

Birgitta Fjellstad
Mathilde Aasen Espelid

Sammensatte bjelker av gran og bøkefinér

En undersøkelse av limtrebjelker forsterket
med bøkefinér i strekk- og trykksonen

Bacheloroppgave i Byggingeniør
Veileder: Marthin Landgraff og Leif Erik Storm
Mai 2019

Birgitta Fjellstad
Mathilde Aasen Espelid

Sammensatte bjelker av gran og bøkefinér

En undersøkelse av limtrebjelker forsterket med
bøkefinér i strekk- og trykksonen

Bacheloroppgave i Byggingeniør
Veileder: Marthin Landgraff og Leif Erik Storm
Mai 2019

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for vareproduksjon og byggteknikk

Oppgavens tittel:	Dato: 14.05.2019		
Sammensatte bjelker av gran og bøkefinér	Antall sider: 84 Sider vedlegg: 29		
<i>En undersøkelse av limtrebjelker forsterket med bøkefinér i strekk- og trykksonen</i>	Masteroppgave	Bacheloroppgave	X
Navn: Birgitta Fjellstad og Mathilde Aasen Espelid			
Veiledere: Marthin Landgraff og Leif Erik Storm			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/ veiledere: Trond Egil Nyløkken, Moelven Limtre AS			

Denne rapporten har til hensikt å undersøke hvordan de mekaniske egenskapene til en limtrebjelke av gran kan påvirkes, ved å forsterke limtrebjelken med bøkefinér i strekk- og trykksonen. De mekaniske egenskapene til en limtrebjelke er avgjørende for bæreevnen til bjelken. Derfor er formålet med denne rapporten å belyse spørsmålet om en limtrebjelke, forsterket med bøkefinér, kan oppnå forbedrede mekaniske egenskaper og dermed forbedret bæreevne. Det undersøkes hvilken betydning de mekaniske egenskapene har for bjelkenes maksimale spennvidde og minste nødvendige tverrsnittsdimensjon. Dette sammenlignes med tilsvarende forhold for en standard limtrebjelke av gran, i fasthetsklasse GL30c.

Metodene benyttet i denne undersøkelsen er teoretiske beregninger, basert på elastisk teori for komposittbjelker, og fullskalatester i laboratorium. Resultatene fra de to ulike metodene sammenlignes og danner grunnlaget for konklusjonen.

Med bakgrunn i de teoretiske beregningene og laboratorietestene, konkluderes det med at de mekaniske egenskapene til en limtrebjelke av gran påvirkes positivt, av en forsterkning med bøkefinér i strekk- og trykksonen. Det kommer fram at en sammensatt limtrebjelke, av gran og bøkefinér, i noen tilfeller kan spenne 10 % lenger enn en standard limtrebjelke av gran. Forsterkningene synes å ha størst effekt på bjelker med korte spenn, på omtrent 3 m. Nødvendig tverrsnittsdimensjon for de sammensatte limtrebjelkene ser ut til å være mindre enn for en standard limtrebjelke av gran, ved ellers like betingelser.

Stikkord:

Limtre
Gran
Forsterket
Bøkefinér
Elastisk teori for komposittbjelker

<p>Title:</p> <p>Combined beams made of spruce and beech LVL</p> <p><i>An examination of glulam beams reinforced with beech LVL in the tensile and compression zone</i></p>	<p>Date: 14.05.2019</p> <p>Pages: 84</p> <p>Appendices pages: 29</p>		
<p>Participants:</p> <p>Birgitta Fjellstad and Mathilde Aasen Espelid</p>	<p>Master thesis</p>	<p>Bachelor thesis</p>	<p>X</p>
<p>Supervisor:</p> <p>Marthin Landgraff and Leif Erik Storm</p>			
<p>External supervisor /employer:</p> <p>Trond Egil Nyløkken, Moelven Limtre AS</p>			

This report aims to examine how the mechanical properties of a glulam beam, made of spruce, can be affected by reinforcement with laminated veneer lumber (LVL), made of beech, in the tensile and compression zone. The mechanical properties of a glulam beam are crucial for the bearing capacity of the beam. Therefore, the purpose of this report is to elucidate the question of whether a glulam beam, reinforced with beech LVL, can achieve improved mechanical properties, thereby improving its bearing capacity. The significance of the mechanical properties for the beams maximum span and minimum required cross-sectional dimension is examined. This is compared with corresponding conditions for a conventional glulam beam made of spruce, in the strength class GL30c.

To examine this problem, the methods used in this thesis are theoretical calculations, based on elastic composite beam theory, and full-scale laboratory tests. The results from the two different methods are compared and form the basis for the conclusion.

Based on the theoretical calculations and the laboratory tests, it is concluded that the mechanical properties are positively influenced by reinforcing a glulam beam, made of spruce, with beech LVL in the tensile and compression zone. It emerges that a composite glulam beam, made of spruce and beech LVL, in some cases can attain a span that is 10 % longer than a conventional glulam beam made of spruce. The reinforcement seems to have the greatest effect on beams with short span lengths around three meters. The required cross-sectional dimension for the composite glulam beams, seems to be smaller compared to a conventional glulam beam made of spruce.

Keywords:

Glulam
Spruce
Reinforced
Beech LVL
Elastic composite beam theory

Forord

Denne undersøkelsen er gjennomført som en avsluttende del av vår bachelorgrad i ingeniørfag, studieretning konstruksjonsteknikk, ved NTNU i Gjøvik.

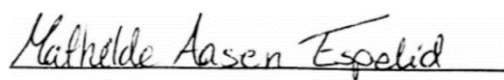
Gjennom studiet har forfatterne av denne rapporten erfart at de mekaniske egenskapene til et materiale er avgjørende for materialets bæreevne. Bærende konstruksjoner av tre er ofte avhengig av store tverrsnittsdimensjoner, for å oppnå tilstrekkelig bæreevne, som en konsekvens av de middels gode mekaniske egenskapene til trevirket. Som blivende byggingeniører er dette en utfordring vi kommer til å stå overfor i arbeidslivet. Vi har derfor valgt å undersøke om det er mulig å påvirke de mekaniske egenskapene til limtrebjelker av gran, ved å forsterke de med bøkefinér som har bedre mekaniske egenskaper enn standard limtre av gran. Dette i håp om å forenkle vår fremtidige hverdag som byggingeniører.

Vi ønsker å takke alle som har bidratt til svar på små og store spørsmål gjennom arbeidet med denne bacheloroppgaven. Våre veiledere ved NTNU i Gjøvik, Marthin Landgraff og Leif Erik Storm, vil vi takke for god oppfølging og veiledning. Spesielt vil vi takke Marthin Landgraff for gode faglige drøftinger av utfordringer vi har stått overfor. Vi vil også takke Jan Steinar Egenes for god hjelp til organisering av laboratorietester, og den positive støtten gjennom arbeidet. Videre vil vi takke Trond Egil Nyløkken, ved Moelven Limtre AS, for tilvirkning av materialer til laboratorietestene og faglig veiledning. Til slutt vil vi takke de ansatte ved Norsk Treteknisk Institutt for at vi fikk gjennomføre laboratorietestene hos dere, og for hjelp til bearbeiding av testresultatene.

Gjøvik 14. mai 2019



Birgitta Fjellstad



Mathilde Aasen Espelid

Innholdsfortegnelse

Forord.....	iii
Figurliste.....	vii
Tabelliste.....	viii
Formelliste.....	ix
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling.....	2
1.3 Forutsetninger og begrensning av undersøkelsen.....	2
1.4 Definisjoner	5
1.5 Forkortelser.....	7
1.6 Symboler.....	8
1.7 Disposisjon	10
2 Teoretisk grunnlag.....	11
2.1 Miljøperspektiv.....	11
2.1.1 Sertifiseringer	11
2.2 Materialer.....	12
2.2.1 Styrkeklasser for lameller.....	12
2.2.2 Komposittbjelker	12
2.2.3 Limtre	12
2.2.4 BauBuche	14
2.3 Elastisk teori for komposittbjelker	15
2.3.1 Beregning av midlere elastisitetsmodul	16
2.3.2 Beregning av karakteristisk bøyefasthet	17
2.3.3 Beregning av karakteristisk trykkfasthet i fiberretning.....	18
2.3.4 Beregning av karakteristisk strekkfasthet i fiberretning	19
2.3.5 Beregning av karakteristisk densitet	19
2.3.6 Beregning av opptredende spenning	20
2.4 Dimensjonering av limtrebjelker	24
2.5 Behandling av testresultater.....	25
2.5.1 Karakteristiske verdier	25

2.5.2	5%-fraktil	26
2.5.3	Karakteristisk bøyefasthet	28
2.5.4	Midlere elastisitetsmodul	29
2.5.5	Fuktighet og karakteristisk densitet.....	29
2.6	Tidligere undersøkelser	30
3	Metode.....	31
3.1	Litteraturgjennomgang	31
3.2	Teoretiske beregninger	31
3.2.1	Viktige mekaniske egenskaper	32
3.2.2	Grunnlag for dimensjonering	33
3.2.3	Beregning av maksimal spennvidde.....	34
3.2.4	Beregning av nødvendig tverrsnittsdimensjon.....	35
3.3	Laborrietester	36
3.3.1	Valg av testbjelker.....	37
3.3.2	Utførelse av laborrietester	38
3.4	Sammenligning av beregningsresultater og testresultater	41
3.5	Kvalitetssikring.....	43
3.5.1	Mulige feilkilder ved laborrietester	45
4	Resultater fra teoretiske beregninger.....	46
4.1	Viktige mekaniske egenskaper	46
4.1.1	Midlere elastisitetsmodul	47
4.1.2	Karakteristisk bøyefasthet	48
4.1.3	Karakteristisk strekkfasthet i fiberretning	49
4.1.4	Karakteristisk trykkfasthet i fiberretning	50
4.1.5	Karakteristisk densitet	51
4.1.6	Oppsummering av mekaniske egenskaper	51
4.2	Maksimal spennvidde	52
4.2.1	Langt spenn	52
4.2.2	Kort spenn	54
4.2.3	Oppsummering av maksimal spennvidde	55
4.3	Tverrsnittsdimensjon	55
5	Resultater fra laborrietester	58
5.1	Elastisitetsmodul.....	60

5.2	Bøyefasthet	60
5.3	Densitet.....	61
5.4	Oppsummering av testresultater og sammenligning med teoretiske beregninger	61
5.4.1	Tverrsnitts-sammensetning av T22 og 47 % bøkefinér	62
5.4.2	Tverrsnitts-sammensetning av T15 og 64 % bøkefinér	62
5.4.3	Maksimal spennvidde med testet elastisitetsmodul	63
5.4.4	Bøyespenningsfordeling	64
6	Drøfting og konklusjon	66
6.1	Drøfting av valgt metode	66
6.2	Drøfting av resultater	67
6.2.1	Midlere elastisitetsmodul	67
6.2.2	Karakteristisk bøyefasthet	69
6.2.3	Karakteristisk strekk- og trykkfasthet i fiberretning	70
6.2.4	Karakteristisk densitet	71
6.2.5	Reliabilitet og validitet ved laboratorietester	71
6.2.6	Maksimal spennvidde.....	73
6.2.7	Nødvendig tverrsnittsdimensjon	73
6.2.8	Bøyespenningsfordeling	74
6.2.9	Sammenligning av resultater med tidligere undersøkelser	75
6.3	Oppsummering og bakgrunn for konklusjon.....	76
6.4	Konklusjon.....	77
6.5	Forslag til videre undersøkelser.....	78
7	Referanser.....	80
	Vedlegg	84

Figurliste

Figur 1.1: Illustrasjon av tverrsnitts-sammensetning 1 og 2	4
Figur 1.2: Illustrasjon av soner i et bjelketverrsnitt	6
Figur 2.1: Stykkevis lineær bøyespenningsfordeling (SLBS). Gjelder dersom bjelken betraktes som en kompositt	23
Figur 2.2: Fullstendig lineær bøyespenningsfordeling (FLBS). Gjelder dersom bjelken betraktes som homogen	23
Figur 2.3: 5%-fraktil for normalfordeling og logaritmisk normalfordeling	26
Figur 3.1: Illustrasjon av tverrsnitts-sammensetninger for testbjelker	36
Figur 3.2: Tverrsnitt av valgte testbjelker – Foto: Mathilde Espelid	37
Figur 3.3: Prinsippskisse av testoppsett for 4-punkts bøyetest for de to testseriene	38
Figur 3.4: Testoppsett med bjelkespenn på 18h og symmetrisk belastning med avstand 6h – Foto: Birgitta Fjellstad	39
Figur 3.5: Testoppsett med gaffellagring og glidelager i ene enden – Foto: Mathilde Espelid	39
Figur 3.6: Sekundær nedbøyningsmåler plassert midt på bjelkespennet – Foto: Mathilde Espelid	40
Figur 3.7: Prøvestykker for måling av fuktighet og densitet – Foto: Mathilde Espelid	40
Figur 4.1: Teoretisk beregnet elastisitetsmodul	47
Figur 4.2: Teoretisk beregnet bøyefasthet	48
Figur 4.3: Teoretisk beregnet strekkfasthet	49
Figur 4.4: Teoretisk beregnet trykkfasthet	50
Figur 4.5: Teoretisk beregnet densitet	51
Figur 4.6: Sammenhengen mellom andelen bøkefinér og spennvidde for lange spenn	52
Figur 4.7: Sammenhengen mellom andelen bøkefinér og spennvidde for korte spenn	54
Figur 5.1: Lastpåføring av bjelker med T22-lameller i midten og resulterende nedbøyning fram til brudd	58
Figur 5.2: Bildeserie av testbjelke T22C som oppnådde størst bruddspenning – Foto: Mathilde Espelid	59
Figur 5.3: Lastpåføring av bjelker med T15-lameller i midten og resulterende nedbøyning fram til brudd	59
Figur 5.4: Bildeserie av testbjelke T15A som oppnådde størst bruddspenning – Foto: Mathilde Espelid	59

Tabelliste

Tabell 1.1: Hovedsymboler	8
Tabell 1.2: Senket skrift	9
Tabell 1.3: Kombinerte symboler.....	9
Tabell 2.1: Noen karakteristiske verdier for fasthet, stivhet og tetthet for GL30c og BauBuche GL70.....	15
Tabell 3.1: Fastsatte forhold benyttet som grunnlag for dimensjonering	34
Tabell 4.1: Nødvendige tverrsnittsdimensjoner for korte spenn	56
Tabell 4.2: Nødvendige tverrsnittsdimensjoner for lange spenn.....	56
Tabell 5.1: Beregnede og målte resultater fra testmaskinen for de seks testbjelkene	58
Tabell 5.2: E-modul for de seks testbjelkene	60
Tabell 5.3: Bøyefasthet for de seks testbjelkene	60
Tabell 5.4: Beregnet densitet, ved 12 % fuktighetsinnhold, for de seks testbjelkene	61
Tabell 5.5: Sammenligning av resultater fra teoretiske beregninger og tester av TS1	62
Tabell 5.6: Sammenligning av resultater fra teoretiske beregninger og tester av TS2	62
Tabell 5.7: Sammenligning av spennvidde med teoretisk beregnet E-modul og E-modul beregnet fra testing	63
Tabell 5.8: Sammenligning av FLBS og SLBS for testresultater	64

Formelliste

Formel 2.1: Kombinert elastisitetsmodul	16
Formel 2.2: Bøyefasthet med FLBS	18
Formel 2.3: Bøyefasthet med SLBS	18
Formel 2.4: Normalfordelt standardavvik	27
Formel 2.5: Middelvei, logaritmisk normalfordelt	27
Formel 2.6: Standardavvik, logaritmisk normalfordelt	27
Formel 2.7: Teoretisk 5%-fraktil, logaritmisk normalfordelt	27
Formel 2.8: Midlere bøyefasthet	28
Formel 2.9: Standardavvik for bøyefasthet	28
Formel 2.10: Karakteristisk bøyefasthet	28
Formel 2.11: Midlere densitet	30
Formel 2.12: Standardavvik for densitet	30
Formel 2.13: Karakteristisk densitet	30

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Limtrebjelker med forskjellig oppbygging kan oppnå ganske ulike mekaniske egenskaper. Hvordan mekaniske egenskaper til sammensatte bjelker av mjukved og hardved påvirkes av andelen hardved i tverrsnittet, er undersøkt tidligere. Ifølge Dill-Langer og Aicher (2016) har homogene limtrebjelker av gran forsterket med LVL-lameller av bøk i strekksonen, veldig lovende styrkeegenskaper. Dill-Langer og Aicher (2016) kom i sin undersøkelse fram til at selv med en liten andel LVL av bøk i strekksonen, ble styrkekapasiteten til bjelkene forbedret i betydelig grad.

Egenskapene til sammensatte tverrsnitt av gran i midten og bøkefinér i både strekk- og trykksonen, er imidlertid ikke undersøkt tidligere. Med bakgrunn i undersøkelsen utført av Dill-Langer og Aicher (2016) er det grunn til å tro at en slik forsterkning vil ha ytterligere betydning for styrkeegenskapene til en limtrebjelke.

Limtrebjelker er mye brukt i norsk byggebransje. I de siste årene har tre, spesielt limtre, blitt benyttet i flere nye bygg og i enda større dimensjoner enn tidligere. Dominerende limtrebjelker og bærende konstruksjoner av limtre er blant annet å finne i Treet i Bergen og Mjøstårnet i Brumunddal (Artec AS, 2018; Voll Arkitekter AS, u.å.).

En utfordring med at stadig flere ønsker å benytte trebaserte materialer i store bygg og bærende konstruksjoner, er kapasiteten til trevirke. Når byggherren og arkitekten ønsker åpne rom uten bærende søyler, men med tre som hovedmateriale, byr dette på utfordringer for ingeniøren som skal tilfredsstille disse ønskene. En av utfordringene for byggingeniøren knytter seg til bærebjelker med lange spenn. Slike bjelker må ofte være svært høye og brede for å kunne tåle de belastningene de blir utsatt for. I et bygg med flere etasjer kan dette igjen by på utfordringer, da etasjehøyden kan være en begrensning. Det er ikke særlig gunstig med store og høye bjelker, da det er ønskelig med størst mulig takhøyde og at de bærende konstruksjonene skal ta minst mulig plass.

Det er derfor interessant å undersøke om det er mulig å konstruere limtrebjelker som kan bære de samme lastene, men med et mindre tverrsnitt enn de tradisjonelle limtrebjelkene. Gjennom studiet har forfatterne av denne rapporten erfart at materialets mekaniske egenskaper er

avgjørende for forhold som dette. Det undersøkes derfor om det er mulig å påvirke noen av de viktigste mekaniske egenskapene til en sammensatt limtrebjelke, ved at den blir forsterket med bøkfinér i de mest utsatte sonene.

1.2 Problemstilling

Med grunnlag i det som er nevnt under bakgrunn, er det interessant å undersøke om det er mulig å forbedre limtrebjelker av gran slik at de kan tåle mer last og spenne lenger, uten å øke tverrsnittshøyden. Det er mest vanlig å benytte lameller av gran til limtreproduksjon i Norge (Bell, Liven og Norske Limtreprodusenters Forening, 2015). Som forsterkning av disse limtrebjelkene, vil det i denne undersøkelsen benyttes lameller av bøkfinér, BauBuche. Noen av de mekaniske egenskapene til limtrebjelker av gran forsterket med bøkfinér i strekk- og trykksonen vil bli undersøkt, og rapporten tar dermed utgangspunkt i følgende problemstilling:

Hvordan påvirkes noen av de mekaniske egenskapene til en limtrebjelke av gran, hvis den blir forsterket med bøkfinér?

For lettere å kunne svare på problemstillingen, er det formulert noen delmål:

- Hvilken betydning har en forsterkning med bøkfinér i strekk- og trykksonen for bjelkens spennvidde og tverrsnittsdimensjon?
- Hvilke mekaniske og geometriske egenskaper kan en slik forsterket bjelke oppnå, sammenlignet med en standard limtrebjelke i fasthetsklasse GL30c?

1.3 Forutsetninger og begrensning av undersøkelsen

Hovedmetoden som benyttes i denne undersøkelsen er beregninger basert på teori som følger relevante standarder og annen faglitteratur. Det tas utgangspunkt i homogene limtrebjelker, med lameller av styrkeklasse T22 og T15, for deretter å forsterke disse med ulik andel bøkfinér i strekk- og trykksonen. For kontroll av de teoretiske beregningene og sammenligning med virkeligheten, blir det også utført fullskalatester av totalt seks bjelker sammensatt av gran og bøkfinér.

Hvordan et materiale reagerer på ytre mekaniske krefter kan angis av de mekaniske egenskapene til materialet (Store norske leksikon, 2015). Det er standarden NS-EN 14080 som gir regler og retningslinjer for beregning av mekaniske egenskaper og oppbygging av

kombinerede bjelker av tre, limtre. Standarden anser karakteristisk bøyefasthet, karakteristisk strekk- og trykkfasthet i fiberretning, middelvei for E-modul og karakteristisk densitet som de fem viktigste mekaniske egenskapene til en kombinert limtrebjelke (Standard Norge, 2013, s. 24-26). Disse mekaniske egenskapene er avgjørende for bjelkens fasthetsklasse. Denne rapporten begrenses derfor til kun å undersøke disse fem mekaniske egenskapene for sammensatte bjelker av gran og bøkefinér. E-modul, bøyefasthet og densitet er også viktige egenskaper i dimensjoneringen av limtrebjelker, og er dermed avgjørende for bjelkenes geometriske egenskaper. Strekk- og trykkfastheten har betydning for andre konstruksjonselementer, som for eksempel søyler. Dermed er dette viktige egenskaper som er relevante å ta med i undersøkelsen, selv om undersøkelsen begrenses til å fokusere på bjelker.

Videre vil det bli undersøkt hvordan de mekaniske egenskapene påvirker de sammensatte bjelkenes geometriske egenskaper. De sammensatte bjelkene i denne rapporten vil bli sammenlignet med en standard limtrebjelke av gran, i fasthetsklasse GL30c, og med en homogen bjelke av typen BauBuche. Sammenligningen baseres på bjelkenes mekaniske egenskaper, maksimale spennvidde og minste tverrsnittsdimensjon. Maksimal spennvidde og minste tverrsnittsdimensjon blir dimensjonert for moment, skjærkraft og nedbøyning iht. EK5.

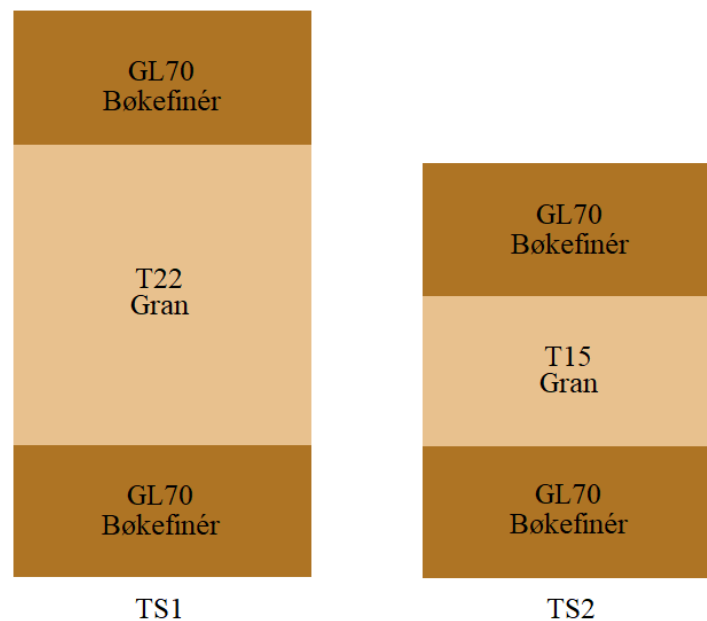
Undersøkelsen er begrenset til å omhandle noen bestemte tilfeller, som antas å kunne gi en indikasjon på den generelle effekten av å forsterke limtrebjelker med bøkefinér. Det undersøkes kun tverrsnitts-sammensetninger med lameller av gran i styrkeklasse T22 eller T15 i midten, og bøkefinér ytterst i strekk- og trykksonen. Disse sammensetningene er illustrert i figur 1.1. De teoretiske beregningene er utført på mange varianter av disse sammensetningene, med ulik andel bøkefinér i tverrsnittet. Laboratorietestene er derimot kun utført på to sammensetninger, en med T22 og en med T15 i midten.

De geometriske egenskapene undersøkes for både korte og lange spenn. Korte spenn er representert ved et utgangstilfelle på 3 m, og lange spenn ved et utgangstilfelle på 20 m. Det undersøkes hvordan spennviddene kan økes ut over dette, ved kun å øke andelen bøkefinér i tverrsnittet, uten å øke tverrsnittsdimensjonen. Det undersøkes også hvilke tverrsnittsdimensjoner som er nødvendige for ulike sammensetninger, dersom spennvidden holdes konstant.

For tilfellene i denne rapporten er det antatt at bjelkene er tilstrekkelig fastholdt mot vipping, av gaffellagring, kubbing eller lignende, slik at vipping ikke blir dimensjonerende. Det benyttes samme belastning og øvrige forutsetninger i alle de teoretiske beregningene. Dette er nærmere beskrevet i delkapittel 3.2.2.

I en limtrebjelke er limet som benyttes en faktor som er viktig for at bjelken skal tåle de belastningene den utsettes for. Det er vanlig å anta at limet som benyttes ved produksjon av limtre har bedre egenskaper enn trevirket. Ved brudd i en bjelke er det som oftest trevirket som er det svakeste leddet, og ikke limet. Det forutsettes derfor at limet som benyttes i denne undersøkelsen er sterkere enn trevirket, og dermed ikke en avgjørende faktor for resultatene. Limets egenskaper utelates derfor fra beregningene i denne rapporten. De teoretiske beregningene forenkles også ved å utelate fingerskjøt i bjelkene.

Det er viktig å presisere at det i denne rapporten ses bort fra det økonomiske perspektivet ved produksjon av bjelkene. Undersøkelsen kommer heller ikke til å omhandle brannegenskapene til de utvalgte bjelketverrsnittene.

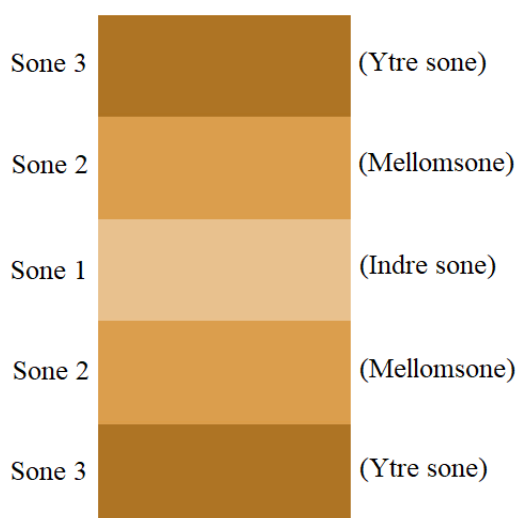


Figur 1.1: Illustrasjon av tverrsnitts-sammensetning 1 og 2

1.4 Definisjoner

Mjukved	Er den norske oversettelsen av det engelske ordet <i>softwood</i> . Mjukved er en betegnelse på trevirke fra bartrær eller nåletrær (Bell, 2017).
Hardved	Er den norske oversettelsen av det engelske ordet <i>hardwood</i> . Hardved er en betegnelse på trevirke fra løvtrær (Bell, 2017).
Lamell	Styrkesortert konstruksjonstrevirke, merket med en T og etterfulgt av et tall som beskriver strekkfasthet, som benyttes til oppbygging av limtrettverrsnitt. Beskrevet og tildelt styrkeklasser i NS-EN 338.
Fingerskjøt	En skjøt som benyttes for å skjøte trevirke. Utfreste fingrer i enden av to lameller som limes, presses sammen og herdes (Store norske leksikon, 2009).
Bjelketverrsnitt	Et snitt på tvers av en bjelke, hvor en kan se bjelkens oppbygning.
Tverrsnitts-sammensetning 1	Et sammensatt limtrettverrsnitt med lameller av gran i styrkeklasse T22 i midten og bøkefinér, BauBuche GL70, ytterst i strekk- og trykksonen.
Tverrsnitts-sammensetning 2	Et sammensatt limtrettverrsnitt med lameller av gran i styrkeklasse T22 i midten og bøkefinér, BauBuche GL70, ytterst i strekk- og trykksonen.
Geometriske egenskaper	En bjelkes minste nødvendige tverrsnittsdimensjon og maksimale spennvidde, bestemt av dimensjonering iht. EK5.
Mekaniske egenskaper	Materialets reaksjon på ytre mekaniske krefter (Store norske leksikon, 2015). I denne undersøkelsen fokuseres det på elastisitetsmodul, bøyefasthet, strekkfasthet, trykkfasthet og densitet.

E-modul	Elastisitettsmodul uttrykker materialets motstandskraft mot å deformeres.
Fasthet	Den maksimale spenningen som et materiale tåler før brudd oppstår.
Styrkeklasse	<p>Styrkesorterte bord, som skal benyttes som lameller i limtre, blir tildelt en styrkeklasse etter NS-EN 14081-1 og angis med betegnelsen T etterfulgt av et tall som angir karakteristisk strekkfasthet (Standard Norge, 2016a; Bell, 2017).</p> <p>Merk at styrkeklasse og fasthetsklasse brukes om hverandre i faglitteratur og standarder, men dette er måten ordet styrkeklasse er benyttet i denne rapporten.</p>
Fasthetsklasse	<p>Limtrevrersnitt, oppbygd av styrkesorterte bord, klassifiseres i fasthetsklasser etter NS-EN 14080 og angis med betegnelsen GL etterfulgt av et tall som angir tverrsnittets karakteristiske bøyefasthet (Standard Norge, 2013; Bell, 2017).</p> <p>Merk at styrkeklasse og fasthetsklasse brukes om hverandre i faglitteratur og standarder, men dette er måten ordet fasthetsklasse er benyttet i denne rapporten.</p>
Sone	Benyttet om forskjellige områder på et bjelketverrsnitt, der hver sone består av lameller i en bestemt styrkeklasse. Illustrert i figur 1.2.



Figur 1.2: Illustrasjon av soner i et bjelketverrsnitt

1.5 Forkortelser

EK0	Eurokode 0, NS-EN 1990
EK5	Eurokode 5, NS-EN 1995-1-1
NS	Norsk Standard
TS1	Tverrsnitts-sammensetning 1
TS2	Tverrsnitts-sammensetning 2
GL30c	Standard limtre, kombinert limtre av gran
GL70	BauBuche, finérbjelke i bøk
LVL	Laminated veneer lumber
FLBS	Fullstendig lineær bøyepenningsfordeling
SLBS	Stykkevis lineær bøyepenningsfordeling
ETKB	Elastisk teori for komposittbjelker, norsk oversettelse av <i>Elastic composite beam theory</i> (Standard Norge, 2013, s. 25)
Moelven Limtre	Moelven Limtre AS
Treteknisk	Norsk Treteknisk Institutt
Pollmeier	Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG

1.6 Symboler

Tabell 1.1:

Hovedsymboler

Hovedsymboler	
	Parallelt med fiberretning
a	Avstand fra bjelkeende til nærmeste punktlast
b	Tverrsnittsbredde
c	Kombinert limtre
E	Elastisitetsmodul
F	Total belastning fra punktlaster
f	Fasthet
G	Skjærmodul
GL	Limtre (Glulam)
h	Homogent limtre
h	Tverrsnittshøyde
I	Annet arealmoment
L	Bjelkens lengde (spennvidde om ikke annet er presisert)
M	Moment
m	Testverdi
n	Antall tester i en testserie
q	Fordelt last
T	Styrkesortert lamell til limtrevetverrsnitt
V	Volum
w	Fuktighetsinnhold
x	Andel av tverrsnittshøyde
δ	Nedbøyning
ρ	Densitet
σ	Normalspenning/Bøyespenning
τ	Skjærspenning

Tabell 1.2:
Senket skrift

Senket skrift	
0	I fiberretning
05	5%-fraktil
A, B, C	Prøvestykke
c	Trykk
d	Dimensjonerende verdi
g	Verdier for bjelker
i	Prøvestykke nummer i
k	Karakteristisk verdi
l	Verdier for bord
m	Bøyning
mean	Middelverdi
n	Tverrsnittssone (nummer 1, 2 eller 3)
t	Strekk
tot	Totalt
v	Skjær

Tabell 1.3:
Kombinerte symboler

Kombinerte symboler	
s_y	Standardavvik
m_1	Masse før tørking
m_0	Masse etter tørking
\bar{y}	Middelverdi

1.7 Disposisjon

- Grafisk utforming** Forfatterne av denne rapporten har hatt et generelt fokus på en helhetlig og presentabel grafisk utforming av rapporten. Den valgte grafiske utformingen har kommet fram av maldokumentet for bacheloroppgave, utgitt av institutt for vareproduksjon og byggingsteknikk ved NTNU i Gjøvik, drøfting med veiledere og egne vurderinger.
- Kapittel 2** Teoretisk grunnlag for rapporten blir gjort rede for her. Delkapittel 2.3 og 2.5 anses som meget viktig teori og er grunnlaget for store deler av undersøkelsen. Til slutt er det en redegjørelse av tidligere undersøkelser på dette området.
- Kapittel 3** Her beskrives og begrunnes metoden benyttet i denne rapporten. Det vises hvordan beregninger og laborietester er gjennomført. Forfatterne av denne rapporten anser dette kapittelet som meget viktig, da metodevalg er en svært viktig del av denne undersøkelsen.
- Kapittel 4** Resultatene fra de teoretiske beregningene av bjelkenes viktigste mekaniske egenskaper presenteres her. Det vises også hvordan egenskapene påvirker bjelkenes spennvidde og tverrsnittsdimensjon i en brukssituasjon.
- Kapittel 5** De målte og de bearbejdede resultatene fra laborietestene legges fram i dette kapittelet. Testresultatene sammenlignes så med resultatene fra teoretiske beregninger.
- Kapittel 6** Her drøftes metodevalg og resultater i undersøkelsen. Videre blir undersøkelsen oppsummert og det legges fram en konklusjon. Til slutt presenteres forslag til videre undersøkelser.

2 Teoretisk grunnlag

2.1 Miljøperspektiv

Regjeringen har som mål å gjøre Norge karbonnøytralt innen 2030 (Treindustrien *et al.*, 2013). For at dette skal oppnås i byggenæringen, kreves det blant annet fokus på bruk av miljøvennlige byggematerialer.

Det er flere grunner til at limtre kan betraktes som et miljøvennlig byggemateriale, dersom det kommer fra et bærekraftig skogbruk. Sammenlignet med de mest vanlig konkurrerende materialene, stål og betong, krever tre mindre CO₂ i fremstillingsprosessen. I tillegg til å kreve lite CO₂ i produksjonen, har tre også karbonlagrende effekt, og bidrar dermed til å binde opp CO₂ gjennom sin brukstid. Norskprodusert trevirke er kortreist og bidrar dermed lite til CO₂-utslipp gjennom transport.

Det finnes også flere enkle måter å gjenbruke eller gjenvinne trevirke. I tillegg er materialet miljøvennlig på et mer lokalt nivå, ved at det bidrar til et godt innneklima. Ikke minst har tre fordelene av å være en fornybar råvare (Treindustrien, u.å.). Disse miljømessige fordelene har vært med på å gjøre tre til et foretrukket byggemateriale i mange sammenhenger (Treindustrien *et al.*, 2013). Tre som materiale har også miljømessige fordeler ved at det blir lite rester og avfall ved produksjon av trevirke. Dette er fordi at nesten hele treet kan utnyttes på en eller annen måte (Bell, Liven og Norske Limtreprodusenters Forening, 2015).

2.1.1 Sertifiseringer

For å sikre at råvarer til trevirke kommer fra bærekraftige skogbruk, er det etablert internasjonale sertifiseringsordninger. *Programme for the Endorsement of Forest Certification schemes* (PEFC) og *Forest Stewardship Council* (FSC) er de mest kjente sertifiseringsordningene i Norge (Treteknisk, u.å.; SINTEF Byggforsk, 2015). FSC er en merkeordning som stiller strenge krav til kontrollert skogsdrift som ikke fører til avskoging. PEFC er en ordning for sporbarhet av trevirket slik at det kan dokumenteres at virket kommer fra bærekraftig skogsdrift (Treteknisk, u.å.). Moelven er opptatt av bærekraft og miljø og har flere sertifiseringer for sine produkter (Moelven, 2017). Blant annet er råvarene som brukes til produksjon av standard limtre sertifisert med både PEFC og FSC (DNV GL, 2018, 2017). Den tyske bøken som brukes til finérbjelken BauBuche, er også sertifisert med PEFC (Moelven Limtre AS, u.å.; Pollmeier, u.å.).

2.2 Materialer

2.2.1 Styrkeklasser for lameller

Styrkesortering av trevirke er nødvendig for å sikre at produktet har de mekaniske egenskapene som kreves. I denne rapporten vil vi ikke gå nærmere inn på prosessen med styrkesortering, men under er noen styrkesorterte klasser omtalt.

I NS-EN 338 er konstruksjonstrevirkers styrkeklasser beskrevet (Standard Norge, 2016b). Klassene gis ulike betegnelser basert på type trevirke og bruksområde. Konstruksjonstrevirke som skal bli til lameller i et limtrettverrsnitt, får betegnelsen T etterfulgt av et tall som angir karakteristisk strekkfasthet parallelt med fiberretningen. Dette er fordi lamellene enten vil havne i bjelkens strekk- eller trykksone, og dermed får strekk- og trykkfastheten større betydning enn bøyefastheten (Bell, 2017). Samtidig er strekkfastheten den svakeste av disse to egenskapene og blir dermed avgjørende. Lamellene klassifiseres etter gitte regler i NS-EN 14081-1 (Standard Norge, 2016a).

2.2.2 Komposittbjelker

En komposittbjelke er en bjelke som er satt sammen av minst to ulike materialer som virker sammen og overfører skjærspenninger. Betegnelsen komposittbjelke kan også benyttes om en bjelke satt sammen av minst to tilnærmet like materialer (Bell, 2017). Kombinert limtre er en type komposittbjelke fordi den består av soner med lameller i minst to ulike styrkeklasser.

Ved å kombinere ulike eller tilnærmet like materialer kan man få en bjelke med flere positive egenskaper. Det er vanlig å bygge opp en komposittbjelke med sterkere materialer der hvor spenningene er størst, og svakere, billigere og lettere materialer der spenningene er mindre. Dette vil gi god utnyttelse av de beste egenskapene til de ulike materialene.

Komposittbjelker har noen egenskaper som er forskjellige fra egenskapene til homogene bjelker. Eksempelvis har komposittbjelker en nøytralakse som ikke nødvendigvis går gjennom tverrsnittets arealsenter, og bøyespenningen har en diskontinuitet i overgangen mellom to materialer (Bell, 2015).

2.2.3 Limtre

Limtre produseres ved at to eller flere lameller av styrkesortert konstruksjonstrevirke limes sammen (Bell, 2017). Ved å benytte fingerskjøt, unngår man begrensinger på lamellenes

lengde og dermed også bjelkens lengde. Lamellene stables oppå hverandre, limes og presses sammen. Etter at limet har herdet, høvles komponenten til et ferdig limtreprodukt med ønsket dimensjon (Bell, Liven og Norske Limtreprodusenters Forening, 2015).

Limtre kan enten settes sammen av lameller med samme styrkeklasse, homogent limtre, eller en kombinasjon av lameller med ulik styrkeklasse, kombinert limtre. Kombinert limtre har lameller med høyere styrkeklasse ytterst i tverrsnittet, fordi det er her bøyepeningen er størst (Bell, Liven og Norske Limtreprodusenters Forening, 2015). NS-EN 14080 gir regler for hvordan limtreværnsnittene skal bygges opp. De kan bestå av to eller tre soner, der hver sone består av lameller i én styrkeklasse. Ifølge Bell (2017) er det mest vanlige å benytte to soner.

Ferdige limtrekomponenter sorteres i fasthetsklasser avhengig av lamellenes egenskaper. Standarden NS-EN 14080 har en oversikt over predefinerte tverrsnitts-sammensetninger som tilhører de ulike fasthetsklassene. Standarden inneholder også nødvendige beregningsregler for å bestemme fasthetsklasser for andre sammensetninger og gjør det mulig å bestemme fasthetsklasser ved fullskalatesting av bjelker. Den mest vanlige fasthetsklassen i Norge er GL30c (Bell, 2017). Denne består av en ytre sone med lameller i styrkeklasse T22, som på hver side utgjør ca. 1/6 av tverrsnittshøyden, og en midtdel med lameller i styrkeklasse T15. Lamellenes styrkeklasser er omtalt i delkapittel 2.2.1.

De sammenlimte limtrekomponentene har bedre egenskaper enn konstruksjonstrevirket i seg selv, både innenfor styrke og stivhet. Dette gjør at limtre kan konkurrere med stål og betong i noen bærende konstruksjoner. Limtre har større styrke i forhold til vekt enn stål og kan i noen tilfeller være mer gunstig å benytte. Limtre har også miljømessige fordeler i forhold til stål og betong, som nevnt tidligere under delkapittel 2.1. Ved synlige bærende konstruksjoner blir ofte limtre foretrukket på grunn av sin arkitektoniske verdi. Dette gjør at limtre er et mye brukt materiale i alle typer bærende konstruksjoner (Bell, Liven og Norske Limtreprodusenters Forening, 2015).

Fordi limtre består av lameller av trevirke som er limt sammen, er materialet per definisjon en kompositt. Kombinert limtre, som består av lameller med ulik styrkeklasse, får en enda større kompositteffekt enn ved samvirket mellom like styrkeklasser og lim. Denne kompositteffekten er beskrevet nærmere under delkapittel 2.2.2.

Likevel kan limtrebjelker ved dimensjonering betraktes som homogene, iht. NS-EN 14080 (Standard Norge, 2013). Dette er fordi standarden samtidig stiller krav til at limet skal ha større fasthet enn trevirket. Siden limet kun er fordelt i tynne lag, symmetrisk over tverrsnittet, er det trevirkets egenskaper som blir gjeldende for tverrsnittet. Fordi forskjellen på E-modulen for de ulike styrkeklassene er relativt liten, blir også bøyespennings diskontinuitet i overgangen mellom trevirke med ulik styrkeklasse så liten at man kan se bort fra denne. Man regner i stedet med at bøyespenningen varierer lineært over tverrsnittet.

Siden limtrevirkesnittene i NS-EN 14080 er symmetrisk oppbygd, vil nøytralaksen uansett gå gjennom tverrsnittets arealsenter. Hovedforskjellene på komposittbjelker og homogene bjelker spiller dermed liten rolle for limtre. Limtrebjelker kan dermed forenkles ved å betraktes som homogene. I stedet er kompositteffekter innbakt i standardens beregningsregler, ettersom mange av disse bygger på tester som viser hvordan limtrebjelkene oppfører seg i virkeligheten.

2.2.4 BauBuche

BauBuche er en finérbjelke i bøk som importeres til Norge fra den tyske leverandøren Pollmeier (Moelven Limtre AS, u.å.). En homogen bjelke av bøkfinér har generelt bedre styrkeegenskaper enn standard limtrebjelker av gran. I motsetning til en standard limtrebjelke i fasthetsklassen GL30c, kan BauBuche plasseres i fasthetsklassen GL70. Det vil si en klasse som tilsvarer mer enn det dobbelt av den karakteristiske bøyefastheten for GL30c (Moelven Limtre AS og Pollmeier, 2017).

En av grunnene til at BauBuche har vesentlig større verdier for fasthets- og stivhetsegenskaper enn limtre i fasthetsklasse GL30c, er fordi den er en bjelke av typen *laminated veneer lumber* (LVL). LVL produseres ved at det skrelles av tynne ark fra en tømmerstokk som roterer. Disse arkene er omtrent 3 mm tykke og limes sammen, lag for lag. De fleste arkene limes slik at fibre har lik orientering, mens noen få ark ligger normalt på hovedretningen. Bjelkene blir dermed av typen parallellfinér (Bell, 2017). Dette fører til at virkesfeilene som er i boken, som i utgangspunktet kan svekke styrken, får mindre effekt da de fordeles jevnt utover produktet.

Bøk har også meget gode styrkeegenskaper i forhold til gran, noe som i hovedsak skyldes at bøk er en type hardved (Treteknisk, 2009; SINTEF Byggforsk, 2015). Trevirkets styrke er avhengig av andelen cellevegger i virket. Det vil si at hardved, med høyere densitet enn

mjukved, er sterkere fordi den har større andel cellevegger i virket enn det mjukved har (Bell, 2017).

I tillegg til den høye karakteristiske bøyefastheten, har BauBuche meget gode karakteristiske fastheter ved strekk- og trykkpåkjenning (Moelven Limtre AS og Pollmeier, 2017). Noen av stivhets- og styrkeegenskapene til finérbjelken (Moelven Limtre AS og Pollmeier, 2017) er sammenlignet med tilsvarende egenskaper for en standard limtrebjelke av gran, GL30C (Standard Norge, 2013, s. 23), i tabellen under.

Tabell 2.1:
Noen karakteristiske verdier for fasthet, stivhet og tetthet for GL30c og BauBuche GL70

	GL30c		BauBuche GL70		Benevning
Bøyefasthet	$f_{m.g.k}$	30	$f_{m.k}$	70	[N/mm ²]
Strekkfasthet 	$f_{t.0.g.k}$	19,5	$f_{t.0.k}$	55	[N/mm ²]
Trykkfasthet 	$f_{c.0.g.k}$	24,5	$f_{c.0.k}$	49,5	[N/mm ²]
Elastisitetsmodul	$E_{0.g.mean}$	13 000	$E_{0.mean}$	16 700	[N/mm ²]
Densitet	$\rho_{g.k}$	390	ρ_k	680	[kg/m ³]

Tabell 2.1 viser at stivhets- og styrkeegenskapene til BauBuche har høyere verdier enn samtlige tilsvarende verdier for GL30c. Spesielt er det forskjell på strekk- og trykkfastheten for disse to fasthetsklassene. I motsetning til BauBuche, som har høyere strekkfasthet enn trykkfasthet, har GL30c høyere trykkfasthet enn strekkfasthet. Dette er i hovedsak fordi BauBuche er i en høyere fasthetsklasse enn GL30c. I utgangspunktet er det strekk som er trevirkets beste styrke, men feil i trevirket påvirker strekkstyrken i større grad enn trykkstyrken. Det er ofte flere virkesfeil i lavere fasthetsklasser enn for de høyere klassene. Strekkstyrken er derfor lavere enn trykkstyrken for fasthetsklasser av lavere kvalitet, mens det for høyere fasthetsklasser av bedre kvalitet er motsatt (Bell, 2017).

2.3 Elastisk teori for komposittbjelker

For å bestemme de samlede egenskapene til lameller med ulik styrkeklasse i en limtrebjelke, må elastisk teori for komposittbjelker (ETKB) benyttes (Standard Norge, 2013). Disse egenskapene antas videre å gjelde homogent for hele limtrebjelken. Regler gitt i NS-EN 14080 gjelder i utgangspunktet kun for limtre som er sammensatt av lameller av bare én tresort. Det antas likevel at mye av teorigrunnet i standarden kan benyttes som veiledning, sammen med andre kilder, til å beregne de mekaniske egenskapene til bjelker sammensatt av

gran og bølgefinér. For at teorien skal tilpasses sammensatte bjelker med lameller av ulik tresort, er det derfor nødvendig å modifisere standardens regler noe.

Karakteristisk bøyefasthet, strekk- og trykkfasthet, middelvei av E-modul og karakteristisk densitet er egenskapene som må bestemmes på denne måten. Det er disse mekaniske egenskapene som avgjør en bjelkes fasthetsklasse. NS-EN 14080 gir regler for hvordan disse fem størrelsene skal beregnes for hver sone, basert på lamellenes kjente strekkfasthet, E-modul og densitet. De respektive egenskapene for lamellene som inngår i bjelken settes sammen ved hjelp av ETKB, og antas videre å gjelde homogent for hele tverrsnittet (Bell, 2017). Etter at disse er bestemt ved hjelp av ETKB, kan øvrige størrelser bestemmes ut fra tabellverdier i NS-EN 14080, avhengig av bjelkens fasthetsklasse.

For limtre med vanlige fasthetsklasser, finnes ferdig beregnede fasthets- og stivhetsegenskaper i standarden. For egenkomponert tverrsnitts-sammensetninger må disse verdiene beregnes i henhold til reglene beskrevet i de følgende delkapitlene.

2.3.1 Beregning av midlere elastisitetsmodul

Elastisitetsmodul, eller E-modul, er en størrelse som angir stivheten til et materiale. Materialets E-modul er direkte avgjørende for hvor stor deformasjon en påført spenning vil føre til (Bell, 2015). Desto stivere materialet er, desto høyere verdi får E-modulen. Dette er dermed en viktig egenskap for bjelker, ettersom det ofte stilles strenge bruksgrensekrav til hvor stor deformasjon som godtas i bygninger, selv om det ikke er fare for brudd (Standard Norge, 2004).

Sammensatt bøyestivhet for komposittbjelker regnes som summen av bøyestivheten til hver enkelt sone (Bell, 2017). NS-EN 14080 oppgir midlere E-modul for hver styrkeklasse av lameller. Ved å kjenne E-modulen for hver sone, annet arealmoment for hver sone og annet arealmoment for hele tverrsnittet, betraktet som homogent tverrsnitt, kan man dermed finne kombinert E-modul for bjelken.

$$EI = \sum E_n I_n \rightarrow E = \frac{\sum E_n I_n}{I_{tot}} \quad (2.1)$$

Den felles E-modulen, som er beregnet ut fra E-modulen for lamellene i hver enkelt sone, kan multipliseres med en faktoren 1,05 for å finne bjelkens E-modul (Standard Norge, 2013).

Dette er fordi samvirket mellom lamellene gjør at den sammensatte bjelken har større stivhet enn den kombinerte stivheten til enkeltlamellene (Bell, 2017).

Tilgjengelig materialdata for BauBuche gjelder kun hele bjelker av bøkefinér, ikke enkeltlameller. Det antas derfor at E-modulen for slike bjelker må divideres med faktoren 1,05, for å få E-modulen for enkeltlameller, før denne brukes til å finne kombinert E-modul for tverrsnittet. Når sluttsvaret så multipliseres med faktoren 1,05, er denne faktoren totalt sett ikke anvendt på finérmaterialet av BauBuche. Dette er i tråd med at standardens regler egentlig ikke gjelder for finérmaterialer, og det kan dermed ikke uten videre antas at faktorer og beregningsregler gjelder på samme måte for finérmaterialet.

2.3.2 Beregning av karakteristisk bøyefasthet

En bjelkes bøyefasthet er definert som den bøyespenningen bjelken tåler før brudd oppstår. Bøyefastheten er dermed avgjørende for momentkapasiteten, ettersom opptredende bøyespennning er direkte avhengig av påført moment. Fordi bøyespennning består av kombinert strekk- og trykkspenning, er bøyefastheten avhengig av trevirkets evne til å tåle strekk- og trykkspenninger (Bell, 2017). Ettersom trykkfastheten er bedre enn strekkfastheten for de fleste fasthetsklassene, er det lamellenes strekkfasthet som avgjør bøyefastheten for en komponent av limtre (Standard Norge, 2013).

Siden bøyespenningen varierer over tverrsnittet, er det ikke nødvendig å bestemme én sammensatt verdi for bjelkens bøyefasthet som skal gjelde hele tverrsnittet. I stedet må det sørges for at bøyefastheten i hver sone på tverrsnittet er større enn den opptredende bøyespenningen som forekommer i den respektive sonen. Sonen som tåler minst i forhold til den opptredende spenningen, blir dimensjonerende og bestemmer dermed hele bjelkens bøyefasthet. Siden bøyefastheten som regel oppgis i form av den maksimale bøyespenningen bjelken tåler, kan den dimensjonerende bøyefastheten regnes om til spenningen bjelken får ytterst på tverrsnittet, i det den dimensjonerende sonen når sin maksimale bøyefasthet (Bell, 2017). For at det sterkeste materialet skal utnyttes mest mulig, vil det som regel være mest effektivt å sørge for at det er den ytterste sonen som blir dimensjonerende. Dette er gjort for alle predefinerte fasthetsklasser av limtre i NS-EN 14080.

Bøyefastheten for lamellene i hver sone bestemmes ut fra formler i NS-EN 14080, som er basert på strekkfastheten for lamellene i den aktuelle sonen, og eventuelle fingerskjøter. Bøyefastheten for lameller av bøkefinér settes lik bøyefastheten for BauBuche.

Hvordan bøyespenningen fordeler seg over de ulike sonene er avhengig av beregningsmetode. For homogene bjelker er antagelsen om fullstendig lineær bøyespenningsfordeling (FLBS) korrekt. Derimot er det stykkevis lineær bøyespennning (SLBS), med diskontinuiteter i overgangen mellom to materialer, som er den korrekte metoden for komposittbjelker.

Maksimal tillatt bøyespennning i ytterste sone (sone 3), lik bjelkens gjeldende bøyefasthet, kan dermed settes lik den minste av fastheten i ytterste sone og spenningen som oppstår ytterst når den innerste sonen (sone 1) når sin spenningskapasitet. For en bjelke med to soner blir formelen for bøyefasthet beregnet med FLBS lik formel 2.2 og formel 2.3 gjelder for SLBS.

$$f_{m,g,k} = \min \begin{cases} \frac{f_{m,g,k,1}}{1 - 2x_3} \\ f_{m,g,k,3} \end{cases} \quad (2.2)$$

$$f_{m,g,k} = \min \begin{cases} \frac{f_{m,g,k,1}}{1 - 2x_3} \cdot \frac{E_3}{E_1} \\ f_{m,g,k,3} \end{cases} \quad (2.3)$$

Siden limtrebjelkene betraktes som homogene, er det den første formelen som blir gjeldende for bjelker som kommer inn under gyldighetsområdet til NS-EN 14080. Mer om valg av antatt bøyespenningsfordeling finnes i delkapittel 2.3.6.

2.3.3 Beregning av karakteristisk trykkfasthet i fiberretning

Trykkfasthet er materialets evne til å tåle trykkspenninger. Fordi bøyespennning er et resultat av kombinert strekk- og trykkspenning, er bøyefastheten og trykkfastheten lik for homogene bjelker. Strekk- og trykkfasthet baseres derfor på den samme formelen som bøyespennning, i standarden NS-EN 14080 (Standard Norge, 2013). På grunn av at trykkspenning og bøyespennning fordeler seg ulikt over tverrsnittet, vil kompositteffekten likevel ha litt ulik betydning for trykkfastheten enn for bøyefastheten. For homogene bjelker vil trykkspenningen fordele seg jevnt over tverrsnittet. For komposittbjelker, der tverrsnittet består av soner med ulik trykkfasthet, kan det antas at de sterkeste sonene tar en større del av trykket. Maksimal trykkspenning som tverrsnittet tåler, er dermed oppnådd når hver sone får en spenning som er like stor som sonens fasthet.

Trykkfastheten for hver sone beregnes da med samme formel som bøyefastheten for hver sone, mens trykkfastheten for lameller av bøkfinér antas å være lik trykkfastheten for BauBuche. Ved videre å anta homogen oppførsel i bjelken, iht. NS-EN 14080, antas det

dermed at det maksimale trykket som bjelken tåler fordeles jevnt over tverrsnittet. Dette maksimale trykket, bjelkens totale sammensatte trykkfasthet, er dermed gjennomsnittet av trykkfastheten i hvert enkelt punkt på tverrsnittet (Bell, 2017).

2.3.4 Beregning av karakteristisk strekkfasthet i fiberretning

Strekkfasthet er materialets evnet til å tåle strekkspenninger. Strekkspenning fordeles seg over tverrsnittet på samme måte som trykkspenning, beskrevet i forrige delkapittel. Metodikken for å beregne strekkfasthet blir dermed identisk som for trykkfasthet. Eneste forskjellen er verdiene til strekkfastheten i de ulike sonene. Ifølge Standard Norge (2013) skal strekkfastheten for lamellene settes til 80 % av bøyefastheten, som også er lik trykkfastheten for enkeltlameller. Dette er fordi at når trevirket kappes til lameller og limes sammen igjen, blir eventuelle feil og svakheter i trevirket som reduserer strekkfastheten, fordelt jevnt i bjelken. Det er dermed tilstrekkelig å bruke dette faste forholdet mellom strekk- og trykkfasthet, selv om forholdet mellom disse varierer ganske mye for de ulike styrkeklassene.

Enkeltlamellene påvirkes mer av feil og svakheter i materialet ettersom svakheter ikke fordeles. Feil og svakheter, spesielt fiberhelling og kvist, reduserer strekkfastheten mer enn det reduserer trykkfastheten. Dermed blir forskjellen på disse større for de svakeste klassene hvor det godtas mer feil (Bell, 2017). Strekkfastheten for lamellene av gran, benyttet i denne undersøkelsen, blir da 80 % av sonens trykk- og bøyefasthet, mens strekkfastheten for lameller av bøkefinér settes lik strekkfastheten for BauBuche. Ettersom strekkspenningen fordeles ut over tverrsnittet på samme måte som trykkfastheten, blir også total strekkfasthet gjennomsnittet av strekkfastheten for hele tverrsnittet.

2.3.5 Beregning av karakteristisk densitet

Densiteten er materialets massetetthet, altså masse per volumenhet. Ifølge Bell (2017, s.57) er treets aller fleste mekaniske egenskaper avhengig av trevirkets densitet. Total densitet for et sammensatt tverrsnitt er lik den gjennomsnittlige densiteten for hver enkelt sone. NS-EN 14080 (Standard Norge, 2013) sier at den samlede densiteten for lamellene, i en kombinert limtrebjelke, skal multipliseres med faktoren 1,1 for å beregne bjelkenes totale densitet. Dette er fordi den karakteristiske densiteten for enkeltlamellene, skal være høyere enn eller lik den karakteristiske densiteten som gjelder for styrkeklassen de plasseres i. Det er derfor rimelig å anta at mange av lamellene har høyere densitet enn styrkeklassen tilsier, og dette må tas

hensyn til i en sammensatt bjelke (Standard Norge, 2013). Karakteristisk densitet for lameller av gran er gitt i NS-EN 14080.

Ettersom materialdata for lameller av bøkefinér er hentet fra BauBuche, og gjelder hele bjelker, vil ikke effekten med økt densitet for bjelken inntreffe. Derimot må det tas høyde for at enkeltlameller av bøkefinér kan ha lavere densitet enn en hel bjelke. Derfor er densiteten for lameller av bøkefinér lik densiteten for BauBuche dividert med 1,1, på samme måte som for E-modul. Ved til slutt å multiplisere den gjennomsnittlige densiteten med 1,1, er faktoren totalt sett ikke anvendt på materialet av BauBuche. Dette er i tråd med at faktoren er hentet fra en standard som egentlig ikke gjelder for materialet bøkefinér.

2.3.6 Beregning av opptredende spenning

Fasthetene som er beskrevet i de forrige delkapitlene og øvrige fasthetsverdier som kan hentes fra NS-EN 14080, skal kontrolleres mot opptredende spenning i henhold til regler gitt i Eurokode 5 (EK5), beskrevet i neste avsnitt. EK5 gir regler for kontroll og dimensjonering, men ingen klare fremgangsmåter for å beregne opptredende spenning (Standard Norge, 2004). Dette må gjøres ut fra teoretiske betraktninger. Ifølge elastisk bjelketeori kan det antas at skjærspenningen har en parabelformet fordeling, med størst verdi midt på tverrsnittet. Bøyepeningen kan derimot antas å ha en lineær fordeling med størst verdi øverst og nederst. Dette gjelder homogene bjelker, noe limtrebjelker kan betraktes som. For komposittbjelker får både bøyepeningen og skjærspenningen diskontinuiteter ved overgangen mellom to materialer.

For å oppnå en mest mulig presis sammenligning mellom de sammensatte bjelkene og standard limtrebjelker av gran, er det mest hensiktsmessig å benytte de beregningsmetodene som vanligvis benyttes i dimensjonering av limtrebjelker. For komposittbjelker er det teoretisk mest korrekt å anta at bøyepeningen fordeles stykkevis lineært over tverrsnittet (SLBS). Limtrebjelker kan likevel betraktes som homogene, og det antas dermed at bøyepeningen har en fullstendig lineær fordeling over tverrsnittet (FLBS) (Standard Norge, 2013). Det vil dermed gi best sammenligningsgrunnlag, dersom de sammensatte bjelkene i denne undersøkelsen også betraktes på denne måten.

Ettersom det ikke er så stor forskjell på E-modulen i de ulike tverrsnittssonene, er det å anta FLBS en brukbar forenkling som ikke er så langt fra virkeligheten. Det vil likevel være fornuftig å utføre en kontroll av hvor stor usikkerhet denne forenklingen kan føre med seg, og

å gjøre en vurdering av om denne usikkerheten kan aksepteres. I noen tilfeller er også forenklingen til sikker side. Det vil da være trygt å benytte denne antagelsen, men det kan føre til at bjelkene ikke får utnyttet sin virkelige kapasitet til det fulle.

For skjærdimensjoneringen har dette liten betydning i og med at skjærfastheten er valgt til en bestemt verdi for alle limtrebjelker, iht. i NS-EN 14080. Denne verdien er lavere enn skjærfastheten til de mest brukte styrkeklassene, selv i den svake sonen. Dette er fordi virkesfeil, kvist eller lignende reduserer bøye-, strekk- og trykkfastheten, og dermed gjør at lamellene får lavere styrkeklasse. Samtidig kan slike svakheter påvirke skjærfastheten positivt. Når trevirket kappes til lameller, blir denne effekten mindre, da mange av kvistene vil kappes og fordeles i bjelken. Bjelken har derfor lavere skjærfasthet enn enkeltlamellene (Standard Norge, 2010; Bell, 2017). Når dette antas å gjelde over hele tverrsnittet, kan også spenningen antas å ha en fordeling som om bjelken var homogen.

For bøyespenningen har dette større betydning, spesielt fordi FLBS i noen tilfeller er en forenkling til usikker side. Dette gjelder for tilfeller der ytterste sone får utnyttet sin fulle bøyespenningskapasitet før innerste sone, slik at ytterste sone blir dimensjonerende for bøyefastheten.

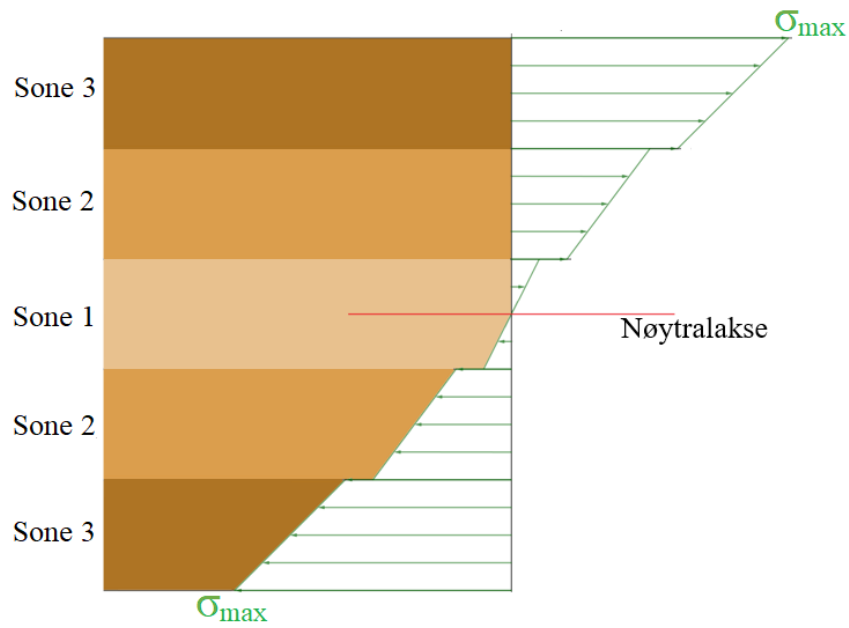
Hvilken sone som blir dimensjonerende for bjelkens bøyefasthet, er avhengig av E-modulen og tverrsnittsandelen i de ulike sonene. For sammensetninger av T22 og bøkfinér er innerste sone dimensjonerende for bøyefastheten, dersom tverrsnittet består av mindre enn $2 \times 27,3$ % bøkfinér. For sammensetninger av T15 og bøkfinér er tilsvarende grense på mindre enn $2 \times 31,8$ % bøkfinér. Dermed er også FLBS til sikker side for sammensetninger som oppfyller dette, slik at denne forenklingen trygt kan brukes. Vedlegg A viser beregningen for å komme fram til disse grenseverdiene.

Det antas også at forenklingen med FLBS kan benyttes i tilfeller der dette er til usikker side, så lenge usikkerheten ligger innenfor det som kan aksepteres. Ettersom NS-EN 14080 åpner for at limtrebjelker kan betraktes som homogene, antas det at usikkerheten dette kan medføre er tatt hensyn til i de øvrige beregningsreglene. Reglene fra denne standarden er også benyttet i de øvrige beregningene i denne rapporten. Derfor antas det at usikkerheten må ligge på et akseptabelt nivå, så lenge den ikke er større enn usikkerheten som aksepteres for limtrebjelker gitt i denne standarden. Det er undersøkt at for de predefinerte sammensetningene i standarden, gir FLBS en bøyefasthet som ligger på minimum 91,3 % av bøyefastheten

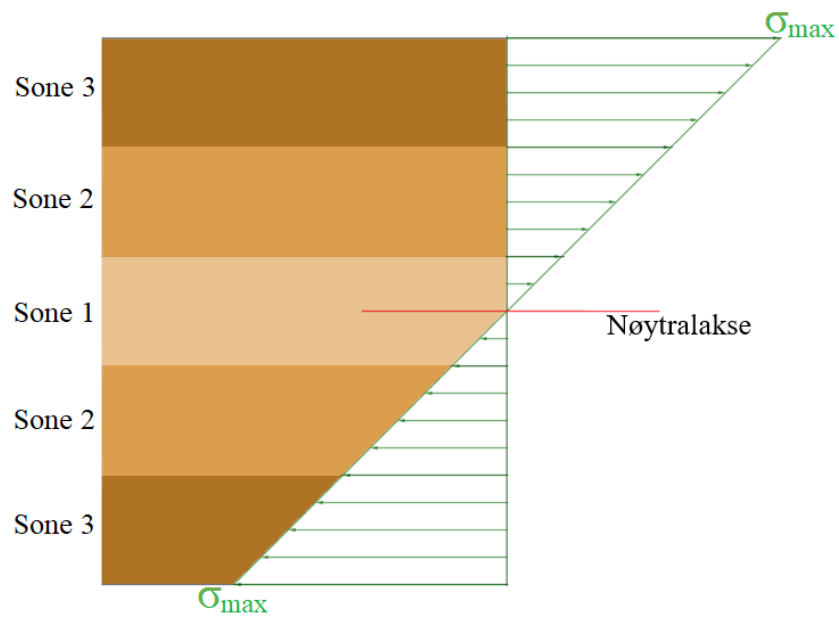
beregnet med SLBS. For tilfeller som ikke gir større usikkerhet enn dette, antas det derfor at forenklingen med FLBS trygt kan benyttes. Forholdet mellom bøyefastheten beregnet med FLBS og SLBS er avhengig av E-modulen i de ulike sonene og andelen av tverrsnittshøyden som tilhører de ulike sonene.

For sammensetninger av T22 og bøkefinér vil bøyefastheten beregnet med FLBS bli større enn 91,3 % av bøyefastheten beregnet med SLBS, dersom tverrsnittet består av mer enn $2 \times 11,0$ % bøkefinér. For sammensetninger av T15 og bøkefinér er tilsvarende grense på mer enn $2 \times 16,0$ % bøkefinér. Det antas derfor at usikkerheten som oppstår ved at FLBS benyttes i beregningene, kan aksepteres for tverrsnitt som oppfyller dette. For tilfeller som gir større usikkerhet enn standarden, ville det vært fornuftig å kontrollere spenningen ved å regne med SLBS også. Vedlegg A viser også beregningen for å komme fram til disse grenseverdiene.

For sammensetninger av T22 og bøkefinér er dermed FLBS til sikker side så lenge andelen bøkefinér er mindre enn $2 \times 27,3$ %, mens usikkerheten samtidig er vist å være på et akseptabelt nivå så lenge andelen bøkefinér er på mer enn $2 \times 11,0$ %. Ettersom disse intervallene overlapper, kan det antas at FLBS kan benyttes i beregningene for alle sammensetninger av T22 og bøkefinér i denne undersøkelsen. For sammensetninger av T15 og bøkefinér er FLBS til sikker side så lenge andelen bøkefinér er mindre enn $2 \times 31,8$ %, mens usikkerheten er vist å være på et akseptabelt nivå så lenge andelen bøkefinér er på mer enn $2 \times 16,0$ %. Da disse intervallene også er overlappende, kan det antas at FLBS også kan benyttes for alle sammensetninger av T15 og bøkefinér i denne undersøkelsen.



Figur 2.1: Stykkevis lineær bøyespenningsfordeling (SLBS). Gjelder dersom bjelken betraktes som en kompositt



Figur 2.2: Fullstendig lineær bøyespenningsfordeling (FLBS). Gjelder dersom bjelken betraktes som homogen

2.4 Dimensjonering av limtrebjelker

Eurokode 5 (EK5) gir krav til trekonstruksjoners bæreevne, brukbarhet, bestandighet og brannmotstand (Standard Norge, 2004). Med trekonstruksjoner menes bygninger og andre konstruksjoner av tre, blant annet limtre. Denne standarden kan dermed legges til grunn for prosjektering av trekonstruksjoner, herunder dimensjonering av limtrebjelker.

EK5 tar hensyn til last- og klimapåkjenninger i form av lastvarighetsklasser og klimaklasser, som sammen med materialtypen bestemmer faktoren k_{mod} . Denne faktoren brukes sammen med materialfaktoren til å bestemme materialets dimensjonerende fasthetsegenskaper.

Bøyefasthet og strekkfasthet for rektangulære limtrevrersnitt kan også multipliseres med en faktor k_h dersom tverrsnittets bredde eller høyde er mindre enn 600 mm. For å ta hensyn til langtidseffekter som kryp i deformasjonsberegninger, benyttes en faktor k_{def} som er avhengig av materialet og klimaklassen.

Dimensjoneringen må utføres for både brudd- og bruksgrensetilstand. For vanlige bjelketilfeller kan reglene for «Dimensjonering av tverrsnitt utsatt for spenning i én hovedretning» (Standard Norge, 2004, s. 35) følges for dimensjonering i bruddgrensetilstand. Ettersom det er antatt at bjelkene i denne undersøkelsen er fastholdt mot vipping, er det for fritt opplagte bjelker med kun vertikal jevnt fordelt belastning, kun bøyning og skjær som må kontrolleres i bruddgrensetilstand. Dimensjonerende opptredende bøyespennning skal være mindre enn dimensjonerende bøyefasthet, og dimensjonerende opptredende skjærspennning skal være mindre enn dimensjonerende opptredende skjærfasthet (Standard Norge, 2004).

Det er byggherren som bestemmer gjeldende grenseverdi for nedbøyningen i hvert enkelt prosjekt. Men de beregnede deformasjonene i bruksgrensetilstanden bør ikke overskride anbefalte verdier gitt i EK5.

For å beregne dimensjonerende opptredende spenning og nedbøyning, må EK5 kombineres med Eurokode 0 (EK0), som er ment til å brukes sammen med de andre Eurokodene (Standard Norge, 2002a). EK0 gir formler for lastkombinasjoner som benyttes til å beregne dimensjonerende belastning i både brudd- og bruksgrensetilstand. I bruddgrensetilstand er det gitt to lastkombinasjoner som begge må kontrolleres, og den som gir mest ugunstig belastning benyttes videre. I bruksgrensetilstand velges det blant tre kombinasjoner, avhengig av brukbarhetskrav og ytelseskriterier som er satt for hver enkelt situasjon. Dimensjonerende opptredende belastning i både brudd- og bruksgrense brukes videre til å beregne opptredende

bøyespennning, skjærspennning og nedbøyning ved hjelp av kjente og allment aksepterte formler. Beregning av opptredende spenning i og fasthet for bjelker sammensatt av gran og bøkefinér er omtalt i delkapittel 2.3, og prosedyren vises i vedlegg B.

2.5 Behandling av testresultater

2.5.1 Karakteristiske verdier

På grunn av trevirkets kompleksitet og påvirkningen av kvist, fiberhelling eller lignende, kan det være stor variasjon i de mekaniske egenskapene til flere tilsynelatende like eksemplarer av trevirke. Trevirket blir sortert i klasser, som beskrevet i delkapittel 2.2.1. Fordi sorteringen ikke kan basere seg på tester av hvert enkelt eksemplar, ettersom slike tester ødelegger trevirket, kan det oppstå variasjoner i de mekaniske egenskapene til eksemplarer i samme klasse. Likevel er det fastsatt bestemte verdier som angir materialegenskapene til lameller i en bestemt styrkeklasse og limtre i en bestemt fasthetsklasse. Hvor konservative verdiene er, er avhengig av hva den aktuelle egenskapen brukes til ved dimensjonering.

En konstruksjons dimensjonerende bæreevne skal beregnes på bakgrunn av karakteristiske verdier for materialets fasthetsegenskaper (Standard Norge, 2004). Karakteristiske verdier tilsvarer 5%-fraktilen i en samling som antas å være normalfordelt eller logaritmisk normalfordelt (Standard Norge, 2016c). Mer om dette i neste delkapittel.

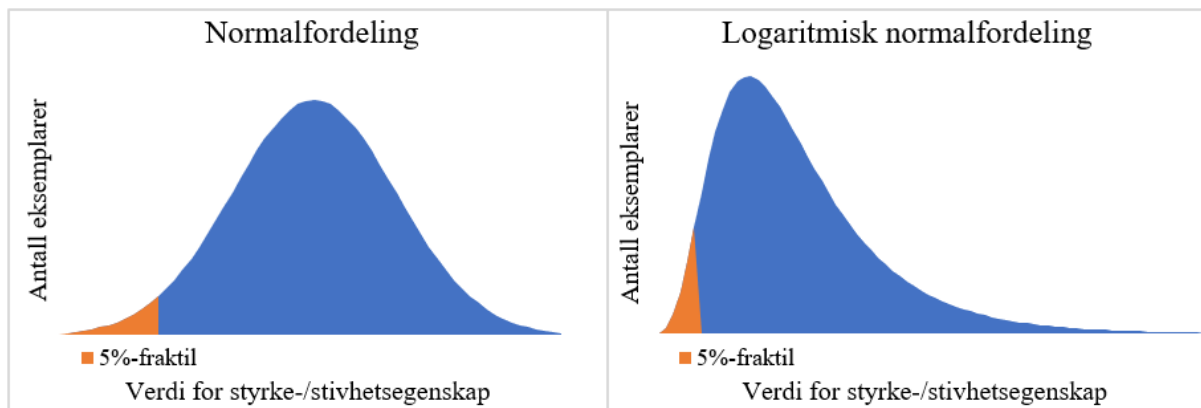
Karakteristisk bøyefasthet, trykkfasthet, strekkfasthet og densitet, som er fire av de viktigste mekaniske egenskapene til limtrebjelker, er dermed basert på verdienes 5%-fraktiler. Den siste avgjørende mekaniske egenskapen, E-modulen, skal baseres på middelveidien (Standard Norge, 2013). Det er fordi deformasjonsberegninger i bruksgrensetilstand, som E-modulen benyttes til, ikke er like kritisk som beregning av bæreevne.

En test vil i utgangspunktet gi fasthets-, stivhets- og densitetsverdier for hver enkelt testbjelke, og kan dermed ikke uten videre sammenlignes med 5%-fraktiler eller middelveidier. Dersom hver bjelke i et stort parti blir testet, kan resultatene fra en slik test brukes til å beregne 5%-fraktiler og middelveidier for de testede egenskapene. Dersom det kun utføres noen få tester på et lite utvalg, kan 5%-fraktiler og middelveidier estimeres ut fra testresultatene ved hjelp av statistiske modeller. Estimerte middelveidier for førstegangstesting kan tas som gjennomsnittet av de målte verdiene for hver enkelt testbjelke, uten ekstra sikkerhetsfaktorer (Standard Norge, 2016c).

2.5.2 5%-fraktil

At 5%-fraktilen brukes som karakteristisk verdi, vil si at 5 % av alle eksemplarene i en fasthets- eller styrkeklasse statistisk sett har dårligere egenskaper enn det den gitte karakteristiske verdien har i praksis. Det er dermed 95 % sannsynlighet for at et enkelt eksemplar har bedre egenskaper enn den karakteristiske verdien (Løvås, 2013).

NS-EN 14358 gir fremgangsmåter for å beregne karakteristiske verdier basert på testing, for ulike formål. Ved estimering av en 5%-fraktil basert på få tester, er det nødvendig å vite, eller anta, hvilken statistisk fordeling den aktuelle mekaniske egenskapen har. Dette er vanligvis normalfordeling eller logaritmisk normalfordeling (Standard Norge, 2016c).



Figur 2.3: 5%-fraktil for normalfordeling og logaritmisk normalfordeling

Ved normalfordeling har de fleste eksemplarene verdier som ligger nær gjennomsnittet, mens færre og færre eksemplarer har verdier som ligger langt over eller under gjennomsnittet. Noe av det samme gjelder for logaritmisk normalfordeling, men her er ikke kurven symmetrisk. Det antas at det er flere eksemplarer som har verdier som er høyere enn gjennomsnittet enn det er eksemplarer som har verdier under.

Å kjenne til eller estimere standardavviket til fordelingen, er helt vesentlig for å kunne estimere 5%-fraktilen. Standardavviket er definert som kvadratroten av variansen, som igjen er et mål på dataenes spredning. Standardavviket for normalfordelt data beregnes med formel 2.4 (Løvås, 2013, s. 56).

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{y})^2} \quad (2.4)$$

For å sammenligne empiriske data, som består av tallverdier i ulik størrelsesorden eller med ulike benevninger, brukes ofte variasjonskoeffisienten. Det er et relativt mål på dataenes spredning, og er definert som standardavviket dividert med middelverdien.

For normalfordelt data har 5%-fraktilen en verdi som er lavere enn den gjennomsnittlige verdien, med en differanse på 1,645 ganger standardavviket (Løvås, 2013, s. 537).

For logaritmisk normalfordeling er dette litt mer komplisert, og 5%-fraktilen kan regnes ut med følgende formler (Standard Norge, 2016c, s. 5-6):

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(m_i) \quad (2.5)$$

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(m_i - \bar{y}))^2} \quad (2.6)$$

$$m_k = \exp(\bar{y} - 1,645 \cdot s_y) \quad (2.7)$$

Ettersom standardavviket også kun er estimert på bakgrunn av et begrenset antall tester, krever NS-EN 14358 at tallet 1,645 økes med en faktor, som skal sørge for et konfidensnivå på 75 %. Det vil si at det er minst 75 % sikkert at den beregnede verdien faktisk er 5%-fraktilen eller en lavere verdi. Dette gir samtidig en relativt stor sannsynlighet for at estimert karakteristisk verdi er lavere enn den virkelige 5%-fraktilen, og at den dermed ikke stemmer fullstendig overens med karakteristiske verdier fra andre tester eller beregninger. Ettersom sikkerheten til estimatet av standardavviket er avhengig av antall tester, synker også denne verdien med økende antall tester.

For tre tester skal det antas at differansen mellom 5%-fraktilen og middelverdien er 3,15 ganger standardavviket ved normalfordelt data (Standard Norge, 2016c, s. 6). Samme verdi gjelder også for logaritmisk normalfordelt data, der middelverdien beregnes med formel 2.5 og standardavviket med formel 2.6.

Dette kravet gjelder for førstegangstesting, men dersom tilsvarende beregning skal utføres i forbindelse med intern produksjonskontroll, er ikke kravet like strengt. Dette er fordi standardavviket og middelveiden da er kjent fra tidligere tester, og det er dermed større sannsynlighet for at disse er korrekte enn hvis de estimeres ut fra et fåtall tester (Standard Norge, 2016c).

De største sikkerhetsfaktorene bør dermed benyttes dersom resultatene skal baseres utelukkende på den ene testserien. Dersom testen derimot skal benyttes til å kontrollere eksisterende antatte verdier, kan det være tilstrekkelig med mindre sikkerhet i beregningene.

2.5.3 Karakteristisk bøyefasthet

Bøyespenningen i en bjelke ved tidspunktet for brudd kan beregnes ut fra påført belastning ved dette tidspunktet. Dette tilsvarer hver bjelkes målte bøyefasthet (Standard Norge, 2010), og vises for testbjelke T22A i vedlegg L Bøyefastheten benyttes som karakteristisk verdi, 5%-fraktil, og skal antas å ha en logaritmisk normalfordeling.

Karakteristisk bøyefasthet beregnes dermed slik at det er 75 % sikkert at den virkelige 5%-fraktilen har en verdi som er større enn eller lik den beregnede (Standard Norge, 2016c, s. 5-6).

$$\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(f_i) \quad (2.8)$$

$$s_y = \max \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(f_i - \bar{f}))^2}, 0,05 \right. \quad (2.9)$$

$$f_{m,k} = \exp(\bar{f} - k_s(n)s_y) \quad (2.10)$$

Faktoren $k_s(n)$ for en serie med tre tester settes til 3,15, som forklart i forrige delkapittel. På samme måte kan den mest sannsynlige 5%-fraktilen beregnes, med formlene over, og gir 50 % sannsynlighet for at den virkelige 5%-fraktilen har en verdi som er større enn eller lik den beregnede. Dette er vist for testbjelker med T22 i vedlegg M.

2.5.4 Midlere elastisitetsmodul

Ved en 4-punkts bøyetest, beskrevet nærmere i delkapittel 3.3.2, kan E-modulen bestemmes ved at nedbøyningen måles som funksjon av påført belastning. Målingene for mellom 10 % og 40 % av bruddlasten brukes til en regresjonsanalyse, som gir en lineær sammenheng mellom nedbøyning og påført belastning. Stigningstallet til den rettlinjede grafen fra regresjonsanalysen brukes til å beregne E-modulen for den aktuelle bjelken. Dersom skjærmodulen er kjent, kan det tas med et ledd som korrigerer for dette, ettersom den målte nedbøyningen i utgangspunktet også inkluderer skjærnedbøyning. Det vil gi et mer konservativt resultat å ikke korrigere for skjærnedbøyning, som vises i vedlegg J.

Ettersom deformasjonsberegninger medfører lavere risiko enn beregning av bæreevne, er det her tillatt å bruke middelveien for E-modul i stedet for 5%-fraktilen (Standard Norge, 2004). Middelveien for E-modul kan beregnes ved å ta gjennomsnittet av den målte E-modulen for hver av testbjelkene (Standard Norge, 2016c). Her har ikke standarden noe ekstra krav til sikkerhetsfaktorer, så standardens beregning gir samme resultat som statistisk metode.

2.5.5 Fuktighet og karakteristisk densitet

Treets mekaniske egenskaper er, ifølge Bell (2017, s.77), avhengig av fuktinnholdet i trevirket. Dermed er fuktinnholdet en viktig faktor ved beregning av de mekaniske egenskapene til trevirket etter testing. NS-EN 13183-1 beskriver hvordan fuktinnhold skal testes og beregnes. Fuktinnholdet oppgis i prosent og beregnes ut fra prøvestykkets masse før og etter tørking. Dette er vist for testbjelke T22A i vedlegg E.

Densitet er per definisjon masse dividert med volum og kan beregnes ved ulikt fuktinnhold i trevirket. Det er imidlertid mest vanlig å oppgi densitet for trevirke med et fuktinnhold på 12 % (SINTEF Byggforsk, 2015). ISO 13061-2 beskriver hvordan densiteten, med et fuktinnhold på 12 %, skal beregnes ut fra volum og masse av trevirket (Standard Norge, 2014). Densitet oppgis med betegnelsen kilogram per kubikkmeter og beregningen er vist i vedlegg E.

Densitet oppgis som midlere og karakteristisk verdi i de norske standardene om tre. Som nevnt tidligere, under delkapittel 2.5.1, tilsvarer de karakteristiske verdiene 5%-fraktilen til en logaritmisk eller normalfordelt samling. Karakteristisk densitet skal ifølge NS-EN 14385 antas å være normalfordelt (Standard Norge, 2016c, s. 5). Dermed må den beregnede

densiteten, med 12 % fuktinnhold, regnes om til karakteristisk densitet med statistisk metode for normalfordeling. Middelerverdi, standardavvik og karakteristisk densitet beregnes med formlene under (Standard Norge, 2016c, s. 5-6).

$$\bar{\rho} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i \quad (2.11)$$

$$s_y = \max \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\rho_i - \bar{\rho})^2}, 0,05\bar{\rho} \right\} \quad (2.12)$$

$$\rho_k = \bar{\rho} - k_s(n)s_y \quad (2.13)$$

2.6 Tidligere undersøkelser

Gjennom kildesøkene, beskrevet under delkapittel 3.1, kom vi fram til én relevant undersøkelse om bruk av mjukved og hardved i samme tverrsnitt. En kort redegjørelse av denne undersøkelsen er presentert her.

«High performance glulam beams made of beech LVL and solid wood lamellas»

Dill-Langer og Aicher (2016) utarbeidet denne artikkelen i forbindelse med *World Conference on Timber Engineering* i 2016. Artikkelen omhandler tverrsnitt med lameller i styrkeklasse T14 og LVL av bøk i strekksonen. Det ble utførte tester med ulikt antall lameller av LVL og resultatene ble sammenlignet med teoretiske beregninger ved hjelp av elementmetoden. For sammenligning ble de samme testene utført på en homogen bjelke med lameller i styrkeklasse T14. Det ble benyttet LVL-lameller av bøk med karakteristisk bøyefasthet på 75 N/mm². Det påpekes i artikkelen at resultatene som fremkommer har begrenset anvendelighet da det kun er benyttet LVL-lameller av bøk uten fingerskjøt.

Dill-Langer og Aicher (2016) kunne konkludere med at resultatene for styrkekapasiteten til komposittbjerkene med LVL var bedre enn for det homogene tverrsnittet med T14-lameller. Bjelken med to LVL-lameller i strekksonen, det vil si 13 % av total høyde på bjelken, oppnådde en karakteristisk bøyefasthet tilsvarende 60 % av den karakteristiske bøyefastheten til en homogen LVL-bjelke av bøk.

3 Metode

3.1 Litteraturgjennomgang

I starten av undersøkelsen ble det satt av tid til søk etter og gjennomgang av relevant litteratur. Dette var for å undersøke hvilken forskning som tidligere hadde blitt gjort innen område, for å kunne bygge videre på dette og sikre at vår undersøkelse ville komme opp med ny informasjon. Databasene *Compendex*, *ScienceDirect*, *Oria* og *Google Scholar* ble benyttet i dette søket. Søket ble gjort systematisk ved at alle søkene ble registrert i et eget skjema. Der ble det blant annet fylt ut hvilke søkeord som ble brukt, hvilken database det ble søkt i og hvor mange treff dette ga. Relevante treff ble gjennomgått og undersøkt nærmere.

De kildene som viste seg å være nyttig for vår undersøkelse ble samlet i vårt *EndNote*-bibliotek. I tillegg til kilder fra nett, ble relevante bøker og standarder gjennomgått. Ved behov ble det gjort flere litteratursøk i løpet av undersøkelsen, ettersom det dukket opp ulike spørsmål vi trengte svar på. Kildene ble benyttet i ulike deler av rapporten, og kildehenvisningen ble gjort i henhold til *NTNUs Harvardstil*, ved hjelp av *EndNote*.

3.2 Teoretiske beregninger

Hovedmetoden som ble benyttet i denne undersøkelsen er beregninger basert på teori som følger relevante standarder og annen faglitteratur. Dette var fordi praktiske utfordringer førte til begrensninger ved laboratorietester. Det ble derfor ikke testet mange nok bjelker til at resultatene i hovedsak kunne basere seg på testing, og testingen ble dermed kun brukt til å kontrollere beregningene. I henhold til NS-EN 14080 er det å benytte standardens regler og lamellenes dokumenterte egenskaper til å beregne tverrsnittets sammensatte egenskaper, en av metodene som er nok til å bestemme en limtrebjelkes fasthetsklasse.

Vi har regnet på noen mekaniske egenskaper til sammensatte bjelker av gran, med styrkeklasse T22 eller T15 i midten, og bølgefinér symmetrisk fordelt øverst og nederst på bjelketverrsnittet. Styrkeklassene T22 og T15 i midten ble valgt fordi det var lameller av disse typene vi hadde tilgjengelig for laboratorietesting. Det var ønskelig at bjelkene vi regnet på teoretisk ble mest mulig lik bjelkene vi kunne teste ved laboratoriet.

3.2.1 Viktige mekaniske egenskaper

Det fantes ingen klare regler for beregning av sammensatte bjelker med limt mjukved og laminert finér av hardved. Derfor var vi nødt til å sette sammen teori fra flere kilder. NS-EN 14080 gjelder for limtre og omfatter også noen limte treprodukter av hardved (Standard Norge, 2013). Derfor antok vi at mye av teorien og beregningsreglene her var relevante og gyldige for sammensatte limtrebjelker av gran og bøkefinér. Etersom standarden egentlig bare gjelder for limtre som består av kun én tresort, har vi betraktet denne teorien som veiledende. Det ble derfor nødvendig å modifisere noen av standardens formler, for å tilpasse dem til tverrsnitts-sammensetningene av gran og bøkefinér.

NS-EN 14080 (Standard Norge, 2013) sier at karakteristisk bøyefasthet, karakteristisk strekk- og trykkfasthet i fiberretning, middelverdi for E-modul og karakteristisk densitet for kombinerte limtrebjelker, kan beregnes basert på de nevnte egenskapene for trevirket benyttet i hver sone. Disse settes sammen etter elastisk teori for komposittbjelker (ETKB), og antas videre å gjelde homogent for hele tverrsnittet. På bakgrunn av dette har vi utviklet formler og metoder for å regne ut disse fem størrelsene, basert på ETKB. Denne teorien er beskrevet nærmere under kapittel 2.

For å kontrollere disse beregningsmetodene, har vi anvendt dem på alle predefinerte sammensetninger beskrevet i NS-EN 14080 og kontrollert at disse metodene ga samme verdier som bjelkene skal ha i henhold til standarden. Andre mekaniske egenskaper enn de fem egenskapene nevnt i forrige avsnitt, har fastsatte verdier og var dermed ikke nødvendig å beregne. De nødvendige egenskapene for bord av gran ble funnet i NS-EN 14080 og NS-EN 338 for hver styrkeklasse, mens egenskapene som gjaldt for finérmaterialet av BauBuche var opplyst fra importøren, Moelven.

I beregningene av opptredende spenning ble de sammensatte tverrsnittene av gran og bøkefinér betraktet som homogene, og det ble antatt fullstendig lineær bøyespenningsfordeling (FLBS). Det var fordi denne beregningsmetoden ga et bedre sammenligningsgrunnlag med standard limtrebjelker, ettersom de betraktes på denne måten i NS-EN 14080 (Standard Norge, 2013). Samtidig førte ikke denne forenklete tilnærmingen til noe større usikkerhet enn det som allerede godtas i standarden, som forklart i delkapittel 2.3.6. Det ble valgt å se helt bort fra effekten fra limet som holdt lamellene sammen, fordi det ble antatt at limet var sterkere enn trevirket, i henhold til standarden (Standard Norge, 2013).

Beregningsmetodene utledet fra standardene og faglitteraturen ble brukt til teoretiske beregninger av de mekaniske egenskapene til ulike bjelker. Dette ble deretter brukt til å sammenligne egenskapene til limtrebjelker med de ulike sammensetningene. Først ble det undersøkt hvordan prosentandelen bøk i tverrsnittet påvirket de mekaniske egenskapene som avgjør limtrebjelkenes fasthetsklasse iht. NS-EN 14080; karakteristisk bøyefasthet, karakteristisk strekk- og trykkfasthet i fiberretning, middelverdi for E-modul og karakteristisk densitet. Disse verdiene ble beregnet etter elastisk teori for komposittbjelker (ETKB), som beskrevet tidligere i rapporten. Verdiene er videre brukt til å si noe om hvordan de geometriske egenskapene, som spennvidde og tverrsnittsdimensjon, varierer for bjelker forsterket med ulik andel bøkfinér.

De geometriske egenskapene ble bestemt for ulike tilfeller i henhold til dimensjoneringsreglene gitt i EK5 (Standard Norge, 2004) og beskrevet nærmere i delkapittel 2.4. For bjelketilfellene var det momentkapasitet og skjærkapasitet i bruddgrensetilstand og nedbøyning i bruksgrensetilstand som var mest relevant å dimensjonere for. For å begrense undersøkelsens omfang, som beskrevet i delkapittel 1.3, og antall variabler som kunne påvirke resultatet, antok vi at bjelkene var fastholdt mot vipping. Vi har av samme grunn heller ikke tatt hensyn til ulykkestilfeller.

3.2.2 Grunnlag for dimensjonering

Ved bruk av relevante standarders dimensjoneringsregler kom vi fram til spennvidder og tverrsnittsdimensjoner som oppfylte standardens krav til konstruksjonssikkerhet, funksjon og utseende. Resultatene tilsvarer derfor ikke bjelkenes teoretiske maksimale spennvidde, men spennvidden man vil tillate at bjelkene har i en virkelig konstruksjon. Som grunnlag for all dimensjonering ble ytre forhold fastsatt på forhånd. Dette var for å begrense antall variabler, slik at undersøkelsen tydeligere viste en årsakssammenheng mellom spennvidde og dimensjon, avhengig av andelen bøkfinér i tverrsnittet, uten påvirkning fra andre forhold.

Tabell 3.1:
Fastsatte forhold benyttet som grunnlag for dimensjonering

Nyttelast	3 kN/m ² (brukskategori B: kontorarealer) (Standard Norge, 2002b, s. 3 i NA)
Egenlast (ikke inkl. bjelkens egenvekt)	1 kN/m ²
Lastbredde	2 m
Bruksgrensetilstand	Tilnærmet permanent/ kvasi-permanent
Bjelkebredde, langt spenn	215 mm
Bjelkebredde, kort spenn	90 mm
Klimaklasse	1 (Relativ fuktighet < 65 %, bærende elementer i innendørs i rom som vanligvis er oppvarmet) (Standard Norge, 2004, s. 2 i NA)
Lastvarighetsklasse	Mellomlangtidslast
Grenseverdi for nedbøyning	w = 1/250 (Standard Norge, 2004, s. 3 i NA)
Faktorer (basert på situasjonen beskrevet over)	k _{mod} = 0,8 (Standard Norge, 2004, s. 26) k _{def} = 0,6 (Standard Norge, 2004, s. 28)

Forutsetningene over ble valgt på bakgrunn av vanlige forhold som limtrebjelker utsettes for. Noen størrelser ble også valgt mer eller mindre vilkårlig. Alle tverrsnittsdimensjoner var standard dimensjoner for limtre, hvor tverrsnittshøyden var multipler av lamelltykkelsen på 45 mm. Utførelsen av dimensjoneringen for en bjelke med kort spennvidde vises i vedlegg B.

Til slutt ble resultatene for de ulike tverrsnitts-sammensetningene sammenlignet og vurdert. Sammenligningen baserte seg på de sammensatte bjelkenes beregnede mekaniske og geometriske egenskaper. Disse egenskapene ble også sammenlignet med tilsvarende egenskaper for en standard limtrebjelke av GL30c.

3.2.3 Beregning av maksimal spennvidde

For å forsøke å finne en sammenheng mellom andelen bøk i tverrsnittet og bjelkens spennvidde, har vi regnet på to utgangstilfeller. Tilfellene var et kort spenn på 3 m og et langt spenn på 20 m. Det ble også vakt en fastsatt tverrsnittsdimensjon for hvert av de to tilfellene, basert på dimensjonering av spennet med en standard limtrebjelke av GL30c. Dimensjonene ble 90 mm × 225 mm for bjelken med et spenn på 3 m, og 215 mm × 990 mm for bjelken med spenn på 20 m. Videre ble maksimal spennvidde for de ulike tverrsnitts-sammensetningene beregnet, ved hjelp av elastisk teori for komposittbjelker (ETKB) og dimensjonering iht. EK5. Alle sammensetningene hadde de samme ytre betingelsene og de

fastsatte dimensjonene, som nevnt over. Den eneste uavhengige variabelen i denne delen av undersøkelsen var andelen bøkfinér i tverrsnittet. Ved å sette alle andre variabler til en fast verdi, fikk vi dermed se en tydelig sammenheng mellom andelen bøkfinér og bjelkens mulige spennvidde.

Dimensjoneringen ble utført for både et kort og et langt spenn, som nevnt i forrige avsnitt. Grunnen til dette var at selv om alle ytre faktorer var like, kunne en bjelke på 20 m og en på 3 m ha nokså ulik oppførsel. Vi ønsket å undersøke om sammenhengen mellom andelen bøkfinér og bjelkens mulige spennvidde, var annerledes for en bjelke med kort spenn enn for en bjelke med mye lengre spenn. Om moment, skjær eller nedbøyning var dimensjonerende, kunne ha en del å si for resultatet. Derfor var det nødvendig å se på minst to ulike tilfeller før det var mulig å si noe generelt om denne sammenhengen.

Det ble utført en serie med slike beregninger der den totale andelen bøkfinér ble økt med 10 % for hver beregning. I tillegg ble det de teoretiske beregningene utført på de sammensetningene som ble testet i laboratoriet. For korte spenn ble maksimal spennvidde rundet ned til nærmeste 0,01 m, mens det for lange spenn ble rundet ned til nærmeste 0,05 m. Dette tilsvarte at avrundingen ble omtrent lik for de to tilfellene, relativt til bjelkenes lengde.

3.2.4 Beregning av nødvendig tverrsnittsdimensjon

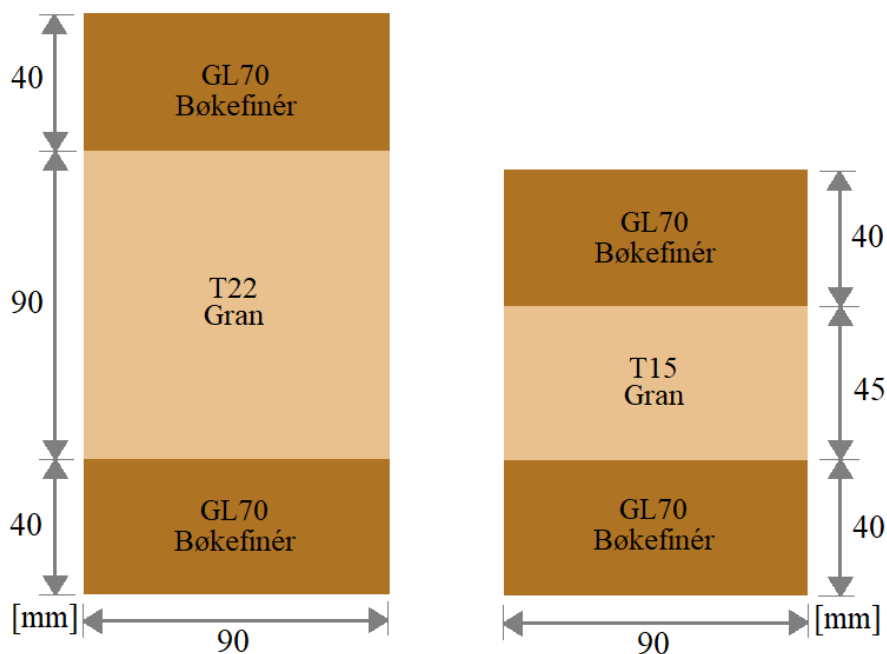
Ut fra undersøkelsen om mulige spennvidder ble det plukket ut noen tverrsnittssammensetninger som var interessante å se nærmere på. Dette var kombinasjonene av bøkfinér og gran i styrkeklasse T22 eller T15 som ga de lengste spennviddene og de kombinasjonene som så ut til å ha mest optimal utnyttelse av bøkfinéren. Bjelker med disse tverrsnittene ble dimensjonert for de forhåndsbestemte spennviddene, 3 m og 20 m, og de maksimale spennviddene fra beregningene, 4,01 m og 21,85 m. Dette var for å undersøke hvilken betydning forsterkningen med bøkfinér kunne ha for bjelkenes nødvendige tverrsnittsdimensjon. Bredden ble i utgangspunktet fastsatt, som vist i tabell 3.1, mens høyden ble dimensjonert. Men dersom tverrsnittet med den dimensjonerte høyden kunne hatt en mindre bredde, ble også dette tatt med. Nødvendig tverrsnittsdimensjon med disse sammensetningene ble så sammenlignet med nødvendig tverrsnittsdimensjon for bjelker av GL30c og BauBuche. På den måten kunne vi finne ut noe om hvordan andelen bøkfinér i tverrsnittet påvirket bjelkens geometriske egenskaper.

3.3 Laboratorietester

For å kontrollere de teoretiske beregningene ble det gjennomført fullskalatester. På grunn av begrenset tilgang på materialer, ble kun seks bjelker testet. Det var to ulike tverrsnittssammensetninger, med tre eksemplarer av hver. Dette antallet tilfredsstilte dermed minimumskravet til antall eksemplarer i en testserie, som ifølge NS-EN 14358 (Standard Norge, 2016c) er tre stykker.

Testbjelkene ble produsert av Moelven Limtre AS og testene ble utført ved Norsk Treteknisk Institutt (Treteknisk). Testene ble utført på følgende tverrsnittssammensetninger:

1. Tverrsnittsdimensjon: 90 mm × 170 mm, lengde: 3,3 m, sammensatt av 40 mm bøkefinér øverst og nederst og 90 mm gran med styrkeklasse T22 i midten. Tverrsnitt med totalt 47 % bøkefinér fordelt på strekk- og trykksone.
2. Tverrsnittsdimensjon: 90 mm × 125 mm, lengde: 2,4 m, sammensatt av 40 mm bøkefinér øverst og nederst og 45 mm gran med styrkeklasse T15 i midten. Tverrsnitt med totalt 64 % bøkefinér fordelt på strekk- og trykksone.



Figur 3.1: Illustrasjon av tverrsnittssammensetninger for testbjelker

3.3.1 Valg av testbjelker

På grunn av frakt og håndtering, var det fordelaktig at testbjelkene var kortest mulig og det ble anslått en gunstig lengde på rundt tre meter. Samtidig måtte bjelkene tilfredsstillende lengdekravet i NS-EN 408, som er 19 ganger tverrsnittshøyden (Standard Norge, 2010). Siden lengden dermed var avhengig av høyden, ble det nødvendig at bjelkene var så lave som mulig.

Bøkefinéren som var tilgjengelig ved Moelven, hadde en tykkelse på 40 mm. Tykkelsen kunne reduseres ved å slisse bøkefinéren, men dette ville by på flere praktiske utfordringer. Det ble derfor benyttet 40 mm bøkefinér øverst og nederst i de sammensatte testbjelkene.

Midten av tverrsnittene skulle bestå av gran i styrkeklasse T22 og T15, da det var disse styrkeklassene som var tilgjengelig. Andelen gran i tverrsnittene, ble bestemt ut fra spenningsberegninger. Det var ønskelig med høyest mulig utnyttelse av begge materialene i tverrsnittet, og dermed at bøkefinéren skulle få brudd først på grunn av bøyespenning. Det ble gjennomført spenningsberegninger av tverrsnitt med ulik andel gran i midten, se vedlegg C, for å finne tverrsnitts-sammensetningene med best utnyttelse av begge materialene. På bakgrunn av disse beregningene, og fordi lamelltykkelsen for gran var på 45 mm, ble tverrsnittet med to lameller av styrkeklasse T22 i midten og tverrsnittet med én lamell av T15 valgt som testbjelker. Figur 3.2 viser tverrsnittet med to lameller av T22 i midten, til venstre, og til høyre er tverrsnittet med én lamell av T15 i midten.



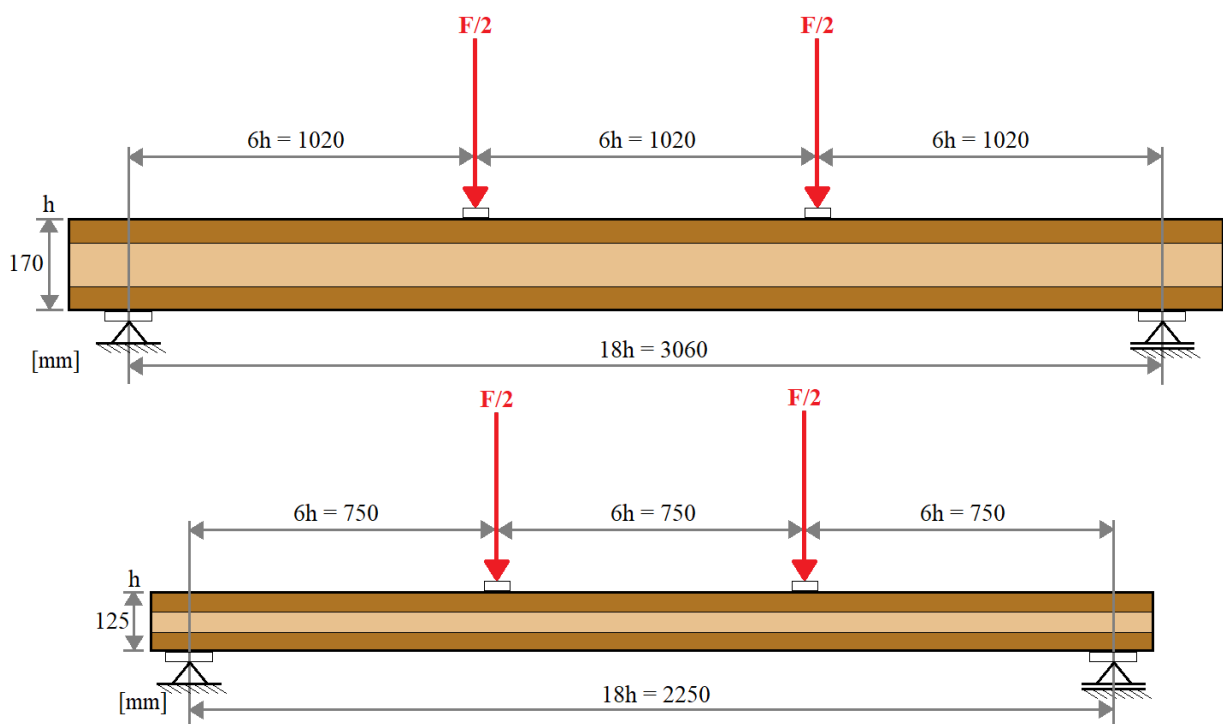
Figur 3.2: Tverrsnitt av valgte testbjelker – Foto: Mathilde Espelid

3.3.2 Utførelse av laboratorietester

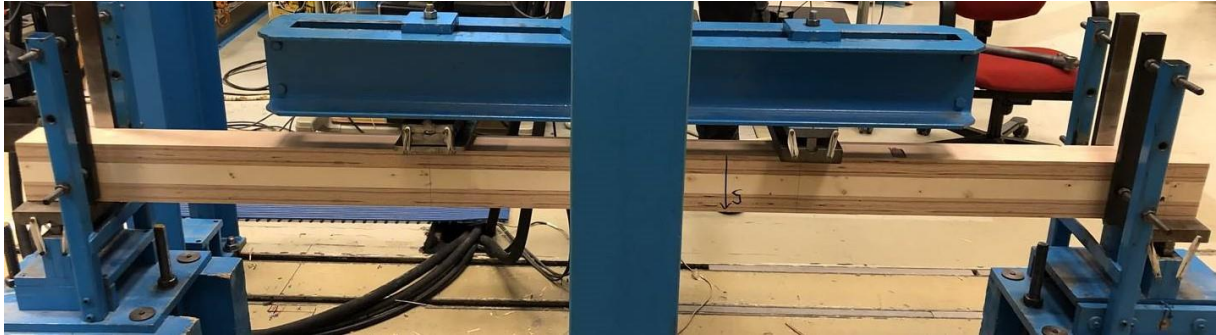
For at testbjelkene skulle akklimatiseres, ble de oppbevart i testlokalet i tre døgn før testene ble utført. Testlokalet, hos Treteknisk, hadde en relativ fuktighet på 65 % og en konstant temperatur på 20 °C, som tilfredsstilte kravene i NS-EN 408 (Standard Norge, 2010).

Før testene ble gjennomført, ble det gjort nøyaktige målinger av bjelkenes dimensjoner, disse ble notert og finnes i vedlegg D. For å identifisere bjelkene, ble hver bjelke navngitt og merket. Bjelkene med T22-lameller i midten fikk navnene T22A, T22B og T22C, mens bjelkene med T15-lameller i midten ble merket med T15A, T15B og T15C.

Det ble utført 4-punkts bøyetest iht. NS-EN 408, som testet bjelkenes bøyefasthet og globale E-modul. Testbjelkene var fritt opplagt, fastlager i ene enden og glidelager i andre, med en spennvidde på 18 ganger tverrsnittshøyden (h). To punktlaster ble plassert symmetrisk, med en avstand $6h$ fra nærmeste opplager. Total belastning fra de to punktlastene ble økt med en hastighet på 10 kN/min. NS-EN 408 (Standard Norge, 2010) sier at bruddet skal komme innen 300 sekunder \pm 120 sekunder. Ettersom bjelker av denne typen ikke hadde vært testet før, ble det foretatt en kvalifisert gjetning av de ansatte ved Treteknisk, på hvilken påføringshastighet som skulle benyttes for å oppnå dette.



Figur 3.3: Prinsippskisse av testoppsett for 4-punkts bøyetest for de to testseriene



Figur 3.4: Testoppsett med bjelkespenn på 18h og symmetrisk belastning med avstand 6h – Foto: Birgitta Fjellstad

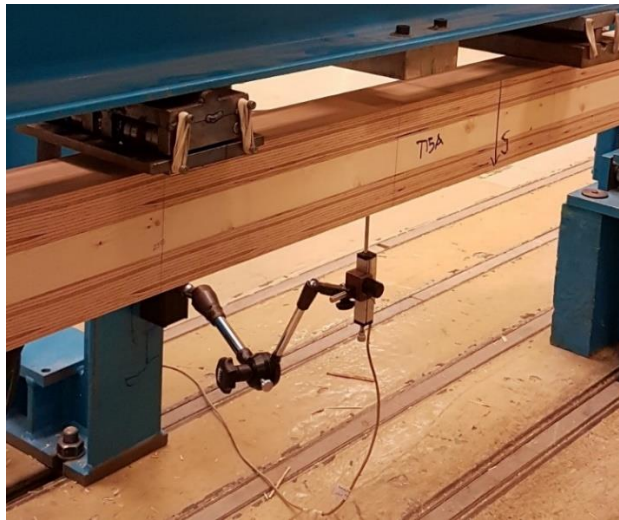


Figur 3.5: Testoppsett med gaffellagring og glidelager i ene enden – Foto: Mathilde Espelid

Nedbøyningen ble målt kontinuerlig av to målere, midt på bjelken. Primært var det testmaskinen som målte nedbøyning fra bjelkens overside, men en sekundær måler ble plassert under bjelkens midtpunkt for mer nøyaktig måling. For å unngå skade på den sekundære nedbøyningsmåleren, ble denne tatt bort når lasten var så stor at det var fare for brudd i testbjelken. Testmaskinen benyttet deretter de to målingene av nedbøyning til å beregne global E-modul for bjelken. Den globale E-modulen ble registrert og brukt videre til manuell beregning av midlere E-modul, med metoden som vist under delkapittel 2.5.4.

Ved brudd i bjelken ble testen stoppet, og lasten på dette tidspunktet ble registrert som maksimal last. Testmaskinen brukte så denne lasten til å beregne maksimal bøyepening i bjelken ved brudd. Bjelkenes E-modul og bøyepening ble også kontrollert ved manuell beregning, som vist i vedlegg J og L. Bruddårsaken for hver enkelt testbjelke ble studert og

notert på et eget ark, se vedlegg D. Alle testene ble filmet, slik at videoene kunne brukes til å analysere bruddene nærmere, og avgjøre i hvilken tverrsnittssone bruddene oppsto først.



Figur 3.6: Sekundær nedbøyningsmåler plassert midt på bjelkespennet – Foto: Mathilde Espelid

Umiddelbart etter at bøyetestene var utført, ble prøvestykker med full tverrsnittsstørrelse kappet fra hver bjelke. Prøvestykkene hadde en tykkelse på omtrent 3,5 cm, og ble tatt ut nærmest mulig bruddet, men uten selv å være berørt av bruddet. Deretter ble prøvestykkene målt og veid, og plassert i et tørkeskap som holdt 103 °C. Etter 22 timer i tørkeskapet ble de veid igjen, og resultatene ble brukt til å beregne bjelkenes densitet og fuktinnhold ved testtidspunktet. Uttak av prøvestykker, tørketid og temperatur i tørkeskap samsvarte dermed med kravene i NS-EN 13183-1 (Standard Norge, 2002c). Beregning av fuktinnhold og densitet er vist for testbjelke T22A i vedlegg E.



Figur 3.7: Prøvestykker for måling av fuktighet og densitet – Foto: Mathilde Espelid

Etter de gjennomførte testene fikk vi overlevert rådata, som deretter ble behandlet iht. NS-EN 408, NS-EN 14358 og ISO 13061-2. Data som ble registrert eller beregnet for hver testbjelke, av testmaskinen hos Treteknisk, var maksimal belastning, maksimal spenning, tidsbruk, nedbøyning og E-modul. I tillegg ble bjelkenes fuktinnhold og densitet bestemt i en egen test.

Dataene ble videre brukt til å beregne midlere E-modul, karakteristisk bøyefasthet og karakteristisk densitet, for hver av de to tverrsnitts-sammensetningene som ble testet. Disse verdiene ble deretter sammenlignet med de tilsvarende teoretiske beregnede verdiene. Denne sammenligningen er nærmere beskrevet i neste delkapittel.

For å få et mål på spredningen til testresultatene, og dermed kunne si noe om hvor reliable og valide de var, har vi også beregnet variasjonskoeffisienten til alle de testede størrelsene i hver serie (Løvås, 2013). Denne beregningen er vist for E-modulen til bjelkene med T22-lameller i midten i vedlegg K.

3.4 Sammenligning av beregningsresultater og testresultater

Under laboratorietesting ble det målt bruddlast, nedbøyning, dimensjoner og vekt. Disse målingene ble benyttet til å beregne testbjelkenes bøyefasthet, E-modul, fuktinnhold og densitet, i henhold til de relevante standardene. Teorien bak beregningene er beskrevet nærmere i delkapittel 2.5.

Under de teoretiske beregningene fant vi karakteristisk bøyefasthet, trykkfasthet, strekkfasthet, densitet og midlere elastisitetsmodul (E-modul), mens testresultatene kun ga den virkelige bøyefastheten, densiteten og global E-modul for de seks testbjelkene. For å kunne sammenligne beregningsresultatene med testresultatene, måtte dermed statistiske metoder benyttes for å regne om testresultatene.

Som forklart under delkapittel 2.5.2 kan beregninger basert på et lite antall tester gi et usikkert estimat for standardavvik og middelvei, og dermed en usikker verdi for 5%-fraktilen. Standarden krever derfor at det benyttes ekstra sikkerhetsfaktorer for å sikre 75 % sannsynlighet for at den virkelige 5%-fraktilen er høyere enn eller lik den estimerte. Denne sikkerheten er større ved førstegangstesting enn ved tester som skal brukes til å kontrollere

partier med antatt kjent styrke- eller fasthetsklasse (Standard Norge, 2016c). Denne metoden skal brukes ved testing av nye produkter (Standard Norge, 2013).

Laboratorietestene som ble utført i denne undersøkelsen kunne kategoriseres som førstegangstester, ettersom de undersøkte sammensetningene ikke var testet før, og det dermed ikke eksisterte tidligere testresultater. Gjennom teoretiske beregninger var vi likevel i stand til å finne teoretiske verdier som skulle kontrolleres ved laboratorietester. Derfor valgte vi å beregne 5%-fraktilene både med standardens metode og med statistisk teori. Dersom det skulle vært produksjon av de sammensatte bjelkene, måtte standardens 5%-fraktil med 75 % signifikansnivå blitt benyttet som karakteristisk verdi. Men i så tilfelle ville det vært fornuftig å utføre langt flere tester enn tre, noe som sannsynligvis ville gitt en høyere karakteristisk verdi enn oppnådd i denne undersøkelsen.

Dermed ble det antatt at metoden som anga den mest sannsynlige 5%-fraktilen basert på testresultatene, burde gi verdier som var godt samsvarende med de teoretiske beregnede verdiene. Det var ventet at standardens metode ville gi litt sikrere verdier. Beregnet karakteristisk bøyefasthet ble basert på antatt logaritmisk normalfordeling, mens karakteristisk densitet ble beregnet med antatt normalfordeling (Standard Norge, 2016c).

Middelverdien for E-modulen ble estimert som den gjennomsnittlige E-modulen for hver av de tre testbjelkene i samme serie, uten flere sikkerhetsfaktorer (Standard Norge, 2016c). Det ble korrigert for skjærdeformasjon ved å sette skjærmodulen til 650 N/mm^2 , som er den faste verdien for skjærmodul til limtre (Standard Norge, 2013). Skjærdeformasjon ble tatt med som et eget bidrag i nedbøyningsberegningene.

Fullstendig utregning av bøyefasthet, E-modul og densitet for testbjelker, samt karakteristiske verdier og middelverdier er vist i vedlegg.

Til slutt ble de beregnede verdiene, karakteristisk bøyefasthet og densitet, og middelverdi for E-modul, fra testene sammenlignet med de tilsvarende teoretiske beregnede verdiene. Blant annet ble det undersøkt om testresultatene stemte best overens med teoretisk bøyefasthet beregnet med antatt fullstendig lineær bøyespenningsfordeling eller antatt stykkevis lineær bøyespenningsfordeling.

På bakgrunn av dette ble det gjort en vurdering av validiteten og reliabiliteten til både testresultatene og beregningsresultatene, og det ble vurdert om det var nødvendig å justere beregningsmetodene.

Strekk- og trykkfasthet i fiberretning ble ikke testet, selv om disse også er to av egenskapene som avgjør fasthetsklassen til en limtrebjelke, og derfor har vært sentrale i de teoretiske beregningene. Det skyldes at det ikke var mulig å utføre slike tester i tillegg til den beskrevne bøyetesten, på de samme testbjelkene. Å utføre tester av disse egenskapene ville dermed krevd flere testbjelker, noe som ikke var mulig å få til på grunn av begrensninger ved produksjon og transport. Den beregnede strekk- og trykkfastheten ble derfor ikke sammenlignet med testede verdier.

3.5 Kvalitetssikring

Gjennom hele undersøkelsen har vi hatt fokus på tiltak som kunne sikre god reliabilitet. Dette ble gjort gjennom gode rutiner for egenkontroller, sidemannskontroller og bruk av beregningsverktøy som *Mathcad* og *Excel* for å minimere risikoen for regnefeil. Særlig viktige beregninger ble gjort i både *Mathcad* og *Excel*.

Det ble benyttet standardiserte metoder for både beregning og testing, der dette fantes. Fordi vi har undersøkt spesielle tilfeller, fantes det ikke standardiserte metoder for alle deler av undersøkelsen. Derfor har vi vært nødt til å utvikle egne metoder for noen av beregningene. Disse metodene ble også basert på standardiserte metoder, men med noen tilpasninger. Til dette ble det brukt relevant litteratur fra flere ulike kilder, for å sikre et resultat med god reliabilitet og validitet.

Testene ble gjennomført på laboratorium ved Norsk Treteknisk Institutt, med deres testutstyr som har høy kvalitet og nøyaktighet. Dokumentasjon av kalibreringssertifikat finnes i vedlegg O. Dette for å sikre god reliabilitet for testresultatene. Antallet testobjekter ble av praktiske grunner satt til et minimum, noe som kunne være en utfordring for testens reliabilitet. Dette fordi en uregelmessighet med en av testene, eksempelvis feilsortert trevirke, feil utførelse av testen eller feil med testutstyret, kunne påvirket resultatet i stor grad. For å unngå at dette ble en feilkilde, ble det lagt mest vekt på de teoretiske beregningene, og testresultatene ble kun brukt som en kontroll.

Ved teoretiske beregninger har vi kommet fram til verdier for mekaniske egenskaper som E-modul, bøyefasthet, densitet, strekk- og trykkfasthet. For å sikre valide resultater som svarte på problemstillingen, har det viktigste arbeidet vært å beregne hvordan en bjelke med disse egenskapene oppførte seg i virkeligheten. Målet med undersøkelsen var å finne ut om en sammensatt bjelke kunne oppnå egenskaper, som gjorde at en slik bjelke egnet seg bedre enn standard limtrebjelker i enkelte reelle situasjoner. Derfor har vi sett på fastsatte like situasjoner, der den uavhengige variabelen var andelen bølgefinér, mens den avhengige variabelen var spennvidde eller tverrsnittsdimensjon. Dermed viser resultatene hvilken betydning andelen bølgefinér i tverrsnittet har for de geometriske egenskapene.

Vi har valgt å se på disse få konkrete situasjonene for at vi skulle få praktiske og sammenlignbare størrelser, uten at undersøkelsen ble for omfattende. På denne måten ville vi få et valid resultat som kunne brukes direkte til å si noe om de ulike sammensetningenes egnethet i gitte reelle situasjoner. Det har blitt lagt vekt på at bjelkene skulle holde seg innenfor dimensjoneringskravene i EK5 (Standard Norge, 2004), slik at tilfellene vi har undersøkt kunne brukes i virkeligheten.

Samtidig kan resultatene være valide for andre bjelketilfeller, eksempelvis med annen last eller spennvidde, med kun små justeringer. De mekaniske egenskapene er avgjørende for bjelkenes mulige spennvidde og tverrsnittsdimensjon. Disse er derfor relevante i andre tilfeller enn de vi har undersøkt

Laboratorietestene kan også antas å være valide fordi resultatene her viser noe av det samme som er beregnet teoretisk på forhånd, nettopp bøyefasthet, E-modul og densitet. Beregningene omfattet også mer, men av praktiske årsaker var det ikke mulig å få testet alt. Dette er noen av de viktigste størrelsene en bjelke blir dimensjonert ut fra, og derfor noe av det mest relevante å teste.

Det ble også foretatt en egen vurdering av feilkilder, avvik og andre ting som kunne påvirke resultatene, spesielt ved testingen, men også ved beregningen. Ved oppdagelse av feil eller avvik i beregningsresultatene, ble beregningene justert eller utført på nytt. Testene var derimot ikke mulig å utføre på nytt. I stedet ble det gjort en vurdering av i hvilken grad aktuelle avvik hadde påvirket resultatene, slik at resultatene kunne tolkes i lys av dette. Ved usikkerhet rundt hvilke beregningsmetoder som var de mest korrekte, ble det undersøkt hvilken metode som ga mest konservativt resultat, og denne ble benyttet videre.

Ved bruk av metodetriangulering, gjennom kombinasjon av teoretiske beregninger, fullskalatester og sammenligning, økes både validiteten og reliabiliteten til undersøkelsen. Dette har gjort at resultater som samsvarte for de to metodene kunne bekreftes med enda større sikkerhet. Mens resultater som ikke samsvarte kunne justeres på bakgrunn av dette, slik at vi endte opp med mest mulig korrekte resultater.

3.5.1 Mulige feilkilder ved laborietester

I forkant av laborietestene ble det gjort en vurdering av mulige feilkilder som kunne oppstå. Det ble vurdert hvilke tiltak som kunne utføres for å minimere antall feilkilder og virkningen av disse. Ved uventede forhold eller hendelser som har oppstått underveis, har det blitt utført tiltak som skulle sørge for at slike faktorer i minst mulig grad ville påvirke resultatene i form av feilkilder.

Siden tverrsnitts-sammensetningene i denne undersøkelsen aldri før har vært testet, hadde vi ingen estimert bruddlast før testene ble utført. Det var dermed usikkert hvilken hastighet for lastpåføring som burde benyttes, for å holde seg innenfor standardens krav om at bruddet burde komme innen 300 sekunder \pm 120 sekunder (Standard Norge, 2010). Det var ingen annen måte å løse dette på enn å bruke kvalifisert gjetning til å estimere bruddlasten og dermed nødvendig påføringshastighet. Det var de ansatte ved Tretknisk som kom med forslag til påføringshastighet, basert på erfaring, og vi fulgte deres anbefaling. Hastigheten ble satt litt lavere enn det som var antatt å gi brudd etter akkurat 300 sekunder, fordi et brudd som oppstod for tidlig ville vært en større feilkilde enn et brudd som oppstod for sent.

Den ene testbjelken, T22A, hadde noe kuving. Dette ble løst ved å la bjelken krumme oppover, for at ikke nedbøyningen skulle forsterke kuvingen, men i stedet motvirke den. Forhåpentligvis ville dette føre til at kuvingen fikk minst mulig betydning for testresultatene.

Det vil alltid være en risiko for at resultatene blir påvirket av menneskelige feil eller feil på utstyr. Vi har vurdert at sannsynligheten for at slike feil ville kunne oppstå i forbindelse med testingen var liten, ettersom testene ble utført av ansatte ved Norsk Tretknisk Institutt, og med deres laborieutstyr. I tillegg ville det ikke være mulig for oss å sikre oss mot slike feilkilder. Vi har likevel vurdert alle testresultatene kritisk, for å kunne oppdage om noen av resultatene hadde blitt påvirket av feilkilder, og dermed ha muligheten til å justere de aktuelle resultatene med hensyn til dette.

4 Resultater fra teoretiske beregninger

4.1 Viktige mekaniske egenskaper

Som beskrevet i delkapittel 3.2, har vi benyttet elastisk teori for komposittbjelker (ETKB) for å beregne de fem karakteristiske verdiene, som NS-EN 14080 anser som viktigst. Dette er middelverdi for E-modul, karakteristisk bøyefasthet, karakteristisk strekk- og trykkfasthet i fiberretning og karakteristisk densitet. Resultatene fra de teoretiske beregningene av de fem mekaniske egenskapene er vist i dette delkapittelet.

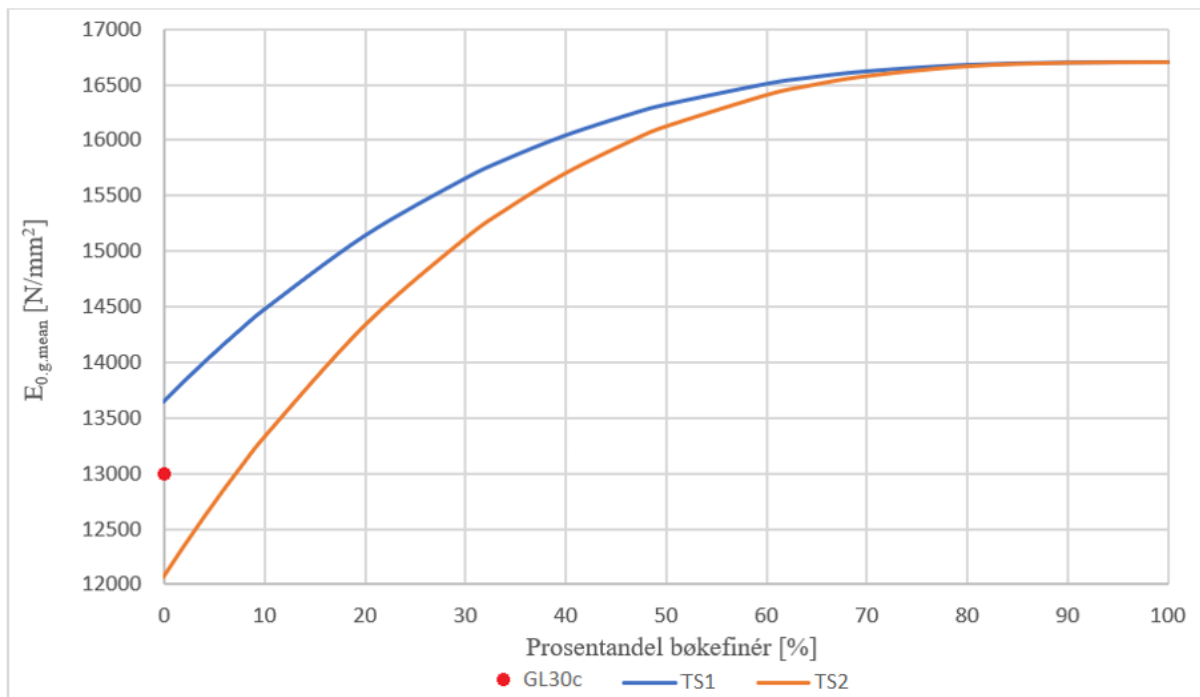
Diagrammene i dette delkapittelet viser sammenhengen mellom prosentandel bøkefinér, i tverrsnittene med T22- eller T15-lameller i midten, og de mekaniske egenskapene til de sammensatte limtrebjelkene. Prosentandelen bøkefinér er den totale prosentandelen i tverrsnittet, fordelt likt mellom øverste og nederste sone på bjelketverrsnittet.

I dette delkapittelet er følgende forkortelser benyttet ved presentasjon av resultatene:

- TS1 er tverrsnitts-sammensetningen av T22 og bøkefinér
- TS2 er tverrsnitts-sammensetningen av T15 og bøkefinér
- GL30c er et kombinert tverrsnitt av T22 og T15 (standard limtre)
- GL70 er et homogent tverrsnitt av bøkefinér, BauBuche.

I alle de følgende diagrammene er verdier for en standard limtrebjelke, i fasthetsklasse GL30c, lagt inn som et punkt. Dette er for å se forskjellen mellom de kjente verdiene til en GL30c og de nye verdiene for de sammensatte tverrsnittene.

4.1.1 Midlere elastisitetsmodul

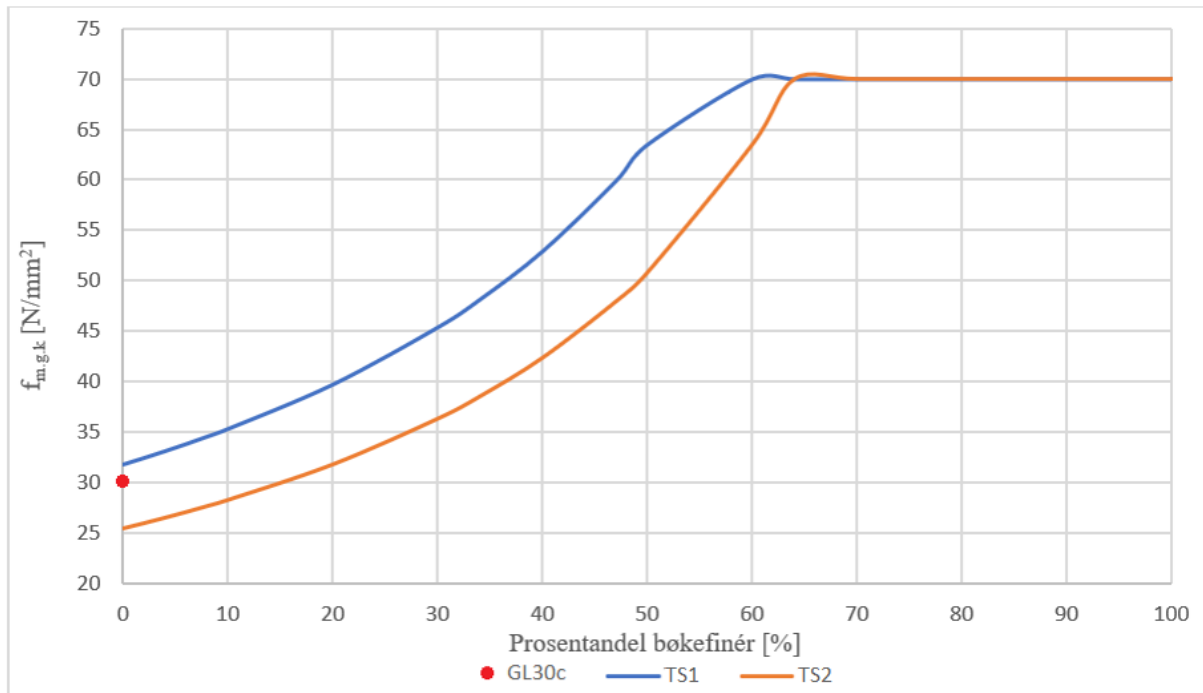


Figur 4.1: Teoretisk beregnet elastisitetsmodul

Figur 4.1 fremstiller hvordan middelverdien for E-modul, for de sammensatte tverrsnittene, øker med økende prosentandel bøkefinér i tverrsnittet. Det vises at E-modulen øker raskt, selv med en liten andel bøkefinér i tverrsnittet. Grafene for de to ulike tverrsnittssammensetningene TS1 og TS2, starter med en differanse på 1600 N/mm^2 for de homogene tverrsnittene av gran og nærmer seg hverandre gradvis, helt til de sammenfaller ved 80 % bøkefinér.

Det vises i diagrammet at E-modulen for TS1 oppnår tilnærmet E-modul for GL70 ved 70 % bøkefinér. Det samme ser vi for TS2 ved 80 % bøkefinér. Videre kan en se at samtlige sammensetninger av TS1 har bedre E-modul enn GL30c. TS2 oppnår større E-modul enn GL30c ved sammensetninger med mer enn 7 % bøkefinér.

4.1.2 Karakteristisk bøyefasthet

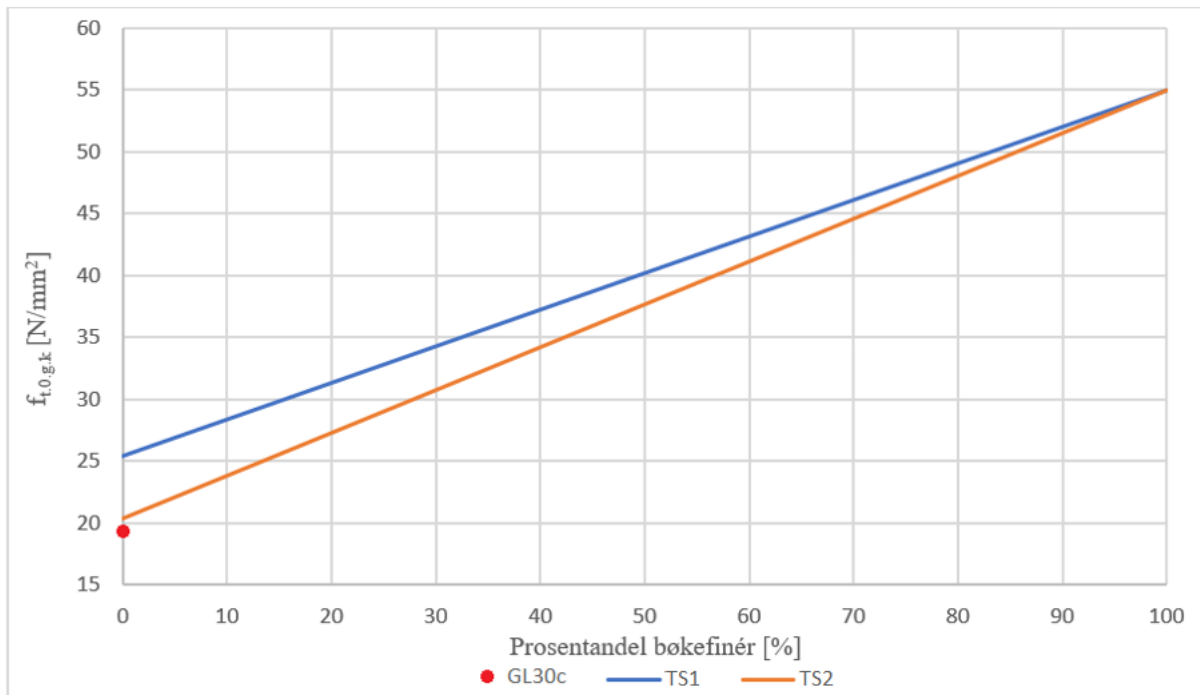


Figur 4.2: Teoretisk beregnet bøyefasthet

I figur 4.2 vises det hvordan den karakteristiske bøyefastheten, for de sammensatte tverrsnittene, øker med økende prosentandel bøkfinér i tverrsnittet. Det vises en jevn økning av karakteristisk bøyefasthet, med økende prosentandel bøkfinér i tverrsnittet, for både TS1 og TS2. Grafene for de to ulike sammensetningene, starter med en differanse på $6,3 \text{ N/mm}^2$ ved 0 % bøkfinér før de sammenfaller ved omtrent 64 % bøkfinér.

TS1 oppnår den karakteristiske bøyefastheten for GL70, altså 70 N/mm^2 , ved 60 % bøkfinér, mens TS2 oppnår den samme verdien ved 64 % bøkfinér. Det vises at samtlige sammensetninger av TS1 har større bøyefasthet enn GL30c. For TS2 er bøyefastheten mindre enn GL30c, fram til tverrsnitts-sammensetningen består av omtrent 15 % bøkfinér.

4.1.3 Karakteristisk strekkfasthet i fiberretning

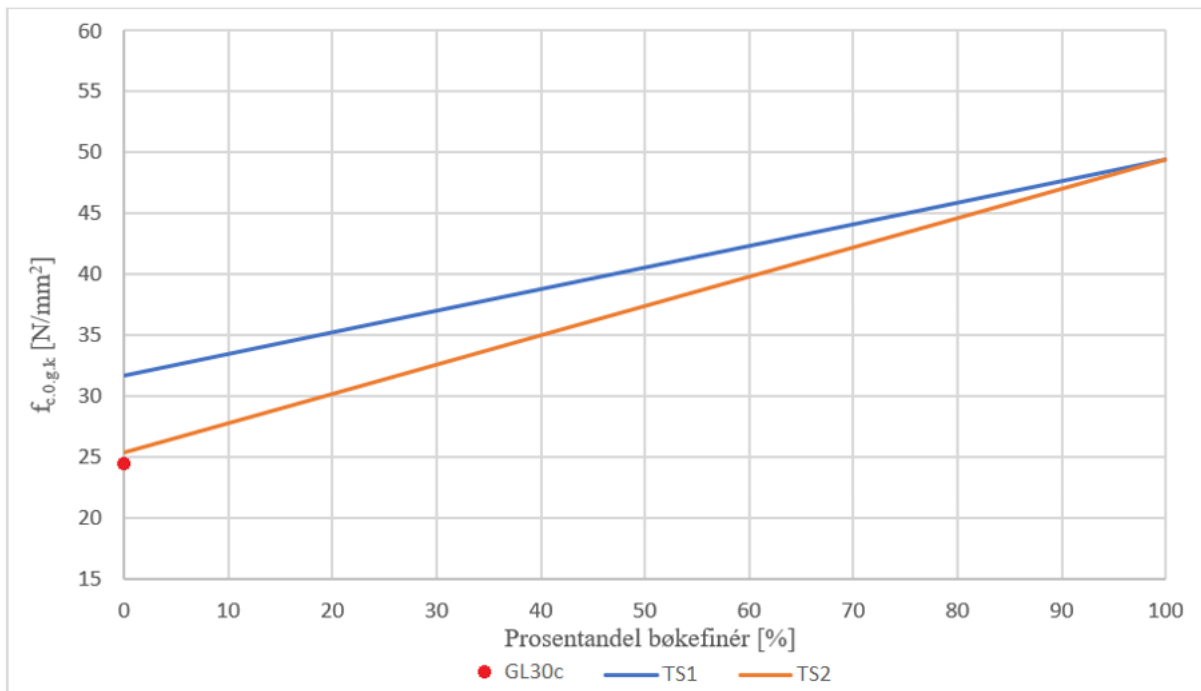


Figur 4.3: Teoretisk beregnet strekkfasthet

Den karakteristiske strekkfastheten i fiberretningen, for de sammensatte tverrsnittene, og hvordan den øker med økende prosentandel bøkefinér i tverrsnittet, vises i figur 4.3. En kan se av diagrammet at strekkfastheten for de to ulike tverrsnitts-sammensetningene har en lineær økning. Grafene starter ved 0 % bøkefinér og en differanse på $5,1 \text{ N/mm}^2$, og nærmer seg hverandre gradvis før de er tilnærmet sammenfallende mellom 90 % og 100 % bøkefinér.

Videre vises det i diagrammet at den karakteristiske strekkfastheten for de sammensatte tverrsnittene gradvis nærmer seg 55 N/mm^2 , som er den karakteristiske strekkfastheten for en GL70. Av diagrammet kommer det fram at alle de sammensatte tverrsnittene oppnår større karakteristisk strekkfasthet enn for en GL30c.

4.1.4 Karakteristisk trykkfasthet i fiberretning

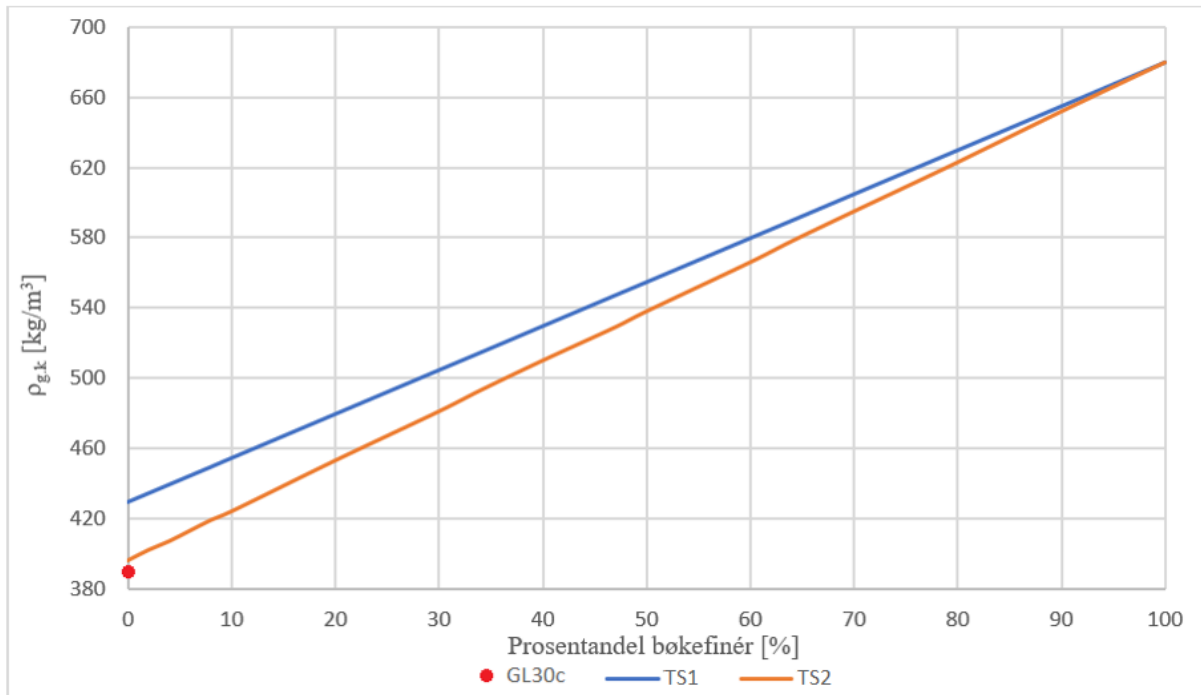


Figur 4.4: Teoretisk beregnet trykkfasthet

Figuren over fremstiller den karakteristiske trykkfastheten i fiberretningen, for de sammensatte tverrsnittene, og hvordan den øker med økende prosentandel bøkefinér i tverrsnittet. En kan se av diagrammet at trykkfastheten for de to ulike sammensatte tverrsnittene har en lineær økning, slik som for den karakteristiske strekkfastheten. Grafene over starter ved 0 % bøkefinér og en differanse på $6,3 \text{ N/mm}^2$, og nærmer seg gradvis før de er tilnærmet sammenfallende mellom 90 % og 100 % bøkefinér.

Det vises at den karakteristiske trykkfastheten for de sammensatte tverrsnittene gradvis nærmer seg $49,5 \text{ N/mm}^2$, som er den karakteristiske trykkfastheten for en GL70. Slik som for karakteristisk strekkfasthet kommer det fram at også den karakteristiske trykkfastheten, for alle de sammensatte tverrsnittene, er større enn for en GL30c.

4.1.5 Karakteristisk densitet



Figur 4.5: Teoretisk beregnet densitet

Den karakteristiske densiteten, for de sammensatte tverrsnittene, og hvordan den øker med økende prosentandel bøkefinér i tverrsnittet, er vist i figuren over. En kan se av diagrammet at densiteten for de to ulike tverrsnitts-sammensetningene har en lineær økning, slik som for den karakteristiske strekk- og trykkfastheten. Grafene over starter med en differanse på 30 kg/m^3 , for de homogene bjelkene av T22 og T15, og nærmer seg gradvis med økende prosentandel bøkefinér i tverrsnittet, før de er tilnærmet sammenfallende ved 90 % bøkefinér.

Av diagrammet over kan en se at ved 90 % bøkefinér oppnår begge de sammensatte tverrsnittene en karakteristisk densitet på omtrent 650 kg/m^3 , før de sammenfaller med densiteten for en GL70, på 680 kg/m^3 . Den karakteristiske densiteten for de sammensatte tverrsnittene er konstant høyere enn den karakteristiske densiteten for en GL30c.

4.1.6 Oppsummering av mekaniske egenskaper

Midlere E-modul for de sammensatte tverrsnittene øker med økende prosentandel bøkefinér i tverrsnittet. Det sammensatte tverrsnittet av T22 og bøkefinér (TS1) oppnår tilnærmet samme E-modul som en GL70 ved 70 % bøkefinér, og tverrsnittet med T15 (TS2) oppnår samme verdi ved 80 % bøkefinér.

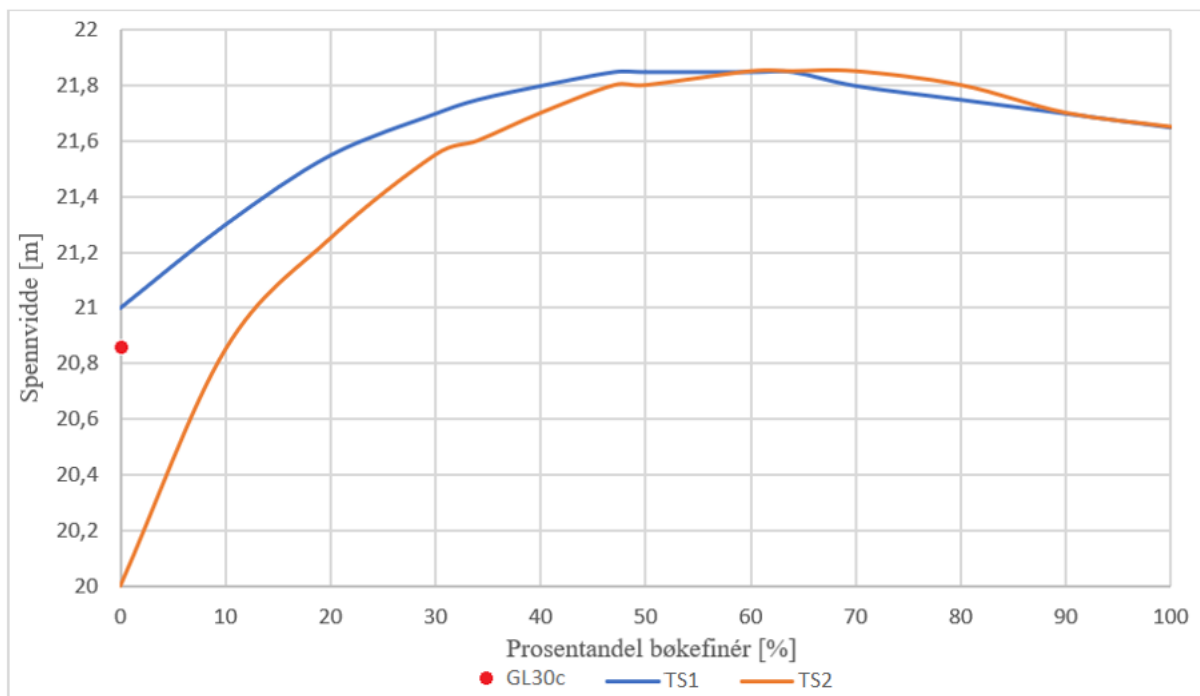
Den karakteristiske bøyefastheten for de sammensatte tverrsnittene øker betydelig med økende prosentandel bøkfinér i tverrsnittet. TS1 oppnår den karakteristiske bøyefastheten for GL70, ved 60 % bøkfinér, mens TS2 oppnår den samme verdien ved 64 % bøkfinér.

Karakteristisk densitet, strekk- og trykkfasthet for de sammensatte tverrsnittene har alle en lineær økning. Disse tre karakteristiske verdiene er tilnærmet sammenfallende med tilsvarende verdier for GL70, for tverrsnitt med andel bøkfinér over 90 %.

4.2 Maksimal spennvidde

Som beskrevet i delkapittel 3.2, har det også blitt undersøkt hvordan de mekaniske egenskapene til de sammensatte bjelkene påvirker geometriske egenskaper, som maksimal spennvidde og tverrsnittsdimensjon. Følgende diagrammer viser sammenhengen mellom prosentandel bøkfinér i tverrsnittet og maksimal spennvidde. Sammensetningene TS1 og TS2 har fastsatt tverrsnittsdimensjon og er dimensjonert iht. EK5. Andre forutsetninger for dimensjonering er beskrevet i delkapittel 3.2.2.

4.2.1 Langt spenn



Figur 4.6: Sammenhengen mellom andelen bøkfinér og spennvidde for lange spenn

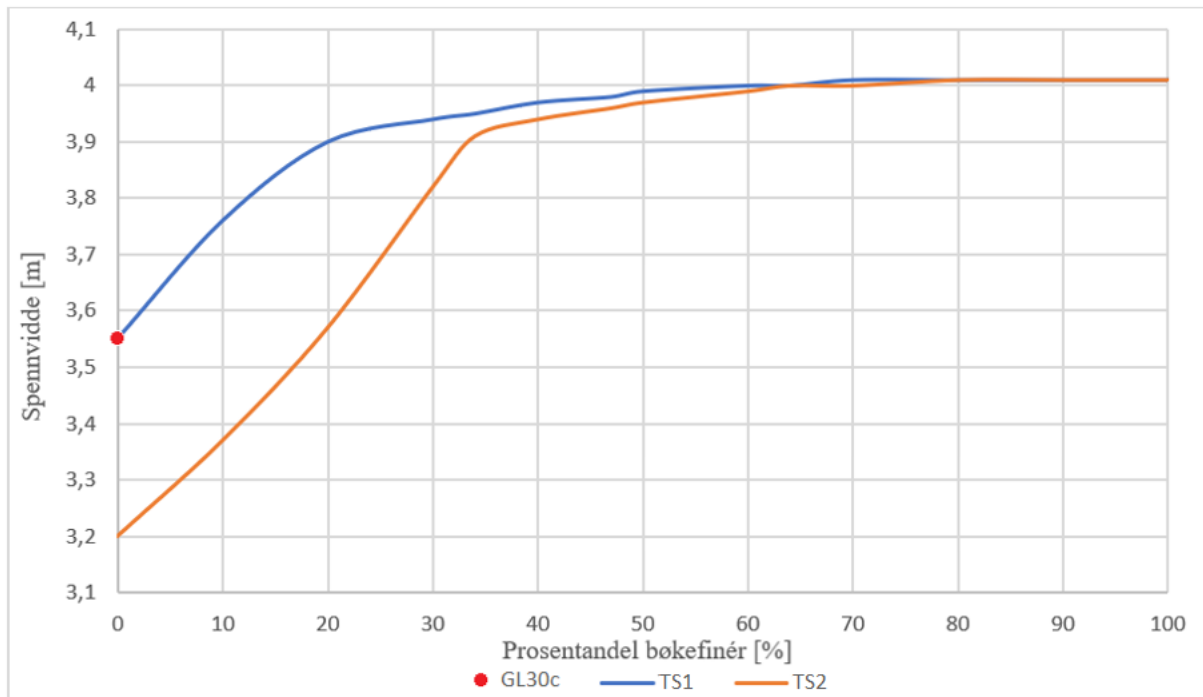
Diagrammet, i figur 4.6, viser at ved å tilsette en liten andel bøkfinér øverst og nederst kan spennvidden økes umiddelbart. Maksimal spennvidde er 21,85 m, noe som tilsvarer en økning på nesten 10 % av den opprinnelige lengden på 20 m. Det vises at maksimal spennvidde for en GL30c, beregnet med samme forutsetninger og tverrsnittsdimensjon, er 20,85 m. Det vil si at den maksimale spennvidden på 21,85 m, for de sammensatte bjelkene, tilsvarer en økning på 4,8 % av den maksimale spennvidden til en GL30c.

Formen til kurven som viser sammensetninger med T15 i midten og bøkfinér ytterst (TS2) er ganske lik kurven som viser sammensetninger av T22 og bøkfinér (TS1). Det er noe forskjell ved en liten andel bøkfinér, men etterhvert som andelen bøkfinér økes, minker forskjellen på de sammensatte bjelkene. Dette er fordi bøkfinéren får større betydning enn lamellene av gran i midten, når en viss andel bøkfinér nås. I starten av kurvene, når bjelkene hovedsakelig består av lameller av gran, vises det at TS1 kan spenne én meter lengre enn TS2. Bjelkene av TS2 forbedrer seg raskere i starten enn bjelkene av TS1.

Videre begynner begge kurvene å flate ut. For TS1 skjer dette ved rundt 50 % bøkfinér, mens for TS2 skjer dette ved rundt 60 % bøkfinér. Etter dette synker den mulige spennvidden ved økende andel bøkfinér, for begge de sammensatte bjelkene. Dette er fordi nedbøyningen er dimensjonerende, og den ekstra vekten bjelken får når man erstatter lamellene av gran med bøkfinér, etterhvert får større betydning enn økningen i stivhet. Bjelkene får dermed økt nedbøyning og tåler dermed kortere spennvidde. Det vises også at en BauBuche kun oppnår en spennvidde på 21,65 m.

For den homogene bjelken av T15 er momentet dimensjonerende. Så snart bjelken forsterkes med kun 10 % bøkfinér, øker bøyefastheten så mye at nedbøyningen blir dimensjonerende. Dette er fordi stivheten, E-modulen, for bøkfinéren ikke er så veldig mye bedre enn stivheten til lamellene av gran, slik som er tilfelle for bøyefastheten. Nedbøyningen forbedrer seg derfor ikke like mye som bøyefastheten, ved at bjelkene forsterkes med bøkfinér. Betydelig forbedring i bøyefasthet er dermed grunnen til kurvenes raske stigning i starten. For TS1 er nedbøyningen dimensjonerende for alle sammensetningene. En kan derfor se at kurven for TS1 har en jevnere form enn kurven som viser sammensetningene av TS2.

4.2.2 Kort spenn



Figur 4.7: Sammenhengen mellom andelen bøkfinér og spennvidde for korte spenn

Diagrammet i figuren over viser at, i likhet med det lange spennet, er det mulig å øke spennvidden for korte spenn umiddelbart, ved å tilsette en liten andel bøkfinér i tverrsnittet. Den mulige relative økningen i spennvidde er her større enn for det lange spennet. Kurvene, for de to sammensatte bjelkene, stiger raskere i starten enn det som er tilfellet for langt spenn. Dette er fordi momentet er dimensjonerende for de korteste spennene. Det fører til en større og raskere forbedring ved å tilsette bøkfinér, fordi forsterkningen påvirker bøyefastheten mer enn stivheten. Maksimalt kan bjelkene oppnå en spennvidde på 4,01 m, altså en økning på over 30 % av opprinnelig spennvidde på 3 m. Sammenlignet med maksimal spennvidde for en GL30c, på 3,55 m, er økningen av spennvidde kun 13 %.

Formen til kurven som viser bjelker av TS2 og kurven som viser bjelker av TS1 er også her ganske like, slik som for det lange spennet. Kurven som viser TS2 øker raskere i starten enn kurven for TS1. For homogene bjelker av T22 og T15 er maksimal spennvidde henholdsvis 3,55 m og 3,20 m. Kurven for TS1 begynner å flate ut ved rundt 20 % bøkfinér, mens for TS2 skjer det samme ved rundt 35 % bøkfinér. Utflatingen av kurvene er enda mer tydelig for bjelker med kort spenn enn for det lange spennet. Kurvene fortsetter likevel å stige til rundt 60 % bøkfinér.

Videre stabiliseres kurvene mer eller mindre sammenfallende på maksimal spennvidde, 4,01 m. I motsetning til for det lange spennet, begynner ikke spennvidden å minske her, uansett hvor stor andelen bøkfinér blir. Dette er fordi korte bjelker er mye mindre utsatt for store nedbøyninger enn det lange bjelker er. Den ekstra vekten bjelken får på grunn av økt mengde bøkfinér, lager derfor ikke så store utfordringer for nedbøyningene her. Dermed er maksimal spennvidde for de sammensatte bjelkene, som oppnås ved omtrent 80 % bøkfinér, den samme som for en BauBuche.

For TS2 er momentet dimensjonerende for sammensetninger med opptil 30 % bøkfinér. Etter dette er bøyefastheten blitt så stor at nedbøyningen blir et større problem og blir dermed dimensjonerende. For TS1 er momentet kun dimensjonerende ved opptil 20 % bøkfinér, mens nedbøyningen blir dimensjonerende videre. Dette kommer tydelig fram av figur 4.7, ved at kurvene flater ut etter at nedbøyningen har blitt dimensjonerende.

4.2.3 Oppsummering av maksimal spennvidde

Det vises at sammensatte bjelker, med lameller av T22 eller T15 i midten og bøkfinér øverst og nederst, kan spenne lengre enn limtrebjelker av GL30c med samme dimensjon. Den mulige lengdeøkningen ved å forsterke bjelkene med bøkfinér, er som vist større for korte spenn enn for lange. For korte spenn, med utgangspunkt 3 m, vises det at bjelkens maksimale spennvidde kan økes med over 30 %, ved å bruke bøkfinér som forsterkning. For lange spenn kommer det fram at denne økningen kun er rundt 10 % av opprinnelig lengde på 20 m. Det vises at det kun trengs en liten andel bøkfinér før det har effekt på spennvidden, og at spennvidden øker raskest i starten ved økning av andelen bøkfinér i tverrsnittet. Samtidig vises det at andelen bøkfinér har mindre og mindre betydning for spennvidden ved høy andel bøkfinér i tverrsnittet.

4.3 Tverrsnittsdimensjon

Det ble også undersøkt hvilken tverrsnittsdimensjon som var nødvendig for ulike tverrsnitts-sammensetninger, dersom spennvidden ble satt til en fast verdi. Det ble regnet på noen sammensetninger med de opprinnelige spennviddene på 3 m og 20 m og de maksimale spennviddene fra beregningene på 4,01 m og 21,85 m. Dimensjoneringen var også her iht. EK5 og andre forutsetninger og metode er beskrevet i delkapittel 3.2.2. Forkortelsene benyttet i tabellene under er fastsatt bjelkebredde (F) og ikke fastsatt bjelkebredde (IF). Ny tverrsnittsdimensjon uten fastsatt bjelkebredde er kun tatt med for tverrsnittene som kan være

mindre enn ved fastsatt bjelkebredde. Nødvendig tverrsnittsdimensjon for de ulike sammensetningene er vist i tabellene under.

Tabell 4.1:

Nødvendige tverrsnittsdimensjoner for korte spenn

Sammensetning	Bjelkebredde	Dimensjon b×h [mm] for spennvidde 3,00 m	Dimensjon b×h [mm] for spennvidde 4,01 m
GL30c	F	90×225	90×270
	IF		
BauBuche	F	90×180	90×225
	IF	78×180	
2×15 % GL70 + 70 % T22	F	90×180	90×270
	IF	78×180	66×270
2×35 % GL70 + 30 % T22	F	90×180	90×225
	IF	78×180	
2×17 % GL70 + 66 % T15	F	90×180	90×270
	IF		66×270
2×40 % GL70 + 20 % T15	F	90×180	90×225
	IF	78×180	

For GL30c er momentet dimensjonerende ved begge spennviddene og tilfellet med 2×17 % GL70 + 66 % T15 på 3 m. Dette skyldes at disse sammensetningene har de laveste bøyefasthetene av de som er sjekket her. For alle de andre tilfellene er nedbøyningen dimensjonerende, fordi bøyefastheten er så stor at nedbøyning ble en større utfordring.

Tabell 4.2:

Nødvendige tverrsnittsdimensjoner for lange spenn

Sammensetning	Bjelkebredde	Dimensjon b×h [mm] for spennvidde 20,00 m	Dimensjon b×h [mm] for spennvidde 21,85 m
GL30c	F	215×990	215×1080
	IF	190×990	
BauBuche	F	215×945	215×1035
	IF	190×945	190×1035
2×15 % GL70 + 70 % T22	F	215×945	215×1035
	IF	190×945	190×1035
2×23,5 % GL70 + 53 % T22	F	215×900	215×990
	IF		
2×17 % GL70 + 66 % T15	F	215×945	215×1035
	IF	190×945	
2×30 % GL70 + 40 % T15	F	215×900	215×990
	IF		

For det lange spennet var nedbøyning dimensjonerende i alle tilfellene. Dette er fordi lange bjelker er mer utsatt for store nedbøyninger enn korte.

Tabell 4.1 og 4.2 viser at en BauBuche kan ha mindre tverrsnittsdimensjon enn en standard limtrebjelke med fasthetsklasse GL30c, når betingelsene ellers er de samme. Nødvendig tverrsnittsdimensjon ble mindre enn for en GL30c, for samtlige av sammensetningene som var forsterket med bøkefinér. En kan også se av tabellene at bjelker med en ganske liten andel bøkefinér kan ha samme tverrsnittsdimensjon som en BauBuche. For de lange spennene er det også noen sammensetninger som krever mindre tverrsnittsdimensjon enn en BauBuche.

5 Resultater fra laboratorietester

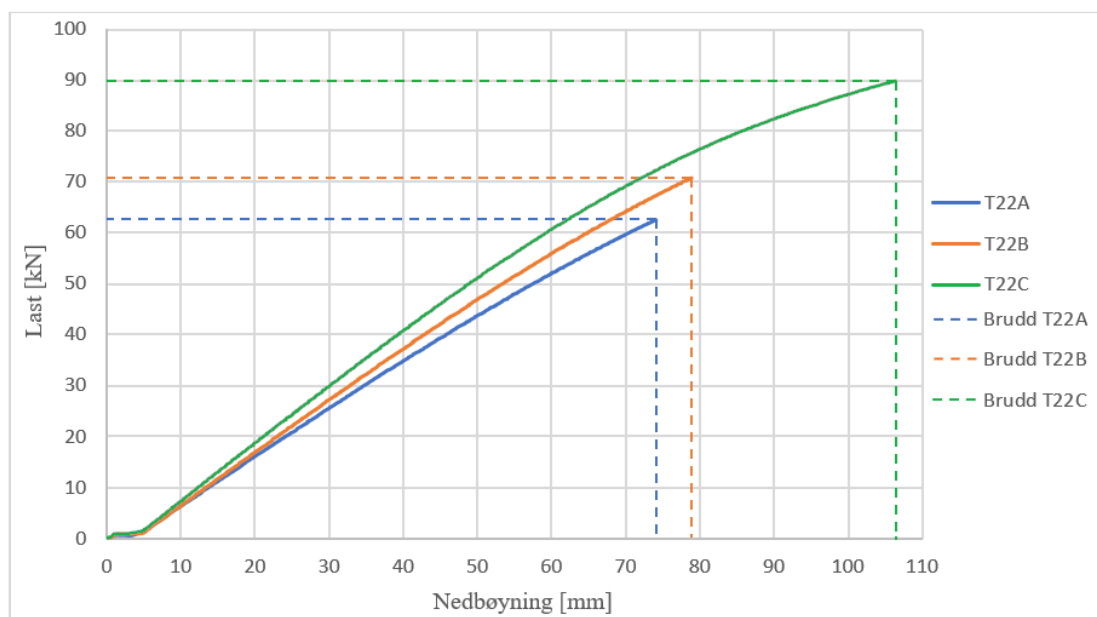
I dette kapittelet presenteres resultater fra laboratoriet og statistiske beregninger, basert på målinger gjort av testmaskinen. Resultatene som er beregnet og målt av testmaskinen er vist i tabell 5.1. Metoden for de utførte testene og valg av testbjelker er beskrevet i delkapittel 3.3

Tabell 5.1:

Beregnete og målte resultater fra testmaskinen for de seks testbjelkene

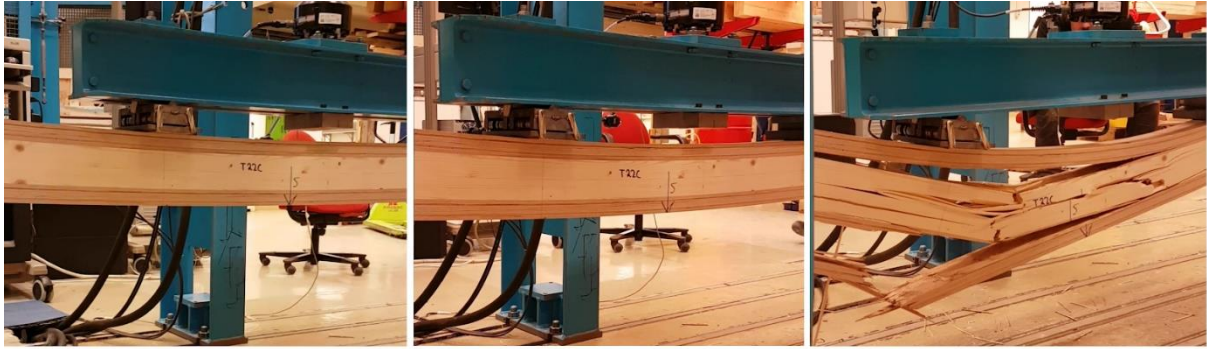
Testbjelke		T22A	T22B	T22C	T15A	T15B	T15C
Global E-modul	[N/mm ²]	12 327	13 314	14 716	13 357	12 785	13 376
Bruddlast	[kN]	62,4	70,7	89,7	57,9	45,5	52,8
Bruddspenning	[N/mm ²]	73,4	83,2	105,6	92,7	72,9	84,5
Tidsbruk	[s]	374	424	538	348	276	317

Under vises det diagrammer for de seks testbjelkene. Diagrammene viser sammenheng mellom påført last og nedbøyning av testbjelkene helt til det oppstår brudd.

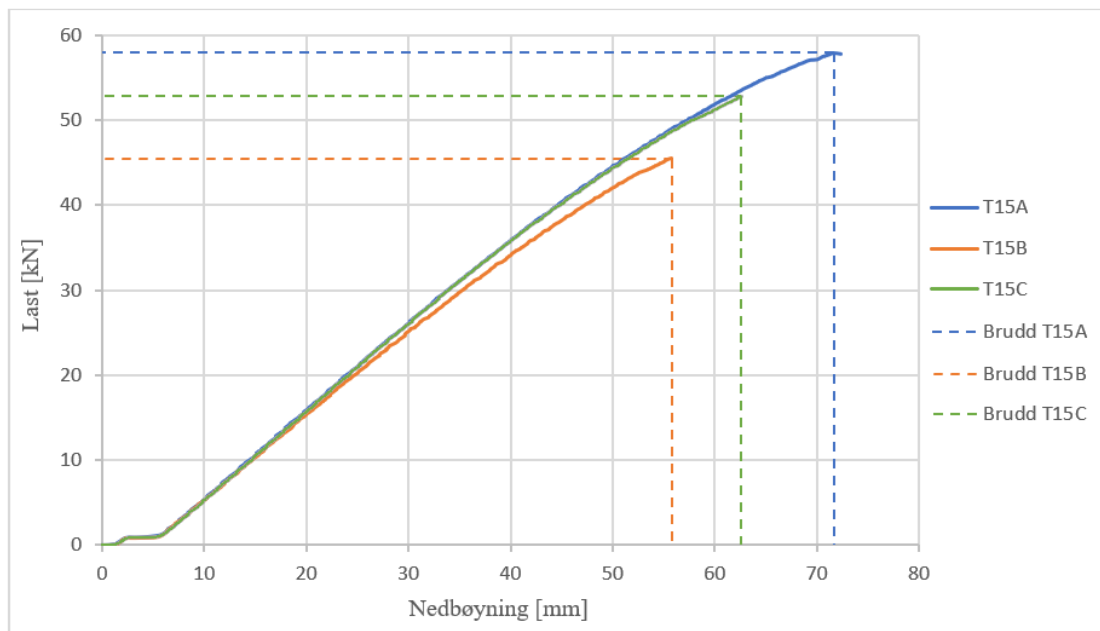


Figur 5.1: Lastpåføring av bjelker med T22-lameller i midten og resulterende nedbøyning fram til brudd

Diagrammet i figur 5.1 viser at testbjelke T22A og B gikk til brudd ved omtrent samme last og nedbøyning. Testbjelke T22C skiller seg ut i diagrammet ved at den oppnådde brudd ved vesentlig større lastpåkjenning og deformasjon.



Figur 5.2: Bildeserie av testbjelke T22C som oppnådde størst bruddspenning – Foto: Mathilde Espelid



Figur 5.3: Lastpåføring av bjelker med T15-lameller i midten og resulterende nedbøyning fram til brudd

Det kommer fram av figur 5.3 at de tre testbjelkene med T15-lameller i midten følger omtrent samme deformasjonskurve fram til brudd. Her vises det at testbjelke T15A tålte mer belastning enn de to andre testbjelkene i denne serien.



Figur 5.4: Bildeserie av testbjelke T15A som oppnådde størst bruddspenning – Foto: Mathilde Espelid

5.1 Elastisitetsmodul

På bakgrunn av testbjelkenes nedbøyning, ble E-modulen for hver bjelke beregnet etter metoden beskrevet i delkapittel 2.5.4. Utregning av dette er å finne i vedlegg J, og resultatene vises i tabell 5.2.

Tabell 5.2:
E-modul for de seks testbjelkene

Styrkeklasse i midten	E-modul [N/mm ²]	
	T22	T15
A	12 706	13 966
B	13 854	13 340
C	15 256	14 267
Middelverdi	13 939	13 858
Variasjonskoeffisient [%]	9,2	3,4

Tabellen over viser noe varierende E-modul for de ulike testbjelkene, spesielt for bjelkene med T22-lameller i midten. Midlere E-modul for de to tverrsnitts-sammensetningene endte opp på ganske like verdier; 13 939 N/mm² for sammensetningen med T22-lameller i midten og 13 858 N/mm² for sammensetningen med T15-lameller i midten. Dette er noe bedre enn E-modulen for en GL30c, som ligger på 13 000 N/mm².

5.2 Bøyefasthet

På bakgrunn av testbjelkenes bruddlast, ble bøyefastheten for hver bjelke beregnet etter metoden beskrevet i delkapittel 2.5.3. Videre ble også mest sannsynlig 5%-fraktil og 5%-fraktilen med signifikansnivå på 75 % beregnet. Resultatene vises i tabell 5.3, og utregning av dette er å finne i vedlegg L og M.

Tabell 5.3:
Bøyefasthet for de seks testbjelkene

Styrkeklasse i midten	Bøyefasthet [N/mm ²]	
	T22	T15
A	73,4	92,5
B	83,2	72,9
C	105,6	84,5
Middelverdi	87,4	83,3
5%-fraktil	48,3	56,6
Teoretisk 5%-fraktil (uten ekstra sikkerhet fra NS)	63,8	67,9
Variasjonskoeffisient [%]	18,9	11,8

I likhet med E-modulen, har også testresultatene for bøyefastheten en del spredning. Spredningen ble størst for testserien av bjelker med T22-lameller i midten, der spesielt bjelke T22C skilte seg ut ved å tåle meget stor bøyepening. Begge testseriene gir karakteristiske verdier som er langt bedre enn bøyefastheten for en GL30c, som ligger på 30 N/mm².

5.3 Densitet

Bjelkenes densitet ble også beregnet, på bakgrunn av vekt-, volum- og fuktighetsmålinger, beskrevet i delkapittel 2.5.5. Utregningene av dette er vist i vedlegg F. Som for bøyefasthet, ble mest sannsynlig 5%-fraktil og 5%-fraktilen med signifikansnivå på 75 % beregnet.

Tabell 5.4:
Beregnet densitet, ved 12 % fuktighetsinnhold, for de seks testbjelkene

Densitet [kg/m ³]		
Styrkeklasse i midten	T22	T15
A	644,8	739,1
B	636,3	710,6
C	646,3	690,4
Middelverdi	642,5	713,3
5%-fraktil	541,3	601,0
Teoretisk 5%-fraktil (uten ekstra sikkerhet fra NS)	633,6	673,1
Variasjonskoeffisient [%]	0,8	3,4

I tabell 5.4 er de beregnede densitetene ved 12 % fuktighetsinnhold vist for alle de seks testbjelkene. Samtlige testbjelker hadde et fuktighetsinnhold på omtrent 9 % ved testtidspunktet, men som beskrevet under delkapittel 2.5.5 skal densiteten oppgis ved et fuktinnhold på 12 %. Det vises svært liten spredning av densitet for de sammensatte bjelkene med T22, mens det for testbjelkene med T15 er noe større spredning. For testbjelkene med T22 i midten er den største differansen på 10 kg/m³, mens den for sammensetningene med T15 er 49 kg/m³. Av 5%-fraktilene kan en se at begge sammensetningene oppnår høy densitet, sammenlignet med densitet for GL30c som er 390 kg/m³.

5.4 Oppsummering av testresultater og sammenligning med teoretiske beregninger

I dette delkapittelet blir de teoretiske beregningene sammenlignet med resultater fra laboratoriet. Som nevnt i delkapittel 3.4 ble det ikke testet strekk- og trykkfasthet for testbjelkene, så disse karakteristiske verdiene er ikke sammenlignet.

5.4.1 Tverrsnitts-sammensetning av T22 og 47 % bøkfinér

Tabell 5.5 viser teoretiske beregninger av tre mekaniske egenskaper sammenlignet med tilsvarende verdier beregnet ut fra testresultater. E-modulen beregnet fra testresultatene er middelverdien av de tre testbjelkene T22A, T22B og T22C, mens bøyefastheten og densiteten er den beregnede 5%-fraktilen, iht. NS-EN 14358. Den beregnede mest sannsynlige 5%-fraktilen for bøyefasthet og densitet er også med i tabellen under, satt i parentes.

Tabell 5.5:

Sammenligning av resultater fra teoretiske beregninger og tester av TS1

	E-modul [N/mm ²]	Bøyefasthet [N/mm ²]	Densitet [kg/m ³]
Teoretisk beregnet	16 247	59,9	547,0
Beregnet fra testresultat	13 939	48,3 (63,8)	541,3 (633,6)
Avvik [%]	- 14,2	- 19,3 (+ 6,5)	- 1,0 (+ 15,8)

Det vises i tabellen at E-modulen beregnet fra testresultatene ligger noe lavere enn den teoretiske beregnede E-modulen. Videre vises det at den mest sannsynlige 5%-fraktilen, beregnet uten ekstra sikkerhet fra Norsk Standard, samsvarer godt med den teoretiske beregnede bøyefastheten. Den beregnede 5%-fraktilen for densitet stemmer godt overens med den teoretiske beregnede densiteten. Her stemmer ikke den mest sannsynlige 5%-fraktilen, beregnet uten ekstra sikkerhet fra Norsk Standard, like godt med den teoretiske beregnede densiteten, men avviket er fremdeles relativt lite.

5.4.2 Tverrsnitts-sammensetning av T15 og 64 % bøkfinér

I tabellen under vises teoretiske beregninger av tre mekaniske egenskaper sammenlignet med tilsvarende verdier beregnet ut fra testresultater. E-modulen beregnet fra testresultatene er middelverdien av de tre testbjelkene T15A, T15B og T15C, mens bøyefastheten og densiteten er den beregnede 5%-fraktilen, iht. NS-EN 14358. Den beregnede mest sannsynlige 5%-fraktilen for bøyefasthet og densitet er også her med, satt i parentes.

Tabell 5.6:

Sammenligning av resultater fra teoretiske beregninger og tester av TS2

	E-modul [N/mm ²]	Bøyefasthet [N/mm ²]	Densitet [kg/m ³]
Teoretisk beregnet	16 484	70,0	578,0
Beregnet fra testresultat	13 858	56,6 (67,9)	601,0 (673,1)
Avvik [%]	- 15,9	- 19,2 (- 2,9)	+ 4,0 (+ 16,4)

Det vises i tabell 5.6 at E-modulen beregnet fra testresultatene ligger noe lavere enn den teoretiske beregnede E-modulen, slik som for det sammensatte tverrsnittet med T22 i midten. Det kommer fram at den mest sannsynlige 5%-fraktilen, beregnet uten ekstra sikkerhet fra Norsk Standard, samsvarer svært godt med den teoretiske beregnede bøyefastheten.

Den beregnede 5%-fraktilen for densitet stemmer også meget godt overens med den teoretiske beregnede densiteten. Her stemmer ikke den mest sannsynlige 5%-fraktilen, beregnet uten ekstra sikkerhet fra Norsk Standard, like godt med den teoretiske beregnede densiteten. Som for det sammensatte tverrsnittet med T22 i midten og 47 % bøkfinér ytterst, er også her avviket nokså lite.

5.4.3 Maksimal spennvidde med testet elastisitetsmodul

Ettersom den testede E-modulen avviker såpass mye fra den teoretisk beregnede E-modulen, kan dette ha en del så si for de øvrige resultatene som bygger på E-modulen, slik som beregningene av spennvidder. Derfor er denne beregningen utført på nytt for de tverrsnitts-sammensetningene som ble testet, der den midlere E-modulen fra testing ble benyttet i stedet for den teoretiske E-modulen. Dimensjoner og øvrige forutsetninger er uendret fra de tidligere beregningene av spennvidder.

Tabell 5.7:

Sammenligning av spennvidde med teoretisk beregnet E-modul og E-modul beregnet fra testing

Sammensetning	47 % GL70 + T22	64 % GL70 + T15	Benevning
E-modul teoretisk beregnet	16 247	16 484	[N/mm ²]
E-modul beregnet fra tester	13 939	13 858	[N/mm ²]
Spennvidde kort spenn (med teoretisk E-modul)	3,98	4,0	[m]
Spennvidde kort spenn (med testet E-modul)	3,79	3,78	[m]
Avvik kort spenn	- 4,8	- 5,5	[%]
Spennvidde langt spenn (med teoretisk E-modul)	21,85	21,85	[m]
Spennvidde langt spenn (med testet E-modul)	20,75	20,65	[m]
Avvik langt spenn	- 5,0	- 5,5	[%]

I tabell 5.7 er resultatene beregnet med den testede E-modulen sammenlignet med resultatene som bygger på den teoretiske E-modulen. Dette gir et bilde på hvor stor betydning differansen

i E-modulene har på praktiske størrelser som spennvidde. Tabellen viser at spennvidden blir omtrent 5 % kortere hvis man benytter den testede E-modulen, enn hvis man benytter den teoretiske beregnede.

5.4.4 Bøyespenningsfordeling

Testresultatene ble også benyttet til å vurdere hvor korrekt det var å betrakte de sammensatte bjelkene som homogene, og dermed anta en fullstendig lineær bøyespenningsfordeling. I tabell 5.8 er den teoretiske restkapasiteten til testbjelkene ved bruddtidspunktet sammenlignet for antatt fullstendig lineær bøyespenningsfordeling (FLBS) og stykkevis lineær bøyespenningsfordeling (SLBS).

De ulike bøyespenningsfordelingene er også sammenlignet med testbjelkenes faktiske oppførsel som ble observert ved laboratorietestene. Beregningene av dette er vist i vedlegg N. Begge tverrsnitts-sammensetningene som sammenlignes i tabellen under, er oppbygd med gran i sone 1 og bøkefinér i sone 3. Restkapasiteten er bestemt ved å sammenligne opptredende bøyespennning ved tidspunktet for brudd, med den teoretisk beregnede kapasiteten.

Tabell 5.8:
Sammenligning av FLBS og SLBS for testresultater

		47 % GL70 + T22	64 % GL70 + T15
Beregnet med FLBS	Restkapasitet i sone 1	- 6,4 %	3,8 %
	Restkapasitet i sone 3	8,9 %	2,9 %
	Brudd oppstår først i	Sone 1	Sone 3
Beregnet med SLBS	Restkapasitet i sone 1	10,6 %	29,5 %
	Restkapasitet i sone 3	6,3 %	1,7 %
	Brudd oppstår først i	Sone 3	Sone 3
Sonen testbjelkene fikk brudd i først	Testbjelke A	Sone 1	Sone 3
	Testbjelke B	Sone 3	Sone 1
	Testbjelke C	Sone 3	Sone 1

For sammensetningen av 47 % bøkefinér og T22 skal bruddet tydelig oppstå i sone 1 først ifølge FLBS, mens det ifølge SLBS skal oppstå i sone 3 først. For sammensetningen av 64 % bøkefinér og T15 skal bruddet oppstå først i sone 3, uansett hvilken bøyespenningsfordeling som benyttes. Dette vises tydelig for SLBS, mens for FLBS er differansen i restkapasitet for

de to sonene så liten at små tilfeldigheter kan føre til at bruddet oppstår i sone 1 først. Tabellen viser at resultatene er varierende, og at det ikke er noen tydelig sammenheng som viser at den ene bøyespenningsfordelingen stemmer bedre med testresultatene enn den andre.

6 Drøfting og konklusjon

6.1 Drøfting av valgt metode

Metodene som er benyttet i denne undersøkelsen er beskrevet og begrunnet i kapittel 3. Metodetriangulering, ved å benytte både teoretiske beregninger og laboratorietester, er en styrke ved denne undersøkelsen som kan føre til god reliabilitet og validitet. Det gir større sannsynlighet for å oppdage feil og avvik, ved at resultatene fra de to metodene sammenlignes.

De teoretiske beregningene baseres på anerkjente eller standardiserte metoder, og antas derfor å være reliable. Som beskrevet i delkapittel 3.5, er beregningene også nøye kontrollert for å sikre reliable resultater. Det er mangel på tidligere forskning om samspillet mellom finér av hardved og vanlige lameller av mjukved. Dermed er det noe usikkert om de benyttede metodene gir helt presise resultater, for bjelker som er sammensatt av bøkefinér og lameller av gran. Det har derfor stor betydning at denne undersøkelsen også involverer fullskalatester, for å avgjøre om beregningene er basert på valide metoder.

Laboratorietestene ble utført av erfarne og kvalifiserte folk, med standardiserte metoder og utstyr, noe som burde føre til høy reliabilitet og validitet for målingene. En svakhet med testmetoden er at det kun ble gjort tre tester i hver serie. Dette gjør at en konklusjon kun basert på testresultatene vil være noe usikker.

Det oppstod også en noe mindre usikkerhet ved gjennomføring av laboratorietesten. Det var ingen antatt bruddlast før forsøkene ble utført, og dette førte til en utfordring ved bestemmelse av nødvendig påføringshastighet for lasten. Nødvendig påføringshastighet kunne vært estimert på forhånd, basert på den teoretisk beregnede bøyefastheten. Men dette ville da vært basert på beregninger med ukjent standardavvik, ettersom den karakteristiske bøyefastheten måtte vært omregnet til antatt middelværdi. Et slikt estimat ville dermed også vært noe usikkert. I tillegg så vi i ettertid at det var ganske store variasjoner i testresultatene, og det er dermed ikke sikkert at alle prøvene ville oppnådd brudd innen standardens anbefalte tidsintervall, selv om vi hadde beregnet estimert bruddlast.

Det oppsto også noen usikkerheter om kvaliteten på selve bjelkene, der den ene hadde noe kuring samt at bruddformene antydte at limingsbetingelsene ikke var som antatt. Dette var

faktorer som var utenfor vår kontroll, ettersom produksjonen av bjelkene ble utført av eksterne.

Dette er små usikkerheter som ikke antas å ha vesentlig betydning for testresultatene.

Betydningen disse kan ha hatt for testresultatene drøftes videre i delkapittel 6.2.5. Den største utfordringen for testenes reliabilitet og validitet var dermed antallet testbjelker, kun tre av hver sammensetning.

Totalt sett antas det dermed at de benyttede metodene i denne undersøkelsen gir relativt høy reliabilitet og validitet, selv om noen tiltak kunne vært gjort for å forbedre reliabiliteten og validiteten ytterligere.

6.2 Drøfting av resultater

6.2.1 Midlere elastisitetsmodul

Under delkapittel 4.1.1 kom det fram at den teoretiske beregnede midlere E-modulen for tverrsnitts-sammensetning 1 og 2, økte betydelig med økende prosentandel bøkfinér i tverrsnittet. Det sammensatte tverrsnittet av T22 og 47 % bøkfinér oppnådde en midlere E-modul tilsvarende 1,2 ganger E-modulen for GL30c. For tverrsnittet av T15 og 64 % bøkfinér var denne økningen på 1,3 ganger E-modulen for GL30c. Det ble også vist at en økning av prosentandel bøkfinér over 70 % for TS1 og 80 % for TS2, ikke ville hatt ytterligere betydning for den sammensatte E-modulen.

E-modulen som ble beregnet på bakgrunn av testbjelkenes nedbøyning, samsvarte ikke helt med den teoretiske beregnede E-modulen. Middelerverdier for E-modul fra testing ble 13 939 N/mm² og 13 858 N/mm² for testbjelkene med henholdsvis T22- og T15-lameller i midten. Ifølge den teoretiske beregningen skulle E-modulen for de samme tverrsnitts-sammensetningene vært henholdsvis 16 247 N/mm² og 16 484 N/mm². Alle de testede E-modulene hadde en lavere verdi enn den teoretisk beregnede, og middelerverdien var rundt 15 % lavere enn den teoretiske, for begge de testede sammensetningene.

Det er alltid en mulighet for at testbjelkene tilfeldigvis har dårligere egenskaper enn det reelle gjennomsnittet for slike bjelker. Likevel er det lite sannsynlig at dette alene kan forklare såpass store avvik mellom teoretisk beregnet og testet verdi. Det er relativt liten spredning i E-modulen for hver testserie, med variasjonskoeffisient på 9,2 % for testbjelkene med T22-lameller i midten og helt ned i 3,4 % for testbjelkene med T15-lameller i midten. En såpass

lav spredning tyder på at den reelle verdien sannsynligvis ikke avviker så mye fra den testede, uansett om middelveidien til de testede bjelkene ligger over eller under den teoretiske middelveidien for alle slike bjelker.

En annen årsak til avviket mellom teoretisk og testet verdi for E-modulen kan være limingsbetingelsene, som ikke var helt som forventet, ettersom det oppsto noe delaminering av testbjelkene. De teoretiske beregningene bygger på en antagelse om at limet som holder lamellene sammen har uendelig styrke, som er en forenkling av virkeligheten. Så lenge limet er sterkere enn trevirket, og trevirket dermed blir dimensjonerende, bør likevel dette være en brukbar tilnærming til virkeligheten.

Det er dermed noe usikkert hva som er årsaken til at den teoretisk beregnede og den testede E-modulen ikke samsvarer. På grunn av at dette avviket var såpass stort, ble det i tillegg utført beregninger av spennvidde med den midlere E-modulen fra testresultatene. Dette ble kun gjort for de testede sammensetningene og resultatene ble presentert i delkapittel 5.4.3. Det ble vist at den testede E-modulen ga rundt 5 % kortere spennvidde enn den teoretisk beregnede E-modulen. For lange spenn, der nedbøyningen hadde størst betydning, førte dette til at maksimal spennvidde for de testede sammensetningene ble kortere enn maksimal spennvidde for GL30c. For korte spenn var maksimal spennvidde for de testede sammensetningene fremdeles omtrent 10 % bedre enn maksimal spennvidde for en GL30c.

Ettersom en testserie med kun tre tester ikke er nok til å fastslå E-modulen med sikkerhet, mens de teoretiske beregningene bygger på anerkjente metoder, antas det fortsatt at den teoretisk beregnede E-modulen er den mest korrekte. Dersom man antar at bjelkenes E-modul er i henhold til de teoretisk beregnede resultatene, vist i delkapittel 4.1.1, må man likevel være åpen for at dette kan gi en E-modul som er for lav i forhold til bjelkenes reelle E-modul.

Om den reelle E-modulen er lavere enn det som er beregnet, vil dette føre til større deformasjoner i bjelkene enn forventet. Dette fører igjen til at den mulige spennvidden kan bli mindre for tilfeller der nedbøyningen blir dimensjonerende, på grunn av bruksgrensekrav. Å utføre dimensjonering med for lav E-modul vil imidlertid ikke utgjøre noen fare for konstruksjonens bæreevne.

6.2.2 Karakteristisk bøyefasthet

Resultatene fra den teoretiske beregnede karakteristiske bøyefastheten ble vist under delkapittel 4.1.2. Sammenlignet med karakteristisk bøyefasthet for GL30c, oppnådde det sammensatte tverrsnittet av T22 og 47 % bøkfinér dobbelt så stor karakteristisk bøyefasthet. Tverrsnittet av T15 og 64 % bøkfinér oppnådde en karakteristisk bøyefasthet på 2,3 ganger bøyefastheten for en GL30c. Dette viser dermed en gunstig økning av karakteristisk bøyefasthet for sammensatte bjelker med bøkfinér, sammenlignet med standard limtre i fasthetsklasse GL30c. Videre kom det fram at en økning av prosentandel bøkfinér over 60 % for TS1 og 64 % for TS2, ikke ville hatt ytterligere betydning for den karakteristiske bøyefastheten for de sammensatte tverrsnittene.

De karakteristiske verdiene fra testresultatene samsvarte godt med verdiene fra de teoretiske beregningene. For testbjelkene med T22 i midten 47 % bøkfinér var den mest sannsynlige 5%-fraktilen for bøyefasthet $63,80 \text{ N/mm}^2$, noe som tilsvarte et avvik på 6,4 % fra den teoretiske verdien på $59,98 \text{ N/mm}^2$. For bjelkene av T15 og 64 % bøkfinér samsvarte den mest sannsynlige 5%-fraktilen, på $67,90 \text{ N/mm}^2$ enda bedre med den teoretisk beregnede verdien på 70 N/mm^2 . Dette gir kun et avvik på 2,9 %.

Testene tyder dermed på at de teoretiske beregningene av bøyefasthet bygger på korrekte metoder og antagelser. Dette tyder igjen på at beregningsresultatene for bøyefasthet, og videre beregninger som bygger på bøyefastheten, er reliable. Testene av bøyefasthet hadde en noe høy variasjonskoeffisient, på 12 % for testbjelkene med T15-lameller i midten og 19 % for testbjelkene med T22-lameller i midten. Dette kan skape noe usikkerhet rundt testresultatene. Usikkerhetene er fortsatt godt innenfor det som kan aksepteres. Dette er fordi NS-EN 14358 angir variasjonskoeffisient på 25 % som øvre grense for når det er tillatt å bruke et minimum antall prøvestykker (Standard Norge, 2016c). Dette er ved verifisering av 5%-fraktiler som skal brukes til å godkjenne et produksjonsparti. Den store spredningen fører også til et høyt standardavvik, som igjen fører til lavere estimert 5%-fraktil. Det er dermed fullt mulig at variasjonen kan ha ført til at testresultatene gir en lavere karakteristisk bøyefasthet enn det bjelkene egentlig har.

Dersom testene alene skal brukes til å si noe om bjelkenes bøyefasthet, krever standarden en noe høyere sikkerhet i beregningene av karakteristiske verdier. Ved denne beregningsmetoden ble karakteristisk bøyefasthet $48,33 \text{ N/mm}^2$ og $56,59 \text{ N/mm}^2$ for testbjelkene med henholdsvis

T22 og T15 i midten. Disse bygger på mer konservative beregningsmetoder og blir derfor noe lavere enn de teoretisk beregnede resultatene.

6.2.3 Karakteristisk strekk- og trykkfasthet i fiberretning

Teoretisk beregnet strekk- og trykkfasthet i fiberretning ble omtalt under delkapittel 4.1.3 og 4.1.4. Det ble vist at det sammensatte tverrsnittet av T22 og 47 % bøkefinér, oppnådde en karakteristisk strekkfasthet tilsvarende det dobbelte av strekkfastheten for en GL30c. Det samme tverrsnittet oppnådde en karakteristisk trykkfasthet på 1,6 ganger trykkfastheten for en GL30c. For tverrsnittet av T15 og 64 % bøkefinér var økningen av strekkfasthet på 2,2 ganger strekkfasthet til en GL30c. Mens økningen for karakteristisk trykkfasthet var på 1,7 ganger trykkfastheten for en GL30c.

Det kom fram at en økning av prosentandel bøkefinér i de sammensatte tverrsnittene, hadde betydning for den karakteristiske strekk- og trykkfastheten. Dette gjaldt helt til verdiene sammenfalte med tilsvarende verdi for GL70, noe som inntraff for sammensetningene med over 90 % bøkefinér.

Strekk- og trykkfasthet i fiberretning ble ikke testet i laboratoriet, og det finnes derfor ingen praktiske verdier i denne undersøkelsen som kan sammenlignes med de teoretiske beregnede verdiene. Vi kan likevel si noe om reliabiliteten og validiteten til beregningen av strekk- og trykkfasthet, basert på bøyetestene. Den testede bøyefastheten samsvarer godt med de teoretiske verdiene. Etersom bøyespennning består av en kombinasjon av strekk- og trykkspenning, tyder dette på at tester også ville samsvart godt med teoretiske verdier for strekk- og trykkfasthet.

Det er dermed grunn til å tro at den benyttede beregningsmetoden gir reliable og valide resultater, også for strekk- og trykkfasthet i fiberretning. Likevel fører mangelen på testing til at disse to egenskapene ikke kan avgjøres med like stor sikkerhet som de testede egenskapene. For alle dimensjonerings-beregningene som ble utført, har imidlertid ikke dette noe å si. Dette er fordi strekk- og trykkfastheten i fiberretning ikke har noen betydning for bjelkers kapasitet for moment, skjærkraft eller nedbøyning, som bjelkene ble dimensjonert for. Vi anser derfor resultatene for å ha tilstrekkelig validitet og reliabilitet, selv om ikke disse to egenskapene ble kontrollert i laboratoriet.

6.2.4 Karakteristisk densitet

Under delkapittel 4.1.5 ble resultatene fra teoretisk beregning av karakteristisk densitet vist. Her kom det fram at den karakteristiske densiteten for sammensetningen av T22 og 47 % bøkfinér oppnådde en beregnet densitet tilsvarende 1,4 ganger den karakteristiske densiteten for en GL30c. Økningen av karakteristisk densitet var for tverrsnittene av T15 og 64 % bøkfinér på 1,5 ganger, sammenlignet med densiteten for en GL30c. Det ble også vist at en økning i prosentandel bøkfinér opptil 90 %, hadde betydning for den karakteristiske densiteten for de sammensatte tverrsnittene.

Etter gjennomførte bøytester ved laboratoriet ble det, som beskrevet under delkapittel 3.3.2, tatt ut et prøvestykke fra hver testbjelke for å gjennomføre måling av fuktighetsinnhold og densitet. Prøvestykkene skulle tas ut fra testbjelkene nærmest mulig bruddet, uten selv å være berørt av bruddet. Testbjelke T22C fikk brudd i hele bjelkens lengde, så her var det ikke mulig å ta ut et prøvestykke uten brudd. Fuktigheten og densiteten målt av prøvestykket fra T22C samsvarte allikevel godt med de to andre prøvene i denne serien, og det ser ikke ut til at brudd i prøvestykket hadde betydning for målingene.

Sammenlignet med den teoretiske beregnede densiteten, ble 5%-fraktilen fra laboratorietestene noe lavere for testbjelkene av T22 og 47 % bøkfinér. For testbjelkene av T15 og 64 % bøkfinér var det omvendt. Som vist i delkapittel 5.3 ble de målte densitetene, og dermed også gjennomsnittet, høyere enn forventet. Dette ble også gjenspeilet i den mest sannsynlige 5%-fraktilen for begge de testede sammensetningene. Den høye densiteten kan skyldes at bøkfinéren som ble benyttet, hadde høyere densitet enn først antatt. Samtidig vet vi at densiteten for gran også kan variere. Dermed kan avviket mellom teoretisk beregnet og testet densitet skyldes at både lamellene av gran og bøkfinér hadde høyere densitet enn antatt.

6.2.5 Reliabilitet og validitet ved laboratorietester

Ifølge NS-EN 408 skal bruddet i testbjelkene komme innen 300 sekunder \pm 120 sekunder (Standard Norge, 2010). Som nevnt tidligere ble det anslått en pålastningshastighet av de ansatte ved Treteknisk, som skulle tilfredsstillte dette kravet. Testbjelke T22A var den første bjelken som ble testet, og kravet om brudd innen denne tiden ble oppfylt med den anslåtte pålastningshastigheten på 10 kN/min. Det var derfor ingen grunn til å endre denne. Allikevel viste det seg at testbjelke T22C tålte mer last og spenning enn de to første testbjelkene. Derfor

ble tiden før brudd i denne bjelken noe mer enn optimalt, som vist i tabell 5.1. Ifølge de ansatte ved Treteknisk var det mer kritisk om bruddet hadde oppstått før kravet om tidsbruk enn etter. Det er mulig at resultatene fra testbjelke T22C ble noe påvirket av dette, og dermed svekket reliabiliteten til resultatene fra denne testserien noe.

Det ble observert at testbjelke T22A kuvet noe, som nevnt under delkapittel 3.5.1. Ut fra resultatene og sammenligning med de andre testbjelkene, ser det ikke ut til at dette hadde noen betydning for resultatene eller reliabiliteten.

Som nevnt tidligere ble alle testene filmet slik at bruddene kunne analyseres, noe som var med på å øke validiteten til denne delen av undersøkelsen. Videoene ble studert nøye for å se om sonen med gran eller bøkefinér gikk til brudd først. Resultatene fra analyse av videoer og statistisk beregning av dette er vist i vedlegg N. Bruddårsaken for hver av de seks testbjelkene ble også studert.

Som beskrevet under delkapittel 2.2.4 er bøkefinéren, benyttet i testbjelkene, en type parallellfinér. Det var ikke forventet at arkene med fibre som lå perpendikulært på de resterende arkene i finéren, skulle ha en så stor rolle ved brudd i testbjelkene. Gjennom observasjon av bjelkene etter utførte tester og analyse av videoer, kom det fram at rulleskjærbrudd i bøkefinéren var én av bruddårsakene for samtlige testbjelker. Det oppstod tydelige rulleskjærbrudd i de to arkene med fibre perpendikulært med de resterende arkene som hadde fiberretning i bjelkens lengde.

På grunn av tydelige rulleskjærbrudd i samtlige testbjelker kan det tyde på at dette var en svakhet i bøkefinéren. Det er mulig at testbjelkenes bøyefasthet kunne vært enda bedre enn det de ble målt til, hvis alle lagene i bøkefinéren hadde hatt samme fiberretning. Samtidig er det ikke mulig å si dette sikkert, kun på bakgrunn av seks tester. Forøvrig kan også de perpendikulære lagene ha positiv effekt på noen av de mekaniske egenskapene som ikke ble testet, eksempelvis trykkfasthet vinkelrett på fibre. Det er det ikke grunnlag for å si noe mer om dette på bakgrunn av denne undersøkelsen.

Videre viste analysen av videoene at det for noen av testbjelkene var antydning til delaminering. Det kunne se ut til at limet mellom lamellene av gran og bøkefinér ikke var optimalt. Som nevnt under delkapittel 1.3, ble det antatt at limet var sterkere enn trevirket og dermed var ikke delaminering forventet. Antydning til delaminering kan tyde på at limet var svakere enn først antatt. Det er mulig at sterkere lim kunne gitt sterkere bjelker, men som for

rulleskjærbruddene er det ikke mulig å fastslå dette, da det kun ble testet seks bjelker.

6.2.6 Maksimal spennvidde

Under delkapittel 4.2 kom det fram at ved å benytte en liten andel bøkefinér øverst og nederst på tverrsnittet, økte spennvidden umiddelbart. Den relative økningen viste seg å være størst for det korte spennet, der spennvidden kunne økes med over 30 %. For det lange spennet kunne spennvidden økes med nesten 10 %. Dette ser ut til å skyldes at nedbøyning ble dimensjonerende for det lange spennet, mens momentet ble dimensjonerende for det korte spennet, med de betingelsene som var satt. Både øvrige teoretiske beregninger og laborietestene viste at forsterkning med bøkefinér ga en langt større forbedring i bøyefasthet enn i E-modul. Dette er grunnen til at momentkapasiteten kan økes mye mer enn kapasiteten for nedbøyning, ved en forsterkning med bøkefinér.

For det lange spennet kom det også fram at den maksimale spennvidden minsket, dersom tverrsnittet bestod av en høy andel bøkefinér. En økning av andel bøkefinér utover 50 % for TS1 og 60 % for TS2, vil dermed ha liten effekt på bjelkens maksimale spennvidde. Dette skyldes at bøkefinéren har såpass liten effekt på E-modulen, samtidig som den tilfører ekstra vekt, og dermed fører til økt nedbøyning.

For det korte spennet ble det vist at en økning av andel bøkefinér over 60 %, for begge sammensetningene, vil ha liten effekt på økningen av spennvidde. Samtidig ble det vist at en sammensatt bjelke med T22- eller T15-lameller i midten, med omtrent 80 % bøkefinér, oppnådde samme maksimale spennvidde som en BauBuche.

Dermed kan det se ut til at bjelker forsterket med bøkefinér har best effekt på spenn rundt 3 m. Der kan spennvidden økes en god del sammenlignet med en standard limtrebjelkes mulige spennvidde, med samme dimensjon. Dette kan gjøre at avstanden mellom bærende vegger, søyler eller lignende kan økes, slik at det for store bygg ikke vil være behov for like mange bærende søyler. Denne typen bjelker har derimot mindre effekt dersom hensikten er å muliggjøre veldig lange spenn eller oppnå økt spennvidde for spenn på rundt 20 m. For slike tilfeller vil nedbøyningen begrense spennvidden.

6.2.7 Nødvendig tverrsnittsdimensjon

Under delkapittel 4.3 ble det vist at ved å benytte sammensatte bjelker av gran og bøkefinér, i stedet for standard limtrebjelker med kvalitet GL30c, kan tverrsnittsdimensjonen minskes.

Det ble vist at det kun trengs en liten andel bøkfinér for at det skal kunne benyttes en mindre dimensjon. For lange spenn ser man igjen effekten av at den tilførte vekten fra bøkfinéren har større betydning enn økt styrke og stivhet, slik at den minste dimensjonen oppnås ved å benytte en sammensetning uten for mye bøkfinér.

Dette viser at det er mulig å spare plass, fordi det oppnås lavere høyde på etasjeskillere, ved å bruke bjelker sammensatt av bøkfinér og standard lameller av gran. De sammensatte bjelkene kan være like gode og i noen tilfeller bedre enn en BauBuche. Samtidig vil de sammensatte bjelkene veie mindre enn en BauBuche, fordi lamellene av gran har betydelig lavere densitet enn bøkfinéren.

6.2.8 Bøyespenningsfordeling

I tillegg til at laboratorietestene ble brukt til å sammenligne de teoretiske beregnede egenskapene med de testede egenskapene, ble de også brukt til å kontrollere hvor godt beregningsmetodene og antagelser stemmer med virkeligheten. En viktig avgjørelse som ble tatt, var om bjelkene skulle betraktes som homogene eller som komposittbjelker. Basert på vurderinger, som er nærmere beskrevet i delkapittel 2.3.6, ble det besluttet at bjelkene skulle betraktes som homogene i henhold til regler for standard limtrebjelker (Standard Norge, 2013). Det ble derfor antatt fullstendig lineær bøyespenningsfordeling (FLBS) over tverrsnittet, mens det for en komposittbjelke ville vært mest korrekt å anta stykkevis lineær bøyespenningsfordeling (SLBS). Siden dette var en forenkling av virkeligheten, ble testene også brukt til å undersøke hvor god denne tilnærmingen var.

Opptredende spenning og restkapasitet i hver tverrsnittssone i det bjelkene gikk til brudd, ble beregnet med både FLBS og SLBS. Beregningene finnes i vedlegg N og resultatene av dette er vist i delkapittel 5.4.4. Her kommer det fram at beregningsmetodene ikke gir så forskjellige resultater, og at det dermed er vanskelig å si noe sikkert om dette, kun basert på tre tester i hver serie. Resultatene viser likevel at beregninger med FLBS stemmer godt med testresultatene, i noen tilfeller bedre enn beregninger med SLBS. Dette gjelder spesielt for tverrsnitts-sammensetninger med stor andel bøkfinér. Ved liten andel bøkfinér stemmer SLBS bedre. For slike sammensetninger gir for øvrig FLBS mer konservative resultater enn SLBS, fordi tverrsnittssone 1 blir dimensjonerende. Derfor er det trygt å benytte FLBS her, selv om tilnærmingen ikke er like nøyaktig.

Dette tyder på at forenklingen med å betrakte de sammensatte bjelkene som homogene, er en god tilnærming til virkeligheten. Alle de øvrige teoretiske beregningene bygger på den samme antagelsen, der de kombinerte egenskapene til bjelkene er beregnet ved hjelp av elastisk teori for komposittbjelker (ETKB), og videre antatt å gjelde for hele tverrsnittet. Det antas dermed at denne beregningsmetoden har gitt valide og reliable resultater, for alle de beregnede egenskapene.

6.2.9 Sammenligning av resultater med tidligere undersøkelser

Tidligere undersøkelser på bruk av mjukved og hardved i samme tverrsnitt, ble redegjort for i delkapittel 2.6. Ifølge Dill-Langer og Aicher (2016) hadde limtrebjelker av gran forsterket med LVL-lameller av bøk i strekksonen langt bedre styrkekapasitet enn homogene limtrebjelker av gran. Dill-Langer og Aicher (2016) benyttet i sin undersøkelse lameller av gran i styrkeklasse T14 og LVL med karakteristisk bøyefasthet på 75 N/mm^2 . Testene ble utført med pålastning fra fire punktlaster oppå bjelkene. Denne metoden er kun en tilnærming av 4-punkts bøyetest beskrevet i NS-EN 408.

I motsetning til Dill-Langer og Aicher (2016) har vi i denne undersøkelsen benyttet lameller av gran i styrkeklasse T22 og T15, og bøkefinér med karakteristisk bøyefasthet på 70 N/mm^2 , GL70. I tillegg har vi i denne undersøkelsen forsterket limtrebjelkene med bøkefinér både i strekk- og trykksonen. Testene ble utført med 4-punkts bøyetest i henhold til regler og prosedyre gitt i NS-EN 408. På grunn av ulike beregningsmetoder og testmetode kan ikke resultatene sammenlignes direkte og vil ikke samsvare helt. Likevel er noen testresultater sammenlignet i neste avsnitt, for å vise forskjell mellom en bjelke som kun er forsterket i strekksonen og bjelker forsterket i både strekk- og trykksonen.

Ifølge Dill-Langer og Aicher (2016) hadde en bjelke med 27 % LVL av bøk i strekksonen, en midlere bøyefasthet tilsvarende 71 % av karakteristisk bøyefastheten for en homogen LVL-bjelke av bøk. Testbjelkene i vår undersøkelse, med 32 % bøkefinér i hver av de ytre sonene og T15-lameller i midten, oppnådde en midlere bøyefasthet tilsvarende 119 % av den karakteristiske bøyefastheten for en BauBuche.

På grunn av forskjellig metode for utførelse av tester og beregning, var det ikke hensiktsmessig å sammenligne flere testresultater med den tidligere undersøkelsen. Likevel er det mulig å se en trend, basert på den informasjonen som var tilgjengelig fra den tidligere undersøkelsen og testresultatene som kom fram av de utførte testene i denne rapporten.

Sammenligningen av resultatene tyder på at bjelker forsterket med bøkfinér både i strekk- og trykksonen er bedre enn bjelker med forsterkning kun i strekksonen.

6.3 Oppsummering og bakgrunn for konklusjon

Det er vist i denne rapporten at en forsterkning med bøkfinér kan ha betydning for de mekaniske egenskapene til en limtrebjelke med lameller av gran, i styrkeklasse T22 eller T15. Gjennom teoretiske beregninger og fullskalatester ble det vist at bøyefastheten for de sammensatte bjelkene av gran og bøkfinér økte i en betydelig grad, sammenlignet med homogene bjelker av gran. Teoretiske beregninger viser at forbedringen skjer raskere desto større andel av tverrsnittet som består av bøkfinér, inntil bøyefastheten når en maksimal verdi. Elastisitetsmodulen (E-modulen) viste seg å være dårligere ved testing enn ved teoretisk beregning. Begge metodene viste likevel at de sammensatte bjelkene oppnår noe bedre E-modul enn homogene bjelker av gran. Forbedringen vises tydelig allerede ved en liten andel bøkfinér, og E-modulen nærmer seg raskt E-modulen for GL70. Effekten av ytterligere økning blir mindre og mindre ved større andel bøkfinér, og det ser ut til at en økning av andelen bøkfinér utover 70 % ikke har betydning for E-modulen. Både teoretiske beregninger og fullskalatester viste også at å forsterke bjelkene med bøkfinér, førte til en økning i bjelkenes densitet. Forsterkningen skal også ha en positiv effekt på strekk- og trykkfastheten i fiberretning, ifølge teoretiske beregninger. Densiteten og strekk- og trykkfastheten øker lineært med økende andel bøkfinér.

Ifølge de teoretiske beregningene har alle de fem mekaniske egenskapene vist seg å være bedre for de sammensatte bjelkene enn for standard limtrebjelker i fasthetsklasse GL30c. Både bøyefastheten og E-modulen ser ut til å oppnå tilnærmet verdi for GL70 når andelen bøkfinér økes til over 60 %. E-modulen er da over 25 % større enn for GL30c, mens bøyefastheten er mer enn doblet. Ved denne andelen bøkfinér er også strekkfastheten over doblet, trykkfastheten er økt med over 60 % og densiteten er økt med over 30 %.

Denne forbedringen av mekaniske egenskaper fører til at de sammensatte bjelkene i mange tilfeller kan spenne lengre, tåle større belastning eller ha mindre tverrsnittsdimensjon enn en standard limtrebjelke, GL30c. En økning av andelen bøkfinér i tverrsnittet har mest betydning opp til rundt 40 % bøkfinér for den maksimale spennvidden. På grunn av lavere E-modul, viser laborietestene noe dårligere geometriske egenskaper for de sammensatte bjelkene, enn det de teoretiske beregningene viser. For lange spenn viser de teoretiske

beregningene at spennvidden kan økes med omtrent 5 % sammenlignet med en GL30c. Med E-modul fra laboratorietestene viser det seg at de lange bjelkene ikke kan spenne lenger enn en GL30c. For korte spenn viser de teoretiske beregningene at bjelkene kan spenne opptil 13 % lenger enn en GL30c. Med testet E-modul viser det seg at de korte bjelkene kan spenne omtrent 10 % lenger enn en GL30c. Dette gjelder kun de sammensetningene som var tilgjengelig for laboratorietesting. Det er mulig at andre sammensetninger med større andel bøkfinér vil kunne oppnå høyere E-modul ved testing, og dermed gi mulighet for større spennvidde.

Den beskjedne økningen i mulig spennvidde for de sammensatte bjelkene, på tross av den store forbedringen i bøyefasthet, skyldes at forsterkningen med bøkfinér ikke gir nok forbedring av E-modulen. I tillegg har bøkfinéren meget høy densitet sammenlignet med gran, og forsterkningen fører dermed til ekstra vekt. Totalt fører dette til at det ikke er mulig å oppnå så store forbedringer av nedbøyningskapasiteten, slik at spennvidden heller ikke kan økes så mye.

Noe forbedring vises det likevel, spesielt for korte spenn. Det kan i noen situasjoner føre til litt større avstand mellom søyler eller andre bærende elementer, eller at det kan brukes mindre tverrsnittsdimensjon. Å forsterke limtrebjelker med bøkfinér kan dermed ha en material- og plassbesparende effekt, i forhold til standard limtrebjelker av gran. Dette kan tenkes å fremme tre som byggemateriale i konkurransen mot andre materialer som stål og betong. Om de sammensatte bjelkene kan bli valgt fremfor stål eller betong, kan det gi miljømessige fordeler ettersom tre kan regnes som et mer miljøvennlig materiale, som forklart i delkapittel 2.1. Det må imidlertid vurderes om miljøgevinsten som oppnås ved å benytte tre fremfor eksempelvis stål eller betong, veies opp av at bøkfinéren produseres i Tyskland, og dermed må transporteres til Norge.

6.4 Konklusjon

Hensikten med denne rapporten har vært å undersøke hvordan de mekaniske egenskapene til en limtrebjelke av gran kan påvirkes, ved å forsterke limtrebjelken med bøkfinér i strekk- og trykksonen. Gjennom teoretiske beregninger og fullskalatester i laboratorium, har forfatterne av denne rapporten forsøkt å belyse dette.

Med grunnlag i de gjennomførte teoretiske beregningene ser det ut til at de mekaniske egenskapene, for de undersøkte limtrebjelkene av gran forsterket med bøkfinér, påvirkes

positivt. Noen av de mekaniske egenskapene påvirkes i langt større grad enn andre. Dette beskrives mer detaljert, for de undersøkte sammensetningene av bølgefinér og gran i styrkeklasse T22 eller T15, i delkapittel 6.3.

Sammenlignet med homogene limtrebjelker av gran og standard limtrebjelker av GL30c, ser det ut til at bøyefastheten har en klar forbedring for de forsterkede bjelkene. Dette kommer fram ved både teoretiske beregninger og laboratorietester. For elastisitetsmodulen vises det derimot kun en svak forbedring ifølge de teoretiske beregningene, og en enda mindre ifølge laboratorietestene. Strekk- og trykkfasthet i fiberretning og densitet vises å ha en moderat forbedring ifølge teoretiske beregninger. Laboratorietestene av densiteten viser omtrent det samme som de teoretiske beregningene, mens strekk- og trykkfasthet ikke er testet i laboratoriet. Forbedringen vises både for bjelkene med T22-lameller i midten og bjelkene med T15-lameller, noe som tyder på at forsterkning med bølgefinér kan ha en generell positiv effekt på limtrebjelker av gran.

Den positive endringen av de mekaniske egenskapene kan utgjøre en forskjell for de undersøkte bjelkenes geometriske egenskaper, det vil si spennvidde og tverrsnittsdimensjon. Det ser ut til at økningen av spennvidden er størst for sammensetningene med opp til rundt 40 % bølgefinér i tverrsnittet, mens effekten av en videre økning synes å være ganske liten. Sammenlignet med en standard limtrebjelke i fasthetsklasse GL30c, ser det ut til at en bjelke av gran og bølgefinér kan oppnå en økning av spennvidde opp til 10 % for et kort spenn på rundt 3 m. Det ser ut til at elastisitetsmodulen for de sammensatte bjelkene ikke forbedres nok til at bjelker over 20 m kan spenne lenger enn en GL30c. Dette på grunn av bruksgrensekravet for nedbøyning. Derimot tyder det på at en forsterkning med bølgefinér fører til at en sammensatt bjelke kan tåle de samme belastningene som en GL30c, med mindre tverrsnittsdimensjon.

6.5 Forslag til videre undersøkelser

På bakgrunn av de avgrensninger som er satt for denne undersøkelsen, kunne det vært interessant å undersøke flere faktorer som ikke er undersøkt her. Limingsbetingelsene, både i fingerskjøter og mellom lamellene, er en faktor som har stor betydning for egenskapene til en limtrebjelke. I denne undersøkelsen er effekter fra lim sett helt bort fra. Det kunne derfor vært interessant å utføre en undersøkelse hvor det legges større vekt på limingsbetingelsene og

betydningen av disse. Da vil det også være interessant å utføre både laboratorietester og teoretiske beregninger for bjelker med fingerskjøt.

Siden mulighetene for tester i denne undersøkelsen har vært begrenset, ville det vært interessant å utføre en lignende undersøkelse med flere testbjelker. For å få sikrere grunnlag til å si noe om bøkefinérens effekt, ville det vært fornuftig å teste flere tverrsnittssammensetninger med større og mindre andel bøkefinér, enn det som er testet i denne undersøkelsen. Det bør også utføres flere tester i hver serie.

Spesielt foreslås det at E-modulen kontrolleres med flere tester, ettersom den teoretisk beregnede og den testede E-modulen hadde ganske stort avvik i denne undersøkelsen. Bøyefastheten kan også testes ytterligere, for å avgjøre hvor god tilnærming det er å betrakte limtrebjelkene som homogene. Videre ville det vært interessant å teste flere egenskaper enn det som ble gjort i denne undersøkelsen. Spesielt bør strekk- og trykkfasthet i fiberretning testes. Disse egenskapene, sammen med egenskapene som ble testet i denne undersøkelsen, vil være nok til å opprette en fasthetsklasse for de sammensatte bjelkene.

Videre ville det vært interessant å utvide undersøkelsen, både den teoretiske beregningen og testingen, til å omfatte sammensetninger med flere styrkeklasser for lamellene i midten. Bjelker med tre tverrsnittssoner, med bøkefinér ytterst og to soner med lameller av ulik styrkeklasse innenfor, kan også være interessant å undersøke.

For å forbedre reliabiliteten og validiteten ytterligere, foreslås det også at samme problemstilling kan undersøkes med andre metoder. En FEM-analyse (Finite Element Method) kan være et egnet verktøy til å undersøke problemstillingen ytterligere.

7 Referanser

Artec AS (2018) *Treet*. Tilgjengelig fra: <https://artec.no/prosjekter/treet/> (Hentet: 3. april 2019).

Bell, K. (2015) *Konstruksjonsmekanikk DEL II Fasthetslære*. 1. utg. Bergen: Fagbokforlaget.

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

Bell, K. (2017) *Dimensjonering av trekonstruksjoner*. Bergen: Fagbokforlaget.

Dill-Langer, G. og Aicher, S. (2016) High performance glulam beams made of beech LVL and solid wood lamellas: Experiments and modelling, i *2016 World Conference on Timber Engineering, WCTE 2016, Universitatsring 1, Vienna, Austria*. DAAAM International Vienna.

DNV GL (2017) *FSC Chain of custody certificate*. Tilgjengelig fra: <https://www.moelven.com/globalassets/moelven-limtre/sertifiseringer-og-dokumentasjon/fsc-sertifikat-limtre-2017.pdf> (Hentet: 3. mars 2019).

DNV GL (2018) *PEFC Chain of custody certificate*. Tilgjengelig fra: <https://www.moelven.com/globalassets/moelven-limtre/sertifiseringer-og-dokumentasjon/pefc244-april-18---april-23.pdf> (Hentet: 3. mars 2019).

Løvås, G. G. (2013) *Statistikk for universiteter og høyskoler*. Oslo: Universitetsforlaget.

Moelven (2017) *Certificates, Documentation and Policies*. Tilgjengelig fra: <https://www.moelven.com/about-moelven/certificates-documentation-and-declarations/?category=17550> (Hentet: 2. mars 2019).

Moelven Limtre AS og Pollmeier (2017) *Tekniske data BauBuche - finérbjelke i bøk*. Tilgjengelig fra: <https://www.moelven.com/globalassets/moelven-limtre/brosjyrer/produktark-baubuche-mai-2017.pdf> (Hentet: 9. januar 2019).

Moelven Limtre AS (u.å.) *Finérbjelker i bøk*. Tilgjengelig fra:

<https://www.moelven.com/no/no/limtre/finerbjelker-i-bok/> (Hentet: 27. februar 2019).

Pollmeier (u.å.) *Sustainability at Pollmeier*. Tilgjengelig fra:

<https://www.pollmeier.com/en/products/material/Sustainability.html> (Hentet: 27. februar 2019).

SINTEF Byggforsk (2015) *571.523 Trevirke. Treslag og materialelegenskaper*. Tilgjengelig

fra: https://www.byggforsk.no/dokument/578/trevirke_treslag_og_materialelegenskaper (Hentet: 27. februar 2019).

Standard Norge (2002a) *NS-EN 1990 Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner*. Tilgjengelig fra:

<http://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=814847> (Hentet: 14. mars 2019).

Standard Norge (2002b) *NS-EN 1991-1-1 Eurokode 1: Laster på konstruksjoner- Del 1-1: Almenne laster- Tetthet, egenvekt, nyttelaster i bygninger*. Tilgjengelig fra:

<http://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1015211> (Hentet: 20. februar 2019).

Standard Norge (2002c) *NS-EN 13183-1 Fukttinnhold i et virkestykke av skurlast Del 1: Bestemmelse ved tørkemetode*. Tilgjengelig fra:

<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=137899> (Hentet: 20. mars 2019).

Standard Norge (2004) *NS-EN 1995-1-1 Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner- Del 1-1: Almenne regler og regler for bygninger*. Tilgjengelig fra:

<http://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=436137> (Hentet: 20. februar 2019).

Standard Norge (2010) *NS-EN 408 Trekonstruksjoner - Konstruksjonstre og limtre - Bestemmelse av noen fysiske og mekaniske egenskaper*. Tilgjengelig fra: <http://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=592329> (Hentet: 29. januar 2019).

Standard Norge (2013) *NS-EN 14080 Trekonstruksjoner - Limtre og limt laminert heltre - Krav*. Tilgjengelig fra: <http://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=866055> (Hentet: 14. januar 2019).

Standard Norge (2014) *ISO 13061-2 Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=714411> (Hentet: 20. mars 2019).

Standard Norge (2016a) *NS-EN 14081-1 Trekonstruksjoner - Styrkesortert konstruksjonstrevirke med rektangulært tverrsnitt - Del 1: Generelle krav*. Tilgjengelig fra: <http://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=866045> (Hentet: 14. januar 2019).

Standard Norge (2016b) *NS-EN 338 Konstruksjonstrevirke - Fasthetsklasser*. Tilgjengelig fra: <http://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=824287> (Hentet: 30. januar 2019).

Standard Norge (2016c) *NS-EN 14358 Trekonstruksjoner - Beregning og verifisering av karakteristiske verdier*. Tilgjengelig fra: <http://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=832910> (Hentet: 29. januar 2019).

Store norske leksikon (2009) *Fingerskjøt*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/fingerskj%C3%B8t> (Hentet: 1. mars 2019).

Store norske leksikon (2015) *Mekaniske egenskaper*. Tilgjengelig fra:

https://snl.no/mekaniske_egenskaper (Hentet: 3. april 2019).

Treindustrien *et al.* (2013) *Treindustriens lille grønne*. Tilgjengelig fra:

<http://www.trefokus.no/resources/Treindustriens-lille-gronne.pdf> (Hentet: 6. mars 2019).

Treindustrien (u.å.) *Miljø*. Tilgjengelig fra: <http://www.treindustrien.no/miljo> (Hentet: 2. mars 2019).

Treteknisk (2009) *Lauvtreegenskaper*. (FOKUS på tre Nr. 18). Oslo. Tilgjengelig fra:

<http://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/fokus-pa-tre/Fokus-nr-18.pdf>
(Hentet: 27. februar 2019).

Treteknisk (u.å.) *PEFC Sporbarhetssertifisering og FSC sertifisering*. Tilgjengelig fra:

<http://www.treteknisk.no/tjenester/sertifisering-og-kontrollordninger/sertifisering/pefc-miljosertifisering> (Hentet: 2. mars 2019).

Voll Arkitekter AS (u.å.) *Mjøstårnet*. Tilgjengelig fra:

http://vollark.no/portfolio_page/mjostarnet/ (Hentet: 3. april 2019).

Vedlegg

Vedlegg A – Valg av antatt bøyespenningsfordeling.....	85
Vedlegg B – Dimensjonering av kort bjelke.....	87
Vedlegg C – Valg av testbjelker.....	92
Vedlegg D – Manuell registrering av testdata.....	95
Vedlegg E – Beregning av fukt og densitet for T22A.....	96
Vedlegg F – Beregning av karakteristisk densitet for testbjelker med T22.....	97
Vedlegg G – Karakteristisk strekk- og trykkfasthet for TS1.....	98
Vedlegg H – Karakteristisk strekk- og trykkfasthet for TS2.....	99
Vedlegg I – Nedbøyningsdata for T22A.....	100
Vedlegg J – Beregning av E-modul for T22A og midlere E-modul for testbjelker med T22.....	103
Vedlegg K – Beregning av variasjonskoeffisient for testet E-modul for testbjelker med T22.....	104
Vedlegg L – Beregning av bøyefasthet for T22A.....	105
Vedlegg M – Beregning av karakteristisk bøyefasthet for testbjelker med T22.....	106
Vedlegg N – Sammenligning av FLBS og SLBS for testbjelker.....	107
Vedlegg O – Kalibreringsbevis for laboratoriestyret.....	112

Vedlegg A – Valg av antatt bøyespenningsfordeling

Dersom den innerste sonen er dimensjonerende for bjelkens bøyefasthet, er fullstendig lineær bøyespenningsfordeling (FLBS) en forenkling til sikker side sammenlignet med stykkevis lineær bøyespenningsfordeling (SLBS). Dette er fordi beregning med FLBS gir større maksimal opptredende spenning på den innerste sonen (sone 1).

Bøyefastheten til BauBuche, som brukes i den ytterste sonen (sone 3) i alle tverrsnittssammensetningene i denne undersøkelsen, er 70 N/mm². Dersom sone 3 er dimensjonerende, er 70 N/mm² også bjelkens totale bøyefasthet. Dersom sone 1 har for lav bøyefasthet og for stor andel av tverrsnittet, vil det kunne oppstå brudd i sone 1 før sone 3 har nådd sin fulle kapasitet. Dermed får bjelken en bøyefasthet som er lavere enn 70 N/mm².

Bøyefastheten til lameller av T22 er beregnet til 31,753 N/mm² iht. NS-EN 14080. Sone 1 er dimensjonerende for bøyefastheten til tverrsnitt som består av T22 og bøkefinér (TS1), dersom følgende ulikhet er oppfylt:

$$\left[\begin{array}{l} > \text{solve} \left(70 > \frac{31.753}{1 - 2 \cdot x_3}, x_3 \right) \\ \phantom{> \text{solve}} \left(-\infty, 0.2731928571 \right), \left(0.5000000000, \infty \right) \end{array} \right]$$

Dersom tverrsnittet består av *mindre* enn 2×27,3 % bøkefinér blir altså sone 1 dimensjonerende og FLBS er derfor til sikker side.

Bøyefastheten til lameller av T15 er beregnet til 25,413 N/mm² iht. NS-EN 14080.

Sone 1 er dimensjonerende for bøyefastheten til tverrsnitt som består av T15 og bøkefinér (TS2), dersom følgende ulikhet er oppfylt:

$$\left[\begin{array}{l} > \text{solve} \left(70 > \frac{25.413}{1 - 2 \cdot x_3}, x_3 \right) \\ \phantom{> \text{solve}} \left(-\infty, 0.3184785714 \right), \left(0.5000000000, \infty \right) \end{array} \right]$$

Dersom tverrsnittet består av *mindre* enn 2×31,8 % bøkefinér, blir altså sone 1 dimensjonerende og FLBS er derfor til sikker side.

Forenklingen med FLBS kan også benyttes der dette er til usikker side, så lenge usikkerheten er på et akseptabelt nivå, som forklart i delkapittel 2.3.6. NS-EN 14080 godtar preaksepterte sammensetninger hvor bøyefastheten beregnet med FLBS er minimum 91,3 % av bøyefastheten beregnet med SLBS (Standard Norge, 2013). Det antas dermed at denne forenklingen kan benyttes på andre sammensetninger, så lenge det ikke medfører større usikkerhet enn det som er godtatt for standardens preaksepterte sammensetninger.

For sammensetninger av T22 og bøkefinér (TS1), blir ikke usikkerheten større enn dette, dersom følgende ulikhet er oppfylt:

$$\left[\text{> solve} \left(\frac{\frac{13000 \cdot (1 - 2 \cdot x_3)^3}{12} + \frac{16700}{1.05} \cdot 2 \cdot \left(\frac{x_3^3}{12} + x_3 \cdot \left(\frac{x_3 + 1 - 2 \cdot x_3}{2} \right)^2 \right)}{\frac{16700}{1.05 \cdot 12}} > 0.913, x_3 \right) \right. \\ \left. (0.1095051606, \infty) \right]$$

Ved en andel bøkefinér *større* enn 2×11,0 %, kan dermed FLBS antas med tilstrekkelig sikkerhet.

Ettersom beregningen tidligere i vedlegget viser at FLBS er til sikker side ved *mindre* enn 2×27,3 % bøkefinér, kan FLBS benyttes i beregningen for alle sammensetninger av TS1.

For sammensetninger av T15 og bøkefinér (TS2), blir ikke usikkerheten større enn det som godtas i standarden, dersom følgende ulikhet er oppfylt:

$$\left[\text{> solve} \left(\frac{\frac{11500 \cdot (1 - 2 \cdot x_3)^3}{12} + \frac{16700}{1.05} \cdot 2 \cdot \left(\frac{x_3^3}{12} + x_3 \cdot \left(\frac{x_3 + 1 - 2 \cdot x_3}{2} \right)^2 \right)}{\frac{16700}{1.05 \cdot 12}} > 0.913, x_3 \right) \right. \\ \left. (0.1601050860, \infty) \right]$$

Ved en andel bøkefinér på *større* enn 2×16,0 %, kan dermed FLBS antas med tilstrekkelig sikkerhet.

Ettersom beregningen tidligere i vedlegget viser at FLBS er til sikker side ved *mindre* enn 2×31,8 % bøkefinér, kan FLBS benyttes i beregningen for alle sammensetninger av TS2.

Vedlegg B – Dimensjonering av kort bjelke

Dette vedlegget viser dimensjonering av en kort bjelke, sammensatt av T22 og GL70 (TS1). Vedlegget viser beregning av midlere E-modul, karakteristisk bøyefasthet, karakteristisk trykk- og strekkfasthet i fiberretning samt karakteristisk densitet. Beregning av disse fem verdiene er marker med titler i **fet tekst**. Grunnlaget for dimensjonering og valgte faktorer er beskrevet under delkapittel 3.2.2 i rapporten.

Dimensjonering av sammensatt bjelke iht. NS-EN 14080

Sammensetning

Sone 3: 2 x 23,5% = **47 % bøkfinér (GL70)**

Sone 2:

Sone 1: 1 x 53% = **53 % gran (T22)**

Dimensjoner

Lengde 3980 mm (Kort spenn)

Bredde 90 mm

Høyde 225 mm

Materialverdier

	For bord av T22 (iht. NS-EN 14080)	Bøkfinér GL70 (BauBuche) (iht. Moelven Limtre AS)
Karakteristisk bøyefasthet	Beregnes	$f_{m,g,k}GL70 := 70 \frac{N}{mm^2}$
Karakteristisk strekkfasthet i fiberretning	$f_{t,0,l,k}T22 := 22 \frac{N}{mm^2}$	$f_{t,0,g,k}GL70 := 55 \frac{N}{mm^2}$
Karakteristisk trykkfasthet i fiberretning	Beregnes	$f_{c,0,g,k}GL70 := 49.5 \frac{N}{mm^2}$
Karakteristisk densitet	$\rho_{l,k}T22 := 390 \frac{kg}{m^3}$	$\rho_{g,k}GL70 := 680 \frac{kg}{m^3}$
Midlere E-modul	$E_{t,0,l,mean}T22 := 13000 \frac{N}{mm^2}$	$E_{0,g,mean}GL70 := 16700 \frac{N}{mm^2}$

Kommentar for midlere E-modul:

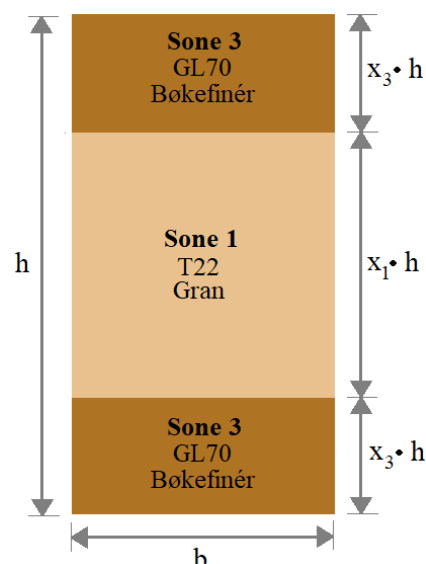
Iht. NS-EN 14080 skal den felles E-modulen, beregnet ut fra E-modulen til lamellene i hver enkelt sone, multipliseres med en faktor på 1,05. Midlere E-modul for GL70 må først divideres med faktoren 1,05 for å gjelde for lamell av GL70. Denne midlere E-modulen for lameller av GL70 blir dermed som følger

$$E_{t,0,l,mean}GL70 := \frac{E_{0,g,mean}GL70}{1.05} = 15904.762 \frac{N}{mm^2}$$

Materialverdier for kombinert limtre, fellesverdier for T22 og GL70 (iht. NS-EN 14080)

Skjærmodul $G_{g,mean}GL := 650 \frac{N}{mm^2}$

Karakteristisk skjærfasthet $f_{v,k}GL := 3.5 \frac{N}{mm^2}$



Utrekning av karakteristisk densitet

Sone 3: Andel GL70 av tverrsnittshøyden $x_3 := 0.235$ (Totalt 47 %)

Sone 1: Andel T22 av tverrsnittshøyden $x_1 := 1 - 2 \cdot x_3 = 0.53$

Sone 1 (T22): Densitet $\rho_{l.k.1} := \rho_{l.k.T22} = 390 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Sone 3 (GL70): Densitet
(divideres med faktoren 1,1 iht. NS-EN 14080) $\rho_{l.k.3} := \frac{\rho_{g.k.GL70}}{1.1} = 618.182 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Beregnet karakteristisk densitet for den sammensatte bjelken

$$\rho_{g.k} := (\rho_{l.k.3} \cdot 2 \cdot x_3 + \rho_{l.k.1} \cdot x_1) \cdot 1.1 = 546.97 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Utrekning av lastkombinasjoner

Faktorer for dimensjonering av bjelke i klimaklasse 1

$k_{def} := 0.6$ $\psi_0 := 0.7$ $\psi_2 := 0.3$

Bjelkedimensjoner

Bredde $b := 90 \text{ mm}$

Høyde $h := 225 \text{ mm}$

Lastbredde $cc := 2 \text{ m}$

Egenlast av bjelken $EL_{bjelke} := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \rho_{g.k} = 5.366 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

Egenlast av bjelken (linjelast) $EV_{bjelke} := EL_{bjelke} \cdot b \cdot h = 0.109 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Påført egenlast (linjelast) $EL := 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot cc = 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Påført nyttelast (linjelast) $NL := 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot cc = 6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Dimensjonerende linjelast (bruddgrense)

$$q_d := 1.2 \cdot (EL + EV_{bjelke}) + 1.5 \cdot NL = 11.53 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Dimensjonerende linjelast (bruksgrense)

$$q_{TP} := (EL + EV_{bjelke}) \cdot (1 + k_{def}) + NL \cdot \psi_2 \cdot (1 + k_{def}) = 6.254 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Utrekning av midlere E-modul

Sone 1: E-modul for T22

$$E_1 := E_{t.0.l.mean} T22 = (1.3 \cdot 10^4) \frac{N}{mm^2}$$

Sone 3: E-modul for GL70

$$E_3 := E_{t.0.l.mean} GL70 = (1.59 \cdot 10^4) \frac{N}{mm^2}$$

Beregnet midlere E-modul for den sammensatte bjelken
(multipiseres med faktoren 1,05 iht. NS-EN 14080)

$$E_{t.0.l.mean} := E_1 + (E_3 - E_1) (6 \cdot x_3 - 12 \cdot x_3^2 + 8 \cdot x_3^3) = (1.547 \cdot 10^4) \frac{N}{mm^2}$$

$$E_{0.g.mean} := 1.05 \cdot E_{t.0.l.mean} = 16245.93 \frac{N}{mm^2}$$

Utrekning av nedbøyning

Bjelkens lengde $L := 3.98 \text{ m}$

Skjærmodul $G_{g.mean} := G_{g.mean} GL = 650 \frac{N}{mm^2}$

Annet arealmoment $I := \frac{b \cdot h^3}{12} = (8.543 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$

Nedbøyning

$$\delta_{max} := \frac{5 \cdot q_{TP} \cdot L^4}{384 \cdot E_{0.g.mean} \cdot I} = 14.722 \text{ mm}$$

Skjærnedbøyning

$$\delta_{max} := \frac{5 \cdot q_{TP} \cdot L^4}{384 \cdot E_{0.g.mean} \cdot I} \left(1 + 0.96 \cdot \left(\frac{h}{L} \right)^2 \cdot \frac{E_{0.g.mean}}{G_{g.mean}} \right) = 15.851 \text{ mm}$$

Grenseverdi for nedbøyning $\frac{L}{250} = 15.92 \text{ mm}$

Utnyttelse [%] $\frac{\delta_{max}}{L} \cdot 100 = 99.566 < 100 \text{ \% OK}$
 $\frac{\delta_{max}}{L} > 100 \text{ \% ikke OK}$

Utrekning av opp tredende bøy espenning (fullstendig lineær, FLBS)

Moment $M := q_d \cdot \frac{L^2}{8} = 22.831 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Annet arealmoment $I := \frac{b \cdot h^3}{12} = (8.543 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$

Sone 1 (T22): Maksimal bøy espenning $\sigma_{max.1} := \frac{M}{I} \cdot \frac{h \cdot x_1}{2} = 15.935 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Sone 3 (GL70): Maksimal bøy espenning $\sigma_{max.3} := \frac{M}{I} \cdot \frac{h}{2} = 30.065 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Beregnet maksimal bøy espenning i bjelken

$$\sigma_{max} := \max(\sigma_{max.1}, \sigma_{max.3}) = 30.065 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Utrekning av karakteristisk bøyefasthet

Sone 1 (T22): Fasthet for bord $[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}]$ $f_{t.0.l.k.1} := 22$

Sone 3 (GL70): Fasthet $[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}]$ $f_{t.0.l.k.3} := 70$

Sone 3 (GL70): Bøyefasthet $[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}]$ $f_{m.g.k.3} := 70$

Sone 1 (T22): Beregnet bøyefasthet (iht. NS-EN 14080)

$$f_{m.j.k.1} := 1.4 \cdot f_{t.0.l.k.1} + 12 = 42.8$$

$$f_{m.g.k.1} := -2.2 + 2.5 \cdot f_{t.0.l.k.1}^{0.75} + 1.5 \left(\frac{f_{m.j.k.1}}{1.4} - f_{t.0.l.k.1} + 6 \right)^{0.65} = 31.753$$

Beregnet karakteristisk bøyefasthet for den sammensatte bjelken

$$f_{m.g.k} := \min\left(f_{m.g.k.3}, \frac{f_{m.g.k.1}}{1 - 2 \cdot x_3}\right) \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 59.912 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Faktorer for dimensjonering

$$k_h := \max\left(\min\left(\left(\frac{600}{h}\right)^{0.1}, 1.1\right), 1\right) = 1.1 \quad k_{mod} := 0.8 \quad \gamma_M := 1.15$$

Dimensjonerende bøyefasthet for den sammensatte bjelken

$$f_{m.d} := k_{mod} \cdot k_h \cdot \frac{f_{m.g.k}}{\gamma_M} = 45.846 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Utnyttelse [%] $\frac{\sigma_{max}}{f_{m.d}} \cdot 100 = 65.579$ <100 OK!
>100 ikke OK!

Utregning av karakteristisk trykkfasthet i fiberretning

Sone 1 (T22): Trykkfasthet (iht. NS-EN 14080) $f_{c.0.g.k.1} := f_{m.g.k.1} \cdot \frac{N}{mm^2} = 31.753 \frac{N}{mm^2}$

Sone 3 (GL70): Trykkfasthet $f_{c.0.g.k.3} := f_{c.0.g.k.GL70} = 49.5 \frac{N}{mm^2}$

Beregnet karakteristisk trykkfasthet i fiberretning for den sammensatte bjelken

$$f_{c.0.g.k} := (f_{c.0.g.k.3} \cdot 2 \cdot x_3 + f_{c.0.g.k.1} \cdot (1 - 2 \cdot x_3)) = 40.094 \frac{N}{mm^2}$$

Utregning av karakteristisk strekkfasthet i fiberretning

Sone 1 (T22): Strekkfasthet (iht. NS-EN 14080) $f_{t.0.g.k.1} := 0.8 \cdot f_{m.g.k.1} \cdot \frac{N}{mm^2} = 25.403 \frac{N}{mm^2}$

Sone 3 (GL70): Strekkfasthet $f_{t.0.g.k.3} := f_{t.0.g.k.GL70} = 55 \frac{N}{mm^2}$

Beregnet karakteristisk strekkfasthet i fiberretning for den sammensatte bjelken

$$f_{t.0.g.k} := (f_{t.0.g.k.3} \cdot 2 \cdot x_3 + f_{t.0.g.k.1} \cdot (1 - 2 \cdot x_3)) = 39.313 \frac{N}{mm^2}$$

Utregning av opp tredende skjærspenning

Skjær $V := \frac{q_d \cdot L}{2} = 22.945 \text{ kN}$

Maksimal skjærspenning $\tau_{max} := \frac{3 \cdot V}{2 \cdot h \cdot b \cdot 0.8} = 2.125 \frac{N}{mm^2}$

Sone 1 (T22): Skjærkapasitet $f_{v.k} := f_{v.k} GL = 3.5 \frac{N}{mm^2}$

Dimensjonerende skjærfasthet for den sammensatte bjelken

$$f_{v.d} := k_{mod} \cdot \frac{f_{v.k}}{\gamma_M} = 2.435 \frac{N}{mm^2}$$

Utnyttelse [%] $\frac{\tau_{max}}{f_{v.d}} \cdot 100 = 87.26$ <100 OK!
>100 ikke OK!

Oppsummering av kapasitetskontroller, utnyttelse [%]

Nedbøyning	Bøyespenning	Skjærspenning
$\frac{\delta_{max}}{L} \cdot 100 = 99.566$ 250	$\frac{\sigma_{max}}{f_{m.d}} \cdot 100 = 65.579$	$\frac{\tau_{max}}{f_{v.d}} \cdot 100 = 87.26$

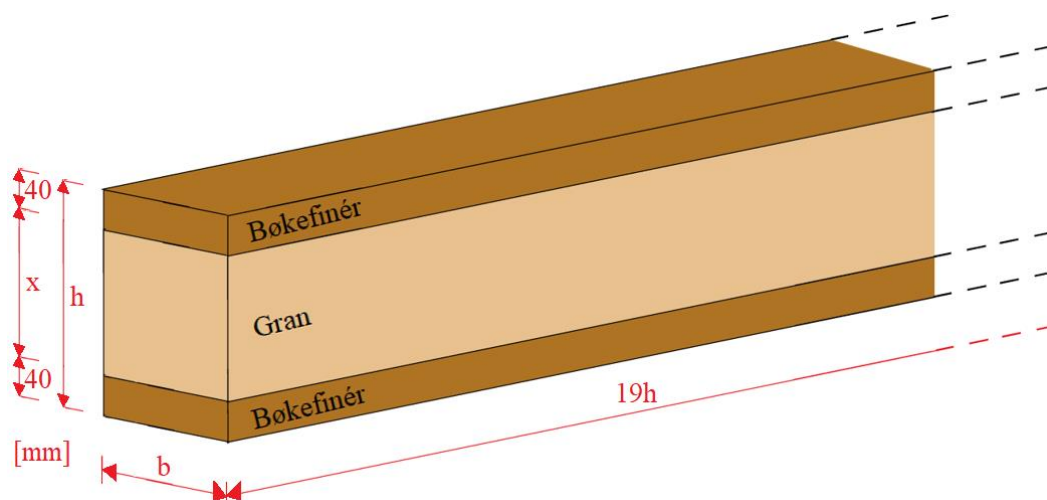
Vedlegg C – Valg av testbjelker

Ved valg av testbjelker var disse forutsetningene og begrensningene tilstede:

- Ønsket å teste to ulike tverrsnitts-sammensetninger:
TS1: Bøkefinér (GL70) og gran (T22)
TS2: Bøkefinér (GL70) og gran (T15)
- Det skulle være symmetrisk oppbygging av tverrsnittet, med lik prosentandel bøkefinér (GL70) i strekk- og trykksonen.
- Bjelkelengden måtte tilfredsstille minstekravet $19h$ (iht. NS-EN 408)
- Av praktiske årsaker var det ønske om maksimal bjelkelengde på omtrent 3000 mm.
- Lamellene av bøkefinér (GL70) hadde tykkelse 40 mm fra leverandør.
- Lameller av gran var tilgjengelig med en tykkelse på 45 mm. For å unngå ytterligere arbeid med slissing av disse lamellene, var det et ønske om å benytte lameller av gran med denne tykkelsen.
- Vi ønsket å utnytte bøyefastheten til GL70 mest mulig og ønsket dermed at denne skulle gå til brudd først. Ved å oppnå bøyespennning på 70 N/mm^2 i ytterst sone (sone 3, GL70) før lamellen(e) av gran nådde sin maksimale bøyespennning, ville bøkefinéren ryke først.
- Bøyespenningsfordeling: Stykkevis lineær (SLBS)/Fullstendig lineær (FLBS)
- Bøyefastheter:

GL70	70 N/mm^2	(Kjent fra Moelven Limtre AS)
T22	$31,753 \text{ N/mm}^2$	(Teoretisk beregnet, iht. NS-EN 14080)
T15	$25,413 \text{ N/mm}^2$	(Teoretisk beregnet, iht. NS-EN 14080)
- E-modul:

GL70	$16\,700 \text{ N/mm}^2$	(Kjent fra Moelven Limtre AS)
T22	$13\,000 \text{ N/mm}^2$	(Kjent for bord av T22, iht. NS-EN 338)
T15	$11\,500 \text{ N/mm}^2$	(Kjent for bord av T15, iht. NS-EN 338)
- E-modul for lamell av GL70: Iht. NS-EN 14080 skal den felles E-modulen, beregnet ut fra E-modulen til lamellene i hver enkelt sone, multipliseres med en faktor på 1,05. Midlere E-modul for GL70 må først divideres med faktoren 1,05 for å gjelde for lamell av GL70. Dette er utført i beregningene på neste side.



Beregning av minste grense for prosentandel GL70 i TS1, antatt SLBS:

$$\left[\begin{array}{l} > \text{solve} \left(70 > \frac{31.753}{1 - 2 \cdot x_3} \cdot \frac{\frac{16700}{1.05}}{13000}, x_3 \right) \\ (-\infty, 0.2225143380), (0.5000000000, \infty) \end{array} \right]$$

Beregningen over viser at T22 ryker først hvis tverrsnittet består av mindre enn 2×22,25 % GL70. Det vil si at GL70 går til brudd først for tverrsnitt med mer enn 2×22,25 % bøkefinér. Maksimal utnyttelse av bøkefinérens bøyefasthet, med antatt SLBS, er dermed for et tverrsnitt med 2×22,25 % bøkefinér.

Beregning av minste grense for prosentandel GL70 i TS1, antatt FLBS:

$$\left[\begin{array}{l} > \text{solve} \left(70 > \frac{31.753}{1 - 2 \cdot x_3}, x_3 \right) \\ (-\infty, 0.2731928571), (0.5000000000, \infty) \end{array} \right]$$

Beregningen over viser at T22 ryker først hvis tverrsnittet består av mindre enn 2×27,32 % GL70. Det vil si at GL70 går til brudd først for tverrsnitt med mer enn 2×27,32 % bøkefinér. Maksimal utnyttelse av bøkefinérens bøyefasthet, med antatt FLBS, er dermed for et tverrsnitt med 2×27,32 % bøkefinér.

Beregning av minste grense for prosentandel GL70 i TS2, antatt SLBS:

$$\left[\begin{array}{l} > \text{solve} \left(70 > \frac{25.413}{1 - 2 \cdot x_3} \cdot \frac{\frac{16700}{1.05}}{11500}, x_3 \right) \\ (-\infty, 0.2489517302), (0.5000000000, \infty) \end{array} \right]$$

Beregningen over viser at T15 ryker først hvis tverrsnittet består av mindre enn 2×24,90 % GL70. Det vil si at GL70 går til brudd først for tverrsnitt med mer enn 2×24,90 % bøkefinér. Maksimal utnyttelse av bøkefinérens bøyefasthet, med antatt SLBS, er dermed for et tverrsnitt med 2×24,90 % bøkefinér.

Beregning av minste grense for prosentandel GL70 i TS2, antatt FLBS:

$$\left[\begin{array}{l} > \text{solve} \left(70 > \frac{25.413}{1 - 2 \cdot x_3}, x_3 \right) \\ (-\infty, 0.3184785714), (0.5000000000, \infty) \end{array} \right]$$

Beregningen over viser at T15 ryker først hvis tverrsnittet består av mindre enn 2×31,85, % GL70. Det vil si at GL70 går til brudd først for tverrsnitt med mer enn 2×31,85 % bøkefinér. Maksimal utnyttelse av bøkefinérens bøyefasthet, med antatt FLBS, er dermed for et tverrsnitt med 2×31,85 % bøkefinér.

Oppsummering

TS1 – GL70 og T22

For tverrsnitt med mellom 22,25 % og 27,32 % GL70 i sone 3:

Beregning med antatt SLBS sier at GL70 skal gå til brudd først

Beregning med antatt FLBS sier at T22 skal gå til brudd først

Valgt tverrsnitt med $2 \times 23,5$ % GL70: Andelen GL70 er ganske nært grensa beregnet med SLBS. Beregningene med antatt SLBS og FLBS gir ikke samme svar. Får dermed kontrollert hvilken metode som er mest rett gjennom testing.

TS2 – GL70 og T15

For tverrsnitt med mellom 24,90 % og 31,85 % GL70 i sone 3:

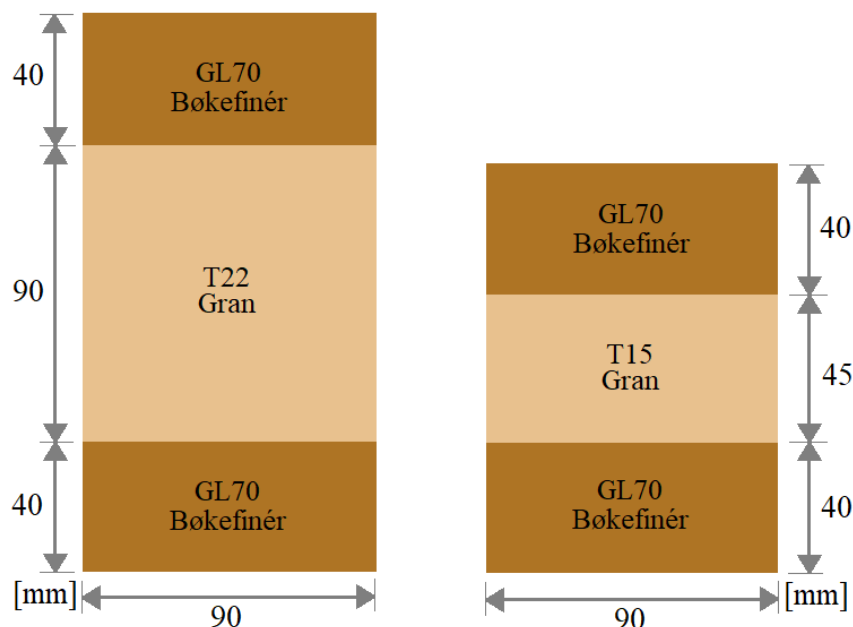
Beregning med antatt SLBS sier at GL70 skal gå til brudd først

Beregning med antatt FLBS sier at T15 skal gå til brudd først

Valgt tverrsnitt med 2×32 % GL70: Andelen GL70 er ganske nært grensa beregnet med FLBS. Valgt tverrsnitt har mer andel bøk enn begge grensene beregnet med antatt SLBS og FLBS. Får dermed ikke kontrollert hvilken metode som er mest rett gjennom testing, da begge metodene er enige om at GL70 skal gå til brudd først.

Valgte tverrsnitts-sammensetninger for testbjelker:

1. Tverrsnittsdimensjon: 90 mm \times 170 mm, lengde: 3,3 m, sammensatt av 40 mm (23,5 %) bøkfinér øverst og nederst og 90 mm gran med styrkeklasse T22 i midten. Tverrsnitt med totalt 47 % bøkfinér fordelt på strekk- og trykksone.
2. Tverrsnittsdimensjon: 90 mm \times 125 mm, lengde: 2,4 m, sammensatt av 40 mm (32 %) bøkfinér øverst og nederst og 45 mm gran med styrkeklasse T15 i midten. Tverrsnitt med totalt 64 % bøkfinér fordelt på strekk- og trykksone.



Vedlegg D – Manuell registrering av testdata

Norsk Treteknisk Institutt
Mekanisk prøvelaboratorium

PM 101-01

NS-EN 408 Manuell registrering av testdata

Utgave: 11	Gyldig fra: 2010-06-07	Utarbeidet av: FGE	Godkjent av: EAa
------------	------------------------	--------------------	------------------

Oppdragsgiver: _____ Prosjektnr.: _____ Nom. Dim.: _____ x _____ mm

Skyvelære nr.: _____ Sylinder nr.: _____

Def.måler nr.: _____

Tørkeskap nr.: _____ Vekt nr.: _____

Prøvenr.	Dimensjon, b, x h _r [mm]		Pålastnings-hastighet [kN/min]	Bruddlast [kN]	Kommentarer (bruddårsak, avvik m.v.)
T22A	1	90,3 x 168,8	10	62,431	Strekbrudd i midtfelt Rulleskjær
	2	90,4 x 168,8		Tidsforbruk [s]	
	3	90,2 x 168,4		374	

Prøvenr.	Dimensjon, b, x h _r [mm]		Pålastnings-hastighet [kN/min]	Bruddlast [kN]	Kommentarer (bruddårsak, avvik m.v.)
T22B	1	90,2 x 169,0	10	70,707	Rulleskjærbrudd i midtfelt
	2	90,4 x 169,2		Tidsforbruk [s]	
	3	90,1 x 169,0		424	

Prøvenr.	Dimensjon, b, x h _r [mm]		Pålastnings-hastighet [kN/min]	Bruddlast [kN]	Kommentarer (bruddårsak, avvik m.v.)
T22C	1	90,2 x 169,8	10	89,747	Brudd i ytterlamell Rulleskjærbrudd Tverrfinér
	2	90,3 x 170,0		Tidsforbruk [s]	
	3	90,3 x 170,0		538	

Prøvenr.	Dimensjon, b, x h _r [mm]		Pålastnings-hastighet [kN/min]	Bruddlast [kN]	Kommentarer (bruddårsak, avvik m.v.)
T15A	1	90,1 x 126,3	10	57,945	Skjærbrudd Rulleskjær
	2	90,1 x 126,7		Tidsforbruk [s]	
	3	90,1 x 126,3		348	

Prøvenr.	Dimensjon, b, x h _r [mm]		Pålastnings-hastighet [kN/min]	Bruddlast [kN]	Kommentarer (bruddårsak, avvik m.v.)
T15B	1	90,0 x 127,3	10	45,546	Skjærbrudd Rulleskjær
	2	90,0 x 127,1		Tidsforbruk [s]	
	3	90,0 x 127,2		276	

Prøvenr.	Dimensjon, b, x h _r [mm]		Pålastnings-hastighet [kN/min]	Bruddlast [kN]	Kommentarer (bruddårsak, avvik m.v.)
T15C	1	90,2 x 126,4	10	52,830	Brudd strekkside Rulleskjær
	2	90,0 x 126,5		Tidsforbruk [s]	
	3	90,2 x 126,3		317	

Vedlegg F – Beregning av karakteristisk densitet for testbjelker med T22

Densitet ved 12 % fuktighetsinnhold

$$\text{Densitet for T22A } \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad \rho_A := 644.76$$

$$\text{Densitet for T22B } \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad \rho_B := 636.34$$

$$\text{Densitet for T22C } \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad \rho_C := 646.35$$

$$\text{Antall tester} \quad n := 3$$

Statistisk beregning iht NS-EN 14358, med antatt normalfordeling

$$\text{Sikkerhetsfaktor} \quad k_s := 3.15 \quad (\text{for 3 prøver})$$

Midlere verdi

$$y_{\text{mean}} := \frac{1}{n} (\rho_A + \rho_B + \rho_C) = 642.483$$

Standardavvik

$$s_y := \max \left(\sqrt{\frac{((\rho_A - y_{\text{mean}})^2 + (\rho_B - y_{\text{mean}})^2 + (\rho_C - y_{\text{mean}})^2)}{n - 1}}, (0.05 \cdot y_{\text{mean}}) \right) = 32.124$$

Karakteristisk densitet iht. NS-EN 14358

$$5\% \text{ - fraktil} \quad \rho_k := (y_{\text{mean}} - (k_s \cdot s_y)) \frac{N}{\text{mm}^2} = 541.292 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Statistisk beregning av mest sannsynlig 5%-fraktil, med antatt normalfordeling

$$\text{Kumulativ fordeling for 5%-faktil:} \quad \phi(1,645) = 0,05 \rightarrow k := 1.645$$

Midlere verdi:

$$y_{\text{mean}} := \frac{1}{n} (\rho_A + \rho_B + \rho_C) = 642.483$$

Standardavvik:

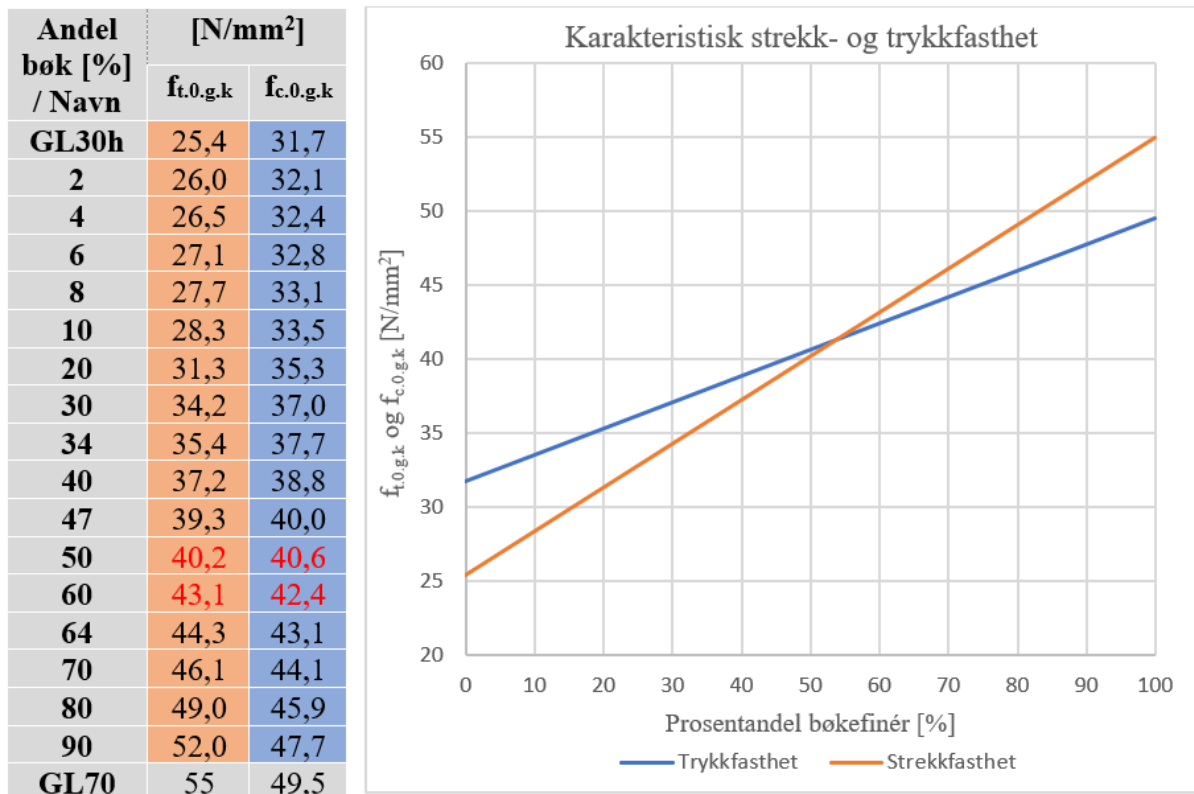
$$s_y := \sqrt{\frac{((\rho_A - y_{\text{mean}})^2 + (\rho_B - y_{\text{mean}})^2 + (\rho_C - y_{\text{mean}})^2)}{n - 1}} = 5.379$$

Karakteristisk densitet

$$5\% \text{ - fraktil} \quad \rho_k := (y_{\text{mean}} - (k \cdot s_y)) \frac{N}{\text{mm}^2} = 633.634 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Vedlegg G – Karakteristisk strekk- og trykkfasthet for TS1

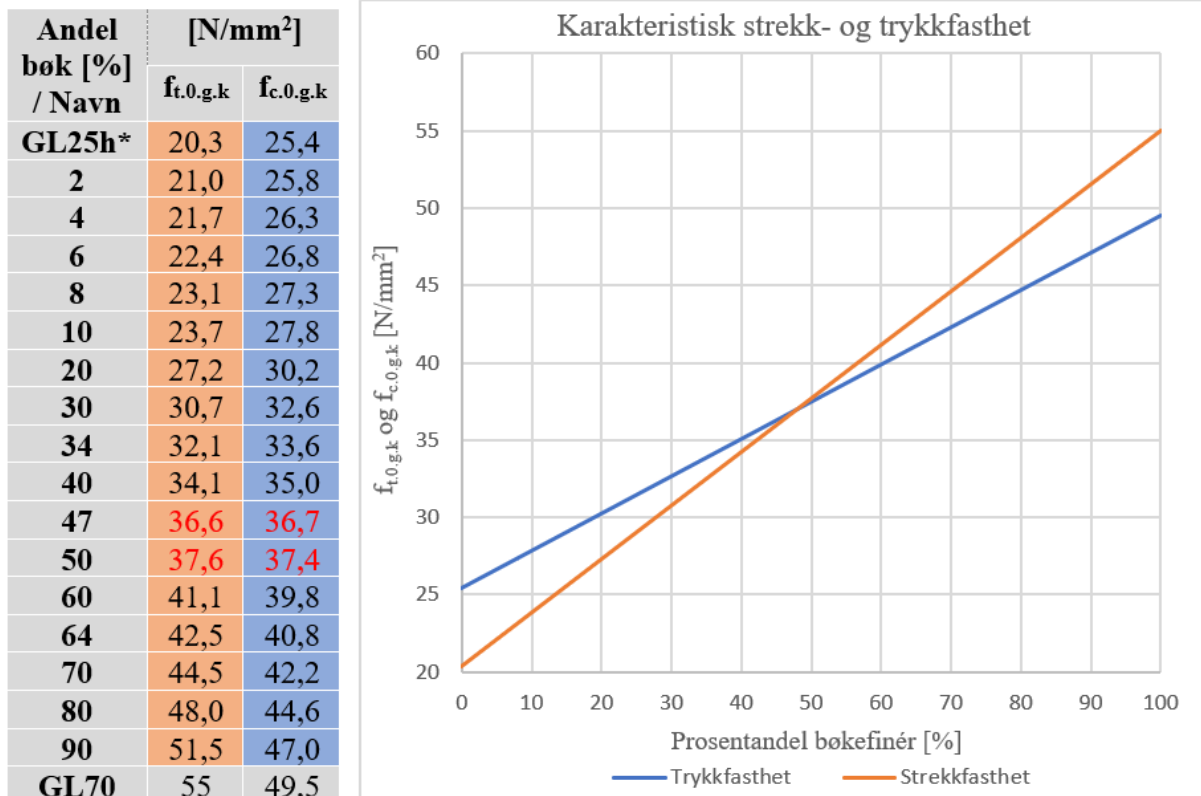
I tabellen under er forkortelsen GL30h benyttet. Dette er et homogent tverrsnitt av lameller i styrkeklasse T22, iht. NS-EN 14080. GL70 er forkortelsen for et homogent tverrsnitt av bøkefinér, BauBuche



Diagrammet over fremstiller den karakteristiske strekk- og trykkfastheten i fiberretningen, for de sammensatte tverrsnittene med T22 (TS1), og hvordan den øker med økende prosentandel bøkefinér i tverrsnittet. Det vises at for tverrsnitt med prosentandel bøkefinér lavere enn ca. 55 % er det trykkfastheten som har høyest verdi. For tverrsnitt med større prosentandel bøkefinér er det motsatt, altså strekkfastheten som har størst verdi. Dette er markert med røde tall i tabellen over. Det vises her at skillet går mellom 50 % og 60 % bøkefinér i tverrsnittet. Som beskrevet under delkapittel 2.2.4 i rapporten, er det i utgangspunktet strekk som er trevirkets beste styrke, men feil i trevirket påvirker strekkstyrken i større grad enn trykkstyrken. Virkesfeil forekommer oftere, og har større betydning, i fasthetsklasser av lavere kvalitet og påvirker dermed strekkstyrken. Dette er bakgrunnen for krysningen i diagrammet.

Vedlegg H – Karakteristisk strekk- og trykkfasthet for TS2

I tabellen under er forkortelsen GL25h* benyttet. Dette er et homogent tverrsnitt av lameller i styrkeklasse T15. Fasthetsklassen GL25h* er markert med en stjerne, fordi det ikke er definert i NS-EN 14080, men de mekaniske egenskapene tilsier at den hører til en fasthetsklasse mellom GL24h og GL26h. GL70 er forkortelsen for et homogent tverrsnitt av bøkefinér, BauBuche.



Diagrammet over fremstiller den karakteristiske strekk- og trykkfastheten i fiberretningen, for det sammensatte tverrsnittet med T15 (TS2), og hvordan den øker med økende prosentandel bøkefinér i tverrsnittet. Det vises at for tverrsnitt med prosentandel bøkefinér lavere enn 47 % er det trykkfastheten som har høyest verdi. For tverrsnitt med større prosentandel bøkefinér enn 50 % er det motsatt, altså strekkfastheten som har størst verdi. Dette er markert med røde tall i tabellen over. Det vises her at skillet går mellom 47 % og 50 % bøkefinér i tverrsnittet. Bakgrunnen for denne krysningen er den samme som beskrevet i vedlegg G.

Vedlegg I – Nedbøyningsdata for T22A

Nedbøyning [mm]	Load [kN]			
11,108	7,497	Regresjonslinje:		
11,292	7,66	Stigningstall:	1,14758858	2,40445408
11,464	7,826		0,00063322	0,01244583
11,652	7,991	Korrelasjonsfaktor:	0,99995981	0,04724099
11,844	8,157		3284459	132
12,041	8,324		7329,96437	0,2945859
12,228	8,493			
12,408	8,659			
12,615	8,826			
12,798	8,995			
12,988	9,162			
13,176	9,326			
13,351	9,49			
13,517	9,654			
13,709	9,818			
13,908	9,985			
14,095	10,15			
14,287	10,318			
14,489	10,484			
14,669	10,649			
14,846	10,816			
15,033	10,984			
15,213	11,15			
15,393	11,314			
15,576	11,485			
15,79	11,654			
15,974	11,823			
16,169	11,992			
16,366	12,159			
16,546	12,326			
16,719	12,491			
16,914	12,654			
17,105	12,817			
17,274	12,981			
17,463	13,145			
17,638	13,309			
17,829	13,474			
18,025	13,641			
18,22	13,807			
18,409	13,974			
18,596	14,145			
18,799	14,313			

18,992	14,479
19,175	14,648
19,371	14,814
19,539	14,98
19,741	15,146
19,913	15,312
20,1	15,481
20,301	15,648
20,498	15,814
20,704	15,984
20,894	16,151
21,088	16,32
21,279	16,485
21,456	16,651
21,662	16,814
21,845	16,98
22,035	17,145
22,217	17,309
22,404	17,475
22,587	17,625
22,77	17,785
22,961	17,954
23,171	18,127
23,369	18,304
23,575	18,48
23,766	18,656
23,979	18,829
24,169	18,999
24,356	19,167
24,554	19,336
24,747	19,497
24,915	19,657
25,106	19,817
25,285	19,977
25,468	20,138
25,657	20,299
25,856	20,464
26,049	20,631
26,247	20,8
26,379	20,886
26,561	21,069
26,806	21,285
27,054	21,502
27,292	21,709
27,513	21,909
27,722	22,096
27,93	22,269
28,117	22,432

28,297	22,586
28,473	22,735
28,634	22,876
28,786	23,017
28,961	23,157
29,135	23,3
29,302	23,449
29,472	23,603
29,663	23,77
29,863	23,946
30,068	24,128
30,287	24,309
30,493	24,49
30,7	24,67
30,884	24,846
31,094	25,017
31,289	25,184
31,486	25,348
31,675	25,514
31,865	25,675
32,062	25,837
32,251	25,995
32,438	26,154
32,623	26,314
32,819	26,475
32,99	26,633
33,176	26,793
33,367	26,957
33,565	27,123
33,758	27,29
33,957	27,46
34,145	27,633
34,345	27,801
34,541	27,972
34,752	28,142
34,936	28,31
35,158	28,475
35,341	28,637
35,546	28,797
35,726	28,961
35,929	29,125
36,136	29,291
36,325	29,459
36,527	29,627

Vedlegg J – Beregning av E-modul for T22A og midlere E-modul for testbjelker med T22

Gjennomsnittlig bruddlast for testbjelker med T22: $F_{max.est} := 74.295 \text{ kN}$

Antatt skjærmodul for de sammensatte bjelkene:
(iht. NS-EN 14080) $G := 650 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Beregning av E-modul for T22A

Målingene i følgende intervall skal benyttes i regresjonsanalyse, iht. NS-EN 408:
(se vedlegg I - Nedbøyningsdata for T22A)

$$0.1 \cdot F_{max.est} = 7.43 \text{ kN} - 0.4 \cdot F_{max.est} = 29.718 \text{ kN}$$

Stigningstall for regresjonslinja som viser sammenheng mellom nedbøyning og påført belastning:

$$\beta_A := 1.14758858 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Korrelasjonsfaktor (>0,99): $r := 0.9999598$

Beregning av E-modul iht. NS-EN 408

E-modul:
(ikke korrigert for skjærmodul) $E_{m.g.A} := \frac{3 \cdot a \cdot L^2 - 4 \cdot a^3}{2 \cdot b \cdot h^3 (2 \beta_A)} = 12025.216 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

E-modul:
(korrigert for skjærmodul) $E_{m.g.A} := \frac{3 \cdot a \cdot L^2 - 4 \cdot a^3}{2 \cdot b \cdot h^3 \left(2 \beta_A - \frac{6 \cdot a}{5 \cdot G \cdot b \cdot h} \right)} = 12706.596 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Beregning av midlere E-modul for testbjelker med T22 iht. NS-EN 14358

E-modul for T22A $\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$: $E_{m.g.A} := 12707 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

E-modul for T22B $\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$: $E_{m.g.B} := 13854 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

E-modul for T22C $\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$: $E_{m.g.C} := 15256 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Middelverdi for E-modul: $E_{mean} := \frac{E_{m.g.A} + E_{m.g.B} + E_{m.g.C}}{3} = 13939 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Vedlegg K – Beregning av variasjonskoeffisient for testet E-modul for testbjelker med T22

Dette vedlegget viser beregning av variasjonskoeffisient for E-modul for de tre testbjelkene med T22-lameller i midten og totalt 47 % bøkfinér i tverrsnittet.

Antall tester i serien: $n := 3$

Målt E-modul for hver av testbjelkene i serien

$$\text{T22A:} \quad E_A := 12706.056 \frac{N}{mm^2}$$

$$\text{T22B:} \quad E_B := 13853.609 \frac{N}{mm^2}$$

$$\text{T22C:} \quad E_C := 15255.933 \frac{N}{mm^2}$$

Beregning av variasjonskoeffisient

Gjennomsnittlig E-modul:

$$y_{mean} := \frac{1}{3} (E_A + E_B + E_C) = 13938.53 \frac{N}{mm^2}$$

Standardavvik for E-modul:

$$s := \sqrt{\frac{((E_A - y_{mean})^2 + (E_B - y_{mean})^2 + (E_C - y_{mean})^2)}{3 - 1}} = 1277.06 \frac{N}{mm^2}$$

Variasjonskoeffisient:

$$COV := \frac{s}{y_{mean}} \cdot 100 = 9.16 \%$$

Vedlegg L – Beregning av bøyefasthet for T22A

Bjelke dimensjoner:

Bredde [mm]

$$b := 90 \text{ mm}$$

Høyde [mm]

$$h := 170 \text{ mm}$$

Testoppsett:

Spennvidde [mm]

$$L := 18 \cdot h = 3060 \text{ mm}$$

Avstand fra en punktlast til nærmeste opplegg [mm]

$$a := 6 \cdot h = 1020 \text{ mm}$$

Bruddlast, totalt for de to punktlastene:

$$F_{max.A} := 62431 \text{ N}$$

Bøyefasthet:
(Iht. NS-EN 408)

$$f_{m.A} := \frac{3 \cdot F_{max.A} \cdot a}{b \cdot h^2} = 73.448 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Vedlegg M – Beregning av karakteristisk bøyefasthet for testbjelker med T22

Beregnet bøyefasthet iht. Vedlegg L

$$\text{Bøyefasthet for T22A } \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]: \quad f_{m.A} := 73.448$$

$$\text{Bøyefasthet for T22B } \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]: \quad f_{m.B} := 83.185$$

$$\text{Bøyefasthet for T22C } \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]: \quad f_{m.C} := 105.585$$

$$\text{Antall tester:} \quad n := 3$$

Statistisk beregning iht NS-EN 14358, med antatt logaritmisk normalfordeling:

$$\text{Sikkerhetsfaktor:} \quad k_s := 3.15 \quad (\text{for 3 prøver})$$

Midlere verdi:

$$y_{mean} := \frac{1}{n} (\ln(f_{m.A}) + \ln(f_{m.B}) + \ln(f_{m.C})) = 4.459$$

Standardavvik (skal minimum settes til 0,05):

$$s_y := \max \left(\sqrt{\frac{((\ln(f_{m.A}) - y_{mean})^2 + (\ln(f_{m.B}) - y_{mean})^2 + (\ln(f_{m.C}) - y_{mean})^2)}{n-1}}, 0.05) \right) = 0.184$$

Karakteristisk bøyefasthet iht. NS-EN 14358

$$\text{5\%-fraktil:} \quad f_{m.k} := \exp(y_{mean} - k_s \cdot s_y) \frac{N}{\text{mm}^2} = 48.333 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Statistisk beregning av mest sannsynlige 5%-fraktil, med antatt logaritmisk normalfordeling:

$$\text{Kumulativ fordeling for 5\%-fraktil:} \quad \phi(1,654)=0,05 \quad \rightarrow \quad k := 1.645$$

Midlere verdi:

$$y_{mean} := \frac{1}{n} (\ln(f_{m.A}) + \ln(f_{m.B}) + \ln(f_{m.C})) = 4.459$$

Standardavvik:

$$s := \sqrt{\frac{1}{n-1} ((\ln(f_{m.A}) - y_{mean})^2 + (\ln(f_{m.B}) - y_{mean})^2 + (\ln(f_{m.C}) - y_{mean})^2)} = 0.184$$

Karakteristisk bøyefasthet

$$\text{5\%-fraktil:} \quad f_{m.k} := \exp(y_{mean} - k \cdot s) \frac{N}{\text{mm}^2} = 63.795 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Vedlegg N – Sammenligning av FLBS og SLBS for testbjelker

Testet momentkapasitet sammenlignes med beregninger med antatt fullstendig lineær bøyepenningsfordeling og antatt stykkevis lineær bøyepenningsfordeling. Beregnede karakteristiske verdier for opptredende spenning følger metoden fra vedlegg M.

Beregning for testbjelkene med T15

Bjelkedimensjoner

Bredde [mm]

$$b := 90 \text{ mm}$$

Høyde [mm]

$$h := 125 \text{ mm}$$

Avstand fra en punktlast til nærmeste opplegg [mm]:

$$a := 6 \cdot h = 750 \text{ mm}$$

Antall tester i hver serie:

$$n := 3$$

E-modul for materialene i de ulike sonene

Sone 3 (BauBuche GL70, omgjort til enkeltlameller):

$$E_3 := \frac{16700}{1.05} \frac{N}{mm^2} = 15904.762 \frac{N}{mm^2}$$

Sone 1 (T15):

$$E_1 := 11500 \frac{N}{mm^2}$$

Andel av tverrsnittshøyden i de ulike sonene

Sone 3 (GL70):

$$x_3 := \frac{40 \text{ mm}}{h} = 0.32$$

Sone 1 (T15):

$$x_1 := 1 - 2 \cdot x_3 = 0.36$$

Fordi mer enn 2x31,8 % av tverrsnittet tilhører sone 3, vil SLBS gi mest konservativt resultat. (Se vedlegg A - Valg av antatt bøyepenningsfordeling)

Andre arealmoment for de ulike sonene

$$\text{Sone 3 (GL70): } I_3 := \frac{2 \cdot b \cdot (h \cdot x_3)^3}{12} + 2 \left(b \cdot h \cdot x_3 \cdot \left(h \cdot \frac{x_1 + x_3}{2} \right)^2 \right) = (1.397 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$$

$$\text{Sone 1 (T15): } I_1 := b \cdot \frac{(h \cdot x_1)^3}{12} = (6.834 \cdot 10^5) \text{ mm}^4$$

Total bruddlast på hver av bjelkene

Punktlaster (totalt)

$$F_{max.A} := 57945 \text{ N}$$

$$F_{max.B} := 45546 \text{ N}$$

$$F_{max.C} := 52830 \text{ N}$$

Moment

$$M_A := \frac{F_{max.A} \cdot a}{2} = 21.729 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_B := \frac{F_{max.B} \cdot a}{2} = 17.08 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_C := \frac{F_{max.C} \cdot a}{2} = 19.811 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Maksimal opp tredende bø yespenning for hver bjelke, beregnet med FLBS

Sone 3 (GL70):

$$\sigma_{3.A} := \frac{6 \cdot M_A}{b \cdot h^2} = 92.712 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{3.B} := \frac{6 \cdot M_B}{b \cdot h^2} = 72.874 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{3.C} := \frac{6 \cdot M_C}{b \cdot h^2} = 84.528 \frac{N}{mm^2}$$

Sone 1 (T15):

$$\sigma_{1.A} := \sigma_{3.A} \cdot (1 - x_3 \cdot 2) = 33.376 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{1.B} := \sigma_{3.B} \cdot (1 - x_3 \cdot 2) = 26.234 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{1.C} := \sigma_{3.C} \cdot (1 - x_3 \cdot 2) = 30.43 \frac{N}{mm^2}$$

Beregnet 5%-fraktil (teoretisk) for sonene med logaritmisk normalfordeling, FLBS

Sone 3 (GL70):

$$\sigma_{3.k} := 67.94 \frac{N}{mm^2}$$

Sone 1 (T15):

$$\sigma_{1.k} := 24.458 \frac{N}{mm^2}$$

Kapasitetskontroll for bø yespenning i sonene (med 5%-fraktiler), FLBS

Største karakteristiske opp tredende spenning i sone 3: $\sigma_{3.k} = 67.94 \frac{N}{mm^2}$

Kapasitet i sone 3
(iht. data for BauBuche GL70):

$$f_{m.g.k.3} := 70 \frac{N}{mm^2}$$

Restkapasitet for sone 3 (GL70):

$$f_{m.g.k.3} - \sigma_{3.k} = 2.06 \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{f_{m.g.k.3} - \sigma_{3.k}}{f_{m.g.k.3}} \cdot 100 = 2.943\%$$

Største karakteristiske opp tredende spenning
i sone 1 (T15):

$$\sigma_{1.k} = 24.458 \frac{N}{mm^2}$$

Kapasitet i sone 1:
(Iht. NS-EN 14080)

$$f_{m.g.k.1} := 25.413 \frac{N}{mm^2}$$

Restkapasitet for sone 1 (T15):

$$f_{m.g.k.1} - \sigma_{1.k} = 0.955 \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{f_{m.g.k.1} - \sigma_{1.k}}{f_{m.g.k.1}} \cdot 100 = 3.758\%$$

Oppsummering, FLBS:

Differansen i restkapasitet for sone 3 og sone 1 er så liten at det i praksis er umulig å si hvilken sone som får brudd først, da variasjoner på trevirket vil være mer avgjørende enn den karakteristiske kapasiteten til materialene i sone 1 og sone 3. I teorien skal sone 3 få brudd først.

Maksimal opptrdende bøyespenning for hver bjelke, beregnet med SLBS

Sone 3 (GL70):

$$\sigma_{3.A} := \frac{E_3 \cdot M_A}{E_1 \cdot I_1 + E_3 \cdot I_3} \cdot \frac{h}{2} = 93.926 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{3.B} := \frac{E_3 \cdot M_B}{E_1 \cdot I_1 + E_3 \cdot I_3} \cdot \frac{h}{2} = 73.828 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{3.C} := \frac{E_3 \cdot M_C}{E_1 \cdot I_1 + E_3 \cdot I_3} \cdot \frac{h}{2} = 85.635 \frac{N}{mm^2}$$

Sone 1 (T15):

$$\sigma_{1.A} := \frac{E_1 \cdot M_A}{E_1 \cdot I_1 + E_3 \cdot I_3} \cdot \frac{h \cdot x_1}{2} = 24.449 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{1.B} := \frac{E_1 \cdot M_B}{E_1 \cdot I_1 + E_3 \cdot I_3} \cdot \frac{h \cdot x_1}{2} = 19.217 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{1.C} := \frac{E_1 \cdot M_C}{E_1 \cdot I_1 + E_3 \cdot I_3} \cdot \frac{h \cdot x_1}{2} = 22.291 \frac{N}{mm^2}$$

Beregnet 5%-fraktil (teoretisk) for sonene med logaritmisk normalfordeling, SLBS

Sone 3 (GL70):

$$\sigma_{3,k} := 68.83 \frac{N}{mm^2}$$

Sone 1 (T15):

$$\sigma_{1,k} := 17.916 \frac{N}{mm^2}$$

Kapasitetskontroll for bøyespenning i sonene (med 5%-fraktiler), SLBS

Største opptrdende spenning i sone 3 (GL70):

$$\sigma_{3,k} = 68.83 \frac{N}{mm^2}$$

Kapasitet i sone 3

(Iht. data for BauBuche GL70):

$$f_{m.g.k.3} := 70 \frac{N}{mm^2}$$

Restkapasitet for sone 3 (GL70):

$$f_{m.g.k.3} - \sigma_{3,k} = 1.17 \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{f_{m.g.k.3} - \sigma_{3,k}}{f_{m.g.k.3}} \cdot 100 = 1.671\%$$

Største karakteristiske opptrdende spenning i sone 1 (T15):

$$\sigma_{1,k} = 17.916 \frac{N}{mm^2}$$

Kapasitet i sone 1:

(Iht. NS-EN 14080)

$$f_{m.g.k.1} := 25.413 \frac{N}{mm^2}$$

Restkapasitet for sone 1 (T15):

$$f_{m.g.k.1} - \sigma_{1,k} = 7.497 \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{f_{m.g.k.1} - \sigma_{1,k}}{f_{m.g.k.1}} \cdot 100 = 29.501\%$$

Oppsummering, SLBS

Sone 1 (T15) har betydelig høyere restkapasitet enn sone 3 (GL70).

Brudd bør dermed oppstå i sone 3 først.

Analyse av videoer fra testene viste:

-T15A: sone 3 (GL70) får brudd først

-T15B og T15C: sone 1 (T15) får brudd først

Konklusjon

Begge beregningsmetodene gir at sone 3 (GL70) skal ryke først, så denne sammensetningen egner seg ikke så godt til å konkludere med hvilken beregningsmetode som stemmer best. SLBS gir likevel at det skal være ganske tydelig at sone 3 ryker først, mens FLBS gir at sone 1 (T15) og sone 3 har så lik restkapasitet at små, tilfeldige variasjoner kan påvirke resultatet. At 2/3 bjelker fikk brudd i sone 1 først, i motsetning til hva vi forventet ut fra beregningene, tyder dermed på at FLBS stemmer minst like godt som SLBS.

Beregning for testbjelkene med T22

Bjelke dimensjoner

Bredde [mm]

$$b := 90 \text{ mm}$$

Avstand fra en punktlast til nærmeste opplegg [mm]:

Antall tester i hver serie:

Høyde [mm]

$$h := 170 \text{ mm}$$

$$a := 6 \cdot h = 1020 \text{ mm}$$

$$n := 3$$

E-modul for materialene i de ulike sonene

Sone 3 (BauBuche GL70, omgjort til enkeltlameller):

$$E_3 := \frac{16700}{1.05} \frac{N}{\text{mm}^2} = 15904.762 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Sone 1 (T22):

$$E_1 := 13000 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Andel av tverrsnittshøyden i de ulike sonene

Sone 3 (GL70):

$$x_3 := \frac{40 \text{ mm}}{h} = 0.235$$

Sone 1 (T22):

$$x_1 := 1 - 2 \cdot x_3 = 0.529$$

Fordi mindre enn 2x27,3 % av tverrsnittet tilhører sone 3, vil FLBS gi mest konservativt resultat. (Se vedlegg A - Valg av antatt bøyespenningsfordeling)

Resultater fra beregninger og kapasiteteskontroll (tilsvarende som for T15) med antatt FLBS

Største karakteristiske opptredende spenning i sone 3 (GL70):

$$\sigma_{3,k} := 63.795 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Kapasitet i sone 3 (Iht data for BauBuche GL70):

$$f_{m.g.k.3} := 70 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Restkapasitet for sone 3 (GL70):

$$f_{m.g.k.3} - \sigma_{3,k} = 6.205 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{f_{m.g.k.3} - \sigma_{3,k}}{f_{m.g.k.3}} \cdot 100 = 8.864\%$$

Største karakteristiske opptredende spenning i sone 1 (T22):

$$\sigma_{1,k} := 33.775 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Kapasitet i sone 1: (Iht. NS-EN 14080)

$$f_{m.g.k.1} := 31.753 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Restkapasitet for sone 1 (T22):

$$f_{m.g.k.1} - \sigma_{1,k} = -2.022 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{f_{m.g.k.1} - \sigma_{1,k}}{f_{m.g.k.1}} \cdot 100 = -6.368 \%$$

Oppsummering, FLBS:

Sone 1 (T22) har overskredet kapasiteten, og bør dermed gå til brudd før sone 3 (GL70).

Resultater fra beregninger og kapasiteteskontroll (tilsvarende som for T15) med antatt SLBS:

Største opptredende spenning i sone 3 (GL70): $\sigma_{3,k} := 65.572 \frac{N}{mm^2}$

Kapasitet i sone 3
(Iht. data for BauBuce GL70): $f_{m.g.k.3} := 70 \frac{N}{mm^2}$

Restkapasitet for sone 3 (GL70): $f_{m.g.k.3} - \sigma_{3,k} = 4.428 \frac{N}{mm^2}$

$$\frac{f_{m.g.k.3} - \sigma_{3,k}}{f_{m.g.k.3}} \cdot 100 = 6.326\%$$

Største opptredende spenning i sone 1 (T22): $\sigma_{1,k} := 28.374 \frac{N}{mm^2}$

Kapasitet i sone 1:
(Iht NS-EN 14080) $f_{m.g.k.1} := 31.753 \frac{N}{mm^2}$

Restkapasitet for sone 1 (T22): $f_{m.g.k.1} - \sigma_{1,k} = 3.379 \frac{N}{mm^2}$

$$\frac{f_{m.g.k.1} - \sigma_{1,k}}{f_{m.g.k.1}} \cdot 100 = 10.642 \%$$

Oppsummering, SLBS:

Sone 1 (T22) har noe mer restkapasitet enn sone 3 (GL70), og sone 3 bør dermed få brudd først.

Analyse av videoer fra testene viste:

- T22A: sone 1 (T22) får brudd først
- T22B og T22C: sone 3 (GL70) får brudd først

Konklusjon

FLBS gir at bruddet skal komme først i sone 1 (T22), mens SLBS gir at bruddet bør komme i sone 3 (GL70) først. Dermed stemmer SLBS litt bedre med testresultatene enn FLBS, men den ene prøven (T22A) stemmer bedre med FLBS.

Oppsummering

På grunn av at testresultatene varierer er det vanskelig å si hvilken av beregningsmetodene som passer best. For testbjelkene med T15 stemmer FLBS faktisk noe bedre med testresultatene enn SLBS, mens for testbjelkene med T22 er det motsatt.

Dette tyder på at FLBS er en brukbar tilnærming til virkeligheten. Det kan også tyde på at FLBS er en bedre tilnærming desto større andel av tverrsnittet som består av bøkefinér. Dette stemmer også overens med teoretiske beregninger.

For sammensetninger med en liten andel bøkefinér gir imidlertid FLBS et mer konservativt resultat enn FLBS, ettersom tverrsnittssone 1 blir dimensjonerende for bøyefastheten. Dette er også tilfelle for testbjelkene med T22, hvor SLBS stemte noe bedre overens med testresultatene enn FLBS. Det er dermed til sikker side å anta FLBS også her, selv om tilnærmingen er mindre nøyaktig.

Vedlegg O – Kalibreringsbevis for laborieutstyret

Vedlegget er gjengitt med tillatelse fra Kjell Ingar Myrdal ved Norsk Treteknisk Institutt.

ICS
Instrument & Calibration Sweden AB



CALIBRATION CERTIFICATE

Issued by an Accredited Calibration Laboratory

CALIBRATION OF FORCE IN A UNIVERSAL TESTING MACHINE

Page 1 of 2

Certificate No: 1846NA03K

Edition 1

Date of calibration: 13/11/2018

Date of issue: 23/11/2018

Customer and Principal

NTI
Forskningsveien 3B
0373 Oslo
Norge

Calibrated object

Universal testing machine

Manufacturer MTS
Type 243.20T
Serial number 381623
Inventory number 23
Year of manufacture -
Software version -

Load cell

Manufacturer MTS
Type 661.20F-03
Serialnumber 94478
Inventory number -
Nominal force 100 kN
Calibrated unit kN

Force range 100 % 10 - 100 kN
Reading from Screen
Application of force Compressive load
Location of instrument Lab

Computer
Software ver: 5.8B
Additional Equip.
serial no: -

External condition

Room temp 20 ° C

Used references

ID number	Type	Serial number	Certificate	Last calibration
VV00-10	DOLI EDC 220	-	Calibrated with loadcell	-
KS00-84	Interface 1220AND-100kN	548652A	MTi8F004867-K05	Feb/ 2018
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-

Traceability

Used references are traceable to international standard or definition by SP, Borås and / or Häfner Gewichte GmbH, Oberrot, Germany

Method

ICS AB's method "ICS-K1", edition 3.2, is according to ISO 75001:2018, with the following changes. If needed the value from the standard instrument is recalculated by linear interpolation to obtain a value equivalent to an even result on the object.

Range

The calibration certificate is valid only for the combination of tensile instrument, load cell and calibrated force range stated under the heading of object.

Laboratories are accredited by the Swedish Board for Accreditation and Conformity Assessment (SWEDAC) under the terms of Swedish legislation. The accredited laboratory activities meet the requirements in SS-EN ISO/IES 17 025 (2000).

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

Instrument & Calibration Sweden AB
Box 28, Abjörngatan 1
SE-332 21 Gislaved Sweden

Tel: +46 (0)371-847 00
Fax: +46 (0)371-147 76
E-mail: info@icssweden.com
Web: www.icssweden.com

Vat.nr: SE556483638401
Org.Nr: 556483-6384
Bankgiro: 5908-2271
Postgiro: 638603-1

Page 2 of 2

Certificate No: 1846NA03K

Edition 1

Inspection of object condition

Inga anmärkningar.

Inspection of object construction

Inga anmärkningar.

Notes

0

Results

Compression reading [kN]	True force mean* [kN]	Uncertainty [± kN]	Relative accuracy [%]	Relative repeatability [%]	Class [7500-1]
10	10.007	0.012	-0.07	0.04	0.5
15	15.024	0.018	-0.16	0.07	0.5
20	20.031	0.024	-0.16	0.07	0.5
25	25.034	0.027	-0.14	0.04	0.5
30	30.037	0.032	-0.12	0.02	0.5
35	35.032	0.041	-0.09	0.07	0.5
40	40.036	0.043	-0.09	0.02	0.5
60	60.032	0.063	-0.05	0.00	0.5
80	80.033	0.085	-0.04	0.03	0.5
100	100.01	0.11	-0.01	0.04	0.5

*Mean value of three measurements.

The reported expanded uncertainty of measurements is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor K=2 which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%. The standard uncertainty of measurement has been determined in accordance with EAL's publication EA-4/02.

Maximum relative zero error [%]	Maximum relative resolution [%]
0.00	0.05

Classification of the object

The object meets the requirements in ISO 7500-1 utg.2. and ISO 5893 utg.2 for classes and forces declared below. The presented results for the classification according to ISO 5893 applies only to the requirements of the force.

Load cell Type	Measuring range [%]	Loading forces [kN]	Class Acc. to ISO 7500-1	Class Acc. to ISO 5893
661.20F-03	100	10 - 100	0.5	0.5

Calibrated by:



Christopher Augustsson

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

