnittet. For å i etterkant kunne gjøre en vurdering av en eventuell effekt av denne variasjonen, ble det foretatt en registrering av plasseringen og skillet mellom langsgående bord (Se Figur 13). Det er viktig å notere seg at NS-EN 16351 setter krav til at skillet mellom de bord som ikke er kantlimte skal ligge i bjelkens nøytralakse, der dette er illustrert ved to identiske langsgående bord i bjelkens høyde. Dette var ikke mulig å tilstrebe, og er derfor tatt i betraktning i den helhetlige vurderingen av testmetodikken. Alle bord var av gran med fasthetsklasse C24, og alle hele bord hadde dimensjon 20 x 122 mm. Mellomsjiktene (krysslagte sjikt), der fibrene er orientert 90 grader på bjelkens lengderetning, påvirkes ikke av manuell utskjæring, og bestod kun av hele bord.



Figur 13: Grafen viser en oversikt over plasseringen av langsgående bord i bjelkenes høyde (yttersjikt og midtsjikt). Aksen til venstre viser høyden på bjelkene, der 0 mm er bjelkenes bunn. Linjen for målepunkter viser den konstante plasseringen av kvadratet (skjærfeltet) for måling av skjærdeformasjon. Til høyre for grafen er data for prøve 12 tatt ut, og illustrert som et eksempel.

Standarden angir at det, på hver side av bjelken, skal defineres fire punkter i hvert hjørne av et kvadrat på 150 x 150 mm. Kvadratet definerer skjærfeltet, og skal være symmetriske om bjelkehøydens senter. Bestemmelse av skjærstivhet skal gjøres ved målinger i dette feltet, og det er derfor viktig at det punktene er svært nøyaktige. Bjelkene ble malt hvite i området rundt kvadratet som skulle analyseres, og en mal med sorte referansepunkter ble så klistret opp på det hvite underlaget. Malen hadde totalt 27 like punkter for å ha muligheten til å hente ut forskyvninger vilkårlige steder i kvadratet (Se Figur 14).

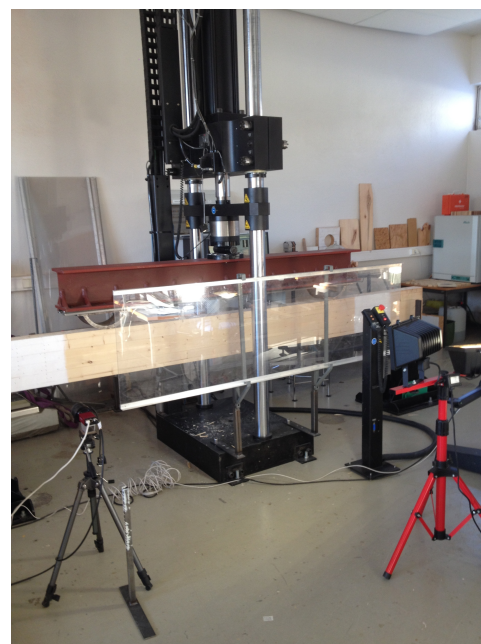


Figur 14: Referansepunkter til måling av deformasjoner på prøvebjelkene

3.1.2 Oppsett av testrigg

Avstanden mellom oppleggene ble finjustert for å få nøyaktig samme belastningssymmetri som i NS-EN 16351 (Se Figur 15). Det ene opplegget er fritt til å skli, slik at bjelkene kan regnes som fritt opplagte. Lastcellen er festet til en stålbjelke som igjen fordeler lasten til to symmetriske punktlaster. Lasten registreres med en nøyaktighet på 0,001 N, som er godt innenfor standardens krav. Spennet mellom oppleggene var 3,6 m, og avstanden mellom de to punktlastene var 1,8 m.

To kameraer, ett på hver side av bjelken, ble satt opp for å måle lokale deformasjoner i det hvitmalt området med referansepunkter. Lys og sikkerhetsskjerm ble satt opp, og riggen var dermed klar til å begynne testingen.

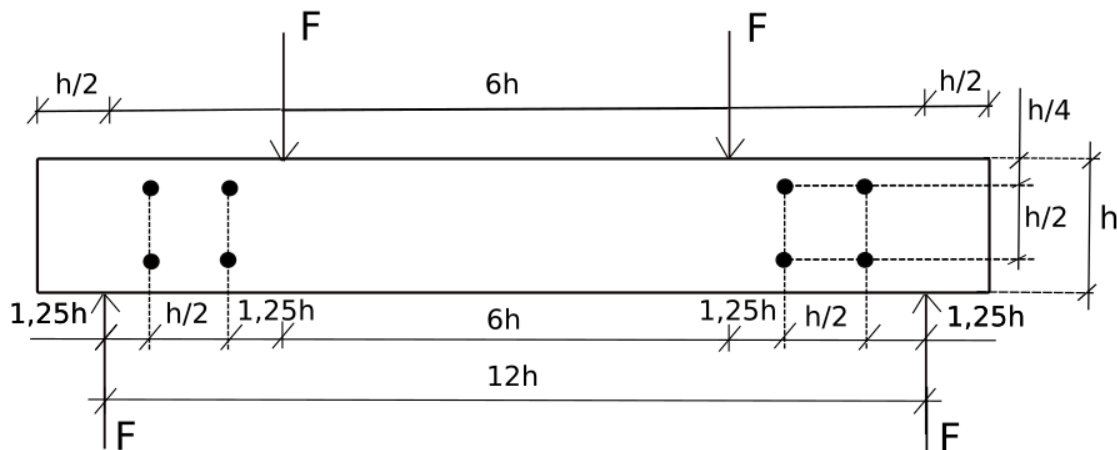


Figur 15: Oppsett av testrigg på trelaboratoriet ved NMBU

3.1.3 Test av bjelkenes stivhet

NS-EN 408 angir at lasten ikke skal overstige 40% av bjelkens bruddlast, for ikke å gi bjelken noen varige skader under belastning. Ved å regne bjelken som heltre med fasthetsklasse C24, der bøyespennings er dimensjonerende, får man en bruddlast på 80 kN. Denne lasten vil være betydelig lavere enn bruddlasten til en massivtrebjelke, og derfor er 40% av 80 kN godt innenfor kravet. Nedre lastgrense ble satt til 5000 kN, og en øvre lastgrense ble satt til 32000 kN. Bjelkene ble testet gjennom tre kontinuerlige lastsykluser mellom nedre og øvre

lastgrense. Lasten hadde en konstant hastighet på 8 mm/min, som er langt innenfor kravet på $(0,003 \cdot h)$ mm/s, der høyden er 300 mm. Kameraene tok 3 bilder i sekundet, og det ble dermed rundt 1100 bilder å analysere per kamera for hver prøve. Prøvebjelkenes stivhet, G-modulen, bestemmes ut fra skjærdeformasjonen i det kvadratiske skjærfeltet som er definert av de sorte referansepunktene på prøven (Se Figur 16).



Figur 16: Oppsett av testkonfigurasjon etter NS-EN 16351. De sorte punktene illustrerer målepunkter for deformasjoner. Her er høyden (h) 300 mm.

Skjærdeformasjonen er lik gjennomsnittet til de maksimale absoluttverdiene av lengdeendringen i de to diagonalene til det kvadratiske skjærfeltet. Kameraene og lastcellen er koblet til hver sin datamaskin, og bildedata og lastdata lagres dermed i to separate program. For å samkjøre resultatene ble tid og bildenummer registrert manuelt underveis i lastsyklusen, slik at man kunne sammenkoble all data i etterkant. Målemetoden er videre beskrevet i kapittel 3.2.

G-modulen beregnes etter likning 2 i teoridelen, og uttrykkes i N/mm^2 .

3.1.4 Bruddtest

Etter testingen av stivhet, ble alle prøver kjørt til brudd.. Testtriggen var av nøyaktig samme symmetri som ved testing av stivhet. Lastcellen hadde en konstant hastighet på 10 mm/min, og belastet helt til det oppstod 70% tap av motstand i prøven. Det ble da betraktet som brudd. Kameraene tok, på samme måte som tidligere, bilder av hele prosessen fra ubelastet bjelke til brudd oppstod. Bruddlast og bruddutvikling ble så registrert, men inkluderes ikke i denne studien. Deformasjonene ble derimot registrert for å inneha muligheten til å sammenlikne deformasjoner i diagonalene ved større belastning, noe som kan være relevant i analysen.

3.1.5 Bestemmelse av fuktinnhold og densitet

Rett etter brudd ble bjelkene kuttet av i tilnærmet upåvirket sone nærmest mulig bruddet, for så å bestemme prøvenes fuktinnhold og densitet. Det ble så skåret ut seks prøvestykker, nummerert a-f, fra en halvdel av bjelketverrsnittet. Tre prøver ble skåret ut fra toppen og tre fra bjelkens senter (Se Figur 17). Prøvestykkene var ca 30x30x20 mm, og ble målt, veiet og nedsunket i vann så raskt som mulig etter bruddforsøk. De ble deretter satt i tørkeskap på 103 grader celsius, der de lå i 24 timer før de ble kontrollveid med 12 timers intervall. Dette for å være helt sikker på at massen var konstant i tørr tilstand. Når massen var konstant, ble prøvene tatt ut av tørkeskapet og veiet varme etter tørke/veie-metoden i EN-13183-1. Fuktighetsinnholdet for hver prøve ble regnet ut ved forholdet mellom tør og våt vekt.



Figur 17: Bildet viser de seks prøvestykkene, nummerert a-f, som ble skåret ut av hver bjelke for registrering av densitet og fuktinnhold

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (15)$$

der

m_1 er massen til prøvestykket før tørking, i gram

m_1 er massen til prøvestykket etter tørking, i gram

ω er fuktinnholdet til prøven, i prosent

Fuktighetsinnholdet for hver bjelke ble bestemt ut i fra gjennomsnittet til summen av fuktinnholdet i de 6 prøvebitene tatt ut av tverrsnittet. Densiteten er bestemt ved oppdrift og arkimedes prinsipp, ved å dyppe prøven i vann og måle vekten av erstattet volum. Densitet og fuktinnhold for prøvestykker og bjelker er vist i tabell 1 og tabell 2.

