

Bærekraftig industribygg

En analyse av CLT, limtre og stål-sandwichelementer



ANDREJ ANATOLYVICH SØRENSEN



CASPER BAKKE LARSEN

VEILEDER

Preben Aanensen, Universitet i Agder
Geir Glasø, Sweco

Universitetet i Agder, 2024

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.	<input checked="" type="checkbox"/>
2.	Jeg/vi erklærer videre at denne besvarelsen: <ul style="list-style-type: none"> • 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. 	<input checked="" type="checkbox"/>
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.	<input checked="" type="checkbox"/>
4.	Jeg/vi er kjent med at alle innleverte oppgaver kan bli plagiatkontrollert.	<input checked="" type="checkbox"/>
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.	<input checked="" type="checkbox"/>
6.	Jeg/vi har satt oss inn i regler og retningslinjer i bruk av kilder og referanser på biblioteket sine nettsider.	<input checked="" type="checkbox"/>

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)?
(Båndleggingsavtale må fylles ut)

JA NEI

- 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

Denne masteroppgaven representerer slutten på en toårig mastergrad i sivilingeniørstudiet innen bygg i faget BYG508 ved Universitetet i Agder, Grimstad, våren 2024. Masteroppgaven markerer en personlig og akademisk reise med fokus på innovative og bærekraftige byggemetoder. Oppgaven er et resultat på godt samarbeid mellom studentene og Sweco som den eksterne part.

Målet og interessen for oppgaven har vært å utforske bruken av massivtre som CLT og limtre, som et alternativ til den tradisjonelle bruken av stål-sandwichelementer i konstruksjonen av industribygg. Det er ønsket å videreutvikle og anvende vår tekniske kompetanse til byggebransjen for mer bruk av miljøvennlige materialvalg og praksiser.

Læringen og erfaringene fra bachelor og masterstudiet kombinert med et dypdykk i dette prosjektet har økt vår faglige kompetanse samt økt våre samarbeidsevner for måloppnåelse. Vi håper vår oppgave kan være med på å endre synet om at det er kun en måte å bygge industribygg effektivt og rimelig på.

Vi ønsker vi å takke vår akademiske veileder Preben Aanensen for kontinuerlig veiledning, oppmuntring og kritiske tilbakemeldinger gjennom hele prosessen. Ekspertisen og støtten har vært støttende for vår faglige utvikling og forståelse av komplekse problemstillinger. En takk til Geir Glasø fra Sweco med innspill og rammesetting av oppgaven.

Videre vil vi takke de som tok seg tid til å delta i våre intervjuer. Uten bidraget fra disse industrielle aktørene, ville ikke vårt forskningsprosjekt vært så omfattende. Villigheten til å dele deres kunnskap og erfaringer har gitt oss dybde for våre analyser og perspektiver.

Vi håper at funnene i denne masteroppgaven vil motivere andre til å vurdere miljøvennlige byggemetoder og materialer, og oppgaven kan brukes til videre forskning og utvikling innenfor feltet.



Andrej Anatolyvich Sørensen



Casper Bakke Larsen

Grimstad, Mai 2024

Summary

This master's thesis explores how building materials such as Cross-laminated timber (CLT) and glued laminated timber (glulam) can be used as alternative building materials to traditional steel-sandwich panel in industrial buildings. This study addresses the primary research question and its sub-questions through a comparative analysis on subject like CO₂-emissions, material cost, construction time and reuse potential.

This study uses a combination of literature review, case study analysis, comparative data evaluation, and semi-structured interviews with industry specialists in CLT, glulam and steel construction. FEM-design was used for structural design of two designs using CLT and glulam for integrity and utilization evaluation purposes. CO₂-emissions were assessed using One Click LCA. Cost and time analysis were conducted using interview information and material data provided. Information about reuse of the different building types were conducted using literature and interview insights.

Key finding in this master thesis was buildings constructed with CLT, and glulam have significantly lower CO₂-emissions compared to the case building built out of steel-sandwich. CLT and glulam design showed approximately 58,6 % lower CO₂-emissions compared to steel-sandwich warehouse building. The cost analysis revealed that material cost of CLT and glulam can be more expensive compared to steel-sandwich. On the other hand, CLT and glulam provide faster construction time compared to steel-sandwich construction, about 46 % reduced construction time, this can reduce the total cost of a project. CLT, glulam and steel have all good potential for reuse. CLT and glulam are easy to dismantle and repurpose with simple tools, whilst steel can be efficiently reused if they are mechanically fastened instead of welded.

The study shows that CLT and glulam represent sustainable, cost and time-effective alternatives to steel-sandwich panel type industrial buildings. The use of CLT and glulam also promote a more sustainable and environmentally friendly construction industry.

Innholdsfortegnelse

Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring.....	i
Publiseringsavtale.....	ii
Forord.....	iii
Summary	iv
Figurliste.....	x
Tabelliste	xi
1. Innledning	1
2. Samfunnsperspektiv.....	2
2.1. Bærekraft og samfunn	2
2.2. FNs Bærekraftsmål.....	3
2.3. Helse, miljø og sikkerhet.....	4
2.4. Estetikk.....	4
3. Kunnskapsbakgrunn.....	5
3.1. Tre som konstruksjonsmaterialer	5
3.1.1. Historie	5
3.1.2. Limtre.....	5
3.1.3. Massivtre (CLT)	10
3.2. Stål som konstruksjonsmateriale.....	12
3.2.1. Stål	13
3.2.2. Sandwichelementer.....	14
3.3. Regelverk.....	14
3.3.1. Byggteknisk forskrift	14
3.3.2. Byggherreforskriften.....	15
3.3.3. Plan- og bygningsloven	15
3.4. Norsk standard.....	15
3.5. Lastberegning.....	16
3.5.1. Grensetilstander	17
3.5.2. Egenlast.....	17
3.5.3. Nyttelast	17
3.5.4. Snølast	17
3.5.5. Vindlast	18
3.6. Miljø	18

3.6.1.	Karbondioksid	18
3.6.2.	Miljø ved bruk av stål.....	19
3.6.3.	Miljø ved bruk av tre.....	19
3.6.4.	Ombruk.....	20
3.7.	Klima i byggebransjen	20
3.7.1.	Livssyklusanalyse	20
3.7.2.	Miljøsertifisering.....	23
3.7.3.	Klimagassberegning, NS 3720.....	23
3.8.	Økonomi og fremdrift	24
3.8.1.	Byggekostnad.....	24
3.8.2.	Byggetid	25
4.	Forskerspørsmål.....	26
4.1.	Forskerspørsmål:.....	26
4.2.	Underspørsmål:.....	26
4.3.	Avgrensninger	26
5.	Case og materialer	27
5.1.	Case.....	27
5.2.	Materialer	28
5.2.1.	Limtre.....	28
5.2.2.	CLT-elementer	28
5.3.	Digitale verktøy	29
5.3.1.	FEM-Design.....	29
5.3.2.	Autodesk Revit.....	29
5.3.3.	One Click LCA.....	29
5.3.4.	Office 365.....	30
6.	Metode.....	31
6.1.	Metode i forskning.....	31
6.1.1.	Kvantitative og kvalitative metoder	31
6.1.2.	Metodevalg.....	32
6.1.3.	Kriterier for vurdering av valgte forskningsmetoder.....	32
6.2.	Litteraturstudie	32
6.3.	Loggbok.....	33
6.3.1.	Utvalg og avvisning.....	33
6.3.2.	Utvalg litteratur	34

6.3.3.	Uthenting av informasjon	34
6.4.	Semistrukturert intervju	34
6.4.1.	Planlegging og forberedelse av intervjuer	34
6.4.2.	Informanter	35
6.4.3.	Utførelse av intervjuene	36
6.4.4.	Etter gjennomføring av intervjuene	37
6.4.5.	Styrker og svakheter av intervjumetoden	37
6.5.	Lastberegning.....	38
6.5.1.	Egenlast.....	38
6.5.2.	Nyttelast	38
6.5.3.	Snølast	38
6.5.4.	Vindlast	38
6.6.	FEM-Design	38
6.7.	Autodesk Revit	39
6.8.	One Click LCA	39
6.8.1.	Oppstart av One Click LCA	39
6.9.	Klimagassberegning med One Click LCA	40
6.10.	Materialpris og mengder	40
6.11.	Totalkostnad	41
7.	Resultat	42
7.1.	Semistrukturert intervjuer av Firma A og Firma B	42
7.1.1.	Felles perspektiver med CLT/limtre.....	42
7.1.2.	Spesifikke innsikter fra Firma A	45
7.1.3.	Spesifikke innsikter fra Firma B	47
7.2.	Semistrukturert intervju av Firma C.....	51
7.3.	Dimensjonering.....	52
7.3.1.	Kapasitetskontroll for søyle Design 1	52
7.3.2.	Kapasitetskontroll for bjelke Design 1.....	53
7.3.3.	Kapasitetskontroll for vegg Design 1	55
7.3.4.	Kapasitetskontroll for tak Design 1.....	56
7.3.5.	Kapasitetskontroll for lagerplass/kontordekke Design 1	57
7.3.6.	Kapasitetskontroll for søyle Design 2	58
7.3.7.	Kapasitetskontroll for bjelke Design 2.....	59
7.3.8.	Kapasitetskontroll for vegg Design 2	60

7.3.9.	Kapasitetskontroll for tak Design 2.....	61
7.4.	Design 1 og Design 2 fra Revit.....	62
7.5.	Klimagassberegning	64
7.5.1.	Miljøgradering	64
7.5.2.	Design 1: Lagerbygg i CLT og limtre	65
7.5.3.	Design 2: Lagerbygg i CLT og limtre	66
7.5.4.	Lagerbygget i stål.....	67
7.5.5.	Standard Referansebygget	68
7.5.6.	Sammenligning	69
7.6.	Materialkostnad.....	70
7.6.1.	Casebygget.....	70
7.6.2.	Design 1 og Design 2.....	71
7.6.3.	Kostnadssammenligning av materialer	72
7.7.	Totalkostnad	72
7.8.	Konstruksjonstid	72
7.8.1.	Casebygget.....	72
7.8.2.	Lagerbygg i Rysstad.....	73
7.9.	Litteraturstudium.....	73
7.9.1.	Understanding Costs and Identifying Value in Mass Timber Construction: Calculating the 'Total Cost of Project' (TCP).....	73
7.9.2.	Mass timber: evaluating construction performance	74
7.9.3.	Asplan Viak: Energi- og materialkonsept.....	75
8.	Diskusjon	77
8.1.	Dimensjonering.....	77
8.1.1.	Tolkning av resultatene	77
8.1.2.	Diskusjon av metode	78
8.2.	Klimagassberegning	78
8.2.1.	Tolkning av resultatene fra One Click LCA.....	78
8.2.2.	Diskusjon av metode	79
8.2.3.	Bærekraftige byggemetode.....	80
8.3.	Kostnader	80
8.3.1.	Materialkostnad	80
8.3.2.	Transport	81
8.3.3.	Totalkostnad	82

8.3.4.	Usikkerheter i kostnadsestimater.....	83
8.3.5.	Troverdighet	83
8.4.	Konstruksjonstid	84
8.4.1.	Tolkning av resultatene	84
8.4.2.	Diskusjon rundt metoden	85
8.5.	Ombruk	86
8.5.1.	Tolkning av resultatene	86
8.5.2.	Diskusjon rundt metoden	87
9.	Konklusjon.....	88
9.1.	Forskerspørsmål.....	88
9.2.	Underspørsmål.....	88
10.	Anbefalinger.....	89
10.1.	Råd til oppdragsgiver	89
10.2.	Videre arbeid.....	89
11.	Referanser.....	90
12.	Vedlegg.....	100

Figurliste

Figur 2.1 - FNs Bærekraftsmål nr 9 "Industri, innovasjon og infrastruktur" [23]	3
Figur 2.2 - FNs Bærekraftsmål nr 12 "Ansvarlig forbruk og produksjon" [24]	3
Figur 2.3 - FNs Bærekraftsmål nr 13 "Stoppe klimaendringene" [25]	3
Figur 3.1 - Skjematisk fremstilling av produksjonsprosessen for limtre [34]	6
Figur 3.2 - Oppbygning av kombinert limtre type GL30c. T14,T15 og T22 er forskjellige styrkeklasser der tallet representerer den karakteristiske strekkfastheten på 30 MPa (N/mm ²) [34]	7
Figur 3.3 - konstruksjonskomponent av limtre (1) har høyere styrke og mindre spredning i styrkeegenskapene sammenlignet med en tilsvarende komponent i vanlig konstruksjonsvirke (2) [34]	8
Figur 3.4 - Illustrasjon av lamineringseffekten der knuter blir mer spredt og er mindre sammenlignet med vanlig konstruksjonsvirke med stor knute [40]	8
Figur 3.5 - Illustrasjon av forskjellige limtrebjelker og fagverk for mellomstore og store spenn [41] ..	10
Figur 3.6 - Krysslagte elementer [45]	11
Figur 3.7 - Utvikling av produksjon av CLT i Europa [43]	12
Figur 3.8 - Oppbygningen av sandwichelementet i lagerbygget [51]	14
Figur 3.9 - Fire trinn i en LCA [83]	21
Figur 5.1 - 3D modell av bygget (sør-øst) over og (øst-nord) under [99]	28
Figur 7.1 - Søyلة C.7.1 markert i rødt fra FEM-Design [9]	52
Figur 7.2 - Bjelke B.28.1 markert i rødt fra FEM-Design [9]	53
Figur 7.3 - Takbjelke B.6.1 markert i rødt fra FEM-Design [9]	54
Figur 7.4 - CLT-vegg TP.7 markert i rødt fra FEM-Design [9]	55
Figur 7.5 - CLT-tak TP.14 markert i rødt fra FEM-Design [9]	56
Figur 7.6 - CLT-lager/kontordecke TP.10 Markert i rødt fra FEM-Design [9]	57
Figur 7.7 - Søyلة C.18.1 markert i rødt fra FEM-Design [9]	58
Figur 7.8 - Bjelke B.35.1 markert i rødt fra FEM-Design [9]	59
Figur 7.9 - CLT-vegg TP.6 markert i rødt fra FEM-Design [9]	60
Figur 7.10 - CLT-tak TP.5 markert i rødt fra FEM-Design [9]	61
Figur 7.11 - Design 1 fra Revit med søyler og bjelker [9]	62
Figur 7.12 - Design 1 fra Revit med CLT vegger og lager/kontordekker [9]	62
Figur 7.13 - Design 2 fra Revit med søyler og bjelker [9]	63
Figur 7.14 - Design 2 fra Revit med CLT vegger [9]	63
Figur 7.15 - Miljøgradering av Design 1 [108]	65
Figur 7.16 - Miljøgradering av Design 2 [127]	66
Figur 7.17 - Miljøgradering av stål bygget [127]	67
Figur 7.18 - Miljøgradering av referansebygget [127]	68
Figur 7.19 - Sammenligning av totalt klimagassutslipp i kg [9]	69
Figur 7.20 - Sammenligning av totalt klimagassutslipp i prosent [9]	69
Figur 7.21 - Sammenligning av klimagassutslipp fra byggematerialer [9]	70
Figur 7.22 - Forskjell i tidsbruk av byggeprosjekter i stål og betong kontra CLT og limtre [112]	73
Figur 7.23 - Kostnad per kvadrat fot for CLT og limtre kontra tradisjonelle bygg [113]	74
Figur 7.24 - Sammenligning av konstruksjonstid for CLT mot tradisjonelt bygget bygg [113]	75

Tabelliste

Tabell 3.1 - Fasthetsklasser for kombinert limtre definert i EN 14080 [34]	9
Tabell 3.2 - Fasthetsklasser for homogent limtre definert i EN 14080 [34]	9
Tabell 3.3 - Typiske dimensjoner for CLT-elementer [43]	10
Tabell 3.4 - Fasthetsklasser for C14, C16, C24 og C30 [43]	11
Tabell 3.5 - Oversikt over Eurokoder [56]	16
Tabell 3.6 - Oversikt over de ulike livssyklusfasene til en bygning eller et produkt [84]	22
Tabell 6.1 - Eksempel på vår søkeprosess [9]	33
Tabell 6.2 - Utdrag av loggboken [9]	33
Tabell 6.3 - Oversikt over gjennomførte intervjuer [9]	35
Tabell 6.4 - Beregningsgrunnlag for materialpris [9]	40
Tabell 6.5 - Materialmengder [9]	41
Tabell 7.1 - Utnyttelse for den mest belastede limtresøylen i FEM-Design [9]	52
Tabell 7.2 - Utnyttelse for den mest belastede limtrebjelken ved lagerdekke fra FEM-Design [9]	53
Tabell 7.3 - Utnyttelse for den mest belastede limtrebjelken i taket fra FEM-Design [9]	54
Tabell 7.4 – Utnyttelse for den mest belastede CLT-veggen fra FEM-Design [9]	55
Tabell 7.5 - Utnyttelse for CLT-taket fra FEM-Design [9]	56
Tabell 7.6 - Utrekning av utnyttelse for lager/kontordekke fra FEM-Design [9]	57
Tabell 7.7 - Utnyttelse av mest belastede søyle for Design 2 fra FEM-Design [9]	58
Tabell 7.8 - Utnyttelse av takbjelke for Design 2 fra FEM-Design [9]	59
Tabell 7.9 - Utnyttelse av bærende veggelement for Design 2 fra FEM-Design [9]	60
Tabell 7.10 - Utnyttelsesgrad for CLT takelementene i Design 2 fra FEM-Design [9]	61
Tabell 7.11 - Forklaring av livssyklusfasene [84]	64
Tabell 7.12 - Totale kg CO ₂ ekvivalenter for Design 1 [9]	65
Tabell 7.13 - Klimagassutslippet for Design 1 fordelt på livssyklus stadier [9]	65
Tabell 7.14 - Totale kg CO ₂ ekvivalenter for Design 2 [9]	66
Tabell 7.15 - Klimagassutslippet for Design 2 fordelt på livssyklus stadier [9]	66
Tabell 7.16 - Totale kg CO ₂ ekvivalenter for stål bygget [9]	67
Tabell 7.17 - Klimagassutslippet for stålbygget fordelt på livssyklus stadier [9]	67
Tabell 7.18 - Totale kg CO ₂ ekvivalenter for referansebygget [9]	68
Tabell 7.19 - Klimagassutslippet for referansebygget fordelt på livssyklus stadier [9]	68
Tabell 7.20 - Økning mellom byggematerialene i prosent [9]	70
Tabell 7.21 - Utdrag av kostand for hovedmaterialene av Casebygget [9]	71
Tabell 7.22 - Kostand for Design 1 [9]	71
Tabell 7.23 - Kostand for Design 2 [9]	71
Tabell 7.24 - Materialkostandssammenligning [9]	72
Tabell 7.25 – Totalkostnadssammenligning [9]	72
Tabell 7.26 - "Total kostnaden for et prosjekt" sammenligning mellom CLT og limtre mot betong [112]	74

1. Innledning

Økende urbanisering og miljøbevissthet, sammen med behovet for bærekraftige utvikling, har satt fokus på bruk av mer miljøvennlige bygningsmaterialer [1]. I den sammenhengen har bruken av tre i konstruksjoner, blitt fremhevet som et bærekraftig alternativ til tradisjonelle byggematerialer som stål og betong [2]. Disse trebaserte materialene, som krysslaminert tre (CLT) og limtre, tilbyr unike fordeler når det gjelder effektivitet og miljøpåvirkning, sammenlignet med konvensjonelle stål- og betongbygg [2] [3].

Denne studien tar for seg en komparativ analyse av et kombibyg/industribygg som er blitt bygget i den tradisjonelle stål-sandwichelement metoden mot et digitalt konstruert CLT- og limtrebygg med samme utforming. Målet er å belyse forskjellene i klimagassutslipp, totalomkostninger og byggetid. CLT og limtre har vist seg å tilby effektive løsninger ved å redusere byggetid gjennom store prefabrikerte elementer som monteres raskt på byggeplass, noe som potensielt kan føre til lavere kostnader, samt godt innemiljø. [4] Videre gir redusert byggetid en reduksjon i miljøpåvirkning ved å redusere støy, støv og transportutslipp på byggeplassen [5] [6].

Fra et miljøperspektiv representerer tre et fornybart materiale som bidrar til karbonlagring og lite energiforbruk ved produksjon og bearbeiding av produktet, noe som resulterer i lavere totale CO₂-utslipp for et byggeprosjekt [7]. Dette står i kontrast til stålproduksjonen, der CLT og limtre kan redusere klimagassutslippene med 28-34 % sammenlignet med stål når karbonlagring ikke er inkludert [3]. Stålproduksjonen krever ofte høyt energiforbruk som fører til økt CO₂-utslipp.

Denne oppgaven vil bygge på eksisterende litteratur, intervjuer og case-studie for å utforske og sammenligne de nevnte aspektene ved bruk av CLT og limtre i forhold til stål-sandwichelementer i industribygg. Ved å utføre en detaljert analyse, sikter studien mot å gi en dypere innsikt i hvordan disse materialene påvirker konstruksjonstiden, kostnad, og miljø, for alle parter i et byggeprosjekt. Der entreprenøren kan ha raskere prosjektgjennomføring som fører til besparelse i tid og arbeidskostnader. For arbeiderene kan bygging med CLT og limtre føre til mindre støy og støv på byggeplassen samt behovet for tunge løfteutstyr. For sluttbrukeren kan redusert byggetid føre til tidligere salg eller utleie av bygget, i tillegg til at man får et bærekraftig bygg som kan være tiltalende for leietagere. Det kan oppleve sunnere innemiljø og et bærekraftig bygg. [8] [9]

2. Samfunnsperspektiv

I dette kapitlet presenteres hvordan bygg- og anleggsbransjen kan bidra til en mer bærekraftig samfunnsutvikling ved å implementere flere trebaserte bygningsmaterialer, samt hvilke bærekraftsmål dette kan støtte opp under [9].

2.1. Bærekraft og samfunn

Fundamentet for den globale klimainnsatsen ble lagt den 12. desember 2015 med vedtakelsen av Parisavtalen under FN's klimakonvensjon. Parisavtalen ble en felles juridisk bindende avtale for de 194 medlemslandene inkludert EU om å bidra til et felles kutt av klimagassutslippene. Formålet med Parisavtalen er å begrense den globale oppvarmingen til under 2/1,5°C samt bli klimanøytrale ved utgangen av år 2100. For å nå målet lager hvert land nasjonale planer for kutt i klimagassutslipp som oppdateres hvert femte år. [10] Norge forpliktet seg ved å ratifisere avtalen 22. april 2016, med et mål om å redusere klimagassutslippet med 50% innen 2030 i forhold til 1990-tallet samtidig bli klimanøytrale innen samme periode. I tillegg har Norge lovfestet en lov om å bli et lavutslippssamfunn i 2050. [11]

Økende befolkning betyr økt behov for infrastruktur i et samfunn. Byggenæringen er derfor en viktig og stor spillebrikke for å imøtekomme det økte behovet. På grunn av denne økningen i befolkning samt det økende behovet for utvikling, må byggenæringen se etter alternative byggematerialer som kan imøtekomme de ambisiøse målene om å redusere de globale klimagassutslippene. Bygg og anleggssektoren kalles ofte for "40%-sektoren" siden det globalt står for omtrent 40% av klimagassutslippene, 40% energiforbruk og 40% avfall [12] [13]. Per dags dato brukes det mest armert betong og stål til konstruksjoner på grunn av tilgjengeligheten samt forholdsvis raskt og enkelt å bygge med. Avhengig av produksjonsmetode er disse materialene ressurskrevende der sement og stål krever store mengder energi under produksjon og står for ca. 7-8% av den globale CO₂ utslippet hver for seg [14] [15] [16]. Å kvitte seg helt med betong eller stål er ikke et alternativ da dette er materialer som må brukes, men mer bærekraftige og innovative løsninger som reduserer klimagassutslippet og reduserer klimafotavtrykket betraktelig vil være den beste og mest ettertrakte løsningen. Samtidig vil løsninger som øker gjenbruk og ombruk av et bygg ved endt levetid være levedyktige løsninger. [17]

I den sammenheng vil bruken av trebaserte materialer som en alternativ erstatning for stål og betong for hele eller deler av konstruksjonen, tilby en mulighet for reduksjon av klimagassutslippene og samtidig gi nye alternativer til de tradisjonelle materialene. Trebaserte materialer er fornybare ressurser som lagrer karbon og har lavt energiforbruk ved produksjon. Dette bidrar til å redusere og motvirke klimagassutslipp. Skogen i Norge binder ca. 70 % av CO₂-utslippet fra menneskene i Norge. Trær vokser ved å absorbere CO₂ fra atmosfæren og karbon forblir lagret i treproduktet gjennom dens hele levetid, mens i naturen vil treet slippe ut CO₂ ut i naturen ved at den dør og råtner. [5] Et tre i vekstfasen binder mer CO₂ enn et modent tre og den norske skogen har tre ganger så mye skog i dag enn for 100 år siden. Grunnen til dette, er at det plantes mer enn det hogges. Det er derfor like viktig å hogge trær for å lage plass til nye trær som kan ta opp mer CO₂, i stedet for å la gamle trær dø og råtne, noe som ville slippe ut alt det lagrede karbonet. [18] Det er ikke bare de miljømessige

fordelene ved bruk av trebaserte materialer som er positive, tre kan ha fremragende egenskaper når det gjelder brann, styrke, lav vekt, kort byggetid, stillere byggeplass og sirkulær økonomi [19].

Industribygg blir i all hovedsak bygget ut av betong eller stålkonstruksjon [3], som nevnt bruker store mengder energi og genererer merkverdig klimagassutslipp, fra materialutvinning, produksjonen og transport. Med tilnærmet like eller bedre egenskaper kan CLT produkter som limtre og krysslått tre erstatte store deler av betong mengden og stål som blir brukt til bygging av industribygg [2].

2.2. FNs Bærekraftsmål

Ettersom byggebransjen står for en betydelig del av de globale utslippene [20], fremstår bruken av tre i byggebransjen som en mulig strategi for å kutte ned disse utslippene [21]. Konstruksjoner av tre gir ikke bare fordeler ved å redusere karbonavtrykk, men kan også spille en viktig rolle i å oppnå FNs bærekraftsmål ved å tilby bærekraftige løsninger som fremmer ressurseffektivitet og reduserer miljøbelastningen [22]. Under kommer de relevante målene CLT og limtre kan bygge under på:



Figur 2.1: Mål nr.9: "Bygge solid infrastruktur og fremme inkluderende og bærekraftig industrialisering og innovasjon" [23]. Bruk av CLT og limtre kan fremme omstilling av industrien mot bærekraftig form og innovasjon i byggemetoder. Samt raskere, renere og presis konstruksjon. Videre vil det bygge på mål 9.4 ved at det er en fornybar ressurs, krever mindre bruk av energi for produksjon av materialene og reduksjon av avfall ved prefabrikasjon. [9]

Figur 2.1 - FNs Bærekraftsmål nr 9 "Industri, innovasjon og infrastruktur" [23]



Figur 2.2: Mål nr. 12: "Sikre bærekraftig forbruks- og produksjonsmønstre" [24]. Ved å bruke fornybare ressurser som CLT og limtre kan det effektivisere bruken av naturressursene, dette kan minske avhengighet av ikke fornybare ressurser i byggebransjen. Prefabrikasjon av limtre og CLT kan redusere avfall på byggeplassen, noe som kan muliggjøre en høyere grad av resirkulering og ombruk. Dette underbygger delmål 12.2 ved bærekraftig forvaltning av naturressurser. [9]

Figur 2.2 - FNs Bærekraftsmål nr 12 "Ansvarlig forbruk og produksjon" [24]



Figur 2.3: Mål nr. 13: "Handle umiddelbart for å bekjempe klimaendringene og konsekvensene av dem" [25]. Treverkets evne til å lagre CO₂ gjennom byggets levetid, bidrar til å redusere CO₂ i atmosfæren. Erstatte energiintensive materialer som stål med CLT og limtre kan redusere de totale klimagassutslippene. Underbygge delmål 13.2 og 13.3 ved at det støtter byggebransjens mål om å redusere klimagassutslipp og bekjempe klimaendringene, samtidig som det fremmer innovasjon og tilbyr nye metoder og teknikker for bærekraftig konstruksjon. [9]

Figur 2.3 - FNs Bærekraftsmål nr 13 "Stoppe klimaendringene" [25]

2.3. Helse, miljø og sikkerhet

Ved å velge bærekraftige materialer som tre i byggeprosjekter, kan man forbedre inneklimate, som igjen skaper en bedre trivsel. Tre er et hygroskopisk materiale, noe som betyr at det har den evnen til å absorbere og gi fuktighet. Dette gjør treet også hydrotermisk, hvilket innebærer at det kan fungere som et passivt varmebatteri. Når fuktighet tilsettes, frigjøres det dermed lagret varme fra treet. Dette er grunnen til at man ofte får den varme og behagelige følelsen når man kommer inn i et rom med mye trevirke. [8]

Å bruke tre som byggematerialer reduserer også eksponeringen for helseskadelige stoffer, som for eksempel støv og kjemikalier fra sementproduksjon, hvor innånding av betongstøv kan føre til betennelse eller irritasjon i luftveiene [26].

Ved å ha et systematisk arbeid med HMS, kan dette bidra til å forebygge arbeidsulykker som skjer på arbeidsplassen, som alle virksomheter har ansvar for [27] [28]. Antall dødsulykker og alvorlige skader er redusert dramatisk de siste 50 årene, men tall fra industrien viser at utviklingen har flatet seg mer ut i det siste, så derfor er det viktig å tenke noe nytt for å få ytterligere forbedringer [28].

2.4. Estetikk

Estetikk utforsker grunnlaget for skjønnhet i kunst og natur og beskriver metodene som benyttes av kunstnere og håndverkere i deres kreative arbeid [29]. Estetikk og funksjonalitet kan gå hånd i hånd, ved at bygningens funksjonalitet handler om hvordan den dekker behovene til de som skal bruke den, og hvor godt den er designet for å fungere effektivt [30]. I kontekst med bruk av trevirke som byggemateriale blir bygningene mer estetisk vakre og miljøvennlige, en løsning som fremhever treetes sjarmerende skjønnhet [31].

3. Kunnskapsbakgrunn

Dette kapittelet inneholder en enkel gjennomgang av teoretisk materiale. Teorien har til hensikt å gi leseren nødvendig bakgrunnskunnskap for å forstå problemområdet og resultatene som presenteres i denne rapporten. [9]

3.1. Tre som konstruksjonsmaterialer

I dette delkapittelet presenteres massive konstruksjonsmaterialer som CLT og limtre. Teorien om disse materialene vil gi en overordnet forståelse av deres oppbygning, bruk og formål. [9]

3.1.1. Historie

Tre har vært det mest grunnleggende bygningsmaterialet gjennom menneskets historie. Bruken av tre som har vært en stor del av utviklingen av sivilisasjonen, kan spores tusenvis av år tilbake. Tre som en fornybar og lett tilgjengelig ressurs med ulike egenskaper har gjort det til et ideelt bygningsmateriale for forskjellige anvendelser. Bruk av tre i konstruksjoner ble verdifullt på grunn av sin styrke, fleksibilitet i forhold til utforming og av det kunne bearbeides lett med enkle håndverktøy. Mange av de kjente bygningene som ble bygget er boliger som rommet mange mennesker samt religiøse strukturer. I Norge og Skandinavia er bruken av tre forankret i historien med tømmerbygninger som har videreutviklet seg over århundrer til stavkirker fra middelalderen som enda står til dags dato. Bygningene er et testament til treets holdbarhet og kunnskap som gamle snekkere hadde. [32]

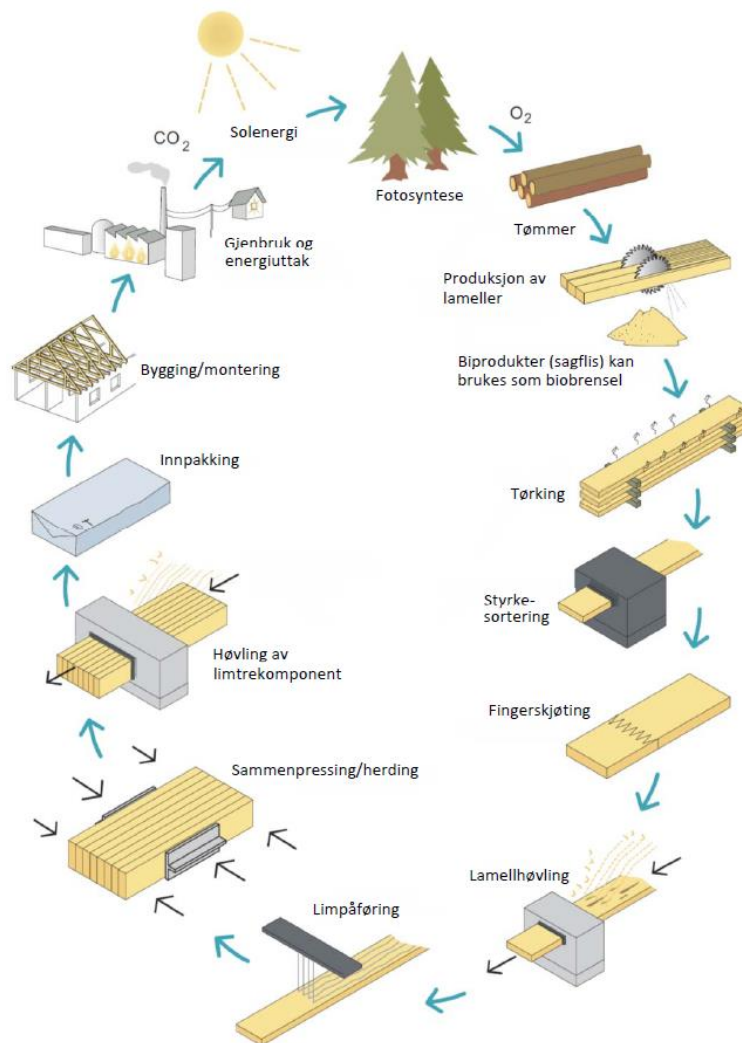
Etter de store bybrannene og den industrielle revolusjonen så man en nedgang i trebygninger. Nye byggeteknikker og materialer som stål og betong tok over for store og høye bygninger, mens tre ble mest brukt til boliger og mindre strukturer. [32]

I nyere tider har det blitt utviklet nye ingeniørprodukter som CLT og limtre som begge kommer fra massivtre kategorien. Limtre ble brukt på starten av 1900-tallet av Tyskland og Russland da det var mangel på stål, ble limtre benyttet til diverse krigsmateriell. [33] Videreutviklingen av limtre åpnet for nye måter å bruke trematerialer i større og mer komplekse konstruksjoner med forbedret styrke og stabilitet sammenlignet med tradisjonelt treverk. Videre ble CLT utviklet på 1990-tallet. Dette nye materialet kunne brukes til vegger, gulv og tak. Kombinasjonen av disse to nye innovative produktene har ført til en utvikling og en større adopsjon i hvordan tre brukes i byggebransjen. [34]

3.1.2. Limtre

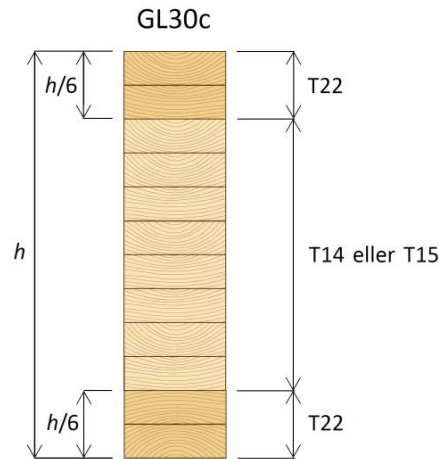
Limtre er den eldste formen for ingeniørprodukt i tre. Limtre kan brukes til alle typer bærende konstruksjoner med en styrke i forhold til vekt – bedre enn stål – er det mulig å ha et spenn opp mot 150 meter med god formbarhet. [34] Taket på OL-hallen "Vikingskipet" i Lillehammer er bygget av limtrebjelker i fagverk som er fire meter høye og har en fri spennvidde på opp mot 100 meter [35]. Miljøbelastningen fra limtre er liten, forutsatt at det kommer fra en sertifisert og bærekraftig forvaltet skog [36].

De første patentene for limtre kom i 1906 som ble tildelt Otto Hetzer. Limtre har sin harmoniserte produktstandard EN 14080 som regulerer de generelle kravene for at produsentene skal kunne CE-merke limtre [37] [34]. Limtre består av to eller flere lameller som er planker eller bord som fingerskjøtes sammen som vist i Figur 3.1. Flere lamineringer (minst to fingerskjøtede planker eller bord) limes deretter sammen. Tykkelsen på lamellene skal være minst 6 mm og maks 45 mm og ha en fuktighet på 6-15% før det limes. Produksjonen av limtre foregår ved at råmaterialet blir tørket og styrkesortert av sagbruket, det brukes vanligvis virke av gran i de nordiske land. I konstruksjoner som er utsatt for store variasjoner i fuktighet, benyttes det som oftest trykkimpregnerert furu. Ved høye estetiske krav kan andre treslag som bjørk eller lerk brukes. [34]



Figur 3.1 - Sjematisk fremstilling av produksjonsprosessen for limtre [34]

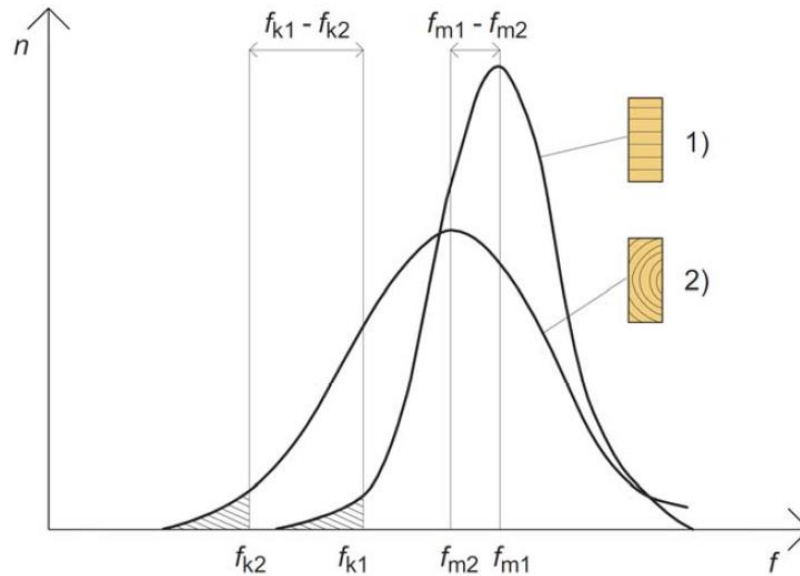
Limtre kan bygges opp av lameller med samme styrkeklasse på alle lamellene, ofte kalt homogent limtre, eller med lameller av forskjellige styrkeklasser, kalt kombinert limtre. Kombinert limtre bygges opp ved å bruke den beste kvaliteten på lamellene i det ytre tverrsnittet, der påkjenningene ofte er størst, mens resten er av en svakere kvalitet, som vist i Figur 3.2. [34]



Figur 3.2 - Oppbygning av kombinert limtre type GL30c. T14, T15 og T22 er forskjellige styrkeklasser der tallet representerer den karakteristiske strekkfastheten på 30 MPa (N/mm^2) [34]

Årsaken til at det brukes lameller av høyere styrke i det ytre tverrsnittet og svakere styrke i resterende tverrsnitt er relatert til effektivitet, økonomi og optimalisering av materialene. Som nevnt er de største spenningene på overflaten der materialet strekkes eller komprimeres mest, og det er derfor naturlig å bruke lameller av høy kvalitet, siden disse områdene har størst behov for styrke og motstand. De indre lamellene opplever mindre spenninger og det vil da være naturlig å bruke svakere kvalitet som opprettholder den strukturelle integriteten. [38] Treverk av høy kvalitet har en høyere pris samtidig som det er mindre tilgjengelig enn treverk av lavere kvalitet, det er da mest hensiktsmessig å bruke materialet av høy kvalitet der det trengs og svakere kvalitet i resterende tverrsnitt. Dette gjør produksjonen mer kostnadseffektiv uten å kompromittere på limtreets ytelse. Man kan derfor utnytte treverk som ellers ville blitt ansett som ikke opp til standard for bærende konstruksjoner ved å bruke treverk i lavere kvalitet i den delen av konstruksjonen hvor det er akseptabelt. [38] [39]

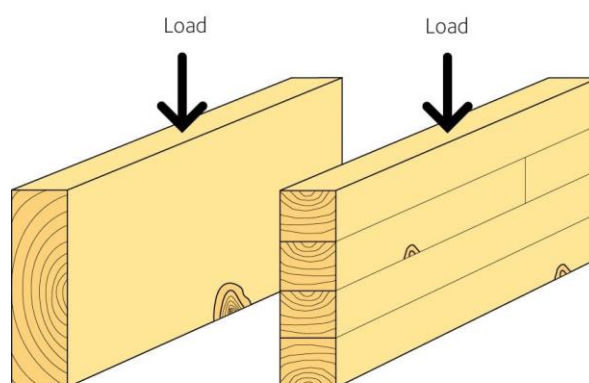
Styrken til en limtrekomponent er høyere, samtidig som at den har en mindre spredning i styrkeegenskapene sammenlignet med en tilsvarende komponent i vanlig konstruksjonsvirke, som vist i Figur 3.3 [34].



Figur 3.3 - konstruksjonskomponent av limtre (1) har høyere styrke og mindre spredning i styrkeegenskapene sammenlignet med en tilsvarende komponent i vanlig konstruksjonsvirke (2) [34]

Grunnen til dette er at limtre som nevnt består av flere lameller som er limt sammen med lim av høy styrke som bidrar til å holde lamellene sammen under høye belastninger. En annen grunn er at lamellene som velges ut og benyttes er av kvalitet med færre defekter som knuter, sprekker og svakheter, sammenlignet med vanlig konstruksjonsvirke, som ofte inneholder disse defektene. [40] Eventuelle knuter eller andre feil i en lamell utgjør en mindre andel enn i et vanlig konstruksjonsvirke, som vist i Figur 3.4. Limtre oppfører seg mer homogent enn vanlig konstruksjonsvirke siden det er flere lag som er limt sammen som gjør det mer forutsigbart og pålitelig ved beregning i strukturelle sammenhenger. [34]

The lamination effect



There is only a very small risk of defects, such as large knots in several laminates, occurring in the same section. A single knot can significantly worsen the strength of a solid plank.

Figur 3.4 - Illustrasjon av lamineringseffekten der knuter blir mer spredt og er mindre sammenlignet med vanlig konstruksjonsvirke med stor knute [40]

Fasthetsklassene til kombinert og homogent limtre defineres i standarden EN 14080 som vist i Tabell 3.1 for kombinert limtre og Tabell 3.2 for homogent limtre [34].

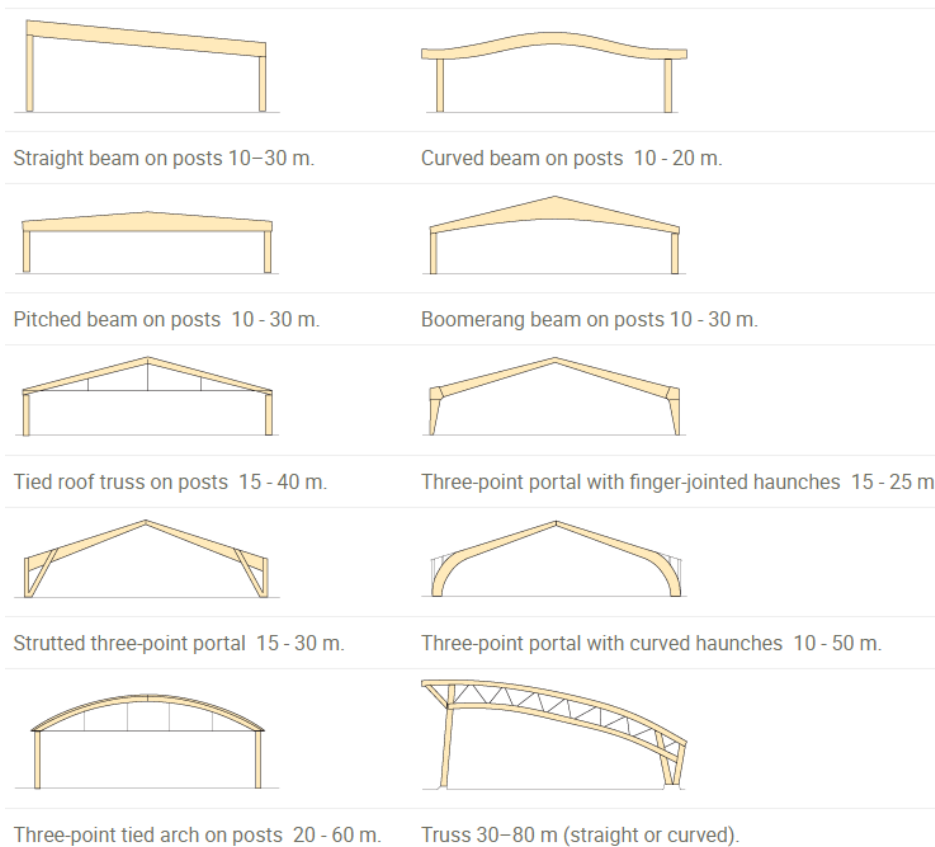
Tabell 3.1 - Fasthetsklasser for kombinert limtre definert i EN 14080 [34]

Egenskap	Symbol	Limtre fasthetsklasse						
		GL20c	GL22c	GL24c	GL26c	GL28c	GL30c	GL32c
Bøyefasthet	$f_{m,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Strekkfasthet	$f_{t0,g,k}$	15	16	17	19	19,5	19,5	19,5
	$f_{t90,g,k}$	0,5						
Trykkfasthet	$f_{c0,g,k}$	18,5	20	21,5	23,5	24	24,5	24,5
	$f_{c90,g,k}$	2,5						
Skjærfasthet (skjær og torsjon)	$f_{v,g,k}$	3,5						
Rulleskjærfasthet	$f_{r,g,k}$	1,2						
Elastisitetsmodul	$E_{0,g,mean}$	10400	10400	11000	12000	12500	13000	13500
	$E_{0,g,05}$	8600	8600	9100	10000	10400	10800	11200
	$E_{90,g,mean}$	300						
	$E_{90,g,05}$	250						
Skjærmodul	$G_{g,mean}$	650						
	$G_{g,05}$	542						
Rulleskjærmodul	$G_{r,g,mean}$	65						
	$G_{r,g,05}$	54						
Densitet	$\rho_{g,k}$	355	355	365	385	390	390	400
	$\rho_{g,mean}$	390	390	400	420	420	430	440

Tabell 3.2 - Fasthetsklasser for homogent limtre definert i EN 14080 [34]

Egenskap	Symbol	Limtre fasthetsklasse						
		GL20h	GL22h	GL24h	GL26h	GL28h	GL30h	GL32h
Bøyefasthet	$f_{m,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Strekkfasthet	$f_{t0,g,k}$	16	17,6	19,2	20,8	22,3	24	25,6
	$f_{t90,g,k}$	0,5						
Trykkfasthet	$f_{c0,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
	$f_{c90,g,k}$	2,5						
Skjærfasthet (skjær og torsjon)	$f_{v,g,k}$	3,5						
Rulleskjærfasthet	$f_{r,g,k}$	1,2						
Elastisitetsmodul	$E_{0,g,mean}$	8400	10500	11500	12100	12600	13600	14200
	$E_{0,g,05}$	7000	8800	9600	10100	10500	11300	11800
	$E_{90,g,mean}$	300						
	$E_{90,g,05}$	250						
Skjærmodul	$G_{g,mean}$	650						
	$G_{g,05}$	540						
Rulleskjærmodul	$G_{r,g,mean}$	65						
	$G_{r,g,05}$	54						
Densitet	$\rho_{g,k}$	340	370	385	405	425	430	440
	$\rho_{g,mean}$	370	410	420	445	460	480	490

Limtrekomponenter produseres med en nøyaktighet på millimeternivå, produksjonen skjer på fabrikk under kontrollerte forhold og med CNC-maskiner som freser og kapper til med denne nøyaktigheten [36]. Limtre kommer oftest i rette eller buede former, men det kan også bearbeides til å ha andre former og fasonger. Figur 3.5 viser forskjellige typer limtrekomponenter som kan benyttes for mellomstore til store spenn. [41]



Figur 3.5 - Illustrasjon av forskjellige limtrebjelker og fagverk for mellomstore og store spenn [41]

3.1.3. Massivtre (CLT)

Massivtre, kjent som krysslimt tre eller "Cross laminated timber" (CLT) på engelsk, består av flere lag med treplanker eller lameller av konstruksjonsvirke etter NS-EN 14081. Hvert lag er plassert på tvers av det underliggende for å gi konstruksjonene eller elementene økt dimensjonsstabilitet og styrke. Hvert lag limes sammen i et CLT-element, mens i andre typer massivtre-elementer brukes tredybler, skruer eller spiker. [42]

CLT-elementer brukes primært som bærende komponenter i konstruksjoner som fleretasjes bygninger, barnehager, skoler, industribygg og boliger. CLT er kjent for sin allsidighet og miljøvennlighet. Elementene kan både resirkuleres, gjenbrukes og ombrukes. Materialet kan ha lang levetid dersom det behandles riktig og kan brukes om igjen i nye strukturer eller forbrennes for energigjenvinning ved endt levetid. [17] Se Tabell 3.3 - Typiske dimensjoner for CLT-elementer.

Tabell 3.3 - Typiske dimensjoner for CLT-elementer [43]

Parameter	Commonplace	Available
Thickness, t	80 – 300 mm	60 – 500 mm
Width, w	1,20 – 3,00 m	up to 4.80 m
Length, l	16 m	up to 30 m
No. of layers	3, 5, 7, 9	up to 25

CLT-elementer har stor bæreevne og stivhet, dette gjør bygninger stabile. Siden lamellene legges på tvers av hverandre blir de mer motstandsdyktige mot vridning og bøyning. Panelenes lave egenvekt sammenlignet med stål og betong, tilbyr fordeler med tanke på transport og montering. Dette gjør prosessen rask og effektiv, samt gir reduserte kostnader ved grunnarbeid, på grunn av mindre fundamentering. Moderne produksjonsteknikker i kombinasjon med materialstyrken gjør at CLT blir et attraktivt materiale for byggeprosjekter med unike egenskaper som fleksibilitet, høy styrke i forhold til egenvekt, presise produksjonstoleranser, god brannbæreevne og god termisk isolasjonsevne. [43] CLT-elementer kan produseres i store format som kan bidra med å redusere byggetiden [42]. Tabell 3.4 viser en oversikt over de mekaniske egenskapene og densiteten for fasthetsklassene C14, C16, C24 og C30 [43].

Tabell 3.4 - Fasthetsklasser for C14, C16, C24 og C30 [43]

Board properties	C14	C16	C24	C30
Characteristic strength values (MPa)				
Bending strength $f_{m,k}$	14	16	24	30
Tensile strength along the grain $f_{t,0,k}$	7.2	8.5	14.5	19
Tensile strength perpendicular to the grain $f_{t,90,k}$	0.4	0.4	0.4	0.4
Compressive strength along the grain $f_{c,0,k}$	16	17	21	24
Compressive strength perpendicular to the grain $f_{c,90,k}$	2.0	2.2	2.5	2.7
Shear strength f_{vk}	3.0	3.2	4.0	4.0
Stiffness values (MPa)				
Mean value of modulus of elasticity, along the grain $E_{m,0,mean}$	7,000	8,000	11,000	12,000
Fifth percentile value of modulus of elasticity, along the grain $E_{m,0,05}$	4,700	5,400	7,400	8,000
Mean value of modulus of elasticity, perpendicular to the grain $E_{m,90,mean}$	230	270	370	400
Mean value of the shear modulus G_{mean}	440	500	690	750
Density (kg/m³)				
Fifth percentile volume of density ρ_k	290	310	350	380
Mean density ρ_{mean}	350	370	420	460

Det finnes tre hovedgrupper av CLT, som viser mangfoldet i trekonstruksjonsteknikker og deres tilpasning til forskjellige arkitektoniske behov. Disse hovedgruppene inkluderer kantstilte elementer, krysslagte elementer og hulromselementer. [44] I denne oppgaven fokuseres det på krysslagte elementer (CLT-elementer).

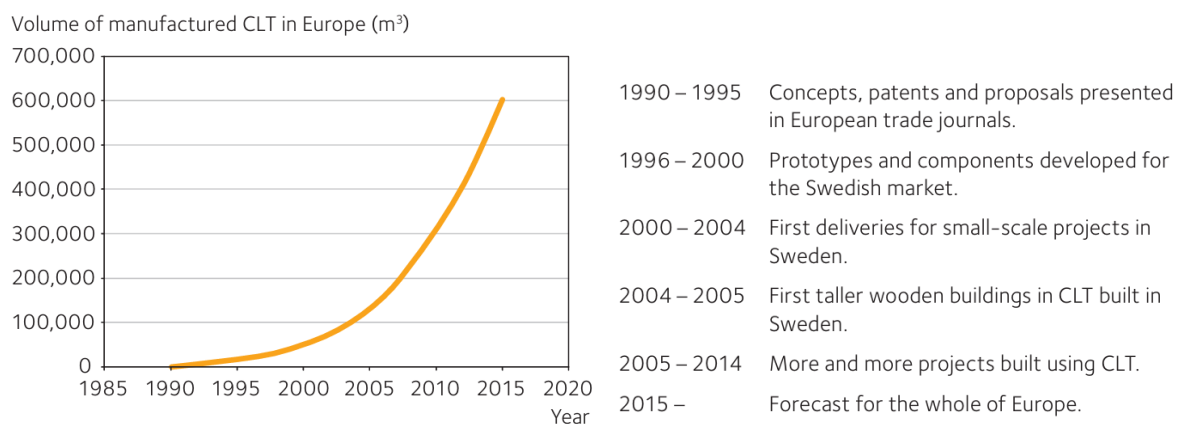
Figur 3.6 viser en illustrasjon på hvordan lamellene legges på tvers av hverandre. CLT-elementer er vinklet i 90 eller 45 grader mot hverandre, og sammenføyet med lim for økt dimensjonsstabilitet [44].



Figur 3.6 - Krysslagte elementer [45]

CLT-teknologien ble først introdusert i Sverige på slutten av 1990-tallet, mens i Sentral-Europa hadde de allerede produsert CLT i flere år. CLT har sett en betydelig vekst, med en årlig produksjon på opptil 1 000 000 m³ globalt per 2018 og en økende etterspørsel. Økt forskning og global adopsjon av utbyggere og entreprenører underbygger CLT som en potensiell bærekraftig løsning i moderne konstruksjoner. [43]

Figur 3.7 viser utviklingen av produksjonen av CLT i Europa fra 1985 til 2020. Grafen illustrerer en markant økning i volumet av produsert CLT, fra nesten ingen produksjon i 1985 til rundt 600 000 m³ i 2015. Figur 3.7 viser også en tidslinje til viktige milepæler i utviklingen av CLT i Europa, som inkluderer introduksjonen av konsepter og prototyper, leveranse til småskalaprosjekter, og bygging av større og mer moderne prosjekter med CLT. [43]



Figur 3.7 - Utvikling av produksjon av CLT i Europa [43]

Produksjon av CLT er kjent for sin energieffektivitet, hvor biprodukter som trebiter og sagflis brukes til produksjon av andre trebaserte materialer og energiproduksjon, noe som kan bidra til å redusere behovet for fossilt brensel. Bærekraftig forvaltning sikrer at treverket kan returneres til naturen uten tilførsel av skadelige klimagasser. Ved å bruke fornybare materialer som CLT kan det bidra til å redusere byggebransjens miljøpåvirkning. [43]

Bygninger laget med CLT tilbyr estetiske og naturlige visuelle kvaliteter, samtidig har det vist seg å forbedre helsen, ved at materialet har en naturlig evne til å "puste" og fremmer bedre luftsirkulasjon. Siden det er et hygroskopisk materiale, tilpasser treverket seg naturlig til endringer i luftfuktighet og temperatur. Ved overgangen fra eldre betongbygg til bygninger oppført i CLT, kan man merke en betydelig forbedring i luftkvaliteten, noe som gir en positiv effekt for brukeren av bygget. [43] [8]

3.2. Stål som konstruksjonsmateriale

I dette kapittelet presenteres generell teori om konstruksjonsstål og sandwichelementer som brukes i casestudiet. Teorien om materialene gir en økt forståelse av deres egenskaper og bruk. [9]

3.2.1. Stål

Stål er et materiale kjent for sin styrke, som gjenspeiles i dets bruk som forsterkende element i andre materialer, for eksempel som armering i betong. Søyler, bjelker og fagverk av stål kan potensielt gi en slankere konstruksjon, noe som kan frigjøre gulvareal og øke takhøyden. Ved bruk av stål kan det også føre til lettere konstruksjoner, noe som reduserer belastningen på fundamenter og kan forenkle transportprosesser. Dette kan bidra til lavere byggekostnader og potensielt redusere miljøpåvirkningen sammenlignet med tyngre materialalternativer. [46] Konstruksjonsstål refererer til en kategori av sveisbare legeringer som består av jern, karbon og andre grunnstoffer. Disse legeringene blir raffinert i flytende tilstand, hvor kjemisk sammensetning nøye justeres for å oppnå ønskede mekaniske og strukturelle egenskaper. [46]

Konstruksjonsstål med materialkvaliteten "S355J2", som klassifiseres i henhold til den europeiske standarden EN 10025-2. Denne standarden gir spesifikasjoner for varmevalset konstruksjonsstål i karbonstål. [47]

- **S**, står for "Structural Steel", altså konstruksjonsstål. [47]
- **355**, refererer til minste flytegrense (yield strength) for stålet, som er målt i megapascal (MPa). Det vil si at konstruksjonsstålet har en minimum flytegrense på 355 MPa under normale omstendigheter, som da vil fungere i konstruksjoner som krever høy styrke. [47]
- **J2**, refererer til konstruksjonsstålets seighet og egenskapene ved lav temperatur. "J" indikerer at stålet har vært gjennom en slagtest med 27 Joules ved bruk av "Charpy V-notch" slagprøve ved romtemperatur [47]. Denne slagprøven er en test med høy belastningshastighet som innebærer at man slår en standard hakket prøve med en kontrollert vektpendel svingt fra en fast høyde. Slagprøven hjelper til med å måle mengden energi som absorberes av prøven under brudd. [48] Tallet "2" indikerer at stålet har en garantert slagseighet ved -20 grader Celsius [47].

Gjennom historien har ingen andre materialer blitt brukt så mye i strukturelle og lastbærende formål som stål. Dette gjør at stål spiller en viktig rolle i en rekke sektorer, som inkluderer tungindustrien, infrastruktur som veier, broer og jernbaner, samt i konstruksjon av bygninger og kjøretøy. [49]

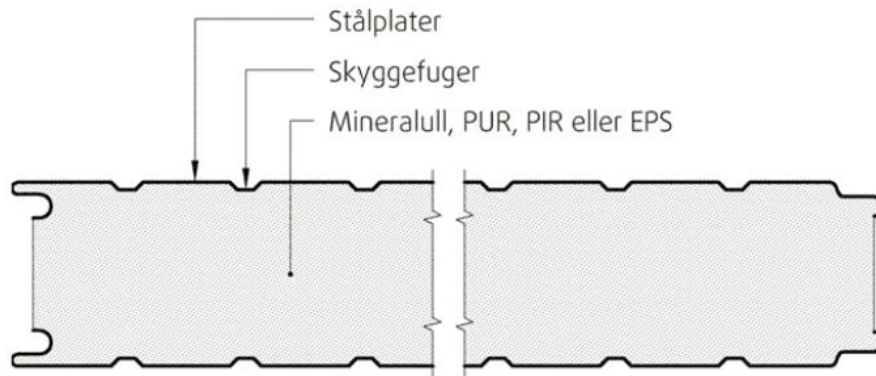
Stål, som primært består av jern, er kjent for sin mulighet for gjenvinning. Stål kan gjenvinnes 100% uten tap av kvalitet, noe som kan betraktes som et potensielt bærekraftig materiale gjennom hele dets livssyklus. [50]

Denne gjenvinningen innebærer at stålet kan smeltes om og formes til nye produkter gjentatte ganger. Prosessen for å smelte om stål krever mye energi, derfor er det viktig å bruke miljøvennlige metoder, som elektriske lysbueovner. [49]

Stål har også fordeler som lang levetid og lett vedlikehold. Prefabrikasjon av stål sikrer også en høy presisjon med et minimalt avfall, rask montering og lave montasjekostnader, noe som understøtter industrialisert bygging med et godt arbeidsmiljø og effektive gjenvinningssystemer. [50]

3.2.2. Sandwichelementer

Sandwichelementer, ikke-bærende konstruksjonsmaterialer, brukes i inner- og yttervegger, tak og spesialrom som kjølerom. Elementene kombinerer to ytre lag av metallplater eller med en isolerende kjerne av plast eller mineralull som vist i Figur 3.8. [51]



Figur 3.8 - Oppbygningen av sandwichelementet i lagerbygget [51]

Disse platene er motstandsdyktige mot fukt og har en overflate som er enkel å rengjøre, noe som gjør dem attraktiv for bruk under krevende forhold med høy fuktighet og strenge hygienekrav. Varmeisolasjon av disse elementene bestemmes av produsenten eller beregnes etter NS-EN ISO 6946, hvor den tar hensyn til materialets varmekonduktivitet, tykkelse, og konstruktive detaljer som kuldebroer. Mens lydegenskapene til disse lette elementene har generelt en begrenset isolasjonsevne mot støy, hvor det stilles krav til innendørs lydnivå. Slik at det kan være behov for tilleggisolasjon mot utendørs lydskilder og/eller innendørs lydskilder som et maskinrom. [51]

3.3. Regelverk

I dette kapittelet presenteres de ulike regelverkene som brukes i byggebransjen i Norge, med fokus på hvordan disse regelverkene kan styre prosjektering, produksjon og utførelse av byggeprosjekter. Det blir undersøkt relevante regelverk som Byggteknisk forskrift, Plan- og bygningsloven, standarder fra Standard Norge og Eurokoder. Ved forståelse av disse regelverkene kan de ulike aktørene sikre at prosjektene ikke bare er teknisk forsvarlige, men også bærekraftige og i samsvar med de nasjonale og europeiske standardene. [9]

3.3.1. Byggteknisk forskrift

Byggteknisk forskrift (TEK), ofte referert til som TEK17 etter revisjon i 2017, stiller krav til byggeprosjekter i Norge for å sikre energieffektivitet, miljøvennlighet, samt helse- og sikkerhetsstandarder. Innenfor rammen av plan- og bygningsloven, sammen med forskriftene om saksbehandling (SAK), det offentlige kartgrunnet (DOK) og forskrift om godkjenning av foretak for ansvarsrett (GOF), gir TEK detaljerte veiledninger som ser mer på den tekniske utførelsen, og omfatter spesifikke krav til gjennomføring og design av byggeprosjekter. TEK har som formål å gi

forutsigbarhet for næringen og sikre standarder for forbrukerne, inkludert funksjonskrav som blant annet snuareal for rullestolbrukere, trinnfri dusjmulighet osv. [52]

3.3.2. Byggherreforskriften

Byggherreforskriften refererer til at byggherren har ansvar for å sikre sikkerhet, helse og arbeidsmiljø (SHA) i bygge- og anleggsprosesser. Forskriften omfatter et bredt spekter av bygge- og anleggsaktiviteter, inkludert oppføring, innredning, montering av elementer, riving, samt grunnarbeid. Ved effektiv implementering av HMS-kravene i forskriften har vist seg å føre til økt trivsel, lavere sykefravær, og økonomisk lønnsomme prosjekter, samtidig som det sikres ferdigstillelse av bygg til bestemt tid og forbedret miljøet i bruksfasen. [53]

Byggherren har ansvaret for å sikre at koordinator, prosjekterende, arbeidsgivere og enkeltpersonforetak oppfyller de pliktene som forskriften pålegger dem. Koordinatorens rolle er å sørge for dialog og samarbeid mellom alle deltakere. I prosjekteringsfasen handler oppgavene om å utvikle og sikre at alt går etter SHA-planen. Under utførelsesfasen fokuserer koordinatoren på å overvåke risikoer og sikre at alle parter følger SHA-planen. Prosjekterende skal risikovurdere forhold som er knyttet til SHA. Arbeidsgiver og enmannsbedriften skal følge de lover og forskriftene som gjelder, som er SHA i tillegg til byggherrens eller koordinators anvisning. [53]

SHA-plan skal lages for alle bygge- eller anleggsprosjekter og byggherren har ansvaret for at lages en plan før arbeidet starter. Planen må inkludere et organisasjonskart, en fremdriftsplan som forklarer tid og sted for de forskjellige arbeidsoperasjonene, tiltak rettet mot arbeid som innebærer risiko for liv og helse, samt rutiner for å gjøre endringer og oppdateringer i planen. [53]

3.3.3. Plan- og bygningsloven

Plan- og bygningsloven, ofte kalt for PBL., er en sentral norsk lov som regulerer forvaltning og bruk av arealer i Norge. Denne sektorovergripende loven gjelder for absolutt alle typer virksomheter og byggeprosjekter i Norge, og spiller en nøkkelrolle i koordineringen av lovgivning som påvirker arealutnyttelse, inkludert skogbruk, landbruk og naturvern. Formålet her er å fremme bærekraftig utvikling til fordel for enkeltpersoner, samfunnet, og fremtidige generasjoner, gjennom koordinering av oppgaver på statlig, regionalt og kommunalt nivå, samt ved å garantere at byggeprosjekter overholder gjeldende lovverk og gjennomføres på en forsvarlig måte. [54]

3.4. Norsk standard

Standard Norge er en organisasjon som står i spissen for utvikling av standarder i Norge, som er prosesser som involverer både private og offentlige aktører i samarbeid. En standard fungerer som en felles "oppskrift" på hvordan ulike produkter, tjenester eller prosesser skal utformes eller gjennomføres. Disse standardene er avgjørende for alt fra fysiske objekter som ovner og bankkort, til mindre håndfaste ting som eldreomsorg. De gjør det mulig å forenkle og effektivisere for eksempel oppstart og drift av virksomheter og fremme et godt arbeidsmiljø. Standarder ligger til grunn for samfunnsbygging, og uten dem ville hverdagen vært betydelig mer komplisert. Prosessen med å

utvikle en standard drives ikke av staten, men av interessegrupper, og resultater i retningslinjer som bidrar til sikre varer, produksjonsprosessen og tjenester. Selv om bruken ofte er frivillig, spiller standarder en nøkkelrolle i å gi detaljerte beskrivelser til EU-direktiver, nasjonale lover og forskrifter. [55]

Eurokoder representerer en vesentlig del av disse standardene, som et fundamentalt sett med felles europeiske standarder for design og dokumentasjon av byggverk. Disse standardene, som også har blitt Norsk Standard, er spesielt viktige for å sikre konstruksjoners sikkerhet og funksjonalitet. Eurokodene er avgjørende for prosjektering av ulike bygg- og anleggskonstruksjoner, og sikrer at konstruksjonene oppfyller nødvendige sikkerhetskrav og funksjonelle krav. [56]

Tabell 3.5 viser ti hovedkoder som dekker alt fra grunnlag for prosjektering til spesifikke materialer som betong, stål, og tre, sikrer eurokodene en harmonisert tilnærming til byggestandarder i Europa. De nye generasjonene av Eurokoder, forventet ferdigstilt rundt 2027-2028. Disse kodene, sammen med nasjonale tillegg, danner grunnlag for dokumentasjonen for byggeveddirektivet og byggeforskriftens sikkerhetskrav, og legger grunnlaget for sikker og bærekraftig byggepraksis i Norge og Europa. [56]

Tabell 3.5 - Oversikt over Eurokoder [56]

NS-EN 1990 – Eurokode 0	Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner
NS-EN 1991 – Eurokode 1	Laster på konstruksjoner
NS-EN 1992 – Eurokode 2	Prosjektering av betongkonstruksjoner
NS-EN 1993 – Eurokode 3	Prosjektering av stålkonstruksjoner
NS-EN 1994 – Eurokode 4	Prosjektering av samvirkekonstruksjoner av stål og betong
NS-EN 1995 – Eurokode 5	Prosjektering av trekonstruksjoner
NS-EN 1996 – Eurokode 6	Prosjektering av mur konstruksjoner
NS-EN 1997 – Eurokode 7	Geoteknisk prosjektering
NS-EN 1998 – Eurokode 8	Prosjektering av konstruksjoner seismisk påvirkning
NS-EN 1999 – Eurokode 9	Prosjektering av aluminiums konstruksjoner

NS-EN 1993 - Eurokode 3 og NS-EN 1995 - Eurokode 5 er viktigst for vår oppgave. Eurokode 3 fokuserer på prosjektering av stålkonstruksjoner, som er grunnlaget for det eksisterende lagerbygget. Overgangen til et bygg i CLT og limtre krever anvendelser av Eurokode 5, som spesifiserer kravene for trekonstruksjoner. Begge eurokodene gir krav til konstruksjonenes kapasitet, brukbarhet, bestandighet og brannmotstand. [57] [58]

3.5. Lastberegning

I konstruksjoner påvirkes det av ulike laster samtidig, som blir gjort i henhold til Norsk Standard. For å hente den nødvendige informasjonen til beregninger i henhold til Norsk Standard, henvises det til NS-EN 1990 og NS-EN 1991. [59] [60]

3.5.1. Grensetilstander

Når en skal dimensjonere konstruksjoner, må byggverket møte dimensjoneringskravene for ulike grensetilstander, som hovedsakelig inkluderer bruddgrensetilstand og bruksgrensetilstand. Bruddgrensetilstand (ULS) benyttes ved beregning av momentkapasitet, mens bruksgrensetilstand (SLS) benyttes for nedbøyning og rissbredde. Bruddgrensetilstand evaluerer konstruksjonsdelens evne til å motstå brudd basert på materialenes strekkegenskaper og styrker. Mens bruksgrensetilstand fokuserer på konstruksjonens funksjonalitet under vanlig bruk, og vurderer blant annet nedbøyning og rissbredde, slik at man forhindrer at disse overskrider akseptable grenser. Bruksgrensetilstanden sikrer dermed at byggverket forblir komfortabelt for brukerne uten at bygget får skader over tid. [61]

3.5.2. Egenlast

Egenlast er basert på den permanente lasten som kommer fra bygningens egne konstruksjoner, materialer og faste installasjoner. Dette inkluderer vekten av veggene, gulvet, taket, og andre elementer som er i bygget. Egenlast er målt i kN/m^2 , og denne lasten er kritisk ved tanke på å sikre bygningens strukturelle stabilitet og er grunnleggende ved beregning av statisk last. Det varierer basert på hvilken materialtype en bruker og hvilken konstruksjonsmetode som blir brukt, slik at det er viktig i prosjekteringen og analysere byggverket for å kunne se hvordan lastene vil oppføre seg under belastning. [62]

3.5.3. Nyttelast

Nyttelast er en variabel eller bevegelig last på et bygg, dette kan være for eksempel, mennesker, møbler, materialer som lagres, maskiner eller kjøretøy. Nyttelasten er beskrevet i Eurokode EN 1991-1-1. [63]

3.5.4. Snølast

For å beregne snølast på tak i Norge, må man bruke standarden NS-EN 1991-1-3 [60], som oppgir karakteriske laster for snø og lastfaktorer med lastkombinasjoner for dimensjonerende laster. Beregning av snølast tar i bruk flere viktige faktorer, som inkluderer bygningens geografiske plassering i Norge, takets form og det omkringliggende terrenget og varmetap gjennom taket [64]. Den karakteristiske snølasten $S_{k,0}$, blir delvis bestemt av den spesifikke kommunen hvor bygget er plassert, ettersom ulike regioner i Norge har forskjellige snøforhold. Høyden over havet spiller også en rolle, da områder over visse høydegrensene kan kreve justeringer i snølastberegningene for å ta hensyn til økt snøfall. For kommuner med kystlinje gjelder grunnverdien i utgangspunktet for høydenivået fra 0 til 150 m over havet, dvs. $H_g = 150$ m. [64] I Norsk Standard, NS-EN 1991-1-3-2003/NA:2008, N.A.4.1, står det angitt at "for steder der høyden over havet H er mindre eller lik høydegrensen H_g , settes normalt S_k lik grunnverdien $S_{k,0}$ " [65].

NS 3491-3 byr på en detaljert beregning av snølast på tak, inkludert faktorer som må tas med ved utforming og dimensjonering av takkonstruksjoner for å motstå snølast. Denne standarden tar også

for seg ulike taktyper og hvordan snølast blir fordelt avhengig av takets form og konstruksjon. Beregningsmetoden i NS 3491-3 tar også hensyn til faktorer som takets helning, eksponering mot vind og egenskaper som kan påvirke snøsmelting. Ved kombinerings av disse faktorene får man en nøyaktig vurdering av den dimensjonerende lasten. [64]

3.5.5. Vindlast

Vindlast refererer til belastningen som bygningskonstruksjoner utsettes for under sterk vind [66]. For beregning av vindlast i Norge, gjøres dette i henhold til standardene NS-EN 1991-1-4 [60], som gir retningslinjer for karakteristiske laster for vind, og NS 3490, som tilbyr lastfaktorer og lastkombinasjoner for dimensjonerende laster. Beregning av vindlast krever at man finner de riktige parameterne for å estimere den faktiske belastningen et byggverk vil møte. Disse parameterne inkluderer blant annet vindkasthastighetstrykk, topografifaktorer, og terrengruhetsfaktorer, som påvirker vindhastigheten og trykket rundt i bygget. [67]

Topografifaktor (C_t) tas i bruk for å vurdere hvordan lokale geografiske forhold som åser, skråninger og fjell påvirker vindhastigheten. Dersom ingen topografiske endringer påvirker bygget, settes disse faktorene til 1,0. [67]

Basisvindhastighet (V_b) bestemmes basert på lokasjon og er avgjørende for å definere den grunnleggende vindbelastningen som bygget må motstå. [67]

Terrengruhetsfaktor (C_r) måler effekten av byggets høyde og den omkringliggende terrengruheten på losiden av bygningen. Denne faktoren er kritisk for bygninger som står høyt i forhold til omkringliggende terreng. [67]

3.6. Miljø

Dette kapittelet gir en oversikt over de ulike miljøaspekter knyttet til bruk av tradisjonelle materialer som stål, samt andre bærekraftige alternativer som CLT og limtre. Det vil også bli gått gjennom viktigheten av ombruk i byggebransjen for å redusere avfall og fremme sirkulær økonomi. [9]

3.6.1. Karbondioksid

Karbondioksid (CO_2) er en gass ved romtemperatur som består av karbon og oksygen. Den finnes i forskjellige former som gass, væske, og fast stoff. Denne gassen spiller en kritisk rolle for både jordens klima og planter, produseres under forbrenning i mennesker og dyr, og omdannes av planter i fotosyntesen til oksygen og karbohydrater med sollys. Selv om CO_2 er viktig, bidrar store mengder i atmosfæren til drivhuseffekten og kan ha negative effekter på klimaet. [68]

Økningen i jordens middeltemperatur kan føre til klimaendringer som hetebølger, tørke og ekstremvær. 2-graders økning vil gjøre det vanskeligere å kontrollere videre oppvarming. Fra 2045 kan det bli nødvendig å slippe ut minimalt med CO_2 og samtidig jobbe med å redusere CO_2 fra atmosfæren hvert år. [22]

Ulike klimagasser har forskjellige oppvarmingseffekt og levetid i atmosfæren. For å kunne sammenligne dem, omregnes de til CO₂-ekvivalenter ved hjelp av deres globale oppvarmingspotensial (GWP), som måler oppvarmingseffekten over 100 år. På denne måten kan man kvantifisere den samlede påvirkningen av alle klimagasser på en felles skala. [69]

3.6.2. Miljø ved bruk av stål

Bærekraftig stålproduksjon bruker gjenvunnet skrapmetall og elektrisk lysbueovn, som reduser CO₂-utslippet og energiforbruk. Fremtidens stålproduksjon går mer mot hydrogenredusert jernmalm for å få minst mulig CO₂-utslipp. Stål er fullstendig resirkulerbart som spiller en kritisk rolle i den sirkulære økonomien, med gjenvinning som en nøkkelpåvirkning. Innovasjoner og forbedringer i produksjonsmetoder viser stålindustriens engasjement for å redusere miljøpåvirkningen, og understreker viktigheten av at stålindustrien oppnå global klimanøytralitet. [70] Selv om man prøver å fokusere på bærekraft ved produksjon, blir det fortsatt brukt tradisjonell produksjonsteknologi i store deler av verden, som medfører både høyt energiforbruk og stor belastning på miljøet. Den globale produksjonen i 2021 var i underkant av 200 millioner tonn, som gjør at det slippes ut 2 tonn CO₂ for hvert tonn stål. [71]

3.6.3. Miljø ved bruk av tre

Den primære kilden til CO₂-utslipp som er knyttet til CLT og limtre er ved produksjon og transport av produktet fra fabrikk til byggeplassen [72]. Selv om det er mange fabrikker som produserer CLT i Sentral-Europa, med ledende produsent KLH Massivholz som produserte 150 000 m³ CLT i 2022 [73], er det færre slike fabrikker i Norge. Norges ledende produsent av CLT er Splitkon, som har en fabrikk kapasitet på omtrent 50 000 m³ per år [74]. Til sammenligning var den totale årsproduksjonen av stål i Norge omtrent 700 000 tonn i 2020 [49]. Lengre transportdistansene kan utgjøre en betydelig andel av de samlede klimagassutslippene, da transport over lange strekninger øker produktets globale oppvarmingspotensial [72].

Bruken av CLT og limtre som byggemateriale har flere miljømessige fordeler. En av faktorene er at treprodukter har minimal negativ miljøpåvirkning når råstoffet er hentet fra bærekraftig skoger. Den andre faktoren er at økt bruk av tre bidrar til å redusere atmosfærens CO₂ – nivåer, da CO₂ lagres i treet gjennom dets vekstfase og videre i produkter samtidig som det kan erstatte fossile og energiintensive materialer som har høyt klimagassutslipp. [75]

Produksjonen av treprodukter baserer seg oftest på råstoff fra bærekraftig skogbruk, hvor rundt 90 % av Norges skoger er sertifisert i henhold til internasjonale standarder. Norske skoger vokser, noe som gjør det mulig å høste mer av denne fornybare ressursen. Ved bruk av tre som byggematerialer, bidrar det også til å skape et godt innemiljø, ved at det skaper en følelse av komfort og evnen til å jevne ut døgnvariasjoner i relativ luftfuktighet og temperatur. Siden også treprodukter er enkle å gjenvinne eller gjenbruke, enten som nye tre baserte produkter eller som bioenergi, som igjen fremmer det en sirkulær økonomi. [76]

I et sirkulært økonomisystem gjenbrukes materialer kontinuerlig, noe som reduserer behovet for nye ressurser og minimerer avfall. Dette fremmer også effektiv ressursbruk og legger vekt på gjenbruk og resirkulering av produkter og materialer. Ved implementering av sirkulær økonomi, kan man skape design som gjør det enklere å demontere og resirkulere, samt produksjonsprosesser som er rene og energieffektive. [77]

3.6.4. Ombruk

Ombruk innebærer å benytte en gjenstand eller et produkt flere ganger på samme måte som det var ment å brukes. Hensikten med ombruk er å forlenge levetiden til gjenstander og redusere behovet for nye innkjøp. [78] Ombruk er viktig på grunn av at det bidrar med å redusere mengden avfall som skapes og gir en rekke økonomiske og miljømessige fordeler. I byggenæringen finnes det flere former for ombruk, dette er blant annet bruk av gjenbrukte byggematerialer i nye konstruksjoner, ombygging fremfører nybygg, samt gjenbruk av møbler og inventar fra tidligere bygninger. [79]

Byggebransjen står for en betydelig andel av det årlige avfallet i Norge, hvor bygg- og anleggsavfall utgjør omtrent 25% av totalen. I 2021 nådde avfallsmengden fra denne sektoren et rekordhøyt nivå på 2,14 millioner tonn, noe som understreker hvor viktig ombruk er i byggenæringen. Ved å ta i bruk ombruk kan aktører i bransjen ikke bare redusere avfallsmengden og miljøpåvirkningen, men i mange tilfeller også øke lønnsomheten. Det er derfor kritisk å identifisere potensielt lønnsomme ombruksmuligheter tidlig i byggeprosessen, helst rett etter kjøp av utviklingsområdet. [79]

Det er også viktig å forstå forskjellen mellom ombruk, gjenbruk og gjenvinning. Ombruk handler om å benytte materialer og gjenstander på nytt for samme formål, involverer gjenbruk av materialer til andre formål enn det opprinnelige. Gjenvinning derimot, innebærer behandling av materialer og gjenstander for å omdanne dem til nye produkter. [79]

3.7. Klima i byggebransjen

Byggebransjen står for 40 % av energibruken i verden og 40 % av menneskeskapte klimagasser, for å redusere dette kan miljøsertifisering av bygg være en løsning [12]. En bedrift eller et prosjekt kan bli miljøsertifisert ved at de tilfredsstillt et eller flere klima- eller miljøkrav. Årsakene til at bygge- og anleggsprosjekter blir miljøsertifisert er ønsket om å oppfylle krav i anbud, nå egne miljømål, vise miljøengasjement, eller å være i forkant av mulige fremtidige miljøkrav. [80]

3.7.1. Livssyklusanalyse

Life Cycle Assessment (LCA), eller livsløpsvurdering, er ikke bare en metode, men en metodikk for å kartlegge og vurdere et produkts eller produktsystems miljø- og ressurspåvirkninger gjennom hele dets livssyklus, fra råvareutvinning til produksjon, transport, bruk, og til slutt gjenvinning. Prosessen følger en "vugge til grav" eller en "vugge til vugge"-tilnærming. LCA-metoden inkluderer flere trinn [81]:

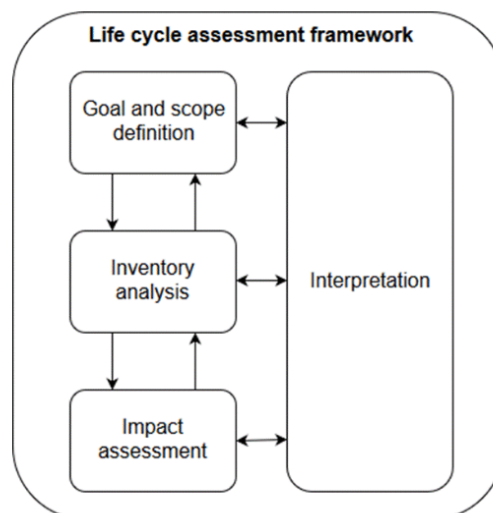
- Kartlegging: Hvor utslipp beregnes

- Klassifisering: Hvor utslipp kategoriseres
- Karakterisering: Beregner de spesifikke miljøpåvirkningene
- Forbedring: Hvor det analyseres hvordan produktets livsløp kan optimaliseres miljømessig

Denne tilnærmingen muliggjør miljøvennlige valg i tidlige konseptfaser, støtter valg av de mest bærekraftige løsningene under prosjektutvikling, og dokumenterer miljøfordeler ved prosjektets slutt. Gjennom LCA kan man identifisere de mest betydningsfulle miljøproblemene et system medfører, hvor i livssyklusen disse problemene oppstår, potensial for miljøforbedringer, og dokumentere de totale miljøbelastningene for sammenligning med konkurrerende produkter. [81]

Innenfor LCA finnes det to overordnet analyseperspektiv; "Regnskap-LCA" og "Konsekvens-LCA". "Regnskap-LCA" fokuserer på å fordele utslipp til forskjellige løsninger eller funksjoner ved å dele opp utslippene i den fysiske verdikjeden på en rettferdig måte mellom ulike produkter. Denne tilnærmingen gir ofte resultater uten kontekst, som for eksempel en miljøproduktdeklarasjon (EPD) eller et spesifikt "CO₂-tall" for et materiale eller en løsning. [82]

I henhold til standarden ISO 14044, deles rammeverket for LCA inn i fire trinn, se Figur 3.9. NORSUS, et senter for bærekraftig forskning, følger disse trinne nøye i sine LCA-prosjekter, som ofte bruker alle disse fire trinnene, selv om fokus kan variere avhengig av prosjektets natur. Første trinnet er fastsetting av hensikt og omfang, her ser man på systemgrenser, detaljnivå og funksjonell enhet. Andre trinnet fokuserer på livsløpsregnskap, ved at man setter opp regnskapet for ressursene som benyttes til fremstillingen, og alle de tilhørende utslippene gjennom livsløpet til produktet. Tredje trinn er livsløpseffektvurdering, da man evaluerer de mulige miljøpåvirkningene som kommer av utslipp, forbruk av energi og materialer. [83]



Figur 3.9 - Fire trinn i en LCA [83]

Bygningers livssyklus deles inn i ulike faser, som er i henholdt til standardene EN15978 og EN15804, se Tabell 3.6. Disse standardene omhandler henholdsvis beregningsmetoder for vurderinger av bygningers miljøpåvirkning og grunnleggende produktkategoriregler for byggevarers

miljødeklarasjoner. Disse fasene definerer de forskjellige stadiene i en bygnings levetid, fra konstruksjon til bruk, og eventuell avhending, med fokus på bærekraft og miljøpåvirkning. [84]

Tabell 3.6 - Oversikt over de ulike livssyklusfasene til en bygning eller et produkt [84]

Produksjonsfase	A1	Råvarer – utvinning og bearbeiding
	A2	Transport av råvarer til byggeplass
	A3	Produksjon
Byggefase	A4	Transport til byggeplass
	A5	Bygging/installasjon
Bruksfase	B1	Bruk
	B2–B5	Vedlikehold
	B6–B7	Forbruk av energi og vann ved drift
Avhending	C1–C4	Riving, transport og avfallsbehandling

Systemgrenser:

- A1:** Uttak og prosessing av råmaterialer
- A2:** Transport til fabrikk
- A3:** Produksjon
- A4:** Transport til byggeplass
- A5:** Installasjon i bygningen
- B1:** Bruk av et installert produkt
- B2:** Vedlikehold
- B3:** Reparasjoner
- B4:** Utskiftning
- B5:** Ombygging
- B6:** Energibruk i drift
- B7:** Vannforbruk i drift
- C1:** Riving
- C2:** Transport til avfallsplass
- C3:** Avfallsbehandling for gjenbruk og/eller gjenvinning
- C4:** Avhending

En miljødeklarasjon, "Environmental Product Declaration" (EPD) er et dokument som kortfattet oppsummerer miljøprofilen til et komponent, et produkt eller en tjeneste på en standardisert måte, basert på en livsløpsanalyse (LCA). Disse deklarasjonene, som lages i henhold til ISO 14025, sikrer objektiv og sammenlignbar miljøinformasjon som er uavhengig verifisert, slik at man bygger tillit hos kundene. EPD er tilgjengelige for en rekke produkter og tjenester, fra kontormøbler til

byggematerialer, og kan lastes ned for å hjelpe kunder med å ta gode valg som er basert på produktets miljøprofil. Det er ulike programoperatører som lager EPD i ulike land, hvor i Norge heter det EPD Norge. Når man skal sammenligne, er det kun mulig å gjøre dette når produktet er det samme og følger de samme produktkategorireglene. [85]

Det er i utgangspunktet to ulike typer EPD: spesifikke produkt-EPD og gjennomsnitts-EPD. En spesifikk produkt-EPD fokuserer på kun ett enkelt produkt fra en produsent, detaljerer ulike scenarier fra produktets livssyklus, og deretter kan man registrere og publisere EPD hos EPD Norge. [86]

Gjennomsnitts-EPD kan derimot bestå av flere lignende produkter fra en leverandør, eller i tilfelle av bransje-EPD, som representerer et gjennomsnitt over flere produsenter for samme type produkt [86].

3.7.2. Miljøsertifisering

Miljøsertifisering er en ekstern verifisering av en virksomhets miljøstyringssystem, som gir sikkerhet for at virksomheten seriøst arbeider med å redusere sin miljøpåvirkning. Sertifiseringen bekrefter at virksomheten følger bestemte standarder for oppbygging og oppfølging av miljøstyringssystemet. [87] Det finnes tre anerkjente sertifiseringsordninger for miljøledelse i Norge: Miljøfyrtårn, ISO 14001 og Emas (Eco Management and Audit Scheme). Miljøfyrtårn er den mest brukte av disse. Det finnes også egne sertifiseringsordninger for bransjer, som Grønt flagg, som er en miljøpedagogisk sertifisering for skoler eller BREEAM som er en miljøsertifisering av bygg. [88]

BREEAM (Building Research Establishment's Environmental Assessment Method) er verdens ledende vitenskapsbaserte system for validering og sertifisering innen bærekraftig byggebransje. Det brukes hovedsakelig i Europa og har som mål å skape en grønnere fremtid. Millioner av bygninger globalt er registrert for å oppnå BREEAM sine mål innen ESG (miljø, sosialt ansvar og styring), helse og netto null-utslipp. [89]

Den norske versjonen av BREEAM, kalt BREEAM-NOR, er utviklet av Grønn Byggallianse sammen med aktører fra norsk bygg- og eiendomsbransje. Ved å følge BREEAM-NOR-standardene viser man at prosjektet møter og overgår byggeforskriftenes krav, samtidig som det tar hensyn til viktige samfunnsverdier. BREEAM-NOR reflekterer beste praksis i norsk byggebransje, fremmer nytenkning i planlegging og konstruksjon, og legger vekt på grundige nasjonale tilpasninger og bredt engasjement. [90]

3.7.3. Klimagassberegning, NS 3720

Klimagassberegningene blir brukt som dokumentasjon og et hjelpemiddel i beslutningsprosesser. Hensikten med denne veiledningen er å forenkle bruken av standarden for byggherre, slik at de kan identifisere klimagassutslipp i sine byggeprosjekter og deretter kunne skape et grunnlag for beslutninger om tiltak for å redusere utslippene. [91]

NS 3720 "Metode for klimagassberegninger for bygninger" [91]. Standarden NS 3720 kan benyttes for å kunne beregne klimagassutslippene knyttet til hele livssyklusen til en bygning eller deler av den. NS 3720 dekker ulike faser av livsløpet, inkludert bygging, drift, bruk og avhending. Dette inkluderer varer og tjenester som er inkludert til alle disse aktivitetene. Standarden fokuserer utelukkende på vurderingen av klimagasser. Denne standarden bygger på NS-EN 15978 "Bærekraftige byggverk – Vurdering av bygningers miljøpåvirkning – Beregningsmetode", som tilbyr generelle regler for beregning av livssyklusanalyse (LCA) for bygninger. [91]

3.8. Økonomi og fremdrift

Å utforske forholdet mellom økonomi og fremdrift i byggeprosjekter krever en forståelse av hvordan disse to elementene påvirker hverandre gjensidig. Økonomisk planlegging i et prosjekt strekker seg utover de direkte kostnadene ved materialer, arbeidskraft, og utstyr, som også inkluderer vurdering av de langsiktige finansielle konsekvensene av prosjektets tidsplan. Et nøye utarbeidet kostnadsestimat er fundamentet for en effektiv prosjektstyring. Dette estimatet bør gå gjennom prosjektets samlede kostnads mål, budsjett, og kostnadsrammer, og er grunnlaget for all videre planlegging og gjennomføring. [92]

Ved utarbeiding av et slik estimat, kan det også oppstå usikkerhetsmomenter, spesielt når man har begrenset med erfaring. Disse usikkerhetene kan utfordre nøyaktigheten av kostnadsestimering og påvirke prosjektets fremdrift. Derfor er effektiv fremdriftsplanlegging fra starten av prosjektet viktig, for å sikre at prosjektet ikke bare holder seg innenfor budsjettet, men også fullfører til avtalt tid. En måte å minke denne usikkerheten på er å utvide planleggingsperioden, noe som kan gi rom for grundigere risikoanalyse og forbedret prosjektstyring. [93]

3.8.1. Byggekostnad

En nylig studie fra 2022, utført av Arkiteam, COWI Norge og Chalmers tekniske høyskole fokuserte på kostnadssammenligninger mellom betong- og CLT konstruksjoner i byggebransjen. Selv om studien hadde fokus på kostnader, avdekket resultatene også betydelige muligheter for reduksjon av CO₂-utslipp ved bruk av trebygg. Materialvalg er en viktig del for å imøtekomme klimamålene for 2030, hvor CLT ikke bare tilbyr lavere CO₂-utslipp, men også potensielt redusere byggekostnader gjennom økt erfaring og effektivisering. Studien viser også at kortere byggetid med trematerialer kan fremskynde inntektsstrømmen, noe som bidrar til økonomisk bærekraft for slike prosjekter. [94]

For å finjustere kostnadsestimatene, kan parametrisk estimering være nyttig. Denne teknikken bruker statistiske sammenhenger mellom historiske data og prosjektspesifikke variabler, som entreprenørens produktivitetsmål, for å forbedre nøyaktigheten av kostnadsprognoser. [93]

Effektiv styring av logistikk kan være avgjørende, med tanke på vektbegrensningene satt av EU-standard for vogntog, som er på 40 tonn [95].

Byggebransjen har også opplevd ustabilitet innenfor pris og kostnad de siste årene, med ekstreme prissvingninger fra 2021 til 2022. Konsernsjefen i E.A. Smith påpeker at prisene på stål og trelast steg

kraftig, hvor armeringsjern økte fra under 500 euro per tonn til over 1300 euro før det falt tilbake. Andre byggevarer som isolasjon og gipsplater har fortsatt å stige i pris. Konsernsjefen opplevde også et betydelig omsetningsfall i 2023, og marginene ble svekket. [96]

3.8.2. Byggetid

Byggetid er den totale tiden det krever for å fullføre et byggeprosjekt, fra start til ferdigstilling. Dette inkluderer alle faser av prosjektet som planlegging, design, konstruksjon og avsluttende arbeid. Å fastsette tilstrekkelig byggetid er avgjørende for å sikre en sikker og kvalitetsmessig gjennomføring av prosjektet. [97]

En forsvarlig fastsatt byggetid er viktig slik at man unngår tidspress, som igjen kan føre til økt risiko for ulykker, skader, kvalitetsavvik og et usunt arbeidsmiljø. Tidspress kan også øke sannsynligheten for at det oppstår konflikter og forsinkelser, spesielt hvis byggetiden ikke blir forlenget ved utfordringer. [97]

Faktorer som kan påvirke byggetiden:

1. Prosjektets kompleksitet
 - Størrelse og kompleksitet på prosjektet kan påvirke byggetiden direkte. Jo større og mer kompleks prosjektet er, krever mer tid til planlegging, koordinering og utførelse [97].
2. Planlegging og forberedelse
 - Å lage en detaljert fremdriftsplan som inkluderer alle faser av byggeprosessen er nødvendig for å opprettholde en effektiv gjennomføring [97].
3. Kvalifikasjoner og erfaring
 - Personer med tilstrekkelig av kvalifikasjoner og erfaringer bør være involvert i vurderinger og planlegging av byggetiden [97].
4. Dokumentasjon og informasjon
 - Tilstrekkelige med dokumentasjon er nødvendig for å planlegge byggetiden riktig. Dette inkluderer å innhente nødvendig informasjon tidlig i prosjektet [97].
5. Organisering og samarbeid
 - Avgjørende med en effektiv organisering og samarbeid mellom byggherre, entreprenør og andre involverte parter. Som inkluderer nødvendige avtaler og profesjonell bistand [97].
6. Kvalitetssikring
 - Gjennomgang og kvalitetssikring av fremdriftsplanen. Identifisere og rette opp mulige problemer før de oppstår [97].

Bruk av CLT kan fremme effektivisering av byggeprosesser, som er hovedsakelig gjennom reduksjon av byggetiden. Dette skyldes for det meste av at CLT kan prefabrikeres, som tillater en rask montering på byggeplass. Prefabrikkerte elementer muliggjør dermed en mer flytende konstruksjonsprosess, ved at komplekse detaljer kan ferdigstilles før ankomst til byggeplassen, noe som kan forkorte den totale byggeperioden. Dette kan føre til økonomiske besparelser ved redusert arbeidskraft og kortere byggetid. CLT sin lette vekt kan redusere behovet for store grunnarbeid og fundamenter. [98]

4. Forskerspørsmål

I dette kapitlet presenteres vårt hovedspørsmål samt tilhørende underspørsmål. Avslutningsvis kommer avgrensninger for oppgaven. [9]

4.1. Forskerspørsmål:

Hvordan kan bygningsmaterialer som CLT og limtre i industribygg utfordre de tradisjonelle bygningsmaterialene som stål-sandwichelementer?

4.2. Underspørsmål:

- ***Hvor mye CO₂-utslipp har bygget i CLT og limtre sammenlignet med stål-sandwich bygget?***
- ***Hvordan er material- og totalkostnadene samt konstruksjonstiden av CLT og limtre sammenlignet med stål-sandwichelementer?***
- ***Hvilket materiale er mest ombruksvennlig av CLT og limtre eller stål-sandwichelementer?***

4.3. Avgrensninger

Masteroppgaven har en tidsramme på rundt 5 måneder, som gjør at det er nødvendig å avgrense deler av masteroppgaven, slik at arbeidet ikke blir for omfattende eller uoverkommelig innenfor den gitte perioden. Avgrensningene for oppgaven er:

- En studie innenfor valgt case
- Materialkostnad for Casebygget kontra CLT og limtre
- Totalkostnad for Casebygget kontra CLT og limtre
- Karbonfotavtrykk av fase A1-A3, A4, A5, B4-B5 og C1-C4
- One Click LCA for klimagassberegning
- FEM-Design som dimensjoneringsgrunnlag
- Forbindelser er antatt å være tilstrekkelig
- CLT-elementer antatt å være tilstrekkelig forankret og fungerer som avstivende for konstruksjonen
- Nødvendig avstivning under montasje er opprettholdt
- Betong på grunn og fundament beholdes likt
- Ser på konstruksjonsmaterialet CLT og limtre i forhold til stål

5. Case og materialer

I dette kapittelet presenteres case-bygget som er valgt ut som utgangspunkt for å svare på forskerspørsmålet, samt materialene som er brukt til å løse oppgaven. [9]

5.1. Case

Figur 5.1 viser en 3D-modell over Casebygget, et reelt prosjekt som har vært under prosjektering og produksjon siden 19.07.2023. Bygget skulle være ferdig før påske 2024, men blir ferdigstilt i løpet av 01.06.2024. Bygget er et kombi-industribygg som gir mulighet for både lagerplass og administrasjon/kontorplass i samme lokale. Lagerbygget er plassert på Buråsen 11 i Kristiansand. Alle tegninger av bygget finnes i Vedlegg A. [9]

Byggespesifikasjoner:

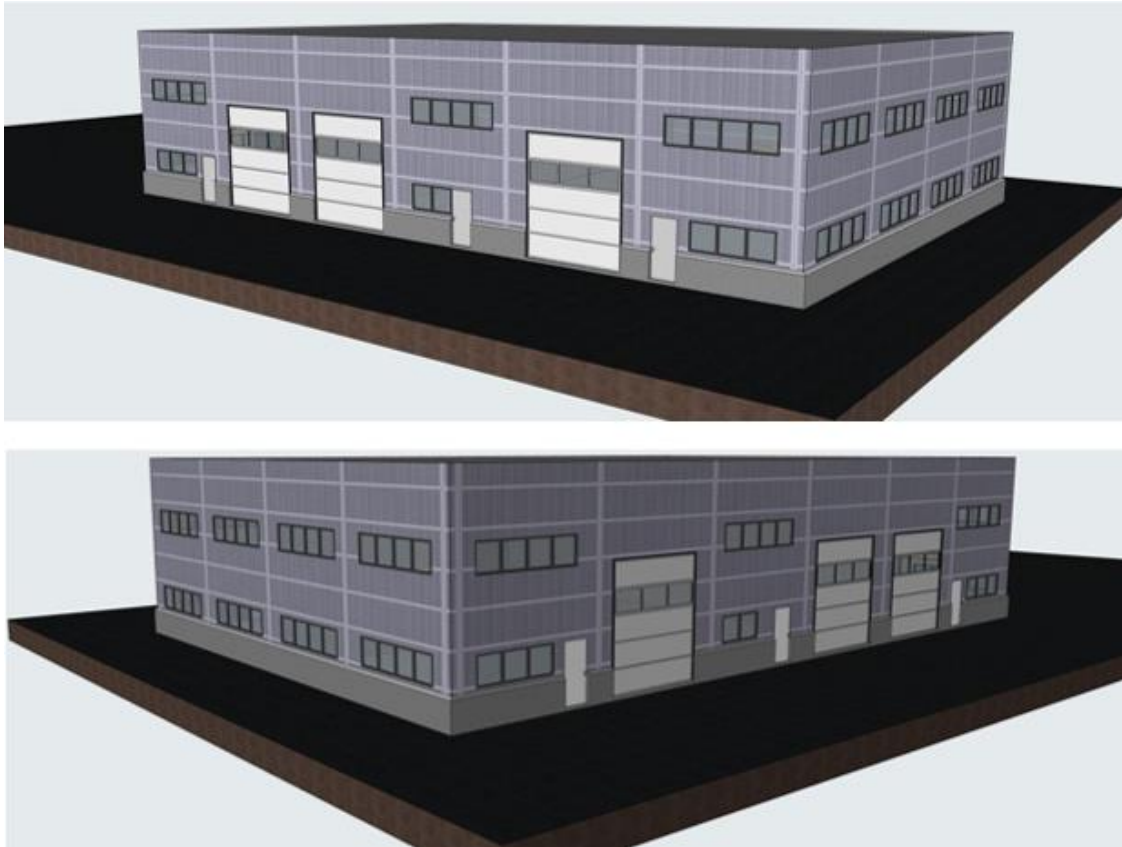
- Lengde: 33 m
- Bredde: 22 m
- Høyde: 7,6 m
- Total gulvflate: 726 m²
- Søyleavstand: 5,5 m

Seksjon:

- Antall seksjoner: 6
- Størrelse per seksjon: 176 m² (inkludert arealet til hulldekkene)
- Utleiepris: 750 kr/m²
- Utstyr per seksjon:
 - i. Lagerport: 4 x 4,5 m
 - ii. Vinduer
 - iii. Inngangsdør

Byggematerialer:

- Bærende konstruksjoner: Søylar og bjelker i stål
- Yttervegger: Sandwichelementer og betongbrystninger
- Tak: Bølgestålplater
- Gulv: Betongfundament og -dekke
- Dekke: Lagerdekke av hulldekker



Figur 5.1 - 3D modell av bygget (sør-øst) over og (øst-nord) under [99]

Det ble laget to versjoner av Casebygget i CLT og limtre. Design 1 ble utformet slik at det ble nesten helt likt det opprinnelige stålbygget, men med en liten forenkling i forhold til taket. Det ble valgt å ha et flatt tak i stedet for skråtak som på Casebygget. Design 2 ble ganske likt som Design 1, men mer tilpasset med tanke på fremtidige endringer av bygget, der innvendige skillevegger og lager/kontordekker var tatt bort. [9]

5.2. Materialer

Her presenteres materialkvalitetene som er brukt for limtrekomponentene og CLT-elementene. [9]

5.2.1. Limtre

Alle limtrekomponentene i konstruksjonen er valgt til å være av limtrekvaliteten GL30c, siden dette er kvaliteten som produseres mest i Norge og derfor er lett tilgjengelig [36] [40]. Det er benyttet standard dimensjoner/tverrsnitt som er hentet fra lagerførte tverrsnitt definert av FEM-Design [9].

5.2.2. CLT-elementer

CLT-elementene er valgt med styrkeklasse C24 for lamellene, ettersom dette er den mest vanlige styrkeklassen for konstruksjonsvirke, noe som betyr at det er et lett tilgjengelig produkt. Denne styrkeklassen har god bæreevne for strukturelle konstruksjoner og er kostnadseffektiv, siden det

produseres mest av denne klassen. Dimensjonene og produsenten er hentet fra FEM-Designs databaser. [9]

5.3. Digitale verktøy

I dette kapittelet presenteres de digitale verktøyene som er benyttet for å løse oppgaven. Disse programmene vil være nyttige i videre arbeidsliv. Gjennom utdanningen har vi opparbeidet kunnskap om Office 365 og Revit. One Click LCA og FEM-Design var mindre kjente programmer som krevde ytterligere studier og opplæring under arbeidet med masteroppgaven. [9]

5.3.1. FEM-Design

FEM-Design, som er utviklet av det svenske selskapet StruSoft AB, ble brukt for å dimensjonere og analysere begge lagerbyggene i CLT og limtre. Dette avanserte strukturanalyseprogrammet dekker alle aspekter av strukturell ingeniørkunst, inkludert 3D-modellering, design og finite element-analyse av konstruksjoner i materialer som stål, betong, tre, murverk, kompositt og fundamenter. Programmet samsvarer med Eurokoder-standarder og nasjonale tillegg. Programmet er kjent for sin brukervennlighet og evnen til å håndtere alt fra enkeltelementdesign til analyse av større bygninger. Selv om vi hadde noe erfaring med FEM-Design fra tidligere, var vi avhengige av brukermanualene fra StruSofts hjemmeside for å oppnå nøyaktige beregninger av konstruksjonens tåleevne for valgte laster. Dette bidro til en grundigere analyse av byggets stabilitet enn om vi bare hadde regnet alt for hånd. Resultatene og geometrien blir presentert med avansert grafikk. [100]

5.3.2. Autodesk Revit

Videre valgte vi å bruke Revit for å modellere bygget, hovedsakelig fordi begge studentene har god kompetanse med dette programmet, noe som var avgjørende for valget [9]. Revit er en design- og dokumentasjonsplattform som støtter bygningsinformasjonsmodellering (BIM), noe som er nødvendig for utforming, tegninger og planlegging. BIM-teknologi gir detaljert informasjon om prosjekt-design, omfang, mengder og faser etter behov. I Revit-modellen kan bygningen konstrueres både i 2D som plan- og snitt-tegninger eller som 3D-tegninger. Programmet koordinerer også informasjonen automatisk på tvers av modellvisninger, tegningsark, tidsplaner, seksjoner og planer. [101] En annen fordel med Revit er at Autodesk støtter plugins fra tredjeparter, slik som One Click LCA-plugin, som muliggjør direkte eksport av materialmengder til One Click LCA for videre analyse [102].

5.3.3. One Click LCA

Gruppen brukte One Click LCA, et nettbasert verktøy utviklet av det finske selskapet Bionova Ltd i 2001, for klimagassberegningene. Dette verktøyet er designet for byggebransjen for å raskt og enkelt beregne miljøpåvirkninger fra prosjekter og støtter sertifiseringer som BREEAM. Det muliggjør sammenligning av prosjekters miljøpåvirkning, generering av standardbygg for beregningsgrunnlag, og visualiserer klimapåvirkninger og effektivitet gjennom grafer [102]. Selv om begge studentene

hadde noe kjennskap til One Click LCA fra før, måtte vi benytte brukermanualene fra hjemmesiden under prosessen. [9]

5.3.4. Office 365

Office 365 ble brukt gjennom hele oppgaven, som er programmer som Word, Teams, PowerPoint, Excel og MS Project. Word brukte gruppen til selve projektskrivingen, Teams for lagring av dokumenter og møter med veileder, PowerPoint for lagning av presentasjon og MS Project for å planlegge prosjektets fremdrift. Disse programmene støttet effektiv prosjektstyring innad i gruppen. [103]

6. Metode

I dette kapitlet presenteres de ulike metodene som ble benyttet for å besvare forskerspørsmålet og underspørsmålene i denne masteroppgaven. Det beskriver både gjennomføringen av litteraturstudie og prosessen frem mot å velge relevant litteratur. Det beskrives også hvilke intervjuemetode som ble brukt og gjennomføringen av intervjuene. Forklaring på hvordan lastberegningene ble gjort. Gjennomgangen av de digitale verktøyene som er benyttet i oppgaven. Avslutningsvis er det en gjennomgang av klimagassberegning, material- og total kostnad. [9]

6.1. Metode i forskning

I dette kapitlet blir det belyst viktigheten av metodevalg i forskning for å tilegne seg ny kunnskap. Det er viktig å understreke at valg av forskningsmetode må begrunnes ut fra evnen til å innhente relevant informasjon og belyse problemstillingen på en faglig måte. Forskning kan enten utføres gjennom kvantitative eller kvalitative metoder, avhengig av hva som er studiets mål. [104]

6.1.1. Kvantitative og kvalitative metoder

Kvantitative og kvalitative forskning er grunnleggende tilnærminger innen samfunnsvitenskapelige studier, som representerer to vesentlige tenkemåter for å innhente og analysere informasjon om samfunnet. [104]

Kvantitative forskningsmetoder fokuserer på innsamling og analyse av data som kan kvantifiseres, det vil si data som blir presentert i tallform eller andre målbare enheter. Det er typisk ved denne metoden å formulere og teste hypoteser basert på forhåndsdefinerte antakelser, for deretter å undersøke om disse hypotesene stemmer overens med de innsamlede dataene. Denne metoden tilbyr en mer bred oversikt ved å samle inn data uten å fordype seg like mye i detaljene som hva kvalitativ forskning gjør. Resultatet ved denne metoden er en mer strukturert tilnærming som igjen gjør at det blir lettere å etterprøve resultatene. [105]

Kvalitativ forskningsmetode brukers derimot ved innsamling og analyse av data, som vanligvis foreligger i form av tekst. Denne metoden derimot fokuserer på å samle inn, analysere og bearbeide skriftlige tekster, intervjuer og observasjoner slik at man oppnår en dyp forståelse av temaet. Metoden lar oss utforske meninger og opplevelser som ikke kan la seg tallfeste. En negativ side ved å bruke denne metoden er at det kan oppstå noen utfordringer i tiden etter analysen, på grunn av at den ikke søker opp funnene, men sammenligner informasjon med teoretisk funn. [106]

Hovedforskjellen mellom disse to metodene ligger i hvordan dataen samles inn, noe som understreker viktigheten av å nøye vurdere både spørsmålene som stilles og måten de stilles på. Uavhengig av valgt metode, må man være bevisst på at både spørsmålene og den innsamlede dataen er åpen for tolkning. [105] [106]

6.1.2. Metodevalg

I en slik oppgave er det hensiktsmessig å benytte seg av flere kilder for å samle inn data. Dette bidrar til å utvide synet på oppgaven, noe som gjør at den innhentede informasjonen blir mer troverdig og nøyaktig [9]. Gjennom triangulering, som innebærer å benytte minst to forskjellige perspektiver (metoder, datasett eller teorier) ved en undersøkelse, sikrer man at resultatet blir nøye kontrollert og verifisert. [107]

Under denne masteroppgaven er det gjennomført litteraturstudie og 3 fokuserte semistrukturerte intervjuer [9]. Dette tilbyr flere datakilder og åpner for muligheten til å triangulere de innsamlede dataene [108]. Intervjuene gir oss førstehåndts data, som er såkalt primærdata, direkte fra kildene [109]. Dataene som vi fikk her, er et viktig fundament for vår forståelse av temaet [9].

Litteraturstudiet gir oss tilgang til data som er samlet av andre, mer kjent som sekundærdata [110].

I denne masteroppgaven har vi hovedsakelig benyttet oss av kvalitative forskningsmetoder. Dette skyldes at det var nødvendig med innsikt fra personer som jobber med det aktuelle temaet daglig for å besvare vår problemstilling. Med bakgrunn av dette, bestemte vi oss for å holde semistrukturerte intervjuer for å besvare vår problemstilling bedre. [9]

6.1.3. Kriterier for vurdering av valgte forskningsmetoder

Ved innsamling av data gjennom ulike metoder, er det viktig at dataen er relevant for forskerspørsmålet. Med tanke på litteraturstudie innebærer dette nøye valg av kilder og data for å sikre at de er relevante for temaet som undersøkes. Det er viktig med en kritisk vurdering av kildenes kvalitet, ved at dette direkte påvirker påliteligheten til de innsamlede dataene.

Når det gjelder intervjuer, er det avgjørende å velge informanter med relevant kunnskap eller erfaring, og stille spørsmål som belyser forskerspørsmålet. Feilkilder i intervjuer kan være misforståelser som er knyttet til hvordan spørsmålet blir formulert, forstått, og besvart, samt intervjuerens tolkning av svarene. Å være oppmerksom på disse mulige feilkildene kan være avgjørende for å sikre dataens relevans og kvalitet. [9]

6.2. Litteraturstudie

Masteroppgaven startet med et litteratursøk for å identifisere og kartlegge den eksisterende informasjonen som allerede er tilgjengelig. Kombinasjonen av litteratursøk og intervjuer var ment for å skape en forbindelse mellom teori og praksis, slik vi får en dypere forståelse av emnet.

Litteraturstudie har gitt nødvendig innsikt i hva CLT og limtre er, deres produksjonsmetoder og anvendelsesområder. Videre har vi fått kunnskap om stål-sandwichelementer og den nødvendige teorien om øvre temaer. Det har vært fokus på å innhente informasjon fra troverdige kilder, som er nødvendig for å besvare forskningsspørsmålene i oppgaven. Litteratursøk og informasjoninnhenting har bidratt til å avgrense oppgavens omfang. Kilder som er brukt i oppgaven har kommet fra forskjellige databaser og disse har blitt ført inn i en loggbok. Dette har skapt et system for kategorisering og organisering av funnene. [9]

6.3. Loggbok

For å oppnå et effektivt og målrettet litteratursøk ble en enkel loggbok benyttet for å ha kontroll på søkeord og begrensninger. Se Vedlegg B for en oversikt over loggboken. Søkene ble utført gjennom både vitenskapelige databaser som Google Scholar, ScienceDirect og inkluderte søk etter relevante bøker, nettsider og rapporter via Google. All litteratur ble nøye evaluert for relevans, pålitelighet og kvalitet. Ved en rask gjennomlesning av sammendrag og innledning får man et inntrykk om litteraturen gir tilstrekkelig informasjon som er relevant til oppgave skrivingen. Tabell 6.1 gir et eksempel på søkeprosessen. [9]

Tabell 6.1 - Eksempel på vår søkeprosess [9]

Søkeord	Betydning på Engelsk	Betydning på Norsk	Antall treff (ScienceDirect)
Mass Timber	-	Massivtre	29,292
Steel-Sandwich panel	-	Stål-Sandwichelementer	15,104

6.3.1. Utvalg og avvisning

Kriteriet for å velge en publikasjon som ble brukt i oppgaven skulle være fagfellevurdert, dette gir en trygghet på at publikasjonen er bedømt akademisk. Som betyr at artikkelen er vurdert og godkjent av to eller tre anonyme objektive eksperter innenfor fagfeltet [111]. Publikasjoner som gir informasjon om relevante temaer for studiet som CLT, limtre, stål, sandwichelementer, bærekraft, industribygg, ulemper og fordeler, pris med mer, ble også vurdert for bruk til oppgaven, Tabell 6.2 gir et utdrag av loggboken. [9]

Kriterier for avvisning av publikasjoner var ikke fagfellevurderte publikasjoner, ikke relevant/utdatert informasjon, og dårlig kvalitet/oppsett ble ekskludert fra oppgaven. [9]

Tabell 6.2 - Utdrag av loggboken [9]

Database	Søke strategi	Søkeord	Notat	Antall treff	Antall valgte
ScienceDirect	Begrenset til: Review and engineering articles. 2010-2024	Use of timber in construction	Få resultater, ikke alt som var relevant, 1-2 artikler var interessante	71	1-2
ScienceDirect	Begrenset til: Review Articles. Subject areas: construction and building materials, English	Industrial buildings in mass timber	Mange resultater, rask gjennomgang av overskrift og oppsummering for valg av artikler.	7393	1

6.3.2. Utvalg litteratur

Tre artikler/rapporter ble valgt fra litteraturstudien til resultatdelen og oppgaveskrivingen, disse er:

- "Understanding Costs and Identifying Value in Mass Timber Construction: Calculating the 'Total Cost of Project' (TCP)" [112]
- "Mass timber: evaluating construction performance" [113]
- "Asplan viak: Energi- og materialkonsept" [17]

6.3.3. Uthenting av informasjon

Relevante informasjonen hentes fra artiklene, bøkene, master- og bacheloroppgavene og andre tidsskrifter ved en rask gjennomlesning av sammendraget. Dette gir et raskt innblikk i hva oppgaven handler om. Dersom sammendraget inneholdt informasjon som kunne brukes ble resten av teksten raskt lest gjennom for ytterligere informasjon. Informasjonen i litteraturen som kunne knyttes til forskerspørsmålene ble også benyttet. [9]

6.4. Semistrukturert intervju

Det finnes ulike måter å utføre intervjuer på. Gitt vårt valg av kvalitativ metode for å løse problemstillingen, valgte vi å benytte kvalitative, semistrukturerte intervjuer. Denne intervjuformen kombinerer forhåndsdefinerte spørsmål med mulighet for oppfølgingsspørsmål, noe som gir rom for å utforske temaet dypere og sammenligne deltakernes svar [114]. Vi benyttet semistrukturerte intervjuer for å hente inn data til denne oppgaven. Denne intervjuformen kombinerer forberedte spørsmål med muligheten for oppfølgingsspørsmål, noe som gir oss muligheten til å sammenligne deltakernes svar og utforske temaet dypere. Dette forberedte oppsettet skaper en trygg og fokusert dialog, som hjelper datainnsamlingen til vårt forskningsspørsmål [114]. Før intervjuene utarbeidet vi en intervjuguide som fungerte som en veiledning for hvordan vi skulle strukturere intervjuet. Denne guiden var kun et utgangspunkt for samtalen og ikke en endelig fasit [115].

6.4.1. Planlegging og forberedelse av intervjuer

I slutten av januar 2024 startet vi prosessen med å finne relevante informanter til vår masteroppgave. Vi søkte etter prosjekter og eksperter innen bruk av CLT og limtre samt tradisjonelle materialer i industribygg for å sikre en bred forståelse av emnet. Deretter kontaktet vi prosjektansvarlige via e-post for å undersøke interesse for samarbeid. Vi rettet henvendelser mot en rekke firmaer innen byggebransjen, inkludert entreprenører, leverandører, og montører av både CLT/limtre og stål. [9]

For å få mer informasjon om CLT og limtre, tok vi kontakt med to firmaer som spesialiserte seg innenfor dette materialet og sikret et digitalt intervju med dem. Det første firmaet er en ledende aktør innenfor CLT og limtre i Norge, mens det andre firmaet har langvarige erfaring med CLT og limtre. Når det opprinnelige lagerbygget i stål nærmet seg ferdigstilling, gjennomførte vi et digitalt intervju med prosjektlederen for å få en dypere forståelse av lagerbygg i stål-sandwich. [9]

Vi ønsket å gjøre lydopptak av intervjuene, noe som krevde at vi måtte sende inn en søknad til Sikt – Kunnskapssektorens tjenesteleverandør – for tillatelse til å behandle personopplysninger i forskningsprosjektet, i Vedlegg C finner man meldeskjema og vurderingen fra Sikt. Før intervjuene, mottok hver informant spørsmålene på forhånd, slik at de hadde muligheten til å forberede seg, samt et informasjonsskriv utformet etter en mal fra Sikt. Dette dokumentet forklarte formålet med forskningen, hva deltakelse innebærer, behandlingen av personopplysninger, og deltakernes rettigheter. Avslutningsvis inneholdt skrevet en samtykkeerklæring hvor informantene ga tillatelse til at samtalen ble tatt opp. [116] Alle samtykkeskjemaene for intervjuene ligger i Vedlegg D. [9]

6.4.2. Informanter

Tabell 6.3 viser en oversikt over informantene som kunne stille til intervju samt hvordan intervjuene ble gjort, samtykke til lydopptak og dato for utførelse [9].

Tabell 6.3 - Oversikt over gjennomførte intervjuer [9]

Informanter				
Aktør	Rolle	Type intervju	Lydopptak	Gjennomført intervju
Firma A, spesialkompetanse innenfor CLT	Prosjektutvikler	Digitalt	Ja	20.03.2024
Firma B, spesialkompetanse innenfor CLT	Daglig leder	Digitalt	Ja	10.04.2024
Firma med spesialkompetanse innenfor Stålbygg	Prosjektleder Daglig leder	Digitalt	Ja	24.04.2024

Den første som stilte til samtale, var en prosjektutvikler med mange års erfaring i bransjen og god kunnskap om CLT og limtre. Intervjuet dekket en rekke temaer som ga oss god innsikt i bruk av CLT i byggebransjen. Vi diskuterte alt fra grunnleggende bakgrunn og produksjonsprosesser for CLT/limtre, til komplekse spørsmål om miljøfordeler, tekniske og økonomiske utfordringer, samt innovasjoner. Prosjektutviklerens erfaringer med kvalitetssikring, produksjonsfleksibilitet og strategier for å redusere klimagassutslipp ga oss god forståelse for de faktorene ved CLT- og limtre-fabrikasjon. Vi diskuterte også markedstrender, kostnader, bærekraftighet, og CLT sin levedyktighet som alternativ til tradisjonelle byggematerialer. Videre gikk vi over til bemanningsbehov, som ga oss innsikt i de praktiske vurderingene ved valg av CLT og limtre. Til slutt ga prosjektutvikleren sine perspektiver på fremtidens byggeløsninger og råd for å fremme bærekraftige byggemetoder. [9]

I det andre intervjuet, var det en daglig leder som ga oss en grundig innsikt i firmaets spesialkompetanse innenfor CLT. Med en bakgrunn som tømmer og tømmermester fra Tyskland har personen vært aktiv i Norge siden 2007, og har spilt en viktig rolle i å fremme CLT- og limtre-bygg i landet. Firmaets erfaring strekker seg tilbake til begynnelsen til bruken av CLT i byggebransjen, og deres arbeid har vært avgjørende for å øke interessen og aksepten for CLT som et byggemateriale.

Samarbeidet med ledende produsenter i Europa har gitt dem tilgang til materialer av høy kvalitet, og deres evne til å tilpasse seg til ulike prosjekter viser deres ønske om å fremme bredere aksept og forståelse for CLT i Norge. Gjennom intervjuet gikk vi gjennom en rekke emner, som inkluderer fordelene med CLT i byggeprosjekter, vurdering av bærekraft i leverandørkjeden, utfordringer knyttet til bruk og aksept av CLT og muligheten for ombruk og resirkulering av CLT ved byggets endte levetid. Denne hjelpsomme samtalen ga oss et helhetlig bilde av både firmaets ekspertise og deres engasjement for å fremme bruken av CLT som et attraktivt og bærekraftig alternativ materiale i byggebransjen. [9]

Siste som stilte til intervju var en daglig leder innenfor stålbygg. Han ga oss innsikt i prosjekteringen og oppføringen av vårt casebygg. Intervjuet avdekket utfordringer knyttet til værforhold. Diskusjonen belyste god logistikk og værforberedelse er viktig å tenke på for å effektivisere fremtidige prosjekter. Deretter gikk diskusjonen over til effektive monteringsverktøy for å forkorte byggetiden. Til slutt ga informanten en tanke rundt CLT som byggemateriale i industribygg. Dette intervjuet ga oss mer informasjon rundt stål, slik at vi nå kan sammenligne stål mot CLT/limtre i lagerbygg, noe som er avgjørende for å kunne svare på vårt forskerspørsmål. [9]

Før intervjuene mottok deltakerne en intervjuguide på e-post for å kunne forberede seg. Slik at de skulle føle seg mer trygg, siden de visste hvilke spørsmål som ville bli stilt. En generell guide ble utformet, men spørsmålene ble tilpasset etter informanten og dybden av temaene varierte under selve intervjuene. Tilpasningene baserte seg på informantens kunnskapsnivå, og oppfølgingsspørsmål som ble stilt, for å utforske ytterligere detaljer som ikke nødvendigvis var inkludert i den opprinnelige guiden. Alle intervjuguidene er i Vedlegg E. [9]

Under utformingen av intervjuguiden var det viktig å sikre at spørsmålene som ble stilt, ville bidra til å bygge opp under forskningsspørsmålene. Først laget vi et utkast til spørsmålene. Deretter sendte vi dette utkastet til veilederen, som gjennomgikk og kom med tilbakemeldinger på mulige forbedringer. [9]

6.4.3. Utførelse av intervjuene

I begynnelsen av hvert intervju var det viktig å sikre at informantene følte seg komfortable nok til å svare akkurat det de mener, uten at dem endrer adferd fra hvordan de normalt ville opptrådt. Vi startet med litt småprat, hvor vi introduserte oss selv og ga en kort beskrivelse av oppgaven vår. Deretter spurte vi informantene om deres bakgrunn og erfaringer. Dette var ment som enkle, faktabaserte spørsmål for å gi en myk start på intervjuet og lette samtaleflyten. Deretter startet vi lydopptaket, og fulgte intervjuguiden for å samle den nødvendige informasjonen. Etter å ha dekket alle spørsmålene, avklarte vi eventuelle uklarheter, og intervjupersonene fikk mulighet til å tilføre ekstra informasjon som ikke tidligere hadde kommet frem, før lydopptaket ble stoppet. [9]

Alle intervjuene ble gjennomført over telefonen, grunnet avstand. En utfordring med digitale møter er at det til tider kan være vanskelig å tydelig forstå hva den andre parten sier, ofte på grunn av tekniske problemer. Videre kan intervjuer utført over nettet medføre utfordringer med transkribering, da det kan være vanskelig å fange opp alt som ble sagt. [9]

6.4.4. Etter gjennomføring av intervjuene

Etter hvert intervju begynte vi transkriberingsprosessen ved å laste opp opptaket til transkriberingsprogrammet Teksta [117], noe som sparte oss for mye tid. Siden noen av informantene snakket dialekt, noe som førte til en del skrivefeil i transkripsjonene. Dette gjorde at vi måtte gå grundig gjennom hvert dokument for å rettskrive og forbedre strukturen. En begrensning med lydopptak er at vi ikke kan se informantenes kroppsspråk, noe som kan være vesentlig for å tolke deres humør. Derfor valgte vi å ta opp samtalen, slik at vi var sikre på at samtalen ble transkribert ordrett. Se Vedlegg F for en oversikt over spørsmålene og svarene som ble stilt i hvert intervju. Siden det ble mange sider transkribert fra intervjuene, opprettet vi et Excel-dokument som inneholdt nøkkelkommentarer og temaer fra hvert intervju. Dette dokumentet dannet et solid grunnlag for resultatdelen av vår analyse, se Vedlegg G. [9]

6.4.5. Styrker og svakheter av intervjumetoden

Kausalitet, som betyr årsak eller grunn [118], har vært en av nøkkelkomponentene i vår oppgave for å utforske hvorfor visse beslutninger ble tatt. Dette inkluderer spørsmål som: Hva ligger bak forskjellene mellom industribygg i CLT/limtre og stål? Gjennom vår forskning har vi forsøkt å finne årsakssammenheng som kan forklare dette. Siden årsak og grunn ikke har den samme meningen, er det viktig å skille mellom disse to. En årsak refererer til noe som setter i gang en forandring eller skaper en effekt [119], mens grunn rettferdiggjør hvorfor noe blir gjort eller hvorfor noe skjer [120]. Så under intervjuene kan det være litt utfordrende å vite om informantene presenterer grunn eller årsak, siden disse begrepene ofte blandes med hverandre. Dette skaper derfor en svakhet ved intervjuene som gjennomføres [9].

Når det gjelder tolkning av intervjuene, er det mulig at den måten som vi brukte ikke nødvendigvis var den mest effektive. En annen synsvinkel kunne potensielt ført til et annet resultat. Begge av oss bringer en viss grad av erfaring til bordet; den ene av oss med en litt praksiserfaring, mens den andre med litt kunnskap fra byggprosjekter. Dette kan både være en styrke og en svakhet i analysen av dataene. På den positive siden skaper en kombinasjon av generell praksis og prosjekterfaring et solid grunnlag for tolkningen av dataene. På den negative siden kan vår varierte erfaring også føre til en risiko for at vi overser eller undervurderer visse punkter som kanskje ville vært opplagte for noen med en mer ensartet erfaring innen feltet. Når det er sagt, har vi forsøkt å se alle synsvinkler og faktorer gjennom intervjuene, nettopp for å minimere denne risikoen. [9]

Ved at intervjuene ble gjennomført digitalt oppsto det til tider lydproblemer, som forstyrret flyten i samtalen og potensielt kunne påvirke kvaliteten på de innsamlede dataene. Når intervjuene transkriberes i sin helhet, blir dataene svært detaljerte og omfattende. Dette kan være en ulempe, da det krever at man selv må identifisere og trekke ut det viktigste fra intervjuene under analyseprosessen. Dette øker risikoen for å overse nøkkelinformasjon som kan være relevant for å belyse problemstillingen. I tillegg kan det føre til at man må bruke mye tid på å filtrere ut mindre relevant informasjon, og i verste fall kan viktige data bli utelatt. [9]

6.5. Lastberegning

I konstruksjoner tas det hensyn til flere samtidige laster, som er basert på den norske standarden NS-EN 1991-1. Laster som er brukt, er enten levert av firmaet Areco, Contiga eller kalkulert av FEM-Design programmet. [9]

6.5.1. Egenlast

Egenlasten og påført egenlast i konstruksjonen ble automatisk beregnet av FEM-Design. Dette sparte oss for manuelle beregninger av egenlasten. [9]

6.5.2. Nyttelast

Nyttelasten er hentet fra Contiga sine beregninger på hulldekkene der de har satt den til 5 kN/m^2 for kontor/lagerdekkene, se Vedlegg A. [9]

6.5.3. Snølast

Siden snølast er basert på lokasjonens spesifikke forhold, er Design 1 og Design 2 lokalisert på samme sted som Casebygget. Dermed benyttet gruppen den samme snølasten som Areco, som ifølge tegningene er snølasten på $4,0 \text{ kN/m}^2$, som sett i Vedlegg A. I Vedlegg H er vår utregning av snølasten beskrevet. [9]

6.5.4. Vindlast

Samme som snølasten, brukte vi samme vindlast som Areco gjorde på Casebygget, se Vedlegg A. De kom fram til at vindlasten ble $0,69 \text{ kN/m}^2$, som beregnes etter standarden NS-EN 1991-1-4. Se Vedlegg H for vår utregning av vindlasten. [9]

6.6. FEM-Design

FEM-Design ble brukt for modellering og analyse av Design 1 og Design 2 som ble laget i CLT og limtre. Begge versjonene følger samme fremgangsmåte for oppbygning i FEM-Design. Våre tegninger er basert på arbeidstegninger vi fikk fra bygningens eier, utarbeidet av AK Mekaniske, Areco, 4Consult og Contiga. Vi mottok 3D-tegninger, snitt og plantegninger for stålkonstruksjonen, takplatene, hulldekkene og betongbrystningen, som finnes i Vedlegg A. [9]

Modelleringen av byggene i CLT og limtre startet med å lage grid-systemet, slik at det er lettere å plassere søyler og lignende. Byggets mål er på $33 \text{ m} \times 22 \text{ m}$, og grid-systemet er satt opp i henhold til tegningene. Deretter ble byggets høyde definert til $7,6 \text{ m}$ samt høyden på hulldekkene og dørene. I Vedlegg I finner man mer informasjon om prosessen, inkludert trinnvise beskrivelser og figurer som viser hvordan vi opprettet grid-systemet, definerte laster, utførte mesh-kontroller og benyttet autodesign-funksjonen for optimalisering av tverrsnitt. For hvilke lastgrupper og kombinasjoner som

ble benyttet i oppgaven se Vedlegg J. For informasjon av alle tverrsnitt som ble brukt for søyler, bjelker og CLT-elementer i Design 1 og 2, se Vedlegg K. [9]

6.7. Autodesk Revit

For detaljer om fremgangsmåten i bruk av Autodesk Revit for modellering av Design 1 og Design 2 i CLT og limtre, inkludert oppsett av gridsystem, definering av høyder, valg og plassering av bjelker og søyler, samt importering og bruk av KLH CLT-elementer, se Vedlegg L. Vedlegget inneholder en trinnvis beskrivelse av prosessen og relevante figurer som viser hvordan vi etablerte gridsystemet, satte opp høydenivåer, valgte materialer og justerte dimensjonene på søyler og bjelker. Detaljer om importering av ferdig oppbygde CLT-elementer fra KLH og utføring av utsparinger for vinduer, dører og porter er også inkludert. [9]

6.8. One Click LCA

Her presenteres hvordan oppbygningen av fire scenarier ble utført i One Click LCA [9].

6.8.1. Oppstart av One Click LCA

Etter å ha modellert lagerbyggene både i FEM-Design og Revit, var vi klare til å bruke One Click LCA for å analysere klimagassutslippene fra byggene i CLT og limtre, som skal sammenlignes med det opprinnelige bygget i stål-sandwichelementer [9].

Når man oppretter et nytt prosjekt, må man fylle ut startparametere som er blant annet beregningsperiode og bygningsareal. Etter at man har opprettet prosjektet, er det dermed mulig å lage et design. Designet omfatter forskjellige datainnganger som er nødvendige for å beregne klimagassutslippene gjennom bygningens ulike livssyklusstadier. Dette inkluderer bygningsmaterialer, årlig energiforbruk, beregningsperiode, bygningsareal, utslipp og fjerning, transport under drift, byggeplassdrift og ytterligere scenarier. [9]

Vår analyse fokuserte primært på bygningsmaterialene, mens vi forsøkte å standardisere andre faktorer så mye som mulig for å sikre en rettferdig sammenligning [9]. Disse faktorene inkluderte:

- En beregningsperiode på 60 år, i tråd med NS 3720 "Metode for klimagassberegninger for bygninger", som standardiserer en 60-års periode når annet ikke er oppgitt [121].
- Energiforbruket ble satt likt som det automatisk genererte referansebygget [122].

Man kan lage flere scenarier innad i samme prosjekt, som gjør det lettere å sammenligne scenarioene mot hverandre. De produserte designene er [9]:

- Design 1
- Design 2
- Det opprinnelige lagerbygget i stål-sandwichelementer

- Standard Referansebygg, som er automatisk generert av "Carbon Designer"-funksjonen i One Click LCA

Etter at man har lagt inn alle dataene for bygningsmaterialene for alle de fire senarioene, opprettet One Click LCA automatisk rapporter som presenterer resultatene. Programmet produserer også figurer som sammenligner de ulike senarioene, og viser en sammenligning av klimagassutslipp som er knyttet til de ulike livssyklusstadier, bygningsdeler og ressurstyper. [9]

6.9. Klimagassberegning med One Click LCA

For detaljer om oppbygningen og bruken av One Click LCA for klimagassberegning av de forskjellige versjonene av bygget, se Vedlegg M. Vedlegget inneholder trinnvise beskrivelser av prosessene i Revit og på One Click LCA-nettsiden. Dette inkluderer eksportering av Revit-modeller, valg av miljøsertifiseringssystem, kvalitetssikring av materialdata, manuell registrering av materialmengder for lagerbygget i stål, og opprettelse av standard referansebygg. Vedlegget gir også innsikt i utfordringer knyttet til bruk av programvaren, inkludert begrensninger i EPD-utvalget og tilgangen til beregningsverktøyene. [9]

6.10. Materialpris og mengder

Tabell 6.4 viser materialkostnaden for de forskjellige materialene som er brukt i Design 1 og Design 2 og Casebygget. Dataene er hentet fra intervjuene om CLT, limtre og stål [9]. Prisene for materialer som isolasjon, kledning og lekter er hentet fra Monter som er et av Norges største byggevareleverandør [123].

Tabell 6.4 - Beregningsgrunnlag for materialpris [9]

Materialtype	Pris
Stål	50-60 kr/kg, 3. Intervjuet
CLT	6 500 kr/m ³ , 2. Intervjuet 7 500 – 8 000 kr/m ³ , 1. Intervjuet
Limtre	5000 kr/m ³ , Monter
100 mm trefiberisolasjon for tak og vegger	194 kr/m ² , Monter
Kledning, 19x148	105 kr/lm, Monter
Lekter, 36x68	46,60 kr/lm, Monter

Materialmengdene for CLT og limtre ble hentet ut fra FEM-Design [9]. Mengden for stål, isolasjon, kledning og lekter, samt densiteten ble hentet fra One Click LCA [124] [125] [126].

Materialmengdene som vist i Tabell 6.5 ble brukt i begge konstruksjonene. [9]

Tabell 6.5 - Materialmengder [9]

Materialtype	Mengde
Stål	Stål konstruksjonen: 20786 kg Takpaneler: 8712 kg Hulldekker: 35,5 tonn Betong brystning element: 23 tonn Sandwich Innervegger 100: 350 m ² Sandwich Yttervegg 120: 726 m ²
CLT for Design 1	393 m ³
Limtre for Design 1	26,65 m ³
CLT for Design 2	226 m ³
Limtre for Design 2	24,94 m ³
100 mm trefiberisolasjon for tak og vegger	1327 m ²
Kledning, 19x148	4628 lm
Lekter, 36x68	590lm

6.11. Totalkostnad

Den totale kostnaden for Casebygget ble gitt av eieren som er vedlagt i Vedlegg N. Dette budsjettet inkluderer materialkostnadene, montering og andre kostnadsposter som prosjektering, kommunale avgifter, og andre kostnader. Vedlegget gir en grundig oversikt over alle kostnadene relatert til prosjektet som gir oss et solid grunnlag for sammenligning av totalkostnadene mellom Casebygget, Design 1 og 2 som vist i resultatet. [9]

7. Resultat

I dette kapitlet presenteres funnene fra forskningsmetodene som er gjennomført. Først kommer resultatene fra intervjuene. Deretter følger resultatene fra dimensjoneringen, klimagassberegningen, materialkostnadene og konstruksjonstiden for begge lagerbyggene, som vil bli presentert i figurer og tabeller. Kapitlet avsluttes med resultater fra litteraturstudium, som omhandler konstruksjonstid, kostand og ombruk av materialene. [9]

7.1. Semistrukturert intervjuer av Firma A og Firma B

I denne studien har vi gjennomført to semistrukturerte intervjuer med to distinkte firmaer spesialisert innenfor CLT. Firma A er anerkjent som en produsent av CLT, mens Firma B har utmerket seg som en innovatør i CLT fabrikasjon og design. Det er valgt å anonymisere intervjuobjektene, slik at de blir heretter omtalt som Firma A og Firma B. På grunn av deres forskjellige roller i bransjen, Firma A som produsent og Firma B som leverandør og montør, ble det tilpasset ulike spørsmål for hvert intervju. Resultatene fra intervjuene blir presentert i tråd med strukturen i intervjuguiden. [9]

7.1.1. Felles perspektiver med CLT/limtre

Begge firmaer, Firma A og Firma B, deler en rekke synspunkter om bruken av CLT/limtre, til tross for noen forskjeller i tilnærming og erfaring. Denne delen blir det presentert både de felles perspektivene og forskjellene i hvordan de to firmaene bruker CLT/limtre i byggebransjen. [9]

Hva er de største fordelene med å bruke CLT/limtre i byggeprosjekter?

Firma A: Effektivisering og miljøfordeler

- Effektivisere byggeprosessen gjennom egenskaper som høy strekkfasthet og en forenklet montering, noe som kan resultere i færre løft enn tradisjonell betongkonstruksjon.
- Positive miljøpåvirkningen ved å benytte et fornybart råstoff, som er støttet av Norges bærekraftige skogforvaltning.

Firma B: Miljø- og byggetekniske fordeler

- Anerkjenner miljøfordelen ved CLT, men mener at bruk av stål eller betong er nødvendig i visse strukturer, som fundamenter og kjellerkonstruksjoner med høy belastning.
- CLT sin varme karakter og evnen til å forbedre inneklimaet, samt at trekonstruksjoner kan tilby lik, om ikke større, presisjon sammenlignet med betong og stål, noe som øker effektiviteten i byggeprosessen.

Kan det være noen økonomiske fordeler eller besparelser ved å velge CLT og limtre kontra tradisjonelle materialer?

Firma A: Kostnadsfordeler og utfordringer

- Prosjekter spesifikt designet for CLT og limtre fra begynnelsen kan oppnå en kostnadsreduksjon på opptil 3-4% sammenlignet med tradisjonelle byggemetoder.

- Kostnadsbesparelsene ikke er universelle, spesielt når det gjelder prosjekter opprinnelig tenkt for stål og betong, hvor endringer i designet for å tilpasse seg CLT kan føre til økte kostnader. Dette understreker hvor viktig det er å få tidlig integrert CLT inn i designfasen for å skape mest mulig økonomiske fordeler.

Firma B: Økonomiske fordeler ved ferdigfabrikkerte konstruksjoner

- Bruk av ferdigfabrikkerte CLT-bindingsverkkonstruksjoner kan betydelig redusere tiden og kostnadene for etterarbeid, takket være elementer som kommer med en ferdig overflate.
- Beskyttelsen mot gulning og vannmerker, samt den generelle overflatekvaliteten, bidrar til en raskere byggeprosess og deretter reduserer både byggetid og finansieringskostnader.
- CLT bidrar til et bedre innemiljø, noe som kan betraktes som en økonomisk fordel over tid, ved tanke på tilfredshet- og helsefordeler for brukeren.

Hvordan er tidsrammen for å ferdigstille et bygg i CLT kontra tradisjonelle byggemetoder?**Firma A: Effektivisering gjennom CLT**

- Prosjektene deres oppnår en vesentlig kortere byggetid, ved bruken av store elementer som maksimerer transporteffektiviteten. Treverket veier omtrent en femtedel av hva betong gjør, noe som betyr at transportkjøretøyene kan utnyttes mer effektivt.
- Monterer ofte direkte fra transportkjøretøyene, noe som eliminerer behovet for omlasting og bidrar til ytterligere tidsbesparelser.

Firma B: Situasjonsavhengig tilnærming

- Valget av byggemateriale og byggeprosess er situasjonsavhengig. De gir et eksempel på stålkonstruksjoner som kan demonteres og gjenoppbygges, noe som kan gi bærekraftige resultater som kan være sammenlignbare med CLT, ved riktig prosjektering.
- God forhåndsplanlegging, slik at man får sikret en effektiv byggeprosess og for å forhindre senere utfordringer.
- Selv om CLT i noen tilfeller kan være raskere, kan kompleksiteten i visse type byggprosjekter føre til at stål og betong kan være et raskere alternativ, avhengig av prosjektets natur.

Kan du beskrive bemanningsbehovet, med tanke på antall montører pluss kranførere, for gjennomføring av et typisk prosjekt av CLT/limtre?**Firma A: Bemanningskrav for større og standard prosjekter**

- Ved større byggeprosjekter er det vanligvis nødvendig med en bemanning på fem personer, som inkludert en kranfører, for å montere og skru sammen byggestammen.
- For et standard lagerbygg, anslås det rundt 4-5 personer, avhengig av prosjektets omfang og kompleksitet.

Firma B: Fleksibelt bemanningsbehov og bruk av kraner

- Opererer vanligvis med minst én montør og en kranfører, men i de fleste tilfeller involverer arbeidet to til tre montører sammen med kranføreren.

- Bruk av mobilkran innebærer at kranføreren er fast ved kranen, mens bruk av en lastebilkran tillater større fleksibilitet, slik at kranføreren kan hjelpe rundt på byggeplassen etter behov.
- Dyktige kranførere som er villige til å hjelpe til med mer enn bare kranoperasjoner kan øke effektiviteten betydelig.
- Bemanningsbehovet varierer med byggets kompleksitet og de spesifikke utfordringene som måtte oppstå på stedet.

Kan du beskrive noen av utfordringene eller forsinkelsene som ofte oppstår i byggeprosjekter med CLT og limtre?

Firma A: Fuktighetskontroll og beskyttelsestiltak

- Fuktighetskontroll. Det å sikre tilstrekkelig beskyttelse mot fuktighet er en konstant bekymring, men ikke en som typisk resulterer i betydelige forsinkelser.
- Tar i bruk praktiske løsninger som membraner og folier for å beskytte treverket under konstruksjon, samt anvender prøvemontering for å sikre at tiltakene er effektive.

Firma B: Prosjektering og mangel på kompetanse

- Dårlig prosjektering og en mangel på kompetanse som en av de større utfordringene.
- Valg av skruetyper og behovet for høy presisjon i betongarbeidet. Disse faktorene blir ofte oversett, men de representerer signifikante hindringer som kan forårsake forsinkelser og komplikasjoner, spesielt sammenlignet med mer tradisjonelle byggemetoder som tillater mer fleksibilitet i justeringer underveis.

Hvilke råd har dere til byggebransjen for å fremme mer bærekraftig byggemetode?

Firma A: Variasjon av materialer og bærekraftig bruk

- Bruke det mangfoldet av materialer og konstruksjonsmetoder som er tilgjengelige og viktig å bruke hver ressurs på en bærekraftig måte.
- Treets unike rolle i å redusere CO₂-utslipp og den muligheten det gir for karbonlagring over lengre perioder, som igjen åpner for nye muligheter innenfor nyplanting og videre vekst.
- Bruk av tre i større omfang ikke bare er nødvendig for bærekraftig utvikling, men også en mulighet som må utnyttes sammen med andre byggematerialer for å skape et mer bærekraftig byggefelt.

Firma B: Skogbruksteknikker

- Valg av skogbruksteknikk er en viktig faktor for å fremme bærekraft i bransjen.
- Selektiv hogst, et mer miljøvennlig alternativ til flatehogst, som er vanlig i Norge. Noe som kan være med på å redusere CO₂-utslipp og støtter et sunnere økosystem.
- Velge produsenter som følger bærekraftige skogbrukspraksiser, kan hjelpe byggebransjen med å minske sin miljøpåvirkning.

Hvordan ser dere muligheten for ombruk av CLT og limtre ved byggets endte levetid?

Firma A: Fremme av demonterbare konstruksjoner

- Utviklingen mot mer bærekraftige byggepraksiser og den økende graden til å designe bygg slik at de er lett demonterbare.
- Trekonstruksjoner, som er skrudd sammen med skruer og vinkler, gjør det enklere å demontere bygget senere og åpner for muligheten til ombruk. Denne tilnærmingen støtter ideen om at byggematerialer kan leve videre i nye former, og bidrar dermed til en sirkulær økonomi.

Firma B: Realistisk vurdering av ombruk

- Skeptisk når det kommer til ombruk, og viktig å være realistisk når det gjelder ombruk av trekonstruksjoner.
- Korrosjon er en utfordring, som kan komplisere demonteringen av forbindelser og dermed gjøre ombruk mer utfordrende.
- Nøye vurdering av mekaniske forbindelser er kritisk, og at tradisjonelle trekonstruksjoner med treplugger ofte er mer ombrukbare enn nyere metoder.
- Teknologiske fremskritt, som CNC-teknologi, kan skape nye muligheter for å utvikle reversible forbindelser som forbedrer mulighetene for ombruk.

*Ser du noen nye trender eller utviklinger i markedet for CLT og limtre?***Firma A: Vekst i kommunale og statlige prosjekter**

- Betydelig vekst i markedet for CLT og limtre de siste årene, spesielt innen kommunale og statlige prosjekter. Disse sektorene har vist større aktivitet sammenlignet med private sektorer.

Firma B: Utvikling av modulbygg og systemer

- Modulbygg og systemer, som inkluderer fabrikkerte CLT moduler som baderomsmoduler. Dette konseptet har ennå ikke fått så stor oppmerksomhet, men det har blitt mer tydelig over tid.
- I Sentral-Europa har fire til fem spesialiserte produsenter avansert betydelig på dette området. Sammenlignet med Moelven Modul, som fortsatt er i en tidlig fase, viser disse produsentene hvordan markedet for CLT kan utvide seg internasjonalt.
- En utfordring ligger i å sikre at modulbyggene ikke umiddelbart skiller seg ut som et modulbygg utseendemessige, siden det ikke er så estetisk tiltalende. Dette er en trend som kommer til å utvikle seg over tid. På en lengre sikt kan det være nødvendig å vurdere å bruke mindre trevirke i CLT konstruksjoner på grunn av begrensende skogressurser og råvarer.

7.1.2. Spesifikke innsikter fra Firma A

Her blir det mer fokusert på spesifikt rettede spørsmål til Firma A, hvor spørsmålene blir mer utformet for å utforske detaljene i firmaets produksjon av CLT. [9]

Kan du beskrive produksjonsprosessen for CLT/limtre?

- Starter med innkjøp av trelast fra lokale sagbruk.

- Deretter foregår det en automatisert produksjon som inkluderer fingerskjøting og høvling, etterfulgt av liming og pressing.
- Ferdige byggelementer bearbeides ytterligere gjennom CNC-maskinering før de kvalitetssikres og transporteres til byggeplass.
- Restmaterialer som kappet tre og småbiter gjenbrukes til å produsere fyringsbriketter, mens material fra dør- og vindusåpninger ofte benyttes i andre produksjoner gjennom samarbeidspartnere.

Jobber dere med å få ned klimagassutslippene?

- Minimere klimagassutslipp gjennom å bruke minst mulig elektrisk kraft og ved å kjøpe inn trelast fra lokale sagbruk, slik at transporten blir minst mulig.
- Bruk av transportmidler med euro 6-motorer for å oppfylle miljøstandarder.

Hvordan sikrer dere kvaliteten på produktene?

- Daglig bruk av internt kvalitetssikringssystem som omfatter et laboratorium for testing av fingerskjøter, treverk og limfuger.
- Bruker en overvåkningslinje for fuktighetsmåling og gjennomfører ekstern kontroll via NTI to ganger i året for å sikre produktkvaliteten.

Hvordan er fleksibiliteten i produksjonen?

- Høy fleksibilitet med evne til å justere produksjonen raskt basert på behov. Kapasitet til å produsere ulike dimensjoner daglig, støttet av et variert trelastlager.
- Produsere elementer opptil 30 meter i lengde og tilpasse størrelsene ned til småbiter for optimal materialutnyttelse. For CLT kan de produsere opptil 16 meter i lengde, 3,5 meter i bredde, og 400 millimeter i tykkelse.

Hvor mye koster 1 m³ limtre i snitt og hvor mye koster 1 m³ CLT i snitt?

- Gjennomsnittsprisen for en kubikkmeter med limtre ligger rundt 5000 kr.
- For CLT er gjennomsnittsprisen rundt 7500-8000.
- Prisvariasjoner avhenger av kvalitetsnivå og bearbeidingsgrad. Mer detaljert bearbeiding som CNC-kutt øker kostnadene, mens tykkere elementer generelt er mer kostnadseffektive sammenlignet med tynnere varianter.

Hvordan påvirker CLT/limtre sammenlignet med tradisjonelle byggematerialer potensiell avkastning ved et senere salg av bygget?

- Tilbakemeldinger som har blitt mottatt tyder på at kontorbygg i CLT, spesielt i byer som Drammen, Bergen og Kristiansand, har hatt en stor suksess med utleie, og dette er takket være høy tilfredshet blant leietakerne. Dette har muliggjort utleie av disse eiendommene til attraktive priser, noe som igjen tyder på en potensielt høyere avkastning ved salg eller utleie sammenlignet med bygg konstruert med tradisjonelle materialer.

Hvilke teknologiske innovasjoner eller fremskritt ser dere som mest lovende for fremtiden til CLT konstruksjoner?

- CLT begynner å bli godt etablert, og det utvikles kontinuerlig, spesielt innenfor lyd- og brannsikkerhet.
- Digitalisering og 3D-tegningsprogrammer blir stadig viktigere i arbeidet med CLT, særlig når det kommer til direkte kommunikasjon med CNC-maskiner.

Hvordan posisjonerer dere dere for å møte fremtidens etterspørsel etter bærekraftig byggeløsninger?

- Aktivt engasjement i å øke produksjonen for å imøtekomme økende etterspørsel etter bærekraftige byggeløsninger.

7.1.3. Spesifikke innsikter fra Firma B

I denne delen blir det kun fokusert på Firma B, og gir innsikt i deres unike perspektiver og praksiser innen bruken av CLT og limtre, spesielt fra deres rolle som leverandør og montør. [9]

Kan du beskrive din erfaring med montering av CLT- og limtrekonstruksjoner? Hva skiller disse prosjektene fra andre byggeprosjekter du har arbeidet med?

- Historisk sett vært utfordrende, spesielt når trekuttene ble levert unøyaktige, som kreves en ekstra innsats for å passe sammen.
- Vært betydelig forbedringer de siste 6-7 årene, takket være bedre maskiner og økt kunnskap blant operatørene.
- Monteringsprosessen kan være problemfri med riktig forberedelse, er nøyaktig kontroll over underlaget, som vanligvis er betong, avgjørende.
- Egne digitale målinger og sammenligning med produksjonsmodellen er viktig for å håndtere eventuelle avvik. Sammenlignet med montering av stålkonstruksjoner, blir prosessen med å sette opp og sammenføre delene enkel når alle forhold er optimalisert og kontrollert.

Kan du si noe om hvor dere får produktet deres fra og hvorfor dere har gått for dette?

- Hoved leveranser kommer fra Tyskland, der de samarbeider tett med Europas første produsent av CLT. Dette valget er drevet av både kvalitet og profesjonalitet i produksjonen som oppfyller deres strenge krav.
- Selvstendighet fra produsenter ved å bruke standardiserte produksjonsprogrammer som tillater dem å håndtere prosjekter selvstendig, som er mindre vanlig i Norge.

Hvordan er prosessen med å bygge med CLT og limtre sammenlignet med mer tradisjonelle byggematerialer som stål og betong?

- Valget mellom bæresystemer, enten det er linjelaster eller punktlaster, er avgjørende i byggeprosessen.
- Når det benyttes CLT, som ofte er tenkt med linjelaster, kan det være mulig med mindre omfattende fundamentering, noe som igjen reduserer behovet for betong. Dette forutsetter imidlertid at konstruktøren har forståelse for og tar hensyn til disse forskjellene.
- Effektiviteten avhenger av evnen til samarbeidspartnere og konstruktører til å tilpasse seg og beregne på en annen måte enn det de er vant til.

Hvordan opplever du markedets aksept og etterspørselen for byggeprosjekter som bruker CLT og limtre sammenlignet med tradisjonelle materialer?

- Aksepten for CLT er utfordrende, hovedsakelig fordi mange ikke er klar over de tilgjengelige mulighetene.
- Stålbygg er mer vanlige, og en generell skepsis til endringer fører ofte til at kjente metoder fortsatt brukes i byggebransjen. Selv når det byr på seg muligheter, med direkte import av CLT fra fabrikk, kan kostnadene være høyere enn for tilsvarende materialer fra andre land i nærheten.
- En mer åpenhet for europeiske byggepraksiser, som involverer avanserte konstruksjoner og fabrikkproduserte elementer, kunne dette bidratt på å endre byggebransjen i Skandinavia generelt.
- Byggebransjen generelt er treg og svært konservativ. Endringer skjer ofte kun når kommunene stiller krav for det eller når det finnes enkeltpersoner med spesiell interesse for nye løsninger.

Hvor mye koster 1 m³ CLT i snitt?

- Startprisen for CLT ligger på rundt 6500 kroner per kubikkmeter, med tillegg for påslag og andre omkostninger. Markedstrenden er for øyeblikket nedadgående på grunn av overproduksjon, med etableringen av rundt 10 nye produksjonslinjer de siste 3-4 årene og en nedgang i igangsettingen av nye prosjekter på grunn av økende renter. Dette har ført til overproduksjon, men prisnivået er tilbake der det var før koronapandemien.

Et av de få lagerbyggene i Norge som er bygd i CLT, er lokalisert på Rysstad. Dette var en av grunnene til at vi kontaktet Firma B. Her er spørsmålene vi stilte Firma B angående lagerbygget.

Kan du gi en oversikt over målene for bruk av CLT i Rysstad prosjektet? Hvordan ble CLT valgt som det foretrukne materialet?

- Målet med prosjektet var primært å bruke tre i konstruksjonen av bygget, men på grunn av feilinformasjon om tilgjengelig høyde på CLT-elementer ble det laget en betongkant på 1 meter høyde for å komme opp til 6 meters høyde med CLT-elementer.
- Ambisjonen om tre ble justert til en løsning som også var økonomisk forsvarlig.
- CLT ble valgt fordi både kunden og arkitekten var interessert, og kunden var åpen for ideen.

Hvordan var prosjekteringsfasen for bygget i form av tid? Og hvor lang tid det tok fra starten av oppreisning til tørt bygg og ferdigstillelse?

- Prosjekteringsfasen for bygget var strukturert, men møtte på en tidlig forsinkelse.
- Endelige beslutningen om å gå videre med prosjektet ble tatt rundt august-september, hvor da montasjen var opprinnelig planlagt å starte i begynnelsen av oktober.
- Forsinkelser oppsto og byggearbeidet startet ikke før midten av oktober.
- Selv om selve prosjekteringsprosessen gikk relativt raskt, delvis på grunn av at bygget ikke var spesielt komplekst, møtte monteringsfasen utfordringer med betongkonstruksjonen som forsinket montasjen med en uke. Men det tok ca. en uke med montering. Monteringen av et lett-tak tok to dager, og bygget var da tett etter en og en halv uke. Prosjektet, som startet i midten av oktober, var ferdigstilt før jul.

Hvordan falt valget på å bruke produsent av CLT og limtre fra Nord-Tyskland istedenfor en lokal aktør i Norge? Og vil dette ha en påvirkning i prisen?

- Tysk produsent ble valgt grunnet deres avanserte og automatiserte produksjonsprosess, sammenlignet med de norske alternativene som var manuelle og dyrere.
- Splitkon, en potensiell leverandør, var ikke aktuell på grunn av høye priser og begrenset interesse for mindre prosjekter.
- Nordisk Massivtre og Moelven, selv om de var vurdert, kunne ikke konkurrere med den tyske effektiviteten og teknologien.
- Selv om kostnadene med den tyske produsenten var 10 prosent høyere sammenlignet med limtre, ble dette oppveid av effektiviteten og muligheten til å utnytte returtransporter fra Tyskland, noe som reduserte de samlede transportkostnadene.

Hvor mange var det som jobbet under monteringen av bygget? Og hvordan var logistikken?

- Teamet bestod av en montasjeleder, to montører og en kranfører under montasjen av CLT.
- I den senere ferdigstillingen av bygget, jobbet det kun to tømrere alene
- Monteringsprosessen var uten noen problemer, takket være tilstrekkelig plass og effektiv lasting og plassering av materialer på bilene. En lokal leverandørs kranbil ble brukt, og minimalt med maskineri var nødvendig for monteringen.

Kan du si noe om hvordan lagerbygget i Rysstad kan bidra med å fremme bruk av CLT og limtre i industribygg? Eventuelt hvilke utfordringer man kan møte på?

- Fundamentering er en sentral utfordring i byggeprosjekter med CLT, sammenlignet med betong- og stålstrukturer. CLT krever ofte mindre fundament, noe som da kan føre til kostnadsbesparelser.
- Prosessen blir også påvirket av prosjekteringsmåten og grunnforholdene.
- Positive tilbakemeldinger fra fagfolk på inn klima og byggets estetikk fremhever CLT sin estetiske og funksjonelle fordeler.
- Økonomisk sett kan effektivisering og muligheten for gjenbruk av design redusere byggekostnadene betydelig.
- CLT har evnen til å bære tunge laster, som er viktig i industribygg hvor det er behov for å montere utstyr på veggene. Dette gir også mulighet for ettermontering av tilleggsutstyr som kranbaner.

Hvilke utfordringer kan man møte på i arbeidet med montering av CLT/limtre, og hvordan jobber dere for å overvinne disse?

- Utilstrekkelig forarbeid, som inkluderer dårlig planlegging eller suboptimal bruk av nødvendig utstyr som kraner.
- Avgjørende å identifisere avvik før monteringsfasen for å unngå problemer som feilvurdering av plassbehov på byggeplassen.
- Menneskelige feil og manglende evne til å forutse problemer kan forårsake slike utfordringer.

Hvordan påvirker vær og andre utendørs forhold med tanke på montasje av CLT og limtre?

- I Norge er det mindre vanlige å benytte seg av værbeskyttelse under montasjen av CLT konstruksjoner sammenlignet med i Sverige og Finland, til tross for vårt fuktigere klima.
- Denne mangelen på beskyttelse av konstruksjonene, kan føre til utfordringer som vannskader på blant annet fasaden.
- Selv om det finnes løsninger som vannavvisende membraner, ligger fortsatt hovedutfordringen i å overbevise ingeniører og prosjektledere om viktigheten av å beskytte treverket under byggeprosessen.
- Et eksempel, under et prosjekt i Trondheim for ti år siden, hvor det utfordringer da de skulle dekke CLT dekket med en form for undertaksduk for å beskytte det mot vann, men fasaden ble ikke beskyttet godt nok, noe som resulterte i vannmerker.

Hvilke spesielle verktøy eller teknikker kreves for å få en effektiv montering av CLT/limtre?

- Mangel på nødvendig utstyr og kunnskap blant vanlige tømmerfirmaer er en betydelig utfordring ved montasje av CLT. Dette kan dermed føre til en utilstrekkelig nøyaktighet i monteringen og dermed redusere sluttresultatets kvalitet.
- Viktige verktøy for kvalitetsmontering inkluderer maskinelle og håndholdte verktøy, som bjelkestrammere og oppmålingsinstrumenter.
- Norges tørre klima i kombinasjon med ventilasjonssystemer føre til utfordringer med fuggedannelse hvis elementene ikke er korrekt montert og strammet.
- Spesialverktøy er derfor nødvendig for å håndtere disse utfordringene, selv om det medfører ekstra kostnader, for å sikre både kvalitet og holdbarhet i byggearbeidet.

Hvilke teknologiske innovasjoner kan bidra til utviklingen med tanke på montering av CLT/limtre?

- Bruk av robotikk kan man forbedre effektiviteten, selv om det kan oppstå utfordringer med store elementer størrelser, som igjen krever mange roboter.
- Totalstasjoner, skanning og avanserte festesystemer er allerede tilgjengelige på markedet og kan forbedre montasjens nøyaktig. Ved å bruke disse metodene kan man sikre en mer presis oppmåling og plassering, og er spesielt nyttig i store byggeprosjekter som skoler og kontorbygg.
- I Norge er bruken av slike teknologier som totalstasjoner ofte begrenset til oppmålere, mens montører sjelden benytter dem. Å kunne klare å ta i bruk denne teknologien mer aktivt kan derfor representere et betydelig fremskritt i montasjeprosessen for CLT- og limtrekonstruksjoner.

Hvilke råd vil du gi til byggebransjen for å fremme bruk av CLT og limtre, og hvordan ser du på fremtiden for disse materialene?

- Være åpen og unngå fordommer, spesielt for de som har vært lenge i bransjen og kanskje ikke er så åpne for å utforske nye materialer som CLT.
- Se utenfor egne grenser, både nasjonalt og internasjonalt. Reis ut, se hvordan andre land håndterer byggeprosjekter med disse materialene og hent inspirasjon derfra. Nå er disse materialene allerede populære i visse segmenter som skole- og kontorbygg, og jeg tror bruken vil øke enda mer i fremtiden.
- Vært en betydelig vekst, og det er ingen tegn til at det vil bli mindre av CLT framover. Det finnes mange muligheter, ikke bare i større bygg, men også i eneboliger hvor man kan

kombinere reisverk og CLT i yttervegger og etasjeskillere, noe som tilbyr betydelige fordeler og fortsatt er relativt utnyttet.

- For å virkelig fremme disse materialene må bransjen være villig til å gjøre små justeringer i den vanlige byggeprosessen og være åpen for nye løsninger.

7.2. Semistrukturert intervju av Firma C

Siste semistrukturerte intervju vi gjennomførte, var med en daglig leder for et firma med spesialkompetanse innenfor stålbygg, som monterte Casebygget. Intervjuobjektet er anonymisert, og firmaet vil heretter bli omtalt som Firma C. [9]

Prosjekterings- og byggefasen for Casebygget

Prosjekteringsfasen for lagerbygget varte fra juli til oktober 2023. Tegningsarbeidet startet den 19.07.2023, og omtrent en måned senere, den 24.08.2023, begynte produksjonen. Godkjenning av tegninger fant sted den 24.10.2023, og en uke senere ble produksjonen justert for å tilpasse endringer i planene. Delene til konstruksjonen ble klar for montasje 12.12.2023. Montasjen av bygget startet 1.januar 2024 og bygget skal ferdigstilles 1. juni, så fra oppreisning til ferdigstilling av bygget tok omtrent fem måneder. Tre personer jobbet med montering, og disse hadde samme timelønn som snekkere, rundt 280 kr per time.

Verktøy og teknologi

Det ble brukt diverse verktøy for å effektivisere monteringsprosessen, inkludert mobilkraner, lifter og moderne batteriverktøy. Disse teknologiene bidro til å optimalisere arbeidsflyten. Mobilkraner ble brukt for å løfte tunge ting på plass, mens lifter ble brukt til å sikre tilgang til høyder under montering. Batteridrevne verktøy gir montørene en fleksibilitet og effektivitet i arbeidet.

Miljøstrategier og bærekraft

Prøver best mulig å redusere klimagassutslipp der vi kan ved å prøve å velge noe mer gjenvunnet materiale og implementere miljøvennlige metoder. Prøve å bruke varer som er produsert med mer fornybare energikilder. Fokuserer også på ombruk av materialer ved byggets levetidsslutt, og tidligere erfaring med å flytte og gjenbruke et eldre bygg. disse tiltakene bidrar til å minimere miljøpåvirkning og fremme bærekraft. Produserte stål elementer gi redusert avfall. Mens sandwichpaneler som kommer i ferdige lengder må kappes til og skaper noe avfall.

Framtidige perspektiver

Til tross for den økende bruk av bærekraftige materialer som CLT og limtre, vil stål fortsette å spille en sentral rolle i bygging av industribygg og lagerbygg, takket være dets unike egenskaper som styrke og holdbarhet. Stål gir muligheten for store spennvidder og fleksibel design.

Lærdom fra prosjektet

Viktigheten av å være godt forberedt på værforhold og kunne håndtere logistikk under uforutsigbare omstendigheter, er en nøkkel lærdom fra dette prosjektet. Snø og kulde kan forsinke byggeprosessen dersom det ikke håndteres riktig. God planlegging og tidsplaner som passer på sesongbaserte utfordringer vil være avgjørende for fremtidige prosjekter.

7.3. Dimensjonering

I dette kapitelet presenteres resultatene for de mest belastede komponentene beregnet av FEM-Design for Design 1 og Design 2. Utregningen av utnyttelsen for alle komponentene i konstruksjonen er basert på NS-EN 1995. Utfyllende beregninger for de mest belastede komponentene finner man i Vedlegg O. [9]

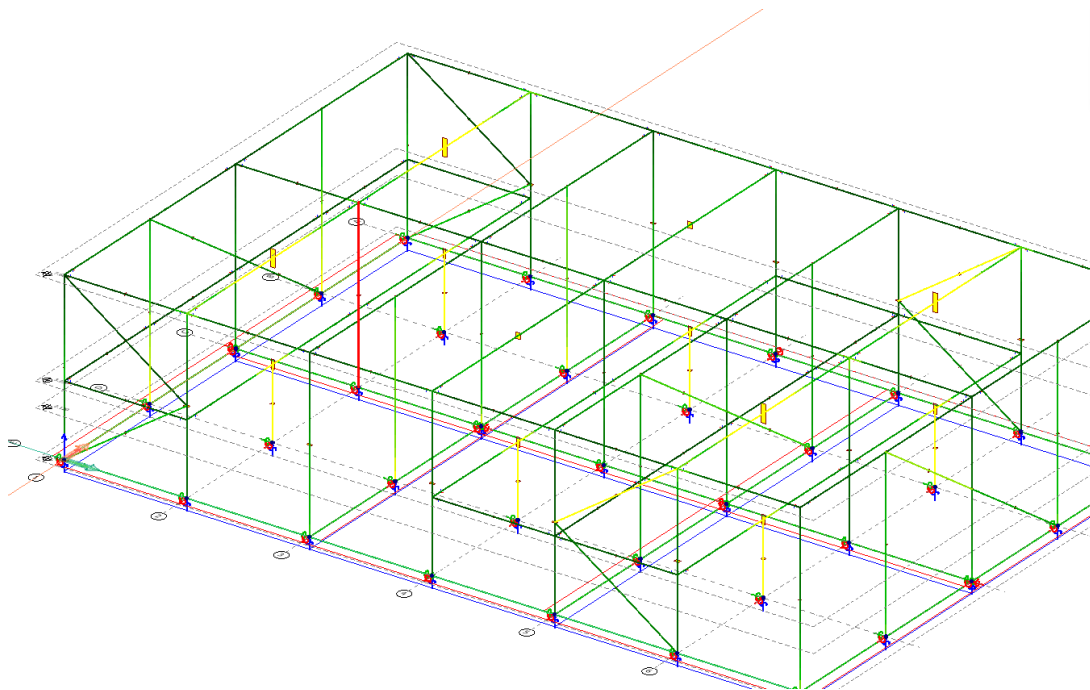
7.3.1. Kapasitetskontroll for søyle Design 1

Fra Tabell 7.1 ser man at bøyning om z-akse er det tilfellet som gir høyest utslag for utnyttelsen på 88% av limtresøylene [9].

Tabell 7.1 - Utnyttelse for den mest belastede limtresøylene i FEM-Design [9]

Konstruksjonsdel	Sjekk fra EC5	Utnyttelse
Søyle C.7.1	Trykk i fiberretning (6.1.4) Kombinert bøyning og aksialt trykk (6.2.4)	20 % (6.1.4) 7 % og 8% (6.2.4)
	Kombinert bøyning og aksialt strekk (6.2.3)	0 %
	Skjær (6.1.7)	5 %
	Søyle utsatt for trykk eller kombinasjon av trykk og bøyning (6.3.2)	Om y-akse 65 % Om z-akse 88 %
	Bjelker utsatt for bøyning eller en kombinasjon av bøyning og trykk (6.3.3)	0 % bare moment (bøyning) 84 % moment og trykk

Figur 7.1, viser plasseringen av søylen C.7.1 markert i rødt som er mest belastet i Design 1. [9]



Figur 7.1 - Søyle C.7.1 markert i rødt fra FEM-Design [9]

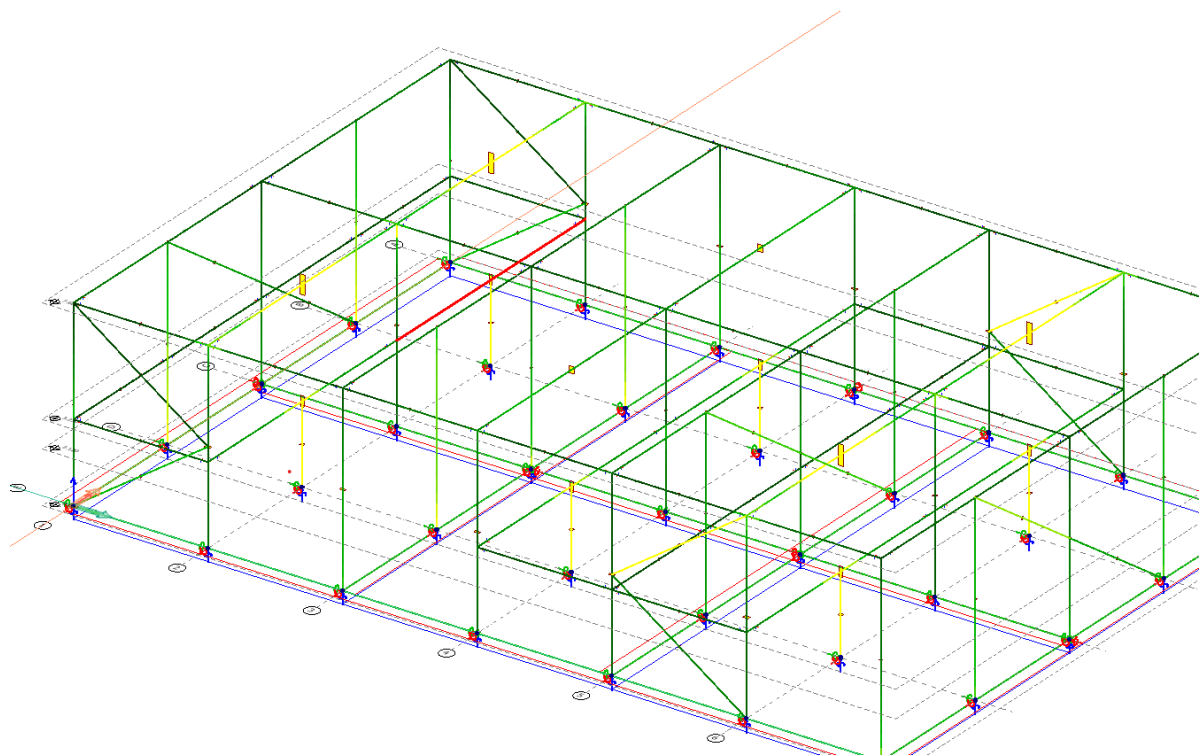
7.3.2. Kapasitetskontroll for bjelke Design 1

Under presenteres den mest belastede bjelken som holder oppe lagerdekke, det største utslaget er kombinert bøyning og aksialt spenninger på 76 % og bjelke utsatt for bøyning på 76 %, som vist i Tabell 7.2. [9]

Tabell 7.2 - Utnyttelse for den mest belastede limtrebjelken ved lagerdekke fra FEM-Design [9]

Konstruksjonsdel	Sjekk fra EC5	Utnyttelse
Dekkebjelke B.28.1	Kombinert bøyning og aksialt strekk (6.2.3)	76 % og 53 %
	Skjær (6.1.7)	91 %
	Bjelker utsatt for bøyning eller en kombinasjon av bøyning og trykk (6.3.3)	76 % moment (bøyning)

Plasseringen av bjelken for lager/kontordekke B.28.1 markert i rødt som er mest belastet i Design 1 som vist i Figur 7.2. [9]



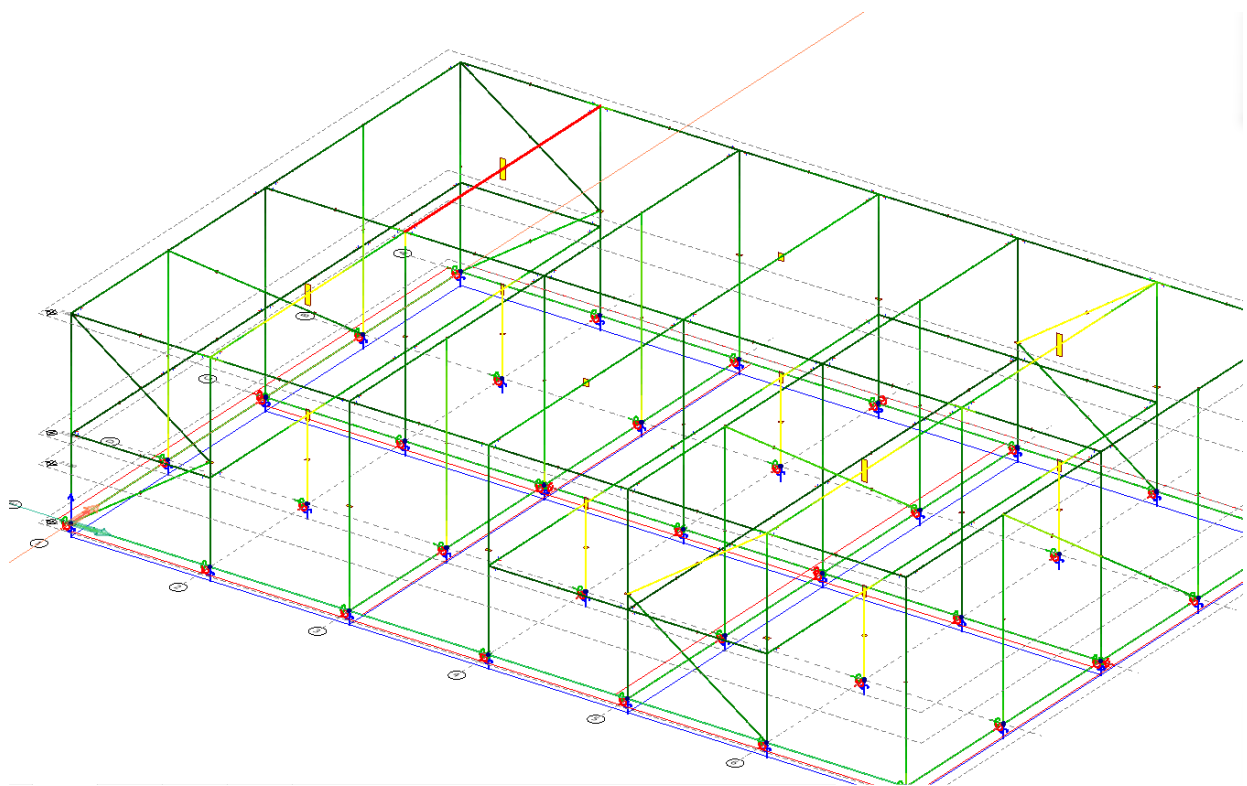
Figur 7.2 - Bjelke B.28.1 markert i rødt fra FEM-Design [9]

Videre har vi tatt med den mest utnyttede takbjelken som har utslag på bøyning på 90 %, som vist i Tabell 7.3. [9]

Tabell 7.3 - Utnyttelse for den mest belastede limtrebjelken i taket fra FEM-Design [9]

Konstruksjonsdel	Sjekk fra EC5	Utnyttelse
Takbjelke B.6.1	Trykk i fiberretning (6.1.4) Kombinert bøyning og aksialt trykk (6.2.4)	0 % (6.1.4) 80 % og 56 % (6.2.4)
	Skjær (6.1.7)	69 %
	Søyle utsatt for trykk eller kombinasjon av trykk og bøyning (6.3.2)	Om y-akse 80 % Om z-akse 57 %
	Bjelker utsatt for bøyning eller en kombinasjon av bøyning og trykk (6.3.3)	90 % bare moment (bøyning) 82 % moment og trykk

Figur 7.3, viser plasseringen av takbjelken B.6.1 markert i rødt som er mest belastet i Design 1. [9]



Figur 7.3 - Takbjelke B.6.1 markert i rødt fra FEM-Design [9]

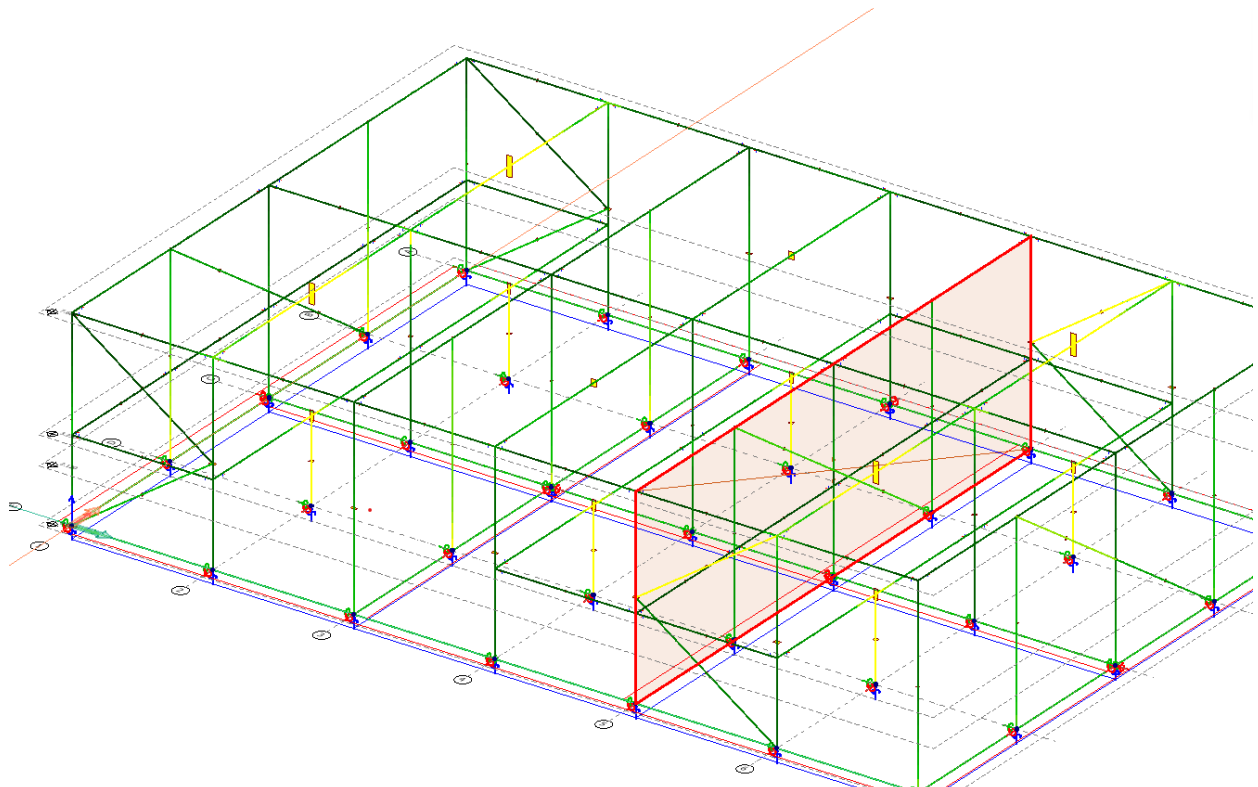
7.3.3. Kapasitetskontroll for vegg Design 1

Tabell 7.4, viser veggelementet som er mest belastet, som man kan se er den mest utslagsvirkende faktoren kombinert bøyning og aksialt strekk på 20 %. [9]

Tabell 7.4 – Utnyttelse for den mest belastede CLT-veggen fra FEM-Design [9]

Konstruksjonsdel	Sjekk fra EC5	Utnyttelse
Vegg TP.7	Kombinert bøyning og aksialt strekk (6.2.3)	20 %
	Skjær (6.1.7)	Xy, 5 % Xz, 2 % Yz, 3 %
	Trykk i fiberretning (6.1.4) Kombinert bøyning og aksialt trykk (6.2.4)	18 % (6.1.4) 7 % (6.2.4)
	Strekk og skjær	3 %
	Trykk og skjær	3 %

Figur 7.4, viser plasseringen av CLT-vegg TP.7 markert i rødt som er mest belastet i Design 1. [9]



Figur 7.4 - CLT-vegg TP.7 markert i rødt fra FEM-Design [9]

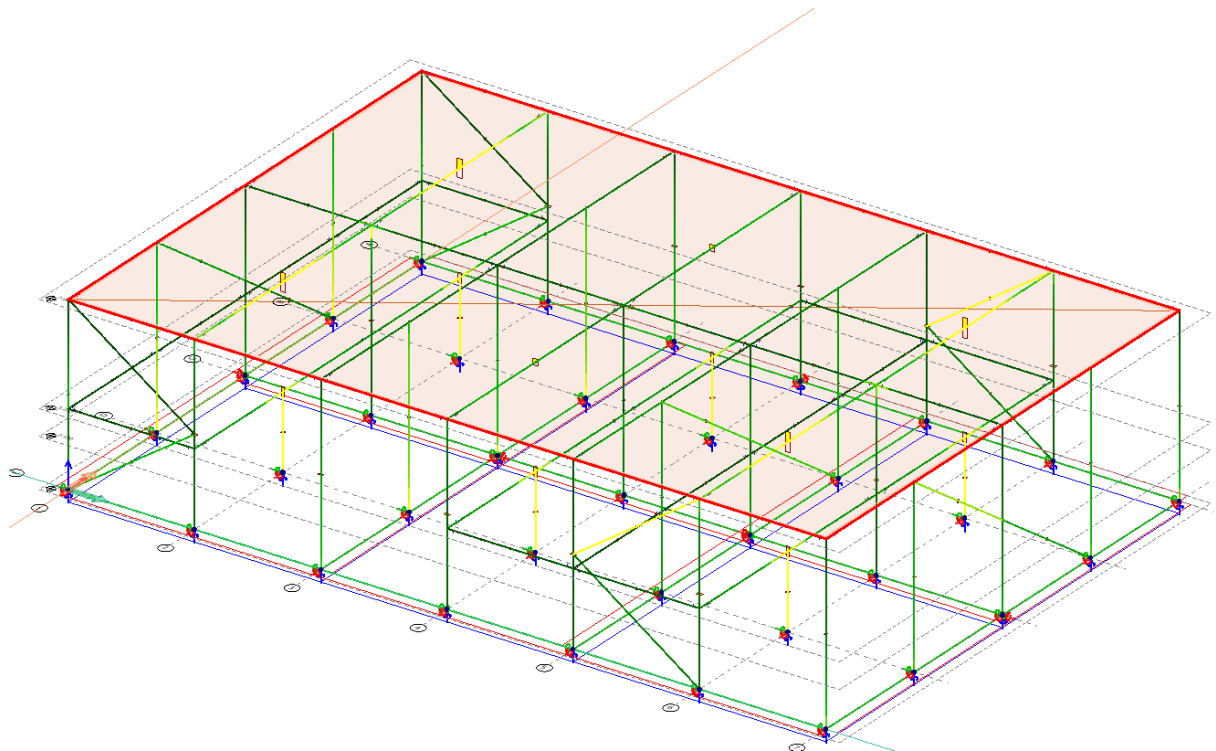
7.3.4. Kapasitetskontroll for tak Design 1

Videre viser Tabell 7.5, utregningene for takelementet der kombinert bøyning og aksialt strekk har det høyeste utslaget på 94 % utnyttelse. [9]

Tabell 7.5 - Utnyttelse for CLT-taket fra FEM-Design [9]

Konstruksjonsdel	Sjekk fra EC5	Utnyttelse
Tak TP.14	Kombinert bøyning og aksialt strekk (6.2.3)	94 %
	Skjær (6.1.7)	Xy, 15 % Xz, 12 % Yz, 28 %
	Trykk i fiberretning (6.1.4) Kombinert bøyning og aksialt trykk (6.2.4)	58 % (6.1.4) 44 % (6.2.4)
	Strekk og skjær	28 %
	Trykk og skjær	28 %

Figur 7.5, viser plasseringen av CLT-taket TP.14 markert i rødt i Design 1. [9]



Figur 7.5 - CLT-tak TP.14 markert i rødt fra FEM-Design [9]

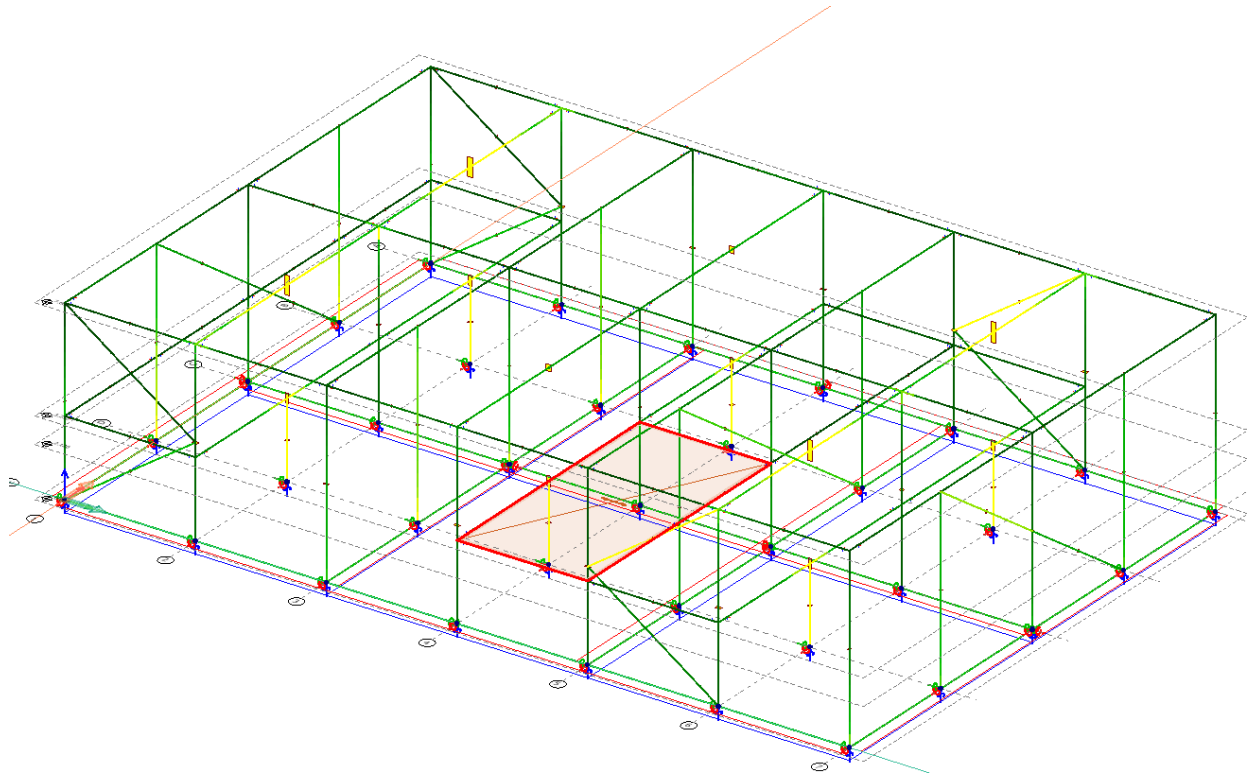
7.3.5. Kapasitetskontroll for lagerplass/kontordekke Design 1

Lager/kontordekkene var alle utnyttet likt så valgte en av de for å se på utnyttelsen, under viser Tabell 7.6, at kombinert bøyning og aksialt strekk gir høyest verdi for utnyttelsen på 59 %. [9]

Tabell 7.6 - Utregning av utnyttelse for lager/kontordekke fra FEM-Design [9]

Konstruksjonsdel	Sjekk fra EC5	Utnyttelse
Lagerplass/ kontordekke TP.10	Kombinert bøyning og aksialt strekk (6.2.3)	59 %
	Skjær (6.1.7)	Xy-, 24 % Xz, 13 % Yz, 28 %
	Trykk i fiberretning (6.1.4) Kombinert bøyning og aksialt trykk (6.2.4)	35 % (6.1.4) 21 % (6.2.4)
	Strekk og skjær	28 %
	Trykk og skjær	28 %

Figur 7.6, viser plasseringen av lager/kontordekket TP. 10 markert i rødt som er mest belastet i Design 1. [9]



Figur 7.6 - CLT-lager/kontordekke TP.10 Markert i rødt fra FEM-Design [9]

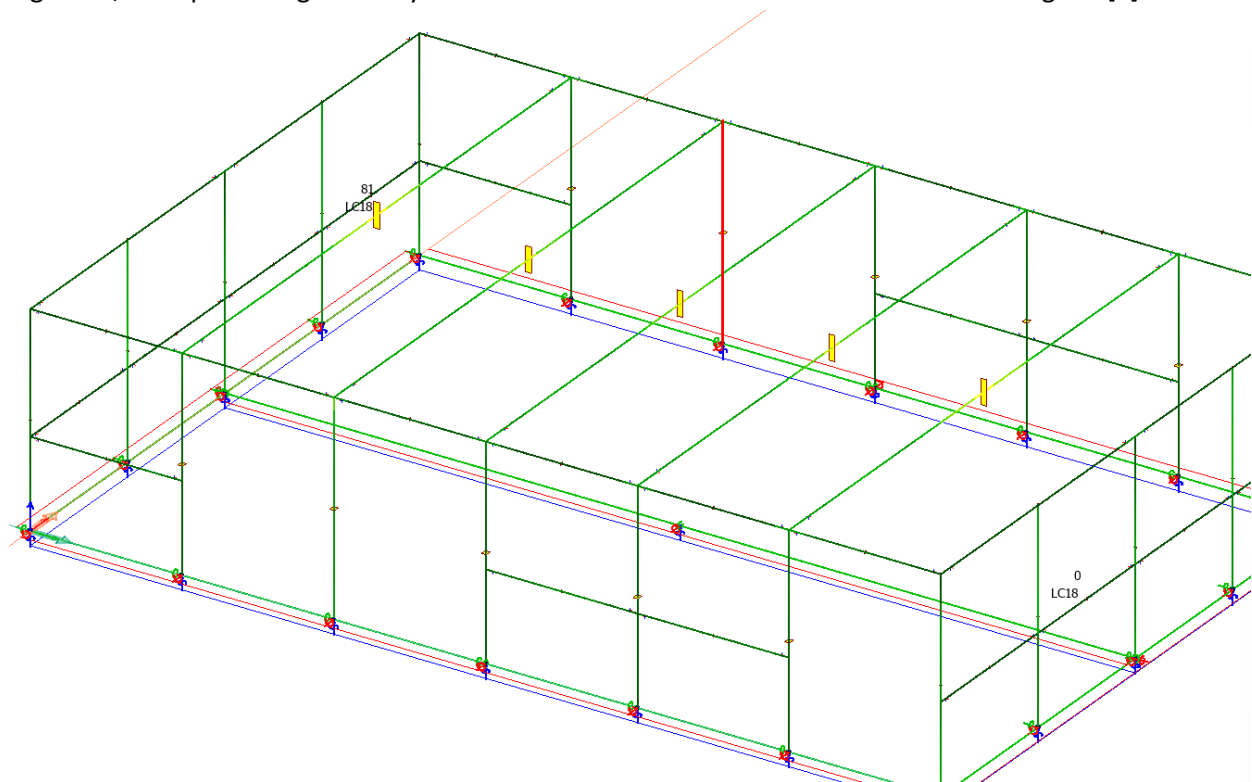
7.3.6. Kapasitetskontroll for søyle Design 2

Den mest utnyttede søylen har høyest verdi for "søyle utsatt for trykk eller kombinasjon av trykk og bøyning" og "bjelker utsatt for bøyning eller en kombinasjon av bøyning og trykk" som begge er på 67 % utnyttelse, se Tabell 7.7. [9]

Tabell 7.7 - Utnyttelse av mest belastede søyle for Design 2 fra FEM-Design [9]

Konstruksjonsdel	Sjekk fra EC5	Utnyttelse
Søyle C.18.1	Trykk i fiberretning (6.1.4) Kombinert bøyning og aksialt trykk (6.2.4)	13 % (6.1.4) 2 % og 2 % (6.2.4)
	Skjær (6.1.7)	0 %
	Søyle utsatt for trykk eller kombinasjon av trykk og bøyning (6.3.2)	Om y-akse 25 % Om z-akse 67 %
	Bjelker utsatt for bøyning eller en kombinasjon av bøyning og trykk (6.3.3)	0 % bare moment (bøyning) 67 % moment og trykk

Figur 7.7, viser plasseringen av søylen C.18.1 markert i rødt som er mest belastet i Design 2. [9]



Figur 7.7 - Søyle C.18.1 markert i rødt fra FEM-Design [9]

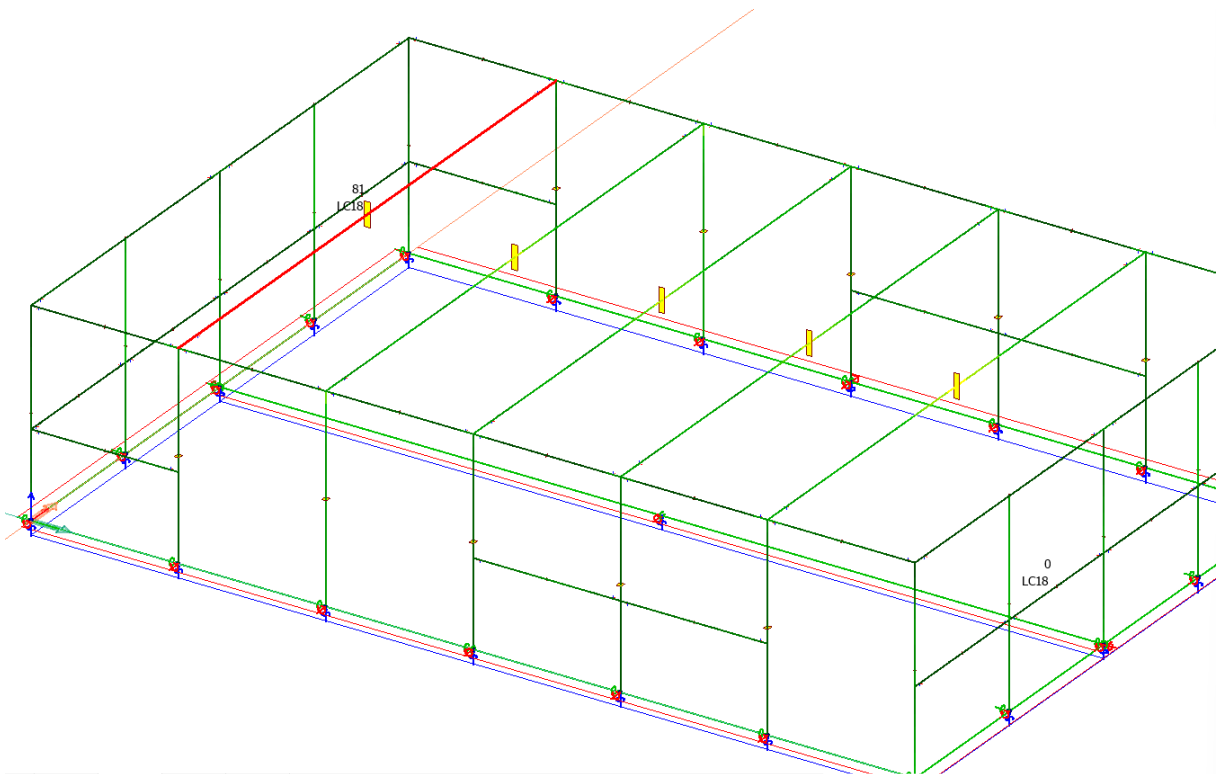
7.3.7. Kapasitetskontroll for bjelke Design 2

Den mest utnyttede takbjelken i Design 2 har en utnyttelse på 81 % for bøyning, se Tabell 7.8. [9]

Tabell 7.8 - Utnyttelse av takbjelke for Design 2 fra FEM-Design [9]

Konstruksjonsdel	Sjekk fra EC5	Utnyttelse
Takbjelke B.35.1	Trykk i fiberretning (6.1.4) Kombinert bøyning og aksialt trykk (6.2.4)	0 % (6.1.4) 63 % og 44 % (6.2.4)
	Skjær (6.1.7)	72 %
	Søyle utsatt for trykk eller kombinasjon av trykk og bøyning (6.3.2)	Om y-akse 63 % Om z-akse 44 %
	Kombinert bøyning og aksialt strekk (6.2.3)	78 % og 54 %
	Bjelker utsatt for bøyning eller en kombinasjon av bøyning og trykk (6.3.3)	81 % bare moment (bøyning)

Figur 7.8, viser plasseringen av bjelken B.35.1 markert i rødt som er mest belastet i Design 2. [9]



Figur 7.8 - Bjelke B.35.1 markert i rødt fra FEM-Design [9]

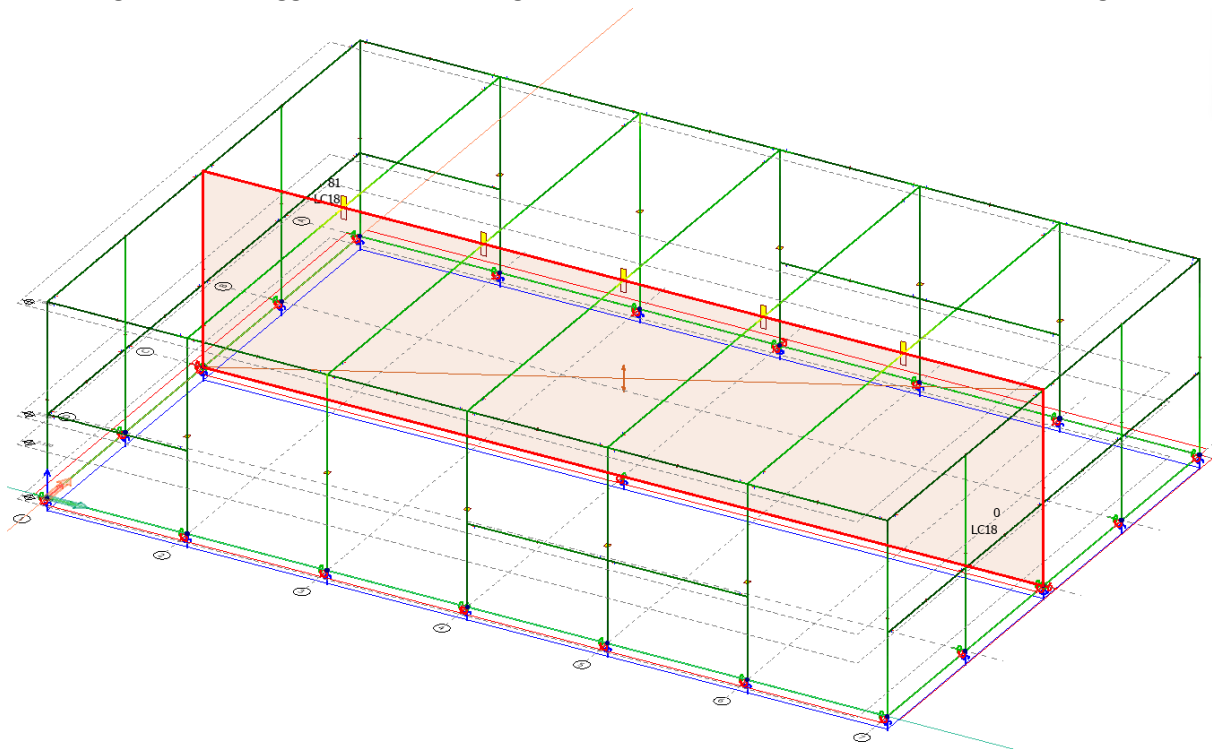
7.3.8. Kapasitetskontroll for vegg Design 2

Veggelementet som er mest utnyttet er den vegg som er bærende i midten av bygget, Tabell 7.9 viser utnyttelsen til veggelementet der trykk i fiberretning er den med høyest utslag på 85 %. [9]

Tabell 7.9 - Utnyttelse av bærende veggelement for Design 2 fra FEM-Design [9]

Konstruksjonsdel	Sjekk fra EC5	Utnyttelse
Vegg TP.6	Kombinert bøyning og aksialt strekk (6.2.3)	35 %
	Skjær (6.1.7)	Xy, 20 % Xz, 0 % Yz, 0 %
	Trykk i fiberretning (6.1.4) Kombinert bøyning og aksialt trykk (6.2.4)	85 % (6.1.4) 73 % (6.2.4)
	Strekk og skjær	0 %
	Trykk og skjær	0 %
	Skjær interaksjon	4 %

Plasseringen av CLT-veggen TP.6 er vist i Figur 7.9 markert i rødt som er mest belastet i Design 2. [9]



Figur 7.9 - CLT-vegg TP.6 markert i rødt fra FEM-Design [9]

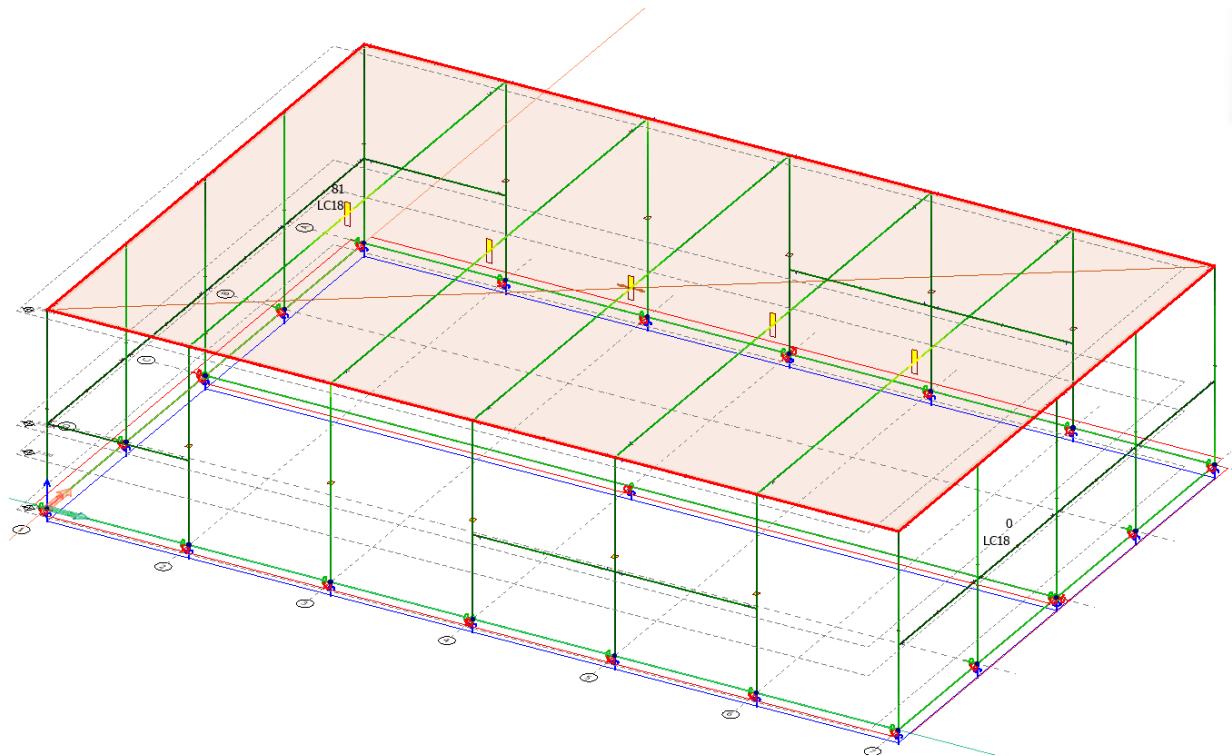
7.3.9. Kapasitetskontroll for tak Design 2

Tabell 7.10 viser utnyttelsesgraden til de forskjellige beregningene som ble gjort av FEM-Design ihht. EC5, som man kan se er det kombinert bøyning og aksialt strekk som har det største utslaget på 67 % på takelementene. [9]

Tabell 7.10 - Utnyttelsesgrad for CLT takelementene i Design 2 fra FEM-Design [9]

Konstruksjonsdel	Sjekk fra EC5	Utnyttelse
Tak TP.5	Kombinert bøyning og aksialt strekk (6.2.3)	67 %
	Skjær (6.1.7)	Xy, 15 % Xz, 8 % Yz, 18 %
	Trykk i fiberretning (6.1.4) Kombinert bøyning og aksialt trykk (6.2.4)	38 % (6.1.4) 27 % (6.2.4)
	Strekk og skjær	18 %
	Trykk og skjær	18 %
	Skjær interaksjon	2 %

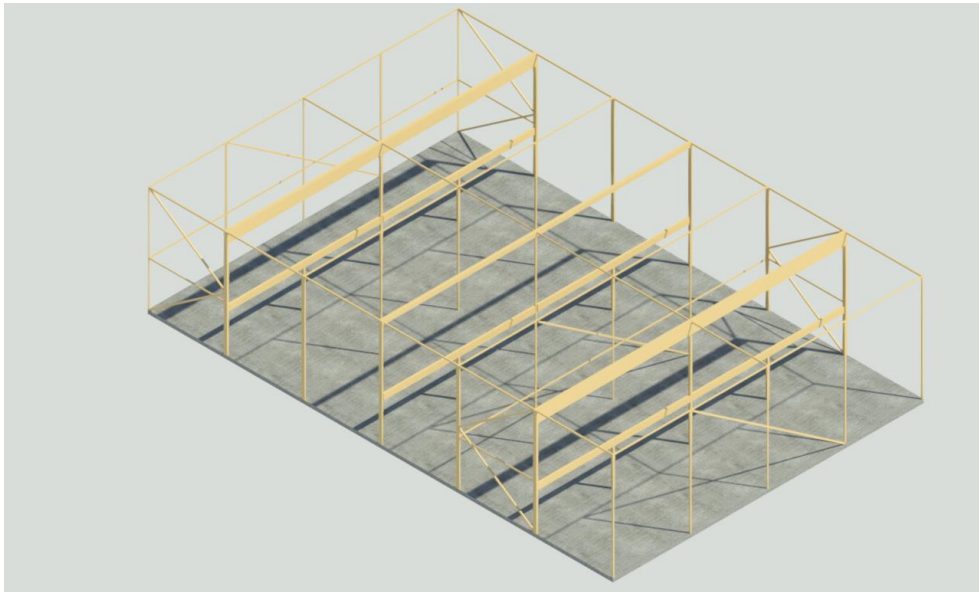
Figur 7.10, viser plasseringen av CLT-taket TP.5 markert i rødt som er belastet i Design 2. [9]



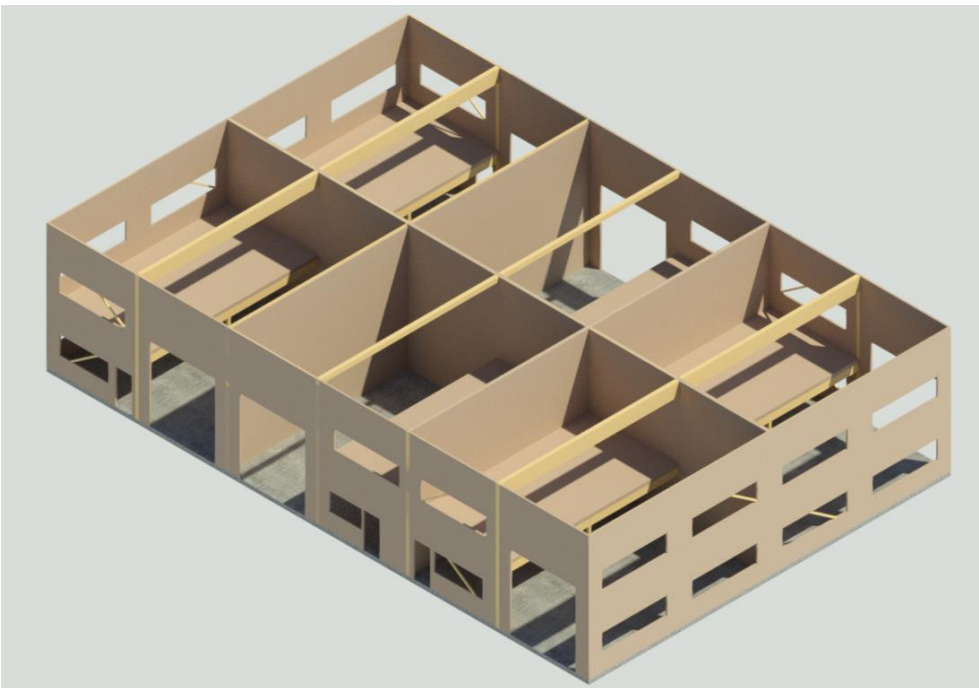
Figur 7.10 - CLT-tak TP.5 markert i rødt fra FEM-Design [9]

7.4. Design 1 og Design 2 fra Revit

Design 1 ble utformet i henhold til tegningene fra AK Mekaniske som har utarbeidet tegningene for stålkonstruksjonen. Figur 7.11, viser limtre søylene og bjelkene som er brukt, disse har samme dimensjoner som FEM-Design ga. Videre viser Figur 7.12 hvordan det ser ut med CLT vegger og dekker for lagring/kontorplasser. Design 1 har seks seksjoner i bygget, det er mulig å lage døråpninger mellom hver seksjon dersom en utleier har flere seksjoner av gangen. [9]

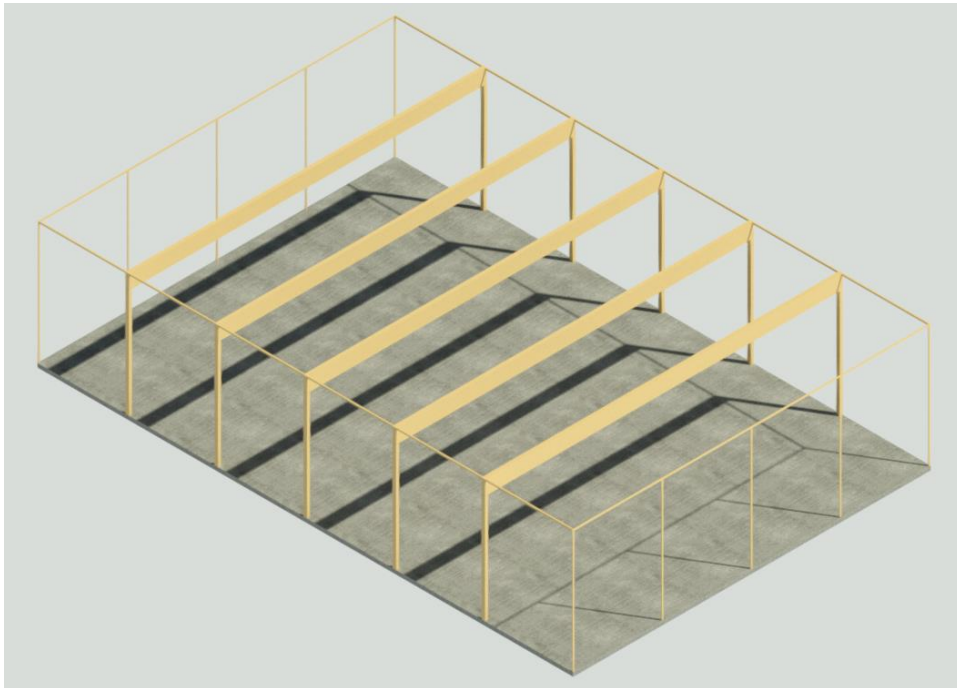


Figur 7.11 - Design 1 fra Revit med søyler og bjelker [9]

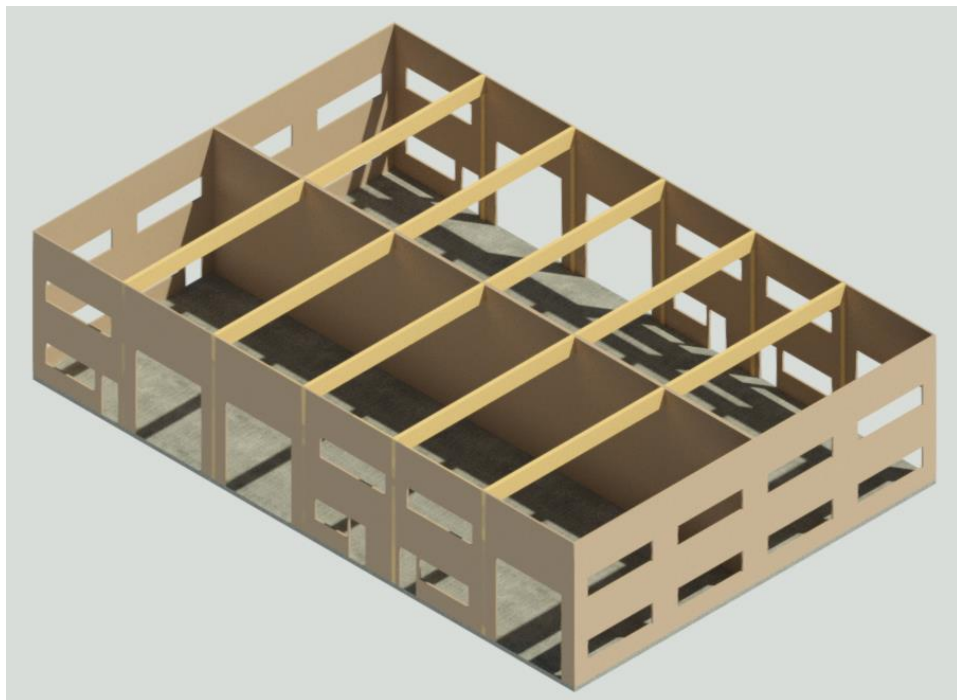


Figur 7.12 - Design 1 fra Revit med CLT vegger og lager/kontordekker [9]

Design 2 ble utformet med tanke på en fremtidig bruksendring av bygget. Figur 7.13 viser byggets oppbygning av søyler og bjelker. Videre viser Figur 7.14 hvordan bygget vil være når CLT veggene er på. Design 2, får da to store seksjoner for mulighet til produksjon med mulighet for kranbane på hver av seksjonene. Dersom noen leier hele bygget, er det mulighet for å lage døråpninger mellom seksjonene. [9]



Figur 7.13 - Design 2 fra Revit med søyler og bjelker [9]



Figur 7.14 - Design 2 fra Revit med CLT vegger [9]

7.5. Klimagassberegning

I dette delkapittelet presenteres resultatene fra klimagassberegningene for de fire ulike scenarioene, utført i One Click LCA. For hver av de fire scenarioene blir det presentert miljøgraden, det totale klimagassutslippet og oversikten over utslippet i hver av livssyklusfasene. Kapittelet avsluttes med sammenligningstabeller og figurer for de fire scenarioene, hentet fra One Click LCA. [127]

7.5.1. Miljøgradering

One Click LCA gir en miljøgradering i karakter fra A-G for hvert design. Karakter A har minst utslipp per m², mens karakter G har mest utslipp per m². Karakterene vurderes fra vugge til grav, altså livssyklusfasene A1-A4, B4-B5, C1-C4, som er forklart i Tabell 7.11. [9]

Tabell 7.11 - Forklaring av livssyklusfasene [84]

Produksjonsfase	A1	Råvarer – utvinning og bearbeiding
	A2	Transport av råvarer til byggeplass
	A3	Produksjon
Byggefase	A4	Transport til byggeplass
	A5	Bygging/installering
Bruksfase	B1	Bruk
	B2–B5	Vedlikehold
	B6–B7	Forbruk av energi og vann ved drift
Avhending	C1–C4	Riving, transport og avfallsbehandling

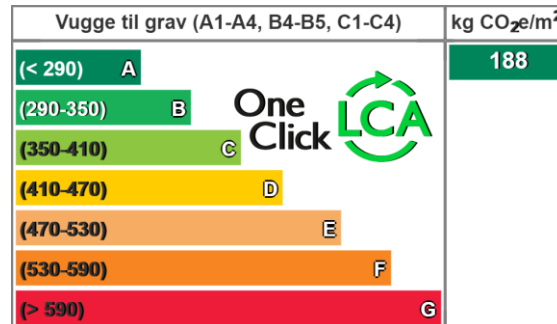
De fasene som ikke tas med i graderingen er [9]:

- A5: Bygging/Installering
- B1: Bruk
- B2: Vedlikehold
- B3: Reparasjoner
- B6-B7: Forbruk av energi og vann ved drift

En egen tabell er utarbeidet for total klimagassutslipp, som inneholder alle faktorene og verdiene som ble brukt i beregningene. Resultatene for graderingen og det totale utslippet varierer på grunn av de faktorene som ikke ble inkludert i beregningene. Hensikten med graderingen er å gi en oversikt over klimagassutslipp, med fokus på materialer, og å gjøre det enklere å sammenligne de ulike designene våre i prosjektet. [9]

7.5.2. Design 1: Lagerbygg i CLT og limtre

En oversikt over miljøgraderingen av Design 1 sees i Figur 7.15. Bygget oppnår karakteren A (<290 kg CO₂/m²) med 188 kg CO₂/m², som er det nest beste resultatet i vårt prosjekt [9].



Figur 7.15 - Miljøgradering av Design 1 [108]

Design 1 har et totalt utslipp på 146 320 kg CO₂-ekvivalenter. Med en levetid på 60 år og et bruttoareal på 726 m², vil bygget generere 2 438 kg CO₂-ekvivalenter per år, 201 kg CO₂-ekvivalenter per m² og 3,36 kg CO₂-ekvivalenter per kvadratmeter per år, se Tabell 7.12. [9]

Tabell 7.12 - Totale kg CO₂ ekvivalenter for Design 1 [9]

Klimautslipp	Kg
CO ₂ e	146 320
CO ₂ e/år	2 438
CO ₂ e/m ²	201
CO ₂ e/m ² /år	3,36

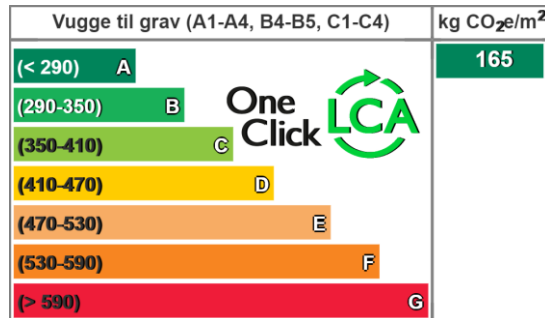
A1-A3 Byggematerialer er livssyklusstadiet med mest klimagassutslipp, 110 871 kg CO₂-ekvivalenter, som utgjør ca. 75,8 prosent av det totale klimagassutslippet. Se Tabell 7.13 for en oversikt over de resterende livssyklusstadiene med klimagassutslipp i kg og i prosent. [9]

Tabell 7.13 - Klimagassutslippet for Design 1 fordelt på livssyklus stadier [9]

Livssyklus stadier	Klimagassutslipp i kg	%
Byggematerialer (A1-A3)	110 871	75,8
Transport til byggeplassen (A4)	5 028	3,4
Byggeplass (A5)	9 706	6,6
Utskiftning (B4-B5)	15 530	10,6
Endt levetid (C1-C4)	5 185	3,6
Utover livsløp (ikke inkludert i totalen)	-52 347	
Total	146 320	100

7.5.3. Design 2: Lagerbygg i CLT og limtre

Figur 7.16 viser en oversikt over miljøgraderingen av Design 2: lagerbygget i CLT og limtre. Bygget oppnår karakteren A (<290 kg CO₂ /m²) med 165 kg CO₂ /m², som er det beste resultatet i vårt prosjekt. [9]



Figur 7.16 - Miljøgradering av Design 2 [127]

Design 2 har et totalt utslipp på 126 706 kg CO₂-ekvivalenter. Med en levetid på 60 år og et bruttoareal på 726 m², vil bygget generere 2 111 kg CO₂-ekvivalenter per år, 174 kg CO₂-ekvivalenter per m² og 2,91 kg CO₂-ekvivalenter per kvadratmeter per år, se Tabell 7.14. [9]

Tabell 7.14 - Totale kg CO₂ ekvivalenter for Design 2 [9]

Klimautslipp	Kg
CO ₂ e	126 706
CO ₂ e/år	2 111
CO ₂ e/m ²	174
CO ₂ e/m ² /år	2,91

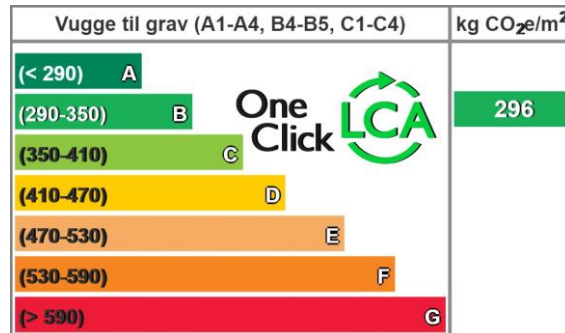
A1-A3 Byggematerialer er livssyklusstadiet med mest klimagassutslipp, 95 741 kg CO₂-ekvivalenter, som utgjør ca. 75,6 prosent av det totale klimagassutslippet. Se Tabell 7.15 for en oversikt over de resterende livssyklusstadiene med klimagassutslipp i kg og i prosent. [9]

Tabell 7.15 - Klimagassutslippet for Design 2 fordelt på livssyklus stadier [9]

Livssyklus stadier	Klimagassutslipp i kg	%
Byggematerialer (A1-A3)	95 741	75,6
Transport til byggeplassen (A4)	4 643	3,7
Byggeplass (A5)	6 899	5,4
Utskiftning (B4-B5)	15 530	12,3
Endt levetid (C1-C4)	3 894	3,0
Utover livsløp (ikke inkludert i totalen)	-41 147	
Total	126 706	100

7.5.4. Lagerbygget i stål

Miljøgraden av lagerbygget i stål er vist i Figur 7.17. Den oppnår karakter B (290-350 kg CO₂/m²) med 296 kg CO₂ /m². [9]



Figur 7.17 - Miljøgradering av stål bygget [127]

Lagerbygget i stål har et samlet utslipp på 232 199 kg CO₂ -ekvivalenter. Over en levetid på 60 år og med et bruttoareal på 726 m², vil bygget produsere 3 869 kg CO₂ -ekvivalenter per år, tilsvarende 319 kg CO₂ -ekvivalenter per m² og 5,33 kg CO₂ -ekvivalenter per kvadratmeter per år, se Tabell 7.16. [9]

Tabell 7.16 - Totale kg CO₂ ekvivalenter for stål bygget [9]

Klimautslipp	Kg
CO ₂ e	232 199
CO ₂ e/år	3 869
CO ₂ e/m ²	319
CO ₂ e/m ² /år	5,33

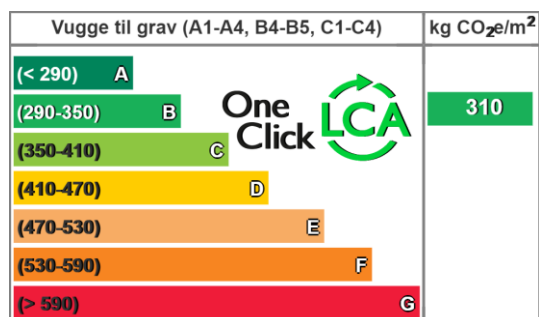
A1-A3 Byggematerialer er livssyklusstadiet med mest klimagassutslipp, med 192 057 kg CO₂-ekvivalenter, som utgjør ca. 82,7 prosent av det totale klimagassutslippet. Se Tabell 7.17 for en oversikt over de resterende livssyklusstadiene med klimagassutslipp i kg og i prosent. [9]

Tabell 7.17 - Klimagassutslippet for stålbygget fordelt på livssyklus stadier [9]

Livssyklus stadier	Klimagassutslipp i kg	%
Byggematerialer (A1-A3)	192 057	82,7
Transport til byggeplassen (A4)	4 512	1,9
Byggeplass (A5)	15 861	6,8
Utskiftning (B4-B5)	15 530	6,7
Endt levetid (C1-C4)	4 238	1,9
Utover livsløp (ikke inkludert i totalen)	-68 147	
Total	232 199	100

7.5.5. Standard Referansebygget

Miljøgraderingen for standard referansebygget er presentert i Figur 7.18. Bygget oppnår klasse B (290-350 kg CO₂ per m²) med en spesifikk utslippsverdi på 310 kg CO₂ per m², noe som gir det dårligste resultatet i prosjektet vårt. [9]



Figur 7.18 - Miljøgradering av referansebygget [127]

Referansebygget, med et bruttoareal på 726 m², genererer totalt 233 876 kg CO₂-ekvivalenter over en forventet levetid på 60 år. Dette resulterer i et årlig utslipp på 3 897 kg CO₂-ekvivalenter. Utslippene fordelt på byggets areal tilsvarer 322 kg CO₂-ekvivalenter per m² og 5,37 kg CO₂-ekvivalenter per kvadratmeter per år, se Tabell 7.18. [9]

Tabell 7.18 - Totale kg CO₂ ekvivalenter for referansebygget [9]

Klimautslipp	Kg
CO ₂ e	233 876
CO ₂ e/år	3 897
CO ₂ e/m ²	322
CO ₂ e/m ² /år	5,37

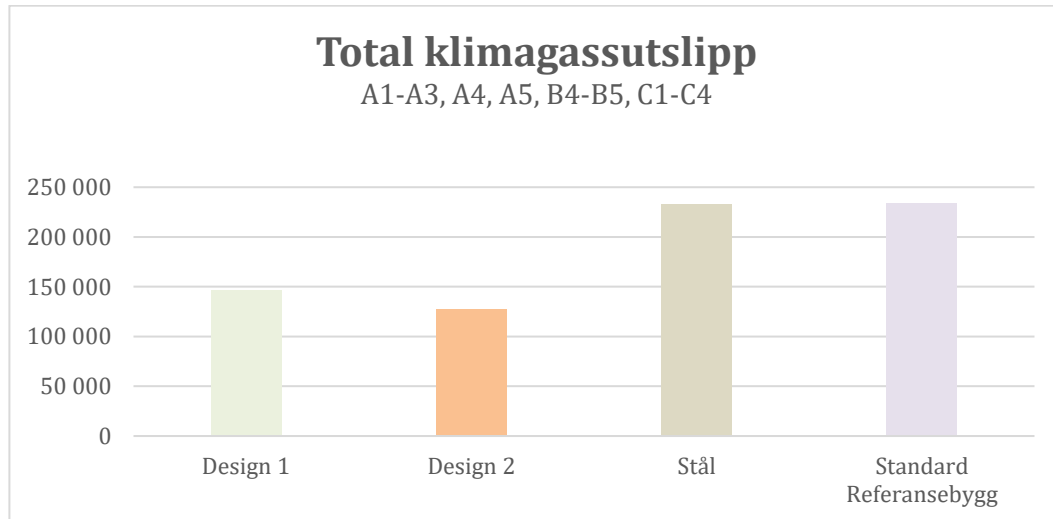
Byggematerialer i A1-A3 livssyklusstadiet står for det høyeste klimagassutslippet, med 191 704 kg CO₂-ekvivalenter. Dette representerer omtrent 82 prosent av det totale utslippet. For informasjon om de resterende livssyklusstadienes utslipp i kg og prosent, se Tabell 7.19. [9]

Tabell 7.19 - Klimagassutslippet for referansebygget fordelt på livssyklus stadier [9]

Livssyklus stadier	Klimagassutslipp i kg	%
Byggematerialer (A1-A3)	191 704	82
Transport til byggeplassen (A4)	6 000	2,6
Byggeplass (A5)	9 130	3,9
Utskiftning (B4-B5)	15 169	6,5
Endt levetid (C1-C4)	11 872	5
Utover livsløp (ikke inkludert i totalen)	-74 903	
Total	233 876	100

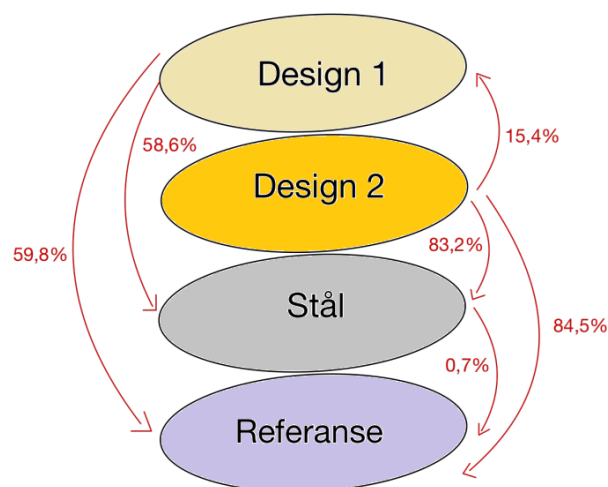
7.5.6. Sammenligning

Figur 7.19 illustrerer forskjellene i det totale klimagassutslippet for de fire designene. Design 2 har det laveste klimagassutslippet på 126 706 kg, etterfulgt av Design 1 med 146 320 kg. Lagerbygget i stål har et utslipp på 232 199 kg, og standard referansebygget har det høyeste utslippet på 233 876 kg. [9]

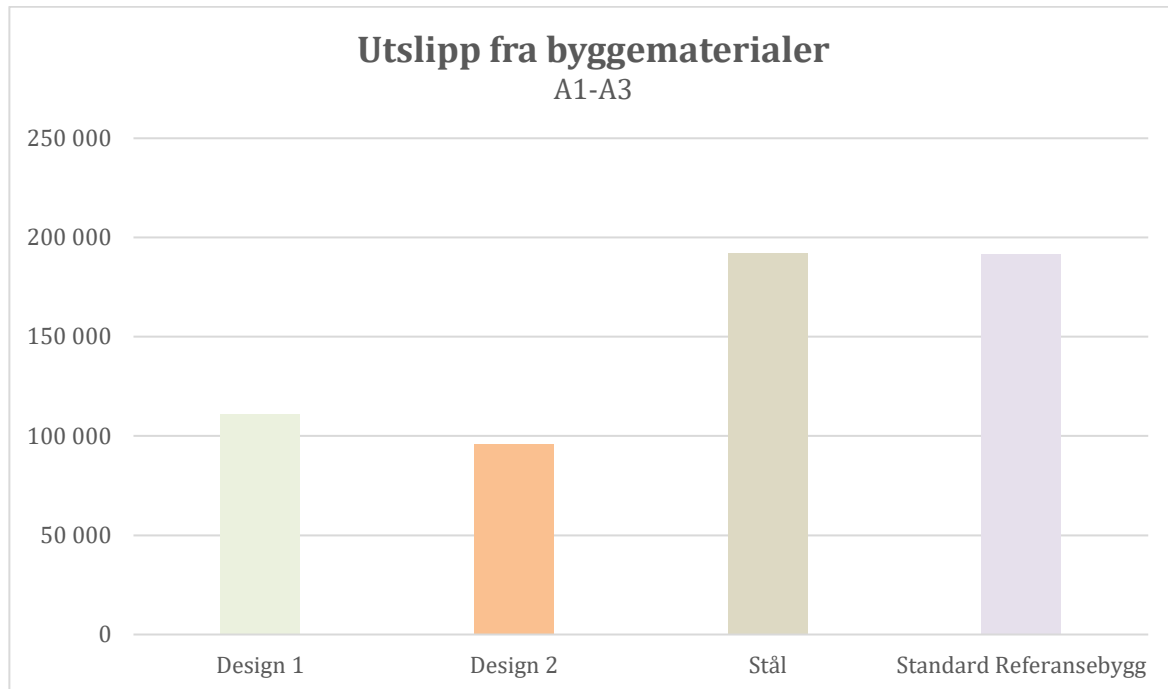


Figur 7.19 - Sammenligning av totalt klimagassutslipp i kg [9]

Design 1 og Design 2 har en utslippsforskjell på 19 614 kg, som utgjør 15,4 %. Design 1 og stålkonstruksjonen har en utslippsforskjell på 85 879 kg, som utgjør 58,6 %. Design 1 og referansebygget har en utslippsforskjell på 87 556 kg, noe som representerer en økning på 59,8 %. Design 2 og stålkonstruksjonen har derimot en utslippsforskjell på 105 493 kg, som utgjør 83,2 %. Ved Design 2 og referansebygget er det en utslippsforskjell på 107 170 kg, som utgjør den største forskjellen med en økning på 84,5 %. Til slutt har lagerbygget i stål og standardreferansebygget en utslippsforskjell på 1 677 kg, noe som utgjør den minste forskjellen med en økning på 0,7 %. Se Figur 7.20 for en oversikt over forskjellene i totale klimagassutslipp mellom designene, i prosent. [9]



Figur 7.20 - Sammenligning av totalt klimagassutslipp i prosent [9]



Figur 7.21 - Sammenligning av klimagassutslipp fra byggematerialer [9]

Figur 7.21 viser at forskjellen i klimagassutslipp øker når man kun ser på livssyklusstadiene A1-A3, som omhandler byggematerialer. Design 2 har fortsatt det laveste utslippet med 95 741 kg, mens Design 1 har et utslipp på 110 871 kg. Dermed er forskjellen i utslipp mellom disse to designene veldig lik når man sammenlignet det totale utslippet mellom dem. Lagerbygget i stål har det høyeste utslippet på 192 057 kg, mens standard referansebygget har et utslipp på 191 704 kg. Tabell 7.20 viser de nøyaktige verdiene for utslipp og prosentvis økning mellom materialene. [9]

Tabell 7.20 - Økning mellom byggematerialene i prosent [9]

Materiale	Design 1	Design 2	Stål	Referanse
Utslipp i kg	110 871	95 741	192 057	191 704
Økning i % (ift. Design 2)	+15,8 %	-	+100,6 %	+100,2 %
Økning i % (ift. Design 1)	-	-	+73,2 %	+72,9%

7.6. Materialkostnad

I dette delkapittelet vil vi beregne og sammenligne prisen på konstruksjonene, som er basert på beregningsgrunnlaget fra metodekapittelet [9].

7.6.1. Casebygget

Kostnadsanalysen for Casebygget er utført ved hjelp av et regnskap vi mottok fra eieren av Casebygget. Se Vedlegg L for en oversikt over materialkostnaden av bygget. I Tabell 7.21 presenteres en oversikt over den totale kostanden for bygget, som er på 3 373 000 kr. Denne totale summen inkluderer stålkonstruksjonen, hulldekker, yttervegger, innervegger og brystninger. [9]

Tabell 7.21 - Utdrag av kostand for hovedmaterialene av Casebygget [9]

Stålkonstruksjon	1 310 000 kr
Takplater	310 000 kr
Hulldekker	518 000 kr
Yttervegg	540 000 kr
Innervegg	455 000 kr
Brystning	240 000 kr
Sum	3 373 000 kr

7.6.2. Design 1 og Design 2

Kostnadsanalysen for Design 1 og Design 2 er utført ved hjelp av intervjuene vi har gjennomført med Firma A og Firma B, samt byggevareleverandøren Monter. Tabell 7.22 gir en oversikt over materialkostnadene for Design 1, hvor totalprisen for materialene er 4 363 962 kr. [9]

Tabell 7.22 - Kostand for Design 1 [9]

Design 1	
CLT	3 144 000 kr
Limtre	133 250 kr
Montering	315 840 kr
Isolering	257 438 kr
Kledning	485 940 kr
Lekter	27 494 kr
Sum	4 363 962 kr

For Design 2 er total kostnaden for materialene 3 019 412 kr, Tabell 7.23 viser oversikten over kostandene [9].

Tabell 7.23 - Kostand for Design 2 [9]

Design 2	
CLT	1 808 000 kr
Limtre	124 700 kr
Montering	315 840 kr
Isolering	257 438 kr
Kledning	485 940 kr
Lekter	27 494 kr
Sum	3 019 412 kr

7.6.3. Kostnadssammenligning av materialer

Tabell 7.24 viser en oversikt over forskjellen i materialkostnad mellom Casebygget og Design 1, som er på +990 962 kr. Dette innebærer at Design 1 er 22,71 % dyrere enn Casebygget. Prisdifferansen mellom Casebygget og Design 2 er -353 588 kr, noe som viser at Design 2 er 11,71 % billigere enn Casebygget. [9]

Tabell 7.24 - Materialkostnadssammenligning [9]

Design	Kostnad	Differanse fra Casebygget i kr	Differanse fra Casebygget i %
Casebygget	3 373 000 kr	-	-
Design 1	4 363 962 kr	+990 962 kr	+22,71 %
Design 2	3 019 412 kr	-353 588 kr	-11,71 %

7.7. Totalkostnad

Tabell 7.25 viser en oversikt over forskjellen i total kostnad mellom Casebygget, Design 1 og Design 2. Forskjellen mellom Casebygget og Design 1 er på +945 962 kr, som innebærer at Design 1 er 13,4 % dyrere. Prisdifferansen mellom Casebygget og Design 2 er på -398 588 kr, noe som viser at Design 2 er 5,65 % billigere enn Casebygget. [9]

Tabell 7.25 – Totalkostnadssammenligning [9]

Design	Kostnad eks mva	Differanse fra Casebygget i kr	Differanse fra Casebygget i %
Casebygget	7 060 589 kr	-	-
Design 1	8 006 551 kr	+945 962 kr	+13,4 %
Design 2	6 662 001 kr	-398 588 kr	-5,65 %

7.8. Konstruksjonstid

I dette delkapittelet blir det presentert og sammenlignes konstruksjonstiden for to lagerbygg: Casebygget som er oppført av Firma C og ett som ble oppført i CLT av Firma B.

7.8.1. Casebygget

I analysen av konstruksjonstiden for Casebygget, ble informasjonen fra intervjuet med Firma C benyttet. Monteringen startet 1. januar 2024 og skal være ferdigstilt 1. juni 2024. Dette gir en total byggefase på 152 kalenderdager. Når man justerer for dager som helger og offentlige fridager, reduseres dette til totalt 102 arbeidsdager. Det er utelatt 21 lørdager og 21 søndager, samt åtte offentlige fridager inkludert første nyttårsdag, skjærtorsdag, langfredag, andre påskedag, arbeidernes dag, Kristi himmelfartsdag, grunnlovsdag, og andre pinsedag. [9]

7.8.2. Lagerbygg i Rysstad

Informasjonen om lagerbygget i Rysstad ble hentet fra intervjuet med Firma B. Byggefasen på dette lagerbygget startet 15. oktober 2023 og ble ferdigstilt 20. desember 2023. Dette tidsrommet utgjør 66 kalenderdager. Når man justerer for helger og offentlige fridager, består hele byggefasen av 47 arbeidsdager. I denne perioden ble det utelukket 9 lørdager og 10 søndager, som ikke ble brukt til monteringsarbeid. Denne informasjonen bli brukt videre som grunnlag for designene våre. Sammenlignet med Casebygget utgjør dette 46 % tidsbesparelse. [9]

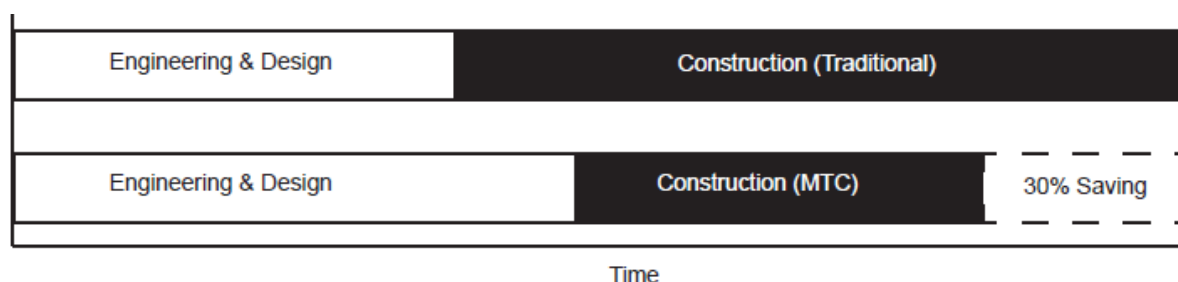
7.9. Litteraturstudium

I dette kapittelet presenteres resultater fra litteraturstudie som omhandler konstruksjonstid, kostnad og ombruk av materialene.

7.9.1. Understanding Costs and Identifying Value in Mass Timber Construction: Calculating the 'Total Cost of Project' (TCP)

I en artikkel av Kremer og Ritchie [112], der de ser på den "totale kostnaden for et prosjekt" ved bruk av massivtre konstruksjon som CLT og limtre mot tradisjonelle materialer som betong, konkluderte Kremer og Ritchie med at prosjekteringstiden er den mest krevende delen av byggeprosessen. Dette skyldes at CLT og limtre krever nøye planlegging og en høy standard av nøyaktighet. [112]

Videre mener de standardisering av CLT og limtre er nødvendig for å oppnå høy standard av effektivisering som kan bidra til reduserte kostnader i en form av tidsreduksjon av selve byggeprosessen. Bruk av CLT og limtre kan oppnå en tidsbesparelse på 30 % dersom entreprenører har erfaring og kunnskap ved bruk av disse materialene. Denne besparelsen skjer til tross for at prosjekterings- og designfasen ofte er noe lengere enn ved bruk av tradisjonelle byggemetoder. Ifølge Figur 7.22 kommer kostnadsbesparelsen fra selve byggeprosessen, der mye tid er spart på grunn av bygging med prefabrikkerte elementer. [112]



Figur 7.22 - Forskjell i tidsbruk av byggeprosjekter i stål og betong kontra CLT og limtre [112]

Videre utførte Kremer og Ritchie en kostnadsanalyse av CLT og limtre kontra betong. De konkluderte med at den "totale kostnaden for et prosjekt" er 6 % lavere for CLT og limtre sammenlignet med betong. Til tross for at materialkostnadene for CLT og limtre er høyere, som blir oppveid av raskere byggetid, lavere arbeidskraftkostnad og lavere kostnader ved forberedende poster som vist i Tabell 7.26. [112]

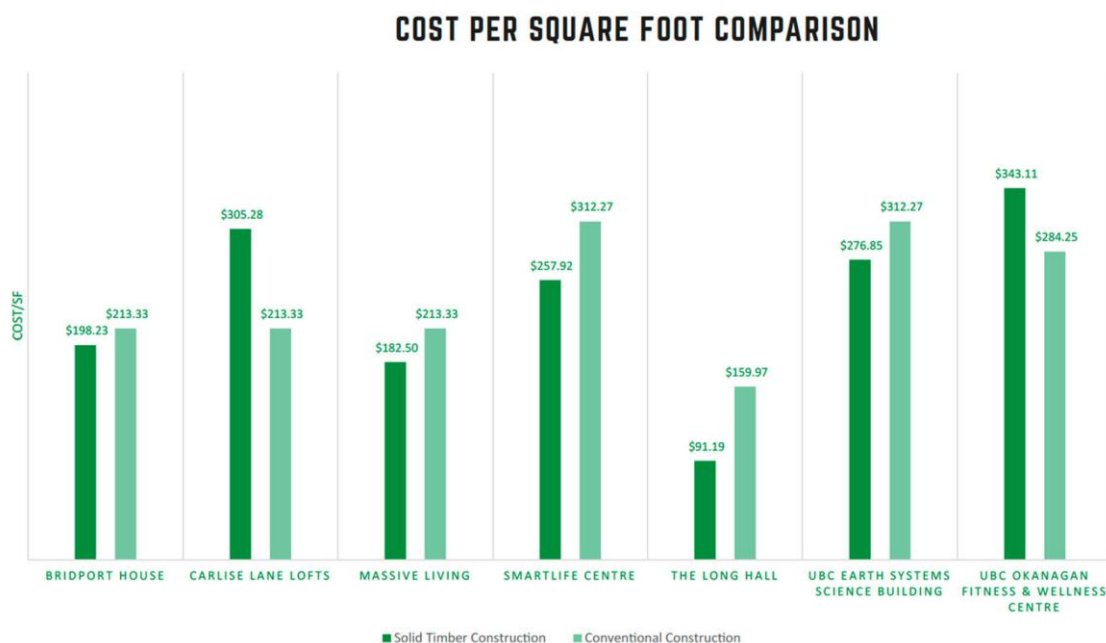
Tabell 7.26 - "Total kostnaden for et prosjekt" sammenligning mellom CLT og limtre mot betong [112]

Description	Cross Laminated Timber	Concrete Construction	Difference CLT to Concrete
Columns	\$34,935	\$365,644	-90%
Upper Floors	\$2,539,961	\$1,810,398	+40%
Staircases	\$81,200	\$66,150	+23%
Roof	\$233,100	\$356,617	-35%
External Walls	\$518,082	\$416,165	+24%
Internal Walls	\$1,286,436	\$1,224,522	+5%
Wall Finishes	Included	Included	-
Ceiling Finishes	Included	\$459,085	-
Preliminaries Adjustment	(- \$287,000)	-	-
Total Cost of Project (TCP)	\$4,406,714	\$4,698,581	- 6%

7.9.2. Mass timber: evaluating construction performance

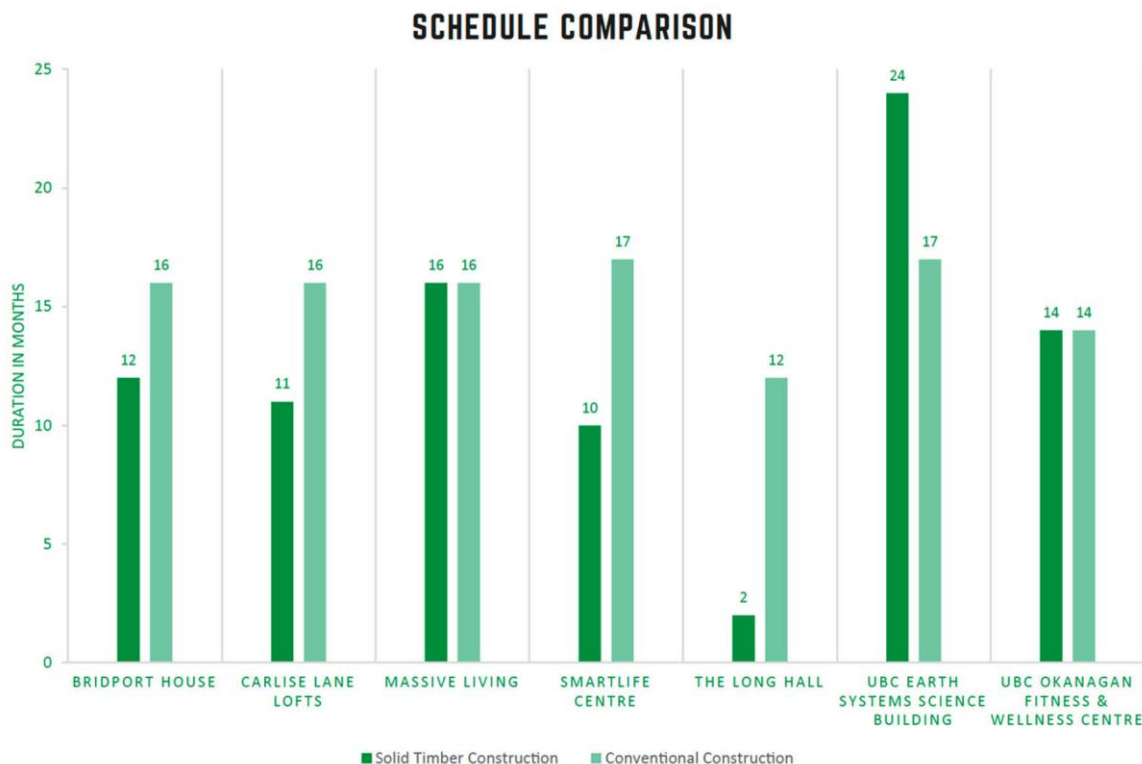
En artikkel av Ryan E. Smith, Gentry Griffin, Talbot Rice og Benjamin Hagehofer-Daniell [113] som undersøker CLT og limtre sammenlignet med tradisjonell byggepraksis. Det er gjort kvantitative og kvalitative analyser for å evaluere kostnads- og tidsytelsen til CLT og limtre prosjekter med å sammenligne dem mot tradisjonelle byggeprosjekter med samme størrelse. [113]

Resultatene viser at CLT og limtre prosjekter hadde en kostnadsbesparelse på 4,2 % i gjennomsnitt sammenlignet med tradisjonelle byggeprosjekter. Noen prosjekter var dyrere enn tradisjonell byggemetode som vist i Figur 7.23, men de fleste var billigere og fire av prosjektene var "pilot prosjekter" som betyr at det var første gang de hadde designet og bygget i CLT og limtre. [113]



Figur 7.23 - Kostnad per kvadrat fot for CLT og limtre kontra tradisjonelle bygg [113]

Funnene ved konstruksjonstid, ga CLT og limtre en gjennomsnittlig tidsbesparelse på 20% sammenlignet med tradisjonell bygging. Den gjennomsnittlige konstruksjonstiden for CLT-prosjektene lå på 12,7 måneder sammenlignet med 15,4 måneder for tradisjonelle prosjekter. Siden CLT og limtre blir prefabrikkert kan arbeidet på byggeplassen og fundamentet utføres samtidig. Dette reduserer forsinkelsene som en tradisjonell byggeplass har der byggeplassen, fundamentet og konstruksjonen skjer etter hverandre, som vist i Figur 7.24. [113]



Figur 7.24 - Sammenligning av konstruksjonstid for CLT mot tradisjonelt bygget bygg [113]

7.9.3. Asplan Viak: Energi- og materialkonsept

I en rapport av Asplan Viak der de skulle kartlegge mulige klimatiltak knyttet til energiløsninger, materialbruk, ombrukbarhet og andre energibesparende tiltak [17]. Det ble gjort en detaljert analyse av ombrukbarhet av materialer som er et sentralt klimatiltak for byggebransjen. Ombruk bidrar til å forlenge materiellressursenes levetid og reduksjon i bruk av nye materialer. Bygninger som er planlagt for fremtidig demontering er de enkleste byggene å ombruke. [17]

Stål og andre metaller blir i likhet med betong materialgjenvunnet. Ved en eventuell ombruk av stål kan man ha en klimagevinst på 80% sammenlignet med gjenvinning. Muligheten for ombruk avhenger ofte av innfestningsmetoden der sveiste komponenter er vanskeligere å ombruke enn de som er mekanisk festet. Stålet sees på som gunstig for ombruk da det kan fraktes relativt langt før det gir negativt utslag på miljøpåvirkning på grunn av styrke-vekt-forhold. Videre kan fremtidig ombruk gjøres lettere ved å bruke standarddimensjoner og prefabrikasjon, noe som minsker avfall og tilpasningsbehov i fremtiden. [17]

CLT og limtre er godt egnet for ombruk, siden elementene kan bearbeides med enkle verktøy etter demontering. Elementer som er mekanisk bundet med for eksempel skruer som tåler gjentatte demontering/remontering er lettere å gjenbruke sammenlignet med elementer som er limt eller spikret. Originale dokumenter vil lette på bearbeiding, testing og dokumentering av elementene. Videre mener de at CLT og limtreelementer er tunge og vil bidra til høye transportutslipp ved lange avstander, det er derfor bedre å ombruke fra eksisterende bygningsmasse eller nærliggende bygninger. [17]

Det er vanskelig å måle klimaeffekten og kostnadene ved ombrukbarhet, men riktig planlegging for demonterbarhet kan redusere både utslipp og kostnader. Bearbeiding, lange transportdistanser og fjerning av miljøskadelig stoffer skaper ekstrakostnader og lavere besparelse. Demontering er dyrere enn tradisjonell riving, men materialenes verdi øker og skaper flere arbeidsplasser ved demontering. [17]

8. Diskusjon

I dette kapittelet drøftes og diskuteres resultatene fra intervjuene, dimensjonering, klimagassregnskapet, kostnadsberegningene og ombruk. Dette legger grunnlaget for konklusjonen knyttet til problemstillingene.

8.1. Dimensjonering

I dette kapittelet diskuteres resultatene fra dimensjoneringen for Design 1 og Design 2, som ble laget ved bruk av tegninger gitt av AK Mekaniske, Areco, 4Consult og Contiga, ved hjelp av FEM-Design. Design 1 var bygd opp likt som Casebygget, med unntak av taket. Design 2 var bygd for fremtidig endring eller bruk av bygget. Begge versjonene av bygget hadde som mål om å sikre strukturell integritet og oppfylle dimensjonerings standarden for tre i programmet som er Eurokode 5. FEM-Design er et kraftig beregningsverktøy for strukturell analyse og design, som gir oss et detaljert innblikk i hvordan konstruksjonselementene oppfører seg under belastning samt hvor mye de blir utnyttet. Justeringer ble gjort ved bruk av "Auto-design" som ga riktige dimensjoner i forhold til belastningene på konstruksjonsdelene.

8.1.1. Tolkning av resultatene

For Design 1 og 2 ble utnyttelsesgrensen satt til 95 %, dette ble valgt for å unngå at konstruksjonsdeler ble 100 % utnyttet som ikke er gunstig da det ikke er noe spillerom dersom noe skulle skje. Ved å sette utnyttelsesgraden til 95 % sikrer vi at konstruksjonen har tilstrekkelig kapasitet ved uforutsette hendelser og gir oss en strukturell integritet i fremtiden. Resultatene fra Kapittel 7.3 viser at de mest utnyttede konstruksjonsdelene var under eller lik 95 % utnyttelse og da innenfor alle beregningene gjort av programmet.

Design 1 fikk tykkere takelementer på 210 mm fra "auto design" og en utnyttelse på 94 % som vist i Tabell 7.5, dette kan være på grunn av varierende størrelser på bjelker og søyler i kombinasjon med at CLT innerveggene har blitt beregnet som bærende vegger, som gjorde at taket måtte være tykkere for å ta opp lastene, i tillegg kan det være at det er høyere konsentrasjon av laster i knutepunktene der bjelkene, søylene og veggene møtes. Innerveggene i Design 1 beholdt sin tykkelse på 200 mm og hadde liten utnyttelse på 20 % på den mest belastede vegg som sett i Tabell 7.4.

I Design 2 ble tykkelsen på 160 mm beholdt av programmet som vist i Tabell 7.10, kan ha sin grunn i at bærende bjelker og søyler hadde større dimensjoner samt samme dimensjoner på alle hoved bjelkene som hadde spennlengde på hele bredden, dette gjør at det er mindre knutepunkter på en plass som skaper mindre konsentrerte laster og blir jevnt fordelt. Den bærende CLT vegg i midten beholdt sin tykkelse på 200 mm, der den støtter opp hoved bjelkene og har da en utnyttelse på 85 % som sett i Tabell 7.9, som er godt innenfor. Dimensjonen på søylene i Design 2 ble tilpasset til å passe med bjelkene i bredde. Dette ble gjort for å få en estetisk likhet mellom søylene og bjelkene. Søylene som ble brukt var 215x180 mm der den mest belastede var på 68 % utnyttelse og bjelkene hadde en dimensjon på 215x900 og hadde 81 % i utnyttelse som vist i Tabell 7.7 og Tabell 7.8. Disse verdiene

er godt innenfor kravet. Tanken var å ha lav utnyttelse slik at man har en fremtidig mulighet for kranbane som kan installeres i hver av seksjonene.

8.1.2. Diskusjon av metode

FEM-Design ble valgt for strukturellanalyse og dimensjonering av Design 1 og 2. FEM-Design er et anerkjent som dimensjoneringsprogram med sin presisjon og detaljnivå i beregninger. Valget av FEM-Design ga oss mulighet til å gjøre nøyaktige analyser av konstruksjonselementene for alle belastningene. En annen grunn for bruk var "auto design" funksjonen som automatisk tilpasset tverrsnittet til konstruksjonselementene uten å overskride den satte grensen på 95 % utnyttelse. Dette gir oss en trygghet på at konstruksjonen kan tåle uforutsette belastninger eller hendelser.

Svakhet med FEM-Design er at det krever høy brukerkompetanse slik at alle parametere er riktig innsatt og tolkning av resultatene. Læringskurven er bratt og det kan ta lang tid å sette opp modellen riktig, spesielt ved vanskelig geometri og kompliserte belastningsforhold, da det kun er enkle videoer eller forklaringer på nett som kan være vanskelige å tolke. Det kan være Design 1 ble feil bygget opp da det er mange komponenter som skal inn til sammenligning med Design 2 som er mindre kompleks. Sett bort i fra dette er FEM-Design et kraftig program for gjennomføring av detaljerte strukturelle analyser, dette er avgjørende for prosjekter som krever høy sikkerhet og pålitelighet i dimensjoneringen.

Valget av utnyttelsesgrad på 95 % er både en styrke og en svakhet. Fra den ene siden gir det en ekstra sikkerhetsmargin for uforutsette hendelser og integritet over tid. Fra den andre siden kan det føre til en viss overdimensjonering av enkelte konstruksjonsdeler, dette kan påvirke materialkostnadene samt miljøpåvirkningen negativt.

Videre kan det være hensiktsmessig å bruke flere verktøy eller metoder for strukturell analyse der man kan sammenligne og verifisere resultatene fra FEM-Design, dette ble ikke gjort da det ikke var hensikten med oppgaven og på grunn av tidsbegrensing for å lære nye programmer.

8.2. Klimagassberegning

I dette delkapittelet presenterer vi vår tolkning av resultatene fra klimagassberegningene, deretter diskuterer vi metoden som ble brukt. Til slutt diskuterer vi rundt bærekraftige byggemetoder.

8.2.1. Tolkning av resultatene fra One Click LCA

Våre resultater viser at klimautslippene reduseres mest ved bruk av CLT som byggemateriale. Design 2 kom best ut med 126 706 kg, fulgt av Design 1 med 146 320 kg, deretter det opprinnelige lagerbygget i stål med et utslipp på 232 199 kg, og til slutt standard referansebygget med et utslipp på 233 876 kg. Dette er uten å ta i betraktning biogen lagring, som ville gitt Design 1 og 2 et negativt CO₂-utslipp på grunn av karbonlagringen. Vi så bort fra dette for å vurdere miljøpåvirkningen uten karbonlagring.

Livssyklusfasen A1-A3, som handler om byggematerialer, representerer fasen med de største utslippene i alle de fire scenarioene. Differansen i prosent mellom Design 1 og Design 2 var nesten helt lik for totalt klimautslipp som for utslipp fra byggematerialer, bortsett fra at differansen var større mellom alle scenarioene i denne fasen. Siden denne fasen står for de største utslippene, er potensialet for å redusere det totale utslippet også størst her. Stålbygget fikk litt mer utslipp her enn referansebygget, som gjør at bygget får det største utslippet, som skyldes av ulik bruk av materialer. Hvor ved stålbygget ble det brukt mer vanlig betong og kamstål, som er høyt CO₂-produserede i produksjonen, sammenlignet med referansebygget, som bruker mer lavkarbonbetong og resirkulerende materialer. Dette viser et skille i materialvalgene innvirkning på miljøet, og bygger på behovet for å velge mer bærekraftige alternativer i byggeprosessen. Ved å innføre flere strategier som bruk av lavkarbonmaterialer, kan dette være en faktor for byggebransjen for å kunne redusere sine utslipp og fremme en mer bærekraftig utvikling.

Når man ser på prosentøkningen mellom materialene, hvor økning i utslipp fra Design 2 til stålbygget er 100,6 %, mens økningen fra Design 2 til referansebygget er 100,2%. For Design 1, sammenlignet med stålbygget, er økningen 73,2% og for referansebygget er det 72,9%. Denne sammenligningen understreker de miljømessige fordelene ved å benytte CLT og limtre i konstruksjoner, og hvordan disse materialene bidrar til å skape lavere klimagassutslipp sammenlignet med tradisjonelle materialer som stål.

Utslippene i fase B4, Utskiftning, er mye lavere enn ved A1-A3, og forskjellen mellom de tre scenarioene som vi har generert er nøyaktig den samme, mens det er en liten forskjell ved det standard referansebygget. Dette skyldes hovedsakelig at vinduer, industriporter og dører må byttes ut, og disse har en levetid på under 60 år, som er lik i alle de tre scenarioene. Forskjellen mellom disse scenarioene og standard referansebygget ligger i typen dører og vinduer som ble automatisk generert av One Click LCA.

Disse resultatene viser fram at valg av byggematerialer har en betydelig innvirkning på klimagassutslipp, og at CLT og limtre representerer mer bærekraftige og miljøvennlige alternativer sammenlignet med tradisjonelle materialer. Ved at flere også bruker mer lavkarbonmaterialer, kan dette også hjelpe byggebransjen med å redusere sine utslipp og fremme en mer bærekraftig utvikling.

8.2.2. Diskusjon av metode

Vi hadde utfordringer i starten med å finne ut av hvordan programmet fungerte. Selv om begge hadde litt kjennskap til programmet fra før av, var det flere år siden sist vi jobbet med det, så det følte som å starte helt på nytt. Siden vi også bare hadde tilgang til en studentlisens, ble vi begrenset i tiden vi hadde tilgang til verktøyet NS 3720. Dette førte til at vi ventet med å lage prosjektet og legge inn alle designene til slutten, slik at vi hadde all data på plass. Programmet tillot også at flere personer jobbet i samme prosjekt samtidig, noe som gjorde det mulig for oss å samarbeide samtidig. Vi valgte å bruke One Click LCA for å beregne klimagassutslipp for alle scenariene. Hvis vi hadde valgt et annet program, hvor vi måtte gjøre alle beregninger manuelt eller beregne for hånd ville vi ikke ha klart å ferdigstille oppgaven i tide til innlevering.

Siden det var noen mangler i tilgjengeligheten av EPD i One Click LCA, resulterte dette i noe unøyaktige resultater som ikke nødvendigvis gjenspeiler virkeligheten fullt ut. Selv med disse begrensningene hjelper livssyklusanalysen oss med å forstå klimagassutslippene som er knyttet til byggeprosjekter. Den gir oss innsikt i ulike tiltak som kan bidra til å redusere disse utslippene, noe som er spesielt viktig i byggebransjen, ettersom denne bransjen står for store utslipp globalt.

8.2.3. Bærekraftige byggemetode

Intervjuene med Firma A og Firma B om CLT og limtre gir en innsikt i hvordan byggebransjen kan ta skritt mot en mer bærekraftige byggemetoder. Hvor Firma A sitt fokus var på å bruke treverk på grunn av dets evne til karbonlagring samt lite energiforbruk ved produksjon. Det er viktig å anerkjenne hvordan tidlig integrering av bærekraftige materialer ikke bare kan forbedre miljøpåvirkningene av et byggeprosjekt, men kan også føre til kostnadsbesparelser gjennom effektiv ressursbruk. Dette fremmer også innovasjon i designfasen, hvor arkitekter og ingeniør utfordres til å tenke bærekraftig helt fra starten av.

Firma B derimot fremmer en endring i skogbruksmetoder, som selektiv hogst, et alternativ til flatehogst. Dette kan være viktig for å støtte et sunnere økosystem og redusere CO₂-utslipp. De anbefalte også å velge produsenter som følger bærekraftige praksiser, noe som er avgjørende for å minimere byggebransjens miljøpåvirkning. Videre nevnte Firma B potensialet for modulbygg og systemer som bruker prefabrikerte CLT-moduler, noe som kan minimere etterarbeid og forbedre byggetidsrammene, samt bidra til betydelige kostnadsbesparelser.

Firma C ga oss derimot innsikter i hvordan miljøstrategier kan integreres i bruken av stål i byggeprosjekter. De legger vekt på å redusere klimagassutslipp gjennom bruk av gjenvunnet materiale og produkter produsert med fornybare energikilder. Dette understreker en sentral faktor i bærekraftig bygging, altså at valget av materialer og materialets opprinnelse har direkte innvirkning på prosjektets samlede miljøpåvirkning.

Disse observasjonene, takket være intervjuene, underbygger det miljømessige potensialet ved å velge bærekraftige materialer som CLT, limtre og gjenvunnet stål. Kombinering av materialer i hybridkonstruksjoner kan være nøkkelen til å utnytte fordelene ved både tre og stål, dette viser hvor viktig det er med innovative løsninger i byggebransjen.

8.3. Kostnader

I dette kapittelet drøftes de ulike kostnadselementene knyttet til materialkostnad, transport, totalkostnad og usikkerheten ved kostnadene for de forskjellige designene.

8.3.1. Materialkostnad

Resultatene fra Kapittel 7.6.3, "Kostnadssammenligning av materialer", viser at Design 2 er den rimeligste løsningen, etterfulgt av Casebygget, Design 1 kommer ut som den dyreste. Ifølge

beregningene i Vedlegg N, er Design 2 11,71 % billigere enn Casebygget, hvor Design 1 er 22,71 % dyrere for materialkostnadene. Grunnen til at Design 2 er billigst er på grunn av byggets enkle oppbygning med få CLT-elementer og limtre-komponenter. Design 2 kan ikke direkte sammenlignes med Casebygget da de er ganske forskjellige i oppbygningen, men vi har med beregningene for å se hvor mye et slikt bygg som Design 2 ville ha "kostet". Design 1 som er likt Casebygget har høyest materialkostnad på grunn av byggets mange CLT-elementer som driver prisen opp.

Når vi sammenligner materialkostnaden for de forskjellige designene, ser vi at prisen varierer på grunn av materialtypen og mengden. Design 1 som det dyreste utfallet har en del store/tykke CLT elementer som vil drive prisen opp, i tillegg til av vi valgte CLT-elementer fra Firma A på grunn av nær tilhørighet som også er den dyreste av CLT elementene mellom Firma A og Firma B med en pris på 8000 kr/m³ fra firma A sammenlignet med 6500 kr/m³ fra Firma B. Som man kan se i Vedlegg N, vil materialkostnaden for CLT være 23,08 % mindre ved bruk av prisene fra Firma B i forhold til Firma A. Videre i Vedlegg N, kan man se at materialkostnadene mellom Casebygget og Design 1 med Firma B sine priser har en prisforskjell på kun 11,9 % som er 11 % mindre sammenlignet med prisene fra Firma A. Dette viser at man burde forhøre seg rundt med forskjellige leverandører/produsenter for å kunne redusere prisene på materialkostnadene dersom pris spiller en viktig rolle for byggherren. Videre kan man anta et fraktkostnaddene ved å velge CLT fra Firma B være noe høyere sammenlignet med Firma A. Men dersom man gjør som Firma B har sagt i intervjuet og planlegger transporten med produsenten kan man få redusert transportkostnadene slik de klarte ved å bruke biler som hadde en planlagt tur opp til Norge på forhånd.

For materialene som isolasjon, kledning og lekter har vi valgt å bruke Monter sine priser da de er et av Norges største byggevareleverandør, prisene som er hentet er de vanlige prisene for privatpersoner. Vi antar at prisen kan justeres når man kjøper som bedrift og i store kvantum slik at man får en pakkepris på alt materiell. Da vi ikke har data på dette så ble det brukt prisene fra nettsiden, noe som gjør at materialkostnadene her vil være antatt høyere.

Som nevnt i Kapittel 7.9.1. i rapporten til Kremer og Ritchie er materialkostnadene høyere for CLT og limtre sammenlignet med tradisjonelle byggematerialer på grunn av begrenset produksjonskapasitet og økt etterspørsel, dette stemmer overens med våre resultater der CLT og limtre er dyrere sammenlignet med stål. Stål har vært brukt og produsert i mange år, dette har gjort at prisen på stål har stabilisert seg, sammenlignet med CLT-elementer som er et ganske så nytt materialet, med begrenset produksjonskapasitet og økende etterspørsel, som driver prisene opp.

8.3.2. Transport

Transport av materialene utgjør en stor del av de totale kostnadene, spesielt avhengig av om de sendes fra lokale leverandører eller ikke.

I Design 1 bruker vi CLT C24, som har en densitet på 420 kg/m³, som er vist i Tabell 3.4, samt limtre GL30c, med en densitet på 430 kg/m³, vist i Tabell 3.1. Dette resulterer i en totalvekt på omtrent 165 tonn for CLT og cirka 11 tonn for limtre. Videre har trefiberisolasjonen, som er 100 mm tykk, en densitet på 50 kg/m³. Kledningen, målt til 19x148, har en densitet på 527,7 kg/m³ ved 17 %

fuktighet, og lektene, med dimensjoner på 36x68, har en densitet på 467 kg/m³ ved samme fuktighetsnivå. Dermed blir totalvekten for Design 1 190,07 tonn.

For Design 2, hvor vi bruker samme densitet for materialene som i Design 1, blir vekten for CLT rundt 95 tonn, og for limtre er den omtrent 10 tonn. Med samme mengde trefiberisolasjon, kledning og lekter som i Design 1, blir totalvekten på 119,07 tonn.

Casebygget har derimot en totalvekt på omtrent 111 tonn. Dette medfører et lavere behov for transport sammenlignet med Design 1 og Design 2, ettersom færre lastbiler kreves.

Transportkostnadene, som ikke er inkludert i de opprinnelige estimatene for Design 1 og Design 2, kan være en avgjørende faktor. De høyere totalvektene for Design 1 og Design 2 kan øke behovet for transportkapasitet sammenlignet med Casebygget. Med en EU-standard vektgrense på 40 tonn for vogntog, kan dette føre til økte kostnader og komplikasjoner, avhengig av lokale forhold. Vi antar derfor at totalkostnadene for Design 1 og Design 2 vil øke med en viss prosentandel.

8.3.3. Totalkostnad

Vedlegg N, viser oversikten over totalkostnadene for Casebygget, Design 1 og Design 2. Design 2 er den billigste løsningen, etterfulgt av Casebygget og til slutt Design 1. Totalkostnadene for Design 2 er 6 662 001 kr, ekskl. mva, noe som tilsvarer 9 176 kr per m². For Casebygget er totalkostnadene 7 060 589 kr, ekskl. mva, som utgjør 9 725 kr per m². For Design 1 er totalkostnaden 8 006 551 kr, ekskl. mva, som tilsvarer 11 028 kr per m². Design 2 er 5,65 % billigere enn Casebygget, mens Design 1 er 13,4 % dyrere enn Casebygget. Design 2 er billigst siden det som nevnt tidligere har mindre elementer i seg og at det er et enklere bygg som gjør at den totale prisen vil være mindre for dette designet sammenlignet med Casebygget, og vil da ikke være en rettferdig sammenligning. Dette blir mer for å se hva det ville potensielt ha kostet totalt å bygge et slikt bygg.

Design 1 er 726 m² stort, og lagerbygget i Rysstad fikk vi informert om er 840 m². Vi antar da at byggetiden for Design 1 vil ta omtrent like lang tid som for Rysstad bygget, som totalt tok 47 arbeidsdager fra montering startet til overlevering. Hvis byggestart for Design 1 starter samtidig som ved Casebygget, altså 1.januar, vil Design 1 være ferdigstilt 6.mars. Dermed kan utleie starte umiddelbart. Hvis man lykkes med å leie ut alle seks seksjoner med engang, og Casebygget blir ferdigstilt 1.juni 2024 vil det være en forskjell på ca. 3 måneder. Med dette kan vi anta at Design 1 vil ha en reduksjon i prisen på grunn av dette som vist i Vedlegg N. Design 1 vil da gå fra en totalkostnad på 8 006 551 kr til 7 809 676 kr som er en reduksjon på 196875 kr. Det kan også argumenteres for at man vil ha reduserte kostnader i form av utleie av kraner, lifter og andre utstyr relatert til bygging som kan være med på å redusere de totale kostnadene for bygget som beskrevet i rapporten til Kremer og Ritchie i Kapittel 7.9.1.

Fra rapporten til Kremer og Ritchie og Smith et al. i Kapittel 7.9.2 kan man ha en total kostnadsbesparelse på 4,2-6 % ved bruk av CLT og limtre sammenlignet med tradisjonelle byggemetoder (betong og stål). Funnene viser at det er mange faktorer som spiller inn på kostnadene og mye av besparelsen i kostnader er ved rask byggetid som fører til reduserte

arbeidskostnader og utleiekostnader med mer. God planlegging og tidlig involvering vil bidra til reduserte total kostnader.

Fra våre intervjuer med Firma A og Firma B kom det fram viktige observasjoner som peker mot fremtidige trender i bruk av CLT og limtre. Både Firma A og B nevnte at for å gjøre prosjekter med CLT og limtre så billig som mulig, er det viktig å inkludere disse materialene helt fra begynnelsen. Firma A påpekte at det er en signifikant vekst i bruken av CLT og limtre i kommunale og statlige prosjekter, som sier noe om en økende aksept og etterspørsel i disse sektorene. Firma A nevnte også at prosjekter som er spesifikt designet for CLT og limtre fra starten, kan oppnå en kostnadsreduksjon opptil 3-4% sammenlignet med tradisjonelle byggemetoder. Denne tidlige integreringen kan derfor spille en avgjørende rolle i å oppnå lave totalpriser for Design 1 og Design 2. Firma B nevnte at utviklingen av modulbygg og systemer som benytter fabrikkerte CLT moduler. Selv om dette er i en tidlig fase, kan bruken av slike moduler føre til betydelig kostnadsbesparelser ved å minimere etterarbeid og forbedre byggetidsrammene.

8.3.4. Usikkerheter i kostnadsestimater

Når det gjelder kostnadsestimater, er usikkerheter en viktig faktor, spesielt med hensyn til prissvingninger på materialer som treverk sammenlignet med stål. Byggebransjen har opplevd stor ustabilitet i prisene de siste årene, med ekstreme prissvingninger fra 2021 til 2022. Konsernsjefen i E.A. Smith peker nemlig på dette fra Kapittel 3.8.1, at prisene på stål og trelast steg kraftig og opplevde et betydelig omsetningsfall i 2023, og marginene ble svekket, noe som viser bransjens uforutsigbarhet. Denne ustabiliteten gjør det utfordrende å forutsi kostnadene for fremtidige prosjekter. Dette betyr at kostnadsestimatene for Casebygget, Design 1 og Design 2 kan være irrelevante om 6-12 måneder på grunn av markedets ustabilitet.

8.3.5. Troverdighet

Våre resultater fra prissammenligningen gir kun et overordnet estimat, slik at man kunne finne de betydelige prisskjellene mellom våre løsninger. Prisen for Design 1 og Design 2 omfatter materialkostnader, montering, isolering, kledning og lekter, men ekskluderer leveringskostnader. Selv om materialprisene er relativt pålitelige, finnes det usikkerhetsmomenter knyttet til monteringen av Design 1 og Design 2. Under intervjuet med Firma B ble vi informert om at det var tre mann som monterte lagerbygget på Rysstad. Dette arbeidet tok åtte arbeidsdager, som tilsvarer rundt 64 timer med åtte timers arbeidsdager. Fra intervjuet med Firma C fikk vi vite at gjennomsnittsprisen for en montør er 280 kr per time, noe som gir en monteringskostnad på 53 760 kr for de tre montørene. Dette gjør at den raske monteringstiden reduserer de totale kostnadene for et reelt prosjekt.

I byggebransjen er det også flere som har mer erfaring og kunnskap om stålkonstruksjon sammenlignet med konstruksjon i CLT og limtre. Dette medfører at kostnadsestimatene for stål, altså Casebygget, har en høyere nøyaktighet, spesielt arbeid knyttet til montering. Dessuten er det en høyere risiko for uforutsette kostnader som er knyttet til manglende erfaring og kunnskap om CLT.

Usikkerheten som er knyttet til montering av CLT elementene avhenger sterkt av hvem som utfører arbeidet.

8.4. Konstruksjonstid

Her blir det presentert vår tolkning rundt konstruksjonstiden av Casebygget sammenlignet med lagerbygget Rysstad som ble bygget opp av CLT, basert på intervju med Firma B.

8.4.1. Tolkning av resultatene

Når man ser på resultatene fra Kapittel 7.8, for disse to lagerbyggene, blir det tydelig at valget av byggematerialer kan gjøre store implikasjoner for prosjektets tidsramme. Casebygget, oppført av Firma C med tradisjonelle materialer som stål-sandwichelementer, hadde en konstruksjonstid på 102 arbeidsdager, som er mer enn dobbelt så lang tid som det tok å montere lagerbygget i CLT. Lagerbygg i CLT, oppført av Firma B, ble fullført på bare 47 arbeidsdager som utgjør 46 % besparelse i byggetid, noe som viser effektiviteten av byggematerialer som CLT og limtre, der alt blir prefabrikkert.

Firma A forteller at deres prosjekter ofte får en kortere byggetid ved bruk av CLT, som er takket være store prefabrikerte elementer som gjør at man maksimerer transporteffektiviteten og minimerer behovet for omlastning på byggeplassen. Dette viser hvordan lette og store trekonstruksjoner ikke bare effektiviserer transporten, men også monteringen, ettersom man ofte får muligheten til å montere direkte fra kjøretøyene.

Firma B beskriver en mer situasjonsavhengig tilnærming, hvor de sier at selv om CLT ofte kan være raskere, kan kompleksiteten i prosjektet variere utfallet. Visse byggeprosjekter kan være mer effektivt utført med mer tradisjonelle materialer som stål og betong. De understreker dermed viktigheten av tidlig og god forhåndsplanlegging for å sikre en mer effektiv byggeprosess og unngå utfordringer senere i byggeprosessen.

Det er viktig at man setter en forsvarlig byggetid for å unngå tidspress og sikre at prosjektet fullføres innen tidsrammen. Hvis man går over den fastsatte tiden, kan det føre til betydelige økonomiske tap. Derfor er god planlegging i starten avgjørende. Jo senere endringer skjer i byggeprosessen, desto dyrere blir feilene og desto vanskeligere blir det å rette dem opp. Derfor er det viktig å sette opp milepæler underveis slik at alle involverte får oppdateringer om fremdriften. Dette bidrar til kvalitetssikring av prosjektet og gjør det mulig å identifisere og rette opp potensielle problemer før de oppstår eller blir større.

Når det gjelder sammenligning av byggetid mellom CLT og limtre, og stål-sandwichelementer, viser det seg at CLT og limtre kan bidra til en betydelig reduksjon i byggetiden. CLT og limtre sine prefabrikasjonsegenskaper tillater rask og effektiv montering på byggeplassen. Prefabrikerte elementer muliggjør en smidigere konstruksjonsprosess, ettersom komplekse detaljer kan ferdigstilles før ankomst til byggeplassen, noe som forkorter den totale byggeperioden. Dette fører til økonomiske besparelser ved redusert arbeidskraft og kortere tidsrammer for byggeprosjekter. I

tillegg reduserer CLT og limtre sin lette vekt behovet for tungt støttende stål, noe som også forkorter byggetiden ved å krevne mindre tid til grunnarbeid og fundamentoppføring.

Disse observasjonene er i tråd med tidligere funn som viser at CLT og limtre gir en raskere byggeprosess takket være produksjonen av store CLT-elementer og limtre komponenter. Selv om prosjekterings- og designfasen kan være lengre for CLT og limtre, resulterer den standardiserte produksjonen og prefabrikasjonen i betydelige tidsbesparelser i byggefasen. Fra rapporten til Kremer og Ritchie kan bruk av CLT og limtre føre til en tidsbesparelse på opptil 30 % sammenlignet med tradisjonelle byggemetoder. Ryan E. Smith rapporterer også at CLT har en gjennomsnittlig tidsbesparelse på 20 % sammenlignet med tradisjonelle byggemetoder, ved at prefabrikasjon av CLT og arbeid på byggeplass kan gjøres simultant. Funnene er i tråd med våre funn der lagerbygget i Rysstad var 46 % raskere å bygge sammenlignet med Casebygget, der lagerbygget i Rysstad til og med var over 100 m² større enn Casebygget.

Til tross for at prosjekterings- og designfasen ofte er lengre for bygg som bruker CLT og limtre sammenlignet med tradisjonelle metoder, skyldes dette at disse materialene er relativt nye og dermed ukjente for de fleste, i motsetning til stål, som er et mer kjent materiale i bransjen. På grunn av den effektive monteringsfasen, kan den samlede konstruksjonstiden reduseres betydelig. Dette er fordi de store, prefabrikkerte elementene reduserer behovet for "on-site" justeringer og byggeaktivitet. Denne tidsbesparelsen oppstår selv med en lengre prosjekteringsstid, takket være en raskere fysisk byggeprosess, som også skaper mindre arbeidsintensive aktiviteter på byggeplassen.

8.4.2. Diskusjon rundt metoden

Selv om CLT viser til en kortere konstruksjonstid, er ingen prosjekter like. Faktorer som logistikk, erfaringen til arbeidskraften, og byggets kompleksitet spiller kritiske roller. Siden lagerbygget i CLT ble montert om høsten og fullført rett før jul, unngikk prosjektet den verste perioden med snø i overgangen til 2024. I motsetning startet Casebygget sin monteringsperiode 1 januar 2024, noe som førte til betydelige problemer med snø. For å gjøre en rettfærdig sammenligning av disse to byggene, har vi valgt å trekke fra en måned fra den totale monteringsperioden for Casebygget på grunn av snøforholdene. Dermed reduseres monteringsfasen fra fem måneder til fire, som fortsatt er betydelig lengre sammenlignet med lagerbygget i CLT.

Ifølge intervjuet med Firma C ble monteringen i Casebygget gjennomført av et team på tre personer, i tillegg til en mobilkran, sett bort ifra sveisere i startfasen av monteringen. Dette viser en effektiv utnyttelse av et begrenset personell og utstyr, men det er også viktig å merke seg at selv med denne begrenset bemanningen var konstruksjonstiden for Casebygget fortsatt lengre sammenlignet med lagerbygget i CLT.

Mens for lagerbygget av CLT rapportere Firma B at det var en mer fleksibel tilnærming til bemanningen, hvor antall arbeidere varierte basert på behov og kompleksitet. De kunne operere med alt fra to til tre montører i tillegg til kranfører, og kranens rolle varierte avhengig om han var ved kranen eller sammen med montørene. Dette understreker CLT og Firma B sitt potensiale for å tilpasse ressursbruken effektivt til prosjekts krav.

Vurderingen av hvordan værforhold påvirker byggeprosjekter er en viktig erfaring for senere prosjekter, spesielt når det gjelder fuktighetskontroll for prosjekter som omhandler treverk. Det er viktig å sikre at konstruksjonen er tilstrekkelig beskyttet mot fuktighet. God planlegging i starten og timing av konstruksjonsarbeidet er avgjørende for å minimere forsinkelser. Selv med færre montører, som i tilfellet med Casebygget, kan uforutsette forhold som ekstremvær forlenge byggetiden. Dette understreker behovet for en grundig risikovurdering og planlegging i alle byggeprosjekter, uavhengig av materialvalg.

8.5. Ombruk

I dette delkapittelet blir det drøftet rundt ombruk av byggematerialer som CLT, limtre og stål, basert på intervjuene og en rapport fra Asplan Viak.

8.5.1. Tolkning av resultatene

Firma A legger vektlegger design for demonterbarhet, som støtter sirkulær økonomi og muliggjør ombruk av materialene i nye byggeprosjekter. Firma B var litt mer bekymret for utfordringer som korrosjon og varierende kvalitet på mekaniske forbindelser, noe som kan komplisere ombruksprosessen. Dette viser at potensialet for ombruk av CLT er stort, men dette krever at man har realistiske forventninger og nøye vurdering av materialenes tilstand og konstruksjonsmetoder. På stålsiden fremhever Firma C bruk av gjenvunnet materiale og produksjonsmetoder som er miljøvennlige. Firmaet har hatt erfaring med å flytte et eldre stålbygg for å skape en ny verdi av det gamle stålet i et nytt bygg.

Rapporten til Asplan Viak vektlegger ombruk og resirkulering som mulig viktige klimatiltak i byggebransjen. Potensialet for ombruk varierer mellom forskjellige materialer, der stål viser store miljøgevinster ved ombruk sammenlignet med gjenvinning, med en reduksjon i klimagassutslipp på opptil 80 %, som er store klimabesparelser. Stålets styrke-vekt-forhold gjør det egnet for lang transport uten store miljøbelastninger. Rapporten peker mot behovet for designstrategier som tillater lett demontering, som bruk av mekaniske forbindelser i stedet for sveiste.

CLT og limtre også er godt egnet for ombruk, takket være deres evne til å kunne demonteres og bearbeides med enkle verktøy. Bruken av skurer som mekaniske forbindelser styrker potensialet for demontering og remontering av konstruksjonen, dette kan være viktig i byggeprosjekter hvor fleksibilitet og tilpasningsevne er nødvendig. Transportavstander er en mulig utfordrer, der lange avstander kan veie opp miljøgevinstene fra ombruk. Slik at det kan være fordelaktig å velge mer lokale løsninger og kortreist materialer, som også styrker argumentet for å bygge med materialer som er hentet fra eller nær konstruksjonsplassen.

En sentral utfordring med ombruk er kostandene og logistikken som er involvert i demonteringen sammenlignet med tradisjonell riving. Demontering krever nøye planlegging, arbeidskraft og lagring av materialene, noe som skaper høye umiddelbare kostander. Selv om ombruk kan være dyrere på kort sikt, kan dette på lang sikt øke materialets verdighet, ved at materialet fortsatt har en verdi selv etter sin første livssyklus. Dette kan potensielt føre til endringer i hvordan materialer og ressurser blir

verdsatt i samfunnet og fremme en kultur for bærekraft og ressursbevaring. Videre understreker rapporten viktigheten av nøye planlegging for demonterbarhet for å maksimere fordelene og minimere de ekstra kostandene knyttet til lang transport og bearbeiding.

8.5.2. Diskusjon rundt metoden

Det ble brukt både kvalitative og kvantitative tilnærminger for evaluering av ombrukspotensialet til byggematerialer som CLT, limtre og stål. Intervjuene med bransjespesialistene gir en innsikt i erfaringene og de praktiske utfordringene, mens den tekniske rapporten fra Asplan Viak gir konkrete data og empirisk støtte. Begge metodene gir et helhetlig bilde av ombrukspotensialet i materialene.

Bruken av data fra ulike kilder gir indikasjoner på styrker og svakheter ved ombruk av de angitte materialene. Intervjuene fremhever praktiske eksempler på vellykket ombruk, samt utfordringer som kan komplisere ombruksprosessen. Kvantitative data fra rapporten understøtter miljøfordelene ved ombruk, men krever nøye planlegging og vurdering.

Intervjuene gir verdifull innsikt i temaet, men de representerer et synspunkt til et begrenset antall aktører. Det kan derfor være fordelaktig å utvide antallet intervjuobjekter og inkludere flere perspektiver fra ulike deler av bransjen for å bygge et mer helhetlig bilde for ombruksteamet.

Litteraturgjennomgangen har gitt konkrete info, men det er en risiko for at ikke all relevant forskning er inkludert. En enda bredere litteratursøk og funn av praktiske eksempler kan gi et bredere grunnlag for vurdering og bidrag til å validere funnene. En dypere analyse vil kunne gi mer konkrete detaljer rundt kostnader knyttet til ombruk og demonterbarheten for de gitte konstruksjonene.

9. Konklusjon

I dette kapittelet trekkes det frem konklusjoner basert på resultatene og diskusjonen i oppgaven. Forskerspørsmålet og underspørsmålene er uthevet i kursiv. Mer informasjon for spesifisering og avgrensninger er i Kapittel 4.

9.1. Forskerspørsmål

- ***Hvordan kan bygningsmaterialer som CLT og limtre i industribygg utfordre de tradisjonelle bygningsmaterialene som stål-sandwichelementer?***

CLT og limtre kan utfordre de tradisjonelle bygningsmaterialene som stål-sandwichelementer ved å tilby betydelige miljøfordeler med lavt CO₂-utslipp ved produksjon samt evnen til karbonlagring i materialet. CLT og limtre tilbyr raskere konstruksjonstid med prefabrikkerte elementer som kan redusere totalkostnadene i et prosjekt. CLT og limtre tilbyr godt inneklima og miljø samt fremme sirkulær økonomi ved ombruk og bærekraft. CLT-elementer tilbyr festepunkter overalt, noe som kan være vanskelig på sandwichelementer.

9.2. Underspørsmål

- ***Hvor mye CO₂-utslipp har bygget i CLT og limtre sammenlignet med stål-sandwich bygget?***

Bygg konstruert med CLT og limtre produserer betydelig mindre CO₂-utslipp sammenlignet med stål-sandwichelementer. Dette ser vi når vi sammenligner Design 1 med Casebygget, som er utformet nesten identisk. Det totale utslippet for Design 1 ble 146 320 kg CO₂-ekvivalenter, mens Casebygget hadde et utslipp på 232 199 kg CO₂-ekvivalentner. Dette betyr at bruk av CLT og limtre kan redusere CO₂-utslippene med omtrent 58,6 % sammenlignet med stål.

- ***Hvordan er material- og totalkostnadene samt konstruksjonstiden av CLT og limtre sammenlignet med stål-sandwichelementer?***

Material- og totalkostnadene for CLT og limtre er høyere enn for stål-sandwichelementer. Dette ser vi ved kostnadsanalysen for Design 1, hvor materialkostnadene er 22,71 % høyere enn for Casebygget, mens totalkostnadene for Design 1 er 13,4 % høyere enn for Casebygget. Når det gjelder konstruksjonstid, viser data på at bygg i CLT og limtre kan fullføres betydelig raskere. Hvor et lagerbygg i CLT ble fullført på 47 arbeidsdager, sammenlignet med Casebygget som blir ferdig etter 102 arbeidsdager.

- ***Hvilket materiale er mest ombruksvennlig av CLT og limtre eller stål-sandwichelementer?***

Både CLT, limtre og stål-sandwich har gode ombruksmuligheter, men med ulike fordeler og utfordringer. CLT og limtre er godt egnet for ombruk takket være deres evne til å kunne demonteres og bearbeides med enkle verktøy. De mekaniske forbindelsene brukt i trekonstruksjoner gjør det enklere å demontere og remontere. Stål, derimot, har den fordelen av høy styrke og kan transporteres over lange avstander uten så stor miljøpåvirkning, men ombruk av stål kan være mer utførende hvis det er sveiset i stedet for mekanisk festet samt dokumentasjon på stål konstruksjonen.

10. Anbefalinger

Her presenteres eventuelle råd til oppdragsgiver samt videre arbeid som kan gjøres.

10.1. Råd til oppdragsgiver

For å sikre optimal bruk og dokumentasjon av CLT- og limtrekonstruksjoner, anbefales det å inkludere disse materialene så tidlig som mulig i prosjekteringen. Ved å bruke mer tid på design av disse materialene i starten av et prosjekt, kan man oppnå både kostnadsbesparelser samtidig kan man redusere byggetiden betraktelig sammenlignet med andre konstruksjoner. Videre vil tidlig design for ombruk og dokumentering av konstruksjonen spille en viktig rolle ved eventuelle ombruk av bygget.

10.2. Videre arbeid

For videre arbeid kan man analysere kostnadsutviklingen over tid for CLT og limtre sammenlignet med andre materialer og se på hva slags trender som påvirker prisene. Se nærmere på hvordan etterspørsel og produksjon påvirker materialkostnadene. Gjennomføring av en detaljert kostnadsanalyse med levering, installering og andre skjulte kostnader. I form av byggetid kan man se på simuleringsverktøy for modellering og optimalisering av byggeprosessen for CLT og limtre sammenlignet med stålbygg. Ved ombruk kan man se på langtidseffektene ved ombruk av CLT og limtre sammenlignet med stål. Lage standardiserte metoder for demontering og ombruk samt teste de. Studere bruken av andre bærekraftige materialer sammen med CLT og limtre for å se på om man kan forbedre miljøprofilen til et bygg. Spre mer informasjon om bruk av CLT og limtre om fordelene sammenlignet med andre materialer til næringsdrivende aktører, slik at de blir mer åpne for endring. Til slutt kan teknologiske fremskritt innenfor robotikk og avanserte festesystemer som kan forbedre effektiviteten ved montering av CLT og limtrekonstruksjoner, som kan redusere byggetid samt øke presisjon.

11.Referanser

- [1] Regjeringen, «Godt bymiljø og bærekraftige byer,» 20 Oktober 2021. [Internett]. Available: <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/klima/innsiktsartikler-klima/bymiljo-og-barekraftige-byer/id2344800/>. [Funnet 29 03 2024].
- [2] H. R. H. B. W. J. C. Q. Jonah M. Greene, «Whole life embodied emissions and net-zero emissions potential for a mid-rise office building constructed with mass timber,» 05 12 2022. [Internett]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993722001427>. [Funnet 03 03 2024].
- [3] M. L. R. R. D. B. P. N. N. C. P. Vaibhav Kumar, «Environmental impact assessment of mass timber, structural steel, and reinforced concrete buildings based on the 2021 international building code provisions,» 05 10 2023. [Internett]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132324000374#bib57>. [Funnet 20 03 2024].
- [4] Splitkon AS, «Hvorfor bygge med massivtre?,» 2024. [Internett]. Available: <https://splitkon.no/massivtre/hvorfor-bygge-med-massivtre/>. [Funnet 20 03 2024].
- [5] Moelven, «Hvorfor kan bruk av tre bidra til å løse klimakrisen?,» 15 01 2018. [Internett]. Available: <https://www.moelven.com/no/aktuelt-og-nyheter/nyhetsarkiv/2018/hvorfor-kan-bruk-av-tre-bidra-til-a-lose-klimakrisen/>. [Funnet 03 03 2024].
- [6] Swidish Wood, «Why wood?,» [Internett]. Available: https://www.swedishwood.com/building-with-wood/construction/why_wood/. [Funnet 20 03 2024].
- [7] WoodWorks, «Sustainability,» [Internett]. Available: <https://www.woodworks.org/why-wood/sustainability/>. [Funnet 20 03 2024].
- [8] Tenk Tre, «Bedre inn klima på 1, 2, tre,» 22 April 2024. [Internett]. Available: <https://www.tenktre.no/a/bedre-inneklima-pa-1-2-tre>. [Funnet 25 April 2024].
- [9] A. A. Sørensen og C. B. Larsen, *Egen kilde/egen produserte bilder/egen skrevet tekst*, Grimstad: Andrej, Casper, 2024.
- [10] FN Sambandet, «Parisavtalen,» 07 07 2023. [Internett]. Available: <https://fn.no/avtaler/miljoe-og-klima/parisavtalen>. [Funnet 03 03 2024].
- [11] Miljødirektoratet, «5.Klima,» Miljøstatus, [Internett]. Available: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/miljomal/klima/>. [Funnet 02 03 2024].
- [12] Grønn byggallianse, «Klimakur for bygg og eiendom,» [Internett]. Available: <https://byggalliansen.no/kunnskapssenter/publikasjoner/infopakkeklimakjempen/#1610543539401-dbff54a2-bb3d>. [Funnet 03 03 2024].
- [13] T. Keilman, «Bygger bedre kunnskap for en mer bærekraftig byggebransje,» 29 03 2023. [Internett]. Available: <https://www.forskningsradet.no/sok-om-finansiering/hvem-kan-soke-om-finansiering/naringsliv/prosjekter-naringslivet/bygger-bedre-kunnskap-for-en-mer-barekraftig-byggebransje/>. [Funnet 03 03 2024].

- [14] Norsk Stål, «REDUSER CO2- UTSLIPPENE DINE MED MILJØMETALL,» 18 05 2022. [Internett]. Available: <https://www.norskstaa.no/aktuelt/produktnyheter/reduser-co2-utslippene-dine-med-miljoemetall>. [Funnet 03 03 2024].
- [15] SINTEF, «Betong er en del av klimaløsningen,» 14 04 2020. [Internett]. Available: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2020/-betong-er-en-del-av-klimalosningen/>. [Funnet 03 03 2024].
- [16] R. C. U. S. P. T. L. S. Supriya, «Low-CO2 emission strategies to achieve net zero target in cement sector,» 13 07 2023. [Internett]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623016244>. [Funnet 03 03 2024].
- [17] M. G. J. K. S. H. P. T. F. Elise Aga, «Energi- og materialkonsept,» Asplan viak, Ålgård, 2023.
- [18] Tenk tre, «Det nytter ikke bare å plante, vi må også hogge,» 03 10 2023. [Internett]. Available: <https://www.tenktre.no/a/vi-maa-ogsaa-hogge>. [Funnet 03 03 2024].
- [19] Tekna, «7 gode grunner til å bruke tre som byggemateriale,» 29 11 2019. [Internett]. Available: <https://www.tekna.no/kurs/innhold/7-gode-grunner-til-a-bruke-tre-som-byggemateriale/>. [Funnet 03 03 2024].
- [20] Tekna, «Aktuell forskning innenfor bygg- og anleggsbransjen,» 1 Mars 2022. [Internett]. Available: <https://www.tekna.no/fag-og-nettverk/bygg-og-anlegg/byggbloggen/aktuell-forskning-innenfor-bygg--og-anleggsbransjen/>. [Funnet 29 April 2024].
- [21] Forskningsrådet, «Smart bruk av tre kan kutte store utslipp,» 15 April 2024. [Internett]. Available: <https://www.forskningsradet.no/sok-om-finansiering/hvem-kan-soke-om-finansiering/forskningsorganisasjoner/Prosjekter-forskningsorganisasjoner/smart-bruk-av-tre-kan-kutte-store-utslipp/>. [Funnet 29 03 2024].
- [22] FN-Sambandet, «Klimaendringer,» 17 Januar 2024. [Internett]. Available: <https://fn.no/tema/klima-og-miljoe/klimaendringer>. [Funnet 12 Februar 2024].
- [23] FN-sambandet, «9 Industri, innovasjon og infrastruktur,» 06 06 2023. [Internett]. Available: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/industri-innovasjon-og-infrastruktur>. [Funnet 20 03 2024].
- [24] FN-sambandet, «12 Ansvarlig forbruk og produksjon,» 02 05 2023. [Internett]. Available: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/ansvarlig-forbruk-og-produksjon>. [Funnet 20 03 2024].
- [25] FN-sambandet, «13 Stoppe klimaendringene,» 18 09 2023. [Internett]. Available: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/stoppe-klimaendringene>. [Funnet 20 03 2024].
- [26] Arbeidstilsynet, «Arbeid med sement, fersk mørtel og betong,» [Internett]. Available: <https://www.arbeidstilsynet.no/tema/kjemikalier/arbeid-med-sement-fer-sk-mortel-og-betong/>. [Funnet 25 April 2024].
- [27] Regjeringen, «Arbeidsmiljø og sikkerhet,» [Internett]. Available: <https://www.regjeringen.no/no/tema/arbeidsliv/arbeidsmiljo-og-sikkerhet/id936/>. [Funnet 25 April 2024].

- [28] NHO, «Forebygging av arbeidsulykker,» [Internett]. Available: <https://arbinn.nho.no/hms/sikkerhet-og-beredskap/Ulykker/artikler/forebygging-av-arbeidsulykker/>. [Funnet 25 April 2024].
- [29] E. Tjønneland, «estetikk,» Store Norske Leksikon, 30 November 2021. [Internett]. Available: <https://snl.no/estetikk>. [Funnet 25 April 2024].
- [30] Byggordboka, «Funksjonalitet,» 6 November 2017. [Internett]. Available: <https://www.byggordboka.no/artikkel/les/funksjonalitet>. [Funnet 25 April 2024].
- [31] H. Ø. Jakobsen, «En treby strekker seg mot himmelen,» forskning.no, 24 Juni 2013. [Internett]. Available: <https://www.forskning.no/materialteknologi-arkitektur-bygningsmaterialer/en-treby-strekker-seg-mot-himmelen/624145>. [Funnet 25 April 2024].
- [32] K. Bell, Dimensjonering av trekonstruksjoner, Bergen: Fagbokforlaget, 2017.
- [33] Trefokus, [Internett].
- [34] Moelven Limtre AS, Limtreboka, Bergen: Norske Limtreprodusenters Forening, 2015.
- [35] Moelven limtre, «Historien om Moelven Limtre AS,» [Internett]. Available: <https://www.moelven.com/no/om-moelven/byggsystemer/Moelven-Limtre-AS/historien-om-moelven-limtre-as/>. [Funnet 20 03 2024].
- [36] Moelven, «Standard limtre gran,» 01 10 2021. [Internett]. Available: <https://www.moelven.com/no/no/limtre/standard-limtre/>. [Funnet 20 03 2024].
- [37] Standard Norge, «NS-EN 14080:2013+NA:2016 Timber structures — Glued laminated timber and glued solid timber — Requirements,» 1 12 2016. [Internett]. Available: <https://online.standard.no/nb/ns-en-14080-2013na-2016>. [Funnet 20 03 2024].
- [38] Swedish Wood, «Design of timber structures Volume 1, 2 og 3,» 2022. [Internett]. Available: https://www.swedishwood.com/publications/list_of_swedish_woods_publications/design-of-timber-structures/. [Funnet 20 03 2024].
- [39] Swedish Wood, «The Glulam Handbook Facts about glulam Volume 1,» 2024. [Internett]. Available: <https://woodcampus.co.uk/glulam-handbook-volume-1/>. [Funnet 20 03 2024].
- [40] Swedish wood, «Structural elements,» [Internett]. Available: <https://www.swedishwood.com/building-with-wood/construction/wood-and-wood-based-products/structural-elements/>. [Funnet 20 04 2024].
- [41] Swedish wood, «Example structures,» [Internett]. Available: https://www.swedishwood.com/building-with-wood/about-glulam/choosing_glulam/example_structures/. [Funnet 20 03 2024].
- [42] Byggforskserien, «Planlegging av bygninger med KLT-elementer,» Mai 2023. [Internett]. Available: https://www.byggforsk.no/dokument/3009/massive_trelementer_typer_ogBruksomraader. [Funnet 18 Januar 2024].
- [43] Swedish Wood, «The CLT Handbook,» Mai 2019. [Internett]. Available: https://www.swedishwood.com/publications/list_of_swedish_woods_publications/the-clt-handbook/. [Funnet 1 Mai 2024].

- [44] TreFokus, «Hva er massivtreelementer?», [Internett]. Available: <http://www.trefokus.no/proff/artikler/a-bygge-med-tre/massivtreelementer>. [Funnet 1 Mai 2024].
- [45] Think Wood, «CROSS LAMINATED TIMBER (CLT) DESIGN + CONSTRUCTION,» - - -. [Internett]. Available: <https://www.thinkwood.com/mass-timber/cross-laminated-timber-clt>. [Funnet 20 03 2024].
- [46] Norsk stålforbund, «Stålsorter,» [Internett]. Available: <https://www.stalforbund.no/stalsorter/>. [Funnet 29 April 2024].
- [47] Octal, «S355JR/S355J0/S355J2 Steel Plate,» [Internett]. Available: <https://www.octalmetals.com/s355jr-s355j0-s355j2-steel-plate/>. [Funnet 30 April 2024].
- [48] TWI, «WHAT IS A CHARPY IMPACT TEST?,» [Internett]. Available: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-charpy-testing>. [Funnet 30 April 2024].
- [49] N. C. o. A. A.-N. Jan Ketil Solberg, «stål,» Store Norske Leksikon, 14 April 2024. [Internett]. Available: <https://snl.no/st%C3%A5l>. [Funnet 21 Januar 2024].
- [50] Norsk Stålforbund, «Miljø,» [Internett]. Available: <https://www.stalforbund.no/miljo/>. [Funnet 21 Januar 2024].
- [51] Byggforskserien, «Lette sandwichelementer i yttervegger og tak,» Høst 2007. [Internett]. Available: https://www.byggforsk.no/dokument/364/523285_lette_sandwichelementer_i_yttervegger_og_tak. [Funnet 21 Januar 2024].
- [52] E. Junker, «Byggteknisk forskrift (TEK),» Store Norske Leksikon, 28 September 2023. [Internett]. Available: [https://snl.no/Byggteknisk_forskrift_\(TEK\)](https://snl.no/Byggteknisk_forskrift_(TEK)). [Funnet 26 Januar 2024].
- [53] Arbeidstilsynet, «Byggherreforskriften,» [Internett]. Available: <https://www.arbeidstilsynet.no/hms/hms-i-bygg-og-anlegg/byggherreforskriften/>. [Funnet 30 April 2024].
- [54] T. F. o. M. R. Fred Solvik, «plan- og bygningsloven,» Store Norske Leksikon, 16 Januar 2024. [Internett]. Available: https://snl.no/plan-_og_bygningsloven. [Funnet 26 Januar 2024].
- [55] Standard Norge, «Hva er en standard?,» [Internett]. Available: <https://standard.no/standardisering/hva-er-en-standard/>. [Funnet 26 Januar 2024].
- [56] Standard Norge, «Eurokoder,» [Internett]. Available: <https://standard.no/fagomrader/eurokoder/>. [Funnet 26 Januar 2024].
- [57] Standard Norge, «NS-EN 1993 Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner,» [Internett]. Available: <https://standard.no/fagomrader/eurokoder/eurokode-3-prosjektering-av-stalkonstruksjoner/>. [Funnet 26 Januar 2024].
- [58] Standard Norge, «NS-EN 1995 Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner,» [Internett]. Available: <https://standard.no/fagomrader/eurokoder/eurokode-5/>. [Funnet 26 Januar 2024].
- [59] Standard Norge, «NS-EN 1990 Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner,» [Internett]. Available: <https://standard.no/fagomrader/eurokoder/ns-en-1990-grunnlag-for-prosjektering-av-konstruksjoner/>. [Funnet 26 Januar 2024].

- [60] Standard Norge, «NS-EN 1991 Eurokode 1: Laster på konstruksjoner,» [Internett]. Available: <https://standard.no/fagomrader/eurokoder/eurokode-1-laster-pa-konstruksjoner/>. [Funnet 30 April 2024].
- [61] S. I. Sørensen, «Dimensjoneringsprinsipp,» i *Betongkonstruksjoner, 2. utg.*, Trondheim, SINTEF, 2017, p. 99.
- [62] Byggforskserien, «Egenlaster for bygningsmaterialer, byggevarer og bygningsdeler,» August 2013. [Internett]. Available: https://www.byggforsk.no/dokument/215/egenlaster_for_bygningsmaterialer_byggevarer_og_bygningsdeler#i1. [Funnet 26 Januar 2024].
- [63] Store norske leksikon, «Nyttelast,» 07 06 2021. [Internett]. Available: https://snl.no/nyttelast_-_byggteknikk. [Funnet 20 03 2024].
- [64] Byggforskserien, «Snølast på tak. Dimensjonerende laster,» Vår 2003. [Internett]. Available: https://www.byggforsk.no/dokument/216/snoelast_paa_tak_dimensjonerende_laster. [Funnet 26 Januar 2024].
- [65] Standard Norge, «NS-EN 1991-1-3:2003+NA:2008,» [Internett]. Available: <https://online.standard.no/nb/ns-en-1991-1-3-2003na-2008-2>. [Funnet 26 Januar 2024].
- [66] K. Harstveit, «vindlast,» Store Norske Leksikon, 22 September 2020. [Internett]. Available: <https://snl.no/vindlast>. [Funnet 1 Mai 2024].
- [67] Byggforskserien, «Vindlaster på bygninger,» Vår 2003. [Internett]. Available: https://www.byggforsk.no/dokument/3118/vindlaster_paa_bygninger. [Funnet 26 Januar 2024].
- [68] B. P. o. T. N. Haakon Haraldsen, «karbondioksid,» Store Norske Leksikon, 22 Januar 2024. [Internett]. Available: <https://snl.no/karbondioksid>. [Funnet 12 Februar 2024].
- [69] K. O. o. B. Lahn, «CO2-ekvivalenter,» Store Norske Leksikon, 9 Januar 2020. [Internett]. Available: <https://snl.no/CO2-ekvivalenter>. [Funnet 10 Mai 2024].
- [70] Norsk Stål, «Stålproduksjon i dag,» [Internett]. Available: <https://www.norskstaal.no/om-oss/miljoe-og-baerekraft/staalproduksjon-i-dag>. [Funnet 12 Februar 2024].
- [71] Nordic Steel, «Nordic Steel tilbyr grønt stål: En løsning for en mer bærekraftig verden,» [Internett]. Available: <https://www.nordicsteel.no/fagartikler/tilbyr-gront-stal>. [Funnet 12 Februar 2024].
- [72] O. G. S. L. H. H. E. G. C. B. H. Swaroop Atnoorkar, «Carbon intensity of mass timber materials: impacts of sourcing and transportation,» *frontiers*, 19 Januar 2024. [Internett]. Available: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2023.1321340/full>. [Funnet 23 Mars 2024].
- [73] Timber-Online.net, «The biggest CLT manufacturers in Central Europe,» 2023. [Internett]. Available: <https://www.timber-online.net/blog/biggest-clt-producers.html>. [Funnet 15 Mai 2024].
- [74] Splitkon, «Produksjon av massivtre,» [Internett]. Available: <https://splitkon.no/massivtre/hvordan-produseres-massivtre/>. [Funnet 15 Mai 2024].
- [75] PEFC, «Spørsmål-svar,» [Internett]. Available: <https://pefc.no/sporsmaal-svar>. [Funnet 23 Mars 2024].

- [76] TreFokus, «Hvorfor er tre et miljøvennlig byggemateriale?», [Internett]. Available: <http://www.trefokus.no/treveilederen/temaer/miljo-og-berekraft/hvorfor-er-tre-et-miljovennlig-byggemateriale->. [Funnet 12 Februar 2024].
- [77] Svanemerket, «Sirkulær økonomi», [Internett]. Available: <https://svanemerket.no/miljo/sirkulaer-okonomi/>. [Funnet 12 Februar 2024].
- [78] Sirken , «Hva er forskjellen mellom ombruk og gjenbruk?», 8 Mars 2023. [Internett]. Available: <https://sirken.no/node/77>. [Funnet 23 April 2024].
- [79] Sirken , «Hva er Ombruk?», 23 Februar 2023. [Internett]. Available: <https://sirken.no/node/76>. [Funnet 23 April 2024].
- [80] T. Karlsen, «miljøsertifisering - bygg og anlegg», Store Norske Leksikon, 23 November 2023. [Internett]. Available: https://snl.no/milj%C3%B8sertifisering_-_bygg_og_anlegg. [Funnet 15 Februar 2024].
- [81] LCA.no, «Hva er LCA?», [Internett]. Available: <https://old.lca.no/hva-er-lca/>. [Funnet 15 Februar 2024].
- [82] A. S. N. O. D. M. S. I. o. M. F. Christian Solli, «BYGGEMATERIALER, TID OG KLIMA», EPD-Norge , 2016.
- [83] NORSUS, «De ulike trinnene i LCA og hvordan NORSUS jobber med disse», [Internett]. Available: <https://norsus.no/de-ulike-trinnene-i-lca-og-hvordan-norsus-jobber-med-disse/>. [Funnet 15 Februar 2024].
- [84] T. S. W. Plesser, «Hvordan prosjektere miljøvennlig med livsløpsvurdering (LCA)», 26 Juni 2015. [Internett]. Available: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2015/hvordan-prosjektere-miljovennlig-med-livslopsvurde/>. [Funnet 15 Februar 2024].
- [85] EPD-Norge, «Hva er en EPD?», [Internett]. Available: <https://www.epd-norge.no/hva-er-en-epd/>. [Funnet 16 Februar 2024].
- [86] EPD-Norge, «Hvilke typer EPDer finnes og hvordan er de forskjellige?», [Internett]. Available: <https://www.epd-norge.no/getfile.php/1321663-1637233134/Dokumenter/Hvilke%20typer%20EPDer%20finnes%20og%20hvordan%20er%20de%20forskjellige%20korr181121.pdf>. [Funnet 16 Februar 2024].
- [87] Miljødirektoratet, «Miljøstyring og miljøsertifisering», 15 September 2023. [Internett]. Available: <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/for-myndigheter/kutte-utslipp-av-klimagasser/klima-og-energitiltak/miljostyring-miljosertifisering/>. [Funnet 19 Mai 2024].
- [88] Miljøfyrtårn, «Miljøsertifiseringer», 2023. [Internett]. Available: <https://www.miljofyrtarn.no/virksomhet/om-oss/dette-er-miljofyrtarn/miljosertifiseringer/>. [Funnet 19 Mai 2024].
- [89] bre, «BREEAM certification from BRE», [Internett]. Available: <https://bregroup.com/products/breeam/>. [Funnet 19 Februar 2024].
- [90] Grønn Byggallianse, «Nysgjerrig på BREEAM-NOR?», Grønn byggallianse, [Internett]. Available: <https://byggalliansen.no/sertifisering/om-breeam/nysgjerrig-pa-breeam-nor/>. [Funnet 19 Februar 2024].

- [91] Standard Norge, «Klimagassberegninger for bygninger – NS 3720,» [Internett]. Available: https://standard.no/fagomrader/energi-og-klima-i-bygg/bygningsenergi/klimagassberegninger/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwouexBhAuEiwAtW_Zx1msX6s0FXt3e-2-ZiYEC5-2TLCPrTVKmwsvZolGgIluj7pgCpQErhoCLOcQAvD_BwE. [Funnet 2 Mai 2024].
- [92] Forsvarsmateriell, «Kostnadsestimering,» Prinsix, [Internett]. Available: <https://www.fma.no/prinsix/kunnskapsomrader/kostnadsledelse/kostnadsestimering>. [Funnet 19 Februar 2024].
- [93] Project Management Skills, «Project Cost Estimating Tools & Techniques,» [Internett]. Available: <https://www.project-management-skills.com/project-cost-estimating.html>. [Funnet 19 Februar 2024].
- [94] Norsk Byggebransje, «Ny studie sammenligner kostnader ved betong- og trebygg,» Norsk byggebransje, 20 Oktober 2022. [Internett]. Available: <https://norskbyggebransje.no/nyheter/betong-vs-massivtre>. [Funnet 19 Februar 2024].
- [95] Trafikksikkerhetshåndboken, «4.30 Tunge godsbiler: Type, vekt og størrelse,» 2022. [Internett]. Available: <https://www.tshandbok.no/del-2/4-kjoeretoeyteknikk-og-personlig-verneutstyr/4-30-regulering-av-vekt-og-storrelse-for-tunge-kjoretoy/>. [Funnet 5 Mai 2024].
- [96] H. Berglihn, «Etter blytungt år i byggebransjen: – Dette kan eksplodere,» Dagens Næringsliv, 3 Februar 2024. [Internett]. Available: <https://www.dn.no/bygg-og-anlegg/stal/byggevarer/e-a-smith/etter-blytungt-ar-i-byggebransjen-dette-kan-eksplodere/2-1-1584803>. [Funnet 15 Mai 2024].
- [97] Sfs BA, «VEILEDER FOR BEREGNING AV TILSTREKkelig OG FORSVARLIG BYGGETID,» [Internett]. Available: <https://sfsba.no/verktoy/veileder-for-beregning-av-tilstrekkelig-og-forsvarlig-byggetid/#2-1>. [Funnet 19 Mai 2024].
- [98] Rambøll, «Hvorfor bygge i massivtre?,» [Internett]. Available: <https://c.ramboll.com/no-no/massivtre-hvorfor-bygge-i-massivtre>. [Funnet 19 Februar 2024].
- [99] Tom, *Diverse tegninger fått av byggherren på mail*, Kristinansand: PA MUR, 2024.
- [100] StruSoft Logo, «Structural Analysis Software | FEM-Design,» [Internett]. Available: <https://strusoft.com/software/3d-structural-analysis-software-fem-design/>. [Funnet 21 Februar 2024].
- [101] Autodesk, «About Revit,» [Internett]. Available: <https://help.autodesk.com/view/RVT/2023/ENU/?guid=GUID-D8835F8E-1330-4DBC-8A55-AF5941056C58>. [Funnet 21 Februar 2024].
- [102] One Click LCA, «About One Click LCA,» [Internett]. Available: <https://oneclicklca.com/company/about-us>. [Funnet 21 Februar 2024].
- [103] Microsoft, «Microsoft office 365,» 2010. [Internett]. Available: <https://www.microsoft365.com/>. [Funnet 2024].
- [104] S. Grønmo, «forskningsmetode - samfunnsvitenskap,» Store Norske Leksikon , 10 Mai 2021. [Internett]. Available: https://snl.no/forskningsmetode_-_samfunnsvitenskap. [Funnet 23 Februar 2024].

- [105] S. Grønmo, «kvantitativ metode,» Store Norske Leksikon, 16 Januar 2023. [Internett]. Available: https://snl.no/kvantitativ_metode?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw48-vBhBbEiwAzqrZVJ-ezaFLpT89Wg-FMIgliopeg8wl-SRbeVBfUu3L-K50txPBnnOswxoC95sQAvD_BwE. [Funnet 23 Februar 2024].
- [106] S. Grønmo, «kvalitativ metode,» Store Norske Leksikon, 16 Januar 2023. [Internett]. Available: https://snl.no/kvalitativ_metode?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw48-vBhBbEiwAzqrZVL5MY554fikT4eFrxoovcHEeN2HTYGgZAA_rpXAmVO19ZXj88z8MehoCv4YQAvD_BwE. [Funnet 23 Februar 2024].
- [107] E. Bolstad, «triangulere,» Store norske leksikon, 15 Desember 2020. [Internett]. Available: <https://snl.no/triangulere>. [Funnet 1 Mai 2024].
- [108] E. Ørstavik, «triangulering,» Store Norske Leksikon, 17 Desember 2020. [Internett]. Available: <https://snl.no/triangulering>. [Funnet 26 Februar 2024].
- [109] norstat, «Primær og sekundær markedsundersøkelse,» [Internett]. Available: <https://norstat.co/no/markedsundersokelser/primaer-sekundaer/>. [Funnet 1 Mai 2024].
- [110] Strategi- og analyseforeningen, «Sekundærdata,» [Internett]. Available: <https://www.analysen.no/sekundaerdata/>. [Funnet 1 Mai 2024].
- [111] F. Svartdal, «fagfelle vurdering,» Store norske leksikon, 10 01 2021. [Internett]. Available: <https://snl.no/fagfelle vurdering>. [Funnet 07 03 2024].
- [112] P. D. K. & L. Ritchie, «• Understanding Costs and Identifying Value in Mass Timber Construction: Calculating the 'Total Cost of Project' (TCP),» 01 10 2018. [Internett]. Available: https://www.researchgate.net/publication/328080594_Understanding_Costs_and_Identifying_Value_in_Mass_Timber_Construction_Calculating_the_'Total_Cost_of_Project'_TCP. [Funnet 10 04 2024].
- [113] G. G. T. R. & B. H.-D. Ryan E. Smith, «Mass timber: evaluating construction performance,» 20 02 2017. [Internett]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17452007.2016.1273089?needAccess=true>. [Funnet 16 04 2024].
- [114] M. Moe, «Intervju som metode,» DinTranskribent, 28 Juni 2021. [Internett]. Available: <https://www.dintranskribent.no/intervju-som-metode/>. [Funnet 1 Mars 2024].
- [115] Prosperastiftelsen, «Slik lager du en intervjuguide,» [Internett]. Available: <https://prosperastiftelsen.no/verktoy/slik-lager-du-en-intervjuguide>. [Funnet 1 Mars 2024].
- [116] Sikt, «Sjekkliste for utfylling av meldeskjema,» [Internett]. Available: <https://sikt.no/tjenester/personverntjenester-forskning/fylle-ut-meldeskjema-personopplysninger/sjekkliste-utfylling-av-meldeskjema>. [Funnet 15 Mars 2024].
- [117] Teksta.no, «Enkel og rask automatisk transkribering.,» 2024. [Internett]. Available: <https://teksta.no/>. [Funnet 20 Mars 2024].
- [118] S. D. o. S. Grønmo, «kauslighet,» Store Norske Leksikon, 11 August 2021. [Internett]. Available: <https://snl.no/kauslighet>. [Funnet 11 Mars 2024].
- [119] L. F. H. Svendsen, «årsak,» Store Norske Leksikon, 31 Oktober 2019. [Internett]. Available: <https://snl.no/%C3%A5rsak>. [Funnet 11 Mars 2024].

- [120] M. S. Sagdahl, «grunn,» Store Norske Leksikon, 15 Februar 2021. [Internett]. Available: <https://snl.no/grunn>. [Funnet 11 Mars 2024].
- [121] Direktoratet for byggkvalitet, «Veileder for utarbeidelse av klimagassregnskap,» 1 Juli 2022. [Internett]. Available: https://www.dibk.no/globalassets/byggteknisk-forskrift-tek17/klimagassregnskap_veileder_01.07.2022.pdf. [Funnet 29 April 2024].
- [122] S. Masson, «Norge - NS 3720 Klimagassverktøyet One Click LCA,» One Click LCA, 2022. [Internett]. Available: <https://oneclicklca.zendesk.com/hc/en-us/articles/360014964920-Norge-NS-3720-Klimagassverkt%C3%B8yet-One-Click-LCA>. [Funnet 1 Mai 2024].
- [123] Byggindustrien, «Dette er de største byggevareaktørene i Norge,» 08 03 2022. [Internett]. Available: <https://www.bygg.no/dette-er-de-storste-byggevareaktorene-i-norge/1492787/>. [Funnet 10 04 2024].
- [124] EPD-Norge, «Hunton Trefiberisolasjon Plate™,» Hunton, 6 Juli 2020. [Internett]. Available: <https://oneclicklcaapp.com/app/sec/util/getEpdFile?resourceId=nepdTrefiberisolasjonPlate&profileId=HuntonFiber2020>. [Funnet 18 Mai 2024].
- [125] EPD-Norge, «Innfarget kobberimpregnert kledning i kl AB,» Moeleven, 12 Desember 2022. [Internett]. Available: https://oneclicklcaapp.com/app/sec/util/getEpdFile?resourceId=nepd_WoodenCladding_NEPD-4103-3120-NO&profileId=MoelvenIndustrierAsa2022. [Funnet 18 Mai 2024].
- [126] EPD-Norge, «Konstruksjonsvirke av gran,» ESAS, 14 Desember 2022. [Internett]. Available: https://oneclicklcaapp.com/app/sec/util/getEpdFile?resourceId=nepdConstructionTimber_Stangeskovene_NEPD39232885NO&profileId=Stangeskovene2022. [Funnet 18 Mai 2024].
- [127] One Click LCA, «Dine prosjekter,» [Internett]. Available: <https://oneclicklcaapp.com/main/>. [Funnet 15 Mars 2024].
- [128] H. B. M. B.-W. G. F. T. R. D. U. S. G. W. L. Y. P. F. D. D.-T. J. A. P. D. P. L. O. S. Michael H. Ramage, «The wood from the trees: The use of timber in construction,» 2017.
- [129] FN-Sambandet, «Ansvarlig forbruk og produksjon,» 2 Mai 2023. [Internett]. Available: <https://fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/ansvarlig-forbruk-og-produksjon>. [Funnet 15 Januar 2024].
- [130] FN-Sambandet, «Stoppe klimaendringene,» 18 September 2023. [Internett]. Available: <https://fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/stoppe-klimaendringene>. [Funnet 15 Januar 2024].
- [131] FN-Sambandet, «Industri, innovasjon og infrastruktur,» 6 Juni 2023. [Internett]. Available: <https://fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/industri-innovasjon-og-infrastruktur>. [Funnet 15 Januar 2024].
- [132] N. Christensen, «legering,» Store Norske Leksikon, 28 Mai 2021. [Internett]. Available: <https://snl.no/legering>. [Funnet 21 Januar 2024].
- [133] Direktoratet for byggkvalitet, «§ 11-1. Sikkerhet ved brann,» [Internett]. Available: <https://www.dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/11/i/11-1>. [Funnet 1 Februar 2024].
- [134] Direktoratet for byggkvalitet, «§ 11-2. Risikoklasser,» [Internett]. Available: <https://www.dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/11/i/11-2>. [Funnet 1 Februar 2024].

- [135] Direktoratet for byggkvalitet, «§ 11-3. Brannklasser,» [Internett]. Available: <https://www.dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/11/i/11-3>. [Funnet 1 Februar 2024].
- [136] Microsoft 365, «Produktivitetsskyen du kan bruke både privat og til jobben,» [Internett]. Available: <https://www.microsoft.com/nb-no/microsoft-365/microsoft-office>. [Funnet 21 Februar 2024].
- [137] Standard Norge , «Referansevindhastighet vb,0 for kommunene,» [Internett]. Available: <https://fig.ol.no/~atso0701/NS%20tabeller/NS-EN%201994-1-1%20tab.%20NA.4.pdf>. [Funnet 12 Mars 2024].
- [138] Strusoft AB, «User Manual,» 28 04 2022. [Internett]. Available: <https://wiki.fem-design.strusoft.com/xwiki/wiki/wiki.fem-design.strusoft.com/view/Manuals/User%20Manual/>. [Funnet 01 03 2024].
- [139] Splitkon, «Massivtre fra Splitkon,» [Internett]. Available: <https://splitkon.no/massivtre/#produksjon>. [Funnet 29 April 2024].
- [140] Presto, «Notch Test With Charpy Impact Tester,» [Internett]. Available: <https://www.prestogroup.com/articles/notch-test-with-charpy-impact-tester/>. [Funnet 30 April 2024].
- [141] Brannkonsult AS, «BRANNPROSJEKTERING – ENKELT FORKLART,» [Internett]. Available: <https://brannkonsult.no/brannprosjektering/>. [Funnet 30 April 2024].
- [142] Byggforskserien , «Brannsikkerhet for bygninger i bruk,» September 2020. [Internett]. Available: https://www.byggforsk.no/dokument/624/brannsikkerhet_for_bygninger_i_bruk?pk_campaign=DSA-RLSA&pk_kwd=&pk_source=google&pk_medium=cpc&gad_source=1&gclid=CjwKCAjwrcKxBhBMEiwAIVF8rPIUAyOcM-qBBoaqZoVpoSthSdbqVr66Q2CT3XQLkWne8LRwSd9esRoCqz0QAvD_BwE. [Funnet 30 April 2024].
- [143] KLH, «KLH designer,» 05 2022. [Internett]. Available: <https://www.klh.at/en/software-tools/>. [Funnet 05 04 2024].
- [144] Autodesk Inc, «One Click LCA for Autodesk® Revit®,» 7 12 2016. [Internett]. Available: <https://apps.autodesk.com/RVT/en/Detail/Index?id=3065869958781255107&applang=en&os=Win64>. [Funnet 10 04 2024].
- [145] S. Masson, «How to Check If Your EPD is Valid? (For inclusion in One Click LCA),» One Click LCA, 2023. [Internett]. Available: <https://oneclicklca.zendesk.com/hc/en-us/articles/360015064799-How-to-Check-If-Your-EPD-is-Valid-For-inclusion-in-One-Click-LCA>. [Funnet 4 Mai 2024].
- [146] J. F. Roberto Crocetti, Limtreboka, Norske Limtreprodusenters Forening, 2015.

12. Vedlegg

- Vedlegg A - Tegninger av Casebygget
- Vedlegg B - Loggbok
- Vedlegg C - Sikt Vurdering og Meldeskjema
- Vedlegg D - Samtykkeskjema for intervjuene
- Vedlegg E - Intervjuguide for Firma, B og C
- Vedlegg F - Intervjuer, Spørsmål og svar
- Vedlegg G - Nøkkelkommentarer fra intervjuene
- Vedlegg H - Lastberegning, Snø- og Vindlast
- Vedlegg I - Oppbygning FEM-Design
- Vedlegg J - Lastgrupper og lastkombinasjoner fra FEM-Design
- Vedlegg K - Søyler, bjelke og CLT dimensjoner fra FEM-Design
- Vedlegg L - Oppbygning Revit
- Vedlegg M - Oppbygning klimagassberegning
- Vedlegg N - Budsjett for Casebygget, Design 1 og Design 2
- Vedlegg O - Mest belastede komponenter fra FEM-Design
- Vedlegg P - A3-poster