



DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTETET
BACHELOROPPGAVE

Studieprogram/studieretning: Byggingeniør- Konstruksjonsteknikk	Vår 2023 Åpen
Forfatter: Mathias Hovda Helene Kay Lun Guan	<i>Mathias Hovda</i> <i>Helene K.L. Guan</i>
Fagansvarlig ved UiS: Mudiyan Nirosha Damayanthi Adasooriya Veileder: Mudiyan Nirosha Damayananthi Adasooriya Ekstern veileder: Kenneth Hatlestad	
Tittel på oppgaven: Hvordan ivareta forsvarlig ressursbruk i høybygg av massivtre? Engelsk tittel: How to ensure sustainable use of resources in high-rise buildings of CLT?	
Studiepoeng: 20 poeng	
Emneord: BYGKBAC	Sidetall: 90 + vedlegg/annet: 1 Stavanger, mai 2023

Sammendrag

Denne bacheloroppgaven undersøker hvordan ressursbruk i høybygg av massivtre kan ivaretas på en forsvarlig måte. Gjennom flere sammenligninger blir det undersøkt hvor mye materiale som kreves i høybygg for varierende antall etasjer. Videre blir det vurdert fra et økonomisk perspektiv hvilke kostnader og ressurser som kreves. For å utføre analysene er byggene designet i Autodesk Revit, og mengder er deretter hentet ut fra Solibri for å få oversikt over kostnader, monterings- og klimagassutslipp. For å undersøke materialbehovet for dimensjonering av høybygg er Calculatis fra Stora Enso også benyttet.

Litteraturgjennomgangen viser at byggemetoden med massivtre fremdeles er under utvikling, og mangel på kunnskap har ført til at metoden ikke har etablert seg i markedet i like stor grad som tilsvarende byggematerialer slik som stål og betong. Bruk av massivtre som byggemethode krever god kunnskap om materialet og det er essensielt at kravene for å opprettholde bæreevne oppfylles.

Bruken av massivtrekonstruksjoner som et alternativ til tradisjonelle materialer i høye bygninger vinner stadig større popularitet. Denne trenden kan primært tilskrives økende oppmerksomhet rundt mer bærekraftige løsninger. Imidlertid er det viktig å erkjenne at bruken av massivtre alene i høye bygg ikke alltid resulterer i gunstige utfall med hensyn til totaløkonomi og klimautslipp. Dette skyldes hovedsakelig behovet for overdimensjonering av konstruksjonen for å sikre at bygningsdelene kan bære den nødvendige belastningen. Som et resultat av dette øker byggekostnadene og det oppstår ugunstige klimaeffekter. Overdimensjoneringen av høye konstruksjoner motvirker lønnsomheten ved å bygge med massivtre og påvirker forvaltningen av ressurser.

Analysen utført i denne studien anbefaler en maksimal grense på 10 etasjer for høyhuskonstruksjoner laget av massivtre. Dersom bygningens høyde overskrider dette, anbefales det å vurdere alternative løsninger. En slik begrensning vil medføre redusert bruk av materialer og bidra til positive miljøeffekter. En potensiell alternativ tilnærming kan være å kombinere massivtrekonstruksjoner med andre materialer, for eksempel betong i de lavere etasjene. Valget av materialer vil variere avhengig av de spesifikke behovene og økonomiske rammebetingelsene knyttet til prosjektet.

Abstract

This bachelor thesis investigates how resource utilization in tall mass timber buildings can be managed in a responsible manner. Through various comparisons, the amount of material required in high-rise buildings with different numbers of floors is examined. Furthermore, an economic perspective is considered to assess the costs and resources involved. To conduct the analyses, the buildings are designed using Autodesk Revit, and quantities are extracted from Solibri to provide an overview of costs, assembly time, and greenhouse gas emissions. Calculatis from Stora Enso is also utilized to examine the material requirements for dimensioning the tall timber buildings.

The literature review indicates that the construction method using mass timber is still under development, and the lack of knowledge has hindered its establishment in the market compared to equivalent building materials such as steel and concrete. The use of mass timber as a construction material requires understanding of the material and compliance with the requirements to maintain structural integrity.

The use of mass timber constructions as an alternative to traditional materials in tall buildings is gaining increasing popularity. This trend can primarily be attributed to growing attention towards more sustainable solutions. However, it is important to acknowledge that the use of mass timber alone in tall buildings does not always result in favorable outcomes in terms of overall economics and carbon emissions. This is primarily due to the need for overdimensioning the construction to ensure that building components can bear the necessary loads. As a result, construction costs increase, and unfavorable climate impacts occur. The overdimensioning of tall constructions undermines the profitability of building with mass timber and affects resource management.

The analysis conducted in this study recommends a maximum limit of 10 floors for tall mass timber buildings. If the height of the building exceeds this limit, alternative solutions should be considered. Such a limitation would reduce material usage and contribute to positive environmental effects. One potential alternative approach could be combining mass timber constructions with other materials, such as concrete in the lower floors. The choice of materials will vary depending on the specific needs and economic constraints associated with the project.

Forord

Denne bacheloroppgaven er vår avsluttende oppgave for tre års studie på byggingeniør med en fordypning i konstruksjonsteknikk innenfor det Teknisk – Naturvitenskapelige Fakultetet ved Universitetet i Stavanger. Oppgaven ble skrevet våren 2023 sammen med Backe Rogaland AS.

Valget av oppgaven ble inspirert av vår eksterne veileder Kenneth Hatlestad som er leder kategoristyring/kategorisjef Massivtre og Modul i Backe Entreprenør AS. Problemstillingen ble valgt på bakgrunn av at vi har stor interesse for nye, bedre og muligens mer bærekraftige løsninger for utviklingen av byggebransjen. Dette er et spennende tema som markedet sakte har tatt i bruk og som stadig er under utvikling.

Vi vil takke Hatlestad for å ha bidratt med entusiastisk veiledning og sterk faglig støtte i løpet av perioden og gitt god oppfølging.

Videre ønsker vi å utlede en takk til vår veileder Mudiyan Nirosha Damayananthi Adasooriya for god veiledning og godt samarbeid i løpet av våren.

Helene Guan & Mathias Hovda
Stavanger, mai 2023

INNHOLDSFORTEGNELSE

Sammendrag	2
Abstract.....	3
Forord.....	4
1 Introduksjon	10
1.1 Bakgrunn.....	10
1.2 Klimabakgrunn	12
2 Teori.....	14
2.1 Tre som byggemateriale.....	14
2.2 Historisk utvikling og miljø.....	14
2.3 Tre som byggemateriale.....	16
2.3.1 Treets egenskaper.....	17
2.3 Limtre.....	19
2.4 Introduksjon til massivtre	20
2.4.1 Massivtreelementer	21
2.4.2 Krysslagte elementer.....	21
2.4.3 Kantstilte elementer	22
2.4.4 Hulromselementer.....	23
2.4.5 Ribbe-elementer	23
2.4.6 Fordeler med massivtre.....	26
2.4.7 Ulemper med massivtre	27
2.5 Brannteknisk	29
2.6 Fukttekniske egenskaper	32
2.7 Akustiske egenskaper i massivtrekonstruksjoner	33
2.8 Tidsbruk	37

2.9	<i>Krav til høybygg</i>	39
3.	Klima og miljø	44
3.1	Bærekraftig utvikling i høyden	44
3.2	<i>Klima og miljø</i>	45
3.3	<i>Bærekraftig økonomi</i>	46
3.4	<i>Sosiale forhold</i>	46
3.5	<i>Transport</i>	47
4.	Økonomi	47
5.	Beregning av laster	49
5.1	<i>Snølast</i>	52
5.2	<i>Vindlast</i>	52
5.3	Søyler og bjelker	54
5.4	Egenvekt yttervegger	55
5.5	Egenvekt dekker.....	55
5.6	Egenvekt tak.....	56
5.3.6	Nyttelast	57
6.	Resultat og beregning	58
6.1	<i>Metode</i>	58
6.2	<i>Søyler for hånd</i>	58
6.3	<i>Søyler med Calculatis</i>	62
6.4	<i>Bjelker for hånd</i>	63
6.5	<i>Bjelker med Calculatis</i>	67
6.6	<i>Vegger med Calculatis</i>	68
6.7	<i>Dekker med Calculatis</i>	72
6.8	<i>Dimensjoner for bygg med 10 etasjer</i>	73

7.	Dimensjonering for bygg med varierende antall etasjer	74
7.1	<i>Dimensjoner for bygg med 8 etasjer</i>	76
7.2	<i>Dimensjoner for bygg med 12 etasjer</i>	78
7.3	<i>Dimensjoner for bygg med 14 etasjer</i>	81
8.	Resultater for økonomi og klimagassutslipp	84
9.	Spørsmål til ansatte hos Backe	88
10.	Diskusjon	90
10.1	<i>Laster</i>	90
10.2	<i>Beregninger</i>	91
10.3	<i>Dimensjoner</i>	92
10.3	<i>Økonomi og klimagassutslipp</i>	94
10.4	<i>Perspektiver fra ansatte i Backe</i>	97
11.	Konklusjon	98
11.1	<i>Veien videre</i>	99
12	Litteraturliste	100
	Vedlegg A - Mengder av 10 etasjers bygg	105

Figurliste

Figur 1: Mjøstårnet til høyre (Utklipp fra Mjøstårn prospekt (DNB Eiendom, 2016)	10
Figur 2 Leilighetsbygg i Milwaukee til venstre (Daykin, u.å.).....	10
Figur 3: Bygg- og anleggssektorens klimagassutslipp (Asplan Virak, 2019)	12
Figur 4: Oppbygging av trestammen (Treteknisk, 2007).....	16
Figur 5: Livssyklusen til treprodukter.....	17
Figur 6: Krysslågt element (Treteknisk, 2006).....	21
Figur 7:Illustrasjon av et kantstilt element, tverrspent med stålstag (Treteknisk, 2006).....	22
Figur 8: Typer av hulromselementer: a) Parallell lameller b)Kryssende lameller.....	23
Figur 9: Ribbe-element; limtre er brukt som bjelkelag/avstivere under et dekke av massivtre (Splitkon)	23
Figur 10: Fremstilling av massivtreelementer (Svenskt trä, 2019).....	24
Figur 11: Forkulling av treverk.....	29
Figur 12: Sammenlikner styrkereduksjon under ulik temperatur av stål, aluminium og tre	31
Figur 13: Figuren illustrerer forskjellen i tidsbruk mellom prosjekter i massivtre og prosjekter i betong og stål. (Kremer og Ritchie 2018).....	38
Figur 14: Studentbolig i Smørbukklia Tromsø av massivtre .Totalt 13 etasjer hvor 2 etasjer er i plaststøpt betong/stål og 11 etasjer i massivtre (Woodcon, u.å).....	39
Figur 15: De tre dimensjonene for å skape bærekraftig utvikling	44
Figur 16 Eksempel for økologisk fotavtrykk av forbruk: Norge og India.....	46
Figur 17 Modellbygg for 10 etasjer	49
Figur 18 Plantegning i 2D for 10 etasjers bygg som viser plassering av bjelker, søyler og heissjakt.....	51
Figur 19 Viser stabiliseringsjekk for et bygg.....	52
Figur 20 viser vindlastene for de ulike sonene sett ovenfra.....	54
Figur 21 Eksempel på oppbygning av dekker med grus, isolasjon og flytsparkel (Svenskt Trä, 2019)	56
Figur 22 Laster på søyle.....	62
Figur 23 Designresultater i ULS på søyle, fra Calculatis.	63
Figur 24: Tverrsnitt av bjelke	65
Figur 25 Laster på bjelken	67
Figur 26 Designresultater i ULS på bjelke, fra Calculatis.....	67
Figur 27: Distribusjon av laster på dekker/tak. Viser kun det snittet av kortsiden som virker på veggen.....	68
Figur 28 Laster på vegg	70
Figur 29 Designresultater i ULS på vegg, viser det mest kritiske punktet.	71
Figur 30 Laster på dekke slik som beregnet i tabellen ovenfor, 2 bredder á 5 meter	72
Figur 31 Laster på dekke, 4 bredder á 5 meter	73
Figur 32 Mengder og pris for bygg på 8 etasjer (utklipp fra rapport).....	85
Figur 33 Mengder og pris for bygg på 10 etasjer (utklipp fra rapport).....	85
Figur 34 Mengder og pris for bygg på 12 etasjer (utklipp fra rapport).....	86
Figur 35 Mengder og pris for bygg på 14 etasjer (utklipp fra rapport).....	86

Tabelliste

Tabell 1: Oversikt over de vanligste fastehetsklassene i Norge (Øvrum og Skaug, 2007)	18
Tabell 2 :Oversikt over massivtre-leverandører i Norge. Tallene er hentet fra markedsanalysen til TreBruk AS (Lier og Aasheim, 2020) og revidert av veileder Kenneth Hatlestad.....	25
Tabell 3: Lydkrav til enkelte bygningstyper (NS 8175) med lydklasse C, minimumskrav trinnlydnivå (Glasø, 2011)	33
Tabell 4 Viser forslag til løsning av akustisk utfordring (Svensk trå, 2019).....	35
Tabell 5: Viser forslag til løsning av akustisk utfordring (Svensk trå, 2019).....	36
Tabell 6 : Viser forslag til løsning av akustisk utfordring (Svensk trå, 2019).....	36
Tabell 7: Oversikt over brannklasser (BKL) og legg merke til at alle bygninger over fem etasjer eller mer er i brannklasse 3	42
Tabell 8: Lister opp et eksempel for bygningers risikoklasse (RKL).....	42
Tabell 9: Oversikt over vindlasten for de ulike sonene	54
Tabell 10 Egenvekt dekker: total egenlast på dekkene regnes ut i tabellen.....	56
Tabell 11 Oppsummering av karakteristiske laster.....	57
Tabell 12 :Resultat av laster på søylene.....	60
Tabell 13 Laster på bjelke.....	65
Tabell 14 Distribuerte laster på vegg.....	69
Tabell 15 Punktlaster på vegg.....	70
Tabell 16 Beregnet laster på dekker.....	72
Tabell 17 Dimensjoner ved 10 etasjers bygg.....	73
Tabell 18 Søyelaster ved varierende antall etasjer.....	74
Tabell 19 Jevnt distribuerte laster på vegger ved varierende antall etasjer	75
Tabell 20 Punktlaster på vegger ved varierende antall etasjer.....	75
Tabell 21 Laster på søyler ved 8 etasjer.....	76
Tabell 22 Distribuerte laster ved 8 etasjer	77
Tabell 23 Punktlaster ved 8 etasjer	77
Tabell 24 Dimensjoner ved 8 etasjers bygg.....	78
Tabell 25 Laster på søyler ved 12 etasjer.....	78
Tabell 26 Distribuerte laster ved 12 etasjer	79
Tabell 27 Punktlaster ved 12 etasjer	80
Tabell 28 Dimensjoner ved 12 etasjers bygg.....	80
Tabell 29 Laster på søyler ved 14 etasjer.....	81
Tabell 30 Distribuerte laster ved 14 etasjer	82
Tabell 31 Punktlaster ved 14 etasjer	82
Tabell 32 Dimensjoner ved 14 etasjers bygg.....	83
Tabell 33 Oversikt over verdier for økonomi og klimagassutslipp	87
Tabell 34 Kostnad og klimagassutslipp per etasje.....	96

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Kampen om verdens høyeste trebygg har allerede blitt realisert i Ringsaker kommune i Brumunddal (2019) med et 18 etasjers høybygg på 85,4 meter kombinert av limtre og massivtre. Et ønske om å bygge bærekraftig i høyden er oppnåelig samtidig som dette beviser at tre som byggemateriale kan være et like bra materialvalg som betong og stål. Mjøstårnet speiler norske tradisjoner med trevirke som byggemateriale sammen med en nyere tankegang rundt byggemetode. Egenskapene til tre byr på uendelig mange løsninger, både som inventar og bygninger, og som alternativ til problemstillingen med klimagassutslipp.



Figur 1: Mjøstårnet til høyre (Utklipp fra Mjøstårn prospekt (DNB Eiendom, 2016)

Figur 2 Leilighetsbygg i Milwaukee til venstre (Daykin, u.å.)

Mjøstårnet er konstruert fra en bærekraftig løsning da dagens prosjekter skal være bærekraftig og materialer skal ha kort reise. Byggets hovedkomponenter er fra Ringsaker kommune. Tømmeret er sagd i Ringsaker. Limtreet, samt gulv- og veggelementer, er også fra stedet. Det er i tillegg mange faktorer å ta i betraktning når man skal bygge i høyden og en av dem er vindlasten. Ettersom trematerialet er lett, vil det føre til svingninger i toppetasjene. Dette løste byggherren, Arthur Buchardt, med å bygge ekstra tyngdebelastning i de øverste etasjene. Dekkene i de syv øverste etasjene er støpte plattendecker, men selve betongen bæres av trekonstruksjonen. Her kan også problemstillingen vår komme inn om hvor bærekraftig ressursene er forvaltet og hvor økonomisk dette er. I høybygg av tre vil det alltid være behov for å tilføre mer vekt i høyden (Hindklev, 2019).

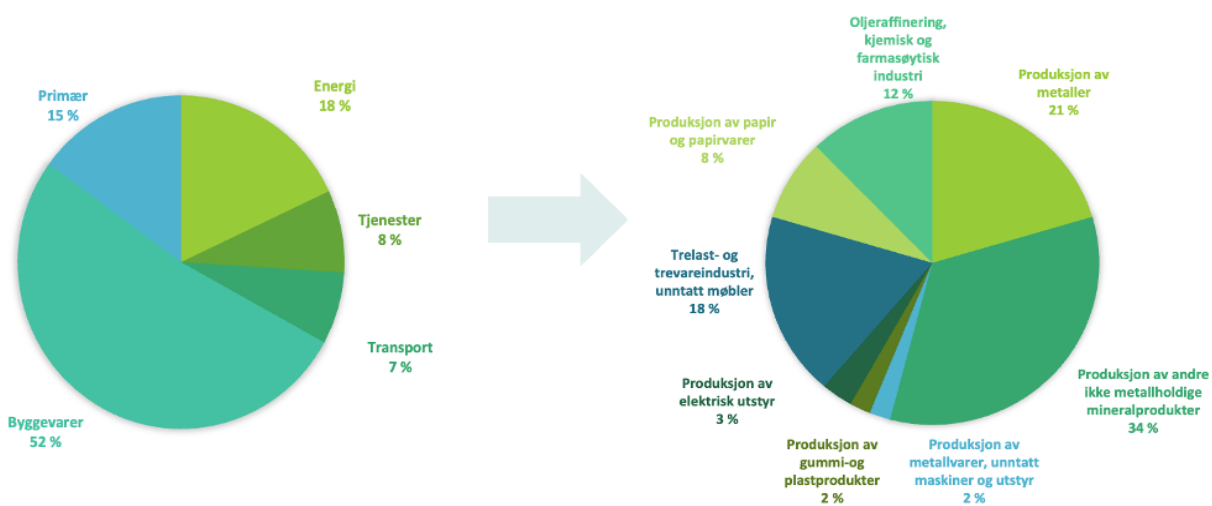
Da Mjøstårnet fikk tittelen som verdens høyeste trebygg vekket det interesse hos Korb and Associates Architects som sommeren 2022 ferdigstilte et 25 etasjers leilighetsbygg i Milwaukee (USA) med en høyde på 86,6 meter, nøyaktig én meter høyere enn Mjøstårnet. Fundamentet er bygget av betong, sammen med heis og trappesjakter for avstivning. Resten er konstruert med krysslaminert tre og limtre. Dette viser at det å bygge miljøvennlig er mulig å gjennomføre i tillegg til at det kan sette verdensrekorder som både inspirerer og vekker interesse (Carlson, 2022).

Tre som materiale er ofte forbundet med å være karbon-nøytralt, da det er en biomasse med egenskapen til midlertidig karbonlagring. En studie viser at ved å erstatte konstruksjoner over flere etasjer i stål og betong med trekonstruksjoner, vil det bidra til å redusere utslipp av drivhusgassene fra byggebransjen betydelig. Det gjøres ved å ta i bruk livsløpsanalyse for å sammenligne klimaendringene fra armerte betongkonstruksjoner med tilsvarende trekonstruksjoner i et nordisk marked for byggehøyder på 3 til 21 etasjer.

Trekonstruksjonene er dimensjonert til å tåle de samme belastningskriteriene, og selve analysen består av tre metoder med ulike analyseperspektiver, allokeringmetoder og modellering av biogen CO₂ og karbonisering av betong. Uavhengig av forutsetningene som er gjort blir det konkludert med at trekonstruksjoner fører til 34-84% lavere klimapåkjenning sammenlignet med armert betong. Det store spranget i tallforholdet skyldes ulike byggehøyder og metodiske forutsetninger (Skullestad et al., 2016).

1.2 Klimabakgrunn

Klimakrisen som blant annet kommer av menneskeskapte klimagassutslipp og bærekraftig utvikling er sentrale tema som er diskutert i samfunnet. Utviklingen skal imøtekomme dagens behov uten å frata kommende generasjoners mulighet til å dekke sine behov (FN-Sambandet, 2021). Utslipp av drivhusgassene fører til klimaendring og for å stanse dette må menneskeskapte CO₂-utslipp reduseres kraftig (FN-Sambandet, u.å.).



Figur 3: Bygg- og anleggssektorens klimagassutslipp (Asplan Virak, 2019)

Bygg- og anleggsbransjen utgjør 40% av dagens CO₂-utslipp sett i den globale sammenhengen, og med dette tilfellet vil erstatning av betong og stål med massivtre redusere mengden klimagasser som blir frigjort. Tre er et sterkt og formstabilt materiale som kan brukes til bærende konstruksjoner som tak, vegger og etasjeskiller. Massivtre kan demonteres og brukes om igjen i nye bygg, men ved gjenvinning av massivtre kan ikke lamellene deles opp på grunn av styrken i limet. Det kan derimot flises og produseres spon- og OSB-plater, samt pellets. At materialet kan gjenbrukes bidrar til å ivareta ansvarlig ressursbruk slik at det ikke brukes mer enn nødvendig, og at ressurser blir forvaltet på en forsvarlig måte (SINTEF Byggforsk, 2023).

Norge har forpliktet seg til Parisavtalen (2015) for å redusere klimagassutslippene med 50 prosent innen 2030 sammenlignet med 1990-nivået (SINTEF et al., 2020). Byggenæringen har et stort ansvar for å bidra til å nå disse klimamålene. Forslag til tiltak er å øke andelen av byggverk i tre og sette seg inn i næringens innkjøpskrav da dette har stor betydning for klimautslippet, se figur 3 (Asplan Viak, 2019).

Problemstilling:

Problemstillingen vår går ut på å undersøke hvordan man kan ivareta forsvarlig bruk av ressurser ved utbyggelse av høybygg. Forklart på en annen måte skal vi se på hvordan man kan bygge høybygg bærekraftig, både med tanke på klimaressurser og økonomiske ressurser.

1.3 Oppgavens struktur

Denne oppgaven er strukturert etter 9 hoveddeler:

- *Kapittel 2: Teori* - Oversikt for relevant bakgrunn av tre som byggemateriale, og introduksjon av massivtre og materialets egenskap.
- *Kapittel 3: Klima og miljø* - Tar for seg bærekraftig utvikling i høyden og transport av byggemateriale.
- *Kapittel 4: Økonomi* - Privat og offentlige aktører setter søkelys på å maksimere avkastning. Gir en oversikt av materialkostnader i tre ulike studier.
- *Kapittel 5: Beregning av laster* - Permanente laster og midlertidige laster.
- *Kapittel 6: Resultat og beregning* – Bruk av metode og beregning av søyler og bjelker for et varierende antall etasjer.
- *Kapittel 7: Dimensjonering* - Bygg med varierende antall etasjer.
- *Kapittel 8: Resultat* - Økonomi og klimagassutslipp.
- *Kapittel 9: Spørsmål* - Perspektiv til ansatte hos Backe om massivtre.
- *Kapittel 10: Diskusjon* – Tar for seg drøfting av resultat og beregningene.
- *Kapittel 11: Konklusjon* - Oppsummering av oppgaven, resultat og forslag til anbefalt løsning.

2 Teori

2.1 Tre som byggemateriale

Gjennom historien har tre tradisjonelt vært dominerende som ressurs i alt fra vikingskip og stavkirker, til dagens massivtreelementer i moderne høybygg. Her videreføres den gamle tradisjonen med tunge trebygninger (Store norske leksikon, 2019).

2.2 Historisk utvikling og miljø

Historisk sett er tre et byggemateriale med sterke tradisjoner i Norge. Treets mange egenskaper gjør det enkelt å bearbeide, samtidig som det har høy styrke, god isoleringsevne og ikke minst er en fornybar ressurs. Gamle håndverkstradisjoner kan sees igjen over hele landet i en rekke middelalderbygninger. Mot slutten av 1700-tallet begynte reisverksveggen å endre måten å konstruere bygninger på ved å avløse lafteveggen, noe som var materialbesparende og ga en bedre løsning for trapper og piper. Det var først i begynnelsen av 1900-tallet at bindingsverk ble normalisert og krav til varmeisolering og tetthet ble innført (Norsk Treteknisk Institutt, 2006a).

I Norge dekker skogen om lag 38% av landets areal og dermed har vi god tilgang på tre som råvare. Det meste av skogen består av bartrærne gran og furu. På grunn av de ulike vekstforholdene påvirkes også kvaliteten på de materialene som lages av trærne. Det sorteres derfor i forskjellige fasthetsklasser hvor tallene sorteres fra høyt til lav etter hvor god styrken er (Grønvold, 2019).

Miljø har blitt et viktig tema for samfunnet i dag, først og fremst knyttet til klima og CO₂-utslipp. Naturmaterialet tre går under kategorien «fornybart råstoff.» Det har liten negativ påvirkning på miljøet under produksjonen, men det er stilt krav til at råstoffet kommer fra sertifisert og bærekraftig forvaltet skog. Dette kan være FSC CoC- sertifisering og PEFC sertifisering som sikrer en pålitelig sammenheng mellom forsvarlig produksjon og forbruk, slik at det tilfredsstiller kravene til bærekraftig skogbruk og sporing gjennom alle ledd i verdikjeden (DNV, u.å.).

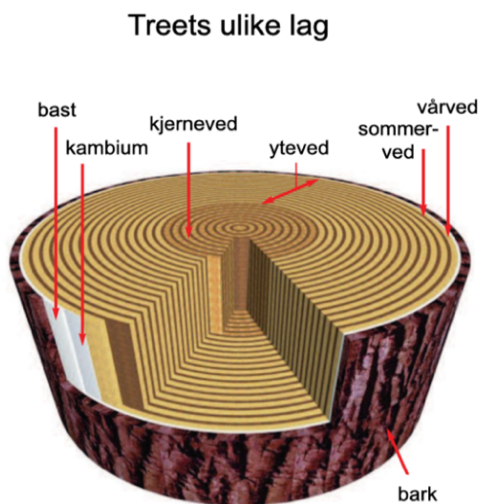
En økning i andelen byggverk (som er laget) av tre vil bidra til reduksjon av CO₂-tilførsel til atmosfæren, fordi CO₂ tas opp gjennom fotosyntesen av skog som vokser og lagrer det i trærne, og videre i trevareproduktene. Dette resulterer i en sum av positiv CO₂-effekt, da det hovedsakelig krever lite fossil energi under fremstillingsprosessen. Denne gunstige effekten er ikke tillatt å ta med i beregningene for klimaregnskapet i Norge.

Tre som materiale er et godt alternativ sammenlignet med andre produkter som gir høyere miljøbelastning. Videre er karbon som lagres i bygninger et bedre alternativ enn at skogen «dør på rot.» Det frigjøres klimavennlig bioenergi den dagen produktene ender sitt livsløp. På denne måten er tre i seg selv et energilager. På lang sikt vil satsing på økt produksjon, uttak og bruk av tre, gi et vesentlig bidrag både nasjonalt og globalt i arbeidet med å redusere nettoutslippet av klimagasser med 50—80% innen 2050 (TreFokus, 2013).

2.3 Tre som byggemateriale

Den kompliserte oppbygningen til trevirket kan ikke sammenlignes med noe annet materiale. Ethvert treslag har sin karakteristiske oppbygning, men forenklet er trevirket bygget opp av hule fibre, eller celler, med sterkt varierende form. Trestammen er delt opp i ulike soner med bark, bast, yteved, kambiet og kjerneved (*se figur 4*). De ulike sonene har forskjellige funksjoner som blant annet skal beskytte trestammen mot uttørking og skader, og transportere vann og næringsstoffer fra bladene til andre deler av treet (Skaug, 2007).

Treets oppbygning gjør at den har evnen til å brukes til både store og små konstruksjoner, og gir store arkitektoniske muligheter. I tillegg utgjør egenskapene til tre et miljøvennlig og sikkert konstruksjonsmateriale, da den også byr på gode systemløsninger i konstruksjoner og knutepunkter. Bruksområder for konstruksjonsvirke kan vanligvis være som bjelkelag, takbjelker, taksperre og stendere, samt limtre og takstoler. Utseende kommer ofte i neste rekke, da trevirket ofte bygges inn i konstruksjonen. I dag har det imidlertid blitt mer populært å bygge store konstruksjoner som broer, hus og boligblokker i tre (Øvrum & Skaug, 2007).



Figur 4: Oppbygging av trestammen (Treteknisk, 2007)

2.3.1 Treets egenskaper

Treets egenskaper gjør at tre i forhold til sin vekt er like sterkt som stål. Styrkeegenskapene for feilfritt tre avgjøres av celleveggenes tykkelse, noe som betyr at tungt tre er sterkere enn lett tre forutsatt at fuktigheten er lik. Holdbarheten til tre i tørr tilstand er meget god. Under forhold der det er rom for oppblomstring av sopp og insekter, kan det raskt brytes ned dersom det ikke er spesialbehandlet, for eksempel med treimpregnering (Böhmer et al., 2023). Styrken i materialet har også en sammenheng med fuktinnholdet. Fukten påvirker blant annet videre bearbeiding, liming og overflatebehandling (Skaug, 2007).

Per definisjon er tre brennbart, men det brenner forutsigbart og med tilnærmet konstant hastighet. Under en brann vil det etter hvert dannes et forkullet lag som beskytter det bakenforliggende og friske trevirket. Denne delen vil stort sett beholde sine stivhets- og styrkeegenskaper, og samtidig opprettholde bæring og stabilitet i konstruksjonen. Tiden til en eventuell kollaps kan beregnes ved å vurdere det resterende tverrsnittet, og på denne måten finne bæreevnen til de belastede trekonstruksjonsdelene. Dette er en forutsigbarhet som brann- og redningstjenesten ofte betrakter i brann-sammenheng, noe som gir liten risiko for uventet kollaps (Glasø, 2005).



Figur 5: Livssyklusen til treprodukter

2.3.2 Fasthetsklasser

Hver tresort har sin særpregede egenskap hvor vekstforholdet påvirker kvaliteten. Konstruksjonsvirke sorteres i forskjellige fasthetsklasser, som definert i standarden NS-EN 338, se tabell 1. De særpregede egenskapene blir listet opp i fasthetsklassen, og jo høyere tall, desto bedre er styrken. Trelast kan kun klassifiseres i fasthetsklasse etter at trevirke er sortert. Dette kan skje på to måter, enten ved å bedømme og måle en rekke egenskaper hos trelasten visuelt, eller ved hjelp av maskiner som måler stivheten ved for eksempel bøyning eller ved lydbølger. Sorteringen skjer henholdsvis etter standarden NS-EN 14081 hvor de setter krav til individmerking og åpner for CE-merking. Merkingen er en garanti for at konstruksjonsvirket tilfredsstiller myndighetens krav og at det fritt kan selges i hele EU/EØS.

Det finnes en frivillig kontrollordning der flesteparten av de store produsentene av konstruksjonsvirke i Norge er medlemmer. Formålet med dette er at de pålegger seg selv en kvalitetskontroll for å sikre at sorteringen av trelast gjennomføres riktig etter NS-INSTA 142, som er standarden for visuell sortering, og NS-EN 14081-4. Denne ordningen gjelder både visuell og maskinell sortering og kontrollen skjer minst to ganger hvert år (Øvrum & Skaug, 2007).

Tabell 1: Oversikt over de vanligste fasthetsklassene i Norge (Øvrum og Skaug, 2007)

Fasthetsklasse NS-EN 338	Bøyefasthet N/mm^2	Elastisitetsmodul kN/mm^2	Densitet kg/m^3
C14	14	7	290
C18	18	9	320
C24	24	11	350
C24	30	12	380

2.3 Limtre

Limtre er et bearbejdet treprodukt. Byggematerialet blir fremstilt ved sammenliming av enkeltbord på 20 - 50 mm tykkelse hvor fiberretningen i alle elementene går tilnærmet samme retning. Denne formen for sammensetning av trevirket gir stor styrke og formstabilitet, og åpner opp for ubegrensede former og dimensjoner. Dette gir nye muligheter for utforming av bærekonstruksjoner i tre. En vanlig metode er å fingerskjøte enkeltbordene sammen til store lengder, samtidig som det enkelt kan produseres bjelker i varierende størrelser og former (Store norske leksikon, 2023).

Limtre ble brukt allerede på slutten av 1800-tallet i Russland og Tyskland, mens massivtreelementer først ble kjent i senere tid. Etterspørselen av limtre økte under 2. verdenskrig på grunn av mangel på stål. Limtre ble blant annet brukt til diverse krigsmateriell som torpedobåter med laminerte spant kledd med kryssfinér, og av minesveipere for å unngå utløsning av magnetiske miner. I Norge kom limtreindustrien rundt 1960-tallet (Solli & Glasø, 2011). Limtre har betydelige miljømessige fordeler. Lamellene limes sammen under kontrollerte betingelser og kan lett gjenvinnes og utnyttes til energiproduksjon. Tresorten som er mest brukt i Norge er norsk gran sammen med et syntetisk lim. Da limets produksjon ikke består av fornybare råvarer vil dette påvirke miljøprofilen negativt, men på grunn av at mengden lim per volumenhet limtre er så liten (mindre enn 1 vektprosent), vil det ferdige produktet ha liten innvirkning på miljøbelastningen (Norske Limtreprodusenters forening, 2015).

I likhet med alt annet trevirke er limtre brennbart, men materialet har gode branntekniske egenskaper. Under direkte brann vil bæreevnen beholdes i lang tid da det forkullede laget vil begrense oksygentilgangen til trevirket og forsinke innbrenningshastigheten, noe som blir diskutert senere i oppgaven. Den minimale temperaturbevegelsen i trevirket sammenlignet med konkurrerende materialer som stål eller armert betong, gjør at limtre kan virke som et brannisolerende sjikt ved for eksempel innslissede knutepunktsplater av stål (Solli & Glasø, 2011).

2.4 Introduksjon til massivtre

I dagens samfunn med behov for miljøvennlige og rasjonelle konstruksjonsløsninger har utviklingen av nye byggesystemer for alvor skutt fart. Ett av disse byggesystemene er bygging med det vi kaller massivtreelementer. Utviklingen av dette begynte i Mellom-Europa på begynnelsen av 1990-tallet, og spredte seg etter hvert videre til Norden. Elementene benyttes i dag hovedsakelig ved bygging av bolighus, industribygg, barnehager og skoler, men også i fleretasjes hus opp mot 3-6 etasjer. Svalganger og balkonger har vist seg å være et meget bredt anvendelsesområde. Massivtre kan brukes i gulv, vegger og tak, både som bærende og ikke-bærende elementer. Bæresystemet kan kombineres med andre materialer som betong og stål, eller bygges opp bestående av bare massivtreelementer (Aarstad & Glasø, 2011).

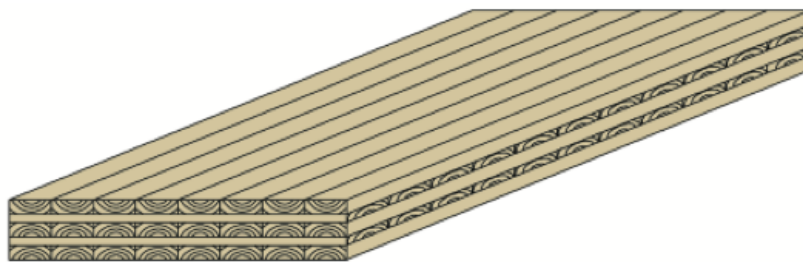
Tradisjonen med bruk av tre i konstruksjoner satte grunnlaget for utviklingen av massivtreelementer. Opprinnelig kommer utviklingen av massivtreelementer fra Canada. Omkring 1975 hadde de behov for å etablere nye og rehabilitere gamle broer. Landets rike tilgang til tømmer la grunnlaget for å ta i bruk tverrspente brodekker, hvor det teknisk sett er planker på høykant som er lagt inntil hverandre og føyd sammen ved hjelp av gjennomgående stålstag. For å kunne tåle belastningen på brodekk må oppspenningskraften fra stålstagene og senteravstanden tilpasses slik at det blir samvirke mellom plankene. På grunn av det vellykkede prinsippet med tverrspente brodekker spredde metoden seg videre til Mellom-Europa og her delte utviklingen seg i to. Den første var videreutvikling av brodekke og den andre var videreutviklingen av tverrspente elementer til bygningselementer i massivtre. På 1990-tallet ble det utviklet forskjellige metoder for å sette sammen planker til større elementer ved de tekniske høyskolene i Lausanne og Zurich i Sveits. Bygging med massivtreelementer er i dag en anerkjent metode i både Sveits, Østerrike, Tyskland. Massivtreelementer ble anvendt for første gang i Norge som etasjeskille i en enebolig i Asker i 1998 (Norsk Treteknisk Institutt, 2006a).

2.4.1 Massivtreelementer

Massivtreelementer er hele elementer som produseres ved at planker settes sammen til massive elementer ved bruk av enten lim, spiker, skruer, tredybler eller stålstag (Aarstad & Glasø, 2011). Den mest utbredte metoden er ved bruk av lim, og da benyttes vanligvis PUR-lim (Polyurethane Reactive) eller MUF-lim (Melamine-Urea-Formaldehyde). Lamellene legges i flere sjikt, eller lag, 90 eller 45 grader i forhold til hverandre. Antall sjikt, og tykkelse på disse, avhenger av elementets bruksområde og funksjon, men varierer typisk mellom 60 mm og 240 mm fordelt over 3-9 sjikt. Det finnes flere forskjellige typer massivtreelementer, noen av dem blir beskrevet under.

2.4.2 Krysslagte elementer

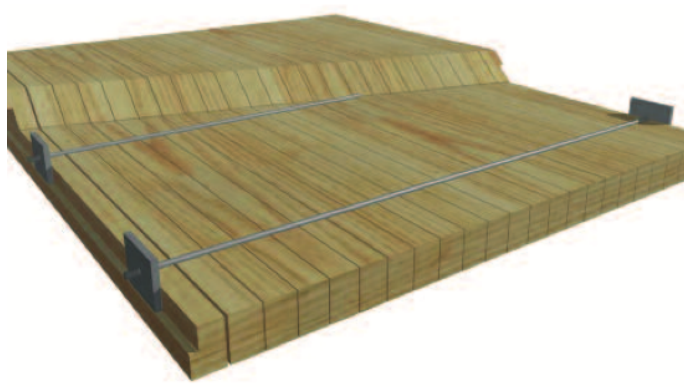
Krysslagte elementer eller flersjiktselementer er elementer som er satt sammen av lameller (planker) i flere lag, *se figur 6*. Hvert lag legges i kryss i forhold til hverandre, vanligvis i 90 eller 45 grader. Plankene i elementene bindes sammen med enten lim, spiker, skruer eller tredybler (Norsk Treteknisk Institutt, 2006a). Elementene må bestå av minst 3 lag, normalt brukes det 3, 5, 7 eller 9 lag. Kryssende fiberretning i plankene gjør elementene meget dimensjonsstabile. Dette gjør at de ikke vil kunne krympe og bevege seg særlig mye ved fuktendringer i lufta (SINTEF Byggforsk, 2023).



Figur 6: Krysslagt element (Treteknisk, 2006)

2.4.3 Kantstilte elementer

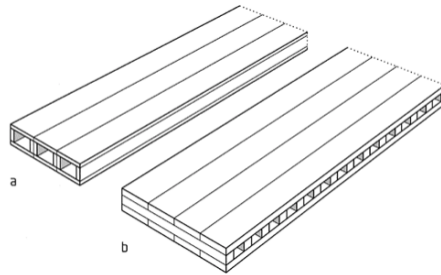
Kantstilte elementer er satt sammen av stående planker, dette vil si at plankene er stilt på høykant og føyd sammen, *se figur 7*. De bindes sammen med lim, spiker, skruer, tredybler eller stålstag. De spikrede eller skrudde elementene er enkle å lage, og kan derfor lages på byggeplassen, men de har mindre evne til å ta opp punktlaster. Elementer med tredybler og lim må derimot lages på fabrikk. De limte elementene tilsvarer limtre, men er i motsetning til limtre dimensjonert som et plant element, og kvaliteten er tilpasset dette. Stålstag eller strekkstag kan brukes ved å bore hull tvers gjennom de oppstilte plankene, føre staget gjennom og skru fra en side. Disse tverrspente elementene har god kapasitet til å ta opp punktlaster og brukes typisk som brodekke (Norsk Treteknisk Institutt, 2006a).



Figur 7: Illustrasjon av et kantstilt element, tverrspent med stålstag (Treteknisk, 2006)

2.4.4 Hulromselementer

Hulromselementer finnes i mange ulike varianter, men felles for dem alle er at de har et hulrom mellom øvre og nedre sjikt. Lamellene sammenføres med lim og kan være lagt både kryssende og parallelt i forhold til hverandre, se figur 8. Andelen av trevirke er så høy at hulromselementene karakteriseres som massivtreelementer, men de danner ikke egentlig massive tverrsnitt (SINTEF Byggforsk, 2023).



Figur 8: Typer av hulromselementer: a) Parallell lameller b) Kryssende lameller.

(SINTEF Byggforsk, 2001)

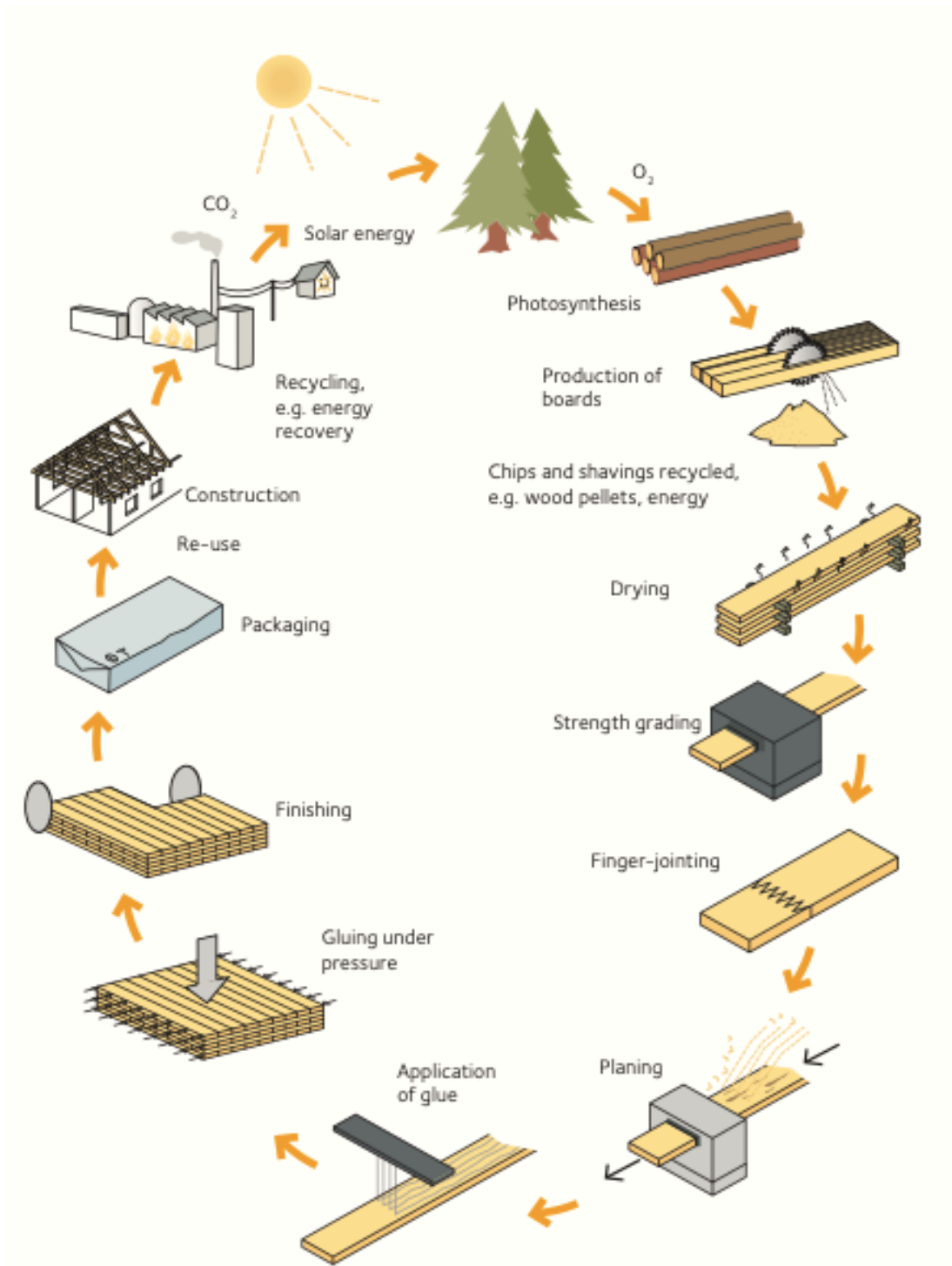
2.4.5 Ribbe-elementer

Ribbe-elementer eller samvirkeelementer er massivtreelementer med underliggende avstivere, og er typisk brukt som bærende konstruksjoner i dekker/etasjeskiller og tak, se figur 9. De er vanligvis skrudd eller limt på bjelker av tre eller limtre. Dette vil medføre økt stivhet i elementet og gir mulighet for større spennvidder (SINTEF Byggforsk, 2009).



Figur 9: Ribbe-element; limtre er brukt som bjelkelag/avstivere under et dekke av massivtre (Splitkon)

Produksjonen av massivtre foregår på stort sett samme måte som ved produksjon av limtre. Etter at modulene er laget vil man i de fleste tilfeller også bearbeide elementene (vanligvis med en CNC-maskin) i etterkant, ved å skjære ut dører og vinduer, eller ved hulltaking. Figur 9 viser en fremstilling rundt prosessen med produksjonen av massivtreelementer.



Figur 10: Fremstilling av massivtrelementer (Svenskt trä, 2019)

Man ser en stadig økende etterspørsel av massivtre både i Norge og i resten av Europa. TreBruk AS sier i sin markedsanalyse at kun ca. 3,7% i av alle nye bygg i 2020 var bygget med massivtre som bærekonstruksjon, men anslår videre at markedsandelen vil kunne stige til ca. 14,2% i 2030 (Lier & Aasheim, 2020). Selv med dagens marked klarer ikke de norske produsentene å dekke etterspørselen. I 2018 dekket kun 2 små norske produsenter (den ene har etterpå gått konkurs), ca. 4% av massivtreforbruket i Norge mens resten ble importert. I 2019 åpnet Splitkon AS verdens største massivtrefabrikk, noe som økte andelen norskprodusert massivtre til omtrent 20%. Dette forventes også å øke ytterligere i årene framover. TreBruk AS peker videre på at en etablering av ytterligere én eller to norske produsenter vil være meget gunstig for det norske markedet, og presiserer at de kun har tatt høyde for det norske markedet, men at også utenlandske markeder kan være interessant for fremtidige norske produsenter. Tabell 2 viser norske og utenlandske leverandører av massivtre som er representert i Norge.

Tabell 2 :Oversikt over massivtre-leverandører i Norge. Tallene er hentet fra markedsanalysen til TreBruk AS (Lier og Aasheim, 2020) og revidert av veileder Kenneth Hatlestad.

Produsent	Representert i Norge ved:
Norge	
Splitkon AS	Splitkon AS og Straye Trebygg AS
Norsk massivtre AS	-
Sverige	
Martinsson trä AB	Splitkon AS
Södra AB	OsloTre AS
Mellom-Europa og Baltikum	
Stora Enso	Woodcon AS
Mayr-Melnhof	Straye Trebygg AS
Binderholz	Binderholz
KLH	Massivtre AS
Züblin Timber	Moelven Limtre AS
Cross Timber Systems	Skonto Prefab og CLT Profi
Derix	ABICO AS
GK-Latvia	Ingen representant i Norge

2.4.6 Fordeler med massivtre

Massivtre er et miljømessig godt materialvalg, og det er enkelt å bygge med massivtreelementer ettersom det har stor fleksibilitet ved formgivning, planløsning og konstruksjon. Elementet er lett å kombinere med andre konstruksjonssystemer og materialer som limtre, betong, glass, stål og stein. Videre kan det formes etter ønsket geometri og kan tilpasses rasjonelt etter øvrige bygningsdeler både utvendig og innvendig. Det gir for eksempel stor fleksibilitet i forhold til planløsning ettersom massivtre kan oppta store punktbelastninger. Dette kan den på grunn av elementets bæring i to retninger som også blir kalt toveisplatevirkning. Elementet kan også brukes som avstivende skiver som virker gunstig for overføring av krefter og bidrar til stabilisering av bygget. Det åpnes dermed for nye muligheter som byr på spennende utforming og overflater.

Massivtreelementer gir god totaløkonomi forutsatt at det er planlagt som et trebygg fra dag 1 og oppfulgt av grundig detaljprosjektering. Den lave vekten og enkel montering av tekniske installasjoner gjør byggetida kort og gir et godt arbeidsmiljø. Totalkostnadene avhenger av byggetiden og er derfor viktig for totaløkonomien. En kort byggetid gir lavere riggekostander og kapitalkostnader, samt bedre likviditet for utbygger i forbindelse med å tidligere kunne motta leieinntekter. Dette vil også være positivt for naboer i området da kort byggetid resulterer i færre timer med byggestøy og ubehag (Norsk Treteknisk Institutt, 2006a).

Målt opp mot andre tradisjonelle trehus bestående av trebjelkelag og stendervegger har massivtre et større potensial når det kommer til lydisolasjon. Lydoverføring vil i teorien skje på følgende måter, enten som direkte transmisjon eller som flanketransmisjon. Massivtreelementer er et bedre alternativ med større potensial som lydisolator enn tradisjonelle bjelkelag og stendervegg. Når det gjelder brann har massivtreelementer evne til å opprettholde sine gode egenskaper i et branntilløp. Dette kommer som en følge av sin massive og tette oppbygging. Materialet vil gradvis forkalles fra brannpåkjent side og innover i elementet. I tillegg kan elementene dimensjoneres for å bevare bæreevne (R), integritet (E) og isolasjon (I) i høyeste brannklasse (Aarstad & Glasø, 2011).

2.4.7 Ulemper med massivtre

Bruk av trematerialer i byggeprosjekter gjør det enklere å redusere klimautslipp, men det er ikke alltid like hensiktsmessig å bygge med massivtreelementer i alle prosjekter. Massivtre er en relativt ny metode å bygge på, hvor materialet er komplekst og byr på andre typer utfordringer enn det man vanligvis er vant til med tanke på bygningsfysikk, brann og miljø.

Fukt er en klimapåkjønning i trekonstruksjoner som har innvirkning på elementets overflate, produksjon og materialvalg. Sopp etableres raskt ved høy fuktighet og gir stor skade på treverk. Normalt vil trefuktigheten gjennom året variere mellom omtrent 6 til 12 prosent forutsatt at det er helårsoppvarmede bygninger (Norsk Treteknisk Institutt, 2006a). Massivtreelementer leveres tørt fra fabrikken, men under byggeperioden kan elementene ta opp fuktighet. Når bygget varmes opp, kan elementene da trekke seg sammen og forårsake sprekkdannelser (Kunøe, 2019).

Årsaker til at fuktighet samles i materialet kan blant annet være direkte kontakt med betongdekker og manglende beskyttelse mot nedbør. Det kan oppstå feil i alle ledd under byggeprosessen og dette må derfor kartlegges grundig allerede i prosjekteringsfasen. For eksempel kan vannfeller oppstå hvor vann lagres istedenfor at det føres ut av konstruksjonen. Dessuten stilles det krav til beskyttelse av fukt under byggeperioden. Vindsperrer i tradisjonelle yttervegger er ikke dimensjonert for å stå ute i vind og regn i lange perioder. Ved langvarige påkjønninger fra regn kan det oppstå fuktskader på ubeskyttete vindsperrer i byggeprosessen. Da er det ikke produktet som svikter, men manglende fuktbeskyttelse som er årsaken til skade. Trematerialet må tørkes raskt opp slik at det ikke råtner. Tørt tre råtner ikke og gir derfor bygningen bedre holdbarhet (SINTEF, 2020).

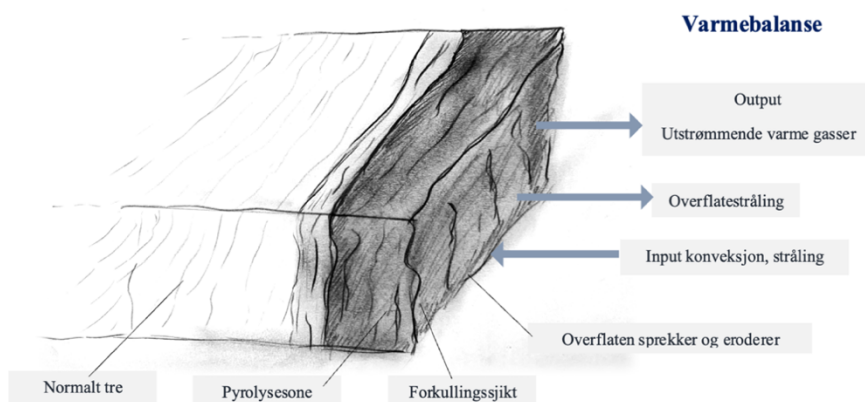
Brannsikkerheten er et utfordrende område da det er økende etterspørsel etter å benytte trekonstruksjoner i høye bygninger. I henhold til veiledningen til forskriften om tekniske krav til byggverk (TEK17 §11-4) er det ikke preakseptert å bruke brennbare konstruksjoner i brannklasse 3, som vanligvis er fem etasjer eller mer. I slike byggverk skal brannsikkerhet dokumenteres ved analyse. Det må dimensjoneres for å opprettholde bæreevnen og stabiliteten under hele brannforløpet, da en brann som involverer trekonstruksjoner kan få større konsekvenser om prosjekteringen ikke utføres tilstrekkelig. For eksempel har det blitt utført flere studier som konkluderer med at eksponert krysslaminert tre med utilstrekkelig beskyttelse kan resultere i at brannen blir mer intens, vokser raskere og varer lenger enn en brann der det eneste som kan forårsake brannen er inventaret i det brennende rommet.

Andre forhold som er viktig å tenke på er forkullingshastigheter, delaminering og selvslokking som kan ha stor innvirkning på brannutviklingen og konstruksjonens evne til å motstå dette. Dessuten er massivtre en ny metode å bygge på sammenlignet med andre tradisjonelle byggemetoder som stål og betong. Kunnskapsgrunnlaget for massivtre er fremdeles under utvikling og litteraturen viser tegn til kunnskapshull om byggemetoden og utfordringer rundt dette (Reitan et al., 2019).

2.5 Brannteknisk

Ettersom tre er et brennbart materiale, kan det også bli fullstendig ødelagt under en brann. Det vil miste alle sine mekaniske og fysiske egenskaper dersom det utsettes for en tilstrekkelig intens varme og varighet (Norske Limtreprodusenters forening, 2015). Fordelen med å benytte tre ligger dermed ikke i dens egenskap til å kunne brenne opp, men i den langsomme og forutsigbare termiske utviklingen i treet. Dette gjør at materialet kommer godt ut med sine branntekniske egenskaper.

Som man ser i *figur 12* vil andre bygningsmaterialer som stål og aluminium svekkes betydelig under en brann, mens tre vil kunne opprettholde sine bærende egenskaper over en mye lengre periode. Dette skyldes at tre brenner gradvis utenfra og innover i elementet (se *figur 11*). Det ytterste laget som blir forkullet vil være svekket eller ødelagt, men innenfor det forkullede området vil temperaturen være tilnærmet uendret.



Figur 11: Forkulling av treverk

Trevirke har omtrent 10 ganger større varmeisoleringssevne enn betong (SINTEF Byggforsk, 2023). Man antar derfor at dette området ikke har noen påvirkning fra temperaturen utenfor (brannen) og beholder derfor materialeegenskapene sine (Norske Limtreprodusenters forening, 2015). Massivtrekonstruksjoner er mindre utsatt for sammenbrudd og kollaps enn lette trekonstruksjoner, fordi de er mer robuste, og har bedre stabilitet og større bæreevne (Norsk Treteknisk Institutt, 2006b).

Varmeledningsevnen til tre er lav og gir derfor liten temperaturøkning på den kalde siden, forutsatt at konstruksjonen er tett. Tradisjonell bygging med trekonstruksjoner vil bestå av flere ulike lag og materialer, noe som øker sannsynligheten for feil ved montering. Den totale brannmotstanden kan da svekkes. Massivtreelementer på sin side, har få materialsjikt, og vil kunne bidra til en tettere og mer kompakt konstruksjon uten kritiske hulrom.

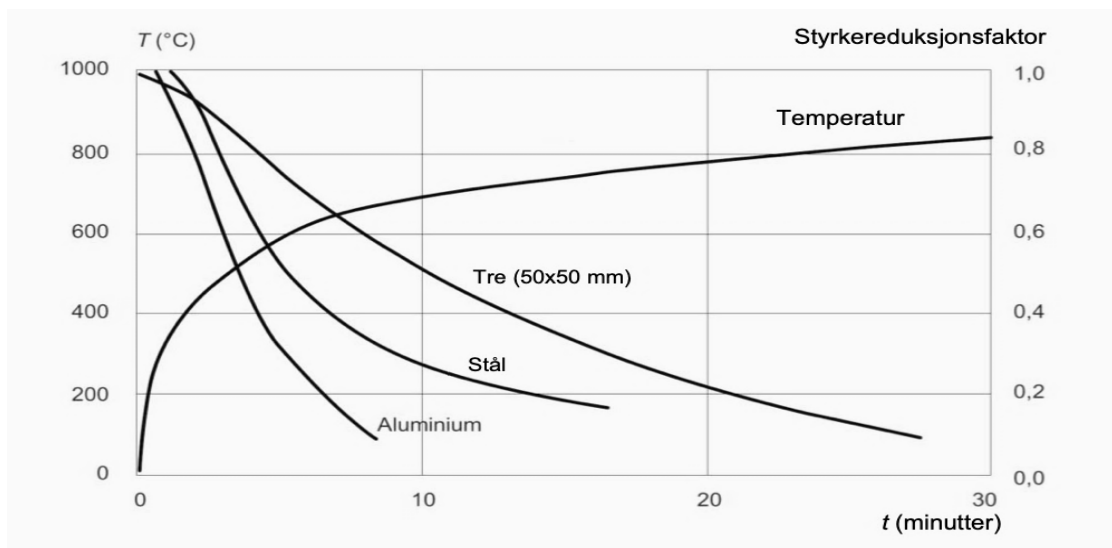
Innbrenningshastigheten til elementer av massivtre er relativt lav. Ifølge «hefte 4» fra Norsk Treteknisk Institutt (2006b) vil limte krysslagte elementer kunne beregnes med den samme innbrenningshastigheten som for limtre, mens den for dyblede krysslagte elementer vil være noe større (Norsk Treteknisk Institutt, 2006b). Da vil vanligvis innbrenningshastigheten til krysslagte elementer ligge på 0,7 mm/min, mens for dyblede elementer vil det være 0,8 mm/min, men dette avhenger også noe av tresorten som brukes (Norsk Treteknisk Institutt, 2006a). Ifølge (Aarstad & Glasø, 2011) fra TreFokus kan brannforsøk utført i et laboratorium dokumentere at et etasjeskille av massivtreelementer oppfylte funksjonskravene REI 90. Elementene hadde en tykkelse på 160mm med 5 krysslagte sjikt, og var forbelastet med 3 KN/m².

Delaminering er et problem ved massivtre under en brann (Splitkon, u.å.). Delaminering vil si at limen mellom lamellene smelter, og lamellene løsner fra hverandre. Dette fører til at brannen får tilgang på ny og frisk ved, noe som øker brannens energi og branntemperaturen betydelig. I en rapport publisert i «Journal Of Fire Sciences» (Ronquillo et al., 2021) tar de for seg flere ulike eksperimenter og tester som er gjort med fokus på massivtre og brann. En av disse er en studie av «Dagenais et al.» (2019) som undersøkte hvordan ulike typer lim oppførte seg i en brann. Forskerne undersøkte fire ulike typer lim:

- I. 1-komponent polyuretan som tradisjonelt brukes for massivtre (PUR1)
- II. En forbedret versjon av PUR1 som var tiltenkt å møte de Nord-Amerikanske kravene til lim (PUR2)
- III. Melamin-formaldehyd (MF)
- IV. Fenol-resorcinol-formaldehyd (PRF)

Resultatene av denne studien viste at MF og PRF hadde vesentlig lavere risiko for delaminering, og at PUR2 var bedre enn PUR1. PUR2 viste likevel såpass gode resultater, hvor bare én av fem tester ikke oppfylte testkriteriene, at den i mange tilfeller vil kunne kvalifiseres som god nok til bruk på overflatene. Dessuten viste studien at innbrenningshastigheten til elementene med MF og PRF var tilnærmet konstant gjennom alle lagene, og noe mindre enn den var for elementene med PUR2. Testene viser at PUR, enten det er PUR1 eller PUR2 er lite motstandsdyktig for høye temperaturer, noe som kan støttes opp av et forsøk utført i forbindelse med «The Epernon Fire Tests Programme» (Mindeguia et al., 2020), hvor de brukte PUR-lim mellom lamellene. Her utførte de flere tester i rom med ulik grad av ventilasjon og med ulike typer branner. Felles for dem var at alle testene opplevde delaminering, hvor den testen med tidligst delaminering skjedde etter 40 minutter og den siste etter 85.

Splitkon forklarer på sin hjemmeside at PUR-lim er svært brannfarlig og vil under en brann avgi giftige gasser, men at den brukes på grunn av rask herdetid og kort produksjonstid (Splitkon, u.å.). De har selv valgt å bruke melamin-urea-formaldehyd (MUF) som er et miljøvennlig kunstharpikslim. Hovedbestanddelen skal være trepulver og limet vil ha samme egenskaper som tre ved brann, og dermed en konstant innbrenningshastighet. Limet har på den andre siden lengre herdetid.



Figur 12: Sammenlikner styrkereduksjon under ulik temperatur av stål, aluminium og tre

(Norske Limtreprodusenters forening, 2015)

2.6 Fukttekniske egenskaper

En av de største utfordringene med bygging med massivtreelementer er byggskader som skyldes fuktighet. Dette kan medføre følgeskader som korrosjon, råte, muggvekst eller svinn i materialer og kontraksjoner. Fukt kan blant annet komme av nedbør, fuktighet i luften inne og ute, fukt i grunnen eller byggfukt som er overskuddsfukt i byggematerialer under byggefasen (SINTEF Byggforsk, 2018).

Det vil alltid være et visst vanninnhold i trevirke som blir omtalt som trefuktighet. Denne typen fuktighet er definert som vekt av vann i forhold til vekten til tørt trevirke gitt i prosent. Når tømmerstokken kommer inn på sagbruket er det ikke unormalt å måle fuktighet opp mot 130%. Dette forteller at vekten av vannet er større enn vekten av den tørre tresubstansen. Ved produksjon av trelast vil trevirket bli tørket for å få lavere vekt, øke styrkeegenskapene, gi større bestandighet mot råte og sopp, og forbedre limbarheten (Norsk Treteknisk Institutt, 2018).

Under en ettårsbefaring i Danmark ble det registrert store sprekker, mangelfulle tettinger av samlinger, muggvekst og andre tegn som tyder på at massivtreelementene har tatt opp fukt i byggeperioden. Elementene er tørre når de leveres fra fabrikken. Dersom de kommer i kontakt med fuktighet vil elementene utvide seg og når boligene blir oppvarmet vil de trekke seg sammen igjen og sprekke. Store sprekker stiller større krav til damp- og vindsperrer som må forbli intakte og samtidig tåle store bevegelser i konstruksjonene.

At tre er et organisk materiale gjør at massivtreelementer har sine begrensninger og egner seg derfor ikke til bruk i alle typer bygg og bygningsdeler. Dette gjelder bygg som mangler utspring, fasader uten konstruktiv beskyttelse og for konstruksjoner mot jord eller våtrom. Før et prosjekt starter bør derfor prosjektlederen utarbeide en strategi og plan for å unngå fuktskader på bygget som både gjelder før prosessen starter, underveis i prosjektet og etter at arbeidet er fullført for å minimere risikoen så mye som mulig (Kunøe, 2019).

2.7 Akustiske egenskaper i massivtrekonstruksjoner

Tre er kjent for å være et lett materiale med lav densitet, noe som vil by på akustiske utfordringer da lette materialer lettere vil kunne settes i svingninger enn tunge materialer, spesielt ved lave frekvenser. Lydisoleringen avhenger av brannsikkerheten i boliger, tettheten til konstruksjonen, i knutepunkter og rundt gjennomføringer som totalt vil avgjøre hvor god isolering bygget oppnår. I boliger vil det stilles lydkrav til forskjellige boenheter og tre må da kombineres med andre materialer for å kunne stille kravene til lydisolering. *Tabell 3* viser lydkrav som stilles i noen ulike bygningstyper.

Tabell 3: Lydkrav til enkelte bygningstyper (NS 8175) med lydklasse C, minimumskrav trinnlydnivå (Glasø, 2011)

Lydkrav		Luftlydisolasjon, R'_w eller $R'_w +$ $C_{50-5000}$		Trinnlydnivå $L'_{n,w}$ eller $L'_{n,w} +$ $C_{1,50-2500}$	
		Klasse B	Klasse C	Klasse B	Klasse C
Boliger	Mellom boenheter, og boenheter og fellesareal	58	55	48	53
	Mellom rom internt i boenhet	43	-	63	-
<i>Kontorer</i>	Mellom kontorer, kontorer og fellesareal	40	(37)	58	(63)
<i>Skoler</i>	Mellom klasserom, og klasserom og fellesareal	52	48	58	63
<i>Barnehager/ fritidshjem</i>	Mellom rom for søvn og hvile, og andre fellesrom	52	48	53	58

Det er angitt lydkrav som tar høyde for å beskytte brukerne av en bygning og brukerområdet mot vesentlige støy- og vibrasjonsplager ifølge Byggteknisk Forskrift (TEK17) til Plan- og bygningsloven. I forskriften defineres støy som uønsket lyd, og det legges særlig vekt på brukernes behov for tilfredsstillende lydforhold ved arbeid, søvn, hvile og rekreasjon.

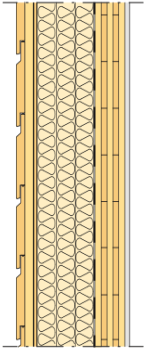
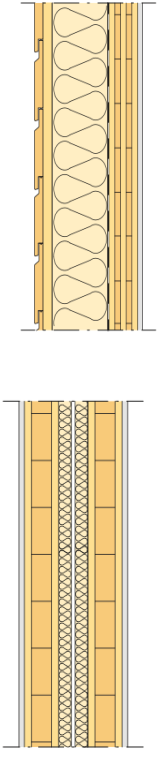
Utarbeidelsen av gode lydforhold innebærer å tenke på luftlydisolasjon, trinnlydisolasjon, lydoverføring og romakustikk. Lydkravet viser til å være oppfylt så lenge det er innenfor minimumskravet klasse C. Luftlydisolasjon er definert som isolasjon mot luftbåren lyd som for eksempel tale eller radio og angis med lydreduksjonstallet R . Videre viser $L'_{n,w}$ normalisert trinnlydnivå. For å ta hensyn til utvidet frekvensområde tas omgjøringsstallet C med i betraktning (se tabell 4 og 5) (Glasø, 2011).

Tradisjonelle trekonstruksjoner som for eksempel bindingsverkskonstruksjoner er noe lettere enn massivtrekonstruksjoner. Dette åpner opp muligheter for bedre lydisolering, men det må kombineres med andre bygningsmaterialer for å tilfredsstille lydkravene. Akustikken og lydforholdene varierer fra prosjekt til prosjekt, alt etter hvilke aktiviteter som skal foregå i bygget og hvilke akustiske behov som allerede finnes, og det må utformes en passende løsning for det aktuelle prosjektet (Svenskt Trä, 2019).

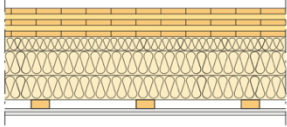
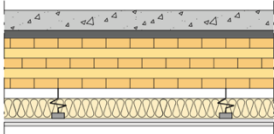
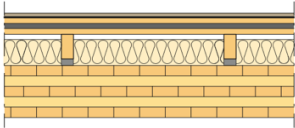
Hvilken løsning som er mest lønnsom og praktisk må vurderes i hvert tilfelle. For eksempel må dimensjonering av bjelkelag gjøres slik at bjelken har tilfredsstillende stivhet og styrke for å oppnå best mulig isolerendeegenskap. Valg av ulike typer belegg på gulv med tanke på trinnlydnivå vil være praktisk for vurdering av trinnlydsforbedring eller forskjellige etasjeskille med lydisolerende tiltak enten på oversiden eller undersiden (Glasø, 2011).

Tabell 4 og tabell 5 viser forslag til vegger og etasjeskiller som vil kunne tilfredsstille lydkravene. Ifølge vår veileder, Hatlestad, er den innvendige skilleveggen i *tabell 4* ikke en anbefalt konstruksjon. Dette skyldes at doble KLT - konstruksjoner med isolasjon mellom gir en stor risiko for fukt som er vanskelig å ha kontroll på.

Tabell 4 Viser forslag til løsning av akustisk utfordring (Svensk trå, 2019)

Typer	Materiale [mm]	Total tykkelse [mm]	Luftlyd R_w (C, C_{tr}) [dB]	Brannmotstand / U-verdi [W/m ²]
	<p>Yttervegg type A 22 Utvendig kledning 22 utforing Vindsperre 12 x 70 kryssfiner 70 isolering 145 bindingsverk 70 x 70 isolasjon Dampsperre 120 KLT- element 15 branngipsplater</p>	412	$D'_w = 48-55$	EI90 / 0,15
	<p>Yttervegg type B 22 Utvending kledning 27 x 98 laimert finertre, c600 200 Isolasjon Dampserre 120 KLT-element 15 Branngipsplater</p> <p>Innvendig skillevegg Type 1 15 Branngipsplater 80 KLT-element 45-70 Isolasjon 20 Luftspalte 80 KLT-element 15 Branngipsplater</p>	384 300-350	<p>$D_w = 52$</p> <p>Løsning 1 ≥ 52 (100 mm mellom KLT - elementer)</p> <p>Løsning 2: ≥ 48 (50mm mellom KLT-elementer) ≥ 56 (170 mm mellom KLT-elementer) ≥ 58 (200 mellom KLT-elementer)</p>	EI90 / 0,15 EI60 (brann mot en side)

Tabell 6 : Viser forslag til løsning av akustisk utfordring (Svensk trå, 2019)

Typer	Materiale [mm]	Total høyde [mm]	Vekt [kg]	Trinnlyd $L_{n,w}$ ($C_{1,50-3150}$)	Luftlyd R_w (C, C_{tr}) [dB]
	<p>Gulv type A 140 KLT-element 70 Isolasjon 45x220 Bjelkelag 2x95 Isolasjon 28 Bjelkelag</p>	449	130	≤ 54	≥ 56
	<p>Gulv type B 80 Betong 30 Trinnlydsplater Dynamisk stivhet $\leq 9 \text{ MN} / \leq 9 \text{ MN/m}^3$ 200 KLT-element 120 Undertaksbjelkelag 80 Isolasjon 2x15 Gipsplater</p>	460	310	33(+17)	79(-14)
	<p>Gulv type C 14 Parkett 3 Underlagsfoam 22 Fiberplate 20 Trinnlydsplater 95 Bjelkelag 90 Isolasjon 25 Trinnlydsplater 220 KLT-element</p>	421	155	$\leq 54 (-4)$	63(-1)

2.8 Tidsbruk

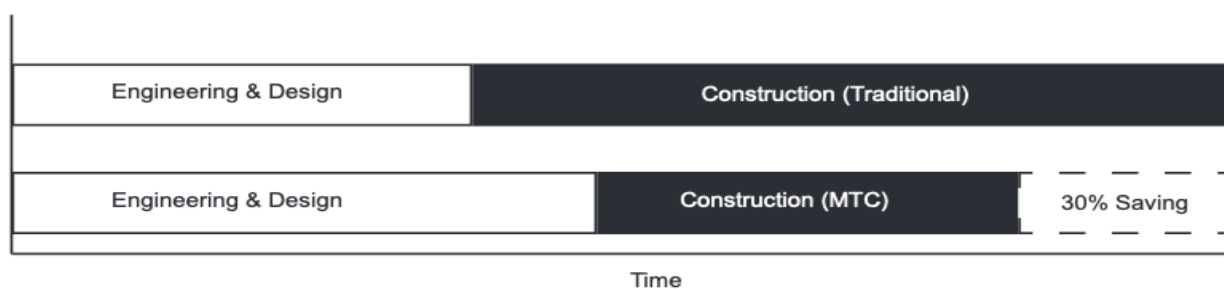
En av de største fordelene med massivtre er redusert tidsbruk på byggeplassen (Smith et al., 2018). En studie utført av Chalmers University of Technology i Gøteborg sammen med Arkitema og Cowi viste at prefabrikkingen av massivtreelementer stort sett resulterer i kortere byggetid på anleggsplassen (Johansen et al., 2022). Vår veileder i Backe, Kenneth Hatlestad, forteller at som en tommelfingerregel i byggebransjen bruker man å si at byggetiden kan bli opp mot 50% raskere ved bruk av massivtre. Han understreker også at dette avhenger av hva du måler opp mot, som for eksempel at prefabrikkerte betongelementer vil kunne monteres vesentlig raskere enn stedstøpt betong.

Dette understrekes i en artikkel publisert av Teknisk Ukeblad (Solberg, 2015), hvor Veidekke forteller at det tok rundt halvparten så lang tid å bygge et 9 etasjers bygg bestående av massivtre i «Moholt studentby», sammenlignet med et bygg av betongelementer i «Voll studentby» (Vikan, 2015). Byggene skal ha vært omtrent like store, med noe større grunnflate i byggene av tre (Solberg, 2015). Artikkelen presiserer at utbyggeren sparer mye tid på montasje, ettersom elementene er forhåndslaget og veier lite. På denne måten kan arbeidskraften reduseres ved montering av elementene.

Bygg av massivtre åpner opp for muligheten til at de strukturelle komponentene kan lages på fabrikk samtidig som fundamentet støpes på byggeplassen (Smith et al., 2018). Dette reduserer forsinkelsestiden som mange tradisjonelle prosjekter opplever, hvor grunnarbeid og fundamentering må være utført før den bærende konstruksjonen kan bygges oppå. I tillegg vil det for stedstøpte betongbygg være en betydelig forsinkelsestid med tanke på at betong bør herde i minst 28 dager før den når gunstig styrke og neste etasje kan bygges (Laguarda Mallo & Espinoza, 2015). Derfor, hvis prosjektering, produksjon og konstruksjon på et prosjekt av massivtre er koordinert på riktig måte, vil tiden på byggeplass reduseres betraktelig, og vil lede til flere fordeler som økt sikkerhet for arbeiderne, mindre støy og forstyrrelser på det omkringliggende nabolaget, og redusert materialavfall (Laguarda Mallo & Espinoza, 2015).

I en studie av Smith et. al (2018) sammenligner de tiden brukt i prosjekter med massivtre opp imot deres tradisjonelle motpart, betong. Studien indikerte at de 7 prosjektene i studien som ble bygget med massivtre hadde gjennomsnittlig 20 % kortere byggetid, med en gjennomsnittlig byggetid på 12,7 måneder, mot 15,4 måneder for typiske betongkonstruksjoner. Studien viste også at leilighetsbygget «Forté» i Melbourne ble fullført 3 måneder før det ville vært mulig med tradisjonell byggemetode, mens «Bridport House» i London fikk redusert byggetiden sin med 2 måneder. Til tross for at en reduksjon i byggetiden allerede kommer tydelig fram gjennom studien, så peker rapporten også på at økt kunnskap som følge av økt erfaring vil kunne gjøre prosjektene mer kostnadseffektive og øke produktiviteten ytterligere (Smith et al., 2018).

Kremer og Ritchie (2018) peker på at prosjekteringsfasen i prosjekter med massivtre normalt sett er lenger enn der hvor det prosjekteres for stål og betong. Byggetiden, derimot, er normalt sett 30% kortere for de med erfaring innenfor montasje av massivtre. Denne reduserte tiden på byggeplassen kan skyldes en rekke faktorer. De trekker frem økt bruk av prefabrikkering, nøye planlegging av hva som må gjøres, flere og bedre prosjekterte løsninger som resulterer i færre variasjoner, forenkling og reduisering av leveranser, og færre fagfolk på byggeplass (Kremer & Ritchie, 2018). *Figur 13* illustrerer denne forskjellen i tidsbruk mellom massivtre og andre prosjekter.



Figur 13: Figuren illustrerer forskjellen i tidsbruk mellom prosjekter i massivtre og prosjekter i betong og stål. (Kremer og Ritchie 2018)

2.9 Krav til høybygg

Det blir stadig mer populært å benytte trekonstruksjoner som byggeløsning i bygg med høyder på fem etasjer og mer, som erstatning for mer tradisjonelle konstruksjonsmaterialer. Dermed stilles det også ulike krav for sikkerhet, bæring og stabilitet. På grunn av følgende krav er en kombinasjon av krysslaminert massivtre (KLT) og limtre en aktuell løsning for høye trebygninger fremfor lett stenderverk. Dette kan ses på prosjekter som har blitt gjennomført i Norge med studentboliger i Tromsø på 13 etasjer, og verdens høyeste trebygg, Mjøstårnet i Brumunddal, med 18 etasjer. I Norge er det ønskelig at trematerialet skal være eksponert og synlig. Dette vil si at det er uten tildekning, men dette har påvirkning for brannutviklingen i et rom ettersom det kan medføre at en brann vokser raskere, blir mer intens og varer lengre (Reitan et al., 2019).



Figur 14: Studentbolig i Smørbukklia Tromsø av massivtre .Totalt 13 etasjer hvor 2 etasjer er i plaststøpt betong/stål og 11 etasjer i massivtre (Woodcon, u.å)

Det finnes ikke noen klar definisjon på hvor høyt et høybygg skal være, da definisjonen varierer etter hvor du befinner deg. Den vanligste betegnelsen for høybygg er bygg på mer enn 10-12 etasjer. Mange av de norske byene har i senere år utarbeidet høyhusrapporter eller strategier som et ledd i arbeidet med byutvikling. I dag oppføres stadig nye byggeprosjekter på 20-30 etasjer, selv om slike bygg som oftest møter stor motstand i lokalbefolkningen. Argumentene er at de skaper lange skygger, skaper sterke vinder eller vil være dominerende i forhold til landskapet eller eldre, verdifulle bebyggelser (Rygh, 2023).

Ifølge Norske arkitekters landsforbund har de som arkitekter merket Oslos vekst med atypisk tetthet og høyde på ny bebyggelse, og har et annet perspektiv innenfor høyhus. De stiller seg positive til høyhusstrategien i storbyen så lenge man har et fastsatt krav om plan, mål og krav for høyhusene. Det skal bygges bærekraftig og være stedstilpasset til omgivelsene, slik at det tilfører byen en positiv byutvikling, og samtidig unngår at det skapes uheldige "murer" med mye skygger. Høyhustrategien kan bidra til en mer mangfoldig boligsektor og være en løsning for å få en fortetting i byer med mye aktivitet, og for å verne «markagrensen» og de andre naturkvalitetene som finnes i området.

Kvalitetskrav er et av hovedpoengene for høyhus. Det bør i høy grad vektlegges hvordan høybyggene møter gateplan og nærområdet, og dets innvirkning på lokalklimaet med tanke på vind- og skyggeforhold, funksjon, utforming og materialvalg for å samtidig rette seg mot bærekraftig løsning. Det er foreslått at høybyggene skal være så smale som mulig for å unngå stor skyggevirksomhet eller stå i veien for viktige siktlinjer, men det kan være fordelaktig å stille mer spesifikke krav. I København er det for eksempel krav om at bygningskropper som er over 24 meter utformes i 1:4 forhold mellom høyde og bredde for å oppnå så smale bygninger som mulig.

Et annet poeng som er verdt å nevne er at byer med høyhus skal utformes bærekraftig for at dette skal være tillat. Høybygg med over 12-14 etasjer har et høyere klimaavtrykk enn lavere bygg, og derfor må det settes konkrete målsettinger knyttet til ulike aspekter av bærekraft. Det som skal ligge til grunn for vurdering av høyhus er tydelige krav til klimaregnskap, ivaretagelse av biologisk mangfold, optimalisering av energi, livsløpsanalyser, mikroklimatiske forhold og sosial bærekraft.

Klimaavtrykket og energibruken skal være så lave som mulig, samtidig som det skal legges til rette for fornybare energikilder. Dessuten skal materialbruk og avfall minimaliseres, og andre klimakompenserende tiltak skal vurderes. Klimaberegninger og CO₂-mål for prosjektet skal legges fram i tidlig fase (Norske arkitekters landsforbund, 2022).

Dersom høye og komplekse bygninger skal oppføres er det viktig å tenke på detaljløsninger ved bruk av trekonstruksjoner. I motsetning til stål og betong er det svært viktig med tilstrekkelig gode brannegenskaper for å hindre spredning dersom det skulle oppstå en brann. Et eksempel på detaljløsning kan være sammenføyninger mellom bygningsdeler og gjennomførelse av brannetting, ettersom konsekvensen av utilstrekkelig prosjektering av trekonstruksjoner kan få store konsekvenser under en brann. Det eksisterer ikke preaksepterte løsninger for høye bygninger med bærende trekonstruksjoner i henhold til veiledningen til forskriften om tekniske krav til byggverk (TEK 17). Dette gjelder brennbare konstruksjoner i bygninger i brannklasse 3 som vanligvis er fem etasjer eller mer.

For å finne ut hvilken brannprosjektering og dokumentasjon som kreves i forbindelse med brannsikring og brannsikkerhet, tas det hovedsakelig utgangspunkt i fire forhold som til sammen bestemmer omfanget rundt dette: risikoklasse, brannklasse, etasjeantall og tiltaksklasse. Som vist i *tabell 6* er bygningens brannklasse (BKL) et resultat av bygningens risikoklasse (se *tabell 7*) og etasjeantall (Brannkonsult, u.å.).

Tabell 7: Oversikt over brannklasser (BKL) og legg merke til at alle bygninger over fem etasjer eller mer er i brannklasse 3

Risikoklasse	Antall etasjer			
	1	2	3 og 4	5 eller flere
1	—	BKL 1	BKL 2	BKL 2
2	BKL 1	BKL 1	BKL 2	BKL 3
3	BKL 1	BKL 1	BKL 2	BKL 3
4	BKL 1	BKL 1	BKL 2	BKL 3
5	BKL 1	BKL 2	BKL 3	BKL 3
6	BKL 1	BKL 2	BKL 2	BKL 3

Tabell 8: Lister opp et eksempel for bygningers risikoklasse (RKL)

Naust og små garasjer	risikoklasse 1
Kontor og lager	risikoklasse 2
Barnehager og skoler	risikoklasse 3
Bolig og fritidsbolig	risikoklasse 4
Forsamlings-og salgslokale	risikoklasse 5
Hotell og sykehus	risikoklasse 6

Selv om det ikke finnes preaksepterte løsninger for bærende trekonstruksjoner i høye bygninger er det fortsatt mulig å bygge dette, samtidig som sikkerheten ivaretas. I all hovedsak finnes det to ulike byggeregler. Den ene er ytelsesbaserte byggeregler, som gir spesifikke tallfestede ytelser som konstruksjoner og materialer må oppfylle. Den andre er funksjonsbaserte byggeregler, som følger av det nivået sikkerheten skal ligge på, men spesifiserer ikke hvilke egenskaper konstruksjoner og materialer må oppfylle for at dette skal tilfredsstilles. Denne typen byggeregler har ofte tilhørende veiledninger med blant annet preaksepterte ytelser som vil oppfylle funksjonskravene.

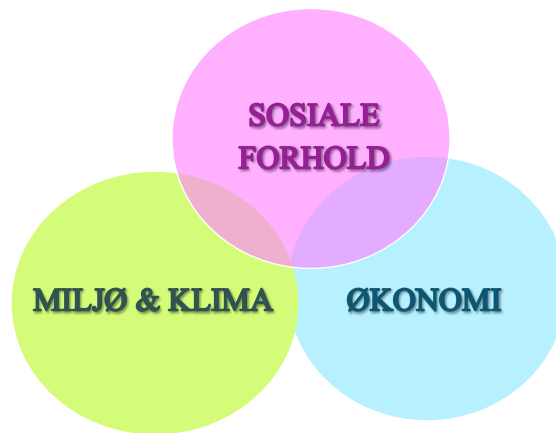
Det har blitt innført funksjonsbaserte byggeregler i mange andre land i verden der brannsikkerheten i bygninger kan dokumenteres ved branntekniske analyser. Betydningen av dette er at selv om mange land opererer med et begrenset antall tillatte etasjer, er det i noen av disse landene likevel mulig å bygge høyere trebygninger dersom man dokumenterer brannsikkerheten gjennom brannteknisk analyse. Hvert enkelt land vil definere hva som er tilstrekkelig brannsikkerhetsnivå gjennom nasjonale byggeregler. I dette tilfellet er Norge et godt eksempel. Prosjekteringen av bygningen oppføres med grunnlag i kunnskap om risiko, og ved bruk av relevante dimensjonerende brannscenarier (Reitan et al., 2019).

Vindlast må vurderes når et høybygg skal oppføres. Vind betegnes som et luftlag i bevegelse, ofte langs jordoverflaten, og skyldes forskjeller i lufttrykket med rotasjonsegenskaper som beveger seg i en strøm (Dannevig & Harstveit, 2023). Da det Diakonale sykehus i Bergen ble oppført, blåste deler av himlingen ved inngangspartiet bort, kun tre dager før åpning av bygget. Plater og stål lå krøllet på bakken. Dette kunne fått store konsekvenser, og viser hvorfor vindlast er en viktig faktor å vurdere (Sweco, u.å.).

3. Klima og miljø

3.1 Bærekraftig utvikling i høyden

Dagens samfunn har et mål om å lykkes med det grønne skiftet. For å nå dette er en omstilling i byggenæringen nødvendig for å utvikle energieffektive bygg med lavt klimaavtrykk og klimatilpasset utforming. Samtidig settes bærekraftig utvikling i fokus da det finnes grenser for hvor mye vi kan utnytte naturen i dag, uten at det går utover hva naturen kan levere av ressurser i fremtiden. Det er i vår felles interesse å ta vare på kloden.



Figur 15: De tre dimensjonene for å skape bærekraftig utvikling

For å skape bærekraftig utvikling må verden jobbe sammen på tre områder, også kalt de tre dimensjonene, som vist i *figur 15*. Disse lyder som følgende: klima og miljø, økonomi og sosiale forhold. Avgjørelsen av om noe er bærekraftig må vurderes i en sammenheng mellom de tre forholdene. Vi må finne løsninger for å ikke bruke opp den eneste kloden vi har og da må det tas beslutninger som balanserer miljøet og økonomien vår, og komme med flere og bedre metoder å fordele ressursene på. Slik kan det bli bærekraftig for både menneskene og miljøet.

3.2 Klima og miljø

Vi tar for oss første dimensjon, nemlig klima og miljø. Klimakrisen er et økende problem som verden står ovenfor som følge av menneskeskapte klimautslipp som igjen forsterker drivhuseffekten og resulterer i global oppvarming og klimaendringene (FN-Sambandet, 2021).

Temperaturen øker, havet og luften blir varmere, og mer ekstremvær medfører fare for liv og verdier i form av flom, tørke og orkan. Klimaendringene gjør at det stilles strengere krav til planlegging, plassering, utforming og vedlikehold av bygninger. Bygningskonstruksjonene må tåle større påkjenninger og vedlikehold av eksisterende bygg må endres enten i form av hyppigere vedlikehold eller andre forebyggende tiltak. Ved oppføringen av nye bygg vil et slikt «føre-var-prinsipp» stille krav til byggets levetid. Årlig rives det mange bygg og store ressurser går til spille (Miljødirektoratet, 2019).

Å velge løsninger og byggevarer som gir lave utslipp i et livsløpsperspektiv er en viktig faktor for klima og miljøet. Tidligere ble det nevnt de hensiktsmessige fordelene med å bygge i tre fremfor tradisjonelle byggematerialer som stål og betong, med tanke på CO₂-tilførsel til atmosfæren. CO₂ tas opp av skog som vokser gjennom fotosyntesen og lagres i trærne og videre i treproduktene. Tre er også et materiale som kan gjenvinnes og brukes om igjen (Grønn Byggallianse, u.å.). I forbindelse med høybygg er god, grønn og bærekraftig politikk at flere kan ta i bruk kollektivtilbudet, eller spasere eller sykle når det bygges høyt og tett ved togstasjoner.

Mange er avhengig av å bruke bilen i hverdagen for å komme seg til og fra jobb og skole. Dersom bygget er plassert sentralt kan det være med å redusere klimagassutslippene. Høyhus har et større CO₂-utslipp per kvadratmeter sammenlignet med bebyggelse som er lavere. Dette veies opp av fortetting som skjer der hvor land allerede er «brukt». Alternativet vi har er å bygge ned skog, myr og dyrket mark eller eplehager, noe som ikke er gunstig for miljøet. Et slik forbruk av land har et betydelig engangs CO₂-utslipp som ikke kan reverseres. Høyhus bør plasseres der biltrafikken reduseres mest og der byens kvaliteter blir størst (Lunøe, 2022).

3.3 Bærekraftig økonomi

Den andre dimensjon for bærekraftig utvikling er økonomi. Det skal sikres økonomisk trygghet for mennesker og samfunn. Ressursene må både fordeles mer rettferdig og hvordan de forbrukes må også endres på for å få en bærekraftig utvikling. Spesielt for fattige land er økonomisk vekst viktig for utviklingen. Dermed sikres nye arbeidsplasser og skatteinntekter som vil bidra til å betale for velferdstjenester som skoler og sykehus. Utfordringen er å gjøre økonomien bærekraftig. Dette kalles gjerne for grønn vekst, og skal sikre menneskers behov, samtidig som det ikke skal gå ut over naturens tåleevne (FN-Sambandet, 2021).

Forenklet kan det forstås med at man fisker litt mindre i dag, slik at de som kommer etter oss også kan fiske i fremtiden. Derfor må ressursene forvaltes på en rettferdig måte og forbruket gå ned, samtidig som produksjonen blir mer bærekraftig. Spesielt gjelder dette for de rikeste landene der forbruket er størst. *Figur 16* illustrerer Norges forbruk sammenlignet med forbruket i India. I forbindelse med oppgaven vår skal vi senere se på om det er gunstig å konstruere høybygget med bare massivtre med tanke på bærekraft og materialbruk, om det bør kombineres med andre materialer for å ikke bruke mer materialer enn det er behov for eller om det er økonomisk og forsvarlig å bygge i bare tre som byggemateriale.



Figur 16 Eksempel for økologisk fotavtrykk av forbruk: Norge og India

3.4 Sosiale forhold

Tredje og siste dimensjon, sosiale forhold, har søkelys på å sikre at alle mennesker skal ha et godt og rettferdig grunnlag for et anstendig liv. Menneskerettighetene er det viktigste punktet for dette. Det går ut på hvordan mennesker har det i et samfunn, om de får oppfylt rettighetene sine samtidig som de får mulighet til å påvirke egne liv og samfunnet de lever i.

3.5 Transport

Østfoldforskning har utarbeidet en rapport (2019) som viser at transport er avgjørende for om et bygg i massivtre avgir et gunstig klimaavtrykk sammenlignet med et bygg i stål og prefabrikkerte betonghulldekker. Transport over lengre strekninger gir et dårlig CO₂ – regnskap for massivtre (Rønning et al., 2019). Denne forskningen er bestilt av Betong Øst og dette må derfor tas med i betraktning. Ifølge vår veileder fra Backe er transport av betong og stål mye mer omfattende enn transport av massivtre. For tre er det volum som er begrensende (omtrent 45 m³ per bil), mens det for betong og stål er vekten som setter en begrensning på hvor mye man får med per lass.

4. Økonomi

Når en ny type teknologi blir introdusert på markedet vil det alltid kreves tid før interessentene blir kjent med fordelene til produktet. En av hovedgrunnene til at den stigende bruken av massivtre i verden har tatt så lang tid, skyldes frykten for at denne relativt nye byggemetoden skal resultere i høyere byggekostnader enn de tradisjonelle betong-konstruksjonene (Abed et al., 2022). Kremer og Ritchie (2018) skriver i sin artikkel; *“Like any new technology introduced to market, there is often an education process required to be undertaken by various stakeholders within the industry to understand the benefits and the potential impacts of the technology on industry.”* De sier med andre ord at med ny teknologi vil det alltid ta en del tid før folk forstår verdien av den og begynner å ta den i bruk. De poengterer også at massivtre ikke er noe unntak. Det må vurderes om bruk av massivtre er en god investering, som viser seg lønnsom og bærekraftig.

Står man i valget mellom å ta i bruk noe nytt eller fortsette med det man har god kjennskap til, velger en typisk det man har et godt kjennskap og forhold til, med tanke på lønnsomhet, tid, materielle egenskaper og total kostnad. Utbyggere innenfor bygg og anleggsbransjen stiller krav til lønnsomhet. Dette gjelder for både offentlige og private aktører, men mens privat sektor har mer søkelys på at de skal maksimere avkastningen mest mulig på prosjektet, vil den offentlige ha et større perspektiv som fokuserer på hele byggets levetid og vil minimalisere den totale kostnaden (Rasmussen et al., 2006).

Bygg- og anleggsbransjen er svært lite risikovillig, er det liten sannsynlighet for at nye teknologier eller byggemetoder vil få rotfeste, med mindre det kan vises til at en betydelig kostnadsbesparelse er oppnåelig. Innovasjoner som vil levere prosjekter til rett tid og under budsjettet vil stå seg ut som hoveddrivere for konkurransefortrinn i byggesektoren. På bakgrunn av dette er det derfor viktig, om ikke kritisk, at interessentene i byggeindustrien forstår de økonomiske fordelene med å bruke massivtre.

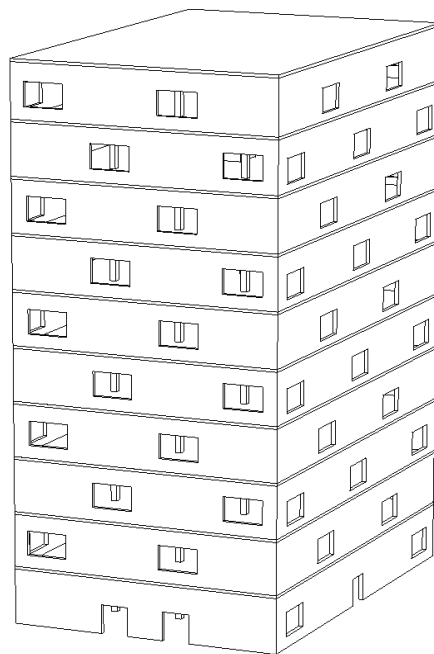
Videre skal vi ta utgangspunkt i tre studier som har blitt gjort i forbindelse med materialkostnader. En studie fra Storbritannia viser at dersom de skulle konstruere et ni-etasjers leilighetsbygg i massivtre ville det resultere i en økning på 30 % i materialkostnader sammenlignet med hvis det bygges med armert betongelementer. En annen studie utført i 2018 i USA sammenligner et hypotetisk bygg på 10 etasjer i krysslaminert tre opp mot plasstøpt betong. Materialkostnaden økte med 16-29% ved å bruke KLT. En tredje studie fra Australia viser derimot at dersom vi kombinerer massivtre og betong vil vi spare 13,6% på materialkostnader. Prosentsparingen kan dobles dersom kilden til materialet er produsert lokalt med kort transportvei, i stedet for å importere fra Europa. Foreløpig er det en antatt økning i materielle kostnader ved å bruke massivtre som byggemateriale fremfor betong eller stål. Imidlertid vil denne kostnaden reduseres etter hvert som massivtre videreutvikles, og det blir mer kunnskap og erfaring om byggemetoden.

Bemanning er et område hvor kostnader kan reduseres. Mange av de strukturelle komponentene kan prefabrikeres før det ankommer til byggeplassen og settes sammen av et lite team av arbeidere som reduserer kostnaden under byggeprosessen (Abed et al., 2022).

Prosjektet blir raskere fullført når mange av komponentene er prefabrikkerte, noe som reduserer behovet for tunge maskinelle bruk. Dette er tidsbesparende og økonomisk. Med tanke på tidsbruk, montasje og transport forårsaker den lave vekten en stor fordel til massivtre fremfor prefabrikkerte betong- og stålelementer. Dette resulterer i god totaløkonomi, og kan føre til at markedet utvikler seg slik at massivtre blir en naturlig del av konstruksjonen i mange fremtidige byggeprosjekter.

5. Beregning av laster

Dette kapittelet tar hovedsakelig for seg påførte laster og de ulike kombinasjonene av laster som må vurderes i henhold til standarden for dimensjonering. Lastene består av både permanente og midlertidige laster som egenlast, nyttelast, snølast og vindlast. Egenlast er materialets egenvekt og regnes vanligvis ut som et produkt av volum og densitet. Nyttelasten er den lasten som skyldes bruk av konstruksjonen og finnes i tabeller i Norsk Standard. For massetetthet som er oppgitt i kg, har vi omregnet til N ved $1\text{kg} = 10\text{N}$.

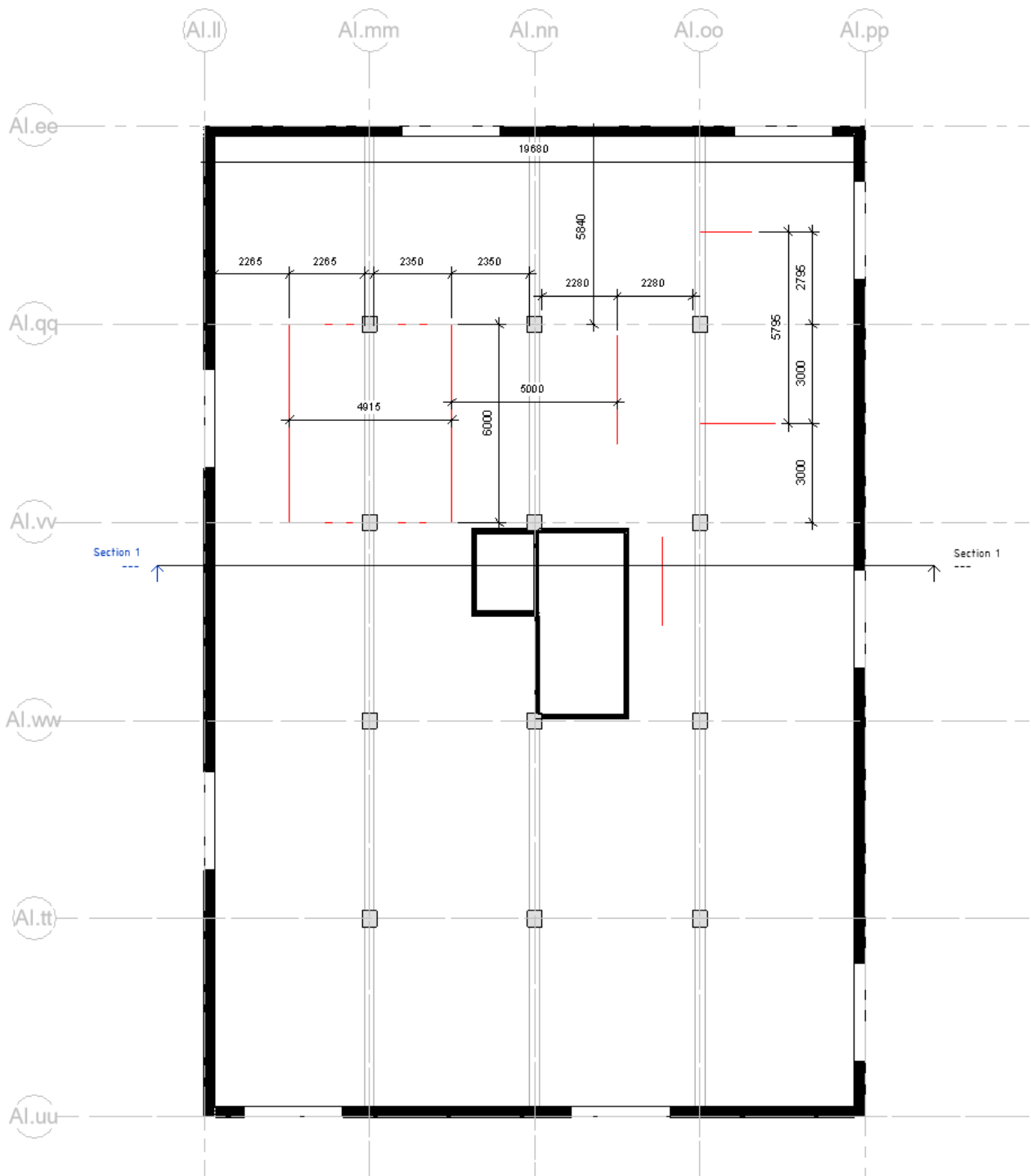


Figur 17 Modellbygg for 10 etasjer

Dimensjoneringen tar utgangspunkt i et 10 etasjers høybygg som illustrert i *figur 17*. Formålet med dimensjoneringen er å beregne størrelsen til søyler og bjelker slik at de er i stand til å bære den påførte belastningen . Videre skal det gjennomføres en dimensjonering for høybygg med ulike antall etasjer, herunder 8, 12 og 14 etasjer, og disse dimensjonene skal sammenlignes med hovedbygget vårt som består av 10 etasjer. I denne sammenligningen vil vi også vurdere lønnsomhetens og bærekraftens grenser for høybygg.

Det er viktig å merke seg at utregningene forenkles ved å anta at alle etasjene har like store bjelker og søyler. Denne tilnærmingen brukes kun for å forenkle beregningene for laster og bør ikke bruke som en faktisk designløsning i virkeligheten. Det gir ikke et realistisk bilde, da dimensjonene bør avta for vegger og søyler med økende høyde. Vi får unødig store dimensjoner, noe som igjen påvirker materialforbruket og økonomien i byggeprosjektet.

Bygget er plassert i Stavanger, og vind- og snølast er beregnet basert på relevante verdier for området. Beregninger for vindlast på tak er utelatt da det brukes flattak og vindlasten får mindre påvirkning på bygningen. Andre ytre krefter, som seismiske krefter, er heller ikke inkludert i beregningene. En siste forutsetning er at bygget må oppfylle minimum REI90-brannkrav.



Figur 18 Plantegning i 2D for 10 etasjers bygg som viser plassering av bjelker, søyler og heissjakt

5.1 Snølast

For takkonstruksjoner utgjør snølast en ekstra påkjenning. Det må settes i verk tiltak i form av snømåking dersom snølasten blir større enn det taket er dimensjonert for. En annen løsning er montering av snøfanger for å hindre snø fra å rase ned og slik at den kan bidra til å øke belastningen av snø. For beregning av snølast følges NS-EN 1991-1-3:2003+A1:2015+NA:2018 (Standard Norge, 2018).

C_e er eksponeringsfaktor som settes lik 1,0. Den tar hensyn til at vind blåser tørr snø bort fra taket.

C_t er termisk faktor, en faktor for snøsmelting som settes lik 1,0.

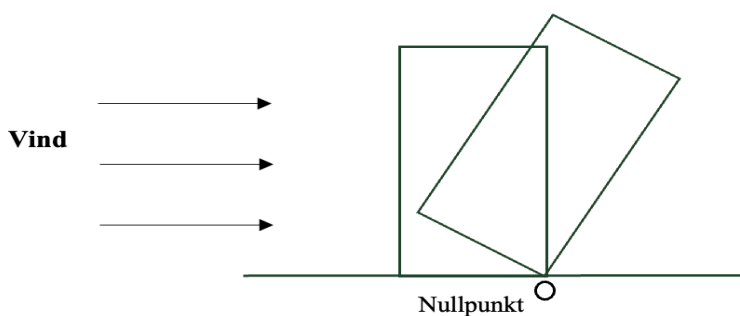
μ_i er en formfaktor som settes lik 0,8 for flattak.

s_k er karakteristisk snølast på mark og for Stavanger er den satt til å være $1,5 \text{ kN/m}^2$ under en høyde på 150 meter over havet.

$$\begin{aligned} S &= \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \left(\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) \\ &= 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,5 \left(\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) = 1,2 \left(\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) \end{aligned}$$

5.2 Vindlast

Ved dimensjonering av en konstruksjon er beregning av vindlast en faktor som må tas med i betraktning da dette påvirker stabiliteten på en konstruksjon og vindlasten blant annet varierer med høyden over bakken. Vi kommer ikke til å gå i dybden for beregning av stabiliteten, men for at konstruksjonen skal tilfredsstillere kravet så må moment forårsaket av vindlast rundt nullpunktet være mindre moment forårsaket av stabilisering av egenvekt, *se figur 17*.



Figur 19 Viser stabiliseringsjekk for et bygg

Det brukes en forenklet metode for beregning av vindlast fra NS EN 1991-1-4 2005+NA 2009 (Standard Norge, 2009).

Det skal beregnes for den kortvarige toppverdien og av vindens hastighetstrykk :

$$q(z)_p = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot c_{dir}^2 \cdot c_{alt}^2 \cdot c_{season}^2 \cdot c_{prob}^2 \cdot q_{p0}(z)$$

k_1 faktor som tar hensyn til vindakselerasjonen over skråninger og åser, setter lik 1,0.

k_2 faktor som tar hensyn til vindkastøkning nær fjelltopper eller særlig bratt terreng, setter lik 1,0.

k_3 ruhetsfaktor korrigerer vindlast med hensyn til bygningens avstand til åpent hav, store vidder og annet åpent terreng ved byggestedet. Setter $k_3=1,15$ med $\Delta n_{BA}=1$ og $\chi_B=0,5$ km fra overgangen fra glatt til ru sone.

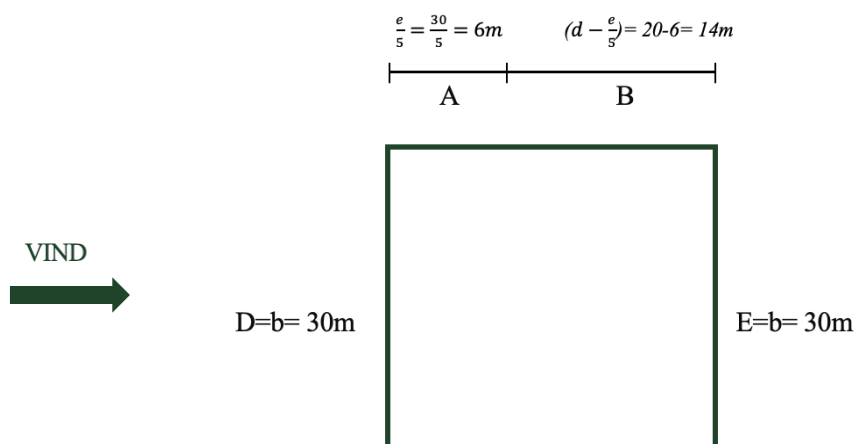
For å finne vindlasten som virker på konstruksjonen vil vi forenkle dette ved å anta at vindlasten treffer 90 grader.

$c_{dir}^2, c_{alt}^2, c_{season}^2, c_{prob}^2$ er faktorer som tar hensyn til retning, høyde og årstid og sannsynligheten for vindstyrke i de neste 50 årene som settes lik 1,0.

Basisvindhastigheten V_b er definert som mildere vindhastighet over 10 minutter, 10 m over flatt landskap og settes lik $V_{b,0} = 26 \frac{m}{s}$ for Stavanger fra NA.4 (901.1).

$q_{p,0}(z)$ er $1,550 \text{ kN/m}^2$ for en bygning med en høyde $h=40,4$ meter og $V_{b,0} = 26 \frac{m}{s}$ fra fig.V.1 a etter oppgitt norsk standard.

Vinkasthastighetstrykket blir som følger: $q(z)_p = 1,550 \cdot 1,15 = 1,783 \text{ kN/m}^2$



Figur 20 viser vindlastene for de ulike sonene sett ovenfra

Tabell 9: Oversikt over vindlasten for de ulike sonene

Soner	$C_{pe,10}$	Areal [m ²]	$q(z)_p$	Total vindlast [kN]
A	-1,2	242,52	1,783	-432,4
B	-0,8	565,88	1,783	-807,2
D	0,8	132,6	1,783	189,2
E	-0,5	132,6	1,783	-117,7

5.3 Søyler og bjelker

Søylene og bjelkene i konstruksjonen er laget av limtre (GL28h). Limtre har en massetetthet på 4,2 kN/m³ (Stora Enso, u.å.-c). Dimensjonene vil variere her, og setter derfor egenlast på søyler og bjelker som:

$$g_{k,søyle} = g_{k,bjelke} = 4,2 \frac{kN}{m^3}$$

5.4 Egenvekt yttervegger

Hovedfokus med bygget er å få et estimat på hvor mye materiale som trengs og kostnaden rundt dette. Vi har på bakgrunn av dette valgt å utelate ekstra materialer som isolasjon, og kun fokusert på massivtreet, som også er bærende. Dessuten ville et 200mm tykt lag med standard steinullisolasjon fra Byggforsk 471.031 (SINTEF Byggforsk, 2013) kun utgjøre 0,06 kN/m², så vi kan se bort fra dette. Yttervegger og dekker som er laget av krysslaminert tre består av C24 – lameller. Krysslaminert tre har en massetetthet på 4,9 kN/m³ (Stora Enso, u.å.-b), og høyden på veggene settes til 4 meter. Bredden settes foreløpig til 220mm, men dette vil kunne endres, og vi tar derfor ikke dette med i beregning av lasten på veggen enda.

Dette gir egenvekt på veggene:

$$g_{k,vegg} = 19,6 \frac{kN}{m^2}$$

5.5 Egenvekt dekker

Vår veileder i Backe kan informere oss om at ettersom tre er et såpass lett materiale, er det normalt å «legge på» et ekstra lag med grus oppå dekkene. Dette vil føre til større tyngde, noe som vil forbedre stivheten til bygget, samt fungere som lydisolasjon. Vi legger til grunn en oppbygning av dekker med: 200mm massivtre, 80mm pukk, 60mm steinullisolasjon og 60mm flytsparkel.

Dekkene velges som CLT 200 L5s (5 lameller á 40mm) ettersom dette opprettholder REI90 (Stora Enso, 2022). Det krysslaminerte treet i dekkene har en massetetthet på 4,9 kN/m³. Pukk med en fraksjon på 8-11mm har en massetetthet på 15 kN/m³ (Grusbutikken, u.å.). For steinullisolasjon velger vi trinnlydisolasjon med massetetthet på 1,6kN/m³ fra Byggforsk 471.031 (SINTEF Byggforsk, 2013). For flytsparkel velges gulvavretningsmasse med massetetthet på 20kN/m³ fra Byggforsk 471.031 (SINTEF Byggforsk, 2013).

Egenvekt på dekkene:

$$g_{k,dekke} = 3,5 \frac{kN}{m^2}$$

Tabell 10 Egenvekt dekker: total egenlast på dekkene regnes ut i tabellen

Materiale	Tykkelse (m)	Massetetthet (kN/m ³)	Egenvekt (kN/m ²)
Massivtre (KLT)	0,200	4,9	0,98
Pukk (fraksjon 8-11mm)	0,080	15	1,2
Steinullisolasjon	0,060	1,6	0,096
Gulvavretningsmasse	0,060	20	1,2
Totalt			3,48



Figur 21 Eksempel på oppbygning av dekker med grus, isolasjon og flytsparkel (Svenskt Trä, 2019)

5.6 Egenvekt tak

Taket består av 220mm med massivtre, men justerer massetettheten opp til 5 kN/m³ for å ta høyde for noe av den vekta som vil tilføres fra takpapp og liknende. Egenvekt på taket:

$$g_{k,tak} = 1,1 \frac{kN}{m^2}$$

5.3.6 Nyttelast

For å finne nyttelast for kontorer velges «kategori B» i tabell NA.6.1 i Eurokode1 (Standard Norge, 2019). Nyttelasten for kontorer finner man da ut fra tabell NA.6.2, som gir $3,0 \text{ kN/m}^2$.

$$q_k = 3,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Tabell 11 Oppsummering av karakteristiske laster

Last	Betegnelse	kN/m ²	kN/m ³
Søyler	$g_{k,søyle}$		4,2
Bjelker	$g_{k,bjelke}$		4,2
Vegg	$g_{k,vegg}$	19,6	4,9 (uten høyden)
Dekker	$g_{k,dekke}$	3,5	
Tak	$g_{k,tak}$	1,1	
Nyttelast	q_k	3,0	
Snø	s	1,2	
Vind	v	1,782	

6. Resultat og beregning

6.1 Metode

For beregninger og dimensjonering av bygget finner vi det fordelaktig og tidsbesparende å bruke det finsk-svenske selskapet Stora Enso sitt kalkuleringsprogram Calculatis. Dette er et program for kalkulering og dimensjonering av massivtre-produkter (Stora Enso, u.å.-a). Programmet følger regler fra svenske standarder, noe som er litt strengere enn de norske kravene på noen områder. Vi regner først noen elementer for hånd, slik at vi kan sammenligne våre utregninger med Calculatis sine, og på denne måten bli kjent med programmet. Vi brukte Excel under utregningene slik at vi enkelt kunne endre størrelser og rette opp feil. Vi har også valgt å kommentere utregningene fortløpende i dette kapittelet, ettersom vi ser det som hensiktsmessig å forklare det man ser ut fra kalkulasjonen.

6.2 Søyler for hånd

Vi forenkler utregningene og antar at det kun tilføres komprimerende trykkraft på søylene. Vi regner kreftene som virker på en søyle i midten i 1 etasje og tar utgangspunkt i at alle søylene i alle etasjene har samme dimensjoner, for å forenkle utregningene. Vi regner først en søyle med dimensjonene $b \cdot h = 360 \cdot 440 \text{ mm}$ og høyde/lengde $l = 4 \text{ m}$. De karakteristiske styrkene finner vi i NS-EN 14080:2013+NA:2016 (Standard Norge, 2016b):

$$f_{c,0,k} = 28 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Vi finner partiellfaktoren, γ_m , og fasthetsfaktoren k_{mod} fra NS-EN 1995-1-1:2004 +A1:2008+NA:2010 (Standard Norge, 2010). Den norske verdien på partiellfaktoren finnes i tabell NA2.3:

$$\gamma_{m,norsk} = 1,15$$

Ettersom Calculatis bruker den svenske partialfaktoren, valgte vi også å gjøre det, og finner denne i The CLT Handbook (table 3.2, s.35) (Svenskt Trä, 2019):

$$\gamma_{m,svensk} = 1,25$$

Vi bestemmer k_{mod} fra tabell 3.1, med klimaklasse 1 fra tabell NA.901 og permanent last etter tabell NA2.2:

$$k_{mod} = 0,6$$

Regner ut materialets «design styrke» til å bli:

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_m} = 0,6 \cdot \frac{28}{1,25} = 13,44 \frac{N}{mm^2}$$

Med en dimensjon på 360·440 vil søylens «design kraft kapasitet» bli:

$$N_{c,0,d} = f_{c,0,d} \cdot b \cdot h = 2128,9 \text{ kN}$$

Dette er den lasten søylen vil kunne tåle, og design lasten kan derfor ikke være større enn dette. Nå finner vi design lasten ved å bruke formel 6.10 fra tabell NA.A1.2(B) i Eurokode 0 (Standard Norge, 2016a):

6,10 *Design last, $N_{Ed} = \Sigma \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \Sigma \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$*

6,10a) $N_{Ed} = 1,35 \cdot G_k + 1,5 \cdot 0,7 \cdot Q_{k,1} + 1,5 \cdot 0,7 \cdot Q_{k,i}$

$\gamma_{G,j} = 1,35$ og $\gamma_{Q,1} = 1,5$ fra NA.A1.2(B). Verdien $\Psi_0 = 0,7$ for kategori B, kontorer, og $\Psi_0 = 0,7$ for snølast finnes i tabell NA.A1.1.

6,10b) $N_{Ed} = 1,2 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_{k,1} + 1,5 \cdot 0,7 \cdot Q_{k,i}$

$\gamma_{G,j} = 1,2$ og $\gamma_{Q,1} = 1,5$ fra NA.A1.2(B). Verdien $\Psi_0 = 0,7$ for snølast finnes i tabell NA.A1.1.

Ettersom vi har flere enn 2 etasjer kan vi bruke en etasjereduksjonsfaktor, a_n , som virker på nyttelasten fra overliggende etasjer. Denne er gitt ved punkt NA.6.3.1.2 i Eurokode 1 (Standard Norge, 2019) og kan brukes i formel 6,10b). Ettersom det er 9 etasjer over søylen vi beregner blir etasjereduksjonsfaktoren:

$$\alpha_n = \frac{2 + (n - 2)\Psi_0}{n} = \frac{2 + (9 - 2)0,7}{9} = 0,766$$

For å beregne design lasten ved bruk av formlene må vi beregne lastene som virker på søylen. Det arealet av dekkene og taket som belastes på søylen, er $29m^2$. Bjelkene er 6 meter lange, og dimensjonene er foreløpig $260 \cdot 620mm$, men disse dimensjonene ble senere enkelt justert i Excel.

Tabell 12 :Resultat av laster på søylene

Last	Betegnelse	Andel last	Last på søyle (kN)
Søyler	$g_{k,søyle}$	$4,2 \frac{kN}{m^3} \cdot 4m \cdot (0,36 \cdot 0,44)m^2$	2,66
Bjelker	$g_{k,bjelke}$	$4,2 \frac{kN}{m^3} \cdot 6m \cdot (0,26 \cdot 0,62)m^2$	4,06
Dekker	$g_{k,dekke}$	$3,5 \frac{kN}{m^2} \cdot 29m^2$	101,5
Tak	$g_{k,tak}$	$1,1 \frac{kN}{m^2} \cdot 29m^2$	31,9
Nyttelast	q_k	$3 \frac{kN}{m^2} \cdot 29m^2$	87
Snø	s	$1,2 \frac{kN}{m^2} \cdot 29m^2$	34,8

Den formelen som gir høyest last (den mest ugunstige lasten) vil bli brukt videre i beregningene. Vi bruker lastene som er beregnet og tar høyde for ekstra last fra etasjene over:

6,10a)

$$N_{Ed} = 1,35(10g_{k,s\oyle} + 10g_{k,bjelke} + 9 \cdot g_{k,dekke} + g_{k,tak}) + 1,5 \cdot 0,7 \cdot (9q_k) + 1,5 \cdot 0,7 \cdot s$$
$$N_{Ed} = 2225,7 \text{ kN}$$

6,10b)

$$N_{Ed} = 1,2(10g_{k,s\oyle} + 10g_{k,bjelke} + 9 \cdot g_{k,dekke} + g_{k,tak}) + 1,5 \cdot \alpha_n \cdot (9q_k) + 1,5 \cdot 0,7 \cdot s$$
$$N_{Ed} = 2152,2 \text{ kN}$$

$$\text{Uten } \alpha_n \text{ vil formel 6,10b) bli: } N_{Ed} = 2426,2 \text{ kN}$$

Vi ser fra formlene at 6,10a) gir høyest last. Vi bruker denne for å finne den komprimerende «design lasten.» Den komprimerende design lasten = $N_{Ed} = 2225,7 \text{ kN}$. Søylene må kunne tåle design lasten. Dette sjekkes ved å se om søylen har større design kapasitet:

$$N_{Rd} = N_{c,0,d} = 2128,9 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 2225,7 \text{ kN} > N_{Rd} = 2128,9 \text{ kN}$$

Dette er ikke OK! Søylene tåler ikke kraften som påføres den. Da må vi oppdimensjonere, og det gjorde vi enkelt i Excel. Vi fant at en dimensjon på 440·480mm gir en design last på $N_{Ed} = 2237,7 \text{ kN}$ og en design kapasitet på $N_{Rd} = 2838,5 \text{ kN}$.

$$N_{Ed} = 2237,7 \text{ kN} < N_{Rd} = 2838,5 \text{ kN}$$

Dette er en god dimensjon som tåler lastene som er påført søylen. Utnyttelsesgraden ligger på 79%. En dimensjon på 400·440mm vil gi oss en utnyttelsesgrad på 94%, noe som er akseptabelt, men ettersom at vi ikke har tatt høyde for andre krefter som også kan virke på søylene, er det hensiktsmessig å benytte dimensjonene 440·480mm. For oppklaring: man vil ha en utnyttelsesgrad som ligger opp mot 100%, ettersom det er her bruddgrensen, ULS ligger.

6.3 Søyler med Calculatis

I Calculatis kan man enkelt bestemme materialet, dimensjonene og lasten som påføres søylen. Vi har lagt inn samme dimensjonene som ved utregningene for hånd, og valgt at den skal brann-dimensjoneres for R90. Den skal med andre ord tåle å stå 90 minutter i brann og fortsatt kunne bære lasten. Vi har lagt inn lastene og definert dem etter hvilken type last det er. Se *figur 21* for fordeling av laster.



Figur 22 Laster på søyle

Fra Calculatis finner vi at dimensjonene 360·440mm gir en utnyttelsesgrad på 90%. Med dimensjonene 440·480mm får vi en utnyttelsesgrad på 67%, mot 79% når man regner for hånd. Dette avviket i utnyttelsesgrad skyldes et avvik rundt fasthetsfaktoren k_{mod} . Denne fasthetsfaktoren tar høyde for lastvarigheten og fuktighetsnivået i materialet (Standard Norge, 2010). Dette bygget kan ta utgangspunkt i klimaklasse 1, og at det belastes med permanent last, noe som gir $k_{mod} = 0,6$.

Programmet Calculatis tar høyde for at søylen kvalifiseres til midlertidig lastvarighet på grunn av snølasten, noe som i kombinasjon med klimaklasse 1 gir $k_{mod} = 0,8$ i stedet for den reelle verdien $k_{mod} = 0,6$. Calculatis benytter en delvis feil k_{mod} -verdi, og avviket blir derfor nokså stort, ettersom oppgaven omhandler relativt store laster.

Til tross for dette avviket velger vi likevel å kun bruke Calculatis på videre beregninger av andre elementer (med unntak av bjelker), og begrunner dette med at de svenske kravene fortsatt i utgangspunktet er noe strengere enn de norske. Dessuten er det svært tidsbesparende. Ved bruk av norsk partiellfaktor, γ_m , får vi en utnyttelsesgrad på 73%. Dette viser at beregningene til Calculatis kommer nærmere norske beregningsgrunnlag, enda den likevel gir et bedre resultat.

Ultimate limit state (ULS) - design results (67 %)

Flexural design

Dist.	$f_{m,k}$	$f_{c,0,k}$	$f_{t,0,k}$	γ_m	k_{mod}	$k_{sys,y}$	$k_{h,m,y}$	$k_{h,m,z}$	k_i	$f_{m,y,d}$	$f_{m,z,d}$	$f_{c,0,d}$	$f_{t,0,d}$
[m]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0.0	28.00	28.00	22.30	1.25	0.80	1.00	1.02	1.03	1.00	18.32	18.48	17.92	14.27

Dist.	$M_{y,d}$	$M_{z,d}$	$N_{c,d}$	$N_{t,d}$	$\sigma_{m,y,d}$	$\sigma_{m,z,d}$	$\sigma_{c,d}$	$\sigma_{t,d}$	Utilization
[m]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	
0.0	0.00	0.00	-2553.50	0.00	0.00	0.00	12.09	0.00	67 %

Figur 23 Designresultater i ULS på søyle, fra Calculatis.

6.4 Bjelker for hånd

Vi beregnet bjelker for hånd, før vi sammenlignet disse med bjelker beregnet ved Calculatis. Også her forenkler vi utregningene litt og antar at det kun tilføres komprimerende krefter på bjelkene. I motsetning til søylene vil det resultere i bøyning og skjærkraft. Ettersom bjelkene kun «bærer» dekkene, er den eneste lasten som påvirker bjelkene dekkenes egenvekt og nyttelast, i tillegg til bjelkenes egenvekt. Vi regner først en bjelke med dimensjonene $b \cdot h = 260 \cdot 620\text{mm}$ og høyde/lengde $l = 6\text{m}$. Den reelle lengden er noe kortere, grunnet at bjelkene ligger inntil søylene og derfor mister omtrent 0,4-0,5m i lengden.

De karakteristiske styrkene finner vi i NS-EN 14080:2013+NA:2016 (Standard Norge, 2016b):

$$f_{m,k} = 28 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$f_{v,k} = 3,5 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Partiellfaktoren, γ_m , og fasthetsfaktoren k_{mod} for bjelkene er fortsatt de samme som for søyler. Dette gir oss materialets «design styrker» på:

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_m} = 0,6 \cdot \frac{28}{1,25} = 13,44 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{v,d} = 0,6 \cdot \frac{3,5}{1,25} = 1,68 \frac{N}{mm^2}$$

Ettersom bøyning kun vil skje om y-aksen, vil det kun være hensiktsmessig å beregne «design moment kapasitet» rundt y-aksen:

$$M_{y,d} = \left(\frac{I_y}{\delta_{\max}} \right) f_{m,d} = \omega_y f_{m,d} = \frac{bh^2}{6} f_{m,d}$$

$$M_{y,d} = 223,9 \text{ kNm}$$

Skjærspenningen går langs z-aksen, og vi beregner derfor «design skjær kapasiteten» langs denne aksen:

$$\tau_{\max} = \frac{3V_z}{2A} = \frac{3V_z}{2b_{eff}h}$$

$$b_{eff} = k_{cr}b = 0,67b$$

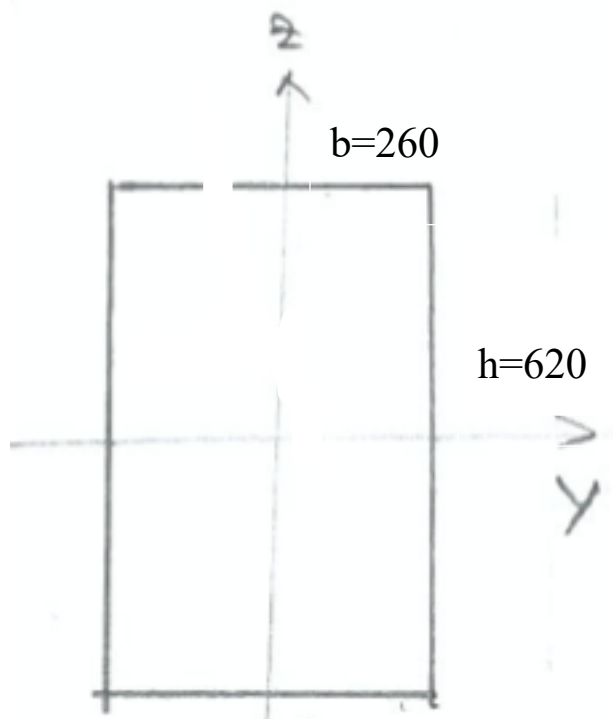
$k_{cr} = 0,67$ for limtre.

Omregnet kan vi si at:

$$V_z = \frac{2}{3} \tau_{\max} * (0,67b)h == V_{z,d} = \frac{2}{3} f_{v,d} * (0,67b)h$$

$$V_{z,d} = 121 \text{ kN}$$

$M_{y,d}$ og $V_{z,d}$ tilsvarer den lasten bjelken vil tåle, med andre ord viser de bjelkens kapasitet. Design lasten kan derfor ikke være større enn disse.



Figur 24: Tverrsnitt av bjelke

Design lasten regnes ut ved hjelp av formlene 6,10a) og 6,10b) som finnes i tabell NA.A1.2(B) i Eurokode 0 (Standard Norge, 2016a). For å beregne design lasten ved bruk av formlene må vi beregne lastene som virker på bjelken. Det arealet av dekkene som belastes på bjelken, er $30m^2$, spennvidden er 5 meter . De aktuelle lastene vises og regnes ut i tabell 12.

Tabell 13 Laster på bjelke

Last	Betegnelse	Andel last	Last på bjelke (kN/m)
Bjelker	$g_{k,bjelke}$	$4,2 \frac{kN}{m^3} \cdot (0,26 \cdot 0,62)m^2$	0,677
Dekker	$g_{k,dekke}$	$3,5 \frac{kN}{m^2} \cdot 5m$	17,5
Nyttelast	q_k	$3 \frac{kN}{m^2} \cdot 5m^2$	15

Vi bruker nå formlene 6,10 for å finne design lasten:

6,10a)

$$w_{Ed} = 1,35 \cdot (g_{k,bjelke} + g_{k,dekke}) + 1,5 \cdot 0,7 \cdot q_k$$
$$w_{Ed} = 40,29 \text{ kN/m}$$

6,10b)

$$w_{Ed} = 1,2 \cdot (g_{k,bjelke} + g_{k,dekke}) + 1,5 \cdot q_k$$
$$N_{Ed} = 44,31 \text{ kN/m}$$

Vi ser fra formlene at 6,10b) gir høyest last. Vi bruker denne for å finne «design lasten» for moment og skjærkraft. Lengden på bjelken er 6 meter. Momentlasten finnes ved:

$$M_{y,Ed} = \frac{w_{Ed}L^2}{8} = 199,4 \text{ kNm}$$

Skjærlasten finnes ved:

$$V_{z,Ed} = \frac{w_{Ed}L}{2} = 132,9 \text{ kN}$$

Bjelken må kunne tåle design lasten. Dette sjekkes ved å se om bjelken har større design kapasitet:

$$M_{y,d} = M_{y,Rd} = 223,9 \text{ kNm}$$

$$V_{z,d} = V_{z,Rd} = 121 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = 223,9 \text{ kNm} > M_{y,Ed} = 199,4 \text{ kNm} \quad \text{OK}$$

$$V_{z,Rd} = 121 \text{ kN} < V_{z,Ed} = 132,9 \text{ kN} \quad \text{IKKE OK}$$

Den dimensjonerende skjærkraften blir her for stor, og vi må derfor oppdimensjonere. I Excel fant vi ut at kun en liten oppdimensjonering på 300·620mm vil være tilstrekkelig. Lastene blir da som vist her:

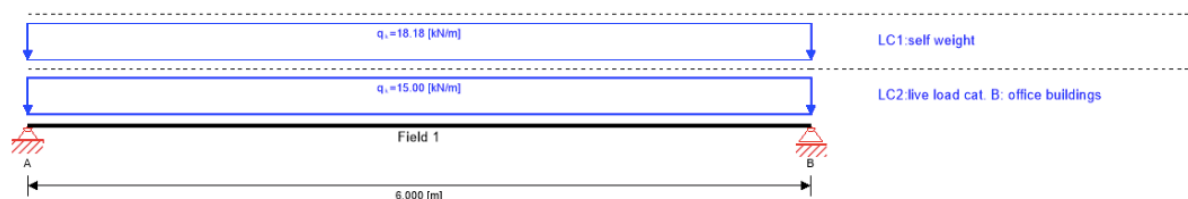
$$M_{y,Rd} = 258,3 \text{ kNm} > M_{y,Ed} = 200 \text{ kNm} \quad 77\% \quad \text{OK}$$

$$V_{z,Rd} = 139,6 \text{ kN} > V_{z,Ed} = 133,3 \text{ kN} \quad 96\% \quad \text{OK}$$

Utnyttelsesgradene ligger nå på 77% for moment og 96% for skjærkraft, og konkluderer med at dette er en god dimensjon som tåler lastene som blir påført den.

6.5 Bjelker med Calculatis

Fra Calculatis finner vi at dimensjonene 260 · 620mm gir en utnyttelsesgrad på 79%, mens ved dimensjonene 300 · 620mm får vi en utnyttelsesgrad på 61%. Dette er en stor forskjell fra hva vi regnet selv, men ettersom vi ønsker å være på den sikre siden i forhold til våre egne beregninger velger vi å bruke dimensjonene 300·620mm. Da kan vi med sikkerhet si at bjelkene skal kunne tåle den dimensjonerende lasten.



Figur 25 Laster på bjelken

Ultimate limit state (ULS) - design results (61 %)

Flexural design

Field	Dist.	$f_{m,k}$	$f_{c,0,k}$	$f_{t,0,k}$	γ_m	k_{mod}	$k_{sys,y}$	$k_{h,m,y}$	$k_{h,m,z}$	k_f	$f_{m,y,d}$	$f_{m,z,d}$	$f_{c,0,d}$	$f_{t,0,d}$
	[m]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
1	3.0	28.00	28.00	22.30	1.25	0.80	1.00	1.00	1.07	1.00	17.92	19.21	17.92	14.27

Field	Dist.	$M_{y,d}$	$M_{z,d}$	$N_{c,d}$	$N_{t,d}$	$\sigma_{m,y,d}$	$\sigma_{m,z,d}$	$\sigma_{c,d}$	$\sigma_{t,d}$	Utilization
	[m]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	
1	3.0	211.69	0.00	0.00	0.00	11.01	0.00	0.00	0.00	61 %

Figur 26 Designresultater i ULS på bjelke, fra Calculatis

6.6 Vegger med Calculatis

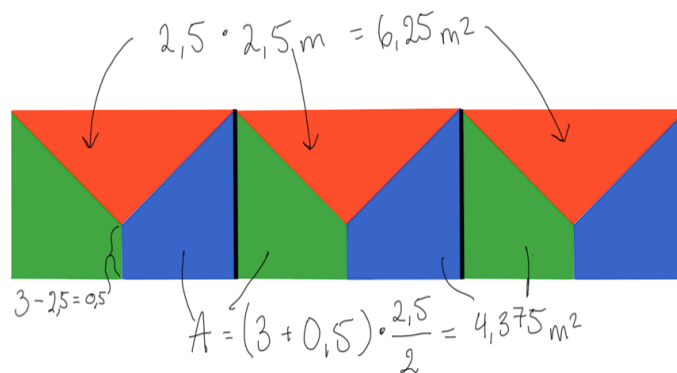
Vi beregnet vegger ved bruk av kalkuleringsprogrammet Calculatis av Stora Enso. Veggen vi beregnet er et utklipp av kortsiden i 1 etasje. Calculatis kan kun beregne opp til 16 meter, og vi så det derfor som hensiktsmessig å ta utgangspunkt i 15 meter av veggen. Dette strekker seg da fra hjørnet på bygget og til den tredje bjelken på veggen.

Lastene som virker på veggene fordeler seg både som jevnt distribuert last fra dekkene og de overliggende veggene, og som punktlaster fra bjelkene som «hviler» på veggene. Det er ikke søyler langs veggen, noe som skyldes at veggen er bærende og ville gjort søyler overflødige. Derfor hviler bjelkene på veggen og skaper punktlaster. For å beregne lastene på veggen må vi dermed beregne både de lastene som virker direkte på veggen og de lastene som virker fra bjelkene.

Etter flere runder med prøving på dimensjonene av veggen fant vi ut at veggen må være 320mm tykk, noe som viser seg å være det tykkeste alternativet til Calculatis. Veggen heter CLT 320 L8s – 2 og består av 8 lameller á 40mm.

De jevnt fordelte lastene på veggen vises og beregnes i *tabell 13*. Arealet som belastes på hver seksjon av veggen er $6,25\text{m}^2$.

Hver seksjon er 5 meter og tilsvarer lengden mellom bjelkene. Tabellen viser også den totale lasten når vi inkluderer last som tilføres fra overliggende etasjer.



Figur 27: Distribusjon av laster på dekker/tak. Viser kun det snittet av kortsiden som virker på veggen.

Figur 27 viser fordelingen av lastene som virker på veggen (oppover på figuren). Den viser kun et snitt av planet for å framheve den veggen som blir kalkulert og lastene som virker på den.

Tabell 14 Distribuerte laster på vegg

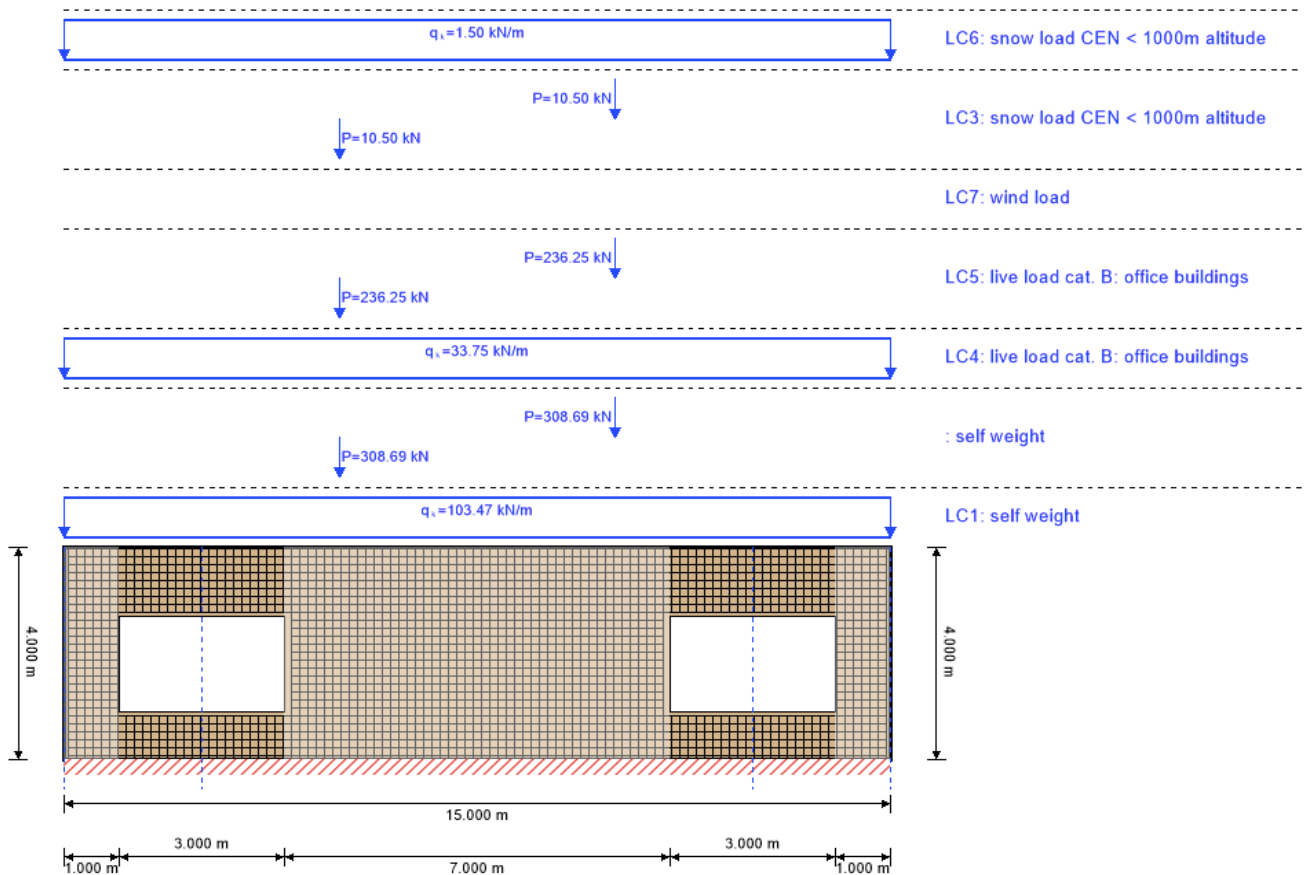
Last	Betegnelse	Andel last	Last på vegg (kN/m)	Last på vegg, med overliggende etasjer (kN/m)
Dekke	$g_{k,dekke}$	$3,5 \frac{kN}{m^2} \cdot \frac{6,25m^2}{5m}$	4,375	39,38
Tak	$g_{k,tak}$	$1,1 \frac{kN}{m^2} \cdot \frac{6,25m^2}{5m}$	1,375	1,375
Vegg	$g_{k,vegg}$	$4,9 \frac{kN}{m^3} \cdot 4m \cdot 0,320m$	6,272	62,72
Nyttelast	q_k	$3 \frac{kN}{m^2} \cdot \frac{6,25m^2}{5m}$	3,75	33,75
Snø	s	$1,2 \frac{kN}{m^2} \cdot \frac{6,25m^2}{5m}$	1,5	1,5

Punktlastene som virker på veggen vises og beregnes i *tabell 14*. Disse lastene er i laster som virker på bjelkene, men som videre overføres til veggen som punktlast. Bjelkene er 6 meter lange, men vi antar at halve bjelken gir last til veggen, mens den andre halvdelene gir last til søylen i den andre enden.

Arealet som belastes på hver bjelke blir da $2 \cdot 4,375m^2 = 8,75m^2$. Tabellen viser også den totale lasten når vi inkluderer last som tilføres fra overliggende etasjer. Her tar vi utgangspunkt i at lasten fra alle bjelkene forplanter seg som en punktlast gjennom hele fasaden som blir større til lenger ned den kommer.

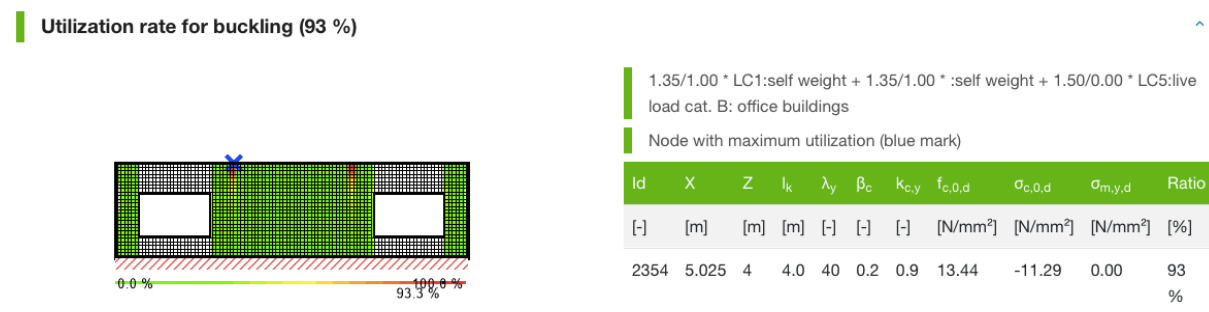
Tabell 15 Punktlaster på vegg

Last	Betegnelse	Andel last	Last på vegg (kN)	Last på vegg, med overliggende etasjer (kN)
Bjelker	$g_{k,bjelke}$	$4,2 \frac{kN}{m^3} \cdot 3m \cdot (0,3 \cdot 0,62)m^2$	2,344	23,44
Dekker	$g_{k,dekke}$	$3,5 \frac{kN}{m^2} \cdot 8,75m^2$	30,625	275,63
Tak	$g_{k,tak}$	$1,1 \frac{kN}{m^2} \cdot 8,75m^2$	9,625	9,625
Nyttelast	q_k	$3 \frac{kN}{m^2} \cdot 8,75m^2$	26,25	236,25
Snø	s	$1,2 \frac{kN}{m^2} \cdot 8,75m^2$	10,5	10,5



Figur 28 Laster på vegg

Vi la inn alle lastene i Calculatis (se figur 27) og fikk resultater som viser at utnyttelsesgraden er 93%. Det imidlertid enkelt å endre utfallet ved å for eksempel endre størrelsen på vinduene. Det hadde heller ikke noe å si om det var ett vindu i midten, 2 på siden (som på figuren) eller 3 vinduer, så lenge de var fordelt likt mellom lastene. Hvor høyt vinduene sitter på veggen spilte også en viktig rolle. Vinduene er nå satt til 0,9 meter over gulvet. Vi testet hvordan utfallet ville bli med vinduer som startet 1,0 meter over gulvet. Da ble utnyttelsesgraden 99%, hvor det svakeste punktet var på midten av vindusåpningen. Området hvor punktlastene virker på veggen ser ut til å være det mest kritiske området. Her er utnyttelsesgraden 93%.



Figur 29 Designresultater i ULS på vegg, viser det mest kritiske punktet.

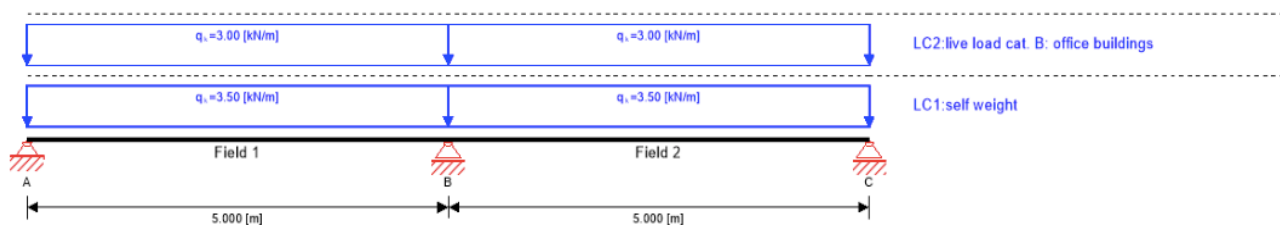
Ved utregningene har vi brukt verst tenkelige utfall og beregnet alle veggene til samme tykkelse, men i realiteten vil det ikke være nødvendig å ha like tykke bærende vegger i de øverste og nederste etasjene. Som en tommelfingerregel (gitt av vår veileder) kan man si at veggene blir 20mm smalere for hver 2. etasje man bygger i høyden. Dette kommer til å bli brukt til å regne økonomi og bærekraft videre.

6.7 Dekker med Calculatis

Vi kalkulerte dekkene i Calculatis som en sikkerhetsjekk for å se om CLT 200 L5s ville tåle lastene. De eneste lastene som virker på dekkene er dekkets egenvekt, og nyttelasten. For å gjøre utregningene lett forståelige ser vi på 1 meter bredde av dekkene, selv om de i utgangspunktet er 6 meter. Dette spiller ingen rolle i utregningene.

Tabell 16 Beregnet laster på dekker

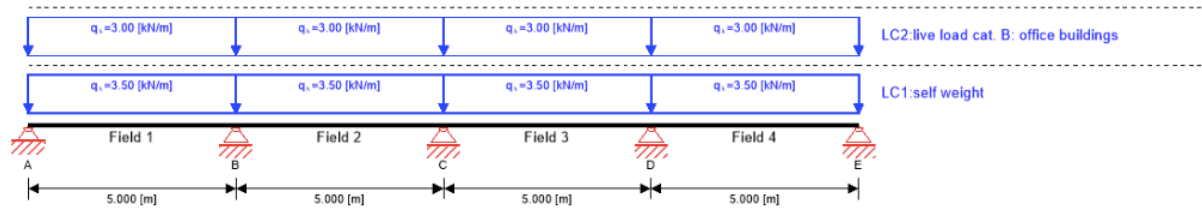
Last	Betegnelse	Andel last	Last på bjelke (kN/m)
Dekker	$g_{k,dekke}$	$3,5 \frac{kN}{m^2} \cdot 1m$	3,5
Nyttelast	q_k	$3 \frac{kN}{m^2} \cdot 1m^2$	3



Figur 30 Laster på dekke slik som beregnet i tabellen ovenfor, 2 bredder à 5 meter

Ut fra Calculatis ser vi at utnyttelsesgraden ligger på 47%. På dekker gir Calculatis oss også noen alternative dimensjoner, og vi velger da heller å bruke CLT 200 L7s, som gir 65% utnyttelsesgrad.

Vi kunne også ha valgt CLT 160 L5s (70%) eller CLT 160 L5s – 2 (86%) (Stora Enso, u.å.-b), men dette ville skapt større konsekvenser for beregninger av laster på de andre elementene i konstruksjonen. Hvis vi setter inn hele dekkets bredde (20 meter) vil utnyttelsesgraden gå litt opp, til 71%, men dette er fortsatt langt innenfor godkjent område.



Figur 31 Laster på dekke, 4 bredder à 5 meter

6.8 Dimensjoner for bygg med 10 etasjer

Resultatene gir oss elementer som vil kunne brukes i konstruksjonen. I *tabell 16* har vi laget en sammenstilling over dimensjonene som brukes i oppgaven ved 10 etasjer.

Tabell 17 Dimensjoner ved 10 etasjers bygg

Element	Dimensjon
Søylar	440mm x 480mm
Bjelker	300mm x 620mm
Vegger	Tykkelse: 320mm (avtar 20mm per 2. etasje oppover)
Dekker	200mm

7. Dimensjonering for bygg med varierende antall etasjer

Vi ønsker å få en forståelse av når et bygg blir for stort til at det vil lønne seg økonomisk og bærekraftig å bygge med massivtre. Derfor må vi også se på hvilke dimensjoner som trengs om konstruksjonen ble bygget med et annet antall etasjer. Vi skal se på hvordan bygget blir med henholdsvis 8, 12 og 14 etasjer. Ettersom det er tidkrevende å regne alt for hånd, kommer vi utelukkende til å bruke Calculatis for disse beregningene. For at forholdet mellom resultatene fra de ulike etasjene skal bli så likt som mulig, er det viktig at utnyttelsesgraden av elementene blir omtrent den samme som for bygget med 10 etasjer. Da finner vi det materialbruket som trengs for å opprettholde samme egenskaper som for de andre byggene.

Dekker og bjelker er uendret i alle byggene. Dette skyldes at de kun bærer sin egenvekt og nyttelasten som er tilført. De får ikke tilført vekt fra etasjene over slik som søyler og vegger gjør. På bakgrunn av dette kommer vi ikke til å regne dimensjoner for dekker og bjelker igjen, men bruke de som er oppgitt i bygget med 10 etasjer.

Lastene som er brukt tar utgangspunkt i beregningene fra bygget på 10 etasjer, og vises i *tabell 17* for søyler, og *tabell 18* og *tabell 19* for vegger. Resultatene vil bli oppgitt for hver etasje.

Tabell 18 Søyelaster ved varierende antall etasjer

Last	Betegnelse	Andel last	Last på søyle (kN)
Søyler	$g_{k,søyle}$	$4,2 \frac{kN}{m^3} \cdot 4m \cdot (x_1 \cdot x_2)m^2$	$16,8 \frac{kN}{m^3} \cdot (x)m^2$
Bjelker	$g_{k,bjelke}$	$4,2 \frac{kN}{m^3} \cdot 6m \cdot (0,26 \cdot 0,62)m^2$	4,06
Dekker	$g_{k,dekke}$	$3,5 \frac{kN}{m^2} \cdot 29m^2$	101,5
Tak	$g_{k,tak}$	$1,1 \frac{kN}{m^2} \cdot 29m^2$	31,9
Nyttelast	q_k	$3 \frac{kN}{m^2} \cdot 29m^2$	87
Snø	s	$1,2 \frac{kN}{m^2} \cdot 29m^2$	34,8

Tabell 19 Jevnt distribuerte laster på vegger ved varierende antall etasjer

Last	Betegnelse	Andel last	Last på vegg (kN/m)
Dekke	$g_{k,dekke}$	$3,5 \frac{kN}{m^2} \cdot \frac{6,25m^2}{5m}$	4,375
Tak	$g_{k,tak}$	$1,1 \frac{kN}{m^2} \cdot \frac{6,25m^2}{5m}$	1,375
Vegg	$g_{k,vegg}$	$4,9 \frac{kN}{m^3} \cdot 4m \cdot (x)m$	$19,6 \cdot x$
Nyttelast	q_k	$3 \frac{kN}{m^2} \cdot \frac{6,25m^2}{5m}$	3,75
Snø	s	$1,2 \frac{kN}{m^2} \cdot \frac{6,25m^2}{5m}$	1,5

Tabell 20 Punktlaster på vegger ved varierende antall etasjer

Last	Betegnelse	Andel last	Last på vegg (kN)
Bjelker	$g_{k,bjelke}$	$4,2 \frac{kN}{m^3} \cdot 3m \cdot (0,3 \cdot 0,62)m^2$	2,344
Dekker	$g_{k,dekke}$	$3,5 \frac{kN}{m^2} \cdot 8,75m^2$	30,625
Tak	$g_{k,tak}$	$1,1 \frac{kN}{m^2} \cdot 8,75m^2$	9,625
Nyttelast	q_k	$3 \frac{kN}{m^2} \cdot 8,75m^2$	26,25
Snø	s	$1,2 \frac{kN}{m^2} \cdot 8,75m^2$	10,5

7.1 Dimensjoner for bygg med 8 etasjer

Lastene som brukes for søylene i bygget med 8 etasjer er vist i *tabell 20*. Det er kun egenvekten til søylene som endres fra 10-etasjers bygget, ettersom at dimensjonene endres.

Tabell 21 Laster på søyler ved 8 etasjer

Last	Last på søyle (kN)	Last medregnet overliggende etasjer	Egenvekt brukt i Calculatis
Søyler	$16,8 \frac{kN}{m^3} \cdot (0,360 \cdot 0,440)m^2 = 2,66$	21,29 kN	796,17 kN
Bjelker	4,06	32,48 kN	
Dekker	101,5	710,5 kN	
Tak	31,9	31,9 kN	
Nyttelast	87	609 kN	
Snø	34,8	34,8 kN	

En søyle med dimensjonene 360 mm · 440 mm gir en utnyttelsesgrad på 70% (83% for hånd). Dette er nærme utnyttelsesgraden ved 10 etasjer som ligger på 67% (79% for hånd). Vi bruker disse dimensjonene videre.

Når man regner 8 etasjer, vil man i realiteten fjerne 2 etasjer fra bygget med 10 etasjer. Hvis tommelfingerregelen om at veggene blir 20mm smalere for hver 2. etasje legges til grunn, skal veggene kunne dimensjoneres til 300mm. Lastene som brukes vises i tabellene under.

Tabell 22 Distribuerte laster ved 8 etasjer

Last	Last på vegg (kN/m)	Last medregnet overliggende etasjer (kN/m)	Egenvekt brukt i Calculatis
Dekke	4,375	30,63	75,09 kN/m
Tak	1,375	1,375	
Vegg, 280 mm	$4,9 \frac{kN}{m^3} \cdot 4m \cdot 0,280m = 5,49$	43,94	
Vegg, 300 mm	$4,9 \frac{kN}{m^3} \cdot 4m \cdot 0,300m = 5,88$	47,04	79,04 kN/m
Nyttelast	3,75	26,25	
Snø	1,5	1,5	

Tabell 23 Punktlaster ved 8 etasjer

Last	Last på vegg (kN)	Last medregnet overliggende etasjer (kN)	Egenvekt brukt i Calculatis
Bjelker	2,344	18,75	242,75 kN
Dekker	30,625	214,38	
Tak	9,625	9,625	
Nyttelast	26,25	183,75	
Snø	10,5	10,5	

Ved 8 etasjer vil en vegg på 300 mm ha en utnyttelsesgrad på 84%, mens vi fant ut at ved 280 mm ligger utnyttelsesgraden på 90%. Veggen på 280 mm gir oss derfor en utnyttelsesgrad som blir likere den for 10 etasjer (93%). Vi velger veggen på 280 mm i videre beregninger. I tabell 23 vises de valgte dimensjonene vi bruker ved et bygg på 8 etasjer.

Tabell 24 Dimensjoner ved 8 etasjers bygg

Element	Dimensjon
Søylar	360mm x 440mm
Bjelker	300mm x 620mm
Vegger	Tykkelse: 280mm (avtar 20mm per 2. etasje oppover)
Dekker	200mm

7.2 Dimensjoner for bygg med 12 etasjer

Lastene som brukes for søylene i bygget med 12 etasjer er vist i *tabell 24*. Det er kun egenvekten til søylene som endres fra 10-etasjers bygget, ettersom at dimensjonene endres. Her måtte vi oppdimensjonere søylene.

Tabell 25 Laster på søylar ved 12 etasjer

Last	Last på søyle (kN)	Last medregnet overliggende etasjer	Egenvekt brukt i Calculatis
Søylar	$16,8 \frac{kN}{m^3} \cdot (0,480 \cdot 0,520)m^2 = 4,19$	50,32 kN	1247,44 kN
Bjelker	4,06	48,72 kN	
Dekker	101,5	1116,5 kN	
Tak	31,9	31,9 kN	
Nyttelast	87	957 kN	
Snø	34,8	34,8 kN	

Vi fant at den mest passende dimensjonen på søyler ved 12 etasjer var 480 mm · 520 mm. Dette gir en utnyttelsesgrad på 70% i Calculatis (og 82% for hånd). Vi bruker denne dimensjonen videre. Når man beregner vegger i store bygg i Calculatis, får man problemer med at det er en begrensning på hvor tykke veggene kan være. Calculatis tillater ikke vegger som er tykkere enn 320 mm. Selv om vegger normalt ikke produseres tykkere enn dette, kan man i teorien likevel produsere elementer som er tykkere. Praktiske forhold som håndtering og transport setter normalt begrensninger for det (Trefokus, u.å.).

Ettersom vegger på 320 mm blir for tynne for et bygg på 12 etasjer, så har vi i denne oppgaven valgt å ta en tenkt størrelse på 400 mm. For å kunne beregne dette i Calculatis tenker vi at det blir brukt 2 vegger, den ene på 320 mm og den andre på 80 mm. Veggen på 320 mm skal da kunne tåle 80% av lasten (320mm er 80% av 400mm). Vi beregner lastene som vist i tabellene under.

Tabell 26 Distribuerte laster ved 12 etasjer

Last	Last på vegg (kN/m)	Last medregnet overliggende etasjer (kN/m)	Laster brukt i Calculatis (80%) (kN/m)
Dekke	4,375	48,13	114,86
Tak	1,375	1,375	
Vegg, 400 mm	$4,9 \frac{kN}{m^3} \cdot 4m \cdot 0,400m = 7,84$	94,08	
Nyttelast	3,75	41,25	33
Snø	1,5	1,5	1,2

Tabell 27 Punktlaster ved 12 etasjer

Last	Last på vegg (kN)	Last medregnet overliggende etasjer (kN)	Laster brukt i Calculatis (80%) (kN)
Bjelker	2,344	28,13	299,70
Dekker	30,625	336,88	
Tak	9,625	9,625	
Nyttelast	26,25	288,75	231
Snø	10,5	10,5	8,4

Ved å beregne lastene på denne måten fant vi at utnyttelsesgraden til veggen er 96%. Vi velger derfor å bruke veggen med en tykkelse på 400 mm videre. I tabell 27 vises de valgte dimensjonene vi bruker ved et bygg på 12 etasjer.

Tabell 28 Dimensjoner ved 12 etasjers bygg

Element	Dimensjon
Søyler	480mm x 520mm
Bjelker	300mm x 620mm
Vegger	Tykkelse: 400mm (avtar 20mm per 2. etasje oppover)
Dekker	200mm

7.3 Dimensjoner for bygg med 14 etasjer

Lastene som brukes for søylene i bygget med 14 etasjer er vist i *tabell 28*. Det er fortsatt kun egenvekten til søylene som endres fra 10-etasjers bygget, ettersom at dimensjonene endres. Søylene må oppdimensjoneres.

Tabell 29 Laster på søyler ved 14 etasjer

Last	Last på søyle (kN)	Last medregnet overliggende etasjer	Egenvekt brukt i Calculatis
Søyler	$16,8 \frac{kN}{m^3} \cdot (0,520 \cdot 0,560)m^2 = 4,89$	68,49 kN	1476,73 kN
Bjelker	4,06	56,84 kN	
Dekker	101,5	1319,5 kN	
Tak	31,9	31,9 kN	
Nyttelast	87	1131 kN	
Snø	34,8	34,8 kN	

Ved 14 etasjer var den mest passende dimensjonen på søyler 520 mm · 560 mm. Utnyttelsesgraden blir da 71% i Calculatis (og 83% for hånd). Vi bruker denne dimensjonen videre. Også her fikk vi problemer med å beregne veggene i Calculatis som en følge av begrensningen på tykkelsen på veggene. Calculatis tillater ikke vegger som er tykkere enn 320 mm, men vi valgte likevel å tenke oss én tykk vegg bestående av 2 vegger.

Vi var nødt til å prøve flere ulike alternativer. Det eneste alternativet som viste seg å tåle lasten, er en vegg med tykkelsen 640 mm. Da beregner vi lasten fordelt på 2 vegger med en tykkelse på 320 mm. 50% av den totale lasten fordeles da på hver vegg. I tabellene under vises lastene som brukes.

Tabell 30 Distribuerte laster ved 14 etasjer

Last	Last på vegg (kN/m)	Last medregnet overliggende etasjer (kN/m)	Laster brukt i Calculatis (50%) (kN/m)
Dekke	4,375	56,86	116,93
Tak	1,375	1,375	
Vegg, 400 mm	$4,9 \frac{kN}{m^3} \cdot 4m \cdot 0,640m = 12,54$	175,62	
Nyttelast	3,75	48,75	24,38
Snø	1,5	1,5	0,75

Tabell 31 Punktlaster ved 14 etasjer

Last	Last på vegg (kN)	Last medregnet overliggende etasjer (kN)	Laster brukt i Calculatis (50%) (kN)
Bjelker	2,344	32,82	220,29
Dekker	30,625	398,13	
Tak	9,625	9,625	
Nyttelast	26,25	341,25	170,63
Snø	10,5	10,5	5,25

Ut fra disse beregningene får veggen på 640 mm en utnyttelsesgrad på 98%. Tykkelsen blir brukt i videre beregninger, sammen med de andre dimensjonene som vist i *tabell 31*.

Tabell 32 Dimensjoner ved 14 etasjers bygg

Element	Dimensjon
Søylar	520mm x 560mm
Bjelker	300mm x 620mm
Vegger	Tykkelse: 640mm (avtar 20mm per 2. etasje oppover)
Dekker	200mm

8. Resultater for økonomi og klimagassutslipp

Ved hjelp av programvaren Solibri har vi analysert bygningsmodellene. Det har vært fokus på å finne pris på byggene, samt vurdere klimagassutslipp. Ved å kjøre modellene gjennom Solibri har vi fått oppgitt de modellerte mengdene av de ulike elementene. Videre har det blitt laget en rapport av hver modell hvor pris og klimaregnskap kommer tydelig fram. Rapporten er laget med bruk av Backe Entreprenør sin mal for mengder og budsjettpris ved bygging i massivtre (*se vedlegg A*).

Rapporten framstilles i Excel og viser pris på bygget, herunder pris for prosjektering (PRO), utførelse (UTF), materialer og total kostnad. I tillegg oppgis monterings tid på bygget, og klimagassutslipp. Det legges fram 2 verdier for klimagassutslippet, én som følger kravene til TEK17 for beregning av klimaregnskap, og én som viser den reelle verdien (dette er ikke lov å regne i et klimaregnskap i Norge). I påfølgende punkter vises utklipp fra rapportene med alle de relevante dataene for oppgaven. *Tabell 32* viser en oversikt over de aktuelle dataene fra alle rapportene.

8 etasjer

Mengder og budsjettpris, Massivtre		
PRO	kr	2 165 586
UTF	kr	2 388 750
Materialer	kr	20 630 815
Totalt	kr	25 185 151
Co2 Eqv		-1556,71 tCO2e
Co2 Eqv TEK17		533,46 tCO2e
Montasjetid		49 Arbeidsdager
729 stk		

Figur 32 Mengder og pris for bygg på 8 etasjer (utklipp fra rapport)

10 etasjer

Mengder og budsjettpris, Massivtre		
PRO	kr	2 864 316
UTF	kr	2 973 750
Materialer	kr	27 417 404
Totalt	kr	33 255 470
Co2 Eqv		-2060,97 tCO2e
Co2 Eqv TEK17		704,88 tCO2e
Montasjetid		61 Arbeidsdager
914 stk		

Figur 33 Mengder og pris for bygg på 10 etasjer (utklipp fra rapport)

12 etasjer

Mengder og budsjettpris, Massivtre		
PRO	kr	3 767 569
UTF	kr	3 558 750
Materialer	kr	36 344 982
Totalt	kr	43 671 301
Co2 Eqv		-2727,09 tCO2e
Co2 Eqv TEK17		934,19 tCO2e
Montasjetid		73 Arbeidsdager
1082 stk		

Figur 34 Mengder og pris for bygg på 12 etasjer (utklipp fra rapport)

14 etasjer

Mengder og budsjettpris, Massivtre		
PRO	kr	5 624 274
UTF	kr	4 143 750
Materialer	kr	55 129 692
Totalt	kr	64 897 716
Co2 Eqv		-4136,20 tCO2e
Co2 Eqv TEK17		1427,34 tCO2e
Montasjetid		85 Arbeidsdager
1263 stk		

Figur 35 Mengder og pris for bygg på 14 etasjer (utklipp fra rapport)

Sammenstilling av rapporter for bygg med varierende høyde

Tabell 33 Oversikt over verdier for økonomi og klimagassutslipp

Bygg	Antall elementer	Monteringstid	Total byggekostnad	Utslipp i CO₂ – ekvivalenter (TEK17)
8 etasjer	729 stk	49 arbeidsdager	25,2 mill. kroner	533 tonn CO ₂ e
10 etasjer	914 stk	61 arbeidsdager	33,3 mill. kroner	705 tonn CO ₂ e
12 etasjer	1082 stk	73 arbeidsdager	43,7 mill. kroner	934 tonn CO ₂ e
14 etasjer	1263 stk	85 arbeidsdager	64,9 mill. kroner	1427 tonn CO ₂ e

9. Spørsmål til ansatte hos Backe

Vi stilte noen spørsmål til et utvalg ansatte i Backe Rogaland og Backe Entreprenør som har jobbet, og jobber med massivtre for å høre deres synspunkter på byggemetoden. De vi spurte var forholdsvis vår veileder Kenneth Hatlestad som jobber i Backe Entreprenør, og Arne-Reidar Rasmussen og Michael Skargren som begge er prosjektledere i Backe Rogaland. Spørsmålene vi stilte, og svarene vi fikk følger i avsnittene under.

Spørsmål 1: *Hvorfor velger dere å bygge i massivtre framfor tradisjonelle byggematerialer som stål og betong? Er det på grunn av at det er rimeligere å bygge i tre enn betong?*

Kenneth svarer: Det er forskjellige grunner til å velge å bygge i massivtre. Én kan være at kunden ønsker dette, en annen at det er det mest miljøvennlige alternativet eller at det rett og slett er det billigste alternativet.

Arne-Reidar legger til: Du kan spare byggetid for at du bygger med ferdigproduserte «klosser» du stabler opp. Vi sparte ca. 1,5-2,5 måned i tid på bærekonstruksjon på Lyse. Du har for eksempel ingen tørketid.

Spørsmål 2: *Hva er det som eventuelt gjør at massivtre stiller sterkere økonomisk enn tradisjonelle byggemetoder?*

Kenneth svarer: For at massivtre skal være det mest fordelaktige økonomisk må bygget være løst som et massivtrebygg i utgangspunktet. I tillegg så har prisene på tre gått en god del ned, mens prisen på stål og betong har gått opp.

Spørsmål 3: *Tror dere at det vil være økonomisk å bygge i massivtre for bygninger med flere enn 8 etasjer? Da tenker vi på 10-, 12-, 14 etasjer osv. Hva tror dere evt. gjør at det ikke lønner seg med tanke på økonomi og miljø?*

Kenneth svarer: Ja, jeg tenker grensen ligger rundt 10 etasje og da er det økonomi og bærekraft som slår inn tror jeg. Bærekraft ift. unødige stort forbruk av materialer.

Spørsmål 4: *Når tenker dere at man bør bygge de første etasjene i betong, men resten av bygningen med massivtre? Og hvorfor?*

Kenneth svarer: Så ofte som mulig. Vi vil alltid måtte ha betong i nedre del av byggene, spørsmålet blir heller hvor mange etasjer som bør bygges i betong. Ref. svar over (svar på spørsmål 3).

Spørsmål 5: *Hva tror dere er grunnen til at ikke flere velger å bygge med massivtre?*

Kenneth svarer: Mangel på kunnskap er nok den største årsaken.

Arne-Reidar svarer: Det er mindre leverandører, mindre utbredt, mye er fremdeles veldig nytt, ikke alle kan ha en «Kenneth Hatlestad» som kan sette byggene sammen for deg, du må ofte til utenlandske leverandører som er mer krevende med språk og logistikk.

Spørsmål 6: *Spiller kostnad med transport og import av materialet noen rolle i forbindelse med bygging av massivtre, sammenlignet med betong og stål? Eventuelt hvorfor er det dyrere/billigere med massivtre?*

Kenneth svarer: Transport utgjør en veldig liten del av kostnadene. Og det vil alltid være dyrere å transportere betong, nesten uavhengig av distanse.

Arne-Reidar legger til: Her spør det litt hva du sammenligner med, stedstøpt vs. massivtre? Eller massivtre vs. betongelementer?

10.Diskusjon

I utgangspunktet vil bruk av treprodukter i konstruksjoner resultere i lavere miljøbelastning, og massivtre som byggemetode er derfor et gunstig alternativ fremfor tradisjonelle byggematerialer. Det må likevel stilles spørsmål ved hvor høyt et trebygg kan bygges før det ikke lenger resulterer i et gunstig utfall.

Høybygg med over 12-14 etasjer har et høyere klimaavtrykk enn lavere bygg, men med konkrete målsettinger knyttet til ulike aspekter av bærekraft kan det være mulig å bygge bærekraftig i høyden. Det kan være i form av fornybare energikilder, materialbruk, minimalisering av avfall, dokumentasjon av livsløpsanalyser og klimaregnskap i tidlig fase for CO₂-mål.

10.1 Laster

Ved beregning av egenvekter i byggene har det kun blitt medregnet vekt fra de bærende komponentene som inngår i en konstruksjon. Med andre ord har lasten hovedsakelig vært et resultat av massivtreets egenvekt. I et virkelig bygg ville også mindre betydelige laster vært medregnet, som for eksempel gips, isolasjon og elektronikk. Disse materialene har mindre vekt enn massivtreet, og er ikke bærende. Derfor har de heller ikke blitt inkludert i beregningene.

Med tanke på at byggene har mange etasjer, fører dette til noe unøyaktige utregninger videre. Dette skyldes at selv lette komponenter kan tilføre mye last når man legger sammen alle etasjene oppå hverandre.

Vinduer tilfører en vekt som er så betydelig at det kunne vært relevant å beregne dem, men veggene har i dette tilfellet blitt forenklet og blitt beregnet i sin helhet uten å ta hensyn til vinduer.

Dekkene er de eneste elementene hvor det er inkludert ekstra vekt utenom massivtreet. Her tilfører pukk og avretningsmasse så mye ekstra vekt at det vil bli mer unøyaktig å utelate dem fra beregningene. Man ser videre i utregningene at dekkene står for den største andelen last som virker på elementene.

10.2 Beregninger

Beregningene er i hovedsak blitt utført med hjelp av kalkyleprogrammet Calculatis fra massivtre-leverandøren Stora Enso. Her kan man velge det elementet som skal brukes og bestemme kvaliteten på det materialet som skal benyttes. Calculatis tar utgangspunkt i svenske krav, noe som generelt sett er litt strengere enn de norske kravene.

Både søyler og bjelker ble i tillegg beregnet for hånd, og her ble utnyttelsesgraden litt større enn den i Calculatis. Disse avvikene skyldes at Calculatis kvalifiserer elementene til midlertidig lastvarighet på grunn av snølasten, selv om resten av lastene virker permanent. I resultat av dette får elementene større lastkapasitet enn de skulle hatt, og man får en lavere utnyttelsesgrad. Utnyttelsesgraden sier noe om hvor stor del av materialets kapasitet som er utnyttet.

Ettersom at bygget er plassert i Stavanger påvirker snøforholdene bygget i liten grad. Snølasten står seg ut som den minste lasten, men vi regner med den for å inkludere flest mulig komprimerende laster.

Vindlast er utelukket fra beregningene på bygget. Konsekvensen av dette blir unøyaktige beregninger ettersom at vind påvirker store bygg i vesentlig grad, spesielt i den delen av landet bygget er plassert.

Ved beregning av vegger er det ikke tatt høyde for vindusåpningene. Vindusåpningene har derfor blitt beregnet som vegg, noe som har tilført ekstra last på veggene. Denne vekten burde vært trukket fra, og blir en feilkilde i beregningene.

10.3 Dimensjoner

Dimensjonene og resultatene ble i utgangspunktet beregnet for å tåle et bygg med en høyde på 10 etasjer. For å få en forståelse av når bygget blir så stort at det må benyttes unødige store mengder materialer, måtte vi også beregne dimensjonene for bygg med 8, 12 og 14 etasjer.

For at dimensjonene skal kunne måles likt i forhold til hverandre er det viktig at utnyttelsesgraden forblir omtrent lik selv om dimensjonene og lastene økes. En søyle med en utnyttelsesgrad på 100% har utnyttet mye mer av kapasiteten sin enn en søyle med 50% utnyttelsesgrad. I bygget på 10 etasjer var det mulig å bruke samme dimensjonene på søylene som i bygget med 8 etasjer, men dette gir en unøyaktig sammenlikning. For søyler på 360mm · 440mm vil utnyttelsesgraden nemlig være 70% for 8-etasjers-bygget og 90% for 10-etasjers-bygget.

Ut fra beregningene ser vi at søylene øker jevnt for hver 2. etasje. Mellom 8 etasjer og 10 etasjer øker søylens dimensjoner 80mm i bredden og 40mm i dybden. Mellom de andre alternative etasjene øker dimensjonene 40mm i begge retninger. Dermed øker materialbruken mest mellom 8 og 10 etasjer, med 33%, eller 0,05m² for hver søyle. Dette er på grunn av den store endringen i bredden på 80mm. Ser vi på dimensjonene mellom 10 og 12 etasjer øker de med 18%, eller 0,038m², mens mellom 12 og 14 øker de med 16,7%, eller 0,042m². Her ser vi at prosentvis økning går ned for hver 2. etasje, men man øker det aktuelle materialbruket hver gang. Hadde det vært en like jevn økning (40mm i bredden og dybden) opp til 16 etasjer ville økningen i prosent vært 15,4%, mens arealet til søylens snitt ville økt med 0,048m².

Ser vi på søylene i et lukket system er det i vårt tilfelle mellom 8 og 10 etasjer at materialbruken øker mest. For vegger er det derimot noe annerledes. Veggene i bygget måtte være 320mm dersom bygget hadde 10 etasjer, men de behøvde kun å være 280mm dersom bygget bestod av 8 etasjer. Dette er en økning i veggens tykkelse på 40mm. Fra 10 til 12 etasjer måtte veggen økes med 80mm, fra 320mm til 400mm. Fra 12 til 14 etasjer måtte veggen økes med ytterligere 140mm, fra 400mm til 540mm. Her kommer det tydelig fram at veggen må være unødige stor allerede ved 12 etasjer, og ekstremt stor ved 14 etasjer. Satt i perspektiv brukes det normalt ikke vegger med tykkelser større enn 320mm, og Calculatis hadde heller ikke mulighet til å regne vegger større enn dette (Stora Enso, u.å.-b). Ved 14 etasjer blir veggen derfor 2 ganger så stor som maksimal tykkelse.

For å kunne regne veggene som har tykkelse større enn 320mm var vi, som tidligere beskrevet, nødt til å tenke oss at vi brukte 2 vegger. I bygget med 12 etasjer tok vi utgangspunkt i en vegg på 320mm og en ekstra vegg på 80mm. Vi tilførte 80% av den totale lasten til veggen på 320mm. For bygget med 14 etasjer måtte vi ta utgangspunkt i 2 vegger på 320mm og tilførte derfor 50% av den totale lasten til veggen.

Dette er en ufullstendig måte å gjøre det på. Beregningen av hvor mye last veggene tåler blir ikke nøyaktig og man finner ikke ut hva veggene egentlig ville ha tålt. Det er likevel sannsynlig å tenke seg at veggene ville ha tålt mer, og at utnyttelsesgraden dermed ville blitt mindre. Vi gjorde en test på dette hvor vi brukte 2 vegger på 200 mm hver, og fordelte halvparten av lasten på hver vegg (fordi 200 mm er 50% av 400 mm). Da ble utnyttelsesgraden beregnet til 146%. Ut fra dette kan vi se at det er mer nøyaktig å bruke en dimensjon som kommer så nærme den reelle dimensjonen som mulig. Veggen på 320 mm ga et mye mer nøyaktig bilde av hvor mye en vegg på 400 mm tåler. Denne testen viser oss dessuten at veggene sannsynligvis ville vært noe mindre i virkeligheten for byggene med 12 og 14 etasjer.

Ut fra beregningene ser vi at man kan bruke mindre dimensjoner for søyler og vegger ved et bygg på 8 etasjer. I bygget på 10 etasjer kunne man derfor neddimensjonert disse allerede fra 3. etasje (1. etasje i bygg med 8 etasjer), og på denne måten minsket materialbruken ytterligere. I bygget med 12 etasjer ville de 10 øverste etasjene hatt samme dimensjoner som for bygget med 10 etasjer, mens de 2 nederste etasjene vill hatt noe større dimensjoner på søyler og vegger. Dette vil gjøres i virkeligheten ved et prosjekt.

Beregningenes største feilkilde kommer til syne her ved at det ikke er tatt høyde for at søylene blir mindre jo lenger opp i bygget man kommer. De øverste etasjene burde hatt de minste søylene, og disse dimensjonene burde ikke øke når man legger på flere etasjer. Kun de nederste (nye) etasjene ville da hatt større dimensjoner. Det samme gjelder veggtykkelsen. Der er det tatt utgangspunkt i en tommelfingerregel som sier at man kan redusere tykkelsen med 20mm for hver 2. etasje man kommer opp i høyden. Ettersom veggene i byggene har økt mer enn 20mm for hver 2. etasje som er tilført, har også veggene lenger oppe i bygget økt. Ser man på forskjellen fra bygget med 8 etasjer og bygget med 14 etasjer, så er veggtykkelsen i øverste etasje i de 2 byggene henholdsvis 220mm og 520mm. Tykkelsen i øverste etasje kunne egentlig ha vært like tykk for begge byggene, og vi får derfor en stor feilkilde.

10.3 Økonomi og klimagassutslipp

Fra rapporten i Solibri oppgis det 2 ulike verdier for klimagassutslippet. Den ene følger kravene til TEK17 for beregning av klimaregnskap, mens den andre viser den reelle verdien for klimagassutslipp. Den sistnevnte er ikke lov å bruke for beregning av klimaregnskap i Norge.

De reelle verdiene for klimagassutslipp er her negative. Dette skyldes at CO₂ – bindingen i det brukte trematerialet er større enn utslippet som medgår i byggeprosessen. I Norge er det kun lov å regne med utslippet av CO₂. Dette gjør at klimaregnskapet alltid vil se dårligere ut enn det egentlig er i virkeligheten.

Utslippet av CO₂ – ekvivalenter øker i stor grad når vi legger på 2 etasjer til bygget. Den største økningen skjer ved overgangen fra 12 til 14 etasjer. Utslippet økes med 493 tonn CO₂ – ekvivalenter, 53% mer enn ved 12 etasjer.

Total byggekostnad øker også kraftigst når vi går fra 12 til 14 etasjer. Da øker den med hele 20,2 millioner kroner. Det er naturlig at byggekostnaden øker for hvert bygg, og vi kan derfor se på kostnad per etasje. Ut *fra tabell 33* kan vi se at kostnaden fortsatt økes betraktelig fra 12 til 14 etasjer.

Kostnad for prosjektering og utførelse øker med omtrent 1 million kroner for hver 2. etasje som blir lagt til. Dette ser ut som en naturlig konsekvens av at det er mer som skal prosjekteres og bygges. Dessuten øker arbeidstiden med 12 dager for hver 2. etasje.

I tillegg til å se på byggekostnad kan vi gjøre en vurdering av den framtidige inntekten til eier av bygget. Dersom vi tenker oss at eier av bygget har for tanken å leie ut hele bygget som kontorlokaler, kan vi beregne hvor mye inntekt som forsvinner som følge av at større dimensjoner opptar verdifullt areal. Ifølge en markedsundersøkelse fra DNB (DNB Næringsmegling, u.å.) ligger leieprisene i Stavanger sentrum i 2023 mellom 2000 kroner og 3400 kroner per kvadratmeter per år.

Ved enkel regning og litt overslag ser vi at en økning i tykkelsen på veggen fra 280-320mm (fra 8 til 10 etasjer) utgjør omtrent 4 kvadratmeter. Vi tar utgangspunkt i at leieprisen er 2400 kroner, og finner at eieren mister 9600 kroner per etasje. Øker vi igjen tykkelsen til 400mm (12 etasjer), mister eieren 8 kvadratmeter og 19200 kroner ekstra per etasje. En økning til 640mm (14 etasjer) fra 400mm vil resultere i at eieren mister hele 24 kvadratmeter ekstra, og dermed 57600 kroner per etasje.

Denne alternativkostnaden spiller en vesentlig rolle. I løpet av ett år vil man miste nesten 700 000 kroner i leieinntekter totalt for de første 12 etasjene dersom man velger å bygge 14 etasjer i stedet for 12.

Som vi ser fra resultatene har bruken av massivtre lett for å bli overdimensjonert når man bygger lenger opp i høyden. Dette resulterer i unødige store mengder av materialer, og en reduksjon i det innvendige arealet. En løsning på disse problemene kan være å kombinere konstruksjonen med andre byggemetoder, som for eksempel stål og betong. Disse byggemetodene vil kunne resultere i mindre dimensjoner på de ulike elementene, samt frigjøre plass til utleie. Dersom man bruker miljøbetong, eller lavkarbonbetong, kan det være muligheter for å redusere klimagassutslippet, eller i det minste holde det like lavt som ved massivtre.

Å bygge i massivtre bør ikke gjøres for enhver pris, og derfor kan en kombinasjon med betong være gunstig for å redusere de store dimensjonene som oppstår i de nederste etasjene. Dersom en konstruksjon skal bygges med 10, 12 eller 14 etasjer kan et alternativ være å kun bygge de øverste 6-8 etasjene i massivtre.

Ettersom tre er et organisk materiale egner det seg ikke til alle typer bygg og bygningsdeler. Dette gjelder spesielt konstruksjoner mot jord eller våtrom, fordi det kan oppstå fuktskader og følgeskader i form av muggvekst, svinn i materialer og kontraksjoner. Materialet får da kortere levetid og gir større behov for oftere utskiftning, noe som ikke er fordelaktig med tanke på bærekraft. Dette underbygger forslaget om at en kombinasjon av materialer vil være en bedre løsning.

Tabell 34 Kostnad og klimagassutslipp per etasje

Bygg	8 etasjer	10 etasjer	12 etasjer	14 etasjer
Pris per etasje	3,15 mill. kroner	3,33 mill. kroner	3,64 mill. kroner	4,64 mill. kroner
CO ₂ – utslipp per etasje	66,63 tCO ₂ e	70,5 tCO ₂ e	77,83 tCO ₂ e	89,07 tCO ₂ e

10.4 Perspektiver fra ansatte i Backe

Det kan være flere grunner til hvorfor utbyggere velger å benytte massivtre i sin konstruksjon. Kenneth trekker fram at det kan være det billigste alternativet, men med en forutsetning av at det planlegges som et massivtrebygg tidlig i prosjektet. På denne måten vil man utnytte materialets evne til konkurranse gjennom hele prosessen. Da kan det tidlig legges til rette for en effektiv produksjon, og ta høyde for transport og montasje av elementene.

Arne-Reidar mener det kan spares mye byggetid, ettersom elementene allerede er ferdig produserte, og kun trenger montasje. En av de viktigste grunnene til dette er at det for stedstøpte betongbygg vil være en betydelig forsinkelsestid med tanke på at betong bør herde i minst 28 dager før den når gunstig styrke og neste etasje kan bygges (Laguarda Mallo & Espinoza, 2015). Denne ventetiden unngår man ved bruk av massivtre.

Kenneth mener at 10 etasjer kan være en grense for hvor høyt det bør bygges med massivtre. Denne påstanden kan finne støtte i resultatene som er beregnet i vår oppgave. Samtidig forteller han at prisen på stål og betong har gått noe opp, mens prisen på tre har gått ned. Dette vil imidlertid være avhengig av tilbud og etterspørsel. Disse indeksene vil alltid variere. Forskjellen i materialpris gjør at det i enkelte tilfeller likevel kan vurderes å bygge høyere i massivtre, selv om dimensjonene skulle blitt store.

Vårt forslag med å benytte betong i de nederste etasjene underbygges av Kenneth. Det vil alltid måtte benyttes betong, men det vil være en vurdering for hvert prosjekt hvor mye som skal brukes. Transport virker til å ha lite å si for total byggekostnad, og om det bespares mye i forhold til betong avhenger av om alternativet vil være betongelementer eller stedstøpt betong.

Selv om bygninger av massivtre kan vise seg å være lønnsomt, er det en byggemetode som fortsatt ikke er mye brukt. Årsaken ligger hovedsakelig i mangel på kunnskap, ifølge Backes ansatte. Det må vanligvis engasjeres utenlandske leverandører, noe som kan øke kostnaden og føre til problemer rundt språk og logistikk.

11.Konklusjon

Bruk av massivtre som byggemetode i høye bygg har potensial til å redusere byggetiden, kostnadene og utslippene av klimagasser sammenlignet med mer tradisjonelle metoder som stål og betong. Massivtre som byggemetode anses derfor som et gunstig alternativ for bærekraftig konstruksjon. Imidlertid er det viktig å ta hensyn til dimensjonene, da de setter en begrensning for hvor høyt det er hensiktsmessig å bygge med tre som materiale. Ved 12 og 14 etasjer blir dimensjonene på søyler og vegger unødige store, noe som resulterer i økte klimagassutslipp og byggekostnader.

I oppgaven er bygget prosjektert med den største tykkelsen som vanligvis brukes på vegger i virkelige prosjekter, noe som er tilstrekkelig for en byggehøyde på 10 etasjer. Å legge til flere etasjer vil resultere i dimensjoner som overskrider standarddimensjonene. Resultatene viser at 10 etasjer utgjør en naturlig høydegrense for bygg med massivtre som eneste byggemateriale.

For konstruksjoner med en høyde over 10 etasjer vil det være økonomisk og miljømessig gunstig å kombinere bruken av massivtre med et annet byggemateriale. Dette vil føre til lavere forbruk av materialer i de ulike elementene og frigjøre areal som kan brukes til utleie. Et alternativ kan være å begrense bruk av massivtre til de øverste 6 til 8 etasjene.

11.1 Veien videre

I vår oppgave har vi forenklet laster og beregninger på flere områder. Ved videre analyse av oppgaven anbefales det å ta høyde for flere av disse lastene og beregningene for å tilnærme seg en designløsning som ville vært brukt i virkeligheten. Det bør detaljprosjekteres for å finne de nøyaktige dimensjonene som trengs på elementene for hver etasje. Som en følge av dette vil man ytterligere kunne redusere materialforbruket og kostnadene forbundet til høye konstruksjoner.

Dersom man videre sammenligner et høyt massivtrebygg med et identisk betongbygg med tilsvarende antall etasjer, vil man få en bedre forståelse av hvilke faktorer som har vesentlig betydning for kostnad og klimagassutslipp. Det vil på denne måten være enklere å se store forskjeller fra ett materiale til et annet.

12 Litteraturliste

- Abed, J., Rayburg, S., Rodwell, J., & Neave, M. (2022). A Review of the Performance and Benefits of Mass Timber as an Alternative to Concrete and Steel for Improving the Sustainability of Structures. *Sustainability*, 14(9), Artikkel 9. <https://doi.org/10.3390/su14095570>
- Asplan Viak. (2019). *Bygg- og anleggssektorens klimagassutslipp*. https://www.bnl.no/siteassets/dokumenter/rapporter/klimautslipp_bae_2019.pdf
- Brannkonsult. (u.å.). *Brannprosjektering—Enkelt forklart*. Hentet 28. mars 2023, fra <https://brannkonsult.no/brannprosjektering/>
- Böhmer, E., Aarnes, H., & Foslie, M. (2023). Tre. I *Store norske leksikon*. <https://snl.no/tre>
- Carlson, C. (2022, august 3). *Ascent skyscraper in Milwaukee becomes world's tallest timber building*. Dezeen. <https://www.dezeen.com/2022/08/03/ascent-tower-milwaukee-worlds-tallest-timber-building/>
- Dagenais, C., Ranger, L., & Benichou, N. (2019). *FIRE PERFORMANCE OF CROSS-LAMINATED TIMBER WITH ADHESIVES CONFORMING TO 2018 EDITION OF ANSI/APA PRG-320* (Nr. 301013085). https://www.researchgate.net/publication/333648016_FIRE_PERFORMANCE_OF_CROSS-LAMINATED_TIMBER_WITH_ADHESIVES_CONFORMING_TO_2018_EDITION_OF_ANSIAPA_PRG-320
- Dannevig, P., & Harstveit, K. (2023). Vind. I *Store norske leksikon*. <https://snl.no/vind>
- Daykin, T. (u.å.). *Construction starts on unusual \$80 million, 25-story mass timber apartment tower in downtown Milwaukee*. Milwaukee Journal Sentinel. <https://www.jsonline.com/story/money/real-estate/commercial/2020/08/31/construction-starts-downtown-milwaukee-mass-timber-high-rise-ascent/3448985001/>
- DNB Eiendom. (2016, juli 16). *Mjøstårnet prospekt by vy communication as*. https://issuu.com/voicereklame/docs/mt_prospekt_web
- DNB Næringsmegling. (u.å.). *Markedsrapport—Stavanger – DNB Næringsmegling*. Hentet 12. mai 2023, fra <https://www.dnbnaringsmegling.no/no/markedsrapport/stavanger/>
- DNV. (u.å.). *FSC® Chain of Custody-sertifisering*. Hentet 9. mai 2023, fra <https://www.dnv.no/services/fsc-r-chain-of-custody-sertifisering-33646>
- FN-Sambandet. (u.å.). *CO2-utslipp*. Hentet 2. februar 2023, fra <https://www.fn.no/Statistikk/co2-utslipp>
- FN-Sambandet. (2021, oktober 28). *Bærekraftig utvikling*. <https://www.fn.no/tema/fattigdom/baerekraftig-utvikling>
- Glasø, G. (2005). Tre og brann. *FOKUS på tre*, 37. <https://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/fokus-pa-tre/Fokus-nr-37.pdf>
- Glasø, G. (2011). Tre og lyd. *FOKUS på tre*, 36. <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/36-Tre-og-lyd.pdf>
- Grusbutikken. (u.å.). *Beregning Pukk 8-11 mm*. Hentet 24. april 2023, fra

<https://www.grusbutikken.no/shop/maengd-beraeknar.asp?groupid=58&productid=783>

Grønn Byggallianse. (u.å.). *Klimakur for bygg og eiendom*. Hentet 11. april 2023, fra <https://byggalliansen.no/kunnskapssenter/publikasjoner/infopakkeklimakjempen/#1610543297119-2891ab52-ad8a>

Grønvold, K. (2019). *Tre som byggemateriale*. NDLA. <https://ndla.no/article/9676>

Hindklev, J. (2019, mars 26). *Mjøstårnet*. <https://www.bygg.no/article/1388256/>

Johansen, H., Andersen, J. H., Hansen, K. A., Englund, M., & Yutaka Goto. (2022). *Construction Cost of Timber Buildings by Arkitema—Issuu*. https://issuu.com/arkitema/docs/ac_b_redygtighedsrapport_202208

Kremer, P. D., & Ritchie, L. (2018). Understanding Costs and Identifying Value in Mass Timber Construction: Calculating the ‘Total Cost of Project’ (TCP). *Mass Timber Construction Journal*, 1(1), Artikkel 1.

Kunøe, C. (2019, september 25). *Beskytt elementer av massivtre mot fukt i byggeperioden*. Byggmesteren. <https://byggmesteren.as/2019/09/25/beskytt-elementer-av-massivtre-mot-fukt-i-byggeperioden/>

Laguarda Mallo, M. F., & Espinoza, O. (2015). Awareness, perceptions and willingness to adopt Cross-Laminated Timber by the architecture community in the United States. *Journal of Cleaner Production*, 94, 198–210. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.090>

Lier, B., & Aasheim, P. A. (2020). *Markedsanalyse KL- tre markedet i Norge 2020-2030*. TreBruk. <https://www.viken.skog.no/files/documents/brosjyrer/markedsanalyse-230120.pdf>

Lunøe, J.-E. (2022, juni 21). Innlegg: Høydeskrekk skader miljøet. *Byggeindustrien*. <https://www.bygg.no/innlegg-hoydeskrekk-skader-miljoet/1501450/>

Løvaas, R. (2023). Massivtrebygging. I *Store norske leksikon*. <https://snl.no/massivtrebygging>

Miljødirektoratet. (2019, desember 2). *Klimatilpasning av bygg og anlegg*. <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/for-myndigheter/klimatilpasning/klimatilpasning-i-sektorer/bygg-og-anlegg/>

Mindeguia, J.-C., Mohaine, S., Bisby, L., Robert, F., McNamee, R., & Bartlett, A. (2020). Thermo-mechanical behaviour of cross-laminated timber slabs under standard and natural fires. *Fire and Materials*, FAM. <https://doi.org/10.1002/fam.2938>

Norsk Treteknisk Institutt. (2006a). Hefte 1—Generelt. *Håndbok - bygge med massivtreelementer*. <https://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/teknisk-handbok/Hefte-1-Generelt.pdf>

Norsk Treteknisk Institutt. (2006b). Hefte 4—Brann. *Håndbok - bygge med Massivtreelementer*. <https://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/teknisk-handbok/Hefte-4-Brann.pdf>

Norsk Treteknisk Institutt. (2018). *ENTRÉ – energieffektive trekonstruksjoner*. <https://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/rapporter/Rapport-84.pdf>

Norske arkitekters landsforbund. (2022). *Høringsvar. Forslag til ny høyhusstrategi for Oslo*. https://arkitektforbundet.no/media/r3enxjnj/_20220830-nal-oaf-horingssvar-forslag-til-ny-hoyhusstrategi.pdf

- Norske Limtreprodusenters forening. (2015). *Limtreboka*.
https://www.moelven.com/globalassets/moelven-limtre/limtreboka_2015_el2.pdf
- Rasmussen, I., Knudsen, J., & Ruud, A. (2006). Politisk styring og lønnsomhet: En analyse av rammebetingelser for energiomlegging i bygge- og eiendomssektoren i Norge. *SUM Report nr. 12*.
<https://www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/32693/prosus.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Reitan, N. K., Friquin, K. L., & Mikalsen, R. F. (2019). *Brannsikkerhet ved bruk av krysslaminert massivtre i bygninger—En litteraturstudie*.
<https://risefr.no/media/publikasjoner/upload/2019/20385brannsikkerhet-ved-bruk-av-klt-rapport-9-2019.pdf>
- Ronquillo, G., Hopkin, D., & Spearpoint, M. (2021). Review of large-scale fire tests on cross-laminated timber. *Journal of Fire Sciences*, 39(5), 327–369. <https://doi.org/10.1177/07349041211034460>
- Rygh, P. (2023). Høyhus. I *Store norske leksikon*. <https://snl.no/høyhus>
- Rønning, A., Prestrud, K., Saxegård, S., Haave, S. S., & Lysberg, M. (2019). *Klimagassregnskap av tre- og betongkonstruksjoner—Kontorbygning -4, 8 og 16 etasjer (OR.26.19)*. https://norsus.no/wp-content/uploads/OR-26-19_v2-klimagassregnskap-av-tre-og-betongkonstruksjoner-1.pdf
- SINTEF. (2020, august 3). *Unngå fuktskader på bygninger*. <https://www.sintef.no/siste-nytt/2020/unnga-fuktskader-pa-bygninger/>
- SINTEF Byggforsk. (2009, november). *Etasjeskillere i massivtre*. Byggforskserien.
https://www.byggforsk.no/dokument/3367/etasjeskillere_i_massivtre
- SINTEF Byggforsk. (2013, august). *Egenlaster for bygningsmaterialer, byggevarer og bygningsdeler*. Byggforskserien.
https://www.byggforsk.no/dokument/215/egenlaster_for_bygningsmaterialer_byggevarer_og_bygningsdeler
- SINTEF Byggforsk. (2018, juni). *Fukt i bygninger. Teorigrunnlag*. Byggforskserien.
https://www.byggforsk.no/dokument/184/fukt_i_bygninger_teorigrunnlag
- SINTEF Byggforsk. (2023, mai). *Planlegging av bygninger med KLT-elementer*. Byggforskserien.
https://www.byggforsk.no/dokument/3009/massive_treelementer_typer_og_bruksomraader#i33
- SINTEF, Civitas, Asplan Viak, NTNU, & Futurebuilt. (2020). *Klimagasskrav til materialbruk i bygninger (Nr. 24)*. https://fmezen.no/wp-content/uploads/2020/05/ZEN-Report-no-24_Klimagasskrav-til-materialbruk-i-bygninger.pdf
- Skaug, E. (2007). Trevirkets oppbygging og egenskaper. *FOKUS på tre*, 40.
<http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/40-Trevirkets-oppbygging-og-egenskaper.pdf>
- Skullestad, J. L., Bohne, R. A., & Lohne, J. (2016). High-rise Timber Buildings as a Climate Change Mitigation Measure – A Comparative LCA of Structural System Alternatives. *Energy Procedia*, 96, 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.112>
- Smith, R. E., Griffin, G., Rice, T., & Hagehofer-Daniell, B. (2018). Mass timber: Evaluating construction performance. *Architectural Engineering and Design Management*, 14(1–2), 127–138.
<https://doi.org/10.1080/17452007.2016.1273089>

Solberg, M. G. (2015, november 2). *Boligblokk i tre tok halvparten så lang tid å bygge som «naboblokka» i betong—Tu.no*. Tu.no. <https://www.tu.no/artikler/boligblokk-i-tre-tok-halvparten-sa-lang-tid-a-bygge-som-naboblokka-i-betong/276082>

Solli, K. H., & Glasø, G. (2011). Trebaserte konstruksjonselementer. *FOKUS på tre*, 27. <http://www.trefokus.no/esources/filer/fokus-pa-tre/27-Trebaserte-konstruksjonselementer.pdf>

Splitkon. (u.å.). *Massivtre—Brannsikkerhet*. Hentet 21. februar 2023, fra <https://splitkon.no/massivtre/massivtre-brannsikkerhet/>

Standard Norge. (2009). *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner—Del 1-4: Allmenne laster—Vindlaster* (NS EN 1991-1-4 2005+NA 2009). <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=392208>

Standard Norge. (2010). *Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner—Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger* (NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:2010). <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=436137>

Standard Norge. (2016a). *Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner* (NS-EN 1990:2002+A1:2005+NA:2016). <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=814830>

Standard Norge. (2016b). *Trekonstruksjoner—Limtre og limt laminert heltre—Krav* (NS-EN 14080:2013+NA:2016). <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=866055>

Standard Norge. (2018). *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner—Del 1-3: Allmenne laster—Snølaster* (NS-EN 1991-1-3:2003+A1:2015+NA:2018). <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=974831>

Standard Norge. (2019). *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner—Del 1-1: Allmenne laster—Tetthet, egenvekt og nyttelaster i bygninger* (NS-EN 1991-1-1:2002+NA2019). <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1015211>

Stora Enso. (u.å.-a). *Calculatis by Stora Enso*. Hentet 13. mai 2023, fra <https://calculatis.storaenso.com>

Stora Enso. (u.å.-b). *Cross-laminated timber (CLT)*. Hentet 24. april 2023, fra <https://www.storaenso.com/en/products/mass-timber-construction/building-products/clt>

Stora Enso. (u.å.-c). *Glued-laminated timber (GLT)*. Hentet 24. april 2023, fra <https://www.storaenso.com/en/products/mass-timber-construction/building-products/glulam>

Stora Enso. (2022). *European Technical Assessment*. <https://www.storaenso.com/-/media/documents/download-center/certificates/wood-products-approvals-and-certificates/eta/eta-14-0349-clt-february-2023-en.ashx>

Store norske leksikon. (2019). *Trekonstruksjon*. <https://snl.no/trekonstruksjon>

Store norske leksikon. (2023). *Limtre*. <https://snl.no/limtre>

Svenskt Trä. (2019). *The CLT Handbook* (1. utg.). <https://www.svensktra.se/siteassets/5-publikationer/pdfer/clt-handbook-2019-eng-m-svensk-standard-2019-2022.pdf>

Sweco. (u.å.). *Om vær og vind*. Hentet 11. april 2023, fra <https://www.sweco.no/aktuelt/nyheter/om-vaer-og-vind/>

Trefokus. (u.å.). *Massivtre*. Hentet 9. mai 2023, fra <http://www.trefokus.no/treveilederen/temaer/byggesystemer/massivtre>

TreFokus. (2013). *Treindustriens lille grønne*. <http://www.trefokus.no/resources/Treindustriens-lille-gronne.pdf>

Vikan, J. I. (2015, september 1). *Nye Voll Studentby*. <https://www.bygg.no/article/1245916/>

Øvrum, A., & Skaug, E. (2007). Konstruksjonsvirke. *FOKUS på tre*, 43. <https://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/fokus-pa-tre/Fokus-nr-43.pdf>

Aarstad, J., & Glasø, G. (2011). *Massivtre*. TreFokus AS og Treteknisk. <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/20-Massivtre.pdf>

Vedlegg A - Mengder av 10 etasjers bygg

Element	Bestemmelse	Plan	Brutto Areal	Netto Areal	Volum	Vekt	Tykkelse	Lengde	IFC Count	Co2 Ekv	Kemagasinvekt	Mengde	Enhetstipe	Totalt	Metrikk
IC:Column	2226_1001,260x380	Plan 01	77,44 m²	66,93 m²	1014 m³	4816,50 kg	0,32 m	0,48 m	12	-6175	18521	10,34	kr 13.000,00	131.820,00	
IC:VindisstandCase	2316_1104,220	Plan 01	214,4 m²	214,4 m²	10174,50 kg	19,26 m	19,26 m	1	-10925	6846	74,29	7	kr 10.700,00	254.588,60	
IC:VindisstandCase	2316_1104,220	Plan 01	78,27 m²	70,32 m²	2250 m³	10687,50 kg	0,32 m	19,68 m	1	-10975	7032	76,50	kr 10.700,00	360.098,80	
IC:VindisstandCase	2316_1104,220	Plan 01	118,27 m²	104,21 m²	3335 m³	15841,25 kg	0,32 m	29,68 m	1	-20681	10540	114,87	kr 10.700,00	381.592,61	
IC:VindisstandCase	2316_1104,220	Plan 01	120,00 m²	109,49 m²	3504 m³	16644,00 kg	0,32 m	30,00 m	1	-30374	10769	116,95	kr 10.700,00	400.084,13	
IC:VindisstandCase	2416_1104,120	Plan 01	10,40 m²	10,40 m²	125 m³	593,25 kg	0,12 m	2,60 m	1	-1012	359	10,40	kr 10.700,00	13.353,60	
IC:VindisstandCase	2416_1104,120	Plan 01	10,88 m²	10,88 m²	131 m³	622,25 kg	0,12 m	2,72 m	1	-1059	376	10,88	kr 10.700,00	13.969,92	
IC:VindisstandCase	2416_1104,120	Plan 01	12,40 m²	12,40 m²	149 m³	707,25 kg	0,12 m	3,10 m	1	-1207	429	12,40	kr 10.700,00	15.921,60	
IC:VindisstandCase	2416_1104,140	Plan 01	22,48 m²	22,48 m²	270 m³	1382,50 kg	0,14 m	5,62 m	2	-2188	777	22,48	kr 10.700,00	28.864,32	
IC:VindisstandCase	2416_1104,140	Plan 01	60,80 m²	60,80 m²	851 m³	4042,25 kg	0,14 m	1,90 m	2	-46903	2451	60,80	kr 10.700,00	91.078,40	
IC:VindisstandCase	2416_1104,140	Plan 01	80,00 m²	80,00 m²	1120 m³	5320,00 kg	0,14 m	2,50 m	2	-9083	3226	80,00	kr 10.700,00	119.840,00	
IC:Slab	Custom	Plan 01	0,00 m²	0,00 m²	0,00 m³	0,00 kg	0,00 m	0,07 m	1	0	0	0,00	kr 9.850,00	-	
IC:Slab	R8/B7E	Plan 01	0,11 m²	0,11 m²	839,95 kg	0,00 kg	0,00 m	0,50 m	1	0	0	0,00	kr -	-	
IC:Column	2226_1001,260x380	Plan 02	9,63 m²	9,63 m²	4574,25 kg	6,07 m	0,48 m	0,48 m	12	-5864	873	9,63	kr 13.000,00	125.190,00	
IC:Column	2226_1001,260x620	Plan 02	6,07 m²	6,07 m²	2883,25 kg	5,44 m	0,48 m	5,44 m	6	-3696	550	6,07	kr 13.000,00	78.910,00	
IC:Column	2226_1001,260x620	Plan 02	8,21 m²	8,21 m²	3899,75 kg	5,52 m	0,48 m	5,52 m	8	-4999	744	8,21	kr 13.000,00	106.730,00	
IC:VindisstandCase	2316_1104,220	Plan 02	77,44 m²	66,93 m²	2142 m³	821 m	0,32 m	19,36 m	1	-19279	6846	74,29	kr 10.700,00	254.588,60	
IC:VindisstandCase	2316_1104,220	Plan 02	118,72 m²	108,21 m²	3463 m³	16449,25 kg	0,32 m	29,68 m	1	-29915	10651	115,57	kr 10.700,00	395.701,41	
IC:VindisstandCase	2316_1104,220	Plan 02	120,00 m²	104,23 m²	3335 m³	15841,25 kg	0,32 m	30,00 m	1	-29932	10623	115,27	kr 10.700,00	394.681,06	
IC:VindisstandCase	2416_1104,120	Plan 02	10,40 m²	10,40 m²	125 m³	593,25 kg	0,12 m	2,60 m	1	-1012	359	10,40	kr 10.700,00	13.353,60	
IC:VindisstandCase	2416_1104,120	Plan 02	10,88 m²	10,88 m²	131 m³	622,25 kg	0,12 m	2,72 m	1	-1059	376	10,88	kr 10.700,00	13.969,92	
IC:VindisstandCase	2416_1104,120	Plan 02	12,40 m²	12,40 m²	149 m³	707,25 kg	0,12 m	3,10 m	1	-1207	429	12,40	kr 10.700,00	15.921,60	
IC:VindisstandCase	2416_1104,120	Plan 02	22,48 m²	22,48 m²	270 m³	1382,50 kg	0,12 m	5,62 m	2	-2188	777	22,48	kr 10.700,00	28.864,32	
IC:Slab	2226_4013,200	Plan 02	600,00 m²	581,55 m²	116,31 m³	5547,25 kg	0,20 m	30,00 m	1	-94327	33497	581,55	kr 9.850,00	1145.653,50	
IC:Column	2226_1001,260x380	Plan 03	9,63 m²	9,63 m²	4574,25 kg	6,07 m	0,48 m	0,48 m	12	-5864	873	9,63	kr 13.000,00	125.190,00	
IC:Column	2226_1001,260x620	Plan 03	6,07 m²	6,07 m²	2883,25 kg	5,44 m	0,48 m	5,44 m	6	-3696	550	6,07	kr 13.000,00	78.910,00	
IC:Column	2226_1001,260x620	Plan 03	8,21 m²	8,21 m²	3899,75 kg	5,52 m	0,48 m	5,52 m	8	-4999	744	8,21	kr 13.000,00	106.730,00	
IC:VindisstandCase	2316_1104,200	Plan 03	77,60 m²	67,09 m²	2013 m³	821 m	0,30 m	19,40 m	8	-18113	6432	74,65	kr 10.700,00	268.974,87	
IC:VindisstandCase	2316_1104,200	Plan 03	78,80 m²	68,29 m²	2049 m³	9792,75 kg	0,30 m	19,70 m	1	-18405	6536	75,65	kr 10.700,00	282.926,97	
IC:VindisstandCase	2316_1104,200	Plan 03	118,80 m²	109,03 m²	3091 m³	14882,25 kg	0,30 m	29,70 m	1	-27753	9856	114,07	kr 10.700,00	386.167,49	

3 **BACKE**

Prosjekt
Rapportert av
Organisasjon
Date

Nr og frekt budformodifling
Kommunikasjonsplan
Bakke Entreprenør AS
Mars 8, 2023

CO2 Ekv
CO2 Ekv IKTU
Middelsnitt

Mengder og budsjettpris, Massivtre

RIO
UTF
Merknader
Totalt

2 884 316
2 973 750
27 417 604
33 255 670

CO2 Ekv
CO2 Ekv IKTU
Middelsnitt

-2089,97 tCO2e
7048 tCO2e
61,44 tCO2e