



Høgskulen  
på Vestlandet

# BACHELOROPPGAVE

Dimensjonering av bæresystem i massive treelementer  
og sammenlikning med betong og stål

Structural analysis of support system in laminated  
timber and comparison to concrete and steel

**Marthe Elise Leirvåg**

**Nora Bjørvik Karlsen**

**Sofie Othilia Ngo**

Bachelor ingeniørfag

Institutt for byggfag

Veileder HVL: Ørjan Fyllingen

25. mai 2020

Vi bekrefter at arbeidet er selvstendig utarbeidet, og at referanser/kildehenvisninger til alle kilder som er brukt i arbeidet er oppgitt, jf. Forskrift om studium og eksamen ved Høgskulen på Vestlandet, § 12-1.

## Forord

Denne bacheloroppgaven er skrevet våren 2020 av Nora Bjørvik Karlsen, Marthe Elise Leirvåg og Sofie Othilia Ngo. Oppgaven er siste emne ved vår utdanning på Høgskulen på Vestlandet, avdeling Bergen, ved institutt for byggfag. Ved å ha en felles interesse for bærekraftige konstruksjoner ønsket vi å skrive en konstruksjonsoppgave om massive treelementer. Som konstruktører kan en bidra til å løse klimautfordringene ved å dimensjonere flere bygg med mer bærekraftige materialer. For å undersøke dette nærmere valgte vi å sammenlikne et bæresystem i stål og betong med et bæresystem i massive treelementer.

Gjennomføring av oppgaven ble utfordrende da COVID-19 gjorde at vi ikke kunne møtes fysisk, samt fjernet tilgangen på velfungerende arbeidsplasser, ressurser og veiledningsmøter. Allikevel har vi vært heldige med veilederen vår ved HVL, Ørjan Fyllingen, som alltid har stilt opp på Zoom-møter og gitt klare råd via e-post. Han har også henvist oss videre til andre veiledere dersom det var nødvendig, og vi vil derfor også takke Jan Bernt Husebø og Trond Einar Martinsen ved HVL.

Vi vil også takke vår kontaktperson fra NODE rådgivende ingeniører AS, Even Zachariassen Høyland, som har tatt oss med på befaring av felt N3 i Kronstadparken, og gitt oss veiledning via Zoom og e-post. I løpet av oppgaven svarte han tålmodig på alle spørsmål vi måtte ha, og ingen spørsmål var for dumme. Han og flere av NODEs ansatte har gitt oss et flott inntrykk av bransjen og hvordan rådgivende ingeniører arbeider.

Bergen, mai 2020



Nora Bjørvik Karlsen



Marthe Elise Leirvåg



Sofie Othilia Ngo

## Sammendrag

Denne oppgaven tar for seg dimensjonering av et bæresystem i massive treelementer, samt sammenlikning med et tilsvarende bæresystem i stål og betong. Bæresystemet i stål og betong er utredet av NODE rådgivende ingeniører AS, som også var oppgavegiveren. I oppgaven ble de to bæresystemene sammenliknet innen brann sikkerhet, lyd og miljøbelastning. Dette ga et vurderingsgrunnlag for hvilket bæresystem som egnet seg best basert på brukskvaliteter innen brann, lyd og miljøegenskaper, samtidig som en tok hensyn til dimensjoneringssikkerhet.

Oppgaven er bygd opp av følgende deler; innledning, teori om sammenlikningstemaene, materialene og deres egenskaper, lastberegninger, dimensjonering, sammenlikning og konklusjon. Delene ga som en helhet et bæresystem i massive treelementer og grunnlag til sammenlikning.

Dimensjoneringen er basert på beregninger etter Eurokodene og de tilhørende nasjonale tilleggene, samt norske standarder, i tillegg til ingeniørmessige erfaringer. Veiledning fra forelesere og oppgavegiveren var nødvendig, sammen med råd gitt gjennom forelesninger og øvinger i løpet av utdanningen. Arbeidet i oppgaven er gjort ved håndberegninger, digitale verktøy, beregningsprogrammer og studering av teori.

Oppgaven krever at leseren har nødvendig kunnskap relatert til konstruksjonsteknikk og bygningsingeniørfaget for å kunne forstå begreper og beregningsganger, samt tolkning av standardene.

## Abstract

This bachelor's thesis deals with a structural analysis of a structural system in laminated timber, as well as a comparison with a similar structural system based on steel and concrete. The structural system in steel and concrete is developed by NODE rådgivende ingeniører AS, the company which also assigned the writers with these objectives. The comparison focuses on fire safety, sound characteristics and environmental impact. This made it possible to define which structural system had the most beneficial user qualities in terms of fire safety, sound characteristics and environmental impact, while maintaining the structural safety criteria.

The thesis is divided into following parts: introduction, theory of the comparison subjects, materials and their characteristics, load calculations, dimensioning, comparison and conclusion. Together they create a structural system in laminated timber and a basis of which the two systems can be compared.

The dimensioning is based on the Eurocodes and the national appendix, and Norwegian standards, as well as advice from civil engineers. Counselling from professors at school and the workers at NODE was essential, as well as the writers' own experiences during their assignments and classes. All the work done in this thesis is done with projections by hand and computer programmes, digital resources and studying of theory.

It is necessary that the reader is familiar with the civil engineering field in order to understand theory and calculations that are presented.

## Innholdsfortegnelse

<b>Forord .....</b>	<b>ii</b>
<b>Sammendrag.....</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>iv</b>
<b>Figurliste .....</b>	<b>viii</b>
<b>Tabelliste.....</b>	<b>ix</b>
<b>Formelliste .....</b>	<b>ix</b>
<b>Symboler .....</b>	<b>x</b>
<b>1 Innledning .....</b>	<b>1</b>
1.1 Kronstadparken felt N3 .....	1
1.2 Bygg C .....	2
1.3 Problemstilling .....	4
1.4 Begrensninger i oppgaven .....	5
1.5 Grunnlag for prosjektering .....	5
1.6 Metode .....	6
1.6.1 Veiledning .....	6
1.6.2 Kildekritikk.....	6
1.6.3 Programvarer.....	6
1.6.3.1 PTC Mathcad Express Prime 3.0.....	7
1.6.3.2 StruSoft FEM-design .....	7
1.6.3.3 Lastberegning av Sletten Byggdata AS (OS-prog) .....	7
1.6.3.4 One Click LCA (2015).....	7
1.6.3.5 Calculatis av Stora Enso.....	8
1.6.3.6 Autodesk Revit .....	8
1.6.3.7 Solibri Model Checker .....	8
<b>2 Teori om sammenlikningstemaene .....</b>	<b>9</b>
2.1 Brann .....	9
2.2 Lyd .....	11
2.2.1 Luftlyd .....	11
2.2.2 Trinnlyd .....	12
2.2.3 Lydklasse .....	13
2.3 Miljøbelastning.....	14
2.3.1 Nærmere om gjenbruk .....	14
<b>3 Materialene og deres egenskaper .....</b>	<b>15</b>
3.1 Stål.....	16
3.1.1 Generelt om stål .....	16
3.1.2 Brann.....	16
3.1.3 Miljøbelastning .....	17
3.1.3.1 Utnyttelse av råvarer .....	17
3.1.3.2 Utslipp av CO <sub>2</sub> .....	18
3.1.3.3 Gjenbrukbarhet .....	18
3.2 Betong.....	19
3.2.1 Generelt om betong.....	19
3.2.2 Brann.....	19
3.2.3 Lyd .....	21

3.2.4	Miljøbelastning .....	22
3.2.4.1	Utnyttelse av råvarer .....	22
3.2.4.2	Utslipp av CO <sub>2</sub> .....	23
3.2.4.3	Gjenbrukbarhet .....	24
3.3	Massive treelementer .....	25
3.3.1	Limtre.....	25
3.3.2	Massivtre.....	25
3.3.3	Brann.....	26
3.3.4	Lyd .....	29
3.3.5	Miljøbelastning .....	31
3.3.5.1	Utnyttelse av råvarer .....	31
3.3.5.2	Utslipp av CO <sub>2</sub> .....	32
3.3.5.3	Gjenbrukbarhet .....	35
<b>4</b>	<b>Lastberegninger .....</b>	<b>35</b>
4.1	Lastkombinasjoner og lastfaktorer .....	35
4.1.1	Bruddgrensetilstand (ULS) .....	37
4.1.2	Bruksgrensetilstand (SLS) .....	37
4.2	Permanente laster .....	38
4.2.1	Egenvekt.....	38
4.2.1.1	Etasjeskiller .....	38
4.2.1.2	Vegger.....	39
4.2.1.3	Tak.....	40
4.2.2	Jordtrykk på parkeringskjeller .....	41
4.3	Variable laster .....	42
4.3.1	Snølast.....	42
4.3.2	Vindlast .....	45
4.3.2.1	Karakteristisk vindlast .....	45
4.3.2.2	Formfaktorer .....	49
4.3.3	Nyttelast.....	53
4.4	Ulykkeslaster .....	54
4.4.1	Påkjøring- og eksplosjonslast.....	54
4.4.2	Seismisk påvirkning.....	54
4.4.2.1	Hva er jordskjelv? .....	54
4.4.2.2	Beregning av seismisk påvirkning .....	55
<b>5</b>	<b>Dimensjonering.....</b>	<b>59</b>
5.1	Forutsetninger for dimensjoneringen .....	60
5.2	Utforming av bæresystemet.....	60
5.3	Utfordringer ved utformingen .....	61
5.3.1	Spennvidder.....	61
5.3.2	Økte dimensjoner .....	62
5.4	Skisseprosjekt av vertikalt bæresystem .....	62
5.5	Limtrebjelker .....	63
5.5.1	Nedbøyning .....	64
5.5.2	Bjelke-søyle forbindelse .....	66
5.6	Limtresøyler .....	66
5.7	Tak, etasjeskiller og takterrasse av massivtre .....	68

5.8	Bærende vegger av massivtre .....	70
5.9	Knutepunkt.....	73
5.10	Stabilitet.....	74
5.10.1	Skjevstillingslast.....	75
5.10.2	Global stabilitet .....	76
<b>6</b>	<b>Sammenlikning .....</b>	<b>77</b>
6.1	Brann .....	77
6.2	Lyd .....	78
6.3	Miljøbelastning.....	79
<b>7</b>	<b>Konklusjon .....</b>	<b>80</b>
<b>8</b>	<b>Referanseliste.....</b>	<b>82</b>

## Figurliste

Figur 1-1 Rød markør viser Kronstadparken, Bergen [2].....	1
Figur 1-2 Rød ring markerer leilighetsbyggene i felt N3 [3] .....	2
Figur 1-3 Arkitektens IFC-fil av bygg C, fasade sør [4] .....	2
Figur 1-4 Fasade sør [7].....	3
Figur 1-5 Fasade nord [7] .....	3
Figur 1-6 Fasade vest [7] .....	3
Figur 1-7 Fasade øst [7].....	3
Figur 1-8 Bæresystem utredet av NODE [8] .....	4
Figur 2-1 Bestemmelse av risikoklasser [13, §11-2] .....	9
Figur 2-2 Bestemmelse av brannmotstand [13, §11-3 tabell 1 i veiledning] .....	10
Figur 2-3 Lydveier [19] .....	11
Figur 2-4 Måling av normalisert trinnlydnivå [17] .....	12
Figur 3-1 Flytespenningen som funksjon av reduksjonsfaktor og ståltemperatur [31, punkt 21] .....	17
Figur 3-2 Betongens fasthet ved temperaturøkning [39, bind D punkt 3.4] .....	20
Figur 3-3 Flankeoverføringsgrad [24] .....	21
Figur 3-4 Livssyklusberegning for betong og stål .....	24
Figur 3-5 Eksempel på massivtre med fem sjikt [53] .....	26
Figur 3-6 Utnyttelsen av tre [64, s.5] .....	32
Figur 3-7 Livssyklusberegning for massivtre .....	34
Figur 3-8 CO <sub>2</sub> -utslipp for transport .....	34
Figur 4-1 Variasjon av laster over tid [70] .....	36
Figur 4-2 Sjikt til etasjeskiller [72] .....	39
Figur 4-3 Sjikt til vegg [74].....	40
Figur 4-4 Sjikt til tak [73].....	40
Figur 4-5 Hviletrykk, aktivt jordtrykk og passivt jordtrykk .....	41
Figur 4-6 Tak med parapet og takterrasse, modell fra arkitektens IFC-fil [4].....	43
Figur 4-7 Trekantlast som følge av fonning mot høyere liggende byggverk.....	44
Figur 4-8 Kart over Ulriken og Løvestakken [79].....	46
Figur 4-9 Høydeprofil Ulriken [80] .....	47
Figur 4-10 Høydeprofil Løvestakken [80] .....	47
Figur 4-11 Kart med avstand til Nordnes [81].....	49
Figur 4-12 Taket til bygg C [7].....	50
Figur 4-13 Forenklete mål brukt i beregninger.....	51
Figur 4-14 Soner på vegg med vind på kortsiden .....	52
Figur 4-15 Soner på vegg med vind på langsiden .....	52
Figur 4-16 Soner på tak med vind på kortsiden .....	53
Figur 4-17 Soner på tak med vind på langsiden .....	53
Figur 4-18 Kart med oversikt over hyppigheten av jordskjelv [84] .....	55
Figur 4-19 Kriterier for regularitet i oppriss [86] .....	58
Figur 5-1 Bæresystem i betong og stål, hentet fra IFC-fil [8] .....	60
Figur 5-2 Største spennvidde i modellen til NODE [8] .....	61
Figur 5-3 Skisse over plassering av vertikale bæreelementer i andre etasje .....	63
Figur 5-4 Bjelke 4-4 fra egenprodusert IFC-fil.....	65
Figur 5-5 Mest belastede søyler i hver etasje fra egenprodusert IFC-fil .....	67
Figur 5-6 Prinsippskisse av Schubanalogieverfahren-metoden [48] .....	68
Figur 5-7 Statisk system til etasjeskiller .....	69
Figur 5-8 Bærende vegg 1-3 .....	71
Figur 5-9 Simulasjon av vegg i Calculatis .....	72
Figur 5-10 Vegg 4-2 med utsparring fra egenprodusert IFC-fil .....	73
Figur 5-11 Knutepunkt i vegg og etasjeskiller [95] .....	74



Figur 5-12 Geometrisk avvik på avstivningssystem[96] .....	75
Figur 5-13 Søyler og vegger brukt i beregning av skjevstillingslaster .....	76
Figur 6-1 Klimagassutslipp sammenligning .....	80

## Tabelliste

Tabell 1 - Grunnlag for prosjektering [9] .....	5
Tabell 2 - CO <sub>2</sub> -utslipp for stålsøyler .....	18
Tabell 3 - Lydegenskaper etasjeskiller i betong [24] .....	22
Tabell 4 - Lydegenskaper betongvegg [41] .....	22
Tabell 5 - Forkulling på treelementer.....	27
Tabell 6 - Lydegenskaper for lydvegg.....	30
Tabell 7 - Lydegenskaper for lydgulv.....	30
Tabell 8 - Egenvekt til etasjeskiller [73] .....	39
Tabell 9 - Egenvekt lydvegg i massivtre [73].....	40
Tabell 10 - Egenvekt til takelement i massivtre [73] .....	41
Tabell 11 - Karakteristisk snølast .....	45
Tabell 12 – Vindlaster på vegg med vind på kortside .....	52
Tabell 13 - Vindlaster på vegg med vind på langside.....	52
Tabell 14 - Vindlaster på tak med vind på kortside .....	53
Tabell 15 - Vindlaster på tak med vind på langside .....	53
Tabell 16 - Nyttelast for konstruksjonsdeler [82].....	54
Tabell 17 - Utelatelseskriterier for seismisk påvirkning.....	59
Tabell 18 - Limtrebjelker GL 30c .....	64
Tabell 19 - Utnyttelse limtrebjelke 4-4.....	65
Tabell 20 – Limtresøyler.....	68
Tabell 21 - Utnyttelse etasjeskiller CLT 240 L7s .....	70
Tabell 22 Utnyttelse av bærende vegg i massivtre 1-3.....	71
Tabell 23 - Skjevstillingslast i både x- og y-retning.....	76

## Formelliste

Formel 1 - Formfaktor på grunn av fonning.....	44
Formel 2 - Basisvindhastighet.....	48
Formel 3 – Turbulensintensitet .....	49
Formel 4 - Kriteriet for lav seismisitet.....	56
Formel 5 - Dimensjonerende grunnakselerasjon .....	56
Formel 6 - Krav om dimensjonerende spektrum .....	57
Formel 7 - Første egensvingeperiode.....	57

## Symboler

### Brann - Kapittel 2

$R_{60}$  Brannmotstand for 60 minutters varighet

$d_0$  Sikkerhetstillegg for forkullingsdybde

### Lyd - Kapittel 2

$R'_w$  Veid, feltmålt lydreduksjonstall

$R_w$  Veid, laboratoriemålt lydreduksjonstall

$L'_{n,w}$  Veid, feltmålt, normalisert trinnlydnivå

$L_{n,w}$  Veid, laboratoriemålt, normalisert trinnlydnivå

$C_{50-5000}$  Omgjøringstall for lavfrekvent spektrum, luftlydisolasjon

$C_{l,50-2500}$  Omgjøringstall for lavfrekvent spektrum, trinnlydnivå

### Lastkombinasjoner og lastfaktorer - Kapittel 4

$\gamma_f$  Lastfaktor

$\gamma_m$  Materialfaktor

$\Psi$  Kombinasjonsfaktor

### Jordtrykk - Kapittel 4

$\Delta$  Veggens forskyvning grunnet jordtrykk

$\sigma_x$  Normalspenninger

$\tau_v$  Skjærspenninger

### Snølast - Kapittel 4

$b_1$  Lengde på tak

$b_2$  Lengde på takterrasse

$C_e$  Eksponeringsfaktor

$C_t$  Termisk faktor

$H$  Høyde over havet på byggestedet

$H_g$  Høydegrense

$h$	Høydeforskjell mellom tak og takterrasse
$l_s$	Lengde på snødrive
$\mu_1$	Formfaktor for snølast
$\mu_2$	Formfaktor for snølast som skyldes ras og vind
$\mu_s$	Formfaktor for snølast som skyldes ras fra høyereliggende tak
$\mu_w$	Formfaktor for snølast om skyldes vind
$s_1$	Snølast på tak og takterrasse
$s_2$	Snølast på takterrasse inkludert fonning og ras fra høyereliggende tak
$s_k$	Karakteristisk verdi for snølast på mark på den aktuelle byggeplassen
$s_{k,0}$	Karakteristisk grunnverdi for snølast
$s_{total}$	Karakteristisk verdi for total snølast på takterrasse
$\gamma$	Snøens tyngdetetthet

#### Vindlast - Kapittel 4

$c_{alt}$	Nivåfaktor
$c_{dir}$	Retningsfaktor
$c_{pe}$	Utvendig formfaktor
$c_{pi}$	Innvendig formfaktor
$c_{prob}$	Sannsynlighetsfaktor
$c_r$	Ruhetsfaktor
$c_o$	Terrengformfaktoren
$c_{season}$	Årstidsfaktor
$I_v$	Turbulensintensitet
$k_3$	Overgangssonefaktor
$k_l$	Turbulensfaktor
$\rho$	Luftens densitet
$q_{kast}$	Karakteristisk vindlast
$q_{m(z)}$	Stedsvindhastighetstrykk
$q_{p(z)}$	Vindkasthastighetstrykk
$v_{b,0}$	Referansevindhastighet

$v_b$	Basisvindhastighet
$v_m(z)$	Stedsvindhastighet
$z$	Høyde over terreng
$z_0$	Ruhetslengden

#### Nyttelast - Kapittel 4

$q_k$	Karakteristisk verdi for en jevnt fordelt last eller en linjelast
$\psi_0$	Faktor for kombinasjonsverdien av en variabel påvirkning

#### Seismisk påvirkning - Kapittel 4

$a_g$	Dimensjonerende grunnakselerasjon for grunnforhold type A
$C_t$	Faktor lik 0.050 for konstruksjoner av massivtre
$\gamma_1$	Seismisk faktor
$F_b$	Skjærkraft ved fundamentnivå eller ved toppen av en stiv kjeller
$H$	Bygningens høyde fra fundamentet eller fra toppen av en stiv kjeller
$L_1$	Lengden til bygget
$L_2$	Lengden til øverste etasje med fratrullet lengde til takterrasse
$m$	Bygningens totale masse over fundamentet eller over en stiv kjelleretasje
$q$	Konstruksjonsfaktor
$S$	Grunnforholdenes forsterkningsfaktor
$S_d(T)$	Dimensjoneringspektrum for elastisk beregning
$T_1$	Første egensvingeperiode

#### Skjevstillingslaster - Kapittel 5

$\theta$	Helning mellom vertikalt og horisontalt plan
$N$	Aksiallast
$H$	Tilleggslast i det horisontale planet, skjevstillingslast

## 1 Innledning

I dette kapitlet vil problemstilling, begrensninger, grunnlag for prosjektering og metode bli presentert. I metodekapittelet presenteres også de ulike programvarene som vil bli brukt.

### 1.1 Kronstadparken felt N3

Denne oppgaven tar for seg et leilighetsbygg på Kronstad i Bergen. Bygget utgjør ett av tre nye leilighetsbygg i Kronstadparken felt N3, som ligger vest for Bjørnsonsgate og nord for Fabrikkgaten. Se figur 1-1 og 1-2 for beliggenhet. Leilighetsbyggene er dimensjonert av NODE rådgivende ingeniører AS, og oppgaven ble gitt av dem høsten 2019. Byggene heter bygg A, B og C, og oppgaven tar for seg bygg C. Per mars 2020 er byggingen av bygg C påbegynt. Figur 1-3 er et skjermbilde av arkitektens IFC-modell av bygget. [1]



Figur 1-1 Rød markør viser Kronstadparken, Bergen [2]



Figur 1-2 Rød ring markerer leilighetsbyggene i felt N3 [3]



Figur 1-3 Arkitektens IFC-fil av bygg C, fasade sør [4]

## 1.2 Bygg C

Bygg C er en del av byggetrinn fire i Kronstadparken, som er utviklet av OBOS og Brødrene Ulveseth. [5] [6] Arkitekten for prosjektet har vært Og Arkitekter AS. Bygg C består av parkeringskjeller og 16 leiligheter fordelt på fire etasjer. Fjerde etasje består av to leiligheter i tillegg til en takterrasse på vestsiden. Figur 1-4 til 1-7 viser tegninger av byggets fasader. [7]



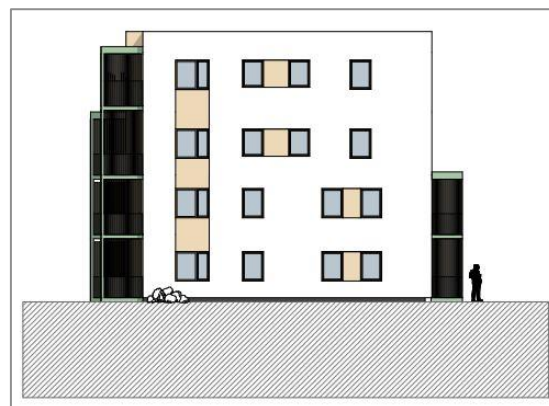
Figur 1-4 Fasade sør [7]



Figur 1-5 Fasade nord [7]



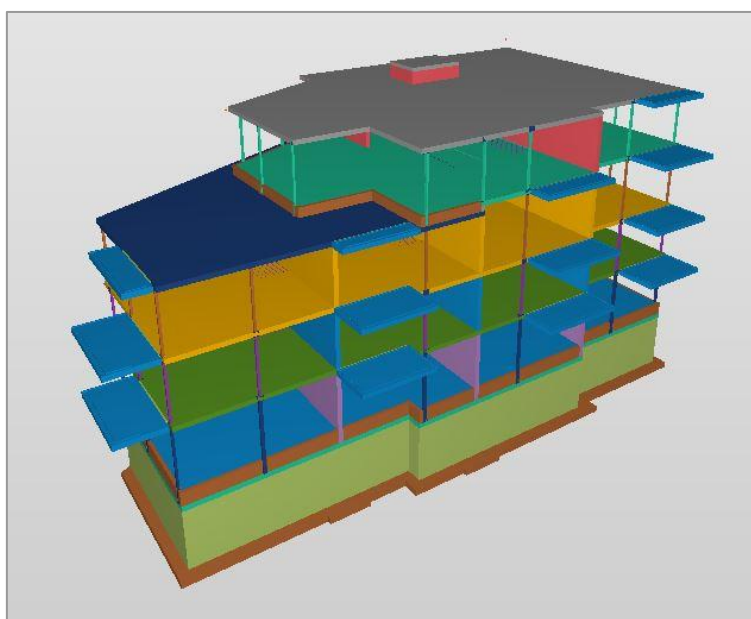
Figur 1-6 Fasade vest [7]



Figur 1-7 Fasade øst [7]



Parkeringskjelleren strekker under alle de tre leilighetsbyggene i felt N3. Den er fundamentert på sprengstein og ligger i nærheten av fjell, med inn- og utkjørsel på vestsiden av tomta. Nærområdet er tett bebygd og bygget har god avstand fra trafikkerte veier og Bybanen. Bæresystemet i parkeringskjelleren består av plasstøpt betong, og de øvrige etasjene av prefabrikkerte betongvegger og -dekker, samt stålsøyler og -bjelker. Gjennom alle etasjene går det en heis- og trappesjakt. Disse er av prefabrikkerte betongelementer. Se figur 1-8 for skjermbilde av NODE sin løsning på bæresystemet, hentet fra deres IFC-modell.



Figur 1-8 Bæresystem utredet av NODE [8]

### 1.3 Problemstilling

Hensikten med oppgaven er å dimensjonere et bæresystem til bygg C, bestående av massive trelementer. Her vil dette si bærende elementer av massivtre og limtre. Bæresystemet skal så sammenliknes med NODE sin løsning i betong og stål. Sammenlikningen vil gi en oversikt over materialenes egenskaper innen brann, lyd og miljøbelastning. Slik skal det konkluderes hvilket bæresystem som er mest velegnet for bygg C basert på de overnevnte egenskapene.



## 1.4 Begrensninger i oppgaven

Det er begrensninger i enkelte temaer for å ikke få en altfor omfattende oppgave. I oppgaven dimensjoneres det ikke knutepunkter, heis- og trappesjakt, balkonger, parkeringskjeller eller fundament. Parkeringskjelleren vil bestå av betong og det gjøres ingen endringer. Ved fundamentering ser en kun på generelle grunnforhold ved seismisk påvirkning. Flere kontroller er utført med overslagsberegninger som er tidsbesparende og til konservativ, sikker side. Antakelser og forenklinger er gjort i samråd med veiledere.

## 1.5 Grunnlag for prosjektering

Oppgaven bygger på et prosjektgrunnlag bestående av tegninger, modeller og beregninger utredet av NODE og Og Arkitekter. Prosjektgrunnlaget gjør at det nye bæresystemet kan basere seg på konstruksjonsrelaterte løsninger og ta hensyn til arkitektens planløsning. Slik kan bygg C beholde store deler av sin opprinnelige planløsning ved omgjøring til en konstruksjon av massive treelementer. Tabell 1 gir en oversikt over klasser og regler for bygg C etter Eurokode 0. [9]

GRUNNLAG FOR PROSJEKTERING	
Dimensjonerende brukstid generelt (Tabell 2.1)	50 år
Pålitelighetsklasse for bygget (Tabell NA.A1(901))	CC2 / RC2
Prosjekteringskontrollklasse (Tabell NA.A1(902))	PKK2
Utførelseskontrollklasse og kontrollform (Tab NA.A1(903))	UKK2. Kontrollform IL1, IL2 og IL3
Vedvarende dimensjonerings-situasjoner	Vertikal belastning fra egenlast, nyttelast, vindlast og snølast. Horisontal påkjenning fra vind og skjevstilling.
Forbigående dimensjonerings-situasjoner	Ved oppføring og vedlikehold av bygget
Dimensjonerende verdier for laster EQU, STR og GEO	Tab. NA.A1.2(A) + (B) + (C)
Dimensjonerende verdier for seismisk situasjoner	Tab. NA.A1.3
Krav til nedbøyning	Bærende hovedsystem (bjelker, søyler og bærende vegger): L/300 Sekundærbæresystem (etasjeskillere, tak og balkonger): L/250
Maksimal tillatt nedbøyning	25 mm

Tabell 1 - Grunnlag for prosjektering [9]

## 1.6 Metode

Metoden baserer seg på konstruksjonsberegninger i samsvar med kravene etter Eurokodene og de tilhørende nasjonale tilleggene, samt norske standarder og tekniske forskrifter. Sammen med disse vil relevant faglitteratur og veiledning benyttes for hjelp til den praktiske utførelsen av beregningene. Beregningene utføres via ulike programvarer, alt fra digitale regneark til beregningsprogrammer.