Tabell 1 - Gjennomsnittlig fuktinnhold og densitet i de seks prøvestykkene

Prøvestykke	Fuktinnhold %	Densitet kg/m ³
a	7,37	407
b	7,06	434
c	8,30	499
d	8,71	463
e	8,96	457
f	9,49	453

Tabell 2 - Densitet og fuktinnhold i prøvebjelkene

Bjelkenummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Gj.snitt
Densitet (kg/m ³)	467	444	427	482	409	409	446	465	458	446	508	466	452,1
Fuktinnhold (%)	8,07	8,29	8,48	8,48	8,21	8,40	8,58	7,87	8,33	8,56	8,00	8,48	8,3

3.2 Metode for analyse av deformasjoner

Metoden beskriver fremgangsmåten som er anvendt til å måle deformasjoner gjennom forsøkene i denne oppgaven, samt nøyaktigheten på målingene.

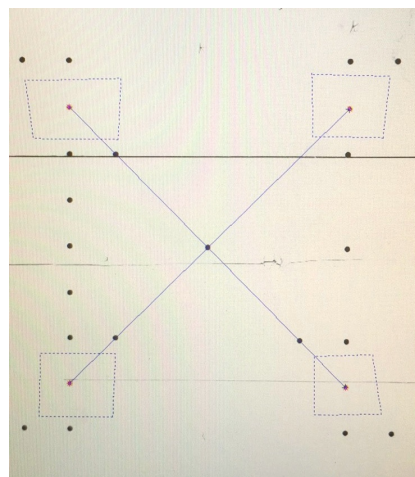
Kameraene som ble benyttet kan ta titalls bilder i sekundet, og i denne oppgaven ble det valgt en frekvens på 3 bilder i sekundet. Kameraene på hver siden av testtriggen var koblet til samme harddisk, og bildene ble videre analysert i bildebehandlingsprogrammet "Scorpion vision software".

En mal med sorte referanseprikker ble klistret på et hvitt underlag, i dette tilfellet hvit maling, på området som skulle analyseres. I "Scorpion vision software" kan man dermed hente frem et bilde, definere et område på bildet og finne skjærsenteret til en kontrast i det området. Kontrasten var i dette tilfellet de sorte referansepunktene, og derfor er kontrasten mellom underlaget og referansepunktene, samt nøyaktigheten på de sorte referanseprikkene, i stor grad avgjørende for presisjonen på målingene.

Det ble gjennom tre lastsykluser tatt omtrentlig 1100 bilder per kamera. I "Scorpion vision software" får man frem informasjon om de valgte skjærsentrene og tilhørende koordinater i piksler. Når man så kjører analyse av hele bildeserien av tre lastsykluser, kan man via et pythonskript skrive all data over i en tekstfil, og dermed har man informasjon om alle bevegelser over tid. Programmet gjør det også mulig å måle avstanden mellom to skjærsentre gjennom bildeserien, og det er denne metoden som er benyttet for å hente informasjon om diagonalenes oppførsel ved skjærbelastning (Se Figur 18).

Forholdet mellom piksler og millimeter må plottes inn manuelt for å få riktige verdier. Avstandene mellom punktene på prøven er kjent, men kameraavstanden kan variere noen millimeter fra prøve til prøve, og det er derfor nødvendig at dette kontrolleres for hver gjennomkjøring. Forholdet regnes ut ved å dividere antall piksler mellom to punkter med den kjente avstanden i millimeter. I denne oppgaven er det en kjent avstand på 150 mm mellom skjærsentrene til to referansepunkter. Verdien er for hver prøve regnet ut som gjennomsnittet til piksler per millimeter av begge diagonalene i det kjente kvadratet.

For å måle nøyaktigheten på metoden er det utført et plott av kraft og tilhørende vertikal forskyvning av et vilkårlig referansepunkt på bjelken (Se Figur 19). I følge Hookes lov er dette forholdet lineært, og nøyaktigheten er dermed målt ved å betrakte spredningen fra den lineære regresjonslinjen (Se Figur 20 og Figur 21).

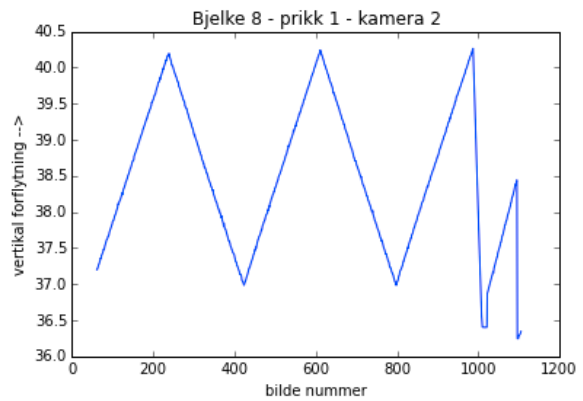


Figur 18: Diagonalene ble målt mellom motstående hjørner i et kvadrat på 150x150 mm. Bildebehandlingsprogrammet "Scorpion" regner til en hver tid ut avstanden mellom skjærsentrene i hver ende av linjene

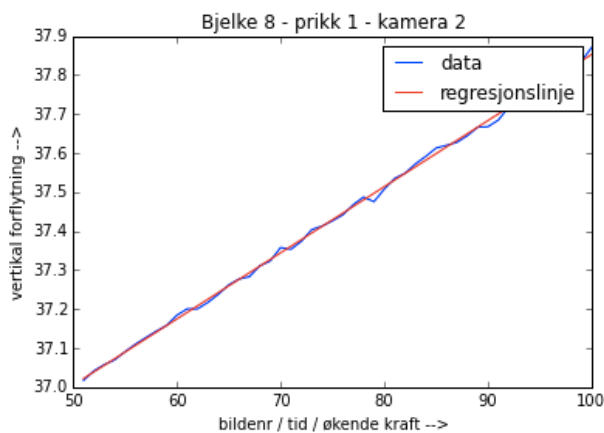
Standardavviket til spredningen (residuals) finnes av formel:

$$SD, residuals = \sqrt{\frac{\sum residuals^2}{n - 2}} \quad (16)$$

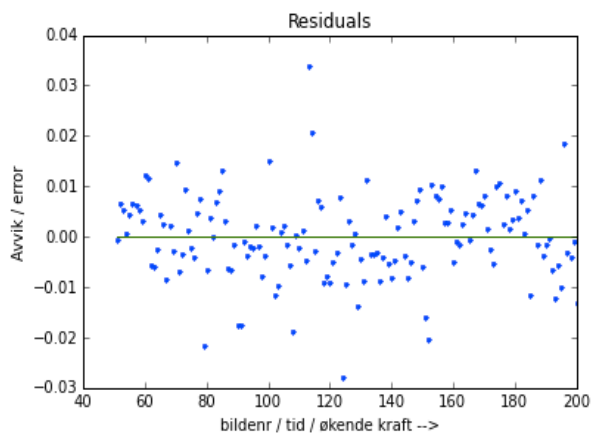
Dette gir et standardavvik på 0,0085 mm gjennom 200 bildemålinger. Altså har målingene en nøyaktighet på ca 0,43 %. NS-EN 408 setter krav til en målenøyaktighet på 1%, og metoden tilfredsstillter dermed kravet.



Figur 19: Plott av vertikal deformasjon i tre lastsykluser for et vilkårlig punkt på bjelken.



Figur 20: Vertikal deformasjon plottet mot en lineær regresjonslinje



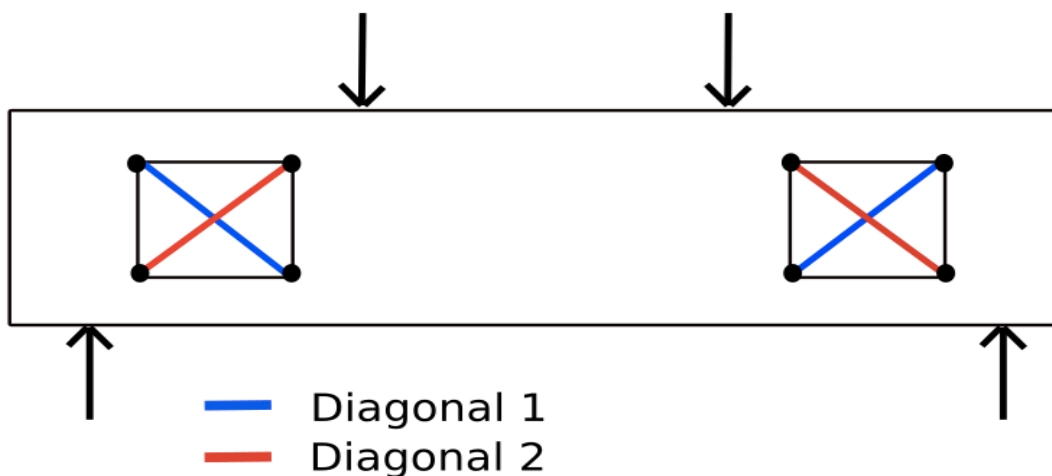
Figur 21: Grafen viser spredningen av data fra den lineære regresjonslinjen

Kapittel 4. Resultater

Dette kapittelet presenterer alle resultatene som av alle gjennomførte forsøk. Resultater fra bjelke 5 er ikke presentert, da store deler av bildeserien fra kameramålingene er uintakte, og deformasjoner kan derfor ikke analyseres.

