

En sammenlignende LCA av optimale etasjeskillere i høye bygg

- og den tilknyttede CO2-premien

Herman Myrberg Rinholm

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: februar 2018

Hovedveileder: Rolf André Bohne, IBM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk

Forord

Denne masteroppgaven er avsluttende oppgave i hovedprofil bygnings- og materialteknikk ved Institutt for bygg- og miljøteknikk ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU). Oppgaven er skrevet over 20 uker og tilsvarer 30 studiepoeng.

Jeg vil takke Rolf André Bohne som har vært veileder for denne oppgaven. Jeg vil også takke Anders Homb og Christofer Skaar ved SINTEF Byggforsk for god veiledning under en inspirerende sommerjobb som la mye av grunnlaget for denne oppgaven. Spesielt vil jeg takke Anders Homb for gode tilbakemeldinger innen lydrelaterte spørsmål. En stor takk rettes også til Bård Solem for gode tilbakemeldinger underveis og for hjelp til å utforme illustrasjoner og snittegninger. Til slutt rettes en takk til medstudenter Simon Liseth Langedal og Frederic-Sebastian Hermansen for faglig tilbakemelding innen betongrelaterte spørsmål.

Trondheim, 9.2.2018

Herman Myrberg Rinholm

Sammendrag

Å bygge høye og tette byer fører til et lavere energibehov per person og mer effektive transportsystemer. Samtidig må høye bygg dimensjoneres for større laster, som krever økt materialbruk per kvadratmeter sammenlignet med lavere bygg. I litteraturen er det på dette grunnlag beskrevet en «premie» for å bygge høyt, som kan omhandle både CO₂- utslipp, energibruk og materialbruk. Det er gjennomført flere studier som undersøker denne premien, noen med fokus på helhetlige bygg, andre med fokus på forskjellige deler av et bygg (energibruk, bæresystem, tekniske installasjoner, osv.).

Det stilles strenge krav til etasjeskillere når byggehøyden økes, spesielt med tanke på brannsikkerhet, lydisolasjon og spennvidde. Samtidig må høyden på etasjeskillet tas hensyn til for å utnytte bygningshøyden på en effektiv måte. Når man sammenligner karbonfotavtrykket til ulike bygningskomponenter er det viktig å se på løsninger som oppnår de samme kravene og behovene innen alle relevante aspekter, å kun se på for eksempel den bærende delen er ikke nok. Hvis de materialene som kreves for å oppnå lyd- og brannkrav inkluderes, vil resultatene endre seg.

Tre er et bygningsmateriale med gode klimaegenskaper, som benyttes i økende grad også i høye bygg. Det kan enkelt settes sammen på fabrikken til lette elementer som fører til en rask og effektiv byggeprosess. Samtidig er det et materiale som møter på utfordringer spesielt når det kommer til brannsikkerhet, lydegenskaper og stivhet. Det forskes mye på dette området, og ved å benyttes de riktige løsningene kan flere av disse utfordringene løses.

Den overordnede hensikten med denne masteroppgaven har vært å undersøke potensialet for å redusere klimagassutslipp fra byggebransjen ved å finne klimavennlige etasjeskillere som oppfyller alle relevante krav for et bygg. Oppgaven undersøker to problemstillinger:

1. Finnes det en CO₂-premie for byggehøyde knyttet til etasjeskillere?
2. Hvilke løsninger er optimale for etasjeskillere i høye hus med tanke på klimagassutslipp og andre funksjonelle krav?

For å undersøke den første problemstillingen er det utført et litteraturstudie som ser på sammenhengen mellom byggehøyde og klimagassutslipp for etasjeskillere spesielt. Her er det kommet fram til at brannkrav kan føre til en betydelig premium ved bygg opp til fem etasjer. For høyere bygg er det ikke funnet et entydig svar på om det finnes en premium knyttet til etasjeskillere. Etasjeskilleres generelle betydning for klimagassutslippet til høye bygg er derimot belyst, hvor det viser seg at de spiller en sentral rolle.

For å undersøke den andre problemstillingen er det utført en livssyklusanalyse for å sammenligne klimagassutslippet til fire forskjellige dekketyper; massivtredekker, trehulldekker, flatdekker av betong og hulldekker av betong. Dekkene er dimensjonert for spennvidder på 5, 7 og 10 meter, med en nyttelast på 3 kN/m^2 og med en brannmotstand på REI 90. Trinnydningnivå og luftlydsreduksjonstall varierer ut fra hvilke tilleggskonstruksjoner som benyttes. Tilsammen er 176 forskjellige konfigurasjoner undersøkt.

I et klimagassperspektiv kommer etasjeskillere med bæresystem av tre i de aller fleste tilfeller bedre ut enn etasjeskillere av betong. Likevel er det viktig å fokusere på de tilleggskonstruksjonene som kreves for å oppnå tilfredstillende brannsikkerhet og lydisolering, da det viser seg at dette kan stå for en betydelig del av de totale klimagassutslippene. I de tilfellene der de minst gunstige tillegsmaterialene velges for dekkene av tre, ser vi klimagassutslippet kan bli høyere enn et gjennomsnittlig betongdekke.

For etasjeskillere av betong ser vi en tilnærmet lineær sammenheng mellom klimagassutslipp og lydegenskaper. For massivtre- og trehulldekker er ikke denne sammenhengen like tydelig, som fører til at flere løsninger skiller seg ut med både lave klimagassutslipp og relativt gode lydegenskaper.

Avslutningsvis viser resultatene fra denne studien at det er et stort potensiale for å redusere klimagassutslipp i byggebransjen ved å benytte etasjeskillere av tre, selv når det settes strenge krav til lydisolasjon, brannmotstand og strukturelle egenskaper.

Summary

Studies show taller and more densely populated cities lead to a lower energy use per person and more efficient transportation systems. However, tall buildings need more and stronger materials per square meter to cope with the increased load. In literature a so-called premium for building tall, in terms of material use, energy use or CO₂-emissions is described.

Flooring systems of tall buildings need to achieve several functions. For tall buildings, matters such as fire safety, sound insulation and span length are essential. When comparing the CO₂-emissions of different building components it is important to compare solutions achieving the same demands and needs for all relevant aspects. Comparing floor systems based on one functionality, e.g. load bearing, is not enough. If materials needed to achieve sound requirements and fire safety are included, the greenhouse gas emissions may change.

Wood is a low-emission building material with an increasing use in tall buildings. It is a low-weight material and can be easily pre-fabricated, ensuring a fast end economically efficient building process. At the same time, it faces major challenges within fire-safety, sound insulation and stiffness. However, a lot has happened on this topic the recent years, and by using the appropriate solutions these challenges can be solved.

The overall purpose of this master's thesis has been to investigate the potential for reducing greenhouse gas emissions from the construction industry by finding climate-friendly floor-to-ceiling units that meet all-important requirements for a building. The thesis examines two issues:

1. Is there a CO₂-premium for building height related to floor systems?
2. What flooring system solutions are optimal for use in tall buildings with regards to greenhouse gas emissions and other functional requirements?

To investigate the first issue, a literature survey regarding the CO₂-premium have been conducted. Results show fire safety demands can lead to a considerable premium for building height related to floor systems. For taller buildings, there is no unambiguous answer to whether there is a premium associated with floors or not. However, the survey show floor systems is responsible for a large amount of the total material-related CO₂-emissions for a building.

To investigate the second issue, a comparative LCA concerning four different flooring systems have been conducted. The flooring systems are: wooden massive slabs, wooden hollow-core slabs, concrete flat slab and concrete hollow core slabs. The flooring systems are dimen-

sioned for spans at 5, 7 and 10 meters, with a live load of 3 kN/m^2 and a fire resistance of REI 90. The impact sound level and the airborne sound insulation vary with the additional constructions used. In total, 176 different configuration tests are performed.

Overall, the wooden systems show lower greenhouse gas emissions compared to the ones of concrete. At the same time, it is important to focus on the additional materials needed to achieve sound insulation criteria. If the least favorable additional materials are chosen for the wooden floor systems, we see the greenhouse gas emissions may be higher than an average concrete floor system.

As a final conclusion, this study show there is a great potential for reducing the greenhouse gas emissions related to the construction industry by utilizing wooden flooring systems, especially hollow-core wooden slabs, even when criteria such as sound insulation, fire safety and other structural properties are accounted for.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	ii
1 Introduksjon	3
1.1 Bakgrunn	3
1.2 Formål	4
1.3 Oppgavens struktur	4
2 Teori	7
2.1 Klimaendringer	7
2.1.1 Globalt oppvarmingspotensial	8
2.1.2 Strålingspådriv	8
2.1.3 Tidshorisont for GWP	8
2.2 Klimaendringer og byggebransjen	9
2.2.1 Reduksjonspotensiale i byggebransjen	11
2.3 LCA	11
2.3.1 Fasene i en LCA	12
2.3.2 Analyseperspektiv for en LCA	14
2.4 LCA i bygg	14
2.4.1 LCA for bærekraftige byggverk	15
2.4.2 Miljøvaredeklarasjoner	15
2.4.3 Energiregnskap eller klimagassregnskap	16
2.4.4 LCA av tre	17
2.4.5 LCA av betong	18
2.4.6 Lavkarbonbetong	19
2.5 Bæresystemer og etasjeskillere for fleretasjes høyhus	20
2.5.1 Betong som bygningsmateriale	20
2.5.2 Bæresystem av betong og stål	20

2.5.3	Etasjeskiller av betong	21
2.5.4	Tre som bygningsmateriale	22
2.5.5	Bæresystem av tre	23
2.5.6	Etasjeskiller av tre	24
2.6	Brann	25
2.6.1	Brannklasser	25
2.6.2	Brannmotstand	26
2.6.3	Brann og tre	27
2.6.4	Branntekniske løsninger for tre	28
2.7	Lyd	29
2.7.1	Akustiske grunnbegrep	29
2.7.2	Desibel	29
2.7.3	Lydabsorpsjon	30
2.7.4	Lydoverføring	31
2.7.5	Måling av luftlydisolasjon	31
2.7.6	Måling av trinnlydnivå	32
2.7.7	Byggeforskriftens krav	33
2.7.8	Omgjøringstall for spektrum	33
2.7.9	Omgjøringstall for utvidet frekvensområde	34
2.7.10	Resonansfrekvenser	35
2.7.11	Luftlydisolering av etasjeskillere	35
2.7.12	Trinnlydisolering av etasjeskillere	36
2.7.13	Lyd og tre	38
2.7.14	Lydtekniske løsninger for tre	38
2.7.15	Vibrasjoner	39
2.7.16	Komfortkriteriet	40
3	Litteraturstudie	41
3.1	Urbanisering og densitet	41
3.1.1	LCA av høyhus	42
3.2	CO ₂ -premium ved byggehøyde	42
3.2.1	CO ₂ -premium ved etasjeskillere	44
3.2.2	Indirekte CO ₂ -premium ved etasjeskillere	44
3.3	LCA sin rolle i byggebransjen	46
3.3.1	Materialenes rolle i en LCA	47
3.4	LCA av komponenter fremfor materialer	49
3.5	Trehulldekker	51

3.5.1	Woodsol	51
3.5.2	Produsenter	52
4	Metode	55
4.1	Oversikt over metodiske beslutninger	55
4.2	Metodiske valg for litteratursøk	56
4.3	Metodiske valg for mengdeberegninger	56
4.3.1	Lastkapasitet og spennvidder	57
4.4	Metodiske valg innen lyd	61
4.5	Metodiske valg innen brann	65
4.6	Metodiske valg for livsløpsanalysen	67
4.6.1	Systemgrenser	67
4.6.2	Utvalgskriterier for materialer benyttet i livsløpsanalysen	67
5	Resultater	73
5.1	Materialmengder	73
5.2	Utslippsfaktorer	74
5.3	Sammenheng mellom vekt og utslipp	74
5.4	Sammenheng mellom lyd og utslipp	76
5.4.1	Trinnlyd, luftlyd og CO ₂	77
5.5	Optimale etasjeskillere for boliger og kontorer	81
5.5.1	Bolig	82
5.5.2	Kontor	85
5.6	Sammenheng mellom spennvidde og utslipp	85
5.7	Etasjeskillernes høyde	86
5.8	Variasjon	88
6	Diskusjon	89
6.1	CO ₂ -premium knyttet til etasjeskillere	89
6.2	Klimaoptimale etasjeskillere	89
6.2.1	Gunstige materialvalg	89
6.2.2	Hvorfor massivtre og flatdekker kommer likt ut	90
6.3	Usikkerhet knyttet til mengdedata	91
6.3.1	Beregning av materialmengder	91
6.3.2	Spesifikke data i en generell analyse	92
6.4	Usikkerhet knyttet til utslippsfaktorer	92
6.4.1	Enkelt-EPDer	92

<i>INNHOLD</i>	1
6.4.2 Generiske verdier	93
6.4.3 Flere EPDer	93
6.4.4 Konsekvenser av et vugge-til-port analyseperspektiv	94
6.4.5 Miljøpåvirkningskategorier	95
7 Konklusjon	97
7.1 Finnes det en CO ₂ -premie for byggehøyde knyttet til etasjeskillere?	97
7.2 Hvilke løsninger er optimale for etasjeskillere i høye hus med tanke på klimagassutslipp og andre funksjonelle krav?	98
8 Anbefalinger til videre arbeid	101
Bibliografi	102
A Mailkorrespondanse	119
A.0.1 Josef Mynár, Product Specialist, Novatop	119
A.0.2 Ralf Wipper, Teknisk rådgiver, Dipl. Ing. Holzbau, Lignatur	120

Kapittel 1

Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Klimaendringer er en av de største utfordringene menneskeheten står ovenfor i dag, og det foreligger bred vitenskapelig konsensus om at menneskelige aktiviteter bidrar til global oppvarming. I november 2016 ble Paris-avtalen vedtatt. Her forpliktet 195 land seg til å bidra til nå 2-graders målet, slik at alvorlige konsekvenser for mennesker, samfunn og økosystemer unngås (UNFCCC, 2016).

Byggebransjen er ansvarlig for mer enn en tredjedel av de globale klimagassutslippene, slik at tiltak her kan ha stor effekt. I tillegg vil faktorer som økt urbanisering og befolkningsvekst føre til større behov for bygninger i framtiden. Følgelig definerer FNs klimapanel reduksjon av energibruk og klimagassutslipp i forbindelse med bygninger som et kritisk klimatiltak.

De seneste årene har økt fokus på å redusere energiforbruk og klimagassutslipp knyttet til driftsfasen i et bygg ført til at det relative bidraget fra produksjon av bygningsmaterialer har økt. I tillegg har det blitt økt fokus på å bygge høye og tettere byer, slik at utslipp knyttet til transport og infrastruktur reduseres. Ved å bygge høye bygg som bruker lite energi settes det samtidig strengere krav til hvilke materialer vi bruker, som betyr at bygningsmaterialenes rolle får økt betydning i et livsløpsperspektiv.

Bæresystemer for høyhus har tradisjonelt bestått av betong og stål. Dette er energiintensive materialer med et høyt bundet klimagassutslipp. For å redusere utslipp knyttet til fleretasjers bygg kan en løsning være å benytte bæresystemer av tre. Høye trebygg, spesielt basert på massivtre, er noe vi har sett en økning av de seneste årene både i Norge og resten av verden.

Tre har flere egenskaper som skiller seg fra betong; det er lettere og mykere, men har et høyere styrke-vekt forhold. Tre er også brennbar, men har en forutsigbar oppførsel der innbrenningen skjer tregt og treet beholder sin bæreevne sammenlignet med stål, som kan begynne å flyte ved høye temperaturer. Tre har bedre varmeisolerende egenskaper enn betong, men dårligere lydisolerende egenskaper. Det er med andre ord veldig mange forhold som må tas høyde for når ulike bygningsmaterialer sammenlignes. For at tre som bygningsmateriale skal få en større utberedning er det viktig at trebyggene ikke står tilbake for betongbygg på områder som brannsikkerhet, lydisolasjon, og andre funksjonelle egenskaper.

1.2 Formål

Den overordnede problemstillingen for masteroppgaven har vært å undersøke potensialet for å redusere klimagassutslipp fra byggebransjen ved å finne løsninger for etasjeskillere som benytter tre som bærende materiale. Forutsetninger som er satt er at løsningene skal oppfylle alle de viktigste kravene som settes for fleretasjes bygg, og at disse skal sammenlignes på et rettfærdig grunnlag med etasjeskillere av betong.

Oppgaven kan deles inn i to hoveddeler: 1) CO₂-premium knyttet til etasjeskillere og 2) klimaoptimale løsninger for etasjeskillere i høye bygg. Oppgavens formål har derav blitt formulert med disse forskningsspørsmålene:

1. Finnes det en CO₂-premie for byggehøyde knyttet til etasjeskillere?
2. Hvilke løsninger er optimale for etasjeskillere i høye hus med tanke på klimagassutslipp og andre funksjonelle krav?

CO₂-premium knyttet til etasjeskillere inngår som del av forskningsprosjektet «The Premium of Building Tall», og slutter seg til tidligere arbeider gjort her. Klimaoptimale løsninger for etasjeskillere i høye bygg er delvis knyttet til forskningsprosjektet «Woodsol», hvor en sommerjobb forfatteren hadde i 2017 var med på å danne mye av grunnlaget for denne oppgaven. Det viste seg at det var gunstig å kombinere disse to retningene siden begge temaene har mye med hverandre å gjøre.

1.3 Oppgavens struktur

Siden denne oppgaven berører mange forskjellige fagfelt har det blitt fokusert på å gi en grundig introduksjon til relevante tema, slik at teori kapitlet har fått stor prioritet. Resten

av rapporten er strukturert på følgende måte:

Kapittel 2 - Teori

Dette kapitlet gir en meget bred teoretisk introduksjon innen mange ulike tema. Klimaendringer, livsløpsanalyser og byggebransjens rolle innen disse temaene blir beskrevet. I tillegg gis det en teoretisk gjennomgang av ulike bæresystemer og konsepter for etasjeskillere i høye hus. Utfordringer relatert til brannsikkerhet i fleretasjers bygg og spesielt etasjeskillere blir berørt. Til slutt gis det en grundig gjennomgang av ulike akustiske begreper og lydisolerende tiltak som er relevante for etasjeskillere.

Kapittel 3 - Litteraturstudie - CO₂- premien ved etasjeskillere

I dette kapitlet presenteres relevant litteratur som handler om kompakt byutvikling og CO₂-premien knyttet til bygging av fleretasjers bygg. Den spesifikke premien knyttet til etasjeskillere blir undersøkt, og mulige påvirkningsfaktorer blir belyst.

Kapittel ?? - Litteraturstudie - klimaoptimale etasjeskillere

I dette kapitlet belyses viktige aspekter ved å sammenligne miljøprestasjonen til ulike konstruksjoner, hvor materialenes rolle i en LCA blir grundig beskrevet. I tillegg undersøkes konsekvensen av funksjonsbaserte tilnærminger og hva dette kan ha å si for LCA sin rolle i byggebransjen. Bakgrunnen for litteraturstudiet kan oppsummeres gjennom et utdrag som står i alle EPDer hos EPD-Norge: *«EPD av byggevarer er nødvendigvis ikke sammenlignbare hvis de ikke samsvarer med NS-EN 15804 og sees i en bygningskontekst»*.

Kapittel 4 - Metode

I dette kapitlet presenteres metoden som er benyttet for å finne klimaoptimale etasjeskillere. Metodiske valg for å finne representative verdier innen lyd, brann, materialmengder og utslippsfaktorer blir alle grundig belyst.

Kapittel 5 - Resultater

I dette kapitlet blir sammenhengen mellom ulike funksjonelle faktorer ved de undersøkte etasjeskillerene presentert. Dette gjelder sammenhenger mellom lydisolasjon, vekt, dekketykkelse og klimagassutslipp for etasjeskillere som oppfyller krav i henholdsvis fleretasjers boligbygg og fleretasjers kontorbygg.

Kapittel 6 - Diskusjon

Dette kapitlet diskuterer de viktigste funnene og gjør et forsøk på å se resultatene i en større sammenheng. Forhold rundt CO₂-premien knyttet til etasjeskillere blir diskutert, deretter

diskuteres forhold rundt klimaoptimale etasjeskillere for høye bygg. Til slutt gis det en grundig gjennomgang av forskjellige usikkerhetsfaktorer.

Kapittel 7 - Konklusjon

Dette kapitlet summerer de viktigste resultatene og hvordan resultatene kan tolkes. Forskningsspørsmålene gjengis og det belyses hvorvidt disse er besvart.

Kapittel 8 - Videre arbeid

Dette kapitlet fremlegger anbefalinger til videre arbeid.

Kapittel 2

Teori

2.1 Klimaendringer

Klimaendringer er en av de største utfordringene menneskeheten står ovenfor i dag. Det foreligger bred vitenskapelig konsensus om at menneskelige aktiviteter bidrar til global oppvarming. Hovedårsaken er forbrenning av fossile brensler og innvirkningen dette har på det naturlige karbonkretsløpet. Sementproduksjon og inngrep i landbruk og skogbruk har også bidratt. Rundt 3% av dagens naturlige karbonkretsløpet stammer fra menneskeskapte utslipp (Novakovic et al., 2007). Globale utslipp må ifølge FNs klimapanel reduseres med 50-85% innen 40-50 år for å unngå katastrofale konsekvenser. Konsekvensene av klimaendringene vil være avhengig av hvilket geografisk område man ser på. Hvis utslippene fortsetter som i dag er det sannsynlig at flere områder vil bli rammet av vann- og matmangel, mer ekstremvær og økt havnivå. På sikt kan slike konsekvenser føre til at livsgrunlaget til mange mennesker endrer seg, som igjen kan føre til økt risiko for økonomisk, sosial og politisk uro (IPCC, 2014).

I november 2016 ble Paris-avtalen vedtatt. Her forpliktet 195 land seg til å bidra til at den globale temperaturen i 2100 ikke blir mer enn 2 grader høyere enn den var i 1850 (UNFCCC, 2016). Norge har i dag mål om å bli en ledende nasjon innen klimavennlige og energieffektive bygninger. Stortinget har gjennom klimaforliket forpliktet Norge til å bli karbonnøytralt innen 2050 (Kommunal- og moderniseringsdepartementet, 2011; Klima og miljødepartementet, 2012). For å nå disse målene må energibruk og klimagassutslipp reduseres.

2.1.1 Globalt oppvarmingspotensial

GWP-verdi (Global Warming Potential) er et mål på hvor effektive de forskjellige drivhusgassene er når det kommer til global oppvarming. I mange tilfeller, som i en livssyklusanalyse, er det hensiktsmessig å omregne virkningen av alle drivhusgassutslippene til en felles indikator. CO₂ er den mest vanlige klimagassen og blir dermed brukt som grunnenhet i utregning av det globale oppvarmingspotensialet, med en GWP-verdi på 1. Tabell 2.1 viser oppvarmingspotensialet til forskjellige gasser. Metan har en GWP-verdi på rundt 22, som betyr at et utslipp av 1 kg metan tilsvarer et utslipp på rundt 22 kg CO₂ eq. Andre mindre vanlige gasser kan ha en GWP-verdi på flere tusen. Denne måten å regne ut det globale oppvarmingspotensialet er blant annet utviklet av FNs klimapanel (IPCC, 2013).

Tabell 2.1: Oppvarmingspotensial for forskjellige klimagasser

Klimagass	Oppvarmingspotensial
Karbondioksid (CO ₂)	1
Metan (CH ₄)	28
Lystgass (N ₂ O)	265
Hydrofluorkarboner (HFK)	≈ 3000
Perfluorkarboner	≈ 7000
Svovelheksafluorid	23500

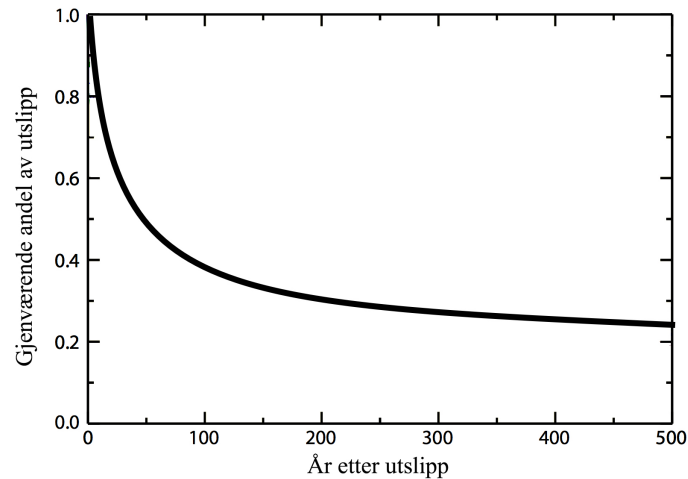
Kilder: (Marton, 2007; IPCC, 2014; EPA, 2016)

2.1.2 Strålingspådriv

Hvilken påvirkning de forskjellige klimagassene har på temperaturen på jorda er avhengig av hvilken innvirkning den har på *strålingspådrivet* i atmosfæren. Strålingspådrivet er et mål på hvordan en klimafaktor påvirker balansen mellom innadrettet stråling fra sola og utadrettet varmestråling fra jorda. Den måles i W/m² og er negativ for utslipp av f. eks. sotpartikler som reflekterer solstrålingen, og positiv for utslipp av drivhusgasser som reflekterer jordas varmestråling (Mæhlum, 2013).

2.1.3 Tidshorisont for GWP

Ved å ta hensyn til hvilket strålingspådriv de forskjellige gassene har over en viss tidshorisont, kan GWP-verdien defineres. De forskjellige drivhusgassene har ulik levetid i atmosfæren. For å illustrere hvordan CO₂-utslipp virker over tid er det vanlig å bruke en impuls-respons-funksjon som vist i Figur 2.1 (Joos et al., 2013). Denne funksjonen viser konsentrasjonen



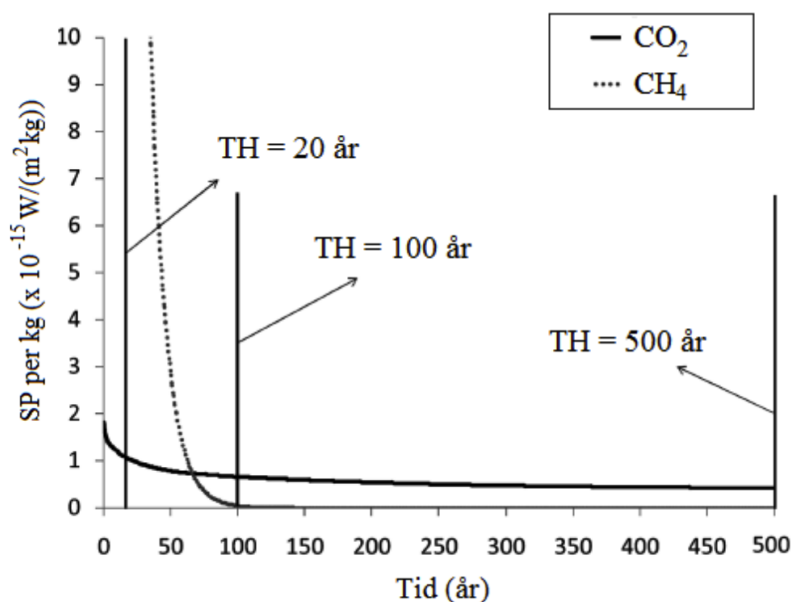
Figur 2.1: Impuls-respons-funksjon for CO₂. Figur hentet og tilpasset fra Joos et al. (2013), basert på et snitt av flere funksjoner

av CO₂ i atmosfæren forårsaket av et engangsutslipp som funksjon av tiden. Grunnet CO₂-opptak i havene og i biosfæren, synker mengden CO₂ i atmosfæren relativt raskt de første årene og er etter 100 år redusert med rundt 60%. Det som er spesielt med CO₂ er at resten av utslippet blir i atmosfæren i veldig lang tid. Så mye som en femtedel av engangsutslippet blir værende i atmosfæren i flere hundre, om ikke flere tusen år. Til sammenligning har metan en mye kortere levetid i atmosfæren, likevel har metan en høyere GWP-verdi siden oppvarmingsegenskapene til metan er mye høyere enn CO₂ de første 50 årene (Skullestad, 2016; Joos et al., 2013).

Arealet under grafene i Figur 2.2 illustrerer det totale strålingspådrivet de forskjellige gassene har. Ved omregning av klimagassutslipp til CO₂-ekvivalenter er det altså hensiktsmessig å betrakte tidshorizonten. Hvis vi betrakter det globale oppvarmingspotensialet et utslipp har over flere hundre år vil CO₂ utslipp veie veldig tungt. Hvis vi ser på oppvarmingspotensialet et utslipp har over en kortere periode, vil metan veie tyngre. FNs klimapanel ved Solomon et al. (2007) har definert tre forskjellige tidshorisonter i utregning av GWP-verdier; 20 år, 100 år og 500 år, hvor GWP100 er den mest benyttede verdien.

2.2 Klimaendringer og byggebransjen

I dag har energieffektivisering høy prioritet i mange utviklede land. I Norge har byggebransjen som helhet hatt et energiforbruk på 80-85 TWh/år de seneste årene, noe som tilsvarer 35-38% av Norges totale energibruk (Novakovic et al., 2007; Skree and Vatndal, 2008; SSB, 2015). Disse tallene stemmer godt overens med Europa for øvrig, som ifølge EU-kommisjonen



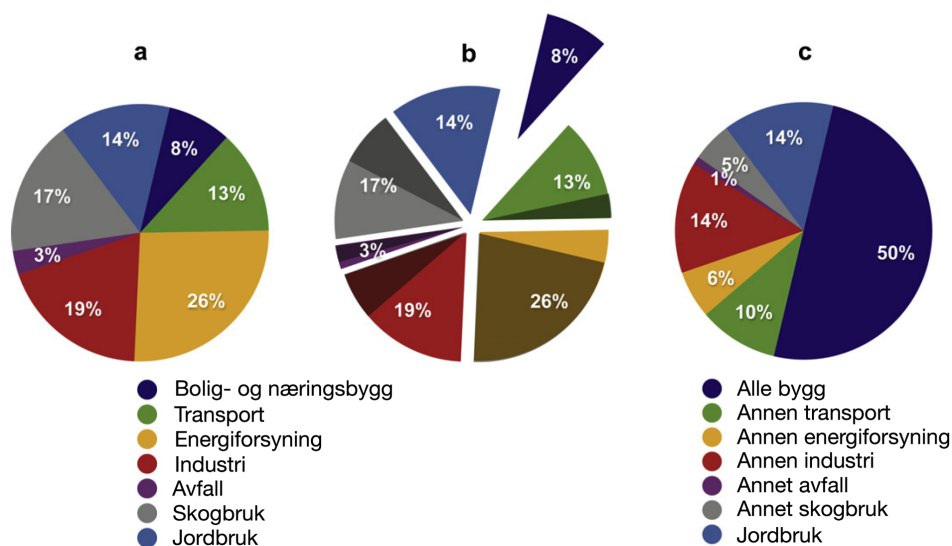
Figur 2.2: Strålingspådriv fra drivhusgassene CO₂ og CH₄. Figur hentet og tilpasset fra Levasseur et al. (2010).

(2017) sto for en energibruksandel på rundt 40%.

Når det kommer til byggebransjens klimagassutslipp er tallene veldig avhengig av hvilken kilde vi ser på og hvilken definisjon den kilden bruker. Ifølge en definisjon av FN's klimapanel, som bygger på utslipp fra energibruk i driftsfasen, står byggebransjen globalt for 8% av klimagassutslippene (Rogner et al., 2007). Miljødirektoratet (2016) definerer byggebransjens andel av klimagassutslipp i Norge til å være 2,4%, men her er kun utslipp knyttet til oppvarming tatt med i beregningene.

Ifølge en rapport produsert på vegne av Miljøverndepartementet i 2007 sto den norske byggesektoren for 13,5% av Norges totale klimagassutslipp (Marton, 2007). Her er utslipp fra produksjon og transport av byggematerialer, bygg- og anleggsvirksomhet og drift av bygninger tatt med. Utslipp fra elektrisitetsbruk i driftsfasen er derimot ikke tatt med, og CO₂-faktoren for elektrisitetsbruk i utregningen av klimagassutslipp er satt til 0 CO₂-eq./kWh.

For å finne den totale andelen av klimagassutslippene byggebransjen står for må innvirkningen byggebransjen har på alle andre bransjer også tas med. For EU er denne andelen blitt beregnet til å være 36% (EU-kommisjonen, 2017) og 39% for USA (USGBC, 2006). Som vist i Figur 2.3 estimerer Meggers et al. (2012) at så mye som 50% av verdens klimagassutslipp kan følge som direkte eller indirekte konsekvens av byggebransjen. Da er byggebransjens innvirkning på andre bransjer, som transport, energiforsyning, industri, avfall, skogbruk og jordbruk tatt med i beregningene.



Figur 2.3: Forskjellige framstillinger av byggebransjens andel av totale klimagassutslipp. Tradisjonell framstilling (a), byggebransjens andel innen de forskjellige sektorene (b), totale utslipp relatert til byggebransjen (c). Figur hentet fra Meggers et al. (2012).

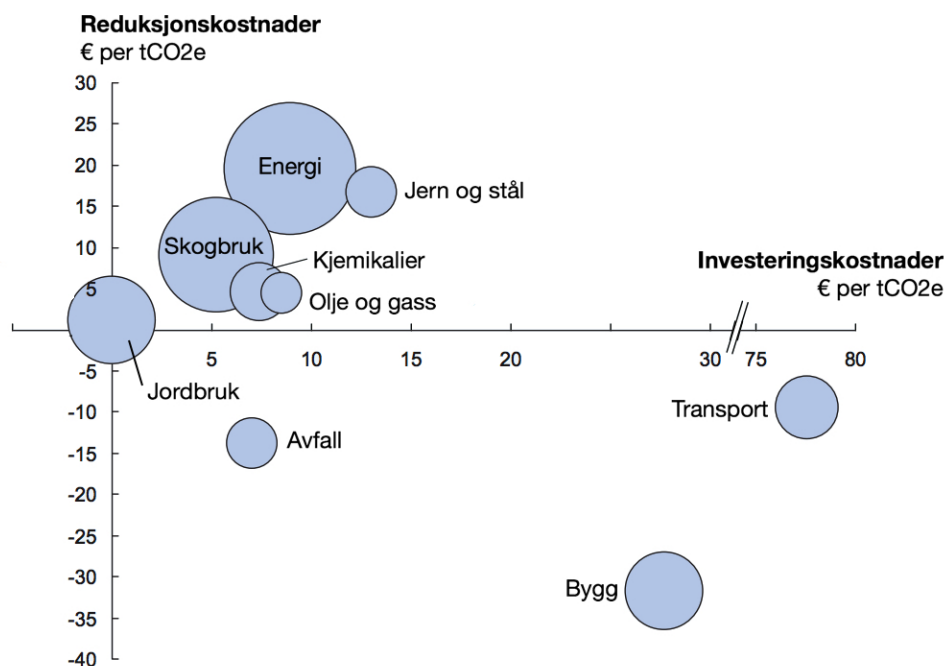
2.2.1 Reduksjonspotensiale i byggebransjen

En rapport publisert av Vattenfall/McKinsey (2009) undersøker livsykluskostnader til forskjellige klimagassreducerende tiltak. Ifølge kilden baserer studien seg på konsistente metoder som lager et godt grunnlag for å sammenligne bransjer og finne de overordnede mulighetene. Den legger til grunn potensialet som finnes i hver enkelt teknologi hvis de blir fullstendig fulgt opp fram mot 2030. Rapporten sier derimot lite om sannsynligheten for at tiltakene blir fulgt opp eller hvordan teknologiene vil utvikle seg.

Resultatene, som vist i figur 2.4 viser at tiltak innen sektorer som energi og skogbruk kan bidra i stor skala, men vil ha en samfunnsøkonomisk kostnad knyttet til seg. Tiltak innen byggebransjen derimot, som også vil være betydelige, vil i tillegg være samfunnsøkonomisk lønnsomme i et livsløpsperspektiv. Dette dreier seg om tiltak som reduserer energibruken og klimagassutslippene for både eksisterende og nye bygg. Samtidig ser vi tiltak i byggebransjen kreve store investeringer (x-aksen), som kan utfordre gjennomførbarheten til de ulike tiltakene.

2.3 LCA

En livsløpsanalyse (LCA - Life Cycle Analysis) er en systematisk analyse for å evaluere miljømessige konsekvenser knyttet til et produkt, et produktsystem eller en aktivitet ved å vurdere



Figur 2.4: Figuren viser de samfunnsøkonomiske kostnadene for klimagassredukerende tiltak i de forskjellige sektorene, sammen med de tilhørende investeringskostnadene som kreves. Størrelsen på boblene indikerer det klimagassredukerende potensialet hver sektor har. Figur hentet og tilpasset fra Vattenfall/McKinsey (2009).

hele livssyklusen til produktet eller aktiviteten (Nestaas, 2014). LCA-rammeverket er nyttig for å kunne gjennomføre konsistente sammenligninger av ulike systemløsninger og alternative teknologier med hensyn på miljøegenskaper. Dette innebærer en evaluering som tar hensyn til mange forskjellige miljøbelastningskategorier; global oppvarming, forsuring, toksiske utslipp med fler. Et bredt perspektiv er viktig for å unngå at tiltak innen en kategori ikke forårsaker andre betydelige miljøproblemer.

2.3.1 Fasene i en LCA

Et overordnet rammeverk for livsløpsanalyser er gitt av de to norske standardene «Miljøstyring - Livsløpsvurderinger - Prinsipper og rammeverk» og «Miljøstyring - Livsløpsvurderinger - Krav og retningslinjer» (NS-ISO 14040, 2006 og NS-ISO 14044, 2006). Disse definerer fire faser i en LCA:

Definisjon av mål og omfang

Den første fasen går ut på å definere målet med analysen og å sette systemgrensene deretter. Målet for en LCA kan være å sammenligne forskjellige alternativer, for eksempel to ulike produkter med samme funksjon, eller to ulike måter å produsere det samme produktet på. Der-

som to ulike produkter skal sammenlignes er det viktig at de har samme *funksjonelle enhet*. Den funksjonelle enheten karakteriserer produktet og er referansen alle miljøbelastninger relateres til. Systemgrensene definerer detaljnivået for modellen, hvilke miljøpåvirkningskategorier som inkluderes, tidshorisonten for miljøpåvirkningen og krav til datakvalitet. En systemmodell bygges opp av enhetsprosesser som materialer, produkter eller prosesser som er nødvendig for å levere den funksjonelle enheten. For hver av disse enhetsprosessene kreves det igjen andre enhetsprosesser tidligere i verdikjeden. Å inkludere mange prosesser gir et sikkert grunnlag, men er samtidig tidkrevende.