### 1.6.1 Veiledning

Oppgaven krever på de fleste områder ingeniørfaglig kompetanse og rådgøring med veiledere fra Høgskulen på Vestlandet og NODE, er dermed nødvendig. Deres erfaringer og kompetanse vil ha en aktiv påvirkning i tillegg til generelle råd ved oppgaveskrivingen.

### 1.6.2 Kildekritikk

Kilder vil vurderes etter seriøsitet og troverdighet. Beregninger og programvarer baseres på matematiske modeller, standarder og forskrifter. Det vil også utføres håndberegninger som en kontroll til beregningsprogrammene. Innhentede data av kart og terrenginformasjon kommer hovedsakelig fra Statens kartverk. Kildekritikken blir mest utfordrende ved fremlegging av teori. Her vil det fokuseres på å bruke fagrelaterte institutter som SINTEF og Norsk Treteknisk Institutt. Utover dette vil en benytte kunnskap og erfaringer fra byggeindustriens aktører gjennom deres nettsider. Dokumenter og tegninger av bygg C, som ikke er egenproduserte, har opphav hos prosjektets rådgivende ingeniør og arkitekt: NODE rådgivende ingeniører AS og Og Arkitekter AS.

### 1.6.3 Programvarer

Bygningsinformasjonsmodellering (BIM) er digitale verktøy som brukes i alt fra planlegging til utførelse av et byggeprosjekt. BIM er svært aktuelt i byggeindustrien, da det bidrar til ressurseffektivitet innen økonomi, framdrift og bærekraft. Bruk av digitale verktøy gjør at oppgaven settes i et realistisk perspektiv og gir mulighet til å

videreutvikle arbeidet. Det er derfor ønskelig å dimensjonere og modellere konstruksjonen i dataprogrammer som brukes av aktørene i byggeindustrien. Flere av programmene er lært i forbindelse med studiet, andre er selvlært gjennom arbeidet med bacheloroppgaven.

#### 1.6.3.1 PTC Mathcad Express Prime 3.0

Mathcad er et regneark som brukes av ingeniører for håndberegninger. Programmet fungerer som en avansert kalkulator hvor matematiske funksjoner skrives inn. I oppgaven vil det brukes til å regne ut laster og gjøre dimensjoneringsregninger etter Eurokodenes instruksjoner. Mathcad er da et nyttig verktøy siden disse beregningene krever mange forskjellige faktorer og mellomregninger.

#### 1.6.3.2 StruSoft FEM-design

FEM-design er i oppgaven benyttet til å kontrollere seismisk påvirkning i kapittel 4.4.2. Dette gjøres ved å omgjøre NODE sin modell i stål og betong til treelementer for så å utføre en analyse av vind- og skjevstillingslaster.

#### 1.6.3.3 Lastberegning av Sletten Byggdata AS (OS-prog)

Lastberegning er levert av Sletten Byggdata AS, tidligere kalt Sivilingeniør Ove Sletten. Programmet brukes til å beregne snø- og vindlaster på konstruksjoner, og er basert på veiledninger og kriterier i Eurokode 1. [10]

#### 1.6.3.4 One Click LCA (2015)

One Click LCA (2015) fra Bionova er et nettbasert program som utfører et klimagassregnskap for bygninger. Programmet gjør en livssyklusberegning basert på en produktliste fra leverandører. I livssyklusberegningene er det mulig å kalkulere utslipp av CO<sub>2</sub> fra produksjon og transport av materialet, samt utslipp fra hele dets levetid.

#### 1.6.3.5 Calculatis av Stora Enso

Calculatis er levert av Stora Enso, en finsk-svensk produktutvikler som fokuserer på biomasser og tre. Programmet er benyttet for dimensjoneringen av limtresøyler og -bjelker, samt etasjeskillere, tak og vegger i massivtre. Det er hovedsakelig brukt som en kontroll av håndberegninger gjort i Mathcad. I Calculatis kan en bruke treelementer fra Stora Ensos sin egen produktkatalog eller legge inn egne materialer. [11]

#### 1.6.3.6 Autodesk Revit

Revit blir brukt av rådgivende ingeniører og arkitekter til modellering av bygg og andre konstruksjoner. Ved å legge til informasjon kan en hente ut data på dimensjoner, materialer, strukturelle egenskaper og lignende. I Revit kan en også samkjøre slik at flere kan redigere modellen samtidig, et nyttig verktøy for aktører som jobber på tvers av bedrifter innad i et prosjekt. Revit vil brukes til å modellere bæresystemet i massive treelementer. Videre kan modellen overføres til Solibri Model Checker.

#### 1.6.3.7 Solibri Model Checker

Solibri Model Checker er et tredimensjonalt visualiseringsprogram med flere verktøy. Solibri knytter informasjon til byggekomponentene slik at programmet blant annet kan gjennomføre masseberegninger og overlappingstester. Slik kontrolleres konstruksjonen for feil og en unngår å oppdage de under bygging, noe som kan medføre forsinkelser og ekstrakostnader. I oppgaven vil Solibri og IFC-filer brukes til å illustrere bygg C. IFC er filtypen som Solibri operer med og står for industry foundation classes, og er en standard som modelleringsprogrammer bruker for å kunne utveksle informasjon. [12]

## 2 Teori om sammenlikningstemaene

I dette kapittelet blir temaene brann, lyd og miljøbelastning presentert. Dette innebærer å gjøre nødvendig klassifisering i henhold til standarder og forskrifter, samt beskrive hva de ulike temaene innebærer. Materialenes egenskaper tilknyttet disse temaene blir så drøftet i kapittel 3.

### 2.1 Brann

Krav til brannsikkerhet er gitt ved byggteknisk forskrift fra 2017 (TEK17) i §11. Forskriften stiller krav til sikkerhet ved brann for mennesker, dyr, miljø og materielle verdier. For å kunne gjennomføre dimensjoneringen av bæresystemet må en fastsette bygg C sin risikoklasse og brannklasse. [13]

Risikoklasse bestemmes ut fra virksomheten til bygget, og forutsetningene mennesker har for å kunne evakuere uten redningsmannskap. Figur 2-1 er hentet fra TEK17 §11-2 *Risikoklasser* og viser risikoklassene basert på byggets bruksområder og forutsetninger for rømningsveier. Ved bruk av figur 2-1 settes bygg C i risikoklasse 4. [13]

Risikoklasser	Byggverk kun beregnet for sporadisk personopphold	Personer i byggverk kjenner rømningsforhold, herunder rømningsveier, og kan bringe seg selv i sikkerhet	Byggverk beregnet for overnatting	Forutsatt bruk av byggverk medfører liten brannfare
1	ja	ja	nei	ja
2	ja/nei	ja	nei	nei
3	nei	ja	nei	ja
4	nei	ja	ja	ja
5	nei	nei	nei	ja
6	nei	nei	ja	ja

Figur 2-1 Bestemmelse av risikoklasser [13, §11-2]

Ifølge veiledningen til §11-3 *Brannklasser* bestemmes brannklassen etter antall etasjer og risikoklasse. Ettersom bygget er på fem etasjer inkludert parkeringskjeller, og i risikoklasse 4, er bygget i brannklasse 2. [13] Brannklasse 2 innebærer en middels konsekvens dersom bygget skulle brenne ned. Konsekvensen er basert på skade på liv, helse, samfunnsmessige interesser og miljø. Utfra veiledning til §11-4 settes brannmotstanden til bæresystemet lik R60. Det vil si at bæreevnen må være fungerende i en 60 minutters brann som vist på figur 2-2. [13] [14]

Bygningsdel	Brannklasse		
	1	2	3
Bærende hovedsystem	R 30 [B 30]	R 60 [B 60]	R 90 A2-s1,d0 [A 90]
Sekundære, bærende bygningsdeler, etasjeskillere og takkonstruksjoner som ikke er del av hovedbæresystem eller stabiliserende	R 30 [B 30]	R 60 [B 60]	R 60 A2-s1,d0 [A 60]
Trappeløp	-	R 30 [B 30]	R 30 A2-s1,d0 [A 30]
Bærende bygningsdeler under øverste kjeller	R 60 A2-s1,d0 [A 60]	R 90 A2-s1,d0 [A 90]	R 120 A2-s1,d0 [A 120]
Utvendig trappeløp, beskyttet mot flammepåvirkning og strålevarme	-	R 30 [B 30] eller A2-s1,d0 [ubrennbart]	A2-s1,d0 [ubrennbart]

Figur 2-2 Bestemmelse av brannmotstand [13, §11-3 tabell 1 i veiledning]

Stål, betong og treelementer oppfører seg ulikt ved brann. Disse egenskapene vil det gjøres rede for i kapittel 3 om brannsikkerhet for hvert enkelt materiale. Her ser en på endringer i flytegrenser og fastheter ved temperaturøkninger. Temperaturen øvre grense er satt til cirka 1000 grader celsius, en reell øvre temperatur ved fullt utviklet flammebrann. [15]

## 2.2 Lyd

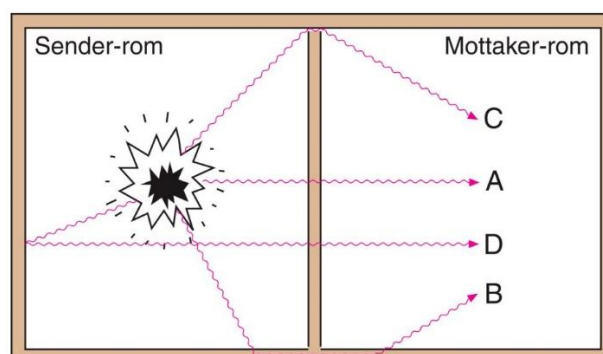
Lyd er et resultat av trykkvariasjoner (bølger) i luft og væsker, eller vibrasjoner i faste stoffer. [16] Når elastiske stoff blir utsatt for en kraftpåvirkning gir det hørbare svingninger som brer seg i stoffet om partiklenes likevektstilstand. Lyd måles i desibel (dB). [17]

Det er valgt å fokusere på lydoverføringen mellom boenhetene ved å se på de bærende veggene og etasjeskillerne. De neste avsnittene vil ta for seg begrepene luftlyd og trinnlyd med tilhørende måleverdier, og deretter lydklassen og kravene for bygg C.

### 2.2.1 Luftlyd

Luftlyd er lyd som kommer i form av trykkbølger i luften. Det er tre prinsipper på hvordan luftlyd kan overføres til et mottakerrom, som framstilt på figur 2-3.

Lydbølgene vil for det første sette skillekonstruksjonen i svingninger, noe som gir lydavstråling på motsatt side. Det kan for eksempel være gjennom en vegg. Det vil også overføres lyd ved flanketransmisjon ved at energien overføres via flankerende konstruksjonsdeler, som gjennom en etasjeskiller. I tillegg vil det være lydoverføringer gjennom utettheter i skillekonstruksjonen. Dette blir gjerne også omtalt som flanketransmisjon da begrepet også benyttes for all lydoverføring som ikke går direkte gjennom skillekonstruksjonen. [18] Utettheter er noe som må unngås da det kan gi betydelig dårligere lydisolasjon. [19]

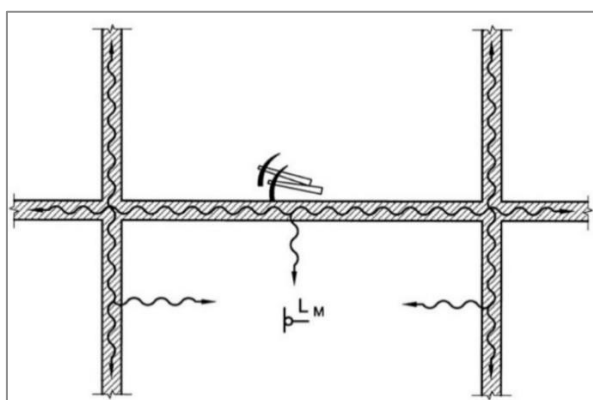


Figur 2-3 Lydvæier [19]

For å bestemme isoleringsegenskapene til skillekonstruksjoner refererer NS 8175 til veid, feltmålt lydreduksjonstall,  $R'_w$ . Lydreduksjonstallet er forholdet mellom lydintensiteten fra senderrommet og den transmitterte lydintensiteten på mottakersiden. Det beskriver altså evnen konstruksjonen har til å dempe lydnivået fra det ene rommet til det andre. [20] Det at lydreduksjonstallet er feltmålt, vil si at det er målt i en bygning og at flanketransmisjon dermed er medregnet. Veid reduksjonstall betyr at det er angitt i forhold til en normert frekvenskurve. Gjennom frekvensområdet vil det ofte være avvik, og veid reduksjonstall er verdien en får ved 500 Hz. [17] [19]

### 2.2.2 Trinnlyd

Trinnlyd er lyd som oppstår når blant annet fottrinn og dunking setter bygningskonstruksjonen i svingninger. Konstruksjonens evne til å isolere mot lyden kalles trinnlydisolasjon. Måleverdien for trinnlyd er veid, feltmålt, normalisert trinnlydnivå,  $L'_{n,w}$ . Normalisert trinnlydnivå blir målt ved å benytte en standardisert bankemaskin på etasjeskilleren og måle lyden i etasjen under. Dette er vist på figur 2-4. [21] Lavt lydnivå i etasjen under indikerer at konstruksjonen har god isolerende evne mot trinnlyd. [20] På samme måte som ved luftlydnivå er det normaliserte trinnlydnivået feltmålt og veid. [17]



Figur 2-4 Måling av normalisert trinnlydnivå [17]



### 2.2.3 Lydklasse

NS 8175 beskriver fire lydklasser: A, B, C og D, hvor lydklasse A er den strengeste.

Byggteknisk forskrift krever ved utforming av bygningen at det skal tas hensyn til forventet bruk for å kunne tilfredsstille lydforhold. [22] Det er valgt å dimensjonere etter lydklasse C, en lydklasse som tilfredsstiller lydforhold for en stor andel berørte personer definert i TEK17 §13-6 (1). [13] Mellom boenheter hvor grenseverdiene til klasse C er oppfylt, vil omtrent 90 % være lite eller ikke plaget av luftlydoverføring, og tilsvarende 80 % for trinnlydoverføring. [23]

I lydklasse A og B angir NS 8175 at ved boliger og skoler skal det benyttes et tilleggsledd ved beregning av luftlydisolasjon og trinnlydnivå. I lydklasse C er dette anbefalt for å oppnå et tilfredsstillende lydnivå, spesielt i boliger. Bakgrunnen for tilleggsleddet er at det har blitt et større fokus på lavfrekvensegenskapene. Dette er grunnet økende antall klager på lavfrekvent luftlyd fra blant annet tv og musikkanlegg, i tillegg til lavfrekvent trinnlyd. Samtidig har lette konstruksjoner redusert lydisoleringsevne i det lavfrekvente området, og det er dermed valgt å benytte tilleggsleddet her. [22] Det gjøres med en korreksjon for lave frekvenser som kalles omgjøringstall for spektrum. [24] [25] Dette gir en bedre og riktigere representasjon av egenskapene til konstruksjonen i lavfrekventområdet, særlig ved trinnlyd. [26]

Ved beregning av luftlydisolasjonen legges leddet  $C_{50-5000}$  til. Luftlydisolasjon beregnes dermed ved  $R'_w + C_{50-5000}$ . Når  $C_{50-5000}$  har en lav, negativ verdi vil det si at konstruksjonen har dårlige isoleringsevner ved lavfrekvenser. Ved beregning av trinnlydsnivået legges leddet  $C_{1,50-2500}$  til, hvor en høy, positiv verdi indikerer en dårlig isoleringsevne ved lavfrekvenser. Trinnlydsnivået er altså lik  $L'_{n,w} + C_{1,50-2500}$ . [24]

Kapittel 7 i NS 8175 omhandler lyd i boliger for de ulike lydklassene. Tabell 1 i standarden angir at kravet for luftlydisolasjon er reduksjonstallet,  $R'_w + C_{50-5000}$ , lik 54 dB for lydklasse C mellom boenheter. Det samme gjelder mellom boenhet og fellesarealer som gang og trapperom. Tabell 2 i standarden angir at kravet for trinnlydisolasjon mellom boenheter,  $L'_{n,w} + C_{1,50-2500}$ , også er lik 54 dB. Foreløpig

henviser TEK17 til NS 8175:2012, men det er her benyttet grenseverdier fra NS 8175:2019. [23]

Kravene for lyd vil videre legges til grunn ved valg av bærende skillekonstruksjon mellom boenheter. En må samtidig understreke at for å kunne avgjøre om lydkvaliteten er tilfredsstillende, vil det ikke være tilstrekkelig å se på skillekonstruksjonene hver for seg. Knutepunktene er avgjørende for å hindre at lyd og vibrasjoner forplanter seg. [26] I kapittel 5.9 ser en nærmere på et knutepunkt som er valgt med hensyn til lyd.

## 2.3 Miljøbelastning

Ved begrepet miljøbelastning menes det her alle faktorer som påfører skader på ytre miljø. Ved å kartlegge materialenes egenskaper kan en sammenlikne belastningen de to bæresystemene har på miljøet. I oppgaven er det valgt å fokusere på følgende aspekter knyttet til ytre miljø:

- Utnyttelse av råvarer
  - *Hvor godt utnyttes råvaren i sin helhet?*
- Utslipp av CO<sub>2</sub>
  - *Hvor mye utslipp av CO<sub>2</sub> har de ulike materialene i løpet av sitt livsløp?*
- Gjenbrukbarhet
  - *Hvordan blir materialene brukt etter sin dimensjonerende brukstid, blir de gjenvunnet eller kan de gjenbrukes?*

### 2.3.1 Nærmere om gjenbruk

En dag vil bygg C stå ovenfor en ombygging, rehabilitering eller rivning. Dette vil medføre materialavfall som må sorteres og behandles på deponi eller hos gjenvinningsaktører. I byggeindustrien ønsker en å redusere klimagassutslippene ved å bruke materialene på nytt slik de er, altså ved gjenbruk (også kalt ombruk). I praksis vil dette si at brukte materialer kan brukes igjen i funksjoner hvor det stilles lavere krav til kvalitet. Materialene er da ubehandlet sammenliknet med gjenvinning, hvor materialer omgjøres til noe nytt for så å ta del i et annet byggeprosjekt. [27]

Alle produkter som brukes i et byggeprosjekt må følge de europeiske standardene og forskrift om dokumentasjon av byggevarer (DOK). I tillegg må alle bygg være i samsvar med TEK17. For å bevise at disse kravene blir tilfredsstilt må produktene sertifiseres. Sertifiseringen gjennomføres av SINTEF Teknisk Godkjenning eller produktet blir CE-merkes av Europeisk Teknisk Bedømmelse (ETA). Det er allikevel slik at gjenbruksmaterialer ikke trenger noen sertifisering eller ytelseserklæring dersom det er svært sannsynlig at materialet er av god nok kvalitet. Derfor brukes ofte gjenbruksmaterialer i funksjoner som stiller lavere krav enn de opprinnelige funksjonene. [27]

Det er opp til det enkelte prosjektet om det skal benyttes gjenbruksmaterialer. I Norge er det ingen standardisert metode for å dokumentere egenskapene til gjenbruksmaterialer. Hovedårsaken til dette er at det er en utfordring å kartlegge de mekaniske egenskapene og eventuelle skader på materialene. Det finnes bedrifter som spesialiserte seg på dette ved å undersøke og teste brukte byggematerialer, men dette byr på utfordringer for aktørene i byggeindustrien. Økte kostnader og logistikkproblemer er hovedargumentene når aktørene velger nye materialer fremfor gjenbruk.

I slutten av kapitlene om miljøbelastning vil det drøftes hvorvidt de ulike materialene kan gjenbrukes og hvordan de eventuelt blir gjenvunnet.

### 3 Materialene og deres egenskaper

I dette kapitlet blir stål, betong og massive trelementer presentert. Kapitlet tar for seg generell teori om materialene samtidig som det gjøres rede for materialenes egenskaper angående brann, lyd og miljøbelastning.

### 3.1 Stål

Dette delkapittelet gjør rede for materialet stål og egenskapene det har generelt, ved brann og ved miljø. Lydegenskaper vil ikke bli diskutert, da stålsøylene i bygg C ikke er relevante ved de viktigste lydoverføringene.

#### 3.1.1 Generelt om stål

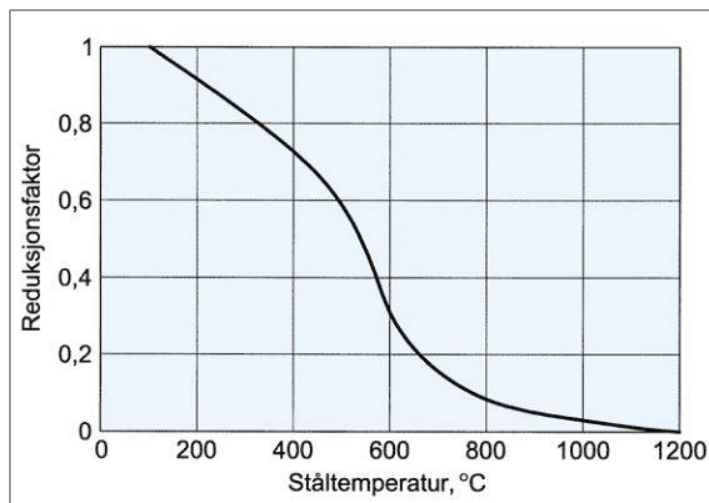
Store deler av NODE sitt vertikale bæresystem består av søyler i konstruksjonsstål. Denne typen stål består av grunnstoffet jern, et legeringsmateriale og karbon. I all hovedsak er stål en jernlegering hvor legeringsmaterialet velges utfra de ønskede egenskapene til stålet. Produsenter leverer stålprofiler med dimensjoner etter Eurokode 3 og de tilhørende standardene. I denne oppgaven er stål et synonym til konstruksjonsstål. [28] [29, s.134-135]

Konstruksjonsstål er en seig ståltype. Dette vil si at materialet er duktilt og har evnen til å deformere seg og vise synlige skader ved overbelastning. Slik unngår en sprø brudd i stålkonstruksjoner, og har mulighet til å rette opp feil eller skader før materialet går til brudd. Ellers er materialet sterkt, enkelt å overflatebehandle og forme. Utfordringene med stål er at det er energikrevende, både når det gjelder produksjon, forming og andre behandlinger. [30, tabell 2] [29, s. 134]

#### 3.1.2 Brann

Stål påvirkes sterkt ved temperaturendringer. Dette gjør stål til et ugunstig materiale ved brann når en ser på stålsøylene alene. Hovedårsaken til dette er at flytespenningen til stålet reduseres kraftig ved høye temperaturer. I tillegg reduseres elastisitetsmodulen (E-modulen), som indikerer at stålets stivhet reduseres sammen med motstanden mot elastisk deformasjon. Reduksjon i flytespenning og E-modul gjør at stålet vil gå over i en plastisk deformasjon. Plastisk deformasjon gir varige deformasjoner, og ved overbelastning vil materialet gå til brudd. Reduksjon i flytespenning er vist på figur 3-1 hvor reduksjonsfaktoren for flytespenningen minsker

ved økning av temperaturen i stålet. Diagrammet viser at ved 600 grader celsius er flytegrensen redusert med hele 70 %. [31]



Figur 3-1 Flytespenningen som funksjon av reduksjonsfaktor og ståltemperatur [31, punkt 21]

Angående kravet til brannmotstand R60 er stålsøylene avhengige av beskyttelse. Uten beskyttelse vil stålet være i fare for å kollapse etter omtrent 15 minutter. Med riktig beskyttelse kan denne tiden forlenges og møte brannmotstandskravet på 60 minutter. Beskyttelsen kommer i ulike former for brannisoleringssystemer.

Brannisoleringssystemet fungerer slik at det hindrer varme i å trenge gjennom til stålet, altså utsetter varmeutviklingen. Systemet kan være i form av brannbeskyttende maling, gipsplater, steinullplater, hardpressede plater og diverse påsprøytningsmidler. [31]

### 3.1.3 Miljøbelastning

#### 3.1.3.1 Utnyttelse av råvarer

Stål fremstilles ved bearbeiding av råjern. Bearbeidingen involverer kjemiske prosesser som desoksidasjon og legering i tillegg til utstøping og valsing. Råjern er behandlet jernmalm, en bergart med høyt innhold av jernmineraler. [32] Stål er ikke bare avhengig av jernmalm, men også andre stoffer som koks og kalkstein. En kan dermed si at stål er svært ressurskrevende, og at det er begrenset hvor mye av råvarene som blir utnyttet slik de er. [28] [33]

### 3.1.3.2 Utslipp av CO<sub>2</sub>

Ved vurdering av klimagassutslipp ser oppgaven på utslippet fra stål gjennom hele dets livsforløp. Miljødeklarasjonen for varmvalset stål er utredet av EPD-Norge på vegne av Norsk Stålforbund. Deklarasjonen gikk ut i 2019, men en vurderer at den likevel gir aktuelle nøkkeltall på klimagassutslipp per kilogram stål. Tabell 2 gir klimagassutslippet for stålsøylene i bæresystemet, basert på varmvalsede hulprofiler med målene 100x100x5 mm. Beregninger finnes i vedlegg B1. [34]

CO <sub>2</sub> -utslipp for stålsøyer		
Egenskap	Verdi	Enhet
Utslipp for stål	2,1	kg CO <sub>2</sub> / 1 kg stål
Vekt per søyle	39	kg
Utslipp per søyle	81,9	kg CO <sub>2</sub>
<b>Totalt utslipp</b>	<b>4586,4</b>	kg CO <sub>2</sub>

Tabell 2 - CO<sub>2</sub>-utslipp for stålsøyer

Det totale utslippet for stålsøylene er tilnærmet likt 4,6 tonn CO<sub>2</sub>. Dette tilsvarer cirka halvparten av en norsk innbyggers CO<sub>2</sub>-utslipp i 2014. [35] En kan oppfatte dette som store tall, men det er viktig å huske at stål har en levetid på 100 år. Det må understrekes at de fleste bygninger dimensjoneres for 50 års brukstid, og at stålets levetid kan ende her ved rivning. I de fleste tilfeller vil renovering benyttes, noe som kan gi en forlengelse av stålets levetid. En kan også medregne høye utslipp av CO<sub>2</sub> ved frakt av råstålet, da norske stålprodusenter bearbeider råstål som gjerne er produsert i Europa eller Kina. [28]

### 3.1.3.3 Gjenbrukbarhet

Stål blir hovedsakelig sendt til materialgjenvinning, altså resirkulert. [36] Det finnes bedrifter som spesialiserer seg på gjenbruk av stål, men i et begrenset omfang. Stålelementer kan kun gjenbrukes dersom de ikke er utsatt for skader som kommer av brann eller overbelastning, da de mekaniske egenskapene er svekket. Dersom stålsøylene i bygg C ikke utsettes for dette, kan søylene benyttes videre i andre

konstruksjoner. Det er da viktig å være forsiktig i rivningsprosessen og demonteringen for å ikke skade søylene. [27]

## 3.2 Betong

I dette kapittelet blir betong som bygningsmateriale drøftet angående sammenlikningstemaene. Herunder gjelder alle støpninger av betong, både prefabrikkerte og plasstøpte.

### 3.2.1 Generelt om betong

Betong består av sement, tilslag og vann. Sement fremstilles av kalkstein og tilsetningsstoffer gjennom ulike behandlingsprosesser. Tilslaget består av enten sand og singel, eller sand og pukk (knust stein). Eventuelt kan en benytte seg av grus, en kombinasjon av de overnevnte. [37]

Betong har evnen til å ta store trykklaster sammenliknet med andre materialer. Materialet har imidlertid dårlig strekkfasthet og vil ikke kunne ta opp betydelige laster som danner strekkrefter i materialet. Derfor legges det inn armering i form av stålstenger eller -kabler. Disse tar opp strekkrefter og gjør dermed betong gunstig til mange ulike konstruksjoner. [37] [38]

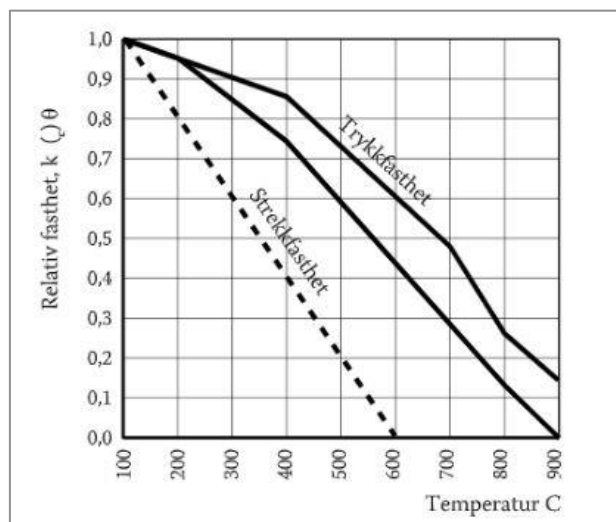
Betong kan enten støpes på byggestedet av fersk betong, eller leveres som helt eller delvis ferdige elementer, også kalt prefabrikkert betong. NODE har valgt både plasstøpt og prefabrikkert betong (plattendekker) til både vegger og dekker i bæresystemet, se vedlegg D for samtale per e-post.

### 3.2.2 Brann

Betong har gunstige egenskaper ved brann. Dette kommer av at betong er et selvisolerende materiale med en lav varmekonduktivitet. Betong har dermed en dårlig evne til å lede varme. I tillegg har betongens vanninnhold evnen til å forsinke

temperaturøkningen i betongen ved brann. Forsinkelsen skjer fordi vannet krever energi i form av varme for å kunne fordampe. Betong er allikevel ugunstig i noen branntilfeller, da det er fare for eksplosiv avskalling. Dette skjer ved branner som har en rask varmeutvikling, og gjerne hvor elementene er av mindre tverrsnittsdimensjoner eller er påført større trykklast. Det kan også skje i betong som er under ett år gammel, da fersk betong har et høyere vanninnhold enn fullherdet betong. [39, bind D punkt 3.4]

Figur 3-2 viser trykk- og strekkfastheten til betong som en funksjon av temperatur og reduksjonsfaktor. Den øverste kurven representerer trykkfastheten til betong hvor tilslaget inneholder kalk, noe som er vanlig ved normalbetong. Kurven forteller at betongens trykkfasthet reduseres med 40 % ved en temperatur på 600 grader celsius. [39, bind D punkt 3.4]



Figur 3-2 Betongens fasthet ved temperaturøkning [39, bind D punkt 3.4]

Til tross for reduksjon i fasthet viser erfaringer at betongbygninger har evnen til å forbli stående gjennom hele brannen uten å kollapse. [39, bind D2] Dette avhenger av at retningslinjer for brannteknisk dimensjonering blir overholdt.



### 3.2.3 Lyd

Ved massive skillekonstruksjoner som betongelementer er luftlydisolering først og fremst avhengig av masse per flateenhet. Ved å øke tykkelsen på en vegg av betong kan en dermed få økt luftlydisoleringsegenskaper. [19] En tung konstruksjon er vanskelig å sette i svingning, noe som gjør at flere lydbølger vil reflekteres tilbake fra overflatene og bli værende i senderrommet. [20]

For å beregne lydegenskapene til etasjeskillerne er det benyttet en beregningsmetode fra SINTEF Byggforsk som gjelder tunge etasjeskillere. Som nevnt tidligere er kravet til lyd oppgitt som feltmålt verdi, og en må dermed inkludere flanketransmisjon. SINTEF Byggforsk gjør dette ved å oppgi lydisolasjonsegenskaper avhengig av ulik grad av flankeoverføring. Flankeoverføringsgraden er avhengig av spennvidde, bæresystem, veggsystem og opplegg for dekket. [24] Løsningen til NODE er her bestemt til middel flankeoverføringsgrad, vist på figur 3-3.

Grad av flankeoverføring	Betingelser/kriterier
Liten	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Store spenn (&gt; 8 m) over flere rom</li> <li>– Opplegg på søyle/bjelke</li> <li>– Lette, utfyllende skillevegger</li> <li>– Yttervegger av bindingsverk, splittet ved dekkene</li> </ul>
Middels	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Middels spenn (5–7 m) over to rom</li> <li>– Opplegg på massiv vegg eller søyle/bjelke</li> <li>– Lette eller massive skillevegger</li> <li>– Yttervegger av bindingsverk, delvis splittet ved dekkene</li> </ul>
Stor	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Små spenn (&lt; 5 m) over ett rom</li> <li>– Opplegg på massive veggskiver</li> <li>– Massive skillevegger</li> <li>– Yttervegger av bindingsverk, delvis gjennomgående</li> </ul>

Figur 3-3 Flankeoverføringsgrad [24]

Nedenfor viser tabell 3 lydegenskapene til etasjeskilleren med forventet feltverdi og omgjøringsstall for spektrum. Betongen alene oppfyller ikke lydkravene, men NODE har

valgt å benytte en trefiberplate i tillegg til parkett. Trefiberplaten er en trinnlydsplate kalt Silencio som har gode isoleringsegenskaper mot trinnlyd grunnet høy trykkstivhet.

[40]

Lydegenskaper etasjeskiller i betong		
Sjikt	Luftlydisolasjon $R'_w + C_{50-5000}$	Trinnlydnivå $L'_{n,w} + C_{l,50-2500}$
220 mm betong + 35 mm avretting	60 dB	70 dB
15 mm parkett + 12 mm trefiberplate	+ (-3 - 3) dB	- (21 + 1) dB
Sum	54 dB $\geq$ 54 dB <b>OK</b>	48 dB $\leq$ 54 dB <b>OK</b>

Tabell 3 - Lydegenskaper etasjeskiller i betong [24]

Ved beregning av lydegenskapene til betongveggene som skiller boenhetene er det også benyttet verdier fra SINTEF Byggforsk. Forventet feltmålt luftlydisolasjon for en 200 mm tykk betongvegg er oppgitt som 54-56 dB. [41] Ettersom veggene er 220 mm tykke vil den ha høyere isolasjonsevne enn dette. I beregningen er det dermed benyttet en luftlydisolasjon på 56 dB. Her er også omgjøringsstallet for spektrum inkludert. Ved å se på tabell 4 ser man at veggene akkurat tilfredsstiller kravet. Det vil være gips på begge sider av betongen, noe som vil øke lydegenskapene ytterligere.

Lydegenskaper betongvegg	
Sjikt	Luftlydisolasjon $R'_w + C_{50-5000}$
220 mm betong	56 + (-2) dB
Sum	54 dB $\geq$ 54 dB <b>OK</b>

Tabell 4 - Lydegenskaper betongvegg [41]

### 3.2.4 Miljøbelastning

#### 3.2.4.1 Utnyttelse av råvarer

I produksjonen av sement blir kalkstein fullt utnyttet. Allikevel er det viktig å påpeke at prosessen som kreves for å fremstille sement er energikrevende og fører til store utslipp av CO<sub>2</sub>. Med dette kan en konkludere med at sement gir en dårlig utnyttelse av materialenes opprinnelige form.

Når det gjelder tilslaget krever disse flere knuseprosesser, avhengig av hvilke korngraderinger en ønsker. Tilslaget kommer fra sprengt berg, og de mobile knuseanleggene bidrar til en effektiv utnyttelse av berget på byggestedet.

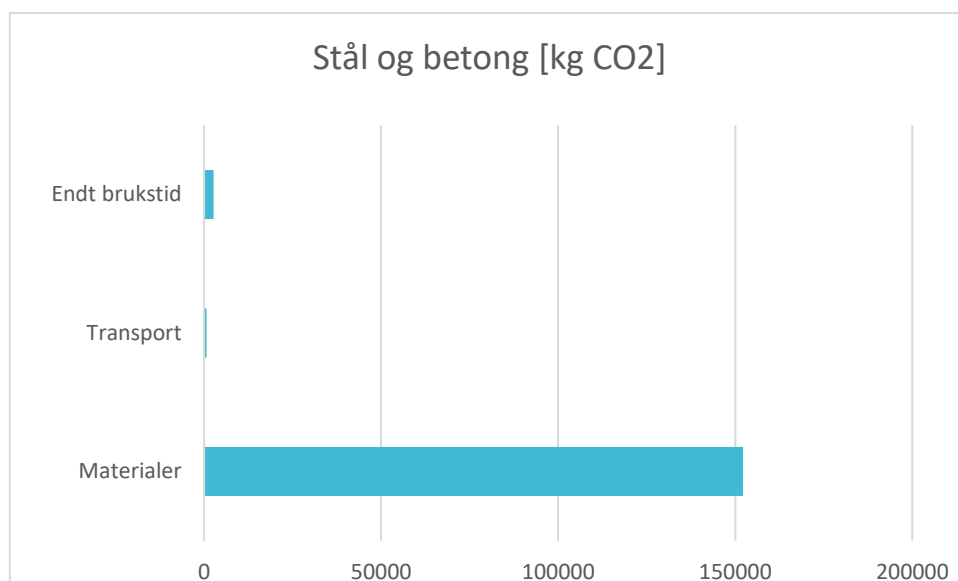
#### 3.2.4.2 Utslipp av CO<sub>2</sub>

I sementproduksjonen må råmelet av kalkstein brennes for å kunne spaltes. [42] Denne kjemiske prosessen kalles kalsinering og utgjør 2/3 av CO<sub>2</sub>-utslippet ved produksjon av sement. Resten av utslippet kommer fra brenselet til oppvarmingen. [43] I Norge er dette brenselet hovedsakelig kull. Per tonn sement slippes det ut omtrent 700-800 kg CO<sub>2</sub>. [44]

Årlig produseres det omtrent 4,4 millioner kubikkmeter betong i Norge. [44] Med dette følger det et utslipp på omtrent 1,4 millioner tonn CO<sub>2</sub> ifølge en rapport utredet på vegne av Norsk Betongforening. [45, s.7] Tallene på utslippet er fra 2006 og inkluderer utslipp tilknyttet sementproduksjonen. En kan anta dette tallet er redusert siden den gang, da CO<sub>2</sub>-tilknyttet sementproduksjonen i Norge er blitt redusert de siste årene. [44]

Et positivt aspekt angående utslipp av CO<sub>2</sub> er at betong er et kortreist materiale, da Norge produserer både tilslag og sement, med unntak av uthenting av selve kalksteinen i sementen. Blanding av betongen foregår over hele landet, og det er derfor liten import av betong. Samtidig er det lite betong som eksporteres.

Det er gjennomført en livssyklusanalyse for bæresystemet i betong og stål ved bruk av programmet One Click LCA. En livssyklusanalyse vil beregne utslippet av CO<sub>2</sub> til hele bæresystemet fra «vugge til grav». Resultatene ligger i vedlegg B3. Slik figur 3-4 viser kommer den største andelen av CO<sub>2</sub>-utslippet fra produksjonen og selve materialet. Utslipp av CO<sub>2</sub> fra transport er lave fordi produksjonslokalene for leverandørene ligger nær byggeplassen. Con-Form og Brødrene Ulveseth på Sotra er betongleverandørene og Alsaker Stål på Askøy er stålleverandøren, se vedlegg D.



Figur 3-4 Livssyklusberegning for betong og stål

### 3.2.4.3 Gjenbrukbarhet

Etter at betong har fullført sin primære oppgave blir rivningsmassene sendt til resirkulering. Betong resirkuleres på ulike måter. Det mest vanlige er å bruke rivningsmassene som fyllmasser. En annen mulighet er å knuse betongen og bruke den som tilslag i bygningsmasser, som gjenbruksbetong og asfalt. Dette forutsetter at betongen ikke er forurenset som følge av ytre påvirkninger. [36]

Betongelementer som prefabrikkerte dekker og vegger egner seg til gjenbruk, men dette avhenger av at elementene demonteres forsiktig slik som ved stålsøylene. Gjenbruk er vanskelig å gjennomføre dersom elementene er for tunge og/eller av for store dimensjoner, slik at betongveggene i leilighetene kan være vanskelige å gjenbruke. Dessuten vil en slik demontering gi en krevende og langsom rivningsprosess. De prefabrikkerte dekkene kommer i ulike dimensjoner, og det er enklere å benytte disse. Videre kan ett eksemplar dekke sendes til undersøkelse slik at det kan utarbeides en form for ytelseserklæring, noe som er nyttig i prosessen ved gjenbruk. [27]

### 3.3 Massive treelementer

Dette kapittelet presenterer de aktuelle massive treelementene i oppgaven: limtre og massivtre. Brann, lyd og miljøbelastning blir drøftet i samme underkapitler, da egenskapene er relativt like.

#### 3.3.1 Limtre

Limtre består av lameller av gran eller furu som er limt sammen til ett trevirke. Lamellene har en tykkelse på mellom 20 og 50 mm. I Norge produseres de fleste limtrevirkene med 45 mm tykke lameller. Lamellene limes sammen i lik fiberretning, noe som gjør trevirket til et sterkt bæreelement med stor formfrihet. Limtre gir bæreelementer som bjelker, søyler, rammer og dekker. Flere limtreelementer kan festes sammen ved fingerskjøtt slik at en får ett langt, sammenhengende konstruksjonselement. [46] [47]

#### 3.3.2 Massivtre

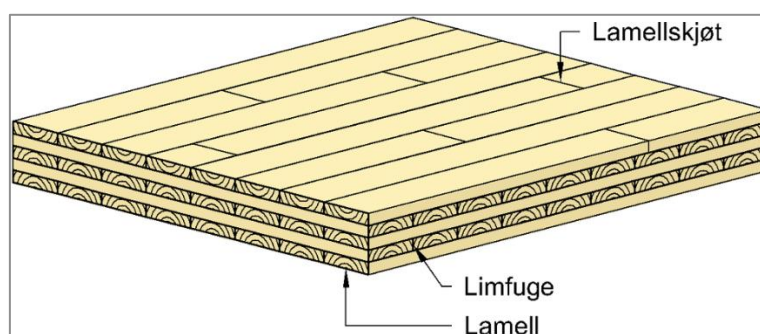
Metoden om krysslaminering har sitt opphav i Canada, hvor det ble brukt til tverrspente brodekker på 1970-tallet. Metoden kom til Sentral-Europa rundt 1990 der ideen ble videreutviklet til bygningsdeler i massivtre. [48] Denne utviklingen kom som følge av et behov for miljøeffektive konstruksjonssystemer. [49]

Massivtre gjorde sitt inntog i Norge rundt 1995, med en sterk vekst de siste årene. [49] Det er forventet et stort potensial i markedet for massivtre, noe som har gjort at staten gjennom Innovasjon Norge har gått inn med tilskudd til private bedrifter. [50] I 2018 produserte norske trelastbedrifter omtrent 4,42 millioner kubikkmeter trelast og i 2019 åpnet Splitkon i Viken verdens største massivtrefabrikk. [51] [52] Dette gir grunnlag til å kunne støtte norsk næringsliv ved utvikling av bæresystemet i massive treelementer.

Massivtre består av sammenkoblede lag av tre. Lagene kalles lameller og består som regel av konstruksjonsvirke av gran. Lim er mest brukt til å feste lamellene sammen til et massivtreelement, men spikre, skruer, tredybler eller stålstag blir også brukt.

Massivtreelementer deles inn i tre kategorier etter hvordan de er satt sammen: kantstilte elementer, hulromselementer og krysslagte elementer. I denne oppgaven er begrepet massivtre av kategorien limte, krysslagte elementer, og massivtre blir omtalt som et synonym til dette. [53]

Ved krysslagte elementer er annenhver lamell dreid 90 grader og limt på det underliggende laget, se figur 3-5. Dette gjør at massivtre kan være bærende i to retninger. Tykkelsen på massivtre kan variere fra 60 mm til 240 mm med tre, fem, sju eller ni lameller, avhengig av elementets bruksområde. De fleste produsenter tilbyr elementer opp mot 14 meters lengde. [48]



Figur 3-5 Eksempel på massivtre med fem sjikt [53]

Bruksområdet til massivtre er variert og kan brukes til flere typer konstruksjoner. Det kan blant annet brukes til etasjeskillere, vegger, tak og balkonger. De kan være bærende og ikke-bærende. Bruksområdet varierer ut fra hva slags bygg prosjektet omhandler, for eksempel boligbygg, næringsbygg eller andre større bygninger over flere etasjer. [49]

### 3.3.3 Brann

Tre er definert som et brennbart materiale, som betyr at det gir bidrag til brannforløpet. Til tross for dette har tre gode egenskaper ved brann. Dette er fordi det dannes et forkullende lag på sidene som er eksponert for brann. Forkullingslaget hindrer oksygentilførsel til det friske treet under, og forsinker dermed

brannutviklingen. Bæreegenskapene begrenses etter hvert som tykkelsen til forkullingslaget øker, og denne forkullingshastigheten kan måles som forkullet lag i mm per minutt. Slik kan en kontrollere at elementene vil tilfredsstille kravet til brannmotstand på 60 minutter. Forkullet tykkelse, og dermed redusert friskt tverrsnitt, er vist i tabell 5. [54, s.10 og 15]

Forkulling på treelementer		
	Massivtreelementer	Limtresøyler- og bjelker
Forkullingshastighet [mm/min]	0,7	0,7
Brannmotstand [min]	60	60
Sikkerhetstillegg $d_0$ [mm]	7	7
<b>Tverrsnittsreduksjon [mm]</b>	<b>49</b>	<b>49</b>

Tabell 5 - Forkulling på treelementer

Som tabell 5 viser er det samme forkullingshastighet på massivtreelementer og limtreelementer. Som en ekstra sikkerhet legges det til syv mm på forkullingslaget. Dette gjør at søyler, bjelker, etasjeskillere, vegger og tak av tre vil ha en reduksjon på minst 49 mm etter en time brann.

En annen gunstig egenskap er at vegger og etasjeskillere av massivtre har en svært lav varmegjennomgang. Dette gjør at en ueksponert side vil bevare en normal romtemperatur selv etter at motsatt side er blitt utsatt for 90 minutters brann på 1000 grader celsius. [54] Å bruke massivtre i vegger og dekker har bevist seg å forsinke brannens påvirkning på konstruksjonen. [55]

Det er ingen Eurokode eller norsk standard for branndimensjonering av massivtre. Det forventes at *Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner - Del 1-2: Brannteknisk dimensjonering* vil komme i oppdatert utgave innen 2024 med kapitler om krysslaminert massivtre. [56] Videre brannteori baserer seg derfor på forsøk gjort ved Carleton University i Canada, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut og National Fire

Protection Association i USA. [57] [58] Gjennom samarbeid har disse institusjonene utredet to rapporter som baserer seg på samme tekniske forsøk. RISE Fire Research AS har på vegne av Direktoratet for byggkvalitet og Direktoratet for beredskap og samfunnssikkerhet studert blant annet disse forsøkene. [59] Denne rapporten har vært en nyttig ressurs ved innhenting av informasjon om forsøkene som blir drøftet videre.

Selv om rom bestående av flater i massivtre har gode brannegenskaper, er det viktig å sammenlikne ubeskyttede overflater med beskyttede. Brann på massivtreelementer fører med seg en høy varmeavgivelse. Ved bruk av brannbeskyttelse i form av gipsplater kan denne varmeavgivelsen reduseres med 80 %. I et av forsøkene som ble gjort bestod en branncelle av beskyttede og ubeskyttede flater av massivtre, og innredet med møbler. I løpet av brannen ble varmeavgivelseshastigheten registrert, som vil si varmeavgivelsen per tidsenhet (minutt). Forsøkene viste at ubeskyttede massivtreoverflater kun bidrar med omtrent 27 % av varmeavgivelseshastigheten de første ti minuttene av brannen. Møblene stod dermed for det største bidraget, men da disse etter 20 minutter brant opp begynte varmeavgivelseshastigheten fra overflatene å øke igjen. Ved brannens slutt viste det seg at massivtreet hadde bidratt med 63 % av energien som ble frigjort i brannen. Dette gjaldt både for beskyttet og ubeskyttet massivtre, men ved de ubeskyttede flatene kom varmeavgivelsen hurtigere. [57] [58]

Selv om beskyttelse kan forsinke varmeavgivelsen, vil den øvre temperaturen i brannen forbli den samme for både gipsdekkede og bare overflater. Allikevel gir de beskyttede overflatene en reduksjon i massivtreets sitt energibidrag i brannen. Totalt sett viser forsøkene at beskyttede overflater i massivtre reduserer varigheten av brannen, gir lavere bidrag til brannforløpet og reduserer intensiteten av brannen. Det er på grunnlag av dette valgt å legge gipsplater på etasjeskillere og vegger. [57] [58]

Forsøkene har også sett på evnen massivtre har på selvslukking. Det vil si at brannen dør ut før alt massivtreet er brent opp. Tre har som nevnt tidligere evnen til å forkulle og dermed hindre oksygentilførsel til frisk tre under forkullingslaget. Teorien bygger da



på at en branncelle med overflater i massivtre vil slukkes av seg selv etter hvert som interiør forbrennes og ulmefasen i treet er over. Det var imidlertid ingen klare bevis på at dette skjer i forsøkene. Noen tester beviste det motsatte: når interiøret er brent opp vil brannen øke i størrelse med bidrag fra treet. Andre resultater viste at rommet ville gå over i en avkjølingsfase av seg selv, men ikke slukne. [57] [58]

I et massivtreelement vil lamellene limes sammen, ikke bare på overflater i lengderetning, men også ved endene hvor trevirke festes sammen på tverrsnittene. Dette er valgt på grunnlag av Stora Ensos sine løsninger som velges i beregningsprogrammet Calculatis. I Calculatis kalles denne løsningen for *edge gluing*. Oppgaven velger også denne løsningen på grunnlag av Treteknisk sin håndbok om brann, da de mener løsningen gir lavest innbrenningshastighet. [54, s. 15] Bruken av lim gjør at fare for delaminering under brann inntreffer. Delaminering vil si at lamellene faller av etter hvert som innbrenningen i tverrsnittet brer seg. Faren med dette er at delamineringen fører til at varmeavgivelsen øker, i tillegg til temperaturen, noe som gir en såkalt andre overtenning. [57] Lamellen som da så ut til å redusere brannens intensitet forsvinner, og massivtreoverflaten blir på ny en del av brannen. Faren for delaminering kan reduseres ved riktig valg av limtype. En undersøkelse ved Forest Products Laboratory i USA viste at lim av typen melamin-formaldehyd (MF) eller fenol-resorcinol-formaldehyd (PRF) reduserte inntreff av delaminering. [60] Ved bestilling av massivtreelementene kan dette stilles som et krav til produsenten.

#### 3.3.4 Lyd

Skillekonstruksjoner av massivtre vil grunnet lavere massetetthet være lettere å sette i svingninger sammenlignet med betong. [26] Det å øke tykkelsen på massivtreelementene vil ikke gi samme effekt og en må se på alternative løsninger.

Ved lette veggkonstruksjoner benyttes gjerne en dobbeltkonstruksjon for å øke luftlydisoleringen. En har da avstand mellom to elementer uten forbindelse, og benytter et lydabsorberende materiale i hulrommet. Avstanden gjør at

massivtreelementene vil svinge uavhengige av hverandre og i kombinasjon med et lydabsorberende materiale gir det gode lydegenskaper. [19] Mineralull er et lydabsorberende materiale som har stor overflate grunnet de mange og tynne trådene, noe som gjør at lyden absorberes godt. En kan øke tykkelsen på mineralullen avhengig av hvor gode isoleringsegenskaper som er ønskelig å oppnå. [20]

Ved dimensjonering av bærende vegger mellom boenhetene (langs byggets bredde) er det valgt en løsning fra Trefokus kalt *Lydvegg*. Lydveggen er en dobbeltkonstruksjon med mineralull. Kapittel 4.2.1.2 viser oppbygningen av veggen med de ulike sjiktene. Lydisoleringsegenskapene er framstilt i tabell 6 nedenfor. Selv om oppgaven kun fokuserer på bæresystemet, er det viktig å nevne at lettvegger mellom boenheter og fellesareal må være godt lydisolert.

Lydegenskaper for <i>Lydvegg</i>	
Laboratoriemålt lydreduksjonstall $R_w$	56 dB
Omgjøringstall $C_{50-5000}$	-1 dB
$R_w + C_{50-5000}$	55 dB $\geq$ 54 dB <b>OK</b>

Tabell 6 - Lydegenskaper for lydvegg

Ved etasjeskillerne vil det også være nødvendig å øke lydisoleringsevnen. Trinnlyd er en utfordring ved lette byggematerialer. For etasjeskillerne er det gått ut fra en løsning til Trefokus kalt *Lydgulv*. Det er et dekke som blant annet inneholder et sjikt av puk som vil bidra til å øke tyngden og slik øke lydisoleringen. Lydisoleringsegenskapene til etasjeskillerne er vist i tabell 7.

Lydegenskaper for <i>Lydgulv</i>			
Laboratoriemålt lydreduksjonstall $R_w$	63 dB	Laboratoriemålt trinnlydnivå $L_{n,w}$	44 dB
Omgjøringstall $C_{50-5000}$	0 dB	Omgjøringstall $C_{i, 50-5000}$	6 dB
$R_w + C_{50-5000}$	63 dB $\geq$ 54 dB <b>OK</b>	$L_{n,w} + C_{i, 50-5000}$	50 dB $\leq$ 54 dB <b>OK</b>

Tabell 7 - Lydegenskaper for lydgulv

Lydegenskapene til begge skillekonstruksjonene er målt i laboratorium. Det vil si at i tabellene er de laboratoriummålte verdiene sammenlignet med kravet til feltmålt verdi i NS 8751. For å kunne fastlegge at bygget tilfredsstiller lydklasse C må en gjøre målinger når bygget er ferdigstilt. Da får en med virkningen av flanketransmisjon, som vil gi den feltmålte luftlydisolasjonen og trinnlydnivået som standarden setter krav til. Ved etasjeskillere i massivtre opplyser SINTEF Byggforsk at man kan forvente flanketransmisjon som gir 3-6 dB dårligere luftlydisolasjon i forhold til de laboratoriemålte. [61] Ved trinnlydisolasjon er det derimot ikke nødvendig å legge til noen sikkerhetsmargin. Dette er fordi verdier målt i laboratorium ofte er mer ugunstig, grunnet liten eller ingen energiavledning. [62]

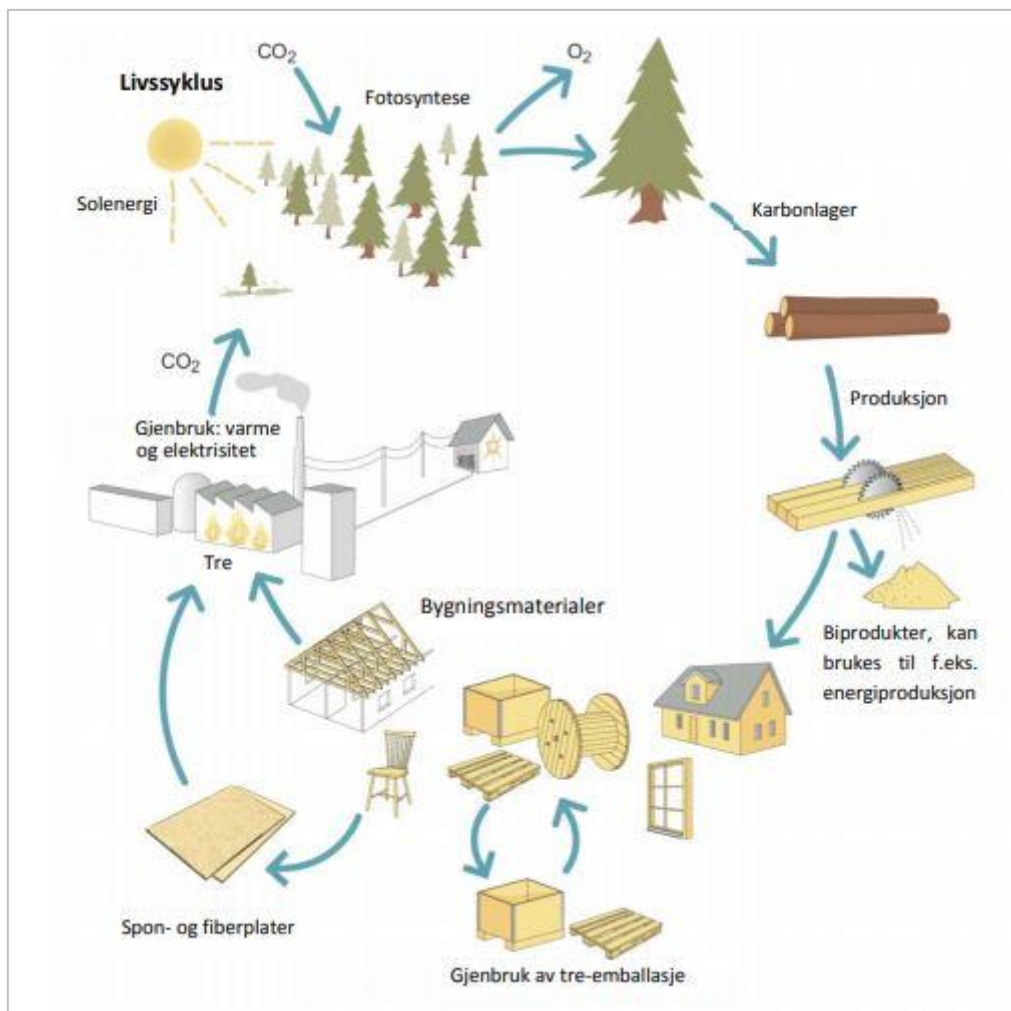
Etasjeskilleren har relativt god sikkerhetsmargin både knyttet til luftlyd og trinnlyd. *Lydgulvet* består av 180 mm massivtre, men som en kommer tilbake til i kapittel 5.7 var det nødvendig å øke tykkelsen. Etasjeskilleren vil dermed ha en noe høyere lydisoleringsevne enn verdier vist i tabell 7. Kravet til lydreduksjonstallet til *Lydveggen* er på grensen. Løsningen forutsetter dermed at flanketransmisjonen er liten. En kan likevel argumentere med at det er tatt hensyn til omgjøringstall for spektrum selv om det ikke er et krav i lydklasse C. Det kan veie opp for tillegget som flanketransmisjon vil kunne gi. Samtidig må en forsikre seg om at det tas tilstrekkelig hensyn til flanketransmisjonen ved utforming av knutepunkter. Et eksempel på et knutepunkt er vist i kapittel 5.9.

### 3.3.5 Miljøbelastning

#### 3.3.5.1 Utnyttelse av råvarer

Ved produksjon av trevirke blir hele treet utnyttet. I sagbruk blir trestammene brukt til produksjon av blant annet konstruksjonstrevirke. Delene av stammen som ikke blir brukt til dette, som bark og sagflis, blir brukt i produksjonen av plater eller andre produkter av papir. Bark brukes også til jordforbedringsprodukter og hageprodukter. [51] Kvister, greiner og tretopper kappes av etter hogsten og brukes også til plate- og

papirproduksjon. [63] På denne måten blir tre som en råvare fullt utnyttet. Se figur 3-6 under for illustrasjon av livsløpet til tre og hvordan råvaren blir utnyttet.



Figur 3-6 Utnyttelsen av tre [64, s.5]

Trelastproduksjonen er avhengig av systematisk og gjennomtenkt skogbruk, hvis ikke kan ressursene bli oppbrukt. I Norge er det sørget for at skogene vokser mer sammenliknet med areal skog som hugges. [63] Mangel på råvarer er dermed ikke et reelt problem.

### 3.3.5.2 Utslipp av CO<sub>2</sub>

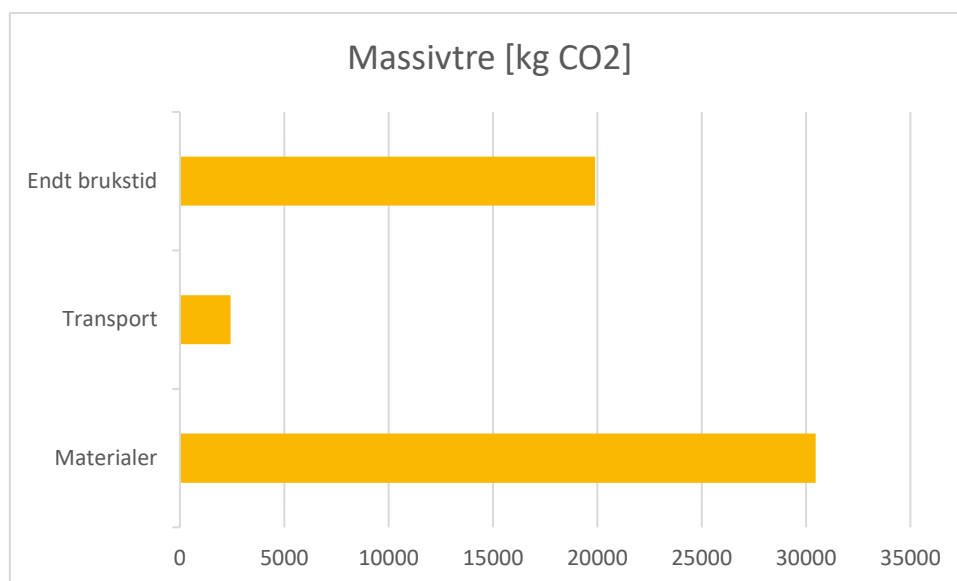
Trelast- og trevareindustrien i Norge hadde i 2018 et totalt utslipp på 47 tusen tonn CO<sub>2</sub> ifølge Statistisk Sentralbyrå. [65] Deler av dette utslippet kommer fra 2,3 millioner

kubikkmeter laminert tre, se vedlegg C1 som baserer seg på tall hentet fra Statistisk Sentralbyrå. [66] Ved å velge kortreiste massivtreelementer vil utslipp fra transport av varer være lavere. Norge driver selv med skogbruk og mesteparten av det som importeres kommer fra Sverige. [51] Ved å velge norske produsenter som bruker lokale råvarer, kan en anse massivtre som et kortreist materiale. Slik begrenses utslippene knyttet til frakt av trelast.

Tre har som alle andre planter egenskapen til å ta opp CO<sub>2</sub> og lagre det som karbon. Dette karbonet frigjøres som CO<sub>2</sub> ved nedbrytning. Ved å fullt utnytte råvaren blir denne frigjøringen utsatt. Når karbonet etter hvert frigjøres, vil det igjen bli tatt opp av trær som har erstattet de oppbrukte. Slik holdes CO<sub>2</sub>-utslippene i en syklus som ikke påvirker atmosfæren. Denne egenskapen gjør tre til byggematerialet med lavest utslipp av CO<sub>2</sub>. [67] Se igjen på figur 3-6 for illustrasjon av løpet til CO<sub>2</sub> som er bundet til trærne.

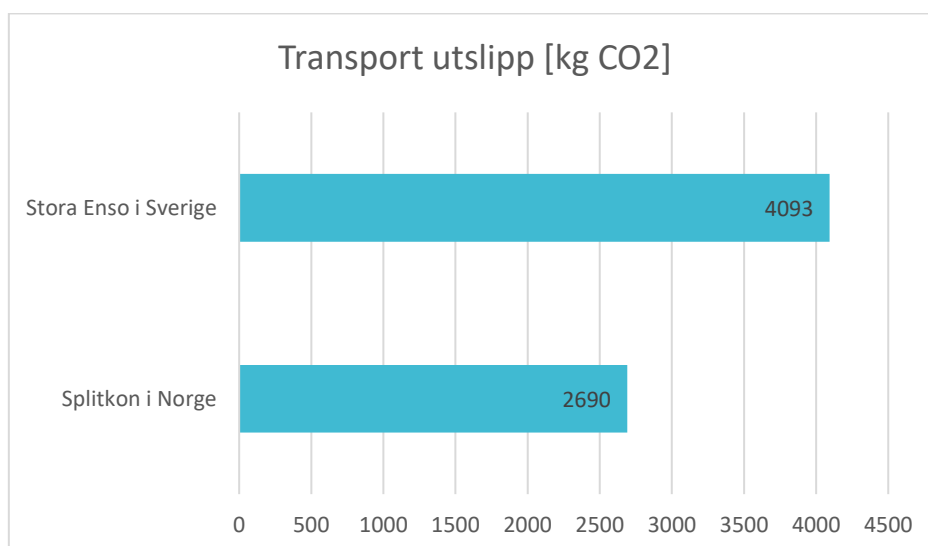
En bakside ved å velge limt massivtre og limtre, er energibehovet lim har under produksjon. Limet har en stor påvirkning på produktets totale energibruk og miljøpåvirkning. [68, s.29] Energibehovet blir tatt i betraktning, men det beregnes ikke noe CO<sub>2</sub>-utslipp knyttet til dette.

Slik som ved bæresystemet i stål og betong gjennomføres det også her en livssyklusanalyse av bæresystemet i massive treelementer ved å bruke One Click LCA. Resultater av dette er i vedlegg B2. Figur 3-7 viser utslippet av CO<sub>2</sub> i kilogram for bæresystemet i massivtre og limtre. Verdiene for mengden massivtre som ble lagt inn i One Click LCA er hentet fra Revit-modellen av bæresystemet i massivtre, se vedlegg C2.



Figur 3-7 Livssyklusberegning for massivtre

Store deler av CO<sub>2</sub>-utslippet i tre er bundet opp i materialet, og frigjøres ved nedbrytning ved endt brukstid. Dette forklarer den store verdien for endt brukstid i diagrammet. Slik som figur 3-8 viser er det omtrent 1,4 tonn mer CO<sub>2</sub> ved å transportere de massive treelementene fra Stora Enso i Sverige, sammenliknet med transport fra den norske produsenten Splitkon i Viken fylke.



Figur 3-8 CO<sub>2</sub>-utslipp for transport

### 3.3.5.3 Gjenbrukbarhet

Dersom trevirket er ubehandlet kan det brukes til produksjon av plater og papir.

Massivtre og limtre kan ikke brukes til dette siden det inneholder lim. Behandlet trevirke som disse blir derfor sendt til energigjenvinning, og produserer varme som gir bidrag til industrielt brensel, fjernvarme eller elkraft. [63]

Massivtre og limtre er egnet til gjenbruk, men dette avhenger av flere faktorer i likhet med betongelementer. Elementene må demonteres forsiktig, må ikke være av for store dimensjoner eller for mange sjikt. Massivtre kan gjenbrukes som det er, men ved reduksjon av tykkelse må de nye bæreegenskapene dokumenteres. Ved limtre blir fasthetsegenskapene redusert når en reduserer høyden i tverrsnittet. Generelt bestemmes det at limtre skal gjenbrukes i en lavere kvalitetsklasse enn det elementet opprinnelig hadde. [27]

## 4 Lastberegninger

Innledningsvis vil dette kapittelet ta for seg generell teori om lastkombinasjoner og lastfaktorer med de ulike grensetilstandene: bruddgrense og bruksgrense. Deretter vil lastene på konstruksjonen bli presentert med beregninger. Her er lastene inndelt avhengig av hvordan de varierer over tid. Det er dermed valgt å dele dem inn som permanente laster, variable laster og ulykkeslaster.

### 4.1 Lastkombinasjoner og lastfaktorer

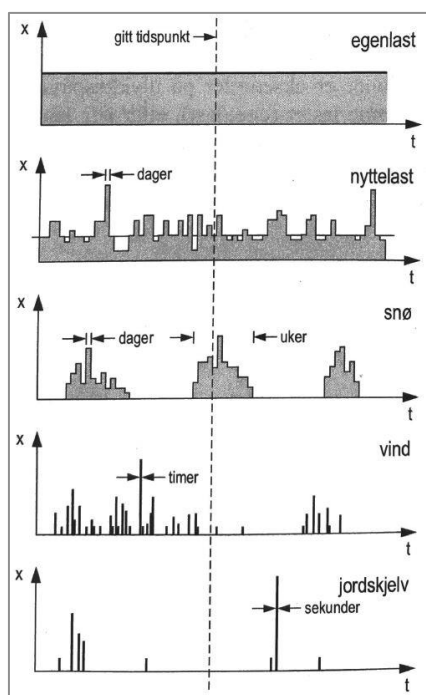
Ved dimensjonering av konstruksjoner er formålet å påvise at lastvirkningene ikke overskrider kapasiteten i ulike grensetilstander, omtalt i punkt 4.1.1 og 4.1.2. En metode for å gjøre dette er kalt partialkoeffisientmetoden. Metoden benytter faktorer, også kalt partialkoeffisienter, for å kompensere mot usikkerheter forbundet med lastvirkning og motstand. Dette gjøres ved lastfaktorer og materialfaktorer.

Lastfaktoren  $\gamma_f$  blir benyttet for å ta hensyn til unøyaktige lastmodeller, usikkerhet i beregninger av lastvirkning og ugunstige lastavvik. Samtidig kompenserer materialfaktoren  $\gamma_m$  for geometriske avvik, usikkerhet i beregningsmodellene og avvik

fra karakteristiske materialverdier. Ut fra dette beregnes de dimensjonerende lastene og kapasitetene. [29, s.26] [69]

Materialfaktorens størrelse er avhengig av materialet. Eksempelvis har tre en høyere materialfaktor da det er et naturmateriale med mer usikkerhet sammenliknet med materialer som stål. [29, s.26] Mangler eller forhold som ikke er i dimensjoneringsantakelsene blir derimot ikke tatt hensyn til ved å benytte partialkoeffisientene. [69]

I boken *Konstruksjonsteknikk – Laster og bæresystem* beskriver Per Kr. Larsen en dimensjonerende situasjon og et lasttilfelle som følgende: «En dimensjonerende situasjon beskriver fysiske forhold (laster m.m.) som er til stede i det tidsintervall der det skal påvises at grensetilstandenes kriterier ikke overskrides. Et lasttilfelle består av samtidig opptredende verdier av laster og lastplassering, forskyvninger og geometriske avvik i konstruksjonen, og som skal betraktes ved kontrollen i grensetilstandene.» [29, s.34]



Figur 4-1 Variasjon av laster over tid [70]



Eurokode 0 sier i punkt 6.4.3.1(1)P at «for hvert kritiske lasttilfelle skal de dimensjonerende verdiene for lastvirkningene bestemmes ved å kombinere verdiene for de lastene som forventes å opptre samtidig». [9] Sannsynligheten for at enhver last vil opptre samtidig er svært liten, noe som er framstilt på figur 4-1. For å nyansere for dette benytter standarden den representative verdien som et produkt av den karakteristiske verdien og en kombinasjonsfaktor  $\Psi$ . [29, s.35]

#### 4.1.1 Bruddgrensetilstand (ULS)

I Eurokode 0 beskrives bruddgrensetilstand som alle grensetilstander som har betydning for konstruksjonens og menneskers sikkerhet. Det vil si sammenbrudd eller tilsvarende former for svikt i konstruksjonen. I bruddgrensetilstand beregnes større laster som har liten sannsynlighet for å opptre i løpet av levetiden til konstruksjonen. Det er fire situasjoner som skal påvises:

- Global likevekt av konstruksjonen (EQU)
- Brudd i konstruksjonen eller konstruksjonselementer (STR)
- Brudd i grunnen (GEO)
- Brudd på grunn av utmatting [9] [29, s.25 og 35-36]

Et spesialtilfelle av bruddgrensetilstand er ulykkestilstand. Det inkluderer ulike lastsituasjoner som har liten sannsynlighet for å inntreffe. Dette er tilstander som blant annet jordskjelv, kollisjoner, eksplosjoner og brann. [29, s. 25 og 35] Etter hvor relevante de er kombineres ulykkeslaster med andre laster. En ser derimot ofte bort fra at flere ulykkeslaster opptrer samtidig. [71]

#### 4.1.2 Bruksgrensetilstand (SLS)

I henhold til *Eurokode 0: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner* har bruksgrensetilstand betydning for menneskers komfort, konstruksjonens utseende og funksjonsdyktigheten ved normal bruk. Det kan for eksempel være vibrasjoner som medfører et ubehag for brukerne eller nedbøyning som hindrer en funksjon. I

bruksgrensetilstand er lasten mindre i forhold til bruddgrensetilstand, men de opptrer gjerne ved vanlig bruk. [9] [29, s. 26]

## 4.2 Permanente laster

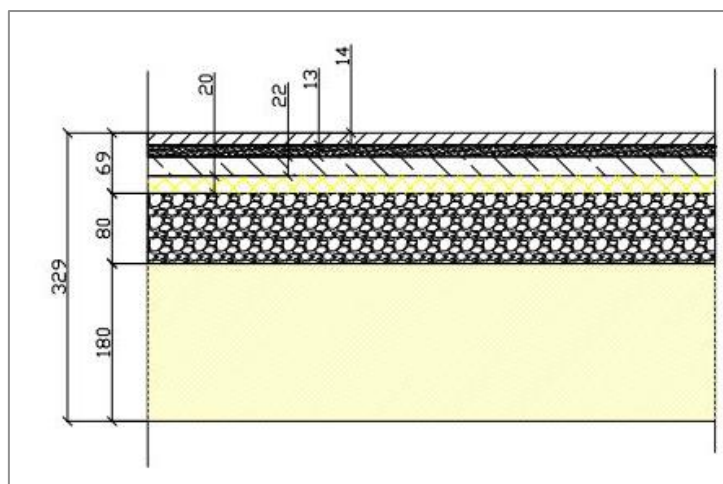
De permanente lastene på bygget er egenvekten og jordtrykket på parkeringskjelleren. Da parkeringskjelleren allerede er dimensjonert vil det ikke bli gjort beregninger, men jordtrykket vil likevel bli presentert som en del av lastene.

### 4.2.1 Egenvekt

Ved bestemmelse av egenvekt er det benyttet materialverdier fra SINTEF Byggforsk sin anvisning nummer 471.031 *Egenlaster for bygningsmaterialer, byggevarer og bygningsdeler*. Sjiktenes oppbygging er hentet fra tegninger på Norsk Treteknisk Institutt sine nettsider. Ved kombinasjon av denne informasjonen er det satt opp tabeller med bæreelementenes egenvekt. Oppbygningene er valgt på grunnlag av isolering og lyddemping. Videre blir hvert bæreelement presentert med tilhørende data og sjiktoppbygging. I tillegg til egenvekt fra etasjeskiller, vegger og tak vil det være en linjelast fra fasade på 1 kN/m.

#### 4.2.1.1 Etasjeskiller

Oppbygning av etasjeskillerne er vist på figur 4-2, og tilhørende data for egenvekt er gitt i tabell 8. Etasjeskilleren er av kategorien lydgulv nummer 263 fra Norsk Treteknisk Institutt. Den er bygd opp av massivtre, pukk, lydisolerende plater, gips og parkett. [72]



Figur 4-2 Sjikt til etasjeskiller [72]

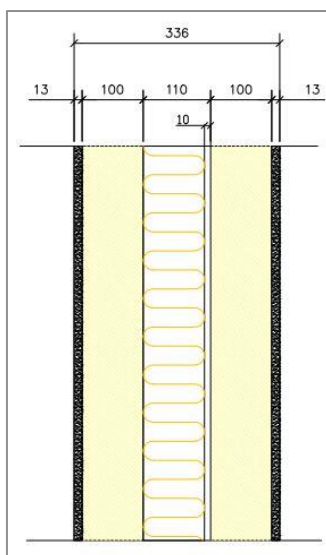
Egenvekt massivtre etasjeskiller			
Materialer	Tykkelse på sjikt	Tyngdetetthet (kN/m <sup>3</sup> )	Egenvekt (kN/m <sup>2</sup> )
Massivtre	240 mm	-	1,2
Pukk	80 mm	12,75	1,02
Glassull, trinnlydsplate	20 mm	1,20	0,024
Sponplate	22 mm	7,00	0,154
Gulvgips	13 mm	9,00	0,117
Parkett	14 mm	-	0,08
		<b>Totalt</b>	<b>2,595</b>

Tabell 8 - Egenvekt til etasjeskiller [73]

Det ble nødvendig å øke tykkelsen på massivtreelementet i forhold til *Lydgulvet* for å overholde krav til vibrasjon, noe som belyses i kapittel 5.7.

#### 4.2.1.2 Vegger

Til bærende vegger er det valgt lydisolerende vegger bestående av gips, massivtreelementer og mineralull. Figur 4-3 viser oppbyggingen til veggene som blir brukt i bygg C, og tabell 9 gir egenvekten. Veggene er av typen lydvegg nummer 243 fra Norsk Treteknisk Institutt. [74]



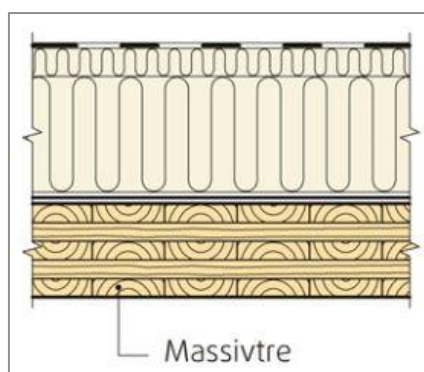
Figur 4-3 Sjikt til vegg [74]

Egenvekt massivtre lydvegg			
Materialer	Tykkelse på sjikt	Tyngdetetthet (kN/m <sup>3</sup> )	Egenvekt (kN/m <sup>2</sup> )
Massivtre	2x100 mm	-	1,000
Mineralull	100 mm	0,30	0,030
Gips	2x13 mm	9,00	0,117
		<b>Totalt</b>	<b>1,147</b>

Tabell 9 - Egenvekt lydvegg i massivtre [73]

#### 4.2.1.3 Tak

Taket er bygd opp av massivtre, isolasjon og et asfaltbelegg, se figur 4-4. Den beregnede egenvekten er gitt i tabell 10. Figuren og de tilhørende sjiktene er hentet fra SINTEF Byggforsk. [73]



Figur 4-4 Sjikt til tak [73]

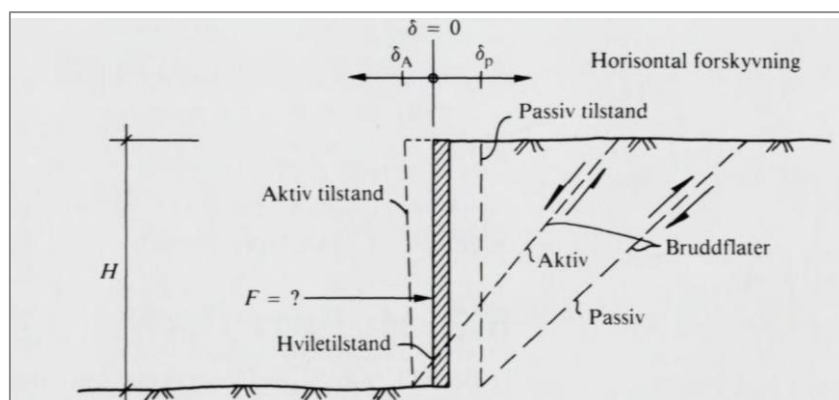
Egenvekt massivtre tak			
Materialer	Tykkelse på sjikt	Tyngdetetthet (kN/m <sup>3</sup> )	Egenvekt (kN/m <sup>2</sup> )
Massivtre	180 mm	-	0,9
Mineralull	250 mm	0,3	0,075
Asfalttakbelegg	3,7 mm	-	0,050
		<b>Totalt</b>	<b>1,025</b>

Tabell 10 - Egenvekt til takelement i massivtre [73]

#### 4.2.2 Jordtrykk på parkeringskjeller

Jordtrykk er en geoteknisk last som påføres alle konstruksjoner som befinner seg i eller under bakkenivå. Her vil det ikke beregnes noen jordtrykkslaster, da parkeringskjelleren under bakkenivå ikke skal dimensjoneres. Dette kapittelet tar derfor kun for seg teorien bak jordtrykk og hvordan en går frem for å beregne de geotekniske lastene.

Lastene beregnes etter *Eurokode 7 – Geoteknisk prosjektering*. [75] Jordtrykk består av normalspenninger  $\sigma_x$  og skjærspenninger  $\tau_v$  som her vil virke i kontaktflaten mellom veggene i parkeringskjelleren og jorda rundt. Ved beregninger av jordtrykk skilles det mellom tre grenseverdier; hviletrykk, aktivt jordtrykk og passivt jordtrykk ut fra hvordan konstruksjonen beveger seg i forhold til jorden. [76]



Figur 4-5 Hviletrykk, aktivt jordtrykk og passivt jordtrykk

Ved hviletrykk er det ingen forskyvninger da veggen blir hindret i å bevege seg horisontalt. Ved aktivt jordtrykk vil jorda ekspandere og veggen vil bevege seg bort fra jorda. Jordtrykket vil reduseres helt til jorda går til brudd, og den nedre grensen kalles aktivt jordtrykk. Passivt jordtrykk oppstår når veggen presser mot jorda og det forekommer brudd langs den passive flaten, se figur 4-5. [76]

NODE opplyser at parkeringskjelleren ligger under bakkenivå hvor det er fylt igjen med sprengstein. Ved undersøkelser gjort i prosjektet er det kommet frem til at grunnvannstanden ligger under fundamentnivå. I tillegg skal det legges inn drensledning rundt hele bygget som skal sørge for at det ikke kan samle seg overvann i byggegropen. Se igjen vedlegg D for samtalen.

### 4.3 Variable laster

Variable laster er laster som er avhengige av faktorer knyttet til tid, og setter ikke konstruksjonen under en konstant, permanent belastning. De variable lastene på bygg C er snø-, vind- og nyttelast, som vil bli presentert og beregnet i dette kapittelet.

#### 4.3.1 Snølast

Snølasten på taket og takterrassen beregnes etter *Eurokode 1 Del 1-3: Snølaster* [77]. Beregninger av snølast finnes i vedlegg E1. Snølaster beregnes ved å først finne karakteristisk snølast og deretter formfaktorene.

Den karakteristiske snølasten på mark  $S_k$  er lik grunnverdien  $S_{k,0}$ . Dette kommer av at høyden over havet  $H$  er mindre enn høydegrensen  $H_g$ .  $S_k$  kan dermed hentes fra tabell, med en verdi lik  $2,0 \text{ kN/m}^2$ . Ved beregning av snølast må en ta hensyn til flere koeffisienter. Eksponeringskoeffisienten  $C_e$  bestemmes etter hvordan topografien påvirker måten snøen legger seg på et bygg. Bygg C konkluderes til å være i en normal topografisone med  $C_e$  lik  $1,0$ . Ettersom taket består av materialer med normale varmeisoleringsegenskaper settes den termiske koeffisienten  $C_t$  lik  $1,0$ .

Formfaktorer varierer ut fra takets form og omgivelser rundt. Formfaktoren  $\mu_1$  for flatt tak er lik 0,8. Videre må det vurderes om det er nødvendig med en formfaktor som skyldes ras fra andre høyereliggende byggverk. Bygg C er ikke utsatt for slike ras, og en kan se bort fra formfaktoren  $\mu_s$ .

Formfaktorer som er knyttet til snødrivere må også vurderes. På taket er det et parapet med høyde på 0,38 m, se figur 4-6. Dette kan resultere i snøopphopning, noe som kommer av at vind skyver på snøen og gir punkter på taket hvor snølasten er større enn ellers. En kommer frem til at parapetet er for lavt til å ha noen innvirkning på snølasten. Det er også en teknisk installasjon på taket som kunne vært en potensiell snødriver. På samme måte som parapetet vil ikke den ha noen påvirkning på snølasten.

Som et produkt av karakteristisk snølast og formfaktor for flatt tak, blir snølasten  $S_1$  lik 1,6 kN/m<sup>2</sup>.  $S_1$  er jevnt fordelt over hele taket og takterrassen.



Figur 4-6 Tak med parapet og takterrasse, modell fra arkitektens IFC-fil [4]

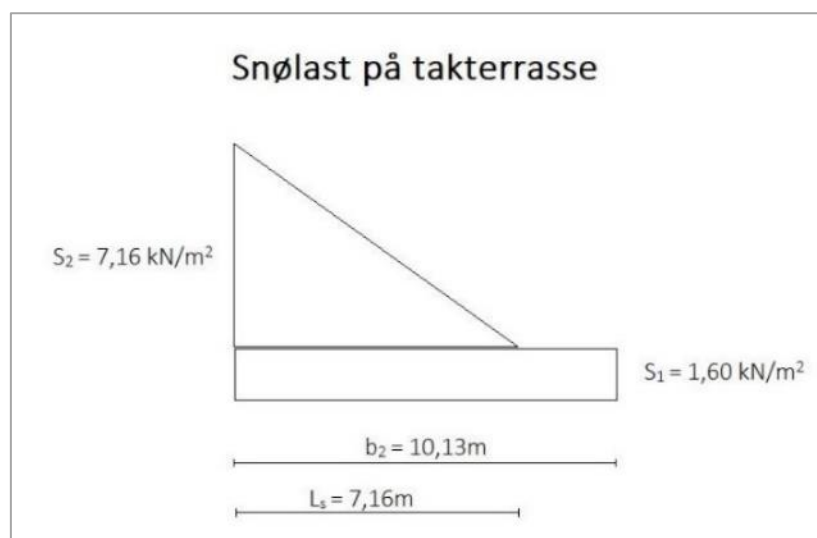
I fjerde etasje er det en takterrasse som grenser til leilighetene i samme etasje, se figur 4-6. Her er det altså et høyereliggende byggverk og en må ta hensyn til ras og fonning av snø som et tillegg til den jevnt fordelte lasten  $S_1$ . Ettersom det høyereliggende taket

er flatt vil formfaktoren grunnet ras  $\mu_s$  være lik null. En må derimot ta hensyn til fonning av snø ved å benytte formfaktor  $\mu_w$  som skyldes vind. Fonningen er avhengig av terrassens lengde, takets lengde og høydeforskjell fra takterrasse til tak. Til sikker side velges de lengste lengdemålene på terrassen og taket. Formel 1 gir formfaktoren til trekantlasten på terrassen.

$$\mu_w = \frac{(b_1 + b_2)}{2h} \leq \frac{\gamma h}{S_k}$$

Formel 1 - Formfaktor på grunn av fonning

Formfaktoren  $\mu_w$  beregnes til å være lik 3,58. Største snølast  $S_2$  inntil veggen blir 7,16 kN/m<sup>2</sup>.  $S_2$  består altså av den jevnt fordelte lasten  $S_1$  i tillegg til lasten knyttet til fonning.  $S_2$  strekker seg 7,16 m ut fra veggen og er en trekantlast, se figur 4-7.



Figur 4-7 Trekantlast som følge av fonning mot høyere liggende byggverk

Videre forenkles beregningene ved å finne en middelvei av trekantlasten og fordele den jevnt over hele takterrassen. Middelveiden legges så til den ordinære snølasten  $S_1$



og gir en total, jevnt fordelt snølast på takterrassen  $S_{\text{total}}$ , på 3,57 kN/m<sup>2</sup>. Resultatene for dette kapittelet er gitt i tabell 11.

Karakteristisk snølast		
Snølast	Beliggenhet	Karakteristisk verdi [kN/m <sup>2</sup> ]
$S_1$	Tak	1,6
$S_{\text{total}}$	Takterrasse	3,57

Tabell 11 - Karakteristisk snølast

#### 4.3.2 Vindlast

Ved beregning av vindlast vil en først ta for seg beregninger av vindkasthastighetstrykket på byggestedet, før en finner de resulterende kreftene på konstruksjonen ut fra formfaktorer. Karakteristisk vindlast er da vindkasthastighetstrykket med overgangssonefaktor multiplisert med formfaktorer. Alle beregninger tilknyttet vindlaster er gjort etter *Eurokode 1 Del 1-4: Vindlaster* og beregningene finnes i vedlegg E2. I dette kapittelet blir beregningen av vindlasten gjennomgått. [78]

##### 4.3.2.1 Karakteristisk vindlast

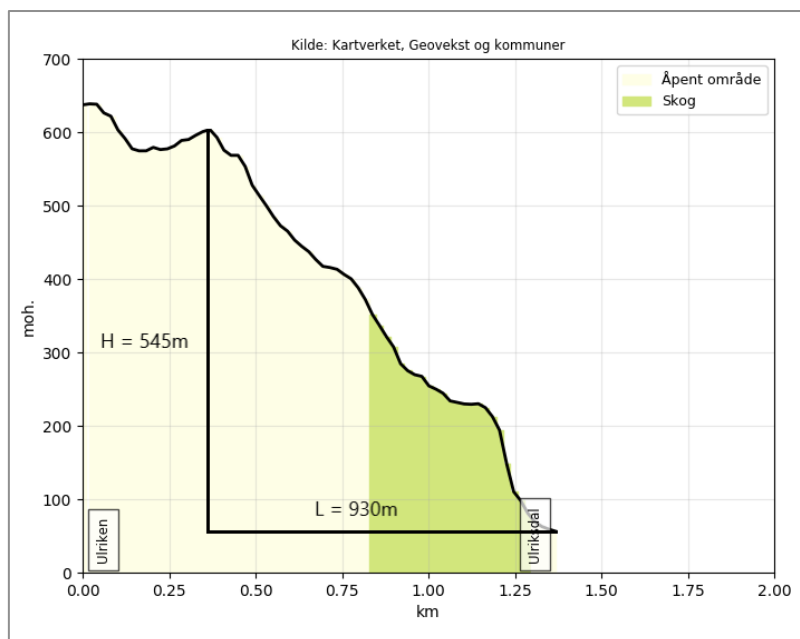
Ettersom bygget befinner seg på Kronstad i Bergen er det nødvendig å undersøke om fjelltoppene Løvstakken og Ulriken har en innvirkning på vindlasten. Se figur 4-8 for deres beliggenhet i forhold til byggestedet.



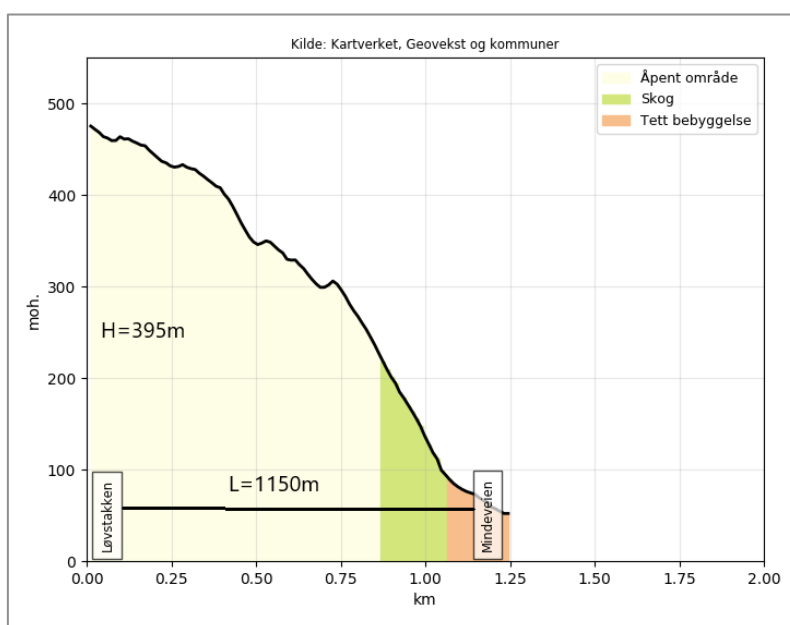
Figur 4-8 Kart over Ulriken og Løvstakken [79]

Etter punkt NA.4.3.3(901.4) vil et bratt terreng med fall større enn 30 grader i vindretning kunne gi en sterk turbulens. Dette fører til en økning i turbulensfaktoren  $k_t$ . Samtidig reduseres middelvindhastigheten, noe som det tas hensyn til ved å redusere terrengformfaktoren  $c_o$  i beregninger av stedsvindhastigheten  $v_m(z)$ . Punkt NA.4.3.3(901.4) medfører også at terrengruhetskategori II skal benyttes, uavhengig om det i utgangspunktet er gitt en annen terrengruhetskategori.

Ved å benytte Norgeskart sine nettsider kan en lage høydeprofiler for å beregne helningsvinklene til fjellene, noe som er vist på figur 4-9 og 4-10. [80] Ulriken ga en helningsvinkel på 30,4 grader, mens Løvstakken ga en helningsvinkel på 19 grader.



Figur 4-9 Høydeprofil Ulriken [80]



Figur 4-10 Høydeprofil Løvstakken [80]

Ettersom helningsvinkelen til Ulriken er større enn 30 grader må en nå se nærmere på om byggestedet ligger innenfor den påvirkede sonen. Dette gjøres ved å benytte figur NA.4(901.5) når hellingsvinkelen er mellom 30 og 40 grader. Avstanden fra losiden på byggestedet til det bratte terrenget på Ulriken er mindre enn  $8H$ , hvor  $H$  er

høydeforskjellen vist på figur 4-9. Det vil si at vindlasten blir påvirket av Ulriken og en må ta hensyn til det i videre beregninger.

Ved å benytte terrengruhetskategori II som følge av påvirkningen fra Ulriken gav det en ruhetsfaktor  $c_r$  lik 1,05. Ruhetsfaktoren angir hvordan stedsvindhastigheten varierer som følge av høyde over terreng og hvordan terrenget på byggestedet er.

Videre ble basisvindhastigheten  $v_b$  beregnet. Som formel 2 viser er denne avhengig av: retningsfaktor  $c_{dir}$ , årstidsfaktor  $c_{season}$ , nivåfaktoren  $c_{alt}$ , faktor avhengig av returperiode  $c_{prob}$  og referansevindhastigheten  $v_{b,0}$ . Retningsfaktoren og årstidsfaktoren ble begge konservativt valgt til 1,0, noe som er gjeldene for alle vindretninger. Byggestedet er 24 m over havet, noe som ikke gir en økning av nivåfaktoren. Returperioden er 50 år, dette fører til at  $c_{prob}$  er lik 1,0. Når alle faktorene er satt lik 1,0 blir basisvindhastigheten  $v_b$  lik referansevindhastigheten  $v_{b,0}$  på 26 m/s.

$$v_b = c_{dir} \times c_{season} \times c_{alt} \times c_{prob} \times v_{b,0}$$

Formel 2 - Basisvindhastighet

Stedsvindhastigheten  $v_m$  er avhengig av terrengruheten, terrengformen og basisvindhastigheten. Videre er stedsvindhastighetstrykket  $q_m$  avhengig av stedsvindhastigheten  $v_m$  og lufttettheten  $p$ . Beregninger gir et stedsvindhastighetstrykk lik 0,38 kN/m<sup>2</sup>.

Deretter bestemmes turbulensintensiteten  $I_v$  som er avhengig av terrenget rundt bygget og terrengets påvirkning på turbulens. Bygget befinner seg verken på toppen av en ås eller i en skråning, men ettersom helningsvinkelen til Ulriken er større enn 30 grader settes turbulensfaktoren  $k_l$  lik 1,75 og terrengformfaktoren  $c_o$  lik 0,9. Formel 3 gir en turbulensintensitet på 0,35. Vindkasthastighetstrykket  $q_p$  blir så beregnet til 1,31 kN/m<sup>2</sup>.

$$I_v(z) = \frac{K_I}{C_0(z) * \ln \frac{z}{z_0}}$$

Formel 3 – Turbulensintensitet

Ved betydelig ruhetsvariasjon skal det tas hensyn til dette med en overgangssonefaktor  $k_3$ . Nærmeste terreng hvor det er endring i ruhet fra byggestedet vil her være Nordnes som ligger 3,9 km unna byggestedet, med terrengruhetskategori I. Dette kan en se på figur 4-11. Ved interpolering finner en at  $k_3$  er lik 1,02. Karakteristisk vindlast  $q_{kast}$  er et produkt av vindkasthastighetstrykket og overgangssonefaktoren, og er lik  $1,34 \text{ kN/m}^2$ .



Figur 4-11 Kart med avstand til Nordnes [81]

#### 4.3.2.2 Formfaktorer

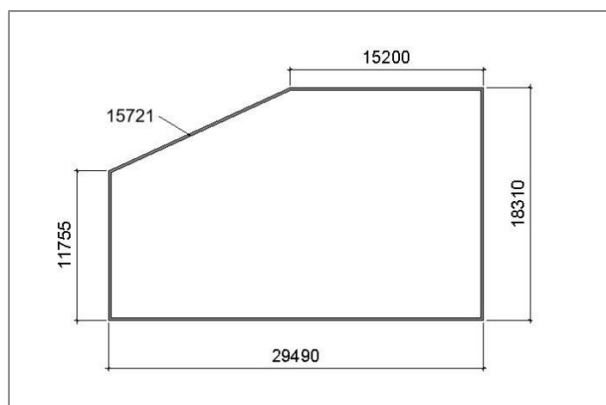
Formfaktorer angir hvilken virkning vinden har på ulike flater av bygningen. De deles inn i innvendige formfaktorer  $c_{pi}$ , som gir virkningen på innvendige flater og utvendige formfaktorer  $c_{pe}$ , som gir virkningen på utvendige flater. De utvendige formfaktorene er igjen delt inn i generelle  $c_{pe,10}$  og lokale  $c_{pe,1}$ , hvor de generelle normalt blir brukt til bærekonstruksjoner. De lokale gjelder ved dimensjonering av små konstruksjonsdeler

med areal på  $1 \text{ m}^2$  eller mindre. Det er altså de generelle som vil bli benyttet her jf. merknad 1 kapittel 7.2.1 i *Eurokode 1*.



Figur 4-12 Taket til bygg C [7]

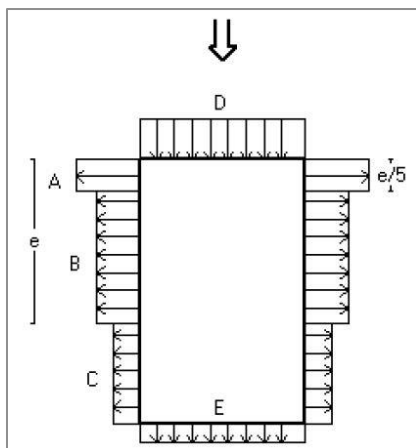
Beregningene forenkles ved å se på konservative løsninger. Dette innebærer blant annet at dimensjonene til bygget økes ved å benytte målene til ytterkant av balkongene både på bredden og lengden av bygget. Det er også valgt å se på bygget som rektangulært slik at tabell 7.1 i *Eurokode 1* for formfaktorer kan benyttes, selv med en skråvegg på nordsiden. Fjerde etasje består av en takterrasse og to leiligheter, som fører til at utvendige mål og vindlastens egentlige fordeling på bygget endrer seg her i forhold til etasjene under. Dette er vist på figur 4-12. Konservativt settes målene lik for alle etasjene. Figur 4-13 viser en forenklet figur av bygget hvor alle mål er basert på de konservative betraktningene nevnt over.



Figur 4-13 Forenklede mål brukt i beregninger

Ved bruk av programmet *Lastberegninger* levert av Sletten Byggdata får en beregnet vindlasten ved å fylle inn informasjonen nevnt over. Resultater fra *Lastberegninger* finnes i vedlegg E2.2. I programmet tegnes bygget som et rektangel. Programmet gir innvendige og utvendige vindlaster for vegger og tak. Formfaktorene for de ulike sonene rundt konstruksjonen er da tatt med. Håndberegninger vist i vedlegg E2.1 gir et annet resultatet sammenliknet med resultatet i *Lastberegninger*, men avviket er ikke av betydelig størrelse. Ulikhetene kan skyldes de konservative løsningene som er valgt til sikker side i håndberegningene, og en kan konkludere med at resultatene kan brukes videre i dimensjoneringen.

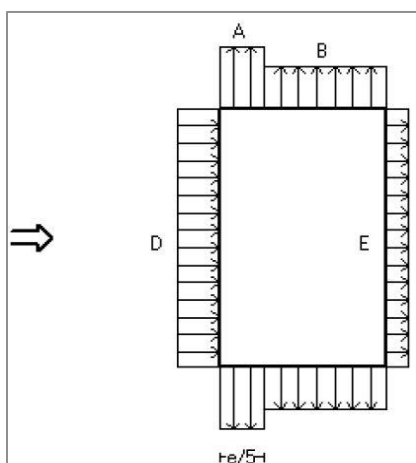
Figur 4-14 viser sonene på veggene når vindlasten kommer på kortsiden av bygget, mens figur 4-15 gjelder for langsiden. Tilhørende formfaktorer og vindlaster er gitt i tabell 12 og 13. I tillegg vil det kunne være et innvendig undertrykke eller overtrykk som tas med i beregningene. Undertrykket fører til at veggene suger seg innover, mens overtrykket gjør at veggene presses ut.



Figur 4-14 Soner på vegg med vind på kortside

Sone	Formfaktor $C_{pe10}$ $e = 18\,310\text{ mm}$	Vindlast [kN/m <sup>2</sup> ]
A	-1,20	-1,47
B	-0,80	-0,98
C	-0,50	-0,61
D	0,72	0,88
E	-0,35	-0,42

Tabell 12 – Vindlaster på vegg med vind på kortside



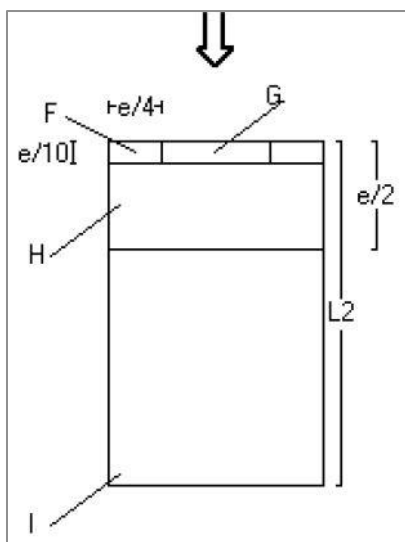
Figur 4-15 Soner på vegg med vind på langside

Sone	Formfaktor $C_{pe10}$ $e = 24\,844\text{ mm}$	Vindlast [kN/m <sup>2</sup> ]
A	-1,20	-1,47
B	-0,80	-0,98
C		
D	0,76	0,93
E	-0,41	-0,51

Tabell 13 - Vindlaster på vegg med vind på langside

Samme prinsipp gjelder for det flate taket, som ved veggene. Vindlastene og sonene er gitt i figurene 4-16 og 4-17, og deres tilhørende formfaktorer og vindlaster er gitt i de tilhørende tabellene 14 og 15. Som tabellene viser er vindlasten lik for sonene, men sonene har ulik plassering.

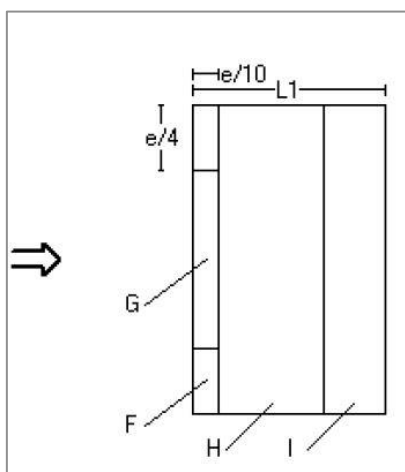




Figur 4-16 Soner på tak med vind på kortside

Sone	Formfaktor $C_{pe10}$ $e = 18\,310\text{ mm}$	Vindlast [kN/m <sup>2</sup> ]
F	-1,59	-1,95
G	-1,09	-1,34
H	-0,7	-0,86
I	+/- 0,2	+/- 0,24

Tabell 14 - Vindlaster på tak med vind på kortside



Figur 4-17 Soner på tak med vind på langside

Sone	Formfaktor $C_{pe10}$ $e = 24\,844\text{ mm}$	Vindlast [kN/m <sup>2</sup> ]
F	-1,59	-1,95
G	-1,09	-1,34
H	-0,7	-0,86
I	+/- 0,2	+/- 0,24

Tabell 15 - Vindlaster på tak med vind på langside

### 4.3.3 Nyttelast

I beregning av nyttelaster brukes *Eurokode 0* og *Eurokode 1 Del 1-1 Tetthet, egenvekt, nyttelaster i bygninger*. Etter det nasjonale tillegget i *Eurokode 1* tabell NA.6.1 vil Bygg C som boligbygg være i brukskategori A. Kategori A deles videre inn i ulike konstruksjonsdeler som alle har hver sin nyttelast etter tabell NA.6.2, se tabell 16. [82] Dimensjonerende verdi for nyttelasten i bruddgrensetilstand er nyttelasten multiplisert med lastfaktor fra *Eurokode 0*.

KATEGORI A	$q_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Gulv	2,0
Balkonger og verandaer (takterrasse)	4,0

Tabell 16 - Nyttelast for konstruksjonsdeler [82]

## 4.4 Ulykkeslaster

Ulykkeslaster er laster som oppstår grunnet ulykker, naturkatastrofer og andre unormale tilstander. [71] Her er det valgt å nevne påkjørings- og eksplosjonslast i tillegg til last som følge av jordskjelv.

### 4.4.1 Påkjøring- og eksplosjonslast

Bygget ligger skjermet fra trafikkert vei noe som gjør at ulykkeslast på grunn av påkjøring er valgt å se bort fra. Parkeringskjelleren som strekker seg fra bygg A, B og videre til C kan bli påført en påkjøringslast. Her vil det være høyst usannsynlig å kunne oppnå en fart som vil påføre store krefter på konstruksjonen.

Eksplosjonslast er en ulykkeslast som kan komme grunnet terror eller ulykke. Her er det konkludert med at leilighetsbygget ikke har en spesielt stor risiko for å bli utsatt for terror, og vil med liten sannsynlighet inneholde noe eksplosjonsfarlig.

### 4.4.2 Seismisk påvirkning

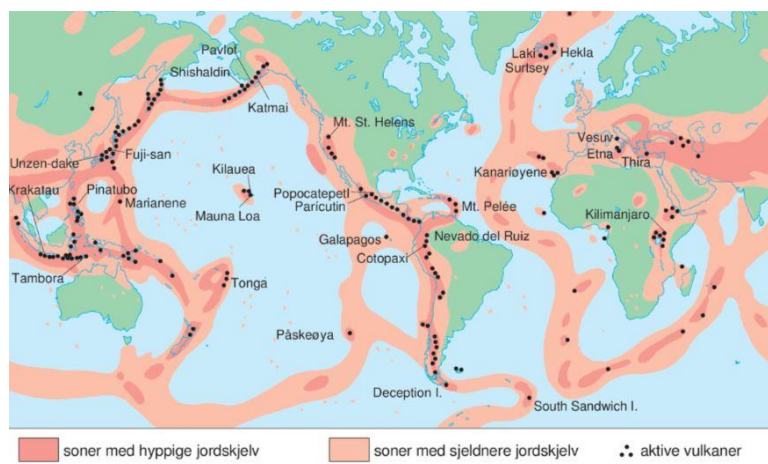
Med seismisk påvirkning menes det her vibrasjoner i grunnen i form av jordskjelv, og hvordan disse påvirker konstruksjonens stabilitet og styrke. Videre vil konseptet jordskjelv forklares og utelatelseskriteriene for seismisk påvirkning presenteres.

#### 4.4.2.1 Hva er jordskjelv?

Jordskjelv er et resultat av plutselige forskyvninger i jordskorpen, som er det ytterste laget i Jordens oppbygning. [83] Jordskorpen består av jordplater som er i stadig bevegelse. Mellom platene bygges det opp skjærspenninger, noe som kan føre til at

planetene forskyver seg og skaper rystelser. Rystelsenes intensitet varierer; de kan være umerkelige eller de kan oppleves som kraftige vibrasjoner i bakken. [84]

Norge er ikke spesielt utsatt for jordskjelv, men sammenliknet med andre nord-europeiske land forekommer det oftere i Norge. [85] Figur 4-18 viser en oversikt over hyppigheten av jordskjelv ulike steder i verden. Utfra dette settes det krav om hensyn som må tas til jordskjelv ved dimensjonering. I Norge er disse fastsatt gjennom *Eurokode 8 – Prosjektering av konstruksjoner for seismisk påvirkning*. Dette gjøres for å sikre menneskeliv og begrense skadeomfang på konstruksjoner. [86] Neste avsnitt tar for seg beregninger av seismisk påvirkning på bygget.



Figur 4-18 Kart med oversikt over hyppigheten av jordskjelv [84]

#### 4.4.2.2 Beregning av seismisk påvirkning

Ved seismisk beregning brukes *Eurokode 8* [86] og *Betongelementboka* [39].

Standarden inneholder utelatelseskriterier, hvor en gjennom disse kan unngå å måtte påvise tilstrekkelig kapasitet for jordskjelv. Dersom et av de fem utelatelseskriteriene er oppfylt, trenger en ikke å dimensjonere med hensyn til seismisk påvirkning. Det forutsetter at bygget er i et lavseismisk område, noe Norge er. [86] Kriteriene er fremstilt i tabell 17 hvor grønt betyr at kriteriet er oppfylt og rødt betyr at det ikke er oppfylt. Beregningene er vist i vedlegg E3.

Utelatelseskriterium 1 er tilfeller hvor det er svært lav seismisitet og det vil dermed ikke være nødvendig å overholde videre bestemmelser i *Eurokode 8*. Kriteriet er at den dimensjonerende grunnakselerasjonen  $a_g$  ikke overskrider  $0,49 \text{ m/s}^2$  når den multipliseres med forsterkningsfaktoren  $S$ , se formel 4.

$$a_g S < 0,49 \text{ m/s}^2$$

Formel 4 - Kriteriet for lav seismisitet

NODE har informert om at bygget er fundamentert på sprengstein og ligger i nærheten av grunnfjell. Slike grunnforhold gir grunntype A etter tabell NA.3.1 og en forsterkningsfaktor  $S$  på 1,0. Den dimensjonerende grunnakselerasjonen beregnes etter formel 5.

$$a_g = \gamma_I \times (0,8 \times a_{g40\text{Hz}})$$

Formel 5 - Dimensjonerende grunnakselerasjon

$\gamma_I$  er avhengig av den seismiske klassen og defineres etter konsekvensene av et sammenbrudd av konstruksjonen. Boligbygg går under klasse II etter tabell NA.4(902) og  $\gamma_I$  settes lik 1,0.  $a_{g40\text{Hz}}$  er spissverdien for berggrunnens akselerasjon med returperiode på 475 år, avlest i tabell NA.3(901). Kriteriet for svært lav seismisitet oppfylles ikke. Derimot er kravet om lav seismisitet  $a_g \times S < 0,98 \text{ m/s}^2$  oppfylt, noe som gjør at bygget kan dimensjoneres etter bestemmelsene om lav seismisitet etter NA.3.2.1(4).

Utelatelseskriterium 2 baserer seg på konstruksjonens seismiske klasse. Etter punkt NA.3.2.1 kreves det ikke påvisning av jordskjelv for konstruksjoner i seismisk klasse I eller for lette trekonstruksjoner. Bygg C er i seismisk klasse II og oppfyller ikke utelatelseskriterium 2. Utelatelseskriterium 3 gjelder for lette trekonstruksjoner. Definisjonen av lette trekonstruksjoner er noe diffust, men generelt vil bolighus i tre falle innenfor denne definisjonen. En må drøfte hvorvidt bygg C er en lett eller tung trekonstruksjon. Ettersom det består av fire etasjer med massivtreelementer og

parkeringskjeller av betong, kan en konkludere med at bygget ikke er en lett trekonstruksjon. Utelatelseskriterium 3 er ikke oppfylt.

I utelatelseskriterium 4 er kravet at det dimensjonerende spektrumet ikke overskrider  $0,49\text{m/s}^2$ , vist i formel 6.

$$S_d(T) < 0,49\text{m/s}^2$$

Formel 6 - Krav om dimensjonerende spektrum

Spektrumet er avhengig av den første egensvingeperioden til konstruksjonen. Dette foregår som en sidebevegelse, og perioden kalles for  $T_1$  og beregnes etter formel 7.  $T_1$  må beregnes for å velge riktig uttrykk i punkt 3.2.2.5(4)P.

$$T_1 = C_t \times H^{\frac{3}{4}}$$

Formel 7 - Første egensvingeperiode

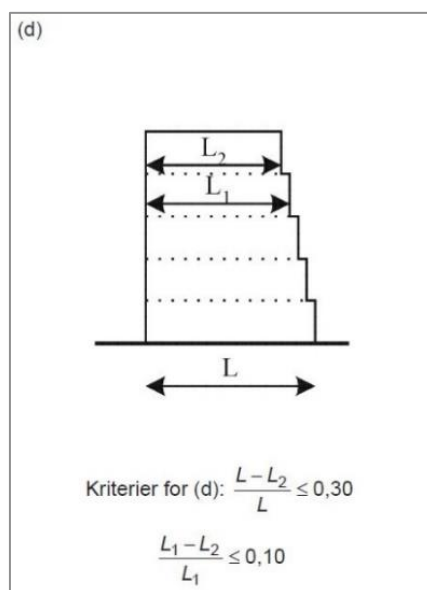
H er høyden på bygget fra overkanten av den stive parkeringskjelleren.  $C_t$  er lik 0,050 for et bygg i massivtre etter punkt 4.3.3.2.2.(3). Utelatelseskriterium 4 er ikke oppfylt.

Utelatelseskriterium 5 gjelder for bygninger som er i seismisk klasse II og III. Kriteriet sier at dersom skjærkraften for seismiske lastkombinasjoner på grunnivå er mindre enn påkjenning fra vind og skjevstilling, kan en videre kapasitetskontroll utelates. Kriteriet forutsetter følgende:

- Regularitet i oppriss og plan
- Lav duktilitet, konstruksjonsfaktor  $q \leq 1,5$
- Kreftene er basert på en lineær elastisk analyse
- Analysemodellen er representativ for bygget [39, bind H punkt 2.3.5]

Punkt 4.2.3 setter krav til regularitet i konstruksjonen, og omhandler det å ha et regelmessig og symmetrisk bygg. Kravet om regularitet i oppriss innebærer å ikke ha for

store endringer i stivheter mellom etasjene. Punkt 4.2.3.3(5)(d) gjelder spesifikt for bygg C på grunn av utformingen til toppetasjen med tilhørende takterrasse, se figur 4-19.



Figur 4-19 Kriterier for regularitet i oppriss [86]

En av betingelsene for regularitet i oppriss er  $\frac{(L-L_2)}{L} \leq 0,30$  og  $\frac{(L_1-L_2)}{L_1} \leq 0,10$ , der  $L = L_1$  i dette tilfellet. L er lengden på bygget og  $L_2$  er lengden til leilighetene i fjerde etasje, hvor lengden til takterrassen er trukket fra. Dette gir et forholdstall på 0,25 som oppfyller kravet på 0,30, men ikke kravet på 0,10. Kravene om regularitet i oppriss er dermed ikke oppfylt. Krav til regularitet i planet er gitt i punkt 4.2.3.2. Punktet omhandler at avstanden mellom massesenteret til bygget og stivhetssenteret i hvert plan skal være liten, og at de forflytter seg lite i de ulike etasjene. [39, bind H punkt 2.3.5] Dette krever en omfattende beregning som oppgaven ikke går inn på.

Videre undersøkes det om den seismiske kraften  $F_b$  er mindre enn påkjenningen fra vind og skjevstilling. Kraften fra vind og skjevstilling er hentet fra FEM-design. Dette ble gjort ved å endre modellen til NODE som bestod av betong og stål til tre. Ved å sammenligne kraftpåkjenningen var den seismiske kraften under 30 % av kraften fra

vind og skjevstilling. Selv med forenklinger er dette en betydelig forskjell og videre kapasitetskontroll utelates. Se tabell 17 for sammendrag av utelatelseskriteriene.

Utelatelseskriterier		
Kriterier	Massivtre	Begrunnelse
1. Svært lav seismisitet $a_g \times S < 0,49m/s^2$		$a_g \times S = 0,68m/s^2 > 0,49m/s^2$
2. Konstruksjoner i seismisk klasse I.		Har seismisk klasse II etter tabell NA.4(902)
3. For lette trekonstruksjoner.		Leilighetsbygg i massivtre er ikke en lett trekonstruksjon.
4. Dersom $S_d(T) < 0,49m/s^2$ med konstruksjonsfaktor $q \leq 1,5$ .		$S_d(T) = 0,685 m/s^2 > 0,49m/s^2$
5. Dersom skjærkraften for dimensjonerende seismisk lastkombinasjoner på grunnivå er mindre enn de fra andre relevante lastkombinasjoner.		Horisontalkraft grunnet jordskjelv $F_b=246 \text{ kN} < 817 \text{ kN}$ kraftpåkjenning fra vind og skjevstilling.

Tabell 17 - Utelatelseskriterier for seismisk påvirkning

I oppgaven er det som en forenkling valgt å gå videre som om bibetingelsene til utelatelseskriteriene er oppfylt. Dette er på bakgrunn av at seismisk beregning ikke er sentralt i forhold til problemstillingen. Det bør derimot undersøkes i eventuelt videre arbeid med oppgaven, da seismisk beregning er en viktig del av en prosjektering.

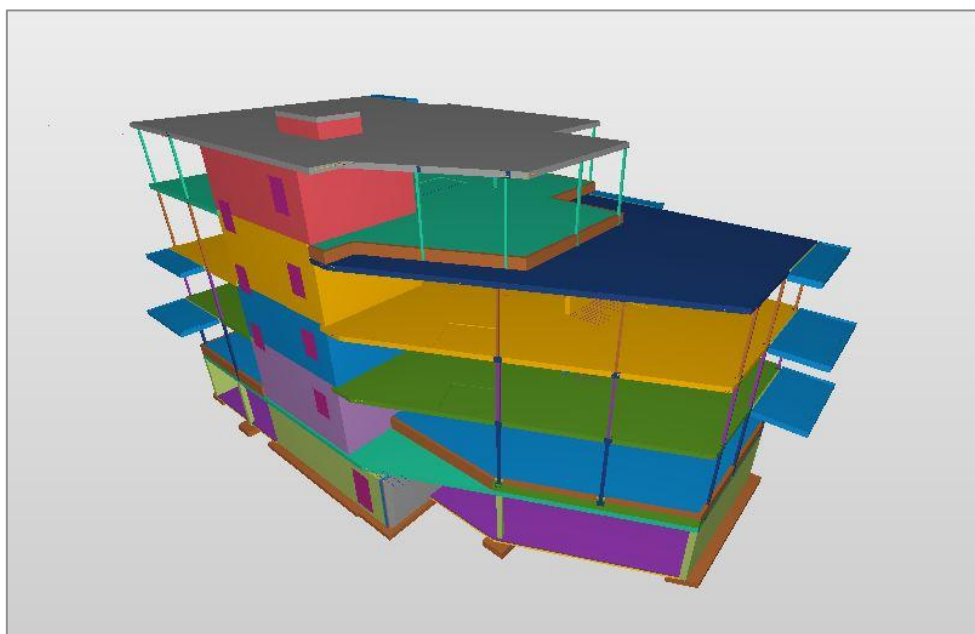
## 5 Dimensjonering

I dette kapittelet blir forutsetninger, utfordringer, fremgangsmåter og resultater for dimensjoneringen presentert.

## 5.1 Forutsetninger for dimensjoneringen

Dimensjoneringen er gjort på grunnlag av *Eurokode 0: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner* [9], *Eurokode 1 Del 1-2 Allmenne laster - Laster på konstruksjoner ved brann* [87] og *Eurokode 5 Del 1-1 Allmenne regler og regler for bygninger* [88] og *Del 1-2 Brannteknisk dimensjonering*. [89]

NODE har valgt en kombinasjon av prefabrikkerte betongelementer, plastøpt betong, stålbjelker og stålsøyler til bæresystemet, vist på figur 5-1. Når bæresystemet skal omgjøres til et system av massive treelementer, gjøres det noen forenklinger i forkant. Som nevnt innledningsvis vil det ikke dimensjoneres ny parkeringskjeller, heis- og trappesjakt eller balkonger, og en tar kun for seg de fire etasjene over bakkenivå.



Figur 5-1 Bæresystem i betong og stål, hentet fra IFC-fil [8]

## 5.2 Utforming av bæresystemet

Bæresystemet tar utgangspunkt i arkitekttegninger og NODE sine modeller. Slik kan en opprettholde de viktigste delene av planløsningen som er satt av arkitekten. Det gjør også at de massive treelementene kan følge deler av plasseringene til betong- og stålelementene. Bygg C beholder slik sine viktigste trekk og egenskaper. Ideen er at



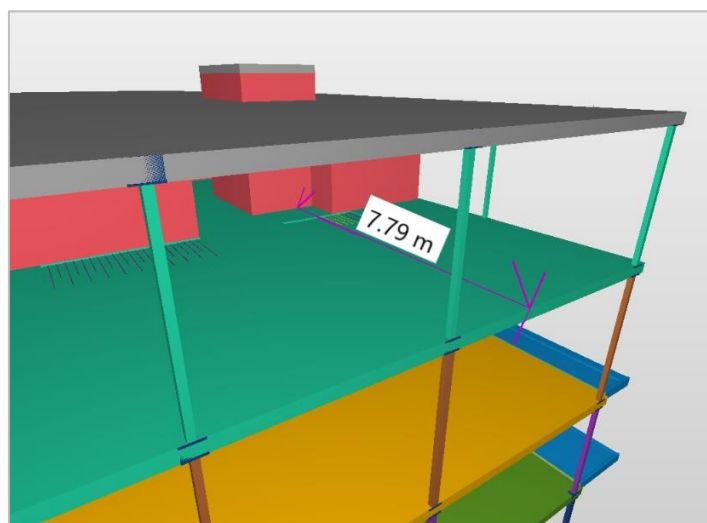
etasjeskillere og vegger i massivtre vil erstatte betongdekker- og vegger, og at søyler og bjelker i limtre vil erstatte stålsøyler- og bjelker. Bygget blir da klassifisert som en massivtrekonstruksjon, selv om en også bruker elementer av limtre. [48]

### 5.3 utfordringer ved utformingen

Ved utforming av bæresystemet i massive treelementer vil det oppstå flere utfordringer. Disse utfordringene kommer hovedsakelig av at bæresystemet bygger på tegninger som er tilpasset et bæresystem i betong- og stål. Det gjør at utformingen og planløsningen må justeres. De viktigste hensyn og problemer er nevnt i de påfølgende kapitlene.

#### 5.3.1 Spennvidder

En stor utfordring ved utformingen er spennvidder på dekker. Dette kommer av at massivtre har kortere spennvidder sammenliknet med betong. Spennvidder kan beskrives som den maksimale avstanden en kan ha mellom oppleggene til dekket. Maksimal spennvidde til massivtre settes til seks meter. Maksimal spennvidde til massivtre settes til seks meter. [61] Hvis spennretningen settes fra vestsiden mot østsiden er det største spennet på nesten åtte meter i bæresystemet til NODE, se figur 5-2. Dette vil si at en må lage en plan for plassering av limtresøylene og massivtreveggene, slik at maksimal tillatt spennvidde ikke overskrides.



Figur 5-2 Største spennvidde i modellen til NODE [8]

### 5.3.2 Økte dimensjoner

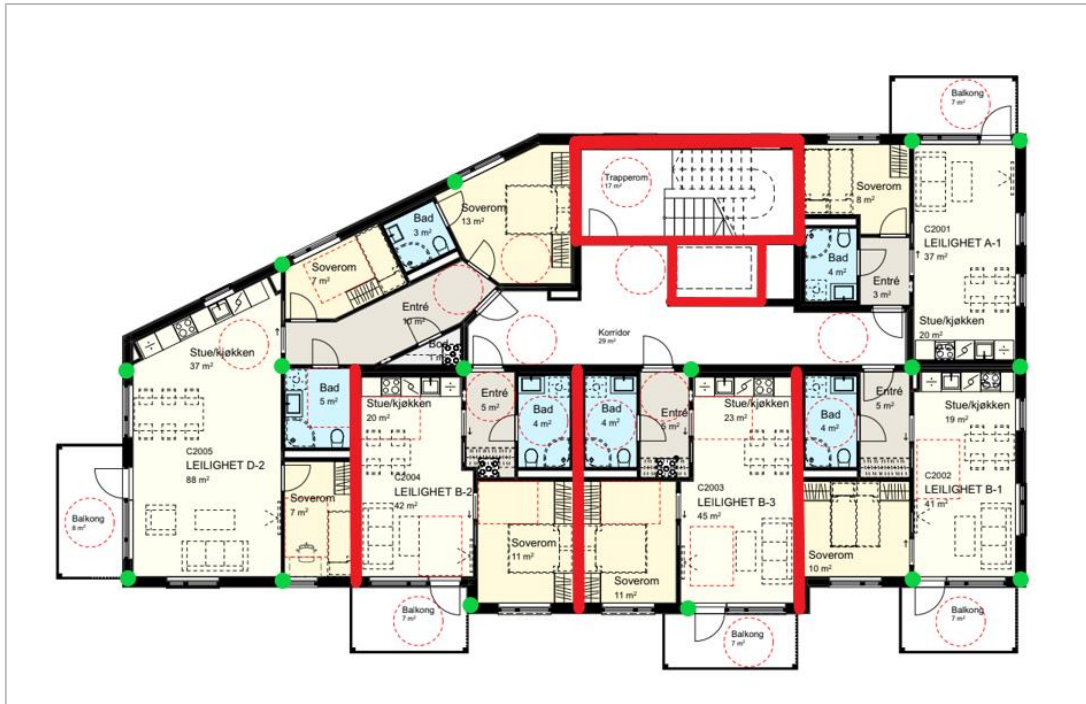
En annen utfordring er hvordan treelementene gjerne krever større dimensjoner enn betong og stål. Dette gjør at leilighetenes areal reduseres som følge av tykkere vegger og større søyler. Løsningen til NODE bygger på at søylene gjerne er skjult i ikke-bærende vegger. De økte dimensjonene i det nye bæresystemet vil ikke kunne skjule søylene på samme måte.

Slike endringer gjør at arkitekttegninger må revideres. Dette er noe som ofte oppstår i prosjekter når rådgivende ingeniør bygg skal utarbeide en konstruksjon basert på arkitekttegninger. Det anses derfor ikke som noe stort problem for oppgaven at endringer i mål forekommer.

Når en skal benytte seg av limtrebjelker må en forvente en økning i tverrsnittets høyde, sammenliknet med stålbjelker. En høy bjelke vil gi problemer for andre ingeniørfag, som VVS og elektro. Disse fagene vil få problemer med å utforme sine systemer, og et godt tverrfaglig samarbeid er derfor viktig. Løsningen blir å planlegge utsparinger, og eventuelt gjøre endringer i planløsning i samråd med arkitekten. Som en forenkling velges det å se bort fra endringer som oppstår ved bjelkene i det nye bæresystemet.

## 5.4 Skisseprosjekt av vertikalt bæresystem

Det første trinnet i dimensjoneringsprosessen var å kartlegge hvor de vertikale bæreelementene måtte plasseres. Dette ble i praksis gjennomført ved å tegne over salgstegningene fra arkitekten. Under skisseprosjektet vurderte en plasseringene med tanke på spennvidder og minimal forstyrrelse av den originale planløsningen. I fjerde etasje ble det nødvendig å sette inn en søyle midt i en av leilighetene. Dette trengs likevel ikke å ses på som noe negativt, da treelementer har et utseende som kan appellere til de fleste. [64, s.3] Figur 5-3 viser andre etasje hvor røde streker representerer bærende vegger i massivtre og grønne prikker representerer limtresøyler.



Figur 5-3 Skisse over plassering av vertikale bæreelementer i andre etasje

Skissen til det vertikale bæresystemet gir grunnlag for det horisontale bæresystemet som består av etasjeskillere, tak og takterrasse i massivtre, samt limtrebjelker. Bjelkene plasseres i tverretning på bygget og hviler på søylene. Etasjeskillere og tak hviler igjen på bjelkene i lengderetning, altså med spennretning på langs av bygget. Nummerering av bjelke-, søyle- og veggsystemer finnes i vedlegg A.

## 5.5 Limtrebjelker

Limtrebjelkene vil spenne kontinuerlig på søylene og regnes som fritt opplagt. De dimensjoneres for å kunne tåle påkjenning fra nyttelast, samt egenlast fra fasade og etasjeskillere eller tak. Takbjelkene og bjelkene under takterrassen blir i tillegg påkjent av vind- og snølast. Lastbredden til bjelkene varierer, men er gjennomsnittlig i underkant av fire meter. Dette er en relativt liten lastbredde for en limtrebjelke, men blir vurdert som den best egnede løsningen for å redusere spennviddene til massivtredekkene. Korte spennvidder gjør at bjelkenes dimensjoner ikke blir spesielt store. Disse løsningene gjør at den originale planløsningen til arkitekten kan beholdes i større grad.

Ved dimensjonering av limtrebjelkene er det valgt å benytte styrkeklasse GL 30c, ettersom denne klassen produseres og er lagerført i Norge. [90] Calculatis har ikke denne styrkeklassen som et alternativ i beregningene. I beregningskontrollen ble det derfor opprettet et nytt materiale i Calculatis med egenskaper lik GL 30c.

Dimensjonene til limtrebjelkene ble valgt basert på standardiserte dimensjoner av lameller. Lamellene har vanligvis en tykkelse på 45 mm og derfor øker høyden på limtrebjelkene med intervaller på 45 mm. Bredder til limtrebjelker samsvarer med sagbrukets standard utvalg på: 90, 115, 140, 165, 215 og 240 mm. [64, s.16] Dette gjelder også for valg av dimensjoner på limtresøylene i kapittel 5.6.

Det dimensjonerende for limtrebjelkene var nedbøyning, og den mest utnyttede bjelken hadde en utnyttelse på 90 %, vist på tabell 18. Håndberegninger som er gjort finnes i vedlegg F med beregninger i Mathcad i tillegg til resultater fra Calculatis. I Calculatis er det ikke tatt hensyn til trykk vinkelrett på fiberretning grunnet søylene, men dette er beregnet i håndberegningene. *Limtreboka – beregningseksempler* fra Moelven er brukt som veiledning til standardene ved håndberegninger. [90] De mest belastede bjelkene i hver etasje er vist på tabell 18.

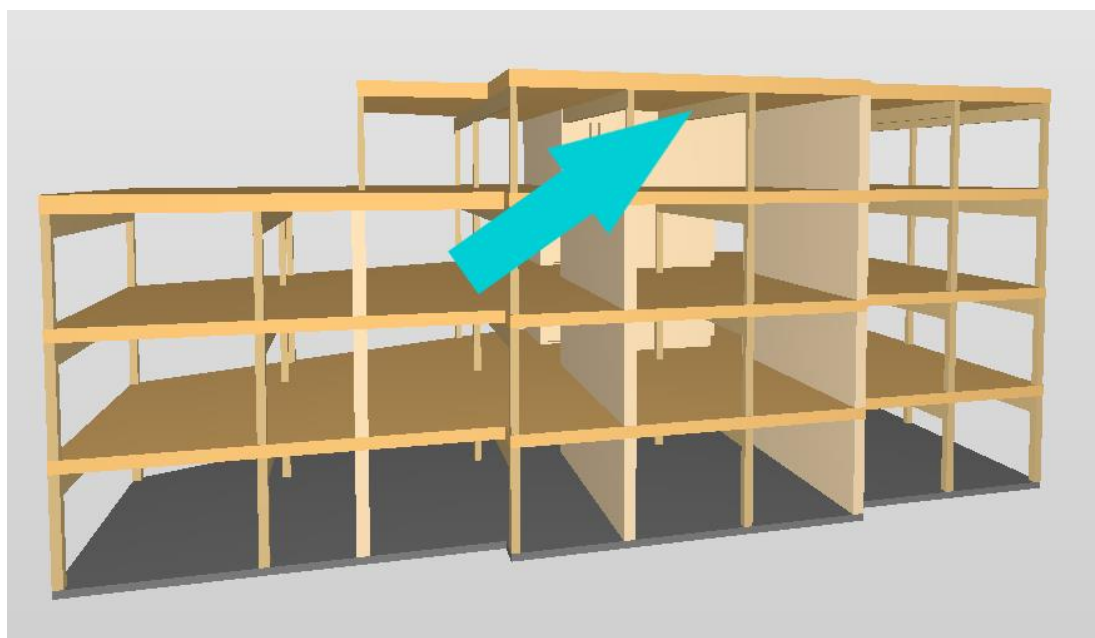
Limtrebjelker GL 30c			
Etasje	Bjelke	Dimensjon [mm]	Utnyttelse
1. etasje	1-4	215x585	86 %
2. etasje	2-4	215x585	86 %
3. etasje	3-4	215x585	86 %
4. etasje	4-4	215x495	90 %

Tabell 18 - Limtrebjelker GL 30c

### 5.5.1 Nedbøyning

Ved beregning av nedbøyning er det gjort forenklinger i håndberegningene. For bjelkene med to spenn er det benyttet en formel for en kontinuerlig bjelke, som har to like spenn, hentet fra SINTEF Byggforskserien. [91] Ingen av bjelkene har to nøyaktig like spenn, men forskjellen er liten. I håndberegningene er heller ikke

skjærdeformasjonen tatt med. Dette er noe som en bør vurdere da skjærmodulen for trematerialer er lav. I *Limtreboka* av Moelven står det: «*Er forholdet mellom bjelkens lengde (L) og tverrsnittshøyden (h), mindre enn 10, dvs.  $L/h < 10$ , bør bidraget fra skjærdeformasjonen tas med; ellers kan den neglisjeres*». [64, s.104] Alle limtrebjelkene har et forhold  $L/h > 10$ , og det er dermed valgt å ikke beregne dette. Calculatis beregner skjærdeformasjonen, og det var ingen betydelige forskjeller på den totale nedbøyningen tross forenklingene. I prosjektgrunnlaget gir en tillatt nedbøyning på bjelkene satt til  $L/300$ . Bjelken med høyest utnyttelse er bjelke 4-4, som er vist på figur 5-4 og tabell 19. Bjelken har en langtidsnedbøyning på 16,6 mm ifølge beregninger fra Calculatis, vist i vedlegg F1.2.



Figur 5-4 Bjelke 4-4 fra egenprodusert IFC-fil

Utnyttelse limtrebjelke 4-4		
ULS	ULS brann	SLS
43 %	38 %	90 %

Tabell 19 - Utnyttelse limtrebjelke 4-4

### 5.5.2 Bjelke-søyle forbindelse

På takbjelkene vil vindlasten kunne gi løftekrefter da de permanente lastene er lavere enn vindsuget. Ved vindtrykk vil taket bidra til å avstive bjelkene, men ved sug er det nødvendig at knutepunktet mellom bjelkene og søylene er gode nok. Det er for å kunne anta at bjelkene er fastholdt mot vipping og at suget kan tas opp som strekk. Ved å benytte stålplater på 20 mm som blir boltet inn i bjelken vil dette gi en avstivning av søyletoppen, samtidig som det virker som en gaffellagring av bjelken ved opplegg. Laskene dimensjoneres for å tåle en horisontalkraft som oppstår grunnet momentet i bjelken og aksialkraften i søylen, samt bidrag fra skjevstilling. Momentet som oppstår i forbindelsen tas opp som et kraftpar i laskene. Boltene dimensjoneres også for påkjenningen. Et eksempel på avstivning av forbindelsen mellom søyle og bjelke er vist i vedlegg F9. *Limtreboka – beregningseksempler* fra Moelven er også her brukt som veiledning.

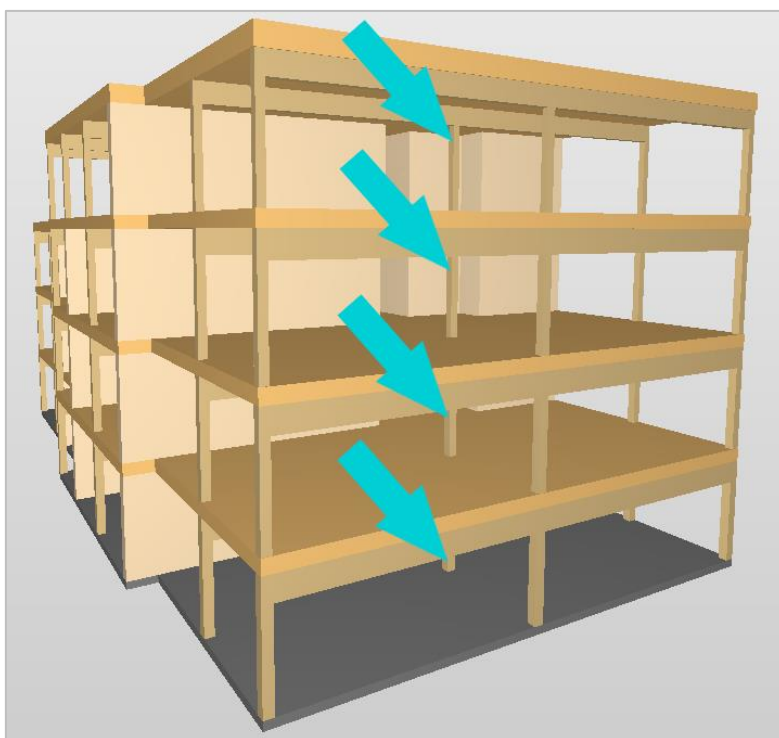
## 5.6 Limtresøyler

På samme måte som bjelkene dimensjoneres limtresøylene for påkjenning fra vind-, snø- og nyttelast, samt egenlaster. Det er valgt å dimensjonere yttersøylene for den horisontale vindlasten som oppstår på veggene, for at løsningen ikke skal begrense valg av fasadesystem. Det gjør at selv om yttersøylene har halvert lastbredde i forhold til innersøylene, vil de nødvendige dimensjonene bli relativt like. Den nødvendige dimensjonen til den mest belastede søylen i hver etasje, benyttes også på de resterende søylene i samme etasje.

Dimensjoneringen startet med å undersøke hvilke søyler som var størst belastet. De mest belastede søylene i hver etasje ble bestemt utfra størst avstand fra andre vertikale bæreelementer. Disse antakelsene er kontrollert ved å se på flere søyler i fjerde og tredje etasje som et utgangspunkt på hvordan belastningen er nedover i andre og første etasje. Kontroller for søylene finnes i vedlegg G. Videre bygger dimensjoneringen av søylene på de mest belastede søylene i hver etasje.

Lastene som limtresøylene påkjennes av er alle i ulike lastvarighetsklasser, noe som fører til ulike modifikasjonsfaktorer. Dette gir mange lastkombinasjoner og det er ikke nødvendigvis enkelt å se hvilken kombinasjon som er dimensjonerende. En løsning på dette var å benytte regneark i Microsoft Excel ved brudddimensjonering. Det ga en enkel oversikt over utnyttelsen ved de ulike lastkombinasjonene, vist igjen i vedlegg G. Lastkombinasjonen som gav høyest utnyttelse ble benyttet ved branndimensjonering. Som ved bjelkene er *Limtreboka – beregningseksempler* fra Moelven brukt som veiledning til standardene. [90]

For utenom noe lengre søyler i fjerde etasje, har de resterende lik lengde og knekk lengde. Det er valgt å benytte en knekk lengde som tilsvarer lengden til søylen i tillegg til høyden på bjelken. Bredden til søylene settes lik bredden til bjelkene i hver etasje. Ved beregninger ble brann det dimensjonerende for alle søylene. Søylen med høyest utnyttelse i hver etasje er vist i figur 5-5 og tabell 20. I forhold til håndberegningene er avviket på utnyttelsen lav.



Figur 5-5 Mest belastede søyler i hver etasje fra egenprodusert IFC-fil

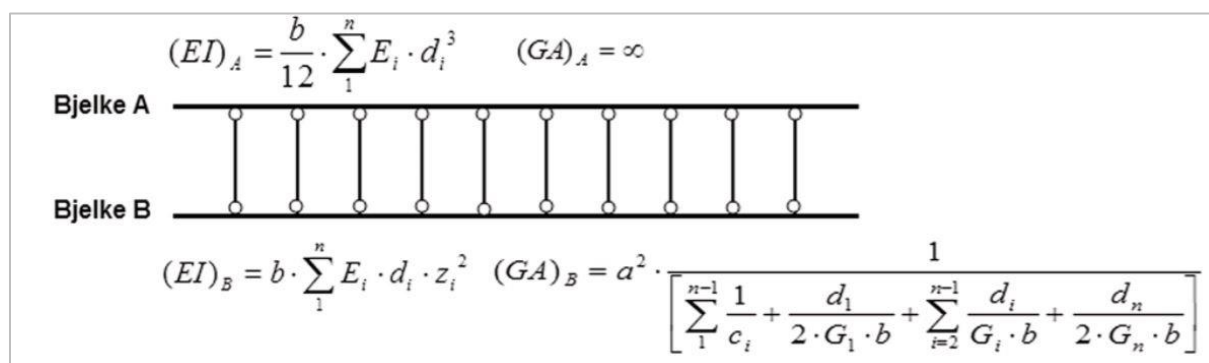


Limtresøyler GL 30c			
Etasje	Søyle	Dimensjon [mm]	Utnyttelse
1. etasje	1-9	215x315	83 %
2. etasje	2-9	215x225	99 %
3. etasje	3-9	215x225	59 %
4. etasje	4-7	215x180	60 %

Tabell 20 – Limtresøyler

## 5.7 Tak, etasjeskiller og takterrasse av massivtre

Håndberegningene av dekkene i massivtre er basert på skjæranalogimetoden, også kjent som *Schubanalogieverfahren* av Kreuzinger. Det er en metode for å regne på massivtreelement som går ut på at en betrakter et element som to bjelker: bjelke A og bjelke B. Dette er illustrert på figur 5-6. Bjelkene er forbundet sammen med uendelig mange staver, der deformasjonen og nedbøyningen blir fordelt likt mellom bjelkene. Bøyestivheten til hvert enkelt sjikt legges til bjelke A. Bidrag fra skjærstivhet og samvirke mellom sjiktene legges til bjelke B. [48]



Figur 5-6 Prinsippskisse av Schubanalogieverfahren-metoden [48]

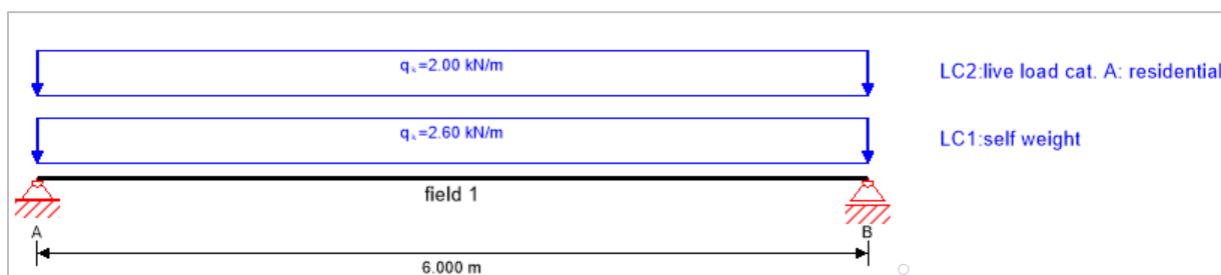
Calculatis sine beregninger av massivtreelementer baserer seg på Timoshenkos teorem. [92] Teoremet går ut på at det legges til en sikkerhetsfaktor for skjærkraftberegningene, da det tar hensyn til vinkelendring mellom nøytralaksen og bøyeaksen. [93] Vinkelendringen gjør at det oppstår indre skjærspenninger i tverrsnittet som bidrar til deformasjon av elementet. Siden det er brukt to forskjellige metoder, Timoshenkos teorem og skjæranalogimetoden, vil resultatene fra Calculatis



og håndberegningene ha noen ulikheter. En kan fortsatt konkludere med at håndberegningene er riktige sammenlignet med resultatene fra Calculatis, da svarene har lite avvik. Dette gjelder også for vegger i massivtre.

Calculatis benytter fasthetsklasse C24 i alle sjikt på massivtreelementene. En bruker derimot gjerne sjikt av lavere fasthetsklasse, som C14, i de midterste sjiktene. Dette er fordi de ytterste sjiktene får høyere spenninger i forhold til de midterste. Det var dermed i utgangspunktet ønskelig å benytte midtsjikt av C14. Håndberegninger kom likevel frem til at det krevde for store dimensjoner. Valget falt til slutt på å benytte fasthetsklasse C24 i alle sjikt.

Etasjeskillerne er påkjent av en nyttelast, samt egenvekt som vist på figur 5-7. Den maksimale spennvidden til etasjeskillerne er seks meter, noe som krevde syv sjikt og en total tykkelse på 240 mm. Det var altså nødvendig å øke tykkelsen på *Lydgulvet* fra Norsk Treteknisk Institutt, som i utgangspunktet besto av 180 mm massivtre. Den maksimale utnyttelsen med en spennvidde på seks meter er vist i tabell 21 for etasjeskillerne.



Figur 5-7 Statisk system til etasjeskiller

Calculatis skiller mellom vibrasjonsklasse I og II. Klasse I har et krav på 8 Hz for egenfrekvensen til etasjeskilleren, mens klasse II har et krav på 6 Hz. For gulv i boliger med en egenfrekvens lavere enn 8 Hz anbefaler *Eurokode 5* å foreta en spesiell undersøkelse. [88] Det er en anbefaling som primært er satt for trebjelkelag, da det foreløpig ikke er utarbeidet noe spesifikt for massivtre. I en prosjektrapport utført på

vegne av SINTEF Byggforsk blir gulvkonstruksjoner i tre med egenfrekvens under 8 Hz frarådet. [94] Det er dermed valgt å benytte vibrasjonsklasse I. Egenfrekvensen til etasjeskillerne med høyest utnyttelse kom på akkurat 8Hz, noe som ga en utnyttelse på 100 %. Håndberegninger av etasjeskillerne er i vedlegg H2.1 og resultater fra Calculatis er i vedlegg H2.2.

Utnyttelse etasjeskiller CLT 240 L7s			
ULS	ULS brann	SLS	Vibrasjon
25 %	15 %	67 %	100 %

Tabell 21 - Utnyttelse etasjeskiller CLT 240 L7s

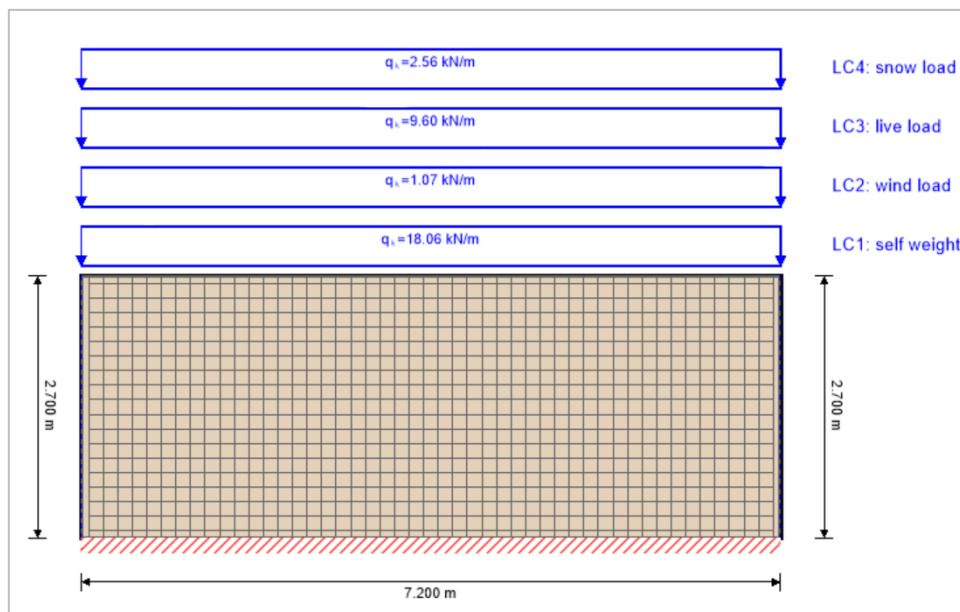
Tak og takterrasse er beregnet på tilsvarende måte som etasjeskillerne, men består av 180 mm massivtre og fem sjikt. Taket er påkjent av vind- og snølast, samt egenvekt. Største spennvidde på taket er seks meter noe som ga en utnyttelse på 78 % ved nedbøyning. Takterrassen er i likhet med taket påkjent av vind-, snø- og egenlast, i tillegg til nyttelast. På takterrassen er snølast større enn på taket grunnet fonning, som vist i kapittel 4.3.1. Største spennvidde på takterrassen er 4,5 meter, noe som ga en utnyttelse på 80 %. Håndberegninger av tak og takterrasse, i tillegg til resultater fra Calculatis er i vedlegg H1 og H3.

## 5.8 Bærende vegger av massivtre

De bærende veggene vil være etasjehøye, og etasjeskillerne regnes dermed som fritt opplagt på dem. Dette vil kunne gir mindre flanketransmisjon, enn om veggene var kontinuerlige. Ettersom dette er et boligbygg med strenge krav til lydisolering vil det derfor være mer fornuftig å bruke etasjehøye elementer. [48]

De bærende innerveggene får last fra vind, snø, nyttelast og egenlaster, vist på figur 5-8. Lydveggene består som nevnt tidligere av to uavhengige massivtreelementer. I beregningene ser en dermed på de 100 mm tykke elementene hver for seg og påkjenningen de får. Som ved etasjeskillere og tak av massivtre er det heller ikke her

mulig å endre sjiktene på Calculatis og det ble dermed beregnet med tre sjikt av C24 i hver av de to elementene.



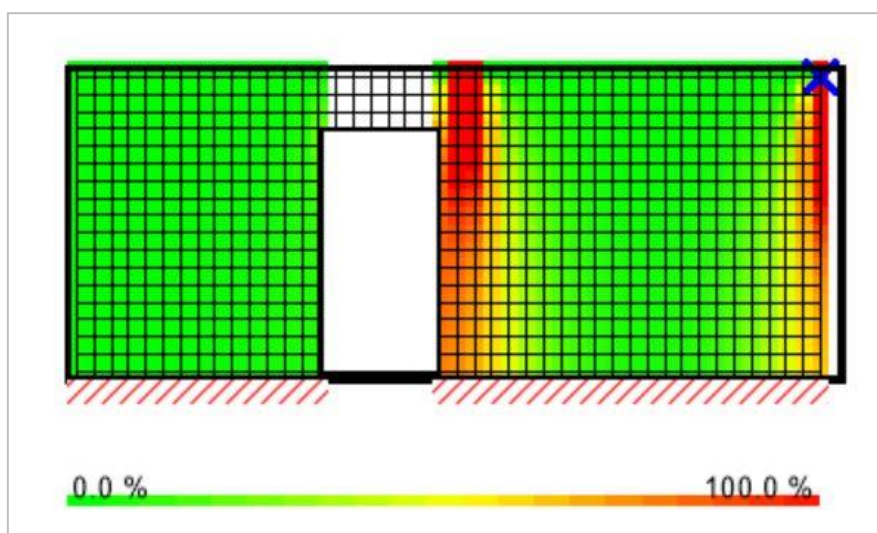
Figur 5-8 Bærende vegg 1-3

Alle veggene som går på tvers av lengderetningen til bygget, mellom leilighetene, får relativt lik påkjenning. Brann ble det dimensjonerende for alle disse. Beregninger i Calculatis ga høyest utnyttelse på en av veggene i første etasje på 91 % ved brann, dette kan en se i vedlegg I. Som en ser på tabell 22 er det betydelig lavere utnyttelse i bruddgrense ved vanlig forhold enn ved ulykkessituasjonen brann. Etter 60 minutter brann vil hele det ytterste sjiktet være brent bort i tillegg til store deler av midtsjiktet. Dette gjør at veggen blir slankere og utnyttelsen øker betraktelig. Som en kontroll ble veggene også beregnet for hånd. De ble da betraktet som en bred søyle, noe en kan se i vedlegg I.

Utnyttelse av bærende vegg 1-3		
ULS	ULS brann	SLS
9 %	91 %	0 %

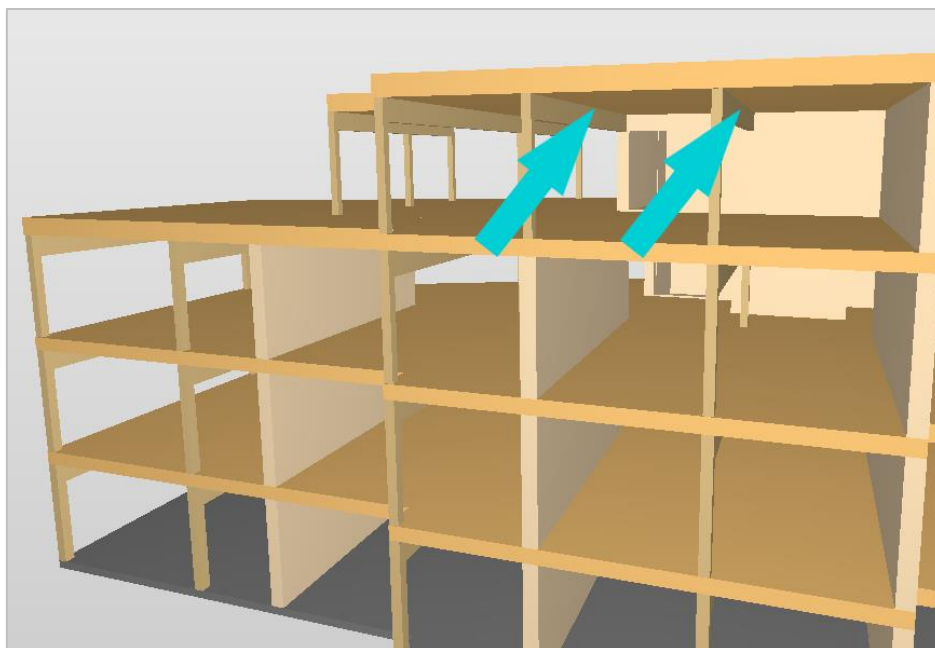
Tabell 22 Utnyttelse av bærende vegg i massivtre 1-3

I utgangspunktet var det planlagt å ha bærende vegger i lengderetning mellom leilighetene og fellesarealet, for å sikre god lydisolering. Veggene hadde da vært utsatt for punktlaster fra søylene ovenfor. Ved å gjøre beregninger i Calculatis så en at de konsentrerte lastene krevde store dimensjoner for å kunne tåle påkjenningen. Figur 5-9 viser en simulasjon av utnyttelsen i vegg. Lydveggen som i utgangspunktet består av til sammen 200 mm massivtre, ville da hatt et behov for 320 mm massivtre. Sammen med sjiktet i mineralull blir veggene svært tykke. En løsning som ble vurdert var å benytte tynnplateprofil av stål for å fordele lasten, men selv da ble dimensjonene store. Valget falt dermed til slutt på å benytte søyler og bjelker av limtre også her.



Figur 5-9 Simulasjon av vegg i Calculatis

Det er valgt å beholde en av veggene i lengderetning, da den er plassert i øverste etasje og vil dermed ha lavere påkjenning. Veggene har utsparring til dør og vil få to punktlaster fra bjelkene ovenfor den, vist i figur 5-10. *Lydveggen* fra Norsk Treteknisk Institutt er en dobbelkonstruksjon bestående av 2x100 mm massivtreelementer. Ved beregninger i Calculatis er det valgt å se på et massivtreelement på 100 mm da de er uavhengige, og bærer dermed også halvparten av lasten. Beregninger i Calculatis viser at veggene er tilstrekkelige når elementet består av fem sjikt, som vist i vedlegg I2.

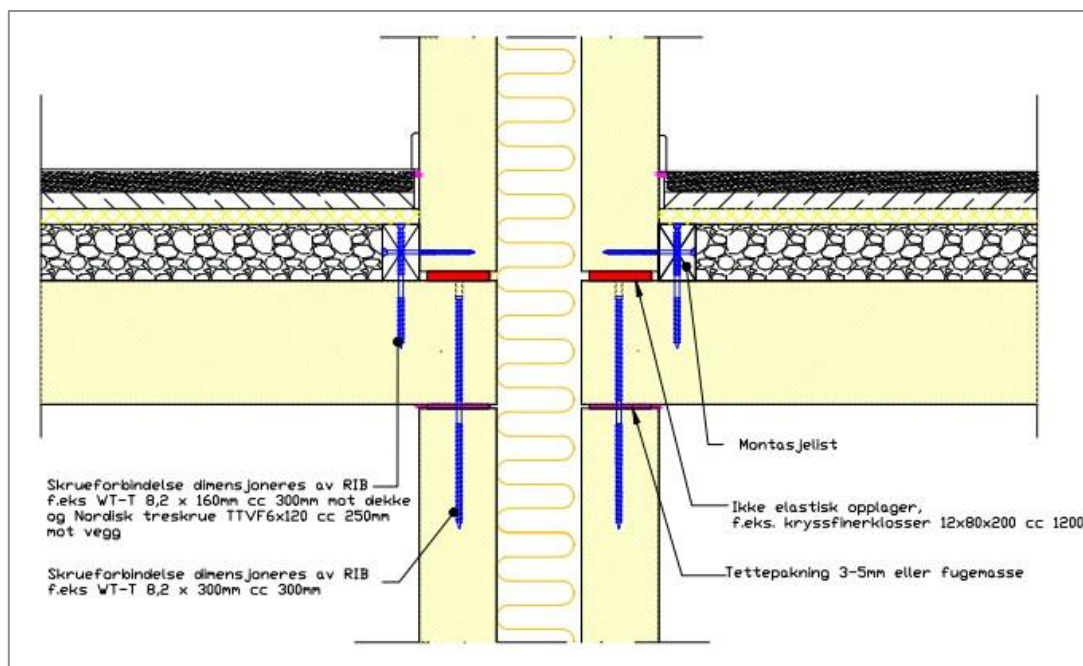


Figur 5-10 Vegg 4-2 med utsparing fra egenprodusert IFC-fil

## 5.9 Knutepunkt

Oppgaven er som nevnt innledningsvis begrenset til noen temaer. Knutepunkt er en av disse, men det er valgt å vise et eksempel på en forbindelse i bæresystemet. Etter anbefaling fra veiledere vil elementene forbindes med skruer. Skrueforbindelsene vil regnes som leddet, slik unngår en overføring av momenter. Forbindelsene med skruer vil gjøres på byggestedet, og en nøyaktig utførelse kan bidra til ytterligere stabilitet.

Ved å se på de valgte sjiktene fra egenvektkapittelet 4.2.1 kan eksempler på knutepunkt hentes fra Norsk Treteknisk Institutt. Figur 5-11 viser hvordan de valgte etasjeskillerne og veggene kan forbindes med skruer. Det er valgt å se på dette knutepunktet da det er relevant for lyd.



Figur 5-11 Knutepunkt i vegg og etasjeskiller [95]

Som figur 5-11 viser er det nødvendig at rådgivende ingeniør bygg (RIB) gjør en dimensjonering av skruerforbindelsen. Dimensjoneringen er viktig for hele konstruksjonens bæreevne, og for å forhindre uventede, sprøe brudd. [64, s.243] Norsk Treteknisk Institutt foreslår å bruke skruer av typen WT-T 8,2 x 160 mm cc 300 mm vertikalt ned i etasjeskilleren, og TTVF 6x120 cc 250 mm horisontalt inn i vegg. Vertikalt inn i vegg foreslås det WT-T 8,2 x 300 mm mellom vegg og etasjeskiller.

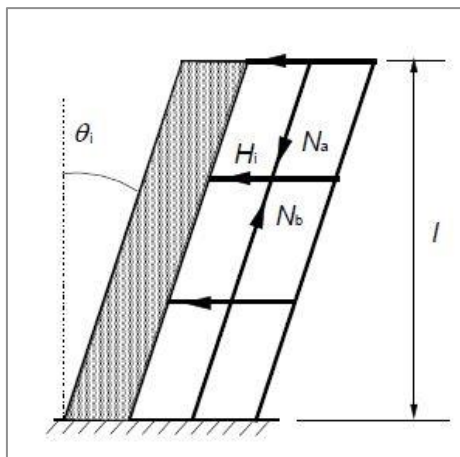
## 5.10 Stabilitet

Bygget må ha tilstrekkelig stabilitet både lokalt og globalt. Et stabilt bæresystem er avstivet og sikret mot kollaps. Den lokale stabiliteten til bygg C avhenger av at bæresystemet kan ta opp aksial- og horisontalkrefter, og føre disse ned til fundamentet. Her består de horisontale lastene av skjevstillingslaster og vindlast. Skjevstillingslastene blir beregnet, men som en forenkling i oppgaven konkluderes det at dekkene har tilstrekkelig kapasitet til å ta opp disse. Angående global stabilitet blir det veltende momentet kontrollert mot avstivende elementer, men ingen videre beregninger utover det. Beregninger finnes i vedlegg J.

### 5.10.1 Skjevstillingslast

Skjevstillingslast er et resultat av avvik som oppstår i konstruksjonens geometri.

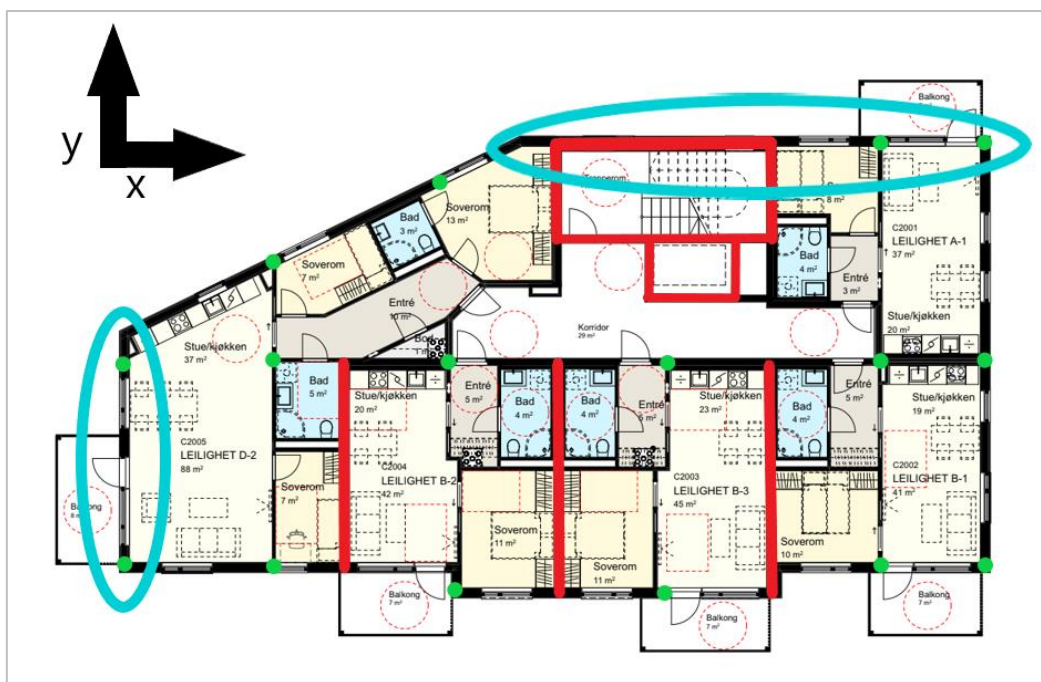
Dersom det vertikale bæresystemet forskyves vil det skapes en helning mellom horisontalt og vertikalt plan, helningen  $\theta$ , se figur 5-12. [96]



Figur 5-12 Geometrisk avvik på avstivningssystem[96]

Helningen gjør at aksiallastene  $N$  i søyler og vegger vil gi en tilleggslast  $H$  i det horisontale planet. Disse horisontale lastene kalles skjevstillingslaster. Ved beregninger etter punkt 5.2(5) i *Eurokode 2 Del 1-1 Allmenne regler og regler for bygninger* blir  $\theta$  lik 0,003. For å beregne skjevstillingslastene benyttes det veiledning etter del B9 i *Betongelementboka*. I beregningene er det brukt forenklede mål av konstruksjonen. Figur 5-13 viser retningene til  $x$  og  $y$ , samt hvilke vertikale elementer som er med i beregningene. I  $y$ -retning er det to søyler, og i  $x$ -retning er det to søyler og en vegg. Tabell 23 viser skjevstillingslastene som er like i både  $x$ - og  $y$ -retning. Se vedlegg J1 for beregning av skjevstillingslastene. [96] [39, bind B punkt 9.1.1]





Figur 5-13 Søyler og vegger brukt i beregning av skjevstillingslaster

Etasje	Karakteristisk skjevstillingslast [kN/m <sup>2</sup> ]	g-faktor for stabilitet (EQU) etter tabell NA.A1.2(A) [9]	Dimensjonerende skjevstillingslast [kN/m <sup>2</sup> ]
1	3,61	0,9	3.25
2	3,73	0,9	3.36
3	3,73	0,9	3.36
4	4,86	0,9	4.37
Tak	2,27	0,9	2.04

Tabell 23 - Skjevstillingslast i både x- og y-retning

### 5.10.2 Global stabilitet

Ved den globale stabiliteten må en kontrollere at bæresystemet er tilstrekkelig avstivet og ikke velter som følge av horisontale laster. Da er først og fremst vindlasten den kraften en beregninger etter. Heis- og trappesjakten vil sammen med de bærende massivtreveggene være med på å skape et stabiliserende moment. Dette momentet må være større enn veltemomentet som vindlasten gir. Påvisning av global stabilitet for bygg C er gitt i vedlegg J2. Dessuten er også betongkjelleren med på avstivningen. Rikelig med avstivende elementer, god håndverksmessig utførelse, gode forbindelser i



knutepunktene, og begrenset høyde til bygget, gjør at bæresystemet gir en stabil konstruksjon. Det ble dermed ikke utført noen videre beregninger av dette.

## 6 Sammenlikning

I dette kapitlet vil brann, lyd og miljøbelastningen for de ulike materialene sammenliknes og drøftes. Kapitlet skal sette egeMnskapene til materialene i perspektiv og slik kunne gi grunnlag til deler av konklusjonen til oppgaven.

### 6.1 Brann

Stål er materialet med de dårligste brannegenskapene, da det er helt avhengig av brannisolering for å motstå brann. Betong og massivtre har begge vist egenskapen til å være bærende under hele brannforløpet, med noen begrensninger. Dette klarer materialene uten brannisolasjon. Selv om brannisolasjon ikke er en krevende del av branndimensjoneringen, vurderes det som en dyktig egenskap å være uavhengig av det.

Som et brennbart materiale vil tre bidra med varmeavgivelse og tilføring av energi til brannen, noe betong ikke gjør. Dette bidraget kan imidlertid reduseres ved isolering i form av gips på treelementene. Ved limte, massive treelementer er det fare for delaminering ved brann. Delaminering kan sammenliknes med eksplosiv avskalling i betongen, ved at materialet underveis i brannen reduseres i tverrsnitt og bæreevne. Dette problemet minimeres hos både betong og trevirke etter hvert som betongen blir eldre, og limet i treelementene er av typen MF eller PRF.

Betong og massivtre er dyktige når det kommer til å hindre brannspredning utover branncellen som følge av varmegjennomgang. Dette kommer av at de begge har en lav varmekonduktivitet og ikke påvirker temperaturen på andre siden av elementet, som for eksempel på en vegg.

Det avgjørende i sammenlikningen må være tre sin forkullingsegenskap. Dette gjør det til et mer bestandig materiale ved brann enn betong. Dette kommer som en følge av reduksjon i betongens fasthet allerede ved 600 grader celsius, og en fullt utviklet brann har temperaturer opp mot 1000 grader celsius. Ved denne temperaturen kan store deler av treelementets tverrsnitt fortsatt være ferskt og bæredyktig. En annen fordel ved massivtre er måten det kan ha en innvirkning på brannens overgang til avkjølingsfasen, men dette er et relativt nytt fagområde med begrensninger gjort i studiene av det.

Bæresystemet i massive treelementer viser gode egenskaper ved brann sammenliknet med bæresystemet i stål- og betongelementer.

## 6.2 Lyd

Luftlyd er hovedsakelig avhengig av masse per flateenhet. Det vil si at en tung konstruksjon vil være vanskeligere å sette i svingninger i forhold til en lett konstruksjon. Ved å øke tykkelsen på massivtreelementer vil en altså ikke oppnå samme effekt som ved betong. Betongen i seg selv vil ofte gi tilstrekkelig lydisolering ved skillevegger, mens det ved massivtreelementer er nødvendig å se på alternative løsninger. Et alternativ er en dobbeltkonstruksjon som skillevegg som sammen med mineralull gir betydelig bedre luftlydisoleringsevne. Selv med en slik løsning var luftlydisoleringen akkurat innenfor kravet.

I betongdekket var ikke betongen i seg selv nok til å oppfylle lydkravet. Løsningen til NODE med trinnlydsplate og parkett var en enkel og velfungerende løsning. Trinnlyd er en utfordring ved lette byggematerialer og her var en også nødt til å se på alternative løsninger ved massivtre. Tilfredsstillende lydisolering ble oppnådd ved å benytte gulv som bestod av massivtre, pukk, trinnlydsplate, sponplate, gulvgips og parkett.

Totalt sett viser sammenlikningen at betong har betydelig bedre lydegenskaper enn massivtre. I bærekonstruksjoner av betong vil det som regel være et lite behov for tilleggssjikt for å kunne oppfylle lydkravet. Ved massivtre er en derimot nødt til å benytte lydisolerende materialer og andre materialer for å øke tyngden. Dette gjør at en må forvente tykkere skillekonstruksjoner, noe som må tas hensyn til i prosjekteringen. Likevel kan en ved å gjøre dette oppnå like gode lydisoleringsegenskaper ved massivtre som ved betong.

### 6.3 Miljøbelastning

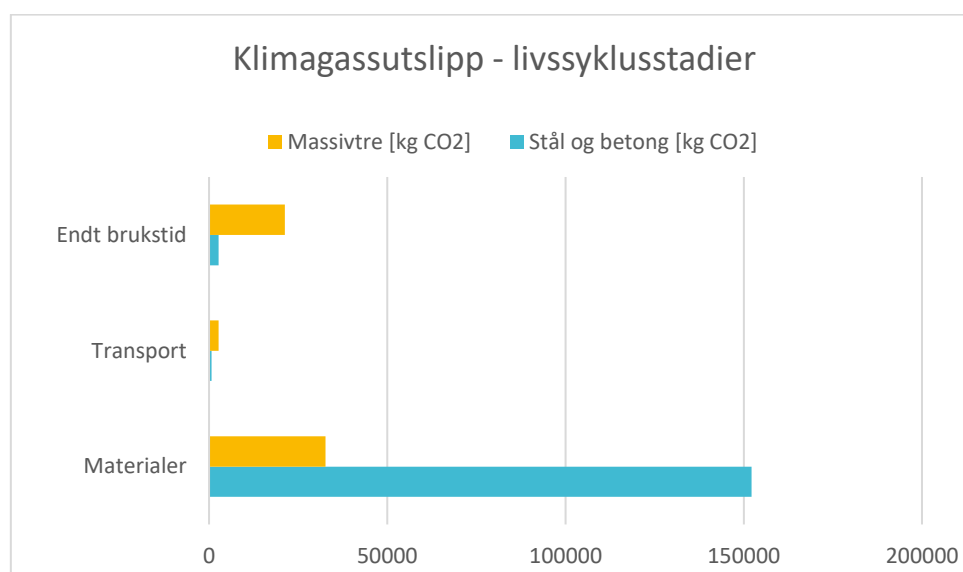
Belastningen på det ytre miljøet har blitt sortert i tre temaer: utnyttelse av råvarer, utslipp av CO<sub>2</sub> og gjenbrukbarhet. Vedrørende utnyttelsen av råvarer viste stål og betong seg å være avhengig av svært energikrevende prosesser for å behandle råvarene som inngikk i produksjonen. Tre som et naturmateriale hadde ikke dette behovet i like stor grad, og hele treet ble utnyttet, alt fra grener til sagflis.

Prosessene i produksjonen av stål og betong fører med seg store utslipp av CO<sub>2</sub>. Årlig forbruk av betong i Norge gir et utslipp på 1,4 millioner tonn CO<sub>2</sub>, mens stålsøylene i bygg C fører med seg et utslipp på cirka 4,6 tonn CO<sub>2</sub>. Trelast- og trevareindustrien i Norge fører kun med seg et årlig utslipp på cirka 47 tusen tonn CO<sub>2</sub>, en betydelig lavere verdi sammenliknet med betong og stål. Det er allikevel viktig å poengtere at det produseres 4,4 millioner kubikkmeter betong, sammenliknet med 2,3 millioner kubikkmeter laminert tre.

Stål har et dårlig utgangspunkt for å kunne gjenbrukes, spesielt dersom det er utsatt for skader som følge av overbelastning eller brann, og blir derfor gjenvunnet. Betong- og treelementer kan i enklere grad gjenbrukes, men dette avhenger av at elementene demonteres forsiktig og at dokumentasjon av deres egenskaper er mulig å gjennomføre. Dette kan medføre en tidkrevende prosess, og gjenvinning av betong og tre blir derfor heller prioritert. Uforurenset betong blir brukt som tilslag i for eksempel veidekker, mens tre blir energigjenvunnet ved forbrenning. Alle materialene har altså

en vane for å bli gjenvunnet fremfor gjenbrukt, og stål har her det dårligste utgangspunktet for gjenbruk.

Det beregnede klimagassutslippet som er gjort med One Click LCA viser et betydelig større utslipp av CO<sub>2</sub> ved bæresystemet i stål og betong, sammenliknet med bæresystemet i massive treelementer, se figur 6-1.



Figur 6-1 Klimagassutslipp sammenlikning

Selv om massivtre har et høyere utslipp ved endt brukstid i forhold til stål og betong, har betong over fire ganger så stort utslipp som massivtre. Ved å bygge bæresystemet i massive treelementer er det en besparelse på cirka 122 000 tonn CO<sub>2</sub>.

## 7 Konklusjon

Det er dimensjonert et bæresystem med vegger, tak og etasjeskillere i massivtre, og søyler og bjelker i limtre. Tre har blitt sammenliknet med stål og betong, som var det opprinnelige bæresystemet til bygg C, utredet av NODE rådgivende ingeniører AS. Oppgaven har vist at det er mulig å dimensjonere et mer bærekraftig bæresystem for leilighetsbygget, som også tilfredsstiller krav til brannsikkerhet og lydegenskaper.

Betong og tre viste seg å ha relativt like egenskaper angående brannsikkerhet. Ved lyd hadde vegger og dekker i massivtre dårligere egenskaper sammenliknet med betong, men dette kunne forbedres ved å legge til sjikt som pukk og isolasjon. Ved miljøbelastning har de massive treelementene langt lavere CO<sub>2</sub>-utslipp sammenliknet med betong og stål. Basert på det som er drøftet i oppgaven, kan en konkludere med at et bæresystem i massive treelementer lar seg gjennomføre og gir gode brukskvaliteter.

## 8 Referanseliste

- [1] Bergen Kommune, "Årstad, gnr 159, bnr 88 mfl., Kronstadparken felt N3, Reguleringsplan. Arealplan-ID 64480000 FAGNOTAT 2. GANGS BEHANDLING," Plan- og bygningsetaten ved Bergen kommune, Fagnotat for reguleringsplan, 2017.
- [2] Google Maps. (2020). *OBOS Kronstadparken* [Internett]. Tilgjengelig: <https://www.google.no/maps/place/OBOS+Kronstadparken/@60.3718812,5.0034825,10.56z/data=!4m5!3m4!1s0x463cf94f2417fdb:0x71896e136d60704c!8m2!3d60.3728587!4d5.3432928> [Hentet 05.05.2020]
- [3] OBOS. *Kronstadparken* [Internett]. Tilgjengelig: [https://www.obos.no/privat/ny-bolig/boligprosjekter/stor-bergen/kronstadparken?gclid=EAlaIqObChMI0ZecqZLa5QIVyYKyCh2qDwtwEAAAYASAAEgIjCfD\\_BwE](https://www.obos.no/privat/ny-bolig/boligprosjekter/stor-bergen/kronstadparken?gclid=EAlaIqObChMI0ZecqZLa5QIVyYKyCh2qDwtwEAAAYASAAEgIjCfD_BwE) [Hentet 10.03.2020]
- [4] Og Arkitekter, "IFC Bygg C," IFC-modell av bygg C, opprettet 08.11.2019.
- [5] Kronstadparken. *Utbyggere* [Internett]. Tilgjengelig: <http://www.kronstadparkenbolig.no/utbygger.html> [Hentet 23.03.2020]
- [6] Kronstadparken. *Kronstadparken* [Internett]. Tilgjengelig: <http://www.kronstadparkenbolig.no/> [Hentet 23.03.2020]
- [7] Og Arkitekter AS, "Bygg C, fasader: Årstad, gnr 159, bnr 88 mfl. Kronstadparken felt N3. AREALPLAN-ID 64480000," arkitekttegninger, opprettet 04.10.2019.
- [8] NODE rådgivende ingeniører, "1811-ByggC," NODE rådgivende ingeniører AS, Bergen, IFC-modell av bygg C, 2020.
- [9] Standard Norge, "Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner," NS-EN 1990:2002+A1:2005+NA:2016.
- [10] Sletten Byggdata AS. *Dimensjonering av betongkonstruksjoner - programutvikling* [Internett]. Tilgjengelig: <http://www.ove-sletten.no/index.htm> [Hentet 20.03.2020]
- [11] Stora Enso. *About Us* [Internett]. Tilgjengelig: <https://www.storaenso.com/en/about-stora-enso> [Hentet 20.03.2020]
- [12] Digitaliseringsdirektoratet. (2019). *Industry Foundation Classes (IFC)* [Internett]. Tilgjengelig: <https://www.difi.no/fagomrader-og-tjenester/digitalisering-og-samordning/standarder/industry-foundation-classes-ifc> [Hentet 20.03.2020]
- [13] Byggteknisk forskrift. (2017). *Forskrift om tekniske krav til byggverk* [Internett]. Tilgjengelig: <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17>
- [14] G. Liebe. (2020). *Brannklassifisering* [Internett]. Tilgjengelig: <https://snl.no/brannklassifisering> [Hentet 07.04.2020]
- [15] G. Liebe. (2020). *Flammebrann* [Internett]. Tilgjengelig: <https://snl.no/flammebrann> [Hentet 15.04.2020]
- [16] T. Gjestland. (2019). *Lyd* [Internett]. Tilgjengelig: <https://snl.no/lyd> [Hentet 26.04.2020]
- [17] S. Hveem, "Lydtubredelse og støy. Grunnbegreper," SINTEF, Teknisk anvisning nr. 421.401 [Hentet 22.04.2020], 2004.
- [18] S. Hveem, "Romakustikk og lydisolering. Grunnbegreper," SINTEF, Teknisk anvisning nr. 421.402 [Hentet 22.04.2020], 2004.
- [19] J. V. Thue. (2019). *Lydisolering* [Internett]. Tilgjengelig: <https://snl.no/lydisolering> [Hentet 21.04.2020]
- [20] Glava. *Teori lydisolering* [Internett]. Tilgjengelig: <https://www.glava.no/bygg/dokumentasjon-montering/teori/teori-lydisolering/> [Hentet 22.04.2020]
- [21] J. V. Thue. (2019). *Trinnlyd* [Internett]. Tilgjengelig: <https://snl.no/trinnlyd> [Hentet 21.04.2020]
- [22] A. Homb, "Lydisolerende etasjeskillere med trebjelkelag i boliger," SINTEF, Teknisk anvisning nr. 522.511 [Hentet 26.04.2020], 2017.

- [23] Standard Norge, "NS 8175 Lydforhold i bygninger. Lydklasser for ulike bygningstyper," 2019.
- [24] S. Hveem, "Lydisolerende, tunge etasjeskillere," SINTEF, Teknisk anvisning nr. 522.513 [Hentet 24.04.2020], 2015.
- [25] S. Hveem, "Lydisolerende, tunge etasjeskillere. Konstruksjonseksempler," SINTEF, Teknisk anvisning nr. 522.514 [Hentet 27.04.2020], 2015.
- [26] G. Glasø, "Nr. 36 Tre og lyd," Trefokus AS og Treteknisk, 2011.
- [27] K. Sørnes, A. S. Nordby, H. Fjeldheim, S. Moqim Bani Hashem, M. Mysen, og R. Dahl Schlanbusch, "Anbefalinger ved ombruk av byggematerialer," SINTEF Fag, Forskningsrapport, ISBN: 978–82–536–1384–0, 2014.
- [28] N. Christensen og A. Almar-Næss. (2019). *Stål* [Internett]. Tilgjengelig: <https://snl.no/st%C3%A5l> [Hentet 07.04.2020]
- [29] P. K. Larsen, *Konstruksjonsteknikk - Laster og bæresystemer*, 2. utg. Bergen: Fagbokforlaget, 2008.
- [30] S. Ø. Nesheim, "Metaller til bygningsbruk. Bruksformål og prosjektering," SINTEF, Teknisk anvisning nr. 571.404 [Hentet 08.04.2020], 2013.
- [31] V. Stenstad og J. C. Krohn, "Brannbeskyttelse av stålkonstruksjoner," SINTEF, Teknisk anvisning nr. 520.315 [Hentet 08.04.2020], 2004.
- [32] T. Sverdrup. (2019). *Jernmalm* [Internett]. Tilgjengelig: <https://snl.no/jernmalm> [Hentet 08.04.2020]
- [33] H. Haraldsen, P. K. Kofstad, og B. Pedersen. (2019). *Jern* [Internett]. Tilgjengelig: <https://snl.no/jern> [Hentet 08.04.2020]
- [34] A. M. Fet, "Generic EPD Hot finished structural hollow sections," EPD-Norge, Miljødeklarasjon, NEPD 00254E, 2014.
- [35] E. S. D. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, United States. (2019). *CO2 emissions (metric tons per capita)* [Internett]. Tilgjengelig: <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC> [Hentet 14.04.2020]
- [36] S. Wærp, "Byggevarer - egnethet for materialgjenvinning," SINTEF, Teknisk anvisning nr. 421.401 [Hentet 14.04.2020], 2012.
- [37] J. V. Thune. (2019). *Betong* [Internett]. Tilgjengelig: <https://snl.no/betong> [Hentet 25.03.2020]
- [38] J. V. Thune. (2019). *Armert betong* [Internett]. Tilgjengelig: [https://snl.no/armert\\_betong](https://snl.no/armert_betong) [Hentet 25.03.2020]
- [39] Betongelementforeningen. *Betongelementboken på nett* [Internett]. Tilgjengelig: <http://betongelementboka.betongelement.no/betongapp/default.html> [Hentet 17.03.2020]
- [40] H. Fiber. *Hunton Silencio Parkettunderlag* [Internett]. Tilgjengelig: <https://www.hunton.no/produkter/gulv/hunton-silencio-parkettunderlag/> [Hentet 29.04.2020]
- [41] S. Hveem, "Lydisolasjon for massive innervegger," SINTEF, Teknisk anvisning nr. 524.321 [Hentet 28.04.2020], 2019.
- [42] T. Årtun og N. Nesse. (2018). *Sement* [Internett]. Tilgjengelig: <https://snl.no/sement> [Hentet 17.04.2020]
- [43] Norcem. *Hvordan lages egentlig sement?* [Film fra internett]. Tilgjengelig: <https://www.norcem.no/no/sementproduksjonsprosessen> [Hentet 17.04.2020]
- [44] Norsk betongforenings miljøkomité. (2016). *Visste du dette om betong og miljø?* [brosjyre på internett]. Tilgjengelig: <https://betong.net/wp-content/uploads/17966-Visste-du-dette-om-betong-og-milj%C3%B8-WEB.pdf>

- [45] K. O. Kjellsen, P. Jähren, S. Jacobsen, H. Magerøy, G. Petkovic, S. A. Myren, *et al.*, "CO<sub>2</sub>-utslipp - sement og betong - utfordringer og perspektiver," Norsk Betongforenings Miljøkomité, Oslo, rapport, 2008.
- [46] Store norske leksikon. (2019). *Limtre*. Tilgjengelig: <https://snl.no/limtre> [Hentet 27.04.2020]
- [47] TreFokus. *Limtre* [Internett]. Tilgjengelig: <http://www.trefokus.no/proff/artikler/materialer/limtre> [Hentet 27.04.2020]
- [48] Treteknisk, "Bygge med massivtreelementer," Norsk Treteknisk Institutt, Oslo, Hefte 2 - byggeteknikk, 2006.
- [49] J. Aarstad, G. Glasø, og A. Bunkholt, "Nr. 20 FOKUS på tre - Massivtre," TreFokus AS og Treteknisk [Hentet 22.03.2020], 2011.
- [50] Regjeringen. (14.11.2017). *Markedet for massivtre er i sterk vekst* [Internett]. Tilgjengelig: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/markedet-for-massivtre-er-i-sterk-vekst/id2578870/> [Hentet 20.03.2020]
- [51] Treindustrien. *Nøkkeltall* [Internett]. Tilgjengelig: <http://www.treindustrien.no/nokkeltall> [Hentet 21.04.2020]
- [52] J. Hindklev. (30.04.2019). *Elvestuen tror Splitkon kan ta opp kampen mot utenlandske produsenter med verdens største massivtrefabrikk* [Internett]. Tilgjengelig: <http://www.bygg.no/article/1392943> [Hentet 14.04.2020]
- [53] K. I. Edvardsen og T. Ramstad, *Trehus*, 1. utg. Oslo: SINTEF akademisk forlag, 2014.
- [54] Treteknisk, "Bygge med massivtreelementer," Norsk Treteknisk Institutt, Oslo, Hefte 4 - brann, 2006.
- [55] J. Z. Su og G. D. Loughheed, "Fire safety summary: Fire research conducted for the project on midrise wood construction (Report to research consortium for wood and woodhybrid mid-rise buildings," National Research Council Canada, Canada, Rapport A1-004377.1, 2014.
- [56] N. K. Reitan, K. L. Friquin, og R. F. Mikalsen, "Brannsikkerhet ved bruk av krysslaminert massivtre i bygninger - en litteraturstudie," RISE Research Institutes of Sweden AB, Trondheim, RISE-Rapport nr. 2019:09, 2019.
- [57] D. Brandon og B. Östman, "Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings Phase 2: Task 1 - Literature Review: The contribution of CLT to compartment fires," SP Technical Research Institute of Sweden/NFPA, Stockholm/Massachusetts, Rapport nr. FRPF-2016-22, 2016.
- [58] C. McGregor, "Contribution of Cross Laminated Timber Panels to Room Fires," master, Carleton University, Ottawa, 2013.
- [59] E. Daaland Wormdahl, K. Hox, A. Steen-Hansen, G. Baker, og M. K. Ulfesnes, "Brannsikkerhet i bygg med massivtre," RISE Fire Research AS, Rapport nr. A17 20229:1, 2017.
- [60] L. Hasburgh, K. Bourne, P. Peralta, P. Mitchell, S. Schiff, og W. Pang, "Effect of adhesives and ply configuration on the fire performance of cross-laminated timber," Wien, Østerrike, Avhandling ved World Conference in Timber Engineering 2016 (WCTE2016), 2016.
- [61] A. Homb, "Etasjeskillere i massivtre," SINTEF, Teknisk anvisning nr. 522.891 [Hentet 26.04.2020], 2009.
- [62] Treteknisk, "Bygge med massivtreelementer," Norsk Treteknisk Institutt, Oslo, Hefte 5 - lyd, 2016.
- [63] L. G. F. Tellnes, "Nr. 58 FOKUS på tre: Miljødeklarasjoner for tre og trebaserte produkter," Treteknisk og TreFokus, Oslo.
- [64] Norsk limtreprodusenters forening, "Limtreboka," ISBN: 978-82-7129-324-6, 2015.



- [65] Statistisk Sentralbyrå. (2018). *09288: Klimagasser fra norsk økonomisk aktivitet, etter næring og komponent 1990-2018* [Statistikk]. Tilgjengelig: <https://www.ssb.no/statbank/table/09288/> [Hentet 17.04.2020]
- [66] Statistisk Sentralbyrå. (2018). *10455: Solgt produksjon av varer for store foretak i industri, etter prodcomkode, statistikkvariabel og år* [Statistikk]. Tilgjengelig: <https://www.ssb.no/statbank/table/10455/> [Hentet 23.05.2020]
- [67] Treindustrien, Treteknisk, Skogeierforbundet, og TreFokus. (2013). *Treindustriens lille grønne* [brosjyre]. Tilgjengelig: <http://www.trefokus.no/resources/Treindustriens-lille-gronne.pdf>
- [68] T. S. Wesser Plesser, "Limsystemer for limtre og sponplater - Sammensetning og miljøegenskaper," SINTEF Byggforsk, Oslo, Forskningsrapport, ISBN: 9788253612690 Rapportnr. 94, 2012.
- [69] E. V. Thorenfeldt og T. M. Jensen, "Sikkerhet av betongkonstruksjoner," presentert på Medlemsmøte Norsk Betongforening, Stavanger 02.02.2010.
- [70] J. Schneider, *Introduction to Safety and Reliability of Structures*. Zürich: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 1997.
- [71] Norges vassdrags- og energidirektorat, "Retningslinje for laster og dimensjonering," 2003.
- [72] Norsk treteknisk institutt. (2011). *Lydgulv, massivtredekke med pukk, tørr II* [Internett]. Tilgjengelig: [http://www.trefokus.no/resources/filer/massivtre-byggesystemer/263-Lydgulv-Massivtredekke-med-pukk-trr-II-A4\\_aNICp.pdf](http://www.trefokus.no/resources/filer/massivtre-byggesystemer/263-Lydgulv-Massivtredekke-med-pukk-trr-II-A4_aNICp.pdf) [Hentet 27.04.2020]
- [73] M. K. Silseth, "Egenlaster for bygningsmaterialer, byggevarer og bygningsdeler," SINTEF, Teknisk anvisning nr. 471.031 [Hentet 20.03.2020], 2013.
- [74] Norsk treteknisk institutt. (2011). *Lydvegg, 2x100 mm massivtre, 13 mm gips på to sider* [Internett]. Tilgjengelig: [http://www.trefokus.no/resources/filer/massivtre-byggesystemer/243-Lydvegg-2x100-Massivtre-13-mm-gips-p-to-sider-A4\\_aprGw.pdf](http://www.trefokus.no/resources/filer/massivtre-byggesystemer/243-Lydvegg-2x100-Massivtre-13-mm-gips-p-to-sider-A4_aprGw.pdf) [Hentet 27.04.2020]
- [75] Standard Norge, "Eurokode 7: Geoteknisk prosjektering Del 1: Allmenne regler," NS-EN 1997-1:2004+A1:2003+NA:2016.
- [76] O. R. Aarhaug, *Geoteknikk og fundamenteringslære 2*. Oslo: NKI Forlaget AS, 2013.
- [77] Standard Norge, "Eurokode 1: Laster på konstruksjoner Del 1-3: Allmenne laster - Snølaster," NS-EN 1991-1-3:2003+A1:2015+NA:2018.
- [78] Standard Norge, "Eurokode 1: Laster på konstruksjoner Del 1-4: Allmenne laster - Vindlaster," NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009.
- [79] Norgeskart. *Bergen* [Internett]. Tilgjengelig: <https://www.norgeskart.no/#!?project=norgeskart&layers=1006&zoom=11&lat=6731609.32&lon=-30214.20> [Hentet 22.03.2020]
- [80] Kartverket, Geovekst, og Bergen Kommune. (2020). *Lag høydeprofil* [Internett]. Tilgjengelig: [https://www.norgeskart.no/?\\_ga=2.4987507.1711600868.1583834412-406875455.1474149261#!?project=norgeskart&layers=1002&zoom=12&lat=6732233.45&lon=-30824.66&markerLat=6732233.449218749&markerLon=-30824.656249999993&panel=searchOptionsPanel&sok=Klaus%20Hanssens%20vei](https://www.norgeskart.no/?_ga=2.4987507.1711600868.1583834412-406875455.1474149261#!?project=norgeskart&layers=1002&zoom=12&lat=6732233.45&lon=-30824.66&markerLat=6732233.449218749&markerLon=-30824.656249999993&panel=searchOptionsPanel&sok=Klaus%20Hanssens%20vei) [Hentet 11.03.2020]
- [81] Norgeskart. *Nordnes, Bergen* [Internett]. Tilgjengelig: <https://www.norgeskart.no/#!?project=norgeskart&layers=1006&zoom=11&lat=6734007.59&lon=-31456.77> [Hentet 18.03.2020]
- [82] Standard Norge, "Eurokode 1: Laster på konstruksjoner Del 1-1: Allmenne laster - Tetthet, egenvekt, nyttelaster i bygninger," NS-EN 1991-1-1:2002+NA:2019.
- [83] H. Fossen. (2019). *Jordskorpen* [Internett]. Tilgjengelig: <https://snl.no/jordskorpen> [Hentet 18.03.2020]

- [84] H. F. Bungum, Haakon. (2019). *Jordskjelv* [Internett]. Tilgjengelig: <https://snl.no/jordskjelv> [Hentet 18.03.2020]
- [85] NORSAR. *Om jordskjelv - Hva er et jordskjelv* [Internett]. Tilgjengelig: <https://www.jordskjelv.no/om-jordskjelv/hva-er-et-jordskjelv/> [Hentet 18.03.2020]
- [86] Standard Norge, "Eurokode 8: Prosjektering av konstruksjoner for seismisk påvirkning Del 1: Allmenne regler, seismiske laster og regler for bygninger," NS-EN 1998-1:2004+A1:2013+NA:2014.
- [87] Standard Norge, "Eurokode 1: Laster på konstruksjoner Del 1-2 Almenne laster - Laster på konstruksjoner ved brann," NS-EN 1991-1-2:2002+NA:2008.
- [88] Standard Norge, "Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger," NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:2010.
- [89] Standard Norge, "Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner Del 1-2: Brannteknisk dimensjonering," NS-EN 1995-1-2:2004+NA:2010, NS-EN 1995-1-2:2004+NA:2010.
- [90] H. Liven og K. Bell, "Limtreboka - Beregningseksempler," Norsk Limtreprodusenters Forening, 2018.
- [91] H. Einstabland, "Statikkformler for bjelker," SINTEF, Teknisk anvisning nr. 421.051 [Hentet 20.04.2020], 2019.
- [92] Stora Enso. (2016). *CLT Design Software User Manual* [Internett]. Tilgjengelig: [https://calculatis.storaenso.com/Dokumentation/CLT-Engineer\\_Manual.pdf](https://calculatis.storaenso.com/Dokumentation/CLT-Engineer_Manual.pdf)
- [93] H. Danielsson. *CLT - Design and use* [presentasjon ved Lund Universitet]. Tilgjengelig: [http://www.kstr.lth.se/fileadmin/kstr/pdf\\_files/Timber\\_Engineering\\_2017/CLT\\_-\\_design\\_and\\_use\\_new.pdf?fbclid=IwAR1sEEaa9JwWOBV6FTYfMebmRIJ9pyLZkJJiotzNWQRT6-WYA3QVi-hC7xY](http://www.kstr.lth.se/fileadmin/kstr/pdf_files/Timber_Engineering_2017/CLT_-_design_and_use_new.pdf?fbclid=IwAR1sEEaa9JwWOBV6FTYfMebmRIJ9pyLZkJJiotzNWQRT6-WYA3QVi-hC7xY)
- [94] A. Homb, "Kriterier for opplevde vibrasjoner i etasjeskillere," SINTEF Byggforsk, Oslo, Prosjektrapport 8, ISBN: 978-82-536-0976-8, 2007.
- [95] Norsk Treteknisk Institutt. (2011). *Knutepunkt ikke-elastisk opplager, "tungt" overgulv uten gulvvarme* [Internett]. Tilgjengelig: [http://www.trefokus.no/resources/filer/massivtre-byggesystemer/225-Knutpunkt\\_-\\_ikke-elastisk-opplager\\_-\\_tungt-overgluv-uten-gulvvarme-A4\\_FQb9o.pdf](http://www.trefokus.no/resources/filer/massivtre-byggesystemer/225-Knutpunkt_-_ikke-elastisk-opplager_-_tungt-overgluv-uten-gulvvarme-A4_FQb9o.pdf) [Hentet 03.05.2020]
- [96] Standard Norge, "Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner Del 1-1: Almenne regler og regler for bygninger," NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2018.