



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2021 30 stp

Fakultet for realfag og teknologi (REALTEK)

Moderne forsterknings- og reparasjonsmetoder brukt for vertikale, bærende elementer i tre

State-of-the-art of repair and strengthening methods
used in vertical load bearing timber

Trym Lunder Østby

Byggeteknikk og arkitektur

Forord

Denne oppgaven definerer slutten på en femårs masterstudie i Byggeteknikk og arkitektur ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) på Ås. Temaet så dagens lys høsten 2020 hvor tankene rundt oppgaven startet å spinne, og enkelte inspirerende kilder ble lest. Samtaler med min veileder definerte oppgavens fokus og gjorde det mulig å planlegge arbeidet fremover. Tidlig januar 2021 startet arbeidet med kildeinnhenting og orientering i temaets status. Siden har arbeidet bydd på lange dager, men en kontinuerlig følelse av at temaet var interessant gjorde arbeidet inspirerende og overkommelig.

Jeg vil rette en stor takk til min hovedveileder ved NMBU, Themistoklis Tsalkatidis, som har vært tilgjengelig for meg gjennom hele semesteret. Han har delt sin kunnskap, sine tanker og idéer gjennom ukentlige møter. Disse møtene har ført til en jevn fremgang i arbeidet, og gitt Themistoklis jevnlig innsikt i arbeidet og progresjon. Det har utvilsomt vært en god motivasjon.

Videre vil jeg også rette en takk til Håvard Kirkebøen som gjennom sin kraft av å være genuint interessert i mitt arbeid og tema, har hjulpet meg som en sparringspartner på teori og masterprosessen som helhet. Takk også til personer som har gitt meg muligheten til å grave i kunnskap og erfaringer. I arbeidet med oppgaven har jeg møtt på personer som viser stor interesse for temaet og mitt arbeid, noe som har gitt meg motivasjon og innsikt.

Til slutt vil jeg takke mine støttespillere i form av familie, venner og medstudenter som gjennom fem år i studiet har vært der for meg. En uvurderlig støtte i form av samtaler og samhold har gjort at studieløpet har vært en periode i livet jeg virkelig har trivdes med. Dere har alle stor betydning for meg og for gjennomføringen av denne oppgaven.

Ås, 27. mai 2021

Trym Lunder Østby

Sammendrag

I et samfunn hvor fokuset på miljø stadig øker, vil byggebransjen også måtte tilpasse seg da det er klart at byggebransjen står for store årlige utslipp av miljøfiendtlige gasser. En løsning er å gjøre konkrete tiltak på byggeplassen, men tiltak kan også gjøres i selve bygningsmassen. Re-design og bruk av gamle bygningsmasser blir pekt på som et viktig ledd, i tillegg til bygg i tre. Kunnskap om konstruksjoner i tre er dermed viktig. Skader på trevirke kan blant annet være brudd, sprekker og biologiske angrep som skaper problemer for styrken og påliteligheten til bærende elementer. I den sammenheng vil reparasjon og forsterkning av bærende elementer av tre i eksisterende konstruksjoner kunne vise seg å være essensielt. Rent praktisk kan dette bety en endring i fokus på hva som er vektlagt og en byggemåte basert på en mer miljø- og klimavennlig tankemåte.

Det eksisterer mange lokale varianter og erfaringer når det kommer til reparasjon og forsterkning. Mangelen på standardisering og en effektiv måte å dele kunnskap på gjør at utviklingen i praksis går sakte selv om det finnes mye forskning på området. I studeringen av forskningen som er gjort er det funnet at selvborende skruer, innlimte stenger og FRP (fiber reinforced polymers) er moderne. Disse kan benyttes på forskjellige måter, blant annet for å montere proteser. Metodene har sine fordeler og ulemper, og passer til hver sin bruk. Selvborende skruer fremstår som den enkleste og billigste metoden for reparasjon av sprekker. Innlimte stenger viser seg å være gode for forsterkning av bærende elementer, spesielt om det er montert før søylen/veggen er på plass i konstruksjonen. FRP trukket rundt konstruksjonen viser seg å by på økning i styrke, men er svært lite visuelt tiltalende. Bruk av lim blir også diskutert da dette har innvirkning på resultatet. Innlimte stenger og FRP benytter seg av lim, noe som gir utfordringer i forhold til herding, tidsbruk, kvalitetskontroll og naturlig vannføring i trevirket.

Forskningen som er funnet er sammenlignet opp mot bransjesituasjonen i Norge. Det er sett på reparasjon av søyleføtter ved bruk av protese og forsterkning ved lasking. Casene viser en forskjell mellom forskningen som er gjort på verdensbasis og hvordan det praktisk løses i Norge. Dermed blir standardisering og kunnskapsdeling belyst, da det kan bidra til å øke kjennskapen til mer moderne metoder. Et ønske om en kildebank innenfor temaet fremstår som en god løsning for å dele erfaringer og metoder som er brukt rundt om i Norge. Det er kjent at ny versjon av Eurocode 5 skal inneholde forsterkning ved bruk av selvborende skruer/bolter, innlimte stenger og pålimt trevirke.

Abstract

In a society where the environmental focus is rapidly increasing, the construction industry must adapt as it stands for big annual emissions. One measure is to do specific changes at the construction site, but another is to change in the constructions. Re-design and use of old buildings, as well as the usage of timber, has been pointed out as an important factor to reach our environmental goals. Repair and reinforcement of bearing elements of timber in existing constructions might be very important in this context. Practically this means a change in our way of prioritizing measures that promotes the use of old constructions and achieve a greener way of building in the future.

There is a lot of ways to repair and reinforce bearing walls and columns based on local assumptions and experiences. The lack of standardization and an effective way of sharing knowledge makes the development slow even though there are a lot of research done in this field. In the study of the research done in this field, self-tapping screws, glued-in rods and FRP are considered state-of-the-art. These methods are used in various ways, such as prostheses. Self-tapping screws appear to be the cheapest and easiest way of repairing cracks. Glued-in rods seems to be great for reinforcing walls and columns but might be complicated to fit in existing constructions. FRP seems to be effective for wrapping columns as a repair and reinforcement but lacks visual appearance. The use of adhesive could affect the result because of curing, quality control, use of time and the disturbance of the natural distribution of moisture in the timber. This affects both the methods of glued-in rods and FRP.

The research found in this study is compared to the methods used construction industry in Norway. It shows a significant difference in the state-of-the-art research and the real-life situations. Standardization and an easier way of sharing knowledge is therefore suggested to distribute the state-of-the-art methods and techniques. There is known that there is a new revision of Eurocode 5 planned to include reinforcement with self-tapping screws/rods, glued-in rods, glued-on plywood and LVL.

Innholdsfortegnelse

Forord	II
Sammendrag	IV
Abstract	V
Innholdsfortegnelse	VI
Figurliste	VIII
Tabelliste	XII
Formellise	XIII
1. Innledning og problemstilling	1
1.1 Problemstilling.....	2
1.2 Formål.....	2
1.3 Bakgrunn/motivasjon.....	2
1.4 Avgrensninger.....	3
2. Metode	4
2.1 Litteraturstudie.....	4
2.2 Case studier og samtaler med fagfolk.....	5
3. Teori	6
3.1 Anatomien til tre.....	6
3.2 Cellenivå.....	8
3.3 Egenskaper til tre.....	10
3.4 Feil i treverket.....	11
3.5 Densitet og mekaniske egenskaper.....	12
3.6 Tre som byggemateriale.....	13
3.7 Treelementer.....	15
3.8 Lasttyper i norsk byggeskikk.....	22

3.9 Bruddtyper.....	28
3.10 Faktorer for forsterkning av søyler og bærende vegger	35
4. State of the art	39
4.1 Selvborende skruer (Self-tapping screws).....	39
4.2 FRP (Fiber Reinforced Polymers).....	44
4.3 Innlimte stenger (Glued-in rods).....	58
4.4 Proteser (Prosthesis).....	64
4.5 Bruk av programvare.....	66
5. Case studier.....	68
5.1 Protese	68
5.2 Lasking av søyle.....	71
6. Diskusjon.....	74
6.1 Diskusjon av presentert forskning.....	74
6.2 Forsøk gjort i rapporter vs. gjennomføring i virkeligheten	76
6.3 Standardisering.....	77
6.4 Endring i fokus på parametere	79
7. Konklusjon.....	81
8. Videre arbeid	83
Litteraturliste.....	84

Figurliste

Figur 1 Oversikt over kildeinnhenting..	5
Figur 2 Retningene tangensial (blå), radial (rød) og lengde (grønn) for ved.....	7
Figur 3 Tverrsnitt av ved og væsketransport i trær	7
Figur 4 Oppbygning av celleveggene i trevirke.....	9
Figur 5 Fuktinnhold i trevirke i prosent av tørrvekten	10
Figur 6 Normal fuktighetsfordeling i planker og bord skåret av en gran-/furustokk.....	11
Figur 7 Konsekvens av krymping i forskjellig retning	11
Figur 8 Hvordan kvist påvirker fiberretning	12
Figur 9 Kvist som skaper fiberforstyrrelser	12
Figur 10 (a) Bæresystem av heltre under montering.(b) Ferdig hall. Muroto Indoor Stadium	16
Figur 11 Kantstilt element satt sammen med stålstag/skruer.....	17
Figur 12 Eksempler på krysslagte elementer. (a) Krysslagt massivtre sammenføydd med lim mellom lamellene. (b) Krysslagt massivtre sammenføydd med tredybler. Hull forbores og tredybler med litt større diameter bankes inn.....	18
Figur 13 Typisk utseende for hulromselement/kassedekke	18
Figur 14 Eksempel på en GL30c med typisk tverrsnitt for en limtrebjelke som har høyere styrkegrad på lamellene i ytterkant sammenlignet med lamellene i midten.	20
Figur 15 Forskjellige typer limtrettverrsnitt. Fra venstre: I-tverrsnitt, L-tverrsnitt, rørtverrsnitt (rektangel), T-tverrsnitt og rørtverrsnitt (mangekantet).....	20
Figur 16 (a) Montering av bærende limtrekonstruksjon i Mjøstårnet. (b) 3D-modell av bæresystemet til Mjøstårnet	21
Figur 17 Eksempler på hva biologisk nedbrytning kan føre til. (a) Termittangrep på stokk som resulterer i markant mindre tverrsnitt. (b) Biologisk nedbrudd søyle som har vært i kontakt med bakken..	29
Figur 18 Spenninger i plankens tverrsnitt i forskjellige faser av tørkeprosessen. (a) Tørking av trevirke i fase 1. (b) Tørking av trevirke i fase 2.....	31

Figur 19 Typiske sprekker som kan oppstå i trevirket grunnet tørke. (a) Sprekk i ytre del av tverrsnittet. (b) Sprekk i indre del av tverrsnittet..	31
Figur 20 Kneking av vertikalt element. Kraften er i fiberretning med de ytterste lamellene.	32
Figur 21 Vindpåvirkning på vegg med tilhørende reaksjoner i vegg og opplagere. Om man tar ut et lite rektangel av veggen ser man hvordan skjærkreftene brer seg ut	33
Figur 22 Hvordan horisontale krefter kan påvirke avstivende og bærende vegger. (a) Underdimensjonert vegg opplever horisontale krefter. (b) Underdimensjonert vegg opplever moment som følge av horisontale krefter.....	33
Figur 23 (a) Skjærbrudd i trevirket langs skjøter. (b) Skjærbrudd i limet mellom lameller. (c) Brudd i hele elementet grunnet skjærkrefter. (c) Hvordan skjærkrefter kan føre til brudd i elementer av massivtre.	34
Figur 24 Forsterkning ved hjelp av FRP diagonalt på en bærende vegg.	37
Figur 25 Påføring av lim før bruk av FRP (Fiberforsterket polymerer) som forsterkningsmetode. I høy grad ikke-reversibelt da det er svært vanskelig å skille lim og trevirke/FRP etter herding uten at det skaper skader på materialene.....	38
Figur 26 Utvikling av skruer i målestokk. Øverst: forsinkede skruer. Øvrige skruer er selvborende skruer som finnes i størrelsesorden opptil 1 meter.	39
Figur 27 Oppsett av forsøk. Søylene til venstre er referansesøylene med sprekk og søylene til høyre er forsterket med skruer på tvers av lengderetningen til sprekken. I tillegg til disse ble en intakt søyle testet.	41
Figur 28 (a) Referansesøyle uten sprekk. (b) Referansesøyle med sprekk. (c) Referansesøyle med sprekk. (d) Forsterket søyle. Piler er påsatt i etterkant for å vise bruddpunkt.....	42
Figur 29 Modellering gjort i FEM-program. (a) Utgangspunktet til testingen. (b) Intakt søyle i brudd. (c) Søyle med sprekk i bruddform 1. (d) Søyle med sprekk i bruddform 2. (e)Forsterket søyle i brudd.	43
Figur 30 Fremgangsmåte for påføring av FRP i liten skala. Her er det først laget rull med FRP, deretter klippes det til og limes på ønsket plass på trevirket.....	45
Figur 31 Forskjellige metoder å benytte seg av EBR. (a) Ark 0/90 grader på fiberretningen. (b) Ark 45 grader på fiberretningen. (c) Sammenhengende striper av FRP oppover søyle. (d)	

Pålimt ark av FRP på overflaten. (e) Stripper rundt søyle med fast avstand imellom. (f) Ark av FRP rundt søyle som allerede er forsterket av FRP-stenger.	45
Figur 32 Fremgangsmåte for forsøk induktiv herdeprosess. Først bore hull, så sette inn stang, fylle på lim og deretter herde limet ved bruk av induksjonssløyfer rundt elementet.	47
Figur 33 Bruddtyper man kan oppleve ved bruk av FRP. 1) Brudd i FRP. 2) Brudd i lim. 3) Brudd i forbindelse mellom lim og annen overflate, enten ved trevirke eller ved FRP. 4) Brudd i selve trevirket.	48
Figur 34 Oppsett av søyle med en forbindelse på midten. L_s er total lengde på forsterkningen, L_t er lengden på skjøten og L_e er overskuddslengden på forsterkningen.	49
Figur 35 Brudd i søyle forsterket med CFRP. Bilde til venstre er forsterket med ett lag i fiberretning, bilde til høyre har dobbelt lag i fiberretning.	50
Figur 36 (a) Referansesøyle eksentrisk last. (b) Søyle med eksentrisk last og BFRP strips. (c) Søyle med eksentrisk last og kontinuerlig BFRP. (d) Referansesøyle sentrisk last. (e) Søyle med sentrisk last og BFRP strips. I tillegg til disse ble det testet en søyle med dimensjonene til d/e som var heltrukken i BFRP.	51
Figur 37 Bruddformer i forsøk. Røde piler er påsatt i etterkant for å vise bruddpunkt.	53
Figur 38 Fremgangsmåte ved bruk av FHFT. Seks like finélelementer limes systematisk på FRP og brettes inn til en sekskantet søyle.	55
Figur 39 Eksempler på hvilke tverrsnitt man kan lage ved bruk av FHFT. (a) Trekant. (b) Blomst. (c) C-tverrsnitt. (d) I-tverrsnitt.	56
Figur 40 (a) Konsept for sammensetning av en HFT-søyle med C-tverrsnitt. (b) Mesh og simulering i FEM-programvare av trykk i lengderetning på elementet.	56
Figur 41 Hvordan man kan bygge opp en HFT-vegg. Forskjell i fiberretning fra lag til lag gjør at veggen oppleves sterk og stabil.	57
Figur 42 Forskjellige måter å gjennomføre innliming av stang. (a) Påfylling av lim før stang føres inn. Krever høy viskositet i limet. (b) Boring av to tilleggshull på siden av tverrsnittet slik at man ofte oppnår god fordeling av lim.	59
Figur 43 Feilkilder som kan føre til dårlige forbindelser. (a) Ugunstig vinkel på boret hull. (b) Stort hull som gir stang en vinkel. (c) Eksentrisk plassering av stang. (d) Ufullstendig innførsel av stang. (e) Ujevn fordeling av lim i hull som gir områder uten heft.	60

Figur 44 Resultater fra forsøk som viser hvordan to typer lim reagerer på induktiv herding i forskjellige temperaturer. Lim (a) responderer mye bedre enn (b) ved induktiv herding i både romtemperatur og i kaldere omgivelser.	61
Figur 45 Oppsett av stang med tråd surret inn i gjengene. Hele EL blir sunket ned i trestykket slik at det blir jevn fordeling av varmen.	62
Figur 46 Graf som viser skjærkrefter som oppleves i området mellom trevirke og lim i en GiR-forbindelse. Her kommer det frem av fordelingen av skjærkrefter er bedre desto mer overflatekontakt man har mellom trevirke og stang.....	63
Figur 47 Eksempler på proteser brukt på konstruksjoner. Gjort med tanke om at verneverdighet er viktig. (a) Søylen i stall som har blitt reparert med protese. Varierende temperaturer og fuktighet over lang tid gjorde at råte har ødelagt søylen. Tilpasset og boltet. (b) Bærende søylen på utescene som måtte skiftes ut grunnet råte. Protese med mye tilpasning av tverrsnitt og boltet.....	64
Figur 48 Protese som reparasjonsmetode i enden av bjelker. Her tres protesen på og stengene limes fast. Stålet er rustfritt.	65
Figur 49 Bilde av montering av protese i et horisontalt element ved hjelp av selvborende skruer.	65
Figur 50 Råte har satt seg i bunnsvill, tilhørende søyler og dør på et eldre hus fra 1759.	68
Figur 51 Bilder av reparasjon av søylefot ved hjelp av protese gjort i 2012. (a) Søylen på venstre side sett utenfra. Merk at denne siden krevde en større protese enn motsatt side. (b) Søylen på høyre side sett utenfra. Mindre protese enn på motsatt side..	69
Figur 52 Bildet viser baksiden av protesen som er vist i figur 51 (a). Her vises det at en plugg er satt inn på tvers av flensen som er faset ut, og dermed låser forbindelsen i lengderetning til flensen. Denne er gjemt på innsiden for å bevare mest mulig originalt utseende.	70
Figur 53 Reparasjon av søylen ved inngangsdør. (a) Halve tverrsnittet er fjernet og erstattet med friskt trevirke. Lengde på protese 60cm. (b) Protese festet med en spiker i overkant og en i underkant av protesen.	70
Figur 54 Lasking av søylen som har store råteskader. (a) Viser råte som er forsøkt forsterket med en lask på hver side. (b) Øvre lask er sammenføyd med bjelken i overkant for å yte mer styrke.	72

Figur 55 Lask av horisontal skjõt på søyle. (a) Lasken har en overskytende lengde på omtrent 45cm på hver side av skjøten. (b) Lasken er spikret inn i søylen med variende avstander og konfigurasjon..... 73

Figur 56 Vanlig fremgangsmåte for standardisering. Først grunnleggende forskning, deretter testes dette i overvåket bruk. Ut ifra resultatene blir det så laget et produkt. Samlet utgjør dette forskning- og utviklingsfasen. Videre utvikles det teknisk godkjenning og deretter produkt- og designstandarder, som til sammen blir valideringsprosessen av standarden. 78

Tabelliste

Tabell 1 Karakteristiske fastheter, stivhetsmoduler og densiteter for dimensjonering av konstruksjonsvirke	14
Tabell 2 Fasthetsklasser for kombinert limtre etter NS-EN 14080.....	19
Tabell 3 Oversikt over enkelte nyttelaster i EC1 - Del 1-1.....	23
Tabell 4 Beregningsprosedyre for bestemmelse av vindpåvirkninger	25
Tabell 5 Trebeskyttelsesmetoder som brukes i Norge, som viser antatt forlengelse av levetiden til materialene.	30
Tabell 6 Forsterkning med FRP på utsiden av materialer (EBR). Fargekode: Brun – Trevirke, Grå – FRP, Blå – Lim.....	44
Tabell 7 Verdier på forskjellige typer FRP basert på forskjellige stoffer. Merk at prisene er fra 2008 og er ment som en pekepinn. Prisene varierer også med tverrsnittet.....	46
Tabell 8 Delaminasjon ved bruk av RF-lim. Resultatene viser at man kan oppnå 0% delaminasjon mellom trevirke og FRP.....	49
Tabell 9 Bruddformer for forsterkede søyler i forsøk.....	51
Tabell 10 Økning i styrke grunnet bruk av BFRP på forskjellige måter. Alle verdiene er prosentvis økning sammenlignet med referansesøyle. Dette gjelder bare sentrisk last.	52
Tabell 11 Effekten av behandling med konserveringsmidler før og etter forsterkning er gjort. Generelt gir det en økt delaminasjon å forsterke behandlet trevirke med EBR enn motsatt..	54
Tabell 12 Forskjellige typer forsterkninger basert på innlimte stenger. Fargekode: Brun – Trevirke, Grå – FRP, Blå – Lim.....	58

Tabell 13 Oversikt over enkelte bruddformer man kan oppleve med GiR.	60
Tabell 14 Kriterier brukt i arbeid gjort ved rehabilitering av hus i Lisboa. Kriteriene ble vektlagt, og programvaren M-Macbeth gjorde evalueringer gjort på gitte vektlegginger, og bistår med beste løsning..	66

Formellise

Formel 1 Dimensjonering av snølast.....	24
Formel 2 Dimensjonering av vindlas	26
Formel 3 Formel for lastkombinasjon	26
Formel 4 Dimensjonering av trykk i fiberretning	32
Formel 5 Kombinasjon av aksial- og tverrlast på skruer etter standard EC5.....	40

1. Innledning og problemstilling

Verden står ovenfor en miljøproblematikk som gjør at alle verdens land setter seg miljømål for å stagnere utslippene av miljøgasser. Norge, som på mange måter er et ideal for andre land, har også satt seg sine mål. I 2020 oppjusterte regjeringen disse målene til at innen 2030 skal 50% (tidligere 40%) av utslippene være redusert sammenlignet med 1990 (Klima- og miljødepartementet, 2020).

Bygg- og anleggsbransjen er på ingen måte fritatt for denne utviklingen. I sin rapport skriver Wiik (2020) at byggebransjens utslipp må reduseres med 7,6% prosent årlig for å nå det opprinnelige målet på 40% redusert utslipp. Fokuset har vært å skape mer klimavennlige bygg og anleggsplasser, men i det siste har også fokuset blitt vinklet over på redesign og rehabilitering fremfor nybygg. Et ledd i utviklingen vil være å bruke sterkere materialer og å forsterke bærende elementer slik at behovet for nybygg eller omfattende renovasjon skal reduseres. Dette støttes opp av rapporten «Grønt er ikke bare en farge: Bærekraftige bygninger eksisterer allerede» (Fufa et al., 2020). Reparasjon og forsterkning av bærende elementer i tre kan være et essensielt ledd i en søken etter grønnere bygg og rehabiliteringer.

Skader på bærende elementer i en konstruksjon innebærer varierende konsekvenser. For elementer av tre går det fra små overflateskader som mindre sprekker, til store skader som i stor grad føre til ytterligere store konsekvenser som kollaps. Behovet for reparasjon og forsterkning øker i takt med seriositeten av skaden, og bør behandles deretter. Enkle skader som ikke er ødeleggende for bæreevnen trenger ingen avanserte inngrep, men for skader som i stor grad svekker bæreevnen kreves det mer innsikt og kunnskap. Dersom kompetansen om skadeomfang og mulige løsninger er høy, vil man kunne gjøre kvalifiserte inngrep på et tidlig stadium og sikre konstruksjonens bæreevne i lang tid.

Macchi et al. (2018) definerer uttrykket å ettermontere/repasere som en handling som søker å gjenopprette et akseptabelt nivå av styrke for at sikkerheten overholdes. På bakgrunn av dette og erfaringer gjort i arbeidet med denne oppgaven er derfor følgende begreper definert:

Å *forsterke* (to *reinforce*) et element er en søken etter å benytte seg av forskjellige metoder for å øke kapasiteten til et element over opprinnelig styrke. Denne termen omhandler inngrep som er gjort på nye elementer for å øke kapasiteten samt å øke kapasiteten til skadde elementer.

Å *reparere* (to *repair*) et element er i denne oppgaven definert som en handling som søker å gjenopprette tapt styrke til et element som har, grunnet en type brudd eller annen svekkelse, mindre styrke og kvalitet enn opprinnelig.

1.1 Problemstilling

Problemstillingen i denne oppgaven vil være å ta for seg dagens forsterknings- og reparasjonsmetoder ved bruk av bærende systemer av tre. For å bryte dette ned i mer konkrete deler vil følgende forskerspørsmål bli satt søkelys på:

- Hvilke løsninger er forsket på, og er moderne i bransjen verden over?
- Hvordan løses bruddproblemer i søyler og vegger av tre med dagens teknologi i Norge?
- Hvilke faktorer og motivasjon blir lagt til grunn i valg av brukt forsterkningsmetode?

1.2 Formål

Formålet med denne oppgaven er å samle, evaluere og sette lys på forsterkningsmetoder som er brukt og kan brukes i byggebransjen. Da dette er et tema i byggebransjen som ikke er standardisert, er det veldig mange lokale løsninger og varianter. Dette fører til fremgangsmåter basert mye på erfaringer, og ikke kvalitativ dimensjonering og prosjektering. Med oppgaven ønskes det å sette lys på de forskjellige løsningene, og belyse muligheten for å utvikle en standard for reparasjonsmetodene for de mest forekommende bruddtypene. Samtidig er formålet å avmystifisere og belyse at tre er et godt materiale å bruke. Ikke bare i forhold til miljø, men også at det ofte lett lar seg reparere og forsterke i eksisterende konstruksjoner slik at de kan øke sin levetid.

1.3 Bakgrunn/motivasjon

Der hvor det tidligere kan ha vært foretrukket å gå over til andre materialer i bærende elementer grunnet styrke, har forsterkningsmetoder en fordel med at man med enkle tiltak kan øke kapasiteten til eksisterende elementer. Disse metodene kan dreie seg om helt enkle tiltak som en enkelt selvborende skrue eller litt mer omfattende og komplekse løsninger. Da det ikke er noen

utbredt tradisjon for å gjennomføre slike inngrep i norsk byggebransje, vil sannsynligvis et samlet og informativt sett med løsninger gjøre det mer forutsigbart, enkelt og sikkert. Dette gjør at potensialet i temaet er stort.

1.4 Avgrensninger

Selv om denne oppgaven tar for seg et studium av dagens mest brukte metoder for forsterkning av treelementer, har det vært naturlig å sette noen begrensninger grunnet omfanget. Det er valgt å kun se på vertikale, bærende elementer (søyler og vegger) da et studium av både vertikale og horisontale elementer ville blitt for omfattende. Det kan likevel være en viss overlapp i de nevnte teknikkene, så flere av evalueringene som er gjort i denne oppgaven kan sees på som interessante og aktuelle også for horisontale elementer. Det er i arbeidet med denne oppgaven observert at det er en stor overvekt av forskning som er gjort på horisontale elementer, slik som bjelker, gulv- og takelementer, sammenlignet med mengden forskning som er gjort på vertikale elementer. Innenfor forskningen som er gjort på vertikale elementer er det en stor overvekt av forskning på søyler, ikke vegger. Det er derimot en viss overlapp mellom disse elementene, så det er gjort en vurdering dithen at enkelt forskning ansees som relevant for denne oppgaven.

Oppgaven er kun konsentrert på elementer av tre. Det bygges også bærende konstruksjoner av stål og betong i Norge i dag, men grunnet omfanget er kun tre tatt i betraktning her. Da tre er et anisotrop materiale med veldig forskjellig materialelegenskaper enn andre nevnte materialer, vil ikke relevansen for disse materialene nødvendigvis være nevneverdig stor i denne oppgaven, men flere av de nevnte metodene baserer seg på erfaringer gjort fra forsterkning av stål- og betongelementer.

2. Metode

I arbeidet med oppgaven er det gjort et omfattende arbeid fra begynnelsen. Arbeidet startet med å samle inn store mengder forskning slik at det var mulig å danne seg et bilde av situasjonen slik den var, og hvilke personer samt drivkrefter som var i sving med å jobbe med temaet. Videre ble arbeidet med å finne passende caser igangsatt. Casene ble i stor grad påvirket av situasjonen med COVID-19. Det ble vanskelig å foreta relevante besøk på grunn av restriksjoner og smittevern hensyn. Et ønske om å inkludere flere caser ble derfor ikke oppfylt.

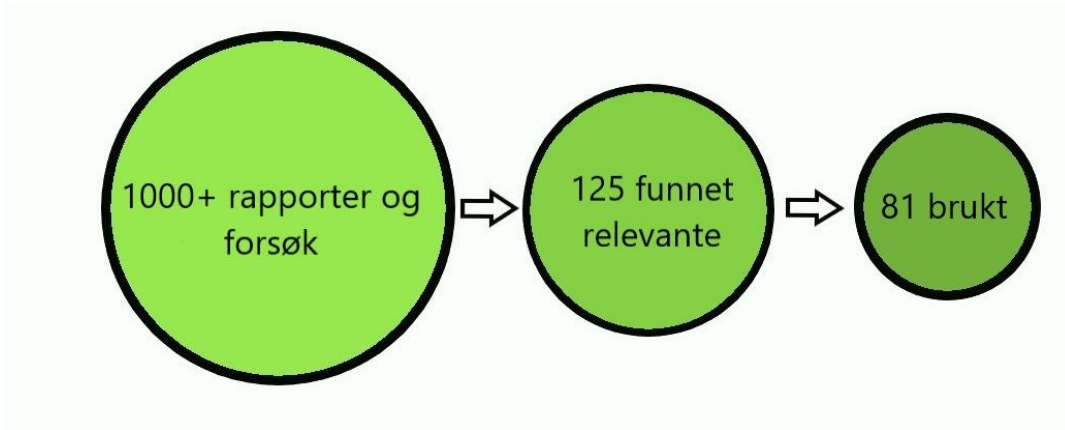
2.1 Litteraturstudie

Denne oppgaven baserer seg på kvalitative forsøk som er gjort på anerkjente universiteter og av anerkjente forskere med stor interesse for faget. Disse forsøkene er samlet som artikler i journaler, konferansepapirer og andre fagvurderte medier slik at det er stor enighet om kvaliteten på forskningen som er gjort. Disse danner igjen grunnlaget for et litteraturstudium som er gjort.

For å finne den nyeste forskningen er søkemotoren til NMBU, Oria (Biblioteket), brukt flittig med søkeord som *reinforcement*, *repair*, *timber*, *column*, *wall*, *FRP*, *Self-tapping screw*, *Eurocode 5*, og lignende. Disse gav flere tusen resultater, hvor ikke alt er relevant eller moderne. Veldig mye av forskningen som er gjort på dette feltet baserer seg på horisontale elementer (bjelker, gulv- og takelementer), noe som ikke alltid er like relevant for denne oppgaven som fokuserer på vertikale elementer (søyler og vegger). Grunnen til at dette ikke er like relevant, er at horisontale elementer ofte opplever krefter i andre vinkler på fiberen i trevirket enn hva vertikale elementer gjør. Gitt tre sin anisotropi vil derfor trevirket reagere forskjellig på aksial last og tverrlast, og forskning gjort basert på denne forskjellen vil ikke alltid kunne overlappes.

Mange av artiklene som denne oppgaven er basert på, er av nyere dato grunnet et ønske om å finne den nyeste forskningen. Forskning som er gjort i løpet av våren 2021, men som enda ikke er publisert ved oppgavens slutt, vil ikke kunne bli vurdert med i denne oppgaven da det ikke finnes tilgang til disse. En stor andel av artiklene som er brukt er publisert på anerkjente nettsider som *Taylor & Francis online*, *ScienceDirect* og *ResearchGate*. På disse nettsidene har journalene *Composite Structures*, *Construction and Building Materials*, *Engineering*

Structures, Wood Material Science & Engineering blitt brukt mye, for å nevne noen. Nettsidene publiserer journaler på engelsk, noe som har vært gjennomgående for de fleste kildene som er brukt. Svært lite forskning er publisert i Norge på dette feltet, men land som Kina, Italia, Tyskland, Østerrike og andre land i Europa, er svært godt representert. Figur 1 viser en oversikt over mengden kilder som er funnet og brukt i arbeidet med denne oppgaven.



Figur 1 Oversikt over kildeinnhenting. Søk i databaser ga 1000+ resultater, hvorav 125 ble funnet som relevante og interessante for temaet. Av de ble 81 brukt i arbeidet med oppgaven.

2.2 Case studier og samtaler med fagfolk

For å gi denne oppgaven en kobling til byggebransjen i Norge er det gjort besøk forskjellige steder for å undersøke reparasjoner og forsterkninger som er utført. Dette vil vurderes og sammenlignes med den topp moderne forskningen (*State-of-the-Art*) som er presentert i oppgaven. Samtalene med fagfolk er ikke referert, da det ikke skal brukes til annet enn refleksjon. Følgende har pekt seg ut etter besøkene og samtalene:

- Det finnes ingen felles standard/måte for hvordan man kan forsterke og reparere bærende elementer av tre.
- Slike inngrep blir basert på gamle tradisjoner, erfaringer og eksempler som ikke er begrunnet mer enn at det av erfaring fungerer.
- Det finnes ingen kildebank eller oppslagsverk som tar for seg temaet, og dermed ingen analytiske fremgangsmåter som enkelt gjør det mulig for brukere av forsterkningsmetoder å kvalitativt vurdere hvilken metode som passer best. Dette resulterer i liten utvikling av metodene, og bidrar til at nye metoder ikke blir brukt grunnet liten tilgang til enkel metodebeskrivelse.

3. Teori

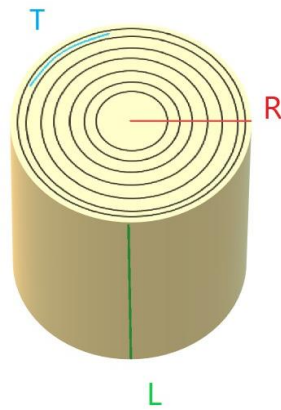
Norge er et nordisk land med mye naturressurser. Trær har i flere tusen år blitt brukt i menneskeskapte konstruksjoner som verktøy, båter, møbler og hus. Dette skyldes at det er god tilgang til trær, og at det er lett å forme til sitt bruk sammenlignet med andre materialer som krever en god mengde bearbeiding og omforming før det kan brukes til sin tiltenkte funksjon.

Menneskets evne til å utvikle nye måter å bruke treet på som materiale har drevet utviklingen og mulighetene på området fremover. I Norge i dag finner man mange treslag, men furu, gran og bjørk utgjør omtrent 90% av skogsmassen (Fjellstad, u.å.). Det er bartrærne furu og gran som for oss i Norge er viktigst som byggemateriale, da det er i stor grad er de som er brukt til trelast- og elementproduksjon.

3.1 Anatomien til tre

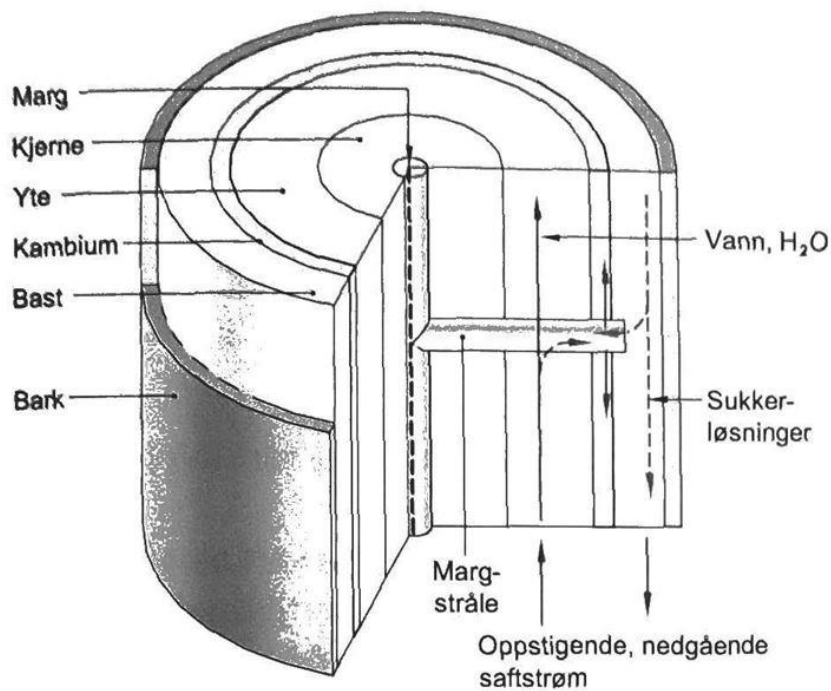
Selv om tre har mange gode egenskaper man tar for gitt, så er det viktig å forstå oppbygningen av treet, både i bruk i konstruksjoner og før det hogges i skogen. Trevirke har en høyst kompleks oppbygning som er vanskelig å finne i andre brukte materialer (Skaug, 2007). Sammenlignet med stål og betong, som er relativt uniforme gjennom hele materialet, har trær fiberretning, kvist og andre egenskaper som gjør det svært unikt og anisotrop. Dette gjør at de forskjellige treslagene er svært unike, men også enkeltrær innenfor samme treslag er ulike. Veden består av mange substanser, men basiselementene er lignin, cellulose og hemicellulose. Disse spiller forskjellige roller i sammensetningen. Cellulosefibrene er lange og har svært høy strekkfasthet. Lignin derimot fungerer som limet mellom cellulosefibrene (Kučera, 1998). For å forstå treet som byggemateriale og samspillet mellom substansene må man se på oppbygningen helt ned til cellenivå.

For å gi en generell forståelse av retningene i en stamme blir det som regel brukt forklarende navn på hver av de forskjellige retningene. Det er tangensial retning (T) som følger årringene på stammen, radiell retning (R) som går fra kjerne mot bark og lengderetning (L) som går fra rot til krone (kalles også aksial retning) (se figur 2).



Figur 2 Retningene tangensial (blå), radial (rød) og lengde (grønn) for ved. Basert på figur av Edvardsen og Ramstad (2014).

Tverrsnittet av veden gir et inntrykk av kompleksiteten til treet. Generelt kan man si at de aller fleste fibre i stammen er orientert i vertikal retning, altså trets lengderetning. Vann og mineraler tas opp i rota og transporteres oppover i stammen, samtidig som karbondioksid og sollys blir tatt opp i krona for så å bli transportert nedover i stammen. I figur 3 vises hoveddelene i vedens indre og hvordan væsketransporten går i stammen fra rot til krone i treet. Stammen består av bark, bast, kambium, yte, kjerne og marg.



Figur 3 Tverrsnitt av ved og væsketransport i trær (Edvardsen & Ramstad, 2014)

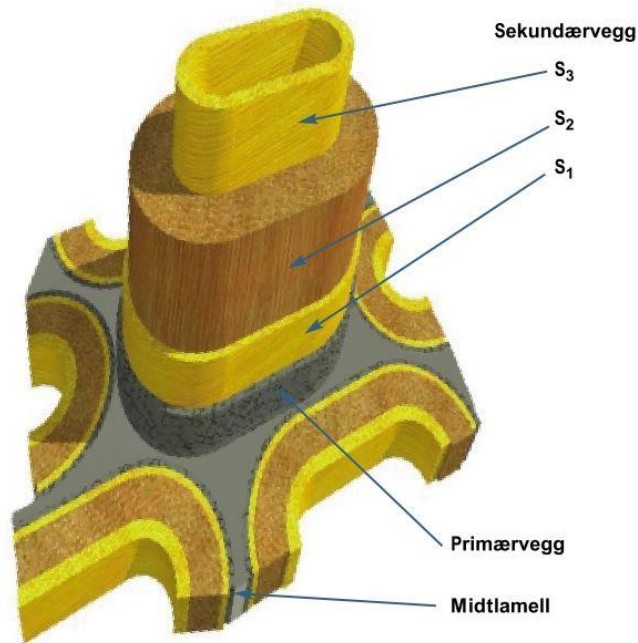
Bark er den delen av stammen som ligger ytterst. Barken har en viktig funksjon for treet da den beskytter resten av stammen for ytre påkjenninger, og den fungerer som den naturlige isolasjonen til stammen. Barken forhindrer også uttørking av stammen slik at treet kan utnytte væsken til å vokse (Kučera, 1998).

Basten (kalles også silvev) ligger innenfor barken. Som vist i figur 3 transporteres sukkerløsningene som blir produsert i kronen ved hjelp av basten, slik at hele stammen får tilgang til essensielle næringsstoffer som er produsert basert på karbondioksid og sollys. Basten går helt ned til roten hvor disse næringsstoffene blir lagret (Kučera, 1998).

I kambiet pågår tykkelsesveksten i treet. Her blir det fortløpende dannet nye lag med celler som enten tilslutter seg basten eller yteveden. Det skilles på celler som dannes om våren og celler som dannes om sommeren. Vårcellene er som regel lysere, har store cellehulrom og er tynnvegget. Det er disse vårvedcellene som bidrar til væsketransporten i yteveden. I motsetning til cellene som er dannet om våren, er cellene som blir dannet om sommeren mer tykkveggede og har dermed mindre hulrom. Dette gjør at man lett kan se fargeforskjell på vårvedceller og sommervedceller, og kan telle årringer i tverrsnittet av stammen (Edwardsen & Ramstad, 2014). Innenfor kambiet finner man vedvevet, som for enkelthetskyld deles inn i yteved med levende celler og kjerneved med døde celler. I yteveden finnes mye vann, men i kjerneveden inneholder cellene mer luft. Det er i hovedsak de tykkveggede sommercellene som står for avstivningen til treet (Skaug, 2007).

3.2 Cellenivå

Studerer veden på cellenivå ser man opphavet til flere av de kjente egenskapene til tre som byggemateriale. Her finner man forklaringen på hvorfor treverk har så god strekkfasthet, og hvorfor det reagerer som det gjør med fuktighet. Celleveggene er bygget opp av flere forskjellige lag, henholdsvis midlamell, primærvegg og sekundærvegg (se figur 4).

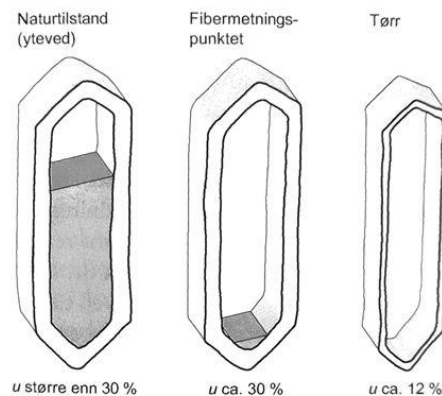


Figur 4 Oppbygning av celleveggene i trevirke (Skaug, 2007)

Midtlamellen som er gråfarget på figur 4 er det som skiller cellene fra hverandre. Tykkelsen på denne varierer mye basert på årringbredde og treslag (Kučera, 1998). Dette laget i strukturen er sett på som bindeleddet mellom cellene, og består i hovedsak av lignin, som er ansett som limet i veden. Primærveggen er neste lag innover i cellen. Sammenlignet med sekundærveggen har ikke fibrene i primærveggen noen tydelig felles retning. Dette laget består av, i likhet med midtlamellen, av lignin, men også av cellulose (Skaug, 2007). Innerst finner man sekundærlaget, som igjen blir delt inn i overgangslamellen (S1), sekundærveggen (S2) og tertiærlaget (S3). Her har hvert lag sin funksjon. S1 er overgangslaget mellom primærveggen og sekundærveggen, og har en motstandsdyktighet mot sopp grunnet en blanding av lignin og cellulose. Her ligger fibrene mer eller mindre på tvers av lengderetningen til cellene. S2-laget er lamellen som har størst betydning i cellen, da den er relativt tykk sammenlignet med S1 og S3. Her er fibrene orientert i samme retning på langs med lengderetningen, og består for det meste av cellulose og hemicellulose (Skaug, 2007). Dette er bakgrunnen for den betydelige strekkfastheten til treverket som ofte blir utnyttet i byggeskikken. S3-laget danner veggene i cellelumen. Som S1-laget har denne lamellen en fiberorientering som ligger mer på tvers av lengderetningen til cellen.

3.3 Egenskaper til tre

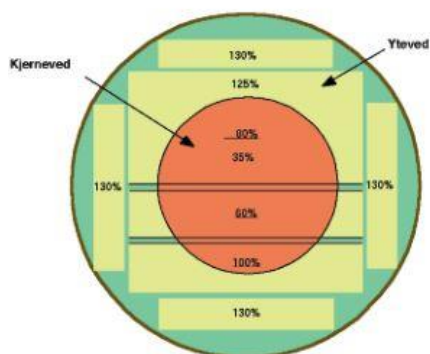
Tre er et hygroskopisk materiale, som betyr at det tiltrekker seg fuktighet basert på fuktigheten i luften rundt. Dette betyr igjen at trevirke kan svulle og krympe i takt med forandringer i vanddampinnholdet og temperaturen til omgivelsene. Det skiller på to former for fuktighet i tre: Vann som lagres i celleveggene og vann som ligger fritt i cellehulrommet. I eldre trær mister etter hvert cellene evnen til å transportere vann. Derfor er det kun cellene i yteveden, altså de gjenværende levende cellene, som har vann i cellehulrommene. De døde cellene i kjerneveden har da stort sett bare luft i cellehulrommene. Trær som nylig er hugget har en naturlig høy fuktighetsprosent som ligger godt over nivået som er ønsket til materialbruk (Tronstad, 2003). Derfor er en uttørking essensielt for at man skal kunne bruke trevirket i konstruksjoner og som trelast uten at det skal oppstå problemer. Når trevirket blir uttørket blir først det frie vannet i cellehulrommet fordampet (se figur 5). Punktet hvor alt det frie vannet i cellehulrommene er fordampet og det kun er vann igjen i celleveggene, blir kalt for fibermetningspunktet. Dersom trevirket blir tørket mer enn dette, vil vannet som er lagret i celleveggene fordampe og celleveggene vil krympe (Edvardsen & Ramstad, 2014). At celleveggene krymper vil føre til deformasjoner i trevirket som kan ha uønsket effekt på konstruksjonen.



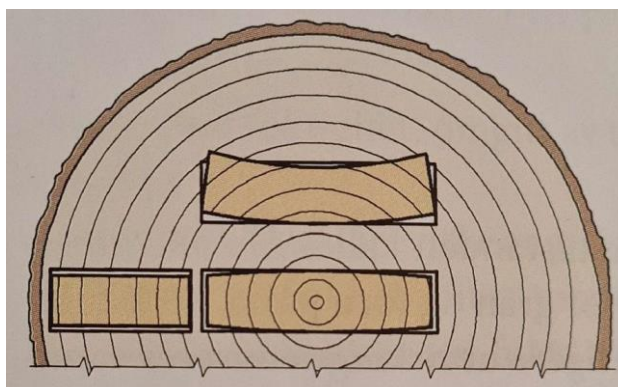
Figur 5 Fuktinnhold i trevirke i prosent av tørrvekten (Edvardsen & Ramstad, 2014)

Konsekvensen av treets hygroskopiske egenskap er at trevirke ikke ukritisk kan benyttes uten å ta høyde for denne forandringen. Som det fremgår av figur 6 er det derfor store forskjeller i virke hentet fra forskjellige deler i stammeverrsnittet. Et eksempel i en stamme med gjennomsnittlig 80% fuktighet, inneholder kjerneveden omtrent 32-40% fuktighet, mens yteveden inneholder rundt 120-130% (Tronstad, 2003). Det er tydelig forskjell på hvor mye

trevirket krymper i de forskjellige retningene. Bakgrunnen for dette finner man i cellenes utstrekning, da cellene sveller mer på tvers av fiberretningen enn i lengderetning. Dette fører til at man generelt kan si at trevirket sveller omtrent 8% i tangentiell retning, 4% i radiell retning, og kun 0,3% i lengderetning (Edvardsen & Ramstad, 2014). Konsekvensen av dette er at tørking av materialer kan føre til større krymping på ytevedsiden enn det er på kjernevedsiden. Man kan derfor få materialer som vrir seg, bøyer seg eller krymper usymmetrisk, slik det er vist på figur 7.



Figur 6 Normal fuktighetsfordeling i planker og bord skåret av en gran-/furustokk (Tronstad, 2003)

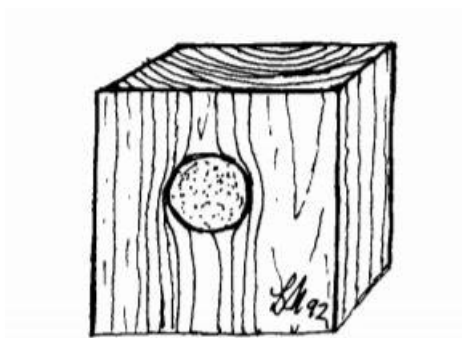


Figur 7 Konsekvens av krymping i forskjellig retning (Edvardsen & Ramstad, 2014)

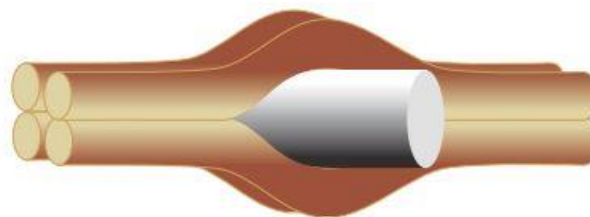
3.4 Feil i treverket

Siden trær er organiske og levende materialer, vil forskjellene fra tre til tre være store. Enhver uregelmessighet som forstyrrer treetts opprinnelige utforming, vil svekke treetts styrke og stivhet (Edvardsen & Ramstad, 2014). Nedenfor er det gjennomgått noen av de største virkesfeilene som påvirker styrken til trær.

En tydelig forskjell er hvor mye kvist man har i elementene. Kvist fremstår som en feil i virket på elementer av tre, og må derfor tas høyde for. De varierer i størrelse, plassering og mengde fra tre til tre (Edvardsen & Ramstad, 2014). En kvist i materialet er et resultat av en gren på treet, og har sin opprinnelse i marginen og skyter ut gjennom stammen i radiell retning. Siden kvisten dermed bryter imellom de lange fibre som går i lengderetning på stammen, vil kvist forstyrre disse (se figurene 8 og 9). Det fører til at styrken til treet, som i stor grad baserer seg på de fibre i lengderetning, blir redusert.



Figur 8 Hvordan kvist påvirker fiberretning (Nagoda, 1992)



Figur 9 Kvist som skaper fiberforstyrrelser (Øvrum, 2012)

Tennar er en struktur i treet som oppstår som en reaksjon mot ytre påkjenninger. Dersom treet til stadighet er utsatt mot mye vind, står i helning eller på annet vis opplever en kraft som ikke er sentrert i midten av stammen, vil treet utvikle tennar på trykksiden. Dette gjør treet for å støtte opp mot nevnte krefter. Tennar kjennes igjen ved at celleveggen til disse fibrene er mye tykkere, og at det kan resultere i omtrent 40% høyere densitet. Dette påvirker krampeegenskapene til fibrene som vil krympe mer enn normalt i lengderetning (Skaug, 2007). Tennar er ikke ønsket i byggematerialer, da det er svakere og vil utforme andre deformasjoner enn vanlig ved.

3.5 Densitet og mekaniske egenskaper

Densiteten til et materiale er et mål på vekt per størrelsesenhet, som for trevirke måles i kg/m^3 . Angir man densitet som forholdet mellom helt tørt trevirke og rått trevirke får man et mål på basisdensiteten (Tronstad, 2003). Generelt sett har celleveggene i alle treslag relativt lik densitet på 1500kg/m^3 i tørr tilstand. Derfor vil densiteten til treet som helhet være et mål på forholdet mellom cellevegg og cellehulrommet (Skaug, 2007). Dersom et tre har en høy densitet, har det mye cellevegg i forhold til cellehulrom. Da kan treet binde mer vann i celleveggen og mindre vann blir liggende fritt i cellehulrom, som igjen fører til at et tre med høy densitet vil svulle/krympe mer enn et tre med lav densitet. Som tidligere nevnt har vårvedcellene større hulrom enn sommervedcellene, som betyr at trevirke med stor andel sommerved har høyere densitet. Derfor har årringbredden en viktig rolle i densiteten til treet. Skaug (2007) peker på at årringbredde påvirkes av næringsinnholdet i jorda og god skogskjøtsel, som er faktorer som

påvirker densiteten til trevirke da dette fører til en økning av årringbredden i vårveden. En annen faktor som også nevnes er at trær som har vokst lenger nord eller høyere over havet vil ha en lavere densitet enn motsatt tilfelle. Dette fordi veksten av treet stopper tidligere på sommeren, og at vårveden derfor vil være dominerende i størrelse.

Typiske verdier for densiteten til gran og furu i Norge ligger på rundt 430 kg/m^3 og 490 kg/m^3 i tørr tilstand. Slik helt tørr tilstand er ikke brukstilstand, så et normalt fuktinnhold å måle densiteten på er ved 12% fuktighet. Da øker vanninnholdet i trevirket, og for gran øker densiteten til rundt 470 kg/m^3 og for furu 530 kg/m^3 (Edwardsen & Ramstad, 2014).

Som tidligere nevnt er mengden sommersved viktig for avstivningen til treet. Derfor kan densiteten knyttes tett opp mot fasthetsegenskapene til trevirket. Mengden tykkvegget sommersved, som har høy densitet, vil som regel gi en god indikasjon på fastheten til treet. Høyere densitet gir derfor normalt høyere fasthet.

3.6 Tre som byggemateriale

Siden trevirke er så forskjellig fra tre til tre er det utbedret en standard som fokuserer på å sortere virket etter styrke. NS-EN 338 er en europeisk standard hvor det er mulig å slå opp i de forskjellige klassene, lese av bøyefasthet, E-modul og densitet, bare for å nevne noe (Øvrum, 2012). For konstruksjonsvirke, altså trelast som blir brukt i konstruksjoner, finnes det flere klasser som er sortert etter bøyefastheten. En slik oversikt gjør det mulig for brukere av materialet å vurdere hvilken styrkegrad man trenger til sitt bruk, og derfor ikke betale unødig mye for et materiale som er altfor sterkt og unngå å bruke materiale som er for svakt. De vanligste fasthetsklassene er C14, C18, C24 og C30, og har egenskaper som er gitt i tabell 1.

I NS-EN 338 er det også blitt definert en T-klasse for konstruksjonsvirke som er tiltenkt brukt i tilfeller hvor strekk er den dominerende lastpåvirkningen og i limtre. Denne klassen angir strekkfastheten til et materiale. T-15 og T-22 er ofte brukt i limtre i Norge, og i denne annotasjonen betyr trevirke i T klassen med henholdsvis 15 N/mm^2 og 22 N/mm^2 . Tallet etter T angir karakteristisk strekkfasthet (Glasø, 2016). Som vist på figur 14 kan man oppnå en limtrebjelke med fasthetsklasse GL30C om man bruker virke fra T-15 og T-22.

Tabell 1 Karakteristiske fastheter, stivhetsmoduler og densiteter for dimensjonering av konstruksjonsvirke. Basert på tabell fra Edvardsen og Ramstad (2014)

		Fasthetsklasse			
		C14	C18	C24	C30
Fastheter i N/mm²					
Bøyning	f_{mk}	14,0	18,0	24,0	30,0
Strekk i fiberretning	f_{t0k}	8,0	11,0	14,0	18,0
Strekk på tvers av fiberretning	f_{t90k}	0,4	0,4	0,4	0,4
Trykk i fiberretning	f_{c0k}	16,0	18,0	21,0	23,0
Trykk på tvers av fiberretningen	f_{c90k}	2,0	2,2	2,5	2,7
Skjær	f_{vk}	3,0	3,4	4,0	4,0
Rulleskjær	f_{rk}	0,8	0,8	0,8	0,8
Stivhetsmodul ved stabilitetsberegninger i N/mm²					
E-modul i fiberretningen	E_{0k}	4700	6000	7400	8000
Stivhetsmodul ved deformasjonsberegninger i N/mm²					
E-modul i fiberretningen	E_0	7000	9000	11000	12000
E-modul på tvers av fiberretningen	E_{90}	230	300	370	400
Skjærmodul	G_0	440	560	690	750
Rulleskjærmodul	G_r	44	56	69	75
Densitet i kg/m³					
Karakteristisk densitet	ρ_k	290	320	350	380
Midlere densitet	ρ_m	350	380	420	460

I Norge er det Norsk Trelastkontroll som kontrollerer at styrkesorteringen av trevirke gjøres i henhold til kravene i NS-EN 14081 (CE-merking). Denne kontrollen innebærer blant annet kontroll av produsentenes egenkontroll, utstyr og rutiner som igjen sikrer at kundene til enhver tid får riktig styrke på trevirket slik at produktfeil ikke skal forekomme (Øvrum, 2012). Da slikt trevirke ofte brukes i bærende deler av konstruksjonen, er slik kontroll meget viktig for å med trygghet kunne bruke dette trevirket uten kollaps.

3.7 Treelementer

Måten det har blitt bygget på i Norge har gjennom årene forandret seg med utvikling av behov. Godal et al. (2009) skriver at stolpereiste hus fikk en oppblomstringstid etter 1860 grunnet et ønske om mer plass til lagring av fôr. Dette er bare ett av mange eksempler på nye prioriteringer som gjennom tidene har endret byggeskikken, og dermed også endret bæresystemene i husene. Dette ser man også på materialene som er brukt i den bærende konstruksjonen. I en enklere tid hvor det ikke fantes en felles standard for byggemåte, fantes det heller ingen standard for materialene som ble brukt. I nyere tid vet vi mer om tre som materiale, og kan derfor perfektionere bruken av det og utarbeide standarder for effektiv og forutsigbar bruk av tre som byggemateriale. Et stadig økende press på å bruke bærekraftige materialer, er også en faktor som i nyere tid gir en utbredt bruk av tre som byggemateriale.

Tidligere var uttak av trevirke basert mer på empiri enn på konkrete verdier. Eldre hus har ofte heltre som er hugget til et spesifikt formål når det gjelder både form og dimensjoner, og tømmerhuggere kunne ut i fra erfaringen sin gjøre antagelser på styrken og kvaliteten på trevirket (Godal et al., 2009). En slik teknikk var også brukt grunnet mangelen på effektive bearbeidingsmetoder, men teknikken bar også med seg en del fordeler. Ved å ikke bryte opp trevirket unødvendig mye beholder man en del av de gode egenskapene som treet har før det blir hugget, blant annet bestandigheten mot ytre påkjenninger. Godal et al. (2009) peker også på den praktiske fordelene med dette da man sparte seg for mye tid og krefter i arbeidet. Dette fordi trevirket stort sett lett kunne fraktes fra skog til ønsket plass i bygget, og man kunne reise hus mye raskere. I moderne tid brukes også heltre i konstruksjoner, men med fokus på andre parametere. Bukauskas et al. (2019) viser til at det er et økende problem på verdensbasis at skog vokser med en diameter som er for liten til bruk som bearbeidet trevirke. I sin rapport viser de derfor til at ved bruk av moderne ikke-destruktive målemetoder kan man gradere heltre slik at det kan bli brukt som bærende elementer i moderne hus. Figur 10 viser hvordan heltre, i form av ubearbeidede stokker, kan brukes i et bærende system i en moderne hall.



(a)



(b)

Figur 10 (a) Bæresystem av heltre under montering. (b) Ferdig hall. Muroto Indoor Stadium, Japan 2017. Foto: Prof. Katsuhiko Imai. Hentet fra Bukauskas et al. (2019).

Etter hvert kom muligheten for å enkelt bearbeide trevirket mer. Oppgangssaga, som er en sag drevet av vannkraft ved hjelp av et vannhjul, gjorde prosessen med å tilpasse trevirke til formålet mye lettere. Hvor man tidligere hadde brukt øks til å tilpasse elementene i byggene, ble det nå vanligere med oppgangssag og håndsag for masseproduksjon av bord (Norsk Sagbruksmuseum, u.å.). Det ble en enorm omveltning i byggeskikken rundt 1800-tallet, og Godal et al. (2009) setter lys på at det antageligvis var en kombinasjon av et ønske om økt volum og bedre utstyr som stod for denne forandringen. En annen faktor for denne overgangen fra et flertall laftete hus til reisverk er at det er materialbesparende, og at krympingen i lengderetning så å si er neglisjerbar. Dette banet også vei for å lettere kunne tilpasse seg krav som kom på 1900-tallet til varmeisolering og tetthet i bygget (Treteknisk, 2006).