Livsløpsinventar

Den andre fasen innebærer kartlegging og kvantifisering av alle inn- og utgående strømmer av substanser og stressorer til enhetsprosessene i systemmodellen. Substansene omfatter energi, råmaterialer, produkter, bi-produkter, avfall og utslipp. Stressorene omfatter utvinning av ressurser, okkupasjon av naturområder og andre aktiviteter som kan skade miljøet. Grunnlagsdata for denne fasen kan innhentes fra produsenter, leverandører, LCI-databaser og miljødeklarasjoner. En mye brukt LCI database i Norge og Europa er Ecoinvent, som inneholder inventardata fra tusenvis av produkter og prosesser (Ecoinvent, 2018). Målet med denne fasen er å utarbeide et livsløpsinventar som kan danne en kvantifisert liste over alle utslipp og stressorer som forekommer som følge av produksjon av en funksjonell enhet av et produkt eller en prosess.

Konsekvensutredning

Den tredje fasen tar utgangspunkt i livsløpsinventaret og konverterer de ulike stressorene til resulterende miljøpåvirkning. En mye brukt metode for konsekvensutredning av miljøpåvirkninger er ReCiPe-metoden. Denne metoden inkluderer 18 ulike miljøpåvirkningskategorier som kvantifiserer et potensiale for miljøpåvirkning midt i årsaks-virkningskjeden (midtpunkts-indikatorer), eller som endelige konsekvenser (endepunkts-indikatorer). Et eksempel på en midtpunktindikator er GWP, som sier noe om potensialet for klimaendring i form av økt konsentrasjon av klimagasser i atmosfæren, men den sier ikke noe om resulterende temperaturendring eller skade på økosystemer. Endelige konsekvenser beskriver hvilken virkning miljøpåvirkningen har på menneskelig helse, økosystemer og tilgjengelige ressurser. Siden endepunkts-indikatorer baserer seg på en rekke antagelser og kompliserte beregninger, blir midtpunkts-kriteriene i større grad benyttet i en LCA (Skullestad, 2016).

Tolkning

Den siste fasen innebærer tolking av resultatene. Denne fasen presenterer funnene fra livsløpsinventaret og konsekvensutredningen, og bør levere resultater som er konsistente med

analysens mål og omfang.

2.3.2 Analyseperspektiv for en LCA

Analyseperspektivet for en livssyklusanalyse kan deles inn i regnskaps-LCA og konsekvensiell-LCA. En regnskaps-LCA forsøker å fordele utslipp til ulike løsninger eller funksjoner, gjennom å splitte utslipp oppstrøms i verdikjeden på en rettferdig måte mellom ulike produkter. Denne metoden benyttes ofte som grunnlag for generiske verdier eller for å utarbeide EPDer, og er i motsetning til en konsekvensiell LCA kontekstløs. En konsekvensiell LCA forsøker på sin side å beskrive miljøkonsekvensene av en endring i et system. Denne metoden baserer seg i stor grad på antagelser om fremtidige markedssituasjoner og er følgelig mer usikker, men det betyr ikke at den er mindre riktig.

For å belyse forskjellen på disse to analyseperspektivene presenteres to eksempler som omhandler henholdsvis stål og betong:

- For stål tilsier den globale markedssituasjonen at det vil være underskudd på resirkulert stål i lang tid fremover. I et konsekvensielt perspektiv vil altså konsum av stål, uavhengig om det er resirkulert eller ikke, føre til økt utvinning av jomfruelig stål. Dette tilsier at bruk av resirkulert stål får dårligere klimagassresultater i en konsekvensiell-LCA enn i en regnskaps-LCA.
- For trematerialer tilsier dagens markedssituasjon at naturgass sannsynligvis vil bli den mest brukte gassen i forbrenningsprosesser om 50 år. I et konsekvensielt perspektiv kan man altså anta at et treprodukt ved endt levetid, vil kunne substituere forbrenning av naturgass. Dette tilsier at bruk av tre får bedre klimagassresultater i en konsekvensiell-LCA enn i en regnskaps-LCA (Solli et al., 2016). Tre har også evnen til å lagre store mengder karbon i løpet av sin levetid som diskuteres videre i kapittel 2.4.4.

2.4 LCA i bygg

Som nevnt i kapittel 2.2 står byggebransjen for en stor andel av verdens energiforbruk og klimagassutslipp, dermed vil de tiltak som gjøres i denne næringen ha betydelig innvirkning på den globale oppvarmingen. I tillegg vil økt levestandard og befolkningsvekst føre til et økt behov for bygninger. Hvordan tilgangen til bygninger skal økes, samtidig som klimagassutslippene reduseres er altså en stor utfordring.

2.4.1 LCA for bærekraftige byggverk

Ifølge standarden for bærekraftige byggverk, NS-EN 15978, består en livsløpsvurdering av et bygg av de fire fasene produktfase, bruksfase, avhending og effekter utenfor systemgrensen, som vist i figur ???. Definisjon av de forskjellige fasene finnes i Standard Norge (2011). Fase- ne produksjon, konstruksjon og avhending inneholder tre forskjellige transportprosesser. A2 omfatter transport av materialer og produkter frem til fabrikkporten, A4 omfatter transport fra fabrikkport til byggeplass, mens C2 omfatter transport av materialer til avfallshåndtering eller avhending. B4 står for utskifting av materialer og er avhengig av de ulike produktenes og materialenes levetid. Miljøbelastninger og gevinster knyttet til gjenbruk og resirkulering av materialer eller energigjenvinning fra avfallsforbrenning skal rapporteres i fase D, som er definert utenfor bygningens livsløp. C4 inneholder alle miljøpåvirkninger fra avfallshåndtering som for eksempel forbrenning eller deponering.

Tabell 2.2: Faser for livssyklusanalyse for en bygning, som angitt i NS-EN 15978

A1-A3			A4-A5		B1-B5							C1-C4				D
Produkt			Konstruksjon		Bruk							Avhending				Effekter utenfor systemgrensen
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
Råmaterialer	Transport	Produksjon	Transport	Konstruksjon	Bruk av produkter	Vedlikehold	Reparasjon	Utskifting	Renovering	Energibruk	Vannbruk	Riving	Transport	Avfallshåndtering	Avhending	Gjenvinning

2.4.2 Miljøvaredeklarasjoner

Miljøvaredeklarasjoner (EPD - Environmental Product Declaration) er et sammendrag av en livsløpsvurdering som dokumenterer miljøegenskapene til et produkt eller et material. Verdiene som presenteres baserer seg på spesifikke data for produktet/materialet med den faktiske produksjonsteknologien som er benyttet. Dette gir lav usikkerhet sammenlignet med generiske data hentet fra LCI-databaser.

For å forenkle utarbeidelsen av en EPD kan man skille mellom et såkalt *forgrunnsystem* hvor produktspesifikke data benyttes for de mest sentrale prosessene, og et *bakgrunnsystem* hvor

generiske data benyttes for de mindre viktige prosessene. Hvis man sammenligner ulike materialer basert på EPDer er det viktig at de samme systemgrensene og funksjonelle enhetene benyttes.

Fleksible EPDer

For produsenter som har mange variasjoner av det samme produktet utvikles det ofte en fleksibel EPD. En forutsetning for dette er at produktet har en variabel, f.eks. tykkelse, tetthet eller farge. Fordeler med dette er at mye informasjon er samlet på et sted, som gjør det lettere å utføre beregninger på sammensatte konstruksjoner.

EPD-Norge

Næringslivets stiftelse for miljødeklarasjoner, EPD-Norge, har etablert et system for verifisering, registrering, publisering og vedlikehold av EPDer. Disse EPD-ene er utarbeidet i henhold til NS-EN 15804 og følger samme inndeling som vist i figur 2.2. Noen faser, som vannforbruk eller driftenergi, er imidlertid ikke like aktuelle for et materiale som for en bygning. EPD-ene oppgir inventardata som midtpunkt-indikatorer, hvor karbonopptak og karbonutslipp er definert til å være balansert for biogene produkter. Klimapåvirkningen til biogene produkter beskrives videre i kapittel 2.4.4.

PCR - Produktkategoriregler

Produktkategoriregler (PCR) legger grunnlaget for hvordan miljødeklarasjoner for et produkt skal utarbeides. Disse reglene utarbeides av bedrifter og andre interessenter som er en del av bransjen/industrien for den spesifikke produktgruppen. Her avgjøres det blant annet hvilke systemgrenser som skal benyttes, hvilke miljøpåvirkningskategorier som inkluderes og hvilke stoffer som skal inngå i utarbeidelsen av EPDene. Dette sikrer et godt sammenligningsgrunnlag av miljøprestasjonene til ulike produkter innen samme kategori. For bygningsmaterialer registrert hos EPD-Norge benyttes produktkategorireglene satt i henhold til NS-EN 15804 (EPD-Norge, 2018).

2.4.3 Energiregnskap eller klimagassregnskap

Påvirkningskategorier som benyttes i livsløpsvurderinger av bygninger eller bygningsdeler er typisk bundet energibruk i form av kilowattimer (kWh), eller klimagassutslipp i form av CO₂-ekvivalenter. Selv om disse to faktorene korrelerer i stor grad er det selvfølgelig bundne klimagassutslipp som er ønskelig å se på i et klimaperspektiv. Et klimagassregnskap skiller seg fra et energiregnskap ved at forbruk av energi fra forskjellige energibærere regnes om

til CO₂-ekvivalenter, for eksempel står en kWh produsert fra forbrenning av kull for et større klimagassutslipp enn en kWh produsert av vindkraft. I tillegg tar et klimagassregnskap hensyn til kjemiske prosessutslipp. Dette er av stor betydning for betongprodukter, ettersom rundt 50% av klimagassutslippene forårsaket av sementproduksjon er knyttet til prosessutslipp (Strand-Hanssen, 2015).

Andre egenskaper ved klimagassregnskap er at CO₂-ekvivalenter som referansepunkt har vist seg å kunne dokumentere en stor bredde av miljøbelastninger, siden det korrelerer godt med mange andre påvirkningsfaktorer (Steinmann et al., 2016). I tillegg er CO₂-ekvivalenter et vanlig begrep som sannsynligvis er bedre kjent blant beslutningstagere enn andre påvirkningsfaktorer (Skaar et al., 2017). Det kan også argumenteres for at bruk av klimagassregnskap fremfor energiregnskap gir mulighet for større fleksibilitet i planleggingen av nye bygg. For eksempel ved at valg av klimavennlige materialer gir rom for enklere energiløsninger og muliggjør en mer innovativ utvikling for byggtekniske løsninger Strand-Hanssen (2015).

På den annen side er det viktig å ta hensyn til at utelukkende bruk av CO₂-ekvivalenter kan overse andre viktige miljøpåvirkningskategorier. Spesielt økotoksisitet viser seg å ha liten korrelasjon med CO₂-ekvivalenter som påvirkningsfaktor (Steinmann et al., 2016).

2.4.4 LCA av tre

Tre er tradisjonelt sett på som et karbonnøytralt materiale siden biogent CO₂-utslipp fra forbrenning og forråtning av biomateriale en gang ble tatt opp fra atmosfæren gjennom fotosyntesen. Det er imidlertid viktig at den totale mengden skog, og dermed den totale mengden lagret CO₂, ikke reduseres. Et viktig forbehold for at tre skal være et klimavennlig materiale med nøytral karbonfluks er altså at det utvinnes på en bærekraftig måte der den totale mengden lagret karbon opprettholdes over tid.

Selv om trematerialer har en nøytral karbonfluks, betyr det imidlertid ikke at de har en nøytral klimapåvirkning. For det første vil det være knyttet CO₂-utslipp til felling, prosessering og transport av trematerialet fram til det er et ferdig produkt. For det andre vil forholdet mellom levetiden til treproduktet og tiden det tar for den aktuelle skogen å ta opp den samme mengden karbon etter den har blitt hugget (rotasjonsperioden), ha innvirkning på den globale oppvarmingen.

Hvordan biogene utslipp skal tas hensyn til i en livsløpsanalyse er et mye diskutert tema (Solli et al., 2016; Tellnes, 2015). Guest et al. (2013) foreslår en metode for å beregne GWP verdien for biogene CO₂ utslipp ved å kombinere impuls-respons-funksjonen for CO₂ (se

figur 2.1), med vekst-raten til den aktuelle biomassen. Hvis levetiden til produktet er meget kort, eksempelvis slik den er for biodrivstoff, vil konsentrasjonen av CO₂ i atmosfæren øke midlertidig. Dette vil føre til et økt netto strålingspådriv, som vil bidra til den globale oppvarmingen. Hvis trematerialer benyttes i produkter med lang levetid, som bygninger, vil dette føre til en midlertidig redusert CO₂-konsentrasjon, et netto redusert strålingspådriv og en kjølede effekt på den globale oppvarmingen. I et konsekvensielt perspektiv er det forøvrig viktig å inkludere effekten lagring og utslipp har på den globale karbonsyklusen. For eksempel vil lagring av karbon føre til at konsentrasjonen av CO₂ i atmosfæren synker, men samtidig vil karbonopptaket fra havet og biosfæren også reduseres for å oppnå ny likevekt.

Dagens praksis for LCA-analyser opererer med at biogene utslipp er klimanøytrale. For bygninger regnes det med at biogent karbon blir tatt opp i A1 og at tilsvarende mengde blir sluppet ut i C3 og C4, uten å ta hensyn til tidspunktene for opptak og utslipp. Denne praksisen overestimerer innvirkningen biobaserte produkter med lang levetid har på den globale oppvarmingen, samtidig som den underestimerer innvirkningen biobaserte produkter med kort levetid har på den globale oppvarmingen.

2.4.5 LCA av betong

Betong lages i dag ved å blande portlandsement og vann med tilslag av sand eller stein. Sementen reagerer deretter kjemisk med vannet og danner en hard masse som binder seg til tilslaget. Hoveddelen av karbonfotavtrykket til betong kommer fra portlandsementen. Portlandsement lages ved at kalkstein, med innslag av andre stoffer, knuses og brennes. Dette danner en kjemisk reaksjon hvor kalsiumkarbonat (CaCO₂) i kalksteinen blir til kalsiumoksid (CaO) og karbondioksid (CO₂). Omtrent halvparten av CO₂-utslippene knyttet til betong kommer fra denne kalsineringsprosessen, mens resten skyldes bruk av fossile brensler for å varme opp kalkstein.

Andelen armering som benyttes i ferdige betongkonstruksjoner vil også ha stor betydning, siden stål er et energiintensivt materiale og forårsaker betydelige klimagassutslipp ved produksjon. Selv om en stor andel av stål gjenvinnes i dag, er det som nevnt i kapittel 2.3.2 ikke nok til å møte verdens behov, slik at ny energiintensiv og jomfruelig stål må utvinnes (Pauliuk et al., 2013).

Karbonatisering av betong

Karbonatisering av betong er en kjemisk prosess som skjer over livsløpet til en betongkonstruksjon der CO₂ fra omgivelsene blant annet reagerer med CaO som finnes i betongen, og danner CaCO₃ - det samme mineralet som Portlandsement ble dannet av. Karbonatiseringen skjer fra utsiden og innover i betongkonstruksjonen som danner en karbonatiseringsfront. Byggteknisk er dette en uønsket prosess siden den senker pH-verdien og øker risikoen for korrosjon i armeringen. For konstruksjoner som kan bli utsatt for korrosjonsvennlige forhold, er det derfor viktig å dimensjonere betongen med nok overdekning slik at karbonatiseringsfronten ikke trenger inn til armeringen i løpet av konstruksjonens levetid.

70%-90% av revet betong i Norge blir knust og resirkulert for bruk i veibygging og drenering eller som tilslag i ny betong (Pade and Guimares, 2007; Lyng et al., 2014). Når betongen er knust og utsatt for luft vil karbonatiseringsprosessen gå mye raskere og en betydelig mengde CO₂ absorberes. Lyng et al. (2014) fant at rundt 15% av CO₂-utslippet knyttet til norsk betong absorberes i løpet av hele levetiden, da både knusing og resirkulering er inkludert. Likevel var det CO₂-opptak før riving som sto for den største andelen. CO₂-opptaket varierer fra produkt til produkt, for et hulldekke av betong med en antatt levetid på 60 år vil klimagassutslippen reduseres med 12% når karbonatisering tas med i LCA-regnskapet.

2.4.6 Lavkarbonbetong

Det foregår mye forskning på såkalt lavkarbonbetong. Dette er en paraplybetegnelse på betong som minimerer bruk av portlandsement ved å blande inn alternative bindemidler med lavere utslipp. Lavkarbonbetong skiller seg fra klassisk betong på flere områder; ofte kan de prestere bedre med tanke på tetthet, støpelighet og bestandighet, men vil støte på utfordringer med tanke på tidlig fasthet og nødvendig herdetid (Aarstad, 2016). De alternative tilsetningsmaterialene dreier seg hovedsaklig om flyveaske, slagg eller silikastøv:

- Flyveaske er et biprodukt fra kullindustrien og består av meget små partikler av silisiumoksid og aluminiumoksid. Innblandingsgraden kan variere mye der de mest miljøvennlige har opp til 50% innblandet flyveaske (Hermansen, 2017).
- Slagg er et biprodukt fra smelteverkindustrien og har blitt brukt som betongtilslag i mange år.
- Silikastøv er et biprodukt fra produksjon av ferrosilisium og består av ultrafine runde partikler av silisiumdioksid (Finnfjord, 2017).

Et annet type materiale som utvikles, men som i liten grad er kommersielt tilgjengelig, er betong basert på alkalieaktiverte materialer, deriblant geopolymerebetong. Her benyttes ikke portlandsement i det hele tatt, kun blandinger basert på flyveaske. Det endelige resultatet vil være en betong basert på helt andre bestanddeler og kjemiske reaksjoner sammenlignet med klassisk portlandbetong, men vil likevel kunne ha mange av de samme egenskapene (Myrdal, 2015).

2.5 Bæresystemer og etasjeskillere for fleretasjes høyhus

Et bæresystem for en bygning kan ifølge Ali and Moon (2007), Alzuhairy (2015) og Khan (1968) deles inn i tre deler.

1. Vertikalt bærende deler i form av stolper, søyler eller bærevegger som overfører kreftene ned til grunnen.
2. Horisontalt bærende deler i form av tak eller etasjeskillere som overfører kreftene til sine vertikalt bærende deler.
3. Avstivende elementer i form av fagverkskonstruksjoner eller stive skivelementer som skal gi konstruksjonen sideveis stabilitet.

2.5.1 Betong som bygningsmateriale

Betong er i dag det dominerende byggematerialet for større bygg. Betong ble lansert på slutten av 1800-tallet som uarmerte bæreelementer som kun tok opp vertikale krefter. Da stål ble introdusert som armering kunne betongen sitt bruksområde utvides betraktelig. Med betong og stål i samvirke, der betong tar opp trykkrefter og stålarmert tar opp strekkrefter kan betong brukes som både horisontalt bærende, vertikalt bærende og som avstivende elementer (Thue, 2014a).

2.5.2 Bæresystem av betong og stål

En typisk norsk boligblokk er bygd med plasstøpte betongdekker som bæres av tversgående innvendige bærevegger og med lette bindingsverkkonstruksjoner i ytterveggen. Bæringen kan også tas opp i fasaden, da ofte med bærende søyler innvendig som gir større muligheter

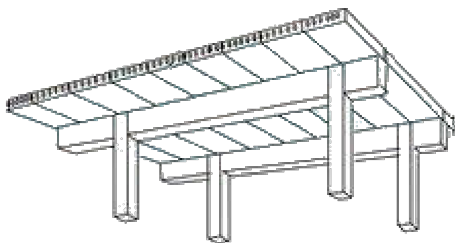
med tanke på spennlengder. Som vist i figur 4.4a finnes det også rammesystemer av søyler og bjelker i betong, som da ofte benytter seg av prefabrikerte betongdekker som kan ha betydelig lengre spennvidde sammenlignet med plasstøpt betong (Spenncon, 2017).

Stål benyttes også mye som bæresystem for høye hus i dag. Da gjerne i et rammesystem av søyler og bjelker som også kombineres med prefabrikerte betongdekker. Rammesystemer, enten de er basert på betong eller stål, har ofte ikke nok stivhet til å kunne ta opp horisontale krefter i seg selv, derfor er det vanlig at plasstøpt betong eller fagverk av stål benyttes som horisontalavstiving, ofte i heis- og trappesjaktene (Brynhildsen et al., 2008).

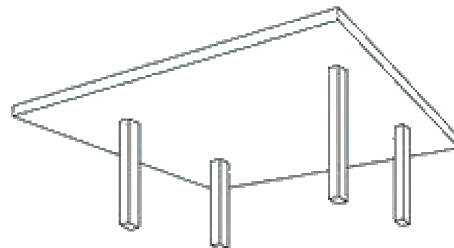
2.5.3 Etasjeskiller av betong

Uavhengig av om det benyttes stål eller betong som hovedbæresystem i høye bygg er etasjeskillerene som regel i betong (Ali and Moon, 2007). Det finnes flere forskjellige varianter med ulike egenskaper. Hovedsaklig er det geometri, armeringstype og nødvendig bæresystem som skiller dekkene. Armeringen i betongdekker kan enten være vanlig slakkarmering, forspent armering eller etterspent armering. Dekketypene relevante for denne oppgaven er slakkarmerte og etterspente massive flatdekker og hulldekker:

Figur 2.5: Illustrasjons av to typer bæresystem av betong



(a) Hulldekker med bæresystem av bjelker og søyler



(b) Massive flatdekker støpt direkte på søyler

Massive slakkarmerte dekker er en konstruksjon som er vanlig å benytte som etasjeskiller. Slike massive dekker støpes på plassen der nødvendig armering legges i forskalingen før utstøping og fester seg til stålet mens det herder. Det kan også benyttes prefabrikkerte forskalingsplater, også kalt plattendekker. Disse platene har armering delvis støpt inn i betongplaten som virker som hovedarmering i den ferdige utstøpte konstruksjonen. Dette gir bæreevne i byggefasen og reduserer forskalingsarbeidet. Vanlige slakkarmerte massive dekker kan ha en spennvidde opp mot 7,5 m. Ved forspenning av forskalingsplatene kan spennet økes opp til 10,5 m (Betongelementforeningen, 2017).

Massive etterspente dekker er en konstruksjonsteknikk som blir mer og mer benyttet i Norge. Slike dekker støpes også på byggeplassen og teknikken går ut på at spennarmering legges i plasthylser slik at den ikke har kontakt med støpen når den herder. Etter at støpen har oppnådd en viss fasthet strekkes spennarmeringen samtidig som den nedre delen av betongdekket presses sammen, som betyr at dekket får en viss oppbøyning. Dette utnytter materialegenskapene til spennarmering og betong på en mer effektiv måte og fører til at lengre spenn og/eller tynnere dekker kan oppnås.

Flatdekker er en spesiell konstruksjonstype som baserer seg på at massive dekker plassstøpes direkte på søyler, som vist i figur 4.4b. Dekkeplaten har hovedarmering i to kryssende retninger og er momentstivt forbundet med søylene, slik at det ikke er behov for bærende bjelker. Slike dekker kan også etterspennes, og har flere fordeler med tanke på byggehøyde, geometrisk tilpassingsdyktighet, materialmengder og spennvidder (Sælen, 2016).

Hulldekker av betong er prefabrikerte dekker med hulrom som forspennes på fabrikken. Dette gir et effektivt tverrsnitt som sparer materialer. Forspenning fungerer på en litt annen måte en etterspenning, men gir i prinsippet de samme fordelene. I praksis brukes det kun på prefabrikerte dekker, ved at spennarmeringen blir lagt i strekkbenker før støpen helles i formen rundt. Etter at støpen har festet seg til spennarmeringen og oppnådd en viss fasthet slippes spennarmeringen som fører til at nedre del av betongen presses sammen og dekket får en viss oppbøyning (Ollendorff, 2012; Betongelementforeningen, 2017). Det finnes også andre typer betongdekker som bubbledeck, ribbeplater, lettbetongdekker og porebetongdekker, men disse er ikke relevante for oppgaven.

2.5.4 Tre som bygningsmateriale

Tre er godt egnet som byggemateriale siden strukturen til cellulosefibre i treet gjør at materialet er et lett samtidig som det har relativt høy styrke. Tre er imidlertid et mykt materiale sammenlignet med betong og stål, som gjør at det har dårligere egenskaper med tanke på bøyemotstand. Klassisk trevirke har også begrensninger når det kommer til dimensjoner på planken, og dermed også bæreevnen. Det er derimot utviklet mange materialer basert på tre som muliggjør store dimensjoner og utvider bruksområdet betraktelig:

- **Limtre** er laminert trevirke i form av bjelker, buer osv. som er fremstilt ved å lime sammen enkeltbord der fiberretningen i alle elementer går tilnærmet samme vei. Slik laminering gir stor styrke og formstabilitet og muliggjør konstruksjonselementer i mange former og dimensjoner. For å utnytte tømmeret på en god måte plasseres de sterkeste bordene i topp og bunn, mens bord med lavere kvalitet plasseres i midten (Tronstad,

2009).

- **Massivtre** består lameller (bord eller plank) sammenføydd til elementer med spiker, skruer, tredybler, lim eller strekkstag, og benyttes som både bærende og ikke-bærende konstruksjonselementer i vegger, tak og etasjeskillere. Ved sammenføyding av massivtreelementer med dybler benyttes en metode som baserer seg på at massivtreet er noe tørrere enn dyblene og miljøet rundt ved installering. Etterhvert som massivtreelementene fuktes opp vil de låses godt sammen med dyblene. *Bordstabelementer* er massivstreelementer med flere kantstilte/stående lameller festet parallelt til hverandre. Dette er blant de tidlige eksemplene hvor massivtre ble benyttet i Norge og har visse utfordringer når det kommer til tetthet og fuktbevegelse. *Krysslagte elementer* (CLT - Cross Laminated Timber) består av lameller i flere sjikt med 90 graders vinkel i forhold til hverandre. Dette er et populært massivtreelement som normalt leveres med tre, fem eller syv lag, hvor de ytterste lagene består av treverk med høy kvalitet. Ved å krysslaminere lamellene oppnår elementene god tetthet, i tillegg til at toveis armering kan motstå fuktbevegelse (Glasø, 2017; Kristensen, 2001). Massivtreelementer er godt egnet for prefabrikasjon, hvor de eksakte målene kan formes på fabrikken, som tillater en rask og effektiv byggefase.
- **LVL - Laminated Veneer Lumber** består av flere tynne finérslag som er limt sammen til bjelker eller plater som kan ta opp store laster. Finér produseres ved at tynne ark eller skiver av tre skrelles av tømmerstokker. For parallellfinér er lagene limt slik at fiberretningen ligger parallelt med bjelkens lengderetning i alle lag. For kryssfinér har to eller flere lag blitt lagt med fiberretningen på tvers av bjelkens lengeretning (Moelven, 2017; Ellingsrud, 2011)

2.5.5 Bæresystem av tre

Bruk av tre har lange røtter innen boligbygging i Norge og brukes i stor skala også i dag. Tradisjonelt sett har dette bestått av lette bæresystemer begrenset til to eller tre etasjer, hovedsaklig grunnet brannsikkerhet. Forskning og utvikling på nye bæresystemer av tre har derimot ført til at det i dag ikke finnes en maksimal grense for høyde på trebygg, så lenge sikkerheten kan dokumenteres. Ifølge Glasø (2004) kan bæresystemer av tre deles inn i fire kategorier, hvor det i praksis kan forekomme kombinasjoner av disse.

- **Bindingsverk** er det dominerende bæresystemet for norkse boliger. Dette systemet består av treverk i standarddimensjoner som tar opp vertikale krefter og platekledninger e.l. som tar opp horisontale krefter.

- **Bjelke-/søylesystemer**, eller rammesystemer, består av limtresøyler og limtre- eller LVL-bjelker med store dimensjoner. Momentstive rammer tar opp de horisontale kreftene.
- **Kryss-struktur** består av bjelker, søyler og staver. Dette danner et fagverk som tar opp de vertikale kreftene og stiver av bygget.
- **Elementstruktur** består av massivtre som kan benyttes som både vertikalt bærende og avstivende elementer i et bæresystem alene, eller i kombinasjon med bjelke-/søylesystemer.

2.5.6 Etasjeskiller av tre

Det finnes flere forskjellige alternativer når det kommer til etasjeskillere av tre. Trebjelkelag er den mest vanlige, men massivtre og gitterbjelkelag benyttes i økende grad i Norge. Hulldekker og komposittløsninger er ikke like vanlige.

- Trebjelkelag er en serie av bjelker som ligger med jevn avstand fra hverandre og som sammen danner bæresystemet i en etasjeskiller. De kan bestå av konstruksjonsvirke (heltre), sammenlimte tverrsnitt i form av limtre, I-bjelker eller parallellfiner, med gulv på oversiden og eventuelt himling på undersiden (Ramstad, 2011).
- Gitterbjelkelag virker på samme måte som trebjelkelag, men har består bjelkene av fagverk med knutepunkter av spikerplater eller innpressede ståldiagonaler (Homb and Kolstad, 2012).
- Massivtre kan brukes i form av bærende elementer i et etasjeskille. For å øke stivheten og muliggjøre lengre spenn kan trebjelker eller limtrebjelker limes/skrus på oversiden eller undersiden av elementet (Homb, 2009).
- Hultredekker består av et øvre og et nedre platelag av massivtre eller kryssfinér med vertikale steg av limtre, kryssfinér eller heltre. Dette danner et effektivt tverrsnitt med høy stivhet og lav vekt. I tillegg kan hulrommene i dekket fylles med mineralull eller materialer med høy vekt, som kan bedre egenskapene med tanke på lyd og vibrasjoner (Kristensen, 2001).
- Komsittløsninger kan bestå av ribbeelementer, massivtre eller hultredekker sammen med betong i et strukturelt samvirke, der betongen tar opp trykkrefter og treet tar opp strekkrefter. Eventuelt kan betong benyttes som dødvekt for å bedre lyd og vibrasjonsegenskaper (Åby and Hartnes, 2016; Fadai et al., 2012; Leyder et al., 2015).

2.6 Brann

Hvis det oppstår brann i et bygg kan det føre til store menneskelige og materielle skader. Hvert år dør mellom 40 og 60 personer som følge av brann i Norge og mellom fire og fem milliarder kroner utbetales årlig i erstatningsbeløp (Direktoratet for samfunnsikkerhet og beredskap, 2017; Finans Norge, 2017). For å sikre seg mot brann vil kunnskap, aktsomhet og ansvarsfølelse være meget viktige menneskelige faktorer (Hoel et al., 2017). Byggteknisk er det også mye som kan gjøres både aktivt og passivt. Aktive tiltak inkluderer blant annet slukkeanordninger i form av sprinklersystemer eller vanntåkeanlegg. Passive tiltak for å sikre seg mot brann er i første rekke bruk av *brannceller* og *brannseksjoner*. Oppdeling av bygg i brannceller er en strategisk måte å unngå at brannen sprer seg videre til andre deler av bygget i den tiden som er nødvendig for rømning og redning (Krohn, 2013). En brannseksjon er i korte trekk en stor branncelle som omfatter større deler av et bygg, med strengere krav til brannmotstand.

2.6.1 Brannklasser

Ved brannteknisk prosjektering av bygg deler man inn i risikoklasser og brannklasser:

- **Risikoklasser** kategoriserer byggverk ut fra den trusselen en brann kan innebære for skade på liv og helse. Forhold som bestemmer risikoklasse er om bygget kun brukes sporadisk, om personene i bygget kjenner til rømningsforholdene, om bygget er beregnet for overnatting og om aktiviteten i bygget medfører stor eller liten brannfare.
- **Brannklasser** kategoriserer byggverk ut fra den konsekvens en brann kan innebære for skade på liv, helse, samfunnsmessige interesser og miljø. Brannklassen fastsettes ut fra risikoklassen og antall etasjer i bygningen eller brannseksjonen, og den danner grunnlag for å bestemme blant annet bygningdelerens nødvendige utforming.

En bygning kan ha forskjellige typer virksomheter og vil dermed også ha forskjellige brannklasser. En etasje eller del av etasje skal i så fall ha minst like høy brannklasse som etasjen/delen over. Et alternativ er å utforme bygningen slik at deler med ulike brannklasser ligger ved siden av hverandre og er skilt med seksjoneringsvegg. Bygninger i brannklasse 1 og 2 skal ha tilfredsstillende bæreevne og stabilitet i *nødvendig rømningstid*, altså tiden det tar fra brannstart til personene i bygningen har kommet fram til sikkert sted, før det forekommer temperaturer, branngasser eller røykutvikling som hindrer rømning (Krohn and Steen-Hansen, 2017). Bygninger i brannklasse 3 og 4 skal ha tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp (Krohn, 2017).

Tabell 2.3: Tabellen viser hvordan inndeling i brannklasser henger sammen med virksomhetstype, risikoklasse og antall etasjer. Byggverk utføres i brannklasse 4 der konsekvensen kan bli meget stor for miljøet eller samfunnet generelt.

Type virksomhet	Risiko- klasser	Brannklasser			
		En etasje	To etasjer	Tre og fire etasjer	Fem eller flere etasjer
Skur og driftsbygning	1	-	1	2	2
Kontor, industri og lager	2	1	1	2	3
Barnehage og skole	3	1	1	2	3
Bolig og internat	4	1	1	2	3
Salgs- og forsamlingslokaler	5	1	2	3	3
Hotell, sykehus, pleieinstitusjon	6	1	2	2	3

2.6.2 Brannmotstand

For at bygninger skal oppnå brannklassekravet er det viktig at hver bygningsdel har den nødvendige brannmotstanden. Denne kan testes på laboratorier på forskjellige måter og karakteriseres i følge NS-EN 13501-2 av fire kriterier med tilhørende bokstavkoder:

- Bæreevne - R
- Integritet - E
- Isolasjon - I
- Mekanisk motstandsevne - M

Bæreevne betegner bygningsdelens motstandsevne mot å rase sammen ved brann. Integriteten betegner bygningdelens motstandsevne mot at en brann sprer seg som følge av gjennomtrengning. Isolasjonen betegner bygningsdelens motstandsevne mot at temperaturen på ikke-eksponert side blir så høy at en brann oppstår. Mekanisk motstandsevne betegner bygningdelens evne til å motstå støt fra sammenstøtning av tilstøtende bygningsdeler. Bokstavkoden etterfølges av motstandstiden i minutter: 15, 30, 60, 90 osv. Preaksepterte ytelser beskrevet i TEK17 for bærende hovedsystem og sekundere bærende elementer som etasjeskillere er gitt i tabell 2.4.

Det stilles også krav til materialeegenskapene til de konstruksjoner som benyttes. Materialets bidrag til brannforløpet angis som A1, A2, B, C, D, E og F, hvor A1 er det strengeste og betyr at materialet ikke er brennbart. Røykproduksjon angis med s1, s2 og s3, der det er strengest krav til klasse s1. Produksjon av brennende dråper angis med d0, d1 og d2, der d0 betyr at det ikke er observert brennende dråper under prøving. Et eksempel på en klassifisering som er viktig å merke seg er A2-s1,d0, som betyr at materialet skal være tilnærmet ubrennbart,

Tabell 2.4: My caption

	Brannklasse 1	Brannklasse 2	Brannklasse 3
Hovedbæresystem	REI 30	REI 60	REI 90, A2-s1,d0
Etasjeskillere	REI 30	REI 60	REI 60, A2-s1,d0

ha lav røykproduksjon og ikke produsere brennende dråper. Der dette kravet stilles er det dermed ikke mulig å benytte trekonstruksjoner for å oppnå preaksepterte ytelser (Solheim et al., 2017).

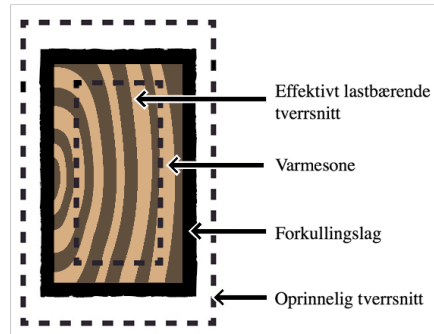
2.6.3 Brann og tre

Etter bybrannen i Ålesund i 1902 ble det forbudt å bygge høyere enn to etasjer med tre som bygningsmateriale i norske byer (Moen, 2017). Dette gjaldt fram til 1997, da byggeforskriften implementerte funksjonskrav framfor ytelseskra, som muliggjorde bygging av høyere trebygg. Ytelsesbaserte krav innebærer at det kun skal brukes preaksepterte løsninger. Dette er bygningstekniske løsninger hvor ytelsesnivået er så godt dokumentert på forhånd at de vanligvis kan brukes uten å utarbeide egen dokumentasjon for det konkrete prosjektet. Funksjonsbaserte krav innebærer på sin side at nye og uprøvde løsninger kan benyttes i prosjektet, så lenge brannsikkerheten kan dokumenteres til å være like bra eller bedre enn de preaksepterte løsningene (Eian and Kjelsen, 2013).

Tre er et brennbart materiale, men har en forutsigbar oppførsel når det utsettes for brann. Spesielt tyngre treløsninger med store dimensjoner, som limtre og massivtre, har blitt anerkjent for å ha veldig god brannmotstand. Når disse trestrukturene blir utsatt for brann vil det øverste laget ta fyr og brenne fort. Deretter vil det dannes et forkullingslag som isolerer og beskytter resten av trestrukturen. Dette vil føre til at innbrenningshastigheten er jevn og forutsigbar på typisk 0,6 til 0,7 millimeter per minutt (Johansen, 2017).

En vanlig måte å beregne brannsikkerhet for større trekonstruksjoner baserer seg på antagelsen om at stivhets- og styrkeegenskapene til et indre tverrsnitt ikke påvirkes av brannen. Som vist i figur 2.6 antar man med denne metoden at forkullingsonen ikke har styrke eller stivhet i det hele tatt. I tillegg vil varmesonen med ubrent treverk, som dannes på innsiden av forkullingsonen, ha så høy temperatur at man ignorerer styrke- og stivhetsegenskapene (Buchanan, 2002). Sammen med den aktuelle tretypens innbrenningshastighet, kan man da beregne hvor lang tid en trekonstruksjon kan stå imot brann.