4.1 Deformasjoner i CLT-bjelker

De oppstående deformasjonene er avgjørende for å vurdere hvorvidt testmetoden egner seg til å verifisere skjærstivheten i bjelkene. Data fra kameramålingene av bjelkenes skjærfelt er her fremstilt for hvert forsøk. Alle målinger foretatt av kameraer er overført fra ”Scorpion vision software” til txt –filer ved hjelp av et Python skript. Endringer i to motstående diagonaler er så plottet inn og presentert grafisk ved hjelp av Python. Figur 22 viser plasseringen av målte diagonaler i tverrsnittet.

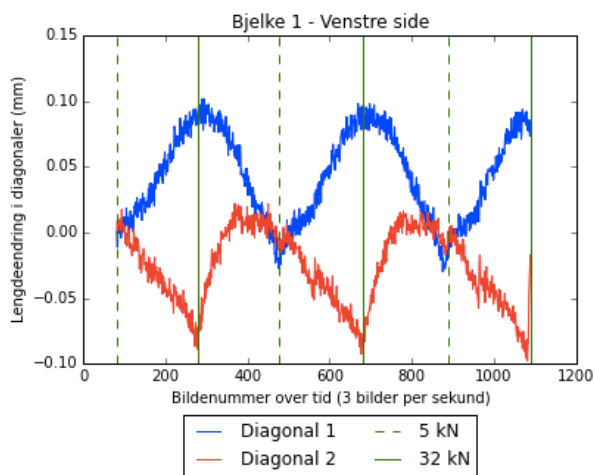


Figur 22: Oversikt over de målte diagonaler på CLT-bjelkene

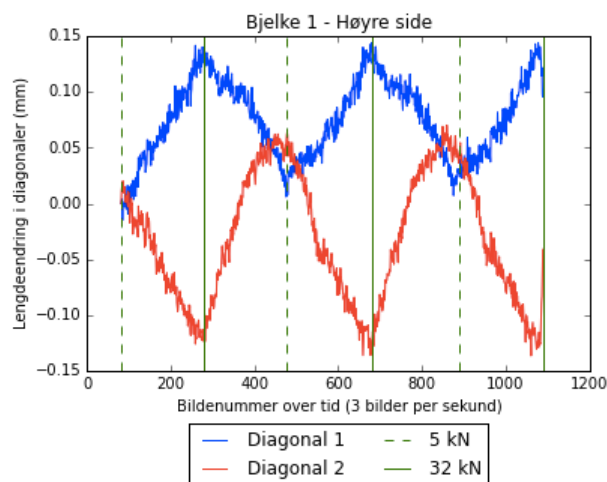
Grafene viser den relative lengdeendringen (tøyningen) i de to motstående målte diagonalene i skjærfeltene på hver side av prøvebjelkene. Testen er utført symmetrisk, og målingene er plottet inn i grafen slik at diagonal 1 på venstre side av bjelken tilsvare diagonal 1 på høyre side av bjelken, begge markert med blått. På samme måte tilsvare diagonal 2 på venstre side av bjelken diagonal 2 på høyre side av bjelken, begge markert med rødt. Voksende grafer viser en økning av lengden til diagonalen. Tilsvarende viser synkende grafer en forkortelse i lengden til diagonalen.

Stivhetstest Bjelke 1

Testingen gikk etter planen, og det oppstod ingen problemer underveis. Grafene presenterer de målte deformasjonene ved stivhetstest av bjelke 1.



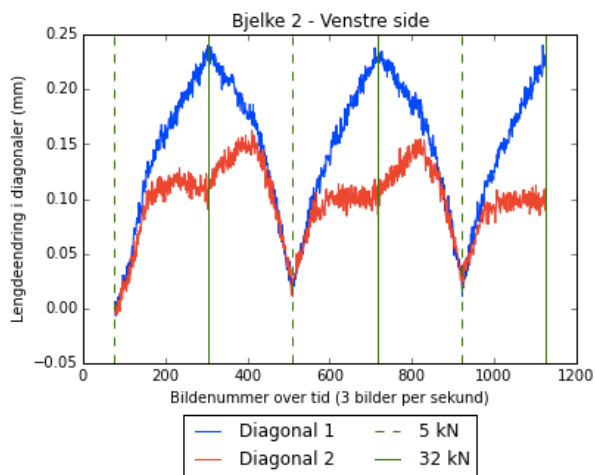
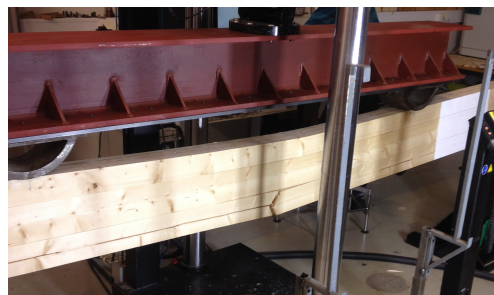
Figur 23: Grafisk fremstilling av tøyninger i motstående diagonaler på venstre side av bjelke 1



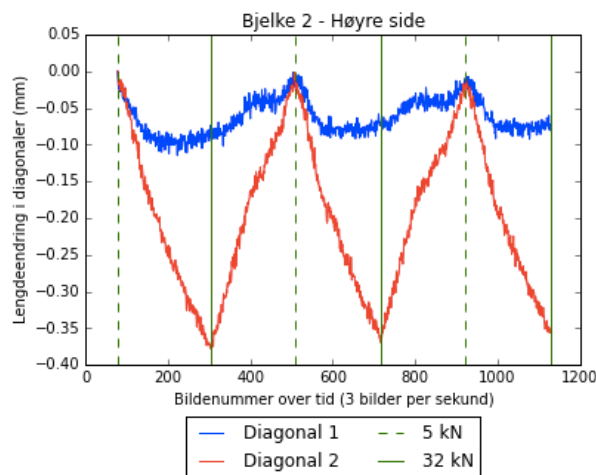
Figur 24: Grafisk fremstilling av tøyninger i motstående diagonaler på høyre side av bjelke 1

Stivhetstest Bjelke 2

Testingen gikk etter planen, og det oppstod ingen problemer underveis. Grafene presenterer de målte deformasjonene ved stivhetstest av bjelke 2.



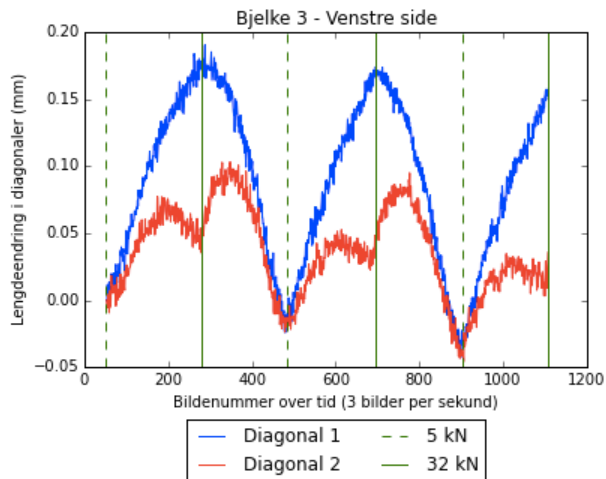
Figur 25: Grafisk fremstilling av tøyninger i motstående diagonaler på venstre side av bjelke 2



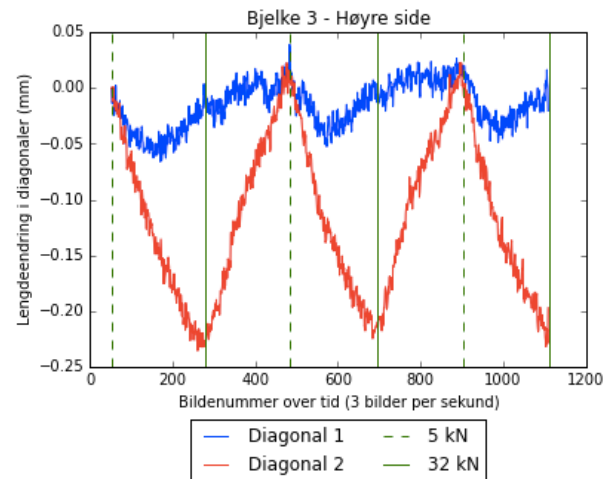
Figur 26: Grafisk fremstilling av tøyninger i motstående diagonaler på høyre side av bjelke 2

Stivhetstest Bjelke 3

Testingen gikk etter planen, og det oppstod ingen problemer underveis. Grafene presenterer de målte deformasjonene ved stivhetstest av bjelke 3.



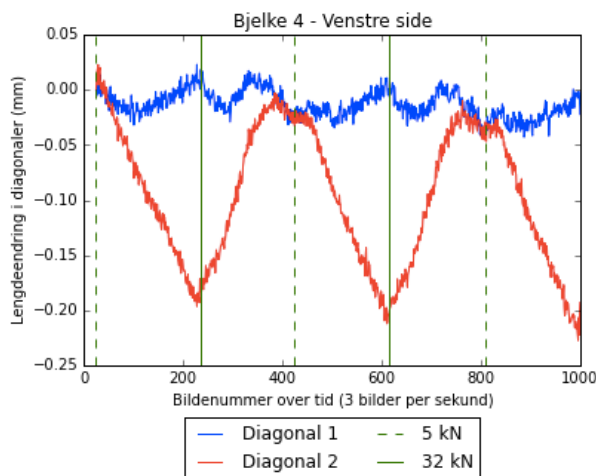
Figur 27: Grafisk fremstilling av tøyninger i motstående diagonaler på venstre side av bjelke 3



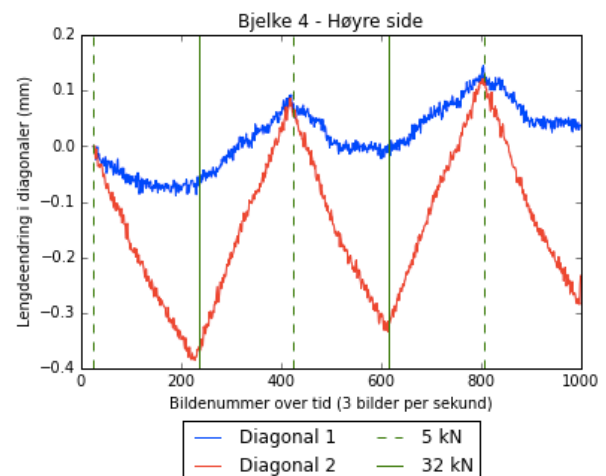
Figur 28: Grafisk fremstilling av tøyninger i motstående diagonaler på høyre side av bjelke 3

Stivhetstest Bjelke 4

Testingen gikk etter planen, og det oppstod ingen problemer underveis. Grafene presenterer de målte deformasjonene ved stivhetstest av bjelke 4.



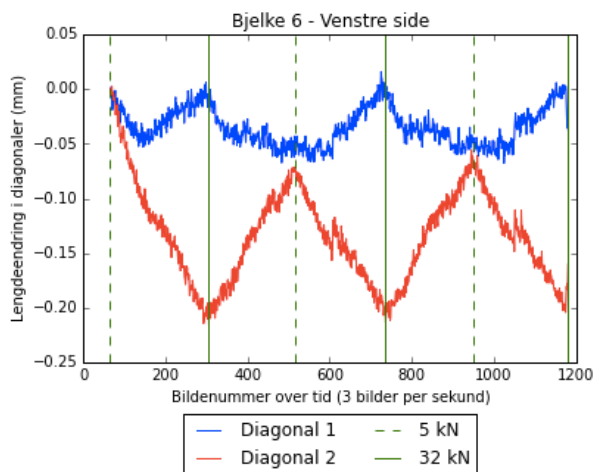
Figur 29: Grafisk fremstilling av tøyninger i motstående diagonaler på venstre side av bjelke 4



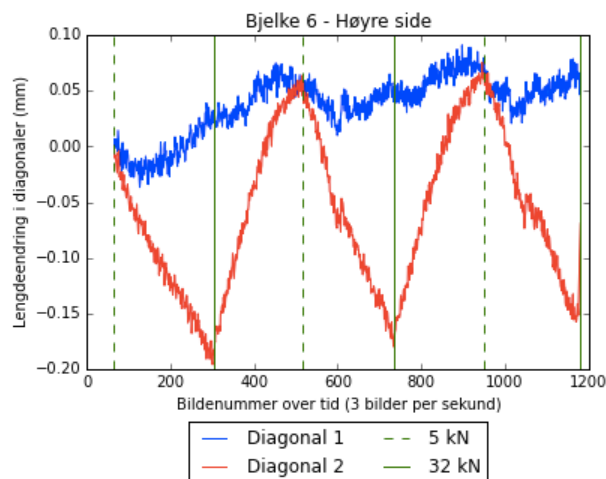
Figur 30: Grafisk fremstilling av tøyninger i motstående diagonaler på høyre side av bjelke 4

Stivhetstest Bjelke 6

Testingen gikk etter planen, og det oppstod ingen problemer underveis. Grafene presenterer de målte deformasjonene ved stivhetstest av bjelke 6.



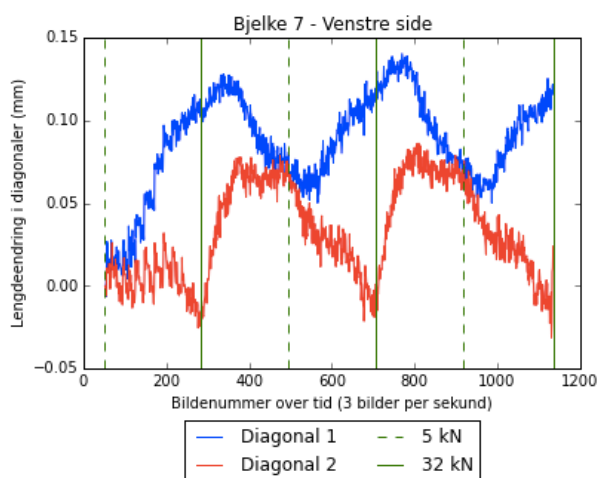
Figur 31: Grafisk fremstilling av tøyninger i motstående diagonaler på venstre side av bjelke 6



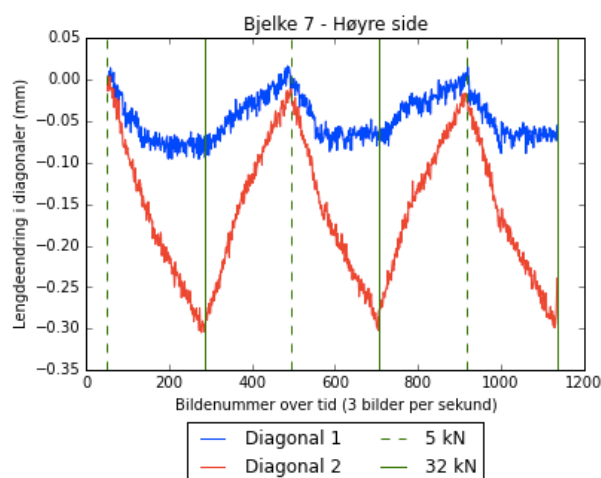
Figur 32: Grafisk fremstilling av tøyninger i motstående diagonaler på høyre side av bjelke 6

Stivhetstest Bjelke 7

Testingen gikk etter planen, og det oppstod ingen problemer underveis. Grafene presenterer de målte deformasjonene ved stivhetstest av bjelke 7.



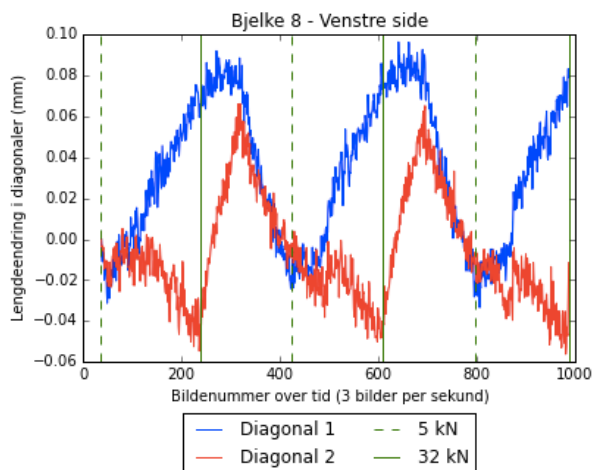
Figur 33: Grafisk fremstilling av tøyninger i motstående diagonaler på venstre side av bjelke 7



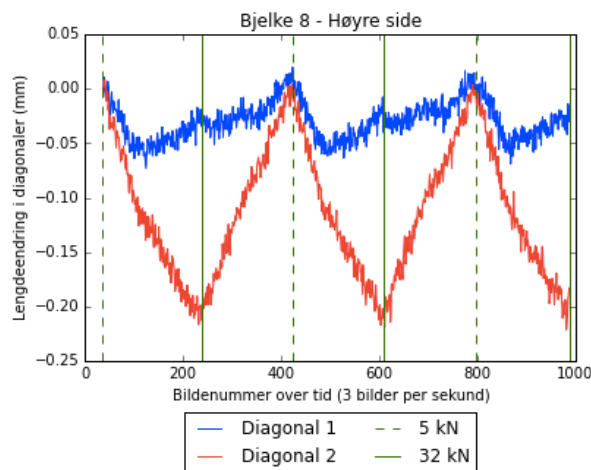
Figur 34: Grafisk fremstilling av tøyninger i motstående diagonaler på høyre side av bjelke 7

Stivhetstest Bjelke 8

Testingen gikk etter planen, og det oppstod ingen problemer underveis. Grafene presenterer de målte deformasjonene ved stivhetstest av bjelke 8.



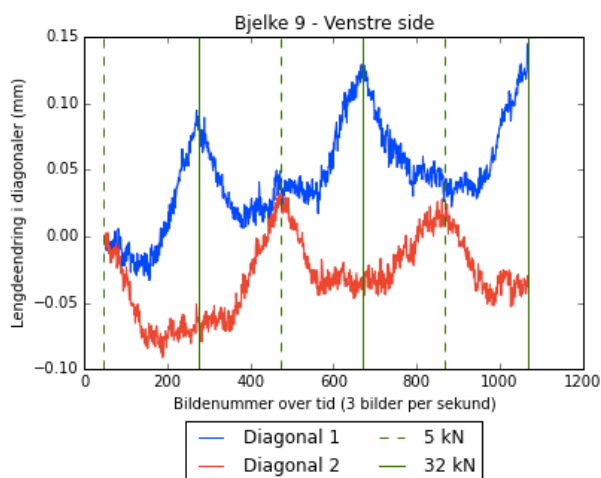
Figur 35: Grafisk fremstilling av tøyninger i motstående diagonaler på venstre side av bjelke 8



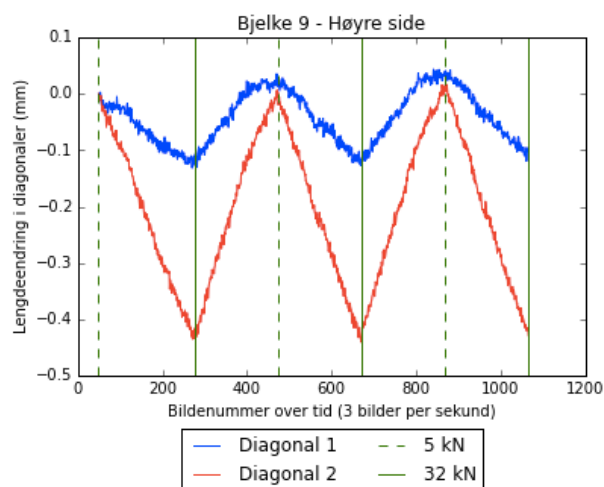
Figur 36: Grafisk fremstilling av tøyninger i motstående diagonaler på høyre side av bjelke 8

Stivhetstest Bjelke 9

Testingen gikk etter planen, og det oppstod ingen problemer underveis. Grafene presenterer de målte deformasjonene ved stivhetstest av bjelke 9.



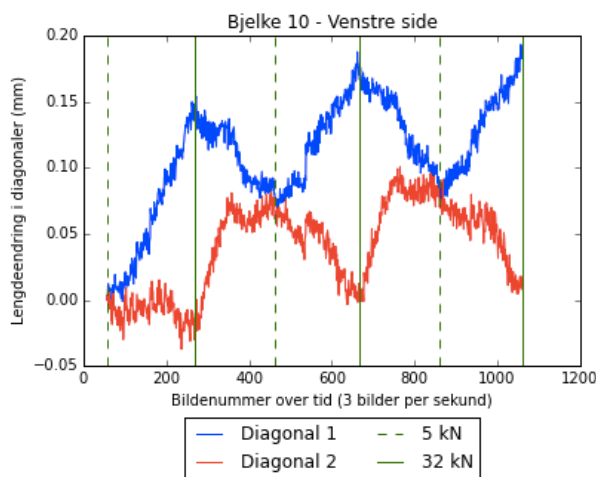
Figur 37: Grafisk fremstilling av tøyninger i motstående diagonaler på venstre side av bjelke 9



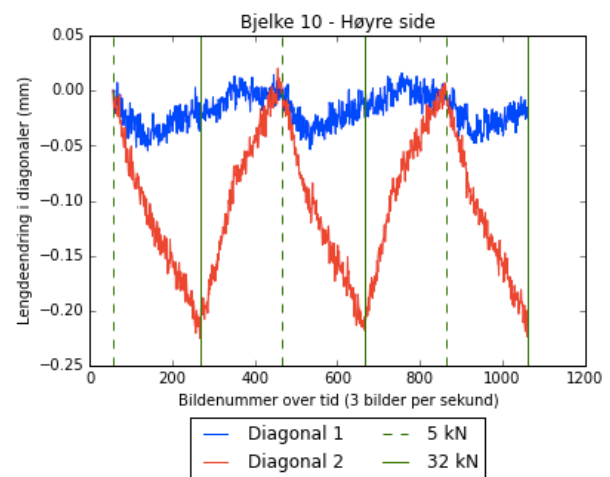
Figur 38: Grafisk fremstilling av tøyninger i motstående diagonaler på høyre side av bjelke 9

Stivhetstest Bjelke 10

Testingen gikk etter planen, og det oppstod ingen problemer underveis. Grafene presenterer de målte deformasjonene ved stivhetstest av bjelke 10.



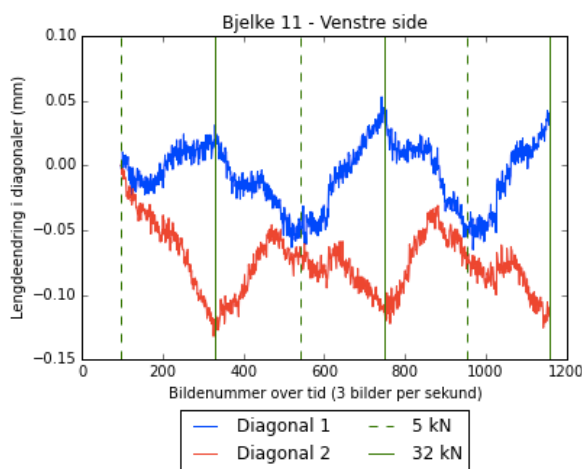
Figur 39: Grafisk fremstilling av tøyninger i motstående diagonaler på venstre side av bjelke 10



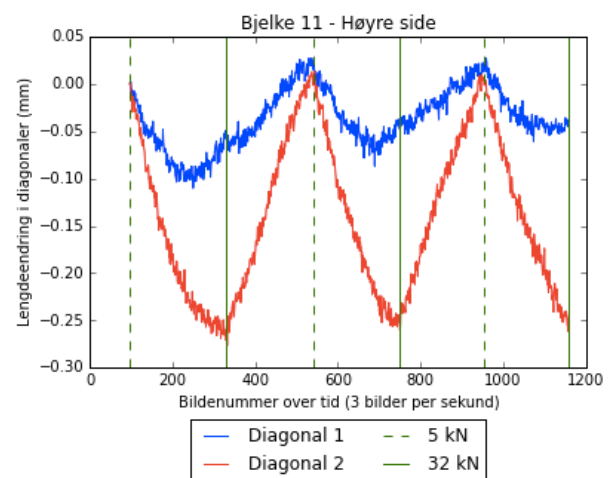
Figur 40: Grafisk fremstilling av tøyninger i motstående diagonaler på høyre side av bjelke 10

Stivhetstest Bjelke 11

Testingen gikk etter planen, og det oppstod ingen problemer underveis. Grafene presenterer de målte deformasjonene ved stivhetstest av bjelke 11.



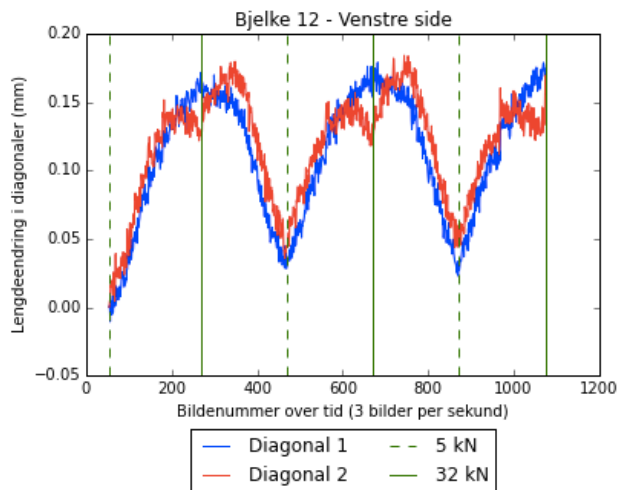
Figur 41: Grafisk fremstilling av tøyninger i motstående diagonaler på venstre side av bjelke 11



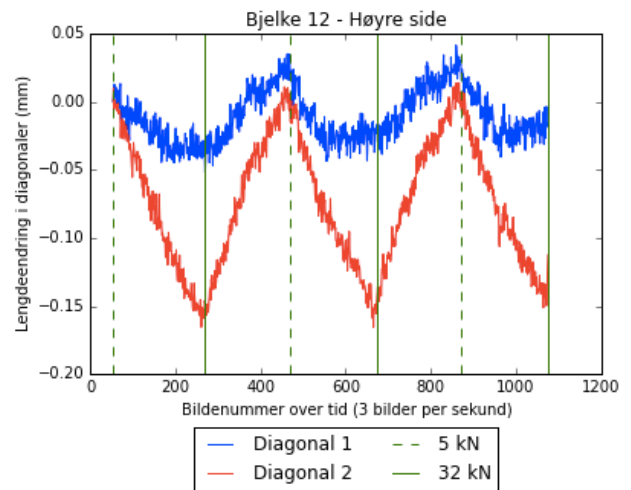
Figur 42: Grafisk fremstilling av tøyninger i motstående diagonaler på høyre side av bjelke 11

Stivhetstest Bjelke 12

Testingen gikk etter planen, og det oppstod ingen problemer underveis. Grafene presenterer de målte deformasjonene ved stivhetstest av bjelke 12.



Figur 43: Grafisk fremstilling av tøyninger i motstående diagonaler på venstre side av bjelke 12



Figur 44: Grafisk fremstilling av tøyninger i motstående diagonaler på høyre side av bjelke 12

Kapittel 5. Analyse og diskusjon

Dette kapittelet ser går inn i dybden på de presenterte resultatene, og inneholder all analyse og diskusjon som inngår i arbeidet med å besvare problemstillingen.

For å beregne direkte skjærstivhet i et materiale, er man avhengig av at deformasjonene som benyttes er rene skjærdeformasjoner som kun er forårsaket av skjærspenninger. Deformasjoner som oppstår gjennom andre krefter vil gi et feil bilde av skjærstivheten dersom de medregnes. Den utførte bjelketesten baserer seg på direkte måling av deformasjoner i et bestemt område, og gir kun grunnlag for å bestemme skjærstivheten i materialet dersom tøyningen i diagonalene skyldes rene skjærdeformasjoner. Som det fremgår av teorien i kap 2.1.1, er forholdet mellom spenning og tøyning lineært, og den teoretiske skjærdeformasjonen i et kvadrat vil dermed føre til like stor forlengelse i en av diagonalene som forkortelse av motstående diagonal. Et kvadratisk utsnitt påkjent av ren skjær vil derfor deformere seg som et parallelogram, og forandringen vil være volumtro. Da resultatene for skjærdeformasjon for prøvene indikerer at motstående diagonaler har ulik tøyning på samme tidspunkt i lastsyklusen, både i samme utsnitt og mellom motsatte sider av bjelken, gir ikke dette grunnlag for å beregne G-modulen til disse massivtrebjelkene ihht NS-EN 408.

Det er med dette gjort en videre analyse av diagonalenes oppførsel, og en vurdering av målemetoden og forskjellige parametere som kan ha innvirkning på irregulariteten i deformasjonene. Testmetodikken er så sett i sammenheng med tidligere dokumenterte testmetoder, og en heltetlig vurdering gjort i oppsummeringen.

5.1 Variasjon i deformasjoner

Den ideelle målingen av skjærdeformasjoner i et tverrsnitt ville vist at to kryssende diagonaler i et kvadratisk definert skjærfelt i tverrsnittet får like store tøyninger. Lengdeøkning i en diagonal skal altså gi tilsvarende forkortelse i den andre, og de målte diagonalene skal også ha sine maksimale absoluttverdier nøyaktig der lastencellen snur. Man ville da kunne sett en tydelig korrelasjon mellom målingene for alle prøver. Dette er ikke tilfellet i resultatene av den gjennomførte bjelketesten, der det er gjennomgående at diagonalenes oppførsel ikke samsvarer med oppførselen til skjærdeformasjoner i en bjelke. Gjennomgående for alle resultatene er at diagonalenes oppførsel er symmetriske for alle tre lastsykluser, noe som er forventet, og forteller oss at deformasjonene som oppstår ikke er tilfeldige ved hver belastning.