Denne søken etter å stadig utnytte trevirke i større grad har brakt byggeskikken fremover. I 1906 hadde Otto Hetzer (1846 – 1911) en patent som beskrev hvordan man kunne lime sammen elementer av tre for å lage en krum bjelke. Dette ble starten på en idé som ble en av de første store limtrekonstruksjonene, og i 1910 stod Reichseisenbahnhalle klar for verdensutstillingen i Brussel (Crocetti et al., 2015). En annen metode, massivtre, ble først brukt i Canada rundt år 1975 i reparasjon og bygging av broer (Treteknisk, 2006). Begge disse metodene baserer seg i stor grad på å lime sammen lameller i henholdsvis samme fiberretning (limtre) og vinkelrett på hverandre (massivtre). Grunnet denne forskjellen blir de brukt forskjellig i konstruksjoner. Norge er blitt store på å produsere og benytte seg av limtre og massivtre.

Massivtre

Massivtre er i hovedsak lameller av tre som blir satt sammen i forskjellige fiberretninger. I Norge blir gran og furu i stor grad brukt grunnet den gode tilgangen og egenskapene. Oppbygningen av et massivtreelement gjør at hver enkelt lamell kan være av relativt lav sorteringsgrad, og en større andel av trevirket blir brukt. Det brukes blant annet lim, skruer, spiker og tredybler i sammenføyningen av lamellene (Solli & Glasø, 2011). Da massivtreelementer har lameller med fiber i flere retninger vil de oppleves som veldig stive og lastbærende i flere akser. Dette gjør at massivtreelementer gjerne har en funksjon som avstivning i konstruksjonen i tillegg til en bærende funksjon. Det finnes 3 hovedtyper av massivtreelementer: kantstilte elementer, krysslagte elementer og hulromselementer.

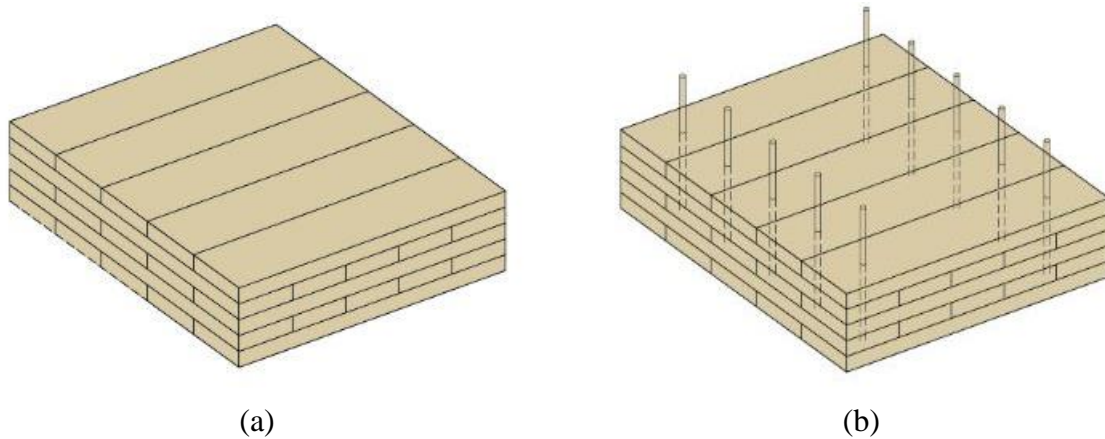
Kantstilte elementer er massivtreelementer som er satt sammen av planker med flate mot flate (se figur 11). De kan være sammenføyd med stålstag, lim, skruer, spiker og tredybler (Treteknisk, 2006). Slike elementer brukes gjerne i brodekker og lignende hvor lasten kommer fra en retning.



Figur 11 Kantstilt element satt sammen med stålstag/skruer (Finch, 2016)

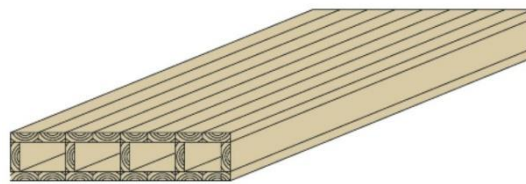
Krysslagte elementer (figur 12) baserer seg på lameller av tre som er lagt med kryssende fiberretning i enten 45 eller 90 grader. Disse blir svært stive i flere retninger, og er gunstige for avstivende vegger eller gulv i konstruksjonen. De ytterste lagene har fibrene orientert i retning av spennet, det vil si vertikalt for vegger. Normalt vil det da være minst to lag i denne retningen, men elementene kan produseres med flere lag (gjerne 3, 5, 7 eller 9) etter ønsket kapasitet.

Lagene her er satt sammen med lim (figur 12 a.) eller forboring og tredybler (figur 12 b.) (Treteknisk, 2006). Grunnet sammensetningen med krysslagte bord er disse elementene svært dimensjonsstabile og lengdekrympingen til trevirket går i flere retninger.



Figur 12 Eksempler på krysslagte elementer. (a) Krysslagt massivtre sammenføyd med lim mellom lamellene. (b) Krysslagt massivtre sammenføyd med tredybler. Hull forbores og tredybler med litt større diameter bankes inn. (Treteknisk, 2006)

Hulromselementer er ikke massive som krysslagte- og kantstilte elementer. De finnes i både parallelle og kryssende fiberretning, og det blir bare brukt lim i sammenføyningen. I lamellene som ikke er ytterst, er det hulrom som kan fylles med isolasjon og trekking av kabler til tekniske installasjoner. Figur 13 viser hvordan et hulromselement/kassedekke kan se ut (Treteknisk, 2006).



Figur 13 Typisk utseende for hulromselement/kassedekke (Treteknisk, 2006)

Limtre

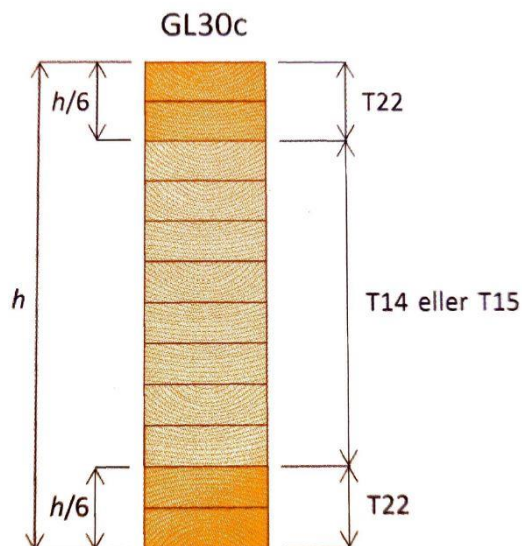
Limtre er basert på den samme idéen som massivtre, men forskjellen er at lamellene her bare er limt i samme fiberretning. Dette gjør at man får mye styrke i forhold til egenvekt, og dermed muligheten til å bygge i svært store spenn. Typiske elementer som er bygget i limtre er bjelker og søyler, samt forsterkning over åpninger i vegger og delstaver i fagverk (Solli & Glasø, 2011).

Her blir det som tidligere nevnt brukt gran i stor grad, men furu er å foretrekke dersom konstruksjonen skal stå i fuktvarierende områder og impregneres.

En fordel for limtre, slik som for massivtre, er at det muliggjør bruken av flere styrkegrader av lavere kvalitet. Man definerer limtre som elementer som oppfyller kravene i NS-EN 14080 (Solli & Glasø, 2011). I denne standarden skiller man mellom homogene og kombinert limtre, som henholdsvis betyr limtre bestående av bare én fasthetsklasse og limtre bestående av en kombinasjon av fasthetsklasser. I tabell 2 er fasthetsklassene for kombinert limtre (GLc) vist med alle egenskaper man kan definere og bruke. Tilsvarende tabell finnes for homogene limtreelementer. Løsningen i et kombinert element er å bruke lameller med høy kvalitet i de ytterste lagene, og lameller av lavere kvalitet i midten slik det er vist på figur 14.

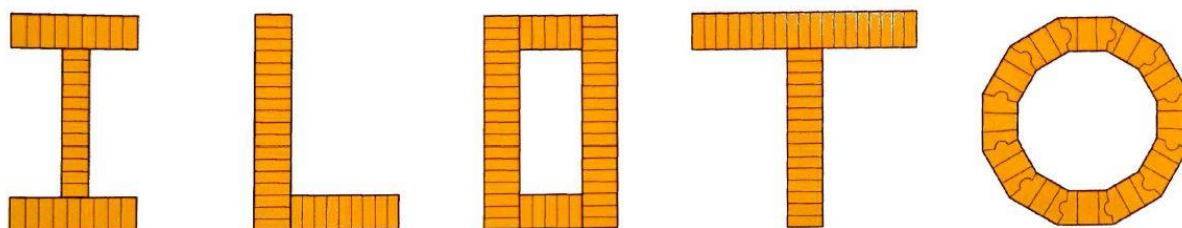
Tabell 2 Fasthetsklasser for kombinert limtre etter NS-EN 14080

Egenskap	Symbol	Limtre fasthetsklasse						
		GL20c	GL22c	GL24c	GL26c	GL28c	GL30c	GL32c
Bøyefasthet	$f_{m,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Strekfasthet	$f_{t,0,g,k}$	15	16	17	19	19,5	19,5	19,5
	$f_{t,90,g,k}$	0,5						
Trykkfasthet	$f_{c,0,g,k}$	18,5	20	21,5	23,5	24	24,5	24,5
	$f_{c,90,g,k}$	2,5						
Skjærfasthet (skjær og torsjon)	$f_{v,g,k}$	3,5						
Rulleskjærfasthet	$f_{r,g,k}$	1,2						
Elastisitetsmodul	$E_{0,g,mean}$	10400	10400	11000	12000	12500	13000	13500
	$E_{0,g,05}$	8600	8600	9100	10000	10400	10800	11200
	$E_{90,g,mean}$	300						
	$E_{90,g,05}$	250						
Skjærmodul	$G_{g,mean}$	650						
	$G_{g,05}$	542						
Rulleskjærmodul	$G_{r,g,mean}$	65						
	$G_{r,g,05}$	54						
Densitet	$\rho_{g,k}$	355	355	365	385	390	390	400
	$\rho_{g,mean}$	390	390	400	420	420	430	440



Figur 14 Eksempel på en GL30c med typisk tverrsnitt for en limtrebjelke som har høyere styrkegrad på lamellene i ytterkant sammenlignet med lamellene i midten. (Crocetti et al., 2015)

Crocetti et al. (2015) viser til flere typer tverrsnitt (figur 15) hvor alle har sine styrker og svakheter. Det rektangulære tverrsnittet i figur 14 er det mest brukte, men med store og moderne produksjonslokaler kan man være mer kreativ og produsere stort sett det man behøver til sitt bruk.



Figur 15 Forskjellige typer limtreværnsnitt. Fra venstre: I-tverrsnitt, L-tverrsnitt, rørtverrsnitt (rektangel), T-tverrsnitt og rørtverrsnitt (mangekantet) (Crocetti et al., 2015)

Generelt byr bruk av massivtre og limtre på mange fordeler. En av de store fordelene med bruk av disse type elementer er produksjonen. Ved en nøye prosjektert konstruksjon kan massivtreelementene være ferdigprodusert hos produsent, transportert og heist på plass på byggeplassen. Dette skaper fordeler gjennom hele prosessen. Ved bruk av prefabrikkerte elementer vil man kunne regne med å få mye mindre kapp og avfall på byggeplass. Mye av

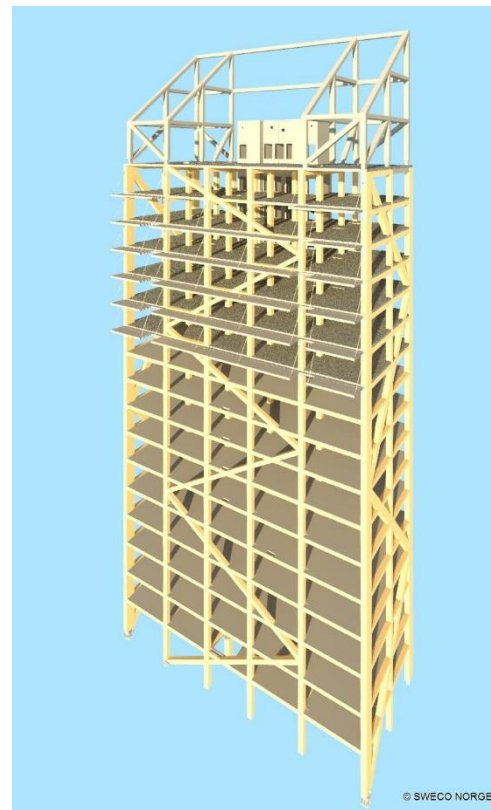
jobben blir bare å heise på plass ferdige elementer fra fabrikk, noe som sparer håndverkere for mye kapasitet, og da byggeprosessen blir mer strømlinjeformet.

En annen god grunn til at elementer med tre blir benyttet i bærende deler av konstruksjoner er miljøaspektet. Tre, som via fotosyntesen binder CO₂, er en virkelig fornybar energi som reproducerer seg selv bare ved hjelp av naturen. Dette gjør at i prosjekter hvor det brukes mye trevirke vil man enklere kunne se et positivt miljøregnskap, siden trevirket vil fremstå som et karbonlager. Sammenlignet med andre tradisjonelle byggematerialer, som stål og sement/betong, så inngår ikke ikke-fornybare produkter i produksjonen, og man kan forvente et bygg med stort energisparende potensial og god inneklima (Zhou et al., 2021).

Som et eksempel på hva som kan oppnås med limtre og massivtre i kombinasjon står Mjøstårnet i Brumunddal som et forbilde for hele bransjen (figur 16). Med sin 85,4 meter høyde er det våren 2021 verdens høyeste bygning i tre. I denne konstruksjonen består det bærende systemet av søyler, bjelker og diagonaler av limtre, og avstivning i form av heissjakter samt balkonger er av massivtre (Moelven Limtre, 2021).



(a)



(b)

Figur 16 (a) Montering av bærende limtrekonstruksjon i Mjøstårnet (foto: Jens Haugen/Anti). (b) 3D-modell av bæresystemet til Mjøstårnet (figur: Sweco). Bilder hentet fra Moelvns mediebank (Moelven Limtre, u.å.)

3.8 Lasttyper i norsk byggeskikk

Norsk, moderne byggeskikk baserer seg i stor grad på et europeisk samarbeid om et standardisert sett dimensjoneringsregler kalt Eurokoder (EC). Disse standardene er svært omfattende, og krever forståelse for riktig og effektiv bruk. Eurokodene omfatter flere typer konstruksjoner, blant annet betong, stål og tre i henholdsvis Eurokode 2, 3 og 5. Videre i denne oppgaven tas det bare høyde for Eurokode 5 (EC5), da det er den som tar for seg trekonstruksjoner, og Eurokode 1 (EC1) som omhandler laster. Generelt sett er Eurokoden lik for alle deltagende land, men med nasjonale tillegg tilpasser man reglene til bruk i eget land. Det poengteres i EC5 (Standard Norge, 2004) at man kun kan bruke denne standarden til prosjektering av bærende konstruksjoner i Norge dersom de bestemmelser som er gitt i det norske nasjonale tillegget følges.

I Eurokodene skilles det på to tilstander man skal dimensjonere for: Bruddgrensetilstander (*Ultimate limit states*) og bruksgrensetilstander (*Serviceability limit states*). I førstnevnte tar Eurokoden for seg situasjoner hvor bærende elementer av tre går i brudd. I sistnevnte kontrollerer man for parametere som ikke nødvendigvis er ødeleggende for bæreevnen til konstruksjonen, men for bruken av det. Dette innebærer glidning, nedbøyning og vibrasjoner (Standard Norge, 2004). I all hovedsak baserer dimensjonering av bærende elementer seg på at man ut ifra kjente type laster, tverrsnitt og materialkvaliteter kan forsikre seg om at elementene er sterke nok. Med andre ord kontrollerer man alltid last mot styrke. For en grundigere gjennomgang av aktuelle bruddtyper for denne oppgaven, se kapittel 3.9.

Det skilles generelt sett mellom forskjellige type laster: Egenlast, nyttelast og naturlaster. Alle laster, med tilhørende sikkerhetsfaktorer, er definert i EC1. Merk at gjennomgangen av nevnte fremgangsmåter i denne oppgaven bare tar for seg den røde tråden og konseptene for utregning av laster. For å få fullstendig fremgangsmåte og kontroll på utregning av laster henvises det til EC1. Det kan være flere faktorer som spiller inn i ulike situasjoner, så enhver form for dimensjonering bør beregnes etter nevnte standarder.

Egenlast baserer seg på egenvekten til materialene som er brukt i konstruksjonen. Disse er viktige å ta med da denne typen vekt er uunngåelig i enhver situasjon. Egenlastene er regnet i tyngde per. volum [kN/m^3]. I denne formelen er masse, i kg, multiplisert med tyngdeakselerasjonen, g. I mange tilfeller kan dette multipliseres med dimensjonene til

konstruksjonen man skal beregne og få enheten [kN/m²] (SINTEF Byggforsk, 2013). Denne lasten er sterkt knyttet opp mot densiteten til materialet.

Nyttelasten tar for seg hva konstruksjonen skal brukes til, og hvordan vekten av bruken påvirker den bærende konstruksjonen. Det kan for eksempel være en restaurant, et forsamlingslokale, kontorlandskap eller andre former for bruk. Det defineres i EC1 Del 1, ulike lastkategorier for forskjellig type bruk. Her faller for eksempel bolighus under kategori A, mens kontorbygg faller under kategori B (Edwardsen & Ramstad, 2014). Grunnen til at det er definert på denne måten er at man kan forvente forskjellig bruk, og dermed forskjellige laster i bolighus og kontorbygg. Edwardsen og Ramstad (2014) gir også noen eksempler på hva EC1 sier om de lastene i de forskjellige kategoriene:

Tabell 3 Oversikt over enkelte nyttelaster i EC1 - Del 1-1. Basert på oversikt fra Edwardsen og Ramstad (2014)

Bygningstype	Nyttelast
Boligrom, hotellrom og lignende	2,0 kN/m ²
Kontorarealer, skoler og lignende	3,0 kN/m ²
Trapper	3,0 kN/m ²
Balkonger	4,0 kN/m ²

Naturlaster er viktig i Norge da dette er et land med store naturkrefter. I all hovedsak dreier dette seg om snølast (*snow load*) og vindlast (*wind load*). Disse lastene har sine egne deler av EC 1, og tar høyde for en rekke faktorer som er til for å gjøre dimensjoneringsnøyaktigheten så høy som mulig.

Snølast

Snølaster utgjør store tyngder for bærende konstruksjoner i hele Norge. Det er flere faktorer som spiller inn i hvor stor denne lasten er, blant annet formen og egenskapene til taket, byggets plassering og terrenget rundt. Standard Norge (2003) har i sin «Eurokode 1: Laster på konstruksjoner – Del 1-3: Allmenne laster - Snølaster.» definert følgende formel for utregning av snølaster på tak:

$$s = \mu_i C_e C_t s_k \quad (1)$$

Hvor: s er snølast på tak $\left[\frac{kN}{m^2}\right]$

μ_i er snølastens formfaktor basert på takvinkel

C_e er eksponeringskoeffisienten

C_t er den termiske koeffisienten

s_k er karakteristisk verdi for snølast på mark $\left[\frac{kN}{m^2}\right]$

Formel 1 Dimensjonering av snølast i henhold til (Standard Norge, 2003)

I denne formelen får man ut en verdi som er en jevnt fordelt last på hele taket. Den skal medregnes i lastkombinasjonene som er aktuelle for dimensjoneringen av konstruksjonen. I det nasjonale tillegget i EC1 – Del 1-3 finnes det en oversikt over verdier for s_k for alle norske kommuner. Legg merke til at s_k her er en karakteristisk verdi for snølast på mark. Her er dette definert som «snølast på mark er basert på en sannsynlighet på 0,02 for at den ikke overskrides et enkelt år, ikke medregnet eksepsjonelle snølaster. (Standard Norge, 2003)». Det betyr at det er en mulighet for at den beregnede snølasten overskrides, men at det skjer svært sjeldent.

Vindlast

Vindlastene i Norge er store. Å dimensjonere bærende konstruksjon etter kreftene vinden utretter er viktig for å få et solid bygg. Vindlasten varierer over hele landet, og Godal et al. (2009) peker på at dette er en grunn til at man på Sørlandet har brattere tak enn man har i enkelte innlandsstrøk. Standard Norge (2005) har en egen del av Eurokodene dedikert for dimensjoneringen av vind som heter «Eurokode 1: Laster på konstruksjoner – Del 1-4: Allmenne laster - Vindlaster.» Dette er en mer avansert standard å bruke enn snølaststandarden, og faktorer som takutforming, plassering i forhold til andre bygg, aktuell kommune og topografi (SINTEF Byggforsk, 2003). Tabell 4 viser fremgangsmetoden til vindberegninger og hvilke faktorer som spiller inn i disse beregningene.

Tabell 4 Beregningsprosedyre for bestemmelse av vindpåvirkninger (SINTEF Byggforsk, 2003)

Parameter	Referanse
Topp hastighetstrykk q_p	
basisvindhastighet v_b	4.2 (2)P
referanse høyde z_e	Kapittel 7
terrengkategori	Tabell 4.1
karakteristisk vindkasthastighetstrykk q_p	4.5 (1)
turbulensintensitet I_v	4.4
stedsvindhastighet v_m	4.3.1
terrengformfaktor $c_o(z)$	4.3.3
ruhetsfaktor $c_t(z)$	4.3.2
Vindtrykk, for eksempel for kledninger, festeinnretninger og konstruksjonsdeler	
utvendig formfaktor C_{pe}	Kapittel 7
innvendig formfaktor C_{pi}	Kapittel 7
resulterende formfaktor $C_{p,net}$	Kapittel 7
utvendig vindtrykk: $w_e = q_p C_{pe}$	5.2 (1)
innvendig vindtrykk: $w_i = q_p C_{pi}$	5.2 (2)
Vindkrefter på konstruksjoner, for eksempel resulterende vindpåvirkninger	
konstruksjonsfaktor: $C_s C_d$	6
vindkraft F_w beregnet fra kraftfaktorer	5.3 (2)
vindkraft F_w beregnet fra formfaktorer	5.3 (3)

Merk at referansene i tabell 4 henviser til seksjoner i EC1 – Del 1-4: Allmenne laster – Vindlast. Den første delen av denne prosedyren baserer seg på å finne topphastighetstrykket q_p . Dette dreier seg om å finne hvilken type hastigheter man kan forvente å finne for vind på området hvor konstruksjonen er plassert. Denne delen av utregningen baserer seg på referansevindhastighetene for den spesifikke kommunen, topografien hvor konstruksjonen er plassert, ruheten til terrenget og vindhastighetstrykket.

Andre del av prosedyren tar for seg utformingen til konstruksjonen og vindretning. Vinden forgreiner seg forskjellig ut ifra hvor på huset den treffer. Utvendig formfaktor, C_{pe} , er faktorer som man finner basert på soneinndeling man gjør basert på vinkelen vinden har på konstruksjonen. C_{pi} er en faktor som tar i betraktning tettheten til bygget, og blir derfor en innvendig formfaktor. Ved å multiplisere dette med topphastighetstrykket kan man finne retningen og vindtrykket som veggene opplever.

Til slutt blir disse faktorene lagt til grunn for å finne vindkraften som treffer konstruksjonen. Denne blir kalt F_w , og regnes ut på følgende måte i EC1 – Del 1-4:

$$F_w = c_s c_d * c_f * q_p(z_e) * A_{ref} \quad (2)$$

Hvor: F_w er vindkraften [kN]

$c_s c_d$ er konstruksjonsfaktoren (= 1 for bygninger < 15m)

c_f er kraftfaktoren (ligning (7.9) i EC1-1-4)

$q_p(z_e)$ er vindkasthastighetstrykk q_p ved referansehøyde z_e

A_{ref} er referansearealet for aktuell del av konstruksjonen

Formel 2 Dimensjonering av vindlast i henhold til (Standard Norge, 2005)

Lastkombinasjon

For å få et reelt bilde av hvordan lastene påvirker konstruksjonen må man først og fremst se på disse i en litt annen form en enkeltlast. En lastkombinasjon ser på hvordan enkeltlasten sammen påvirker konstruksjonen. Først må man finne en dimensjonerende verdi for hver last, noe som ved hjelp av faktorer øker lasten. Dette gjøres fordi man vil være på den trygge siden når man dimensjonerer bærende elementer. En dimensjonerende last kan defineres på følgende måte som et eksempel fra Edvardsen og Ramstad (2014) (formel 3). Denne formelen baserer seg på utregning av last i bruddgrensetilstanden. I bruksgrensetilstand blir lastfaktor γ_f satt lik 1,0, og dermed blir $q_d = q_k$.

$$q_d = q_k \gamma_f k_{FI} \quad (3)$$

Hvor: q_d er den dimensjonerende lasten

q_k er karakteristisk last (egenlast, nyttelast, naturlast)

γ_f er lastfaktor

k_{FI} er korreksjonsfaktor for pålitlighetsklasse

Formel 3 Formel for lastkombinasjon hentet fra (Edvardsen & Ramstad, 2014)

Jordskjelv

Jordskjelv er som andre laster standardisert, og er å finne i NS-EN 1998 EC8: Prosjektering av konstruksjoner for seismisk påvirkning. Denne standarden er utviklet for at konstruksjoner som opplever seismiske krefter skal tåle påvirkningen det fører med seg. Faktorer som er viktig her er blant annet egenfrekvensen til konstruksjonen, stivhet- og massefordeling. Det er ofte mindre jordskjelv i Norge, men ingen er av slik stor skala man kan oppleve lenger sør i Europa og på Island. Dette gjør at standarden for jordskjelvdimensjonering ikke blir videre utredet i denne oppgaven.

3.9 Bruddtyper

Sopp/råte/fuktighet

Dersom trevirke er utsatt for mye fuktighet over lang tid kan det bryte ned trevirket på en helt annen måte enn en belastning eller last gjør. Dette gjør at det kan være vanskelig å forebygge og oppdage før det har gått for langt, og trevirket har mistet store deler av sin kapasitet. Man kan se for seg at skader på tømmer kan deles inn etter når de oppstår (Clausen, 2010):

- Behandlingsskader
- Lagringsskader
- Skader på trevirke i bruk

Under behandlingsskader går mekaniske skader i forbindelse med felling, transport, barking og bearbeiding. Lagringsskader innebærer konsekvenser av utilstrekkelig tildekning og lufting under lagring. Her kan man oppleve tanninskader, og andre biologiske skader som sopp, bakterier, insekter og marine borere. Konsekvensen av dette er ofte at trevirket bør bli kassert.

For å forstå hvorfor biologiske nedbrytende organismer og råte utvikler seg i trevirke kan man se på det som 4 kriterier for gode vekstvilkår for nevnte organismer. Dette bunner ut i at slik nedbryting avhenger av næring (som i dette tilfellet er tre), fuktighet, oksygen og tid. Fjerner man en av disse elementene vil man kunne forebygge slik nedbrytning. Næring og oksygen er ikke noe vi kan fjerne i en realistisk situasjon. Dermed er det bare fuktighet og tiden man kan kontrollere. Tiden nedbrytningen får til å virkelig gjøre skade kan minimeres ved å jevnlig kontrollere de aktuelle elementene. Nedbrytningen vil også minimeres dersom man holder en jevn og relativt lav fuktighet. Som tidligere nevnt er tre hygroskopisk, og fuktighetsnivået i omgivelsene vil derfor påvirke fuktighetsmengden i trevirket.

Råtesoppen er svært svekkende for trevirket. Den har cellulose og lignin som sine primære næringsstoffer, og som tidligere nevnt er disse essensielle for trevirkets fasthet- og styrkeegenskaper. Dersom denne type sopp oppdages, noe som skal oppdages i kontrollen av trevirket, vil ikke dette blir godtatt som konstruksjonsvirke. Andre sopper som i hovedsak går ut over utseende til trevirket, som blåved og svartesopp, utgjør en svært liten mekanisk forskjell på trevirket, og kan derfor ansees som akseptabelt i konstruksjonsvirke (Øvrum, 2012). Figur 17 viser konsekvenser av nedbrytning av trevirke.



(a)



(b)

Figur 17 Eksempler på hva biologisk nedbrytning kan føre til. (a) Termittangrep på stokk som resulterer i markant mindre tverrsnitt. (b) Biologisk nedbrudd søyle som har vært i kontakt med bakken. Hentet fra Chang (2015).

En effektiv måte å forebygge slike skader på er å starte allerede i designprosessen. Morris (1998) viser til templer i Japan og Skandinaviske stavkirker som gode eksempler på hvordan en designprosess kan minimere, nesten ekskludere, sjansen for soppangrep. Ved kun å bruke kjerneved, bratte tak som leder vannet vekk fra øvrig konstruksjon og generelt godt vedlikehold resulterte i at vi i dag fortsatt har slike 800 år gamle bygg stående. Dette er det som går under kategorien konstruktiv beskyttelse, og er å foretrekke da det ikke gjør inngrep i materialet.

Moderne impregneringsmetoder, slik som tjære før i tiden, vil danne et beskyttende lag på treverket. Man skiller gjerne mellom overflatebehandling, trykkimpregnering og modifisering. Overflatebehandling innebærer impregnering som ikke trenger veldig langt inn i materialet (omtrent 2–3mm), og som påføres med pensel, sprøyting eller drypping. Trykkimpregnering baserer seg på å trenge impregneringen inn i yteveden ved hjelp av trykk. Fremgangsmåten varierer etter hvor dypt man vil ha impregneringen og hvilken impregneringsklasse man skal produsere. Dette gir en bedre totalbeskyttelse enn overflatebehandling, men er ikke like godt beskyttet mot mugg- og fargeskader på overflaten. Modifisering baserer seg på at man ved hjelp av kjemiske stoffer som reagerer i treverket eller varmebehandling bedrer egenskaper som UV-stabilitet, holdbarhet og dimensjonsstabilitet (SINTEF Byggforsk, 2017). I tabell 5 er en oversikt over forventet forlengelse av levetiden til produkter basert på forskjellige metoder og at gitte metoder er gjennomført etter standard.

Tabell 5 Trebeskyttelsesmetoder som brukes i Norge, som viser antatt forlengelse av levetiden til materialene. Basert på tabell fra SINTEF Byggforsk (2017).

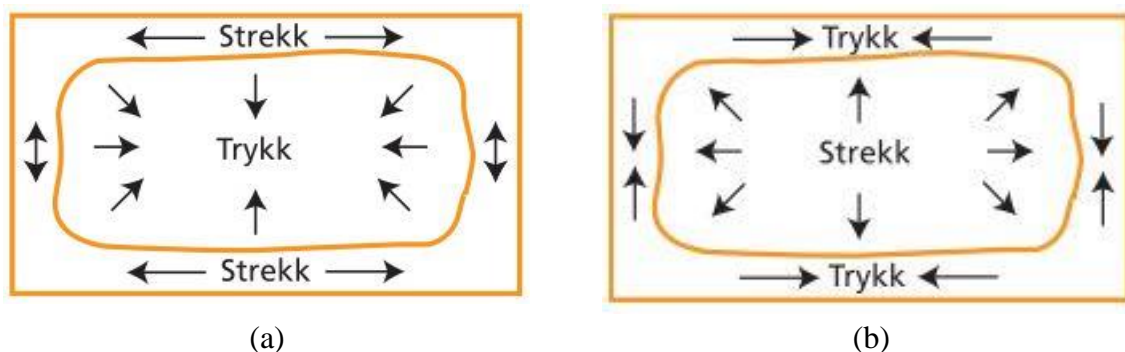
Beskyttelsesmetode	Påføring	Forlengelse av levetid
Overflatebehandling	Påstrykning/påsprøyting	Kan i enkelte tilfeller føre til fordobling, men vanligvis kortete
	Dyping	Noe mer enn fordobling. Avhenger av dypingstiden
Trykkimpregnering	Impregneringsanlegg	4-5 ganger økning
Modifisering	Kjemisk, biologisk eller fysisk	Varierende.

Sprekk (tørke)

Korrekt behandling av konstruksjonsvirke er essensielt for å unngå sprekkdannelser. Ferskt trevirke fra skogen har et altfor høyt fuktighetsnivå, og må tørkes før det tas i bruk i konstruksjoner. I en tid hvor hurtighet i byggeprosessen er ønsket, vil også tørkeprosessen bli forkortet ned til det absolutte minimum. Dette kan ha uheldige konsekvenser, og dersom ikke tørkingen blir gjort korrekt, vil det oppstå sprekker i materialet.

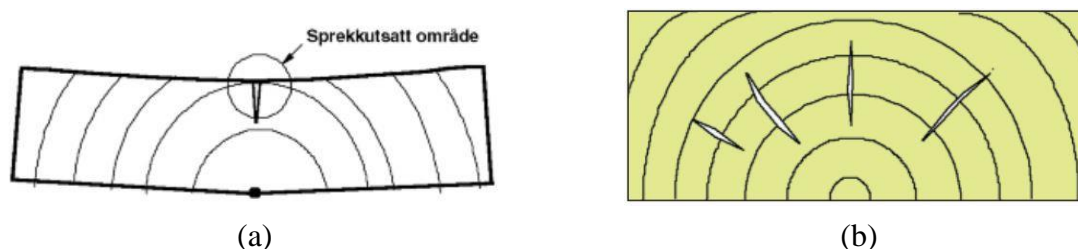
Som tidligere nevnt er det forskjell i fuktighetsinnholdet i kjerneveden og yteveden. Denne ubalansen skaper problemer under tørking av materialene. Når et materiale tørkes med sirkulerende varmluft, vil overflaten tørkes først. Dette resulterer i at materialet lengst ut i tverrsnittet vil nå fibermetningspunktet og begynne krympingen mens det enda er mer fuktighet i den indre delen av tverrsnittet. Sammensetningen i treverket tilsier da at de ytre cellene vil forsøke å krympe, men de indre cellene begrenser denne krympingen. Da oppstår det spenninger i tverrsnittet (figur 18a) mellom de indre og ytre delene. Takket være deformasjonsegenskapene til treet vil det ikke oppstå sprekkdannelser dersom dette gjøres i et kontrollert tempo (Sandland, 2009).

Det kommer så til at den indre delen av tverrsnittet også når fibermetningspunktet, og dermed begynner krympingen også der. Da er de ytre cellene strukket ut, noe som fører til at hele spenningsbildet snur (også kalt spenningsomvandlingen, se figur 18b). Disse indre strekkspenningene kan utvikle seg over lang tid, og vil bare øke ettersom fuktigheten i tverrsnittet stabiliserer seg (Sandland, 2009).



Figur 18 Spenninger i plankens tverrsnitt i forskjellige faser av tørkeprosessen. (a) Tørking av trevirke i fase 1. (b) Tørking av trevirke i fase 2. Figur hentet fra Sandland (2009)

Resultatet av slike spenningsforandringer i tverrsnittet kan være sprekkdannelser både i overflaten og i indre deler av trevirket. Sandland (2009) understreker at det i første fase før spenningsomvandlingen vil være fare for sprekker i de ytre delene av treverket (figur 19a) mens det i fase to vil være en sjanse for sprekker i indre deler av tverrsnittet (figur 19b). Denne prosessen, når ytre del av trelasten er forstreckt i forhold til indre del, kalles for yteherding.



Figur 19 Typiske sprekker som kan oppstå i trevirket grunnet tørke. (a) Sprekk i ytre del av tverrsnittet. (b) Sprekk i indre del av tverrsnittet. Figurer hentet fra Tronstad (2003).

Mekaniske feil

Vertikale elementer tar i en viss grad bare vertikale laster, det vil si trykk i fiberretning. Tabell 1 viser at samtlige klasser har flere ganger høyere styrke i trykk i fiberretning (f_{c0k}) kontra på tvers av fiberretning (f_{c90k}). Dette betyr at en bærende søyle eller vegg i stor grad utnytter seg av treverkets sterkeste egenskap. For å kontrollere søyler mot rent trykk i fiberretningen er det blitt satt krav i EC5 – Del 1-1 (6.2) (formel 4). Her kommer det frem at fastheten til trevirket må være høyere enn spenningen den opplever fra lastene.

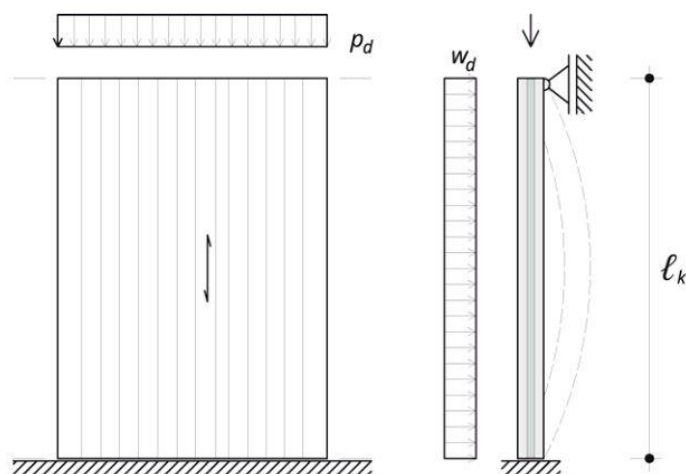
$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (4)$$

Hvor: $\sigma_{t,0,d}$ er dimensjonerende trykkspenning i fiberretning

$f_{c,0,d}$ er dimensjonerende trykkfastheten i fiberretning

Formel 4 Dimensjonering av trykk i fiberretning i henhold til EC5 (Standard Norge, 2004)

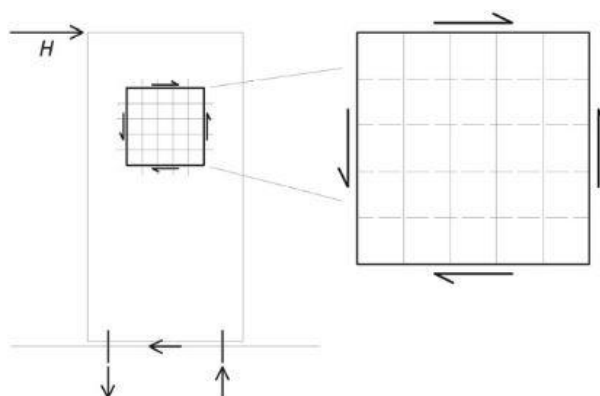
Dersom dette kravet ikke overholdes er det en overhengende fare for at strukturen i treet vil knuse og at man opplever at fibrene ikke klarer å holde lasten den opplever. Man kan også oppleve en form for knekking, som betyr at elementet knekker ut slik som vist på figur 20. Slik knekking avhenger også av opplagerne i topp og bunn av elementet.



Figur 20 Knekkning av vertikalt element. Kraften er i fiberretning med de ytterste lamellene. Bilde hentet fra Wallner-Novak et al. (2014)

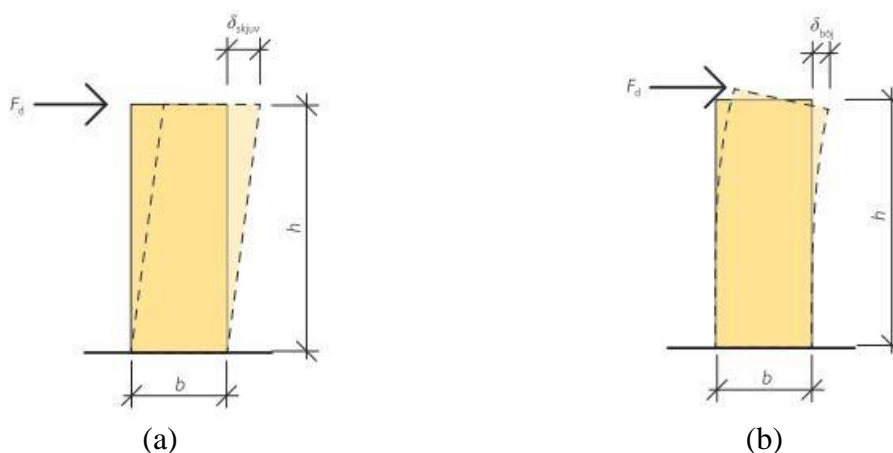
Det er imidlertid bare i en ideell situasjon man har trykk rett ovenfra og rett ned i elementet uten vinkel på fiberretningen. I realiteten vil kreftene ikke være sentrert, eller ofte ha en vinkel på fiberretningen, noe som gjør at elementet opplever en kombinasjon av trykk i fiberretning og bøyning. Dette er noe som må tas høyde for i dimensjoneringen, og slankheten til elementet spiller en stor rolle her. Slankheten sier noe om bredden på søylen i forhold til lengden, og siden ikke alle tverrsnitt er kvadratiske kan det være forskjellige retninger som er kritiske. I EC5: Del 1-1 kap. 6.3.2 blir det vist fremgangsmåte for hvordan slankhet blir beregnet, og deretter kontroll på om søylen tåler kombinasjonen av trykk og bøyning.

Bærende vegger har også en stabiliserende rolle i konstruksjonens helhet. Laster som blir påført bjelkelaget i bygget blir normalt ført gjennom en bærende og stabiliserende vegg (Borgström & Fröbel, 2017). Dette, i tillegg til vindlaster, gjør at nevnte vegger opplever en form for horisontal last. Når vindkraften treffer vegg, overføres den til fundamentet som opplever en reaksjonskraft i motsatt retning. Reaksjonene i opplagene, som vist på figur 21, vil ha motsatt retning og vil kunne forårsake indre spenninger i vegg som kan føre til deformasjoner.



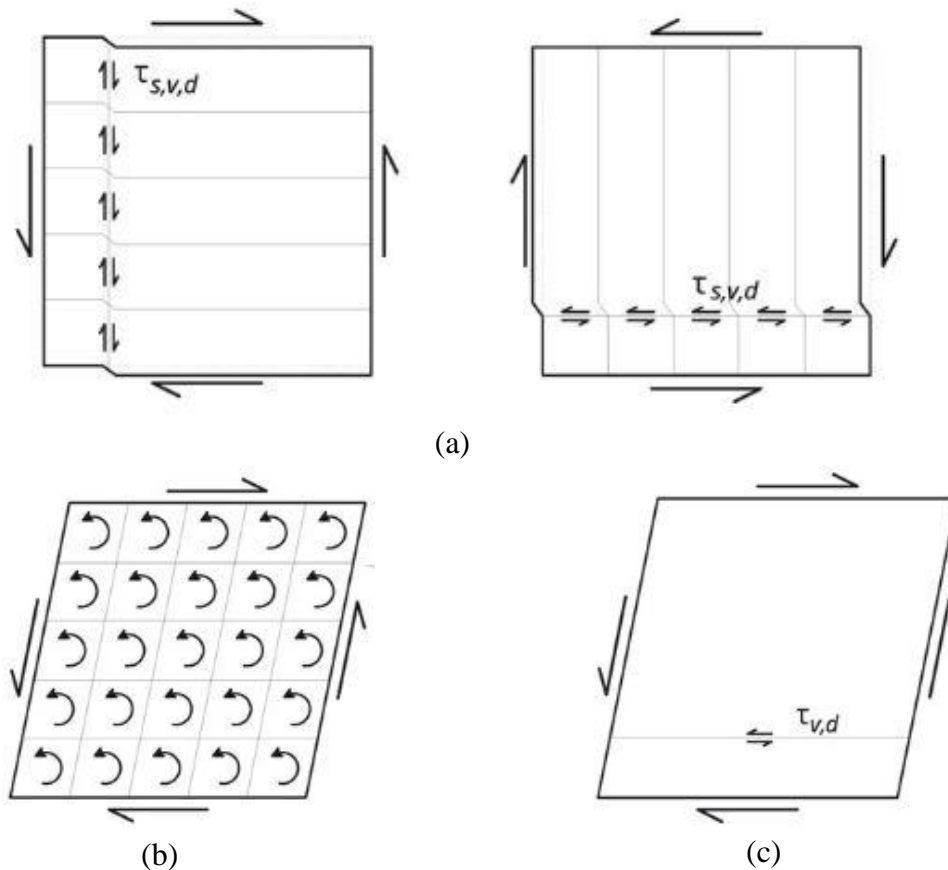
Figur 21 Vindpåvirkning på vegg med tilhørende reaksjoner i vegg og opplagere. Om man tar ut et lite rektangel av vegg ser man hvordan skjærkreftene brer seg ut. Figur hentet fra Wallner-Novak et al. (2014)

Dersom veggene ikke er dimensjonert godt nok mot disse kreftene kan man oppleve at kreftene og påfølgende moment kan gjøre at vegg deformerer, slik som vist på figur 22a og 22b. Disse deformasjonene kan forårsake brudd i elementene og bør dermed unngås.



Figur 22 Hvordan horisontale krefter kan påvirke avstivende og bærende vegger. (a) Underdimensjonert vegg opplever horisontale krefter. (b) Underdimensjonert vegg opplever moment som følge av horisontale krefter. Hentet fra Borgström og Fröbel (2017)

Om disse kreftene blir store kan det føre til interne skjærkrefter som igjen kan føre til brudd i (a) trevirket langs skjøter, (b) i limet mellom lameller eller (c) i elementet som helhet (Wallner-Novak et al., 2014). I figur 23 er det fremstilt hvordan slike brudd kan utarte seg.



Figur 23 (a) Skjærbrudd i trevirket langs skjøter. (b) Skjærbrudd i limet mellom lameller. (c) Brudd i hele elementet grunnet skjærkrefter. (c) Hvordan skjærkrefter kan føre til brudd i elementer av massivtre. Figurene er hentet fra Wallner-Novak et al. (2014).

3.10 Faktorer for forsterkning av søyler og bærende vegger

Hvorfor forsterke?

Det er mange grunner til at man kan komme over en situasjon hvor man blir nødt til å forsterke eller reparere et bærende element. Alle bygg er forskjellige, noe som gjør at man til stadighet opplever unike situasjoner. Noen konkrete tiltak kan gjøres allerede i planleggingsprosessen. Nødvendigheten for forsterkning og reparasjon av bærende elementer i tre kan starte i designprosessen av et bygg. Dersom man sikter mot å minimere mengden av last treelementene opplever i skjær og strekk parallelt til fiberretningen, vil man bedre sikre seg mot å måtte forsterke elementene i fremtiden (Harte & Dietsch, 2015). Andre tiltak kan komme som forebyggende i en eksisterende konstruksjon eller i etterkant av brudd. Felles for disse situasjonene er at det er ønskelig å optimalisere elementene slik at de fortsatt kan gjøre sin nytte i konstruksjonen og bevare sikkerheten.

Det kan være mange faktorer som spiller inn i valg av metode for forsterkning og reparasjon. I dette underkapittelet blir det satt lys på en del av disse faktorene, og hvorfor det blir vektlagt i en reell situasjon. Enkelte prosjekter krever fokus på utseende, andre vektlegger økonomi. I tillegg til disse mer tradisjonelle fokusområdene vil også de mer moderne faktorene som miljø og reversibilitet bli vektlagt. Det er parametere som i fortiden kan ha blitt litt neglisjert, men som i fremtiden kan avgjøre hvilken form for forsterknings – og reparasjonsmetode man velger å gå for. I flere reelle situasjoner blir alle disse faktorene tatt i betraktning, men da til forskjellig vektning. Nedenfor er et utvalg av disse faktorene gått igjennom slik at det er tydelig hva som kan vektlegges i de forskjellige fokusområdene.

Visuelt

Det visuelle er viktig for et helhetlig inntrykk. Nore et al. (2017) peker på at de subjektive målene på velvære ved bruk av synlig tre i konstruksjoner er blitt stadig viktigere de siste årene. Et friskt bygg av tre vil ofte oppleves som mer behagelig enn «tunge og kalde» betong- og stålkonstruksjoner. Sluttbrukere av et prosjekt vil ofte korrelere sin tilfredshet med hvordan produktet ser ut, og dersom det er store sprekker eller brudd som vises, vil dette kunne ha en stor negativ effekt på tilfredsheten. Det visuelle kan også veies tungt i reparasjon på eldre bygg da det ofte er et ønske om å bevare det originale uttrykket til bygget.

Når en sprekk eller brudd oppstår i en konstruksjon bør det evalueres av sakkyndige personer. Utviklingen av digitale hjelpemidler har gjort det enklere å vurdere seriøsiteten til et eventuelt brudd eller en sprekk. I flere tilfeller kan sprekken vise seg å ikke være noen form for kritisk for bæreevnen til elementet, og fra en fagpersons side kan det dermed være enklest å la det være ubehandlet. Sluttbrukeren har derimot ofte ikke samme kunnskap om temaet, og kan reagere om sprekker blir stående ubehandlet selv om de ikke er farlige.

Økonomisk

Et annet aspekt som har preget bransjen lenge, og som vil det i fremtiden, er det økonomiske. Budsjetter og prosjektering styrer i stor grad fremgangen og valgene som blir tatt i prosjekter, og det er ingen unntak for valg av forsterknings- og reparasjonsmetode. Dersom det konkluderes med at noe må gjøres med et brudd eller en sprekk vil det være naturlig å veie løsningene opp mot hverandre basert på kostnaden.

Det vil variere fra situasjon til situasjon om det lønner seg å bytte enkeltdeler, bytte hele elementer eller gjøre noe mindre inngripende. Faktorer som spiller inn vil være arbeidstimer, material- og maskinbruk, og andre faktorer koblet til utgifter. Metoder som er mindre tid- og materialkrevende vil ofte fremstå som et enklere og mer økonomisk fornuftig alternativ. Dette styres også i stor grad av tilgjengeligheten til arbeidskraft og materialer. Dersom fagarbeidere og materialene allerede er på plassen vil dette naturligvis være billigere enn å bestille alt fra bunnen av. Om store inngrep går i veien og utsetter andre deler av et prosjekt, kan det også fordyre situasjonen betraktelig.

Øke bæreevne

Siden bransjen streber etter å bygge høyere hus med tre i bærende elementer kan også en forsterkning for å øke de mekaniske egenskapene til trevirket være aktuelt. Chang (2015) viser til flere bygg på opptil 10 etasjer i England og Australia som eksempler på søken etter høyere bygg av tre. Faktoren økt bæreevne kan anses som et fokus på forsterkning, og i denne sammenhengen viser det til metoder som brukes for å øke et elements egenskaper, som for eksempel trykkfasthet og bøyefasthet.

Praktisk gjennomførbarhet

Et viktig kriterium for valg av forsterknings- eller reparasjonsmetode er gjennomførbarheten. Enkelte løsninger som er forsket på fremstår som gode fordi de kun er forsket på i kontrollerte

omgivelser. Om en metode innebærer at man har tilgang rundt en hel vegg eller søyle, kan det være fellende for metoden da dette ikke alltid er mulig i praksis. Denne faktoren er relatert til kompleksiteten til en metode, og med lav kompleksitet følger ofte en gjennomførbarhet som er praktisk mulig i mange situasjoner. Her kan det være lurt å skille mellom forsterkning på elementer før de er tatt i bruk og etter at det er plassert i bygget. Figur 24 viser test av FRP brukt diagonalt på en vegg. Denne forsterkningen er praktisk gjennomførbar dersom den gjøres før veggens plasseres i bygg, men kan fort vise seg å være vanskelig på en eksisterende vegg da man ikke har tilgang rundt hele vegg.



Figur 24 Forsterkning ved hjelp av FRP diagonalt på en bærende vegg. Bilde hentet fra Premrov og Dobrila (2008)

Miljø

Fokuset på miljø vokser stadig. I denne sammenhengen innebærer det flere ting: Innemiljøet i konstruksjonen, miljøaspektet ved bruk av tre og miljøet som helhet. Innemiljø henger ofte sammen med den visuelle faktoren som nevnt tidligere.

Ved re-design av gamle bygg kan forsterkning av de bærende elementene gjøre at man ikke trenger å rive eksisterende og bygge nytt, men heller utnytte gamle arealer. FutureBuilt (2019) har i den sammenheng definert kriterier for sirkulære bygg. I sin journal greier de ut om hvordan man kan legge til rette for at sirkulære bygg kan bli en realitet. De streker under at rehabilitering av bygg generelt gir en høyere miljøgevinst enn det rivning og nybygg gir. Det går ut på at ved å definere konkrete kriterier kan man oppnå et bygg som enkelt kan modifiseres og bygges om til annet bruk. Dette påvirker også bæresystemet. Dersom bruken av bygget endrer seg, eller at det bygges høyere enn det normalt var, vil det ofte kreve mer styrke av de bærende elementene.

Dette gjør at det kan være nødvendig å forsterke de bærende elementene, og for lite bæreevne som tidligere kan ha ført til at man valgte å rive bygg, kan nå være en faktor som gjør at man velger å rehabilitere i stedet. Dette gir ofte en miljøgevinst.

Et annet aspekt med miljøet er hvordan forsterkningsmetoden påvirker de positive miljøfordelene som trevirke har. En vurdering av hvordan samspillet mellom forsterkning/reparasjon og trevirke er, kan ansees som essensielt. Motivasjonen til å benytte trevirke i utgangspunktet bør ikke overkjøres av en forsterkningsmetode som ikke har den samme hensikt som bruk av trevirke. Om trevirket forsterkes eller repareres med miljøfiendtlige materialer eller teknikker, vil dermed ha negativ innvirkning på CO₂-regnskapet.

Reversibilitet

Reversibilitet betyr i denne sammenheng at man enkelt kan omgjøre et inngrep man har gjort uten at det skaper nevneverdige forringelser i materialet og dets egenskaper. Dette er et viktig punkt i diskusjonen om ombrukbarhet av bygg, da et fokus på reversibilitet vil øke graden av fleksibilitet for bygget. FutureBuilt (2019) viser til at bruk av skruer og bolter i stedet for lim og fugemasser gjør at forbindelser blir fleksible og reversible. Corradi et al. (2019) kobler dette opp mot at utbredt bruk av FRP (Fiber Reinforced Polymers) som limes (figur 25) derfor er uønsket, mens rustfritt stål derimot er montert med mekaniske forbindelser som skruer og bolter, og er derfor å foretrekke. Et fokus på reversibilitet vil gi fremtidige metoder muligheten til å bedre nåværende forsterkninger og reparasjoner. Dersom metoder brukt i dag ikke er reversible, kan det være en stopper for fremtidige inngrep og tap av kulturhistorisk verdi blir større. Evnen til å omgjøre inngrep kan derfor vise seg å være svært verdifullt.



Figur 25 Påføring av lim før bruk av FRP (Fiberforsterket polymerer) som forsterkningsmetode. I høy grad ikke-reversibelt da det er svært vanskelig å skille lim og trevirke/FRP etter herding uten at det skaper skader på materialene.. Bilde hentet fra Donadon et al. (2020)

4. State of the art

I dette kapitlet blir det gjennomgått moderne metoder og forskning (state-of-the-art) for forsterkning og reparasjon av vertikale bærende elementer. Kapitlet er delt inn i underkapitler basert på de forskjellige metodene som er moderne.

4.1 Selvborende skruer (Self-tapping screws)

Selvborende skruer er skruer som har gjenger og en tupp/spiss som graver seg ned i trevirket og bryter ned trefibrene i prosessen. Tanken om å forsterke og reparere ved hjelp av metall går helt tilbake til 40-tallet (Bulleit, 1983). Disse skruene trenger ikke forboring for å kunne benyttes i konstruksjoner, og ved hjelp av en drill kan man lett entre skruen i trevirket. Slike skruer har de siste årene hatt en rivende utvikling, og lengden på disse gjør at de er svært anvendbare i større konstruksjoner (Dietsch & Winter, 2012). På figur 26 er det vist noen forskjellige skruer, hvor den lengste er en meter lang.



Figur 26 Utvikling av skruer i målestokk. Øverst: forsinkede skruer. Øvrige skruer er selvborende skruer som finnes i størrelsesorden opptil 1 meter. Bilde hentet fra Dietsch og Winter (2012).

Selvborende skruer bringer med seg flere fordeler som gjør at den bør sammenlignes med andre topp moderne forsterkningsmetoder. I all enkelhet krever denne metoden svært lite utstyr, lite materiale og forkunnskap for å gjennomføre inngrep. Variabler å regne med i denne metoden er kvaliteten på skruen, lengden, vinkelen og fordelingen av skruene i trevirket. Skruene er en effektiv måte å binde sammen trefibrene sammen på slik at sprekker blir redusert. Bruk av skruer i trevirke er omfattende tatt for seg i EC 5 hvor diverse krav er stilt for at man skal unngå brudd i skrueforbindelser. Der er det i kapittel 8.7 *Skrueforbindelser* tatt for seg uttrekkskapasitet, skruehodets avrivningsmotstand, gjennomtrekkingsmotstand, skruens strekkfasthet, knekkbrudd i skruen når trykkbelastet og blokk- og pluggutrivning (Standard Norge, 2004). Harte et al. (2015) har i sin rapport om standardisering av forsterkninger definert følgende situasjoner som ideelle for bruk av selvborende skruer:

- Strekk og trykk på tvers av fiberretningen
- Skjær
- Forbindelser

I tillegg til dette kan selvborende skruer være aktuelle å benytte seg av når det oppstår sprekker langs med fiberretningen i trevirket i kombinasjon med trykk i fiberretning. Skruene sine enestående evner til å føye sammen trevirke på tvers av sprekke kan vise seg å være en egenskap å utnytte. Harte et al. (2015) understreker at slike inngrep varierer fra hvor dypt skruen går, aksial styrke, stivhet og slankhet på elementet.

En faktor ved bruk av skruer av stål er at man skal kunne observere duktile endringer i forbindelsene slik at man har tid til å reagere og reparere forbindelsene dersom de nærmer seg brudd. Likevel kan man oppleve sprøbrudd i forbindelser i elementer som er belastet parallelt med fiberretningen. Cabrero et al. (2019) fremhever splittelse i fiber, blokkutrivning og strekkbrudd som typiske bruddtyper for forbindelser med selvborende skruer i elementer som er lastet aksialt i fiberretningen. Skruer kan belastes i tre forskjellige retninger som er henholdsvis aksialt (på langs av skruen), tverrbelastning (på tvers av skruelengden) og en kombinasjon av dette. For vertikale elementer vil man ofte oppleve en kombinasjonsbelastning. I kapittel 8.7.3 i EC5 vises det til følgende ligning som må oppfylles for skruer som belastes i kombinasjon av flere retninger på kreftene:

$$\left(\frac{F_{ax,Ed}}{F_{ax,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}}\right)^2 \leq 1 \quad (5)$$

Hvor: $F_{ax,Ed}$ er aksial last på skruen

$F_{ax,Rd}$ er dimensjonerende kapasitet til skruen i aksial retning

$F_{v,Ed}$ er tverrlast på skruen

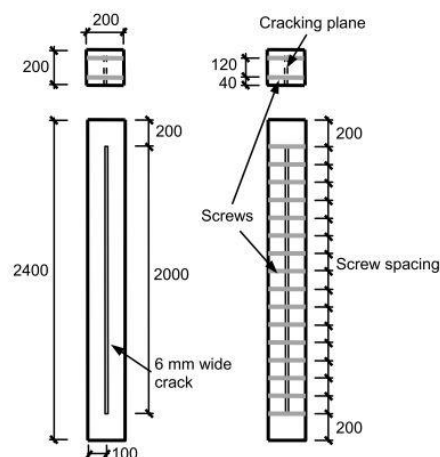
$F_{v,Rd}$ er dimensjonerende kapasitet til skruen i tverretning

Formel 5 Kombinasjon av aksial- og tverrlast på skruer etter standard EC5 (Standard Norge, 2004)

Formel 5 sin relevans er blitt betvilt i forskermiljøet da denne formelen ikke tar høyde for vinkelen til skruen i forhold til vinkelen på fiberretningen til trevirket, og dermed i hvilken grad den er dekkende nok for selvborende skruer brukt som forsterkningsmetode. Flere forskere har i sine rapporter foreslått konkrete utbedringer (blant annet Tomasi et al. (2010)) som inkluderer effekten av vinkelen på skruen. Dette dannet grunnlaget for forsøkene gjort av Jockwer et al. (2014) hvor det ble laget en fremgangsmåte som tok høyde for en lavere innført lengde av skruen i trevirke ved bruk av skrue i vinkel. Denne modellen samsvarte godt med tester som ble gjort, og det ble understreket at denne type dimensjonering bør basere seg på nøyaktige styrkeverdier for hver skrue i stedet for å benytte seg av standardverdier.

Vinkelen på skruer i trevirke er vanskelig å kontrollere samt utføre nøyaktig uten forboring. Brown et al. (2021) utførte forsøk på forskjellige konfigurasjoner med selvborende skruer i vegger av massivtre med mål om å finne en konfigurasjon/vinkel som var optimal i bruk i forbindelser i massivtre. Resultatet viser at en kombinasjon av flere vinkler gir økt motstand mot forskyvning av elementet samt en bedre fordeling av krefter og stress enn forbindelser som er basert på skruer i bare en felles vinkel. Bruddtypene som oppstod var uttrekk av skruene, strekkbrudd i skruene og brudd i trevirket rundt skruene.

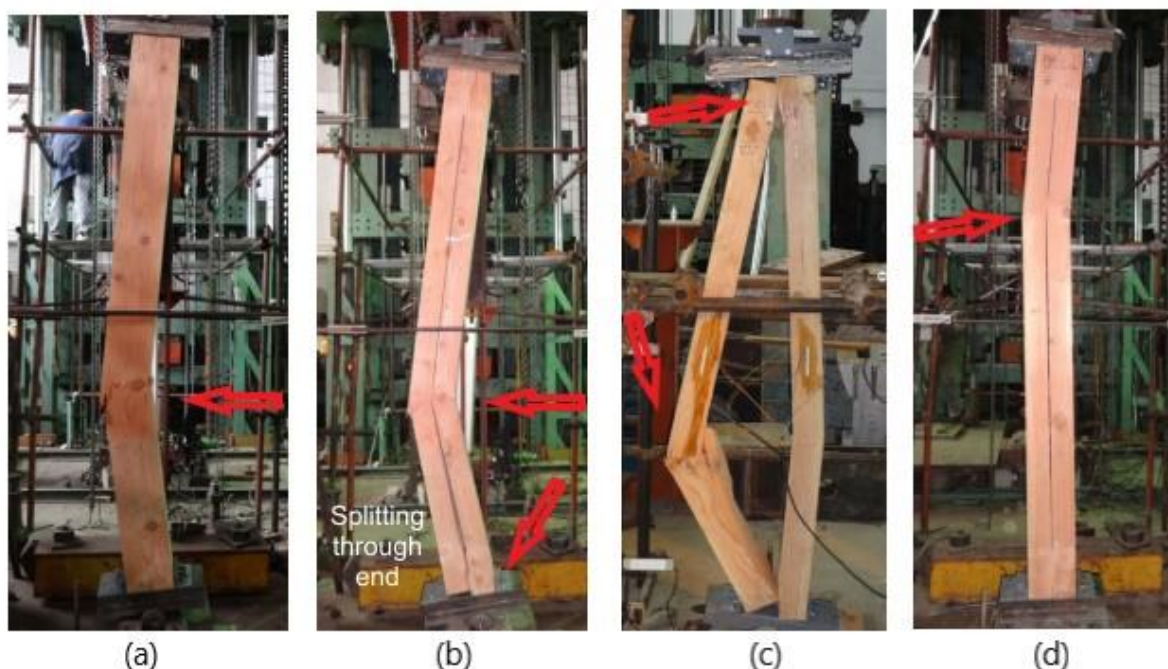
Song et al. (2015) gjorde et omfattende forsøk på søyler av tre med kontinuerlig splittelse i langsgående retning. Dette er typiske sprekker man kan komme over i søyler og vegger av tre grunnet blant annet tørke. I forsøket testet de søyler på 2.4m med en sprekke på 6mm tykkelse og en lengde på 2.0m, slik det er vist på figur 27. Alle søylene ble testet for både sentrisk og eksentrisk last.



Figur 27 Oppsett av forsøk gjort av (Song et al., 2015). Søylen til venstre er referansesøylen med sprekke og søylen til høyre er forsterket med skruer på tvers av lengderetningen til sprekken. I tillegg til disse ble en intakt søyle testet.

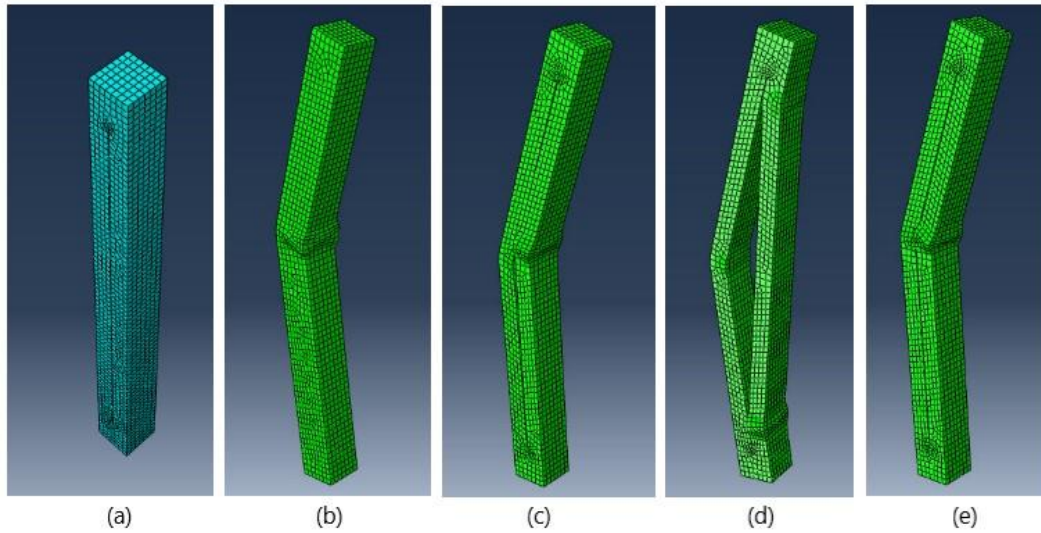
Figur 28 viser bruddformene som ble gjeldene i forsøkene. Referansesøylen som var intakt (a) gikk i knekkbrudd. Referansesøylene med sprekk, (b) og (c), viser at flere bruddtyper er mulig her. Generelt ble det observert dårligere stivhet og stabilitet enn de intakte søylene. Forskjellen på disse er at alle søylene med sprekk knakk i samme retning, og begge stegene gikk inn i hverandre før de opplevde knekkbrudd som den intakte søylen. En av søylene med sprekk gikk i et brudd hvor stegene knakk hver sin retning slik det er vist på (c), men det understrekes at dette var et engangstilfelle.

For søylene som var forsterket med selvborende skruer opplevde man en mye høyere stivhet da skruene bandt stegene godt sammen slik at de hadde synkronisert bevegelse, og sprekken holdt mer eller mindre samme størrelse i hele forsøket. Man kunne dermed konkludere med at for sentrisk last kunne man reparere søylen slik at 80% av den tapte styrken igjen var til stede. For eksentrisk last virket skruene som en forsterkning som gav søylen tilbake 159% av den tapte styrken grunnet sprekken. Det vil dermed si at for sentrisk last fikk søylen nesten tilbake sin opprinnelige styrke, men for eksentrisk last virket sammenbindingen til skruene så godt at man fikk en økt styrke sammenlignet med den intakte søylen (Song et al., 2015).



Figur 28 Resultater av forsøkene gjort av Song et al. (2015). (a) Referansesøyle uten sprekk. (b) Referansesøyle med sprekk. (c) Referansesøyle med sprekk. (d) Forsterket søyle. Piler er påsatt i etterkant for å vise bruddpunkt.

Dette forsøket lot seg også modellere i et FEM-program med relativt høy nøyaktighet slik det er vist i figur 29. Den største feilmarginen man der fikk var på 5.17%. Dette gir grunnlag for en fremtidig bruk av FEM-verktøy for å analysere søyler som skal forsterkes med selvboerende skruer, og dermed gi metoden en mye høyere grad av trygghet og forutsigbarhet.




Figur 29 Modellering gjort i FEM-program av (Song et al., 2015). (a) Utgangspunktet til testingen. (b) Intakt søyle i brudd. (c) Søyle med sprekk i bruddform 1. (d) Søyle med sprekk i bruddform 2. (e) Forsterket søyle i brudd.

4.2 FRP (Fiber Reinforced Polymers)

Fibre Reinforced Polymers (FRP) baserer seg på en tanke om å utnytte styrken i en kompositt bestående av trevirke, lim og fiber. FRP'ene kan bestå av mange typer materiale, som for eksempel karbonfiber (CFRP), og flere er samlet i tabell 7. FRP består av enten stenger, plater, mesh eller vevde tekstiler. Disse består av sterke fibre som er satt sammen i et svært sterkt lim/harpiks. Dette fører til at man får et materiale som har høy styrke ved liten egenvekt, og som er svært anvendbart i mange situasjoner (Schober et al., 2015). Chang (2015) viser til at denne metoden har blitt utviklet i over to tiår og at det dermed har blitt utforsket en del. Wang et al. (2020) uttrykker at høy elastisk modulus, høy stivhet og et høyt styrke-vekt forhold som absolutte fordeler ved bruk av FRP. Videre skilles det på metodene slik det er vist i tabell 6 og 12.

Tabell 6 Forsterkning med FRP på utsiden av materialer (EBR). Fargekode: Brun – Trevirke, Grå – FRP, Blå – Lim. Bilder hentet fra (Wang et al., 2020)

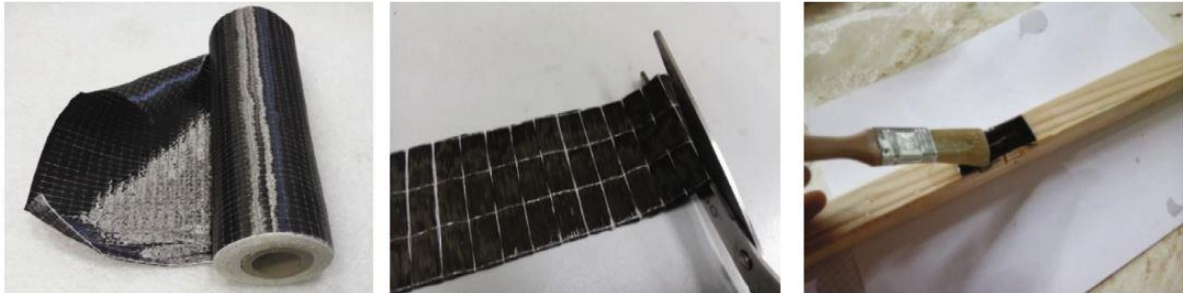
Metode	Navn	Beskrivelse	Illustrasjon
EBR	Externally Bonded Reinforcement	Pålimt bånd/plate av forskjellige typer FRP på utsiden av et materiale ved hjelp av lim. Ofte brukt i eksisterende konstruksjoner. Kommer i form av plater eller vevde tekstiler (woven fabrics/sheets)	

Videre tar dette kapittelet for seg metoden EBR. NSM (Near Surface Mounted) og GiR (Glued-In Rods) blir videre diskutert i eget kapittel, da dette er metoder som baserer seg på stenger inne i trevirket, og ikke tekstiler av FRP på utsiden av elementet.

Fremgangsmåte

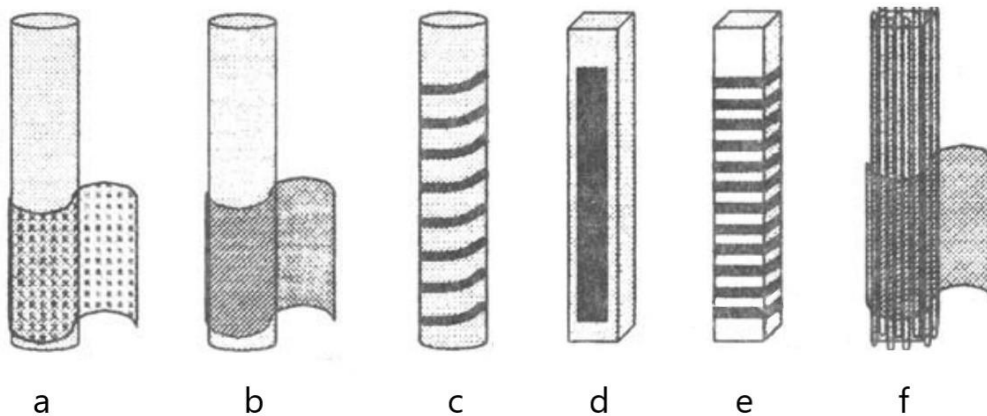
For å benytte seg av denne metoden er fremgangsmåten relativt enkel. Dersom man har et element som er ønsket forsterket, vil først FRP'en bli laget av ønsket materiale. Her kan fibre

ligge i samme retning eller i forskjellige retninger. Valg av lim gjøres før FRP'en blir limt på elementet som er ønsket forsterket. Denne prosessen er enkelt illustrert i figur 30 hvor man har en rull med ønsket FRP. Videre tilpasses størrelsen til bruk før man limer det på elementet. Siden denne metoden inneholder tre forskjellige elementer er det flere faktorer som vil påvirke resultatet.



Figur 30 Fremgangsmåte for påføring av FRP i liten skala. Her er det først laget rull med FRP, deretter klippes det til og limes på ønsket plass på trevirket. Bilder hentet fra (Corradi et al., 2020).

I 2004 diskuterte Oprisan et al. mulige måter å benytte seg av FRP som forsterkningsmåte for søyler av tre. Disse metodene er vist i figur 31, og mange viser seg gjeldende den dag i dag.



Figur 31 Forskjellige metoder å benytte seg av EBR definert av Oprisan et al. (2004). (a) Ark 0/90 grader på fiberretningen. (b) Ark 45 grader på fiberretningen. (c) Sammenhengende striper av FRP oppover søyle. (d) Pålimt ark av FRP på overflaten. (e) Striper rundt søyle med fast avstand imellom. (f) Ark av FRP rundt søyle som allerede er forsterket av FRP-stenger.

Variabler

Denne metoden har flere variabler som spiller inn på den totale kvaliteten på forsterkningen. Disse kan deles opp som henholdsvis 1) typen FRP, 2) hvilket lim som er brukt og påføringsmetode, 3) kontaktflate, 4) orientering/fordeling og 5) trevirket. Nedenfor blir disse variablene utdypet ytterligere, og forskning blir presentert.

FRP

Selve FRP'en kan bestå av flere typer materialer hvor alle har forskjellige egenskaper. Et utvalg av de mest brukte materialene er samlet i tabell 7. Sammenlignet med stål, som er mye brukt i samme situasjoner som FRP, kan man se at FRP generelt sett har mindre densitet og større strekkfasthet enn stål (Steiger et al., 2015). Densiteten til FRP gir da muligheten for mindre tverrsnitt for å oppnå samme styrke sammenlignet med stål. Samtidig er produksjonen av stål mye mer utbredt enn FRP da det er brukt i flere sammenhenger, noe som gjenspeiler seg i at stål er billigere enn FRP.

Tabell 7 Verdier på forskjellige typer FRP basert på forskjellige stoffer. Merk at prisene er fra 2008 og er ment som en pekepinn. Prisene varierer også med tverrsnittet. Tabell hentet fra (Steiger et al., 2015).

Material	Density (kg/m ³)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Cost ^a (Euro/m ³)
Steel	7800	400–700	275–500	200	6700
Aramid FRP	1450	3000	–	77–135	82,000
Basalt FRP	2700	1000	–	90	14,000
Carbon FRP	1500	1600	–	120–300	90,000
Glass FRP	1800	850	–	46	11,500

Limforbindelsen

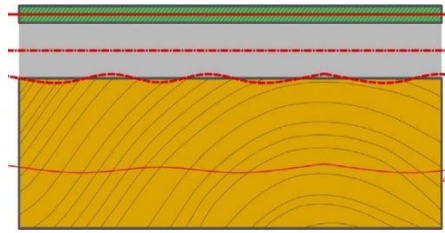
Limet i EBR-metoden er på mange måter et sted hvor det ligger et stort utviklingspotensial. Lim til bruk i konstruksjoner er delt inn i 2 typer etter standard NS-EN 301, hvor type I tåler høy varme og fuktighet, og type II er mer sensitiv og er best brukt inne i godt ventilerte konstruksjoner (Pizzo & Smedley, 2015). I EC 5 er det dermed konkretisert i kapittel 3.6 at lim av type I kan brukes i alle klimaklasser, mens lim av type II er forbeholdt klimaklasse 1 og 2 hvor limet ikke utsettes for over 50°C (Standard Norge, 2004).

En stor utfordring ved limet i denne metoden er å følge produsentens anvisning for mest gunstig bruk og herding. I EC5: 10-3 *Limte forbindelser* er det konkretisert at slike anbefalinger fra produsent bør følges slik at man er sikker på sluttresultatet. Her blir det også poengtert at lim som krever etterherding for å oppnå full styrke må avvente med å bære last til herding er fullført (Standard Norge, 2004). Dette kan by på problemer i en strømlinjet byggeprosess hvor lim som trenger lang herdetid, ikke alltid blir like enkelt å benytte seg av. Akselerert herdig ble forsket på av Voß og Vallée (2020). Der ble tradisjonelle herdemetoder som strålingsherding, UV-herding, mikrobølge-herding og varmeherding, nevnt. Sistnevnte er den mest brukte metoden. Videre ble det forsket på bruk av Curie partikler (CP) innblandet i limet for å enklere kunne bruke induktiv oppvarming i herdeprosessen. Dette gav lovende resultater med høyere jevnhet i temperaturen i limet, akselerert herdeprosess samt at det er kostnadseffektivt. Induktiv herdeprosess er vist i figur 32. Det rapporteres at herdetiden kan gå fra dager ned til minutter ved bruk av slik herdemetode.



Figur 32 Fremgangsmåte for forsøk gjort av (Ratsch, N. et al., 2019) med induktiv herdeprosess. Først bore hull, så sette inn stang, fylle på lim og deretter herde limet ved bruk av induksjonssløyfer rundt elementet.

Klein et al. (2021) viser til at flere eksperimenter bekrefter at en limtykkelse på 0.1mm – 0.5mm gir sterkest forbindelse. Dette underbygges i en trend i forsøk gjort av Lee, I.-H. et al. (2015) hvor de sammenlignet 1 mm og 2 mm tykkelse på limet i en forbindelse. Resultatet viste at 1 mm tykkelse hadde 17% – 29% høyere styrke enn en tykkelse på 2 mm. Dette gir mening da mer av kreftene vil samle seg i limet dersom tykkelsen er større. Siden lim generelt har mindre styrke i strekk og skjær enn FRP og trevirke, vil en høy limtykkelse føre til at forbindelsen som helhet har lavere kapasitet. Figur 33 viser hvor man kan oppleve å få brudd ved bruk av EBR-metoden.



Figur 33 Bruddtyper man kan oppleve ved bruk av FRP. 1) Brudd i FRP. 2) Brudd i lim. 3) Brudd i forbindelse mellom lim og annen overflate, enten ved trevirke eller ved FRP. 4) Brudd i selve trevirket. Figur bearbeidet og hentet fra (Balmori et al., 2021)

Kontaktflate

Overflaten som limet skal fordeles ut på har en stor effekt på det totale resultatet. Helt glatte overflater gjør det vanskelig for limet å binde seg effektivt til materialene, og forsterkningen vil skli av ved lav belastning. Wang et al. (2020) peker på at preparering av overflaten til både trevirket og FRP 'en er en av de viktigste faktorene for at sammenføyningen skal være sterkest mulig. For å oppnå en slik overflate kan et koblingsmiddel (coupling agents) brukes, eller ved å øke ruheten til overflatene. Pizzo og Smedley (2015) peker på forskjellene på overflatene man møter på fabrikk og i felt. På fabrikk er overflatene til trevirket behandlet i kontrollerte omgivelser slik at det gir gode forhold for liming. I felt derimot kan man møte på overflater som er påvirket av varierende skader og klima som gjør kontaktflaten vanskeligere å utnytte.

Lyons og Ahmed (2005) gjorde forsøk med 7 forskjellige treoverflater, 2 typer lim og varierende klimatilstander. De gjorde funn som tilsier at generelt sett vil FRP'en feste seg noe bedre om det er limt på røe overflater. Den største effekten hadde derimot bruk av primer (HMR) på overflaten før liming, da dette gav høyere styrke til koblingene. Dette støttes av forsøkene gjort av Davalos et al. (2000). Her ble det testet styrke til koblingen mellom FRP og trevirke med to forskjellige limtyper, resorcinol formaldehyde (RF) og phenol-modified resorcinol formaldehyde (PRF). Først ble overflatene på treelementene behandlet med sandpapir (korning 100), for så å rense med etanol. Deretter ble det brukt primer (HMR) på enkelte av treelementene før de ble testet for delaminering. Som vist i tabell 8 har primer mye effekt på forbindelsen mellom FRP og trevirke ved bruk av RF-lim. I forsøket oppnådde man 0.00% delaminering ved bruk av primer og lim (RF) påført med pensel. Sammenlignet med samme scenario uten primer som hadde en delaminasjon på 2.44% av total lengde på forbindelsen. En konsekvens av 0.00% delaminasjon var en økning i krefter i trevirket svært nær FRP-tre forbindelsen, noe som svekker hele forbindelsen totalt sett.

Tabell 8 Delaminasjon ved bruk av RF-lim. Hentet fra (Davalos et al., 2000). Resultatene viser at man kan oppnå 0% delaminasjon mellom trevirke og FRP.

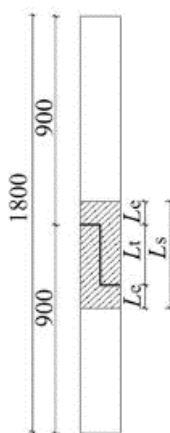
Specimens	Percent Average Delamination			
	Wood-Wood		Wood-FRP	
Coupling Agent	Without HMR (6 specimens)		With HMR (12 specimens)	
Bondline	Wood-Wood		Wood-FRP	Without HMR (12 specimens)
Delamination	4.00	0.00	6.53	2.44
			Wood-Wood	Wood-Wood
				1.46

Zhou et al. (2020) kunne konkludere i sitt forsøk med at det var forskjell på materialene stål, betong og trevirke i dette punktet. I tester med FRP-stål og FRP-betong systemer er kontaktflaten mellom FRP og overflaten det kritiske punktet. For trevirke derimot er det overflaten på trevirket som er det svake punktet.

Orientering/fordeling

Som vist i figur 31 finnes det flere måter å benytte seg av EBR på et vertikalt element.

Li et al. (2018) gjorde forsøk på en søyle av heltre som var sammenføyd på midten slik det er vist på figur 34. I dette forsøket ble det testet forsterkning med stålrør rundt søylen med og uten lim (steel jacket), stålringer (ear-hoop) i ytterkant av skjøtene og innkledning i CFRP. Ved hjelp av avansert måleteknikk og kameraer ble reaksjonene i søylen observert når den ble utsatt for trykk i fiberretning. Av 4 søyler som ble testet med CFRP hadde alle et lag med FRP med fiberretningen til søylen og ett lag vinkelrett på fiberretningen. To av de hadde i tillegg et lag ekstra i fiberretningen til søylen (totalt 3 lag med FRP).



Figur 34 Oppsett av søyle med en forbindelse på midten. L_s er total lengde på forsterkningen, L_t er lengden på skjøten og L_c er overskuddslengden på forsterkningen. Bilde hentet fra (Li et al., 2018)

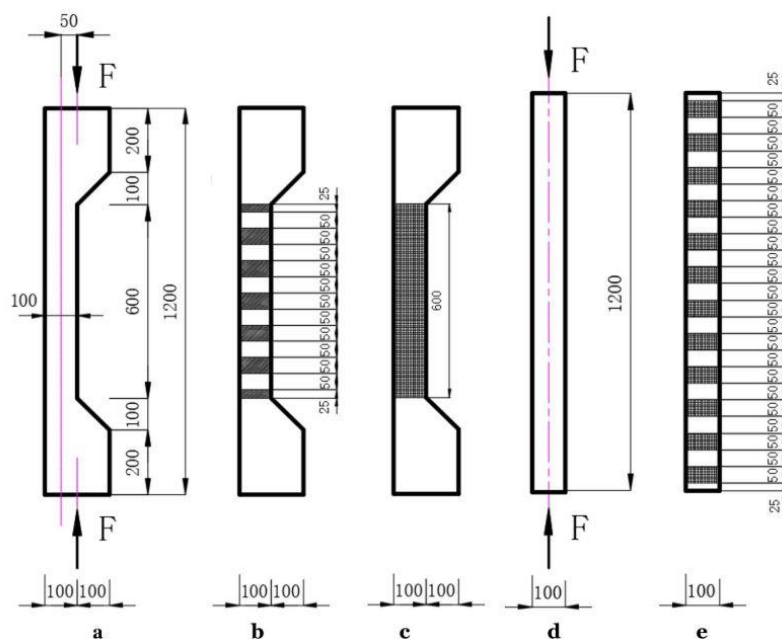
Etter hvert som søylene ble belastet til 65% av den totale styrken begynte søylen å knekke ut grunnet FRP'en sin relativt svake trykkmotstand. Dermed ble belastningen for stor på strekksiden, og søylen gikk i brudd grunnet strekkbrudd i FRP'en slik det er vist på 35. Dette skjedde ikke for søylene som var forsterket ved hjelp av stål, da de fikk brudd i selve treverket først.



Figur 35 Brudd i søyle forsterket med CFRP. Bilde til venstre er forsterket med ett lag i fiberretning, bilde til høyre har dobbelt lag i fiberretning. Bilder hentet fra Li et al. (2018)

Det konkluderes med i rapporten at CFRP-forbindelsen i utgangspunktet hadde god stivhet, men at det var lite tilfredsstillende aksial styrke og dermed lav styrke mot knekking. En annen erfaring som ble gjort var at stivheten økte markant om man brukte to lag CFRP i stedet for ett, og at man da fikk tilfredsstillende resultater for stivhet og styrke.

En viktig faktor for EBR-metoden er hvordan man velger å benytte seg av og fordeler FRP'en. I et omfattende forsøk testet Zhou et al. (2021) søyler i trykk. Det ble testet strips og heltrukket bruk av BFRP, både for sentrisk og eksentrisk last, slik det er vist på figur 36.



Figur 36 Søylene som er testet i forsøket til (Zhou et al., 2021). (a) Referansesøyle eksentrisk last. (b) Søyle med eksentrisk last og BFRP strips. (c) Søyle med eksentrisk last og kontinuerlig BFRP. (d) Referansesøyle sentrisk last. (e) Søyle med sentrisk last og BFRP strips. I tillegg til disse ble det testet en søyle med dimensjonene til d/e som var heltrukken i BFRP.

Resultatene i dette forsøket gir interessant informasjon. I de forsterkede søylene opplevde man to typer brudd slik det er vist i tabell 9: knekking og skjærbrudd. Søylene som var forsterket med strips av BFRP gikk utelukkende i knekkbrudd. For de heltrukne søylene derimot var det mer vanlig med skjærbrudd.

Tabell 9 Bruddformer for forsterkede søyler i forsøket til (Zhou et al., 2021).

Specimen number	Reinforcement method	Details reinforced with BFRP			Initial eccentricity (mm)	Failure mode of the tested specimens
		layers	Spacing (mm)	Width (mm)		
JB1-0-1200	BFRP strips with spacing	1	100	50	0	Bending failure
JB1-100-1200					100	Bending failure
JB2-0-1200	fully reinforced by BFRP	2			0	Bending failure
JB2-100-1200					100	Bending failure
MB1-0-1200	fully reinforced by BFRP	1	/	1200	0	Shear failure
MB1-100-1200					100	Bending failure
MB2-0-1200		2			0	Shear failure
MB2-100-1200					100	Shear failure

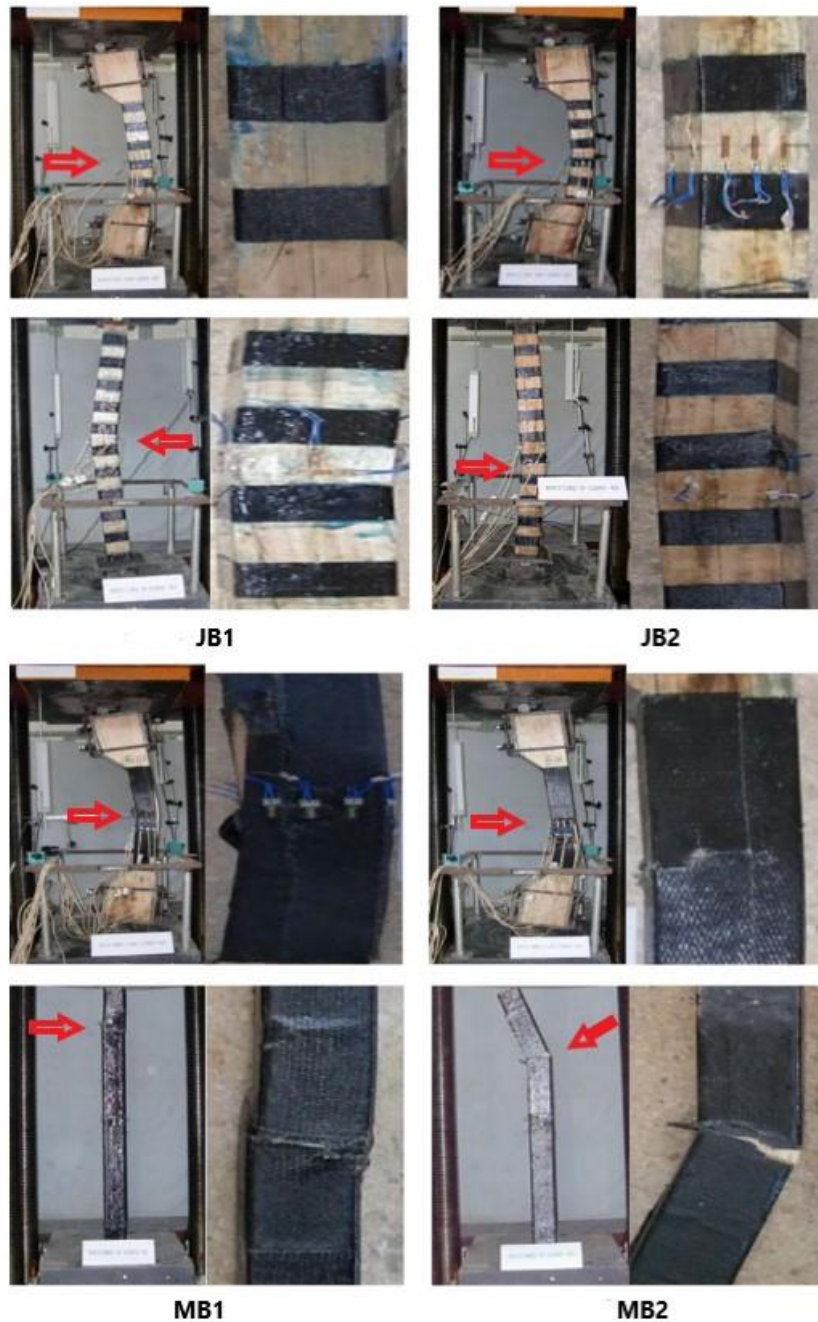
Sammenlignet med referansesøylene (a og d i figur 36), som tidligere gikk i brudd grunnet trykk og dermed også knekking, har de forsterkede søylene fått høyere kapasitet, og man kan tydelig se en effektiv økning av stivhet og duktilitet. Dette vises i tabell 10. Her kommer det også

tydelig frem at en økning fra ett til to lag med FRP gir stor gevinst i form av høyere kapasitet. Dette kan forklares med at to lag med FRP i praksis danner en kompositt et forsterkende i seg selv.

Tabell 10 Økning i styrke grunnet bruk av BFRP på forskjellige måter. Alle verdiene er prosentvis økning sammenlignet med referansesøyle. Dette gjelder bare sentrisk last. Verdier hentet fra Zhou et al. (2021)

Søyle	Trykkfasthet [%]	Strekkfasthet i fiberretning [%]	Strekkfasthet vinkelrett på fiberretning [%]	Snittøkning fra ett lag til to lag med FRP [%]
JB1	3.13	7.54	26.53	14.08
JB2	30.00	19.65	29.80	
MB1	40.63	22.06	41.30	19.45
MB2	65.00	30.69	66.64	

En tilsvarende observasjon ble gjort i fordelingen av FRP. For søylene JB1 og JB2, som er søyler forsterket med BFRP strips i henholdsvis ett og to lag, observerte man brudd i trevirket mellom stripsene. Dermed var disse søylene mer utsatt for knekking, og disse ble derfor karakterisert som søyler i knekkbrudd/bøyningsbrudd. For MB1 og MB2, som er søyler som var heltrukne i BFRP i henholdsvis ett og to lag, var situasjonen en annen. Etter hvert som trykket økte, bøyde søylene seg sakte ut og BFRP'en gikk i brudd grunnet skjærbrudd i trefibrene på trykksiden. Samtlige brudd er vist på figur 37.



Figur 37 Bruddformer i forsøk gjort av Zhou et al. (2021). Røde piler er påsatt i etterkant for å vise bruddpunkt.

Trevirket

Trevirket vil på mange måter være en konstant i dette tilfellet. Søylene og veggene er ofte plassert i lang tid før bruk av EBR blir vurdert, og dermed er det lite man kan gjøre med selve treelementet. Noe som likevel gjør at trevirket oppfattes som en variabel i dette tilfellet er hvilken type trevirke/element man har med å gjøre. I sine forsøk gjorde Lee, Y. et al. (2015) tester for EBR-metoden på tverrsnitt bestående av heltre furu og limtre. I disse testene, hvor alt

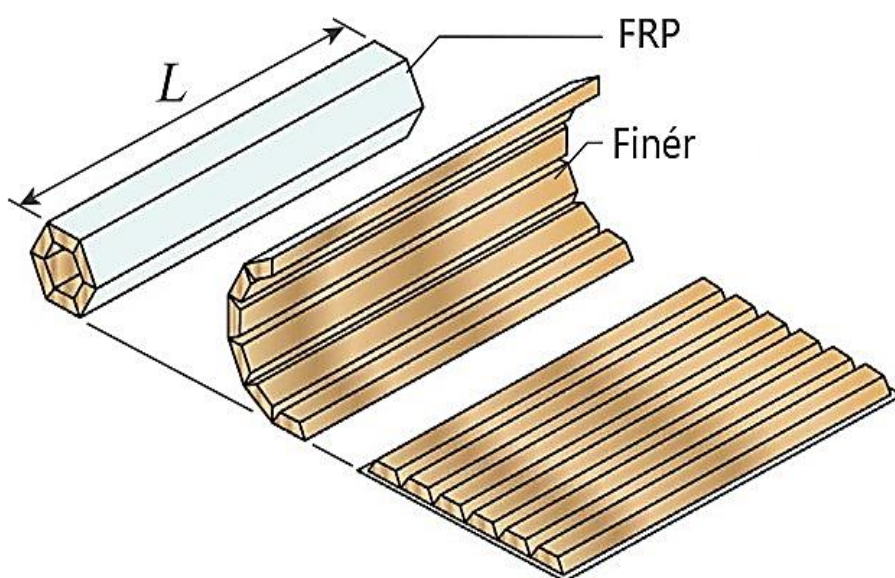
annet for øvrig var likt, kom limtre klart best ut med 56,4% høyere kontaktstyrke enn det heltre furuen gjorde med 17,8% økning. Dette kan variere da ingen treelementer er helt identiske, men gir en indikasjon på hvilken effekt man kan forvente å oppnå.

Alt som kan påvirke kontakten mellom limet og trevirket kan ha en effekt på denne metoden, og Wang et al. (2020) viser til delvis manglende forsøk på disse variablene. I et eldre forsøk testet Tascioglu et al. (2003) effekten forskjellige behandlinger av trevirket har på forbindelsen med EBR. Det ble testet både vannbaserte og oljebaserte konserveringsmidler i en type gul furu (Southern yellow pine) som ved hjelp av vanlig trelim (PRF) skulle forsterkes ved en type GFRP. Resultatet viste at konserveringsmidlene generelt hadde en negativ effekt på forsterkningen, og at dette dermed bør medtas i evalueringen av metoden. I forsøket ble det også sammenlignet om behandling før og etter forsterkningen hadde noe å si for forbindelsen. Som man kan se på tabell 11 er delamineringen markant større for behandlingen som er gjort før forsterkningen sammenlignet med det motsatte. Det vil si om man maler eller på en annen måte påfører trevirket andre konserveringsmidler før man forsterker med FRP. Man kan også se at behandling etter forsterkningen er gjort gir mindre delaminasjon. Dette betyr at forsterkning som gjøres på allerede impregnerte, malte eller på annen måte behandlede trevirker, vil kunne få en markant dårligere styrke grunnet dårligere heft.

Tabell 11 Effekten av behandling med konserveringsmidler før og etter forsterkning er gjort. Generelt gir det en økt delaminasjon å forsterke behandlet trevirke med EBR enn motsatt. Tabell hentet fra (Tascioglu et al., 2003).

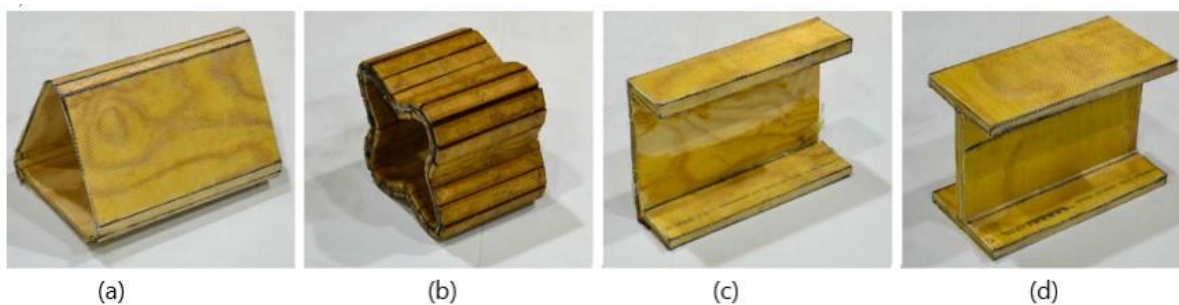
Preservative	Pre-treatment			Post-treatment		
	Retention ^a (kg/m ³)	Delamination		Retention ^a (kg/m ³)	Delamination	
		Wood/ wood (%)	Wood/ FRP (%)		Wood/ wood (%)	Wood/ FRP (%)
Untreated	0	0.1	2.8	0	0.1	2.8
CDDC	9.61	2.2	26.5	10.3	8.0	16.0
Cu-N	2.72	1.4	48.4	2.72	0.6	12.0
PCP	9.29	9.3	55.4	9.77	2.4	23.9
Creosote	270	0.5	45.7	272	1.2	11.9

EBR og trevirke som kompositt gir muligheter for å bygge andre tverrsnitt enn man tidligere har kunnet gjort med typiske massive elementer. Stålelementer har flere typer hulprofiler, som sirkel og firkant, som gjør at vekten reduseres drastisk sammenlignet med massive tverrsnitt. Dette kan oppnås ved hjelp av HFT (Hybrid FRP-Timber). Gattas et al. (2018) har bidratt til en utvikling av FHFT (Folded HFT) hvor finér blir brukt sammen med FRP for å lage brettbare elementer som har høy styrke, liten vekt og enkel montering. Hovedtanken er at fiberretningen til finéren går i lengderetningen til elementet, og fiberretningen til FRP'en går på tvers. Finéren limes systematisk på FRP'en og brettes inn i ønsket tverrsnitt slik det er vist i figur 38.



Figur 38 Fremgangsmåte ved bruk av FHFT. Seks like finérelementer limes systematisk på FRP og brettes inn til en sekskantet søyle. Figur modifisert og hentet fra Gattas et al. (2018).

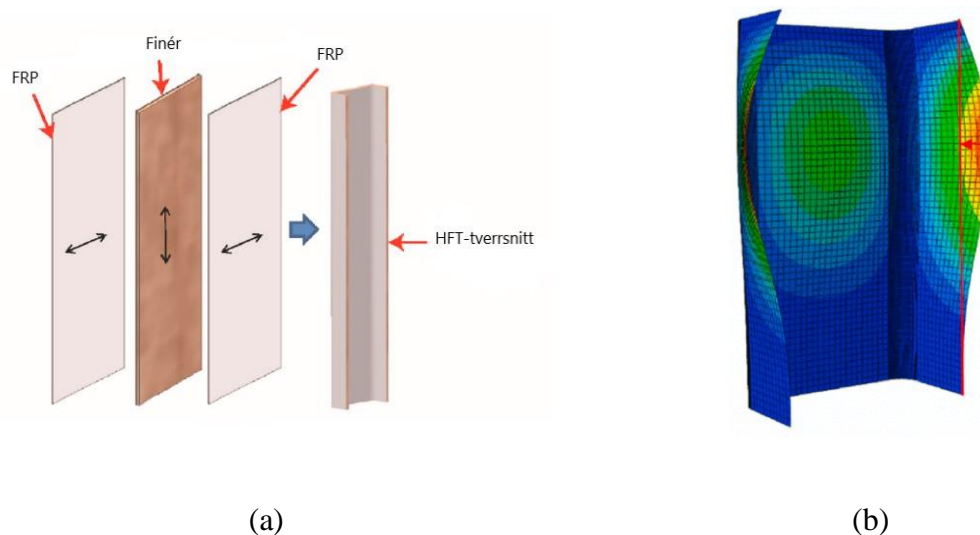
Denne metoden skaper muligheten for å benytte seg av flere typer tverrsnitt slik det er vist i figur 39. I et forsøk som ble gjort på sirkulære og sekskantede elementer kom man frem til forskjellige bruddtyper for hvert tverrsnitt. For FHFT ble knusning av fiber i endene en gjenganger, samt at knekking og brudd i FRP ble observert. Referansesøyle som var laget av bare finér uten FRP var bruddtypen i limlinjen eller i trevirket i nærheten av limlinjen. For FHFT-elementene observerte man ikke delaminasjon mellom FRP og tre, men man observerte en markant økning i styrke for disse elementene sammenlignet med referanseelementet som bestod av bare finér uten FRP (Gattas et al., 2018).



Figur 39 Eksempler på hvilke tverrsnitt man kan lage ved bruk av FHFT. (a) Trekant. (b) Blomst. (c) C-tverrsnitt. (d) I-tverrsnitt. Bilde hentet fra Gattas et al. (2018).

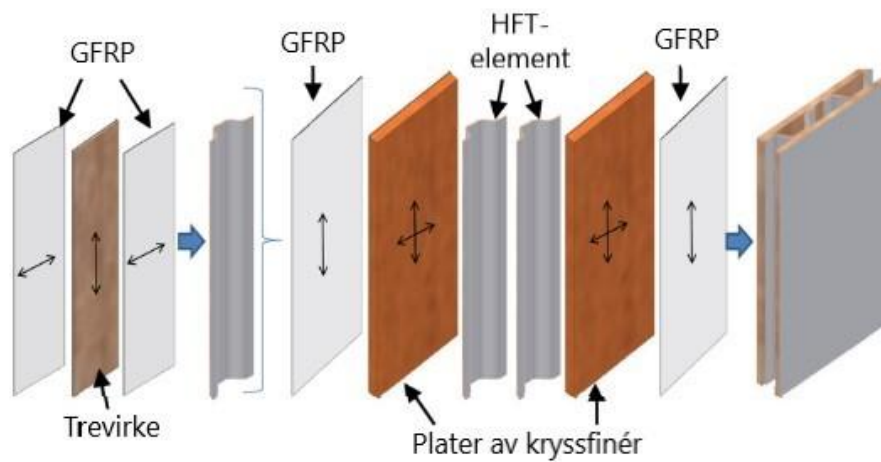
Dette ble videreført av Min et al. (2020) som ved bruk av FEM-programvare prøvde å forutse styrken til en søyle med C-tverrsnitt laget med HFT-metoden. De tok utgangspunkt i 3 tradisjonelle tankemåter i modellering, men ingen av disse gav tilfredsstillende resultat og konvergens. Deretter testet de en UGENS-metode for å modellere, som er en funksjon i ABAQUS som definerer ikke-lineær mekanisk respons for skjellsystemer basert på krefter, forandringer i form og momenter (ABAQUS Inc., 2006).

Denne metoden fikk tilfredsstillende konvergens for både stivhet og bærende kapasitet. Figur 40 viser konseptet for C-tverrsnittet og hvordan det ser ut i et FEM-program.



Figur 40 (a) Konsept for sammensetning av en HFT-søyle med C-tverrsnitt. Oversatt og hentet fra (Fernando et al., 2018). (b) Mesh og simulering i FEM-programvare av trykk i lengderetning på elementet. Figur hentet fra Min et al. (2020)

Metoden med HFT kan også benyttes til å lage hule, lette veggelementer med de samme kvalitetsfordelene som søyler av HFT har. Fernando et al. (2018) testet dette ved å kle inn elementer/søyler laget av HFT med kryssfinérplater og FRP slik det er vist på figur 41. I forsøket ble slike vegger med en høyde på 2.0 meter og bredde på 0.5 meter utsatt for laster. Det resulterte i at dette oppsettet var svært tilfredsstillende i både aksiell bæreevne og deformasjon. Dette byr dermed på en kostnadseffektiv bæreevne sammenlignet med lignende stålprofiler, da det har en mye høyere spesifikk bæreevne (styrke-vekt ratio) og at man kan benytte seg av mindre og svakere trevirke enn tidligere.


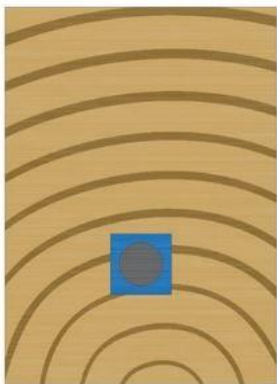


Figur 41 Hvordan man kan bygge opp en HFT-vegg. Forskjell i fiberretning fra lag til lag gjør at veggen oppleves sterk og stabil. Bilde oversatt og hentet fra (Fernando et al., 2018)

4.3 Innlimte stenger (Glued-in rods)

Innlimte stenger er relatert til FRP (kap. 4.2) da denne metoden også innebærer lim og trevirke sammen med et element for forsterkning, i denne sammenheng en stang. Denne metoden baserer seg på elementer som er innlemmet i trevirket. Disse elementene er enten stenger eller plater som består av stål eller en type FRP. De forskjellige metodene innenfor denne kategorien er videre forklart i tabell 12.

Tabell 12 Forskjellige typer forsterkninger basert på innlimte stenger. Fargekode: Brun – Trevirke, Grå – FRP, Blå – Lim. Bilder hentet fra (Wang et al., 2020).

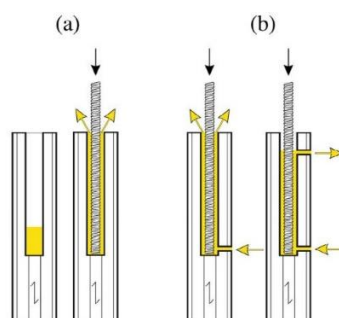
Metode	Navn	Beskrivelse	Illustrasjon
NSM	Near-Surface Mounted	Stag/stenger som er lagt i et spor som er freset ut og bryter overflaten på elementet. Lim i sporet. Mest brukt i nye konstruksjoner og horisontale elementer.	
GiR	Glued-in Rods	Baserer seg på samme tanke som NSM, men befinner seg inne i elementet og bryter ikke overflaten. Mest brukt i nye konstruksjoner.	

Denne metoden har blitt forsket på siden 1960-tallet, og bærer med seg flere fordeler ved bruk som blir poengtert av Azinović et al. (2019):

- Høyere styrke og stivhet enn tradisjonelle bolter (dowel-type fastners)
- God beskyttelse mot brann og korrosjon
- Arkitektonisk kompatibilitet
- Relativt lav kostnad

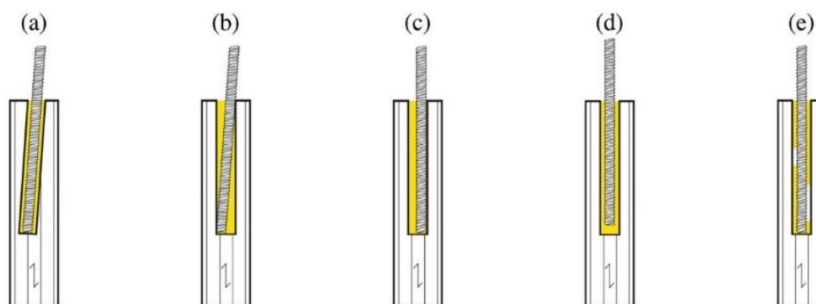
Fremgangsmåte

Ved bruk av denne metoden blir det først boret eller frest et hull/spor i trevirket som har litt større diameter enn hva stangen har. Videre blir det etterfylt med lim, før stangen blir ført på plass. Steiger et al. (2015) viser til at det er normalt å bore et hull som er 1 mm – 4 mm større enn diameteren til stangen, slik at man skal få plass til limtykkelser på maks 2 mm. Etter et hull er boret, må det rengjøres slik at man oppnår mest mulig heft mellom lim og trevirke. Mye sagflis etter boring/fresing kan ødelegge for jevn distribuering av limet. Innføring av selve stangen kan gjøres på forskjellige måter slik det er vist i figur 42. I denne figuren illustreres (a) en måte hvor man først fyller på med lim før man fører inn stangen. Her er det essensielt med lim med høy viskositet og sentrisk plassering av stang slik at limet fordeler seg jevnt og yter maks styrke. Hvis lim ikke skyter ut når stangen er fullstendig innført, er det for lite lim og man kan risikere å ikke få full heft langs overflaten på stanga. Det samme gjelder for metode (b), men forskjellen her er at limet blir presset inn fra siden, og overskuddslim flyter ut enten på topp eller i et annet hull i nærheten av kanten av elementet.



Figur 42 Forskjellige måter å gjennomføre innliming av stang. (a): Påfylling av lim før stang føres inn. Krever høy viskositet i limet. (b) Boring av to tilleggshull på siden av tverrsnittet slik at man ofte oppnår god fordeling av lim. Bilder hentet fra (Steiger et al., 2015)

Da dette er en metode som krever mye presisjon er det også mye som kan forringe kvaliteten på forsterkningen. Som vist på figur 43 kan mange typer unøyaktigheter i utførelsen av forsterkningen svekke resultatet. Vinkel på stang, tykkelse på lim, jevn fordeling av lim og plassering av stang i hull er faktorer som alle i høy grad kan gjøre forsterkningen mye svakere enn antatt. Fordelingen av lim vil også være svært vanskelig å kontrollere. Dette gjør det vanskelig på forhånd å forutsi en økning i styrke og stivhet for forsterkningen, og like vanskelig er det å oppnå kvaliteten man har sett for seg.



Figur 43 Feilkilder som kan føre til dårlige forbindelser. (a) Ugunstig vinkel på boret hull. (b) Stort hull som gir stang en vinkel. (c) Eksentrisk plassering av stang. (d) Ufullstendig innføring av stang. (e) Ujevn fordeling av lim i hull som gir områder uten heft. Hentet fra Steiger et al. (2015)

Variabler

Steiger et al. (2015) diskuterer i sin rapport forskjellige bruddtyper som kan oppstå i denne metoden, og understreker at mye av teorien som er skapt rundt dette temaet i høy grad basert på erfaring og empirisk data. Graden av kompleksitet er høy da samspillet mellom lim og stang skal virke optimalt i midten av trevirket. Det defineres flere bruddtyper, hvor følgende er relevante for vertikale elementer:

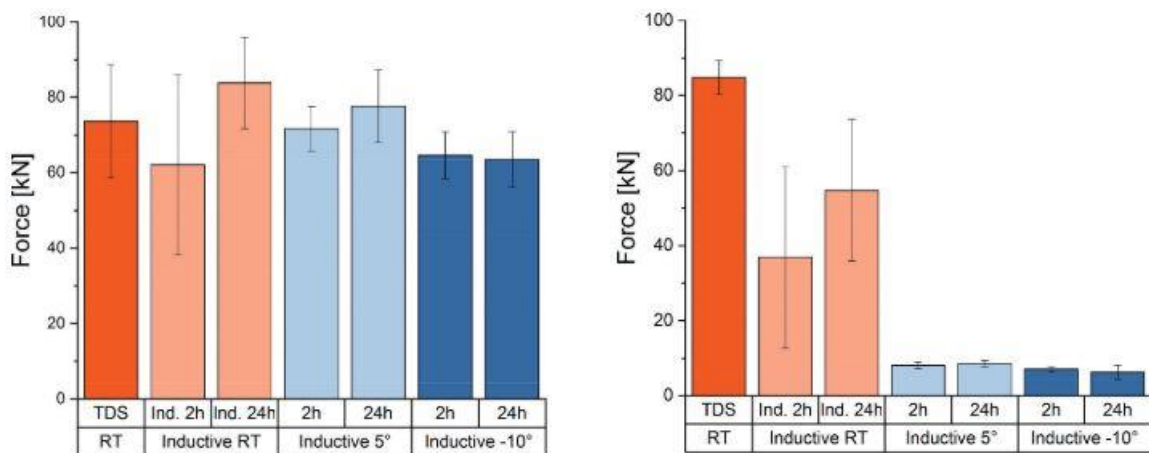
Tabell 13 Oversikt over enkelte bruddformer man kan oppleve med GiR. Basert på (Steiger et al., 2015)

Bruddtype	Årsak
Brudd i stang	For svakt materiale i stang
	Knekking av stang grunnet overbelastning i trykk
Splitting av fiber i trevirket	Korte kantavstander
	Stang ikke riktig satt inn i fiberretning i trevirke/eksentrisitet mellom stang og trevirke
	Overbelastning av søyle/vegg på tvers av fiberretning
	For liten avstand mellom stenger i forbindelser med mer enn én stang
Strekkbrudd i tverrsnittet på trevirket	Forstyrrelser i trevirkets fiber grunnet stang
Skjærbrudd i trevirke	For liten dybde av stang i trevirke

Defekter i forbindelsen ble testet av Ratsch, Nils et al. (2019) hvor de ved hjelp av 4 typer lim og 2 typer trevirke testet hvordan urene borehull og bobler i limet kan påvirke forbindelsens styrke. De konkluderte med at tomrom mellom stang og trevirke (figur 43e) har meget stor

påvirkning på styrken til forbindelsen. Luftbobler i limet viste seg å kunne svekke styrken til forbindelsen med opptil 25%.

En annen utfordring for GiR, i tillegg til langsomme og kalde herdeprosesser som er nevnt i metoden EBR, er at det krever en viss minimumstemperatur for at herding skal skje. Når man skal benytte seg av forsterkningsmetoder som innebærer bruk av lim vil omstendighetene være essensielle, og da er temperaturen ingen unntak. I sitt forsøk testet Ratsch et al. (2020) kapasiteten til en GiR-forbindelse ved 23°C, 5°C og -10°C, både ved eksperiment og numerisk FEM-analyse. Forsøket viste at, ved valg av riktig lim, kan induktiv oppvarming føre til en litt lavere, men akseptabel kapasitet etter herding i kalde omgivelser (5°C, -10°C) enn man får ved romtemperatur (23°C). Dette ble også støttet opp av FEM-analysen gjort i samme rapport da man kunne se at induktiv oppvarming resulterte i konsentrert oppvarming i limet, og dermed like stor effekt selv ved kalde som varme omgivelser. Figur 44 viser resultatene for hver to av de valgte limtypene.



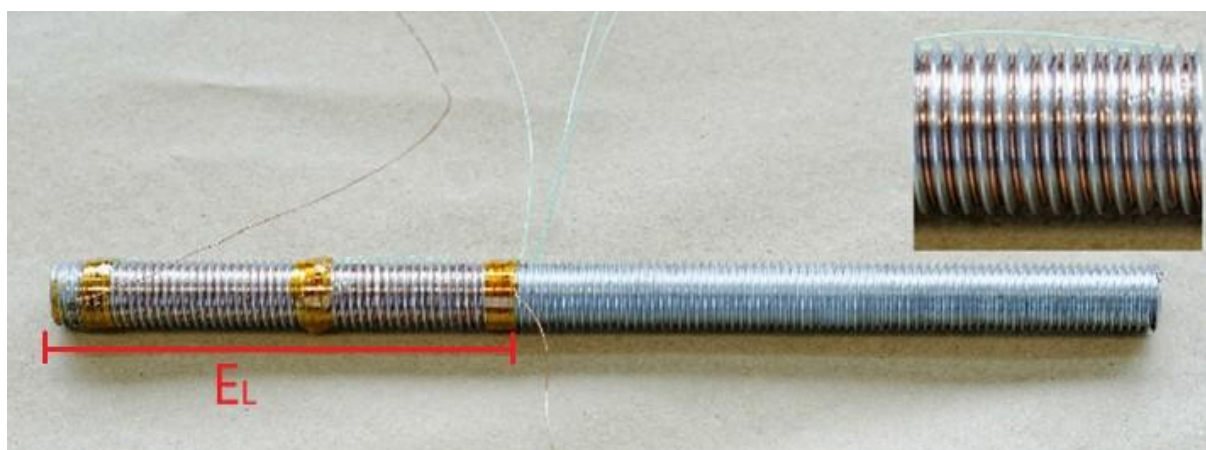
(a) Resultat for induktiv herding av Fischer FIS 390 EM som er et 2K-EPX lim med anbefalt herdetid på 24t fra produsent. Kapasiteten ikke veldig påvirket ved herding i kalde omgivelser.

(b) Resultat for induktiv herding av Loctite Purbond CR421 som er et 2K-PUR lim med anbefalt herdetid på 10 dager fra produsent. Kapasiteten mer eller mindre ødelagt ved herding i kalde omgivelser.

Figur 44 Resultater fra forsøk gjort av Ratsch et al. (2020) som viser hvordan to typer lim reagerer på induktiv herding i forskjellige temperaturer. Lim (a) responderer mye bedre enn (b) ved induktiv herding i både romtemperatur og i kaldere omgivelser.

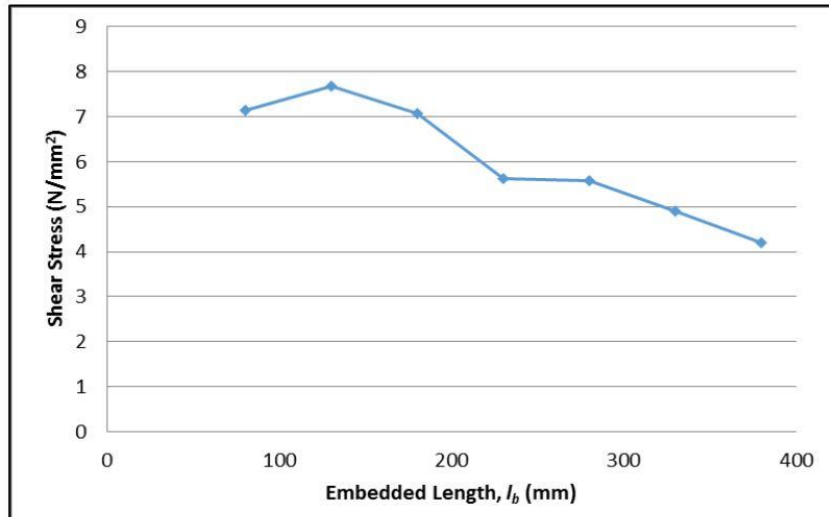
Forskning som i senere tid også er gjort av Ratsch et al. (2021) tar metoden videre. I forsøket er limtypene og betingelsene like som forsøket nevnt over med induktiv herding. Forskjellen er at det i dette forsøket er spunnet en tråd i gjengene på stanga som føres inn i limet som består

av 55% kobber og 45% nikkel (figur 45). I stedet for induksjon har de dermed benyttet seg av motstanden i tråden for å varme limet innvendig ved å føre strøm gjennom tråden. Resultatene viser likheter med forsøket gjort med induktiv herding: Man kan effektivt akselerere herdeprosessen og man kan med god effekt herde forbindelsen i lavere temperaturer enn hva som er anbefalt fra produsentens side. Merk at det var det samme limet som i forrige forsøk, 2K-PUR, som utpekte seg som svært svekket ved denne herdemetoden. Det blir poengtert at denne metoden er billigere enn induktiv herding, og at dette forsøket ble gjort med en stang av stål og ikke FRP.



Figur 45 Oppsett av stang med tråd surret inn i gjengene. Hele EL blir sunket ned i trestykket slik at det blir jevn fordeling av varmen. Bilde hentet fra Ratsch et al. (2021)

O'Neill et al. (2014) testet styrken til flere GiR-forbindelser med forskjellige dybder på stangen. Det viste seg å være en tydelig sammenheng mellom styrken til forbindelsen og dybden til stangen, og man fant ut at styrken økte etter hvert som dybden til stangen økte. Et annet interessant funn i denne forskningen var at man tydelig kunne se en synkende tendens i skjærkrefter i overgangen mellom trevirket og limet med større dybde, slik det er vist i figur 46. Dette resulterte i en forandring i bruddtypen, da det stort sett gikk fra skjærbrudd i trevirket til mer brudd i kontakten mellom lim og stang.



Figur 46 Graf som viser skjærkrefter som oppleves i området mellom trevirke og lim i en GiR-forbindelse. Her kommer det frem av fordelingen av skjærkrefter er bedre desto mer overflatekontakt man har mellom trevirke og stang.. Hentet fra (O'Neill et al., 2014).

Det er vanskelig å kvantifisere en eksakt dybde som er optimal for en GiR-forbindelse, men i et forsøk viser det seg at høyest kapasitet for innlimte stenger kan oppnås når dybden stanga blir ført inn i trevirket er 5 ganger større enn diameteren til stanga, altså $E_L = 5d$ (Lee, I.-H. et al., 2015). Dette kan variere fra materialtyper, limtyper og omgivelsene.

4.4 Protoser (Prosthesis)

Protese har i denne sammenheng samme betydning som annen bruk av protese: Å erstatte en ødelagt del med en fungerende del. Det er da valgt å ikke bytte ut hele elementer, men derimot skjære ut skadede deler og erstatte de (figur 47). Dette kan være kostbesparende, mer praktisk enn å bytte ut hele elementer samt at det kan være mer visuelt vennlig å gjøre. Ved angrep av sopp og råte, samt ved elementer utsatt for ugunstig fuktighet over tid, kan man oppleve at skade på trevirket ikke gjelder hele elementet, men bare delene som er i umiddelbar nærhet med fuktigheten og råten.



(a)



(b)

Figur 47 Eksempler på protoser brukt på konstruksjoner. Gjort med tanke om at verneverdighet er viktig. (a) Søylen i stall som har blitt reparert med protese. Varierende temperaturer og fuktighet over lang tid gjorde at råte har ødelagt søylen. Tilpasset og boltet. (b) Bærende søyle på utescene som måtte skiftes ut grunnet råte. Protese med mye tilpasning av tverrsnitt og boltet. Foto: Trym Lunder Østby.

Slike inngrep kan løses på flere måter: Selvborende skruer, innlimte stenger, bolter og lim. Mye forskning er gjort på horisontale elementer (blant annet Orlando et al. (2019); Corradi et al. (2019)), hvor flere av fremgangsmåtene baserer seg på innlimte stenger som kobler original og protese sammen (figur 48) og selvborende skruer som skrues inn i forskjellige sammensetninger (figur 49). Denne teknikken blir ikke videre kommentert i dette kapittelet, da mye av teorien baserer seg på teori fra kapittel 4.1 og 4.3, samt at det er en metode som i høy grad er brukt på horisontale elementer når de er så avanserte som her. For vertikale elementer kan denne teknikken ha en mye enklere tilnærming enn den vil ha for horisontale elementer da lasten ofte er mindre komplisert i fiberretning. Merk at denne teknikken stort sett varierer fra om man har

et snitt som er helt rett (90° på fiberretningen), skrått kutt (45° på fiberretningen) eller et egendefinert kutt spesielt tilpasset situasjonen. Det samme gjelder med innføringen av bolter, skruer og innlimte stenger i forskjellige vinkler.



Figur 48 Protese som reparasjonsmetode i enden av bjelker. Her tres protesen på og stengene limes fast. Stålet er rustfritt. Hentet fra Corradi et al. (2019)



Figur 49 Bilde av montering av protese i et horisontalt element ved hjelp av selv borende skruer. Hentet fra Franke et al. (2015)

4.5 Bruk av programvare

Utviklingen av programvare som dimensjoneringsprogrammer (ABAQUS, ANSYS, m.fl.) har gjort prosesser i byggebransjen mye enklere. Slike programmer utgjør en stor forskjell når det kommer til effektivisering, komplekse løsninger og kontroll av konstruksjoner.

Stellacci et al. (2018) tok i bruk programmet M-Macbeth som evalueringsprogram med flere kriterier som input som skal bistå med å ta avgjørelser. Det ble brukt for å kvalitativt kunne vurdere hvilke metoder og løsninger man skulle gå for i et prosjekt med reparasjon av rammevegger av tre i Lisboa. Nevnte programvare er kapabelt til å ta inn flere kriterier og gjøre vurderinger basert på gitte kriterier og vektninger. I arbeidet ble følgende kriteriene som er fremvist i tabell 14 lagt til grunn.

Tabell 14 Kriterier brukt i arbeid gjort ved rehabilitering av hus i Lisboa. Kriteriene ble vektlagt, og programvaren M-Macbeth gjorde evalueringer gjort på gitte vektlegginger, og bistår med beste løsning. Tabellen er basert på rapporten utarbeidet av Stellacci et al. (2018).

Komponent	Kriterier	Beskrivelse
Materialkompabilitet	Fysisk	Porøsitet, fuktforandringer, ekspansjon
	Kjemisk	Reaksjoner, oppløselighet
	Mekanisk	Hardhet, deformasjon
Materialenes varighet	Påtrengelighet	Hvordan inngrep påvirker eksisterende materialer
Strukturell pålitelighet	Resistivitet	Lastkapasitet alle akser
	Duktilitet og energifordeling	Evne til deformasjon uten kollaps
Strukturell autentisitet	Oppbygning	Bevare massefordeling, stivhet og lastfordeling
	Vegger og forbindelser	Bevare energifordeling mellom vegger og forbindelser
Visuell-taktil fremtoning	Visuell	Tykkelse, farge, glass
	Taktil	Bevare sanseinntrykk konstruksjonen gir

For hver metode ble kriteriene så delt inn etter verdiene «høy, middels, lav, veldig lav», slik at programvaren kunne evaluere fremgangsmåtene etter gitte kriterier. I forsøket gjorde de seg erfaringene om at manglende informasjon om originale materialer og kvaliteten på håndverket

som skal tas med i beregningene er svært variable, og dermed vanskelig å sette en konkret, begrunnet verdi på.

Orlando et al. (2019) viser til at anisotropien til trevirket er avansert å gjenskape i et FEM-program. Kombinasjonen av forskjellig styrke i strekk og trykk for forskjellig fiberretning samt avanserte bruddtyper, er vanskelig å gjenskape nøyaktig i slike program. Små forskjeller i trevirket kan også spille inn i analysen, da programvaren i stor grad skaper et trevirke som ikke er identisk med trevirket som er testet ved fysisk forsøk. Trevirket er fullt av små variasjoner som kan være vanskelig å overføre til programvaren. Det er tidligere i denne oppgaven fremstilt flere forsøk gjort både fysisk og via FEM-analyse. I flere av disse er sammenhengen mellom modellering og reelle resultater ofte gode nok til å brukes i videre analyse. FEM-analyse er blitt gjort i lang tid ved beregning av enkeltelementer og større deler av konstruksjoner. Ved økt material- og komposittkunnskap kan analysering av forsterkning og reparasjon stadig bli mer relevant. Li et al. (2020) testet forsterkning av søyle i ABAQUS, Donadon et al. (2020) testet en bjelke forsterket med FRP i ANSYS og Azinović et al. (2019) testet GiR i ABAQUS. Felles for disse forsøkene er at de oppnår tilfredsstillende resultater, men at disse ligger stort sett på et avvik på 5% - 20% sammenlignet med tilsvarende forsøk gjort fysisk. Det eksisterer programvare og programtillegg, som er dedikert til dimensjonering og prosjektering av trevirke, blant annet TimberTech og RFEM.

XFEM (Extended Finite Element Modelling) er en utvidet elementmetode som utvider løsningsområdet til differensiallikninger med diskontinuerlige løsninger. Metoden gjør det enklere å modellere sprekker og ujevnheter (Datta, 2013). Programmer som kan benytte seg av denne metoden er blant annet ABAQUS, ANSYS og Matlab. Metoden byr på store muligheter for mer detaljrike simuleringer innenfor treteknologi. Blant annet har Gebhardt og Kaliske (2020) benyttet det til å simulere sprøbrudd i limtre og Ostapska og Malo (2021) for å simulere utvikling av sprekker og brudd som resultat av flere moduser på norsk gran.

5. Case studier

I dette kapitlet vil det være fokus på forskjellige caser som er sett på i forbindelse med reparasjoner og forsterkninger i Norge. Det vil bli fokusert på inngrep gjort i eldre konstruksjoner da tilgangen til nyere konstruksjoner med skader som er relevante, er begrenset. Årsaken til skadene i casene er i all hovedsak fuktighet og råte. Utbedringene generelt er gjort med et fokus på bestandighet og bevaring av byggets fremtoning mer enn bæreevne. Dette vil kunne forventes å være annerledes i nyere konstruksjoner.

5.1 Protese

5.1.1 Protese i søyle ved svalgang

I et eldre laftet hus fra 1759 har råte satt seg i konstruksjonen som tilstøter grunnmuren. Bygget har en svalgang i begge etasjer, og ved inngangen til svalgangen på bakkeplan har råte satt sine preg etter mange år utsatt for fuktighet slik det er vist på figur 50.



Figur 50 Råte har satt seg i bunnsvill, tilhørende søyler og dør på et eldre hus fra 1759. Foto: Maihaugen museum

I 2012 falt avgjørelsen om at disse måtte utbedres slik at man ikke risikerte at et verneverdig bygg skulle ta ytterligere skade. En vurdering av hva som skulle vektlegges ble gjort, og resultatet ble at begge søylene skulle repareres med en protese i nedkant av søylen hvor den

råtne delen ble fjernet og erstattet slik det er vist på figur 51. Begrunnelsen for valg av reparasjon er først og fremst bæreevne. Samtidig var det et ønske om å bevare et autentisk utseende og å erstatte minst mulig av den originale søylen. Dette for å bevare mest mulig av det originale uttrykket, men samtidig fjerne nok til at man kan forsikre seg om at all råte er fjernet. Protesen skulle bestå av samme tresort som søylen originalt består av og av samme kvalitet.



(a)

(b)

Figur 51 Bilder av reparasjon av søylefot ved hjelp av protese gjort i 2012. (a) Søylen på venstre side sett utenfra. Merk at denne siden krevde en større protese enn motsatt side. (b) Søylen på høyre side sett utenfra. Mindre protese enn på motsatt side. Foto: Trym Lunder Østby.

Rent praktisk ble reparasjonen startet med at muren under bygget ble senket, og at vekten dermed ble båret av eksterne stolper slik at det kunne gjøres inngrep uten problemer. Det ble tatt nøyaktige mål slik at søylene ikke skulle få forskjellige lengder og føre til at bygget skulle få skjevstilling i etterkant av inngrepet. Disse protesene ble ikke limt i kontaktflatene, da dette vil kunne hindre fuktighetens naturlige transport gjennom trevirket. Det er faset ut en del av den opprinnelige søylen slik at den låser mekanisk i en retning. Denne låsing vil i stor grad sperre mer for torsjon i kontaktflaten enn en flat kontaktflate ville gjort.

Som et substitutt for bruk av lim ble dermed forbindelsen plugget i bakkant slik det er vist på figur 52. En slik plugg sperrer forbindelsen på tvers av flensen som er faset ut, noe som fører til at søylen nå er sperret av i to retninger i forbindelsen i tillegg til at den er låst mot knekking av øvrige elementer i veggen langs søylen.



Figur 52 Bildet viser baksiden av protesen som er vist i figur 51 (a). Her vises det at en plugg er satt inn på tvers av flensen som er faset ut, og dermed låser forbindelsen i lengderetning til flensen. Denne er gjemt på innsiden for å bevare mest mulig originalt utseende. Foto: Trym Lunder Østby

5.1.2 Protese på søyle ved dør i låve

Ved en sidedør i en låve var en av søylene svært utsatt for en taklekkasje og hadde dermed store skader av råde, slik det er vist på figur 53. Som man ser av det originale trevirket som vises i figur (a) er store deler av det originale tverrsnittet råtnet bort.



(a)



(b)

Figur 53 Reparasjon av søyle ved inngangsdør. (a) Halve tverrsnittet er fjernet og erstattet med friskt trevirke. Lengde på protese 60cm. (b) Protese festet med en spiker i overkant og en i underkant av protesen. Foto: Trym Lunder Østby

Valget falt på å kun erstatte halve tverrsnittet, da det var et ønske om å beholde mest mulig av originalt trevirke gjennom hele søylen. Effekten av kontinuerlig fiber i trevirket er ønsket å bevare grunnet bedre låsing i forbindelsen og bevaring av informasjonsrikt trevirke. Søylen er plassert på en del av låven som ikke bærer store laster, så slik sett har løsningen vært solid nok med tanke på bæreevne. Bruk av spiker fremfor skruer er gjort grunnet liten tilgjengelighet på skruer i det tidspunktet forsterkningen ble gjort. Denne løsningen ble vurdert til å være sterkere enn å ha plant snitt på skjøten da protesen blir innlemmet i søylen. Det var fokus på gjennomførbarhet og autentisitet da verveverdige bygg i stor grad skal benytte seg av originalt trevirke.

5.2 Lasking av søyle

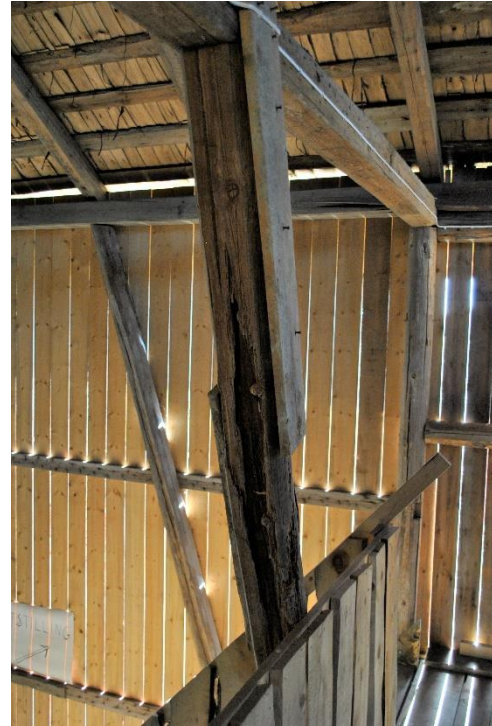
I en eldre låve fra 1930-tallet har råte satt sitt preg på flere bærende søyler og diagonaler. Låven har i lang tid utført sin funksjon som lagrings- og tørkeplass for korn før den ble flyttet til et museum på 1990-tallet. Flyttingen av låven ble sett på som en god mulighet til å utbedre bærende elementer som trengte reparasjon. Konstruksjonen bærer preg av mye stolper av bearbeidet heltre som er plassert for optimal plassutnyttelse. Da det finnes flere etasjer i låven vil man kunne se søyler av flere lengder hvor noen er lenger enn én etasje og noen er på lengde med etasjehøyden.

5.2.1 Lasking grunnet råte

Denne søylen (figur 54) går fra gulv i første etasje og opp i bærende konstruksjon i taket. Grunnet store råteskader, som også er svært synlig i overflaten, er store deler av tverrsnittet borte. I et forsøk på å holde søylen sammen er det lasket på begge sider hvor den ene lasken holder søylen sammen over det mest utsatte råteområdet (a), og den andre lasken (b) er festet i bjelken på oversiden. Denne søylen har en vinkel.



(a)



(b)

Figur 54 Lasking av søyle som har store råteskader. (a) Viser råte som er forsøkt forsterket med en lask på hver side. (b) Øvre lask er sammenføyd med bjelken i overkant for å yte mer styrke. Foto: Trym Lunder Østby

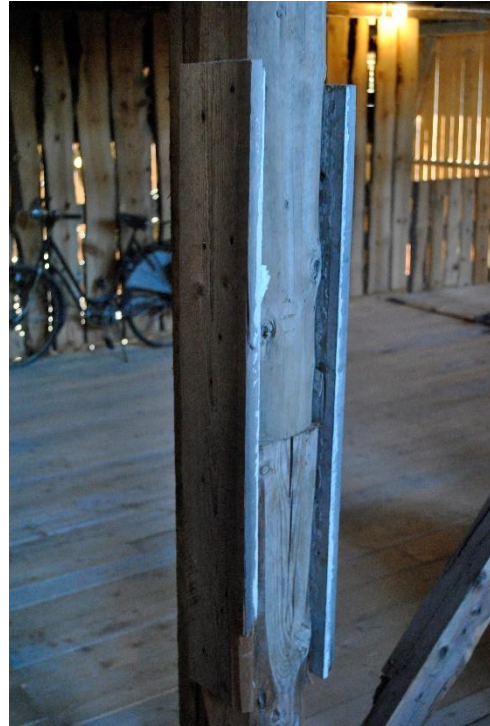
Det står en tilsvarende søyle på motsatt side av låven som gjør at søylene til sammen har en avstivende funksjon. Reparasjonen har stått siden låven ble flyttet på 90-tallet, men tilstanden til søylen tilsier at en utbedring er planlagt i nær fremtid.

5.2.2 Lasking som forsterkning av skjøt

I dette tilfellet ble halve søylen byttet i forbindelse med flytting av låven. Det ble her valgt en horisontal kontaktflate. Søylen står helt vertikalt og har en lengde på én etasjehøyde. Lasten kommer i dette tilfellet bare i aksial retning, og skjøten er forsterket med en lask på hver side for å forhindre vridning og å holde søylen intakt på rett plass. Lasken er omtrent 45cm på hver side av skjøten og er festet med spiker inn i søylen. Spikrene har ingen felles konfigurasjon eller avstand. Snittet i skjøten er plant for å fordele kreftene jevnt utover tverrsnittet, og med det forhindre vridning. En løsning med lask på alle flater ble vurdert, men da med åpne hjørner for å kunne observere eventuelle endringer. Dersom forsterkningen skulle vært gjort i dag er det uttrykt et ønske om å benytte seg av skruer og forboring av ytterste planke grunnet tettere kontaktflate mellom lask og søyle.



(a)



(b)

Figur 55 Lask av horisontal skjõt på søyle. (a) Lasken har en overskytende lengde på omtrent 45cm på hver side av skjøten. (b) Lasken er spikret inn i søylen med variende avstander og konfigurasjon. Foto: Trym Lunder Østby

6. Diskusjon

6.1 Diskusjon av presentert forskning

Selvborende skruer er ofte brukt i horisontale elementer og spesielt forbindelser. Gjennom god forskning, mye utbredt bruk og enkel tilgang har bransjen mye kunnskap om bruk av skruer i trevirke. En god del av variablene som kan være avgjørende i bruken av skruer, slik som uttrekkskapasitet, avstander og blokkutrivning m.m. er allerede standardisert i EC5. Enkelheten ved bruk av selvborende skruer er forlokkende, men uten forboring er det ikke alltid like enkelt å kvalitetssikre korrekt vinkel gjennom trevirket. Selv om selvborende skruer er regnet som reversible grunnet sin enkle uttrekk ved bruk av riktig verktøy, vil skruene skape et hull som kan regnes som sprekker dersom de trekkes ut. Nevnte hull kan i tillegg skape grobunn for større sprekker eller enklere tilgang for organismer.

Ved enkle problemer slik som tørkesprekker vil bruk av selvborende skruer på tvers av sprekk fremstå enkelt, visuelt tiltrekkende og effektivt. For vertikale elementer vil flere av variablene som gjør skruene utsatt, ikke gjelde. Utrivning kan sies å være av svært liten risiko, spesielt hvis man skrur i flere vinkler slik det var forsket på av Brown et al. (2021). Denne forskningen fremhever også en annen fordel med selvborende skruer. Det er små gjenstander sammenlignet med mye FRP og GiR, noe som gjør at friheten til forskjellige orienteringer på skruene er stor, og dermed kan man låse reparasjonene i flere retninger enn man kan med andre metoder.

EBR som metode viser seg å appellere dårlig visuelt, men kan være en god måte å forsterke elementer som ikke er synlig i konstruksjoner eller hvor utseende ikke er det viktigste. Snittøkningen på styrke som ble vist fra ett til to lag med FRP er lovende, dog vil dette også føre til en dobling av materiale og utgifter. Forskjellen i bruddtyper for de forskjellige fordelingene av FRP er også verdt å merke seg (heltrukket, strips). En søyle heltrukket med FRP vil også fremstå mye stivere enn en forsterkning med selvborende skruer. Forsøket med konserveringsmidler og FRP er av eldre årgang, og mye har skjedd med konserveringsmetodene og limet siden den gang. Derfor vil valg av overflatebehandling, impregnering og brannmotstandsbehandling være eksempler på variabler i trevirket som trenger mer utforskning før man kan konkludere med effekten det har på EBR som forsterkningsmetode.

Innlimte stenger kan lett fremstå som den mest avanserte metoden som er presentert. Dette grunnet mengden forskjellige enheter som skal jobbe godt sammen for å oppnå et optimalt resultat. Ved flere elementer kan mer gå galt, og dermed gjøre metoden mer usikker. Det er

svært små feil som skal til før man kan få et merkbart dårligere resultat slik det er vist i figur 43. Slike ujevnheter er det vanskelig å helgardere seg mot og å evaluere kvaliteten på. Et scenario som kan være problematisk med GiR, er om det skulle oppstå brudd eller andre problemer som gjør at man må reparere forsterkningen. Da GiR er plassert inne i elementet er tilgangen vesentlig mindre enn man kan forvente ved bruk av andre metoder.

Metoden HFT vil kunne fremstå som en moderne, bærende lettvegg. Styrken kan sammenlignes med stålsystemer av samme dimensjoner, men er merkbart lettere. For å gjøre en ny metode som HFT gjeldende i bransjen, bør det la seg modellere slik at man kan forutsi, med god treffsikkerhet, hvordan elementet vil prestere i en konstruksjon. Bruken man her opplever med FRP vil kunne gjøre at trevirke som opprinnelig ville bli sett på som overflødig og svakt, vil kunne bidra til bæring i bygg. Vekten og hulrommet kan virke utelukkende positivt, men lydisolasjon og lette konstruksjoner kan være et problem i områder utsatt for store naturkrefter. Forbindelsen mellom slike elementer og øvrig konstruksjon er ikke beskrevet i forsøket, og kan dermed være en svakhet. Opplagere er vist å være viktige i evalueringen av styrken til vegger, og dersom HFT ikke har noen god overføring av krefter mellom vegg og tilstøtende elementer kan det være ødeleggende for denne type elementer.

Limet har vist seg å kunne være grunnen til flere svake forbindelser. Det fører til at det stadig er fokus på videreutvikling av limet som komponent i reparasjoner og forsterkninger. Forskningen som er presentert viser at det stadig gjøres fremskritt. Slike tverrfaglige utfordringer kan være fellende for enkelte metoder. Herdetid, herdekvalitet, limtykkelse, limfordeling og styrken på kontakten med materialoverflatene utgjør så store variabler at de må brukes med høy nøyaktighet og kunnskap slik at resultatet ikke blir forringet. Til sammenligning vil bruk av selvborende skruer fremstå som et enklere alternativ med færre variabler som kan ødelegge kvaliteten. I tillegg vil reparasjoner og forsterkninger gjort med selvborende skruer enkelt kunne endres grunnet sin reversibilitet. Dette er ikke like enkelt ved bruk av lim i for eksempel FRP og GiR. Det resulterer i at selvborende skruer vil kunne fremstå som mer brukervennlig. Hvordan limet i massivtre og limtre påvirker fuktighet i elementene er også et punkt som må tas i vurdering.

Forskningen som blir gjort på lim vil kunne gjøre metoder som baserer seg på lim mer brukervennlig enn tidligere. Alle typer FRP (EBR, NSM, GiR) og GiR med stålstang er avhengig av limet for å kunne få heft mellom overflaten på trevirket og FRP. Det viser seg at herdetiden kan reduseres kraftig uten å forringe kvaliteten alt for mye, noe som vil kunne føre

til at disse metodene kan benyttes i en mer strømlinjet byggeprosess som unngår å stoppe opp for å vente på herding i 7 dager. I tillegg vises det til at akselerert herding kan utføres i et vidt spekter av temperaturer (23°C, 5°C og -10°C) med gode resultater. I norsk klima kan dette vise seg å være essensielt da dette er temperaturer som ofte forekommer i Norge. Dersom man kan akselerere herdingen i nordisk klima, vil metoden kunne brukes mer utbredt enn først antatt.

FRP fremstår enn så lenge som et dyrt alternativ til stål. Dersom etterspørselen øker, vil produksjonen og tilgjengeligheten kunne øke. Da kan man i fremtiden se at der vi i dag bruker mye stål, vil det kunne bli mer vanlig å benytte seg av forskjellige typer FRP.

6.2 Forsøk gjort i rapporter vs. gjennomføring i virkeligheten

Protese er en mye brukt løsning for horisontale elementer. I bruk for vertikale elementer kan man se at det kan være en enklere fremgangsmåte enn man opplever i horisontale elementer. Dette vises i forsterkningen gjort i kapittel 5.1. Forskningen som er funnet om bruk av protese er at det ofte må brukes innlimte stenger eller selvborende skruer for at en slik metode skal holde. Her hvor lasten i stor grad kommer aksialt og søylene er fastholdt mot knekking av øvrig konstruksjon, har det vist seg å holde med en enklere tilnærming til bruk av protesen. En konsekvens av svalgang vil være at de bærende søylene og veggene til huset er mer tildekket for vær og vind, og at et inngrep på søylene som bærer svalgangen ikke er like risikofyllt som et inngrep på en søyle i selve bygget. Gitt at lastene dermed er mye mindre vil en enkel tilnærming til protese være tilstrekkelig.

Om man sammenligner løsningene i kapittel 5.1.1 og 5.1.2 kan man se at man i utgangspunktet har en relativt lik problemstilling. Det er derimot løst på forskjellige måter, hvor løsningen i 5.1.1 har fjernet hele tverrsnittet med råte og 5.1.2 har fjernet halve tverrsnittet. I sistnevnte løsning beholder man mer av det skadde trevirket som kan fortelle historien om hva som har skjedd. Samtidig beholder man flere fibre som kontinuerlig går fra topp til bunn i søylen. Det visuelle fremstår derimot mer tiltalende i løsningen gjort i 5.1.1, som i tillegg fremstår som et mer omfattende inngrep. Da dette er en søyle som er svært synlig i inngangspartiet til svalgangen, er det visuelle en viktig faktor å inkludere. Felles for løsningene er valget om å ikke ha en plan kontaktflate i forbindelsen. Dette fører til at man ikke er avhengig av låsing på utsiden av søylen, og man kan forvente et utseende som er autentisk. I disse tilfellene er ikke lasten nevneverdig stor, så en jevn fordeling av lasten over en plan skjøt er ikke nødvendig.

Utseendemessig vil man måtte forvente en fargeforskjell på materialene de første årene. Trevirket som har stått siden 1759 vil naturligvis ha flere bruksmerker, sprekker og fargeforandringer enn friskt trevirke fra 2012. Slik det vises på figur 51 er fargeforskjellen merkbar, men på ingen måte sjenerende for helhetsinntrykket. Dersom man ikke spesifikt ser etter slike variabler som denne reparasjonen har, vil man ikke kunne merke at noe er gjort. Sammenlignet med tilstanden før reparasjonen, er inngrepet vellykket og er et bevis på at man kan gjennomføre reparasjoner av god kvalitet på eldre hus med denne metoden.

En meget interessant vurdering som er gjort i denne reparasjonen er valget om å ikke bruke lim. Limet vil kunne danne en tett hinne i kontaktflatene som ikke lar vann trenge igjennom i vertikal retning. Dette kan føre til at unaturlige oppsamlinger av vann oppstår og den naturlige bevegelsen av fuktighet i trevirket blir påvirket, slik at råte dermed er uunngåelig i nær fremtid. I et inngrep på utvendige elementer og andre bærende elementer, som er i jevnlig kontakt med varierende fuktighetsnivåer, er dette noe som må tas med i evalueringen.

Lasking fungerer fint for enkle forsterkninger. Kapittel 5.2 viser til to forskjellige løsninger med lask som forsterkning. Visuelt er det ikke like tiltalende, men for bærende elementer som er skjult for allmenn ferdsel er ikke det en like viktig faktor. Spiker er brukt grunnet tilgangen til materialer når forsterkningen ble gjort, men med økt kunnskap kan andre metoder benyttes slik som selvborende skruer eller EBR.

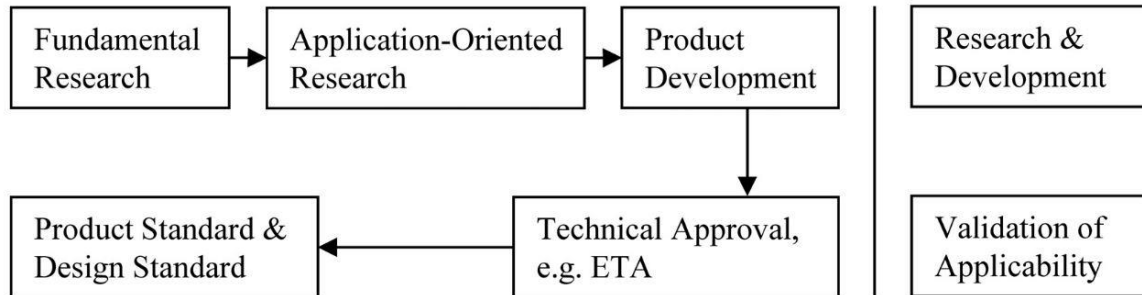
6.3 Standardisering

Standarder er til for å hjelpe til med effektivisert og trygg prosjektering av konstruksjoner og elementer. Gitte regler for dimensjonering, materialkapasiteter og andre faktorer gjør at man enklere kan gjennomføre prosjektering hvor man kan forutse styrken og kvaliteten, og dermed være trygg på at konstruksjonen holder mål. Når man følger nevnte regler vil det også være tidsbesparende.

Bransjen presser stadig grenser og nye spennende metoder for forsterkning og reparasjon kommer frem. I de fleste land har ikke EC5 et avsnitt for dette temaet, men i den tyske og østeriske standarden er det inkludert som et tillegg.

Standardisering er en langsom prosess som går igjennom mange steg for å kunne bli publisert som en standard, slik det er vist i figur 56. Det har vært jobbet med dette siden 2011 da komiteen for standardisering i Europa (*European standardization Committee responsible for EC5*) dannet

en egen arbeidsgruppe for å utarbeide et tillegg til ny EC5 som omhandler forsterkning av trelementer. Det som inkluderes i dette tillegget skal bare ta for seg vanlige situasjoner for design som er godkjent gjennom resultater av grundig praktisk erfaring (Dietsch, 2019).



Figur 56 Vanlig fremgangsmåte for standardisering. Først grunnleggende forskning, deretter testes dette i overvåket bruk. Ut ifra resultatene blir det så laget et produkt. Samlet utgjør dette forskning- og utviklingsfasen. Videre utvikles det teknisk godkjenning og deretter produkt- og designstandarder, som til sammen blir valideringsprosessen av standarden. Figur hentet fra (Dietsch, 2019).