I en slik beregning er det viktig å ta hensyn til hvilken type lim som benyttes i elementene.



Figur 2.6: Illustrasjon av beregningsmetode for større trekonstruksjoner

PUR-lim mister de bindende egenskapene ved 200-300 °C, som betyr at det forkullede sjiktet som beskytter resten av elementet faller av når temperaturen blir høy nok. Limtyper basert på formaldehyd mister derimot ikke de bindende egenskapene og holder dermed sjiktene på plass ved brann (Johansen, 2017).

2.6.4 Branntekniske løsninger for tre

Å kle trekonstruksjoner med gipsplater er et effektivt brannbeskyttelsestiltak. Gipsplatene vil øke tiden det tar før treverket blir påvirket av brannen, i tillegg til at konstruksjonens bidrag til brannen vil være svært liten eller neglisjerbar, så lenge gipsplatene holdes på plass. Ifølge (Glasø et al., 2005) har tester vist at bruk av 13 mm gipsplate samt to lag med 15 mm brann-gips ytterst, beskytter trekonstruksjoner slik at forkulling ikke starter gjennom hele brannforløpet. Andre tester har vist at to lag gipskledning alene også kan beskytte bakenforliggende trekonstruksjoner gjennom et helt brannforløp. Bruk av et lag gips beskytter ikke like godt siden temperaturen i det bakenforliggende treverket blir så høy at forkulling starter (Lieblein, 2016). Ifølge Hakkarainen (2002) vil hvert lag med gips forsinke forkullingstart med 20 minutter. Det skal sies at effekten av å bruke gipsplater som beskyttelse vil være avhengig av flere faktorer; type gipsplate, tykkelse på gipsplate og montering av gipsplate. Overflatebehandling som brannmaling og brannimpregnering vil også bedre egenskapene.

For å unngå tiltak som skjuler treoverflaten og begrenser den arkitektoniske friheten, kan tverrsnittet på selve konstruksjonen økes og frie treoverflater beholdes. For å beregne brannmotstanden til en slik konstruksjon kan metoden med redusert tverrsnitt benyttes. Her er det som nevnt en fordel å benytte limtyper som ikke mister de bindende egenskapene ved høye temperaturer.

Installasjon av sprinkling vil forhindre eller utsette tiden til overtenning og gjøre det lettere å bruke tre som bygningsmateriale og synlig overflate. Ved installasjon av sprinkling i en funksjonsbasert analyse, kan andre branntekniske ytelser reduseres for å finne et optimalt nivå på brannsikkerheten. Erfaringer fra USA viser meget få menneskelige og materielle skader der boligsprinkling er benyttet (Glasø et al., 2005).

Oppsummert kan det altså sies at brannsikkerheten i større bygninger i liten grad er avhengig av hvilket materiale som benyttes i de bærende konstruksjoner, så lenge den helhetlige brannsikkerheten ivaretas og riktige tekniske løsninger velges (Stenstad, 2002; Glasø et al., 2005; Egeli, 2011; TreTeknisk, 2013).

2.7 Lyd

2.7.1 Akustiske grunnbegrep

Lyd er hørbare svingninger som brer seg i et elastisk stoff (gass, væske eller fast stoff) i form av bølger. Når stoffet blir påvirket av en kraft begynner partiklene i stoffet å svinge om sin likevekttilstand, uten at det forekommer en permanent forflytning av partikler. Øret oppfatter disse svingningene ved at trommehinnen blir satt i bevegelse. I gass og væske brer lyd-bølgene seg som longitudinale trykkbølger. De hørbare endringene av lufttrykket omkring atmosfæretrykket kalles *luftlyd*. I fast stoff forplanter lydbølgene seg vanligvis som bøyingsbølger, men kan også forplantes som skjærbølger, torsjonsbølger og longitunalbølger. Svingninger i faste stoffer som er innenfor det hørbare området kalles *strukturlyd*. Lydhastigheten avhenger av elastisiteten og densiteten til det stoffet lyden beveger seg gjennom. For luft ved romtemperatur er lydhastigheten konstant ved 340 m/s (Gjesteland, 2017).

2.7.2 Desibel

De fysiske størrelsene som brukes i akustikken kan ha et meget stort variasjonsområde. Et eksempel på dette er lydtrykket, hvor et normalt øre kan oppfatte endringer i lufttrykket mellom $2 \cdot 10^{-5}$ Pa (høregrensen) til 10^2 Pa (smertegrensen), som gir et variasjonsområde på hele 10^7 . Disse enhetene oppgis derfor ved en logaritmisk skala som har måleenheten *desibel* [dB]. En desibel er en tiendedels Bel, hvor enheten Bel angir logaritmen til forholdet mellom to verdier. Innen akustikken er dette ofte forholdet mellom en verdi og en referanseverdi, hvor betegnelsen da blir «nivå». Med definisjonen for desibel angis lydtrykket som *lydtrykknivå*-

et, L_p , som vist i formel 2.1. Med denne definisjonen betyr det at lydtrykknivået varierer fra 0 dB (høregrensen) til 134 dB (smertegrensen) (Thue, 2014b).

$$L_p = 20 \log \frac{p_{\text{eff}}}{p_0} \text{ [dB]} \quad (2.1)$$

hvor: p_{eff} = effektivverdien av lyddtrykket [Pa]

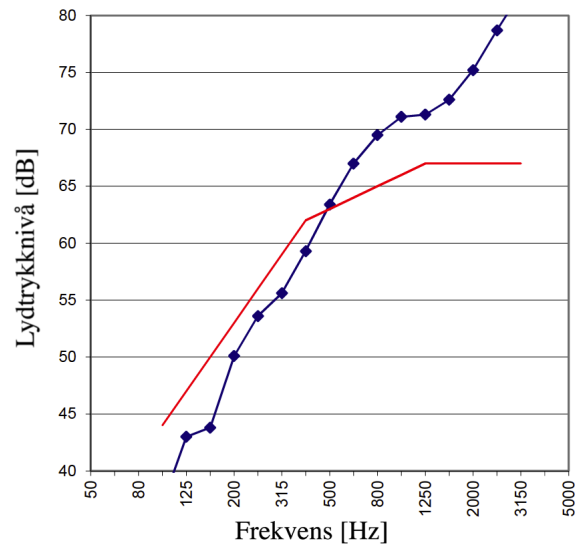
p_0 = referanselydtrykket = $2 \cdot 10^{-5}$ [Pa]

I tillegg til variasjoner i lydtrykket har antall trykkvariasjoner per sekund mye å si for vår oppfattelse av lyd. Trykkvariasjoner som skjer fra 20 til 20 000 ganger i sekundet kan oppfattes av et normalt øre. Antall variasjoner i sekundet kalles *frekvens* og måles i Hertz [Hz]. For å avgjøre lyd- og støypåvirkningen på mennesker og konstruksjoner trenger vi kjennskap til lydets frekvensmessige sammensetning. De fleste lydskilder avgir lyd som er sammensatt av uendelig mange frekvenser som til sammen utgjør et spektrum. Frekvensspekteret til en lydkilde kan finnes ved å gjøre målinger i spesifikke frekvensområder, hvor lyd i de andre frekvensene blir filtrert bort (Thue, 2009). Med dette kan lydtrykknivået fremstilles som en funksjon av frekvensen, som vist i figur 2.7.

Standardiserte frekvensområder som kalles *frekvensbånd* er angitt for at ulike målinger kan sammenlignes. Hvis forholdet mellom øvre og nedre grensefrekvens er 2:1 har vi avgrenset et frekvensbånd som kalles en oktav. Disse frekvensområdene kan igjen deles i tre og kalles 1/3-oktavbånd. Byggteknisk forskrift definerer krav til lydisolasjon i hvert av disse båndene i området 100-3150 Hz. Dette omfatter i alt 16 standardiserte 1/3-oktavbånd, som vist langs x-aksen i figur 2.7 (Thue, 2014b).

2.7.3 Lydabsorpsjon

Når en lydbølge treffer en flate vil en del av lyden absorberes. Hvor mye lyd som absorberes avhenger av flates *absorpsjonsfaktor*, α . Denne faktoren varierer mellom 0 og 1, hvor 0 betyr fullstendig refleksjon og 1 betyr fullstendig absorpsjon. Harde og tette materialer, som betong, har en lav absorpsjonsfaktor, mens myke og porøse materialer, som mineralull, har en høy absorpsjonsfaktor. Det er vanlig å angi en flates absorpsjonsegenskaper med flatens *ekvivalente absorpsjonsareal*, A (Hveem, 2004a).



Figur 2.7: Typisk frekvensfordeling for måling av luftlydreduksjon i et lett etasjeskille (blå), og referansekurven (rød).

2.7.4 Lydoverføring

Lydoverføringen mellom to rom kan deles i to kategorier; direkte transmisjon og flanke-transmisjon. Ved direkte transmisjon setter en lydkilde i det ene rommet skillekonstruksjonen (vegg eller etasjeskille) i svingninger, som igjen stråler ut luftlyd i det andre rommet. All annen lyd som overføres mellom rom kan kalles flanketransmisjon. Dette inkluderer strukturlyd som brer seg gjennom bæresystemet, luftlyd som overføres via kanaler og utettheter eller en kombinasjon av luftlyd og strukturlyd (Hveem, 2004b). For eksempel kan bygg som bygges av elementer (hulldekker, massivtreelementer), få problemer med lydisolasjon hvis ikke fugene tettes skikkelig.

Når det gjelder lydisolering av skillekonstruksjoner i bygg er det to typer lydkilder man isolerer mot: luftlyd og trinnlyd. Luftlyd er lydbølger som spres ut i rommet fra en lydkilde, for eksempel fra et musikkorgan. Trinnlyd er vibrasjoner som oppstår i etasjeskiller som strukturlyd grunnet gangtrafikk, og deretter stråles ut som luftlyd (Glasø, 2011).

2.7.5 Måling av luftlydisolasjon

Reduksjonstallet er et mål for skillekonstruksjonens egenskaper mht. luftlydisolering. Reduksjonstallet måles ved at en lydkilde plasseres i et senderrom og lydtrykknivået måles i sender- og mottakerrommet. Differansen mellom disse nivåene i tillegg til et ledd for å korrigere for forholdene i mottakerrommet og størrelsen av skilleflata gir reduksjonstallet som

vist i formel 2.2 (Hveem, 2004a). Jo høyere reduksjonstallet er jo bedre vil luftlydisolasjonen til den aktuelle konstruksjonen være.

$$R = L_s - L_m + 10 * \log \frac{S}{A_m} \text{ [dB]} \quad (2.2)$$

hvor: L_s = lydtryknivå i senderrommet [dB]

L_m = lydtryknivå i mottakerrommet [dB]

S = skillekonstruksjonens areal [m^2]

A_m = ekvivalent absorpsjonsareal i mottakerrommet [m^2]

Reduksjonstallet måles ihht. teknisk forskrift i hver av de standardiserte 1/3-oktavbåndene. Dette fører til et resultat i form av en frekvensfordeling med 16 ulike verdier. For å enklere kunne sammenligne forskjellige konstruksjoner er det en fordel at de lydisolerende egenskapene kan beskrives med en enkeltverdi. I dag benyttes *veid lydreduksjonstall*, R_w , som en standardisert enkeltverdi for luftlydisolasjon. Denne verdien tar hensyn til at øret er mer følsomt for lyse diskantlyder (høy frekvens) sammenlignet med mørke basslyder (lav frekvens).

Med bakgrunn i dette er det utarbeidet en referansekurve som skal etterligne ørets følsomhet og gir krav i de forskjellige frekvensbåndene, som vist i figur 2.7. Det veide reduksjonstallets beregnes ved å tilpasse referansekurven til den aktuelle lydmålingen. Enkeltverdien defineres deretter som verdien av den forskjøvne referansekurven ved 500 Hz, slik at summen av avvikene i ugunstig retning ved de 16 standardiserte senterfrekvensene ikke er større enn 32 dB.

Når målingen utføres i et laboratorium under kontrollerte forhold, kan flanketransmisjonen neglisjeres som gir betegnelsen *veid laboratoriemålt reduksjonstall*, R_w . Når reduksjonstallet måles i et ferdig bygg vil målingen inkludere lydoverføring via flanketransmisjon. Dette kalles *veid feltmålt reduksjonstall*, R'_w , og beregnes på samme måte som i laboratoriet. I praksis vil forskjellen på disse to størrelsene ligge på 3-5 dB (Hveem, 2015a).

2.7.6 Måling av trinnlydnivå

Måling av trinnlydisolasjon skiller seg fra måling av luftlydisolasjon ved at man måler kun lydnivået i mottakerrommet framfor forskjellen i sender- og mottakerrom. Siden det kan være store variasjoner i lydnivået som oppstår når ulike personer beveger seg på et dekke benyttes det standardiserte testmetoder. *Normalisert trinnlydnivå*, L_n , er det målte lydnivå-

Tabell 2.5: Utdrag av forskjellige krav til luftlydisolasjon fra NS 8175 (2012). Alle enheter angitt i desibel [dB].

Bygningstype	Brukerområde Mellom:	Klasse A $R'_w + C_{50-5000}$	Klasse B $R'_w + C_{50-5000}$	Klasse C R'_w	Klasse D R'_w
Bolig	Boenheter	63	58	55	50
Overnatting	Gjesterom	60	55	52	48
Skole	Klasserom	56	52	48	44
Kontor	Kontorer	44	40	37	34

et i et rom når det bankes på et etasjeskille med ISO-standardisert hammerverk. Trinnlydnivåene måles også i forskjellige frekvensbånd, og på samme måte som for luftlydnivået blir enkeltverdier beregnet ved å tilpasse en referansekurve til de målte verdiene. Den standardiserte enkeltverdien for trinnlyd kalles *veid normalisert trinnlydnivå* og betegnes $L_{n,w}$ for laboratoriemålinger og $L'_{n,w}$ for feltmålinger. I motsetning til luftlydnivået er trinnlydisolasjonen til en konstruksjon bedre jo lavere trinnlydnivået er.

2.7.7 Byggeforskriftens krav

Kravet til god lysisolering har økt de seneste årene. Dette skyldes både større trafikkbelastninger og økt bruk av støyende utstyr, men også folks generelle krav til lydkomfort. Før 1997 stilte byggeforskriftene tallfestede krav til lydisoleringen i forskjellige typer bygninger. Dagens byggeforskrifter gitt i NS 8175:2012 gir nå rene funksjonskrav til lydforholdene. Standarden deler inn i lydklasser fra klasse A, *spesielt gode lydforhold der personer kun unntaksvis blir forstyrret av lyd og støy* til klasse D *lydforhold der en stor andel av berørte personer kan vente å bli forstyrret av lyd og støy*. Minimumskravene til nybygg er gitt i lydklasse C, hvor de viktigste tallverdiene er gjengitt i tabell 2.5 for luftlydisolasjon og tabell 2.6 for trinnlydisolasjon.

Standarden deler også inn kravene til skillekonstruksjoner ut fra bygningstype og hvilke aktiviteter/brukerområder skillekonstruksjonen grenser til. Boliger, skoler, overnattingssteder, kontorer osv. har ulike krav, hvor de strengeste kravene generelt sett tillegges lydisolasjon mellom ulike boenheter.

2.7.8 Omgjøringstall for spektrum

En ulempe ved å benytte enkelttallverdier for lydisolasjon er at to konstruksjoner som har vidt forskjellige frekvensfordelinger, likevel kan ha samme reduksjonstall eller trinnlydnivå.

Tabell 2.6: Utdrag av forskjellige krav til trinnlydisolasjon fra NS 8175 (2012). Alle enheter angitt i desibel [dB].

Bygningstype	Brukerområde Mellom:	Klasse A	Klasse B	Klasse C	Klasse D
		$L'_{n,w} + C_{I,50-2500}$	$L'_{n,w} + C_{I,50-2500}$	$L'_{n,w}$	$L'_{n,w}$
Bolig	Boenheter	43	48	53	58
Overnatting	Gjesterom	48	53	58	63
Skole	Klasserom	53	58	63	68
Kontor	Kontorer	53	58	63	68

I praksis vil lydforholdene kunne oppfattes meget forskjellig (Haugen, 2007).

Omgjøringstall for spektrum, C (dB), er en verdi som skal legges til ett-tallsverdien for å ta hensyn til formen på bestemte lydspektre. Det er definert to forskjellige spektre for luftlydnivå, ett beregnet for inneforhold (C) og ett beregnet for isolering mot et standardisert referansespektrum for veitrafikkstøy (C_{tr}). Spektre for trinnlydnivå (C_I) er beregnet slik at det representerer egenskapene til typiske lydspektre for gange (Hveem, 2004a).

2.7.9 Omgjøringstall for utvidet frekvensområde

Øret kan som nevnt oppfatte lyd ned til 20Hz, men dagens beregningsmetoder tar ikke hensyn til lydoverføring i frekvensområder under 100Hz. Selv om øret ikke er like følsomt for lave frekvenser, viser det seg at beregninger som ikke tar høyde for de lave frekvensene kan gi et uriktig bilde på de faktiske lydforholdene et menneske vil oppfatte (Holmefjord, 2013).

For å gi en strengere og riktigere bedømmelse av lydisolasjonsegenskapene kan lydberegningene inkludere omgjøringstall for utvidet frekvensområde; $C_{50-5000}$ for luftlydisolering og $C_{I,50-2500}$ for trinnlydnivå. Kravgrensene vil da angis som henholdsvis $R'_w + C_{50-5000}$ og $L'_{n,w} + C_{I,50-2500}$. Høye negative verdier for $C_{50-5000}$ gir uttrykk for at konstruksjonen isolerer dårlig i lavfrekvensområdet. Høye positive verdier for $C_{I,50-2500}$ gir uttrykk for det samme. Negative tall for $C_{I,50-2500}$ skal ikke regnes med (Hveem, 2015a).

Flere kilder peker på at dagens lydkrav med fordel kan bli mer omfattende, men foreløpig er erfaringsgrunnlaget for målinger med utvidet frekvensområde så lite at det er vanskelig å angi sikre konstruksjonsløsninger (Homb, 2017; Holmefjord, 2013). I NS 8175 inkluderes ikke korreksjonsverdien som minimumskrav (lydklasse C), men det anbefales å dimensjonere konstruksjoner ut fra lydklasse A eller B hvor omgjøringstallene for utvidet frekvensområde legges til enkeltverdiene, som vist i tabell 2.5 og tabell 2.6.

2.7.10 Resonansfrekvenser

Alle gjenstander kan vibrere eller svinge, og har en frekvens hvor de fortsetter å svinge av seg selv når svingningene først er satt i gang og svingebevegelesene ikke blir dempet. Innen akustikken kalles denne frekvensen for resonansfrekvensen. Beregning av resonansfenomener er komplisert og vil ikke bli dypt beskrevet i denne oppgaven. Fenomenet i seg selv er derimot viktig å kjenne til siden det er grunnleggende for forståelsen av hvordan lyd brer seg i et bygg.

Grensefrekvensen er en type resonansfrekvens der lyd hastigheten i lufta er lik lyd hastigheten i et legeme, for eksempel en bygningsplate av gips eller kryssfiner. I lufta er lyd hastigheten konstant, mens bøyningbølgene i en plate øker med frekvensen. Ved en bestemt frekvens vil altså disse frekvensene være like og det vil oppstå en god lyd kobling mellom plate og luft. Lydutstrålingen fra en plate er betydelig mindre under grensefrekvensen enn over, det er derfor lurt å sørge for at grensefrekvensen befinner seg i overkant av det hørbare området. Siden lyd hastighet i en plate er avhengig av bøyestivhet og densitet kan dette oppnås ved at platekledningene er tunge, tynne og bøyeelastiske.

Plateresonanser er en annen type resonansfrekvens som vanligvis vil oppstå i tynne homogene platekonstruksjoner. Dette er typisk frekvenser i det lave hørbare området, slik at lyd isolasjonen blir dårlig her. I frekvensområdet mellom plateresonansen og grensefrekvensen vil *masseloven* gjelde. Denne sier at lyd isolasjonen øker lineært med konstruksjonens flatevekt. Med høyere masse vil det kreves mer energi for å sette konstruksjonen i svingninger og en mindre andel av lyden vil trenge gjennom.

Dobbeltveggresonans, eller hulromsresonans, er i bygningsssammenheng en resonansfrekvens mellom to tette platekledninger der hulrommet er fylt med luft eller et porøst materiale. Dobbeltveggresonansen avhenger av avstand mellom platene, masse på platene og dynamisk stivhet til materialet mellom platene.

2.7.11 Luftlydisolering av etasjeskillere

Luftlydisolering av etasjeskiller avhenger av flere forhold. For tunge homogene konstruksjoner, som massiv plassenstøpt betong og dekker av massivtre, vil ikke masseloven gjelde på samme måte som for tynnere plater av gips eller kryssfiner fordi grensefrekvensen blir for lav. Likevel vil de lyd isolerende egenskapene først og fremst avgjøres av konstruksjonens masse og stivhet. Med stor masse og høy stivhet vil det kreves mer energi for å sette konstruksjonen i svingninger og en mindre andel av lyden vil trenge gjennom. Huldekker og ribbeelementer

av betong vil derfor ha lavere lydisolasjon sammenlignet med massive plassenstøpte betongdekker, grunnet lavere vekt.

For lette dobbeltkonstruksjoner, som etasjeskiller med trebjelkelag, kan lydisolasjonen bli god selv om massen er lav. Konstruksjonen virker da som et masse-fjær-system som absorberer og demper lydoverføringen. Den ene platen settes i svingninger av lyd i senderrommet før disse vibrasjonene overføres via hulrommet til den andre platen. Ved frekvenser som er lavere eller lik dobbelveggesonansen blir lydisolasjonen dårlig.

Strålingsminskende himling er et lydisolerende spesialtilfelle av en slik dobbeltkonstruksjon. Slike himlinger består som regel av tynne og elastiske spon- eller gipsplater festet med et mellomrom fra primærkonstruksjonen. En slik tynn og lett plate gir betydelig forbedring av reduksjontallet fordi den har egenskaper som gjør at lydstrålingen reduseres vesentlig under grensefrekvensen. I tillegg er det fordelaktig at platens bæresystem er helt adskilt fra konstruksjonen ovenfor. Dette kan oppnås ved at himlingen festes i elastiske opphengprofiler eller at den har sine egne bærebjelker.

Oppsummert vil avgjørende egenskaper for god lydisolasjon i dobbeltkonstruksjoner som trebjelkelag og strålingsminskende himlinger være at:

1. Bæresystemet til de to platene holdes adskilt for å unngå direkte transmisjon
2. Avstanden mellom platene er så stor som mulig og hvert platelag har stor masse for å senke dobbelveggesonansen under kritisk frekvensområde.
3. Platene er elastiske og monteres i flere lag for å øke grensefrekvensen og maksimere plateabsorpsjonen
4. Hulrommet inneholder mineralull (minimum 50 mm) for å absorbere lyd og dempe uønskede resonanser

2.7.12 Trinnlydisolering av etasjeskillere

Trinnlydisolering av etasjeskiller er ofte den lydtypen som gir de største utfordringene med tanke på sjenerende lydoverføringer til underliggende rom. Vekt og stivhet av dekket er viktige parametere også her, men for trinnlydisolering alene vil tiltak som demper vibrasjoner fra trinn på overflaten før de når den bærende konstruksjonen være avgjørende. Dette kan i hovedsak gjøres på to forskjellige måter; med elastiske golvbelegg eller flytende overgulv:

- **Elastiske golvbelegg** er tynne sjikt typisk laget av vinyl eller linoleum, som har flere egenskaper som gjør dem godt egnet som gulvmaterial; de er myke, slitesterke,

vanntette, lette å rengjøre og har liten avgassing. Disse virker som et kraftreducerende sjikt og demper derfor trinnlyden ved kilden. Myke gulvtepper vil også gi meget god trinnlydemping, men dette er ikke en utstrakt løsning i Norge eller Europa grunnet forhold som luftkvalitet og inneklime (Folkehelseintituttet, 2015).

- **Flytende overgulv** har et tykt eller tynt elastisk sjikt som demper vibrasjoner som oppstår i overgulvet fra å nå bærende konstruksjon. Tynne elastiske sjikt består typisk av 2-3 mm ekspandert polyetylen (PE) med parkett- eller heltregulv lagt flytende på oversiden. Tykke elastiske dempesjikt består typisk av heldekkende trykkfaste trinnlydmatter med et platelag eller ribbegulv lagt på oversiden, eventuelt med tilfarergulv lagt på elastiske klosser. Trinnlydmattene og de elastiske klossene kan være laget av trykkfast mineralull, men det finnes også produkter laget av trefiber, kork, gummi og PUR-skum. Som overgulv kan det benyttes et eller flere lastfordelende platelag av gips, spon eller kryssfiner, ofte med parkett eller laminat som øverste lag. Alternativt kan det legges tunge flytende overgulv i form av påstøp eller gulvavrettingsmasse på det elastiske sjiktet. Her er det viktig at støpen ikke kommer i strukturell kontakt med andre bygnings-elementer da dette vil forringe de dempende egenskapene og øke flanketransmisjonen (Hveem, 2015a).

2.7.12.1 Lydforbedringstallet

Lydforbedringstallet (dB) beskriver hvordan ulike gulvbelegg og overgulv bidrar til å redusere trinnlydnivået. Dette defineres som differansen mellom veid trinnlydnivå for etasjeskille med og uten gulv eller gulvbelegg. Lydforbedringstallet avgjøres hovedsaklig av resonansfrekvensen til gulvet eller gulvbelegget. Trinnlydnivået reduseres i de frekvensområdene som ligger over resonansfrekvensen. Under resonansfrekvensen forekommer det ingen trinnlydemping, som betyr at denne bør være så lav som mulig. Dette kan oppnås ved å øke vekten i platelaget eller øke tykkelsen på dempesjiktet.

For parkett lagt på tynne dempesjikt blir resonansfrekvensen 300-500 Hz, for flytende plategulv på elastiske dempesjikt blir resonansfrekvensen under 150 Hz, for tunge flytende overgulv på trinnlydmatter vil resonansfrekvensen bli enda lavere.

Behovet for tilleggskonstruksjoner på over- og/eller undersiden av bærekonstruksjonen avhenger av bærekonstruksjonens flatemasse. For tunge etasjeskillere av betong vil trinnlydempende tiltak ha mye større effekt siden tunge etasjeskillere i seg selv har mindre høyfrekvent demping. Lette etasjeskillere må kompletteres med mer omfattende tiltak for å oppnå de samme lydisolasjonstallene (Hveem, 2009).

2.7.13 Lyd og tre

Selv om bruk av lydkilder med høyt lavfrekvensinnhold, som radio, TV og musikkanlegg, har økt de seneste tiårene, er det ikke lavfrekvent luftlyd som er den største lydtekniske utfordringen for etasjeskillere av tre. De største utfordringene for trekonstruksjoner er lavfrekvent lyd som stammer fra trinnlyd (Hveem, 2010; Bartlome and Liebl, 2014).

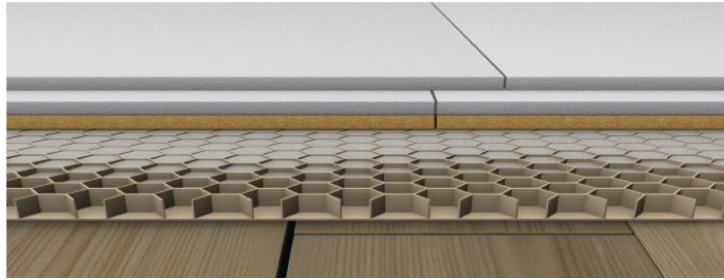
Et studie utført av treindustriorganisasjonen Lignum fra Sveits og Institutt for bygningsfysikk i Tyskland gjennomførte tilfredshetsmålinger for beboere i rundt 250 moderne fleretasjes trehus (Bartlome and Liebl, 2014). Resultatene viste generelt lav tilfredshet med lyd- og vibrasjonsforholdene. I tillegg gjennomførte studiet lydmålinger for ulike konfigurasjoner av etasjeskiller av tre som også inngår i Lignum databasen. Målingene bekrefter at god luftlydisolasjon enkelt kan oppnås for tredekker, men at det er utfordrende å oppnå god trinnlydisolasjon i de lave frekvensene.

Studiet utført av Bartlome and Liebl (2014) i tillegg til flere andre kilder anbefaler å benytte korreksjonsverdier for lave frekvenser, som nevnt i kapittel 2.7.7 (Holmefjord, 2013; Hveem, 2010). Dette er en viktig faktor å ta hensyn til når lydegenskapene til tunge betongdekker og lette tredekker skal sammenlignes. Uten å ta hensyn til korreksjonsfaktoren kan lydmiljøet oppfattes helt forskjellig selv om konstruksjoner har samme lydisolasjonstall, slik at det det i mange tilfeller vil bli som å sammenligne epler og pærer. I fremtiden kan denne faktoren bli innført som et krav, som vil innebære at nye byggeprinsipper for lette trekonstruksjoner må utvikles (Holmefjord, 2013; Hveem, 2010).

2.7.14 Lydtekniske løsninger for tre

For å løse problemene med lavfrekvent lyd og trinnlyd vil etasjeskillere av tre trenge mer omfattende tilleggstiltak sammenlignet med andre tyngre etasjeskillere. Vanlige løsninger som benyttes i Norge, og spesielt lenger sør i Europa som Tyskland og Sveits, presenteres her:

- Større og tykkere dimensjoner på dekkekonstruksjonen som øker både stivhet og masse vil være gunstig i alle frekvenser for både luftlyd og trinnlyd.
- Dobbeltkonstruksjoner som lydhimling og flytende lette gulv på elastiske dempesjikt vil også bedre lydisolasjonen for både luftlyd og trinnlyd. Dette gjelder spesielt for frekvenser i diskant- og mellomtoneområdet, men siden lette etasjeskillere er myke og ofte gir god høyfrekvent demping i seg selv er det begrenset hvor stor effekt slike tiltak kan ha. Det er også avgjørende at slike konstruksjoner utføres korrekt. For eksempel



Figur 2.8: Figur av grus fylt i pappstruktur

kan stive plater og små hulrom føre til at systemets resonansfrekvens sammenfaller med hørbare frekvenser i det lave frekvensområdet, som vil gi en redusert lydisolering.

- Økt flatevekt, ved å inkludere tunge materialer i konstruksjonen, vil gi forbedringer av både trinnlydnivå og luftlydnivå. En vanlig løsning er å støpe betong på oversiden av dekket, men siden det hovedsaklig er økt masse som er avgjørende kan også grus benyttes. Tynne lag med fin grus kan legges løst uten å holdes på plass (under 50 mm). Ved tykkere lag er det vanlig at grusen er elastisk bundet eller fylt inn i pappstrukturer, slik at den holdes på plass i det lange løp som vist i figur 2.8 (Stora Enso, 2016). Elastisk bundet grus er grus som tilsettes bindemiddel av blant annet latex polymer. Det er liten forskjell på lydegenskapene til de to løsningene, så lenge de er løst bundet og har myke egenskaper. Dobbel trinnlydforbedring kan oppnås sammenlignet med stive plater (Köhnke, 2013, 2014).
- For etasjeskillere med hulrom, som trebjelkelag og trehulldekker, vil en økt høyde og dermed økt størrelse på hulrommet mellom øvre og nedre plate, gi bedre lydegenskaper i de lave frekvensene. I tillegg kan lydegenskapene bedres ytterligere ved at disse hulrommene fylles med mineralull eller andre tunge materialer (Mahn et al., 2013).

2.7.15 Vibrasjoner

Som nevnt i kapittel 2.5 er tre et mykt materiale med lavere bøyemotstand sammenlignet med betong og stål. For etasjeskillere av tre vil det i praksis være krav om maks nedbøyning og krav om å unngå sjenerende vibrasjoner fra vanlige aktiviteter som bestemmer den maksimale spennvidden, ikke elementenes styrke mot brudd (Homb, 2009).

2.7.16 Komfortkriteriet

Menneskers opplevelse av å befinne seg på et dekke som beveger seg er en subjektiv opplevelse. Et typisk kjennetegn på uønskede vibrasjoner er at det klirrer i kopper og glass i skap når noen går på gulvet. Grensen for hva som er akseptabelt er vanskelig å sette, og avhenger blant annet av bruk, møblering og tilstøtende konstruksjoner. Med bakgrunn i dokumentasjon for trebjelkelag har SINTEF Byggforsk utviklet et forslag til kriterier for slike konstruksjoner som kalles komfortkriteriet. Dette går ut på at den første egenfrekvensen til dekket skal være høyere enn 10Hz og at maksimal nedbøying ved en punktlast på 1kN ikke skal overskride 1,3 mm (Homb, 2007).

Å øke vekten på et dekke uten å øke stivheten vil senke den første egenfrekvensen. Dette kan forverre vibrasjonssituasjonen til et dekke hvis egenfrekvensen senkes til et område hvor sjenerende vibrasjoner kan oppstå.

Kapittel 3

Litteraturstudie

3.1 Urbanisering og densitet

Kompakt byutvikling er ifølge IPCC et viktig tiltak for å redusere byers klimagassutslipp. Flere rapporter viser at byer står for rundt tre fjerdeler av både globalt energiforbruk og globalt CO₂-utslipp. Det er altså viktig å forstå energi- og miljørelaterte aspekter ved urbane områder, for hvis byer er en del av problemet, må det også være en del av løsningen.

Resch (2016) modellerte i hvilken grad bytetthet og bystruktur påvirker energiforbruket i det urbane systemet. Modellen relaterer energikostnader av byggehøyde med energifordeler av å bygge tettere med tanke på transport og infrastruktur. Funnene viste at en tettere og høyere bystruktur enn det som er vanlig i dag har et lavere energiforbruk, med en optimal byggehøyde i størrelsesorden 7-27 etasjer. For byggehøyder over dette vil den økte bundede energien overgå ytterligere reduksjonspotensialer fra andre byelementer. Byer med høy tetthet har et reduksjonspotensial på omtrent en tredjedel, sammenlignet med byer med lav tetthet. Når tettheten øker vil parametre som bundet energi i bygg og gulvareal per innbygger være mer innflytelsesrike enn energi relatert til transport.

Norman et al. (2006) gjennomførte et empirisk studie på to forskjellige byområder i Toronto med henholdsvis høy og lav densitet. Studiet undersøkte energibehov og klimagassutslipp til de tre elementene; materialer for bygg og infrastruktur, drift av bygg og transportsystem. Resultatene viste at de viktigste tiltakene for å redusere klimagassutslipp til byer burde rettes mot transportsektoren. Resultatene viste også at forstadsutvikling med lav tetthet har et større energibehov og klimagassutslipp med en faktor på 2 til 2,5 per innbygger, sammenlignet med sentrumsområder med høy tetthet. Samtidig lå denne faktoren på kun 1 til 1,5

når den funksjonelle enheten var kvadratmeter bruksareal, som tilsier at mye av fordelene med kompakt byutvikling kan tilskrives arealeffektivitet og antall kvadratmeter per innbygger. I tillegg illustrer dette at valg av funksjonell enhet er meget relevant for å forstå effekter av kompakt byutvikling.

3.1.1 LCA av høyhus

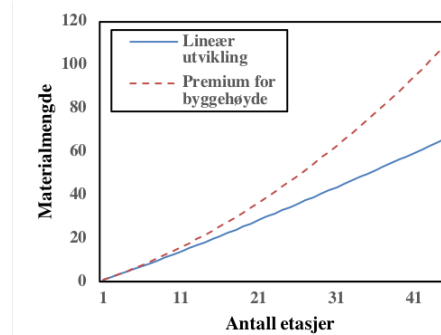
Trabucco and Wood (2016) diskuterer LCA sin rolle innen prosjektering og bygging av høye bygg. Det argumenteres for at det har skjedd mye forskning innen LCA av høye bygg de seneste årene, men at det fortsatt er et stort kunnskapshull som bør fylles. Oldfeld (2012) diskuterer flere fordeler og ulemper ved høye bygg når det kommer til karbonfotavtrykk. Fordeler som nevnes er at høyhus ofte huser flere innbyggere per kvadratmeter, krever mindre infrastruktur, har større mulighet for prefabrikasjon og effektiv bygging, og blir generelt renovert fremfor å bli revet og erstattet. En ulempe som nevnes er at det er begrenset med muligheter for å bygge høye hus i tre, som er et klimavennlig materiale sammenlignet med stål og betong.

3.2 CO₂-premium ved byggehøyde

Et aspekt som gjør seg gjeldene når densiteten og byggehøyden i urbane områder øker, er at høye hus krever mer materialer og sterkere materialer for å motstå strukturelle laster, slik at utslippene per kvadratmeter bruksareal øker. Dette fenomenet blir omtalt i litteraturen som premien for byggehøyde.

Khan (1968) er en av de første som omtaler en slik premie for byggehøyde. Her beskrives premien som den ekstra materialmengden som kreves per kvadratmeter bruksareal når antall etasjer øker, som vist i figur 3.1. Som nevnt i kapittel 2.5 består et bæresystem hovedsaklig av horisontalt bærende, vertikalt bærende og avstivende elementer. Kahn argumenterer for at premien for vertikalt bærende elementer øker lineært med byggehøyden, siden lastpåvirkningen til vertikalt bærende elementer avhenger av antall etasjer over dem. For avstivende elementer vil premien øke eksponentielt med byggehøyde, siden bøyemoment forårsaket av horisontalt virkende krefter øker med kvadratet av byggehøyden. På grunnlag av dette hevder Kahn at for byggehøyder over 10 etasjer vil de horisontale kreftene avgjøre dimensjoneringen. Da blir stivhet den dominerende faktoren fremfor styrke, og premien for byggehøyde øker raskt med antall etasjer (Ali and Moon, 2007).

Det finnes flere studier som bekrefter argumentene til Kahn. Bawden (2013) gjennomførte en livssyklusanalyse på fem teoretiske flerfamilieboliger på tre, fire, syv, 11 og 21 etasjer, og fant en klar premie for byggehøyde. Bæresystemene var representative for typiske bygg i de forskjellige høydene, hvor de lave byggene hadde enkle bæresystemer av tre og de høye byggene hadde mer kompliserte bæresystemer av stål og betong. Ordóñez and Modi (2011) så på klimagassutlipp knyttet til operasjonell energi og produksjon av materialer for bygg opp til 60 etasjer med samme totale bruksareal. Den optimale høyden ble funnet når bygningen hadde 4-6 etasjer, med en tydelig premie for bygningshøyde over dette.