En sammenstilling av deformasjonene på høyre side av alle prøvebjelkene, viser at det det er en viss sammengeng fra bjelke til bjelke. Diagonal 2, som er antatt å forkorte seg ved lastøkning, får en forholdsvis lik oppførsel gjennom målingene. Det får også diagonal 1, som er antatt å forlenge seg, men det er derimot gjennomgående at diagonal 1 får en langt mindre tøyning enn diagonal 2, og at begge diagonalene faktisk ser ut til å forkorte seg. Det er dette

som motstrider teorien om like store tøyninger i de to diagonalene, og som samtidig må bety at resultatene ikke viser rene skjærdeformasjoner alene. Ved å betrakte målinger på venstre side av alle prøvebjelkene, viser resultatene at det er en betydelig irregularitet fra bjelke til bjelke. Her er det ikke noe spesielt mønster i grafene, og flere av diagonalene har vendepunkter under kontinuerlig lastpåføring.

Ved videre vurdering av sammenhengen mellom venstre og høyre side for alle 12 prøvebjelkene, viser resultatene for bjelke 1 størst samsvar med teorien, der lengdeendringene er betydelig symmetriske om 0-aksen, akse der grafene har sitt utgangspunkt i begynnelsen av første lastsyklus. Grafene for bjelke 12 viser derimot en uforståelig utvikling, og på venstre side får begge diagonalene lik tøyning i samme retning, altså at begge får en økt lengde. Dette kan indikere at krumningen fra moment har en stor innflytelse på korrelasjonen til diagonalene. Dersom en bjelke bøyes, og det blir trykk i overkant som presser punktene mot hverandre, og det i underkant blir strekk som trekker punktene fra hverandre, vil dette føre til en økning i begge diagonalenes lengder. Deformasjonene i måleområdet er veldig små, og det skal ikke mye til å forstyrre diagonalenes oppførsel og skape upresise resultater. Deformasjonene fra bøyemoment er mye større enn deformasjonene i diagonalene i skjærfeltet, og kan derfor være en faktor som påvirker trenden i målingene. De store avvikene mellom motsatte sider av samme prøve, kan også komme av virkesfeil i bordene. Likevel viser målinger på høyre side av bjelken en betydelig stødigere sammenheng mellom prøvene enn målinger på venstre side, men unntak av for bjelkene 1, 4 og 6.

Da plasseringen av langsgående bord i høyden varierer fra bjelke til bjelke, er det interessant å se om dette påvirker målingene. Effekten av bordenes symmetri kan vurderes ved å sette oppbygningen i langsgående sjikt (Se Figur 13) opp mot målingene. Bjelke 4, 8, 9 og 12 har tilnærmet samme oppbygning, og består alle av fire langsgående bord i yttersjikt. I tillegg ligger de fire ytterbordene så å si symmetrisk om bjelkens nøytralakse. Målingene for disse bjelkene viser ingen sammenhengende trend, og resultatene er verken bedre eller dårligere enn tilsvarende resultater for de andre bjelkene. Dette tyder på at bordenes plassering i høyden ikke har noen merkbar innvirkning på diagonalenes oppførsel, men også at bord som er plassert symmetrisk om bjelkens nøytralakse gir samme irregularitet som vilkårlig plasserte bord. Standarden angir at alle bjelkene skal bestå av to identiske bord, der skillet mellom dem er plassert i nøytralaksen av bjelken. Våre resultater indikerer derimot at det ikke er nødvendig å følge kravet i standarden for å kunne bedømme hvorvidt testmetoden egner seg til å finne skjærdeformasjoner og tilhørende skjærstivhet i CLT-bjelker. For å bygge videre på analysen av symmetrien i til bordene og tilhørende målinger, er det forsøkt å flytte på det oppmålte skjærfeltet. Det er gjort registrerte målinger høyere opp i tverrsnittet for å undersøke effekten av plasseringen til det kvadratiske skjærfeltet. For Bjelke 8, er de fire hovedmålepunktene hevet 25 mm opp fra det opprinnelige skjærfeltet i bjelketverrsnittet, som igjen vil gi usymmetriske målinger om bjelkens nøytralakse. Målingene viser likevel at utviklingen av tøyningen i de to diagonalene forblir den samme. (Se vedlegg)

Gjennom bruddtest av bjelkene ble det, på lik linje som for stivhetstesten, registrert deformasjoner i tverrsnittet. Ut fra disse dataene kan man vurdere utviklingen i tverrsnittet over lengere tid enn én lastsyklus. Gjennom en nærmere analyse av bjelke 3 under bruddtest (Se vedlegg) ble det observert at dataene gir et tydeligere bilde av lengdeendringene over tid, uten forstyrrelse av vendepunkter grunnet lastsykluser slik som i stivhetstesten. Man kan se at diagonal 1 får svært liten tøyning i forhold til diagonal 2, og at dette fortsatt motstrider teorien om rene skjærdeformasjoner. Selv om deformasjonsanalyse over større lastintervall og lengre tid viser et tydeligere bilde av endringene som oppstår, gir likevel analysene fra stivhetstesten grunnlag for å vurdere validiteten til bjelketesten. NS-EN 408 sier også at deformasjonene skal utledes fra stivhetstesten, altså gjennom tre lastsykluser der maksimal belastning skal være under 40% av antatt bruddlast.

5.2 Vurdering av målemetoden

Bildebehandlingsprogrammet ”Scorpion vision software” regnes som stødig, da lineariteten til vertikal forskyvning viser seg å være tilstrekkelig lik den lineære regresjonslinja, og fordi målingene av lengden mellom to skjærsentere har et standardavvik på kun 0,0085 mm. Residuaene viser ingen åpenbare feil, og det sannsynlig at det største avviket fra standardavviket ligger i usikkerhet i bildebehandlingsprogrammet. Usikkerhetene kommer av ørsmå hopp i diagonalenes lengder, da ”Scorpion vision software” ikke klarer å finne prikkens eksakte tyngdepunkt gjennom hele analysen.

Omgjøringen fra piksler til millimeter er gjort manuelt. Som nevnt i metoden er dette basert på forholdet mellom diagonalenes piksler og den kjente lengden på diagonalen i millimeter. Verdien sørger kun for riktig lengde i millimeter, og påvirker derfor ikke oppførselen i diagonalene som her er analysert. Lengden på diagonalene har noen få tusendels piksler forskjell, som gjennom beregninger viser seg å være ubetydelig for riktig lengdeenhet av deformasjon i diagonalene. Omgjøringen er pålitelig, og den forstyrrer heller ikke målingene.

Kameraene og lasten ble startet manuelt, men lastsyklusen og bildemålingene over tid, er i ettertid sammenkoblet. Noen sekunders avvik mellom graf og last vil likevel ikke påvirke trendene til grafene for forskyvning, og vil heller ikke påvirke tolkningen av grafene presentert i resultatdelen. Alle data vedrørende deformasjonene i diagonalene er direkte overført fra ”Scorpion vision software” til tekstfiler. Det er ikke gjort endringer av data i tekstfilene før de er plottet inn som grafer i python, og derfor har prosessen heller ikke påvirket resultatene.

Ingen av de dokumenterte testmetodene i kapittel 2.4 benytter kameraer til å måle deformasjoner i tverrsnittet, men metoden er i henhold til kravet til målenøyaktighet i NS-EN 16351. Målemetoden som helhet vurderes som god, og danner derfor grunnlag for å si at diagonalenes oppførsel er helt reell.

5.3 Vurdering av lastkonfigurasjon og bjelker

Symmetrien i selve testtriggen, avstand mellom opplegg og lastpresse, ble finjustert etter bjelkenes oppmålinger, og regnes som identisk for hvert forsøk. Det kan likevel ha oppstått små avvik på noen millimeter gjennom manuell oppmåling av bjelker, men det vil ikke gi utslag på oppførselen mellom diagonaler i skjærfeltet, kun eventuelle ørsmå forskjeller i total skjærdeformasjon på hver side av bjelken. Symmetrien ble også kontrollsjekket flere ganger for hver bjelke, for å sikre at resultatene på venstre og høyre side av prøven hadde like forutsetninger for å kunne vurderes opp mot hverandre.

Alle prøvebjelker ble lagret under samme forhold, og fuktinnhold og densitet vil ikke ha betydning ved sammenlikning av resultater, kun ved bestemmelse av prøvenes totale skjærstivhet. Bjelkene hadde samme dimensjoner og samme styrkeklasse på alle bord.

5.4 Vurdering av testmetodikk

Den gjennomførte eksperimentelle testingen er utført i henhold til ” Shear stiffness for cross laminated timber in plane bending test” NS-EN 16351. Testkonfigurasjonene er ukomplisert å sette opp, men samtidig forholdsvis tidkrevende. Det definerte skjærfeltet er i samsvar med oppsettet i standarden. Målinger basert på ” Shear field test method” i NS-EN 408, ment for bestemmelse av skjærstivheten i limtre, gir resultater som ikke gjør det mulig å bestemme skjærdeformasjoner i overflaten på de anvendte massivtrebjelkene. Dette antyder at oppførselen i overflaten må være annerledes i en limtrebjelke enn i en massivtrebjelke, og at skjærstivheten i CLT-bjelker med vilkårlig plassering av bord ikke kan utledes ved vanlig skjærfeltteori for en bjelke.

Bordene i prøvebjelkene er ikke kantlimte. Som beskrevet av Flaig og Blaß (2013), vil ikke bord med ulimte kanter kunne føre skjærkreftene direkte videre til neste bord i samme sjikt. Kreftene må gå via bakomliggende bord, og fører dermed til større samlede skjærspenninger i disse områdene. I de gjennomførte forsøkene deles det definerte skjærfeltet av ett eller flere skiller mellom ulimte kanter av sideliggende langsgående bord (Se Figur 13). Det vil derfor ikke være kontinuitet i materialet i det målte yttersjiktet av bjelkene. Dette, i kombinasjon med et stort bøyemoment, kan gjøre det vanskelig å måle elementets totale skjærdeformasjon av de ytre bordene i bjelkens lengderetning. Det antas derfor at dette kan påvirke resultatene i den gjennomførte testen, og kan være noe av grunnen til irrasjonaliteten som oppstår mellom diagonalenes tøyning.

Felles for de dokumenterte testmetodene av hele CLT-skiver i kapittel 2.4, er at skjærdeformasjonene blir målt diagonalt i et skjærfelt i yttersjiktet. I motsetning til for bjelketesten, oppstår det ikke bøyning av materialet som følge av moment, og flere av målingene viser seg å samsvare godt med tilhørende analytiske beregninger eller FEM-

analyser. Selv om funnene fra de forskjellige dokumenterte metodene spriker, tyder de stabile resultatene fra hver testkonfigurasjon på god testmetodikk. Testkonfigurasjonen til Bogensperger, Moosbrugget, Schickhofer (2007) viser seg å overføre rene skjærspenninger via den kontinuerlige stålrammen rundt prøveskiven, mens kreftene i testtriggen til Andreolli, Rigamonti og Tomasi (2014) må omregnes ved hjelp av en faktor for få en reell skjærstivhet. Felles for deres testmetoder, er at målinger av diagonalenes endringer i skivenes definerte skjærfelt gir et godt bilde av skjærdeformasjoner, med tilhørende stabile resultater innad. Brandner et al. (2015) benytter to metoder for utledning av G-modul, hvorav den ene er basert på bergeninger fra EN-408, altså en metode basert på bestemmelse av skjærstivhet i limtre og konstruksjonstre. Målingene foretas i diagonalene, og egner seg bedre enn den analytiske løsningen, der E-modul må hentes fra andre dokumenterte metoder. Dette viser at EN-408, hovedsakelig ment for limtre, kan gi grunnlag for å verifisere skjærstivheten i CLT, men da for skiver uten påvirkning fra bøyemoment.

Alle prøvebjelkene ga bøyebrydd, og gir derfor ikke noe klart innblikk i skjærstyrke og feilmeknismer som oppstår av skjær. Dersom de målte deformasjonene hadde vist seg å samsvare med skjærteori, kunne en sammenlikning med andres funn av stivhet være relevant, men dette er ikke tilfellet i de gjennomførte bjelketestene.

5.5 Oppsummering

Gjennom analysen av variasjon i deformasjoner er det gjort en sammenlikning av de målte deformasjonene i skjærfeltet til hver av prøvebjelkene. Det forekommer stor irregularitet mellom målinger utført på to sider av samme prøve. Felles for alle resultatene er at de opptredende tøyninger i diagonalene for hver bjelke er identiske for hver lastsyklus, som igjen indikerer at resultatene ikke er tilfeldige. En sammenstilling av målinger på høyre side av bjelkene, viser til gjennomgående stødige resultater. Her fremkommer det at begge diagonalene forkorter seg under belastning, noe som må bety at deformasjonene ikke er rene skjærdeformasjoner, men at lengden til diagonalene påvirkes av andre parametere. Målinger på venstre side av bjelkene viser derimot ingen samvariasjon. Det er naturlig å ha noe avvik mellom to sider av samme prøve, og det kan blant annet skyldes virkesfeil i treet, men i dette tilfellet er det konsekvent venstre side som ikke viser til noen sammenheng.

Nøyaktigheten på målemetoden tilfredsstillende kravet i standarden, og regnes derfor å gi et pålitelig bilde av oppførselen i målefeltet på materialet. Testtriggenes symmetri har vært konstant under alle forsøkene, og vil gi likt grunnlag for å tolke deformasjonene i hvert forsøk. Densitet og fuktinnhold spiller ikke inn ved sammenlikning av resultater.

Tidligere dokumenterte tester viser til at deformasjonsmålinger i diagonalene i et definert skjærfelt gir et godt grunnlag for å beregne skjærstivhet, men her uten påkjenning fra bøyemoment. På bakgrunn av teorien er det antatt at de store variasjonene og avvikene i

diagonalenes oppførsel, kan skyldes oppsamlingen av skjærspenninger i området mellom bord som ikke er kantlimte, i kombinasjon med bøyemomentet som oppstår i bjelkene. Dette kan gjøre det utfordrende, og kanskje ikke mulig, å måle deformasjonene i CLT-bjelkenes overflate. Analysen utelukker videre at parametere som plasseringen av bord, og omplassering av det definerte skjærfeltet, har noe å si for resultatene. Sett bort ifra et variende antall langsgående bord i bjelkene, er alle krav til testkonfigurasjonen ellers tilfredsstilt. Målingene tyder derfor på at det i alle tilfeller vil være vanskelig å definere skjærdeformasjonene og den tilhørende skjærstivheten i CLT-bjelker ved bruk målemetoden i NS-EN 408.

Kapittel 6. Konklusjon

Bjelketesten gir resultater som indikerer at bevegelsene i målefeltet ikke viser rene skjærdeformasjoner alene. Det er gjennomgående at motstående diagonaler beveger seg ulikt, og oppførselen i skjærfeltet samsvarer derfor ikke med teorien. Samtidig er deformasjonene små, og det er ingen klar korrelasjon mellom deformasjoner målt på to sider av samme prøve. Målingene gir derfor ikke grunnlag for å beregne skjærstivheten i de gjennomførte forsøkene. Det antas at et stort bøyemoment, i kombinasjon med skjærkreftenes diskontinuitet i det ulimte skillet mellom langsgående bord, er noe av årsaken til uklare deformasjoner. De standardiserte kravene til gjennomføring og målenøyaktighet er oppfylt, og gir like forutsetninger for å kunne bedømme resultatene til hver prøve.

Med dette trekkes følgende konklusjon:

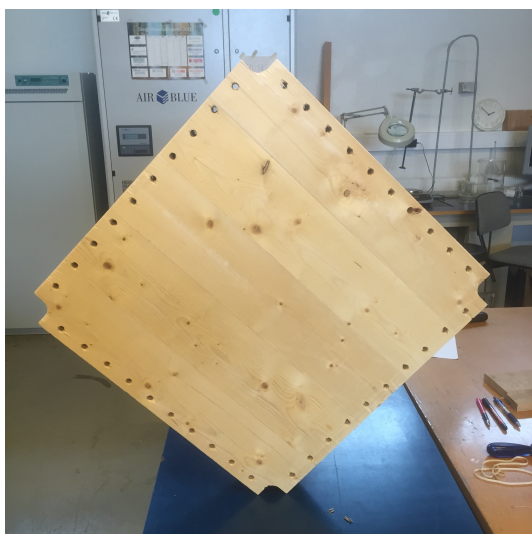
” Shear field test method” i NS-EN 408 er uegnet til å verifisere skjærstivheten i CLT-bjelkene testet etter ”Shear stiffness for cross laminated timber in plane bending test” i NS-EN 16351. Resultatene gir også grunnlag for å anta at det i alle tilfeller vil være vanskelig å verifisere skjærstivheten i CLT-bjelker ved bruk av denne testmetodikken.

Kapittel 7. Videre arbeid og forslag til ny testrigg

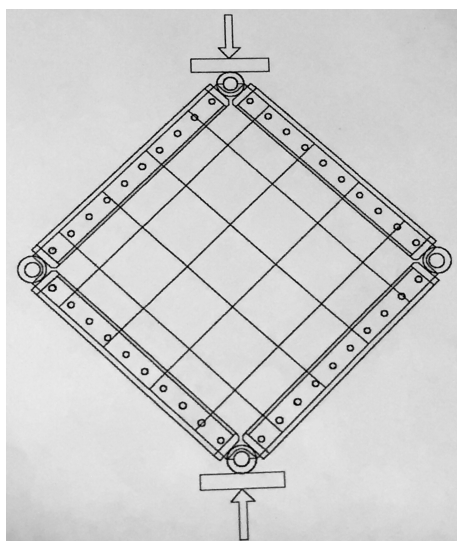
Det er, som nevnt i kapittel 3, ikke funnet noen dokumentert gjennomføring av bøyetester for å verifisere skjærstivheten i CLT. Da bøyetesten i denne oppgaven viser seg å være uegnet til å fastslå stivhetsegenskaper i planet, foreslås det å gå videre med utviklingen av testkonfigurasjoner for CLT-skiver. Tidligere dokumenterte testmetoder for CLT-skiver, som også anvender målinger av diagonaler i definerte skjærfelt, viser seg å gi resultater som er stødige. Disse er ikke utsatt for bøyemoment slik som bjelkene i denne studien. Samtidig oppstår det i flere tilfeller en kombinasjon av skjær og trykk i skivene, som gjør at stivheten må korregeres. Dersom det kan utvikles en testkonfigurasjon som gjør det mulig å påføre rene skjærspenninger alene, uten at prøven skades eller påvirkes av andre parametere, vil dette være å foretrekke.

Basert på erfaringer fra tidligere dokumenterte testmetoder er det, ved siden av arbeidet med å evaluere bjelketesten, utarbeidet en potensiell testrigg for å verifisere skjærstivheten av CLT-skiver i planet. Hensikten er å skape en testrigg som kan fremstille en situasjon med rene skjærspenninger, der en kan få frem direkte skjærdeformasjon i skivene uten påvirkninger fra andre krefter eller spenninger. Tanken er, for at treet skal kunne deformere seg naturlig, å tilføre prøven krefter via en leddet stålramme som er bundet til CLT-skivene ved hjelp av friksjon (Se Figur 46). Dette vil i teorien deformere skiven til et parallellogram som kan beskrive skjærdeformasjon direkte uten at noen nødvendig korreksjon må benyttes ved betraktning av resultatene.

Arbeidet med testkonfigurasjonen er allerede i gang, og stålrammen er nå i produksjon. Prøveskivene ligger klare til testing i trelaboratoriet ved NMBU (Se Figur 45). Skivene er skåret ut maskinelt fra massivtreelementer, identiske med de som er benyttet til å skjære ut bjelker i denne oppgaven, og er kvadratiske med sidekanter på 600 mm og en tykkelse på 100 mm.



Figur 45: CLT-skiver klare for testing. Skivene er 600x600x100 mm



Figur 46: Forslag til ny testkonfigurasjon

Hjørnene på skivene er skåret bort for å få plass til frie roterende ledd, slik at treet er fritt til å deformere seg. For å få tilstrekkelig samvirke mellom rammen og prøvestykket, er planen å benytte gummilister, der friksjonen skapes ved å tre bolter gjennom hull i randen på prøven, for så å stramme til. Tanken er at boltene, i tillegg til gummifriksjonen, vil overføre trykkraften som rene skjærspenninger i treet. Såfremt det ikke oppstår sprekker inntil hullene langs randen av prøven, er det sannsynlig at man ved denne metoden kan hente ut rene skjærdeformasjoner i tversnittet, der skjærdeformasjonene måles på samme måte som i testkonfigurasjonen til Andreolli, Rigamonti og Tomasi (2014). Testmetoden er en forenkling av en skjærttest for betong, beskrevet av Vecchio og Collins (1986). Denne skjærttesten gjorde det mulig å tilføre betongprøven alle mulige kombinasjoner av skjær, trykk og strekk ved å belaste innebygde stålstenger i prøven. Dette er ikke mulig å få til i massivtre, og derfor er en leddet stålramme valgt som lastmekanisme. En mer detaljert beskrivelse av denne testkonfigurasjonen vil bli publisert av Anders Nygård (2016).

Kapittel 8. Kilder

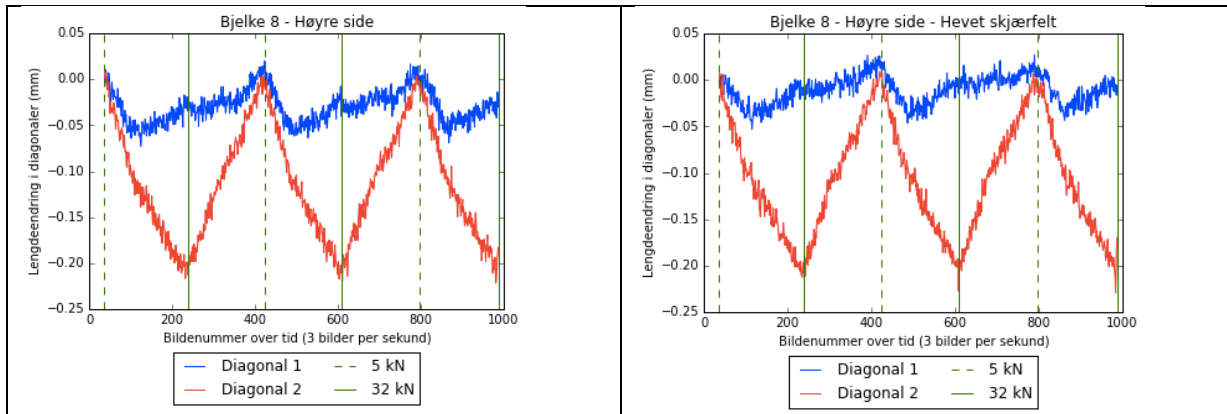
- Andreolli, M, Rigamonti, M og Tomasi, R (2014) "Diagonal compression test on cross laminated timber panels" *WCTE 2014*, Quebec, Canada.
- Boogensperger, T, Moosbrugger, T og Schickhofer, G (2007) "New test configuration for CLT-wall-elements under shear load" *CIB-W18/40-21-2*, Bled, Slovenia.
- Boogensperger, T, Moosbrugger, T og Silly, G (2010) "Verification of CLT-plates under loads in plane" *WCTE 2010*, Riva del Garda, Italia.
- Brandner, R, Dietsch, P, Dröscher, J, Schulte-Wrede, M, Kreuzinger, H, Sieder, M, Schickhofer, G og Winter, S (2015) "Shear Properties of Cross Laminated Timber (CLT) under in-plane load: Test Configuration and Experimental Study" *INTER 2015*.
- Brandner, R (2013) "Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report" Graz, Austria.
- Lukacs, I og Björnfort, A (2016) "Structural Performance of Multi-Story-Cross-Laminated Timber (CLT) Buildings" ICSA, Guimares, Portugal.
- NS-EN 16351:2015, "Trekonstruksjoner – Krysslitt massivtre – Krav"
- NS-EN 408:2010+A1:2012, "Trekonstruksjoner – Konstruksjonstre og limtre – Bestemmelse av noen fysiske og mekaniske egenskaper". Norsk standard.
- NS-EN 13183-1:2002, "Fuktinnhold i et virkestykke av skurlast – Del 1: Bestemmelse ved tørkemetode". Norsk Standard.
- Nygård, A.S, Björnfort, A, Tsalkatidis, T, Tomasi, R (under publisering) "Test Method for Determining the In-plane Shear Stiffness of Cross Laminated Timber (CLT), *WCTE 2016*, Vienna, Austria.
- Flaig, M, og Blaß, H.J (2013) "Shear strength and shear stiffness of CLT-beams loaded in plane" *CIB-W18/46/12-3*, Vancouver, Canada.
- Hartsuijker, C og Welleman, J.W (2007) "Engineering Mechanics: Volume 2: Stresses, Strains, Displacements". Springer.
- Vecchio, F.J., Collins, M.P (1986) "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear" *ACI Journal, Proceedings*, V.83 No. 2.

Øvstebø, O (2015) *Bøyeforsøk på massivtrebjelker*. Masteroppgave. Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, Ås.

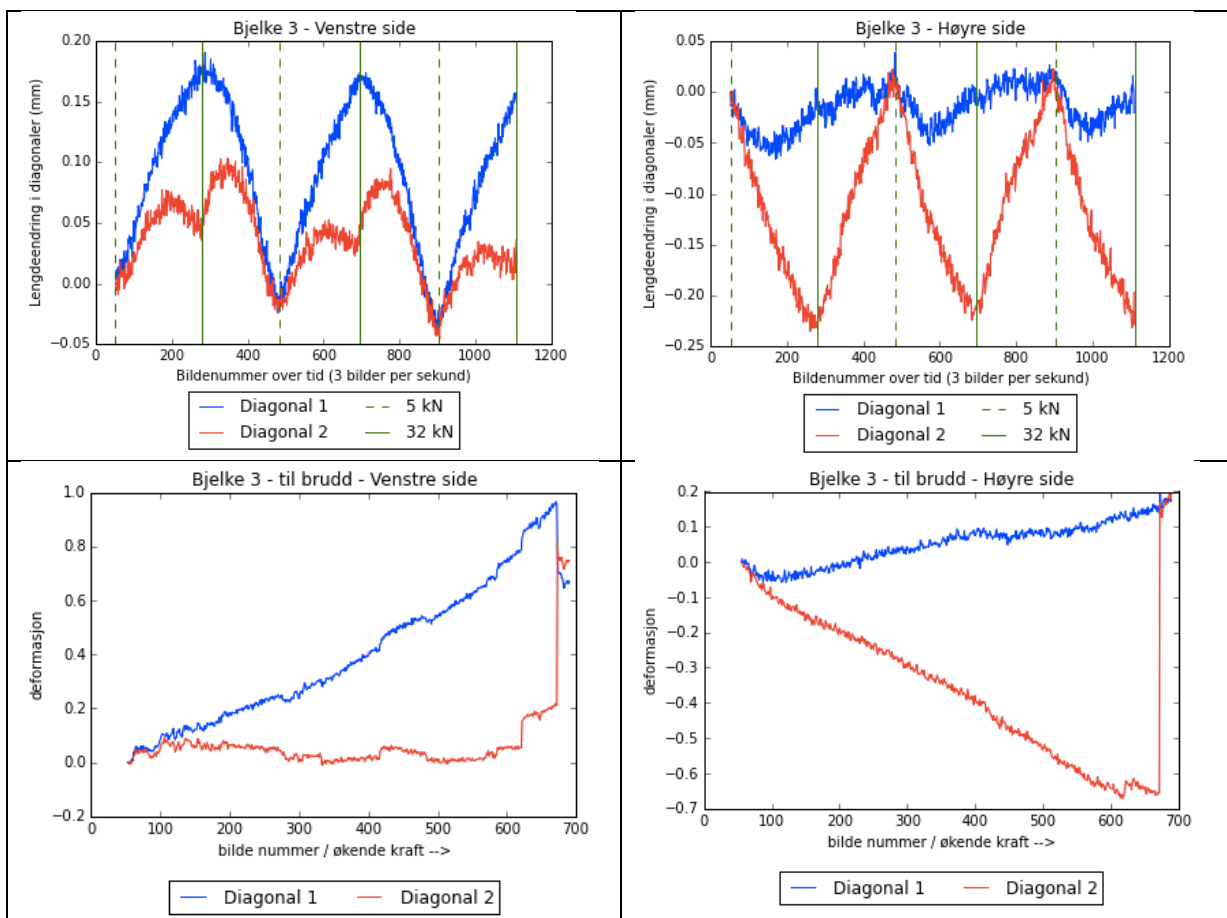
Kapittel 9. Vedlegg

Tilleggsmålinger til analyse

A.1 Deformasjonsmålinger med hevet skjærfelt



A.2 Deformasjonsmålinger til bruddlast





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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway