



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2020 30 stp.

Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning (MINA).

Bruk av returtre i KL-tre-elementer.

Use of reclaimed wood in CL-timber elements.

Gunder Gunderson Trommald
Kristian Wik Amundrød

Forord

Denne oppgaven markerer slutten på studietiden ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Gunder Gunderson Trommald startet studietiden på Skogfag og går nå fordypning i trekonstruksjoner på REALTEK. Kristian Wik Amundrød har gått trekonstruksjoner på REALTEK hele veien. Vi er imidlertid komfortable med å skrive masteroppgaven for Institutt for Naturforvaltning og Skogfag da vi begge kjenner godt til næringen.

Da denne oppgaven ble nevnt i eksamensperioden høsten 2019, hadde vi allerede valgt hver vår oppgave på REALTEK innenfor konstruksjon. Vi var i midlertidig ikke seine med å slå en strek over de planene da denne oppgaven virket utrolig spennende.

Etter noen samtaler med forskjellige aktører og et lite forprosjekt på slutten av året 2019, skjønte vi at dette kunne bli en viktig oppgave både for treindustrieringen og miljøet. Vi håper derfor at denne oppgaven har blitt gjort tilstrekkelig grundig slik at treindustrien kan få nytte av den i fremtiden. Vi gleder oss til videre arbeidet med returvirke som konstruksjonsråstoff for fremtidige byggeprosjekter.

Det skal ikke legges skjul på at vi har dratt god nytte av tidligere praktiske erfaringer som Kristians svennebrev i tømmerfaget og Gunders praksis i møbelsnekkerfaget samt å ha to biler med henger disponible. Utfordringer vi har møtt, har løst seg ved rådgivning fra profesjonelle aktører og samarbeidspartnere; det virker som byggenæringen er klar for å ta enda et skritt inn i det grønne skiftet.

Vi vil takke Per F. Jørgensen i Vill Urbanisme for igangsettelse av prosjektet, Kristine Nore i Splitkon AS for teknisk rådgivning og materialer, Per Johannesen i Ragn Sells AS for tilrettelegging på avfallsmottakene, Ronny Bredesen i Dynea AS for rådgivning og tilrettelegging av trelim og pressing av prøver, Carlos Einar Myrebø og Andreas Stenstad i Norsk Treteknisk Institutt for lån av testapparater og hjelp til utføring av tester på elementene våre.

En stor takk til våre veiledere Anders Qvale Nyrud og Olav Albert Høibø for å ha klart mesterstykket å lose oss igjennom denne ekstreme tålmodighetsprøven det har vært å skrive master i koronatiden. Vi vil også takke dere ekstra, for medmenneskelighet og deres hyggelige vesen som har gjort det mulig for oss praktikere å få skrevet denne oppgaven.

Til slutt ønsker vi å takke alle som har hjulpet oss med oppgaveskrivingen.

Tack psamt Pskaal!

Ås, mai 2020

Kristian Wik Amundrød & Gunder Gunderson Trommald

Sammendrag

Det blir stadig større fokus på klima og miljø ved oppføring av nye bygg. Tre er et klimavennlig byggemateriale noe som har ført til mer interesse for trekonstruksjoner. I tillegg har nye materialer, som KL-tre, gjort det er mulig å sette opp store bygg i treverk. Byggenæringen er under press for å bli tilpasset sirkulærøkonomien. Tilgangen på trevirke som råstoff er jevnt over god, og kostnadene er forholdsvis lave i motsetning til andre byggematerialer. Dette kan være årsaker til at det er lite resirkulering av trevirke. I den grad trevirke blir gjenvunnet, skjer dette ved at returvirket blir fliset opp. Ved flising blir det gode vekt-styrke-forholdet til trevirke ødelagt, slik at flis er å betrakte som en degradering av råstoffet til konstruktive formål.

En mer gunstig måte å ta vare på trevirket som ressurs, er å gjenvinne så mye som mulig av treverket før det flises opp. Det er flere utfordringer knyttet til trevirket som leveres til avfallsmottakene, spesielt med hensyn til skader og forurensninger. Det er generelt lite tilgjengelig informasjon om hvilke kvaliteter og typer treverk som kommer inn på avfallsmottakene.

Dette prosjektet har sett på muligheten for å gjenbruke returvirket før det blir fliset opp, som et råstoff i en KL-tre-produksjon. Prosjektet har hatt tre faser: (1) plukkanalyse, (2) produksjon og (3) testing. Med utgangspunkt i erfaringer fra plukkanalysen ble det laget et forsøksdesign der vi testet sju ulike typer KL-tre-elementer. KL-tre-elementene hadde identisk oppbygning, dvs. trelags-elementer med lamelltykkelse på 33,3mm. Returvirke ble i hovedsak benyttet som råstoff i midtlamellene. For å få et enhetlig opplegg, lagde vi også midtlameller med feil, som skulle tilsvare feil funnet på virke ved avfallsmottakene. Vi lagde også elementer med midtlameller av lavkvalitetstrelast, 6.-sort. KL-tre-elementene ble testet, og sammenlignet med KL-tre-elementer fra Splitkon AS.

Kapasiteten til elementene ble testet i en global nedbøyningstest og en rulleskjærtest. Testresultater ble analysert i statistikkprogrammet JMP, og resultatene tyder på at returvirke kan være egnet som råstoff i en KL-tre-produksjon. Det er tilgang på returvirke med gode kvaliteter på avfallsmottakene, med det er utfordringer knyttet til forurensning og skader på virke fra røff behandling fra byggeplassene. Returvirke viste seg å ha god styrke i nedbøyningstester, selv om skadet virke ble brukt. Rulleskjærfasthet ble redusert ved bruk av skadet returvirke og smale midtlameller. Når midtlamellene ble laget av kvistrik trelast med lav densitet, dvs. 6.-sortiment økte rulleskjærfastheten.

Abstract

There is an increasing focus on environment and sustainability when constructing new buildings. Wood is a climate-friendly building material, and recently we have seen an increased interest in wooden structures. Furthermore, new materials, such as cross laminated timber (CLT), has made it possible to construct large buildings in wood. The construction industry is under pressure to adapt to the circular economy. The supply of wood based fiber and logs is sufficient, and the costs are relatively low in contrast to other building materials. This may be the reason for the low percentage of recycling of wood and solid wood products. When recycled, the wastewood is chipped and the high weight-strength ratio of the wood is destroyed in the sense that chips are regarded as a degradation of the raw material for constructive purposes.

A better way to conserve the wood as a resource is to recycle as much of the wood as possible before it is chipped. There are several issues challenges related to the properties of the wood delivered to the Waste Disposal Sites, in particular damage and contaminants. There is scarce information available about the quality and what kind of wood entering the Waste Disposal Sites.

This project has been focused on recycling solid wood, i.e. prior to chipping, as a raw material in a CLT production. The project went through three phases: (1) on-site mapping at Waste Disposal Site, (2) production and (3) testing. Based on experience from the initial mapping, an experimental design was made in which we tested seven different types of CLT elements. All CLT elements had the same structure, three-layers with lamellae thickness of 33.3mm. Recycled wood was mainly used as raw material in the middle lamellae. In order to obtain a uniform arrangement, we also made center lamellas with defects, which should correspond to defects found on timber at the Waste Disposal Sites. We also made elements with low quality center lamellas, sideboards of quality 6 according to Nordict Timber Grading Rules. The CLT elements made in laboratory settings were tested and compared with CLT elements from Splitkon AS.

The capacity of the elements was tested in a global deflection test and a rolling shear test. Test results were analysed in the statistics program JMP, and the results indicate that recycled wood may be suitable as raw material in a CLT production. There is good access to recycled wood of sufficient qualities at the Waste Disposal Sites, but there are challenges associated with containments and damage to timber from rough treatment at the construction sites. Recycled wood was found to have good strength in deflection tests, although damaged timber was used. Rolling shear strength was reduced by the use of damaged recycled wood and narrow center lamellae. When the center lamellae were made of low density boards with many big knots, the roller shear strength increased.

Innholdsfortegnelse

Forord.....	II
Sammendrag	III
Abstract	IV
Innholdsfortegnelse	V
Figurer	VIII
Tabeller	X
1. Innledning og problemstilling	1
1.1 Bakgrunn og hensikt.....	1
1.2 Avgrensing og problemstilling.....	6
2. Teori	7
2.1 Trevirke som byggemateriale.....	7
2.2 KL-tre	7
2.2.1 Elementtyper.....	8
2.3 E-modul og rulleskjær	9
2.4 Lim	11
3. Materiale og metode	12
3.1 Materiale	13
3.1.1 Forprosjekt/plukkanalyse.....	13
3.1.2 Returvirke og handelsvirke.....	14
3.1.3 Registering av returvirke	15
3.2 Bearbeiding	16
3.2.1 Bearbeiding av lamellene	16
3.2.2 Kontrollert tverrsnittreduksjon	18
3.2.3 KL-tre-elementene	19
3.2.4 Liming/pressing	22
3.3 Nedbøyingstest.....	25
3.4 Rulleskjærtest.....	26
4. Resultater	29
4.1 Forprosjekt	29
4.2 E-modul	29
4.3 Rulleskjærfasthet.....	32
5. Diskusjon	38
5.1 Forprosjekt	38
5.2 E-modul	38
5.3 Rulleskjærfasthet.....	39
6. Konklusjon.....	41

7. Videre arbeid.....	42
Referanser	43
Vedlegg A: Håndberegninger	45
E-modul	45
Rulleskjærfasthet.....	46

Figurer

Figur 1-1: Krona og Verket (Glosli, 2018), (foto: Håkon Sparre).	1
Figur 1-2: Skipet i Bergen, (foto: MIR AS – Paal Kahrs Arkitekter – Holon AS, Byggherre GC Rieber Eiendom AS)	2
Figur 1-3: Lineær økonomi, (Nilsen, 2020).	2
Figur 1-4: Sirkulær økonomi, (Nilsen, 2020).	3
Figur 1-5: Avfallshierarki/avfallspyramiden, (LOOP, 2018).	4
Figur 1-6: Avfall fra bygg- og anleggsbransjen, 2017 SSB.	5
Figur 1-7: Gjenvinningsgrad av ulike materialer, 2017 SSB.	5
Figur 2-1: Fremstilling av langsgående, radiell og tangentiell retning på en planke, figur inspirert av (Bergman et al., 2010).	7
Figur 2-2: Kantstilt element, (Aarstad et al., 2006).	8
Figur 2-3: Krysslågt element, (Aarstad et al., 2006).	8
Figur 2-4: Hulromelement, (Aarstad et al., 2006).	8
Figur 2-5: Belastning – deformasjon graf, (σ = påført spenning, ϵ = relativ deformasjon).	9
Figur 2-6: Hunton sin I-bjelke (Hunton, 2020).	10
Figur 2-7: Skjærdeformasjon av KL-tre element, (Mestek et al., 2008).	10
Figur 2-8: Standard KL-tre-test for rulleskjær hvor F = punktlast, T_z =skjærspenning og G_z =skjærfastheten, figur inspirert av (Ehrhart et al., 2015).	11
Figur 3-1: Generell oppbygging av KL-tre-elementene.	12
Figur 3-2: Tverrsnitt av KL-tre-elementene.	12
Figur 3-3: Fremgangsmåte for materiale og metode	12
Figur 3-4: Ren asfalt med god drenering på avfallsmottaket til Ragn Sells i Moss.	14
Figur 3-5: Møkkete avfallsmottak med mye vann stående på avfallsmottaket til Ragn Sells Gardermoen.	14
Figur 3-6: Uttak av returvirke på avfallshåndteringsplass hos Ragn Sells i Moss.	15
Figur 3-7: Stabel med styrkesortert returvirke, E-modul målt med Brookhois markert i endeveden.	16
Figur 3-8: Metallsøking i returvirke før høvling.	17
Figur 3-9: Tykkelseshøvling av returvirke.	17
Figur 3-10: Boring av 76 mm hull sentrert i 98 mm bred lamell.	18
Figur 3-11: Fra venstre mot høyre - et element av type 4, tre elementer av type 3, tre elementer av type 2.	19
Figur 3-12: Vekt og volum ble målt for alle deler av KL-tre-elementene.	20
Figur 3-13: Skjematisk fremstilling av testoppbyggingen hvor smalt felt tilsvarer midtlamellbredde på 98 mm og et bredt felt midtlamellbredde på 198 mm. *Midtlameller er 152 mm brede.	21
Figur 3-14: Ferdig oppmålt mengde lim og herder.	23
Figur 3-15: Limpåføring.	24
Figur 3-16: 8 testelementer lagt i pressen.	24
Figur 3-17: E-modultest - opplagring og kraftpåføring.	25
Figur 3-18: Nedbøyningstest. Deformasjonsmåler er montert under prøven for global E-modul beregning.	26
Figur 3-19: KL-tre-elementenes oppdeling fra E-modultest til rulleskjærtest.	27
Figur 3-20: Rulleskjærtest - opplagring og kraftpåføring.	27
Figur 3-21: Rulleskjærtest.	28
Figur 4-1: Standardavvik og variansanalyse i hver elementtype.	30
Figur 4-2: Sammenheng mellom E-modul og densitet i strekksiden på KL-tre-elementene.	30
Figur 4-3: Sammenheng mellom E-modul og densitet i trykksiden på KL-tre-elementene.	31

Figur 4-4: Variansanalyse og standardavvik til rulleskjærfasthet av KL-tre-elementene.....	32
Figur 4-5: Positiv sammenheng mellom lamellbredde og rulleskjærfasthet.	33
Figur 4-6: Rulleskjærfasthet mot lamellbredde, inkludert KL-tre-elementer med hull på 24 mm.	34
Figur 4-7: Rulleskjærfasthet mot densitet midtsjikt, uten hull i midtlameller.	34
Figur 4-8: Rulleskjærfasthet mot densitet midtsjikt, med hull på 24 mm.	35
Figur 4-9: Rulleskjærfasthet mot densitet midtsjikt, med hull på 24 mm og 76 mm.	35
Figur 4-10: Rulleskjærfasthet mot predikert rulleskjærfasthet ($F=9,00$, $P=0,0035$, R^2 justert 0,52).....	36

Tabeller

Tabell 3-1: Formelbeskrivelser av anvendte formler	13
Tabell 3-2: Fargekoder til forskjellig kvaliteter.....	22
Tabell 4-1: Gjennomsnittlig E-modul for de ulike elementtypene.....	29
Tabell 4-2: Variansanalyse og parameterestimat hvor densitet i strekkside og trykkside påvirker E-modulen.	31
Tabell 4-3: Gjennomsnittlig rulleskjærfasthet for de ulike KL-tre-elementene.	32
Tabell 4-4: Tukey-Kramer-test som viser hvilke elementtyper som det er forskjell mellom. Like bokstaver betyr at det ikke er signifikant forskjell på 0,005% nivå. Ulike bokstaver betyr at det er signifikant forskjell på 5% nivå.....	33
Tabell 4-5: Variansanalyse og parameterestimat når både densiteten i midtsjiktet og lamellbredden i midtsjiktet er kjørt i samme analyse.	36
Tabell 4-6: Variansanalyse og parameterestimat når både densiteten i midtsjiktet og lamellbredden i midtsjiktet er testet i samme analyse. Her er ikke prøver med 76 mm hull med i modellen.....	37

1. Innledning og problemstilling

1.1 Bakgrunn og hensikt

Verden som vi kjenner den, er i endring og vi står overfor et paradigmeskifte. Klimakampen og overgangen til et mer bærekraftig samfunn har vært en av de store kampene de siste årene. I tillegg har vi nå kjent på problemene en epidemi kan skape. Siden den industrielle revolusjonen har forurensingen i verden økt kraftig, med byggebransjen som en av de største bidragsyterne innenfor forurensing og utslipp. I 2015 stod bygg- og anleggsbransjen alene for 40% av verdens klimagassutslipp (Dragland, 2015), en betydelig andel som er med på å tvinge frem store omveltninger i alle deler av bransjen.

Tre har vært det tradisjonelle byggematerialet i Norge. Fra lafting via bindingsverk, til dagens standardiserte bygningsmetoder, har det vært økonomisk å bygge mindre bygninger i tre. Etter den industrielle revolusjon endret metodene seg for hvordan man bygde; man gikk fra mindre byggverk til større, mer arealeffektive og økonomiske bygg. Stål ble enklere og billigere å produsere, et materiale med stor fleksibilitet som gjorde det mulig å bygge større bygninger. Etter flere katastrofale bybranner ble det også forbudt å bygge i tre i de større byene i Norge.

Tidlig på 90-tallet begynte man å se på måter å få utnyttet tømmerstokken fullt ut, noe som ble begynnelsen for massivtre som byggemateriale. Massivtre er samlebetegnelsen til ulike massive trekonstruksjoner. Grunntanken for å lage massivtre var et ønske om at virket som ikke passet inn i målene til standardiserte dimensjoner og utsorterte kantbord, ikke skulle gå til spille. Andre fordelere ved å bruke massivtre var blant annet et godt styrke-vekt-forhold, fleksibilitet med tanke på utforming, kort byggetid og en byggeprosess med lavt CO_2 -utslipp (Aarstad et al., 2006).

De siste årene har det vært flere større byggeprosjekter i Norge i massivtre, blant studenthjemmene Krona & Verket (Figur 1-1) på Ås, verdens høyeste massivtrebygning i 2014 og Skipet i Bergen (Figur 1-2), et kontorbygg.



Figur 1-1: Krona og Verket (Glosli, 2018), (foto: Håkon Sparre).



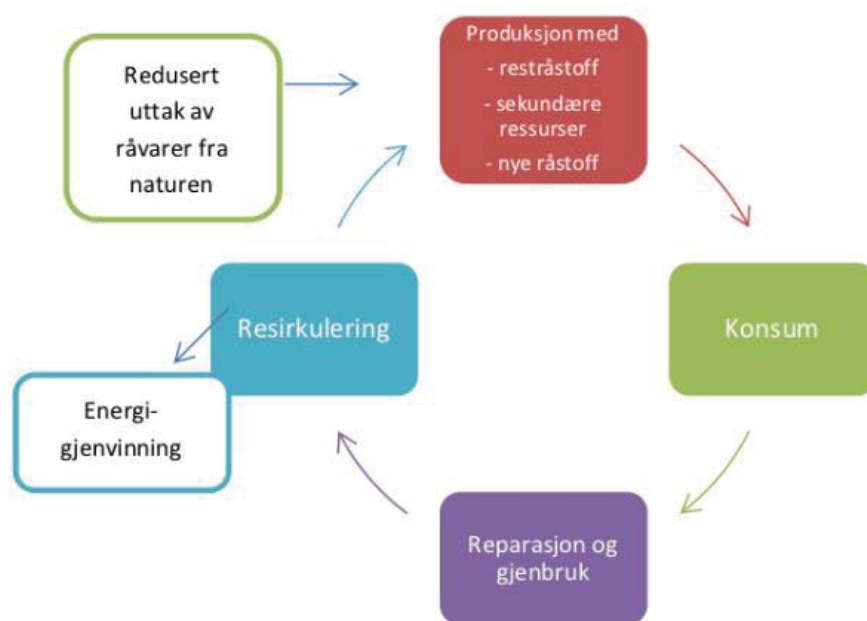
Figur 1-2: Skipet i Bergen, (foto: MIR AS – Paal Kahrs Arkitekter – Holon AS, Byggherre GC Rieber Eiendom AS)

Økonomien i Europa har vært preget av å være lineært bygget opp. Dette betyr at ressursene tas ut av naturen og videreforedles til produkter som forbrukes og til slutt kastes som avfall, jfr. Figur 1-3. Med dagens bærekraftige omveltninger og fokus sikter man mer mot en sirkulær økonomi, hvor fokuset er det motsatte fra den lineære økonomien med dens «bruk-og-kast»-mentalitet. I sirkulær økonomi fokuserer man på å ta vare på verdien av materialene vi omgir oss med (Boye, 2019), og at ressursene vi tar ut fra naturen brukes igjen på nye og flere måter, jfr. Figur 1-4. I 2015 løftet Europakommisjonen prinsippene om sirkulær økonomi inn i politikk-, nærings- og samfunnsliv på et europeisk og globalt nivå ved å vedta politikkpakken kalt «Closing the loop» (Nilsen, 2020; St. Meld. 45 (2016-2017)).

«Sirkulær økonomi er et økonomisk system som bygger på prinsipper fra sirkulære kretsløp i naturen. Det har som utgangspunkt at alle ressurser har en anvendelse og at det dermed ikke skapes avfall» (Nilsen, 2020).



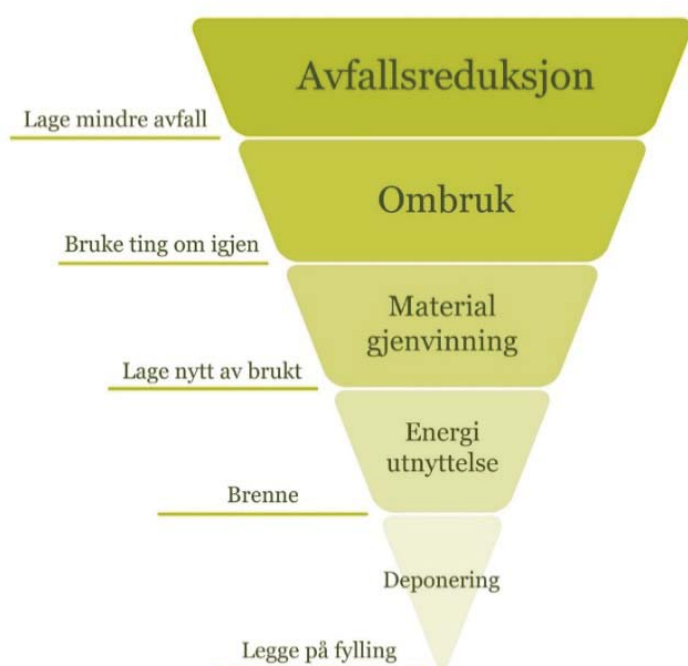
Figur 1-3: Lineær økonomi, (Nilsen, 2020).



Figur 1-4: Sirkulær økonomi, (Nilsen, 2020).

I en sirkulær økonomi står gjenbruk sterkt, og man forbinder ofte gjenbruk som en ny utnyttelse av et produkt som opprinnelig ble sett på som avfall. I følge Store norske leksikon (SNL) betyr gjenbruk: «...at ting som er blitt overflødig eller unødvendig brukes på nytt i stedet for å kastes, dette til forskjell fra gjenvinning som betyr at ting plukkes fra hverandre til råvarer og settes sammen igjen til et nytt produkt» (Rosvold, 2018). Det finnes flere eksempler på byggeprosjekter i dag hvor gjenvinning står sterkt, hvor man bruker materialer fra bygg som skal rives i nye bygg som skal bygges. For konstruksjonsdeler gjelder dette i hovedsak stål og betong.

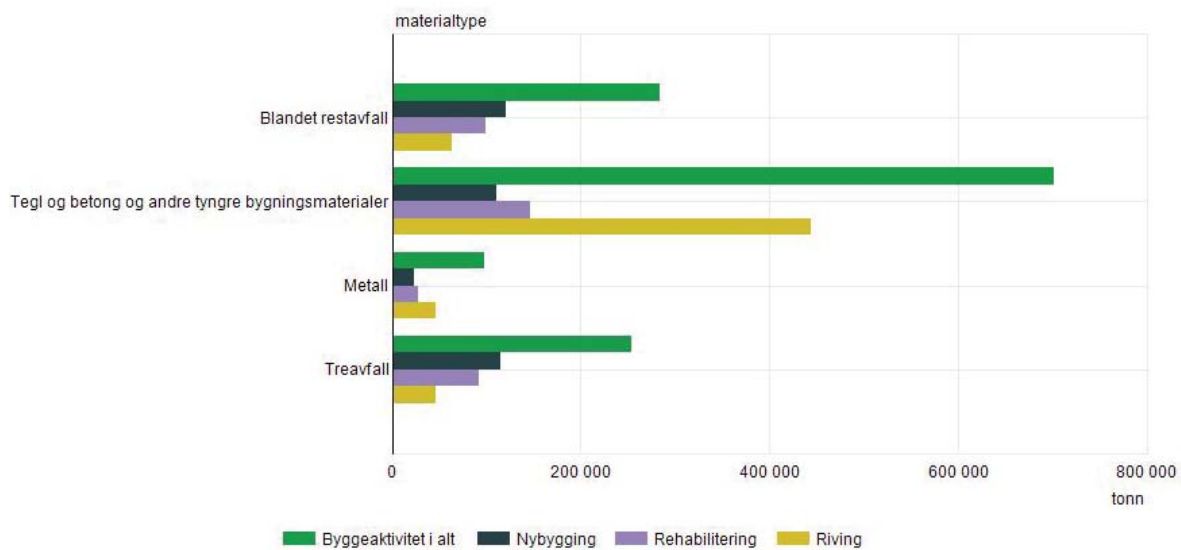
I dag kan bærende konstruksjoner av tre, som for eksempel takstoler og bjelker, gjenbrukes. Det stilles da krav til at treverkets opprinnelige kvalitet kan dokumenteres. For at opprinnelig kvalitet skal ivaretas er det nødvendig å bruke reversible festemidler som bolter og skruer. Bærende konstruksjonsdeler, som ikke kan dokumenteres eller satt opp slik at demontering fører til skader, kan ikke brukes som konstruksjonsdeler i nye bygg. Det kan midlertidig brukes som ikke bærende konstruksjoner hvis det festes mekanisk med skruer eller klikk-systemer (Leland, 2008). NS EN 16351:2015 tilsier at bruk av returvirke ikke er tillatt i KL-tre-produksjon, noe som gjør det vanskelig for industrien å imøtekomme fremtidens behov.



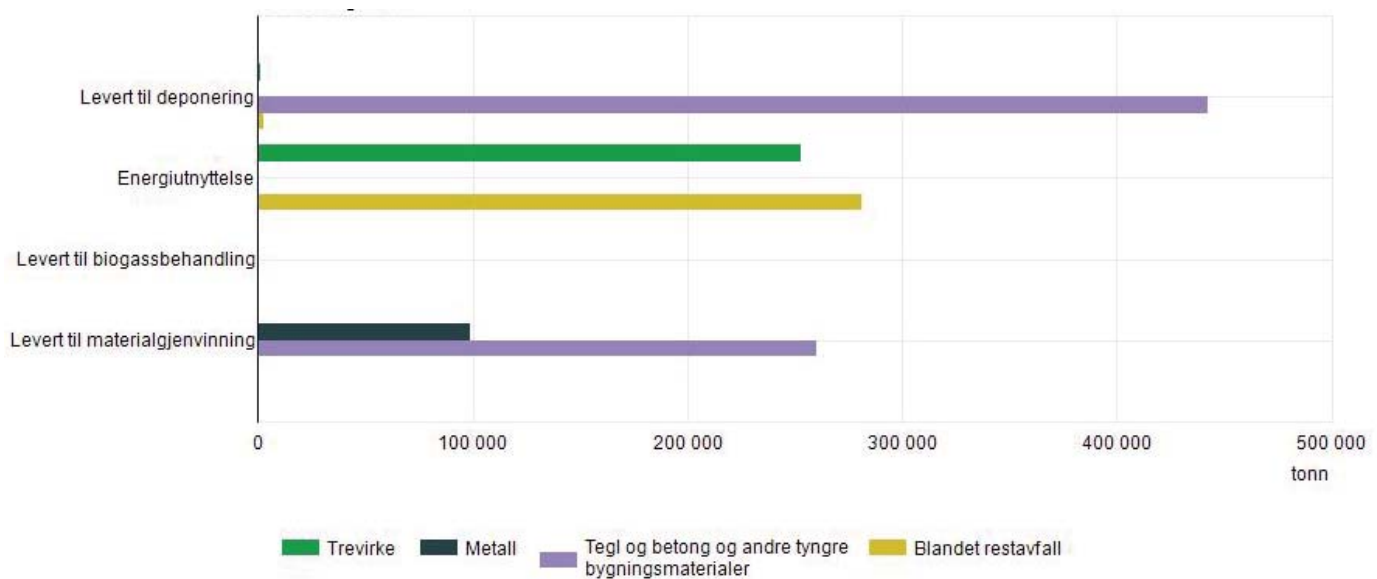
Figur 1-5: Avfallshierarki/avfallspyramiden, (LOOP, 2018).

Mål nummer 2 i avfallshierarkiet, eller avfallspyramiden, er gjenbruk/ombruk. Målet er å bruke produktene om igjen i stedet for å kaste dem (LOOP, 2018). Avfallshierarkiet/avfallspyramiden er en figur (Figur 1-5) som illustrerer prioriteringene i norsk avfallspolitikk og EUs rammedirektiv for avfall (THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL OF EU, 2008). Pyramiden skal leses fra øverst til nederst, og målet er at avfallet skal behandles så nært toppen som mulig (LOOP, 2018).

I følge Statistisk sentralbyrå ble det i 2017 levert om lag 11,7 millioner tonn med avfall til avfallshåndteringsplasser i Norge, hvor over 700 000 tonn av dette er tre-avfall (Statistisk sentralbyrå, 2020). Av dette igjen kom ca. 250 000 tonn fra bygg- og anleggsbransjen (Figur 1-6). I Figur 1-7 ser man gjenvinningsgraden til forskjellige materialer inkludert trevirke, som er angitt med grønn farge.



Figur 1-6: Avfall fra bygg- og anleggsbransjen, 2017 SSB.



Figur 1-7: Gjenvinningsgrad av ulike materialer, 2017 SSB.

EU diskuterer krav om gjenbruk i nye bygg, og har som mål å gjenbruke eller materialgjenvinne (Figur 1-5) 70% av avfallet fra byggenæringen innen 2020 (Sandved, 2018). Dette betyr at vi må finne nye, gode løsninger for å kunne gjenvinne trevirke med dets egenskaper, i stedet for det at blir energigjenvunnet.

Hensikten med denne oppgaven er å se om man kan bruke gjenvinningsmaterialer/ returvirket i KL-tre. Gjenvinning vil bidra til å gjøre valg av tre enda *grønnere* og mer miljøvennlig enn det er i dag, da vi kan klare å ta bedre vare på ressursene ved å bruke dem på nytt, gjenvinne og i andre bruksområder. Som nevnt over er det ikke i dag tillatt å bruke returmaterialer i KL-tre-produksjon. Ved en eventuell ny styrkesortering vil denne oppgaven være med på å diskutere om returvirke holder kvaliteter som er tilfredsstillende i en KL-tre-produksjon.

1.2 Avgrensing og problemstilling

Dette er en oppgave med mulige miljøgevinster dersom det viser seg at returvirke kan brukes i KL-tre-produksjon. Oppgaven ser imidlertid ikke på noen miljømessige perspektiv, unntatt noen refleksjoner vi, forfatterne, har gjort oss. Økonomien rundt plukk av returvirke er ikke sett på i denne omgang. Det viktigste vil være å undersøke om returvirke som råstoff er brukbart eller ikke.

Oppgaven ble satt i gang av Vill Urbanisme AS med tanke på sirkulærøkonomi. Splitkon AS var med som KL-tre produsent og rådgiver, og innsamlingen av returvirket ble gjort hos Ragn-Sells AS i Moss.

Videre bearbeiding av materialene ble gjort på snekkerverksted på TF Fløy 5 ved NMBU. Liming og pressing ble gjort i samarbeid med Dynea AS på Lillestrøm, og testing av KL-tre-elementene ble gjort hos Norsk Treteknisk Institutt (Treteknisk) i Oslo.

Returtre er spesielt egnet i midtsjiktet, da det er lange spenn som er begrensningen til KL-tre. I lange spenn er det ytterlamellene som får de største påkjenningene da det er trykk- og strekk- kapasiteten som blir dimensjonerende. Midtsjiktet til elementer med lange spenn vil fungere som et steg og kan betraktes på samme måte som andre typer bjelker. Splitkon kan levere elementer med spennvidder på 7,5 meter, mens tilsvarende elementer av betong kan ha spennvidde på 20 meter.

Etter konsultasjon med Splitkon ble det bestemt å se på skader relatert til hull i virket, ikke alle skader egner seg i Splitkon sin produksjonslinje, og det er enkelt å få laget en testoppbygning som sikrer gode gjentak KL-tre-elementene. På den måten vil vi kunne se om dårlige kvaliteter i returvirke kan ha en betydning for kapasiteten til KL-tre-elementer. Kvister står vinkelrett på fibrene og vi tror dermed at kvister kan armere mot rulleskjærkrefter. Fiberhelning øker rulleskjærkapasiteten og vi vil dermed også hente kapasitet i fiberhelning rundt kvisten. Dette vil bli testet i KL-tre-elementene ved bruk av 6.- sortiment fra sagbruk som har gått ut på grunn av stor kvistforekomst.

Problemstilling:

Kan returtre brukes som råstoff i midtsjiktet i en KL-tre produksjon?

Ut fra problemstillingen er det utarbeidet 3 hypoteser som vil bli testet i kapittel 4 og 5:

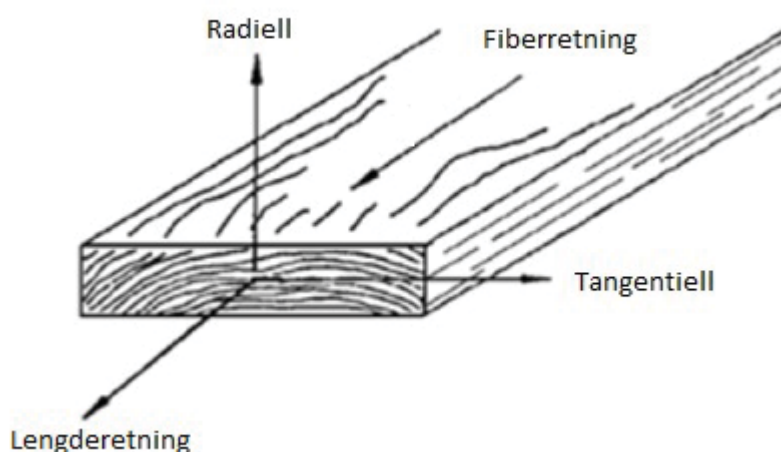
1. E-modulen blir i liten grad påvirket av kvaliteten til lamellene i midtsjiktet.
2. Rulleskjærfastheten til KL-tre blir påvirket av kvaliteten i midtsjiktet.
3. Rulleskjærfastheten til KL-tre vil øke ved bruk av kvistrikt virke i midtsjiktet.

2. Teori

2.1 Trevirke som byggemateriale

Tre er et ortotropisk materiale. Det vil si at det har forskjellige materialegenskaper i tre retninger som står vinkelrett på hverandre; parallelt med fibrene, tangentiell retning og radiell retning (Figur 2-1). Trevirke har mye større strekk- og trykkstyrke parallelt med fibrene enn vinkelrett på fibrene (Ehrhart et al., 2015). Ved dimensjonering regner en med like styrkeegenskaper i radiell og tangentiell retning (NS EN:338).

Siden det er så stor forskjell på styrkeegenskapene, parallelt og vinkelrett på fibrene, vil fiberforstyrrelser i lengderetning av planken føre til styrkereduksjon. Kvist er den viktigste årsaken til fiberforstyrrelser trevirke siden fibrene går rundt kvisten, (Bergman et al., 2010).



Figur 2-1: Fremstilling av langsgående, radiell og tangentiell retning på en planke, figur inspirert av (Bergman et al., 2010).

Egenskapene til veden i et tre kan variere fra tre til tre, men egenskapene kan også variere innad i treet. Et mindre tverrsnitt er mer utsatt for virkesfeil.

Den store variasjonen i trevirket medfører at trelast blir styrkesortert til karakteristiske styrkeverdier. Etter NS-INSTA 142:2009 (Standard Norge, 2009) og NS-EN 14081 (Standard Norge, 2016b) blir det sortert ut slik at bøyefastheten skal holde et visst nivå. Dette systemet er et 5%-fraktilsystem, det vil si at 95% av partiet skal ha en høyere reell styrke enn beregningsmessig antatt (Sagen, 1999).

2.2 KL-tre

Moderne massivtrehus tar utgangspunkt i gamle tradisjoner med laftede tømmerhus. I Skandinavia, Øst- og Mellom-Europa er laftehus velkjent. Fra laftede tømmerhus har utviklingen gått videre via reisverk til bindingsverk.

Tømmerhus og andre bygninger basert på massive trekonstruksjoner, gir en spesiell følelse av komfort. De følelsesmessige inntrykkene og akustikken kan være vel så viktig som trevirkets egenskaper i forbindelse med å jevne ut døgnvariasjoner i temperatur og relativ fuktighet (Kristensen, 1999)

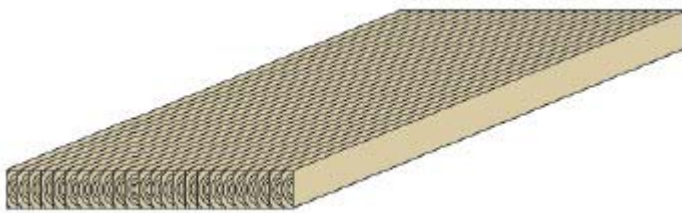
Utviklingen av KL-tre på 1990-tallet ble motivert av sagbruksindustrien ønske om å finne mer lønnsom bruk av sidebordene fra sagstokken. Kryssfinér var inspirasjonskilden til et formstabilt produkt på grunn av mindre svelling- og krymping i planet, forårsaket av lagene som ligger krysslågt og dermed gir en samvirke-effekt. Det unike med KL-tre er KL-treets store dimensjoner i planet, også tykkelsen, som gjør produktet anvendelig til frittstående konstruksjonselementer.

KL-tre gjorde det mulig å utvide bruksområdet for tre til områder som har vært forbeholdt stål- og betong. Når det gjelder arkitektur og prosjektering, ga dette nye muligheter for å realisere konstruksjoner og strukturer i tømmer (Brandner et al., 2016).

2.2.1 Elementtyper

Massivtre er en fellesbetegnelse for planker/lameller som er satt sammen til elementer ved hjelp av lim, skruer, spiker, tredybler eller stålstag. I dagligtalen blir ofte massivtre tolket som krysslagte elementer. De tre hovedtypene massivtre er kantstilte-, krysslagte- og hulroms-elementer (Aarstad et al., 2006).

Kantstilte elementer har som fellesnevner at lamellene settes sammen stående. Forbinderen i disse elementene er ofte dybler, skruer eller lim. Elementene består vanligvis av trevirke i fasthetsklasse C18 eller bedre (Skogstad, 2009). Den vanligste formen for kantstilte elementer er limtre som blir brukt som bjelker og dragere (se Figur 2-2).



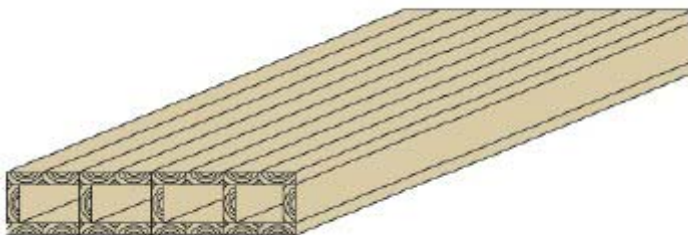
Figur 2-2: Kantstilt element, (Aarstad et al., 2006).

Krysslagte elementer er fellesnevner for elementer som har lameller lagt oppå hverandre i flere sjikt. Vanligvis ligger disse sjiktene 90- eller 45-grader i forhold hverandre (se Figur 2-3).



Figur 2-3: Krysslagt element, (Aarstad et al., 2006).

Hulromelementer finnes det forskjellige oppbygninger av, men det de har til felles er at de har hulrom mellom det øvre- og nedre sjiktet i elementet (se Figur 2-4).



Figur 2-4: Hulromelement, (Aarstad et al., 2006).

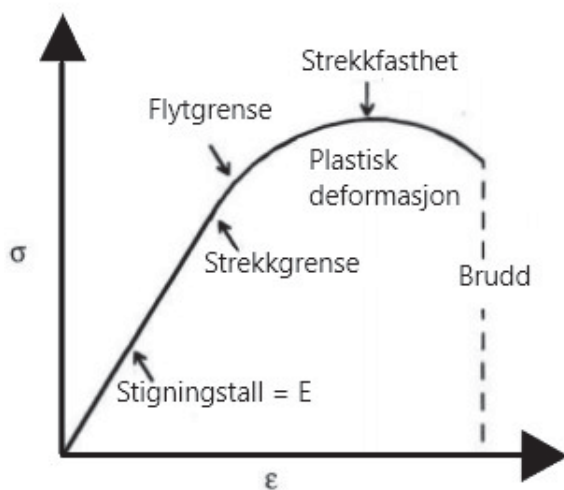
2.3 E-modul og rulleskjær

Trykkfastheten angir hvor mye spenning som kan påføres prøven vinkelrett eller parallelt med fibrene før det oppstår brudd. Spenninger ved brudd påført vinkelrett eller parallelt med fibrene, men som strekker prøven, angir strekkfastheten. I denne oppgaven forstås både trykkfasthet og strekkfasthet som spenninger parallelt med fibrene. Skjærfastheten angir hvor stor spenning som kan påføres før det oppstår brudd mellom fibrene. Bøyefasthet er en kombinasjon av trykk- og strekkfasthet (Skogstad, 2009).

Elastisitetsmodulen (E-modul) beskriver materialets stivhet, som et lineært forhold mellom spenning og relativ deformasjon. Et materiale som er fullstendig elastisk vil ikke ha noen deformasjon når kreftene fjernes fra legemet (Ormestad, 2018).

E-modulen kan brukes til å styrkesortere og klassifisere trevirke til en konstruksjonsfasthet. For eksempel har henholdsvis C18, C24 eller C30, et krav på E-modul over 9 000, 11 000 og 12 000 N/mm² parallelt med fibrene (Skogstad, 2009). Dette er i henhold NS-EN 338 (Standard Norge, 2016a).

Av Figur 2-5 kan vi se forholdet mellom belastning (σ) og deformasjon (ϵ). E-modulen er stigningstallet for linjen frem til proporsjonalitetsgrensen, altså der vi har et lineært forhold mellom belastning og deformasjon.



Figur 2-5: Belasting – deformasjon graf, (σ = påført spenning, ϵ = relativ deformasjon).

I NS-EN 408 er det oppgitt to måter å måle nedbøyningsdeformasjon på, en metode for global nedbøyning og en for lokal nedbøyning. Ved lokal nedbøyningstest henges en deformasjonsmåler i nøytralaksen i det skjærfrie belastningsområdet mellom belastningspunktene. For global nedbøyningstest settes en deformasjonsmåler på undersiden av bjelken. Både lokal og global testing krever at lengden på KL-tre-elementene må minimum være $(19 \pm 3) \cdot h$, hvor h representerer elementets høyde (Standard Norge, 2012).

Ved en nedbøyningstest hvor midtsjiktet er i fokus, er det naturlig å teste globalt. Denne nedbøyningstesten er også en mer konservativ testmetode, noe som er hensiktsmessig med tanke på at returvirke ikke er godkjent for bruk i KL-tre produksjonen. Derfor ble det i denne oppgaven ble valgt global deformasjonstest fordi midtsjiktets egenskaper vil ha en innvirkning på hvor stor nedbøyningen blir.

Ved å sammenligne nedbøyningen til KL-tre med nedbøyning av en bjelke, er det kjent at det er flensen tar opp normalkreftene og ikke steget. Midtsjiktet i KL-tre vil fungere som et steg og kvaliteter og feil her

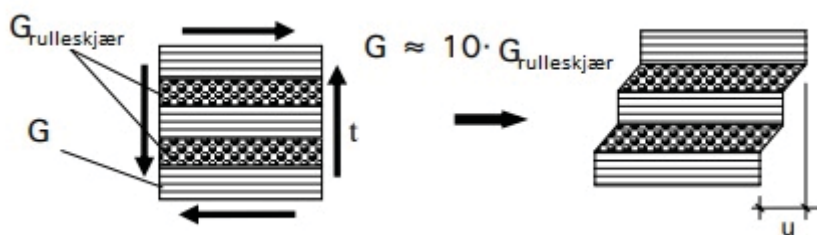
vil ikke påvirke E-modulen til elementet i betydelig grad. Det finnes andre typer byggematerialer som har den samme tankegangen, hvor steget er av dårligere kvalitet. Figur 2-6 viser Hunton sin I-bjelke, hvor steget ikke tar opp normalkrefter.



Figur 2-6: Hunton sin I-bjelke (Hunton, 2020).

Rulleskjær er et fenomen som oppstår i trevirke fordi fibrene ligger parallelt på hverandre. For å forstå hva som skjer, kan en forestille seg at fibrene betraktes som sugerør som ligger stablet på hverandre. Når disse blir påført en kraft parallelt med lengderetningen vil liten deformasjon vil oppstå. Om kraften imidlertid blir påført vinkelrett på lengderetningen vil sugerørene lett rulle over hverandre og vi får store deformasjoner i elementet.

KL-treets oppbygging kan ta opp krefter inn og ut av planet. Det er den ortogonale oppbygningen av lamellene som gjør at vi får skjærspenninger innad i elementene (Ehrhart et al., 2015). På grunn av rulleskjærets lave kapasitet, vil det være rulleskjærfastheten som blir dimensjonerende ved beregning av skjærdeformasjoner for bruddgrensetilstand (ULS) samt bruksgrensetilstand (SLS) (Mestek et al., 2008).

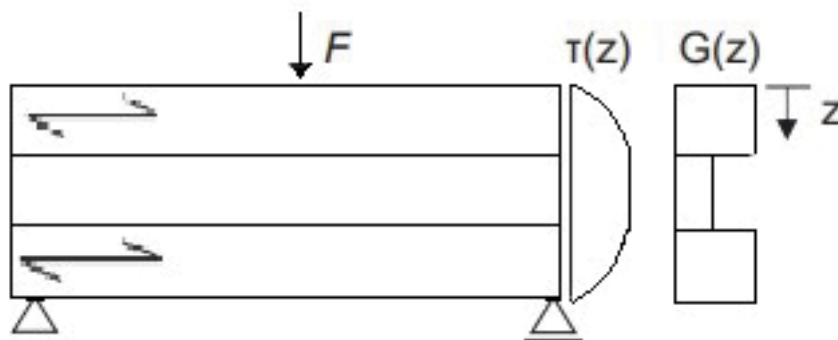


Figur 2-7: Skjærdeformasjon av KL-tre element, (Mestek et al., 2008).

Rulleskjærmodulen avhenger av forskjellige faktorer, spesielt har treslag mye å si (Ehrhart et al., 2015). For gran (*Picea Abies*) er det funnet et lite, positivt forhold mellom densitet og rulleskjær (Ehrhart et al., 2015).

For rulleskjærfastheten har det mye å si hvordan plankene blir tatt ut av tømmerstokken. Orienteringen av årringene, størrelse og geometri på tverrsnittet kan være av betydning (Gagnon, 2011). Bredden bør være fire ganger høyden for de tverrstilte lamellene, for å få tilstrekkelig kapasitet (Aarstad et al., 2006). For å øke rulleskjærfastheten er det imidlertid mulig å kantlime de tverrstilte lamellene. Ved

lamellbredder mindre enn fire ganger høyden blir rulleskjærfastheten begrenset til $1,4 \text{ N/mm}^2$ (Standard Norge, 2015).



Figur 2-8: Standard KL-tre-test for rulleskjær hvor F = punktlast, T_z =skjærspenning og G_z =skjærfastheten, figur inspirert av (Ehrhart et al., 2015).

Av Figur 2-7 ser man at det er størst skjærspenning (T_z) i midtsjiktet. Samtidig er skjærfastheten (G_z) lavest for midtsjiktet i trelags KL-tre-elementer. I denne undersøkelsen ble kun trelags KL-tre-elementer testet. Det betyr at en fikk de største skjærspenningene i de tverrstilte lamellene.

2.4 Lim

KL-treets egenskaper påvirkes av limets egenskaper. Limtypen har både betydning for brannegenskapene og elementets egenskaper i forbindelse med fuktpåkjenning.

De mest brukte limtypene er PU (polyuretan) og MUF (melamin urea formaldehyd). Disse har forskjellige egenskaper, spesielt med tanke på brann. PU er tradisjonelt det mest brukte limet i massivtreproduksjon, men har problemer ved branntekniske krav. MUF er et nyere type lim med egenskaper som tilfredsstiller den strengeste emisjonsklassen E1 med god margin. (Aarstad et al., 2006)

MUF lim er et tokomponent lim, der MUF-harpiks er den ene komponenten og den andre komponenten er herder. Den mest brukte herderen til produksjon av massivtre er maursyre. (Wester Plessner, 2012)

For å sørge for best mulig heftkvalitet når en produserer laminert trevirke, er det vesentlig at fuktighetsinnholdet i treverket skal være mellom 6 og 15%, med en maksimal fuktighetsforskjell mellom lamellene på 5% (Dynea, 2019).

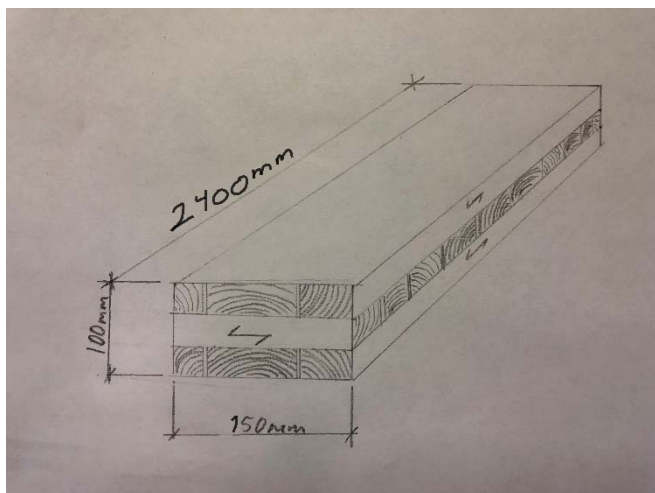
I industrien er det ønske om rask herdetid da det er økonomisk gunstig, men dette avhenger av brukstiden (pot-life) til limet. Dette styres ved lim/herder-forholdet, og mengde lim per kvadratmeter. Ønskes det enda raskere herding kan temperaturen økes.

Tid er en faktor som spiller inn på kvaliteten til limfugen, da herdingen starter så fort lim og herder har kontakt med hverandre. Lukketid er tiden man har fra lim og herder blandes til den må være påført elementet som skal limes. Limet er fullt herdet når pressetiden er utført. Pressetiden varierer med lim/herder-forholdet, der herderandelen avgjør hvor kort tid dette tar. Elementet må presses med et gitt trykk for å oppnå ønsket tykkelse på limfugen, under $0,1 \text{ mm}$. For bartrær er dette trykket $0,6 - 1,0 \text{ N/mm}^2$, mens for løvtrær er trykket $0,8 - 1,2 \text{ N/mm}^2$ (Dynea, 2019).

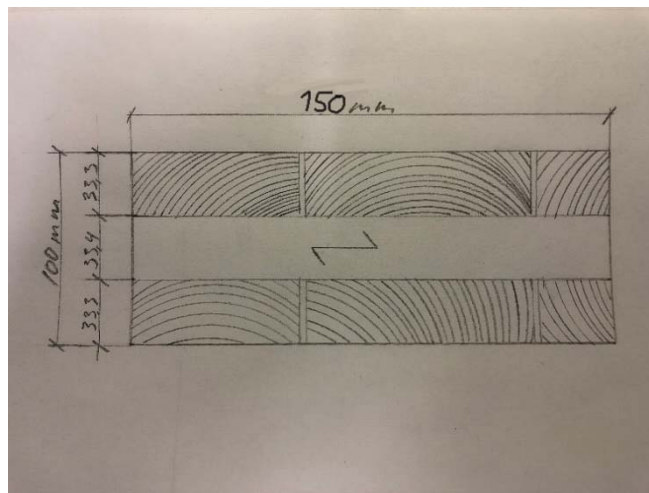
3. Materiale og metode

Det ble produsert og testet 7 ulike elementtyper med 3 gjentak av hver elementtype. De forskjellige elementtypene ble bygd opp med ulike lamellbredder og kvaliteter i midtsjiktet. For noen av elementtypene var det boret hull i det tverrstilte sjiktet for å simulere feil funnet på returvirke på avfallsmottaket.

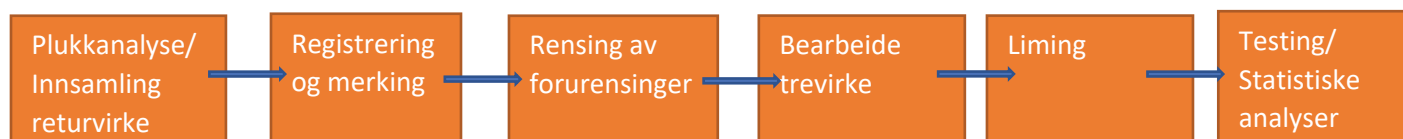
I Figur 3-1 og 3-2 er det skissert opp hvordan elementene skal se ut.



Figur 3-1: Generell oppbygging av KL-tre-elementene.



Figur 3-2: Tverrsnitt av KL-tre-elementene.



Figur 3-3: Fremgangsmåte for materiale og metode

For utregninger av E-modul og rulleskjær er det brukt formler hentet fra henholdsvis NS-EN 408: 2010 (Standard Norge, 2012) og NS-EN1995-1-1:2004 (Standard Norge, 2004). I Tabell 3-1 viser formlene for E-modul og skjærfasthet.

Tabell 3-1: Formelbeskrivelser av anvendte formler

Formel beskrivelse			
$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3(2\frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gb h})}$	a =	avstand mellom opplager og kraftpåføring	(mm)
	l =	elementets lengde	(mm)
	b =	bredde på elementet	(mm)
	h =	høyden på elementet	(mm)
	$w_2 - w_1 =$	deformasjon	(mm)
	$F_2 - F_1 =$	kraftpåføring	(N)
	G =	skjærfasthet	(N/mm ²)
	NS-EN 408: 2010 (Standard Norge, 2012)		
$\tau_d = \frac{1,5 V}{bh_{ef}}$	V =	kraftpåføring	(N)
	b =	bredde på elementet	(mm)
	$h_{ef} =$	effektiv høyde	(mm)
	NS-EN1995-1-1:2004 (Standard Norge, 2004)		

3.1 Materiale

3.1.1 Forprosjekt/plukkanalyse

En plukkanalyse ble gjort på avfallsmottakene til Ragn Sells på Gardermoen og i Moss. Vi fikk dermed en oversikt på tilgangen og muligheter for tilrettelegging av plukking av returvirket.

Returvirket ble hentet på avfallsmottaket i Moss da dette var den reineste og mest oversiktlige avfallsplassen. Lastebilene til Ragn-Sells startet å tømme containere hentet fra anleggsplasser to dager før vi skulle plukke returvirket. For å forhindre forurensninger og ytterligere skader ble returvirket tippet utover en ren og tørr asfaltert plass uten at avfallshåndteringsmaskiner håndterte virket.

I Figur 3-3 ser vi tipplassen i Moss som er forholdsvis rein. I Figur 3-4 ser vi utfordringer med dårlig drenering og mye forurensninger på tipplassen på Gardermoen.



Figur 3-4: Ren asfalt med god drenering på avfallsmottaket til Ragn Sells i Moss.



Figur 3-5: Møkkete avfallsmottak med mye vann stående på avfallsmottaket til Ragn Sells Gardermoen.

3.1.2 Returvirke og handelsvirke

Fra avfallsmottaket ble det hentet dimensjoner på 48mm x 98mm og 48mm x 198mm i gran. Det ble lagt vekt på å ta virke med lite forurensninger, og lengder over 1,5 meter. Dette virket ble plukket før maskinene på avfallsmottaket hadde håndtert det.

Returvirke ble plukket i en periode hvor temperaturen lå rundt 0 til -5 grader. Virket ble plukket når det var oppholdsvær for å unngå fuktighet i virket.

Returvirke som var skrudd sammen, ble skrudd fra hverandre eller kappet ut med bajonettsag.

Figur 3-1 viser eksempler på hvordan returvirket så ut og hvordan uttak av lengder over 1,5 meter ble plukket.



Figur 3-6: Uttak av returvirke på avfallshåndteringsplass hos Ragn Sells i Moss.

Materiale til ytterlamellene ble hentet hos Splitkon. Disse materialene var produsert hos Moelven Numedal AS og Begna Bruk AS. Til ytterlamellene ble det hentet styrkesorterte materialer i klasse T22 i dimensjon 36 mm x 152 mm. Midtlamellene som ikke skulle være av returvirke, ble hentet hos Splitkon. Styrkeklassen var T15 og dimensjonen 36 mm x 152 mm. 6. sortiment uten dokumentert styrke ble også hentet hos Splitkon. Dette ble styrkesortert visuelt etter NS-INSTA 142.

3.1.3 Registering av returvirke

Fuktigheten til returvirket ble målt med en hammerelektrode. Virket som holdt under 12% fuktighet ble sortert ut til bruk i forsøket.

Styrkesorteringen av returvirket ble gjort ved en kombinasjon av visuell og maskinell sortering. Den maskinelle sorteringen ble gjort med Brookhuis resonans hammer (Brookhuis, 2020), her ble E-modulen lest direkte ut fra programvaren på datamaskinen. Den visuelle sorteringen ble gjort etter NS-INSTA 142 (Standard Norge, 2009). Det var nødvendig å gjøre en visuell sortering i tillegg til maskinsorteringen, siden sprekker og skader på virket ikke nødvendigvis gir utslag på Brookhois hammeren. Returvirke som holdt mer enn 11 500 N/mm² i E- modul, dvs. en C24 klassifisering ble brukt i elementene som skulle testes. I Figur 3-7 ser vi stabelen med styrkesortert returvirke, oppå stabelen ligger Brookhois styrkesorteringshammeren.



Figur 3-7: Stabel med styrkesortert returvirke, E-modul målt med Brookhois markert i endeveden.

3.2 Bearbeiding

3.2.1 Bearbeiding av lamellene

Før lamellene skulle høvles, måtte det være reint for forurensninger som kunne skade høvelstålet. Spiker, skruer, stifter og metallgjenstander ble fjernet med kubein, hammer eller drill. Småstein og betongrester ble skrapet vekk. Det som ikke lot seg fjerne ble kappet ut.

En håndholdt metalledetektor ble brukt for å kontrollere at returvirke var fritt for metallrester. Det viste seg at det fremdeles var noe gjenværende metall og forurensninger som var vanskelig å få øye på. Disse ble også kappet ut da dette var metallrester som satt inni treverket. Figur 3-2 viser metallsøking med en enkel håndholdt metalledetektor.



Figur 3-8: Metallsøking i returvirke før høvling.

Etter denne prosessen var det ca. 80 meter med 48 mm x 98 mm og ca. 30 meter 48 mm x 198 mm returvirke klart til høvling.

Returvirke og handelsvirke skulle nå høvles ned til en 33 mm tykkelse. Den siste finhøvlingen ned til en 33,3 mm tykkelse ble spart til samme dag som elementene skulle settes sammen og limes.

Tykkelseshøvelens begrensning var på 3 mm reduksjon. Derfor ble virket høvlet flere ganger på hver side. Figur 3-3 viser tykkelseshøvling av en 198mm bred returplanke i gulvstående tykkelseshøvel.



Figur 3-9: Tykkelseshøvling av returvirke.

3.2.2 Kontrollert tverrsnittreduksjon

Hullene som ble valgt var 24 mm og 76 mm i diameter. 24 mm store hull skulle representere trekkerør i vegger, større skruer, betongplugg og lignende. Dette er skader som er vanlig å finne i virke på avfallsmottaket.

Det kan tenkes at det kan komme virke med enda større hull fra avløpsrør, ventilasjon eller andre tekniske gjennomføringer. Vi valgte derfor også å lage prøver med store hull på 76 mm i diameter. Hullene ble boret med en gulvstående søylebormaskin før siste finhøvling.

Figur 3-5 viser boring av 76 mm hull før høvling. Her bores det ut en rekke hull i en 98 mm bred returplank. Alle disse prøvene skulle ligge 90 grader på KL-tre-elementet slik at de etter høvling måtte kappes i 150 mm lange lengder. For å få lange nok prøver ble sagsnittet målt inn.



Figur 3-10: Boring av 76 mm hull sentrert i 98 mm bred lamell.

For å kunne sammenligne like store hull med forskjellige bredder på lamellene, ble det boret like mange hull per testelement uansett bredde på lamellene. Det vil si at annenhver lamell a 98 mm bredde fikk ett hull, og hver lamell a 198 mm bredde fikk et hull. Lamellene som det ble boret hull i ble valgt ut tilfeldig

uavhengig av den målte E-modulen til lamellen. Elementene blitt laget ut fra en stabel av plank hvor øverste planke ble brukt først til element 1-1 osv.

Under i Figur 3-11 synes et lite utvalg av midtsjiktet til de forskjellige KL-tre-elementene og hvordan midtsjiktet ble lagt opp før transport til Lillestrøm for liming og pressing.



Figur 3-11: Fra venstre mot høyre - et element av type 4, tre elementer av type 3, tre elementer av type 2.

3.2.3 KL-tre-elementene

Ifølge NS-EN 408 (Standard Norge, 2012) skal lengden til KL-tre-elementene for testing av E-modul være 19 ganger høyden på KL-tre-elementene. Av disse ble det tatt ut 2 rulleskjærprøver av hvert testelement etter at testing av E-modul var gjennomført, (Figur 3-19). Lengde til rulleskjærprøvene var 9 ganger høyden i henhold til NS-EN 16351:2015 (Standard Norge, 2015).

KL-tre-elementene ble i hovedsak fordelt på to grupper, elementer med 198mm brede lameller og elementer med 98 mm brede lameller. For hver av disse gruppene ble det testet elementer som hadde midtsjikt uten hull og elementer med 24 mm hull og 76 mm hull i midtsjiktet.

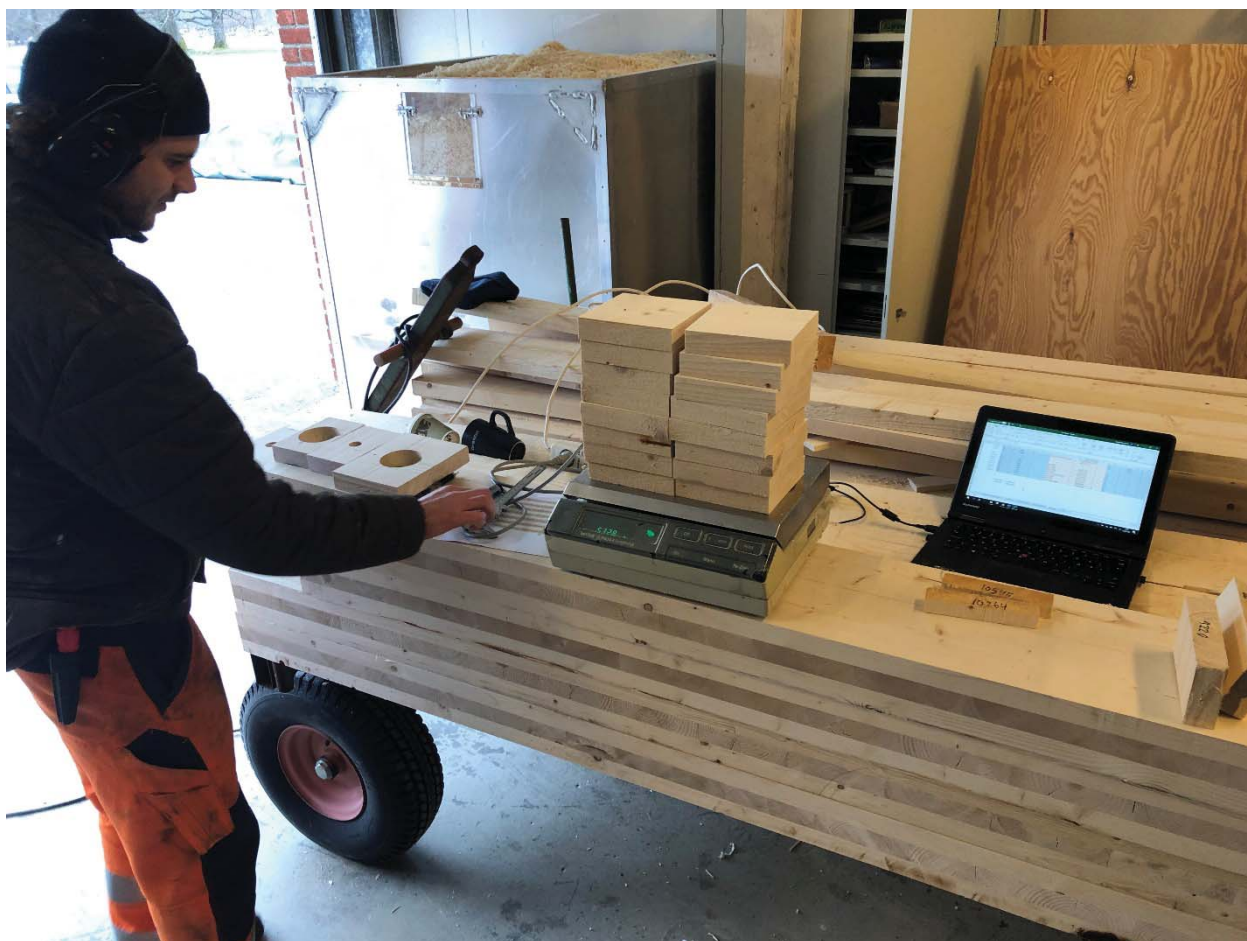
Det ble også laget KL-tre-elementer hvor midtsjiktet ikke var av returvirke, men T15 virke eller 6.-sort. T15 kvalitet i midtsjiktet ble brukt for å kunne sammenligne vår elementproduksjon mot Splitkons produksjon. 6.-sort ble brukt som midtsjikt for å se om kvist kunne armere mot rulleskjærbrudd.

Et fabrikkprodusert element fra Splitkon ble delt opp i like dimensjoner som våre testelementer for kontroll.

Da midtsjikt-lamellene hadde fått riktige hull og høvlet til riktige dimensjon, kappet vi ut nok biter på 150 mm lengde til midtsjiktet til KL-tre-elementene.

Densitet ble målt for hver ytterlamell og midtsjikt etter at de var kappet ut. Alle prøvene holdt relativ lik fuktighet, og utregnet densitet baserte seg på registrert volum og vekt til prøvene rett etter de ble kappet ut. I Figur 3-12 ser man vektmåling av et midtsjikt som har blitt kappet til riktige lengder. For prøver som har hull i midtsjiktet ble dette volumet trukket ifra ved densitetsberegningene.

Elementene ble høvlet og kappet i riktige lengder om morgenen på Ås, før de ble kjørt til Dynea på Lillestrøm for liming på ettermiddagen.



Figur 3-12: Vekt og volum ble målt for alle deler av KL-tre-elementene.

Det ble produsert 3 eksemplarer av hver elementtype. Under er de ulike kvalitetene fargekodet og oppbygningen av KL-tre-elementene er skjematisk fremstilt.

Figur 3-13 viser en skjematisk fremstilling av de forskjellige KL-tre-elementtypene, som blir forklart i Tabell 3-2. Fremstillingen viser alle ytterlamellene med T22 kvalitet. Midtlamellbreddene er delt opp i to kategorier, 98 mm lameller og 198 mm lameller. Fargekodene til midtlamellene i Figur 3-13 er forklart i Tabell 3-2.

Eksempelvis har KL-tre-elementtype 3 smale midtlameller (98 mm), bestående av midtlameller med tallkode 1 og 2, som vil si ubehandlet returvirke og returvirke med ett sentrert hull på 24 mm.

Eksempelvis har KL-tre-elementtype 4 har brede midtlameller (198 mm), bestående av midtlameller med tallkode 2, som vil si ubehandlet returvirke ett sentrert hull på 24 mm.

Oppbygningen til midtsjiktet er gjort på en slik måte at senteravstanden mellom alle hull, uansett hulldiameter og bredde på lamell, alltid er den samme ± 4 mm.

Midtsjiktets oppbygning gjør at senteravstanden til hullene til KL-tre-elementer med samme hulltype blir den samme.

KL-tre-element 1

T22 fra Splitkon

Returtre

T22 fra Splitkon

T22																			
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T22																			

KL-tre-element 2

T22 fra Splitkon

Returtre

T22 fra Splitkon

T22																			
1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3
T22																			

KL-tre-element 3

T22 fra Splitkon

Returtre

T22 fra Splitkon

T22																			
1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
T22																			

KL-tre-element 4

T22 fra Splitkon

Returtre

T22 fra Splitkon

T22																			
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
T22																			

KL-tre-element 5

T22 fra Splitkon

Returtre

T22 fra Splitkon

T22																			
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
T22																			

KL-tre-element 6 *

T22 fra Splitkon

6.sortiment

T22 fra Splitkon

T22																			
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
T22																			

KL-tre-element 7

T22 fra Splitkon

Returtre

T22 fra Splitkon

T22																			
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T22																			

Egenprodusert kontroll*

T22 fra Splitkon

Returtre

T22 fra Splitkon

T22																			
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
T22																			

Figur 3-13: Skjematisk fremstilling av testoppbyggingen hvor smalt felt tilsvarer midtlamellbredde på 98 mm og et bredt felt midtlamellbredde på 198 mm.

*Midtlameller er 152 mm brede.

Tabell 3-2: Fargekoder til forskjellig kvaliteter.

1: Returvirke, ubehandlet.
2: Returvirke med ett sentrert hull, Ø24 mm.
3: Returvirke med ett sentrert hull, Ø76 mm.
4: T15/22 fra Splitkon 152mm brede lameller.
5: 6.sortiment fra Splitkon, pga. kvist 152 mm brede lameller.

3.2.4 Liming/pressing

Melamin Urea Formaldehyd (MUF) lim, men med mindre herdermengde enn hva som brukes hos Splitkon ble brukt til å lime KL-tre-elementene. Det ble brukt mindre herder enn hva Splitkon bruker, for å få tid til å påføre limet og manuelt legge lamellene i limpressen.

Fire deler lim per del herder var blandingsforholdet som ble brukt i forsøket. Dette ga en brukstid til limet på 90 minutter før prøvene ble trykksatt.

Liming for hånd, ulikt forhold mellom herder og lim og en annen type presse skaper noe usikkerhet med vår produksjon av elementer kontra Splitkons produksjon.

Denne usikkerheten ble kontrollert ved elementtype «Egenprodusert kontroll» (E).

Det ble brukt en lim-herder-mengde tilsvarende 300 gram per kvadratmeter. Lim og herder ble målt opp for hver lamell på forhånd. Dette ble blandet rett før påføring slik at limet alltid var nyblandet for hver påføring. Ytterlamellene ble påført lim og midtsjiktet ble lagt på bunnlamellen før topplamellen ble lagt på. Kapasiteten til pressen begrenset antallet til 8 elementer per pressing. Det ble brukt ca. 4 minutter i snitt til å lime hvert element, som betød at 8 elementer ble limt på ca. 30 minutter. Deretter ventet vi 15 minutter for at alle prøvene skulle få noe lukketid før press ble satt på.

I Figur 3-14 ser vi riktig mengde lim og herder oppmålt for hver lamell som skulle limes. Dette ble blandet rett før limpåføring.



Figur 3-14: Ferdig oppmålt mengde lim og herder.

Pressen hos Dynea AS er spesiallaget med 14 stempler som presser med en flate på 15 cm bredde og 25 cm lengde. Hvert enkelt stempel kan stilles inn til ønsket trykk. Hos Splitkon presses elementene med et trykk på $0,8 \text{ N/mm}^2$, derfor er det valgt å presse med samme trykk ved dette forsøket. Ved pressing er det viktig å se at det kommer ut like mye lim på de første prøvene som de siste som går inn i pressen, for å se at limet ikke har herdet før pressetrykket settes på. Ved vår blanding og innenfor 45 minutter så det veldig jevnt og fint ut. Pressetrykket ble opprettholdt fra ettermiddagen og over natten, før prøvene ble tatt ut på morgenen. Prøvene lå i press i om lag 16 timer.

Under ser vi limpåføring av en ytterlamell (Figur 3-15). I Figur 3-16 ser vi maksimal utnyttelse av Dynea sin presse med 8 elementer a 100 mm høyde.



Figur 3-15: Limpåføring.



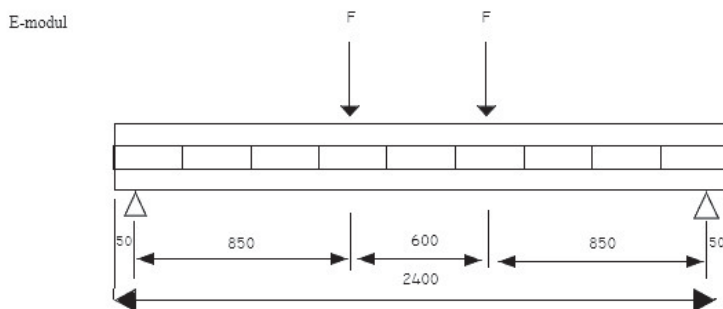
Figur 3-16: 8 testelementer lagt i pressen.

3.3 Nedbøyingstest

Elementene ble fraktet til Norsk Treteknisk Institutt to dager før selve testen, og lagt i et klimarom for akklimatisering.

I denne undersøkelsen ble E-modulen testet globalt. Figur 3-17 og Figur 3-18 viser oppsettet for deformasjonstesten. Figur 3-18 viser hvordan deformasjonsmåleren sitter plassert på undersiden av KL-tre-elementene.

En siste tverrsnitt- og fuktmåling ble gjort for alle elementene før vi startet testingen. Disse målingene ble brukt ved utregning av E-modul og rulleskjærfasthet.



Figur 3-17: E-modultest - opplagring og kraftpåføring.

Det ble satt en deformasjonsmåler på midt på undersiden av elementet ved $\frac{l}{2}$ (Figur 3-18). Maks kraft KL-tre-elementet ble utsatt for var $0,4 * F_{max,est.}$ (den estimerte kraften som kan påføres elementet før det går til brudd).

KL-tre elementene i dette forsøket ble antatt å ha en dimensjonerende fasthet ($f_{m,g,d}$) på 35 N/mm², dette gir en $F_{max,est.}$ på 22,4 N/mm².

I henhold til standard NS-EN 408 (Standard Norge, 2012) skal elementet belastes med $0,4 * F_{max,est.} = 8,96$ kN beregnet ut fra elementenes oppbygning og fasthetsklasser til lamellene.

Fukttinnholdet til KL-tre-elementene ble målt etter kondisjonering i klimarom (20 grader 65% RF). KL-tre-elementene lå innenfor kravet på 12 ± 3 %.

$F_{max,est.}$ ble beregnet med utgangspunkt i fasthetsklassene til ytterlammellene da midtlamellens rolle i en bøyetest hvor lengde-høydeforholdet til bjelken er større enn 19xh ikke bidrar til økt stivhet.

Av NS-EN 408 pkt. 10.3 (Standard Norge, 2012):

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3(2\frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh})} \quad (1)$$

Skjærfastheten (G) til midtsjiktet er ukjent, derfor velges det å sette $G = \infty$ slik at formelen blir:

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3(2\frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1})} \quad (2)$$



Figur 3-18: Nedbøyningstest. Deformasjonsmåler er montert under prøven for global E-modul beregning.

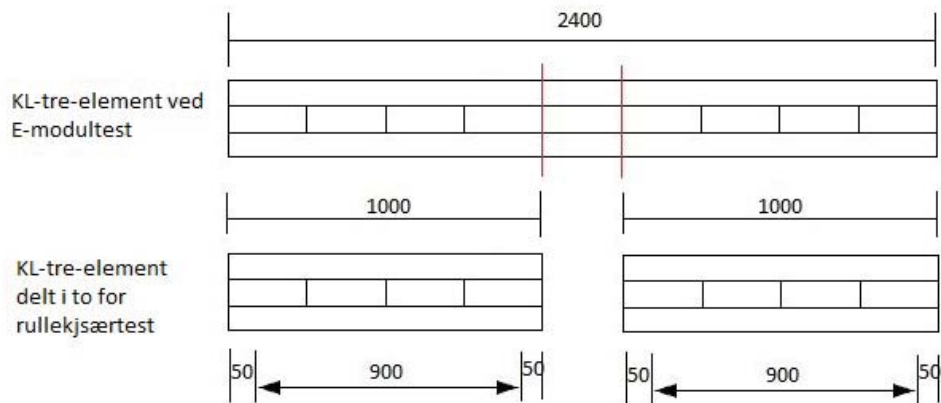
3.4 Rulleskjærttest

De samme KL-tre-elementene som ble benyttet i E-modul testingen, ble også benyttet til å teste rulleskjærfastheten. I Figur 3-19 er det vist hvordan rulleskjærprøvene ble tatt ut av elementet.

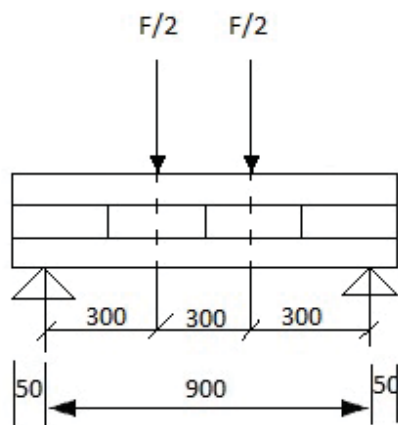
For å teste rulleskjærfastheten til de forskjellige KL-tre-elementene, ble NS-EN 16351:2015 (Standard Norge, 2015) benyttet. Rulleskjærttesten ble gjort på de samme prøvene som hadde blitt testet i nedbøyningstesten. Da kravet for lengden på KL-tre-elementene i skjærttesten er 9+1 ganger høyden ble det kappet ut to prøver fra hvert KL-tre-element. Dette medførte at vi fikk 4 prøver å teste for hver elementgruppe.

Alle rulleskjærprøvene ble kjørt til brudd og kontrollert for at bruddet skyldtes rulleskjær.

KL-tre-elementer



Figur 3-19: KL-tre-elementenes oppdeling fra E-modultest til rullekjærttest.



Figur 3-20: Rullekjærttest - opplagring og kraftpåføring.

Av NS-EN 16351:2015 (Standard Norge, 2015) er kravet til rullekjærttesten at lengden skal være minimum $9xh$.

Formel for skjærfasthet for bjelker med rektangulært tverrsnitt:

$$\tau_d = \frac{1,5 V}{bh_{ef}} \quad (3)$$

I testen ble kraften påført av én sylinder, men fordelt på to punkter som vist ovenfor i Figur 3-20. For å beregne τ_d blir da $V = \frac{F}{2}$. Dermed blir formelen slik:

$$\tau_d = \frac{1,5 \frac{F}{2}}{bh_{ef}} \quad (4)$$

Figur 3-21 viser hvordan rulleskjærtesten ble gjennomført.

Formel 4 ble benyttet for å beregne skjærfastheten til KL-tre-elementene.



Figur 3-21: Rulleskjærtest.

Statistiske analyser

Alle statistiske analyser ble utført i JMP (versjon 15.0; SAS Institute Inc., Cary, North Carolina) og hypotesene ble forkastet, hvis P-verdien var større enn 0,05. Gjennomsnittstall for skjærfastheten til det enkelte KL-tre-element ble brukt i de statistiske analysene fordi det var noe avhengighet mellom de to observasjonene fra samme element.

4. Resultater

4.1 Forprosjekt

Under plukkanalysen fant vi mye skader på trevirke. De skadene som var vanligst å finne før avfallshåndtering-maskinene var:

- Brudd/flising/sprekk
- Klemaskader
- Utrivning
- Utrivning av skruer
- Hull i virke

Mengde forurensinger som skruer og spiker varierte mye mellom plankene på avfallsmottaket. Noen var helt fri for spiker og skruer, mens andre planker hadde store forekomster av skruer og spiker. Betongrester forekom også da mye av virket var forskalingsmaterialer.

Av virke som så lovende ut anslo vi at det meste var av dimensjonene 48mm x 98mm, 36mm x 98 mm og 48 mm x 198 mm umalte planker i gran.

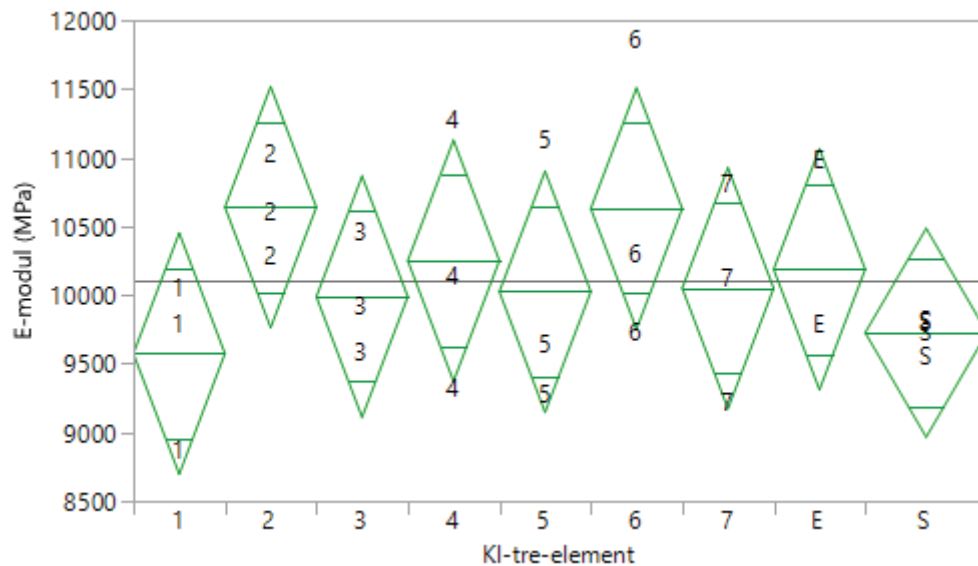
4.2 E-modul

Tabell 4-1 viser gjennomsnittlig E-modul til hver elementtype, for fullstendig tabell se Vedlegg A.

Tabell 4-1: Gjennomsnittlig E-modul for de ulike elementtypene.

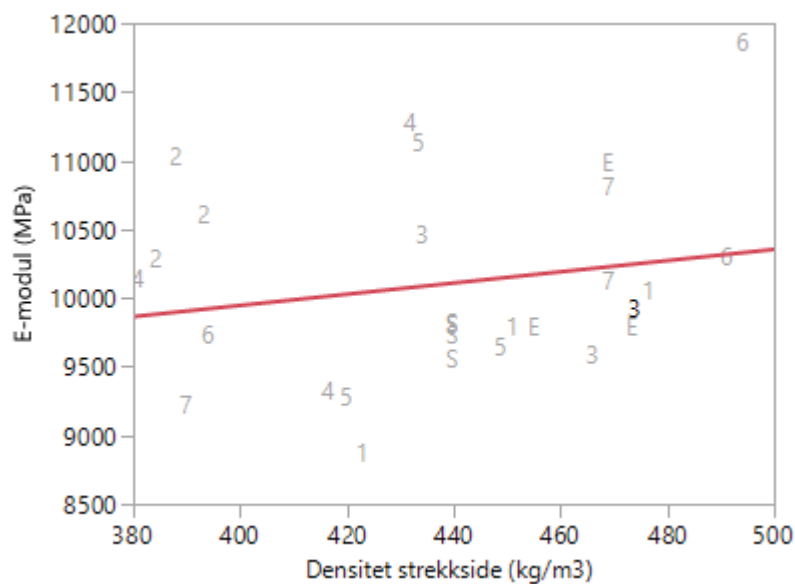
E-modul	
KL-tre-elementtype	$E_{m,g,mean}(MPa)$
1	9574
2	10640
3	9989
4	10250
5	10024
6	10630
7	10050
E	10188
S	9726

KL-tre-element 1 hadde den laveste E-modulen og KL-tre-element 2 hadde den høyeste (Figur 4-1). Det var imidlertid ikke signifikant forskjell i E-modul mellom noen av de ulike elementtypene ($F=0,77$, $P=0,63$).



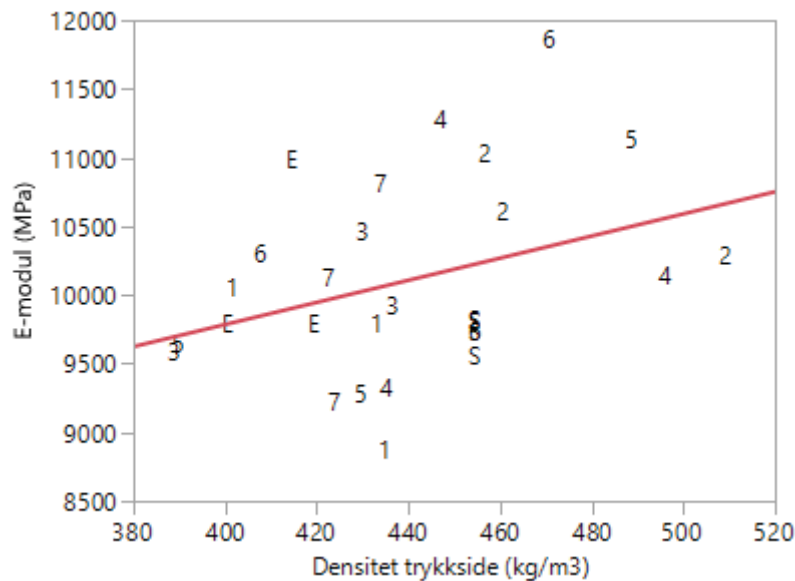
Figur 4-1: Standardavvik og variansanalyse i hver elementtype.

Figur 4-2 viser at E-modulen øker noe med densiteten til lamellen på strekksiden av KL-tre-elementet. Sammenheng var imidlertid ikke signifikant ($F=1,02$, $P=0,32$).



Figur 4-2: Sammenheng mellom E-modul og densitet i strekksiden på KL-tre-elementene.

Figur 4-3 viser at E-modulen øker med økende densitet til lamellen på trykksiden av KL-tre-elementet. Denne sammenhengen var signifikant ($F=3,49$, $P=0,07$). Forklaringsgraden til den lineære regresjonen mellom densitet på strekksiden som forklaringsvariabel og E-modul som avhengig variabel var 0,37 (R^2 justert).



Figur 4-3: Sammenheng mellom E-modul og densitet i trykksiden på KL-tre-elementene.

I en multippel modell hvor densiteten til lamellene på trykksiden og strekksiden var inkludert, bidro begge variablene til en signifikant reduksjon av residualene (Tabell 4-2). P-verdiene for begge variablene var mindre i den multiple modellen enn når E-modulen ble analysert med enkel regresjon med densitet på trykksiden og deretter med densitet på strekksiden.

Tabell 4-2: Variansanalyse og parameterestimat hvor densitet i strekkside og trykkside påvirker E-modulen.

Variansanalyse			
Kilde	F-verdi		P-verdi
Model	6,3696		0,0058
Parameterestimat			
Kilde	Estimat	T-verdi	P-verdi
Skjæringspunkt	-1895,27	-0,56	0,5807
Densitet trykkside (kg/m3)	15,47	3,36	0,0025
Densitet strekkside (kg/m3)	11,84	2,88	0,0081

4.3 Rulleskjærfasthet

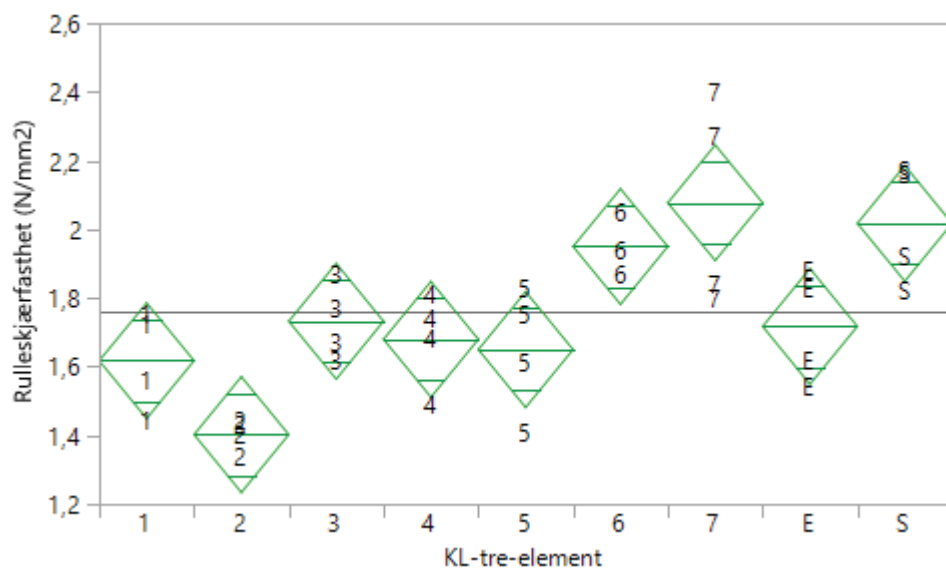
Tabell 4-3 viser gjennomsnittlige rulleskjærfastheten til KL-tre-elementtypene. KL-tre-elementtype 2 hadde den laveste fasthet på (1,4 N/mm²). KL-tre-elementtype 7 hadde den høyeste fastheten (2,08 N/mm²). For fullstendig tabell se Vedlegg A.

Tabell 4-3: Gjennomsnittlig rulleskjærfasthet for de ulike KL-tre-elementene.

Rulleskjærfasthet	
KL-tre-elementtype	$\tau_{d,mean}(MPa)$
1	1,62
2	1,40
3	1,73
4	1,68
5	1,65
6	1,95
7	2,08
E	1,72
S	2,02

En variansanalyse viser at det finnes signifikante forskjeller mellom enkelte av de ulike KL-tre-elementene når det gjelder rulleskjærfasthet ($F=6,91$, $P<0,0001$). Se også Figur 4-5.

Egenprodusert kontroll (E) ligger noe lavere enn elementene levert av Splitkon (S). Det var imidlertid ikke signifikant forskjell i rulleskjærfasthet mellom disse to KL-tre-elementtypene (Tukey Kramer, Tabell 4-4).



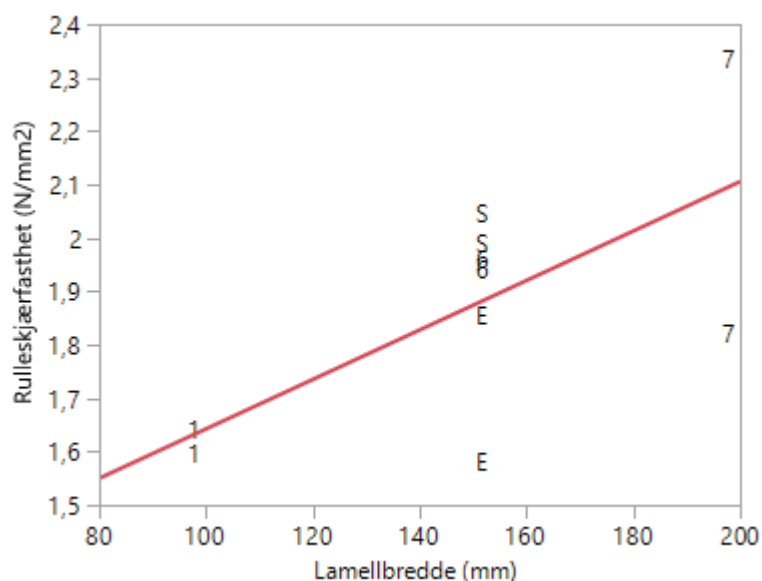
Figur 4-4: Variansanalyse og standardavvik til rulleskjærfasthet av KL-tre-elementene.

Elementtype 2 var signifikant dårligere enn elementtypene 6, S og 7. Elementtype 7 er signifikant bedre enn elementtypene 4, 5, 1 og 2 (Tabell 4-4, Tukey-Kramer, 5% nivå).

Tabell 4-4: Tukey-Kramer-test som viser hvilke elementtyper som det er forskjell mellom. Like bokstaver betyr at det ikke er signifikant forskjell på 0,005% nivå. Ulike bokstaver betyr at det er signifikant forskjell på 5% nivå.

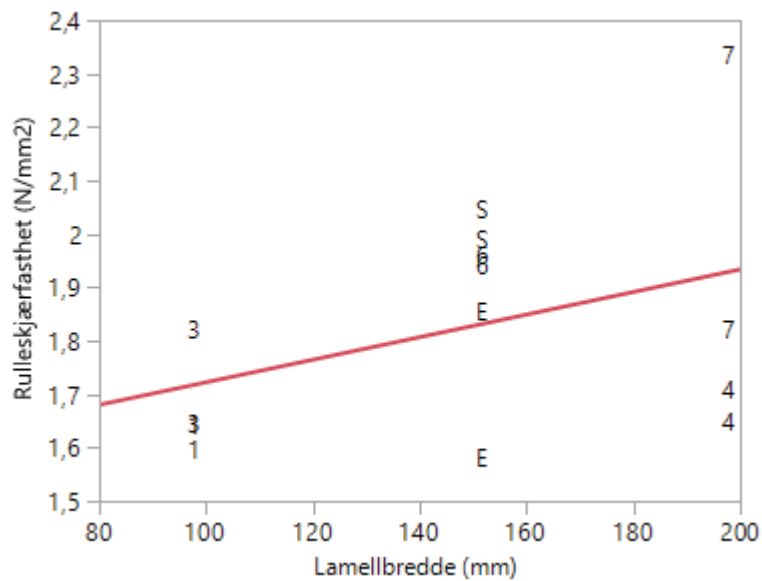
Elementtype				
7	A			
S	A	B		
6	A	B	C	
3	A	B	C	D
E	A	B	C	D
4		B	C	D
5		B	C	D
1			C	D
2				D

Figur 4-5 viser rulleskjærfastheten plottet mot lamellbredden i midtsjiktet. Rulleskjærfastheten øket signifikant med lamellbredden ($F=6,27$, $P=0,037$). Her er kun KL-tre-elementer hvor det ikke er boret hull i midt-lamellene tatt med i analysene.



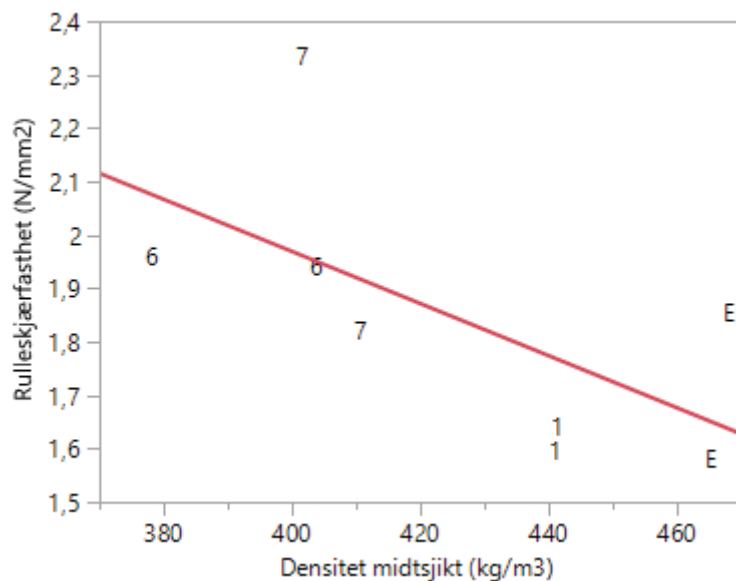
Figur 4-5: Positiv sammenheng mellom lamellbredde og rulleskjærfasthet.

I Figur 4-6 vises tilsvarende plot som i Figur 4-5, men med KL-tre-elementer med hull på 24 mm i midtsjiktet. Det var ikke signifikant sammenheng mellom lamellbredde og rulleskjærfasthet når en tok med KL-tre-elementene som hadde lameller i midtsjiktet med 24mm hull ($F=2,14$, $P=0,17$). Forklaringsgraden til den lineære regresjonen mellom lamellbredden til midtsjiktet som forklaringsvariabel og rulleskjærfastheten som avhengig variabel var bare 0,08 (R^2 justert).



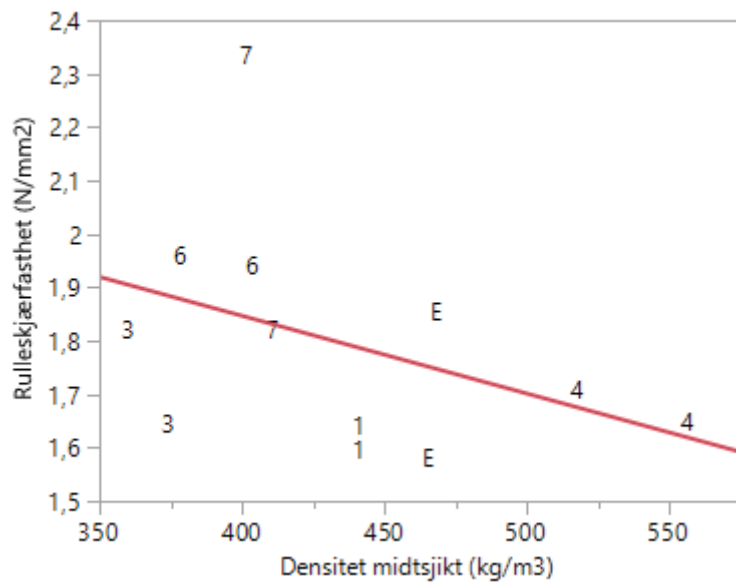
Figur 4-6: Rulleskjærfasthet mot lamellbredde, inkludert KL-tre-elementer med hull på 24 mm.

Figur 4-7 viser rulleskjærfastheten plottet mot densitet i midtsjiktet. Rulleskjærfastheten avtok signifikant med densiteten til midtsjiktet ($F = 4,03$, $P=0,09$). Her er kun prøver hvor det ikke er boret hull i midt-lamellene tatt med i analysen. Forklaringsgraden til den lineære regresjonen mellom densitet til midtsjiktet som forklaringsvariabel og rulleskjærfasthet som avhengig variabel var 0,30 (R^2 justert).



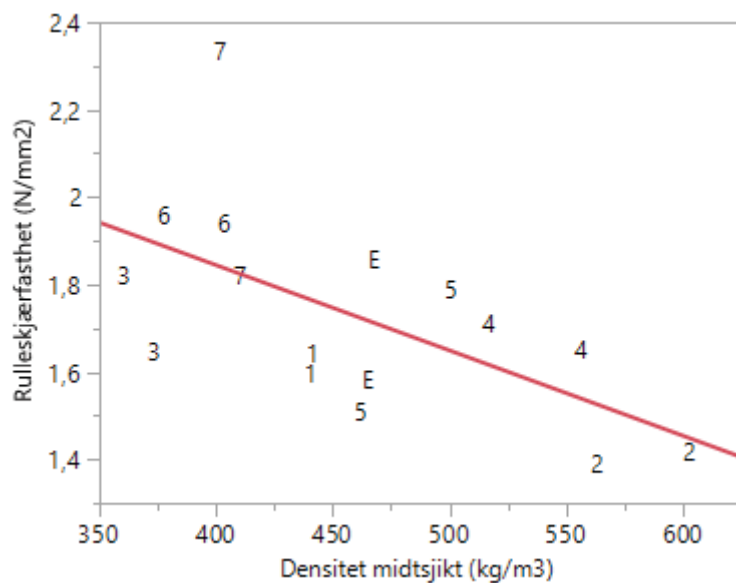
Figur 4-7: Rulleskjærfasthet mot densitet midtsjikt, uten hull i midt-lameller.

Figur 4-8 viser rulleskjærfasthet plottet mot densiteten til midtsjikt, hvor KL-tre-elementer med hull på 24 mm i midtsjiktet var inkludert. Rulleskjærfastheten sank med økt densitet i midtsjiktet, men sammenhengen var ikke signifikant ($F=1,94$, $P=0,19$). Forklaringsgraden til den lineære regresjonen mellom densitet i midtsjiktet som forklaringsvariabel og rulleskjærfasthet som avhengig variabel var 0,08 (R^2 justert).



Figur 4-8: Rulleskjærfasthet mot densitet midtsjikt, med hull på 24 mm.

Figur 4-9 viser den samme sammenhengen som i Figur 4-8. I Figur 4-9 er alle KL-tre-elementer med hull tatt med. Her fikk vi en negativ, signifikant sammenheng mellom densiteten i midtsjiktet og rulleskjærfastheten ($F=8,10$, $P=0,013$). Elementtypen som er laget hos Splitkon, var ikke med da vi mangler densiteten for midtsjiktet for disse prøvene. Forklaringsgraden til den lineære regresjonen mellom densiteten til midtsjiktet som forklaringsvariabel og rulleskjærfasthet som avhengig variabel var 0,32 (R^2 justert).



Figur 4-9: Rulleskjærfasthet mot densitet midtsjikt, med hull på 24 mm og 76 mm.

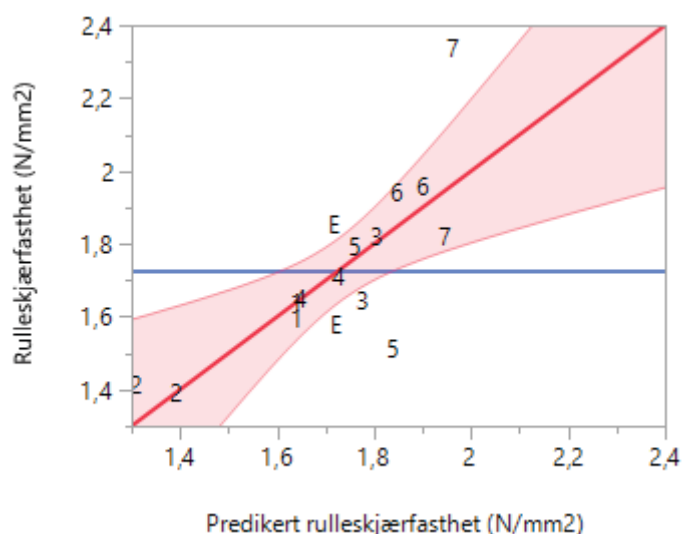
Tabell 4-5 viser en multippel analyse når densiteten til midtsjiktet og lamellbredden i midtsjiktet ble lagt inn som variabler. Denne modellen ga en klarere signifikant sammenheng ($F=9,00$, $P=0,0035$) enn når variablene ble testet hver for seg. Vi ser også at P-verdiene for begge parameterestimaterne ble lavere i den multiple analysen enn når hver variabel ble testet med enkel lineær regresjon.

Tabell 4-5: Variansanalyse og parameterestimat når både densiteten i midtsjiktet og lamellbredden i midtsjiktet er kjørt i samme analyse.

Variansanalyse			
Kilde	F-verdi		P-verdi
Model	9,00		0,0035
Parameterestimat			
Kilde	Estimat	T-verdi	P-verdi
Skjæringspunkt	2,3027	7,76	< 0,0001
Densitet midtsjikt (kg/m3)	-0,0020	-3,51	0,0038
Lamellbredde midtsjikt (mm)	0,0024	2,58	0,0231

Parameterestimatet til densiteten til midtsjiktet var negativt, men parameterestimatet til lamellbredden var positivt.

Figur 4-11 viser rulleskjærfastheten plottet mot predikert rulleskjærfasthet. Forklaringsgraden til den lineære regresjonen mellom rulleskjærfasthet og predikert rulleskjærfasthet var 0,52 (R^2 justert).



Figur 4-10: Rulleskjærfasthet mot predikert rulleskjærfasthet ($F=9,00$, $P=0,0035$, R^2 justert 0,52).

Tabell 4-6 viser en multippel analyse når densiteten til midtsjiktet og lamellbredden i midtsjiktet ble lagt inn som variabler. Her er ikke KL-tre-elementer med hull på 76mm med i modellen. Denne modellen ga en økt signifikant sammenheng ($F=7,90$, $P=0,0104$). Vi ser også at P-verdiene for begge parameterestimaterne ble lavere i denne multiple analysen hvor midtsjiktet med 76mm hull var tatt ut.

Tabell 4-6: Variansanalyse og parameterestimat når både densiteten i midtsjiktet og lamellbredden i midtsjiktet er testet i samme analyse. Her er ikke prøver med 76 mm hull med i modellen.

Variansanalyse			
Kilde	F-verdi		P-verdi
Model	7,90		0,0104
Parameterestimat			
Kilde	Estimat	T-verdi	P-verdi
Skjæringspunkt	2,4312	7,65	< 0,0001
Densitet midtsjikt (kg/m3)	-0,0028	-3,41	0,0078
Lamellbredde midtsjikt (mm)	0,0039	3,43	0,0075

5. Diskusjon

5.1 Forprosjekt

Resultatet fra forprosjektet viser at mye returvirke får røff behandling før det kommer til avfallsmottaket. Det er synlige skader fra maskiner, f.eks. er virket er knekt og knust. Dette har antakeligvis blitt gjort for å komprimere massene, som på byggeplassen har blitt ansett som avfall. Dette er med på å forringe kvaliteten for returmaterialer fra byggeplass. Plukkanalysen viser at for å få returvirke av god kvalitet, må plukk av materiale skje på byggeplass. Et samarbeid med entreprenørene er også en viktig faktor for økt tilgang på returvirke som holder tilfredsstillende kvalitet. En løsning kan være at entreprenørene allerede på byggeplass grovsorterer returvirke slik at materiale av høy kvalitet oppbevares i tørre containere.

Det var tørt og kaldt da returvirket til denne oppgaven ble plukket. Fukt har derfor ikke gitt utfordringer med tanke på resultatene. Returvirket oppbevares ute, enten på bar bakke eller i containere, uten drenering. Dette kan resultere i at returvirket får høy fuktighet, og slikt returvirke må tørkes før det kan brukes i KL-produksjon. Sammenlignet med handelsvirke som må tørkes ned på sagbruk, kan det likevel spares energi ved å tørke returvirket siden dette jevnt over har lavere fukt enn utørket trelast.

Metallforurensing, skruer og spikre, kan være en utfordring fordi det er stor variasjon i antall og avstanden mellom dem. For planker der det bare var skruer og spiker i endene, ble fjerning enkelt. Mesteparten av dette trevirket kan brukes. For materialer hvor det er mer skruer og spiker, kreves det mer manuelt arbeid, og kostnaden med å fjerne metallet vil bli høyere.

Trelast dimensjonen 48 mm x 98 mm var det mest av, og samtidig minst skader på. Det kan skyldes at det er denne dimensjonen som blir mest brukt som midlertidige byggkonstruksjon på byggeplassene. I dag er 48 mm x 98 mm byttet ut til større dimensjoner for reisverk i hus ettersom tekniske forskrifter stiller høyere krav til isolasjon. Gamle hus som pusses opp eller rives har mye 48mm x 98mm. Virke brukt som stenderverk har som regel skruer og spiker plassert i hver sin ende. Dette medfører at returvirke mellom skrue/spikerslag lett kan kappes ut slik at mesteparten av stenderne kan gjenvinnes.

5.2 E-modul

Det stiveste KL-tre-elementet var elementtype 2. Elementtype 2 var i snitt 11% stivere enn den minst stive elementtypen (elementtype 1). Det var imidlertid ingen signifikante forskjeller mellom de sju KL-tre-elementtypene. Selv om noe kapasitet som kanskje kan hentes fra midtsjiktet, var det densitetene i ytterlamellene som var dimensjonerende.

KL-tre-elementene var bygget opp slik at yttersjiktene bestod av en hel lamellbredde i yttersjiktene. Ved fullskala produksjon vil det kunne oppstå sprekker mellom hver ytterlamell, hvor det ikke er noen kapasitet. Splitkon AS kantpresser elementene sine for å redusere disse sprekke, men det vil fortsatt finnes noe sprekker mellom lamellene. Testprøvene i denne oppgaven kan derfor ha et lite overestimat med tanke på styrke kontra fullskala element.

I den multiple modellen for E-modul, hvor densitet til lamellene på trykksiden og strekksiden var inkludert, ble P-verdiene til begge variablene lavere enn når densiteten på trykksiden og densiteten på strekksiden ble brukt hver for seg i enkle regresjoner. Dette skyldes at densiteten både på strekksiden og trykksiden har betydning for E-modulen, og at densiteten på strekk- og trykksiden varierte uavhengig av hverandre for dette materialet. Vi får da en god effekt av å korrigere effekten av den ene variabelen med den andre.

Ytterlamellene var av T22 kvalitet, som betyr at de har en karakteristisk strekkfasthet på 22 N/mm^2 (Standard Norge, 2016a). Dette er veldig høyt for trevirke, noe som tyder på lite kvist og andre virkesfeil. Returvirke som ble brukt i midtsjiktet var styrkesortert og holdt minimum $11\,500 \text{ N/mm}^2$, som tilsvarer C24-kvalitet. C24 har en strekkfasthet på $14,5 \text{ N/mm}^2$. Splitkon bruker T15 virke i midtsjiktet (strekkfasthet på 15 N/mm^2), som betyr at returvirke i denne undersøkelsen holdt nesten like god kvalitet.

De lange prøvene som ble testet for E-modul var svært lite utsatt for skjærdeformasjoner. Det stemmer med hypotese 1: E-modulen blir i liten grad påvirket av kvaliteten til lamellene i midtsjiktet.

Det er viktig å understreke at ved kortere prøver kan resultatene bli annerledes, da skjærkreftene blir viktigere for nedbøyningen jo kortere prøvene er. Minimumskravet for lengde i forhold til høyden på bjelken skal sikre mot skjærspenninger i rene nedbøyningstester. Vi valgte å teste lengre prøver enn minimumskravet, for å forsikre oss mot skjærdeformasjoner skulle påvirke resultatene. Ved kortere prøver vil skjærspenningene bli dimensjonerende for nedbøyningen.

5.3 Rulleskjærfasthet

KL-tre-elementtype 2 var den antatt svakeste elementtypen, de hadde en gjennomsnittlig rulleskjærfasthet på $1,4 \text{ N/mm}^2$. KL-tre-elementtype 7 var den antatt sterkeste elementtypen med gjennomsnittlig rulleskjærfasthet på $2,08 \text{ N/mm}^2$.

Vi sammenlignet fabrikkprodusert elementer (S) og egenproduserte elementer (E). Det var ingen signifikant forskjell mellom S- og E-elementene. Dette tilsier at elementene som ble produsert til studiens, var av tilfredsstillende kvalitet.

Elementtype 7, som hadde høyest rulleskjærfasthet var i snitt 48% bedre enn elementtype 2, som hadde den laveste rulleskjærfastheten. Det viser at kvaliteten til midtsjiktet påvirker rulleskjærfastheten betydelig, jfr. hypotese 2: rulleskjærfastheten til KL-tre blir påvirket av kvaliteten i midtsjiktet.

Som forventet, hadde KL-tre-elementtype 2 dårligst rulleskjærfasthet siden 33% volumet til midtsjiktet er fjernet for denne elementtypen. Dessuten bestod midtsjiktet av smale lameller ($33,3 \text{ mm} \times 98 \text{ mm}$). Elementtype 5 var kun 21% svakere enn den sterkeste enda det hadde samme prosentvis volumandel fjernet fra midtlamellene som elementtype 2. Elementtype 5 hadde imidlertid større lamellbredder i midtsjiktet. Den positive effekten lamellbredden til midtsjiktet for rulleskjærfastheten (Figur 4-5) er i overensstemmelse med NS-EN 16351:2015 (Standard Norge, 2015).

Figur 4-9 viser sammenhengen mellom densiteter i midtsjiktet og hvordan den spiller inn på rulleskjærfastheten. Den negative sammenhengen mellom rulleskjærfasthet og densitet kan skyldes at i virket med lavere densiteter hadde større forekomster av kvister. Da tidligere studier har funnet en negativ sammenheng mellom densitet og kvistdiameter (Vestøl et al., 2012), kan det argumenteres for at virke som betraktes som dårlig til konstruksjoner kan gi økte rulleskjærkapasitet i et KL-tre-element. Effekten var kun signifikant når KL-tre-elementtype 2 var inkludert. Betydningen av denne elementtypen i de statistiske analysene skyldes at elementet hadde svært høy densitet, samtidig som det hadde lav

rulleskjærfasthet. Elementet hadde imidlertid store hull i annenhver midtsjikt-lamell samtidig som lamellbredden var liten. Det kan ha gitt en sammenblandende effekt mellom densitet, hullstørrelse og lamellbredde. Ser en på effekten av densitet når elementer uten hull var utelatt i analysen fikk densiteten til midtsjiktet en P-verdi 0,08. En multippel analyse hvor KL-tre-elementer med 76 mm hull i midtsjiktet var utelatt viser en signifikant effekt av både elementbredde og densitet. Det styrker hypotesen om at densitet har en negativ effekt og dermed at kvist har en positiv effekt på rulleskjærfastheten.

Multiple analyser, hvor bredde på midt-lamellene og densiteten til midtsjiktet inngår, gir de beste sammenhengene. Resultatene viser både kvalitet og dimensjon har betydning for rulleskjærfastheten til et KL-tre-element. Vi mener derfor at forsøksdesign og metodikk har vært tilfredsstillende.

Resultatene viser at bruk av såkalt dårlig konstruksjonsvirke i KL-tre-produksjon kan gi et bedre sluttprodukt. Vi mener derfor at hypotese 3 er korrekt: rulleskjærfastheten til KL-tre vil øke bruk av kvistrikt virke i midtsjiktet. Dette skyldes mest sannsynlig fiberretningen i kvisten, som går nesten på tvers av skjærretningen, og fiberforstyrrelsene rundt kvisten, som begge vil virke som armering mot rulleskjær.

6. Konklusjon

God logistikk og samarbeid med entreprenører er vesentlig for å få til bruk av returvirke. Det er mye returvirke med lite forurensninger og god kvalitet, og som er lett tilgjengelig. Den letteste måten å ta ut returvirke er å kappe det vekk, men det kan fort bli mange korte biter. En idé kan derfor være å fingerskjøte korte feilfrie biter til lange lengder.

Returtre kan brukes som råstoff i midtsjiktet, siden E-modulen til slike elementer tilsvarer E-modulen til godkjente elementer (jfr. S-elementene som var Splitkons produksjon). Midtlamellenes egenskaper påvirker stivheten til elementene i liten grad. Derfor kan det nyttes materialer av dårlige kvaliteter og mye feil uten store utslag på E-modulen, se Figur 5-1.

Rulleskjærfastheten påvirkes av flere faktorer, hvor noen er enklere å gjøre noe med enn andre. Ved å splitte smale lameller slik at forholdet $\frac{\text{bredde}}{\text{høyde}} > 4$, vil en følge standardenes anbefalinger og mest sannsynlig få sterkere elementer. I studien fant vi en positiv effekt av lamellbredde når tykkelsen var konstant. Det anbefales derfor at 48mm x 98mm splittes og høvles ned til for eksempel 18mm x 98mm. Hvis tykkere lameller ønskes, foreslår vi at lamellene kantlimes. For KL-tre-produsenter som ikke kantlimer, blir det nødvendig å bygge opp forskjellige tykkelser og antall sjikt for å holde seg innenfor kravene i standardene.

Studien viser at returvirket må tilpasses slik at det kan møte standardenes behov, men virke med mindre skader og hull ser ut til å kunne brukes i midtsjiktet uten at kvaliteten til det ferdige KL-tre-elementet reduseres.

Trelast med mye og stor kvist har liten verdi for industrien i dag. Slikt virke kan imidlertid være en god ressurs for KL-tre-produsentene, da det ser ut til å gi økt rulleskjærkapasitet i KL-tre-elementene. Spesielt med det nye tømmermålingsreglementet fra 2018, må en regne med å få økt tilgang på trelast med mye kvist, trelast som i mindre grad egner seg til andre produkter.

7. Videre arbeid

Det er satt i gang et samarbeidsprosjekt med målsetting om å produsere et fullskala KL-tre-element av returtre. Vill urbanisme, Splitkon AS, Ragn-Sells AS og Norsk Treteknisk Institutt er samarbeidspartnere i prosjektet. Prosjektet vil kunne gi positive signaler når det gjelder bruk av returvirke i KL-tre-produksjon. Denne oppgaven, og det ovenfornevnte prosjektet, vil kunne åpne opp for nye retningslinjer for bruk av returvirke i konstruksjonsdeler.

Det bør vært gjennomføres en grundigere plukkanalyse for å kartlegge mengder, typer og kvalitet på returvirket som kommer til avfallsmottakene. Det ville også vært nyttig å utarbeide statistikk for fuktigheten til virke som er samlet inn over en lengre periode.

Videre undersøkelser bør også gi et svar på miljøgevinster ved gjenbruk av trevirke, som en del av sirkulærøkonomien. Bruk av returvirke i KL-tre-produksjonen, forutsatt gode logistikk-løsninger, vil kunne være ressursbesparende og økonomisk gunstig for samfunnet.



Vi har troen på en fremtid med returvirke!

Referanser

- Aarstad, J., Glasø, G. B., A. Landrø, H., H., K. K., Skaar, S., Jakobsen, B., Sund, H. & Kleven, B. (2006). Bygge med massivtreelementer. I: 1. *Generelt*: Norsk Treteknisk Institusjon, Holz100 Norge AS, Moelven MassivTre AS og Norsk Massivtre AS.
- Bergman, R. C., Zhiyong; Carll, Charlie G.; Clausen, Carol A.; Diertenberger, Mark A.; Falk, Robert H.; Frihart, C. R. G., Samuel V.; Hunt, Christopher G.; Ibach, & Rebecca E.; Kretschmann, D. E. R., Douglas R.; Ross, Robert J.; Star. (2010). *Wood handbook: Wood as an engineering material*: Department of Agriculture Forest Service Forest Products Laboratory U.S.
- Boye, E. (2019). *Sirkulær framtid - om skiftet fra lineær til sirkulær økonomi*: Framtiden i våre hender, Mariboes gate 8, 0183 Oslo. Tilgjengelig fra: <https://www.framtiden.no/aktuelle-rapporter/874-sirkulaer-framtid-om-skiftet-fra-lineaer-til-sirkulaer-okonomi/file.html> (lest 11.05.2020).
- Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G. & Thiel, A. (2016). Cross laminated timber (CLT): overview and development.
- Brookhuis. (2020). *Strength grading handhelds*. Tilgjengelig fra: <https://www.brookhuis.com/wood-testing/strength-grading/strength-grading-handhelds/> (lest 22.04.2020).
- Dragland, Å. (2015). *Bygg står for 40% av verdens utslipp - slik skal det reduseres*: Teknisk Ukeblad. Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/bygg-star-for-40-av-verdens-utslipp-slik-skal-det-reduseres/223922> (lest 11.05.2020).
- Dynea. (2019). *Prefere 4547: Liquid melamin urea adhesiv for the wood industry*: Dynea AS.
- Ehrhart, T., Brandner, R., Schickhofer, G. & Frangi, A. (2015). *Rolling shear properties of some European timber species with focus on cross laminated timber (CLT): test configuration and parameter study*. International Network on Timber Engineering Research: Proceedings of Meeting 48: Timber Scientific Publishing, KIT Holzbau und Baukonstruktionen.
- Gagnon, S., & Pirvu, C. (2011). *CLT Handbook*: FPInnovations.
- Glosli, C. (2018). *Hvordan er fremtidens trebygninger?* Tilgjengelig fra: <https://www.nmbu.no/fakultet/mina/aktuelt/node/37491> (lest 20.05.2020).
- Kristensen, T. (1999). *Bygningselementer av massivtre*: Norsk Treteknisk Institutt.
- Leland, B., N. (2008). Prosjektering for ombruk og gjenvinning. 2020.
- LOOP, S. f. K. o. G. (2018). *Avfallshierarki*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/avfallshierarki> (lest 11.05.2020).
- Mestek, P., Kreuzinger, H. & Winter, S. (2008). *Design of cross laminated timber (CLT)*. 10th World Conference on Timber Engineering.
- Nilsen, H. R. (2020). *Sirkulær økonomi*. Tilgjengelig fra: https://snl.no/sirkul%C3%A6r_%C3%B8konomi (lest 07.05.2020).
- Ormestad, H. (2018). *Elastisitet - fysikk*. Store Norske Leksikon. Tilgjengelig fra: https://snl.no/elastisitet_-_fysikk (lest 20. April).
- Rosvold, K. A. (2018). *Gjenbruk*. Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/gjenbruk> (lest 11.05.2020).
- Sagen, A. e. a. (1999). *Trekonstruksjoner med spikerplater*: Norske Takstolprodusenters Forening.
- Sandved, D. L. (2018). *Skaper verdier av treavfall og restprodukter fra treindustri*: Regjeringen.no. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/skaper-verdier-av-treavfall-og-restprodukter-fra-treindustri/id2612678/>.
- Skogstad, P. (2009). *Treteknisk Håndbok*. 3. Utgave utg. Oslo: Norsk Treteknisk Institusjon.
- St. Meld. 45 (2016-2017). *Avfall som ressurs - avfallspolitikk og sirkulær økonomi*. Oslo: Klima- og miljødepartementet. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-45-20162017/id2558274/> (lest 19.05.2020).
- Standard Norge. (2004). *NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:2010 Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=436137> (lest 29.05.2017).
- Standard Norge. (2009). *NS-INSTA 142:2009 Nordiske regler for visuell styrkesortering av trelast*. Tilgjengelig fra:

- <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=428580> (lest 12.02.2020).
- Standard Norge. (2012). *NS-EN 408:2010+A1:2012 Trekonstruksjoner - Konstruksjonstre og limtre - Bestemmelse av noen fysiske og mekaniske egenskaper*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=592329> (lest 27.01.2020).
- Standard Norge. (2015). *NS-EN 16351:2015 Trekonstruksjoner - Krysslimt massivtreelement - Krav*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=795701> (lest 27.01.2020).
- Standard Norge. (2016a). *NS-EN 338:2016 Konstruksjonstrevirke - Fasthetsklasser*: Standard Norge. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=824287> (lest 17.03.2020).
- Standard Norge. (2016b). *NS-EN 14081-1:2016+A1:2019 Trekonstruksjoner - Styrkesortert konstruksjonstrevirke med rektangulært tverrsnitt - Del 1: Generelle Krav*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1105103> (lest 10.04.2020).
- Statistisk sentralbyrå. (2020). *Avfallsregnskapet*. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/statistikker/avfregno> (lest 12.02.2020).
- THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL OF EU. (2008). *Directive 2008/98/EC on waste*. Tilgjengelig fra: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1589909108483&uri=CELEX:32008L0098> (lest 19.05.2020).
- Vestøl, G. I., Høibø, O. A., Langesethagen, K. G., Skaug, E. & Skyrud, R. E. A. (2012). *Variability of density and bending properties of Picea abies structural timber*. *Wood Material Science and Engineering*.
- Wester Plessner, T. (2012). *Limsystemer for limtre og sponplater*. Tilgjengelig fra: https://www.sintef.no/globalassets/upload/teknologi_og_samfunn/betong/brosjyrer/sb-prrapp-94.pdf (lest 23.03.2020).

Vedlegg A: Håndberegninger

E-modul

E-modultest tabell			
Testelementtype	Elementnr.	$E_{m,g} \left(\frac{N}{mm^2} \right)$	$E_{m,g,mean} \left(\frac{N}{mm^2} \right)$
1	1	9796	9574
1	2	10054	
1	3	8873	
2	1	11025	10640
2	2	10613	
2	3	10282	
3	1	9923	9989
3	2	9580	
3	3	10463	
4	1	10147	10250
4	2	9322	
4	3	11282	
5	1	9286	10024
5	2	11136	
5	3	9650	
6	1	10298	10630
6	2	11860	
6	3	9732	
7	1	10807	10050
7	2	10126	
7	3	9216	
E	1	9784	10188
E	2	9789	
E	3	10990	
S	1	9825	9726
S	2	9802	
S	3	9725	
S	4	9551	

Rulleskjærfasthet

Skjærfasthet		
Elementtype	τ_d	$\tau_{d,gj.snitt}$
1	1,56	1,62
1	1,72	
1	1,44	
1	1,75	
2	1,34	1,40
2	1,44	
2	1,40	
2	1,43	
3	1,62	1,73
3	1,67	
3	1,77	
3	1,87	
4	1,81	1,68
4	1,49	
4	1,74	
4	1,68	
5	1,83	1,65
5	1,75	
5	1,61	
5	1,41	
6	2,05	1,95
6	1,87	
6	1,94	
6	1,94	
7	2,27	2,08
7	2,40	
7	1,84	
7	1,80	
E	1,83	1,72
E	1,88	
E	1,54	
E	1,62	
S	2,17	2,02
S	1,92	
S	2,16	
S	1,82	



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway