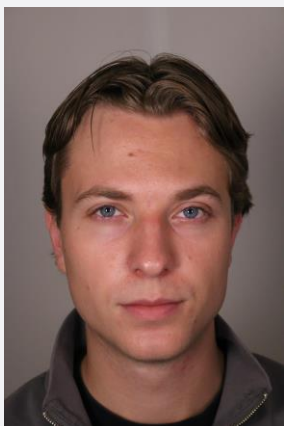


Design for demontering og ombruk av trekonstruksjoner



MATHIAS FREDRIKSEN



OSKAR FRANTZEN HOLTE

VEILEDER

Intern: Preben Aanensen

Ekstern: Kenneth Hatlestad (Backe)

Universitetet i Agder, 2025

Fakultet for teknologi og realfag

Institutt for ingeniørvitenskap

Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring

Den enkelte student er selv ansvarlig for å sette seg inn i hva som er lovlige hjelpemidler, retningslinjer for bruk av disse og regler om kildebruk. Erklæringen skal bevisstgjøre studentene på deres ansvar og hvilke konsekvenser fusk kan medføre. Manglende erklæring fritar ikke studentene fra sitt ansvar.

1.	Jeg/vi erklærer herved at min/vår besvarelse er mitt/vårt eget arbeid, og at jeg/vi ikke har brukt andre kilder eller har mottatt annen hjelp enn det som er nevnt i besvarelsen.	☒
2.	Jeg/vi erklærer videre at denne besvarelsen: - ikke har vært brukt til annen eksamen ved annen avdeling/universitet/høgskole innenlands eller utenlands. - ikke refererer til andres arbeid uten at det er oppgitt. - ikke refererer til eget tidligere arbeid uten at det er oppgitt. - har alle referansene oppgitt i litteraturlisten. - ikke er en kopi, duplikat eller avskrift av andres arbeid eller besvarelse.	☒
3.	Jeg/vi er kjent med at brudd på ovennevnte er å betrakte som fusk og kan medføre annullering av eksamen og utestengelse fra universiteter og høgskoler i Norge, jf. Universitets- og høgskoleloven §§4-7 og 4-8 og Forskrift om eksamen §§ 31.	☒
4.	Jeg/vi er kjent med at alle innleverte oppgaver kan bli plagiatkontrollert.	☒
5.	Jeg/vi er kjent med at Universitetet i Agder vil behandle alle saker hvor det forligger mistanke om fusk etter høgskolens retningslinjer for behandling av saker om fusk.	☒
6.	Jeg/vi har satt oss inn i regler og retningslinjer i bruk av kilder og referanser på biblioteket sine nettsider.	☒

Publiseringsavtale

Fullmakt til elektronisk publisering av oppgaven

Forfatter(ne) har opphavsrett til oppgaven. Det betyr blant annet enerett til å gjøre verket tilgjengelig for allmennheten (Åndsverkloven. §2).

Alle oppgaver som fyller kriteriene vil bli registrert og publisert i Brage Aura og på UiA sine nettsider med forfatter(ne)s godkjenning.

Oppgaver som er unntatt offentlighet eller taushetsbelagt/konfidensiell vil ikke bli publisert.

Jeg/vi gir herved Universitetet i Agder en vederlagsfri rett til å gjøre oppgaven tilgjengelig for elektronisk publisering:

☒ JA ☐ NEI

Er oppgaven båndlagt (konfidensiell)?

☐ JA ☒ NEI

(Båndleggingsavtale må fylles ut)

- Hvis ja:

Kan oppgaven publiseres når båndleggingsperioden er over?

☐ JA ☐ NEI

Er oppgaven unntatt offentlighet?

☐ JA ☒ NEI

(inneholder taushetsbelagt informasjon. Jfr. Offl. §13/Fvl. §13)

Forord

Masteroppgaven er utarbeidet ved Institutt for Ingeniørvitenskap som en del av masterprogrammet for Bygg ved Universitetet i Agder. Masteroppgaven er den avsluttende oppgaven i emnet BYG508 og ble utarbeidet i det fjerde og siste semesteret.

Vi ønsker å rette en stor takk til vår interne veileder ved Universitetet i Agder, Preben Aanensen, for verdifulle råd, tett oppfølging og engasjement gjennom hele arbeidet. En stor takk rettes også til vår eksterne veileder, Kenneth Hatlestad i Backe, for hans verdifulle og praktiske perspektiv, tilgjengelighet og omfattende faglige innsikt i bransjen. Deres bidrag har vært avgjørende for fremdriften og kvaliteten i oppgaven.

Målet med masteroppgaven er å utforske mulighetene til å implementere design for demontering og ombruk (DfDR) av massivtre- og limtrekonstruksjoner, i tillegg til potensielle bruksområder for økt bruk av de bærekraftige prinsippene ved DfDR.

Summary

This master's thesis addresses the environmental challenges of the construction industry, which is responsible for approximately 37 % of global energy- and process-related CO₂ emissions. The sector also consumes large quantities of non-renewable resources and generates a significant share of national waste. To meet sustainability goals and transition toward a circular economy, there is a growing need for solutions that enable reuse of materials and components in buildings.

The thesis investigates design for deconstruction and reuse (DfDR) in cross laminated timber (CLT) and glued laminated timber (glulam) bearing structures. This study is based on a case study of the Stabbursmoen school project, provided by general contractor Backe. With information from BN3 and Backe, this study provides the research question: How does the implementation of demountable connections affect cost, material usage, and future reuse of CLT and glulam structures compared to conventional design in school buildings?

The theoretical background includes timber properties, engineered wood systems, mechanical fasteners, relevant regulations and standards (TEK17, PBL and ISO 20887), and both traditional and sustainability-focused design criteria. The methodology involves analysis of the existing timber structure and its connection system, followed by a cost evaluation of both conventional and DfDR alternatives. A reuse value analysis is also conducted, assessing material loss due to non-reversible joints and estimating future reuse scenarios.

The results indicate that introducing demountable connections increases the structural cost compared to conventional design. Material usage remains unchanged due to applied assumptions. However, the adoption of demountable connections significantly enhances the potential for disassembly and reuse of timber components in future projects.

Innholdsfortegnelse

Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring.....	i
Publiseringsavtale.....	ii
Forord.....	iii
Summary	iv
Innholdsfortegnelse	v
Figurliste	ix
Tabelliste	x
1. Innledning	1
2. Kunnskapsbakgrunn	2
2.1. Tre som byggemateriale	2
2.2. Trevirkets egenskaper.....	3
2.3. Materialer og komponenter til bærende konstruksjoner.....	4
2.3.1. Konstruksjonsvirke.....	4
2.3.2. Limtre.....	4
2.3.3. Massivtre (KLT)	5
2.4. Byggesystemer i treverk.....	5
2.4.1. Bindingsverk	5
2.4.2. Limtresøyle og limtrebjelkesystem.....	6
2.4.3. Bæresystem av massivtre	6
2.4.4. Ikke-bærende bygningskomponenter	7
2.5. Treforbindelser	8
2.5.1. Treskruer.....	8
2.5.2. Bolter	9
2.5.3. Stavdybler	10
2.5.4. Beslag og hullplater	10
2.5.5. Spikerplater	11
2.5.6. Tømmerforbindere	11
2.6. Regelverk og standarder for bygg.....	12
2.6.1. Plan- og bygningsloven (PBL).....	12
2.6.2. Byggteknisk forskrift (TEK17).....	12
2.6.3. ISO 20887:2020.....	12
2.7. Bærekraft i byggebransjen: Tradisjonell og bærekraftige kriterier	13

2.8.	Design for demontering og ombruk (DfDR)	14
3.	Forskerspørsmål.....	16
3.1.	Bakgrunn og definering av problemstilling.....	16
3.2.	Hovedspørsmål:	16
3.2.1.	Underspørsmål:	16
3.3.	Avgrensning	16
3.4.	Deklarasjon	17
4.	Metode.....	18
4.1.	Forskningsdesign.....	18
4.2.	Datainnsamling	20
4.2.1.	Litteraturstudie.....	20
4.2.2.	Særegne arbeidsmøter	22
4.3.	Casestudie - Stabbursmoen skoleprosjekt.....	22
4.3.1.	Analyse av trekonstruksjonen	23
4.3.2.	Analyse av forbindelsessystemet	25
4.4.	Økonomisk analyse	29
4.4.1.	Nåværende konstruksjon	29
4.4.2.	Utselgelse og økonomisk analyse av DfDR-forbindelser	31
4.5.	Materialeffektivitetsanalyse	32
4.6.	Gjenbruksverdi analyse.....	33
4.7.	Intervju.....	38
5.	Resultat	40
5.1.	Resultater fra litteraturstudie	40
5.1.1.	Omtalelse av DfDR i TEK17	40
5.1.2.	Omtalelse av DfDR i PBL	40
5.1.3.	NS 3691-3:2025	41
5.1.4.	Norsk standard for ombruk under arbeid	41
5.1.5.	DfDR i ISO 20887.....	41
5.1.6.	Artikkel. Developing a grading tool for sustainable design of structural systems in buildings	43
5.1.7.	Rapport. Att mäta demonterbarhet och återbrukbarhet hos träbyggnader	44
5.1.8.	Masteroppgave. Detachable Connections for Circularity of Timber Buildings	47
5.1.9.	Resultat fra søk etter demonterbare forbindelser	48
5.2.	Resultater til casestudie.....	51

5.2.1.	Resultater for analysen av trekonstruksjonen	51
5.2.2.	Resultater for analyser av eksisterende forbindelsessystemet.....	51
5.2.3.	Resultat for økonomisk analyse av den originale trekonstruksjonen	54
5.2.4.	Resultater fra materialeffektivitetsanalysen	54
5.2.5.	Resultater fra gjenbruksver dianalysen.....	55
5.3.	Resultater fra implementeringen av DF.....	56
5.3.1.	Kostnadspåvirkningen	56
5.3.2.	Materialeffektivitets påvirkning av DF.....	57
5.3.3.	Ombruksverdiens påvirkning.....	57
5.4.	Resultater fra intervju	57
5.4.1.	Bakgrunnen for designvalg	57
5.4.2.	Kostnadsvurderinger	58
5.4.3.	Materialeffektivitet og ressursbruk.....	58
5.4.4.	Demonterbarhet av den valgte løsningen	59
5.4.5.	DfDR og fremtidige muligheter	59
5.5.	Diskusjon av eksisterende standarder og krav for DfDR.....	61
5.5.1.	Mangler i norske standarder og krav.....	61
5.6.	Diskusjon av eksisterende DF og utvalg til DfDR-løsningen.....	62
5.7.	Diskusjon til konstruksjonsanalysen og forbindelsessystemet.....	62
5.8.	Diskusjon til den økonomiske analysen ved implementeringen av DF.....	63
5.8.1.	Datagrunnlag, metode, forenklinger og begrensinger	63
5.8.2.	Kostnadssammenlikning mellom DF og tradisjonell løsning	64
5.8.3.	Kostnadssammenlikning mellom DF-løsningen, gjenbruksløsningen og tradisjonell riving	65
5.9.	Diskusjon til materialeffektiviteten ved implementeringen av DF	66
5.9.1.	Den nåværende konstruksjonen	66
5.9.2.	Implementeringen av DF for DfDR-løsningen.....	66
5.10.	Diskusjon til ombrukbarhet og gjenbruksverdi.....	67
5.10.1.	Beregningsgrunnlag for gjenbruksverdien og metodiske forenklinger.....	67
5.10.2.	Forutsetninger for full ombruk i DfDR-løsningen.....	68
5.10.3.	Vurdering av DfDR-løsningen opp mot ISO 20887	68
5.10.4.	Sammenlikning av gjenbruks- og ombruksverdi i praksis	68
5.10.5.	Praktiske utfordringer og bærekraftige implikasjoner.....	69
6.	Konklusjon.....	71

7.	Anbefalinger	73
8.	Referanser	74
	Vedlegg	79

Figurliste

Figur 2.1 - Produksjonsprosessen til konstruksjonstre-produkter [10].....	2
Figur 2.2 - Illustrasjon av oppbygningen til trestamme [9]	3
Figur 2.3 - Illustrasjon av limtre og konstruksjonsvirke [15]	4
Figur 2.4 - Oppbygging av krysslågt, limt massivtrelement [19]	5
Figur 2.5 - Ulike komponenter i yttervegger med bindingsverk av tre [20]	6
Figur 2.6 - Bygg med KLT-elementer i kombinasjon med limtresøyle og -bjelkesystem [22]	7
Figur 2.7 - Ulike mekaniske forbindelser [23]	8
Figur 2.8 – (a) Treskrue produsert ved valsing, (b) Sekskant-treskrue [23]	9
Figur 2.9 – Bolt [23]	9
Figur 2.10 - Stavdybel [23].....	10
Figur 2.11 - Eksempler på vanlige bygningsbeslag [23].....	10
Figur 2.12 - Spikerplate [23]	11
Figur 2.13 - Ringforbindere (a), Plateforbindere (b) og Tannede tømmerforbindere (c) [23]	11
Figur 2.14 - Bærekraftig utvikling sine tre dimensjoner [31]	13
Figur 4.1 - Flytskjema forskningsdesign	19
Figur 4.2 - Vurderingsprosess for artikler.....	21
Figur 4.3 - Stabbursmoen skole [41]	23
Figur 4.4 - Illustrasjon av massivtre- og limtrekonstruksjonen hentet fra Tot.BIM-modellen.....	24
Figur 4.5 - Inndelingen av bygget	27
Figur 4.6 - Opptelling av knutepunkter i massivtredekker (a) og -vegger (b)	28
Figur 4.7 - Opptelling av knutepunkter i limtrekonstruksjonen	28
Figur 4.8 - Utklipp av skrudde løsninger til: (a) dekkeskjøt, (b) veggskjøt og (c) dekke-vegg-skjøt [42].....	29
Figur 4.9 – Utsnitt av rammeverk fra Prod.Lim: tre-etasje (a); to-etasje (b); ett-etasje (c); Gymsal (d)	34
Figur 4.10 - Bjelke-søyle forbindelse (a); Søyle-søyle forbindelse (b)	35
Figur 4.11 - Fire kategorier for skrueforbindelser i bjelke på/mot søyle	35
Figur 4.12 - Kuttelengde for dekke-dekke og vegg-vegg (utklipp fra Woodcon prosjekteringsmanual)	36
Figur 4.13 – Nummererte kategorier for dekke-vegg (utklipp fra Woodcon prosjekteringsmanual (1. kategori) og Backe BIM-modeller (2.-6. kategori)).....	37
Figur 5.1 - Illustrasjon av et resultat fra DfD/A-vurderingen [49]	44

Tabelliste

Tabell 2.1 - Tradisjonelle og bærekraftige kriterier [28]	13
Tabell 4.1 - Inklusjons- og eksklusjonskriterier	20
Tabell 4.2 – Gjennomsnittlige bransjepriser for elementer i trekonstruksjoner [43]	30
Tabell 5.1 - ISO 20887 sine DfD/A-prinsipper med forklaring [4].....	42
Tabell 5.2 - Konkrete eksempler til anvendelse av ISO 20887-prinsippene [50]	45
Tabell 5.3 - Demonterbarhet og gjenbrukspotensial av ulike forbindelser [51]	47
Tabell 5.4 - DF fra Rothoblaas med kort beskrivelse	49
Tabell 5.5 – Antall og volum for massivtre- og limtreelementer	51
Tabell 5.6 - Gjennomsnittlige dimensjoner for massivtre- og limtreelementer	51
Tabell 5.7 - Eksisterende tre-mot-tre forbindelsene i trekonstruksjonen	52
Tabell 5.8 - Kostnadsberegninger til hele den originale trekonstruksjonen	54
Tabell 5.9 –Kostnadsfordeling for forbindelsestypene i knutepunkter	54
Tabell 5.10 - Resultater fra materialeffektivitetsanalysen av nåværende konstruksjon	55
Tabell 5.11 – Gjenbruksverdi for nåværende konstruksjon	55
Tabell 5.12 - Kostnadsbevaringen ved gjenbruk av massivtre og limtre.....	55
Tabell 5.13 – Prosentvis nedgang i totalkostnaden ved forkastet materiale.....	55
Tabell 5.14 –Utvalgte DF med antall og totalkostnaden	56
Tabell 5.15 – Kostnadssammenligning mellom originale og demonterbare forbindelser	56
Tabell 5.16 –Totalkostnad med og uten demonterbare forbindelser.....	56
Tabell 5.17 - Gjennomsnittprisene til tre-mot-tre (TT) innlåste plater og demonterbare forbindelser	57

1. Innledning

Den globale byggesektoren er kjent for å produsere betydelige mengder utslipp, og står ansvarlig for rundt 37 % av verdens energi- og prosessrelaterte CO₂-utslipp [1]. Bransjen forbruker mengder ikke-fornybare ressurser som sand, stein og mineraler. I tillegg produserer bygge- og anleggssektoren (BA) mye byggeavfall, hvor tall fra Statistisk sentralbyrå (SSB) viser at det har vært en økende trend i avfallsproduksjon til sektoren de siste 12 årene [2]. De nyeste tallene fra SSB viser at BA produserte 24%, nesten en fjerdedel, av Norges totale avfallsmengde i 2023. Denne utviklingen står i sterk kontrast til målene i Parisavtalen for begrensning av klimaendringer, som krever at den globale byggesektoren gjennomgår en omfattende avkarbonisering innen midten av det 21. århundret [3].

For å kunne møte utfordringene knyttet til bransjen og forberede dens bærekraft, er det avgjørende med et skifte til bruk av bærekraftige materialer og prinsipper for sirkulær økonomi (SØ). Dette innebærer blant annet å tilrettelegge for økt bruk av sekundære materialer og ressurser, som ikke er nylig produsert eller utvinnet, i bygninger og infrastruktur [4]. Bruken av sekundære materialer og ressurser bør i større grad kunne gjenbrukes, slik at ressursforbruket og utslippene reduseres.

Design for demontering og ombruk (Design for Deconstruction and Reuse (DfDR)) er i denne sammenhengen et viktig prinsipp som innebærer å utforme bygninger slik at materialer kan demonteres uten skade og ombrukes i nye prosjekter [4]. I kontrast til tradisjonell riving, som ofte resulterer i betydelig materialtap, muliggjør DfDR en mer sirkulær tilnærming til materialforvaltningen. Implementeringen av prinsippet kan begrense avfallsmengder, redusere behovet for uttak av nye ressurser, samt kutte klimagassutslipp over tid. I tillegg kan designet skape økonomiske fordeler gjennom å redusere kostnader for demontering og materialombruk, samtidig kan muligheten for bygningens fleksibilitet og levetid øke.

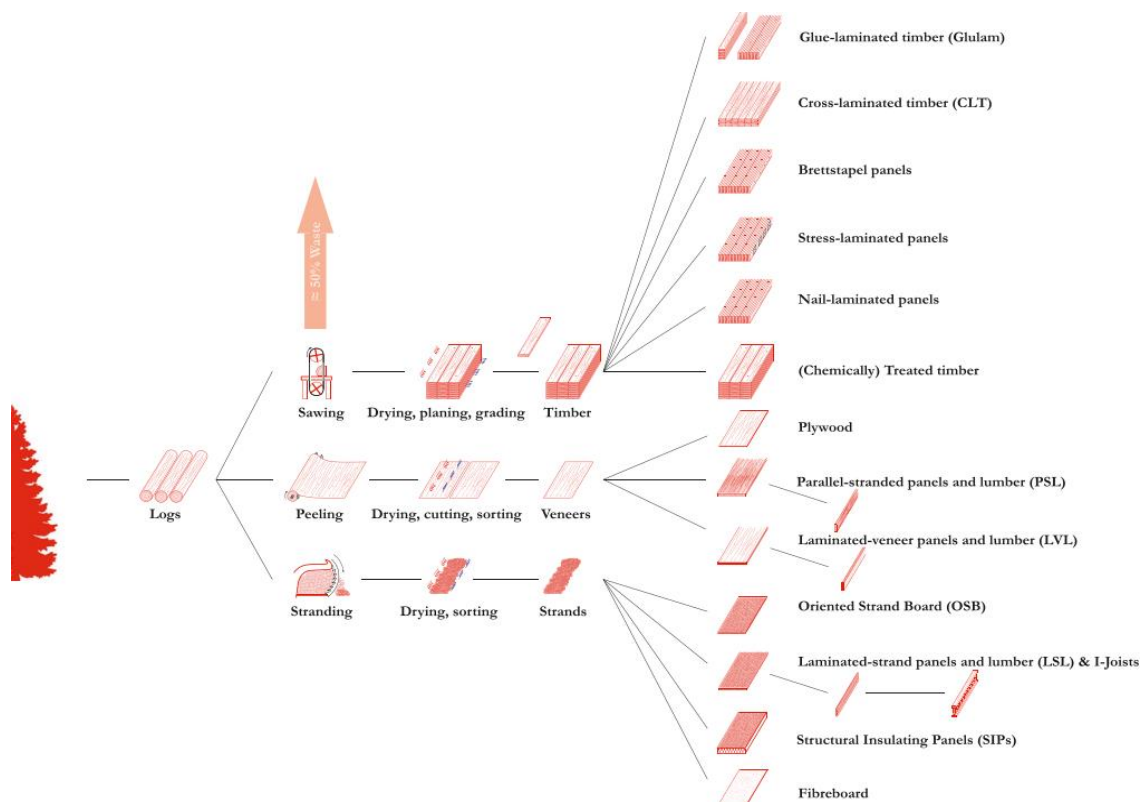
Selv om potensiale til DfDR er stort, og at det i tillegg kan implementeres i både nåværende og fremtidige bygg [5], viser studier at under 1% av eksisterende bygninger kan fult demonteres [6]. For å styrke byggesektoren, er det derfor nødvendig med ytterligere forskning på implementeringen av designstrategien i nåværende og nye bygg, for å tilrettelegge for økt bruk.

2. Kunnskapsbakgrunn

2.1. Tre som byggemateriale

Historisk sett har tre vært det viktigste byggematerialet i Norge [7, p. 87]. Skogen dekker omtrent 37 % av Norges landareal, og materialet utmerker seg med lett tilgjengelighet, enkel produksjon og flere gunstige materialegenskaper [8]. I tillegg er tre en fornybar naturressurs med lav miljøpåvirkning, forutsatt at tømmeret kommer fra bærekraftig forvaltet skog. I Norge er nesten 100% av skogarealet miljøsertifisert etter verdens største skogssertifiseringssystem PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification) og FSC (Forest Stewardship Council) [8]. Norges Skogeierforbund (NSF) sier at landets skogvolum har nesten tredoblet seg sammenlignet med nivået på 1920-tallet, og anslår at det årlige tømmeruttaket kan økes med ytterligere 15 %, uten å overskride bærekraftige rammer.

Sagtømmer har et bredt anvendelsesområde og utnyttes på ulike måter i byggenæringen, som illustrert i Figur 2.1. Sagtømmer produseres ved å sage tømmer langs fiberretningen [9, p. 100]. Produksjonsprosessen starter med bearbeidelse på sagbruk, hvor tømmer fra skogen renses, sages og sorteres [10, p. 11]. Ifølge Ramage et al. blir en stor andel av volumet til sagtømmer bearbeides til trelast, som er en fellesbetegnelse for utskårde materialer, som planker og bord. Videre beskriver Ramage et al. at den resterende andelen blir enten skrelt eller flishugget til spon, sagflis og fiberprodukter, og benyttes vanligvis som biomasse eller inngår i produksjon av andre trebaserte plateprodukter. For å sikre kvalitet til bærende konstruksjoner, klassifiseres trelast etter mekaniske egenskaper og dimensjoner i henhold til standarden NS-INSTA 142 [11]. Trelast kan også brukes videre som råmaterialet i produksjon av konstruksjonsvirke.

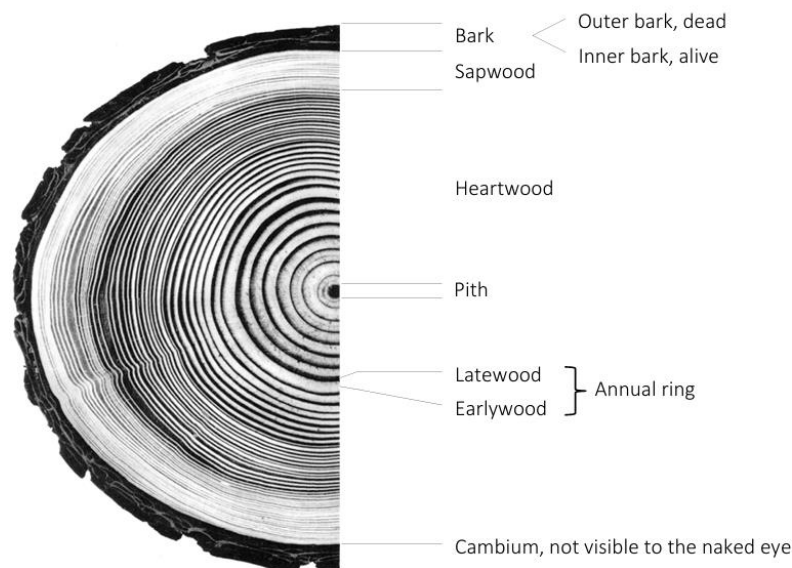


Figur 2.1 - Produksjonsprosessen til konstruksjonstre-produkter [10]

2.2. Trevirkets egenskaper

Trehus håndboka fra SINTEF Bygg, som gir anbefalinger og retningslinjer for norsk trehusbygging, påpeker at trevirke har mange fordelaktige egenskaper som gjør det til et effektivt og attraktivt byggemateriale. Trevirke kombinerer blant annet høy styrke i forhold til egenvekt, gode bearbeidsegenskaper, lav termisk ledningsevne og har en naturlig og estetisk overflate [7, p. 87]. Det beskrives at den norske byggenæringen benytter særlig gran, furu, og løvtrevirke til husbygging. Gran, som er lettere og har flere, men mindre kvister enn de to overnevnte, er dominerende til konstruksjonsformål i Norge.

Oppbyggelsen til trestammen, vist i Figur 2.2, er bygd opp av en lagvis fiberstruktur, som gjør materialet til et anisotropisk materiale hvor styrkeegenskapene avhenger belastningsretningen i forhold til fiberne [9, p. 161]. Trehus håndbok beskriver at en stor fiberhelning i forhold til lengderetningen vil sterkt redusere styrken, og er den primære grunnen til svekkelser i trevirket. Det punkteres en klar sammenheng mellom densitet og styrke, hvor fuktinnhold opp til 30%, sveller treet som følge av vannopptak, noe som gir en volumøkning og reduserer styrken. Derfor tørkes ofte trevirke for å redusere vannmengden i celleveggene, slik at materialet blir «tettere» og sterkere. I tillegg avhenger kvaliteten på trevirket i stor grad fiberforløpet, der rettvekst virke har høyest styrke og stivhet. Avvik som kvist, skråfiber eller bøyd fiberstrukturen vil svekke de mekaniske egenskapene [7, pp. 87-90]. Treets stivhet uttrykkes gjennom elastisitetsmodulen (MOE – Modulus of Elasticity), som angir materialets motstand mot deformasjon under belastning [9, p. 91]. En høy MOE vil indikere et stivt materiale, som ofte er fordelaktig for dimensjonering av bærende elementer.



Figur 2.2 - Illustrasjon av oppbygningen til trestamme [9]

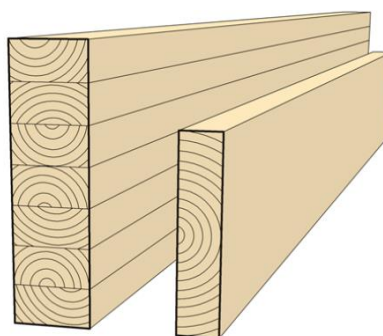
2.3. Materialer og komponenter til bærende konstruksjoner

2.3.1. Konstruksjonsvirke

Konstruksjonsvirke er styrkesortert trelast som brukes i bærende bygningsdeler som stendere, bjelker, taksperrer og takstoler (se Figur 2.3) [7, p. 96]. Edvardsen og Ramstad forteller at det også anvendes som et råmateriale i produksjon av massivtre- og limtreelementer, og kan også benyttes til ikke-bærende skillevegger, spikerslag, sviller, påføringer og lignende. På det norske markedet er fasthetsklassene C14, C18, C24 og C30 de mest brukte, hvor tallet angir den karakteristiske bøyefastheten i N/mm^2 . For å sikre kvalitet og standardisering skal konstruksjonsvirke være CE-merket i henhold til NS-EN 14081 og styrkesortert i samsvar med NS-EN 338. I Norge utføres sortering av kontrollorganet Treteknisk, enten visuelt eller maskinelt. Visuell sortering ser på kvister, fiberretning, sprekker og andre virkefeil. Maskinell sortering benytter avanserte maskiner som måler stivheten gjennom lydbølger eller bøyning [12]. Konstruksjonsvirke finnes i ulike dimensjoner og tilpasses kravene fra SINTEF Byggforsk, basert på NS-EN 1991-1-1 og NS-EN 1995-1-1 [12]. Etter direkte framstilling av rundvirke, som ubehandlet skurlast, justeres og utleveres det vanligvis med standarddimensjoner tilpasset overnevnte retningslinjer [7, p. 96].

2.3.2. Limtre

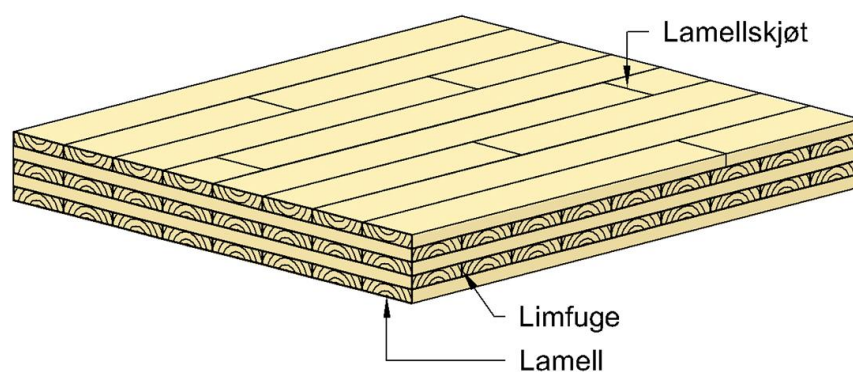
Limtreelementer produseres ved å lime sammen lameller med hovedsakelig parallell fiberretning, illustrert i Figur 2.3. Lamellene er vanligvis laget av gran eller furu, og styrkesorteres i henhold til NS-EN 14081 for konstruksjonsvirke [7, p. 97]. Ifølge Edvardsen og Ramstad innebærer produksjonsprosessen at lamellene først limes sammen og deretter herdes under trykk. Et standard limtreelement består normalt av minst fire lameller, hver med en tykkelse på omtrent 45 mm eller mindre. Det finnes to hovedtyper tverrsnitt: kombinert limtre og homogent limtre [13]. Det forklares at kombinert limtre benytter lameller med høyere fasthetskklasse i yttersonene, mens midtsonen består av lameller med lavere fasthet. Kombinert limtre kan oppnå høy fasthet uten at forbruket av lameller blir større enn nødvendig. I homogent limtre benyttes alle lameller med samme kvalitet gjennom tverrsnittet [14]. Edvardsen og Ramstad forteller at de mest aktuelle tverrsnittene for trehus er rette, rektangulære bjelke- og søyletverrsnitt, men limtre kan også produseres i flere ulike former. Rektangulære limtreprofiler leveres i ulike standarddimensjoner, med tykkelser på 90, 115 og 140 mm, og høyder fra 90 mm til omtrent 600 mm. Sammenlignet med konstruksjonsvirke, kan limtre ha større dimensjoner og høyere fasthet, da virkefeil i de enkelte lamellene fordeles jevnere og reduserer innvirkning på det samlede tverrsnittet [7, p. 97].



Figur 2.3 - Illustrasjon av limtre og konstruksjonsvirke [15]

2.3.3. Massivtre (KLT)

Massivtre er et fabrikkert element bestående av heltrebjelker/lameller som settes sammen til bygningselementer ved hjelp av spiker, skruer, tredybler, lim eller stålstag [16]. Det finnes to typer massivtre: krysslagte elementer (KLT) og kantstilte elementer. I denne oppgaven omtales KLT, vist Figur 2.4, som massivtre, ettersom denne typen er vanligst brukt i bygninger [7, p. 99], og brukt i casestudiet. Massivtre brukes blant annet til etasjeskillere, vegger, tak og balkonger. Elementtykkelse og antall sjikt tilpasses funksjon og bruksområde, hvor tykkelsen varierer fra 60 mm til 240 mm, og antall sjikt kan variere mellom 3 og 9 [16]. Produksjonen av massivtre skjer ved å legge sjiktene 90 eller 45 grader i forhold til hverandre, og forbindes sammen med enten lim eller tredybler [16]. Lamellene er vanligvis laget av styrkesortert konstruksjonsvirke av gran og består av minst tre lag, med en tykkelse på mellom 10 mm og 50 mm [7, p. 99]. Enkelte produsenter, som Splitkon [17] og Midt-Norsk Massivtre [18], har elementbredder fra 1.2 til 3.5 meter, og lengder opptil 16 meter, men størrelsene begrenses i stor grad av transportmulighetene.

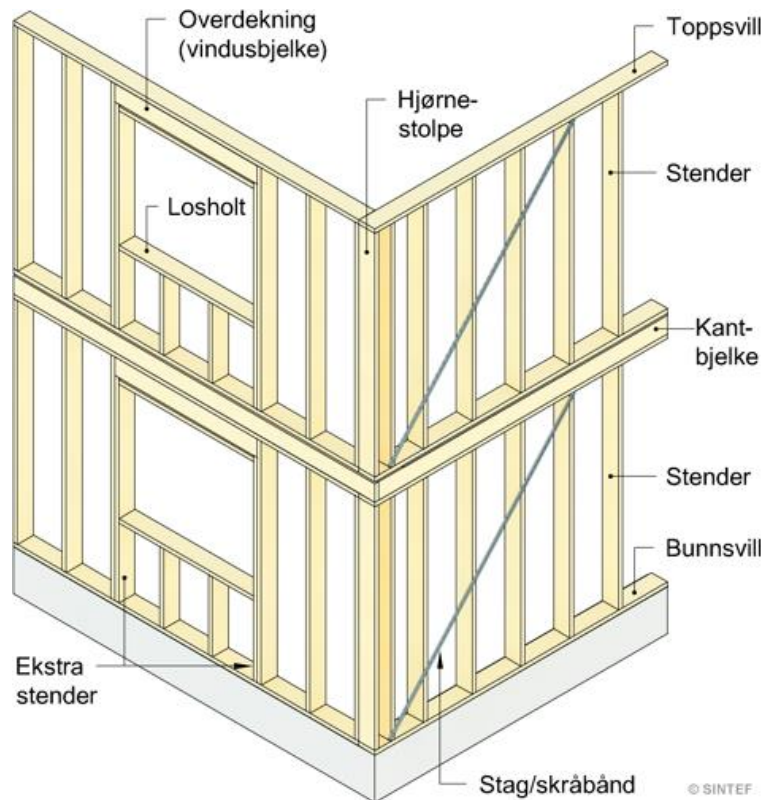


Figur 2.4 - Oppbygging av krysslagt, limt massivtreelement [19]

2.4. Byggesystemer i treverk

2.4.1. Bindingsverk

Det vanligste konstruksjonssystemet for vegger i norske trehus, er et bæresystem basert på bindingsverk, se Figur 2.5 [7, p. 177]. Konstruksjonen består av vertikale stendere, vanligvis plassert med en senteravstand på 600 mm, og sammenføydd med topp- og bunnsviller. Edvardsen og Ramstad påpeker at den plassbygde teknikken har vært en dominerende byggemetode i flere tiår og sikrer en effektiv og stabil bærekonstruksjon for boliger og andre bygninger. Bindingsverket forsterkes spesielt rundt utsparinger for dører og vinduer for å opprettholde byggets strukturelle integritet. Ekstra bærende elementer, som losholter og skråavstivninger, benyttes ofte for å redusere deformasjoner og sikre tilstrekkelig styrke. Det forklarer videre at bindingsverk til yttervegger supplementeres med påføring til ekstra isolasjon, utlektinger for kledning, og plater eller skråbånd for horisontal avstivning [7, p. 177].



Figur 2.5 - Ulike komponenter i yttervegger med bindingsverk av tre [20]

2.4.2. Limtresøyle og limtrebjelkesystem

I bygninger over 3 etasjer, er det vanlig at laster blir for store for vanlig bindingssystem, hvor et alternativ er veggkonstruksjoner med et hovedbæresystem av større limtresøyler og limtrebjelker [7, p. 178]. Det påpekes at bruken av limtre gir betydelig høyere bæreevne og bedre brannmotstand enn vanlig bindingsverk, noe som gjør det egnet for større bygg med økte lastkrav. Denne konstruksjonsmetoden gir større fleksibilitet i utformingen av bygget og muliggjør lengre spennvidder uten behov for mange interne støttekonstruksjoner. For å opprettholde energieffektivitet og funksjonalitet fylles veggene mellom limtresøylene med ikke-bærende bindingsverk. Etterfyllingen kan tilpasses for å gi nødvendig varmeisolasjon, lydisolasjon og lufttetthet. Dette systemet kombinerer fordelene ved limtreets strukturelle egenskaper med bindingsverkets fleksibilitet og gjør det mulig å oppnå en balansert løsning mellom bæreevne, brannmotstand og energieffektivitet [7, p. 178].

2.4.3. Bæresystem av massivtre

Massivtre er et alternativ til tradisjonelt bindingsverk og brukes ofte i veggelementer, spesielt i større bygninger med flere etasjer [7, p. 178]. Årsaken forklares til å være massivtreets høye bæreevne, stivhet og gode brannmotstand, noe som gjør det mer egnet enn bindingsverk i konstruksjoner med høyere belastning. For at massivtre skal kunne benyttes i yttervegger, kreves det imidlertid tilleggsløsninger for å oppnå nødvendig isolasjonsverdi og værbestandighet. Ytterveggselementene må derfor suppleres med ekstra varmeisolasjon og en egnet kledning, som beskytter mot vær og vind, samtidig som den ivaretar energieffektiviteten i bygget [7, p. 178].

Massivtre, ifølge Edvardsen og Ramstad, kan i tillegg benyttes som en integrert del av etasjeskillere og takkonstruksjoner, noe som gir en helhetlig og robust konstruksjonsløsning (se Figur 2.6). I etasjeskillere er det vanligvis stivhetskriteriet som er dimensjonerende for spennvidden, ettersom det er viktig å unngå sjenerende vibrasjoner og rystelser [21]. Massivtreelementene brukes ofte med undersiden eksponert som himling, mens et oppforet gulv legges på oversiden [7, p. 223]. Rommet mellom massivtreelementene og undergulvet gir plass til rør- og kanalføringer, samt eventuell ekstra varmeisolasjon.



Figur 2.6 - Bygg med KLT-elementer i kombinasjon med limtresøyle og -bjelkesystem [22]

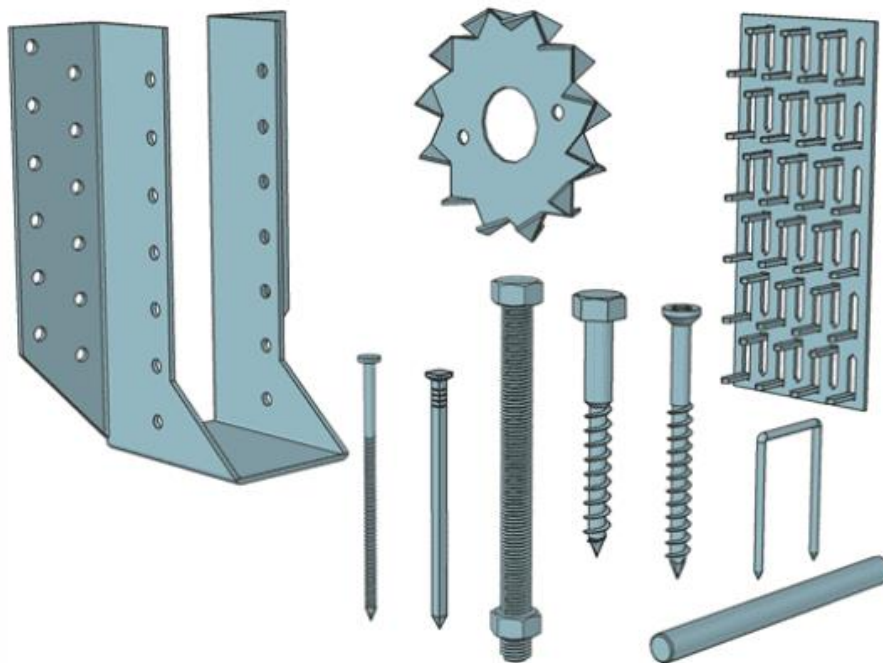
2.4.4. Ikke-bærende bygningskomponenter

I konstruksjoner som bindingsverk og etasjeskillere inngår flere ikke-bærende komponenter, som blant annet isolasjon, damp- og vindsperre, veggpaneler, gulvbord, samt tekniske føringssystemer som ventilasjonskanaler, vann- og avløpsrør [7]. Dører og vinduer regnes også som en del av bindingsverket og bidrar til byggets funksjon uten å være bærende elementer. Overflatebehandling påføres ofte på utvendige veggpaneler for å forbedre materialenes motstandsdyktighet mot klimabelastninger som nedbør, vind og sol [7, pp. 361-362]. Tilsvarende benyttes også overflatebehandling på innvendige paneler og gulv, både for estetisk uttrykk og for å beskytte materialene mot slitasje og smuss [7, p. 366].

2.5. Treforbindelser

Treforbindelser har, ifølge Byggforsk, til hensikt å overføre krefter mellom elementer og sikre at konstruksjonen tåler de belastningene den utsettes for [23]. Det finnes flere ulike typer, som tresammenføyninger, mekaniske forbindelser og limte forbindelser. Relevante forbindelser til problemstillingen, nærmere bestemt *mekaniske treforbindelser*, beskrives i etterkommende underkapitler.

Mekaniske forbindelsesmidler brukes for å forbinde trekomponenter, platematerialer, stålplater eller beslag til trevirke [7, p. 145], se Figur 2.7. Hvilken type forbindelse som benyttes, avhenger av flere faktorer til konstruksjonens lastforhold og behov. De mest brukte mekaniske forbindelsene inkluderer blant annet spiker, bolter, treskruer, stavdybler og beslag og hullplater. I moderne trekonstruksjoner benyttes også spesialiserte festemidler, som spikerplater og tømmerforbindere, for å forbedre sammenføyningens styrke og effektivisere byggeprosessen [23].

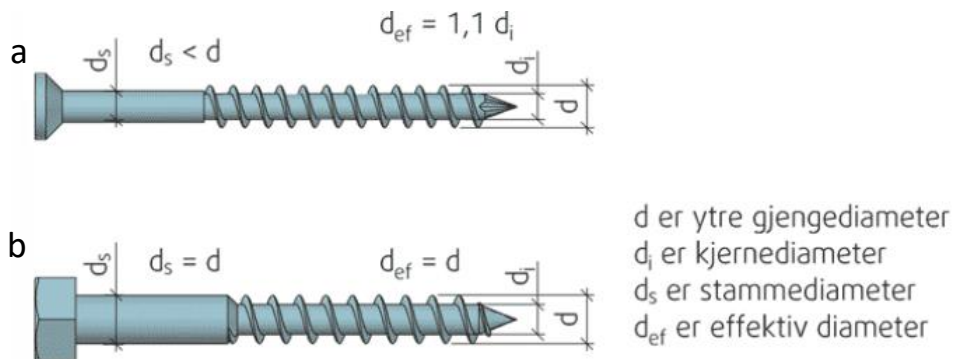


Figur 2.7 - Ulike mekaniske forbindelser [23]

2.5.1. Treskruer

Treskruer har i løpet av de siste årene fått en stadig økende anvendelse i trekonstruksjoner, på grunn av sin enkle innskruing med batteridriller og utvikling av nye skruetyper [23]. I motsetning til spiker, som kan bevege seg ut av treverket ved krymping, sikrer skruer en mer stabil og varig forbindelse [7, p. 146]. Forskjellen forklares til å være at utforming til treskruer (se Figur 2.8) gir bedre klemming og feste mellom materialene. Byggforsk skiller mellom to hovedtyper skruer; sekskant-treskruer og valsede treskruer. Tradisjonelle sekskant-treskruer produseres ved at den gjengede delen freses ut fra en glatt stamme, og brukes primært til tre-mot-tre-forbindelser og montering av stållasker på limtre. Treskruer produsert ved valsing, benyttes til feste av tre mot tre, plantematerialer mot tre, og

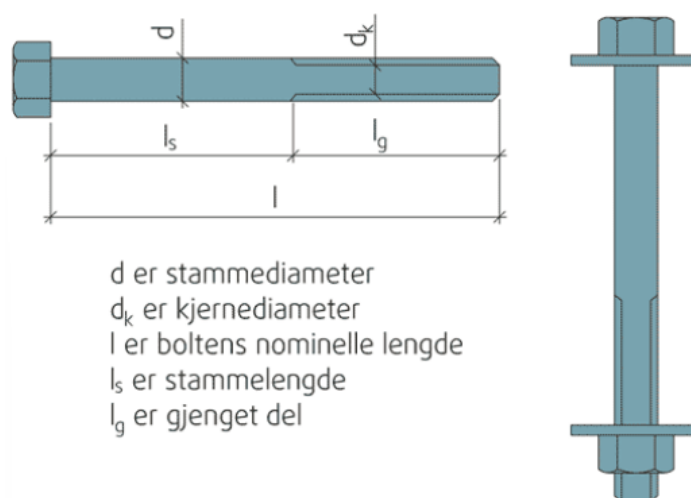
stålbeslag mot tre [23]. Alle typer treskruer skal CE-merkes etter NS-EN 14592, for å sikre krav til helse, sikkerhet og miljø [7, p. 146].



Figur 2.8 – (a) Treskrue produsert ved valsing, (b) Sekskant-treskrue [23]

2.5.2. Bolter

Bolter brukes primært i tre-mot-tre-forbindelser og stål-mot-tre-forbindelser [23]. Forbindelsestypen kjennetegnes ved å ha en jevn og sirkulær utforming med en gjenget ytterdel, vist i **Feil! Fant ikke referanseilden..** Bolter festes ved hjelp av muttere i enden, der det anvendes underlagsskiver mellom treverket og bolthodet for å fordele belastningen jevnere mot festematerialet [7, p. 147]. I følge Byggforsk kan bolteforbindelser brukes alene eller i kombinasjon med andre festemidler, som tømmerforbindere og stavdybler [23]. Det finnes også spesialbolter utviklet for forankring i mur og betong, som gir robuste sammenføyninger mellom ulike materialer, og brukes i kombinasjon med kjemiske eller mekaniske forankringssystemer [7, p. 147]. Bolter må forbores med en maks hulldiameter på 1 mm større en boltens stammediameter, hvor det vanligvis benyttes bolter med stål kvalitet 8.8 i henhold til NS-EN ISO 4014 og mutter i henhold til NS-EN ISO 4034 [23].



Figur 2.9 – Bolt [23]

2.5.3. Stavdybler

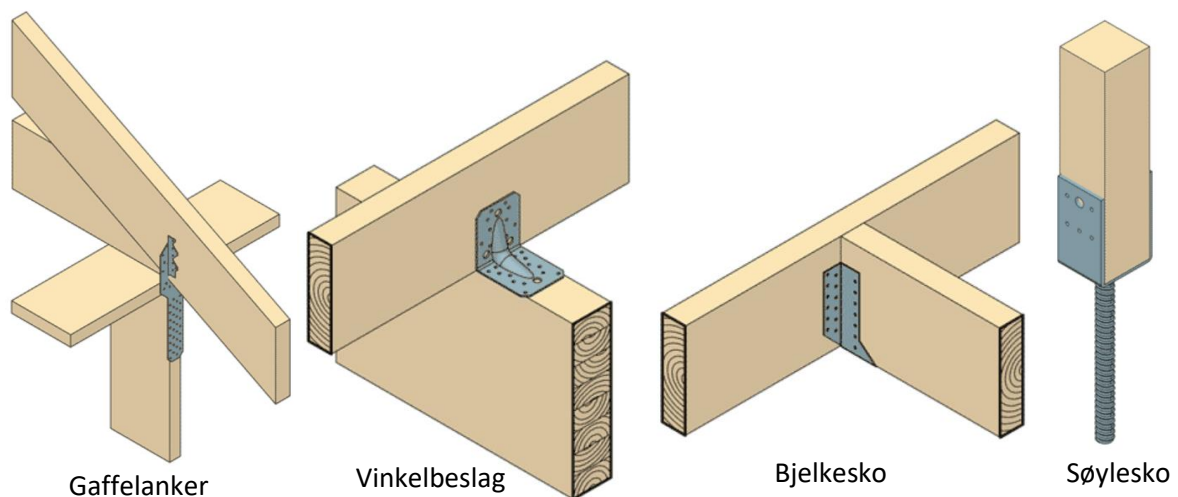
Stavdybler har en utforming bygd opp av en glatt sylindrisk stålstav med avfasede ender, vist i Figur 2.10. Stavdybler monteres ved å slå inn i forborede hull i trevirket [23]. Byggforsk forklarer at de forborede hullene skal passe eksakt dybeldiameteren, eller være litt mindre. Ved bruk i treverk med innslissede stålpater, får forbindelsen en nesten usynlig forbindelse med gode branntekniske egenskaper. Forbindelsen likner bolter sin virkemåte, der krefter overføres ved tverrbelastninger, men tar har ingen aksialkrefter og klemvirkning [23].



Figur 2.10 - Stavdybel [23]

2.5.4. Beslag og hullplater

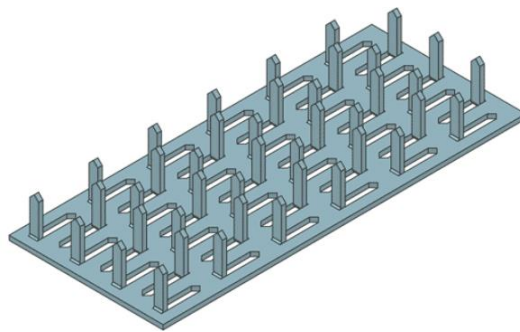
Det tilbys en rekke beslag og hullplater til sammenføring og forankring av trekonstruksjoner [7, p. 148]. Bygningsbeslag har fått stor utbredelse på grunn av enkel produksjonsprosess, samt enkel og sikker montering [23]. Byggforsk forklarer at forbindelsene vanligvis produseres av 1,5-4,0 mm stålpater og leveres enten som plane elementer med hull for innfestning, eller formet til ulike geometrier som vinkelbeslag, bjelkesko og gaffelankre, se Figur 2.11. Innfestning skjer vanligvis med spesialspiker eller -skruer, men også bolter og treskruer kan benyttes. Enkelte beslag og festemidler finnes i rustfri utførelse for bruk i mer krevende miljøer [23]. Byggforsk påpeker at kapasiteten til beslag og hullplater skal være dokumentert, hvor regler for spiker og skruer i stål mot-tre-forbindelser også gjelder for beslag.



Figur 2.11 - Eksempler på vanlige bygningsbeslag [23]

2.5.5. Spikerplater

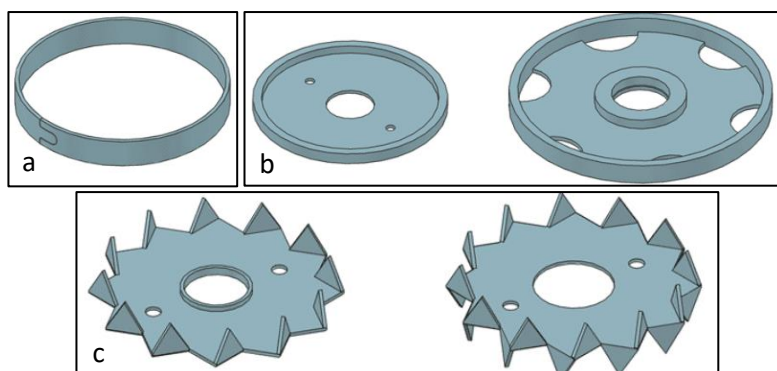
Spikerplater produseres ved at tenner, eller «spiker», stanses ut fra en stålplate, slik at de står vinkelrett på stålplatens overflate, som vist i Figur 2.12 [23]. Byggforsk forklarer at spikerplater benyttes til sammenføring av prefabrikkerte stoler, gitterbjelker og liknede konstruksjoner. Det fins ulike typer spikerplater med forskjellige mønstre og fasonger. Vanligvis er spikerplatene laget av varmforsinkede eller elektrolytisk forsinkede stålplater, med en tykkelse på 1,0-1,5 mm [7, p. 148]. Videre beskriver Edvardsen og Ramstad at spikerplatene presses inn i treverket ved hjelp av hydrauliske presser eller rullepresser, en prosess som krever betydelig kraft. Denne innpressingen utføres vanligvis i egne fabrikker. Spikerplatene skal CE-merkes i henhold til NS-EN 14545 [23].



Figur 2.12 - Spikerplate [23]

2.5.6. Tømmerforbindere

Tømmerforbindere kan, ifølge Byggforsk [23], deles inn i fire hovedgrupper: ringforbindere, plateforbindere, tannede forbindere og andre typer (se **Feil! Fant ikke referansekilden.**). Ringforbindere er tosidige komponenter utformet som ringer, og de monteres i sirkulære spor som freses ut i treverket med spesialverktøy. Plateforbindere beskrives som ensidige og sirkulære forbindere med en flens langs omkretsen på den ene siden. De har et senterhull som er tilpasset en bolt. Både ring- og plateforbindere kalles for innfresingsdybler, ettersom de krever tilpasset utfresinger for riktig innfesting [23]. En tredje kategori, kalt tannede tømmerforbindere, er enten ensidige eller tosidige. Den stanses ut fra en plate med tenner langs kantene, og presses inn i treverket ved hjelp av hydraulisk utstyr [7, p. 147].



Figur 2.13 - Ringforbindere (a), Plateforbindere (b) og Tannede tømmerforbindere (c) [23]

2.6. Regelverk og standarder for bygg

I Norge reguleres planlegging, prosjektering og oppføring av byggverk gjennom et sett av lover, forskrifter og standarder. Dette kapitlet gir en kort oversikt over de mest relevante dokumentene for oppgavens tematikk. Den konkrete betydningen disse har for gjenbruk, ombruk og/eller demontering av byggkomponenter vurderes nærmere i resultatdelen.

2.6.1. Plan- og bygningsloven (PBL)

PBL er det overordnede lovverket for arealplanlegging og byggesaksbehandling i Norge. Loven har som formål å fremme bærekraftig utvikling til beste for den enkelte, samfunnet og framtidige generasjoner [24]. Planlegging gir grunnlag for bruk og vern av ressurser, og bidrar til å samordne statlige, regionale og kommunale oppgaver. Byggesaksbehandlingen sikrer at tiltak gjøres forsvarlig i samsvar med lov, forskrift og planvedtak. Loven fungerer blant annet som det rettslige grunnlaget for TEK17 [25].

2.6.2. Byggteknisk forskrift (TEK17)

Byggteknisk forskrift av 2017, også kalt TEK17, gir føringer for tekniske krav som må oppfylles for å kunne oppføre byggverk lovlig i Norge [26]. Veiledningen utdyper krav og presenterer preaksepterte ytelser, som beskriver forslag til løsninger som anses å oppfylle forskriftens minimumsstandards. I mange tilfeller krever byggeprosjekter godkjenning fra PBL, hvor det må henvises til at bygget følger regler som fremgår i TEK17, som søknaden vurderes etter [27]. Mange av kravene er formulert som funksjonskrav, der noen også er presisert som konkrete ytelseskrav, enten direkte i forskriften eller gjennom veiledningen. Formålet med TEK17 er å sikre at tiltak planlegges, prosjekteres og utføres på en måte som ivaretar visuell kvalitet, universell utforming og tekniske krav knyttet til sikkerhet, miljø, helse og energi. TEK17 henviser også til flere relevante standarder fra SINTEF og Standard Norge, som gir mer detaljerte tekniske spesifikasjoner.

2.6.3. ISO 20887:2020

ISO 20887 Design for disassembly and adaptability (DfD/A) – principles, requirements and guidance, er utarbeidet av ISO (International Organization for Standardization), som er en verdensomfattende uavhengig organisasjon, som produserer og publiserer internasjonale standarder [4]. ISO 20887 ble publisert i 2020 og er en del av ISO-serien som fokuserer på bærekraft og sirkulær økonomi (SØ) i byggesektoren. Standarden relaterer også til flere andre standarder, som blant annet ISO 15392 (generelle prinsipper for bærekraft) og ISO 15686 (planlegging av levetid). Dokumentet omfatter Design for Disassembly and Adaptability (DfD/A) prinsipper og strategier for integrering i designprosessen. Det fungerer som en veiledning for eiere, arkitekter, ingeniører og produsenter, med fokus på muligheter, viktige hensyn og metoder for ytelsesmåling. Prinsippene gjelder for alle typer bygg og anleggsprosjekter, inkludert nybygg, renovering og ombygging, samt deres ulike komponenter og materialer. ISO 20887 definerer SØ som en økonomi som er gjenopprettende og regenerativ i sin utforming, og som har som mål å holde produkter, komponenter og materialer på sitt høyeste nyttenivå og verdi til enhver tid, med et skille mellom tekniske og biologiske kretsløp [4].

2.7. Bærekraft i byggebransjen: Tradisjonell og bærekraftige kriterier

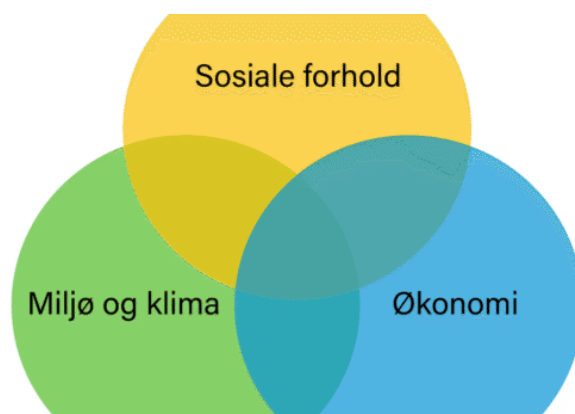
Bærekraftig kriterier og tradisjonell kriterier har hver sin tilnærming for bygningsmaterialer, produkter og systemer, se Tabell 2.1. I følge Kibert, har byggenæring tradisjonelt sett vært styrt av tre kriterier: ytelse, kvalitet og kostnad [28]. Kriteriene legger vekt på byggets funksjonsevne, materialestyrke, levetid, og økonomisk lønnsomhet ut ifra investering og drift. Bærekraftige kriterier ser på nye vurderingsparametere som å redusere ressursuttak, miljøbelastning og skape et sunt miljø. Overgangen fra tradisjonelt til bærekraftig design innebærer en utvidelse fra tekniske og økonomiske kriterier til å inkludere miljø- og samfunnsperspektiver.

Tabell 2.1 - Tradisjonelle og bærekraftige kriterier [28]

Tradisjonelle kriterier	Bærekraftige kriterier
• Ytelse • Kvalitet • Kostnad	• Ressursuttak • Miljøbelastning • Sunt miljø

Bærekraft har lenge vært kjent i byggebransjen. Bærekraftbegrepet fikk internasjonal betydning gjennom Brundtland-rapporten, Vår felles framtid (Our Common Future), publisert i 1987 [29]. Rapporten definerte begrepet som «En bærekraftig utvikling er en utvikling, som møter dagens behov, uten å sette fremtidige generasjoners evne til å dekke sine behov i fare» [30]. Rapporten endret tilnærmingen til miljøspørsmål, hvor det ofte brukes av politikere og miljøbevegelser for å understrekes at fattigdoms- og miljøproblemer må ses i sammenheng, og at fokuset må vekk fra kortsiktige økonomiske hensyn og over til langsiktige miljøhensyn. Miljøbevegelsen som vokste fram begynte å påvirke alle deler av samfunnet, gradvis også byggebransjen.

Figur 2.14 viser bærekraftig utvikling sine tre dimensjoner: miljø og klima, sosiale forhold og økonomi [31]. FN forklarer at bærekraftig utvikling handler om å skape balanse mellom dimensjonene for å sikre en levedyktig fremtid ved å redusere klimagassutslipp, bevare naturmangfold og tilpasse klimaendringer. FN påpeker at økonomisk utvikling må skje innenfor naturens tålegrenser og bidra til rettferdig ressursfordeling. FN beskriver at sosial bærekraft handler om å sikre grunnleggende rettigheter, som utdanning, helse og likestilling.



Figur 2.14 - Bærekraftig utvikling sine tre dimensjoner [31]

2.8. Design for demontering og ombruk (DfDR)

DfDR er et konsept som støtter prinsipper innen sirkulær økonomi ved å legge til rette for at produkter, bygninger og systemer enkelt kan demonteres, og brukes om igjen etter endt livssyklus [5]. Ifølge Moffatt og Russell, defineres *DfDR* som et design til en bygning der deler kan enkelt demonteres og separeres fra hverandre for *ombruk* eller *resirkulering* [32]. Hovedfokuset er å bevare komponenter for ombruk til samme hensikt eller nye, før materialet må resirkuleres. DfDR omfatter midlertidig både design for demontering DfD og ombruk.

Demontering utgjør en strategi for å redusere miljøbelastninger, forbedre ressursutnyttelsen og legge til rette for effektiv avfallshåndtering [33]. Taromi forklarer at konsept design for demontering (DfD) ikke er nytt, og har vært anvendt i flere andre industrier, særlig innen vedlikehold og reparasjon av produkter. I byggesektoren muliggjøres DfD hovedsakelig gjennom bruk av reversible forbindelser, slik at komponenter og elementer kan demonteres og separeres uten skade [5]. De kan videre repareres, gjenbrukes eller ombrukes i nye sammenhenger, slik at materialers gjenværende levetid utnyttes.

Ifølge Bogue, sitert av Ottenhaus et al., kan man definere DfD gjennom struktur, materialvalg, sammenføyninger, komponentegenskaper og demonteringsbetingelser [5]. Han sier at strukturen bør fokusere på modularitet og standardisering av komponenter, samt begrense antallet komponenter. Materialvalget bør være resirkulerbare stoffer. For forbindelsene fremmer Bogue et redusert antall forbindelsespunkter, økt tilgjengelighet og synlighet av skjøter, samt enkel demontering og bruk av festemidler i stedet for lim. Komponentegenskapene bør inkludere en lett vekt og god holdbarhet, og demonteringsbetingelser bør fokusere på potensiell automatisering som benytter enkle prosedyrer og verktøy.

Ottenhaus et al. punkterer at DfD ikke automatisk gir ombruk. Det vises til at det finnes flere designkriterier med fokus på bevaring av komponentens funksjon og tilstand. Det forklares at design for ombruk, uavhengig materiale, bør være inkludert tidlig i design- og planleggingsfasen. Bygningskomponenter eller moduler (eksempelvis bjelker, søyler eller veggelementer) bør være fullt intakte. Videre beskrives det at eventuelle skader eller tap av funksjon skal være forutsigbare, slik at de alternativt kan repareres eller brukes på en ny måte, slik at skaden ikke påvirker funksjonaliteten i en ny konstruksjon. For en vurdering av ombruk av eldre materialer, kreves det ofte en ny vurdering eller reklassifisering av materialer for å kartlegge kvaliteten opp mot den opprinnelige. Ifølge artikkelen, gjelder dette spesielt for eldre trebygg som ofte mangler opprinnelig dokumentasjon, og har høyere risiko for å være utsatt for biologiske nedbrytninger, samt påført skade fra tidligere bruk, montering eller demontering. Dette kan inkludere hull, sprekker, deformasjoner eller slitasjeskader. Materialene kan også være overflatebehandlet, med maling eller belegg, som forhindrer inspeksjon. Trevirket sin styrke vil også svekkes over tid på grunn av langtidslaster og miljøpåvirkning, og må medregnes. Ottenhaus et al. sier at det derfor er nødvendig med en nøyaktig vurdering av materialene og komponentene før ombruk [5].

Miljødirektoratet sier at *Ombruk* betyr at produkter eller materialer brukes på nytt til samme formål som før, uten at de må bearbeides noe særlig [34]. I tillegg defineres *resirkulering* som enhver gjenvinningsprosess der avfallsmaterialer reposseseres til produkter, materialer eller stoff,

enten for opprinnelig eller annet formål. Miljødirektoratet påpeker at gjenbruk ofte blir brukt upresist om ombruk. Det er derfor nødvendig og skille mellom begrepene. Sirken, som er en ombrukssentral, definerer gjenbruk som å bruke materialer eller elementer på en annen måte enn det var ment for [35]. Formålet med gjenbruk, ifølge Sirken, er å redusere avfall ved å bruke materialer på nytt som ellers ville blitt kastet. Ifølge Cristescu et al. [36] er gjenbruk hvilken som helst operasjon der produkter eller komponenter som ikke er avfall, kan brukes om igjen for den samme hensikten, med minimal behandling, som kontroll, rengjøring og reparasjon.

3. Forskerspørsmål

3.1. Bakgrunn og definering av problemstilling

Problemsstillingen for dette prosjektet er utgitt av BN3 (Bransjenettverk for Trekonstruksjoner) og utviklet i samarbeid med entreprenøren Backe, med et felles ønske om å undersøke hvordan DfDR kan påvirke kostnader, materialbruk og ombrukspotensial i trebygg. Utformingen av forskningsspørsmål har vært resultat av en grundig prosess, hvor både oppdragsgiverens behov og studentenes faglige tilnærming har vært sentrale. I prosjektets innledende fase presenterte Backe to relevante skoleprosjekter der byggenes konstruksjoner var utført i massivtre og limtre, og designet på konvensjonelt vis uten demonterbare forbindelser i. Etter en vurdering av prosjektenes modenhet, tilgjengelig dokumentasjon og relevans for problemstillingen, valgte forskningsgruppen prosjektet til Stabbursmoen skole som case for videre analyse.

Utviklingen av hovedproblemstillingen skjedde i tett dialog med Backe, med mål om å utforme et spørsmål som både adresserer praktiske behov i byggebransjen og legger til rette for en grundig akademisk utforskning av DfDR sine muligheter. For å besvare hovedspørsmålet, er det utarbeidet sju underspørsmål som skal lede an veien.

3.2. Hovedspørsmål:

Hvordan påvirker implementeringen av demonterbare forbindelser kostnad, materialbruk og fremtidig ombruk av massivtre- og limtrekonstruksjoner sammenliknet med konvensjonelt design i skolebygg?

3.2.1. Underspørsmål:

- Hva slags standarder og krav finnes for DfDR i Norge i dag, og hvilken utvikling er det innen området?
- Hva slags forbindelser finnes til DfDR av massivtre- og limtrekonstruksjoner?
- Hvordan er den bærende trekonstruksjonen løst i casestudiet?
- Hva er de økonomiske konsekvensene av å implementere DfDR i trekonstruksjonen?
- Hvordan påvirker DfDR materialeffektiviteten til trekonstruksjonen?
- Hva er gjenbruksverdien til den nåværende trekonstruksjonen?
- Hvordan bidrar DfDR til fremtidig ombruksmuligheter for trekonstruksjonen?

3.3. Avgrensning

- Oppgaven analyserer kun den *bærende og stabiliserende trekonstruksjonen*
- Studien er avgrenset til å evaluere oppførselen til ulike forbindelsestyper til casestudie Stabbursmoen, som innebærer at kun et utvalg av forbindelser fra Rothoblaas vil bli analysert og presentert.
- Studien fokuserer kun på *tre-mot-tre-forbindelser* og inkluderer ikke forbindelser med andre materialer.

- På grunn av begrenset tidsramme for denne oppgaven, vil det ikke bli gjennomført FEM-analyse (Finite Element Method) og beregning av lastkapasiteter for de spesifikke forbindelsene.
- Underveis i studiens periode tok et annet firma over for Woodcon, som hadde ansvaret for etter-dimensjonering, levering og montering av trekonstruksjonen. Eventuelle endringer som har skjedd dekker ikke oppgaven.

3.4. Deklarasjon

Innholdet i kapitlene for resultat, diskusjon og konklusjon er basert på forfatterens tolkning av de kvantitative og kvalitative dataene. Leserne gjøres oppmerksom på at det kan forekomme feiltolkninger av resultater og svar, som ikke nødvendigvis reflekterer respondentenes faktiske holdninger eller synspunkter. Derfor kan ikke disse holdes ansvarlige for innholdet i denne masteroppgaven.

4. Metode

Dette kapittelet beskriver metodene som er benyttet til gjennomføring av masteroppgaven. Metodevalgene tar utgangspunkt i problemstillingen og er utformet for å besvare forskningsspørsmålene på en grundig og systematisk måte innenfor den gitte tidsrammen. Metode er en fremgangsmåte og et verktøy til å løse problemstillinger og generere ny kunnskap [37, p. 62]. Derfor undersøkes de vanligste metodiske tilnærmingene og nøkkelbegrepene i forskningskvalitet for å sikre et solid grunnlag for valg av forskningsdesign. Disse metodene presenteres kort nedenfor, mens den endelige metodiske tilnærmingen blir grundigere beskrevet i Kapittel 4.1.

De vanligste metodene er, ifølge Olav Dalland og Cecilie P. Dalland (heretter kalt Dalland), *kvantitativ, kvalitativ og blandet metode* [37, pp. 63-66]. Dalland beskriver kvantitativ metode som en strukturert tilnærming benyttende av målbare data. Redskapet gjør det mulig å beregne gjennomsnitt, identifisere mønstre og sammenligne ulike enheter. Metoden kan brukes når det er viktig å tallfeste fenomener og undersøke sammenhenger. Kvalitativ metode, derimot, beskrives som en mer utforskende metode som søker å fange opplevelser og mening som ikke lar seg tallfeste. Den legger vekt på dybdekunnskap og forståelse. Videre forklarer Dalland at enkelte ganger brukes uttrykk som «myk» og «hard» data som merkelapper for henholdsvis kvantitative og kvalitative metoder, der kvantitativ data beskrives som «teller» og kvalitativ som «tolker». Dalland sier til slutt at metodene ikke er så rigid som man skulle trodd, og at i praksis så er det også vanlig å bruke en blandet metode. Den blandede metoden kombinerer begge tilnærmingene og skaper mulighet for et mer helhetlig bilde av forskningsspørsmålet.

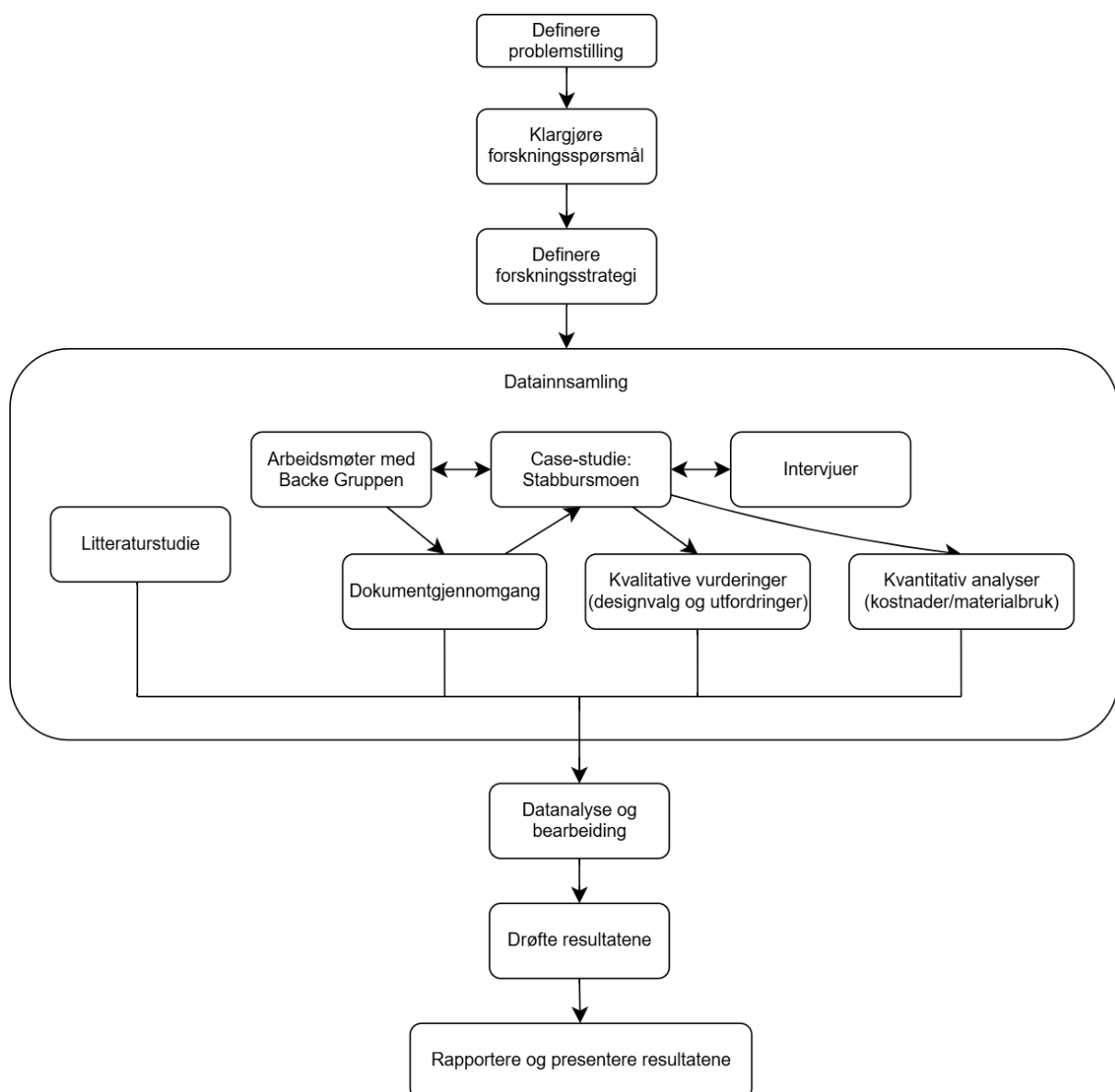
Dalland forklarer videre at i enhver undersøkelse må det stadig tas valg, og med en vitenskapelig innstilling bør det anstrenge for å følge noen normer [37, pp. 67-68]. De sier at for å kunne vurdere og sikre kvalitet til forskningen, er nøkkelbegrepene *relabilitet, validitet, generaliserbarhet og gyldighet* svært sentrale. Relabilitet handler om påliteligheten til arbeidet og hvor nøyaktig prosessen har vært. Dette innebærer å legge til rede for hvordan dataen er samlet inn og hvilke feilkilder som kan påvirke resultatet. Validitet er et kriterium av gyldigheten til målingene, og handler om hvor godt forskningen faktisk måler det oppgaven skal finne. Generaliserbarhet referer til i hvilken grad resultatene kan anvendes i andre kontekster eller grupper. Det brukes oftest i kvantitativ forskning under kontrollerte forhold, der påliteligheten og validiteten er sentralt for å kunne generalisere. Videre forklares det at overførbarhet er mer relevant for kvalitativ forskning og referer til hvordan arbeidet kan anvendes på andre situasjoner, kontekster eller grupper. Dalland forklarer at forskjellen fra generaliserbarhet er at den er mer utforskende, mens den førstnevnte søker å gjøre universelle krav.

4.1. Forskningsdesign

For å oppnå en helhetlig forståelse av problemstillingen, benytter studien en blandet metode. Forskningsdesignet kombinerer ulike metoder, herunder særegne arbeidsmøter, casestudie, dokumentgjennomgang, intervjuer, litteraturstudie, og tekniske analyser. Denne tilnærmingen skal legge til rette for en grundig undersøkelse av hvordan implementering av demonterbare forbindelser (DF) påvirker kostnader, materialbruk og fremtidig ombruk av massivtre- og limtrekonstruksjoner

sammenlignet med konvensjonelt design i skolebygg. Selve forskningsdesignet er presentert i Figur 4.1.

Casestudiet av Stabbursmoen skole danner grunnlaget for analysen og fungerer som et konkret eksempel for å undersøke hvordan implementeringen av demonterbare forbindelser påvirker de overnevnte faktorene. For å sikre reliabilitet vektlegges en grundig beskrivelse av datainnsamlingen, samt identifisering av potensielle feilkilder som kan påvirke resultatene. Validiteten styrkes ved å kombinere kvantitative beregninger og kvalitative vurderinger, for å sikre at målingene faktisk fanger opp de aspektene av DfDR som studien har til hensikt å undersøke. Kvantitative analyser kartlegger kostnader og materialbruk, og gir numerisk grunnlag for å vurdere forskjellene mellom de to designstrategiene. Samtidig inkluderes kvalitativ dybdeanalyse for å vurdere fremtidig ombruksmuligheter, der designvalg og beslutningsprosesser undersøkes for å avdekke hvilke faktorer som påvirket den opprinnelige utformingen.



Figur 4.1 - Flytskjema forskningsdesign

Alt visuelt materiale uten kildehenvisning er produsert av forfatteren selv. I tråd med Universitetet i Agders retningslinjer er kunstig intelligens (KI) benyttet som et støtteverktøy i arbeidet med oppgaven [38]. KI-verktøyet ChatGPT er anvendt for idéutvikling, språklig og strukturell forbedring, samt korrektur. Det er ikke brukt ChatGPT til å skrive hele avsnitt eller kapitler, men kun til å bearbeide egen tekst. Alt innhold og faglig vurdering er forfatterens egne.

4.2. Datainnsamling

4.2.1. Litteraturstudie

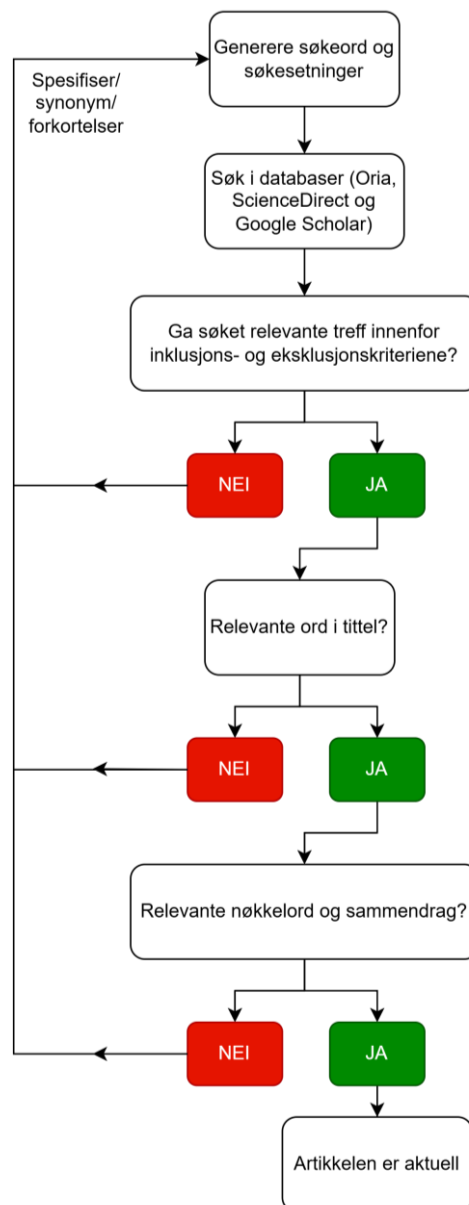
Før litteraturstudiet gjennomføres, utarbeides og defineres en tydelig problemstilling. Problemstillingen gir grunnlag, retning og avgrensning til hva som skal søkes etter. Jacobsen fremhever at jo mer presist problemstillingen er definert, desto mer målrettet og avgrenset blir litteratursøket [39, p. 79]. Dalland påpeker i tillegg at det er en fordel å knytte problemstillingen til et hovedtema for å sikre at søket dekker relevante kilder [38, p. 177]. Ifølge Jacobsen så kan litteratursøk utføres enten usystematisk eller systematisk, der begge metodene har som mål å identifisere relevant forskning [39, p. 79]. Videre beskriver Jacobsen at et usystematisk søk kjennetegnes ved at kriteriene for utvelgelse ikke er klart definert. Dette gjør det vanskelig for leseren å forstå hvilke kilder som er utelatt, og hvilke kriterier som er benyttet for å inkludere én type forskning fremfor en annen.

Metodikken for litteraturstudie i denne studien er inspirert av *Academic Information Seeking*, et nettkurs utviklet av University of Copenhagen (Coursera) [40]. Kurset danner et metodisk rammeverk for utviklingen av søkeord og søkesetninger. Søkeprosessen til litteraturstudiet er dokumentert i en loggbok, se Vedlegg A. Søkeordene inkluderte blant annet «DfDR», «demonterbare forbindelser» og «trekonstruksjoner DfDR». Det ble utført søk i to anerkjente databaser: ScienceDirect og Google Scholar. I tillegg ble det etablert et sett med inklusjons- og eksklusjonskriterier, presentert i Tabell 4.1, for å sikre relevans i utvalget.

Tabell 4.1 - Inklusjons- og eksklusjonskriterier

Kriterier	Inklusjon	Eksklusjon
Språk	Norsk og engelsk	Andre språk enn norsk og engelsk
Publikasjonstype	Masteroppgaver, doktoravhandlinger, vitenskapelige artikler	Andre typer enn nevnt
Tidsspenn	2015 og nyere	Eldre enn definert tidsperiode
Geografisk område	Norden – Norge, Sverige, Danmark og Finland	Studier fra irrelevante områder

Etter gjennomføring av søkene, ble treffene vurdert gjennom en strukturert vurderingsprosess. Denne prosessen hadde som mål å sikre faglig relevans og metodisk presisjon i utvalget av litteratur. Vurderingen tok utgangspunkt i tre ledd: (1) samsvar med inklusjons- og eksklusjonskriterier (2) relevans av tittel, og (3) faglig innhold basert på nøkkelord og sammendrag. Artikler som besto alle trinn, ble vurdert som aktuelle. Hele vurderingsprosessen er illustrert i Figur 4.2, som visualiserer fremgangsmåten for artikkelutvelgelse.



Figur 4.2 - Vurderingsprosess for artikler

Litteratursøket gjennomføres ved å søke etter relevante standarder som er tilknyttet DfDR. Det ble søkt etter relevante artikler som ser på poengsetting for DfDR og artikler som ser på hva slags demonterbare forbindelser som finnes for trekonstruksjoner. Hvilke demonterbare forbindelser som finnes i markedet, ble også gjort et litteratursøk på.

For litteratursøk etter demonterbare forbindelser ble det avgrenset kun til Rothoblaas, siden Backe kun bruker denne firmaet. Søket foregikk ved å lese seg opp på de ulike produktene Rothoblaas tilbyr og finne ut om de var demonterbare. I tillegg kontaktet vi Rothoblaas for informasjon om pris på hver av de demonterbare forbindelsene, se Kapittel 4.4.2.

4.2.2. Særegne arbeidsmøter

Som en del av studiens gjennomføring har gruppen hatt faste arbeidsmøter med både intern og ekstern veileder for å sikre faglig kvalitet, kontinuitet og retning i arbeidet. Veiledningsmøter og særegne møter omtales her som det samme. Det ble tidlig i prosessen etablert et møteintervall på annenhver uke. Møtene ble gjennomført sammen med intern veileder Preben Aanensen, og ekstern veileder Kenneth Hatlestad, kategoristyringssjef hos Backe. Hvert møte hadde en varighet på sirka en time, og det ble åpnet mulighet for å gjennomføre ekstra møter ved behov. Denne møtefrekvensen og fleksibiliteten sikrer oppfølging gjennom prosjektets ulike faser.

For å fremme et godt faglig utbytte av veiledningen, har gruppen valgt å forberede seg systematisk i forkant av hvert møte. Det ble utarbeidet en agenda og samlet relevante spørsmål knyttet til både faglige og metodiske temaer. Denne tilnærmingen har bidratt til målrettede og strukturert diskusjoner. Alle møter er dokumentert i form av referater, noe som har bidratt til god sporbarhet og samtidig fungert som et nyttig verktøy for videre bearbeiding og refleksjon.

De særegne møtene har hatt en sentral funksjon i oppgavens utvikling. Det har særlig verdt verdifullt med den tverrfaglig innsikt fra Hatlestad sitt entreprenør-perspektiv, samt Aanensen sin akademiske veiledning. Hatlestad har bidratt med innsikt i praktisk gjennomføring, dokumentgjennomgang, prosjektstyring og bransjestandarder. Aanensen har støttet opp med forskningsbasert veiledning og metodisk struktur. Denne tverrfaglige sammensetningen har gitt prosjektet flere perspektiver og styrket kvaliteten på de valgte løsningene.

Gjennom samarbeidet fikk gruppen tilgang til omfattende og praksisnær prosjektdata, som har dannet grunnlag for oppgavens videre analyser. Dette inkluderer:

- Prosjektfiler og modeller fra Dalux, med blant annet tilgang til BIM-modeller og teknisk dokumentasjon for Stabbursmoen skole
- Materialmengder for både massivtre- og limtrekonstruksjoner
- Bransjepriser for relevante elementer i trekonstruksjonen

4.3. Casestudie - Stabbursmoen skoleprosjekt

Studien benytter Stabbursmoen skole i Trondheim som case for å analysere trekonstruksjonen og dens tilhørende forbindelsessystem. Oppdragsgiver presenterte to relevante skoleprosjekter som utgangspunkt, begge utformet med konvensjonelt design uten fokus på reversible forbindelser. Det ene prosjektet var lokalisert i Haugesund og hadde ennå ikke blitt igangsatt, mens det andre, Stabbursmoen skole, var allerede godt i gang og hadde tilgjengelig dokumentasjon og bedre forutsetninger for videre analyse. På bakgrunn av prosjektets modenhet og tilgjengelighet, falt valget naturlig på Stabbursmoen som case i denne oppgaven. Datagrunnlaget for analysen er hentet fra prosjektets digitale bygningsmodell i Dalux, der gruppen i samarbeid med Hatlestad, har gjennomført systematisk uttrekk av relevante konstruksjonsdata. Informasjonen som er benyttet videre i analysen, er basert på denne databasen.

Stabbursmoen skoleprosjekt, er et oppdrag ulevert av Trondheim kommune, som har besluttet å rive den gamle skolen fra 1979 og bygge ny på samme tomt [41]. Etter en prekvalifiserings- og anbudsprosess høsten 2023 ble Backe Trondheim valgt som totalentreprenør. Prosjektet startet sommeren 2024 og skal stå ferdig til skolestart i august 2026. Den nye skolen vil ha tre etasjer og et samlet areal på 6750 m², med plass til 420 elever fra 1. til 7. klasse, samt 55 ansatte (se Figur 4.3). Skolen inkluderer gymsal, kulturarena og et oppgradert uteområde og er dimensjonert for en fremtidig utvidelse til 560 elever.



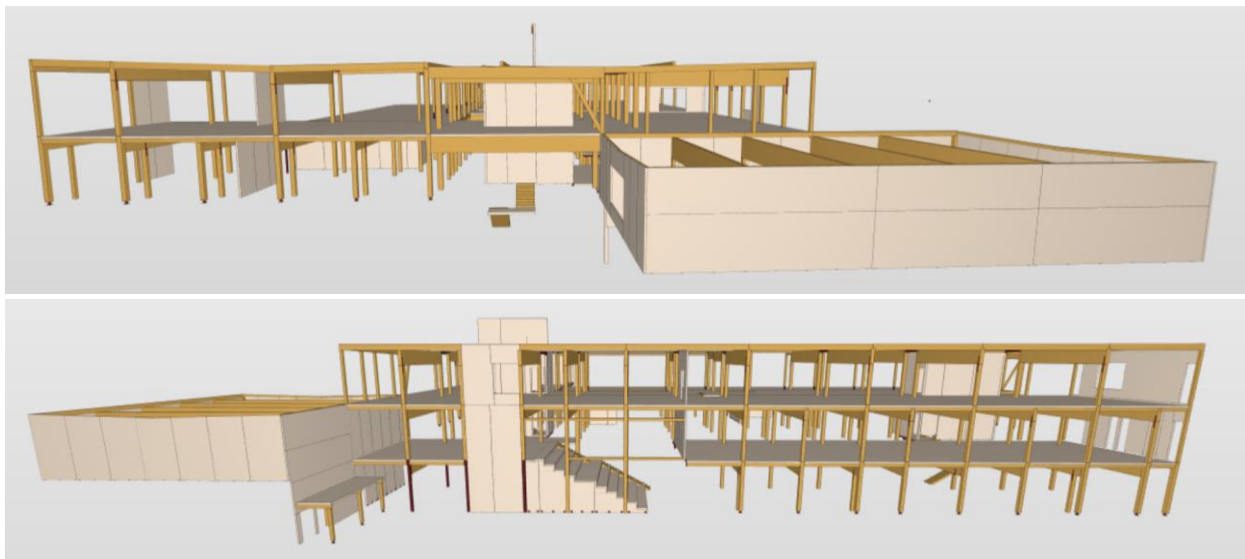
Figur 4.3 - Stabbursmoen skole [41]

4.3.1. Analyse av trekonstruksjonen

Bæresystemet består av massivtre- og limtreelementer. Bygningssystemet er utviklet av Backe med et høyt fokus på materialeoptimalisering, der den bærende trekonstruksjonen består av bjelke-søyle-system med massivtreelementer som avstivning [41]. Det er brukt stålelementer til en nødvendig sjakt for gjennomgang av tekniske installasjoner i midten av bygget, samt noen nødvendige søyler og bjelker. Denne studien fokuserer utelukkende på tre-elementene. Woodcon var i perioden da studentene startet på oppgaven ansvarlig for etter-dimensjonering og tilpassing av trekonstruksjonen, samt levering og montering av tilhørende elementer. En illustrasjon av trekonstruksjonen for analyse er vist i Figur 4.4.

Analysen av trekonstruksjonen baserer seg på flere BIM-modeller og tilhørende rådata, og er vedlagt i Vedlegg B. De relevante BIM-modellene til trekonstruksjonen inkluderer: en overordnet modell for hele massivtre- og limtrekonstruksjonen (Tot.BIM), to mer detaljerte produksjonsmodeller delt opp for massivtre (Prod.Mas) og limtre (Prod.Lim). All rådata fra BIM-modellene ble utlevert av Hatlestad, ettersom dette krevde en versjon av Solibri som ikke studentene hadde tilgang på. Det er viktig å påpeke at gruppen først fikk utlevert rådata fra Tot.BIM. Etter arbeid i rådataen, oppdaget gruppen at det manglet informasjon om antall elementer, der flere enkelte massivtreelementer var slått sammen til større og færre elementer, som eksempelvis det ene dekkelementet på 67 meter lang og 26 meter bred. Det var derfor nødvendig med en mer detaljert rådata fra produksjonsmodellene Prod.Mas og Prod.Lim.

Rådataen til Tot.BIM-modellen inneholder informasjon for 632 ulike typer/elementer til trekonstruksjonen. Informasjonen inkluderer typer sin beliggenhet (etasje), type, materiale, dimensjoner (bruttoareal, nettoareal, tykkelse, bredde, lengde, høyde og volum) og antallet for hvert enkelt element i trekonstruksjonen. Forskjellen på brutto og netto er at brutto ser på hele elementet og netto har med utsparinger og åpninger. Ettersom rådataen til Tot.BIM, lagt inn i regneark «Rådata (Tot.BIM)» var ganske omfattende, ble den sortert i fem regneark for enklere arbeid: «Massivtre (Tot.BIM)», «Massivtre (Prod.Mas)», «Limtre (Tot.BIM)», «Stål (Tot.BIM)» og «Knutepunkter». Sorteringen ble gjennomført ved å benytte informasjonen i kolonnene *Type* og *Materiale*. For massivtre ble det sortert etter CLT i *Type* og *Materiale*. Limtre ble sortert etter Heltre og Limtre i *Materiale*. Stål ble sortert etter bjelketype (HEB, VL, IPE og CFRS) og STC søyler i kolonnen *Type*. Forbindelser ble sortert etter Fotplate og forbindelsesnavnene fra PDF-filen over forbindelser, i kolonnen *Type*. Dimensjonskolonnene inneholder tallverdier knyttet til fysiske størrelser, og for å tydeliggjøre hva disse verdiene representerer, ble det lagt til enhetsbenevnelse i kolonneoverskriftene.



Figur 4.4 - Illustrasjon av massivtre- og limtrekonstruksjonen hentet fra Tot.BIM-modellen

For arbeid med rådataen til massivtreelementene, ble det valgt en systematisk tilnærming hvor massivtreelementene ble delt opp i underkategoriene: dekker, vegger, amfi. Kategoriene er forankret i bransjeprisene som er tilsendt fra Hatlestad, vist i Tabell 4.2. For å finne antall massivtreelementer ble Prod.Mas-modellen benyttet, ettersom Tot.BIM hadde slått sammen flere elementer til større konstruksjonsdeler. Kategoriseringen innebar å søke opp de ulike elementtypene fra rådataene i BIM-modellen og visuelt påvise hvilken kategori de tilhørte. Det ble opprettet en ekstra kolonne i Excel med navn *Kategori* der resultatet ble skrevet inn, se Vedlegg B regneark «Massivtre (Prod.Mas)».

Rådataen til limtreelementene, er på samme måte som massivtre, inndelt med bakgrunnen i kategorier fra bransjeprisene: limtresøyle og limtrebjelke. Antallet søyler og bjelker har tatt utgangspunkt i rådataen fra Tot.BIM. Prosessen for å finne antallet, har lik framgangsmåte som massivtreelementer. Rådataen er søkt opp manuelt i BIM-modellen og kategorisert for hånd, se regneark «Limtre (Tot.BIM)». Under søking for søyle/column, ble det identifisert små påskrudde

elementer til søylene kalt «Konsoll» og regnes ikke som søyler. Disse er derfor ekskludert fra søyleantallet, men blir senere inkludert i beregning av det totale limtrevolumet. I tillegg ble «IFCBuildingElementProxy» ikke tatt med i beregningen, siden det er trappeelementer. Alle ekskluderte elementer er merket i rødt og kommentert i Vedlegg B.

Volumet for massivtre- og limtrekonstruksjonen er beregnet basert på rådata fra Tot.BIM, der verdiene er hentet fra kolonnen *Volum* i regnearkene «Massivtre (Tot.BIM)» og «Limtre (Tot.BIM)». Verdiene summeres for hver kategori i henhold til bransjeprisene, og danner grunnlaget for den påfølgende økonomiske analysen.

4.3.2. Analyse av forbindelsessystemet

Forbindelsessystemet i trekonstruksjonen omfatter ulike typer forbindelser som benyttes for å koble sammen de bærende elementene i bygget. Disse forbindelsene kan deles inn i tre hovedgrupper basert på materialkombinasjoner:

- **Tre-mot-tre**
- Tre-mot-stål
- Tre-mot-betong

På grunn av oppgavens omfang og avgrensede tidsramme rettes fokuset i denne studien mot forbindelsene innenfor *tre-mot-tre-forbindelser*. Forbindelsene som danner grunnlaget for analysen, er identifisert gjennom en systematisk gjennomgang av Tot.BIM, Prod.Mas, Prod.Lim og en tilhørende PDF-fil over forbindelsene (se Vedlegg C).

For å danne en oversikt over forbindelsene til trekonstruksjonen, er det gjort en analyse av PDF-filen, «Plateforbindelser», gitt i Vedlegg C. Dokumentet inneholder informasjon om de brukte plateforbindelsene, inkludert antall, beliggenhet (etasje), dimensjoner og stål kvalitet. Informasjonen ble videre satt inn i en tabell i regnearket «Knutepunkter» i Vedlegg B. Informasjonen ble sortert etter allerede eksisterende kategorier: isolert søyleplate (Isolated Column plate), veggplate (Wall plates), søyleplate (Column plates), søyle og plater (Column and plates), bjelke-søyleplater (Beam – Column plates). Den utarbeidede tabellen inkluderer kategori, navn, antall, beliggenhet, samt en beskrivelse. Beskrivelsen er basert på den visuelle oppbygningen i Tot.BIM-modellen. For å velge de relevante tre-mot-tre-forbindelsene, søkte gruppen opp navnet til hver enkelt komponent i BIM-modellen, og utelukket tre-mot-betong-forbindelser. Disse ble markert rødt i tabellen.

Alle forbindelsene fra den overnevnte plateforbindelses-PDF'en, inkludert de mot betong, representerer kun en andel av knutepunktene til hele konstruksjonen. De resterende knutepunktene har ulike skrudde løsninger som ikke er detaljert i BIM-modellene. Noen generelle skrudde løsninger er presentert i prosjekteringsmanualen, utarbeidet av Woodcon, men antall er ikke inkludert. For å kunne regne på et DfDR-forslag, var det nødvendig å finne det totale antallet knutepunkter, og kategorisere dette på en slik måte at det kunne brukes til kostnadsberegning.

Det totale antallet tre-mot-tre-knutepunkter, er besluttet å utarbeides ved en manuell gjennomgang i Tot.BIM, Prod.Mas og Prod.Lim. Fokus er å identifisere overordnede kategorisere for knutepunkter.

Som metodisk forenkling ble forbindelsene inndelt etter komponentkombinasjon til massivtre- og limtrekonstruksjonen. For massivtrekonstruksjonen ble forbindelsene inndelt i 3 underkategorier:

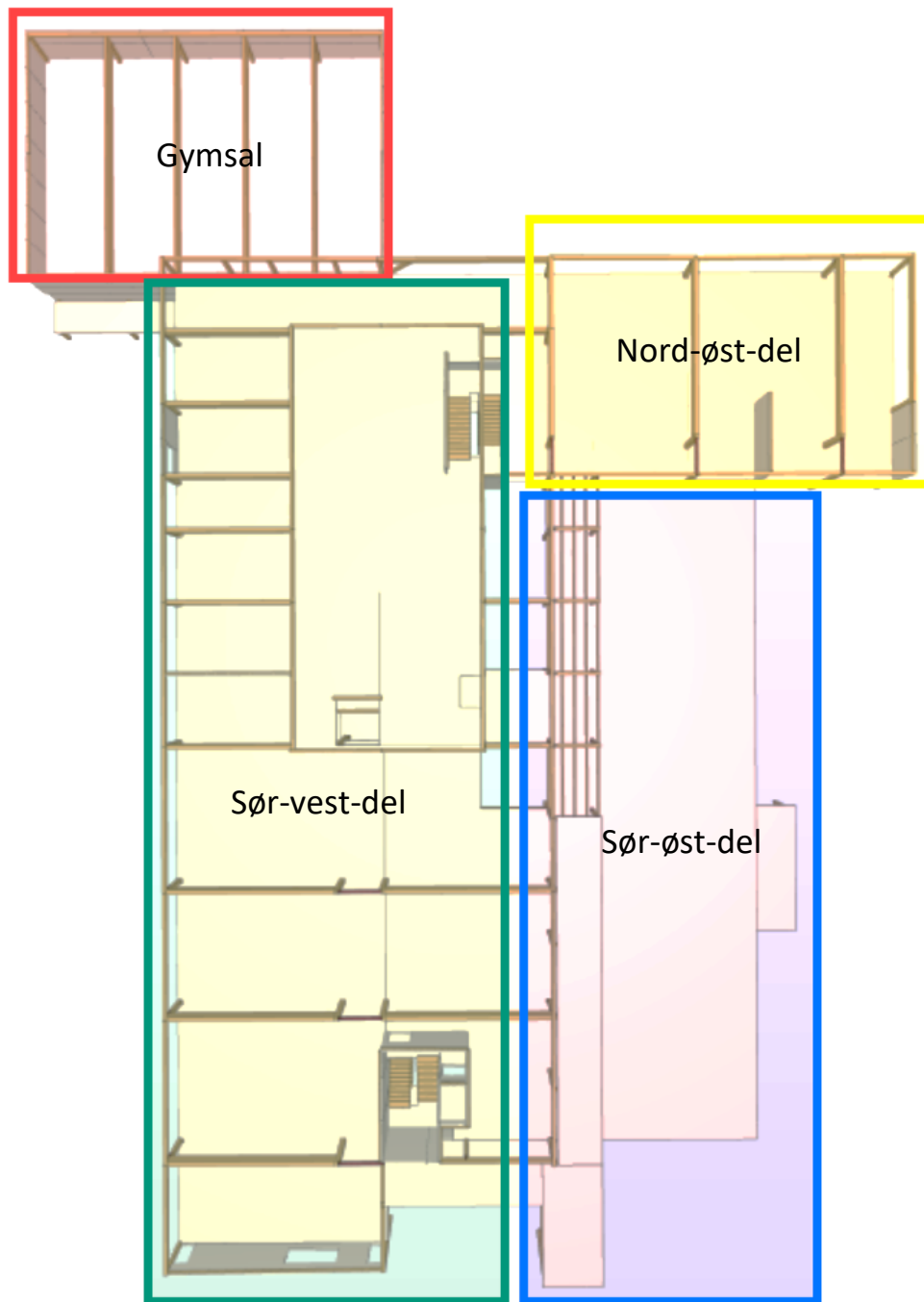
- Dekke-dekke, (DD)
- Dekke-vegg, (DV)
- Vegg-vegg, (VV)

Limtresøyle-bjelkesystemet ble kategorisert i tre underkategorier:

- Søyle-søyle (SS)
- Bjelke-søyle (BS)
- Bjelke-bjelke (BB)

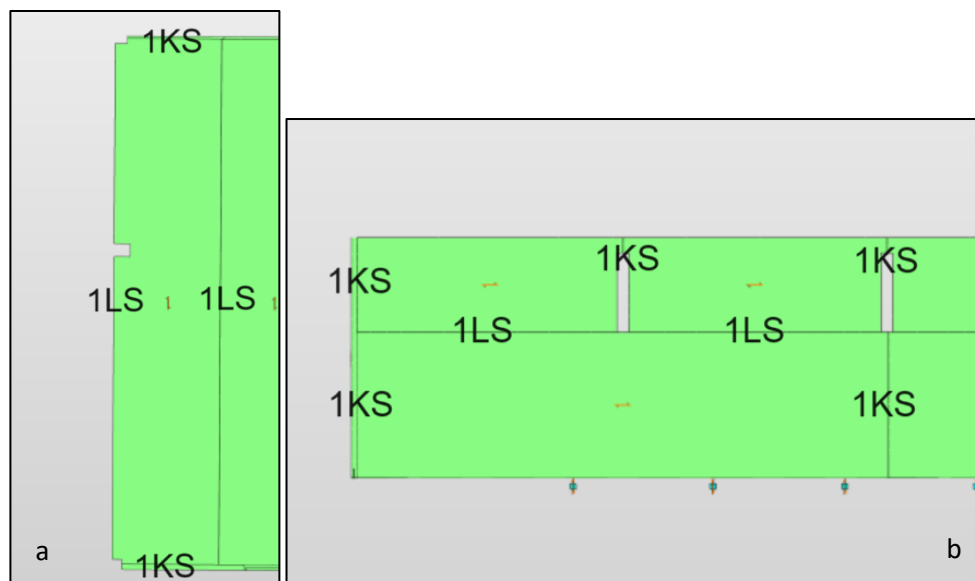
Denne inndelingen sikrer en strukturert tilnærming og bidrar til å systematisere datagrunnlaget for videre analyser. På grunn av modellens størrelse og kompleksitet ble BIM-analysen gjennomført trinnvis. Bygget ble delt inn i fire hoveddeler (se Figur 4.5) basert på byggets oppbygning. Hver del ble analysert separat, etasje for etasje, og samtlige forbindelser innenfor de definerte kategoriene ble registrert og kvantifisert.

- Gymsalen (rødt)
- Nord-øst-delen (gult)
- Sør-vest-delen (grønt)
- Sør-øst-delen (blått)



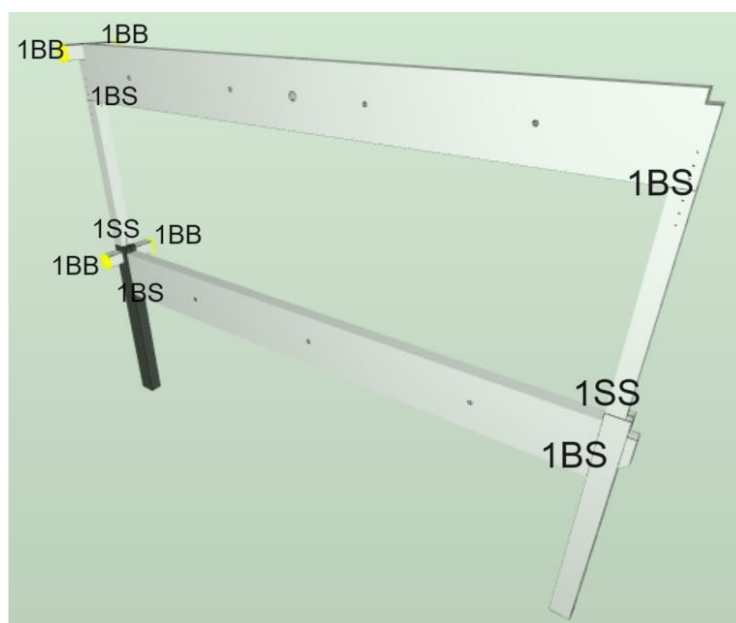
Figur 4.5 - Inndelingen av bygget

For massivtreelementene er antallet forbindelser basert på antall kontaktflater mellom elementene. Det vil si at det summeres hvor mange sider som møtes for hver massivtrekategori, illustrert i Figur 4.6. Det skilles mellom kortside (KS) og langside (LS) for å sikre korrekt telling, der summen gir totalt antall kontaktflater i hver kategori. Prod.Mas ble gjennomgått og manuelt telt igjennom antall kontaktflater i hver kategori.



Figur 4.6 - Opptelling av knutepunkter i massivtredekker (a) og -vegger (b)

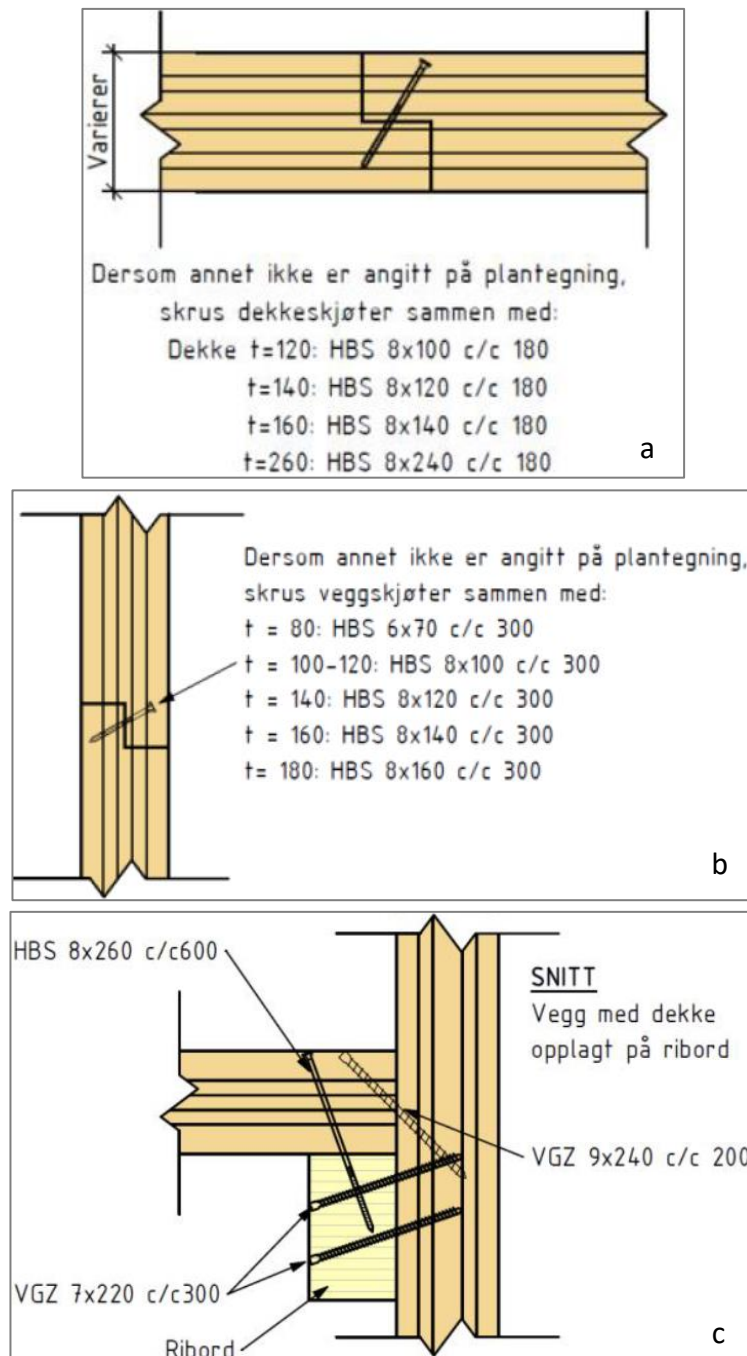
Limtrekonstruksjonen fulgte samme fremgangsmåte som massivtre, der knutepunkter ble delt inn i underkategorier. Underkategoriene har bakgrunn i elementsammenkomstene: bjelke-bjelke, bjelke-søyle og søyle-søyle. Deretter ble Prod.Lim-modellen visuelt gjennomgått for å telle antallet for de ulike kategoriene, se Figur 4.7.



Figur 4.7 - Opptelling av knutepunkter i limtrekonstruksjonen

Beregning av antall skruer til massivtreelementene, tar bakgrunn i informasjon fra prosjekteringsmanualen og gjennomsnittlige størrelser for massivtredekker og -vegger (Kapittel 5.2.1). Prosjekteringsmanualen inneholder bla. informasjon om skruenes senter-til-senter avstand (c/c) for elementene, se Figur 4.8. Antallet beregnes ved å dele de gjennomsnittlige lengdene til dekket på den tilhørende senteravstanden. Dette antallet multipliseres deretter med antallet

knutepunkter til de ulike kategoriene (fra Kapittel 5.2.2). For dekke og vegg blir det brukt antall for KS og LS, med tilhørende skrueantall. For dekke-vegg blir det brukt vegg KS, siden denne er størst av dekke og vegg. Ettersom prisene er konfidensielle, presenteres kun en totalpris i Kapittel 0.



Figur 4.8 - Utklipp av skrudde løsninger til: (a) dekkesskjøt, (b) veggskjøt og (c) dekke-vegg-skjøt [42]

4.4. Økonomisk analyse

4.4.1. Nåværende konstruksjon

Økonomisk analyse av den nåværende trekonstruksjon tar utgangspunkt i bransjepriser, som er erfaringsbaserte enhetspriser levert av Hatlestad, presentert i Tabell 4.2. Prisene representerer

gjennomsnittlige verdier for ulike konstruksjonselementer basert på faktiske innkjøp i 84 gjennomførte prosjekter i regi av Backe i 2024. Det presiseres at prisene kan variere over tid, avhengig av markedssituasjon og prosjekttype. Alt av økonomiske beregninger er vedlagt i Vedlegg B. Grunnlaget for den økonomiske analysen er basert på materialmengder hentet fra Tot.BIM.

Tabell 4.2 – Gjennomsnittlige bransjepriser for elementer i trekonstruksjoner [43]

Element	Enhet	Enhetspris (kr)
KLT – Amfi ol.	m ³	12 725
KLT – Dekker	m ³	7 448
KLT – Trapper	m ³	13 696
KLT – Vegger	m ³	9 594
Limtre	m ³	11 510
Stålkonstruksjoner	kg	65
Elastomer	lm	240
Synlig kvalitet (pr. side)	m ²	190
Montasje	m ³	2 437
Prosjektering	m ³	834
Forbindelser	-	9% av den totale kostnaden

Massivtreet er inndelt i de tre hovedkategorier: KLT-dekker, KLT-vegg og KLT-amfi, i tråd med bransjeprisenenes struktur. For å sikre korrekt fordeling av volumene ble Prod.Mas gjennomgått, slik at komponentene kunne lokaliseres og kategoriseres korrekt. Lokaliseringen startet med amfi-delen, ettersom beliggenheten for disse elementene allerede var kjent (Plan U1). Ved å søke etter elementtykkelsene som forekommer i Plan U1 – nemlig 60, 100, 120 og 160 mm – og sammenligne antallet med verdiene i regnearket «Massivtre (Tot.BIM)», kunne elementene identifiseres og valideres. Den videre klassifiseringen ble utført ved å kontrollere om elementene var definert som dekker eller vegg i kolonnen *IFC Entity*. For limtre ble klassifiseringen gjort etter søyler og bjelker, ved å kontrollere om elementene var definert som søyle eller bjelke i kolonnen *IFC Entity*.

Etter at dataene var sortert og kategorisert, ble desimalverdiene i regnearkene avrundet til to desimaler (0,00). Dette ble gjort for å forenkle tallmaterialet og sikre et enhetlig grunnlag for videre beregninger.

Fra kolonnen *Volum* i regnearkene ble det totale volumet for massivtre og limtre summert hver for seg i kubikkmeter (m³). For stålkonstruksjonen ble det totale volumet summert og deretter omregnet til vekt, ettersom bransjeprisene er oppgitt per kilogram. Rådataene spesifiserte stålqualiteten som S355, med en tetthet på 7850 kg/m³ [44]. Volumet ble multiplisert med denne tettheten for å beregne totalvekten. Det bemerkes at volumene som kommer frem i Tot.BIM, representerer nettomengder og tar høyde for utsparinger og åpninger. Dette avviker fra volumene i Backe sin opprinnelige tilbudsgrunnlag, hvor det ble benyttet bruttovolumer, som tar hele elementer. Som følge av dette er volumene som inngår i analysen noe lavere enn tilbudsgrunnlaget.

For beregning av elastomer, som måles i løpemeter massivtrevegg, ble lengden for alle veggelementer summert ved å bruke verdiene i kolonnen *Lengde*. Synlig kvalitet ble beregnet basert

på bruttoareal målt i kvadratmeter (m^2), hvor summen av veggflatene til massivtre, målt på én side, ble hentet fra kolonnen *Bruttoareal*.

Kostnadene for massivtre ble beregnet med utgangspunkt i volumene for KLT-vegg, KLT-dekke og KLT-amfi, der enhetsprisene for hvert element (se Tabell 4.2) multipliseres med tilhørende. Kostnader for elastomer regnes ved å multiplisere antall løpemeter med enhetsprisen, og synlig kvalitet med veggflatearealet. Prosjektering og montasje ble behandlet som egne kostnadsposter, og disse ble beregnet basert på det totale massivtrevolumet. Tilsvarende ble kostnadene for limtre beregnet basert på samlet limtrevolum, hvor også prosjektering og montasje ble inkludert som separate poster, beregnet med samme volumgrunnlag. Deretter ble kostnadene for massivtre, limtre og stål summert.

Forbindelser i trekonstruksjonen utgjør vanligvis mellom 7 og 9 % av den totale materialkostnaden for konstruksjonen [43]. I denne analysen er 9 % benyttet som beregningsgrunnlag, for å inkludere en sikkerhetsmargin. Basert på denne summen ble kostnaden for knutepunktene beregnet. Når kostnaden for knutepunktene ble lagt til, utgjorde dette den endelige totalkostnaden for den bærende konstruksjonen.

Totalkostnaden for knutepunktene består av tre-mot-betong-, tre-mot-tre- og skruеforbindelser. For å muliggjøre en sammenligning mellom den originale og DfDR tre-mot-tre-forbindelser, ble det beregnet hvor stor andel hver av kategoriene utgjorde av den totale knutepunktskostnaden. Skruеforbindelsene er identifisert og trukket ut av totalsummen etter metoden i Kapittel 4.3.2. Dette gjør det mulig å beregne en gjennomsnittspris for tre-mot-betong- og tre-mot-tre-forbindelsene med deres tilhørende antall. Den opprinnelige tre-mot-tre-forbindelser består av både skruе- og tre-mot-tre-forbindelser, og danner sammenligningsgrunnlaget for DfDR-løsningen.

4.4.2. Utvelgelse og økonomisk analyse av DfDR-forbindelser

I beregningen av kostnaden til DfDR-løsningen, antas konstruksjonen å forbli den samme. Forskjellen blir dermed kun et utskifte av ikke-demonterbare forbindelser til nye DF i konstruksjonen. Med utgangspunkt i analyse av forbindelsessystemet i Kapittel 4.3.2, ble det gjennomført et litteratursøk for å identifisere DF i den eksisterende konstruksjonen og til det nye utvalget. Ut ifra funnene til litteratursøket, se Kapittel 5.1.8, gjennomgikk gruppen nettsiden til produsenten, Rothoblaas, for å finne de tilgjengelige forbindelsene på markedet som har høy demonterbarhet. I Tabell 5.3 er de foretrekkende forbindelsene markert i gult. Det nye utvalget er presentert i Kapittel 5.1.9.

Etter utvelgelsen tok gruppen kontakt med Rothoblaas for prising av utvalget. Det ble tilsendt et konfidensielt dokument med informasjon om forbindelsene med flere ulike størrelser og priser som er bakgrunnen for beregningen. Enhetsprisene kan ikke vises i oppgaven, så det er besluttet å kun vise totalsummen til den nye løsningen som en prosentforskjell fra den originale forbindelsesprisen. På grunn av oppgavens omfang og tidsramme, er utvalget til størrelsen og tilhørende enhetspris tatt på bakgrunn av gjennomsnittlige størrelser til bjelker, søyler og massivtreelementer. Ettersom det er store spenn og høye gjennomsnittsverdier for dimensjoner til konstruksjonselementene, falt valgene på de største forbindelsene med tilhørende høyest enhetspris.

For massivtrekonstruksjonen ble forbindelsene X-RAD og TITAN PLATE T (TPT) valgt som demonterbare forbindelser. X-RAD benyttes i både dekke-vegg- (DV) og vegg-vegg-forbindelser (VV), der det er behov for én forbindelse per knutepunkt eller veggelement. Totalkostnaden for disse forbindelsene beregnes ved at antall forbindelser som kreves per knutepunkt (én) multipliseres med henholdsvis antall DV-knutepunkter og antall massivtrevegger. Disse multipliseres deretter med enhetsprisen for X-RAD.

For dekke-dekke-forbindelser (DD) benyttes TPT-plater. Antall plater per dekkeelement estimeres basert på gjennomsnittlig bredde og lengde for massivtredekkene. Én TPT har en lengde på 1200 mm. Med utgangspunkt i et dekke på 2360 mm i bredde og 10340 mm i lengde, estimeres det behov for 8 plater på langsiden og 2 plater på kortsiden. Av praktiske hensyn ble antallet avrundet ved å runde ned for langsiden og opp for kortsiden. Antall TPT-plater per dekke multipliseres med totalt antall massivtredekker, og deretter med enhetsprisen for TPT.

For limtrekonstruksjonen ble forbindelsene UV T, RADIAL og ALUMEGA valgt. Beregningsmetoden for totalkostnaden følger samme prinsipp: Antall forbindelser som kreves per knutepunkt multipliseres først med antall knutepunkter i hver kategori, og deretter med enhetsprisen for den aktuelle forbindelsestypen. UV T benyttes i bjelke-bjelke-forbindelser (BB) og bjelke-søyle-forbindelser som er skrudd (BS (Skrue)), ettersom Metal Hangers ikke er egnet til å ta opp aksialkrefter. Det kreves én UV T-forbindelse per knutepunkt i begge disse kategoriene. RADIAL benyttes i søyle-søyle-forbindelser (SS), hvor det er behov for fire forbindelser per knutepunkt. ALUMEGA benyttes i bjelke-søyle-forbindelser (BS), der én forbindelse benyttes per knutepunkt.

Den totale kostnaden for DF-løsningen fremkommer ved å summere kostnadene til de overnevnte forbindelsestypene. Totalsummen sammenlignes med tre-mot-tre-forbindelseskostnaden i referanseprosjektet, der det beregnes differanse og prosentforskjell. Beregningene (uten spesifikke priser) er vist i Vedlegg B, regneark «Sammenligning Org. & DfDR». Videre sammenlignes den opprinnelige totalkostnaden for hele trekonstruksjonen med totalkostnaden etter implementering av DF, der differansen adderes med totalkostnaden og prosentforskjell beregnes. I tillegg er det utført en sammenligning av gjennomsnittsprisene for DF og tre-mot-tre innslissede plater, der det beregnes differanse og prosentforskjell.

4.5. Materialeffektivitetsanalyse

Materialeffektiviteten til den bærende konstruksjonen ble beregnet ved å sette det totale volumet av konstruksjonsmateriale i forhold til byggets bruttoareal. Volumet av massivtre og limtre, som omfatter de bærende elementene i konstruksjonen, ble først summert for å gi et samlet konstruksjonsvolum målt i kubikkmeter (m^3). Deretter ble byggets bruttoareal, oppgitt i kvadratmeter (m^2) og presentert på nettsiden til Backe [41], benyttet som referanseareal i beregningen. Ved å dele det totale materialvolumet på bruttoarealet, ble materialeffektiviteten uttrykt som mengde bærende konstruksjonsmateriale per kvadratmeter (m^3/m^2).

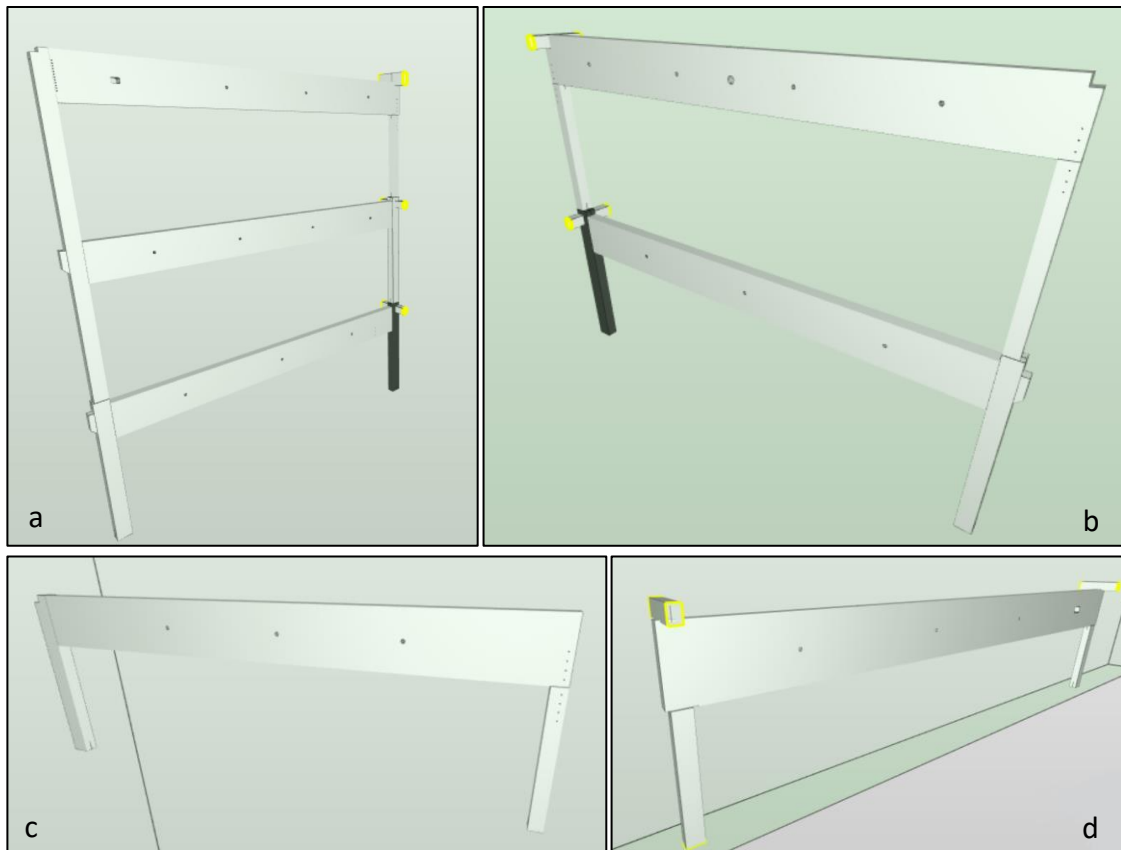
4.6. Gjenbruksverdi analyse

For å vurdere forskjellen i gjenbruksverdi eller gjenbrukbarhet mellom referanseprosjektet og en demonterbar løsning, benyttes en systematisk fremgangsmåte. Beregningen tar utgangspunkt i et referansenivå hvor alle treelementene i den demonterbare løsningen har en antatt 100 % gjenbruksverdi, det vil si at alle komponentene kan demonteres og gjenbrukes uten tap av materialkvalitet eller volum.

Vurderingen av referanseprosjektet baseres på kartlegging av forbindelsestypene i trekonstruksjonen, støttet av samtaler med Hatlestad, og intervju med Odd Grøthe, RIBtre i Dimensjon AS. Basert på tilbakemeldinger antas det at elementer som inneholder ikke-demonterbare forbindelser må kappes ved demontering. Kun de delene som forblir intakte anses å kunne ombrukes. Dette fører til et visst materialtap, hvor volumtapet trekkes fra totalvolumet for å beregne gjenbrukbar mengde i referanseprosjektet.

Med hensyn til oppgavens omfang og tidsramme benyttes en forenklet beregningsmetode for gjenbruksverdi analysen. Det fastsettes gjennomsnittlig *høyde/tykkelse, bredde og lengde* for inkludert massivtredekker, massivtrevegger, limtresøyler og limtrebjelker. For å beregne gjennomsnittlige tykkelsen for massivtreelementene, delt i dekke og vegg, brukes det totale volumet og totale arealet for tilhørende kategorier i regnearket «Massivtre (Tot.BIM)». Volumet deles på arealet, som gir gjennomsnittlig tykkelse. Bredde og lengde til massivtre beregnes i regnearket «Massivtre (Prod.Mas)», og deles opp etter dekke og vegg. Det ble lagt til en ny kolonne med navnet *Bredde dekke*, ettersom tallverdiene i *Bredde* er ganget med antall elementer for den raden. I *Bredde dekke* er det beregnet ut de riktige breddene for massivtredekker, ved å dele *Bredde* på *Antall*. Limtreelementene deles opp i søyle og bjelke, og tilhørende bredde, høyde og lengde beregnes i regnearket «Limtre (Tot.BIM)». Det ble gjennomført en manuell gjennomgang av kolonnen *Bredde*, for disse tallverdiene er i rådataen ganget med antallet elementer som forekommer. Dette gjorde at bredde ble større enn det som er virkelig.

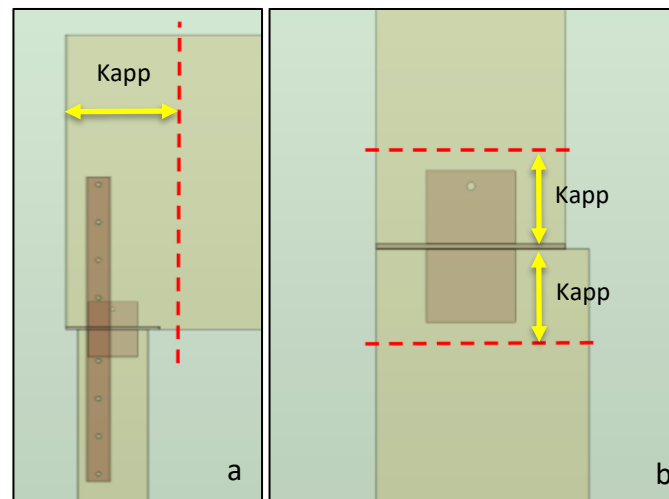
Lengden for volumtap fastsettes som innfestelsesdybden i elementene til forbindelsene som antas å ikke være fullt demonterbar, nærmere bestemt innslissede plateforbindelser og skrueforbindelser. PDF-fil (Vedlegg C) som viser forbindelsene, samt BIM-modellene som ligger til grunn for vurderingen, er hentet fra Dalux og analysert i Vedlegg B. Her er innslissede plateforbindelsene sortert etter kategoriene isolert søyleplate, veggplate, søyleplate, søyler og plater, bjelke-søyle plater og krokforbindelser. De forbindelsene som ikke er tre-mot-tre, markeres, og de resterende innslissede plateforbindelsene benyttes til grunnlaget for *lengden* for volumtap. For å standardisere beregningene til limtrekonstruksjonen deles bygget opp i ulike utsnitt: 3 etasjer ramme, 2 etasjer ramme, 1 etasje ramme og Gymsal (se Figur 4.9).



Figur 4.9 – Utsnitt av rammeverk fra Prod.Lim: tre-etasjer (a); to-etasjer (b); ett-etasje (c); Gymsal (d)

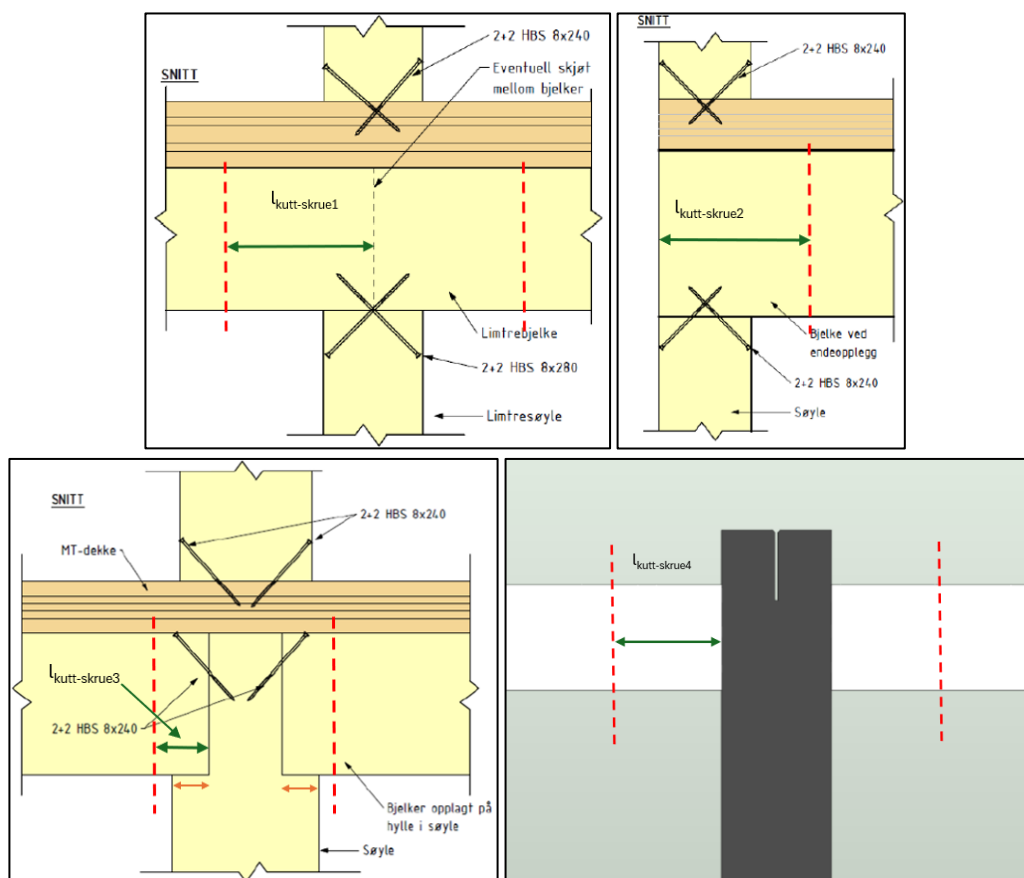
For hvert utsnitt telles det antall bjelke-bjelke-, bjelke-søyle-, krok- og skrueforbindelser. Dette danner grunnlaget for å beregne det totale volumtapet i limtrekonstruksjonen.

For bjelke-søyle- og søyle-søyle-forbindelser beregnes en gjennomsnittlig dybde, der det legges en sikkerhetsmargin på 2 cm for kappetoleranse, basert på anbefaling fra Hatlestad. Dybdelengden multipliseres deretter med gjennomsnittlig høyde og bredde for de aktuelle treelementene, noe som gir estimert volumtap per element. For å fastsette hvilke innslissede plateforbindelser som skal brukes, gjøres det en standardisering ved å finne gjennomsnittlige bredder og lengder på de innslissede platene som har en tre-mot-tre forbindelse. For søyle-søyle forbindelser er innfestelsesdybden den innslissede platens lengde inn i treverket. For bjelke-søyle forbindelser er innfestelsesdybden den horisontale platen, ettersom bjelken ligger på søyla og deretter kuttet vertikalt («oppover»), se Figur 4.10. På figuren angir røde linjer hvor kuttet skal skje.



Figur 4.10 - Bjelke-søyle forbindelse (a); Søyle-søyle forbindelse (b)

Detaljer om skruforbindelsene hentes fra leverandørprosjekterende Woodcon sin prosjekteringsmanual, som spesifiserer skruetype, dimensjon og monteringsmetode for ulike skjøter, som dekkeskjøt, veggskjøt, dekke-vegg og bjelke på/mot søyle. Basert på illustrasjonene fra manualen, antas det at skruene skrues inn på 45° ved bjelke på/mot søyle forbindelser, og *lengden* for volumtapet beregnes ved å bruke gjennomsnittlig bredde og høyde for limtresøyler. Prod.Lim-modellen gir fire kategorier for bjelke på/mot søyle forbindelser, som illustrert i Figur 4.11.



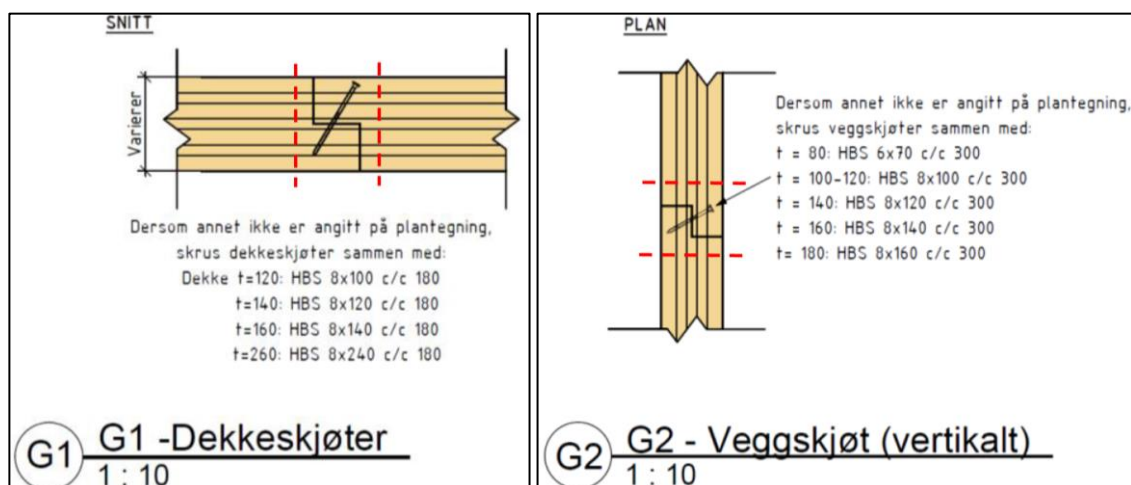
Figur 4.11 - Fire kategorier for skruforbindelser i bjelke på/mot søyle

For hver kategori beregnes lengden for volumtapet ved å bruke gjennomsnittlig bredde og høyde for limtresøylen. For første kategori benyttes gjennomsnittlig bredde for limtresøyle som grunnlag for kuttelengden. Her blir kuttelengden gjennomsnittlig bredde pluss halvparten av bredden, altså 1,5 ganger bredden på limtresøylen. For andre kategori benyttes gjennomsnittlig høyde for limtresøyle som grunnlag for kuttelengden. Kuttelengden blir gjennomsnittlig høyde pluss halvparten av høyden på limtresøylen, altså 1,5 ganger høyden. For tredje kategori benyttes lengden som bjelken er inn på søylen, målt manuelt fra Prod.Lim, pluss sikkerhetstoleransen. For fjerde kategori benyttes bredden på limtrebjelken som kuttelengde, og denne bredden er hentet fra Prod.Lim.

Volumet som kappes av bjelke og søyle for hver forbindelsestype beregnes ved å bruke gjennomsnittlige høyder og bredder for bjelke og søyle. For innslissede plater for bjelke-søyle- og skrueforbindelser benyttes det gjennomsnittlige høyder og bredder for limtrebjelker, som multipliseres med deres tilhørende kuttelengde. For innslissede plateforbindelser for søyle-søyle benyttes gjennomsnittlig bredde og høyde for limtresøyler, som multipliseres med sin kuttelengde.

For hvert utsnitt (ramme) identifiseres først antall forekomster av hver forbindelsestype, både innslissede plateforbindelser og skrueforbindelser. Deretter fastslås hvor mange ganger hvert utsnitt forekommer i Prod.Lim. Volumtapet for hver forbindelsestype i hvert utsnitt beregnes ved å multiplisere tilhørende volumtap for forbindelsene med antall forekomster innenfor det aktuelle utsnittet. Dette volumtapet multipliseres deretter med antall repetisjoner av utsnittet i limtrekonstruksjonen. Det totale volumtapet for limtrekonstruksjonen fremkommer som summen av volumtapene for alle forbindelsestyper i alle utsnitt, justert for hvor ofte hvert utsnitt forekommer i konstruksjonen.

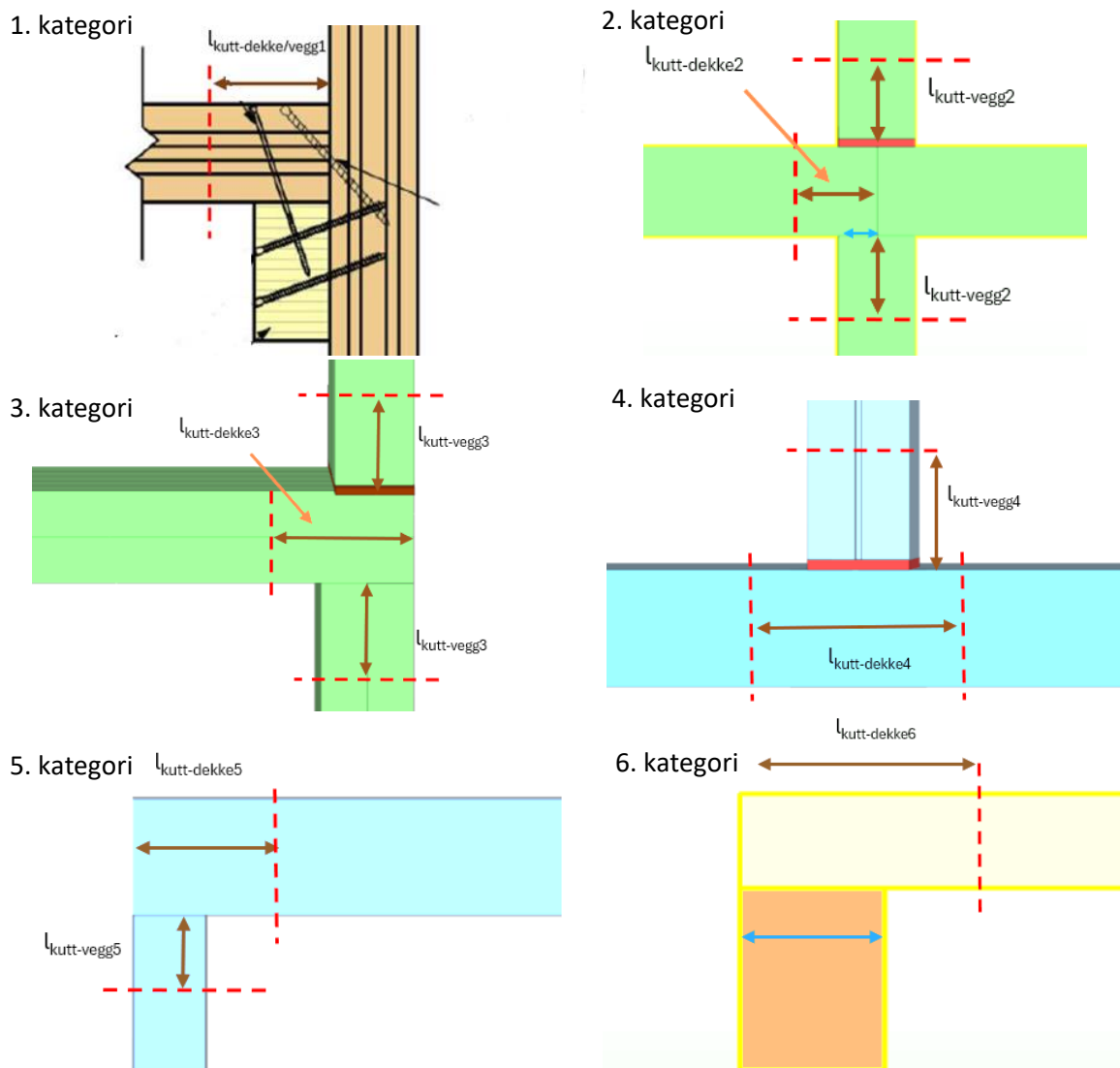
For å beregne volumtapet for massivtreelementene benyttes leppeskjød (LS) som utgangspunkt for dekke-dekke- og vegg-vegg-forbindelser, se Figur 4.12. Grunnlaget for beregningen er gjennomsnittlige dimensjoner fra Kapittel 4.3.1 samt manuell måling av LS-bredden fra Prod.Mas, som er 52 mm. For å ivareta sikkerhetstoleransen legges det til to ganger sikkerhetsmargin. Kuttelengden for disse forbindelsene settes dermed til LS-bredde pluss to ganger sikkerhetstoleransen, og volumtapet beregnes separat for kortsiden og langsiden ved å multiplisere bredde, tykkelse og kuttelengde for kortsiden, og lengde, tykkelse og kuttelengde for langsiden.



Figur 4.12 - Kuttelengde for dekke-dekke og vegg-vegg (utklipp fra Woodcon prosjekteringsmanual)

For dekke-vegg-forbindelser identifiseres seks ulike konstruksjonskategorier, se Figur 4.13. I hver kategori brukes gjennomsnittlige dimensjoner for dekker og vegger, samt manuelle målinger fra Prod.Mas og Prod.Lim der det er aktuelt.

I første kategori ligger dekket på en underliggende limtrebjelke, og kuttelengden settes til bjelkens bredde pluss halvparten av bredden. I andre kategori skrus dekket på en massivtrevegg. Her beregnes kuttelengden for dekket som innskutt lengde (målt fra Prod.Mas) pluss halvparten av veggtykkelsen, mens kuttelengden for veggens settes lik veggens tykkelse. I tredje kategori møtes dekke og vegg med skruerforbindelse, og kuttelengden for dekket beregnes som veggtykkelsen pluss halv veggtykkelse, mens veggens igjen får kuttelengde lik sin tykkelse. I fjerde kategori er dekket festet under en vegg, og kuttelengden for dekket settes til to ganger veggtykkelsen, men kuttelengden for veggens er lik tykkelsen. Femte kategori er en variant av tredje kategori, og beregnes på samme måte. I sjette kategori ligger dekket på en limtrebjelke ved byggets ytterkant. Kuttelengden beregnes her som bredden på limtrebjelken pluss halvparten av bredden, hvor verdien er målt fra Prod.Lim.



Figur 4.13 – Nummererte kategorier for dekke-vegg (utklipp fra Woodcon prosjekteringsmanual (1. kategori) og Backe BIM-modeller (2.-6. kategori))

Volumtapet for hver kategori beregnes ved å multiplisere relevante dimensjoner (bredde, tykkelse og kuttelengde) og antall forekomster telt i Prod.Mas. For dekke-dekke og vegg-vegg skilles det mellom kortsider og langsider basert på metodikken i Kapittel 4.3.2, og gjennomsnittlige dimensjoner benyttes for å beregne volumtap for hver del. Volumtapene for dekke-vegg-forbindelser beregnes tilsvarende ved å kombinere dimensjonene til dekke og vegg, og ved å telle forekomstene av de ulike kategoriene i Prod.Mas.

Det totale volumtapet for massivtre beregnes ved å multiplisere volumtap per kategori med antall forekomster og summere dette. Til slutt legges dette sammen med volumtapet fra limtrekonstruksjonen for å finne det totale volumtapet i referanseprosjektet. Den gjenbrukbare materialmengden fastsettes ved å trekke dette volumtapet fra det totale volumet av trekonstruksjonen. Differansen gir grunnlag for en prosentvis sammenligning mellom referanseprosjektet og den demonterbare løsningen, og synliggjør forskjellen i gjenbruksverdi. Antall kuttflater i trekonstruksjonen registreres også. For limtre beregnes kuttflatene basert på antall forbindelser. For massivtre baseres beregningen på antall kontaktflater, nærmere bestemt kortsider og langsider for dekke- og veggelementer, samt antall dekke-vegg-forbindelser.

Beregningen for det forkastede materialets verdi tar utgangspunkt i den opprinnelige kostnadsverdien for massivtre og limtre, summert fra Tabell 5.8. Gjenbrukbare kostnadsverdien estimeres ved å multiplisere materialkostnaden med gjenbruksverdien. Verdien av det forkastede materialet er differansen mellom den opprinnelige materialkostnaden og den gjenbrukbare kostnadsverdien, der det også beregnes en prosentforskjell.

Det forkastede materialets kostnadsverdi blir benyttet videre for å analysere den økonomiske konsekvensen på totalkostnaden for hele trekonstruksjonen. Ved å trekke verdien fra den opprinnelige totalkostnaden beregnes en bevart totalkostnad. Deretter beregnes prosentnedgangen ved å sammenligne den bevarte kostnaden med den opprinnelige totalkostnaden.

4.7. Intervju

Gruppen har valgt å gjennomføre ett åpent, individuelt intervju i sammenheng med casestudiet om Stabburmoen skole. Intervjuet er gjennomført med Odd Grøthe (heretter respondenten), som er daglig leder i Dimensjon AS og rådgivende ingeniør byggeteknikk for trekonstruksjon (RIBtre) ved Stabburmoen skole. Målet med intervjuet var å tilegne seg informasjon om hvordan det eksisterende skolebygget er løst rent teknisk, økonomisk og praktisk, og siden åpent, individuelt intervju lønner seg når det er få intervjuobjekter [39, p. 162].

Samtalen fant sted som et nettbasert videomøte via Teams den 26.02.2025. Studentene deltok fra et grupperom på universitetet, mens respondenten deltok fra sitt kontor i Oslo. Hensikten med intervjuet var å innhente informasjon om eksisterende løsninger for limtre- og massivtrekonstruksjonen, samt tilhørende forbindelser. I tillegg var det fokus på designprosessen med tanke på kostnader, materialeffektivitet og fremtidig mulighet for gjenbruk. Hensikten ble sendt til respondenten på forhånd via e-post.

Forberedelsene til intervjuet ble gjennomført i tråd med Kapittel 8.3 «Det åpne individuelle intervjuet» [39, pp. 162-176]. Arbeidet inkluderte å definere intervjuets bakgrunn og hensikt, respondentens rolle, en overordnet strategi, aktuelle temaer og konkrete spørsmål. Spørsmålene som ble utarbeidet, tok utgangspunkt i problemområdet og forskerspørsmålene presentert i Kapittel 3. Alt forberedelse materiale er dokumentert i Vedlegg D. Det ble satt av 1,5 time til intervjuet, og respondenten ga samtykke til både lyd- og videoopptak, samt transkribering av samtalen. Intervjuet ble gjennomført via Teams, som også ble brukt til automatisk transkribering. Det innsamlede materialet inneholder både kvalitative og kvantitative data, og er vedlagt som Vedlegg E.

Etter gjennomføringen av intervjuet, ble transkriberingen gjennomgått og revidert for å sikre korrekt språk og gjengivelse av innhold. Fyllord og unødvendige uttrykk ble fjernet. Den reviderte transkripsjonen er presentert i Vedlegg F. Resultatet fra intervjuet er presentert i Kapittel 5.4.

5. Resultat

5.1. Resultater fra litteraturstudie

Litteraturstudien har som hensikt å understøtte det overordnende problemområdet til oppgaven. Studien har tatt utgangspunkt i relevante forskningsartikler, rapporter standarder og regelverk, og er tematisk strukturert etter: eksisterende standarder og regelverk knyttet til DfDR, verktøy for praktisk gjennomføring av DfDR, en vurdering av ISO 20887, videre forskning til ISO-standardens forbedringspotensialer, eksisterende DF og sine anvendelser.

5.1.1. Omtalelse av DfDR i TEK17

TEK17 omtaler ikke begrepet «Design for demontering og ombruk (DfDR)». Forskriften er midlertidig innom tematikken til oppgaven i § 9-5. Bygget skal sikres en tilstrekkelig levetid for minimal avfallsmengde, hvor det er krav om å velge materialer som er egnet for ombruk og gjenvinning. I tillegg er det krav om at byggverk skal prosjekteres for senere demontering, dersom det er innenfor praktiske og økonomiske rammer.

- (1) «Byggverket skal sikres en forsvarlig og tilsiktet levetid slik at **avfallsmengden over byggverkets livsløp begrenses til et minimum**» [45].
- (2) «Det skal velges **produkter som er egnet for ombruk og materialgjenvinning**. Byggverk skal **prosjekteres og bygges slik at det er tilrettelagt for senere demontering når dette kan gjennomføres innenfor en praktisk og økonomisk forsvarlig ramme**» [45].

5.1.2. Omtalelse av DfDR i PBL

Resultater fra undersøkelser av PBL viser at DfDR ikke nevnes eksplisitt i standarden. PBL bemerker tematikken ved lovens formålsbeskrivelse, som skal fremme bærekraftig utvikling og vektlegge langsiktige løsninger:

- (§ 1-1) «Loven skal **fremme bærekraftig utvikling** til beste for den enkelte, samfunnet og framtidige generasjoner. Det skal **legges vekt på langsiktige løsninger**, og konsekvenser for miljø og samfunn skal beskrives» [46].

PBL henviser videre til Kommunal- og distriktsdepartementet (KDD) i §29-10 [46], som gir forskrifter for ivaretagelse av miljø. KDD nevner ikke DfDR spesifikk, men tematikken benevnes gjennom tre relevante punkter for ombruk [47]. KDD påpeker at ombruk er en sentral del av fokuset til samfunnsutviklingen og at ombruk er en del av de nåværende nasjonale forventningene for perioden 2023-2027:

- «**Kommunene har en sentral rolle i omstillingen gjennom forvaltningen av egne arealer, infrastruktur og eiendommer, i utformingen av avfallstjenester, lokalisering og tilrettelegging av avfallsbehandling og ved å legge til rette for ombruk av eksisterende bygninger og anlegg og økt materialgjenvinning**» [47].

*«Fylkeskommunene og kommunene legger gjennom sin areal- og samfunnsutvikling og virksomhetsutøvelse til rette for omlegging til en mer sirkulær økonomi, der **ressurser og eksisterende bebyggelse og anlegg brukes lengst mulig og i større grad ombrukes og oppgraderes**» [47].*

*«Helhetlig masseforvaltning avklares i regionale og kommunale planer. Planer for større bygge- og anleggsarbeider avklarer hvordan overskuddsmasser skal disponeres og hvordan nødvendig areal til håndteringen skal sikres. **Muligheten for ombruk og materialgjenvinning vurderes, og massebalanse bør tilstrebes**» [47].*

5.1.3. NS 3691-3:2025

Den norske standarden NS 3691 er utarbeidet av komiteen SN/K 267 *Tre og trebaserte produkter*, og er en del av et prosjekt kalt SirkTre, støttet av Norges forskingsråd [48]. Standarden omhandler evaluering av returtre som benyttes som et nytt produkt, enten som heltre eller som flis til trebaserte produkter. NS 3691 serien bestående av tre deler, Del 1: Terminologi, Del 2: Renhet, Del 3: Visuell styrkesortering. Dokumentet gir bestemmelser til visuell styrkesortering av returtre for å benyttes på ny i bærende konstruksjoner eller som elementer i produkter som limtre og krysslimt tre. Det beskrives at styrkesorteringen vurderer forringelser i trestrukturen dannet fra tidligere bruk og demontering, samt fra naturlige virkefeil. Ettersom dokumentet ikke er tilgjengelig for studentabonnement i Standard Norge, utelukkes en mulig videreanalyse av standarden, men standarden er allikevel et poeng som punkteres i diskusjonen i Kapittel 5.5.

5.1.4. Norsk standard for ombruk under arbeid

Gruppen er gjort kjent at en ny norsk standard for ombruk er under utvikling, opplyst av eksterne veileder [43]. Standarden er beskrevet til å bygge videre på ISO 20887, men befinner seg fortsatt i en tidlig fase. Det foreligger per nå ingen offentlig tilgjengelig informasjon om verken innhold eller fremdrift. Gruppen ble henvist til en fagperson involvert i arbeidet, men har ikke lyktes i å oppnå kontakt. Standarden blir dermed ikke avdekket i oppgaven, men illustrerer at det er relevant utvikling på området.

5.1.5. DfDR i ISO 20887

ISO 20887 er delt inn i to hovedkategorier, prinsipper for *tilpasningsevne* og prinsipper for *demontering*. Tilpasningsevne består av tre prinsipper som fokuserer på bygningers fleksibilitet til å møte skiftende behov, enten det gjelder mindre justeringer, større modifikasjoner eller utvidelser som legger til rette for nye funksjoner eller økt kapasitet [4]. Disse prinsippene sikrer at bygninger kan tilpasses uten omfattende inngrep, noe som forlenger levetiden og reduserer ressursforbruket. Demonteringsprinsippene består av syv prinsipper, som vektlegger hvordan bygninger og deres komponenter kan demonteres effektivt og sikkert. De inkluderer enkel tilgang til materialer, standardisering av design og støtte for gjenbruk og resirkulering, alt med fokus på å minimere avfall og maksimere ressursutnyttelse [4]. Under er en beskrivelse av de ulike relevante prinsippene med forklaringer hentet fra ISO 20887.

ISO 20887 Standarden forklarer at design for demontering og tilpasning «Design for Disassembly and Adaptability (DfD/A)» handler om å lage bygninger som kan demonteres, gjenbrukes og tilpasses endrede behov gjennom livssyklusen [4]. Målet til standarden er å bidra til å redusere avfall, øke gjenbrukspotensialet for materialer, forlenge bygnings funksjonelle levetid og bidra til konseptet sirkulær økonomi. Dette innebærer eksplisitte metoder i designfasen for optimal gjenvinning av spesielle materialer og komponenter, uten å skade det som fjernes og det omkringliggende. Samtidig skal designet legge til rette for fremtidige endringer knyttet til bruk og omgivelser.

Før de konkrete prinsippene for tilpasningsevne og demontering gjennomgås, understreker ISO 20887 viktigheten av at prosjekter vurderes helhetlig med tanke på om DfD/A er praktisk gjennomførbart. Prinsippenes anvendbarhet og relevans må ses i lys av prosjektets rammebetingelser, målsetninger og krav. Standarden fremhever at det første og mest grunnleggende steget er å definere byggets nåværende og potensielle funksjoner, dets forventede levetid, samt gjeldende regulatoriske, politiske og øvrige krav. Disse forholdene legger føringer for hvordan DfD/A-prinsippene, presentert i Tabell 5.1, kan implementeres. Ved vurdering av designvalg, systemer, komponenter og materialer, anbefaler ISO 20887 at det gjennomføres grundige analyser som belyser mulige avveininger. Dette bør gjøres ved hjelp av scenariobasert vurdering og etablerte metoder som livssyklusanalyse (LCA) og livssyklus kostnadsanalyse (LCC), som gir innsikt i både miljømessige og økonomiske konsekvenser over byggets levetid.

Tabell 5.1 - ISO 20887 sine DfD/A-prinsipper med forklaring [4]

	Prinsipper	Underprinsipper	Forklaring
Tilpasningsevne	5.2.2 Allsidighet	-	Evnen til å tilpasse seg ulike funksjoner med mindre systemendringer.
	5.2.3 Konvertibilitet	-	Evnen til å imøtekomme vesentlige endringer i brukerbehov ved å gjøre modifikasjoner
	5.2.4 Utvidbarhet	-	Evnen til å imøtekomme en vesentlig endring som muliggjør tillegg av nytt rom, funksjoner, kapasitet eller egenskaper.
Demontering	5.3.2 Enkel tilgang til komponenter og tjenester	-	Design for lett tilgang til materialer med minimalt skadeomfang for tilstøtende komponenter, eller koblinger, spesielt de med kortest forventet levetid.
	5.3.3 Uavhengighet	5.3.3.2 Reversible forbindelser (RF)	Bruke RF i stedet for faste festemidler for å koble produkter eller komponenter, slik at materialet og tilkoblinger (f.eks. skruer, bolter) kan gjenbrukes.
	5.3.4 Unngå unødvendige behandlinger og overflater	-	Overflatebehandlinger som hindrer gjenbruk eller resirkulering av underlaget bør unngås. Eventuelle behandlinger bør ha et spesifikt formål som f.eks. brann- og/eller korrosjonsbeskyttelse.

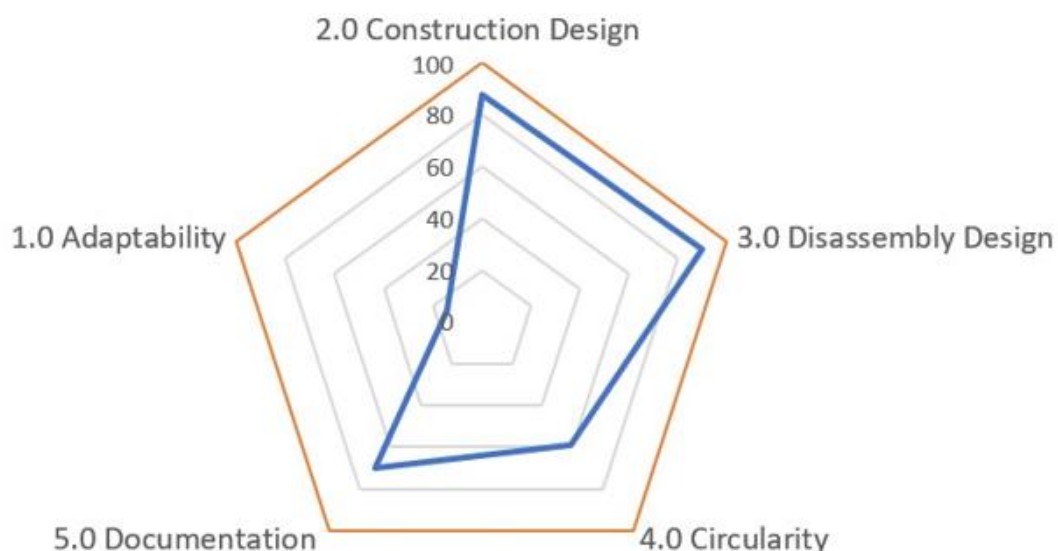
	5.3.5 Støtte gjenbruk - (sirkulær økonomi) forretningsmodeller	5.3.5.2 Gjenbruk- barhet	Evne materialer, produkter, komponenter eller systemer har til å ombrukes i sin opprinnelige form mer enn én gang og samtidig opprettholde sin verdi og funksjonelle egenskaper, for å muliggjøre ny bruk til samme eller annet formål.
		5.3.5.3 Renover- barhet	Evnen et produkt, en bygning eller annen konstruert eiendel har til å gjenopprette de estetiske og funksjonelle egenskapene til en tilstand som er egnet for videre bruk.
		5.3.5.4 Økt resirkulering	Bruke resirkulerte materialer, enten direkte eller som råmateriale i et produsert produkt, for å støtte markedet for resirkulering av avfallsmaterialer fra bygninger og andre sektorer.
		5.3.5.5 Resirkuler- barhet	Evnen til at ulike komponentdeler og materialer kan separeres og bearbeides fra produkter og systemer, og deretter brukes som råmateriale til samme eller en ny funksjon.
	5.3.6 Enkelhet	-	Design systemer med kvalitet til å være oversiktlig, lett forståelig og møte ytelseskrav med minst mulig tilpasning.
	5.3.7 Standardisering	-	Omhandler bruk av standardiserte komponenter, produkter eller prosesser for å oppfylle krav.
	5.3.8 Sikkerhet ved demontering	-	ISO krever at enhver komponent, modul eller system som skal demonteres har en demonteringsplan som vurderes allerede i designfasen.

5.1.6. Artikkel. Developing a grading tool for sustainable design of structural systems in buildings

Artikkelen «Developing a grading tool for sustainable design of structural systems in buildings» omhandler det å utvikle et verktøy for karaktersetting av bærekraftig design til strukturelle bygningssystemer [49]. Masteroppgaven er skrevet av Andres Oswaldo Zabala Mejia ved Lindköping University og publisert i 2021. Det er utviklet et digitalt EcoDesign-verktøy som tar utgangspunkt i prinsippene for Design for Deconstruction and Adaptability (DfD/A), og er strukturert i henhold til standarden ISO 20887. Verdisettingsmetoden består av et indikatorsystem med fem hovedkategorier, som igjen er delt inn i 20 prinsipper og 54 strategier. Den systematiske vurderingen av bærekraft i bygningssystemers strukturelle utforming har særlig fokus på materialeffektivitet og muligheter for sirkulær ressursbruk.

Verktøyet er struktur i tre forskjellige faser: prosjektbeskrivelse, DfD/A-vurdering og resultater [49]. I første fase registrerer brukeren grunnleggende informasjon om byggeprosjektet, som inkluderer tekniske rammer, strukturelle system og bærekraftsmål. Målet med prosjektbeskrivelsen er å sikre at vurderingen bygger på et klart og relevant utgangspunkt. Del to er kjernen til verktøyet hvor de 54 strategiene som er fordelt på 20 prinsipper vurderes gjennom en tre-punkts skala (0, 0.5, 1). Skalaen balanserer brukervennligheten og nytteverdi for prosjektet, og gir rom for nyanserte vurderinger. Den tredje og siste fasen er resultatdelen hvor poengene fra vurderingene summeres og normaliseres for en samlet vurdering innen de fem hovedkategoriene. Resultatene visualiseres i et radardiagram, vist i Figur 5.1, og det beregnes i tillegg en total bærekraftsindeks kalt ReBuilding Index fra (1-100). En høyere verdi vil indikere et større potensiale for gjenbruk og anvendelse i nye bruksområder, og vil fremme bærekraftig utvikling.

Verktøy er utviklet som en Excel-fil med syv faner, tre trinn for vurdering, to vedlegg for brukerstøtte og en velkomstfane [49]. Verktøyet er dessverre ikke tilgjengelig på nett, og studiegruppen har ikke lyktes i å få kontakt med utvikleren for tilgang. Verktøyet beskrives til å følge standard Excel-programvare, som ikke krever administratorrettigheter for installasjon. Håndteringen skal være enkel sammenlignet med andre programmeringsprogramvarer.



Figur 5.1 - Illustrasjon av et resultat fra DfD/A-vurderingen [49]

5.1.7. Rapport. Att mäta demonterbarhet och återbrukbarhet hos träbyggnader

Rapporten «Att mäta demonterbarhet och återbrukbarhet hos träbyggnader», som er skrevet av Ylva Sandin og utgitt av RISE Research Institutes of Sweden AB i 2022, omhandler hvordan en kan måle hvor lett det er å demontere og gjenbruke trebygg [50]. Forskningen bygger videre på forskningsprosjektet InFuURWood. Arbeidet i rapporten er delt i tre deler. Først analyseres demonterings- og gjenbruksprosessen til seks eksisterende casestudier. Her beskrives styrker, svakheter og tilkoblinger til prinsipper i ISO 20887:2020. Videre analyseres et utkast til vurderingsverktøyet. Til slutt gjøres en vurdering av hvordan verktøyet kan videreutvikles.

Resultater fra casestudier kom fram til en sjekkliste med elleve praktiske løsninger til å oppnå design for demontering og gjenbrukbarhet, vist i punkter under [50]. Punktene illustrerer hvordan ISO 20887:2020 kan brukes i praksis. Videre i oppgaven plasseres arbeid fra casestudiene innunder punktene til ISO standarden, for å konkretisere eksempler på hvordan et trebygg kan være i tråd med standardens råd. Denne ISO-punktlisten er presentert i Tabell 5.2.

Tabell 5.2 - Konkrete eksempler til anvendelse av ISO 20887-prinsippene [50]

Prinsipper	Konkrete eksempel
Alminnelige demonteringsprinsipper (5.3.1)	Bruk av større bygningselementer (bjelker, søyler eller volumer), som samtidig har dimensjoner og vekter til enkel transport.
	Løfteøyer fra enheten blir liggende i strukturen for fremtidig demontering.
Enkel tilgang til komponenter og installasjoner (5.3.2)	Rammen har en enkel og oversiktlig utforming, f.eks. med et søyle- bjelkesystem eller i et fåtall moduler.
	Mekaniske og elektriske installasjoner er plassert med tanke på demontering, f.eks. i spesielle sjakter.
Uavhengighet (5.3.3)	a. Alminnelig - Installasjonen lages uavhengig av rammen slik at rammen og installasjonen kan skilles uten skade. Forbindelser mellom volumer utformes til å enkelt demonteres.
	b. Reversible knutepunkter - Demonterbare skrue- eller bolteforbindelser benyttes. Skjøter utformes til at elementer kan skilles uten å bli skadet.
Unngå unødvendige behandlinger og belegg (5.3.4)	Ikke impregner tre.
Støtte til forretningsmodeller for ombruk (sirkulær økonomi) (5.3.5)	Huset er industrielt produsert med prefabrikkerte gjenbrukbare elementer.
	Benytt komponenter med lang dokumentert levetid.
	Holdbare søyler og bjelker bygger opp systemet.
	Lufttetthet oppnås uten bruk av plastfolie i et rammesystem med KLT og IspTimber-elementer.
	Gulvelementer skal være limfrie og gjenbrukbare.
Enkelhet (5.3.6)	Prefabrikkerte elementkonstruksjoner
	Lett lesbare og forståelige rammestrukturer (søyle- bjelkesystem)
Standardisering (5.3.7)	Bruke prefabrikkerte elementkonstruksjoner

Demonteringssikkerhet (5.3.8)	I-bjelke hadde velkjente og gode egenskaper, som gjenkjent lim for gjenvinneren.
	Demonteringsprosess som ikke trenger ekstraordinære verktøy.
	Benytte få og vanlige verktøy for demonteringsprosessen
	Bruke reversible bolteforbindelser
	Risikoen er minimal for usikre forbindelser siden monteringen skjer i henhold til anvisningen.

Rapporten inkluderer et kapittel om aspekter ved ISO-standarder som er mindre tydelig [50]. Gjennom arbeidet med casestudiene, var det fire ting som ble påpekt til å være vanskelig å assosiere med standarden. Det var ikke tydelig om noen av prinsippene dekker *værbeskyttelse* i standarden. Det var heller ikke uttrykt for *enkel transport*, kun nevnt under prinsippet standardisering at standardiserte deler kunne lette transport, lagring og gjenbruk. Prinsipper tar heller ikke opp betydningen av *fysisk merking* av elementer eller komponenter. Det påpekes henholdsvis at det gis en sjekklister om informasjonsoverføring, som angir at produkter skal sjekkes for tilgjengelig informasjon i form av eksempelvis en strekkode eller RFID-merking. Det mangler også formulering om strukturens *lesbarhet*. Standarden beskriver kun at enkelhet er en kvalitet ved et system som er designet for å være enkelt, lett å forstå og for å kunne oppfylle ytelseskrav med minst mulig tilpasning.

Rapporten forklarer at gjennom seks casestudier er det identifisert konkrete løsninger som enten forenkler eller vanskeliggjør demontering og gjenbruk [50]. De positive faktorene er presentert til å være:

- God planlegging i prosjekteringsfasen med detaljert demonteringsanvisninger
- Merkede byggelementer og kjente produkter
- Struktur som er enkel å lese og demontere
- Bruk av reversible forbindelser og ubehandlede materialer
- Standardisering og bruk av få, vanlige verktøy

Resultater fra bruken av verktøyet og de positive faktorene ovenfor viser flere utviklingsområder [50]. Punktene over kan bli egne nye indikatorer til verktøyet. Videre bør verktøyet struktureres mer i tråd med ISO 20887 oppbygning, hvor det bør være færre og mer relevante vurderingspunkter. Objektive målemetoder kombinert med overkommelige arbeidsmengder bør inkluderes. Det bør også være praktiske erfaringer fra casestudier med som eksempler. Det understrekes at verktøyet skal kunne brukes på systemnivå, elementnivå og komponentnivå. De ulike indikatorene kan være et måltall, et krav om undersøkelser eller møter, og et krav om dokumentasjon som garantibevis. Rapporten kommer med forslag til egne indikatorer:

- *Enkel tilgang til komponenter*
- *Uavhengige konstruksjonselementer*
- *Reversible forbindelser*
- *Ingen unødvendige behandlinger*

- *Gjenbrukbarhet og sirkularitet*
- *Enkelhet og standardisering*
- *Sikkerhet ved demontering*

Som avgrensing og videre utvikling, framhever rapporten at dette prosjektet har fokusert på stammen i bygningen, den bærende strukturen som har lengst levetid [50]. ISO 20887 anbefaler også vurdering på komponent-, delkomponent- og materialnivå. Spørsmålet er om disse nivåene bør ha egne måleindikatorer. Det anbefales at aktører innen trehusbygging må sammen utvikle kriteriene for hva som utgjør et rettferdig og nyttig verktøy.

5.1.8. Masteroppgave. Detachable Connections for Circularity of Timber Buildings

Masteroppgaven «Masteroppgave. Detachable Connections for Circularity of Timber Buildings» er skrevet av Abdulrahman Al Shamaa og Khadeen Saleh ved Chalmers tekniska högskola i Gøteborg, Sverige, i 2021 [51]. Arbeidet ble gjennomført ved Institutt for arkitektur og byggteknikk, under avdeling for konstruksjonsteknikk og forskningsgruppen for lette konstruksjoner. Formålet med studien er å utvikle forbindelsesløsninger som muliggjør effektiv montering og demontering av trekonstruksjoner, med mål om å øke gjenbrukspotensialet for konstruksjonselementer i fremtidige byggeprosjekter.

Studien vurderer en rekke tilkoblingsmetoder og utvikler et vurderingssystem for Design for Demontering (DfD), basert på syv kriterier hentet fra Pozzi (2019): antall tilkoblede elementer, kompleksitet, prefabrikeringsarbeid, tilgjengelighet, montørens ferdigheter, synlighet og styrke [51]. Forbindelsestypene analyseres i tre hovedkategorier: snekkerforbindelser, mekaniske forbindelser og festeforbindelser.

For videre arbeid i denne studien ble et utvalg relevante forbindelsestyper trukket ut fra den omfattende analysen presentert av Al Shamaa og Saleh. Utvalget er basert på forbindelser som vurderes som relevante i sammenheng med Stabbursmoen casestudie, demonterbarhet og gjenbruk i trekonstruksjoner. De utvalgte forbindelsene er systematisert og kategorisert basert på deres opprinnelige verdi, det vil si vurderingene for demonterbarhet (DfD), gjenbrukspotensial for forbindelsen, og gjenbrukspotensial for det tilknyttede treverket. Utvalget og bearbeidelsen etterfølger i Tabell 5.3, som presenterer en oversikt over de utvalgte forbindelsene, sortert etter demonterbarhet fra høy til lav.

Tabell 5.3 - Demonterbarhet og gjenbrukspotensial av ulike forbindelser [51]

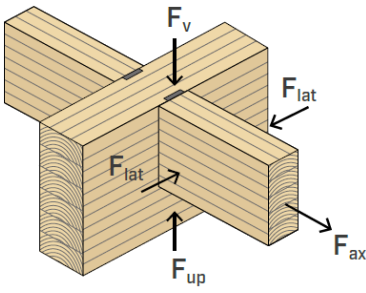
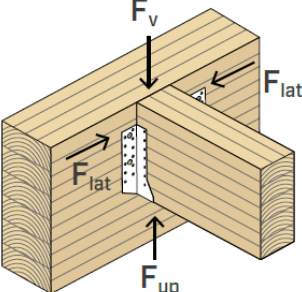
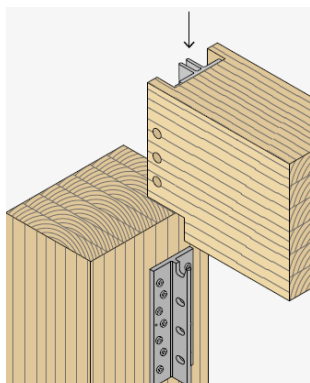
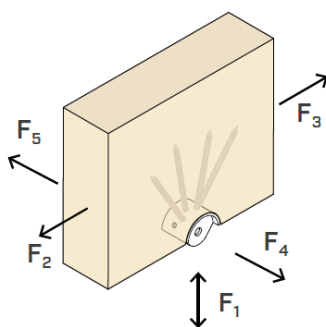
Forbindelsestype	Demonterbarhet (DfD)	Gjenbrukspotensial (forbindelse)	Gjenbrukspotensial (treverk)
Krokforbindelser	Høy – enkel å demontere med minimal innsats, kan lett frakobles med enkle verktøy	Høy – kan gjenbrukes flere ganger uten skade	Høy – påfører lite skade på treverket de er koblet til

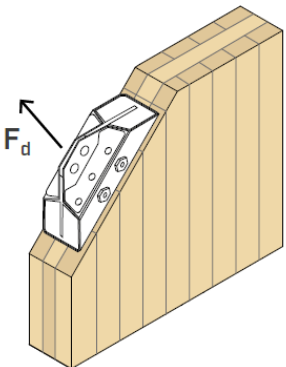
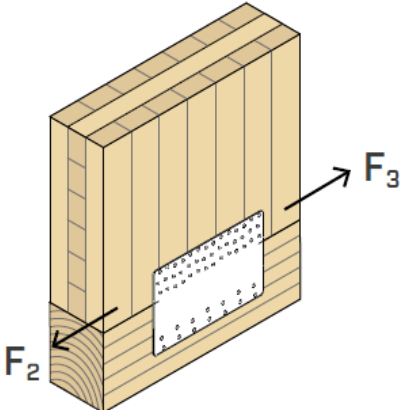
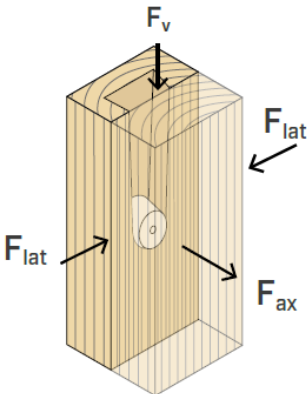
X-RAD	Høy – enkelt å demontere med enkle verktøy	Høy – gir høy gjenbruk av forbindelsen	Høy – treverket kan gjenbrukes uten skade
Metall hengere (eksterne)	Høy – designet for enkel montering og demontering	Høy – kan gjenbrukes enkelt	Høy – forårsaker minimal skade på tilknyttede treverket
Bolter	Høy – lett å demontere og fjerne	Høy – kan gjenbrukes uten skade	Moderat – skader treverket der forbindelsen er, og «connected part» kan ikke gjenbrukes
Metall hengere (interne)	Moderat – demontering avhenger av hvilken installasjonsmetode	Moderat – kan gjenbrukes, men krever forsiktig fjerning (tidskrevende)	Moderat – forårsaker noe mer skade på treverket enn eksterne hengere
Krysspostforbindelse	Moderat – skjulte koblinger hemmer demontering	Moderat – enkelte festemidler må fjernes	Moderat – skader treverket der forbindelsen er, og «connected part» kan ikke gjenbrukes
Skruer	Moderat – tidskrevende å fjerne, spesielt når mange skruer er brukt	Moderat – kan bli skadet ved demontering	Moderat – kan forårsake skade på treverket, og «connected part» kan ikke gjenbrukes
Metall plater	Lav – kan være vanskelig å demontere, spesielt når de er permanent festet	Moderat – kan gjenbrukes hvis fjernet forsiktig (tidskrevende)	Moderat – skader treverket, og «connected part» kan ikke gjenbrukes
Dybler	Lav – vanskelig å demontere uten å skade materialet	Lav – ofte skades forbindelsen under demontering	Moderat – dybler kan skade treverket, og «connected part» kan ikke gjenbrukes

5.1.9. Resultat fra søk etter demonterbare forbindelser

Resultater av søk etter demonterbare forbindelser som Rothoblaas tilbyr, er presentert i Tabell 5.4. Her presenteres hvilken type forbindelse det er, med beskrivelse og fordeler og ulemper for hver av forbindelsene. Informasjonen er hentet fra hjemmesiden til Rothoblaas med tilhørende produktdatablad for hver av forbindelsene.

Tabell 5.4 - DF fra Rothoblaas med kort beskrivelse

Type med illustrasjon	Beskrivelse
UV T [52] 	UV T forbindelsen er en skjult krokforbindelse som benyttes i BB-konstruksjoner. Den anvender svalehaleskjøt for å koble bjelkene sammen. Forbindelsen er designet for å håndtere både vertikale, horisontale og aksiale belastninger. 
Metal hangers (BSA) [53] 	BSA-forbindelsen benytter utvendige vinger for BB-forbindelser og festes med skruer. Metallhengerne er designet for å håndtere vertikale og horisontale belastninger.
ALUMEGA [54] 	ALUMEGA er sammenlignbar med UV-T, men benytter en krokforbindelse med bolter mellom de to sammenkoblingene. Den er designet for BB- og SB-konstruksjoner. Med større mulighet til noe rotasjon enn UV-T for å sikre leddet oppførsel, kan den håndtere større spennvidder. Forbindelsen tåler vertikale, horisontale og aksiale belastninger.
RADIAL [55] 	Typen RADIAL består av en innfestet stålsirkel med skruer, som sammenkobles til andre elementer med bolter. Forbindelsen har en bred anvendelse, og kan brukes til å sammenkoble bjelker, søyler og vegger. Den er designet for å håndtere både statiske og dynamiske belastninger.

X-RAD [56]  The diagram shows a 3D perspective of the X-RAD corner connector. It is a white, L-shaped metal bracket with several circular holes for screws. It is shown being installed into the corner of a wooden frame made of vertical studs. A force vector F_d is shown pointing away from the corner joint.	X-RAD brukes til hjørneforbindelser mellom dekke-vegg, samt mellom vegg-vegg. Systemet er primært utviklet for massivtrelementer, men kan også benyttes med limtre. Forbindelsen premonteres på fabrikk. Forbindelsen er designet for å håndtere både statiske og dynamiske belastninger, inkludert seismiske krefter.
TITAN PLATE T [57]  The diagram shows a 3D perspective of the TITAN PLATE T connector. It is a rectangular metal plate with a grid of small circular holes. It is shown being installed between two vertical wooden studs. Two force vectors are shown: F_2 pointing horizontally from the left stud and F_3 pointing horizontally from the right stud.	TITAN PLATE T brukes til forbindelser mellom DD, VD og VV. De er designet for å håndtere skjærbelastninger, og leveres i ulike størrelser for å dekke forskjellige behov og krav til belastning.
WOODY [58]  The diagram shows a 3D perspective of the WOODY connector. It is a cylindrical metal pin with a central hole. It is shown being inserted into a wooden joint. Four force vectors are shown: F_v pointing vertically down on top of the joint, F_{lat} pointing horizontally from the left and right sides, and F_{ax} pointing horizontally from the front side.	Forbindelsen benyttes mellom VD, DD og VV, og er basert på svaletaleskjøt. Den er designet for å håndtere både vertikale og horisontale belastninger.

5.2. Resultater til casestudie

5.2.1. Resultater for analysen av trekonstruksjonen

Resultater fra trekonstruksjonsanalysen, gjennomført i Kapittel 4.3.1, viser antall og materialevolum for de representative underkategoriene for massivtre (KLT) og limtre i Tabell 5.5. Beregningene viser at massivtre, inkludert dekker, vegger og amfi, har et totalt volum på 797 kubikkmeter. Resultater for limtre, inkludert bjelker og søyler, gir et totalvolum på 382 kubikkmeter.

Tabell 5.5 – Antall og volum for massivtre- og limtreelementer

Element	Antall	Volum [m ³]	Totalt volum [m ³]
Dekker (KLT)	137	582	797
Vegger (KLT)	145	185	
Amfi (KLT)	58	29	
Bjelker	261	291	382
Søyler	193	91	

Resultater for beregning av gjennomsnittlige dimensjoner for massivtre- og limtreelementer (ekskludert amfi), gjennomført i Kapittel 4.3.1, er lagt frem i Tabell 5.6. Resultatene viser de gjennomsnittlige dimensjonene for bredde, tykkelse/høyde og lengde for de representative underkategoriene.

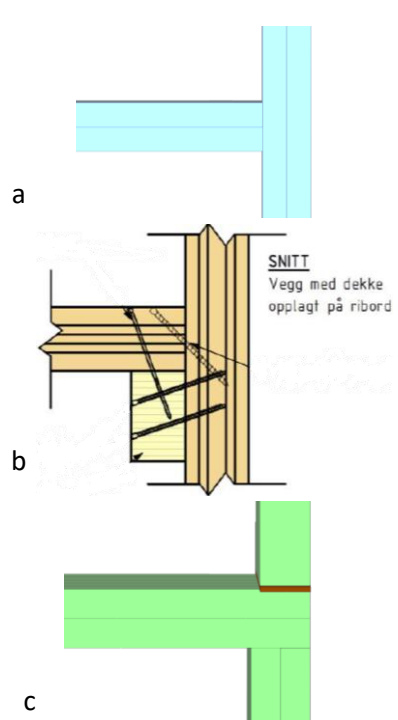
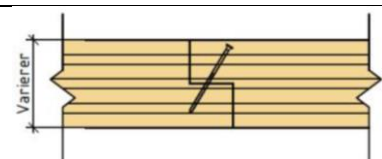
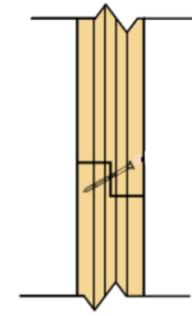
Tabell 5.6 - Gjennomsnittlige dimensjoner for massivtre- og limtreelementer

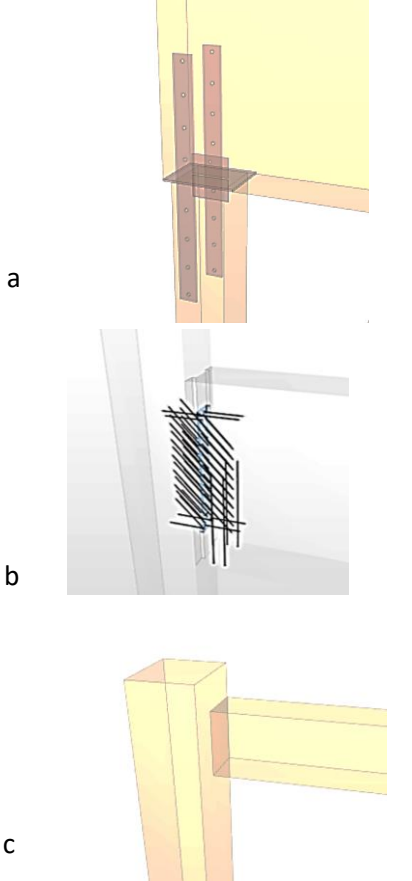
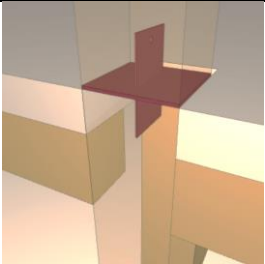
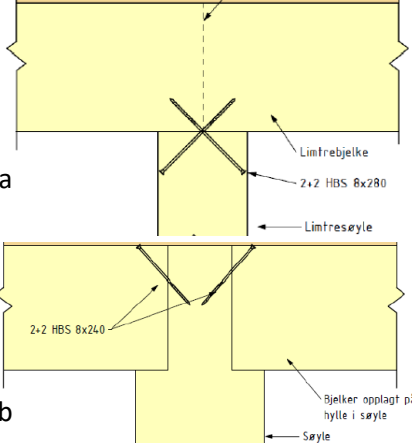
Element	Bredde [mm]	Tykkelse/høyde [mm]	Lengde [mm]
Dekke (KLT)	2 360	150	10 340
Vegg (KLT)	2 520	120	4 420
Bjelke	210	490	6 680
Søyle	250	300	5 300

5.2.2. Resultater for analyser av eksisterende forbindelsessystemet

Resultater til analysen av forbindelsessystemet, gjennomført i Kapittel 4.3.2, er presentert under i Tabell 5.7. Tabellen viser alle de ulike tre-mot-tre forbindelseskategoriene til konstruksjonen, inkludert en kort beskrivelse av utførelse, illustrasjon og antall.

Tabell 5.7 - Eksisterende tre-mot-tre forbindelsene i trekonstruksjonen

Kategori	Beskrivelse	Illustrasjon	Antall
Dekke-vegg (DV)	Forbindelsen mellom dekker og vegger utføres med skruer på tre måter: a) Festes direkte til veggelementer b) Festes i underliggende støttebjelker c) Festes mellom to veggelementer	 a b c SNITT Vegg med dekke opplagt på ribord	91
Dekke-dekke (DD)	Dekkene sammenføres ved hjelp av skruer. Skjøtene mellom elementene er utformet som leppeskjøter.	 Varierer	211
Vegg-vegg (VV)	Forbindelsene mellom veggelementene består av skruer. Veggskjøtene er utført som leppeskjøter.		120

Bjelke-søyle (BS)	Forbindelsen mellom bjelker og søyler utføres på tre måter: a) Innslissede plater og dybler, samt påfesteplater på sidene (148 stk.) b) Krokforbindelser for å koble bjelken til søylen. (108 stk.) c) Skrudde bjelker til søylene (143 stk.)	 a b c	399
Søyle-søyle (SS)	Søyleforbindelsene etableres ved bruk av innslissede stålplater og dybler.		58
Bjelke-bjelke (BB)	Forbindelsen mellom bjelker festes med skruer på to måter: a) Bjelker som festes sammen, ofte med søyle-bjelke-konstruksjon b) Bjelker på opplagt hylle festes i søyle-bjelke-konstruksjon	 a b	55

5.2.3. Resultat for økonomisk analyse av den originale trekonstruksjonen

Resultater fra den økonomiske analysen av den opprinnelige trekonstruksjonen, gjennomført i Kapittel 4.4.1, er presentert i Tabell 5.8. Analysen omfatter hovedkategoriene massivtre-, limtre-, stålkonstruksjonen samt kostnader til knutepunkter. Detaljerte beregningene for hver av konstruksjonstypene er gitt i Vedlegg B, under regnearket «Økonomisk analyse Org.». Kostnadsberegningene viser at massivtrekonstruksjonen har en total kostnad på 9 470 439 kr, mens limtrekonstruksjonen utgjør 5 666 601 kr. Stålkonstruksjonen er estimert til 904 824 kr. I tillegg er det lagt inn en påslagskostnad for knutepunkter på 1 443 408 kr. Summert, koster hele den opprinnelige trekonstruksjonen totalt 17 481 272 kr.

Tabell 5.8 - Kostnadsberegninger til hele den originale trekonstruksjonen

Konstruksjonstype	Antall	Enhet	Kostnad [kr]
Massivtre	797	m ³	9 470 439
Limtre	383		5 666 601
Stål	1,76		904 824
Knutepunkter	9	% påslag	1 443 408
Totalt:			17 481 272

Videre viser Tabell 5.9 resultater fra delanalysen til kostnader for ulike forbindelsestyper brukt i knutepunktene, utarbeidet i Kapittel 4.4.2. Beregninger viser at prisen for innslissede plater i tre-mot-tre (TT)-forbindelser utgjør 40,2 % av den totale knutepunktskostnaden, mens tre-mot-betong (TB)-forbindelser utgjør 55,5%. Skrueforbindelser står for de resterende 4,3%. Totalkostnaden for TT-forbindelser, som ekskluderer prisen til TB-komponenter, utgjør 44,5% av knutepunktskostnaden.

Tabell 5.9 –Kostnadsfordeling for forbindelsestypene i knutepunkter

Forbindelsestype	Antall	Kostnad [kr]	Andel av knutepunktskostnaden [%]
TT innslissede plater	309	580 794	40,2
TB innslissede plater	426	800 707	55,5
Skrueforbindelser	9 349	61 907	4,3
Total TT-forbindelser	-	642 701	44,5

5.2.4. Resultater fra materialeffektivitetsanalysen

Resultater fra materialeffektivitetsanalysen, utarbeidet i Kapittel 4.5, er presentert i Tabell 5.10. Analysen omfatter trekonstruksjonen bestående av både massivtre- og limtreelementer, og viser at det totale volumet av trematerialer utgjør 1 180 m³. Skolens bruttoareal er oppgitt til 6 750 m², noe som gir en materialeffektivitet på 0,17 kubikkmeter trematerialer per kvadratmeter.

Tabell 5.10 - Resultater fra materialeffektivitetsanalysen av nåværende konstruksjon

Spesifikasjon	Enhet	Verdi
Totalt volum massivtre og limtre	m ³	1 180
Totalt bruttoareal av skolen	m ²	6 750
Materialeffektivitet	m ³ /m ²	0,17

5.2.5. Resultater fra gjenbruksverdianalysen

Resultater fra gjenbruksverdianalysen, utarbeidet i Kapittel 4.6, er presentert i Tabell 5.11. Analysen tar utgangspunkt i kutting av 866 ikke-demonterbare skjøter i den eksisterende trekonstruksjonen, hvorav 422 gjelder massivtre og 444 gjelder limtre. Det totale volumtapet beregnes til 58 m³, fordelt på 49 kubikkmeter for massivtre og 9 kubikkmeter for limtre. Den samlede gjenbrukbare andelen av trekonstruksjonen utgjør 95,1%, der massivtre har en gjenbruksverdi på 93,9 %, og limtre har 97,7 %.

Tabell 5.11 – Gjenbruksverdi for nåværende konstruksjon

Type	Volum [m ³]	Volumtap [m ³]	Antall kuttflater	Gjenbruksverdi [%]
Massivtre	797	49	422	93,9
Limtre	383	9	444	97,7
Totalt	1 180	58	866	95,1

Videre er det utført beregninger for den økonomiske verdien av den gjenbrukbare andelen av trekonstruksjonen, utført i Kapittel 4.6. Som vist i Tabell 5.12, estimeres den bevarte kostnaden for massivtre- og limtrekonstruksjonen til 14 391 521 kr. Sammenliknet med den opprinnelige verdien på 15 133 040 kr, utgjør verdifallet for det forkastede materialet 741 519 kr, som tilsvarer en prosentnedgang på 4,9.

Tabell 5.12 - Kostnadsbevaringen ved gjenbruk av massivtre og limtre

Massivtre- og limtrekonstruksjon	Kostnad [kr]	Prosentnedgang [%]
Opprinnelig verdi	15 133 040	100,0
Gjenbrukbar verdi	14 391 521	95,1
Forkastet materiale	741 519	4,9

Når verdifallet av det forkastede materialet vurderes i sammenheng med totalkostnaden for hele trekonstruksjonen, utført i Kapittel 4.6, utgjør dette et tap på 4,2 %, som vist i Tabell 5.13.

Tabell 5.13 – Prosentvis nedgang i totalkostnaden ved forkastet materiale

Spesifikasjon	Kostnad [kr]	Prosent [%]
Totalkostnad	17 481 272	100,0
Bevart totalkostnad	16 739 753	95,8
Forkastet materiale	741 519	4,2

5.3. Resultater fra implementeringen av DF

5.3.1. Kostnadspåvirkningen

Resultater fra kostnadsanalysen for implementeringen av de utvalgte DF, utført i Kapittel 4.4.2, er oppsummert i Tabell 5.14. Tabellen viser en oversikt av de utvalgte forbindelsestypene fordelt på ulike konstruksjonskategorier, sammen med antall komponenter, totalkostnad og gjennomsnittlig pris per knutepunkt. Den totale kostnaden for de utvalgte DF-løsningene er beregnet til 1 446 684 kr, med en gjennomsnittspris på 1635 kr per knutepunkt.

Tabell 5.14 – Utvalgte DF med antall og totalkostnaden

Kategori	Forbindelsestype	Antall	Total kostnad [kr]	Gjennomsnittspris [kr/knutepunkt]
Dekke-dekke (DD)	X-RAD	236	1 446 684	1635
Dekke-vegg (DV)				
Vegg-vegg (VV)	TITAN PLATE T	1 370		
Bjelke-bjelke (BB)	UV T	55		
Bjelke-søyle (BS)	ALUMEGA	256		
	UV T	143		
Søyle-søyle (SS)	RADIAL	232		

Kostnaden for DF er sammenlignet med de opprinnelige tre-mot-tre-forbindelser, som ble estimert til 642 701 kr (se Tabell 5.9). Implementeringen av DF gir en økning på 803 983 kr, noe som tilsvarer en prosentvis økning på 125 %, vist i Tabell 5.15.

Tabell 5.15 – Kostnadssammenligning mellom originale og demonterbare forbindelser

Forbindelsessystem	Kostnad [kr]	Differanse [kr]	Prosent økning [%]
Originalt	642 701	803 983	125
DF	1 446 684		

Når kostnadsforskjellen for DF vurderes i sammenheng med den totale materialkostnaden for trekonstruksjonen, fremkommer en samlet kostnadsøkning på 4,6 %. Den totale kostnaden med DF øker fra 17 481 272 kr til 18 285 255 kr. Resultater er oppsummert i Tabell 5.16.

Tabell 5.16 – Totalkostnad med og uten demonterbare forbindelser

Spesifikasjon	Kostnad [kr]	Prosent økning [%]
Totalkostnad	17 481 272	-
Kostnadsøkning med DF	803 983	-
Totalkostnad med DF	18 285 255	4,6

I tillegg gjennomføres det en sammenligning av gjennomsnittsprisen mellom TT innskissede plater og DF. DF viser en kostnadsreduksjon på 13 %, med en gjennomsnittspris på 1 635 kr sammenlignet med 1 880 kr for TT innskissede plater, som presentert i Tabell 5.17.

Tabell 5.17 - Gjennomsnittprisene til tre-mot-tre (TT) innslissede plater og demonterbare forbindelser

Spesifikasjon	Gjennomsnittpris [kr]	Differanse [kr]	Prosentnedgang [%]
TT innslissede plater	1880	245	13
DF	1635		

5.3.2. Materialeffektivitets påvirkning av DF

Materialeffektiviteten til DfDR-prosjektet er satt til å være den samme som i referanseprosjektet, som beskrevet i Kapittel 4.5. Materialeffektiviteten blir 0,17, hentet fra Tabell 5.10. Bakgrunnen ligger i forenklingene, gjort i Kapittel 4.4.2, om at trekonstruksjonen forblir den samme i DfDR-prosjektet, kun forbindelsessystemet forandres.

5.3.3. Ombruksverdiens påvirkning

Resultater for ombruksverdien til DF-løsningen er 100% av trekonstruksjonen, antatt i Kapittel 4.6. Antagelsen gir en prosentdifferanse på 4,9 prosentpoeng fra den originale løsningen, som hadde en gjenbruksverdi på 95,1% (se Tabell 5.11).

5.4. Resultater fra intervju

Resultatene fra intervjuet er strukturert etter temaer som er relevant for oppgaven og problemområdet. Informasjonen vil støtte under ulike påstander eller utfordringer til tematikken, som blir diskutert og senere konkludert i avslutningen av oppgaven.

De relevante funnene fra intervjuet er delt inn i følgende temaer:

- Bakgrunnen for designvalg
- Kostnadsvurderinger
- Materialeffektivitet og ressursbruk
- Demonterbarhet av den valgte løsningen
- DfDR og fremtidige muligheter

5.4.1. Bakgrunnen for designvalg

Respondenten forklarer at det var utfordringer knyttet til tilbudsmodellens utforming, særlig når det gjaldt byggets stabilitet. «Det er sjeldent å kjøre limtre-spenn på over 11 meter, men her var nesten alle bjelkene i skoledelen 11 meter lange. Det var ikke brudd, skjær eller nedbøyning som var dimensjonerende, men komfort.» [59]. På grunn av de store spennene, ble de nødt til å ha større dimensjoner på limtrebjelkene. «Modellen [...] hadde jo dimensjoner som på en måte holdt i forhold til brudd og skjær, men det holdt ikke i forhold til komfort som jeg var nødt til å justere dimensjonene betydelig opp [...]». Han forklarer også at det samme gjaldt «[...] massivtredekker, så det som dimensjonerer for dekker er utelukkende komfort [så] det var nødvendig med justeringer for å oppfylle krav til frekvens og svingninger». Han påpeker at med de store tverrsnittene på elementene, er det ikke nødvendig å øke dimensjonene for å tilpasse demonterbare forbindelser.

På spørsmål om det stilles spesielle komfortkrav til skolebygg sammenlignet med andre bygg, peker han på at den norske trestandarden i dag er basert på tradisjonelle byggemetoder med bjelkelag. *«Den norske trestandarden er basert på tradisjonelle bygningsteknikker i Norge. Bjelkelag er generelt krevende, spesielt mellom boenheter, fordi de ofte gir for mye svingning og for dårlig stivhet.»*. Han sier at massivtre fungerer på dette området: *«Massivtre fungerer annerledes fordi det er en mer homogen masse, der kryssfineren og lamellene fordeler lastene sideveis og gir bedre stivhet.»*. Videre forklarer han at den norske standarden ikke dekker massivtre godt nok, og de er nødt til å bruke andre standarder: *«Norsk standard er imidlertid ikke tilpasset massivtre, så vi bruker ofte den østerrikske standarden, som er mer utviklet på dette området.»*. Han påpeker at det er arbeid med en ny massivtrestandard som mest sannsynlig vil bli implementert i Norge: *«Nå jobber det vel i Europa med en ny standard [om] massivtre. Og den kommer jo til å bli implementert i Norge antagelig når den kommer.»*

5.4.2. Kostnadsvurderinger

Ved spørsmål om hva som er det mest kostnadsdrivende svarer respondenten at trevirket *«[...] utgjør jo 70 % og mer som det altså er festemiddel og montasje og transport, og prosjektering som kommer i tillegg.»*. For spørsmål til forbindelsene og sine kostnadsvurderinger til prosjektet, sier svarer respondenten at dette er en liten del av det totale kostnadsbildet. Han sier også at *«[...] du kan ha dyre knutepunkt, og du kan ha billigere i knutepunkt. Det er jo ingen tvil om.»*.

Respondenten forteller om hvordan prisingen ser ut i forhold til massivtre og limtre i konstruksjonen. Han tar utgangspunkt i kubikkpris og forteller at massivtre i seg selv koster rundt 6000 til 7000 kroner per kubikk, men med innsatsfaktorer som kommer i tillegg til selve materialkostnaden, blir det totalt sirka 11 000 kr per kubikk. Han sier også at *«limtre er litt dyrere, så hvis massivtre koster 11 000 kr, [så] ligger limtre mellom 12 000 og 13 000 kr per kubikk ferdig montert, prosjektert [og] levert [...]»*.

På spørsmålet om demonterbare forbindelser ville vært et aktuelt valg i prosjektet, svarer respondenten at dette ville ha en viss kostnadmessig påvirkning *«Det er dyrere forbindelse [...]»*, uttaler han om bruken av demonterbare forbindelser.

5.4.3. Materialeffektivitet og ressursbruk

For spørsmål om materialeoptimaliseringen til prosjektet, svarer respondenten at dette var et høyt fokus og *«[...] at denne skolen er løst med en veldig effektiv materialeffektivitet.»*. Han viser til at prosjektet benytter limtre som søyler og bjelker, og at dette reduserer treforbruket betraktelig. Videre beskriver han at *«[...] det blir ikke brukt massivtre noen andre steder enn der det er bærende. Når jeg sier bærende, så er det både bærende og stabiliserende.»*. Han forklarer at valget om å bruke søyler og bjelker av limtre, og ikke massivtre, var bevist for å redusere treforbruket og dermed optimalisere bygget.

Senere i intervjuet under temaet kostnader, setter respondenten materialforbruket i perspektiv med at vanligere skoleprosjekter. Han sier at det normalt brukes mer massivtre, spesielt i bærende vegger, slik at forbruk ligger høyere, på rundt 0,35 kubikkmeter per kvadratmeter. *«For dekke med spenn på over 6 meter, som for eksempel på skoler, er det vanlig å bruke mer massivtre, spesielt*

bærende vegger, i stedet for limtre. Da er spennene normalt mellom 7 og 8 meter, og da vil dekkedimensjonene ligge mellom 220 og 280 mm. I normale tilfeller vil kubikkforbruket per kvadratmeter være rundt 0,35.». For spørsmål om hvordan kubikkforbruket per kvadratmeter endte i Stabbursmoen-prosjektet, svarer han «Tipper det ligger rundt 0,30 [m³/m²].».

5.4.4. Demonterbarhet av den valgte løsningen

For spørsmål til de valgte forbindelsen svarer respondenten at *«Det er jo det løst med skrudde forbindelser ikke sant? Altså skruer og slisset plater og det er vel noen åpne beslag og. Men stort sett så er det vel skjulte beslag.»* På spørsmål om demonterbare forbindelser ble vurdert som et alternativ, svarer han at *«Det er ikke tenkt spesielt mye på demontering i dette prosjektet. Det er i stor grad brukt skrudde løsninger, hvor dekker skrus sammen og festes til limtre.»*. Han påpeker utfordringen med tilgang for demontering av de skrudde løsningene, og at beslag hadde i den sammenheng vært mer praktisk. *«Veggene skrus fast i dekkene. Det er minimalt med beslag, noe som ville gjort demontering enklere. Skruene er små og forsvinner inn i treverket, noe som gjør det vanskelig å finne og fjerne dem senere.»*. Respondenten forklarer henholdsvis at gjenbrukspotensialet for konstruksjonen er stort, der de ulike elementene har muligheten til å bli kuttet og brukt om igjen. Han sier at *«[...] det er veldig enkelt å ta motorsagen og kutte massivtre litt. Det er ganske mye enklere på gjenbruk av trekonstruksjon, enn det er med stål og hulldekke. Det vil jeg si, så er det mye enklere element å løfte fordi det er mye lettere i egenvekt.»*.

5.4.5. DfDR og fremtidige muligheter

For spørsmål om han har erfaring og/eller vært involvert i DfDR prosjekter, svarer respondenten nei, men at han er sikker på at de hadde greid å løse det om det hadde vært etterspurt, og påpeker også hvorfor han tror det generelt ikke er så etterspurt med at *«[...] åpne løsninger er noe man unngår på grunn av at de er synlige, og de er ikke særlig estetiske, ikke sant? Åpne løsninger brukes vanligvis bare på områder som ikke er så høye, og der brannklassifiseringen kanskje er 30 eller 15 i verste fall. Da kan man ofte løse det på den måten.»*. Her viser han til at å oppfylle brannkrav kan være en utfordring til DfDR: *«Men det var et veldig godt spørsmål du stilte. Jeg tenkte ikke så mye på det da jeg svarte tidligere, men brann kan absolutt ha betydning for ombruk. Ja, for en skrue, den vil ikke miste sin fasthet. Den vil bare miste fastheten i den ytre delen, ikke sant? Men skjæringspunktet vil ikke påvirkes på samme måte.»*.

For spørsmålet om hvordan han ser på framtidige muligheter for mer demonterbare løsninger i skolebygg og større trekonstruksjoner, svarer han at *«[...] den er fullt til stede. Det er helt klart.»*. Han sier oppfølgingsvis at en svært høy prosentandel i prinsippet kan gjenbrukes, der kun knutepunktet behøver å kuttes vekk, og setter spørsmål med DfDR. *«Så vil spørsmålet være, behøver du å lage det demonterbar eller kan man si at man tar bort 5% av materialet og heller kaster det. Også gjenbruke resterende 90-95%? Du kan tenke at man skjærer vekk den materialebiten som er knutepunktet, så kaster den til fyring»*. Det vises også til at dagens elementprodusenter har systemer til å håndtere slikt avfall: *«Som produsentene har i dag, de har et system på fabrikken der du produserer elementer, og bruker alt avkapp til fyring og lager strøm»*. Han klargjør noen utfordringer ved tilgjengelighet og brannkrav til elementer i DfDR: *«Da må man være klar over at dekker med f.eks. lydkrav (luft og trinn). Så må man ha oppføring på dekkene med flytsparkel, og sånt må man fjernes når man skal*

gjenbruke. På en vegg, som skal ta lyd krav så må man ha påføring. Eller brann, der man må fjerne tilleggsveggen som står vedsiden av for å komme til massivelementene.».

Ved spørsmål om hvordan dette muligens kan løses, svarer respondenten at «*du kan jo brannmale vanlig stål, men om du kan brannmale galvaniserte materialer, er jeg litt usikker på. Kanskje det er mulig, men det vil uansett være mye jobb. Ja, det blir et visst antall millimeter per beslag overalt, ikke sant? Det høres ikke så lurt ut, men sånn er det jo.*» Han påpeker igjen at «*[...] ombruksmulighetene er litt mer krevende, mens gjenbruksmulighetene er mye større, nesten uansett. Hvis du tar en motorsag for å kutte bjelken ved knutepunktet, er du ferdig med det. Du kan bruke en elektrisk motorsag, som er mer miljøvennlig og nesten fossilfri. Men det er viktig å gjøre det på alle byggeprosjekter, og bruke elektriske motorsager der det er mulig. Vi må alltid tenke på miljøet. Det er veldig fokus på fossilfrie byggeplasser nå.*».

5.5. Diskusjon av eksisterende standarder og krav for DfDR

5.5.1. Mangler i norske standarder og krav

I arbeidet med å kartlegge eksisterende standarder, krav og føringer for DfDR i Norge, har det vært utfordringer å finne konkret og relevant informasjon. Plan- og bygningsloven nevner verken DfDR eller ombruk direkte. Byggeteknisk forskrift referer til ombruk gjennom ett relevant punkt, men uten tydelig krav til gjennomføring. Det stilles kun forventning om at ombruk skal vurderes i prosjektering og utførelse, uten å angi føringer til hvordan det skal gjøres i praksis. Videre overlates ansvaret til kunden, som selv må vurdere hva som er innenfor de rette praktiske og økonomiske rammene. Til tross for manglende gjeldende standarder og krav, er gruppen gjort kjent med at en ny norsk standard er under utvikling. Standarden skal bygge videre på ISO 20887 og ble omtalt av gruppens eksterne veileder. Det foreligger per nå ingen offentlig tilgjengelig informasjon om innhold eller fremdrift til arbeidet. Videre avdekker resultater at regjeringens nasjonale forventninger til regional og kommunal planlegg fremhever prioriteten til ombruk, som er med i flere av punktene for perioden 2023-2027. Dette indikerer at selv om det per nå er mangler i norske standarder og krav for DfDR, er tematikken i utvikling, og ombruk er etablert som et nasjonalt fokusområde.

Et potensielt relevant dokument for vurdering av ombruk og gjenbruk av trekonstruksjoner kan være NS 3691. Det er særlig del 3, som blant annet tar for seg visuell styrkesortering av returtre til bruk i bærende konstruksjoner. Dokumentet gir faste bestemmelser for håndtering av tidligere dokumentasjon for virkefeil, samt skader til elementer fra tidligere bruk. På bakgrunnen av dokumentasjonen og skadeomfanget, gir standarden fasthetsverdier for returnert tre. Gjennom en metode for vurdering av styrkesortering til DF-elementer og kuttete elementer i tråd med NS 3691, kan dokumentet gi fasthetsverdier for sekundærbruk. Dette kan være av høy nytte til vurderingen av gjenbruksverdien, samt være inkludert i et forslag til en standardisert metode for dokumentering og godkjenning av DF-elementer til bruk i nye konstruksjoner.

Søk etter internasjonale standarder og krav for DfDR, ga ISO 20887 DfD/A. Standarden omhandler prinsipper for design for demontering og tilpasning av alle typer bygg, med tilhørende komponenter og materialer, men vurderes til å ha en mindre relevans for bærende bygningskonstruksjoner. Dette er fordi standarden holder et overordnet detaljnivå for hele bygget, og oppgir ikke spesifikke føringer til tiltak, tekniske krav eller praktiske eksempler til gjennomføringen av DfDR. Dermed har standarden en begrenset verdi for praktiske tilnærminger til prosjektering av DfDR i bærende trekonstruksjoner. Resultater fra litteratursøk viser enkelte forskningsartikler som forsøker å utvikle et verdisettingssystem fra ISO20887 til mer konkrete punkter for bærende konstruksjoner. Denne forskningen kan også gjenspeile mulige løsninger som senere kommer i den norske standarden som jobber videre med ISO 20887. Resultatene viser henholdsvis at verktøyet fortsatt befinner seg i et tidlig utviklingsstadium, der gruppen heller ikke fikk tak i det spesifikke verktøyet for å teste ut selv. Det påpekes at gruppen kunne ha søkt etter flere verdisettingsverktøy, for et mer generaliserbart resultat. Med bakgrunn i få konkrete resultater for relevante standarder og krav, samt et ufullstendig verdisettingsverktøy av DfDR i bærende konstruksjoner, måtte gruppen gjøre noen egne antagelser for å kunne jobbe videre, spesifikt med ombruks- og gjenbruksverdien til det eksisterende prosjektet til casestudiet. Utviklingen av metoder for ombrukbarhet og gjenbruksverdi diskuteres i Kapittel 5.10.

5.6. Diskusjon av eksisterende DF og utvalg til DfDR-løsningen

For å finne eksisterende DF, ble produsenten Rothoblaas valgt, men dette utelukker alle andre produsenter med sine utvalg. Avgjørelsen er forankret i det gjeldene casestudie, der Backe hadde benyttet Rothoblaas som sin produsent av forbindelser. En bestilling av DF fra denne leverandøren hadde derfor innvirkning på en tilnærming i casestudiet, enn om det var brukt en annen produsent. Selv om valget skaper en god tilnærming til det spesifikke skoleprosjektet, kunne flere produsenter med et bredere utvalg DF vært vurdert. Dette ville gitt et større bilde av eksisterende DF som finnes på markedet.

Utvalget av DF fra Rothoblaas tok utgangspunkt i resultater fra litteraturstudiet fra Kapittel 5.1.7, der fokuset var å sørge for å sikre DF med høy demonterbarhet, gjenbruksverdi for forbindelsene og treverket. Analysen inkluderte ikke spesifikke lastkapasiteter, noe som representerer en svakhet ved utvalget. Dette er noen som kunne vært inkludert for å sikre at designforslaget tar de gjeldene kreftene. For å sikre relevans ble forbindelseskategoriene i den eksisterende trekonstruksjonen (DD, DV, VV, BS, BB, SS) brukt som et ytterligere utvalgs-kriterium, noe som resulterte i 7 forbindelsestyper som var tilpasset konstruksjonen. Selv om dette utvalget er tilpasset casen, finnes det flere aktuelle DF fra Rothoblaas som burde vært vurdert i senere arbeid for et bedre utvalg og analyse. Analysen av den originale trekonstruksjonen viste at demonterbare krokforbindelser ble brukt til å feste søyler og bjelker, med spenn på over 11 meter. Dette indikerer at det er dimensjonert for krokforbindelser, og denne typen er inkludert i DfDR-forslaget.

Ut ifra de valgte forbindelsestypene, etterspurte og mottok gruppen en liste fra produsenten, men listen inneholdt flere forskjellige størrelser og ulike priser til hver forbindelsestype. Gruppen var nødt til å gjøre en utvelgelse innad i forbindelsestypene, der fokuset ble å velge de med størst dimensjoner for å sikre en robust og trygg konstruksjon. Dette var med bakgrunn i skoleprosjektets store bygningsdeler med tilhørende høye gjennomsnittsdimensjoner for treelementene. Valget kan argumenteres for å øke ombrukbarheten til neste konstruksjon, ettersom en høyere kapasitet vil åpne bruken til flere og større konstruksjonsløsninger. Selv om denne forenklingen sikrer en høyere styrke til DfDR-løsningen, kan utvalget også være mer tilpasset for hver enkelt situasjon og forbindelseskategori, slik at en mer optimalisert løsning kan fremkomme.

5.7. Diskusjon til konstruksjonsanalysen og forbindelsessystemet

På grunn av størrelsen til den eksisterende bærende konstruksjonen til Stabbursmoen skoleprosjekt, har det vært gjennomført utelukkinger som vil påvirke resultatene på ulike måter. Den eksisterende trekonstruksjonen er analysert med fokus på tre-mot-tre-forbindelser, men utelukker andre nødvendige materialekombinasjoner, som stål og betong. Utelukkelsen er gjort for å minske fokusområdet og skape en mer overkommelig arbeidsmengde for studiegruppen, men det gjør at det ikke blir dannet et fullt bilde av konstruksjonen. Det påpekes at stål er inkludert i beregninger av volum til hele den bærende konstruksjonen, som er koblet sammen med de utleverte bransjeprisene fra Hatlestad for totale kostnadsberegningene til konstruksjonen. I kostnadsberegningen er også alle forbindelser inkludert i påslagsprisen, slik at det er en viss inkludering. Utelukkelsen i videre analyser danner likevel et bilde av konstruksjonen med fokus på tre-mot-tre-forbindelser, og blir sammenlikningsgrunnlaget for forbindelsessystemet sine endringer og implementeringer av DF.

Den store og komplekse trekonstruksjonssystem, med tilhørende mange knutepunkter i forbindelsessystem, har det vært utfordringer for forbindelsessanalysen. Antallet forbindelser i kategoriene fra bakgrunnsinformasjonen, tar kun for seg innslissede plater, som i realiteten bare dekker en del av det totale antallet. De resterende forbindelsene består av ulike skrudde løsninger og krokforbindelser som ikke er inkludert i bakgrunnsinformasjonen. Antallet innslissede plateforbindelser fra PDF-filen stemte ikke overens med rådataen fra BIM-modellene, der rådataen besto av flere oppdelte plater, som hadde generiske navn, noe som skapte ytterligere problemer. Dokumentet skiller heller ikke mellom tre-mot-betong- (TB) og tre-mot-tre-forbindelser. På grunn av informasjonsmangelen og inkluderingen av TB-forbindelser, var gruppen nødt til å gjennomføre en visuell gjennomgang av forbindelsessystemet i BIM-modellen, for å trekke ut og fylle inn det riktige antallet knutepunktene i kategoriene til oppgavens fokusområde. Det påpekes at den systematiske gjennomgangen av dokumentet, utelukker til sammen over halvparten av de slissede plateforbindelsene, som er tre-mot-betong-forbindelser. Inkluderingen av disse ville i stor grad ha påvirket resultatene til forbindelsessanalysen, inkludert kostnaden og gjenbrukbarheten, som senere punkteres i de gjeldene punktene i diskusjonen.

Den visuelle gjennomgangen skaper en risiko for menneskelige feil, hvor antallene som fremkommer kan vike fra det faktiske antallet. Et tiltak for å minske risikoen, var å inndelegge bygget i fem analysedeler, for arbeide med mindre mengder informasjon om gangen. Det originale forbindelsessystemet består av mange innslissede plater og skruer, men inneholder også over hundre krokforbindelser. Det påpekes i intervjuet at fokuset til designet var en høy materialoptimalisering og ikke demonterbarhet. Dette viser at uten å ha demonterbarhet som fokus, inkluderer designet en andel demonterbare forbindelser, som anses å være en del av løsningen til et høyt materialeoptimalisert bygg.

5.8. Diskusjon til den økonomiske analysen ved implementeringen av DF

5.8.1. Datagrunnlag, metode, forenklinger og begrensinger

Den økonomiske analysen av den originale bærende trekonstruksjonen er basert på utlevert informasjon om gjennomsnittlige bransjepriser fra 2024, men prisene kan i realiteten variere fra prosjekt til prosjekt. Ved å benytte bransjeprisene, ble det estimert materialkostnader for beregning og sammenlikning i senere analyse til DfDR-løsningen. Gjennomsnittsberegningen er en hensiktsmessig tilnærming i tidligfase av planleggingen for å få en oversikt over kostnadene, men den gir ikke nødvendigvis et presist bilde av de faktiske kostnadene for dette spesifikke prosjektet, og er oppe for diskusjon. Estimeringen av den totale knutepunktskostnaden ble gjort ved å bruke et påslag til den totale materialkostnaden, noe som er en generell antagelse i tidligfase. Dette gir en god oversikt over knutepunktskostnaden, men det gir ikke nødvendigvis et nøyaktig bilde av de faktiske kostnadene for hver av forbindelsene. I intervjuet påpekes det at knutepunktene utgjør en liten del av den totale kostnaden, og at det kan være stor variasjon i prisene for forskjellige knutepunkter, noe som gjør påslaget mindre presist. Det er viktig å merke seg at dette påslaget kan variere mellom entreprenører, avhengig av deres egne vurderinger og antagelser.

Det ble valgt å fokusere på tre-mot-tre-forbindelser, en forenkling som gir mindre data, men en mer håndterbar informasjonsmengde for beregning av resultater. Denne forenklingen fører henholdsvis til at en stor del av konstruksjonen, spesifikt tre-mot-betong-forbindelser, blir utelatt fra analysen.

Resultater fra begninger viser at prisgrunnlaget som er brukt for sammenligningen til tre-mot-tre-forbindelsene i denne studien, utgjør 44,5% av den totale knutepunktskostnaden for forbindelsessystemet. Inkluderingen av TB, som utgjør 55,5% av kostnaden vil skape et større bilde av kostnadene for både den originale og den demonterbare løsningen. Allikevel gir fokuset på TT-forbindelser en god bakgrunn for sammenlikning av den originale løsningen mot implementeringen av DF til DfDR-løsningen.

For å finne kostnaden for TT innslissede plateforbindelser ble det brukt en forenklet metode som bruker gjennomsnittspris og antall tre-mot-tre-forbindelser. Dette gir gruppen et forenklet sammenlikningsgrunnlag til DfDR-løsningen, men kostnaden vil ikke være de faktiske kostnadene som baserer seg på ulike enhetspriser og antall. For en mer nøyaktig sammenlikning kunne man ha fått tilgang til de faktiske enhetsprisene for forbindelsestypene i den originale konstruksjonen, slik at man kunne beregne en mer presis totalkostnad for plateforbindelsene. Når det gjelder beregningene av skruerforbindelsene, ble prisene hentet fra Rothoblaas sin prisliste, men denne inkluderte ikke alle dimensjonene som gruppen hadde beregnet. For å forenkle ble de nærmeste tilgjengelige dimensjonene brukt, noe som kan føre til at prisene blir høyere enn de faktiske kostnadene. Dette kan gjøre estimatet mindre nøyaktig, da det er mulig at de virkelige dimensjonene ville ha gitt en lavere kostnad. I intervjuet påpekes det at skruer har en liten kostnad sammenliknet med andre bygningsdeler, og at det i realiteten ikke vil ha en stor innvirkning på totalkostnaden. For en mer nøyaktig sammenlikning kunne man ha fått tilgang til de faktiske enhetsprisene for de ulike forbindelsestypene i den originale konstruksjonen, samt tilhørende antall, slik at man kunne beregne en mer presis totalkostnad for forbindelsessystemet.

Prisene til DF er basert på et tilsendt dokument fra Rothoblaas med ulike størrelser og priser for de ulike forbindelsestypene som er valgt. Det ble henholdsvis valgt ut de største forbindelsene, med tilhørende høyest enhetspris for løsningen. Dette var for å sikre en robust konstruksjon, men det kunne i realiteten vært tilpasset for hver enkelt løsning i trekonstruksjonen. Det danner selv om en estimert kostnad til DF i DfDR-løsningen, som skaper sammenlikningsgrunnlag mot den originale løsningen.

5.8.2. Kostnadssammenlikning mellom DF og tradisjonell løsning

Resultater for den økonomiske bergingen viser at bruken av DF fører til en prisøkning på 125 % sammenliknet med tre-mot-tre forbindelsene til den originale løsningen. Dette indikerer at implementeringen av DF i trekonstruksjoner krever en betydelig høyere investering. Det er midlertidig diskuterbart hva som faktisk skaper denne til prisforskjellen. Resultater viser at forskjellen hovedsakelig ligger i bruken av et høyt antall skrudde løsninger i den originale løsningen. De skrudde løsningene har en vesentlig mindre kostnad sammenliknet med innslissede plater og DF, noe som drar ned totalkostnadene til den originale løsningen. Selv om en sammenlikning av snittpriser til innslissede plateforbindelser og DF, viser at DF får en gjennomsnittlig prisreduksjon på 13%, reflekterer dette ikke nødvendigvis de reelle kostnadsforskjellene. De forenklede beregningene tar ikke høyde for variasjoner i enhetspriser, typer, størrelser og antall. Respondenten fra intervjuet understrekte at DF er dyrere. Det kan gjennomføres en mer detaljert sammenlikning, hvor forbindelsestyper kan settes opp mot hverandre i forhold til forbindelseskategoriene (SS, BS, BB, DD, DV og VV), med forbehold om at enhetsprisene ikke er konfidensielle.

Ser man på kostnadsperspektivet tilknyttet hele den bærende konstruksjonen, vil bruken av DF innebære en kostnadsøkning på 4,6 %. Dette er en kostnad som kunden selv må ta ansvar for. En slik prisøkning kan derfor være uønsket, ettersom tradisjonelle beslutningskriterier fokuserer på kostnad, ytelse og kvalitet. Det er derfor ofte ønsket å senke kostnadene til prosjektet. Det er midlertidig verdt å ta et skritt ut og se på økningen i forhold til kostnadsbildet til hele skoleprosjektet. Det påpekes i intervjuet at kostnader til knutepunkter bare er en liten del av det totale kostnadsbildet til skoleprosjektet. Dette gir bakgrunn til å argumentere for at prisøkningen til implementeringen av DF for DfDR kan være forsvarlig, ettersom det medfører en økonomisk gevinst i neste konstruksjon.

Et sentralt formål med DfDR er å legge til rette for ombruk av produkter og bygningssystemer. En investering i demonterbare forbindelser som støtter dette prinsippet, kan gi betydelige økonomiske fordeler ved at trekonstruksjonselementer kan demonteres uten skade og gjenbrukes i nye prosjekter. Dette reduserer behovet for nyproduksjon og materialanskaffelser, og gir potensial for at den opprinnelige kostnadsøkningen knyttet til DF kan tilbakebetales over livsløpet gjennom reduserte fremtidige investeringskostnader. Det kan argumentere for at hele investering i DF kan gi en nær dobling av verdien i form av materialbesparelser. I motsetning til tradisjonelle løsninger, der trebygg ofte rives og materialer går direkte til energiutvinning etter endt levetid, kan en investering i DF og DfDR-konseptet muliggjøre både ombruk og energigjenvinning, og dermed bidra til sirkulær økonomi.

5.8.3. Kostnadssammenlikning mellom DF-løsningen, gjenbruksløsningen og tradisjonell riving

Respondenten i intervjuet setter spørsmål ved nødvendighet av å benytte DfDR, ettersom det går an å gjenbruke store mengder av trekonstruksjoner ved å sage og tilpasse. Den gjenbrukbare tilnærmingen vil heller ikke skape noen ekstrakostnader til byggefasen, men først i konstruksjonens avslutning. I det gjeldende casestudiet ble det beregnet en gjenbruksverdi på 95,1% av de originale trekonstruksjonene, noe som understreker synspunktet. Sammenlignet med en gitt 100% ombruksverdi til DfDR-løsningen, er forskjellen kun på 4,9 prosentpoeng, og inkluderer ikke ekstra DF-kostnader til materialer.

En sammenlikning mellom ekstrakostnader ved DF og materialtap ved gjenbruk, viser at DF hadde en kostnadsøkning på 4,6%, mens gjenbruksløsningen får et kostnadstap på 4,2 % av konstruksjonskostnaden. Dette indikerer at de to løsningene har sammenliknbare kostnader og at DF i prinsippet kan «tjene tilbake» mye av ekstrakostnadene ved å unngå materialetapet fra kapping i neste prosjekt. Det forutsettes at DF-komponentene bevarer sine kapasiteter i demonterings- og monteringsprosessen, og at gjenbruksløsningen forutsetter saging med minimal kapasitetsreduksjon til elementene. Begge løsningene har dermed nære verdibesparelser, og et høyt potensial til å gi økonomiske og ressursmessige gevinster, sammenliknet med tradisjonell riving hvor materialer ofte går direkte til gjenvinning.

Det må understrekes at det i midlertidig kan være svinn som følge av skader til elementer under levetiden og ved demontering/remontering, slik at noen elementer må forkastes eller tilpasses. Gjenbruksverdien og ombruksverdien vil derfor i realiteten være lavere enn det som fremkommer i resultatene. Det kan anslås at gjenbruksverdiene vil være nærmere 90 % enn 95,1%, og at

ombruksverdien vil synke fra 100%. Dette er noe som bør være med som en ekstra faktor i beregningene til planleggingen. Det er også viktig å påpeke at denne sammenlikningen ikke tar for seg kostnader knyttet til demonteringen og eventuell etterbehandling av trekonstruksjonen før de tas i bruk i nye konstruksjoner. Det kan argumenteres for at den gjenbrukbare løsningen vil ha høyere kostnader knyttet til etterbehandlingen av de kappede elementene, ettersom sagingen krever høy presisjon og menneskelige feil kan oppstå. Det kan også oppstå feil ved demontering av DfDR-konstruksjonen, som fører til at noen forbindelser blir ødelagte og må etterbehandles. Prosjekteringskostnader til DfDR, som antas å være noe høyere på grunn av et større planleggingsbehov, er heller ikke medregnet. Det kan tenkes at DfDR kan gi noen besparelser til vedlikeholdskostnader, ettersom DF gjør det enklere å bytte ut konstruksjonselementer i fremtidige bygg. Aspektene viser kompleksiteten til gjenbruksløsningen og DfDR-løsningen. Utfordringer knyttet til fremtidige ombruksmuligheter diskuteres nærmere i Kapittel 5.10.

5.9. Diskusjon til materialeffektiviteten ved implementeringen av DF

5.9.1. Den nåværende konstruksjonen

Materialeffektiviteten til den originale trekonstruksjonen er beregnet som forholdet mellom volumet av treelementene og byggets bruttoareal. Resultatet fra beregningen viser at trekonstruksjonens kubikkforbruk er på $0,17 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Dette samsvarer med beskrivelsen fra informantene, som forklarer at casestudiet har hatt et tydelig fokus på materialoptimalisering gjennom planlegging og design. Til sammenlikning, oppgis det i intervjuet at tilsvarende prosjekter i normale tilfeller ligger rundt $0,35 \text{ m}^3/\text{m}^2$, noe som tilsier at det analyserte prosjektet oppnår omkring en dobbelt så høy materialeffektivitet.

Hovedårsaken til det lave materialforbruket er beskrevet av informantene til å ligge i konstruksjonsdesignet, som benytter en kombinasjon av limtresøyler og -bjelker, samt et begrenset antall massivtreelementer. Bruken av limtresøyler og -bjelker fremfor massivtre, gjøres bevisst for å redusere treforbruket, ettersom limtreelementer ofte har mindre tverrsnitt og dermed lavere volum per arealenhet. Massivtreelementer har vanligvis større dimensjoner og høyere materialetetthet, og benyttes kun der det er helt nødvendige i dette prosjektet, primært til avstivning og dekker. Det påpekes at skoleprosjekter generelt har lange spenn, og at man normalt benytter massivtreelementer i konstruksjoner med spenn på over 6 meter. Siden det var spenn på over 11 meter i det gjeldende prosjektet, var det nødvendig å bruke massivtreelementer for dekkekonstruksjonen. Til tross for bruken, viser de samlede resultatene at konstruksjonen har et betydelig lavere materialforbruk enn tilsvarende prosjekter.

5.9.2. Implementeringen av DF for DfDR-løsningen

Ved overgang til DfDR-løsningen, er det gjort en forenkling om at trekonstruksjonen forblir uendret, hvor det kun er gjort endringer i forbindelsessystemet. Antagelsen fører til at trekonstruksjonens volum og bruttoareal er vurdert til å være det samme, slik at materialeffektiviteten er satt til å være $0,17 \text{ m}^3/\text{m}^2$ også etter implementeringen av DF. Bakgrunnen for antagelse er basert på at dimensjoner til den originale konstruksjonen er tilstrekkelig, så det antas at implementeringen av DF ikke vil øke tverrsnitt eller volum. Det er viktig å påpeke at dette må betraktes som en idealisert

tilnærming, og at det i realiteten kan være nødvendig å endre tverrsnitt og volum ved integrering av DF.

En slik forutsetning om uendret materialvolum kan ikke overføres til andre prosjekter, ettersom det er flere faktorer som vil påvirke dimensjonering og materialforbruk. Faktorer som spennvidder, påkjenninger, lastoverføringer og funksjonelle krav vil være nødvendig å analysere ved implementeringen av DF. I intervjuet påpekes det at den analyserte trekonstruksjonen har usedvanlig lange spenn for limtrebjelker, slik at det ikke var typiske styrkekriterier som var dimensjonerende, men komfortkriterier tilknyttet svingninger og vibrasjoner. Det var derfor nødvendig å oppdimensjonere limtrebjelker og massivtredekker for å sikre brukerkomfort. Denne typen tilpasninger illustrerte utfordringer til design av skoleprosjekter, som ofte har lange, frie spenn og dermed ekstra krav til frekvens og svingninger. Det viser også behovet for at konstruksjoner må tilpasses sin individuelle løsning, slik at alle bygningskriterier oppnås. Derfor er det ikke gitt at implementeringen av DF til DfDR-løsningen ikke må tilpasses for nye dimensjonsendringer og materialendringer for beregning av materialeffektivitet.

5.10. Diskusjon til ombrukbarhet og gjenbruksverdi

5.10.1. Beregningsgrunnlag for gjenbruksverdien og metodiske forenklinger

Gjenbruksverdien til den opprinnelige konstruksjonen, er i denne analysen satt til å være det bevarte materialet etter saging av elementdeler med ikke-DF. Ettersom det ikke finnes noen kjente etablerte standardmetoder til denne typen vurderinger, er beregningsgrunnlaget basert på tips og tilbakemeldinger fra respondentene. En sentral utforing var å identifisere forbindelser som ikke kunne demonteres uten å skade forbindelsene eller de tilhørende treelementene. Gruppen fikk vite av informantene at skrudde forbindelser, inkludert innslissede plater og skjulte beslag, er upraktiske for demontering. Det påpekes i intervjuet at det er brukte mye skrudde løsninger som har utfordringer med tilgangen for demontering av skruene, siden skruene er små og forsvinner inn i treverket. I tillegg gjør treverkets egenskaper, som krymping, svelling og deformasjoner, at innslissede plater vil sette seg fast og er utfordrende å demontere. Det ble derfor antatt at de overnevnte forbindelsestypene ikke er demonterbare og dermed kuttes bort for gjenbruksløsningen.

På grunn av lite tilgjengelig informasjon om antallet skrudde løsninger til beregning av materialetapet, ble det med bakgrunn i tips fra Hatlestad, utviklet en forenklet beregningsmetode. Metoden tar utgangspunkt i tre standardiserte trekonstruksjonsrammer for første-, andre-, og tredjeetasje. Hver ramme ble analysert for et forventet massetap ved saging, og resultatene ble multiplisert opp med antallet gjentakelser i bygget. Dette innebærer i markant forenkling, som i realiteten ikke hensyntar at rammene vil ha ulike antall elementer, forskjellige elementdimensjoner og ulike knutepunkter. Estimatet vil derfor kunne vike fra det virkelige materialetapet. I tillegg er det benyttet sikkerhetsmarginer og gjennomsnittlige elementstørrelser for beregning av inntrengingsdybder til både skruer og innslissede plater. For innslissede plater er det lagt til en ekstra sikkerhetsdybde på 2 cm. For skruer er inntrengingsdybder beregnet med gjennomsnittlige inntrengingsdybder med toleranser i gjennomsnittlige limtrebjelker og -søyler. I realiteten vil det brukes ulike skruetyper, dimensjoner og innføringsvinkler for skruingen. Beregningen kunne vært mer spesifisert til hver enkelt løsning for et mer nøyaktig resultat.

5.10.2. Forutsetninger for full ombruk i DfDR-løsningen

I arbeidet med gjenbruksanalysen, er ombruksmuligheten til DfDR-løsningen satt til 100%. Dette innebærer en forutsetning om at alle treelementer i den bærende konstruksjon kan demonterbare uten kapasitetsreduksjon og deretter benyttes i nye konstruksjoner. Antagelse har utgangspunkt i samtaler med informantene, der antagelsen må betraktes som en idealisert forenkling. Hvor realistisk denne antagelsen er i virkeligheten, er diskuterbart, spesielt siden kun forbindelsessystemet er endret. Andre faktorer som påvirker bæreevne og belastninger er ikke analysert i detalj. Forutsetningen fører til at DF-løsningen antas å ha minst den samme bæreevnen som den opprinnelige løsningen. I realiteten er det et behov for en egen detaljplanleggingsfase for den nye DF-løsningen, hvor påkjenninger og lastoverføringer analyseres for hele trekonstruksjonen. Prosessen med demontering og remontering er også satt til å ikke svekke den opprinnelige strukturelle kapasiteten eller funksjonaliteten til den nye konstruksjonen. I virkeligheten kan det oppstå svinn i trekonstruksjonen under dens levetid, demontering og remontering. Dette er noe som bør legges ved som en faktor i planleggingen for beregning av ombruksverdien.

5.10.3. Vurdering av DfDR-løsningen opp mot ISO 20887

Selv med en forutsetning på 100% ombrukbarhet for den bærende trekonstruksjonen, finnes det flere andre aspekter som kan vurderes i verdisetting til både ombruksverdien og gjenbruksverdien. Resultater fra litteraturstudiet viser at bruken av reversible forbindelser alene ikke nødvendigvis gir en høy grad av demonterbarhet og gjenbruksverdi. ISO 20887 standarden gir syv prinsipper for demontering, presentert i Tabell 5.1. Prinsippene er videre behandlet i rapportene i Kapittel 5.1.6, samt påfølgende arbeid presentert i Kapittel 5.1.7, som kommer med flere tilpasninger og utviklinger mot bærende konstruksjoner. Det er identifiserer en rekke indikatorer for vurdering av demonterbarheten og ombruksverdi til konstruksjoner. Det går an å vurdere fem hovedkategorier: tilpasningsevne, konstruksjonsdesign, demonterbarhet, sirkularitet og dokumentasjon. Basert på erfaringer og tilbakemeldinger fra casestudier, identifisert også flere ekstra indikatorer. Disse inkluderer blant annet: enkel tilgang til komponenter, uavhengige konstruksjonselementer, ingen unødvendige behandlinger, gjenbrukbarhet og sirkularitet, enkelhet og standardisering, og sikkerhet ved demontering. Dette viser at selv om DF i seg selv kan representere en god verdi for demonterbarheten, er bygningskonstruksjoner langt mer kompleks. Den nåværende DfDR-løsningen ser kun på den bærende konstruksjonen, mens andre materialer er utelukket. I praksis består bygninger av mange flere bygningsdeler, som for eksempel isolasjon, påstøp, tekniske installasjoner og overflatebehandlinger. Flere faktorer må hensyntas for å danne et helhetlig DfDR-perspektiv.

5.10.4. Sammenligning av gjenbruks- og ombruksverdi i praksis

Gjenbruksverdien til den originale trekonstruksjonen er beregnet til 95,1 %, forutsatt at de bearbeidede elementene kan gjenbrukes etter saging. Imidlertid innebærer denne prosessen redusert kapasitet og behov for en ny vurdering av de mekaniske egenskapene. Det kan derfor anslås at gjenbruksverdien i realiteten vil ligge nærmere 90 prosent enn beregnet verdi. Tilsvarende er ombruksverdien til DfDR-løsningen anslått til 100 %, men på grunn av uunngåelig svinn, vil verdiene i realiteten være noe lavere. I den konvensjonelle trekonstruksjonen, der flertallet av forbindelsene ikke var demonterbare, er ombrukspotensialet mye lavere. Det er kun enkelte krokforbindelser i den

opprinnelige trekonstruksjonen som kunne demonteres intakt. Dette viser at DF og DfDR-løsninger gir langt bedre forutsetninger for verdibevaring. Likevel er forskjellen mellom gjenbruks- og ombruksverdi relativt liten, bare på 4,9 prosentpoeng. Dette indikerer at selv bearbeidede elementer fortsatt har høy verdi ved videre bruk, spesielt hvis bearbeidingen er minimal.

En sentral begrensning i analysen er utelatelsen av andre materialer fra konstruksjonen, som ikke-bærende elementer og tekniske komponenter. For å få en mer nøyaktig forståelse av totalverdien for både gjenbruk og ombruk, bør disse materialene også inkluderes. Andre komponenter i bygningen kan ha et høyere potensiale for enten gjenbruk eller ombruk, og dermed påvirke verdiene.

5.10.5. Praktiske utfordringer og bærekraftige implikasjoner

En av utfordringene knyttet til gjenbruk av materialer er den praktiske gjennomføringen av saging av elementer. Prosessen med saging er både tidskrevende og krever høy presisjon, spesielt når det handler om mange detaljkutt og store elementer. I denne konstruksjonen er det 866 kuttflater, noe som kan gjøre sagingen tidskrevende og presisjonen kan variere. Dette er noe som ikke er hensyntatt i den økonomiske analysen, som er diskutert i Kapittel 5.8. Fra et praktisk perspektiv kan saging av materialer være en betydelig kostnad i tid og arbeid, noe som kan påvirke de økonomiske aspektene til prosjektet. Videre er den presisjonen som kreves at elementene er intakte etter saging, en annen faktor for påvirkning av gjenbruksverdien. Å undervurdere disse praktiske utfordringene kan føre til feilaktige eller optimistiske antagelser til kostnad ved gjenbruk.

Et annet aspekt som kan komplisere gjenbruksprosessen er behovet for etterbehandling eller offisiell godkjenning av elementene før de kan gjenbrukes. Selv om dette ikke er spesifikt presisert i intervjuet, virker det sannsynlig at spesialiserte anlegg eller testprosedyrer vil være avgjørende for å sikre at de kuttete materialene oppfyller standardkrav for senere bruk. Saging kan påvirke de mekaniske egenskapene til elementene, og en etterfølgende kapasitetsvurdering burde vært inkludert for å vurdere mulige reduksjoner i styrke eller bæreevne. Uten dette trinnet kan man risikere å integrere svekkede elementer i nye konstruksjoner, noe som kan føre til svekket konstruksjon. Videre medfører saging og bearbeiding at elementene ofte får redusert dimensjon og fleksibilitet, særlig fordi ombruk krever at elementene brukes til samme formål og med samme dimensjoner. Imidlertid gir gjenbrukte elementer også øke muligheter for tilpasning i nye konstruksjoner. Elementene kan bearbeides til å passe nye kontekster, både for de samme og alternative formål, og gi økt fleksibilitet i planleggingen av nye bygg.

Det må tas hensyn til begrensninger og praktiske utfordringer knyttet til demonterbare forbindelser og ombruk av treelementer i nye bygg. Treelementer justeres ofte spesifikt til prosjekter, noe som kan gjøre det krevende å tilpasse dem i nye bruksområder. DF er i tillegg spesifisert for enkelte elementer de er koblet til, hvilket begrenser fleksibiliteten ved ombruk. Selv om robuste elementer, som massivtre og limtre, kan tilby høy bæreevne og lang levetid, kan det være utfordrende å finne passende anvendelser i nye byggeprosjekter. Det medbringer høye krav til planleggingen for å kunne integrere slike elementer, spesielt i tilfeller der opprinnelige spennvidder ikke samsvarer med behovene i fremtidige prosjekter. Det trekkes frem utfordring i casen tilknyttet de usedvanlige lange spennene på opptil 11 meter, sammenliknet med vanligere spennvidder på 7 til 8 meter. Ved ombruk av slike elementer i bygg med kortere spenn kreves ofte tilpasning, som for eksempel med kapping.

Tilpasningen kan endre de mekaniske egenskapene til elementene, og føre til at de ikke lenger klassifiseres som *ombrukte*, men som *gjenbrukte*. Dette skillet har både tekniske og miljømessige konsekvenser. Teknisk kan kappingen redusere elementenes bæreevne, og skape utforinger til dokumentasjon og godkjenningskrav. Miljømessig kan kapping redusere klimagevinster i form av materialbearbeiding og energiforbruk. Ombruk vil derfor gi større klimagevinster sammenliknet med gjenbruk, side gjenbruk ofte krever en mer omfattende bearbeiding av elementene.

Implementeringen av DF og DfDR-løsninger har en positiv effekt på bærekraftsmålene. Dette er spesielt relevant i tråd med FNs bærekraftsmål 12.5, som fokuserer på avfallsreduksjon gjennom ombruk og materialgjenvinning. Videre støtter dette mål 9.4, som vil fremme en mer bærekraftig infrastruktur og effektiv bruk av ressurser. Ved å fremme mulighetene for å demontere og ombruke elementer, kan DF bidra til en betydelig reduksjon i avfallsmengden og samtidig gi muligheten til bedre ressursutnyttelse i byggebransjen.

Et viktig aspekt ved dimensjoneringen av massivtre er mangelen på norsk trestandard som kan anvendes, da den nåværende standarden ikke dekker massivtre, ettersom den bygger på tradisjonelle byggemetoder brukt i Norge de siste årene. Den norske trestandarden mangler også komfortkrav, hvilket som førte til at i dette prosjektet måtte bruke utenlandske standarder. Her ble det benyttet den østerrikske trestandarden for å dimensjonere. Det påpeke i intervjuet imidlertid at det pågår arbeid med en ny standard for massivtre i Europa, noe som kan forbedre og presisere dimensjoneringsprosessen for massivtre.

6. Konklusjon

Hva slags standarder og krav finnes for DfDR i Norge i dag, og hvilken utvikling er det innen området?

- Det finnes ikke spesifikke standarder for DfDR i Norge i dag. Det finnes ett krav til ombruk i TEK17.
- Det er en internasjonal standard for design for demontering og tilpasning, ISO 20887 DfD/A.
- Det er nevnt en utvikling av en norsk standard for ombruk basert på ISO 20887.

Hva slags forbindelser finnes til DfDR av massivtre- og limtrekonstruksjoner?

Det er beskrevet 7 forbindelser til DfDR av massivtre- og limtrekonstruksjoner, som er hentet fra Rothoblaas:

- UV T (Krokforbindelse)
- BSA (Metall henger)
- ALUMEGA (Krokforbindelse)
- RADIAL (Søyleforbindelse)
- X-RAD (Dekke og vegg forbindelse)
- TITAN PLATE T (Plateforbindelse)
- WOODY (Dekke og vegg forbindelse)

Hvordan er den bærende trekonstruksjonen løst i casestudiet?

- Materialoptimalisert bæresystem med limtrebjelker og limtresøyler, samt målrettet bruk av massivtreelementer kun til avstivning og i dekker.
- Minimal bruk av stål, begrenset til teknisk sjakt og enkelte søyler og bjelker der det er nødvendig.
- Forbindelsessystemet er utført med innslissede plater, skruer og krokforbindelser.

Hva er de økonomiske konsekvensene av å implementere DfDR i trekonstruksjonen?

- Gitt at DF øker materialkostnaden, vil implementeringen av DfDR øke totalkostnadene til prosjektet.
- Forutsatt at trekonstruksjonen kan demonteres uten skade og brukes om igjen, kan betydelige materialkostnader spares i neste konstruksjon.

Hvordan påvirker DfDR materialeffektiviteten til trekonstruksjonen?

- Gitt at trevolumet er uendret ved implementeringen av DF, påvirker DfDR materialeffektiviteten minimalt.

Hva er gjenbruksverdien til den nåværende trekonstruksjonen?

- Gjenbruksverdien for den nåværende trekonstruksjonen er anslått til 90–95 % ved demontering med saging.

Hvordan bidrar DfDR til fremtidig ombruksmuligheter for trekonstruksjonen?

- DfDR vil bidra med en svært høy utnyttelsesverdi for trekonstruksjonen, ved å muliggjøre demontering av konstruksjonen for ombruk i nye prosjekter.

Hvordan påvirker implementeringen av demonterbare forbindelser kostnad, materialbruk og fremtidig ombruk av massivtre- og limtrekonstruksjoner sammenliknet med konvensjonelt design i skolebygg?

Implementeringen av DF til det analyserte prosjektet indikerer noe økte kostnader til trekonstruksjonen sammenliknet med kostnaden til det konvensjonelle designet. Påvirkningen vil være liten på materialbruken som forblir uendret ved grunngitte antagelser. Implementeringen av DF vil øke muligheten for demontering av trekonstruksjoner til ombruk med betydelig verdi i nye prosjekter.

7. Anbefalinger

For videre arbeid anbefales det å inkludere et bredere spekter av materialkombinasjoner og forbindelsestyper, samt å analysere de eksakte dimensjoner og verdier for de ulike byggeelementene, for å oppnå større nøyaktighet i estimatene.

Det anbefales å sette forbindelsestyper opp mot hverandre i forhold til forbindelseskategoriene (SS, BB, BS, DD, DV og VV) for en mer detaljert kostnadssammenligning.

Det anbefales å vurdere flere økonomiske aspekter knyttet til DfDR, inkludert kostnadene for prosjekteringstid, demontering og remontering.

Videre bør det inkluderes tekniske beregninger av trekonstruksjonen for å sikre at de demonterbare forbindelsene oppnår tilsvarende kapasiteter som de opprinnelige forbindelsene.

Ved å undersøke flere metoder for å måle gjenbruksverdi og bruke eksakte beregningsmetoder, kan man også oppnå mer presise estimater av gjenbruks- og ombruksverdi.

Det anbefales å undersøke behovet for etterbehandling og godkjenning av demonterte elementer for bruken i nye konstruksjoner.

8. Referanser

- [1] UN Environment Programme, «2022 Global Status Report for Buildings and Construction,» 9. november 2022. [Internett]. Available: <https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>. [Funnet 11. februar 2025].
- [2] Statistisk sentralbyrå, «Avfallsregnskapet,» 8. desember 2023. [Internett]. Available: <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/avfall/statistikk/avfallsregnskapet>. [Funnet 6. november 2024].
- [3] FN-sambandet, «Parisavtalen,» 8. november 2024. [Internett]. Available: <https://fn.no/avtaler/miljoe-og-klima/parisavtalen>. [Funnet 24. januar 2025].
- [4] International Organization for Standardization, «ISO 20887:2020,» ISO, Genève, 2020.
- [5] L.-M. Ottenhaus, Z. Yan, R. Brandner, P. Leardini, G. Fink og R. Jockwer, «Design for adaptability, disassembly and reuse – A review of reversible timber connection systems,» 12. oktober 2023. [Internett]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823025394>. [Funnet 2. mai 2025].
- [6] G. Kanter, «Design for Deconstruction in the Design Process: State of the Art,» 7. november 2018. [Internett]. Available: https://www.researchgate.net/publication/328786962_Design_for_Deconstruction_in_the_Design_Process_State_of_the_Art. [Funnet 5. mai 2025].
- [7] K. I. Edvardsen og T. Ø. Ramstad, TREHUS - Håndbok 5, Oslo: SINTEF Byggforsk, 2018.
- [8] Norges Skogeierforbund, «Fakta om skogen i Norge,» Norges Skogeierforbund, u.å. [Internett]. Available: <https://skog.no/om-oss/dette-bor-du-vite-om-skogen-i-norge/>. [Funnet 3. mars 2025].
- [9] H. J. Blaß og C. Sandhaas, Timber Engineering, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2017.
- [10] M. H. Ramage, H. Burrridge, M. Busse-Wicher, G. Fereday, T. Reynolds, D. U. Shah, G. Wu, L. Yu, P. Fleming, D. Densley-Tingley, J. Allwood, P. Dupree, P. Linden og O. Scherman, «The wood from the trees: The use of timber in construction,» februar 2017. [Internett]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116306050>. [Funnet 6. mai 2025].
- [11] Standard Norge, «NS-INSTA 142:2009,» Standard Norge, Oslo, 2010.
- [12] A. Øvrum, «Konstruksjonsvirke - FOKUS på tre,» TreFokus AS, Treteknisk og Norsk Trelastkontroll, Oslo, 2012.
- [13] K. H. Solli og G. Glasø, «Trebaserte konstruksjonselementer - FOKUS på tre,» TreFokus AS og Treteknisk, Oslo, 2011.
- [14] K. Bell og H. Liven, «Limtreboka,» 2018. [Internett]. Available: https://www.moelven.com/globalassets/moelven-limtre/limtre_eksmpl_digital.pdf. [Funnet 23. mai 2025].

- [15] Byggforsk, «Bjelker av tre. Dimesjonering,» mai 2011. [Internett]. Available: https://www.byggforsk.no/dokument/304/bjelker_av_tre_dimensjonering. [Funnet 12. april 2025].
- [16] J. Aarstad og G. Glasø, «Massivtre - FOKUS på tre,» TreFokus AS og Treteknisk, Oslo, 2008.
- [17] Splitkon, «Hva er massivtre?,» 10. juni 2022. [Internett]. Available: <https://splitkon.no/nyheter/hva-er-massivtre/>. [Funnet 12. mai 2025].
- [18] Midt-Norsk Massivtre, «CLT - Massivtre,» u.å. [Internett]. Available: <https://www.mnmas.com/clt-massivtre>. [Funnet 23. mai 2025].
- [19] SINTEF Byggforsk, «Unngå skadekonstruksjoner i massivtre,» 7. juni 2017. [Internett]. Available: <https://www.sintef.no/sintef-community/fagblogg/poster/unnga-skadekonstruksjoner-i-massivtre/>. [Funnet 19. mars 2025].
- [20] Byggforsk, «Bindingsverk av tre. Dimensjonering og utførelse,» februar 2023. [Internett]. Available: https://www.byggforsk.no/dokument/358/bindingsverk_av_tre_i_smaahus_dimensjonering_og_utfoerelse. [Funnet 18. mars 2025].
- [21] Byggforsk, «Trebjelkelag. Dimensjonering og utførelse,» august 2011. [Internett]. Available: https://www.byggforsk.no/dokument/334/trebjelkelag_dimensjonering_og_utfoerelse#. [Funnet 7. mai 2025].
- [22] Byggforsk, «Planlegging av bygninger med KLT-elementer,» Byggforsk, mai 2023. [Internett]. Available: https://www.byggforsk.no/dokument/3009/massive_treelementer_typer_og_bruksomraader. [Funnet 18. mars 2025].
- [23] Byggforsk, «Mekaniske treforbindelsesmidler,» mai 2008. [Internett]. Available: https://www.byggforsk.no/dokument/601/mekaniske_treforbindelsesmidler#i52. [Funnet 20. mars 2025].
- [24] Kommunal- og distriktsdepartementet, «Lov om planlegging og byggesaksbehandling (plan- og bygningsloven),» 27. juni 2008. [Internett]. Available: https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2008-06-27-71/KAPITTEL_1#KAPITTEL_1. [Funnet 30. april 2025].
- [25] Direktoratet for byggkvalitet, «TEK17 - § 1-1. Formål,» 15. september 2017. [Internett]. Available: https://www.dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/1/1-1?t_q=plan%20og%20bygningsloven. [Funnet 7. mai 2025].
- [26] Direktoratet for byggkvalitet, «Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning,» 15. september 2017. [Internett]. Available: <https://www.dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/>. [Funnet 1. april 2025].
- [27] Byggstart, «TEK17: En komplett guide (våtrom, soverom, brannklasser),» Byggstart AS, u.å. [Internett]. Available: <https://www.byggstart.no/guide/tek17>. [Funnet 15. mai 2025].
- [28] C. J. Kibert, «ESTABLISHING PRINCIPLES AND A MODEL FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION,» 6. november 1994. [Internett]. Available: https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC24773.pdf. [Funnet 1. mai 2025].

- [29] NRK, «"Du har et valg, du har en sjanse",» 12. juni 2012. [Internett]. Available: <https://www.nrk.no/klima/brundtland-satte-klima-pa-dagsorden-1.8126481>. [Funnet 1. mai 2025].
- [30] Bæredygtig Udvikling, «1987 – Brundtland rapporten,» [Internett]. Available: <https://bu.dk/introduktion/baeredygtig-udviklings-historie/1987-brundtland-rapporten/>. [Funnet 1. mai 2025].
- [31] FN, «Bærekraftig utvikling,» 17. mars 2025. [Internett]. Available: <https://fn.no/tema/baerekraftig-utvikling-fattigdom-og-befolkning/baerekraftig-utvikling>. [Funnet 23. mai 2025].
- [32] S. Moffatt og P. Russell, *Assessing the Adaptability of Buildings: Annex 31, Energy-Related Environmental Impact of Buildings*, 2001.
- [33] S. K. Taromi, «Design for Disassembly and Reuse Developing an Indicator System for Volumetric Timber Structures,» 2023. [Internett]. Available: <https://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1808174/FULLTEXT03.pdf>. [Funnet 2. mai 2025].
- [34] Miljødirektoratet, «Sirkulær økonomi,» 11. oktober 2023. [Internett]. Available: <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/avfall/sirkular-okonomi/>. [Funnet 23. mai 2025].
- [35] Sirken, «Hva er forskjellen mellom ombruk og gjenbruk?,» 8. mars 2023. [Internett]. Available: <https://sirken.no/node/77?srsId=AfmBOoo-G3sHnpntp2fD80anR3AA7OyBaf3DFne5AC4GQoP0Kr-FITY->. [Funnet 23. mai 2025].
- [36] C. Cristescu, D. Honfi, K. Sandberg, E. Shotton og S. J. Walsh, «Design for deconstruction and reuse of timber structures -state of the art review,» februar 2021. [Internett]. Available: https://www.researchgate.net/publication/349180102_Design_for_deconstruction_and_reuse_of_timber_structures_-state_of_the_art_review. [Funnet 5. mai 2025].
- [37] O. Dalland og C. P. Dalland, *Metode og oppgaveskriving*, Oslo: Gyldendal Norsk Forlag AS, 2024.
- [38] Universitetet i Agder, «Kunstig intelligens i eksamensbesvarelser og skriftlige oppgaver,» 28. mars 2025. [Internett]. Available: <https://www.uia.no/studier/for-studenter/eksamen/kunstig-intelligens-i-oppgaveskriving.html>. [Funnet 4. april 2025].
- [39] D. I. Jacobsen, *Hvordan gjennomføre undersøkelser?*, Oslo: Cappelen Damm Akademisk, 2022.
- [40] University of Copenhagen, «Academic Information Seeking,» Coursera , u.å. [Internett]. Available: <https://www.coursera.org/learn/academicinfoseek>. [Funnet 10. februar 2025].
- [41] Backe, «Stabbursmoen skole,» Backe, [Internett]. Available: <https://stabbursmoen.backe.no/om-prosjektet>. [Funnet 10. mars 2025].
- [42] Woodcon Engineering AS, «Prosjekteringsmanual,» Woodcon, Oslo, u.å.
- [43] K. Hatlestad, *Backe*, 2025.
- [44] Eurocode Applied, «Table of design material properties for structural steel,» u.å. [Internett]. Available: <https://eurocodeapplied.com/design/en1993/steel-design-properties>. [Funnet 8. april 2025].

- [45] Direktoratet for byggkvalitet, «TEK17 - § 9-5. Byggavfall og ombruk,» 1. oktober 2023. [Internett]. Available: https://www.dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/9/9-5?_t_q=ombruk. [Funnet 1. april 2025].
- [46] Regjeringen, «Lov om planlegging og byggesaksbehandling (plan- og bygningsloven) - Første del: Alminnelig del,» u.å. [Internett]. Available: https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2008-06-27-71/KAPITTEL_1#KAPITTEL_1. [Funnet 25. mai 2025].
- [47] Regjeringen, «Nasjonale forventninger til regional og kommunal planlegging 2023–2027,» Regjeringen, u.å. [Internett]. Available: https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/nasjonale-forventninger-til-regional-og-kommunal-planlegging-20232027/id2985764/?q=ombruk&ch=4#match_0. [Funnet 15. mai 2025].
- [48] Standard Norge, «NS 3691-3:2025,» Standard Norge, Oslo, 2025.
- [49] A. O. Z. Mejia, «Developing a grading tool for sustainable design of structural systems in buildings,» Vår 2021. [Internett]. Available: <https://liu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1573857&dswid=9231>.
- [50] Y. Sandin, «Att mäta demonterbarhet och återbrukbarhet hos träbyggnader,» RISE , Göteborg, Sweden, 2022.
- [51] A. A. Shamaa og K. Saleh, «Detachable Connections for Circularity of Timber Buildings,» 2021. [Internett]. Available: <https://odr.chalmers.se/items/19773cad-f916-4b76-a5c1-66e3056d19b1>. [Funnet 13. mai 2025].
- [52] Rothoblaas, «UV T,» u.å. [Internett]. Available: <https://www.rothoblaas.com/products/fastening/brackets-and-plates/concealed-connections/uv-t>. [Funnet 14. mai 2025].
- [53] Rothoblaas, «BSA,» u.å. [Internett]. Available: <https://www.rothoblaas.com/products/fastening/brackets-and-plates/metal-hangers/bsa>. [Funnet 14. mai 2025].
- [54] Rothoblaas, «ALUMEGA,» u.å. [Internett]. Available: <https://www.rothoblaas.com/products/fastening/brackets-and-plates/concealed-connections/alumega>. [Funnet 14. mai 2025].
- [55] Rothoblaas, «RADIAL,» u.å. [Internett]. Available: <https://www.rothoblaas.com/products/fastening/brackets-and-plates/angle-brackets-and-plates-for-buildings/radial>. [Funnet 14. mai 2025].
- [56] Rothoblaas, «X-RAD,» u.å. [Internett]. Available: <https://www.rothoblaas.com/products/fastening/brackets-and-plates/x-rad/x-rad>. [Funnet 14. mai 2025].
- [57] Rothoblaas, «TITAN PLATE T,» u.å. [Internett]. Available: <https://www.rothoblaas.com/products/fastening/brackets-and-plates/angle-brackets-and-plates-for-buildings/titan-plate-t>. [Funnet 14. mai 2025].
- [58] Rothoblaas, «WOODY,» u.å. [Internett]. Available: <https://www.rothoblaas.com/products/fastening/brackets-and-plates/concealed-connections/woody>. [Funnet 14. mai 2025].

[59] O. Grøthe, Interviewee, *Intervju Stabbursmoen Skole*. [Intervju]. 26. februar 2025.

Vedlegg

Vedlegg A – Log book

Vedlegg B – Beregning massivtre- og limtrekonstruksjonen

Vedlegg C – Plateforbindelser

Vedlegg D – Forberedelser til intervju om Stabbursmoen

Vedlegg E – Intervju transkribering fra teams

Vedlegg F – Forkortet transkribering