Figur 3.1: Grafisk fremstilling av CO₂ premium for bygninger.

Ytrehus (2015) undersøkte CO₂-premiene til forskjellige bæresystemer basert på stål og betong med byggehøyde som varierte fra tre til 70 etasjer. Studiet viste at det ikke finnes en CO₂-premie for bæresystemer opp til 12 etasjer. For bygg over 30 etasjer vil CO₂-premiene i stor grad påvirkes av valgt bæresystem. Velges de alternativene med lavest utslipp vil premien bli liten eller neglisjerbar også for høyere bygg.

Skullestad (2016) gjennomførte en livsløpsvurdering for fire bygg fra tre til 21 etasjer med betong og tre som bæresystem. Studiet fant en CO₂-premie for trekonstruksjoner fra 3 etasjer og for betongkonstruksjoner fra 12 etasjer, hvor bæresystemet av tre kom best ut for alle benyttede beregningsmetoder og scenarier.

Kaspersen (2016) gjennomførte en livsløpsvurdering knyttet til materialbruk og operasjonell energi for tekniske systemer i de samme byggene som presentert av Skullestad (2016). Resultatene viser at CO₂-premiene varierer betydelig ut fra hva slags teknisk løsning som velges, likevel konkluderes det med at CO₂-premiene for tekniske installasjoner er neglisjerbar.

Bohne et al. (2017) oppsummerer blant annet arbeidet til Ytrehus (2015), Skullestad (2016) og Kaspersen (2016). Artikkelen finner at det ligger et stort potensiale i å redusere utslippene ved å velge riktige bygningsmaterialer, som for eksempel tre. Til slutt konkluderes det med at en optimal byggehøyde ser ut til å ligge mellom 10 og 20 etasjer.

3.2.1 CO₂-premium ved etasjeskillere

Flere av de nevnte kildene argumenterer for at det ikke finnes en premie for byggehøyde knyttet til etasjeskillere (Alzuhairy, 2015; Khan, 1968). Dette er fordi et etasjeskille vil ha relativt lik utforming uavhengig av om det benyttes i et bygg med fem etasjer eller femti etasjer såfremt brukstypen er den samme. Det er hovedsaklig dødlast, nyttelast og nødvendig spennvidde som påvirker den strukturelle dimensjoneringen, parametre som ikke er direkte knyttet til byggehøyden (Alzuhairy, 2015).

Likevel finnes det studier som har funnet en premium knyttet til etasjeskillere. Ytrehus (2015) fant som nevnt en neglisjerbar premium for byggehøyde for bæresystemer av stål og betong. Ved å isolert se på etasjeskillere derimot, fant studiet en viss premie, fra ~50 kg CO₂-eq/m² ved tre etasjer til ~68 kg CO₂-eq/m² ved 12 etasjer. Treolar et al. (2001) undersøkte den innebygde energien til fem virkelige kontorbygg i Melbourne fra tre til 52 etasjer, studiet fant en betydelig premie for byggehøyde, hvor en klar del av dette var knyttet til etasjeskillere. Siden ingen av disse studiene hadde som mål å undersøke etasjeskillere direkte, foreligger det ingen klare årsaker til at det finnes en premium ved etasjeskillere.

Uansett om CO₂-premien knyttet til etasjeskillere er betydelig eller ikke, viser flere studier at etasjeskillere står for en stor del av de totale utslippene knyttet til et bygg. Dette gjelder også ved store høyder der de avstivende elementene gjør seg gjeldene. Treolar et al. (2001) fant at etasjeskillere var den bygningsdelen som bidro mest til den innebygde energien med en andel på 33-46%. Denne observasjonen støttes av Foraboschi et al. (2014) som så på betongbygg fra 20 til 70 etasjer og fant at etasjeskillere sto for 35-70% av den totale innebygde energien.

3.2.2 Indirekte CO₂-premium ved etasjeskillere

Siden ingen av studiene som fant en premie knyttet til etasjeskillere hadde dette som fokusområde, foreligger det ingen konkrete årsaker til at det er slik. Litteratursøket har derimot avdekket at det er flere mulige årsaker til at etasjeskillere i høye bygg må dimensjoneres annerledes. Dette gjelder blant annet innen temaene brannsikkerhet, fleksibilitet/tilpasningsdyktighet og svai/vibrasjoner:

Brannsikkerhet

Som vist i figur 2.3 i kapittel 2, henger klassifisering av bygningers brannklasse direkte sammen med antall etasjer opp til fem etasjer. For bygg fra én til fem etasjer vil altså branndimensjoneringen øke i takt med byggehøyden. For etasjeskillere betyr dette at brannmotstanden (som henger tett sammen med materialbruk) må økes for å opprettholde tilfredstillende bæreevne og stabilitet. Ytrehus (2014) undersøkte nødvendig branndimensjonering av massivtredekker der byggehøyden varierte fra 2 til 16 etasjer. Oppgaven var ikke rettet mot å finne en premie for byggehøyde, men ut fra dataene presentert foreligger det et tydelig premium for byggehøyder på grunnlag av at brannkravene endrer seg fra REI 30 til REI 90.

Fleksibilitet/tilpasningsdyktighet

Store bygg har ofte behov for stor arkitektonisk fleksibilitet, slik at bygningen kan møte vekslende funksjonelle krav i løpet av sin levetid uten å gjennomføre omfattende renoverings tiltak (Arge, 2002). Store bygg betyr store investeringer, slik at det i et livsløpsperspektiv vil lønne seg å tilpasse det fremfor å rive og bygge nytt. Dette innebærer blant annet å benytte planløsninger med få bærende innervegger og lange spennvidder som er dimensjonert for fremtidige laster (Rüter, 2017). Tykkelsen og styrken til etasjeskillene må dermed økes. Fleksibilitet kan i tillegg innebære strengere dimensjonering med tanke på brann, lyd, etasjehøyde og flere andre parametere som må være oppfylt hvis bruksområdet til bygget skal endres. (Larsen and Bjørberg, 2007). Siden store bygg krever større fleksibilitet, kan dette indikere en mulig premie ved byggehøyde.

Svai og vibrasjoner

Vindhastigheter er større i høyden, slik at høye bygg er mer utsatt for store vindkrefter. Hvis bygget i tillegg har en slank form kan det lettere begynne å svaie eller vibrere ved fluktuerende vindpåkjenninger. Dette er ikke nødvendigvis kritisk for byggets bæreevne, men kan oppleves veldig ubehagelig for brukere i form av kvalme og svimmelhet. I tillegg forventer folk flest at et bygg skal stå i ro, slik at bevegelser ved høye vindpåkjenninger vil føles utrygt (Bashor et al., 2005).

Det er flere parametere som inngår for å beregne slike vind-fremkalte vibrasjoner og bevegelser, blant annet gjelder dette formen på bygningskroppen, stivheten til bygget, vekten på bygget, bygningens egenfrekvenser og eventuelt dempende elementer som kan absorbere

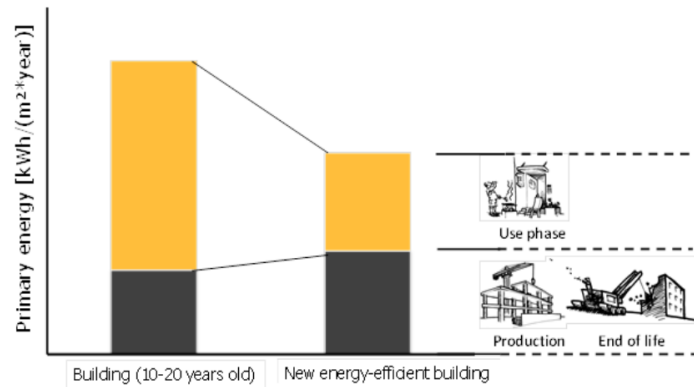
bevegelsesenergi (Malo et al., 2016). For bygninger med bæresystem av tre vil dette være en spesielt stor utfordring, siden både stivheten og vekten i utgangspunktet er lavere enn for tilsvarende systemer av stål og betong. Dette bekreftes av et studie utført av Spjuth and Åkeson (2016) som modellerte et typisk fleretasjes trebygg og fant at det hadde store utfordringer med å nå anbefalte vibrasjonskriterier, spesielt i de øvre etasjene.

Utforming av etasjeskillere vil, uavhengig av hvilket materiale som benyttes, ikke ha stor innvirkning på stivhet eller bygningsform, men kan ha direkte innvirkning på vekten til bygget. Høyere vekt på bygget er positivt med tanke på vibrasjoner, slik at tyngre etasjeskillere kan være nødvendig når byggehøyden økes. På denne måten kan en premium for byggehøyde gjøre seg gjeldene, spesielt for bygg som i utgangspunktet har et lett bæresystem. Denne problemstillingen er ikke videre undersøkt i denne oppgaven.

3.3 LCA sin rolle i byggebransjen

I en oppsummering av forskningsprosjektet ZEB (Zero Emission Buildings) ved NTNU, argumenterer Kristjansdottir (2017) for at utforming av bygninger tradisjonelt sett har hatt fokus på to områder; funksjonalitet og estetikk, men at dette ikke er godt nok i dagens samfunn der aspekter som klimagassutslipp og miljøpåvirkning gjør seg mer og mer gjeldene. Resultatene av ZEB tilsier at det finnes mye kunnskap om hvordan utslipp kan reduseres og klimamål oppnås, men at det er utfordrende å implementere denne kunnskapen i velfungerende løsninger som blir tatt i bruk i byggebransjen.

Et studie av Labonnote et al. (2016) tar for seg nettopp denne problemstillingen. Her argumenteres det for at overgangen fra ytelsesbaserte krav til funksjonsbaserte krav i byggebransjen har gitt større frihet i utforming av bygninger og bygningskomponenter. En ytelsesbasert tilnærming kan tilføre en byggeprosess stor verdi ved at optimale løsninger som tar hensyn til flere parametre utarbeides. Dette kan igjen føre til at nye bærekraftige og «intelligente» løsninger blir tatt i bruk. Likevel er det en stor utfordring å gjennomføre dette i byggebransjen i dag siden en byggeprosess, fra skisseprosjekt til ferdigstillelse, ofte er lineært utformet. Hver fase er ansvarlig for hver sin del, som hindrer effektiv informasjonsflyt mellom de ulike fasene.



Figur 3.2: Energibruk i et livssyklusperspektiv. Figur hentet fra EeBGuide (2012).

3.3.1 Materialenes rolle i en LCA

Energikravene for norske kontorbygg har blitt 30% strengere det siste tiåret. Når det kommer til krav for materialbruk ser man ikke den samme utviklingen. Dette betyr, som belyst i figur 3.2, at materialene får en viktigere rolle i en LCA av to grunner:

1. Fokus på energieffektivitet har ført til redusert energibehov i bruksfasen, som betyr at den relative viktigheten av materialer har økt.
2. Mer materialer kreves for å nå strengere energikrav, som har ført til en økt bruk av materialer Skaar et al. (2017).

Paleari et al. (2013) utførte en case-basert LCA at et italiensk leilighetskompleks med bygningsstandard som tilsier at bygget nesten ikke bruker energi i bruksfase (nZEB). For denne bygningen står før bruk-stadiet, altså produksjon av materialer, transport av materialer, og konstruksjonsprosessen for 61% av utslippene. Artikkelen argumenterer for at et ensidig fokus på energibruk gir et upresist bilde av klimagassutslippene til et bygg i et livløpsperspektiv.

Oldfeld (2012) utarbeidet en empirisk livssyklusanalyse av et 40 etasjers høyhus i London som inkluderte klimagassutslipp både bundet til materialene og i bruksfasen. Studiet fant at en tredjedel av byggets totale karbonfotavtrykk kan relateres til utslipp fra produksjon av bygningsmaterialene, og det argumenteres også her for at utslipp knyttet til produksjon av materialer blir viktigere etterhvert som energikravene blir strengere.

Bawden (2013) argumenterer for at bruksenergi i en LCA ofte har bredere systemgrenser enn materialfasen, slik at de to fasene ikke sammenlignes på et rettferdig grunnlag. For eksempel vil den totale bruksfaseenergien til et bygg inkludere energien som kreves av utstyr som TVer og vaskemaskiner, mens miljøpåvirkningen av å produsere dette utstyret ikke tas med i betrakningen. Ifølge Bawden (2013) fører dette til at bidraget fra energibruk i drift blir over-



Figur 3.3: Oppnådd redusert utslipp for 8 pilotskoler fra programmet Framtidens Bygg. Figur hentet med tillatelse fra Solem (2017).

representert mens bidraget fra produksjon av materialer blir underrepresentert.

Tidspunktet for når de eventuelle utslippsreduksjonene forekommer er også et sentralt tema når man vurderer materialenes rolle i en LCA. For å nå togradersmålet haster det å redusere de globale klimagassutslippene og av denne grunn har flere land satt seg kortsiktige utslippsmål IPCC (2014). Både Solem (2017) og Oldfeld (2012) argumenterer for at valg av klimavennlige materialer er en måte å oppnå disse målene på siden disse utslippsreduksjonene vil kunne avskrives i dag. For tiltak som reduserer en bygnings energibruk vil fordelene av dette derimot bli avskrevet hvert år gjennom hele byggets levetid. Dette perspektivet er illustrert i figur 3.3, hvor vi ser at gevinsten knyttet til redusert materialutslipp er umiddelbar sammenlignet med de årlige gevinstene til reduserte energi- og transportutslipp. Figuren beskriver de samlede utslippsreduksjonene for 8 pilotskoler fra forbildeprogrammet Framtidens Bygg, sammenlignet med en bransjereferanse.

Samtidig som vi ser en tendens til at materialenes rolle opptar en økende andel av klimagassutslippet til et bygg ser det ut til at energibruk i bruksfasen fremdeles er den viktigste faktoren for totalt klimagassutslipp over livsløpet. Cole and Kernan (1996) undersøkte et stort kontorbygg med alternative bæresystemer av tre, betong og stål og fant at utslipp fra bruksfasen dominerer de totale livssyklusutslippene. 20 år senere undersøkte Bohne et al. (2017) klimagassutslippet til bygninger med forskjellige bæresystemer og byggehøyder, og konkluderte med at bruksenergi fortsatt er den største bidragsyteren til de totale klimagassutslippene.

3.4 LCA av komponenter fremfor materialer

Livssyklusanalyser relatert til bygninger og bygningsmaterialer sammenligner ofte ulike alternativer basert på én eller et begrenset sett med funksjonelle egenskaper. Ofte gjelder dette bæresystemer som sammenlignes på det grunnlag at de har samme bæreevne (Robertson et al., 2012; Bawden, 2013; Foraboschi et al., 2014; Skullestad, 2016; Ytrehus, 2015). I mange tilfeller er dette en fullgod tilnærming, men ofte kan tiltak som gjør at konstruksjonen oppfyller flere funksjonelle krav ha betydelige utslag på klimagassutslippet. I disse tilfellene er det viktigere å se på fullstendige bygningsdeler fremfor enkeltmaterialer (Wiik and Schlanbusch, 2016).

Et studie utført av SINTEF Byggforsk, Husbanken og EPD-Norge undersøkte sammensatte konstruksjoners miljøprestasjon (Wiik and Schlanbusch, 2016). Et mål med rapporten var å danne et grunnlag for å utvikle en oppdatert og fullverdig vugge-til-grav PCR for ulike sammensatte konstruksjoner, hvor beregningsregler og metoder foreslås. Rapporten belyser spesielt to hensyn som er viktig å være bevisst på når man sammenligner ulike varianter av samme bygningsdel:

1. For det første er det viktig å undersøke egenskapene og bruksområdene til det spesifikke materialet som beskrives i EPDen. For eksempel kan en gipsplate som er laget for vegger og himlinger, ha for dårlig bæreevne til å benyttes i gulvkonstruksjoner.
2. For det andre stilles det funksjonskrav til ulike bygningskomponenter, der materialene som inngår i bygningskomponenten i samspill må oppfylle disse kravene. Å sammenligne ulike materialer uten å se på hvordan de samspiller med andre materialer kan derfor gi et ufullstendig bilde av materialets egnethet. Det er for eksempel vanskelig å avgjøre hvilket isolasjonsmateriale som er det mest miljøvennlige, siden mineralull, trefiber og isopor alle oppfyller ulike funksjoner i en bygningskontekst (Wiik and Schlanbusch, 2016).

Wiik and Schlanbusch (2016) anbefaler å bruke Bygningsdeltabellen fra Standard Norge for å definere hvilken bygningsdel man ser på (Standard Norge, 2009). Som funksjonell enhet anbefaler de å benytte 1 m² flateareal. I tillegg anbefaler de å gi en grundig forklaring av hva konstruksjonen innebærer og hvilke tekniske spesifikasjoner bygningsdelen har. For etasjeskillere innebærer dette info om de tre faktorene brann, lyd og lastkapasitet.

Bygningsdelstabell

For å gi en felles forståelse av hvordan bygningsdeler kan systematiseres og klassifiseres er det utarbeidet en standard bygningsdelstabell (NS 3451) som beskriver de ulike fysiske dele-

ne av et bygg (Standard Norge, 2009). Et utdrag fra tabellen som er relevant for denne oppgaven er vist i 3.1, som klassifiserer et bygg på tre nivåer med økende grad av detaljering. Det første nivået deler inn bygget i overordnede hoveddeler som omfavner hele bygget. Det andre nivået deler inn hver hoveddel i mer spesifikke underkategorier. Det tredje nivået deler opp disse underkategoriene i nye, enda mer spesifikke, underkategorier.

Tabell 3.1: Tabellen viser et eksempel på NS3451 sin inndeling av bygningskomponenter. De seks hoveddelene omfatter hele bygget (a), hoveddelen «Bygning» deles inn i flere bygningsdeler (b), bygningsdelen «Dekker» deles til slutt i detaljerte underkategorier (c). Fet skrift viser hvilke deler som fokuseres på i denne oppgaven.

(a)	(b)	(c)
Hoveddeler	Bygning	Dekker
Bygning	Generelt	Frittbærende dekker
VVS-installasjoner	Grunn og fundamenter	Gulv på grunn
Elkraft	Bæresystemer	Oppfôret gulv, påstøp
Tele og automatisering	Yttervegger	Gulvsystemer
Andre installasjoner	Innervegger	Gulvoverflate
Utendørs	Dekker	Faste himlinger
	Yttertak	Systemhimlinger
	Fast inventar	Utstyr og komplettering
	Trapper, balkonger, m.m.	Andre deler av dekker
	Andre bygningsmessige deler	

Eksempelstudier

Et studie av Jönson et al. (1997) gjennomførte en LCA-analyse som sammenlignet forskjellige gulvtyper av henholdsvis vinyl, linoleum og heltre. Her kom gulvtypen av heltre best ut, men det var da ikke medregnet et dempende sjikt på undersiden. Som beskrevet i kapittel 2.7 vil et massivt tregulv uten et dempende sjikt ha lavere trinnlyddemping enn de andre myke alternativene. Dette betyr at gulvtypene ikke nødvendigvis kan benyttes i den samme konstruksjonen, som synliggjør viktigheten av å sammenligne ulike alternativer basert på like funksjoner.

Et eksempel på et studie som tar høyde for flere ulike funksjoner i sammenligningsgrunnlaget er et studie utført av Skaar et al. (2017). Her er det gjennomført en livsløpsanalyse av fire forskjellige etasjeskillere som enkelt kan prefabrikeres og benyttes i bygg fra fem til 10 etasjer. Etasjeskillerne oppnår en minimum spennvidde på 7,2 meter, lydisolasjon på 53 dB og brannmotstand på REI 90. Alle de fire dekkene inkluderer tilleggsmaterialer for å oppnå lyd- og brannkrav. Disse tilleggsmaterialene er blant annet påstøp av betong, trinnlydplate, grus, isolasjon og himlingsplater, som har en betydelig innvirkning på de totale klimagassut-

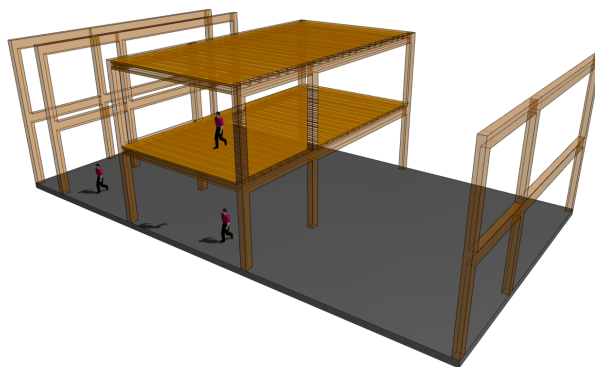
slippene. Resultatene indikerer at tredekkene har et lavere klimagassutslipp sammenlignet med betonghulldekket. Samtidig viser studiet at karbonfotavtrykket til de trebaserte dekkene i værste fall kan bli høyere enn de betongbaserte dekkene, hvis det ikke fokuseres på valg av klimavennlige tilleggsmaterialer.

3.5 Trehulldekker

Trehulldekker er en lite brukt konstruksjon som er sentral for denne oppgaven og blir derfor beskrevet grundig i dette avsnittet. I forbindelse med en sommerjobb forfatteren hadde sommeren 2017 tilknyttet forskningsprosjektet Woodsol hos SINTEF Byggforsk, ble det utført et litteraturstudie om trehulldekker. Det ble funnet mye informasjon som omhandlet strukturelle og lastbærende egenskaper, men begrenset med informasjon som omhandlet akustikk og livssyklusanalyser.

3.5.1 Woodsol

WOODSOL er et pågående forskningsprosjekt som involverer SINTEF, NTNU, Moelven, Eggen Arkitekter og flere andre norske aktører. Målet med prosjektet er å utvikle et bæresystem som kan prefabrikeres og tillate trebygg i 5 til 10 etasjer. Bæresystemet baseres på moment-sive rammesystemer av limtre, og stive huldekker der bærebjelkene integreres i dekkene. Illustrasjon på dette er vist i figur ???. Dette tillater lange spenn og muliggjør en åpen og fleksibel arkitektur. Prosjektet har et spesielt fokus på akustikk, i tillegg til at alle løsningene skal komme et godt stykke bedre ut på klimagassregnskapet sammenlignet med tradisjonelle løsninger av betong.



Figur 3.4: Illustrasjon av bæresystem og trehulldekker fra Woodsol. Figur laget av Bård Solem, Eggen Arkitekter.

Tabell 3.2: Produsenter av trehulldekker i Europa, med oversikt over hvilke materialer som benyttes

Produsent	Land	Material	
		Øvre og nedre plate	Steg
Lignatur	Sveits	Heltre	Limtre
Novatop	Tjekkia	LVL	LVL
Lignotrend	Tyskland	CLT eller heltre	Limtre
Züblin Flex	Tyskland	LVL eller CLT	Limtre
Metsä Wood	Finland	LVL	LVL
Stora Enso	Finland/Sverige	LVL	LVL
Kielsteg	Tyskland	Heltre	LVL
Dendro Light	Latvia	LVL	Porøst limt tre

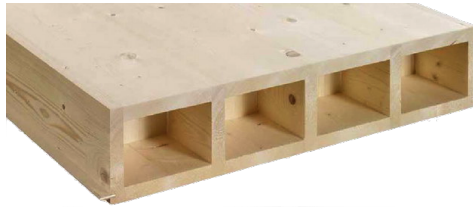
3.5.2 Produsenter

Når det gjelder produsenter som leverer trehulldekker i dag ble det funnet åtte leverandører fra forskjellige steder i Europa (se tabell 3.2). Dekkene fra Kielsteg og DendroLight har ikke den samme utformingen som de andre dekkene, og er derfor ikke aktuelle å se videre på i denne oppgaven.

For de resterende dekkene er det stor variasjon i hva slags dokumentasjon som foreligger. Siden denne oppgaven fokuserer på et stort antall parametre er det viktig at datagrunnlaget som oppgis fra leverandørene er tilstrekkelig. For Lignotrend, Züblin Flex, Metsä Wood, Stora Enso og Hernández et al. (2014) foreligger det ikke tilfredstillende informasjon som omhandler alle de nødvendige aspektene innen lydisolasjon, brannmotstand og tilgjengelige spennvidder. For elementene fra Novatop foreligger det informasjon om både lydisolasjon, brannmotstand og spennvidder, men hverken korreksjonsfaktorer for lavere frekvenser eller dekkenes nedbøying og vibrasjonsegenskaper er dokumentert (se korrespondanse i vedlegg A). Ut fra litteraturstudiet er det altså kun elementene fra Lignatur som kan fremvise nok dokumentasjon på alle områder nødvendig for denne oppgaven.

Lignatur

Lignatur tilbyr en rekke forskjellige løsninger for sine etasjeskillere som kan oppnå forskjellige krav ut fra hvilket bruksområde de skal benyttes i. Gode egenskaper innen brannsikkerhet, lyddemping, romakustikk og varmeisolasjon kan oppnås ved å inkludere forskjellige materialer på oversiden, på undersiden eller i hulrommet, eller ved å utforme dekkene med perforeringer. Elementene gir rask oppføring på byggeplass og produseres enten som bjelkeelementer (LKE) eller som flatelementer (LFE), som vist i figur 3.5. Flatelementene består



Figur 3.5: Illustrasjon av et trehulldekke (LFE). Bildet er hentet fra Lignatur sine hjemmesider og gjengitt med tillatelse.

av brede elementer mens bjelkeelementene består av hule kvadratiske bjelker, begge settes sammen etter not og fjær prinsippet.

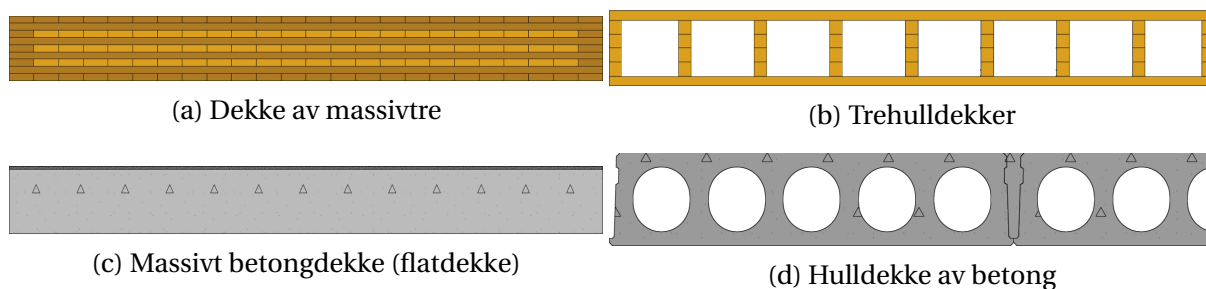
Kapittel 4

Metode

4.1 Oversikt over metodiske beslutninger

I denne oppgaven er det valgt å fokusere på etasjeskillere som kan benyttes i høye hus og de krav som gjelder der. Mange parametre er tatt høyde for, som spennvidde, nyttelast, brannmotstand, trinnlydnivå og luftlydsreduksjonstall. Fire forskjellige dekketyper er undersøkt; to dekker med betong som hovedmateriale og to dekker med tre som hovedmateriale. Det er fokusert på dekketyper som er materialeeffektive og/eller klimavennlige. Dette inkluderer massivtredekker, trehulldekker, flatdekker av betong og huldekker av betong, som vist i figur 4.1. Nødvendige søyler og bjelker for å bære de forskjellige dekketyperne er tatt med i analysen. Hver av de fire dekketyperne har blitt kombinert med forskjellige tilleggsmaterialer på oversiden og på undersiden, og eventuelt i hulrommet. Dette har ført til at et stort antall forskjellige dekker har blitt analysert; hvis hver enkelt konfigurasjon telles med tilsvarende dette 176 stykk.

Figur 4.1: Illustrasjon av de bærende delene til etasjeskillerene undersøkt i denne oppgaven



Dekkene er dimensjonert for spennvidder på 5, 7 og 10 meter, med en nyttelast på 3 kN/m^2 og med en brannmotstand på REI90. Trinnlydnivå og luftlydsreduksjonstall med tilhørende

korreksjonsverdier for lave frekvenser er samlet inn. I tillegg har parametrene vekt og totaltykkelse på etasjeskillet blitt tatt med i analysen. Andre parametere har blitt utelatt selv om de i praksis kan ha innvirkning på utformingen av etasjeskillerne. Dette omfatter blant annet termisk masse, estetiske forhold, luftkvalitet, varmeisolasjon, romakustikk og overflatekvalitet.

Systemgrensen for livssyklusanalysen er satt som «vugge-til-port» og inkluderer fasene A1 til A3, hvor effektene av lagring av biogent karbon er utelatt. Den funksjonelle enheten er én kvadratmeter ferdig dekke med egenskapene nevnt i forrige avsnitt. Analysen baserer seg på EPDer registrert hos EPD-Norge og generiske verdier fra Ecoinvent (Ecoinvent, 2018; EPD-Norge, 2018).

Det er viktig å presisere at det er benyttet flere ulike metoder for å dimensjonere og utarbeide materialmengder for dekkene i denne oppgaven. Tredekkene er dimensjonert ut fra veiledende tabeller gitt av leverandører og etter anbefalinger fra SINTEF Byggforsk. Dekkene av betong er dimensjonert basert på to masteroppgaver skrevet ved NTNU av Margrethe Ollendorf og Håkon Sælen (Ollendorff, 2012; Sælen, 2016).

4.2 Metodiske valg for litteratursøk

For å skaffe til veie relevant informasjon har masteroppgaver skrevet ved bygg og miljøteknikk gjennom de seneste fem til ti årene blitt undersøkt. For de masteroppgavene som viste seg å være relevante har litteraturlisten blitt gjennomgått og referansene undersøkt videre. Det er utført søk i forskjellige databaser, deriblant Google Scholar, Scopus, Research Gate og ScienceDirect hvor det er benyttet forskjellige kombinasjoner av søkeord som: CO₂-premium, comparative LCA, urban, tall building, embodied energy, m. fler for litteratursøket som omhandler CO₂-premien for etasjeskillere og søkeord som: LCA, tall building, CO₂, wood og flooring systems for litteratursøket som omhandlet klimaoptimale etasjeskillere. I forbindelse med en sommerjobb forfatteren hadde hos SINTEF Byggforsk ble det gjennomført et litteraturstudie som omhandlet trehulldekker, hvor flere av de samme kildene er benyttet i denne oppgaven.

4.3 Metodiske valg for mengdeberegninger

Dette kapitlet beskriver hvilke beregninger, antagelser og kilder materialmengdene for dekkene i denne oppgaven baserer seg på.

4.3.1 Lastkapasitet og spennvidder

Spennvidde er som nevnt tidligere i oppgaven en veldig viktig konkurransefaktor for et etasjeskille som bidrar til arkitektonisk fleksibilitet. For å finne en sammenheng mellom klimagassutslipp og spennvidde, og sikre at de ulike dekkene sammenlignes på likt grunnlag, ble det valgt å systematisere de ulike dekkene i tre kategorier med enkeltspenn på 5, 7 og 10 meter. Siden nødvendige dimensjoner på bjelker og søyler varierer fra dekke til dekke ble disse også inkludert i beregningene.

I beregningene er det sett bort fra alle krefter som har med avstivning å gjøre, som vind og skjevstillingslaster. Avstivende tiltak kan utgjøre betydelige materialmengder, men er i større grad avhengig av faktorer som høyde og utforming på bygget, og i mindre grad avhengig av valgt dekkeløsning. Stive heissjakter, skjervegger og andre stivende tiltak som krysstruktur er på grunnlag av dette utelatt fra analysen.

Veiledende tabeller

For å dimensjonere tredekkene for nedbøyning og vibrasjoner er flere veiledende tabeller fra forskjellige leverandører undersøkt. Dette er så sammenlignet med tabellverdier for komfortkriteriet gitt av Homb (2007). Disse tabellene oppgir nødvendige dimensjoner ved forskjellig nyttelast, dødlast og spennvidde, men kan bare brukes ved fordimensjonering og ikke fullstendig statisk dimensjonering. I denne oppgavene er tabellene fra Martinson, Stora Enso og Lignatur undersøkt. Kriterier for første egenfrekvens og maksimal nedbøyning varierer fra kilde til kilde, som vist i tabell 4.1. Her ser vi det strengeste dimensjoneringskriteriet er komfortkriteriet.

Tabell 4.1: Krav for nedbøyning og vibrasjoner funnet i litteraturen. Maksimal nedbøyning måles ved en punktlast på 1kN. Noen av kravene inkluderer også maksimal vibrasjonsaksellerasjon, a .

Kilde	Nedbøyning	Første egenfrekvens
Martinson (2016)	< 1,3 mm	$f_1 > 8$ Hz
Stora Enso (2015a)		$f_1 > 8$ Hz, eller $f_1 > 5$ Hz med $a < 0,4$ m/s ²
Lignatur (2014)	< 1,5 mm	$f_1 > 8$ Hz, eller $f_1 > 5$ Hz med $a < 0,2$ m/s ²
Homb (2007)	< 1,3 mm	$f_1 > 10$ Hz

Spennvidder for massivtredekkene

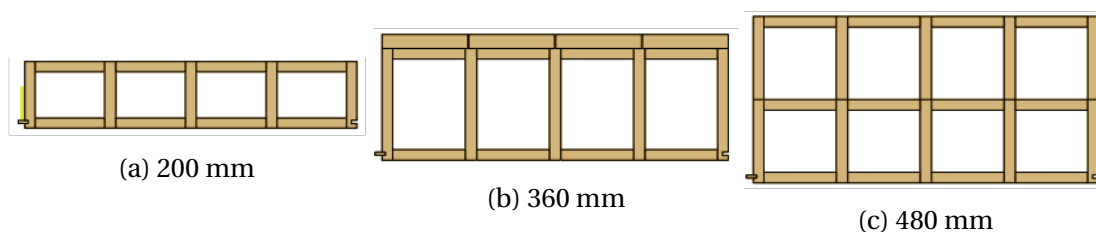
Dekkene av massivtre er dimensjonert ut fra komfortkriteriet, siden denne metoden sikrer det beste sammenligningsgrunnlaget med tanke på vibrasjoner og nedbøying i forhold til et tyngre betongdekke. Ifølge veiledende tabell gitt av Homb (2009) oppnår krysslimte elementer lagt over ett spenn en spennvidde på 5 meter ved 200 mm dekketykkelse. Vibrasjonsegenskaper ved disse betingelsene har forøvrig vist en god overenstemmelse mellom målte og beregnede verdier.

Siden Homb (2009) ikke oppgir nødvendig dekketykkelse for spenn ved 7 meter er tall fra Ytrehus (2014) benyttet. Ytrehus (2015) gjennomførte et studie som omhandlet materialbruk i trebaserte etasjeskillere i fleretasjes bygg, hvor blant annet materialmengder for massivtredekker ble estimert ved varierende nyttelast, spennvidde og brannkrav. Selv om dekket ved 7 meter er kontrollert for komfortkriteriet er det uvanlig å benytte slike dimensjoner i praksis. Det er likevel inkludert i oppgaven for å vise ulike sammenhenger.

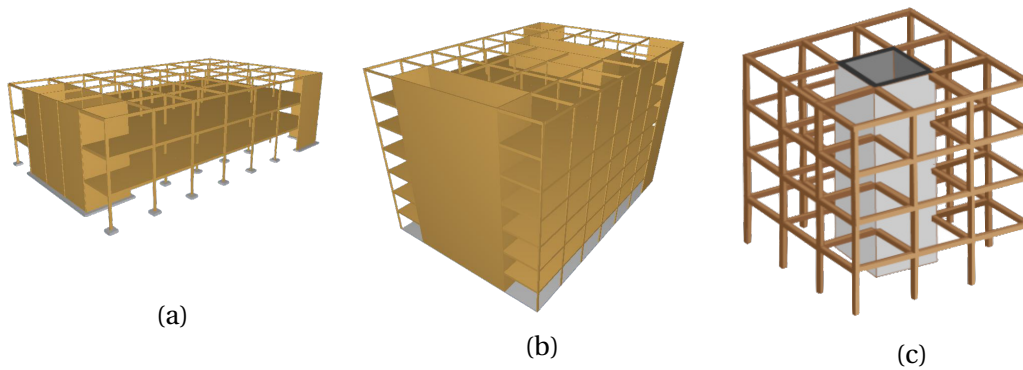
Spennvidder for trehulldekkene

Trehulldekkene er dimensjonert ut fra veiledende tabeller fra Lignum og tilhørende dimensjoneringskriterier vist i tabell 4.1. Dekkene er ikke dimensjonert ut fra komfortkriteriet da det for trehulldekker ikke foreligger dokumentasjon på dette. Nødvendige dekkehøyder er dimensjonert til 200 mm, 320 mm og 480 mm for spennvidder på henholdsvis 5, 7 og 10 meter. Utforming av disse dekkene uten tilleggskonstruksjoner er illustrert i figur 4.2. De valgte dekkehøydene tilsvarer nødvendige dimensjoner for et tungt dekke med nyttelast på 3 kN, der lettere konfigurasjoner er konservativt antatt å benytte de samme dimensjonene. Dette er ikke en optimal tilnærming, da dekkehøyde ikke bare avhenger av nyttelast og spennvidde, men også av dødlast fra tilleggskonstruksjoner. Samtidig bør det nevnes at denne problemstillingen har minimal innvirkning på sluttresultatene siden trehulldekker har effektive tverrsnitt der kun steghøyden varierer. Dette belyses videre i kapittel 6.

Figur 4.2: Forskjellige dekkehøyder levert av Lignatur



Figur 4.3: Illustrasjon av bæresystemene benyttet av Skullestad (2016) (a-b) og Robertson et al. (2012) (c).



Dimensjonering av bjelker og søyler av tre

Nødvendige bjelker, søyler og bærevegger av tre har blitt dimensjonert basert på normaliserte verdier gitt av Robertson et al. (2012) og Skullestad (2016). Robertson et al. (2012) gjennomførte en vugge-til-port LCA av et Canadisk kontorbygg på fem etasjer hvor alternative bæresystemer av betong og tre ble sammenlignet. Studiet hadde som mål å dimensjonere de to bæresystemene med så like funksjonelle egenskaper som mulig. Bæresystemet av tre er vist i figur 4.3 og består av et bjelke-/søylesystem med avstivende betongkjerne dimensjonert for en nyttelast på 3 kN. Artikkelen fremlegger nødvendige materialmengder fordelt på ulike bygningsdeler, dette omfatter blant annet kategoriene etasjeskillere, søyler, bjelker og vertikalt bærende vegger. Normaliserte materialmengder for de bygningsdelene som er benyttet i denne oppgaven er gitt i tabell 4.2.

Skullestad (2016) gjennomførte som nevnt i kapittel 3 en livsløpsvurdering for fire bygg på tre, syv, 12 og 21 etasjer med betong og tre som bæresystem. For trebygningene på tre, syv og 12 etasjer består bæresystemet av et bjelke-/søylesystem med avstivende massivtrekjerne dimensjonert for en nyttelast på 2,6 kN. Byggene er dimensjonert på skissestadiet av et ledende rådgivende firma i Norge, med mål om å oppnå de samme lastkravene som de tilsvarende betongbyggene. Artikkelen fremlegger ikke materialbruk fordelt på bygningskomponenter men deler materialmengdene inn i CLT og limtre, hvor normaliserte verdier er gitt i tabell 4.2.

Som vi ser av tabell 4.2 skiller materialmengdene fra Robertson et al. (2012) seg fra materialmengdene benyttet av Skullestad (2016), selv om totalmengden er relativt lik. At bygget beskrevet av Robertson et al. (2012) bruker mindre CLT er en naturlig følge av at avstivningssystemet baserer seg på en betongkjerne.

Tabell 4.2: Oversikt over nødvendige materialmengder tilknyttet bjelker og søyler. Alle enheter er oppgitt som kg/m².

Komponent	Material	Skullestad			Robertson
		3	7	12	5
Etasjer		3	7	12	5
Vegger og dekker	CLT	123	124	134	101
Søyler og bjelker	Limtre	19	11	10	35
Totalt		142	135	144	137

For å skaffe tall som er sammenlignbare med bjelke-/søylesystemet benyttet av betongdekkene er det valgt å kun inkludere den delen av bæresystemet som omhandler bjelker og søyler, hvor avstivende elementer er ekskludert. Materialmengdene knyttet til søyler og bjelker varierer i de to studiene. Dette kan være fordi massivtreveggene i modellen fra Skullestad (2016) bidrar mer til den vertikale lastbæringen enn betongkjernen i modellen til Robertson et al. (2012). Som et konservativt anslag er det valgt å benytte materialmengdene oppgitt av Robertson et al. (2012) videre i analysen, som tilsvarer et bidrag på 35 kg limtre pr kvadratmeter bruksareal. Det antas at disse erfaringstallene er representative for alle dekkeløsningene benyttet i denne oppgaven, som er en grov tilnærming med usikkerhet som diskuteres videre i kapittel 6.

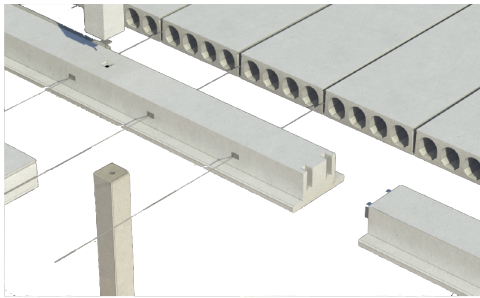
Spennvidder for betongdekker

For betongdekkene baserer dimensjonering av lastkapasitet og spennvidder seg på to masteroppgaver skrevet ved NTNU av Margrethe Ollendorff og Håkon Sælen (Ollendorff, 2012; Sælen, 2016). Disse oppgavene tar for seg to spesifikke byggeprosjekter, Powerhouse Brattøra og Gullhaug Torg, som var under planlegging da oppgavene ble skrevet. Flere forskjellige dekkeløsninger, med forskjellig nyttelast, spennvidde og geometri, ble sammenlignet med mål om å ha så like forutsetninger som mulig.

For flatdekkene med spenn på 5 og 7,2 meter er materialmengdene basert på 200 mm tykke dekker hentet fra Ollendorff (2012). For spenn på 10 meter er det nødvendig å etterspenne dekkene hvor materialmengder for et dekke på 250 mm er basert på Sælen (2016). Nødvendig søyledimensjonering er inkludert i beregningene. Flatdekker benytter ikke bjelker siden konstruksjonsteknikken baserer seg på at dekkene støpes direkte på søyler. Avretting på 10 mm er inkludert i alle tilfellene.

For hulldekkene av betong er materialmengder utelukkende basert på dimensjonering foretatt av Ollendorff (2012). Det er benyttet hulldekke på 265 mm for alle spennvidder, der nød-

Figur 4.4: Illustrasjon av bæresystemene som er benyttet av Ollendorff (2012) og Sælen (2016). Figurene er hentet og tilpasset fra Ollendorff (2012).



(a) Hulldekker med bæresystem av bjelker og søyler



(b) Massive flatdekker støpt direkte på søyler

vendig spennarmering varierer. Nødvendige materialmengder for bjelker og søyler er inkludert i beregningene. Fugearmering og avretting på 20 mm er inkludert for alle spennvidder.

Kildene oppgir et par usikkerhetsmomenter knyttet til dimensjoneringen av betongdekkene. For det første utnytter ikke alle dekkene sin fulle kapasitet ved korte spennvidder og kunne med optimaliserte beregninger redusert betong- eller armeringsmengden. For det andre er det ikke tatt hensyn til at praktisk gjennomførbarhet på byggeplass sannsynligvis vil føre til at en større mengde armering er nødvendig.

Tabell 4.3 viser hvordan mengden på de forskjellige delmaterialene varierer med spennvidde for flatdekkene og hulldekkene av betong. Det foreligger ikke en slik oversikt over tredekkene siden de består av kun CLT eller kun limtre. En samlet oversikt over alle dekkenes materialbruk finnes i kapittel 5.

4.4 Metodiske valg innen lyd

Lydisolasjonegenskaper for etasjeskillerne i denne oppgaven baserer seg på dokumenterte verdier fra laboratorie- og feltmålinger hentet fra leverandører og relevant litteratur. Trinnlydnivå og luftlydsreduksjonstall med tilhørende korreksjonsverdier for lave frekvenser er samlet inn for alle dekketyper.

Lydtegn for massivtredekker

Informasjon om lydisoleringsegenskaper for massivtredekker er hentet fra forskningsprosjektet *Sound insulation in wood construction* gjennomført av Lignum. Lignum er en paraplyorganisasjon for treindustrien i Sveits, som i samarbeid med Bern University og SINTEF

Tabell 4.3: Detaljert mengdeoversikt over delmaterialer som inngår i flat- og hulldekkene av betong

	Vekt dekke			Vekt bjelker og søyler			Totalt		
	5 m	7 m	10 m	5 m	7 m	10 m	5 m	7 m	10 m
Flatdekke									
Betong	480	480	600	15,0	26,4	58,4	495	506	658
Slakkarmering	15,0	28,0	12,0	7,60	2,90	2,50	22,6	30,9	14,5
Påstøp	16,0	16,0	16,0	-	-	-	16,0	16,0	16,0
Spennarmering	-	-	4,90	-	-	-	-	-	4,90
Total	511	524	633	22,6	29,3	60,9	534	553	694
Hulldekke HD265									
Betong	367	367	367	658	687	657	1025	1054	1024
Avretting	32,0	32,0	32,0	-	-	-	32,0	32,0	32,0
Spennarmering	2,62	2,62	3,93	2,62	7,86	7,86	5,24	10,5	11,8
Slakkarmering	0,42	0,49	0,35	5,16	4,60	9,36	5,58	5,09	9,71
Total	402	402	403	666	700	674	1068	1102	1078

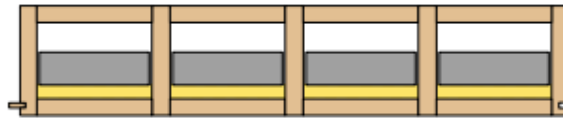
Byggforsk i Norge har samlet inn lydisolasjonsdata om forskjellige bygningskomponenter i tre. Prosjektet har resultert i en åpen database som kan benyttes til å beregne de akustiske egenskapene for alle komponenter i et trebygg (Lignum databasen). For etasjeskillere foreligger det dokumenterte egenskaper innen luftlydisolasjon, trinnlydnivå og korreksjonsfaktor for utvidet frekvensspekter for konfigurasjoner av blant annet massivtre og trehulldekker. Målingene for massivtre er utført med dekketykkelse 200 mm.

Lydtall for trehulldekker

Datagrunnlaget for trehulldekkene er hentet fra Lignatur og Lignum databasen (Lignatur, 2014; Lignum, 2018). Lignatur har utført laboratorietester ved *Rosenheim Laboratory for building acoustics* i Tyskland, hvor trinnlydnivået er oppgitt både med og uten lett flytende gulv. Lyddata er kun hentet inn for elementer med dekketykkelse 200 mm.

For noen av elementene inneholder hulrommet et gruselement som ligger oppå et elastisk lag av mineralull, som vist i figur 4.5. Dette fungerer som en harmonisk absorbent som reduserer lavfrekvent strukturlyd og minimerer trinnlydoverføringen. Vekten på demperen og elastisiteten til mineralullen bør optimaliseres med tanke på elementets spennvidde, totalvekt og bruksområde. For at resultatene fra lydmålingene skal være gyldige i et ferdig bygg er det viktig at dette analyseres individuelt for hvert enkelt element, slik at nye ugunstige

resonansfrekvenser ikke oppstår.



Figur 4.5: Oppbygning av LFE Silence 12. Figur hentet med tillatelse fra Lignatur (2014).

Lydtall for betongdekker

Informasjon om lydisoleringsegenskaper for forskjellige betongdekker er hentet fra Hveem (2015a) og Hveem (2015b). Disse dataene baserer seg på en rekke felt- og laboratoriemålinger utført av SINTEF Byggforsk og andre rådgiverfirmaer innen akustikk. Anvisningen viser hvordan man kan beregne forventet lydisolasjon i ferdig bygning for en sammensatt etasjeskiller. Etasjeskillerne består av forskjellige typer bærende konstruksjon av betong, som hulldekker, massive dekker og lettklinkerdekker, kombinert med ulike gulv- og himlingskonstruksjoner.

Utgangspunktet for beregningene er en basisverdi som angir lydisolasjonen til rådekket avhengig av tykkelse. I tillegg angir kilden lydforbedringsverdier for ulike typer tilleggskonstruksjoner på oversiden (belegg, flytende gulv osv.) og på undersiden (strålingsminskende himling). Summen av basisverdien for valgt dekke ($L'_{n,w}$ eller R'_w) og forbedringsverdien for ekstra konstruksjon på oversiden eller undersiden ($\Delta L'_w$ eller $\Delta R'_w$) gir forventet lydisolasjonsverdi for hele etasjeskilleren. Der dekketykkelsen ligger mellom to verdier oppgitt i tabellene fra Hveem (2015a,b), er det konservativt avrundet ned til nærmeste dekke.

Lydegenskaper ved varierende spennvidder

For dekkene i denne oppgaven (utenom hulldekker av betong) øker både dekketykkelsen og flatevekten med spennvidden. Flatdekket med 10 meter spenn er dimensjonert med 50 mm ekstra dekkehøyde sammenlignet med flatdekkene med kortere spenn, som øker flatevekten med 120 kg/m^2 . Som nevnt i kapittel 2.7 vil dette bedre lydisolasjonsegenskapene betraktelig, som er tatt hensyn til ved at egne lydtall er beregnet.

For massivtredekkene og trehulldekkene er det kun funnet dokumentasjon av lydegenskaper ved dekketykkelser som kan nå 5 meter spenn. For massivtredekkene øker flatevekten med rundt $30\text{-}35 \text{ kg/m}^2$ fra fem til syv meter spenn, for trehulldekkene øker flatevekten med 10 kg/m^2 fra fem til syv meter spenn og med ca 30 kg/m^2 fra fem til 10 meter spenn. Selv om

økt flatevekt i teorien vil bedre lydegenskapene ser vi økningen for tredekkene er relativt beskjedent sammenlignet med flatdekket. På bakgrunn av dette, i tillegg til mailkorrespondanse med Dipl. Ing. Ralf Wipper, teknisk rådgiver ved Lignatur, er det antatt at lydegenskapene for etasjeskillerne av tre er uavhengig av dekketykkelse og spennvidde (se vedlegg A).

Korreksjonsfaktor for lavfrekvent lyd

I henhold til den norske standarden for lydforhold i bygninger (NS 8175, 2012) skal korreksjonsfaktoren for luftlydisolasjon oppgis som $C_{50-5000}$ og korreksjonsfaktoren for trinnlydnivå oppgis som $C_{I,50-2500}$.

Tabell 4.4: Oversikt over oppgitt luftlydsreduksjonstall og trinnlydnivå med tilhørende korreksjonsfaktor fra de forskjellige kildene.

Dekketype	Kilde	Luftlydsreduksjonstall	Trinnlydnivå
Massivtre	Lignum (2018)	$R_w + C_{50-3150}$	$L_{n,w} + C_{I,50-2500}$
Trehulldekke*	Lignum (2018)	$R_w + C_{50-3150}$	$L_{n,w} + C_{I,50-2500}$
Flatdekke	Hveem (2015a,b)	$R'_w + C_{50-5000}$	$L'_{n,w} + C_{I,50-2500}$
Betonghulldekke	Hveem (2015a,b)	$R'_w + C_{50-5000}$	$L'_{n,w} + C_{I,50-2500}$

*Konstruksjoner med parkett oppgir korreksjonsfaktor for trinnlydnivå som $C_{I,50-5000}$

Som vi ser av tabell 4.4 er de fleste korreksjonsfaktorene benyttet i denne oppgaven oppgitt i henhold til NS 8175, bortsett fra tredekkenes korreksjonsfaktor for luftlyd. Siden $C_{50-3150}$ ikke tar hensyn til de høye frekvensene der dekker av tre normalt isolerer godt, vil denne faktoren bedømme tredekkene strengere enn korreksjonsverdien i henhold til NS 8175.

Det er kommet fram til at dette sannsynligvis vil ha lite å si for totalresultatet. For å sammenligne dekker av tre og betong er det korreksjonsverdier som tar hensyn til de lave frekvensene som er avgjørende.

Flanketransmisjon

Som vist i tabell 4.4 er lyddataene for dekkene av tre basert på laboratoriemålte verdier ($L_{n,w}$ og R_w), mens dekkene av betong er basert på feltmålte verdier ($L'_{n,w}$ og R'_w). Disse verdiene kan ikke sammenlignes direkte siden feltmålte verdier inkluderer en flanketransmisjon på typisk 3-5 dB, som nevnt i kapittel 2.7. Det er derfor gjort tilnærminger med utgangspunkt i kriterier gitt av Hveem (2015a), som vist i tabell 4.5. Her ser vi at valg av bæresystem, innervegger og yttervegger, samt etasjeskillets spennvidde avgjør hvor stor flanketransmisjon som gjør seg gjeldene.

Tabell 4.5: Betingelser for de ulike flankeoverføringsgradene (Hveem, 2015a)

Grad av flankeoverføring	Kriterier
Liten grad	Store spenn (>8 m) over flere rom Opplegg på søyle/bjelke Lette, utfyllende skillevegger
Middels grad	Middels spenn (5–7 m) over to rom Opplegg på massiv vegg eller søyle/bjelke Lette eller massive skillevegger
Stor grad	Små spenn (<5 m) over ett rom Opplegg på massive veggskiver Massive skillevegger

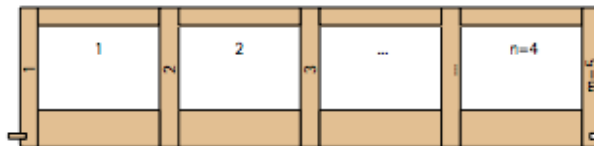
Felles for alle dekkene i denne oppgaven er at de blir benyttet i bæresystemer basert på bjelker og søyler, med lette skillevegger. Basert på tabell 4.5 betyr dette at dekkene med 10 meter spenn havner i kategorien med liten grad av flankeoverføring. Dekkene på 5 og 7 meter spenn havner et sted mellom liten og middels grad av flankeoverføring. For enkelhets skyld er det antatt at alle dekkene i denne oppgaven har en lav flankeoverføringsgrad. Dette forutsetter at alle gjennomføringer, rørføringer, fuger, etc. er tett og at alle opplegg og knutepunkter er utført på en måte som sikrer lav flanketransmisjon. For betongdekkene oppgis høy/middels/lav flankeoverføringsgrad for de forskjellige rådekkene ved kilden. For tredekkene er det antatt at lav overføringsgrad tilsvarer 3 dB.

Densiteter

Lydmålingene baserer seg på spesifikke materialegenskaper, hvor flatevekten på for eksempel gipsplater kan være avgjørende for oppnådd lydisolasjon. For å forenkle livsløpsanalysen har det derimot blitt antatt at materialdensitetene er like i alle etasjeskillerne. Dette betyr at den oppgitte vekten på ulike materiallag i lydmålingene viker noe fra vekten benyttet i LCA-analysen, selv om volum og tykkelse er helt identiske. Å ta hensyn til dette ville ført til mer tidkrevende beregninger, i tillegg har dette små konsekvenser for det totale klimagassutslippet sammelignet med usikkerheten knyttet til valg av EPD, som beskrives i kapittel 6.

4.5 Metodiske valg innen brann

Brannegenskapene for de analyserte etasjekillerne i denne oppgaven baserer seg på veiledende verdier oppgitt fra leverandører, anbefalinger fra SINTEF Byggforsk og spesifikke branntester funnet i litteraturen. En oversikt over nødvendige dimensjoner for å oppnå REI



Figur 4.6: Oppbygning av trehulldekke som oppnår REI90. Figur hentet med tillatelse fra Lignatur (2014).

90, med tilhørende kilder, er gitt i tabell 4.6. Flatdekkene og massivtredekkene overgår kravet om REI 90. Ingen av dekkene behøver himling på undersiden for å oppnå brannkravene, likevel inkluderes en himling på flere av de analyserte etasjeskillerene for å nå lydkrav.

Tabell 4.6: Oversikt over dimensjoner på forskjellig typer dekker som oppnår REI 90

Dekke	Dekketykkelse	Nedre plate/overdekning	Kilde
Massivtre	160 mm	-	Glasø et al. (2005); Stora Enso (2015b)
Trehulldekke	200 mm	82 mm	Lignatur (2014)
Hulldekke	200 mm	45 mm	Betongelementforeningen (2017)
Massiv betong	100 mm	30 mm	Krohn (2008)

For massivtre viser branntester beskrevet i Glasø et al. (2005) og Stora Enso (2015b) at et dekke på 160 mm kan oppnå REI 90 med en testlast på 6 kN. Trehulldekkene kan leveres med brannmotstand REI90, avhengig av tykkelsen på nedre plate, som vist i figur 4.6. Kilden kategoriserer dekkene som D-s₁, d₀, og har benyttet en innbrenningshastighet på 0,8 mm/min (Lignatur, 2014; AICE, 2014).

For betongdekkene har brannteknisk teori og anbefalte utførelser blitt hentet fra Krohn (2008) og Betongelementforeningen (2017). For flatdekker av betong er brannmotstanden avhengig av dekketykkelse og armeringsdybde. For hulldekker av betong er brannmotstanden avhengig av ekvivalent dekketykkelse og armeringsdybde. Ekvivalent dekketykkelse er gitt som $h_{ekv} = A/B$, der A er netto tverrsnittsareal av elementet, og B er elementbredden.

I praksis vil en mer utfyllende brannsikkerhetsanalyse måtte gjennomføres, der forhold som brannlast, romutforming, tretype, limtype, osv. inkluderes. Dette kan slå begge veier med tanke på klimagassregnskapet:

- Siden tre er et brennbart materiale utføres i praksis alle høye trebygg med sprinkleranlegg for å oppnå gitte funksjonskrav. Utslipp knyttet til dette er ikke tatt med i denne oppgaven.
- Der det benyttes himling er det mulig at nødvendig dekketykkelse kunne blitt redusert med tanke på branndimensjonering. Dette forutsetter at andre krav som bæreevne,

nedbøying og vibrasjoner blir ivaretatt. Eventuelle innsparinger knyttet til dette er ikke tatt med i denne oppgaven.

4.6 Metodiske valg for livssløpsanalysen

4.6.1 Systemgrenser

Systemgrensen for livsløpsanalysen er som nevnt satt som «vugge-til-port» og inkluderer fasene A1 til A3 gitt i NS-EN 15987, som innebærer utslipp knyttet til utvinning av råmaterialer, transport til produksjonssted og produksjon. Konstruksjon, bruk, avhending og effekter utenfor systemgrensen er ikke inkludert. Dette innebærer at opptak og utslipp av biogent karbon antas å skje i begynnelsen av livløpsperioden.

Utslippsfaktorene for de viktigste materialene baserer seg på EPDer registrert hos EPD-Norge. For noen materialer som ikke er registrert i denne databasen har generiske verdier fra Ecoinvent eller EPDer fra andre kilder blitt benyttet. EPDene hentet fra det norske EPD programmet baserer seg på like forutsetninger som sikrer et godt sammenligningsgrunnlag.

4.6.2 Utvalgsriterier for materialer benyttet i livsløpsanalysen

Densiteter

Det varierer om den deklarerde enheten i en EPD er oppgitt som vekt [kg], volum [m^3], tykkelse [mm] eller flateareal [m^2]. For å finne dekkens totale vekt har det derfor vært nødvendig å estimere densiteten til de forskjellige materialene. Estimaten baserer seg på typiske verdier hentet fra litteraturen, leverandører eller EPD'er og er sammenlignet med verdier oppgitt i Byggdetaljblad 471.031 «Egenlaster for bygningsmaterialer, byggevarer og bygningsdeler» (Silseth, 2013). Oversikt over estimater for de mest sentrale materialene er vist i tabell 4.7.

Materialer

Materialer som estimeres til å bidra mindre enn 5% av vekten for hvert etasjeskille, som skruer, spiker og teip, blir

Tabell 4.7: Oversikt over benyttede densiteter for sentrale materialer

Material	Densitet [kg/m^3]
Mineralull	30
Trinnlydmatte	120
Limt tre	470
Gips	900
Fibergips	1150
Påstøp	1600
Grus	1600
Betong	2400

neglisjert med antagelsen om at vekt og karbonfotavtrykk korrelerer. Dette gjelder for blant annet elastiske opphengsprofiler, som basert på konstruksjonseksempel fra Homb (2017) og materialdata fra Nor-gips, vil tilføye mindre enn 2 kg/m^2 til den totale flatevekten. Usikkerhet rundt denne antagelsen er videre belyst i kapittel 6.

Totalt innebærer denne analysen rundt 30 forskjellige materialer innen kategoriene; betong, armering, treverk, isolasjon, gips, gulvprodukter med fler. Utvalgskriteriene belyses her:

Gipsprodukter Utslippsfaktorer for gipsplatene i denne oppgaven er delt inn i vanlig gips (kartonggips), branngips og fibergips. Den vanlige typen er 12-13 mm tykke og består av rundt 95% gips med glassfiberarmering og et lag papp på hver side. Branngips er normalt 15-16 mm tykke. De krymper mindre under brann og beholder sine bindende egenskaper lengre grunnet tykkere glassfiberarmering og andre tilsetningsstoffer. Fibergips er plater som består av en homogen blanding av trefiber og gips, uten papp på utsiden. Perforerte gipsplater og gipsplater med densitet lavere enn 700 kg/m^3 er ikke tatt med i analysen siden de endrer lyd- og brannegenskapene ved dekket.

Treprodukter Forutsetninger for limte treprodukter i denne oppgaven er at de skal ha en densitet mellom 420 og 500 kg/m^3 . Kryssfiner er basert på generiske verdier da det ikke foreligger noen EPD.

Forutsetninger for sponplater benyttet i denne oppgaven er at de skal ha densiteter på 450 - 800 kg/m^3 og tykkelser mellom 6 og 40 mm som gitt av (trefokus 26) Malte sponplater er ikke tatt med da de har betydelig større klimagassutslipp og kun skal benyttes i gulv. Det er ikke funnet EPD for OSB-plater. Utslippsfaktorene er antatt å tilsvare sponplater, siden disse har relativt lik densitet.

Forutsetninger for porøse trefiberplater benyttet i denne oppgaven er at de skal ha densiteter på 200 - 400 kg/m^3 og tykkelser mellom 3 og 25 mm som gitt av (trefokus 26). Både undergulv (3 - 8 mm) og spesialplater ($<38 \text{ mm}$) av trefiberbasert materiale, er definert som porøs trefiberplate.

Betongprodukter Ved bestemmelse av utslippsfaktorer for betong i denne oppgaven er det forutsatt at betongen har fasthetsklasse B30 til B35 og med densitet som normalbetong på 2000 - 2600 kg/m^3 . Dette gjelder også for betong-

heller. Alle typer påstøp og avrettingsmasse er antatt å være av typen sementbasert avrettingsmasse. Sementfiberplater, støpeasfalt og avrettingsmasser basert på anhydritt er antatt å ha samme utslippsfaktor som avrettingsmassen siden densiteten er tilnærmet lik. Selv om det finnes flere EPDer som omhandler spesifikke hulldekker, er armering- og betongmengdene for hulldekkene i denne oppgaven kvantifisert for de ulike funksjonene. Derfor er materialmengdene gitt av Ollendorf og Sælen, og egne utslippsfaktorer knyttet til armering og betong benyttet for å finne hulldekkenes utslippsfaktor. I denne oppgaven har elastisk bundet grus og grus i pappstruktur, som beskrevet i kapittel 2.7, blitt antatt å ha samme utslippsfaktor som vanlig grus. Datagrunnlaget baserer seg kun på en EPD fra EPD-Norge, med densitet på 1600 kg/m^2

Isolasjonsprodukter Isolasjonsmaterialer er delt inn i to kategorier som inkluderer både glassull og steinull; lett mineralull ($0-70 \text{ kg/m}^3$) og tung mineralull ($>120 \text{ kg/m}^3$). Tung mineralull tilsvarer trinnlydplater. Utslippsfaktorer knyttet til Sylo-dyn er i mangel på bedre kilder antatt å tilsvare PUR-skum.

Gulvbelegg Forutsetninger for myke gulvbelegg i denne oppgaven er at de skal være av vinyl eller linoleum og ha gode, sammenlignbare akustiske egenskaper med oppgitt trinnlyddemping på 15-18dB. Dette er såkalte akustikkbelegg som består av et tynt slitelag av vinyl eller linoleum montert på et lag myk skumplast. Vinylbelegg og linoleumsbelegg er lagt i samme kategori selv om de har noen ulike kjemiske og fysiske egenskaper. Linoleum er laget av fornybare materialer og har en bedre miljøprofil, men er ikke like slitesterkt som vinyl. Ingen myke gulvbelegg av hverken vinyl eller linoleum er oppgitt i EPD-Norge. Det er derfor valgt å benytte EPDer for de tre produktene «Acoustic Vinyl», «Marmoleum Tile» og «Marmoleum Decibel», oppgitt av produsenten Forbo (Forbo, 2017).

Lette flytende gulv Lydmålingene som inkluderer lette flytende gulv baserer seg på parkett lagt på tynne isolasjonssjikt (parkettunderlag). Det er ikke funnet utslippsfaktor for parkett, men på grunnlag av tilgjengelige EPDer er det antatt at utslippsfaktorene for laminat og heltregulv er representative. Det antas at lydegenskapene til disse gulvtypene også er representative for parkett. I realiteten vil ulik flatetvekt på de forskjellige gulvtypene føre til en viss variasjon i lydisolasjonsegenskaper, men dette neglisjeres i denne oppgaven. Utslippsfaktor for parkettunderlag er hentet fra

Skaar et al. (2017), som benytter en folie med 60% polyetylen (PE) og 40% polystyren (PS).

Hevede gulvsystem Hevede gulvsystem fra spesifikke produsenter er utelatt fra analysen siden det ikke foreligger noen EPD på disse. Det er utfordrende å finne utslipp knyttet til slike systemer siden de består av mange spesifikke materialer med uvisse mengder.

Sammenligning av utslippsfaktorer med litteratur

For å kvalitetssikre utslippsfaktorene benyttet i livsløpsanalysen er det valgt å sammenligne faktorene med verdier i litteraturen. Tabell 4.8 viser en oversikt over utslippsfaktoren til sentrale materialer fra forskjellige kilder, sammenlignet med verdiene benyttet i denne oppgaven.

Verdiene benyttet av Skaar et al. (2017) og verdiene i denne oppgaven bør være tilnærmet like, siden samme metode er benyttet. For gips og påstøp ser vi verdiene stemmer godt overens, for limtre er det en liten forskjell siden denne oppgaven skillet mellom limtre og massivtre. For mineralull er det derimot en større forskjell. Dette er fordi denne oppgaven skiller mellom tung, trykkfast mineralull som benyttes som trinnlydmatter i overgulv, og vanlig lett mineralull som benyttes i strålingsminskende himlinger. Vi ser denne differensieringen har en del å si.

Utslippsfaktoren for armering har relativt stor variasjon i den undersøkte litteraturen. Likevel vil ikke dette ha avgjørende innvirkning på totalresultatene da det totale utslippet fra armering er relativt lite sammenlignet med resten av materialene i betongdekkene. Valg av utslippsfaktor for betong vil derimot ha mye å si for dekkene i denne oppgaven. Her ser vi verdiene oppgitt av de forskjellige masteroppgavene følger det samme variasjonsmønsteret som verdiene oppgitt av Norsk Betongforening (2015). Utslippsfaktoren benyttet i denne oppgaven er relativt lav, og oppfyller nesten kravene for lavkarbon A. Hvilke følger dette får for sluttresultatene er diskutert i kapittel 6.

Den benyttede utslippsfaktoren for grus baseres kun på én EPD og er meget lav, hele 97% lavere enn betong per kilo og 94% lavere enn massivtre per kubikkmeter. Dette betyr at det resulterende klimagassutslippet fra grus vil være meget lite sammenlignet med totalutslippet til etasjeskilleren det benyttes i. Det er likevel valgt å kvalitetssikre verdien siden grus viser seg å ha en sentral rolle i denne oppgaven. Som vist i tabell 4.8 er det god overensstemmelse mellom de forskjellige EPDene, og som forventet ligger de generiske verdiene høyere

Tabell 4.8: Liste over forskjellige utslippsfaktorer oppgitt i litteraturen for sentrale materialer i denne oppgaven. Faktoren gjelder for A1-A3, og inkluderer ikke biogent karbonopptak.

Materiale	Enhet	Kilde	Type kilde	GWP (kilde)	GWP (Rinholm)
Gips	12mm	Skaar et al. (2017)	Artikkel	2,95	2,81
Limtre	m3	Skaar et al. (2017)	Artikkel	142,05	115,57
Påstøp	25mm	Skaar et al. (2017)	Artikkel	10,56	10,48
Mineralull	50mm	Skaar et al. (2017)	Artikkel	5,35	1,96
Armering	kg	Skullestad (2016)	Masteroppgave	0,89	0,59
		Ytrehus (2015)	Masteroppgave	0,78	
		Ollendorff (2012)	Masteroppgave	0,34	
		Sælen (2016)	Masteroppgave	0,42	
Betong	m3	Skullestad (2016)	Masteroppgave	326	229
		Ytrehus (2015)	Masteroppgave	282	
		Ollendorff (2012)	Masteroppgave	236	
		Bransjereferanse*	Håndbok	370	
		Lavkarbon C*	Håndbok	280	
		Lavkarbon B*	Håndbok	270	
		Lavkarbon A*	Håndbok	210	
		Hermansen (2017)	Laboratorie/EPD	157	
Hermansen (2017)	Laboratorie/EPD	89			
Grus	tonn	Holcim (2014)	EPD	3,1	3,0
		Martin Marietta (2017)	EPD	2,7-5,1	
		Skaar et al. (2017)	Generisk	4,3	
		Skaar et al. (2017)	Generisk	10,6	

*oppgitt av Norsk Betongforening (2015)

enn EPDene. Om selv den høyeste verdien blir benyttet vil totalutslippene til et etasjeskille være tilnærmet upåvirket, med forbehold om at elastiske bindemidler og papp-stukturer (se kapittel 2.7) ikke fører med seg en betydelig økning i klimagassutslippene. Hvis A4 inkluderes i analyseperspektivet vil utslipp knyttet til transport potensielt flerdoble utslippsfaktoren til grus. Dette diskuteres videre i kapittel 6.

Lavkarbonbetong - laboratorieresept

I forbindelse med en masteroppgave ved institutt for konstruksjonsteknikk ved NTNU er det utarbeidet og testet flere resepter for forskjellige lavkarbonbetonger (Hermansen, 2017). En av reseptene som viser gode egenskaper innen støpelighet og herdetid inneholder 78% tilslag av flyveaske. En EPD for denne resepten er blitt utarbeidet av Unicon og viser en resulterende GWP-verdi for fasene A1-A3 på 89 kg CO₂/m².

En utfordring for betong med veldig høy grad av flyveaske er at de er meget utsatt for karbo-

natisering, som betyr at armeringen fort kan ruste i utsatte bruksområder. Ledningsevnen til flyveaske-betong er derimot lav slik at korrosjonene muligens skjer veldig tregt selv om forholdene ligger til rette for det. Det er med andre ord mye testing og utvikling som må til før en slik betong kan benyttes i et virkelig bygg, men verdien sier noe om hva som kan være tilfellet i framtiden.

Kapittel 5

Resultater

I dette kapitlet presenteres benyttede materialmengder og utslippsfaktorer, i tillegg belyses sammenhengen mellom etasjeskillernes klimagassutslipp, vekt, spennvidde, dekketykkelse, trinnlydnivå og luftlydisolasjon. Et utvalg av etasjeskillere som skiller seg ut, samt etasjeskillere som oppnår lydkrav i henholdsvis bolig og kontor presenteres og illustreres. For å holde orden på alle løsningene har hvert etasjeskille blitt tildelt en kode av en bokstav og et tall. Bokstaven representerer hvilken dekketype som er benyttet som bærende del, hvor M står for massivtredekke, T står for trehulldekke, F står for flatdekke og H står for hulldekke.

5.1 Materialmengder

Materialmengdene som er benyttet som underlag for å analysere de ulike bæresystemene er en viktig del av resultatene, da variasjoner i materialmengder kan være en vesentlig årsak til ulikheter i beregnede klimagassutslipp. Tabell 5.1 viser en samlet oversikt over rådekkenes høyde og vekt uten tilleggsmaterialer ved de ulike spennviddene.

Tabell 5.1: Oversikt over de analyserte dekkenes høyde og vekt uten tilleggsmaterialer.

	Høyde [mm]			Vekt [kg/m ²]								
	Dekke			Dekke			Bjelker og søyler			Totalt		
	5 m	7 m	10 m	5 m	7 m	10 m	5 m	7 m	10 m	5 m	7 m	10 m
Massivtre	200	260	-	94,0	122	-	39,5	39,5	-	134	162	0
Trehulldekke	200	360	480	63,0	71,8	96,1	39,5	39,5	39,5	103	111	136
Flatdekke	200	200	250	511	524	633	22,6	29,3	60,9	534	553	694
Hulldekke	265	265	265	402	402	403	619	616	625	1021	1018	1028

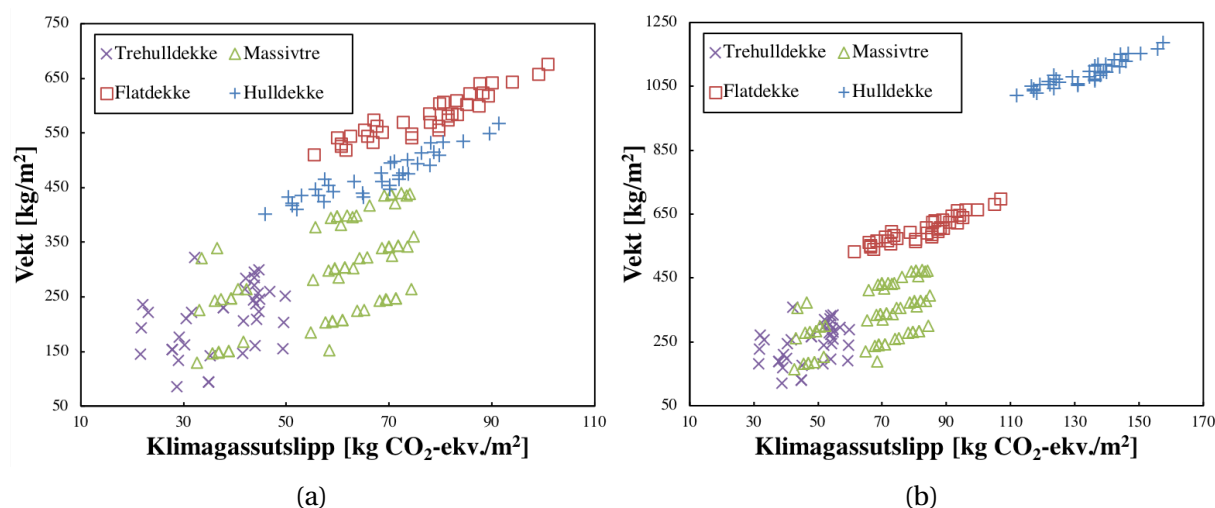
5.2 Utslippsfaktorer

Tabell 5.2 viser gjennomsnittet, maksimumsverdien og minimumsverdien for utslippsfaktorene i denne oppgaven, samt hvor mange EPDer disse baserer seg på. For grus og porøse trefiberplater foreligger det kun en EPD som grunnlag, og har følgelig bare en verdi oppgitt. For å beskrive variasjonen i datagrunnlaget er standardavviket regnet ut med antagelsen om at utslippsfaktorene følger en normalfordeling. Som vi ser av kolonnen der standardavviket er oppgitt som en prosentandel av gjennomsnittsfaktoren, er det en meget stor spredning av utslippsfaktorer for flere av materialene. Dette betyr at valg av produsent har mye å si for det endelige klimagassutslippet. Dette er diskutert videre i kapittel 6.

Vi ser også det er stor variasjon i hvor mange EPDer som er oppgitt for de forskjellige materialene. Det bør nevnes at utregning av standardavvik basert på kun to verdier er meget usikkert, slik at spredningen for disse materialene kun virker som et grovt estimat. For materialer som har oppgitt flere EPDer er standardavviket derimot et godt mål på datagrunnlagets spredning.

5.3 Sammenheng mellom vekt og utslipp

Figur 5.1: Sammenheng mellom klimagassutslipp og vekt for etasjeskillere med 5 meter spenn, uten bjelker og søyler (a) og med bjelker og søyler (b).



Figur 5.1 viser hvordan etasjeskillernes masse og klimagassutslipp henger sammen. Etasjeskillerne som benytter massiv betong, hulldekke av betong og massivtre som bærende del viser en klar sammenheng mellom vekt og klimagassutslipp. For massivtredekkene ser vi et

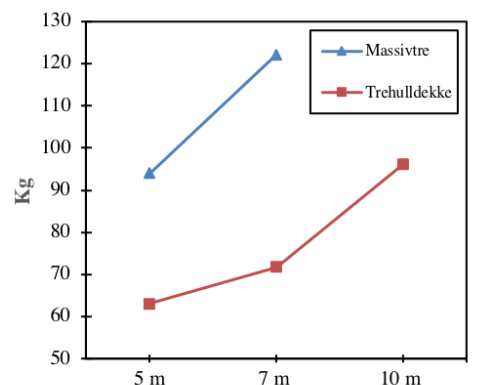
Tabell 5.2: Utslippsfaktorene for de viktigste materialene benyttet i denne oppgaven

Gruppe	Material	# EPDer	Enhet	GWP [kg CO ₂ – ekv]			Standardavvik	
				Snitt	Maks	Min	+/-	%
Gips	Gips	8	12 mm	2,81	4,09	1,83	0,82	29 %
	Fibergips	4	12 mm	2,35	2,94	1,09	0,86	37 %
	Branngips	3	15 mm	3,99	5,46	2,84	1,34	34 %
Isolasjon	Trinnlydmatte	5	50 mm	8,27	9,10	7,40	0,66	8 %
	Mineralull	19	50 mm	1,96	3,66	0,81	0,87	44 %
	EPS	8	50 mm	5,34	9,57	2,53	2,47	46 %
Betong/ grus	Grus	1	tonn	3,00	-	-	-	- %
	Påstøp	9	tonn	262	543	171	105	40 %
	Betongheller	2	tonn	91,2	223	197	18,8	21 %
	Betong	20	tonn	88,3	97,0	85,4	13,0	15 %
Armering	Slakkarmering	7	kg	0,59	1,10	0,33	0,31	54 %
	Spennarmering	2	kg	1,86	2,68	1,04	1,16	62 %
Gulv	Parkett	2	m ²	3,58	5,27	1,89	2,39	67 %
	Mykt gulvbelegg	3	m ²	4,52	8,10	1,49	3,34	74 %
	PE-folie	9	m ²	0,57	1,25	0,29	0,34	60 %
Tre	CLT	3	m ³	129	187	60,0	64,3	50 %
	GLT	6	m ³	116	238	39,0	70,5	61 %
	Trevirke	4	m ³	47,62	53,40	41,10	6,49	14 %
	Sponplate	3	22 mm	6,45	7,61	4,31	1,85	29 %
	Porøs trefiberplate	1	35 mm	3,75	-	-	-	-

spesielt mønster ved at resultatene deler seg inn i tre vektkategorier med en tilnærmet lineær utvikling. Dette skyldes at kilden opererer med et gitt sett tilleggsmaterialer, der grus- og betonglagene varierer med tre faste tykkelser. For trehulldekkene ser vi at resultatene er mer spredt hvor sammenhengen mellom vekt og klimagassutslipp ikke er like tydelig. Her kan de tunge alternativene også oppnå relativt lave klimagassutslipp. De samme trekkene som vist i figur 5.1 gjelder også for spennvidder på 7 og 10 meter

Trehulldekkets effektive tverrsnitt

Hulldekker kan oppnå lange spennvidder uten at materialmengdene øker betraktelig. Som vi ser av figur 5.2 opplever trehulldekkene en svak økning av materialmengder fra 5 til 7 meter sammenlignet med dekker av massivtre. Dette er en naturlig konsekvens av at treulldekkene har et mer effektivt utformet tverrsnitt, der en større andel av materialene tar opp strekk- og trykkkrefter. Massivtredekkene har på sin side indre lameller som ikke utnyttes til å ta opp

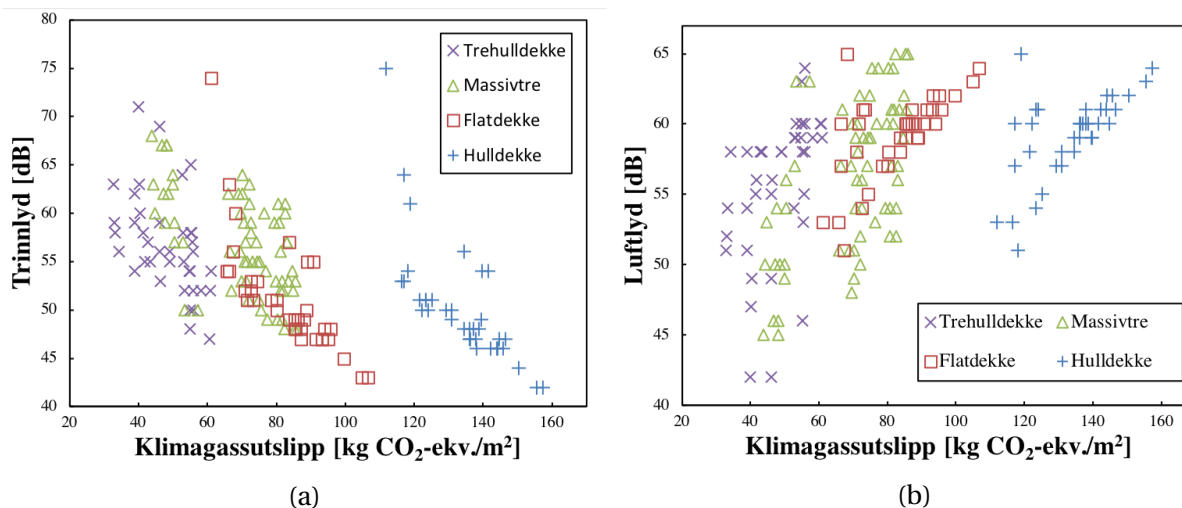


Figur 5.2: Vekt og spennvidde

strekk eller trykkrefter. Disse indre lamellene kan dermed bestå av billigere trevirke med lave styrke- og fasthetsegenskaper. Videre opp mot spennvidder på 10 meter øker materialmengden i større grad siden hulldekker med store dekkeshøyder har behov for indre avstivere og tykkere øvre- og nedre flens.

5.4 Sammenheng mellom lyd og utslipp

Figur 5.3: Sammenheng mellom klimagassutslipp, trinnlydnivå (a) og luftlydisolasjon (b)



Trinnlyd og CO₂

I figur 5.3 ser vi hvordan klimagassutslipp henger sammen med trinnlydnivå (5.3a) og luftlydisolasjon (5.3b). Utslipp knyttet til bæresystem av bjelker og søyler er inkludert.

For etasjeskillere med hulldekker og flatdekker av betong ser vi en tendens til at lave trinnlydnivåer henger sammen med høye utslipp for både hulldekker og flatdekker. Hvis vi sammenligner med kravet for boliger i lydklasse B på 48 dB, som er et av de strengere kravene i

NS 8175, ser vi flere løsninger oppnår dette. Med tanke på klimagassutslipp kommer flatdekkene bedre ut enn hulldekkene for alle lydnivåer.

For etasjeskillere med massivtre- og hulltredekker er ikke sammenhengen like klar, men vi ser også her en liten tendens til at gode trinnlydegenskaper henger sammen med høyere utslipp. Her er det færre løsninger som oppnår et trinnlydnivå under 48 dB. Med tanke på klimagassutslipp kommer trehulldekkene bedre ut enn dekkene av massivtre, men vi ser det er noe overlapp mellom disse to.

Ser vi på alle dekketyperne samtidig ser vi hulldekkene av betong skiller seg ut som et dårlig alternativ, mens trehulldekkene skiller seg ut som et godt alternativ. Etasjeskillerne som benytter flatdekker av betong og massivtredekker kommer relativt likt ut, men ved mildere lydkrav ser det ut til at massivtredekkene er gunstigere. At disse resultatene er såpass like skyldes en rekke forutsetninger som er gjort i denne oppgaven, som diskuteres videre i kapittel 6.

Luftlyd og CO₂

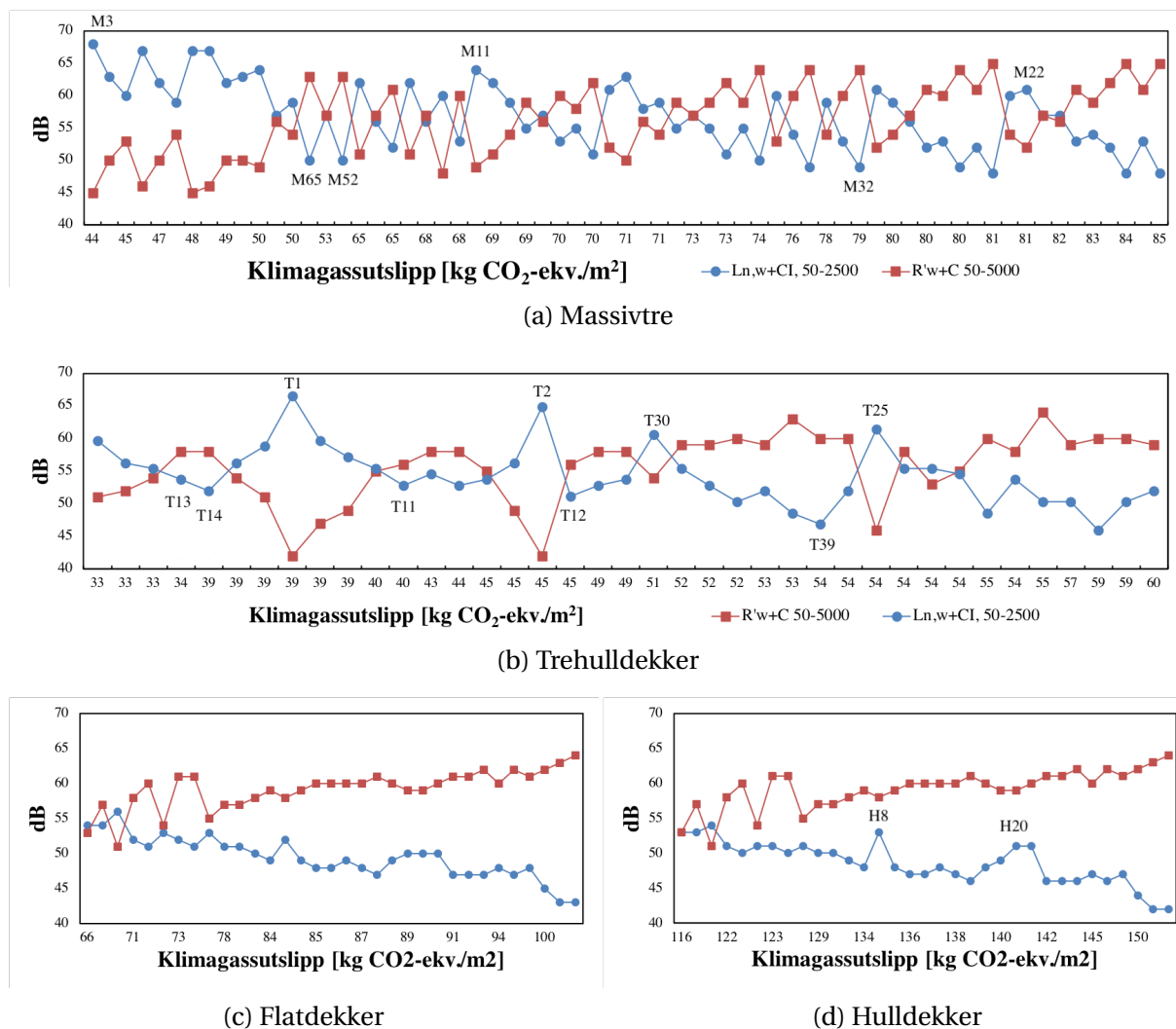
For luftlydegenskapene ser vi de samme tendensene; høy luftlydisolasjon henger sammen med høye utslipp. Også her følger betongdekkene mer lineære sammenhenger, mens tredekkene har mer spredte resultater. Hvis vi sammenligner med kravet for boliger i lydklasse B på 58 dB ser vi flere løsninger for både tredekkene og betongdekkene oppnår dette. Dette betyr at krav til luftlydisolasjon ikke er en begrensende faktor på samme måte som krav til trinnlydnivå, for de aller fleste dekkene.

5.4.1 Trinnlyd, luftlyd og CO₂

Figurene 5.3a og 5.3b viser hvordan trinnlydnivå og luftlydisolasjon hver for seg henger sammen med klimagassutslipp. Den sier derimot ikke noe om sammenhengen mellom trinnlyd og luftlyd, hvor det er uvisst om etasjeskillerne som oppnår gode luftlydegenskaper også oppnår gode trinnlydegenskaper. Dette er essensielt siden et dekke må oppnå både krav til trinnlyd og krav til luftlydisolasjon samtidig.

Figur 5.4 (a-d) viser sammenhengen mellom både klimagassutslipp, trinnlydnivå og luftlydisolasjon i samme framstilling. Her vises hvert enkelt etasjeskille sine lydegenskaper med økende klimagassutslipp langs x-aksen. Disse figurene kan benyttes til å finne ut om det er noen spesielle løsninger som skiller seg ut med både lavt trinnlydnivå, høy luftlydisolasjon og lavt klimagassutslipp. Tydelige sammenhenger belyses i de neste avsnittene, hvor konsekvensene av dette blir videre diskutert i kapittel 6.

Figur 5.4: Sammenheng mellom trinnlydnivå, luftlydisolasjon og klimagassutslipp for etasjeskillere med 5 meter spenn



Massivtredekker

For etasjeskillere med massivtre ser vi den samme tendensen som i figur 5.3; høye utslipp henger til en viss grad sammen med gode lydegenskaper, men med en betydelig spredning. Dette tilsier at det bør finnes løsninger med lave klimagassutslipp og relativt gode lydegenskaper samtidig som det finnes løsninger med høye klimagassutslipp og relativt dårlige lydegenskaper. Etasjeskillere som skiller seg ut enten negativt eller positivt er markert med sin aktuelle kode i figuren.

- Dekker som skiller seg ut med ugunstige egenskaper er blant annet M11, M22 og M3. M11 består av et overgulv med 50 mm påstøp, 30 mm trinnlydplate og elastisk opphengt himling. M22 er bygd opp på tilnærmet samme måte, men med tykkere påstøp

og større hulrom i himlingen. M3 består av kun fibergips og trefiberplate på massivtre. En interessant observasjon her er at om 120 mm grus inkluderes i overgulvet bedres både trinnlydnivået og luftlydisolasjonen med 8 dB i gunstig retning, mens klimagassutslippet øker med 0,6 kg CO₂-ekv/m².

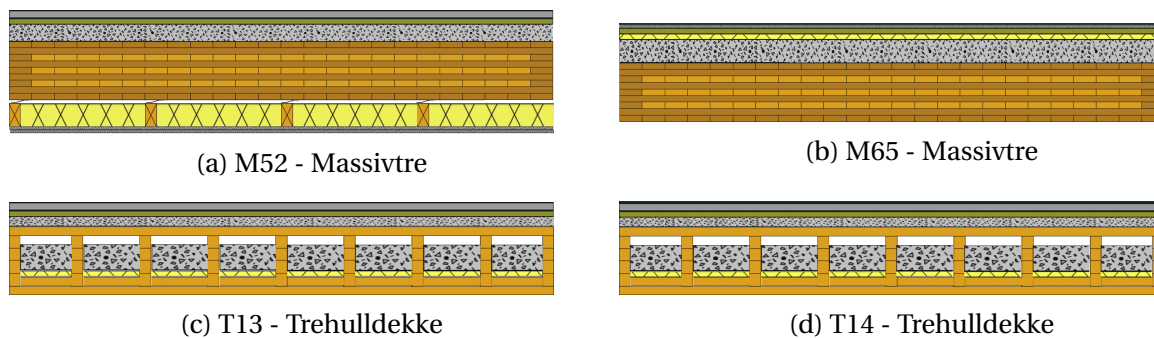
- + Dekker som skiller seg ut med gunstige egenskaper er blant annet M32, M52 og M65. Sammenligner vi M32 med M22, som også har 80 mm påstøp og 30 mm trinnlydplate, ser vi M32 er en mye mer effektiv konstruksjon. Her benyttes det 120 mm grus i overgulvet fremfor 120 mm himling med mineralull, som gir et etasjeskille med samme dekketykkelsen, men lavere klimagassutslipp og bedre lydegenskaper. M52 og M65 skiller seg også ut med meget gunstige egenskaper. Snittegninger av disse er vist i figur 5.5 og består av forskjellige trinnlyddempende tiltak og et gruslag på oversiden. M52 har i tillegg elastisk opphengt himling.

Trehulldekker

Som vi ser av figur 5.4b er det også for trehulldekker en viss sammenheng mellom gode lydegenskaper og høye klimagassutslipp, hvor ytterpunktene representerer de beste og dårligste egenskapene. Resultatene er også her meget spredt hvor det finnes flere unntak som er markert i figuren.

- Dekker som skiller seg ut med ugunstige egenskaper er blant annet T1 og T2. Disse består av et overgulv av en sponplate lagt på en trinnlydplate hvor trehulldekket ikke inneholder grus. En interessant observasjon her er at trinnlydisolasjonen forbedres med hele 11 dB, og luftlydisolasjonen forbedres med 7 dB, hvis 90 kg grus inkluderes i hulrommet. Dette øker klimagassutslippet med bare 0,3 kg CO₂-ekv/m². T30 og T25 består av avrettingsmasse/segmentplate og trinnlydmatte på oversiden av et trehulldekke uten grus i hulrommet. Hvis grus inkluderes i hulrommet for disse to løsningene bedres både trinnlyd- og luftlydisolasjonen med 5 - 7 dB, mens økningen i klimagassutslipp fortsatt er neglisjerbar.
- + T13 og T14 skiller seg ut med meget gunstige egenskaper og er vist i figur 5.5. Disse her et overgulv bestående av gips- og trefiberplater på et gruslag, hvor hulrommet i dekket er fylt med grus på isolasjon. Dette er såkalte LFE Silence 12-dekker som er beskrevet i kapittel 3.5. T11 og T12 består også av LFE Silence 12 dekkene, men her er gips- og trefiberplatene byttet ut med sponplater. T14 og T12 skiller seg fra T13 og T11 ved at det er lagt parkett og parkettunderlag på oversiden. T39 er senere vist i figur 5.6 og har et overgulv bestående av påstøp på en trinnlydmatte, med et underliggende gruslag. Trehulldekket er fylt med ekstra mye grus (90 kg/m²).

Figur 5.5: Illustrasjon av fire etasjeskillere som skiller seg ut med spesielt gode lydegenskaper og samtidig lave klimagassutslipp, relativt til andre etasjeskillere i samme kategori. Spennvidde 5 meter. Oppbygning er beskrevet i teksten.



Flatdekker og hulldekker av betong

Som vi ser av figur 5.4c og 5.4d har sammenhengen mellom lydegenskaper og klimagassutslipp for betongdekker en mer lineær oppførsel hvor det er klare tendenser til at økte klimagassutslipp betyr både lavere trinnlydnivå og høyere luftlydisolasjon. Her er det ikke like mange løsninger som skiller seg ut i forhold til hverandre, men uregelmessigheter vi ser i de to grafene kan trolig forklares:

Som vi ser er det en del variasjon i luftlydisolasjonen for betongdekker med lave klimagassutslipp (til venstre i grafen). Felles for de som skiller seg ugunstig ut er at det er benyttet parkett og parkettunderlag direkte på betongdekket. Dette fører trolig til at det oppstår ugunstige resonansfrekvenser som reduserer luftlydisolasjonen. Der parkett kombineres med ulike typer patelag ser vi at dette unngås. En interessant observasjon her oppstår hvis vi bytter ut parkettunderlaget med en porøs trefiberplate. Dette bedrer luftlydisolasjonen med 6 dB og trinnlydisolasjonen med 1 dB, samtidig som klimagassutslippet kun øker med $1,3 \text{ kg CO}_2\text{-ekv/m}^2$. For hulldekkene ser vi det er et par-tre dekker som kommer ugunstig ut med tanke på trinnlyd, relativt til løsninger med ca. samme klimagassutslipp (H8 og H20). Felles for disse er at det benyttes 30 mm påstøp/avrettingsmasse på en 20 mm tynn trinnlydplate. Det kan virke som at denne løsningen utnytter de gode egenskapene til betong på en lite effektiv måte, slik at det i et klimaperspektiv bør benyttes andre løsninger der dette er mulig. Eksempelvis vil en økning av trinnlydmattetykkelsen til 40 mm utnytte de lydisolerende evnene til påstøp på en mer effektiv måte.

Det er viktig å påpeke at etasjeskillere diskutert i dette kapitlet er gunstige/ugunstige løsninger innen hver sin kategori og relaterer seg kun til andre etasjeskillere med samme bærende system. Som vi ser av figur 5.4 har disse etasjeskillerne ulike egenskaper når det kommer

til trinnlyd- og luftlydisolasjon, slik at de gunstige løsningene i figur 5.5 ikke kan sammenlignes direkte. Denne tilnærmingen kan derimot belyse hvilke materialer og tekniske løsninger som er typiske for etasjeskillere med både lavt klimagassutslipp og gode lydegenskaper. Dette diskuteres videre i kapittel 6.

5.5 Optimale etasjeskillere for boliger og kontorer

Tabell 5.3: Klimaoptimale etasjeskillere for boliger og kontorer ved forskjellige spennvidder som oppnår lydklasse B.

	Massivtredekke		Trehulldেকে		Flatdekke		Hulldেকে		
	Nr.	GWP	Nr.	GWP	Nr.	GWP	Nr.	GWP	
Bolig									
5 m	M32	82	T39	55	F30	86	H18	134	
7 m	M32	92	T39	57	F30	91	H18	147	
10 m			T39	63	F14	90	H18	149	
Kontor									
5 m	M49	51	T7	33	F2	66	H2	116	
7 m	M49	60	T7	35	F2	72	H2	129	
10 m			T7	41	F2	84	H2	131	

For å sammenligne de fire dekketyperne i denne oppgaven på et rettferdig grunnlag er det viktig at det plukkes ut løsninger som oppfyller de samme kravene. Alle dekkene oppfyller brannkrav på REI 90, men klimagassutslippet varierer ut fra lydisolasjon og spennvidde. To bygningstyper som representerer hvert sitt ytterpunkt når det kommer til lydkrav og behov for lange spennvidder er boliger og kontorer. Boliger har spesielt høye lydkrav til skillekonstruksjoner mellom ulike boenheter, mens lydkravene for kontorer er betydelig lavere. Når det kommer til spennvidde derimot, vil kontorer ha behov for store frie arealer uten søyler og bærevegger. Det er uansett fordelaktig å bygge fleksible bygg for boliger/leiligheter også, men behovet for store åpne arealer er ikke like stort her. Begge disse bygningstypene er forøvrig bruksområder som er godt egnet til å benyttes i fleretasjes bygg.

Tabell 5.3 viser et utvalg etasjeskillerne med lave utslipp som samtidig oppnår lydkrav for boliger og kontorer i de forskjellige spennviddekategoriene. Det er benyttet krav i lydklasse B som inkluderer korreksjonsfaktorer ved lave frekvenser. For boliger innebærer dette at kravet er satt til $L'_{n,w} + C_{I,50-2500} < 48\text{dB}$ til trinnlydnivå og $R'_{w} + C_{50-5000} > 58$ for luftlydisolasjon. For kontorer innebærer det $L'_{n,w} + C_{I,50-2500} < 58$ og $R'_{w} + C_{50-5000} > 40$.

Som vi ser er den optimale kombinasjonen av tilleggsmaterialer uavhengig av spennvidde, med unntak av flatdekket på 10 meter. Dette er en naturlig konsekvens av at tredekkene er antatt å ha samme lydegenskaper ved ulik dekkehøyde, samt at hulldekkene av betong har samme dekkehøyde for alle spennvidder. For flatdekket med 10 meter spenn har dekketykkelsen økt, som vi ser gir utslag for den optimale konfigurasjonen i boliger, men ikke for kontorer.

Figurene 5.6 og 5.7 illustrerer oppbygningen til klimaoptimale etasjeskillere som oppnår lydklasse B for henholdsvis boliger og kontorer. Det er inkludert et sektordiagram som viser fordelingen av klimagassutslipp på de forskjellige materialene, hvor utslipp- og vektbidraget knyttet til bjelker og søyler er inkludert. Snittegningen representerer dekkeløsninger som oppnår 5 meter spenn.

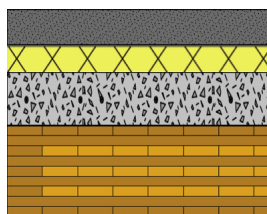
5.5.1 Bolig

Som vi ser av figur 5.6 er det nødvendig med påstøp for at massivtre- og trehulldekkene skal oppnå lydkravene som gjelder mellom boenheter. Påstøp står da for rundt 40% av totalutslippene og det vil derfor ha avgjørende betydning hvilket produkt som velges her. For begge typer tredekker står den bærende delen for rundt 30% av utslippene. Dette betyr at en alternativ LCA-tilnærming som for eksempel tar høyde for virkningen av å lagre biogent karbon, eller virkningen av å erstatte fossile brennstoff med biogene materialer ved endt levetid, vil kunne ha store utslag på resultatene.

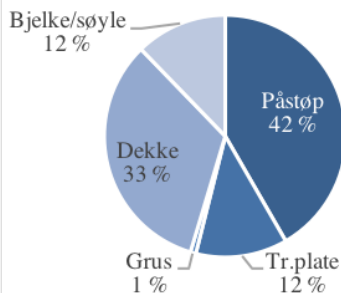
En tydelig observasjon er at tilleggsmaterialer er ansvarlig for en stor andel av totalutslippene for bæresystemene av tre. Dette ligger på 56 og 52% for henholdsvis massivtre og trehulldekkene. For etasjeskillerne av betong ser vi tilleggsmaterialene står for en mye mindre andel av klimagassutslippene. For flatdekkene er dette 28%, mens for hulldekkene er denne andelen på 17%. Dette bekrefter at det er viktig å se på fullstendige bygningskomponenter, da oppnåelse av funksjonskrav kan ha stor betydning for klimagassutslippet.

En annen observasjon er at størsteparten av utslippene knyttet til hulldekker av betong stammer fra bjelke-/søylesystemet. Hulldekkene er avhengig av bjelker og søyler, noe flatdekkene ikke er. Dette viser at selv sammenligning på bygningskomponentnivå, hvor de samme funksjonelle egenskapene oppnås, ikke alltid gir et fullgodt bilde på hvilke klimagassutslipp de forskjellige løsningene fører til. Inkluderes bæresystemet ser vi at det i dette tilfellet har en avgjørende innvirkning på klimagassutslippet.

Figur 5.6: Etasjeskillere som oppnår lydklasse B for boliger, representert ved den klimaoptimale løsningen innen hver dekkekategori. Sektordiagrammene viser den prosentvise fordelingen av klimagassutslipp knyttet til de forskjellige materialene. Utslipp og vekt knyttet til bjelke-/søylesystemene er inkludert. GWP er oppgitt i kg CO₂-ekv/m², vekt er oppgitt i kg, høyde er oppgitt i mm og lyd tallene er oppgitt i dB.

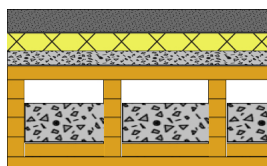


Oppbygning	
80 mm påstøp	
60 mm tr.plate	
120 mm grus	
200 mm dekke	

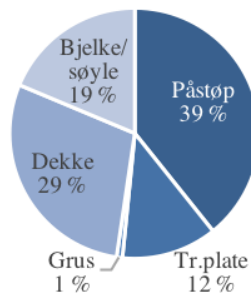


Info	
GWP	80,8
Vekt	457
Høyde	460
R' _w +C ₅₀₋₅₀₀₀	65
L' _{n,w} +C _{I,50-2500}	48

(a) M32

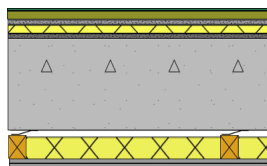


Oppbygning	
50 mm påstøp	
40 mm tr.plate	
30 mm grus	
200 mm dekke	
90 kg/m ² grus i h.rom	

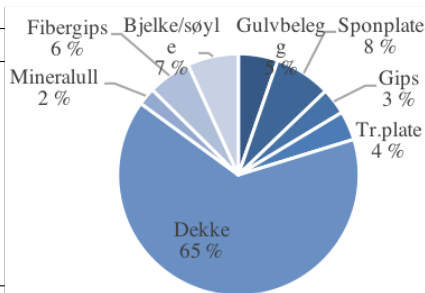


Info	
GWP	53,5
Vekt	321,1
Høyde	320
R' _w +C ₅₀₋₅₀₀₀	60
L' _{n,w} +C _{I,50-2500}	48

(b) T39

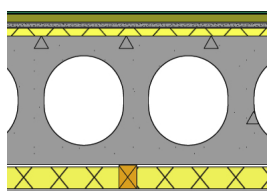


Oppbygning	
4 mm gulvbelegg	
22 mm sponplate	
13 mm gips	
20 mm tr.plate	
210 mm dekke	
50 mm mineralull	
25 mm fibergips	

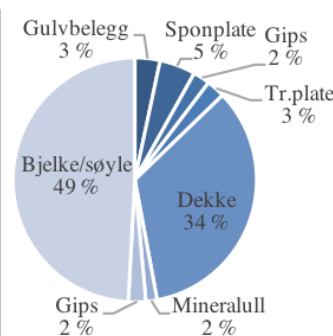


Info	
GWP	85,5
Vekt	626,2
Høyde	354
R' _w +C ₅₀₋₅₀₀₀	60
L' _{n,w} +C _{I,50-2500}	48

(c) F30



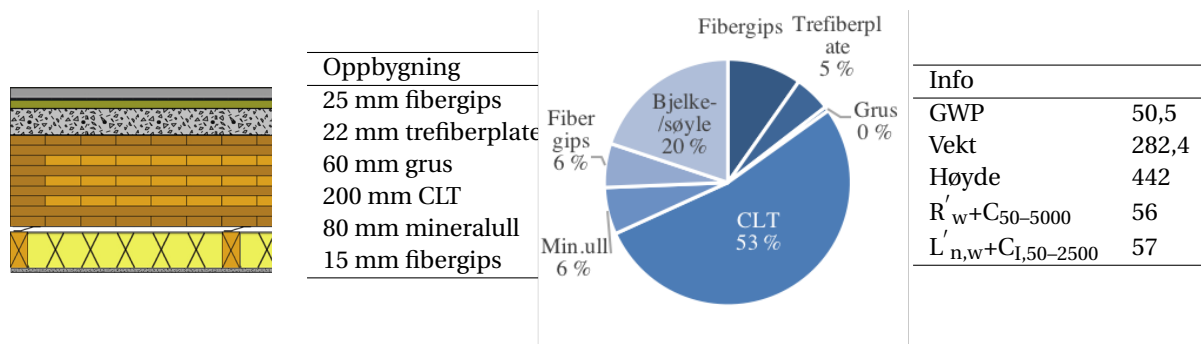
Oppbygning	
4 mm gulvbelegg	
22 mm sponplate	
13 mm gips	
20 mm tr.plate	
285 mm dekke	
50 mm mineralull	
13 mm fibergips	



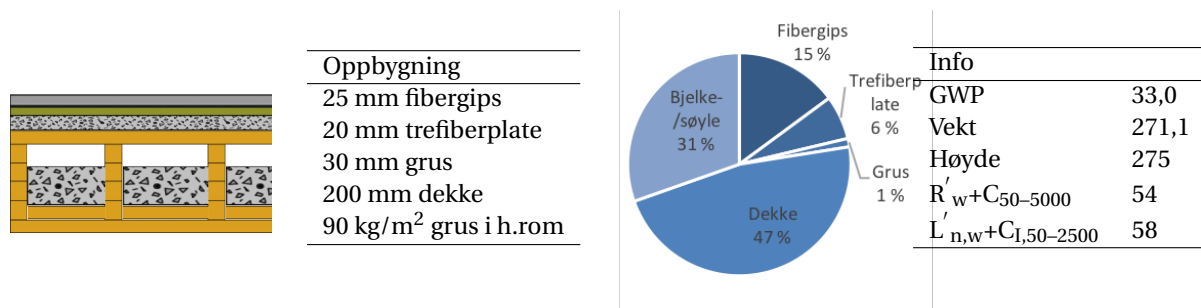
Info	
GWP	134,4
Vekt	1095,3
Høyde	407
R' _w +C ₅₀₋₅₀₀₀	59
L' _{n,w} +C _{I,50-2500}	48

(d) H18

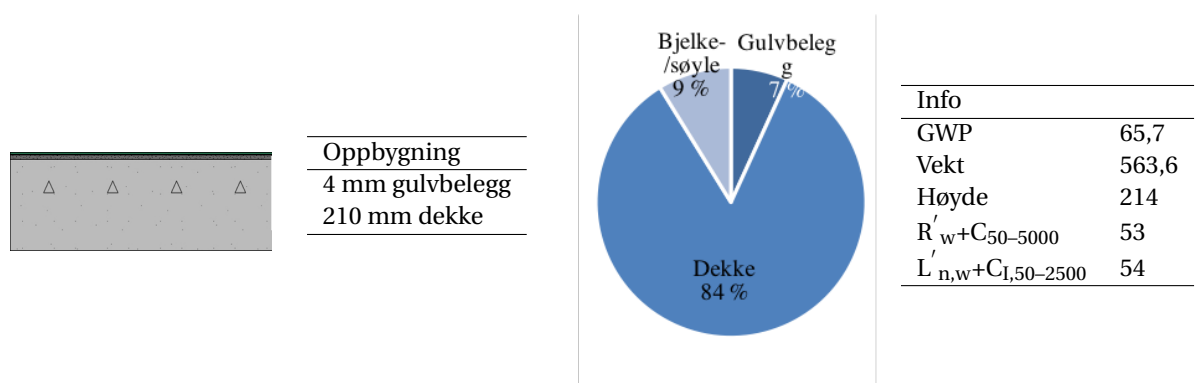
Figur 5.7: Etasjeskillere som oppnår lydklasse B for kontorer, representert ved den klimaoptimale løsningen innen hver dekkekategori. Sektordiagrammene viser den prosentvise fordelingen av klimagassutslipp knyttet til de forskjellige materialene. Utslipp og vekt knyttet til bjelke-/søylesystemene er inkludert. GWP er oppgitt i kg CO₂-ekv/m², vekt er oppgitt i kg, høyde er oppgitt i mm og lydtallene er oppgitt i dB.



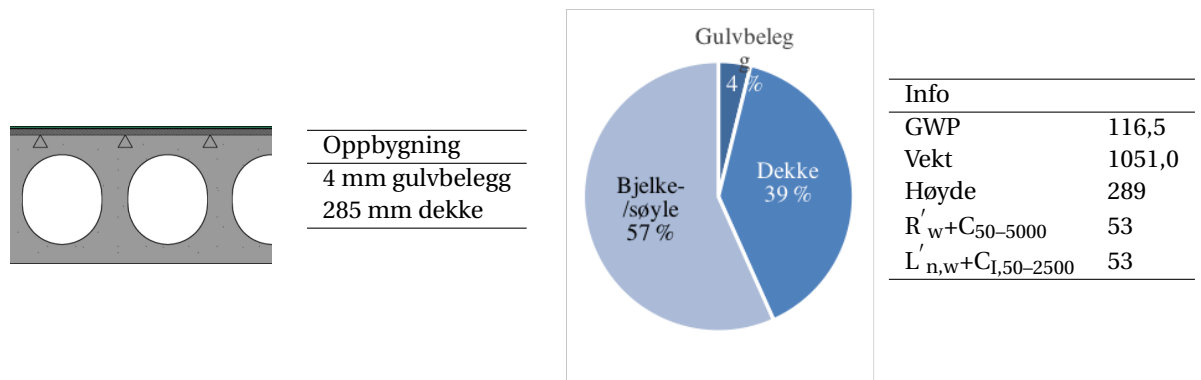
(a) M49



(b) T7



(c) F2



(d) H2

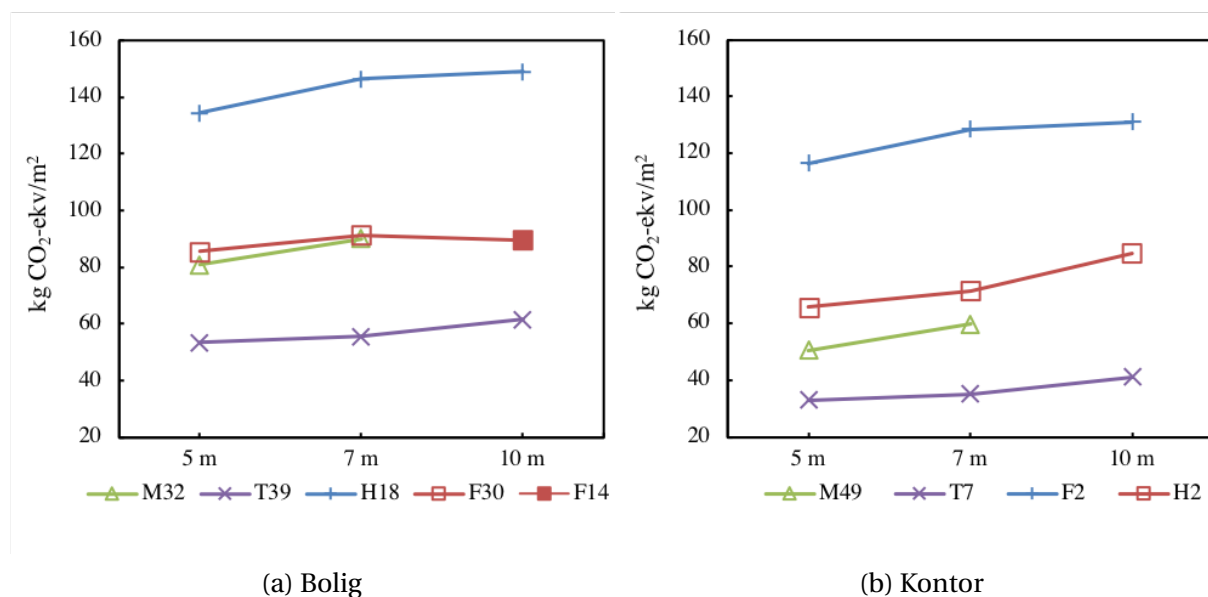
5.5.2 Kontor

For massivtre- og trehulldekkene er det fortsatt behov for relativt omfattende tiltak for å oppnå lydkravene for kontorer. Disse tiltakene medfører derimot ikke påstøp/avrettingsmasse slik at klimagassutslippene blir i en annen størrelsesorden. Vi ser at også her er det utstrakt bruk av grus i eller på dekkene. For etasjeskillerne av betong holder det med et mykt gulvbelegg for å oppnå lydkravene i kontorer. Et slikt belegg senker trinnlydnivået med opp mot 20 dB, sammenlignet med et dekke uten tilleggskonstruksjon i det hele tatt. Siden slike belegg fører til resonansfrekvenser i det lavfrekvente området blir C-verdiene for luftlyd negative, men dette er ubetydelig siden etasjekillerne oppfyller kravene med god margin.

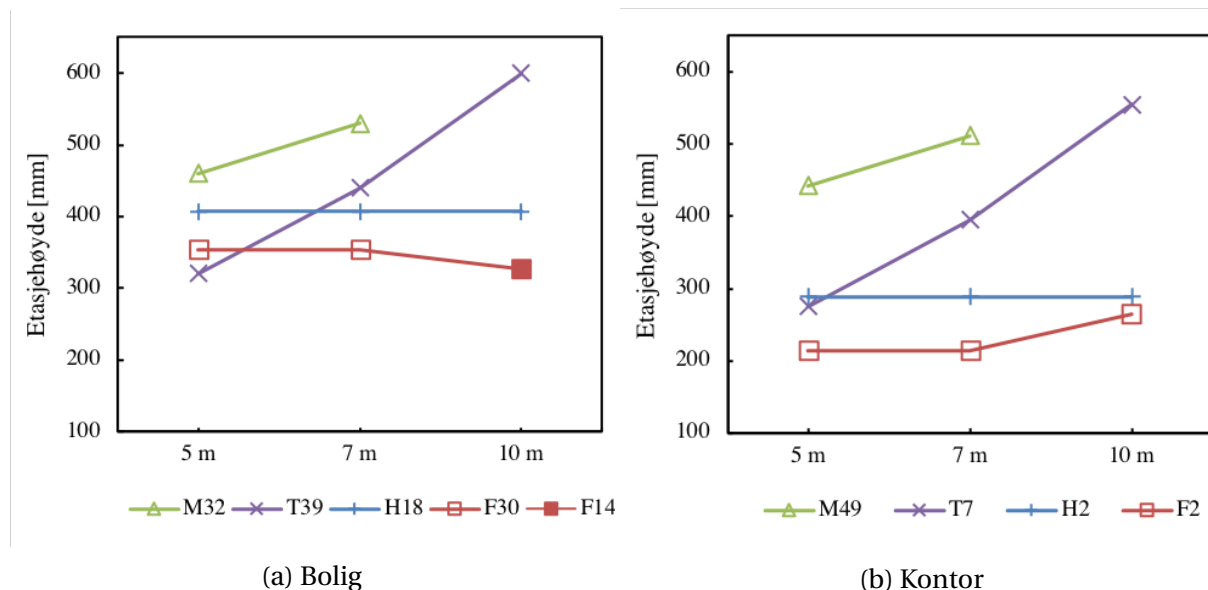
En tydelig observasjon er at tilleggsmaterialene står for en betydelig mindre andel av totalutslippene for alle dekketyper når lydkravet gjelder for kontorer i stedet for boliger. For bæresystemene av tre reduseres denne andelen fra 56 til 27% og fra 52 til 22% for henholdsvis massivtre og trehulldekkene. For bæresystemene av betong reduseres denne andelen fra 28 til 7% og fra 17 til 4% for henholdsvis flatdekke og hulldekke. Dette betyr at innvirkningen tilleggsmaterialene har på totalutslippet er mye lavere for kontorbygg som har lavere lydkrav. Dette forutsetter forøvrig at andre forhold, som spennvidde, er like for de to bygningstypene.

5.6 Sammenheng mellom spennvidde og utslipp

Figur 5.8: Sammenheng mellom spennvidde og utslipp ved lydkrav for bolig (a) og lydkrav for kontor (b).



Figur 5.9: Sammenheng mellom spennvidde og nødvendig høyde på etasjeskillet ved lydkrav for bolig (a) og lydkrav for kontor (b).



Figur 5.8 viser sammenhengen mellom spennvidde og utslipp for etasjeskillere som oppnår lydkrav mellom boenheter (5.9a), og for etasjeskillere som oppnår lydkrav mellom kontorer (5.9b). Her ser vi at etasjeskillerne med trehulldekker har lavest klimagassutslipp ved samtlige spennvidder for både strenge og milde lydkrav, og at hulldekkene av betong har høyest klimagassutslipp ved samtlige spennvidder for både strenge og milde lydkrav. Massivtredekkene og flatdekkene kommer relativt likt ut når lydkravet gjelder for boliger. For kontorer kommer derimot massivtre bedre ut enn flatdekkene, som tyder på at lavere lydkrav gjør massivtre til et gunstigere valg i et klimaperspektiv.

Det kan virke som at kontorer har etasjeskillere med lavere klimagassutslipp sammenlignet med boliger. Ifølge resultatene fra denne studien er dette en sannhet med modifikasjoner. Hvis vi legger til grunn et scenario hvor etasjeskillere i boliger behøver 5 meter spenn og etasjeskillere i kontorer behøver 10 meter spenn, ser vi av figur 5.8 at sluttresultatene blir relativt like for betongdekkene. For trehulldekket har kontorer derimot betydelig lavere utslipp selv ved lange spennvidder. Dette er muligens et søkt scenario, men det belyser nok en gang at det er mange hensyn å ta når man skal sammenligne ulike løsninger.

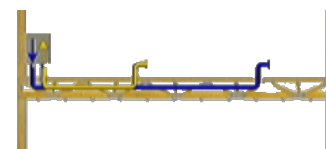
5.7 Etasjeskillernes høyde

Det er ikke tatt hensyn til høyde på etasjeskillet i utvelgelsen av de optimale løsningene, som potensielt kan være avgjørende for valg av etasjeskilleløsning i en virkelig situasjon. Ofte kan

det være begrensninger til hvor høyt det er tillatt å bygge og da vil etasjehøyden kunne være en avgjørende faktor for hvor mange etasjer det er plass til. For fleretasjes bygg vil i tillegg det økonomiske også spille en betydelig rolle, da materialmengden for yttervegger og gjennomgående vegger og søyler vil kunne reduseres hvis etasjetykkelsen reduseres.

Figur 5.9 viser sammenhengen mellom ulike spennvidder og nødvendige høyder på etasjeskillet for henholdsvis boliger (a) og kontorer (b). Her ser vi etasjeskillere av massivtre i begge tilfellene kommer dårligst ut for spennvidder på 5 og 7 meter. Ved 5 meter er det noe overraskende trehulldekkene som har lavest nødvendig etasjehøyde. Dette skyldes at de optimale betongløsningene begge har en strålingsminskende himling på undersiden, i tillegg til at det også her er behov for trinnlyddempende tiltak på oversiden. Trehulldekkenes tykkelse øker derimot kraftig når spennvidden forlenges. Ved 7 meter er de fortsatt konkurransedyktige mot betongdekkene, med sine 440 mm mot 407 mm og 354 mm for henholdsvis hulldekker og flatdekker. Ved 10 meter spenn ser vi den nødvendige etasjehøyden for trehulldekkene er veldig høy, for både boliger og kontorer, som i praksis fører til at bruksområdet for trehulldekker ved slike spenn snevres inn betraktelig.

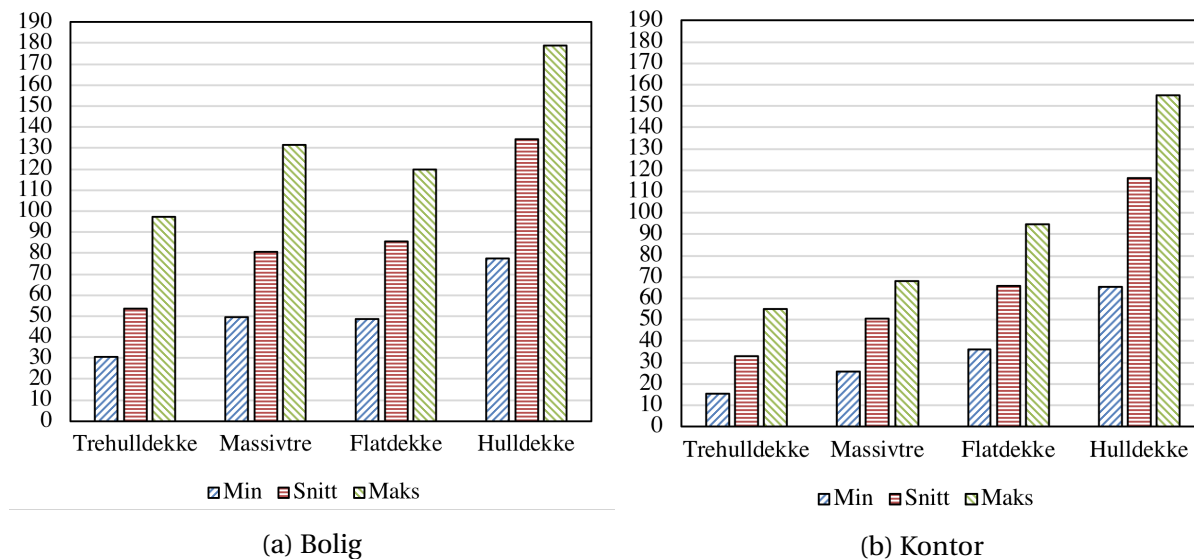
En mulig løsning for å redusere nødvendig høyde på etasjeskillet for trehulldekker kan være å integrere tekniske systemer i hulrommet til dekket. Dette vil ha konsekvenser for lydisolasjonen ved at grusmengden begrenses, men mest av alt vil de nødvendige gjennomføringene til undersiden av dekket føre til utfordringer med tanke på brannmotstand. En løsning som er benyttet blant annet i Sparebank 1 sine kontorer i Trondheim (Småge) og i Akersgata 45 i Oslo (Tycho, 2017), er at det legges et hevet gulv der ventilasjonssystemet føres fra dekkene og opp i det hevede gulvet. Dette er løsninger som i teorien også kan benyttes for trehulldekkene i denne oppgaven, men det foreligger ingen eksempler på dette fra leverandørene.



Figur 5.10: Illustrasjon av tekniske føringer lagt i en dekkeløsning av gitterbjelker. Figur hentet med tillatelse fra Tycho (2017).

Høyden på betongdekkene ved de ulike spennviddene er muligens ikke representativt i forhold til hva som ville vært tilfellet i et reelt bygg. Dimensjoneringen av betongdekkene baserer seg som nevnt på optimale betong- og armeringsmengder som gir de lavest mulige klimagassutslippene. I virkeligheten kan praktiske og økonomiske årsaker føre til at dekketykkelsen på betongdekkene også endrer seg med spennvidden. At dekkhøyden øker er på den annen side ikke ensbetydende med at høyden på etasjeskillet øker. Som vi ser av flatdekket for boliger er dekketykkelsen 50 mm større ved 10 meter spenn enn ved 5 og 7 meter spenn, men siden økt dekketykkelse i seg selv gir bedre lydegenskaper er det behov for færre tilleggsmaterialer, og høyden på etasjeskillet reduseres med ca 20 mm.

Figur 5.11: Variasjon i resultatene ved bruk av de «beste» og de «verste» EPDene, samt ved bruk av den gjennomsnittlige utslippsfaktoren



5.8 Variasjon

For å belyse hvordan resultatene kan variere har utslippet ved utelukkende bruk av de «beste» materialalternativene, og ved utelukkende bruk av de «verste» materialalternativene, blitt undersøkt. Som vi ser av figur 5.11 er resultatene meget avhengig av valg av materialleverandør og tilhørende EPD. Figuren viser utslippene til de optimale etasjeskillerne for henholdsvis bolig og kontor ved 5 meter spenn (M32, T39, H18 F30 og M49, T7, H2 F2). Variasjonen er tilnærmet lik ved de andre spennene. Det er kun benyttet EPDer for materialer som er kommersielt tilgjengelig, uten at geografisk plassering er tatt hensyn til. Laboratorieverdiene fra resepten til Hermansen (2017) er ikke benyttet som et av de «beste» alternativene.

At resultatene varierer i så stor grad tyder på at valg av bæresystem kun er en liten del av løsningen om man ønsker å redusere utslipp knyttet til etasjeskillere. Selv om det forekommer en klar rangering, der trehulldekkene kommer best ut og hulldekkene av betong kommer verst ut, ser vi at om de mest gunstige/ugunstige materialene benyttes kan selv et etasjeskille som benytter trehulldekke som bærende del, ha betydelig høyere klimagassutslipp sammenlignet med et etasjeskille som benytter hulldekke av betong som bærende del.

Det skal også nevnes at figur 5.11 viser variasjonen i de etasjeskillerne som har lavest klimagassutslipp og samtidig oppfyller kravene for henholdsvis bolig og kontor. Om andre konfigurasjoner tas med i sammenligningen, som samtidig oppfyller de samme funksjonelle kravene, blir variasjonene enda større.

Kapittel 6

Diskusjon

6.1 CO₂-premium knyttet til etasjeskillere

Etasjeskillerens rolle for svai og vibrasjoner i høye bygg

Som omtalt i kapittel 3 kan høye bygg med lav vekt få problemer med vind-induserte vibrasjoner og svai. Dette kan føre til ubehag for brukerne av bygget og må derfor unngås. Avstiving av høye bygg er derfor nødvendig og som vist i kapittel 3 er dette den dominerende årsaken til at en CO₂-premium oppstår.

Slike vind-induserte vibrasjoner kan også reduseres ved å øke vekten på bygget, deriblant etasjeskillerne. For høye trebygg, som i utgangspunktet er lette, vil dette være spesielt aktuelt. Som vi så i kapittel 5 og figur 5.3 kan etasjeskillere av tre oppnå relativt høy flatevekt og samtidig lave klimagassutslipp ved å benytte store mengder grus. Om slike vibrasjoner er en dimensjonerende faktor for en lett bygning av tre, kan det tenkes at bruk av grus vil være et klimagunstig valg for å øke vekten og redusere vibrasjonene. Som nevnt i kapittel 3, har ikke denne problemstillingen blitt videre undersøkt i denne oppgaven.

6.2 Klimaoptimale etasjeskillere

6.2.1 Gunstige materialvalg

Hvis vi ser på de optimale etasjeskillerne som skilte seg ut med både gode lydegenskaper og lavt klimagassutslipp (se figur 5.5), ser vi at det er et par materialvalg som går igjen for både

trehulldekker og massivtredekker:

- For det første benytter alle etasjeskillerene grus i overgulvet. Dette kan tyde på at grusens høye vekt og samtidig lave klimagassutslipp gjør det til et effektivt og klimavennlig materiale å benytte i samspill med andre materialer. Økt flatevekt bidrar som nevnt i kapittel 2.7 til bedre lydegenskaper i seg selv, i tillegg vil løst bundet grus ha myke egenskaper som kan dempe trinnlyd. Det ser ut til at disse to egenskapene gjør at grus er et meget godt egnet materiale å benytte i etasjeskillere når både lyd og klimagassutslipp tas i betraktning.
- For det andre benytter alle løsningene vektfordelende gipsplater på porøse trefiberplater i overgulvet. Dette kan tyde på at gips- og trefiberplater i samspill er en løsning som gir god trinnlyddemping samtidig som det har et relativt lavt klimagassutslipp. Det skal nevnes at det også benyttes andre trinnlyddempende materialer i to av løsningene, slik at observasjonen angående gips- og trefiberplater ikke nødvendigvis er pålitelig.

6.2.2 Hvorfor massivtre og flatdekker kommer likt ut

Et interessant resultat i denne studien er at massivtre og flatdekker kommer relativt likt ut med tanke på klimagassutslipp i flere tilfeller. Dette skiller seg fra andre studier der massivtre kommer ut som et bedre alternativ framfor betong (Skullestad, 2016; Robertson et al., 2012; Grann, 2014; Cole and Kernan, 1996). Sammenligningsgrunnlaget for denne oppgaven er derimot ganske annerledes enn de nevnte studiene, og det er flere årsaker til at de to dekketyper kommer relativt likt ut:

Strukturelt: Flatdekker er et meget materialeeffektivt byggesystem som i denne oppgaven er dimensjonert med mål om å minimere klimagassutslippene, i tillegg benyttes det en utslippsfaktor for betong som tilsvarer lavkarbon klasse B. Flatdekkene kan derfor ikke sees på som noen bransjereferanse for et typisk betongbygg. Samtidig er massivtredekkene dimensjonert etter strengere kriterier enn hva som er normalt å operere med, slik at vibrasjonsegenskapene for et massivtredekke ikke skal stå tilbake for et betongdekke. Spennvidder på 7 meter for et dekke av massivtre er heller ikke noen optimal løsning, og det finnes flere eksempler på massivtredekker i kombinasjon med limtrerebber som gir mye mer effektive tverrsnitt ved lange spennvidder (Martinson, 2016; Skaar et al., 2017; Lignum, 2018).

Lyd: I denne studien er tilleggsmaterialer for å oppnå lydisolasjon inkludert for

dekkene. I tillegg tar lydkravene høyde for korreksjonsverdier i de lave frekvensene, som ikke er nødvendig i henhold til dagens krav. Dette er som nevnt i kapittel 5 utslagsgivende for dekker med bærende del av tre, hvor utslippene knyttet til lydreduserende tiltak i boliger står for mer enn halvparten av utslippene. For flatdekker er denne andelen på 28%. I begge tilfellene er utslipp fra bjelker og søyler inkludert. Dette påpeker hvor viktig det er å ta hensyn til flere aspekter enn kun det strukturelle.

LCA: Hvilken tilnærming LCA-analysen benytter og hvilke systemgrenser som settes, vil også kunne gi store utslag på klimagassutslippet. Dette gjelder spesielt for biogene materialer og diskuteres senere i kapittelet.

Det finnes også andre aspekter som gjør at flatdekkene og massivtredekkene i denne oppgaven ikke nødvendigvis kan sammenlignes. Flatdekkene er slankere og behøver mindre dekkeshøyde for både boliger og kontorer, i tillegg kan forskjellige avanserte geometriske former oppnås ved at det støpes på plassen. Massivtredekker kan på sin side prefabrikeres og gir derfor raskere og mer økonomisk bygging sammenlignet med plassenbetong. Hvis i tillegg avstivende elementer inkluderes i betrakningen ser vi av studiet til Skullestad (2016) at utslipp knyttet til avstivende elementer av tre blir lavere enn utslipp knyttet til avstivende elementer av betong.

6.3 Usikkerhet knyttet til mengdedata

For at livsyklusanalyser skal ha pålitelige resultater er det viktig at usikkerheten forstås godt. Flere usikkerhetsmomenter er beskrevet underveis i kapittel 4 og kapittel 5, mens noen sentrale usikkerheter presenteres her. Siden beregnede klimagassutslipp for etasjeskillerne i denne oppgaven varierer proporsjonalt med mengdedata og utslippsfaktorer, er det nettopp usikkerhet innen disse to faktorene som avgjør den totale usikkerheten.

6.3.1 Beregning av materialmengder

Å utelukke klimagassbidraget fra tilleggsmaterialer som skruer, plater og andre festemidler kan ha signifikante utslag på sluttresultatene (Kellenberg and Althausb, 2009). Dette gjelder spesielt for tredekker fremfor betongdekker, siden de benytter en større mengde festemidler.

Last- og spennviddeberegninger og tilhørende materialmengder for de forskjellige dekkene baserer seg på ulike metoder, som forringer sammenligningsgrunnlaget til en viss grad:

- For betongdekkene baserer dimensjoneringen seg på utførlige beregninger i programvare som har optimalisert materialmengdene.
- For tredekkene baserer dimensjoneringen seg på veiledende tabeller gitt av ulike leverandører og anbefalinger, som gir et mye større variasjonsområde.

Tredekkene har altså et mye større variasjonsområde, men hvis optimaliserte beregninger utføres kan dette slå begge veier med tanke på klimagassregnskapet: På den ene siden kan detaljerte beregninger avdekke behov for større dimensjoner, og på den andre siden kan optimaliseringer føre til reduserte materialmengder der det er hensiktsmessig.

6.3.2 Spesifikke data i en generell analyse

I denne oppgaven er det benyttet erfaringstall fra spesifikke prosjekter for å danne datagrunnlag for en generell analyse. Den strukturelle dimensjoneringen av bæresystemene i betong er basert på erfaringstall fra Gullaug Torg og Powerhouse Brattøra, mens dimensjoneringen av bjelke-/søylesystemet for trebyggene er basert på et kontorbygg i Canada Robertson et al. (2012). I praksis vil alle prosjekter ha sine egne krav, tekniske løsninger og arkitektoniske valg, som betyr at bæresystemene ikke nødvendigvis kan generaliseres, eller i det hele tatt benyttes, for alle typer prosjekter.

For bjelke-/søylesystemet av tre er det i tillegg knyttet en ekstra usikkerhet siden det ikke tar høyde for varierende spennvidder eller varierende egenlast, noe dimensjoneringen av søyler og bjelker av betong gjør. For etasjeskillerne av tre i denne oppgaven varierer nettopp disse faktorene i stor grad; fra en egenlast på rundt 50 til 350 kg og et spenn fra 5 til 10 meter. Verdiene knyttet til bjelker og søyler av tre er derfor ikke representative for alle dekketyper, selv om bjelke-/søylesystemet fra Robertson et al. (2012) er konservativt valgt fremfor bjelke-/søylesystemet fra Skullestad (2016).

6.4 Usikkerhet knyttet til utslippsfaktorer

6.4.1 Enkelt-EPDer

Utslippsfaktorene til et par av materialene i denne oppgaven baserer seg på én enkelt EPD, som er en god metode med lav usikkerhet hvis det spesifikke materialet beskrevet i EPD faktisk benyttes. Forskjellige EPDer baserer seg derimot på ulike råvarer, energikilder og transportformer, i tillegg til at produksjonssted og teknologinivå varierer fra produsent

til produsent, slik at utslippsfaktoren kan bli en helt annen dersom andre leverandører benyttes. Det kan innen en materialtype være større forskjell på utslippsfaktorene enn det er mellom ulike materialtyper. Som vi ser av tabell 5.2 i kapittel 5 gjelder dette for flere av materialene i denne oppgaven. Å benytte én EPD er altså representativt for det spesifikke produktet, men er ikke representativt for byggebransjen som helhet.

6.4.2 Generiske verdier

Om materialenes utslippsfaktorer baserer seg på generiske data vil dette gi en verdi som er mer representativ for en hel bransje. Generiske data er et gjennomsnitt av en stor mengde datakilder, som dermed generaliserer ulike produsenters energikilder, transportformer og teknologinivåer. Usikkerhet knyttet til retningen, dvs. hvordan utslippet endrer seg hvis materialbruken endrer seg, er derfor lav. Den absolutte verdien på utslippsfaktoren er derimot meget høy, siden det ikke foreligger spesifikk informasjon som i en EPD.

6.4.3 Flere EPDer

I denne oppgaven er de aller fleste utslippsfaktorene basert på et gjennomsnitt av flere EPDer. Dette gir også verdier som er mer representative for en hel bransje sammenlignet med å bruke kun én EPD. I tillegg er det benyttet EPDer fra EPD-Norge eller samarbeidende programoperatører, som sikrer et godt sammenligningsgrunnlag. På den annen side er den absolutte usikkerheten fortsatt meget høy, som vi så i kapittel 5.8. I tillegg er utvalget av EPDer sannsynligvis noe skjevfordelt, da det kan tenkes at produsentene som dokumenterer miljøegenskapene til sine produkter er mer bevisste på bedriftens miljøprestasjon sammenlignet med resten av bransjen. Dette fører til at utslippsfaktoren for de fleste materialene i denne oppgaven sannsynligvis har en lavere verdi enn det reelle bransjesnittet.

Det viktigste når ulike løsninger skal sammenlignes er derimot at alle utslippsfaktorene baserer seg på det samme beregningsgrunnlaget. Kun ett av materialene i denne oppgaven baserer seg på en enkelt-EPD, to baserer seg på generiske verdier, mens 22 baserer seg på gjennomsnittsverdier av to eller flere EPDer. De materialene som baserer seg på enkelt-EPDer eller generiske verdier står ikke for en betydelig andel av utslippene (trefiberplater, parkettunderlag og PUR-skum). Det kan med andre ord argumenteres for at de fleste utslippsfaktorene i denne oppgaven baserer seg på de samme metodene, som gir et godt sammenligningsgrunnlag.

Som vi så i kapittel 5.8 har valg av EPD meget stor innvirkning på de absolutte resultatene.

Likevel ser vi rangeringen av de ulike dekkeløsningene endres i liten grad når kun de «beste» materialalternativene eller kun de «verste» materialalternativene benyttes i analysen. Dette tyder på at usikkerhet knyttet til retningen på resultatene er lav, og at den benyttede metoden gir konsistente resultater.

6.4.4 Konsekvenser av et vugge-til-port analyseperspektiv

I denne oppgaven er systemgrensene satt som vugge-til-port (A1-A3), ekskludert biogent karbon. Dette utelukker flere relevante faser i en bygning sitt livsløp. Konsekvenser av dette diskuteres i de følgende avsnittene:

Utelukke A4

Å utelukke klimagassbidraget fra transport mellom fabrikk og byggeplass (A4) kan, som Kellenberg and Althausb (2009) og Skaar et al. (2017) viste, ha betydelig innvirkning på sluttresultatene i en LCA. For etasjeskillerne i denne oppgaven er det spesielt de tunge løsningene som vil komme dårligere ut, avhengig av avstanden fra produksjonssted til byggeplass. Basert på EPDen for grus fra Skanska Betong benyttet i denne oppgaven, vil en transportavstand på 35 km doble utslippene. Hvis vi legger til grunn en norsk gjennomsnittlig transportavstand på 200 km (Skaar et al., 2017), vil utslippet syv-dobles fra 3,0 til 21,2. Med de samme forutsetningene vil betongutslippet øke med ca 20% fra 88,3 til 106,0.

Grus har fortsatt en relativt lav utslippsfaktor, og det er ikke urimelig å anta at transportavstanden for både grus og betong kan holdes lav hvis det er fokus på dette i byggeprosessen. For andre produkter i denne analysen er det derimot større usikkerhet knyttet til transportavstand. For eksempel baserer trehulldekkene seg på en tysk produsent. Om tilsvarende løsninger ikke kan spesialbestilles av norske leverandører vil disse dekkene ha et betydelig utslipp knyttet til fasen A4.

Utelukke B1-B7

Fasene B1 til B5 er ikke inkludert i analysen. Bruk av produkter (B1), energibruk (B6) og vannbruk (B7) er irrelevante å se på i denne oppgaven, og de fleste materialene i denne oppgaven har samme levetid som bygget slik at det ikke vil forekomme noen utslipp i bruksfasen. For parkett, heltregulv og myke gulvbelegg vil derimot vedlikehold (B2) og utskiftning (B4) kunne ha en betydelig innvirkning på livsyklus-utslippene.

Utelukke D

Å utelukke effekter utenfor systemgrensen (D) henger sammen med valg av analyseperspek-

tiv. Hvis det hadde blitt gjennomført en konsekvensiell LCA kunne blant annet utslippsfaktoren for biogene materialer blitt kraftig redusert. Som nevnt i kapittel 2.4.4 vil den faktiske effekten av et biogent utslipp være avhengig av produktets levetid og rotasjonsperioden til det biogene råstoffet. Siden de fleste biogene materialene i denne oppgaven har en levetid på 60 år eller mer, betyr det at utslippene knyttet til disse ville blitt redusert om LCA analysen tok høyde for dette. I tillegg kan det tenkes at de biogene materialene vil bli benyttet til energiutvinning ved endt levetid, som erstatning for fossile brensler. Dette vil senke utslippsfaktoren for de biogene materialene ytterligere.

En annen konsekvens av å utelukke effekter utenfor systemgrensene gjelder karbonatiseringen av betong. Som nevnt i kapittel 2.4.5 kan rundt 15% av CO₂-utslippet knyttet til norsk betong absorberes i løpet av levetiden. Hvor stort dette tallet er avhenger av hva slags type betong som brukes, hva slags produkt det brukes i, samt hvordan betongen behandles ved endt levetid (knusing, eksponering mot luft resirkulering osv.).

6.4.5 Miljøpåvirkningskategorier

LCA analysen i denne oppgaven inkluderer kun miljøpåvirkningskategorien globalt oppvarmingspotensial (GWP), og utelukker med det andre kategorier som forsuring, ozon-nedbryting, økotoksisitet, overgjødning, ressursuttømming osv. Selv om et materiale er veldig gunstig i et klimaperspektiv kan det hende det fører til store negative konsekvenser innen andre miljøaspekter. Som nevnt i kapittel 2.4.3 fant derimot Steinmann et al. (2016) at nettopp GWP korrelerer godt med de fleste miljøpåvirkningskategoriene. Dette kan tyde på at analysen er representativ for et bredt spekter av miljøpåvirkningskategorier, selv om innbefatning av flere miljøpåvirkningskategorier kan påvirke hvilke løsninger som er optimale i et større perspektiv.

Kapittel 7

Konklusjon

I dette kapitlet gjengis de to forskningsspørsmålene og det belyses hvorvidt disse er besvart.

7.1 Finnes det en CO₂-premie for byggehøyde knyttet til etasjeskillere?

Litteraturstudiet viser at kompakt byutvikling er et viktig tiltak for å redusere byers klimagassutslipp. Tettere byer har lavere utslipp knyttet til transport, i tillegg til at urbane områder har høyere arealeffektivitet med færre kvadratmeter boareal per innbygger. Tettere byer krever derimot høyere hus som igjen krever mer og sterkere materialer som kan øke byenes klimagassutslipp (CO₂-premium). Flere kilder viser derimot at denne premien er neglisjerbar hvis de rette materialvalgene tas (Ytrehus, 2015; Skullestad, 2016; Kaspersen, 2016; Bohne et al., 2017).

Når det gjelder CO₂-premien knyttet til etasjeskillere viser litteraturstudiet at dette forekommer til en viss grad fra en til fem etasjer som følge av strengere brannkrav. For byggehøyder som overgår dette er det funnet argumenter både for og imot at det finnes en premium knyttet til etasjeskillere. Oppsummert kan det sies at det ikke forekommer noe premium der ulike bygg sammenlignes på helt like premisser (modellbygg). For virkelige bygg kan det likevel tyde på at valg av etasjeskillere til en viss grad påvirkes av byggehøyde (Treolar et al., 2001). Om dette skyldes at høye bygg utformes med større fleksibilitet og lengre spennvidder, om det er gunstig med høy vekt for å motvirke vind-induserte vibrasjoner eller om det er andre grunner for dette, vites ikke.

Litteraturstudiet viser uansett at etasjeskillere spiller en betydelig rolle for det endelige klimagassutslippet til et bygg, selv for store byggehøyder der avstivende systemer gjør seg gjeldene. Dette betyr at strukturelle, tekniske og arkitektoniske valg for å oppnå forskjellige krav og behov knyttet til etasjeskillere, har stor innvirkning på det endelige klimagassutslippet til en bygning, og i det større bildet, en by.

7.2 Hvilke løsninger er optimale for etasjeskillere i høye hus med tanke på klimagassutslipp og andre funksjonelle krav?

I denne oppgaven er LCA benyttet til å sammenligne klimagassutslippet til fire forskjellige dekketyper; massivtredekker, trehulldekker, flatdekker av betong og hulldekker av betong. Dekkene er dimensjonert for spennvidder på 5, 7 og 10 meter, med en nyttelast på 3 kN/m² og med en brannmotstand på REI 90. Trinnlydnivå og luftlydsreduksjonstall varierer ut fra hvilke tilleggskonstruksjoner som benyttes. Tilsammen er 176 forskjellige konfigurasjoner undersøkt, som har ført til følgende konklusjoner:

- Av de fire dekketyperne undersøkt i denne oppgaven kommer trehulldekker ut som en meget gunstig konstruksjon med tanke på klimagassutslipp, selv når viktige funksjonelle egenskaper innen brann, lyd og bæreevne tas hensyn til. I tillegg til at tre er et materiale med lave utslipp i seg selv, er det hovedsaklig to faktorer som bidrar til at trehulldekker kommer så godt ut; de er effektivt utformet der en stor andel av tverrsnittet tar opp trykk- og strekkrefter sammenlignet med massive dekker. De kan også benytte ulike tilleggsmaterialer i hulrommet for å oppnå forskjellige funksjonelle krav, som grusfylling for å bedre lydegenskapene, uten at det går utover byggehøyden.
- For etasjeskillere av betong ser vi en lineær sammenheng mellom klimagassutslipp og lydegenskaper. For massivtre- og trehulldekker er ikke denne sammenheng like tydelig, som fører til at flere løsninger skiller seg ut med både lave klimagassutslipp og relativt gode lydegenskaper. Her er det med andre ord viktig å velge klimariktige løsninger under prosjekteringsfasen av et bygg. Felles for alle etasjeskillerne av tre som skiller seg ut med lave klimagassutslipp og gode lydegenskaper er at de benytter grus for å øke flatevekten på dekket.
- Nødvendige tilleggsmaterialer for å oppnå lydkrav har stor innvirkning på klimagassutslippet til et etasjeskille av tre, for etasjeskillere av betong er denne virkningen betraktelig mindre. Samtidig kan krav til trinnlydnivå for forskjellige bygningstyper ha mye å si for klimagassutslippet til et etasjeskille. Som følge av dette ser det ut til at etasje-

7.2. HVILKE LØSNINGER ER OPTIMALE FOR ETASJESKILLERE I HØYE HUS MED TANKE PÅ KLIMAGASSUTSLIPP

skillere av tre kommer enda gunstigere ut for kontorer enn for boliger. En oppveiende faktor er at kontorer har behov for lengre spennvidder, som igjen øker klimagassutslippet. Når spennlengden økes ser vi trehulldekkene kommer best ut også her med tanke på klimagassutslipp, men den nødvendige etasjetykkelsen gjør trehulldekker mindre konkurransedyktige ved spenn opp mot 10 meter.

Selv når bæresystemer av tre, uten å inkludere virkningen av biogent karbon, sammenlignes med et optimalisert betongdekke med en relativt lav utslippsfaktor, ser vi trehulldekkene kan oppnå de samme funksjonskravene til lydisolering og brannmotstand, med et betydelig redusert klimagassutslipp. Dette tyder på at potensialet for å redusere klimagassutslipp fra byggebransjen ved å benytte etasjeskillere av tre, er stort.

Med de gunstigste valgene av tilleggsmaterialer kan et trehulldekke med 7 meter spenn som oppfyller funksjonelle krav innen lyd og brann for et fleretasjes bygg komme ned i 31,4 kg CO₂-ekv. for boliger og 16,3 kg CO₂-ekv. for kontorer. Hvis vi ser bort fra utslipp knyttet til bjelker og søyler blir tilsvarende resultater 26,5 kg CO₂-ekv. for boliger og 11,4 kg CO₂-ekv. for kontorer.

Kapittel 8

Anbefalinger til videre arbeid

Metoden for livsløpsanalysen i denne oppgaven har systemgrensene satt fra A1-A3. Som belyst kan en utvidet systemgrense ha stor innvirkning på utslippsfaktorene til de forskjellige materialene. En mer omfattende LCA bør derfor utføres for å gi en bredere forståelse av hvilke etasjeskille-løsninger i høye bygg som er mest klimavennlige.

Materialmengdene knyttet til bæresystemene av betong er grundig beregnet sammenlignet med materialmengdene knyttet til bæresystemene av tre. En grundigere dimensjonering av bjelke-/søylesystemene av tre, samt etasjeskillerne ved forskjellige egenlaste og spennvidder, bør gjennomføres for å øke troverdigheten til resultatene.

Økonomiske faktorer er ikke tatt hensyn til i denne oppgaven, der ulike kostnader som følger med de forskjellige materialvalgene ikke har blitt undersøkt. For at klimavennlige løsninger skal bli tatt i bruk i byggebransjen er det viktig at de er økonomisk konkurransedyktige. Å undersøke kostnader knyttet til de ulike løsningene i denne oppgaven kan derfor være et viktig tema å se videre på.

Bibliografi

United Nations Framework Convention on Climate Change UNFCCC. The Paris Agreement. Technical report, United Nations, 2016. Tilgjengelig på: http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php. Besøkt: 19.04.2017.

Vojislav Novakovic, Sten Olaf Hanssen, Jan Vincent Thue, Ivar Wangensteen, and Frode Olav Gjerstad. *Enøk i bygninger - effektiv energibruk*. Universitetsforlaget AS og Gyldendal Norsk Forlag, 3 edition, 2007. ISBN 978-82-05-37496-6.

Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. Climate Change 2014 Synthesis Report. contribution of working groups i, ii and iii. *Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, page 87, 2014. Tilgjengelig på: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf. Besøkt 07.04.2017.

Kommunal- og moderniseringdepartementet. Gode bygg for et bedre samfunn. (Meld. std. 28. 2011-2012), 2011. Tilgjengelig på: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld-st-28-20112012/id685179/sec1>. Besøkt: 28.11.2017.

Klima og miljødepartementet. Meld.st. 21 (2011-2012) Norsk klimapolitikk, 2012. Tilgjengelig på: <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/klima/innsiktsartikler-klima/klimaforliket/id2076645/>. Besøkt: 19.04.2017.

IPCC. Summary for policymakers. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, 2013.

I. Marton. Byggsektorens CO2-utslipp og energibruk. Innspill/rapport, Statsministerens kontor, 2007. Tilgjengelig på: https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/md/vedlegg/forurensing/et-klimavennlig-norge/byggenaeringens_miljosekretariat2.pdf. Besøkt: 07.04.2017.

- United States Environmental Protection Agency EPA. Inventory of u.s. greenhouse gas emissions and sinks: 1990 – 2014. EPA, page 26, 2016. Tilgjengelig på: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-04/documents/us-ghg-inventory-2016-main-text.pdf>. Besøkt: 07.04.2017.
- Lars Mæhlum. Strålingspådriv. I Store norske leksikon., 2013. Hentet 25. april 2017 fra <https://snl.no/str%C3%A5lingsp%C3%A5driv>.
- F. Joos, R. Roth, J.S. Fuglestvedt, G.P. Peters, I.G. Enting, W. von Bloh, and more. Carbon dioxide and climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics: a multi-model analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 2013.
- Julie Lyslo Skullestad. Bygging av høyhus i tre som et klimatiltak. master thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2016. Tilgjengelig på: https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2407885/14670_FULLTEXT.pdf?sequence=1. Besøkt 19.09.2017.
- A. Levasseur, P. Lesage, M. Margini, L. Deschênes, and R. Samson. Considering time in LCA: Dynamic LCA and its application to Global Warming Impact Assessments. *Environmental Science and Technology*, 44, 2010.
- S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Cheng, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. *Summary for Policymakers and Technical Summary*, 2007. Cambridge University Press. Tilgjengelig på: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4_wg1_full_report.pdf. Besøkt: 05.04.2017.
- Jostein Skree and Jens-Dag Vatndal. Energibruk i bygg – rammer, krav og muligheter. Technical Report 8, Norsk teknologi, 2008. Hentet fra <https://www.arkitektur.no/energibruk-i-bygg?pid=NAL-EcoPublication-Attachment>. Besøkt: 20.04.2017.
- Statistisk sentralbyrå SSB. Produksjon og forbruk av energi, energibalanse, 2014-2015, endelige tall, 2015. Hentet fra <https://ssb.no/energibalanse>. Besøkt: 20.04.2017.
- EU-kommisjonen. Energy efficiency - Buildings. Nettside, 2017. Hentet fra <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>. Besøkt: 23.04.2017.
- H. Rogner, D. Zhou, R. Bradley, P. Crabbé, O. Edenhofer, and B. et al Hare. Climate change 2007: Mitigation. contribution of working group iii. *The Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 4:95–116, 2007. Tilgjengelig på: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/ch6s6-2.html. Besøkt 24.04.2017.

- Miljødirektoratet. Klimagassutslipp fra bygg, 2016. Tilgjengelig på <http://www.miljostatus.no/tema/klima/norske-klimagassutslipp/klimagassutslipp-bygg/#heading1>. Besøkt 07.04.2017.
- Forrest Meggers, Hansjürg Leibundgut, Sheila Kennedy, Menghao Qin, Mike Schlaich, Werner Sobek, and Masanori Shukuya. Reduce co2 from buildings with technology to zero emissions. *Sustainable Cities and Society*, 2:29–34, 2012. Hentet fra https://architecture.mit.edu/sites/architecture.mit.edu/files/attachments/lecture/Reduce%20CO2%20from%20buildings_SustCitiesSoc.pdf. Besøkt: 23.04.2017.
- USGBC. Buildings and climate change, 2006. Hentet fra <http://www.eesi.org/files/climate.pdf>. Besøkt: 23.04.2017.
- Vattenfall/McKinsey. Pathways to a Low-Carbon Economy, Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve. 2009.
- Ivar Nestaas. Livsløpsvurdering. *Store Norske Leksikon*, 2014. Tilgjengelig på: <https://snl.no/livsl%C3%B8psanalyse>. Besøkt 02.12.2017.
- Ecoinvent. About ecoinvent. Nettside, 2018. Tilgjengelig på: <http://www.ecoinvent.org/about/about.html>. Besøkt 11.01.2018.
- Christian Solli, Anne Sigrid Nordby, Oddbjørn Dahlstrøm, and Marit Sundby Iversen. Byggematerialer og klima - hvordan påvirker forutsetninger i analysene resultatet? Presentasjon, 2016. Tilgjengelig på: <https://www.ntnu.no/documents/1264930397/1265429912/2+-+sollie.pdf/7c4b196e-f306-40af-bc1d-fa9b0acfe2c3>. Besøkt 03.12.2017.
- Standard Norge. Ns-en 15978 - bærekraftige byggverk - vurdering av bygningers miljøpåvirkning - beregningsmetode. Technical report, Standard Norge, 2011.
- EPD-Norge. Hva er en pcr? Nettside, 2018. Tilgjengelig på: <http://epd-norge.no/pcr/>. Besøkt 10.01.2018.
- Sigrud Strand-Hanssen. Innspill til dibk høringsnotat for nye energiregler, 2015. Tilgjengelig på: https://dibk.no/globalassets/aktuelle-horinger3/160215_nye-energikrav-til-bygg/svar/asplan-viak-as.pdf. Besøkt 05.12.2017.
- Zoran J. N. Steinmann, Aafke M. Schipper, Mara Hauck, and Mark A. J. Huijbregts. How many environmental impact indicators are needed in the evaluation of product life cycles? *Environmental Science & Technology*, 50(7):3913–3919, 2016. doi: 10.1021/acs.est.5b05179. Tilgjengelig på: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.5b05179>. Besøkt 05.12.1017.

- Christofer Skaar, Bård Solem, and Petra R  ther. Composite floors in urban buildings: Options for a low carbon building design. In *6th Forum Wood Building Nordic Trondheim*. SINTEF Building and infrastructure, 2017. Presentasjon av sammendrag tilgjengelig p  : <http://innovativeanskaffelser.no/wp-content/uploads/2017/11/sintef-byggforsk-christofer-skaar.pdf>. Besøkt 28.11.2017.
- Lars Tellnes. Systemgrenser i lca av treprodukter. Presentasjon, 2015. Tilgjengelig p  : <https://www.ntnu.no/documents/1264930397/1265429912/Tellnes2015-+Treprodukter+og+LCA+-+Innspill+klimax+seminar+%5BRead-Only%5D.pdf/275426a8-483e-4389-9a9f-622059cf4a81>. Besøkt 03.12.2017.
- Geoffrey Guest, Francesco Cherubini, and Anders Str  mman. Global warming potential of carbon dioxide emissions from biomass stored in the anthroposphere and used for bioenergy at end of life. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1):20–30, 2013. Tilgjengelig p  : <http://dx.doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00507.x>. Besøkt 10.12.2017.
- Stefan Pauliuk, Rachel Milford, Daniel M  ller, and Julian Allwood. The steel scrap age. *Environmental Science and Technology*, 47(7):3448–3454, 2013. Tilgjengelig p  : <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/es303149z>. Besøkt 03.12.2017.
- Claus Pade and Maria Guimares. The co2 uptake of concrete in a 100 year perspective. *Cement and Concrete Research*, 37(9):1348–1356, 2007. Tilgjengelig på: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884607001317>. Besøkt 03.12.2017.
- Kari-Anne Lyng, Anne Rønning, Mie Vold, and Erik Svanes. Karbonopptak i betong i lca og epd - status og videre anbefalinger. Technical Report OR.01.14, Østfoldforskning, 2014. Tilgjengelig på: <https://www.ostfoldforskning.no/media/1084/720-1.pdf>. Besøkt 03.12.2017.
- Kari Aarstad. Betong. typer, egenskaper og bruksområder. Technical report, SINTEF Byggforsk, 2016. Tilgjengelig på: https://www.byggforsk.no/dokument/5157/betong_typer_egenskaper_og_bruksomraader#i941. Besøkt 22.11.2017.
- Frederic Aarn  s Hermansen. Lavkarbonbetong i etterspente dekker. Ptrosettprosjekt, Norwegian University of Science and Technology, Juni 2017.
- Finnfjord. Silika. Nettside, 2017. Tilgjengelig på: <http://www.finnfjord.no/silika>. Besøkt 22.11.2017.
- Roar Myrdal. Betongkjemi - bindemidler og tilsetningsstoffer til betong. Presentasjon, 2015. Tilgjengelig på: http://butikk.betong.net/wp-content/uploads/R_Myrdal___BETONGKJEMI___Stavanger_08.09.2015.pdf. Besøkt 22.11.2017.

- Mir Ali and Kyoung Moon. Structural developments in tall buildings: Current trends and future prospects. *Architectural Science Review*, 50, 2007. Tilgjengelig på: https://www.researchgate.net/publication/228347447_Structural_Developments_in_Tall_Buildings_Current_Trends_and_Future_Prospets. Besøkt 09.10.2017.
- SABIH HASHIM Alzuhairy. Structural systems of high rise and long span buildings. lecture, 2015. Tilgjengelig på: <http://cihanuniversity.edu.iq/files/1429475958.pdf>. Besøkt 10.10.2017.
- Fuzlur R. Khan. Column-free box-type framing with and without core. In *Chicago, Illinois*, 1968.
- Jan Vincent Thue. Hus. *Store Norske Leksikon*, Mars 2014a. Tilgjengelig på: <https://snl.no/hus>. Besøkt 08.10.2017.
- Spenncon. Bæresystemer. Nettside, 2017. Tilgjengelig på: <http://spenncon.no/produkter/baresystem/>. Besøkt 08.10.2017.
- Brynhildsen, Rotheim, Hvidsten, Solberg, Reiersen, Myhre, and Sygnestveit. Hulldekker på bæresystemer av stål - anbefalte prinsipper og løsninger. Technical report, Betongelementforeningen og Norsk Stålforbund, 2008. Tilgjengelig på: http://www.stalforbund.no/uploads/source/files/Materialet/Hulldekker/Veileder_Hulldekker_2008_2.pdf. Besøkt 08.10.2017.
- Betongelementforeningen. Betongelementboken på nett, 2017. Tilgjengelig på: <http://www.betongelement.no/betongapp/default.html>. Besøkt 21.11.2017.
- Håkon Sælen. Konsekvenser av irregulær ytre geometri for bæresystemets klimagassregnskap på gullhaug torg. masteroppgave, NTNU, 2016. Tilgjengelig på: <http://hdl.handle.net/11250/2443360>. Besøkt .2017.
- Margrethe Ollendorff. Powerhouse - innebygget energi og klimagassregnskap for bæresystemene. masteroppgave, NTNU, 2012. Tilgjengelig på: <http://hdl.handle.net/11250/237130>. Besøkt 10.12.2017.
- Sverre Tronstad. Limtre. *Store Norske Leksikon*, 2009. Tilgjengelig på: <https://snl.no/limtre>. Besøkt 29.11.2017.
- Geir Glasø. Brann tekniske egenskaper ved massivtre. Presentasjon, 2017. Tilgjengelig på: <http://bygg.tekna.no/massivtre-og-brann/>. Besøkt 10.10.2017.

- Tor Kristensen. Massive treelementer. Technical report, SINTEF Byggforsk, 2001. Tilgjengelig på: https://www.byggforsk.no/dokument/3009/massive_treelementer_typer_og_bruksomraader. Besøkt 29.11.2017.
- Moelven. Kerto-s. Nettside, 2017. Tilgjengelig på: <http://www.moelven.com/no/Produkter-og-tjenester/Limtre-og-Kerto/Kerto-S/>. Besøkt 29.11.2017.
- Odd E. Ellingsrud. Keto-bjelken. Teknisk godkjenning, SINTEF Byggforsk, avd. Energi og arkitektur, Oslo, 2011. Tilgjengelig på: <http://www.moelven.com/Documents/Limtre/TG2142%20Kerto.pdf>. Besøkt 29.11.2017.
- Geir Glasø. Fokus på tre - fleretasjes trehus. Technical report, Treteknisk, 2004. Tilgjengelig på: <http://www.treteknisk.no/publikasjoner/fokus-pa-tre/32--fleretasjes-trehus>. Besøkt 06.12.2017.
- Trond Ø. Ramstad. Trebjelkelag. dimensjonering og utførelse. Technical report, SINTEF Byggforsk, 2011. Tilgjengelig på: https://www.byggforsk.no/dokument/334/trebjelkelag_dimensjonering_og_utfoerelse. Besøkt 30.11.2017.
- Anders Homb and Svein Terje Kolstad. Gitterbjelkelag, løsninger og detaljer. Prosjektrapport 103, SINTEF Byggforsk, 2012. Tilgjengelig på: https://www.sintefbok.no/book/index/967/gitterbjelkelag_loesninger_og_detaljer. Besøkt 30.11.2017.
- Anders Homb. Etasjeskillere i massivtre. Technical report, SINTEF Byggforsk, 2009. Tilgjengelig på: https://www.byggforsk.no/dokument/3367/etasjeskillere_i_massivtre. Besøkt 30.11.2017.
- Kim Andre Åby and Martin Hartnes. Etasjeskiller i tre med komposittløsning. Masteroppgave, NTNU, 2016. Tilgjengelig på: <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2433669>. Besøkt 30.11.2017.
- Alireza Fadai, Wolfgang Winter, and Michaela Gruber. Wood based construction for multi-storey buildings. the potential of cement bonded wood composites as structural sandwich panels. In *WCTE - World Conference on Timber Engineering*. New Zealand Timber Design Society, 2012. Tilgjengelig på: <http://www.timberdesign.org.nz/files/00446%20Wolfgang%20Winter.pdf>. Besøkt 30.11.2017.
- Claude Leyder, Eleni Chatzi, Flavio Wanninger, and Andrea Frangi. Dynamic response of an innovative hybrid structure in hardwood. *Construction Materials*, 168(3)::132–143, 2015. Tilgjengelig på: https://www.researchgate.net/publication/276461529_Dynamic_response_of_an_innovative_hybrid_structure_in_hardwood. Besøkt 15.08.2017.

- DiBK Direktoratet for samfunnsikkerhet og beredskap. Brannstatistikk. Database, 2017. Tilgjengelig på: <http://stat.dsb.no//Database/DSB/databasetree.asp>. Besøkt 21.11.2017.
- Finans Norge. Brannstatistikk, 2017. Tilgjengelig på: <https://www.finansnorge.no/statistikk/skadeforsikring/Brannstatistikk/>. Besøkt 21.11.2017.
- Oleiv Hoel, Niels Øistein Rimstad, and Kari Jensen. Brann. *Store Norske Leksikon*, 2017. Tilgjengelig på: <https://snl.no/brann>. Besøkt 20.11.2017.
- Jan Chr. Krohn. Brannteknisk oppdeling av bygninger. Technical report, SINTEF Byggforsk, 2013. Tilgjengelig på: https://www.byggforsk.no/dokument/79/brannteknisk_oppdeling_av_bygninger#i91. Besøkt 20.11.2017.
- Jan Chr. Krohn and Anne Steen-Hansen. Brannteknisk klassifisering og dokumentasjon av bygningsdeler og byggeprodukter. Technical report, SINTEF Byggforsk, 2017. Tilgjengelig på: https://www.byggforsk.no/dokument/315/brannteknisk_klassifisering_og_dokumentasjon_av_bygningsdeler_og_byggeprodukter#. Besøkt 20.11.2017.
- Jan Chr. Krohn. Oversikt over krav og løsninger ved brannteknisk prosjektering av bygninger. Technical report, SINTEF Byggforsk, 2017. Tilgjengelig på: https://www.byggforsk.no/dokument/3307/oversikt_over_krav_og_loesninger_ved_brannteknisk_prosjektering_av_bygninger. Besøkt 14.10.2017.
- Erling Solheim, Bjørn Lundby, and Vegard Ervik Olsen. Brannkrav og rådgivende ingeniør byggeteknikk. Technical report, Rådgivende Ingeniørers Forening, 2017. Tilgjengelig på: <http://www.rif.no/media/6174/brann-og-rib-2017.pdf>. Besøkt 29.11.2017.
- Kristen Moen. Bærekraftige materialer og klimanøytral bygging - tre som konstruksjonsmateriale. Presentasjon, 2017. Tilgjengelig på: <https://bygg.tekna.no/wp-content/uploads/2017/01/Tre-som-konstruksjonsmateriale.pdf>. Besøkt 30.11.2017.
- Pål Kjetil Eian and Grete Kjelsen. Krav til dokumentasjon ved prosjektering av «ikke preaksepterte» løsninger. Notat, Norconsult, 2013. Tilgjengelig på: <http://docplayer.me/37228232-Krav-til-dokumentasjon-ved-prosjektering-av-ikke-preaksepterte-losninger.html>. Besøkt 30.11.2017.
- Erlend Johansen. Massivtre og brann. Presentasjon, Mars 2017. Tilgjengelig på: <https://bygg.tekna.no/massivtre-og-brann/>. Besøkt 6.11.2017.
- Andrew H. Buchanan. *Structural Design for Fire Safety*. John Wiley and Sons, Ltd, 2002. ISBN 13: 978 0 471 88993 9.

- Geir Glasø, Harald Landrø, and Erik Aasheim. Fokus på tre - tre og brann. Technical Report 37, TreFokus og TreTeknisk, 2005. Tilgjengelig på: <http://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/fokus-pa-tre/Fokus-nr-37.pdf>. Besøkt 01.12.2017.
- A. D. Lieblein. Brannsikkerhet i høye trehus. Masteroppgave, NTNU, 2016. Tilgjengelig på: https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2418422/15567_FULLTEXT.pdf?sequence=1. Besøkt 06.12.2017.
- Tuula Hakkarainen. Post-flashover fires in light and heavy timber construction compartments. *Journal of Fire Sciences*, 20(2), 2002. Tilgjengelig på: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0734904102020002074>. Besøkt 06.12.2017.
- Vidar Stenstad. Boligblokker med trekonstruksjoner. Technical report, SINTEF Byggforsk, 2002. Tilgjengelig på: <http://www.brannmurbetong.no/innhold/PDF/brann-sikkerhet-7-02-p25-28.pdf>. Besøkt 01.12.2017.
- Taran Nygård Egeli. Branntekniske utfordringer i høye trehus. Masteroppgave, NTNU, 2011. Tilgjengelig på: <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/231791>. Besøkt 01.12.2017.
- TreTeknisk. Treindustriens lille grønne. Technical report, Treindustrien og Trefokus og Treteknisk, 2013. Tilgjengelig på: <http://www.trefokus.no/resources/Treindustriens-lille-gronne.pdf>. Besøkt 01.12.2017.
- Truls Gjesteland. Lyd: fysikk. Store Norske Leksikon, 2017. Tilgjengelig på: https://snl.no/lyd_-_fysikk. Besøkt 02.10.2017.
- Jan Vincent Thue. *Bygningsfysikk - grunnlag*. Akademika forlag, 2014b. ISSN: 9810300037238.
- Jan Vincent Thue. Lydisolering. *Store Norske Leksikon*, 2009. Tilgjengelig på: <https://snl.no/lydisolering>. Besøkt 07.10.2017.
- Sigurd Hveem. Romakustikk og lydisolering. grunnbegreper. Byggforskserien 421.402, SINTEF Byggforsk, 2004a. Tilgjengelig på: https://www.byggforsk.no/dokument/186/romakustikk_og_lydisolering_grunnbegreper. Besøkt 01.10.2017.
- Sigurd Hveem. Lydutbredelse og støy. grunnbegreper. Byggforskserien 421.401, SINTEF Byggforsk, 2004b. Tilgjengelig på: https://www.byggforsk.no/dokument/185/lydutbredelse_og_stoey_grunnbegreper. Besøkt 01.10.2017.

Geir Glasø. Tre og lyd. *Fokus på tre*, 36, 2011. Tilgjengelig på: <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/36-Tre-og-lyd.pdf>. ISSN 1501-7427. Besøkt 02.10.2017.

Sigurd Hveem. Lydisolerende, tunge etasjeskillere. Technical report, SINTEF Byggforsk, 2015a. Tilgjengelig på: https://www.byggforsk.no/dokument/340/lydisolerende_tunge_etasjeskillere#. Besøkt 06.10.2017.

Knut Haugen. Fasaders støyisolering mot vegtrafikkstøy. Masters thesis, NTNU, 2007. Tilgjengelig på: https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2369628/350452_FULLTEXT01.pdf?sequence=2&isAllowed=y. Besøkt 07.10.2017.

Tove Holmefjord. Konsekvenser av å utvide frekvensområdet ved beregninger i støybygg iii fra 100-3150 hz til 50-5000 hz. Presentasjon på nett, 2013. Tilgjengelig på: <http://docplayer.me/9619796-Konsekvenser-av-a-utvide-frekvensområdet-ved-beregninger-i-stoybygg-iii-fra-100-3150-hz-til-50-5000-hz.html>. Besøkt 01.12.2017.

Anders Homb. Lydisolerende, tunge etasjeskillere. Technical report, SINTEF Byggforsk, 2017. Tilgjengelig på: [Lydisolerendeetasjeskillere med trebjelkelag i boliger](#). Besøkt 01.12.2017.

Folkehelseintituttet. Anbefalte faglige normer for inneklime. Technical report, Nasjonalt folkehelseinstitutt, 2015. Tilgjengelig på: <https://www.fhi.no/globalassets/dokumenterfiler/moba/pdf/anbefalte-faglige-normer-for-inneklime-pdf.pdf>. ISBN: 978-82-8082-655-8. Besøkt 06.10.2017.

Sigurd Hveem. Lydisolerende golv og golvbelegg. Byggdetaljblad 522.515, SINTEF Byggforsk, 2009. Tilgjengelig på: https://www.byggforsk.no/dokument/341/lydisolerende_golv_og_golvbelegg#i11. Besøkt 16.12.2017.

Sigurd Hveem. Unngå byggskafer - lydisolasjonskvalitet i boliger. Technical report, SINTEF Byggforsk, 2010. Tilgjengelig på: <https://www.sintef.no/globalassets/upload/artikkel-05-10-byggaktuelt.pdf>. Besøkt 09.10.2017.

Olin Bartlome and Andreas Liebl. Acoustic solutions for wooden intermediate floors. *InterNoise*, 2014. Tilgjengelig på: https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/INTERNOISE2014/papers/p819.pdf. Besøkt 10.1.2018.

- Stora Enso. Schallschutz für clt von stora enso, 2016. Tilgjengelig på: <http://www.clt.info/wp-content/uploads/2015/10/Schallschutz-mit-CLT-von-Stora-Enso-DE.pdf>. Besøkt 09.12.2017.
- Ernst Ullrich Köhnke. Schallschutztechnische ausführungsfehler an holzdecken, 2013. Tilgjengelig på: http://www.forum-holzbau.com/pdf/HBS_bauphysik_13_Koehnke.pdf. Besøkt 09.12.2017.
- Ernst Ullrich Köhnke. Schallschutz – schüttungen ungebunden?, 2014. Tilgjengelig på: http://www.quadrige-news.de/www.quadrige-news.de/data/media/2373/47_Koehnke.pdf. Besøkt 09.12.2017.
- Jeffrey Mahn, Carl Hopkins, Ulrich Schanda, and Luboš Krajčí. Competitive wooden floor systems - multi-objective optimization based on acoustics improvement. In *Internoise Conference - Noise control for quality of life*, 2013. Tilgjengelig på: https://www.researchgate.net/publication/268685830_Competitive_wooden_floor_systems_-_Multi-objective_optimization_based_on_acoustics_improvement. Besøkt 06.10.2017.
- Anders Homb. Kriterier for opplevde vibrasjoner i etasjeskillere. Technical report, SINTEF Byggforsk, 2007. Tilgjengelig på: https://www.sintefbok.no/book/index/94/kriterier_for_opplevde_vibrasjoner_i_etasjeskillere. Besøkt 10.12.2017.
- Eirik Resch. A holistic model for analyzing energy benefits of urban density by relating energy use, building height, and overall city structure. Master thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2016. Tilgjengelig på: <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2427554>. Besøkt 10.10.2017.
- Jonathan Norman, Heather Maclean, M Asce, and Christopher Kennedy. Comparing high and low residential density: Life-cycle analysis of energy use and greenhouse gas emissions. *Journal of Urban Planning and Development*, 132(1), 2006. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9488(2006)132:1(10). Besøkt 28.11.2017.
- Dario Trabucco and Antony Wood. Lca of tall buildings: Still a long way to go. *Journal of Building Engineering*, 7:379–381, September 2016. Tilgjengelig på: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.07.009>. Besøkt 29.11.2017.
- Philip Oldfeld. Embodied carbon and high-rise. In *CTBUH 9th World Congress*, Shanghai, 2012. Council on Tall Buildings and Urban Habitat. Tilgjengelig på: <http://global.ctbuh.org/resources/papers/download/941-embodied-carbon-and-high-rise.pdf>. Besøkt 20.10.2017.

- Kimberly Bawden. Hybrid life cycle assessment of low, mid and highrise multi-family dwellings with development of knowledge-based uncertainty bounds. Thesis, Rochester Institute of Technology, 2013. Tilgjengelig på: <http://scholarworks.rit.edu/theses/4052/>. Besøkt 26.11.2017.
- Javier Ordóñez and Vijay Modi. Optimizing co2 emissions from heating and cooling and from the materials used in residential buildings, depending on their geometric characteristics. *Building and environment*, 46(11):2161–2169, 2011. Tilgjengelig på: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132311001326>. Besøkt 27.11.2017.
- Egil Karoliussen Ytrehus. Investigating the "CO2-premium for building height. master thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2015. Tilgjengelig på: https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2349754/12422_FULLTEXT.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Besøkt 20.09.2017.
- Benedicte Kaspersen. Exploring the co2-impact for building height; a study on technical building installations. master thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2016. Tilgjengelig på: <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2427544>. Besøkt 20.09.2017.
- Rolf André Bohne, Benedicte Kaspersen, Julie Lyslo Skullestad, and Egil Myklebust. Embodied energy versus building height, the “premium” of building tall. In *World Sustainable Built Environment Conference 2017*, Hong Kong, 2017. Norwegian University of Science and Technology. Tilgjengelig på: https://www.researchgate.net/publication/319208935_Embodied_Energy_Versus_Building_Height_The_Premium_of_Building_Tall. Besøkt 20.09.2017.
- G.J. Treolar, Roger Fay, D.B. Ilozor, and Peter E.D. Love. An analysis of the embodied energy of office buildings by height. *Facilities*, Mai 2001. Tilgjengelig på: https://www.researchgate.net/publication/235281355_An_analysis_of_the_embodied_energy_of_office_buildings_by_height. Besøkt 10.10.2017.
- Paolo Foraboschi, Mattia Mercanzin, and Dario Trabucco. Sustainable structural design of tall buildings based on embodied energy. *Energy and Buildings*, 4:254–269, 2014. Tilgjengelig på: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.003>. Besøkt 6.10.2017.
- Egil Ytrehus. Materialbruk i trebaserte etasjeskillere i fleretasjes bygg. Prosjektoppgave, NTNU, 2014. Faglærer/veileder: Rolf André Bohne.

Kirsten Arge. Generalitet, fleksibilitet og elastisitet i kontorbygninger. Prosjektrapport 340, Norges byggforskningsinstitutt, 2002. Tilgjengelig på: <https://sintef.no/globalassets/upload/byggforsk/publikasjoner/prosjektrapport-340.pdf>. Besøkt 10.10.2017.

Petra Rüter. Utvikler byggesystem for høye trehus. Pressemelding, 2017. Tilgjengelig på: <http://www.sintef.no/siste-nytt/utvikler-byggesystem-for-hoye-trehus/>. Besøkt 10.10.2017.

Anders Larsen and Svein Bjørberg. Livsløpsplanlegging og tilpasningsdyktighet i bygninger. Technical report, Multiconsult, 2007. Tilgjengelig på: <https://dibk.no/globalassets/eksisterende-bygg/publikasjoner/livsløpsplanlegging-og-tilpasningsdyktighet-i-bygninger---innføring-og-prinsipper.pdf>. Besøkt 10.10.2017.

R. Bashor, T. Kijewski-Correa, and A. Kareem. On the wind-induced response of tall buildings: The effect of uncertainties in dynamic properties and human comfort thresholds. *Proceedings of Americas Conference on Wind Engineering*, 31, 2005. Tilgjengelig på: [https://nathaz.nd.edu/confs/\(2005\)OntheWind-InducedResponseofTallBuildingsTheEffectofUncertaintiesinDynamicPropertiesand.pdf](https://nathaz.nd.edu/confs/(2005)OntheWind-InducedResponseofTallBuildingsTheEffectofUncertaintiesinDynamicPropertiesand.pdf). Besøkt 14.10.2017.

K. A. Malo, R. B. Abrahamsen, and M. A. Bjertnæs. Some structural design issues of the 14-storey timber framed building “treet” in norway. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(3), 2016. Tilgjengelig på: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-016-1022-5>. Besøkt 13.10.2017.

Gustav Spjuth and Louise Åkeson. Wind-induced transmission of low frequency vibrations for a tall multi-storey wood building. Masters thesis, Lund University, 2016. Tilgjengelig på: <http://www.akustik.lth.se/fileadmin/tekniskakustik/publications/tvba5000/webTVBA5050.pdf>. Besøkt 11.12.2017.

Torhildur Fjola Kristjansdottir. Low carbon solutions: the key driver. In *Zero Emission Buildings*, pages 69–79. Vigmostad Bjørke, 2017.

Nathalie Labonnote, Christofer Skaar, and Petra Rüter. The potential of decision support systems for more sustainable and intelligent constructions: a short overview. *Procedia Manufacturing*, 12:33–41, 2016. Tilgjengelig på: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S23519789173059543>. Besøkt 30.11.2017.

- Michele Paleari, Monica Lavagna, and Andrea Campoli. Life cycle assessment and zero energy residential buildings. In *PLEA2013 - 29th Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future*. Politecnico di Milano, 2013. Tilgjengelig på: <http://mediatum.ub.tum.de/doc/1169326/1169326.pdf>. Besøkt 27.11.2017.
- Bård Solem. Kan pilotprosjektene hjelpe oss til å oppnå våre klimaforpliktelser? Technical report, Eggen Arkitekter AS / FutureBuilt, 2017. Tilgjengelig på: <https://www.futurebuilt.no/Blogg#!/Blogg/Kan-pilotprosjektene-hjelpe-oss-til-aa-oppnaa-vaare-klimaforpliktelser>. Besøkt 12.01.2018.
- Raymond Cole and Paul Kernan. Life-cycle energy use in office buildings. *Building and Environment*, 1996. Tilgjengelig på: https://www.researchgate.net/publication/222501421_Life-Cycle_Energy_Use_in_Office_Buildings. Besøkt 09.01.2018.
- Adam B. Robertson, Frank C. F. Lam, and Raymond J. Cole. A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of mid-rise office building construction alternatives: Laminated timber or reinforced concrete. *Buildings*, 2:245–270, 2012. Tilgjengelig på: <http://www.mdpi.com/2075-5309/2/3/245>. Besøkt 12.01.2018.
- Marianne Kjeldseth Wiik and Reidun Dahl Schlanbusch. Sammensatte konstruksjoners miljøprestasjon. Technical Report 1, EPD-Norge, Husbanken og SINTEF, 2016. Tilgjengelig på: http://epd-norge.no/getfile.php/Dokumenter/Publikasjoner/Rapport_Sammensatte%20konstruksjoners%20milj%C3%B8prestasjon_HB_30.09.2016.pdf. Besøkt 05.12.2017.
- Standard Norge. Bygningsdelstabell - ns 3451. Technical report, Standard Norge, 2009. Tilgjengelig på: <https://www.standard.no/fagomrader/bygg-anlegg-og-eiendom/ns-3420-/ns-3450-ns-3451-ns-3459-2/>. Besøkt 16.10.2017.
- Jönson, Tillman, and Svensson. Life cycle assessment of flooring materials: Case study. *Building and Environment*, 32(3):245–255, 1997. Tilgjengelig på: https://ac.els-cdn.com/S0360132396000522/1-s2.0-S0360132396000522-main.pdf?_tid=db260076-dff5-11e7-8f82-00000aab0f02&acdnat=1513163449_499637aef031bbd49b876da9531f2731. Besøkt 12.12.2017.
- Hernández, Geyer, Müller, Pichler, and Sanavi. Direct and flanking airborne and impact sound insulation of different swiss timber floor and wall constructions. *Forum Acusticum*, 2014. Tilgjengelig på: https://www.researchgate.net/publication/308986190_Direct_and

[flanking_airborne_and_impact_sound_insulation_of_different_Swiss_timber_floor_and_wall_constructions](#). Besøkt 03.12.2017.

Martinson. Handbok i kl-trä, 2016. Tilgjengelig på: <https://www.martinsons.se/default.aspx?id=11498>. Besøkt 10.12.2017.

Stora Enso. Building solutions. Technical report, Stora Enso Wood Products GmbH, 2015a. Tilgjengelig på: <http://www.clt.info/wp-content/uploads/2015/10/Technical-folder-CLT-EN.pdf>. Besøkt 12.10.2017.

Lignatur. Workbook, 2014. Tilgjengelig på: http://www.lignatur.ch/fileadmin/ablage/downloads/workbook-en/2014-06-04_workbook_a4_en.pdf. Besøkt 10.10.2017.

Holzwirtschaft Schweiz Lignum. Lignum component catalog soundproofing. Nettside, 2018. Tilgjengelig på: <https://lignumdata.ch/>. Besøkt 05.01.2018.

Sigurd Hveem. Lydisolerende, tunge etasjeskillere. konstruksjonseksempler. Technical report, SINTEF Byggforsk, 2015b. Tilgjengelig på: https://www.byggforsk.no/dokument/2566/lydisolerende_tunge_etasjeskillere_konstruksjonseksempler. Besøkt 06.10.2017.

Stora Enso. Clt - teknisk brosjyre. Technical report, Stora Enso Wood Products GmbH, 2015b. Tilgjengelig på: <http://woodcon.no/download/TechnischeNO.pdf>. Besøkt 10.01.2018.

Jan Krohn. Brannmotstand for etasjeskillere. Technical report, SINTEF Byggforsk, 2008. Tilgjengelig på: https://www.byggforsk.no/dokument/1538/brannmotstand_for_etasjeskillere. Besøkt 29.11.2017.

Austrian Institute of Construction Engineering AICE. European technical assessment eta-11/0137, 2014. Tilgjengelig på: http://www.lignatur.ch/fileadmin/ablage/downloads/produkte/2014-06-20_electronic_copy_eta_11_0137_lignatur.pdf. Besøkt 10.12.2017.

Mette Kristine Silseth. Egenlaster for bygningsmaterialer, byggevarer og bygningsdeler. Byggforskserien 471.031, SINTEF Byggforsk, 2013. Tilgjengelig på: https://www.byggforsk.no/dokument/215/egenlaster_for_bygningsmaterialer_byggevarer_og_bygningsdeler. Besøkt 01.10.2017.

Forbo. Nedlastningssenter - environmental product datasheet. Nettside, 2017. Tilgjengelig på: <https://www.forbo.com/flooring/no-no/nedlastning/epd/pkh3le>. Besøkt 10.12.2017.

- Norsk Betongforening. Lavkarbonbetong. Publikasjon 37, Norsk Betongforening, 2015. Tilgjengelig på: https://fabeko.no/assets/Komplett_NB-37-Lavkarbonbetong.pdf. Besøkt 03.01.2017.
- Holcim. Epd of aggregates, 2014. Tilgjengelig på: http://www.holcim.ro/fileadmin/templates/R0/doc/SD_Reports/HoRo_EPD_Agg_final.pdf. Besøkt 10.12.2017.
- Martin Marietta. Environmental product declaration, 2017. Tilgjengelig på: https://www.astm.org/CERTIFICATION/DOCS/359.EPD_for_Martin_Marietta_EPD_final.pdf. Besøkt 10.12.2017.
- Jørgen Tycho. Erfaringer - prosjekter: Større trekonstruksjoner. Tekna, 2017. Tilgjengelig på <https://bygg.tekna.no/massivtre-og-brann/>. Besøkt: 03.12.2017.
- Kjell Småge. Hvor ser vi de vanlige feil og mangler. Evotek. Tilgjengelig på <http://www.byggalliansen.no/wp-content/uploads//2014/06/140527-kps-GBA-Beregnet-og-virkelig-forbruk-de-vanlige-feilene-2.pdf>. Besøkt: 03.03.2017.
- Blane Grann. Comparative life cycle assessment. multi-story, cross-laminated timber apartment in quebec. Presentasjon, 2014. Tilgjengelig på: <http://www.woodworks.org/wp-content/uploads/2014-OR-WSF-GRANN-Comparative-Life-Cycle-Assessment.pdf>. Besøkt 10.01.2018.
- Daniel Kellenberg and Hans-Jörg Althausb. Relevance of simplifications in lca of building components. *Building and Environment*, 4(4):818–825, 2009. Tilgjengelig på: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013230800142X#fig1>. Besøkt 20.12.2017.

Tillegg A

Mailkorrespondanse

A.0.1 Josef Mynár, Product Specialist, Novatop

 RE: Sound insulation Novatop flooring elements

Vis alle meldinger i denne samtalen



Josef Mynár <josef.mynar@agrop.cz>

torsdag 7. desember 2017 12.19

Til: Herman Myrberg Rinholm

Hi Herman,

Thank you for your interest.

I have to say, that we don't have more information about frequencies under 60Hz, because the testing method actually start at cca 60hz to 4000Hz.
Best regards

JOSEF MYNÁŘ

From: Herman Myrberg Rinholm [<mailto:hermanmr@stud.ntnu.no>]

Sent: Thursday, December 07, 2017 10:26 AM

To: josef.mynar@agrop.cz

Subject: Sound insulation Novatop flooring elements

Hi Josef

I'm a student at the Norwegian University for Science and Technology, currently working on my master thesis for sound insulating flooring systems. I want to compare wooden floor systems to those of concrete, and it definitely looks like the Novatop elements can compete!

I have looked at the different systems, presented at page 26 and 27 in your brochure (<https://www.novatop-system.cz/en/novatop-download/a-complete-catalog-of-construction-details-98-pgs/?v=64336>).

But I can't find any information about the sound insulation for the lower frequencies. Is there any information about C-values for frequencies down to 50Hz?

Thank you,
Herman Rinholm, NTNU

A.0.2 Ralf Wipper, Teknisk rådgiver, Dipl. Ing. Holzbau, Lignatur



Herman Rinholm <herman.rinholm@gmail.com>

til Ralf ▾

Thank you very much! This will help me a lot.

One question:

I see the sound insulation values are based on elements with 200-240 mm height (page 60-62 in the workbook).

How would increasing the height to 360 or 480 mm affect the sound properties ?

Best regards,
Herman Rinholm

...



Ralf Wipper - Lignatur AG

til meg ▾

Hello Herman,

there is no difference, the higher elements are more heavy, but that causes no an great benefit concerning sound proofing.

Kind regards
Ralf Wipper

Lignatur AG
[Herisauerstrasse 30](#)
[CH-9104 Waldstatt](#)

Tel. [+41 71 353 04 22](tel:+41713530422)
r.wipper@lignatur.ch
www.lignatur.ch

Von: Herman Rinholm [mailto:herman.rinholm@gmail.com]

Gesendet: Freitag, 26. Januar 2018 13:36

An: Ralf Wipper - Lignatur AG <R.Wipper@lignatur.ch>

Betreff: Re: WG: Kontakt: lignatur.ch EN