Arbeidet med tillegget til EC5 fokuserer på forsterkninger gjort med følgende metoder:

- Selvborende skruer og bolter
- Innlimte stenger
- Pålimt trevirke

Dette betyr at FRP og andre nanoforsterkninger ikke blir omtalt i et nytt tillegg i en ny standard EC5. Grunnen til det er at testprosedyrene samt materialstandardene ikke er gode nok, eller mangler, for å lage generelle regler til en standard (Dietsch, 2019). En slik ekskludering kan føre til at fremtidige løsninger med FRP og nanoforsterkninger faller bort fra bruk i hverdagen, da løsninger i henhold til standarden blir prioritert. Ved grundig utarbeiding av en generell standard kan man også se for seg at den tar høyde for bruk av nye metoder.

Innenfor forsterkning og reparasjon er variablene så mange og situasjonene så forskjellige at en felles standard for alle typer brudd er vanskelig å utarbeide. Allikevel kan en form for oppdeling etter generelle bruddtyper forsyne med bransjen med nok teori og fremgangsmåter til at det dekker over en stor del av problemene. En slik standard vil kunne føre til en generell fremgangsmåte for å løse de mest tilbakevendende bruddtypene og lettere gjennomføring for alle involverte. Enkelte formler og tankeganger er vanskelig å standardisere, da det er svært få

tilfeller som er helt identiske. Et bredere utvalg av formler kan være å foretrekke for at forsterkning av vertikale elementer skal være aktuelt i praksis.

En implementering av en standard vil også kunne øke bevisstheten rundt mulighetene til å forsterke trevirke. Hvor man tidligere stort sett hadde økning i tverrsnitt eller styrkegrad av trevirke som muligheter til å få sterkere materialer, belyses det andre måter å oppnå økt styrke. I flere tilfeller har man ikke muligheten til å øke tverrsnitt. Dette fordi det tar av bruksarealene eller at det er dyrere å øke sorteringsgraden enn det er å gjøre en forsterkning slik det kan være beskrevet i en standard.

Ikke alt kan standardiseres. For eldre bygg er det andre parametere som gjelder enn for nybygg, og et alternativ/tillegg til standardisering kan være en form for håndbok eller kildebank hvor fagpersoner kan legge inn sine erfaringer slik at andre med tilsvarende problemer kan løse forsterkning og reparasjon mer effektivt. Et slikt lett tilgjengelig verk vil kunne øke kunnskapsnivået rundt temaet. En felles utarbeidelse av kriterier man bør vurdere før inngrep kan også hjelpe bransjefolk til å ikke glemme viktige faktorer man bør legge til grunn i sin evaluering av valgt metode.

6.4 Endring i fokus på parametere

Der hvor det tidligere har vært fokus på økonomi som motivasjon for valg av forsterkning, så kan miljø/reversibilitet bli viktigere i fremtiden. Selv om det i det hverdagslige vil være enkelt å tenke på økonomi som hovedfaktor for valg av metode, er det tenkelig at miljø- og klimafaktorene blir mer tungtveiende i tiden fremover. Utviklingen i samfunnet generelt tvinger bransjen til å tenke annerledes, og da kan man bli motivert til å vektlegge miljø mer en økonomi. Siden verden beveger seg mer og mer mot klimavennlige endringer vil også byggebransjen påvirkes. Det kan tvinge frem et fokus på å prosjektere konstruksjoner som er høyt reversible, og dermed gjør konstruksjoner enklere å re-designe. Bygg som baserer seg på forsterkninger som ikke kan reverseres kan bli tvunget til å rives og bygge nytt fremfor å bygge om eksisterende bygg, og dermed mister man muligheten til å rehabilitere. Dette er pekt på som et essensielt ledd i utviklingen av en mer klimavennlig tankegang for byggebransjen. Fokuset på miljø vil også påvirke kostnadene i en forsterkning. Fremtidige krav kan overskygge søken etter å gå for den mest økonomiske løsningen.

Forskjellen mellom fokusområder fra nyere og eldre konstruksjoner kommer tydelig frem. For nyere konstruksjoner står gjerne økonomi, tidsbruk, visuelt og miljø i fokus. For eldre konstruksjoner er ofte økonomien nedprioritert til fordel for autentisk fremtoning av forsterkningen/reparasjonen. I eldre verneverdige konstruksjoner kan også tankegangen i gjennomføring skille seg fra nye konstruksjoner. Skjøre gamle bygg bør håndteres på en annen måte enn nybygg, og det fremstår at bruk av mer tid er akseptabelt.

I analysen gjort av Stellacci et al. (2018) vist i kapittel 4.5 er variablene strukturell bæreevne og det visuelle prioritert. Bæreevne er en selvsigende variabel som må med, men i gjennomføringen er ikke reversibilitet, praktisk gjennomførbarhet, miljø og økonomi vektlagt. Slik analyse med så mange variabler kan bli veldig komplekst å gjennomføre. Her kan man risikere å ende opp med at metoden som etter kalkulasjonene er best, men at den ikke lar seg enkelt gjennomføre, at den koster store summer, at den tar i bruk miljøfiendtlige materialer eller at den ikke er reversibel. I fremtidig bruk av slike programmer bør man kunne implementere flere variabler slik at man får et nøyaktig nok resultat, da bransjen i fremtiden mulig vil måtte vektlegge andre/flere variabler. Slike mindre kvantifiserte variabler kan derimot være vanskelig å tallfeste, slik at det blir tatt med i vurderingen på korrekt basis, noe som gjør at vektleggingen «høy, middels, lav, veldig lav» som er brukt i nevnt forsøk gir mening.

Bruken av programvare for beslutningstaking fremstår som et godt hjelpemiddel. Det kan komme frem kombinasjoner og løsninger som man selv ikke kunne forutsatt som optimaliserer flere parametere. Samtidig er det en kompleks kartlegging av variabler som må til for å gjøre en grundig analyse, og dermed kan fordelene av bruk av slik programvare vaskes bort. Dersom variabler ikke er fullstendig kartlagt, kan avgjørelser tas på et ufullstendig grunnlag og føre til dårlige resultater. Derimot kan slike program være veldig gunstige dersom det er anledning til å bygge opp en materialbank med gitte verdier slik at man enkelt kan benytte seg av forhåndsdefinerte variabler og gjøre beslutninger. Om det i tillegg kan kobles opp mot kriterier i en standard for forsterkning kan det virkelig gjøre prosessen med prosjektering og beslutningstaking mer strømlinjeformet.

7. Konklusjon

Hovedmålet med denne oppgaven var å undersøke og presentere reparasjons- og forsterkningsmetoder for reparasjon for vertikale, bærende elementer av tre. I arbeidet med oppgaven har følgende konklusjon gjort seg gjeldende:

Selvborende skruer bringer med seg store fordeler. Enkel montering, lite inngrep i det visuelle, gunstig både prismessig og tidsmessig. Dette er alle faktorer som gjør teknikken svært attraktiv for reparasjon av vertikale elementer. En inkludering av metoden i en fremtidig revidert EC5 vil kunne gjøre den meget anvendbar. Selvborende skruer fremstår mer attraktivt enn FRP grunnet reversibilitet. Hvordan fjerning av FRP påvirker originalt trevirke er ikke fremstilt på noen lettvinnt måte. Med limtyper som blir bedre vil man kunne anta at slik heft mellom FRP og trevirke vil kunne ødelegge trevirke ved fjerning av FRP.

Prismessig er selvborende skruer et relativt billig alternativ sammenlignet med FRP. Innad i FRP-metoden er enn så lenge bruk av stål billigere enn diverse FRP-typer. Dersom bruken av FRP øker, vil produksjonen øke og dermed tilgangen bli bedre. Dermed vil metoden i fremtiden kunne bli billig. Materialeegenskaper skaper problemer for det strukturelle aspektet ved bruk av FRP og lim. Variasjonene er store, og det er mange variabler involvert som kan forringe resultatet. Metoden fordrer at man baserer seg i stor grad på tverrfaglig kompetanse som kan fordyre situasjonen og gjøre den mer komplisert enn man ønsker. For reparasjons- og forsterkningsmetoder som benytter seg at lim, slik som FRP og innlimte stenger, vil limets påvirkning på treets hygroskopiske egenskap være en stor faktor som kan gjøre metoden uegnet til bruk i klima med varierende fuktighet. Slik situasjonen er nå har GiR som forsterkningsmetode gjort seg mer gjeldende for horisontale enn vertikale elementer grunnet lettere tilgang samt utbredt forskning. GiR øker styrken til trevirket på tvers av fiberretning, men bruken av GiR for økning av styrke i fiberretning er ikke like tydelig.

GiR er den eneste metoden av FRP-forsterkning som er blitt varslet inkludert i ny EC5. Sammenlignet med selvborende skruer, som blir inkludert i ny EC5, vil det kunne sies å være svekkende for EBR som metode. En inkludering i standarden vil øke bevissthet rundt metoden, og gjøre metoden forenklet nok til at den blir valgt ofte.

Bruk av programvare for analyse av metodene kan vise seg å være essensielt i fremtiden. En utvikling av evalueringsprogram kan forenkle og strømlinje prosessene nok slik at den totale

tidsbruken blir forminsket drastisk. Dersom det i tillegg blir enklere å nøyaktig simulere aktuelle situasjoner kan dette kunne øke effektiviteten og kvaliteten betraktelig. Ut ifra ønske om redesign fremfor nybygg i et miljøperspektiv vil reversibilitet og miljø kunne stå igjen som de viktigste faktorene. Miljøfokus vil ikke avta, og vil kunne fremstå som et tydeligere krav i fremtiden. Derfor kan reparasjon- og forsterkningsmetoder som anvender stoffer som ikke er klimavennlige eller er ikke-reversible, fremstå som uegnede.

Sammenhengen mellom den nyeste forskningen og bruken av teknikker på eldre konstruksjoner i Norge kan ansees som svært liten. Grunnen til dette kan være fokus på forskjellige parametere i gjennomføringen av inngrepene og liten tilgang til moderne metoder. Det er dermed funnet en forskjell i parametere som blir lagt til grunn mellom eldre og nyere konstruksjoner. Forskningen som blir ansett som moderne kan vise seg å bli mer gjeldene for nyere konstruksjoner når det oppstår behov for forsterkning og reparasjon.

Potensialet i reparasjon og forsterkning av trevirke er stort. Økt kunnskap rundt temaet vil i fremtiden gjøre det mulig å benytte seg av flere metoder og oppnå et bedre resultat enn man tidligere har opplevd. Nye metoder vil stadig komme til, og ved hjelp av bedre deling av kunnskap vil fremtidens inngrep kunne gjøres mer effektivt, bli billigere og sterkere.

8. Videre arbeid

I arbeidet med oppgaven er det tydelig at det er flere punkter som har behov for videre undersøkelser:

- Hvordan forsterkning påvirker miljøaspektet ved bruk av tre. Er dette et fremtidig kriterium for valg? Dersom en metode overskygger miljøfordelene ved bruk av tre vil dette kunne fortære gleden ved bruk av trevirke. Trevirke som er dekket av FRP påvirker den visuelle effekten trevirke har, men hvordan påvirker det de organiske sidene slik som den hygroskopiske effekten?
- I skrivende stund er ikke tillegget til EC5 som skal omhandle forsterkning av elementer av tre publisert. Hvordan tillegget vil bli ved publisering er dermed ikke visst. En gjennomgang av hvordan endringen i EC5 påvirker bransjen vil dermed være av interesse.
- Mye av forskningen som er funnet i arbeidet med denne oppgaven omhandler horisontale elementer, slik som bjelker og gulv/tak. En lignende oppgave med et horisontalt fokus vil kunne være aktuelt.
- Utforming av en kildebank som inneholder inngrep, erfaringer og kunnskap om bygg og andre konstruksjoner i et ingeniør-, kulturhistorisk- og materialperspektiv.

Litteraturliste

- ABAQUS Inc. (2006). *1.1.25 UGENS: User subroutine to define the mechanical behavior of a shell section*. Tilgjengelig fra: <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/sub/default.htm?startat=ch01s01asb25.html> (lest 23.03.2021).
- Azinović, B., Danielsson, H., Serrano, E. & Kramar, M. (2019). Glued-in rods in cross laminated timber – Numerical simulations and parametric studies. *Construction and Building Materials*, 212: 431-441. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.331>.
- Balmori, J. A., Branco, J. M. & Basterra, L. A. (2021). Behaviour of the adhesive bond between low-grade wood and GFRP reinforcements using epoxy resin. *Construction and Building Materials*, 271: 121516. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121516>.
- Borgström, E. & Fröbel, J. (2017). *KL-trähandbok*. Stockholm: Svenskt Trä.
- Brown, J. R., Li, M., Tannert, T. & Moroder, D. (2021). Experimental study on orthogonal joints in cross-laminated timber with self-tapping screws installed with mixed angles. *Engineering Structures*, 228. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111560>.
- Bukauskas, A., Mayencourt, P., Shepherd, P., Sharma, B., Mueller, C., Walker, P. & Bregulla, J. (2019). Whole timber construction: A state of the art review. *Construction and Building Materials*, 213: 748-769. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.043>.
- Bulleit, W. M. (1983). Reinforcement of Wood Materials: A Review. *Wood and Fiber Science*, 16 (3): 391-397.
- Cabrero, J. M., Honfi, D., Jockwer, R. & Yurrita, M. (2019). A probabilistic study of brittle failure in dowel-type timber connections with steel plates loaded parallel to the grain. *Wood Material Science & Engineering*, 14 (5): 298-311. doi: 10.1080/17480272.2019.1645206.
- Chang, W.-S. (2015). Repair and reinforcement of timber columns and shear walls - A review. *Construction and Building Materials*, 97: 14-24. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.002>.
- Clausen, C. A. (2010). Biodeterioration of Wood. I: *Wood Handbook - Wood as an Engineering Material*, s. 14-1 - 14-16. Madison, WI: United States Department of Agriculture.
- Corradi, M., Osofero, A. I. & Borri, A. (2019). Repair and Reinforcement of Historic Timber Structures with Stainless Steel- A Review. *Metals*, 106 (9). doi: <https://doi.org/10.3390/met9010106>.
- Corradi, M., Vemury, C. M., Edmondson, V., Poologanathan, K. & Nagarathnam, B. (2020). Local FRP reinforcement of existing timber beams. *Composite Structures*, 258. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113363>.

- Crocetti, R., Kliger, R., Hansson, E. F., Danielsson, H., Mårtensson, A., Serano, E., Piazza, M., Bell, K. & Liven, H. (2015). *Limtreboka*, b. 2. Oslo: Norske Limtreprodusenters Forening.
- Datta, D. (2013). *Introduction to eXtended Finite Element (XFEM) Method*. Tilgjengelig fra: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1308/1308.5208.pdf> (lest 12.05.2021).
- Davalos, J., Qiao, P. & Trimble, B. S. (2000). Fiber-Reinforced Composite and Wood Bonded Interfaces: Part 1. Durability and Shear Strength. *Journal of Composites Technology & Research*, 22: 224-231. doi: 10.1520/CTR10544J.
- Dietsch, P. & Winter, S. (2012). Eurocode 5—Future Developments towards a More Comprehensive Code on Timber Structures. *Structural Engineering International*, 22 (2): 223-231. doi: <https://doi.org/10.2749/101686612X13291382991001>.
- Dietsch, P. (2019). Reinforcement of Timber Structures - Standardization towards a new section for EC 5. I: *5th International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures, SHATiS'19, Portugal, September 25-27*, s. 1-29. Guimarães.
- Donadon, B. F., Mascia, N. T., Vilela, R. & Trautwein, L. M. (2020). Experimental investigation of glued-laminated timber beam with Vectran-FRP reinforcement. *Engineering Structures*, 202. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109818>.
- Edvardsen, K. I. & Ramstad, T. Ø. (2014). *Håndbok 5 Trehus*. Oslo: SINTEF akademisk forlag.
- Fernando, D., Teng, J., Gattas, J. & Heitzmann, M. (2018). Hybrid fibre-reinforced polymer–timber thin-walled structural members. *Advances in Structural Engineering*, 21 (9): 1409-1417. doi: <https://doi.org/10.1177/1369433217739709>.
- Finch, G. (2016). *High-Rise Wood Building Enclosures*. RDH Building Science. Tilgjengelig fra: https://web.ornl.gov/sci/buildings/2016/docs/presentations/practices/practices-13/Practices13_Paper7_Finch.pdf (lest 02.02.2021).
- Fjellstad, K. B. (u.å.). *Treslag i Norge*. Tilgjengelig fra: <https://www.nibio.no/tema/skog/skoggenetiske-ressurser/treslag-i-norge> (lest 19.01.2021).
- Franke, S., Franke, B. & Harte, A. M. (2015). Reinforcement of timber beams. I: Harte, A. M. & Dietsch, P. (red.) *Reinforcement of Timber Structures - A state-of-the-art report*, s. 5-24. Germany: Shaker Verlag.
- Fufa, S. M., Flyen, C. & Venås, C. (2020). *Grønt er ikke bare en farge: Bærekraftige bygninger eksisterer allerede*. SINTEF Fag. Tilgjengelig fra: <https://www.sintefbok.no/book/index/1268/groent-er-ikke-bare-en-farge-baer-ekraftige-bygninger-eksisterer-allerede>.

- FutureBuilt. (2019). *FutureBuilt kriterier for sirkulære bygg*. Oslo: FutureBuilt.
Tilgjengelig fra:
<https://www.futurebuilt.no/Nyheter?lcid=1033&page=3#!/Nyheter/Sirkulaere-bygg.-Definert.-Og-snart-realitet> (lest 18.01.2021).
- Gattas, J. M., O'Dwyer, M. L., Heitzmann, M. T., Fernando, D. & Teng, J. G. (2018). Folded hybrid FRP-timber sections: concept, geometric design and experimental behaviour. *Thin-Walled Structures*, 122: 182-192. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.10.007>.
- Gebhardt, C. & Kaliske, M. (2020). An XFEM-approach to model brittle failure of wood. *Engineering Structures*, 212: 1-9. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110236>.
- Glasø, G. (2016). *Ny NS-EN 338 (2016) - konstruksjonstrevirke*. Treteknisk Informasjon. Tilgjengelig fra: <http://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/TI-nr-1-2016.pdf> (lest 03.02.2021).
- Godal, J. B., Moldal, S., Oalann, T. & Sandbakken, E. (2009). *Beresystem i eldre norske hus*. Trondheim: Tapir Akademiske Forlag.
- Harte, A. M. & Dietsch, P. (red.). (2015). *Reinforcement of Timber Structures - A state-of-the-art report*, b. 1. Düren: Shaker Verlag.
- Harte, A. M., Jockwer, R., Stepinac, M., Descamps, T., Rajcic, V. & Dietsch, P. (2015). Reinforcement of timber structures - The route to standardisation. I: Nowak, J. J. T. (red.), s. 78-88. Wrocław, Poland.
- Jockwer, R., Steiger, R. & Frangi, A. (2014). Fully Threaded Self-tapping Screws Subjected to Combined Axial and Lateral Loading with Different Load to Grain Angles. I: *Materials and Joints in Timber Structures*, s. 265-272. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Klein, J., Ihmels, F., Schürmann, H. & Mittelstedt, C. (2021). Manufacturing influences of the adhesive layer on the load-bearing capacity of anchor bolts for thick FRP laminates. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 106: 102817. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102817>.
- Klima- og miljødepartementet. (2020). *Norge forsterker klimamålet for 2030 til minst 50 prosent og opp mot 55 prosent*. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/norge-forsterker-klimamalet-for-2030-til-minst-50-prosent-og-opp-mot-55-prosent/id2689679/> (lest 18.01.2021).
- Kučera, B. (1998). *Treets oppbygning og vedanatomi*. Ås: Norsk Institutt for skogforskning.
- Lee, I.-H., Song, Y.-J., Jung, H.-J. & Hong, S.-I. (2015). Moment Resistance Performance Evaluation of Larch Glulam Joint Bonded in Glass Fiber Reinforced Plastic Rods. *J. Korean Wood Sci. Technol.*, 43 (1): 60-67. doi: <https://doi.org/10.5658/WOOD.2015.43.1.60>.

- Lee, Y., Park, J., Hong, S. & Kim, S. (2015). A Study of Bond of Structural Timber and Carbon Fiber Reinforced Polymer Plate. *Materials Science*, 21 (4): 563-567. doi: <https://doi.org/10.5755/j01.ms.21.4.9702>.
- Li, H., Qiu, H., Zhao, Z. & Lu, Y. (2018). Axial compression behaviour of retrofitted long timber columns. *Advances in structural engineering*, 21 (3): 445-459. doi: <https://doi.org/10.1177/1369433217719984>.
- Li, H., Qiu, H. & Lu, Y. (2020). An analytical model for the loading capacity of splice-retrofitted slender timber columns. *Engineering Structures*, 225 (111274): 1-14. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111274>.
- Lyons, J. S. & Ahmed, M. R. (2005). Factors Affecting the Bond Between Polymer Composites and Wood. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 24 (4): 405-412. doi: <https://doi.org/10.1177/0731684405044898>.
- Macchi, G., Calvi, G. M. & Sullivan, T. J. (2018). Structural Strengthening and Retrofit; Motivations, Concepts and Approaches. I: Costa, A., Arêde, A. & Varum, H. (red.) *Strengthening and Retrofitting of Existing Structures*, s. 1-24. Singapore: Springer Singapore.
- Min, L., Fernando, D., Gilbert, B. P. & You, Z. (2020). Hybrid FRP-timber thin-walled Cee section columns under axial compression: Numerical modelling. *Thin-Walled Structures*, 157: 107029. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107029>.
- Moelven Limtre. (2021). *Mjøstårnet*. Tilgjengelig fra: <https://www.moelven.com/mjostarnet/> (lest 02.02.2021).
- Moelven Limtre. (u.å.). *Mediabank Moelven Limtre*. Tilgjengelig fra: <https://mediabank.moelven.com/mediaroom.html> (lest 16.02.2021).
- Morris, P. I. (1998). *Understanding Biodeterioration of Wood in Structures*. Composites and Treated Wood Products. Tilgjengelig fra: <https://cwc.ca/wp-content/uploads/aboutdecay-biodeterioration.pdf> (lest 14.01.2021).
- Nore, K., Nyrud, A. Q., Kraniotis, D., Skulberg, K. R., Englund, F. & Aurlien, T. (2017). Moisture buffering, energy potential, and volatile organic compound emissions of wood exposed to indoor environments. doi: <https://doi.org/10.1080/23744731.2017.1288503>.
- Norsk Sagbruksmuseum. (u.å.). *Oppgangssagas tidsalder*. Tilgjengelig fra: <https://sagbruksmuseet.no/sagbrukshistorie/oppgangssaga/> (lest 01.02.2021).
- O'Neill, C., McPolin, D. O., Harte, A. M. & Taylor, S. (2014). Influence of embedded length on strength of BFRP rods bonded parallel to the grain in low grade timber by pullout-bending tests. I: *Civil Engineering Research in Ireland, August 2014*, s. 1-5. Belfast.
- Oprisan, G., Taranu, N. & Ențuc, I.-S. (2004). Strengthening of the Timber Members Using Fibre Reinforced Polymer Composites. I: *Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, CONSTRUCTIONS. ARCHITECTURE Section, Tomme L (LIV), Fascicle 1-4*, s. 67-76.

- Orlando, N., Taddia, Y., Benvenuti, E., Pizzo, B. & Alessandri, C. (2019). End-repair of timber beams with laterally-loaded glued-in rods: Experimental trials and failure prediction through modelling. *Construction and Building Materials*, 195: 623-637. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.045>.
- Ostapska, K. & Malo, K. A. (2021). Crack path tracking using DIC and XFEM modelling of mixed-mode fracture in wood. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 112: 102896. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.102896>.
- Pizzo, B. & Smedley, D. (2015). Adhesives for on-site bonding: Characteristics, testing and prospects. *Construction and Building Materials*, 97: 67-77. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.061>.
- Premrov, M. & Dobrila, P. (2008). Mathematical modelling of timber-framed walls strengthened with CFRP strips. *Applied Mathematical Modelling*, 32 (5): 725-737. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2007.02.009>.
- Ratsch, N., Böhm, S., Voß, M., Adam, M., Wirries, J., Dreves, N. & Vallée, T. (2019). Accelerated curing of glued-in threaded rods by means of inductive heating – Part III: transient curing. *The Journal of Adhesion*: 1-25. doi: <https://doi.org/10.1080/00218464.2019.1699071>.
- Ratsch, N., Böhm, S., Voß, M., Kaufmann, M. & Vallée, T. (2019). Influence of imperfections on the load capacity and stiffness of glued-in rod connections. *Construction and Building Materials*, 226: 200-211. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.278>.
- Ratsch, N., Burnett-Barking, M., Böhm, S., Voß, M., Adam, M., Kaufmann, M. & Vallée, T. (2020). Accelerated curing of glued-in threaded rods by means of inductive heating — part IV: curing under low temperatures. *The Journal of Adhesion*: 1-26. doi: <https://doi.org/10.1080/00218464.2020.1818562>.
- Ratsch, N., Burnett-Barking, M., Böhm, S., Myslicki, S., Voß, M., Adam, M. & Vallée, T. (2021). Resistive curing of glued-in rods. *Construction and Building Materials*, 268: 121127. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121127>.
- Sandland, K. M. (2009). *Yteherding - årsak og tiltak*. FOKUS på tre. Tilgjengelig fra: <http://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/fokus-pa-tre/Fokus-nr-48.pdf> (lest 09.02.2021).
- Schober, K.-U., Harte, A. M., Klinger, R., Jockwer, R., Xu, Q. & Chen, J.-F. (2015). FRP reinforcement of timber structures. *Construction and Building Materials*, 97: 106-118. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.020>.
- SINTEF Byggforsk. (2003). *Vindlaster på bygninger*. Byggforskserien 471.043. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/3118/vindlaster_paa_bygninger (lest 29.01.2021).
- SINTEF Byggforsk. (2013). *Egenlaster for bygningsmaterialer, byggevarer og bygningsdeler* Byggforskserien 471.031. Tilgjengelig fra:

- https://www.byggforsk.no/dokument/215/egenlaster_for_bygningsmaterialer_byggevarer_og_bygningsdeler (lest 28.01.2021).
- SINTEF Byggforsk. (2017). *Trebeskyttelse - Overflatebehandling, trykkimpregnering og modifisering*. Byggforskserien 432.101. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/203/trebeskyttelse_overflatebehandling_trykkimpregnering_og_modifisering (lest 08.02.2021).
- Skaug, E. (2007). *Trevirkets oppbygning og egenskaper*. FOKUS på tre. Tilgjengelig fra: <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/40-Trevirkets-oppbygning-og-egenskaper.pdf> (lest 15.01.2021).
- Solli, K. H. & Glasø, G. (2011). *Trebaserte konstruksjonselementer*. FOKUS på tre. Tilgjengelig fra: <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/27-Trebaserte-konstruksjonselementer.pdf> (lest 01.02.2021).
- Song, X.-b., Wu, Y.-j. & Jiang, R. (2015). Compressive capacity of longitudinally cracked wood columns retrofitted by self-tapping screws. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 16 (12): 964-975. doi: <https://doi.org/10.1631/jzus.A1500069>.
- Standard Norge. (2003). *NS-EN 1991-1-3:2003+NA:2008 Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-3: Allmenne laster - Snølaster*.
- Standard Norge. (2004). *NS-EN 1995-1-1:2004/NA:2010/A1:2013 Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger*
- Standard Norge. (2005). *NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009 Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-4: Allmenne laster - Vindlaster*.
- Steiger, R., Serrano, E., Stepinac, M., Rajčić, V., O'Neill, C., McPolin, D. & Widmann, R. (2015). Strengthening of timber structures with glued-in rods. *Construction and Building Materials*, 97: 90-105. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.097>.
- Stellacci, S., Rato, V., Poletti, E., Vasconcelos, G. & Borsoi, G. (2018). Multi-criteria analysis of rehabilitation techniques for traditional timber frame walls in Pombalino buildings (Lisbon). *Journal of Building Engineering*, 16: 184-198. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.01.001>.
- Tascioglu, C., Goodell, B. & Lopez-Anido, R. (2003). Bond durability characterization of preservative treated wood and E-glass/phenolic composite interfaces. *Composites Science and Technology*, 63 (7): 979-991. doi: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00013-7](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00013-7).
- Tomasi, R., Crosatti, A. & Piazza, M. (2010). Theoretical and experimental analysis of timber-to-timber joints connected with inclined screws. *Construction and Building Materials*, 24 (9): 1560-1571. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.007>.
- Treteknisk. (2006). *Håndbok - bygge med massivtreelementer*. 1. utg., b. Hefte 1 - Generelt. Oslo: Strandberg og Nilsen Grafisk as.

- Tronstad, S. (2003). *Trefuktighet - tørking*. FOKUS på tre. Tilgjengelig fra: <http://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/fokus-pa-tre/Fokus-nr-38.pdf> (lest 25.01.2021).
- Voß, M. & Vallée, T. (2020). Accelerated curing of G-FRP rods glued into timber by means of inductive heating using Curie-particles – large-scale experiments at room temperature. *The Journal of Adhesion*: 1-29. doi: <https://doi.org/10.1080/00218464.2020.1803067>.
- Wallner-Novak, M., Koppelhuber, J. & Pock, K. (2014). *Cross-Laminated Timber Structural Design*. Immenstadt: proHolz Austria.
- Wang, Z., Li, H., Lorenzo, R., Corbi, I., Corbi, O. & Fang, C. (2020). Review on Bond Properties between Wood and Fiber Reinforced Polymer. *Journal of Renewable Materials*, 8 (8): 993-1018. doi: <https://doi.org/10.32604/jrm.2020.012488>.
- Wiik, M. R. K. (2020). *Norge bør satse på rehabilitering fremfor nybygg*. Tilgjengelig fra: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2020/norge-bor-satse-pa-rehabilitering-ramfor-nybygg/> (lest 18.01.2021).
- Zhou, A., Qin, R., Chow, C. L. & Lau, D. (2020). Bond integrity of aramid, basalt and carbon fiber reinforced polymer bonded wood composites at elevated temperature. *Composite Structures*, 245: 112342. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112342>.
- Zhou, L., Liu, Q., Ma, S. & Han, X. (2021). Eccentric compression behavior of long poplar columns externally reinforced by BFRP. *Journal of Wood Science*, 67 (1): 17. doi: <https://doi.org/10.1186/s10086-020-01934-8>.
- Øvrum, A. (2012). *Konstruksjonsvirke*. FOKUS på tre. Tilgjengelig fra: <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/43-Konstruksjonsvirke.pdf> (lest 27.01.2021).



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway