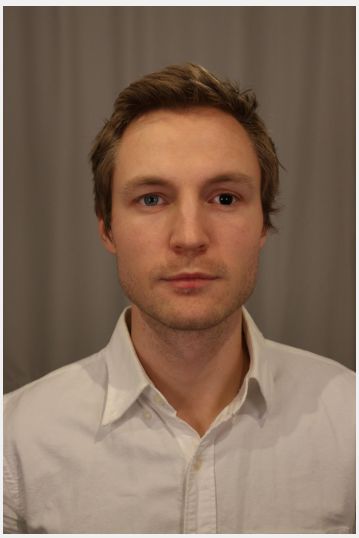
UiA Universitetet i Agder

Master

Livssyklusanalyse (LCA) av vegger i bindingsverk med kontinuerlig isolasjon

En sammenlignende LCA-studie av ytterveggsystemer i tre for miljøoptimalisering



Harald K. Eidhamar

Knut A. Kaada

VEILEDER

Reyn Joseph O'Born

Universitetet i Agder, 2020

Fakultet for teknologi og realfag

Institutt for ingeniørvitenskap

Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring

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

1. Jeg/vi erklærer herved at min/vår besvarelse er mitt/vårt eget arbeid, og at jeg/vi ikke har brukt andre kilder eller har mottatt annen hjelp enn det som er nevnt i besvarelsen. ☒

2. Jeg/vi erklærer videre at denne besvarelsen:
   - ikke har vært brukt til annen eksamen ved annen avdeling/universitet/høgskole innenlands eller utenlands. ☒
   - ikke refererer til andres arbeid uten at det er oppgitt.
   - ikke refererer til eget tidligere arbeid uten at det er oppgitt.
   - har alle referansene oppgitt i litteraturlisten.
   - ikke er en kopi, duplikat eller avskrift av andres arbeid eller besvarelse.

3. Jeg/vi er kjent med at brudd på ovennevnte er å betrakte som fusk og kan medføre annullering av eksamen og utestengelse fra universiteter og høgskoler i Norge, jf. Universitets- og høgskoleloven §§4-7 og 4-8 og Forskrift om eksamen §§ 31. ☒

4. Jeg/vi er kjent med at alle innleverte oppgaver kan bli plagiatkontrollert. ☒

5. Jeg/vi er kjent med at Universitetet i Agder vil behandle alle saker hvor det forligger mistanke om fusk etter høgskolens retningslinjer for behandling av saker om fusk. ☒

6. Jeg/vi har satt oss inn i regler og retningslinjer i bruk av kilder og referanser på biblioteket sine nettsider. ☒

Publiseringsavtale

Fullmakt til elektronisk publisering av oppgaven

Forfatter(ne) har opphavsrett til oppgaven. Det betyr blant annet enerett til å gjøre verket tilgjengelig for allmennheten (Åndsverkloven. §2).
Alle oppgaver som fyller kriteriene vil bli registrert og publisert i Brage Aura og på UiA sine nettsider med forfatter(ne)s godkjennelse.

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

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

Er oppgaven båndlagt (konfidensiell)? ☐JA ☒NEI
(Båndleggingsavtale må fylles ut)
- Hvis ja:
Kan oppgaven publiseres når båndleggingsperioden er over? ☐JA ☐NEI

Er oppgaven unntatt offentlighet? ☐JA ☒NEI
(inneholder taushetsbelagt informasjon. Jfr. Offl. §13/Fvl. §13)

1 Forord

Denne masteroppgaven «Livssyklusanalyse (LCA) av vegger i bindingsverk med kontinuerlig isolasjon» er skrevet av to studenter på institutt for ingeniørvitenskap ved Universitetet i Agder, campus Grimstad.

Rapporten er et bidrag til byggebransjens mål om kutt i CO_2-utslipp. Den gir leseren kunnskap om miljøvennlige ytterveggsystemer - med et hovedfokus på vegger med utvendig kontinuerlig isolasjon. Rapporten er innenfor fagfeltet livssyklusanalyse (LCA) men det har også vært nødvendig å inkludere bygningsfysikk og byggteknikk. Oppgaven er utarbeidet av Harald Kristian Eidhamar og Knut André Kaada på masterprogrammet for bygg. Forfatterne har forkunnskaper innen livssyklusanalyse fra blant annet et forprosjekt med livsløpsvurdering av et større kontorbygg.

Det er et stadig økende fokus på bærekraft og et behov for byggtekniske løsninger som er miljøvennlige. Denne rapporten er dermed veldig dagsaktuell og gruppen er glade for å få økt kompetanse innenfor et slikt viktig tema.

Det vil rettes en takk til doktorgradsstipendiat Merethe Solvang Tingstveit og professor Henrik Kofoed Nielsen for deling av deres kunnskap om bygningsfysikk. Samtidig vil gruppen rette en stor takk til veileder Reyn Joseph O'Born for sin gode veiledning innen livssyklusanalyse og for å føre gruppen på rett kurs igjennom semesteret.

Grimstad, juni 2020

Harald Kristian Eidhamar

Knut André Kaada

2 Summary

The building industry is taking measures in order to reduce its large carbon footprint. However, even more ecofriendly building solutions need to be used. External walls are constructed with a great usage of materials - in addition to being the building component were large portions of heat escape.

This study answers the research question “How does timber-framed external walls with continuous outer insulation (BKI) perform from an environmental point of view?”. The software SimaPro is used to compare different types of external walls with regards to CO_2-emissions. The findings in the study show that BKI walls do have good energy efficiency, especially for the TEK17 building standard. However, the rigid outer insulation studied has a worse carbon footprint than the soft insulation in between the beams. In addition, increasing the thickness of the outer continuous insulation results in a larger carbon footprint from the insulation material itself, than what is saved due to the increased energy efficiency of the reference house. This leads to the recommendation of using timber-framed walls with continuous outer insulation for the Norwegian TEK17 building standard only.

Innholdsfortegnelse

Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring I
Publiseringsavtale II
1 Forord III
2 Summary IV
Innholdsfortegnelse V
3 Figurliste IX
4 Tabelliste X
5 Ordforklaringer XI
6 Innledning 1
7 Samfunnsperspektiv 2
8 Teoribakgrunn 3
8.1 LCA 3
8.1.1 Produksjon- og konstruksjonsfase (A1-A5) 4
8.1.2 Bruksfase (B1-B7) 5
8.1.3 Livets slutt (C1-C4) 5
8.1.4 SimaPro 5
8.2 Bygningsfysikk 6
8.2.1 U-verdi 6
8.2.2 Kuldebroer 7
8.2.3 Kuldebroer gjennom kontinuerlig trevirke 7
8.2.4 Reduserte kuldebroer i vegger av bindingsverk 8
8.2.5 Tetting 9
8.2.6 Fukt og kondens 10
8.3 SIMIEN 11
8.4 TEK17 11
8.5 Passivhusstandard (PH-standard) 12
8.6 Isolasjonstykkelser i et miljøperspektiv 12
8.7 Bindingsverk (B) 13
8.8 Bindingsverk med kontinuerlig isolasjon (BKI) 14
8.9 Vegger av massivtre (M) 14
8.10 Bygningsmaterialer 15
8.10.1 Gipsplate 15
8.10.2 Asfaltimpregnert trefiberplate 15

8.10.3 OSB-plate 16
8.10.4 Vindsperreduk og dampsperre 16
8.10.5 Isolasjon 16
8.10.6 Tre 17
8.11 Markedspotensialet 18
8.12 Oppsummering av litteraturstudiets hovedfunn 19
9 Forskerspørsmål 21
10 Case 22
11 Metode 26
11.1 Litteraturstudie 26
11.2 U-verdiberegning 26
11.3 Kondenskontroll 29
11.4 SIMIEN 29
11.5 Fordeling av varmetap 30
11.6 LCA 31
11.6.1 Fastsettelse av hensikten og omfanget 31
11.6.2 Livsløpsregnskap (LCI) 32
11.6.3 Livsløpseffektvurdering (LCIA) 32
11.6.4 Livsløpstolkning 33
11.6.5 Beregning av materialmengder og transportavstander 33
11.6.6 Begrensninger 34
11.6.7 Valg tatt 34
11.6.8 SimaPro 37
12 Resultat 40
12.1 Transportavstander 40
12.2 Vegger av bindingsverk med utvendig kontinuerlig isolasjon 41
12.2.1 CO2-optimalisering i bærende sjikt 41
12.2.2 CO2-optimalisering i vindtettingssjikt 43
12.2.3 CO2-optimalisering i påforingssjikt 44
12.2.4 Kondenskontroll 46
12.2.5 Evaluering av veggtykkelse 47
12.3 Vegger av enkelt og dobbelt bindingsverk 49
12.4 Vegger av massivtre 50
12.5 Sammenligning av veggsystemer 51
12.5.1 TEK17 51

12.5.2 Passivhusstandard 53
12.5.3 Sammenligning av byggestandard og veggsystemer 56
13 Diskusjon 57
13.1 U-verdiberegninger 57
13.2 SIMIEN 57
13.3 Fordeling av varmetap 57
13.4 SimaPro 58
13.4.1 Materialmengder 59
13.4.2 Transport 59
13.5 Isolasjonstykkelser i et miljøperspektiv 60
13.6 CO2-optimalisering av BKI 60
13.6.1 CO2-optimalisering i bærende sjikt 60
13.6.2 CO2-optimalisering i vindtettingssjikt 62
13.6.3 CO2-optimalisering i påforingssjikt 62
13.6.4 Kondenskontroll 63
13.6.5 Evaluering av veggtykkelse 64
13.7 Sammenligning av veggsystemer 64
13.8 Den store sammenhengen 66
14 Konklusjon 67
15 Anbefalinger 69
16 Referanser 70
17 Vedlegg 78
17.1 Beregningsgrunnlag 78
17.2 BKI 79
17.2.1 U-verdiberegninger 79
17.2.2 Energiberegninger 80
17.3 Enkelt og dobbelt bindingsverk 81
17.3.1 U-verdiberegninger 81
17.3.2 Energiberegninger 83
17.4 Massivtre 85
17.4.1 U-verdiberegninger 85
17.4.2 Energiberegninger 85
17.5 Materialmengder 86
17.6 Kondenskontroll 87
17.7 CO2-avtrykk for 1 m3 «Krysslimt tre» 88

17.8 Eksempel på prosess for byggemateriale (Glava Proff 34) 89
17.9 Eksempel på prosess for yttervegg (BKI) 90
17.10 Detaljert CO2-utslipp for optimalisert BKI (BKI50) 91
17.11 A3-poster 92
17.12 Fremdriftsplan 93
17.13 Møtereferater fra veiledningstimer 94

3 Figurliste

Figur 8.1: En modifisert fremstilling av livssyklusfaser med delfaser hentet fra EN 15804: 2012 [23] 4
Figur 8.2: Viser varmestrømmen i en vegg av bindingsverk [48] 8
Figur 8.3:Viser varmestrømmen i en vegg av bindingsverk med kontinuerlig utvendig isolasjon [45] 9
Figur 8.4: Kritiske punkter i sperresjiktet [51] 9
Figur 8.5: Reduksjon av temperatur utover i en yttervegg [34] 10
Figur 10.1: Referansehuset benyttet som beregningsgrunnlag 22
Figur 11.1: Sammenhengen mellom de ulike LCA-fasene [112] 31
Figur 11.2: Flytskjema av studiens inkluderte LCA-faser 32
Figur 12.1: Grafisk fremstilling av optimalisering i bærende sjikt 42
Figur 12.2: Grafisk fremstilling av optimalisering i påforingssjikt 46
Figur 12.3: Sammenheng mellom veggtykkelse og kg CO_2-ekv. fordelt på MAT og B6 47
Figur 12.4: Sammenheng mellom veggtykkelse og kg CO_2-ekv. fordelt på MAT og B6 med estimert veggtykkelse på 450 mm 48
Figur 12.5: Samlet CO_2-utslipp for optimalisert BKI med veggtykkelse til og med 450 mm ... 49
Figur 12.6: Sammenligning av CO_2-avtrykket for yttervegger etter TEK17 52
Figur 12.7: Sammenligning av byggematerialers CO_2-avtrykk i veggsystemer etter TEK17 53
Figur 12.8: Sammenligning av CO_2-avtrykket for yttervegger etter passivhusstandarden 54
Figur 12.9: Sammenligning av byggematerialers CO_2-avtrykk i veggsystemer etter passivhusstandarden 55
Figur 12.10: Sammenligning av byggestandard og veggsystemer 56

4 Tabelliste

Tabell 8.1: Energitiltak for TEK17 [67] 12
Tabell 8.2: Antall bygninger med kun bindingsverk som bæresystem 18
Tabell 8.3: Antall bygninger med mulighet for bindingsverk som bærende vegger 19
Tabell 10.1: Ytterveggsystemene brukt i sammenligningen 23
Tabell 11.1: Snitt og felt i veggene for U-verdiberegning av horisontal påføring 27
Tabell 11.2: U-verdiberegning ved horisontal påføring 28
Tabell 11.3: Generiske verdier benyttet for energiforbruket i produksjonsfasen (A3) 35
Tabell 11.4: Generiske prosesser for avfallshåndtering (LCA-fase C1-C4) 37
Tabell 11.5: Bygningsmaterialene med deklarasjonsnummer for benyttede EPDer 38
Tabell 12.1: Transportavstander fra fabrikk til byggeplass (LCA-fase A4) 40
Tabell 12.2: Transportavstand fra byggeplass til avfallshåndtering (LCA-fase C2) 40
Tabell 12.3: U-verdi for ulike stendersjikt 41
Tabell 12.4: Energiforbruk grunnet varmetap gjennom yttervegger 41
Tabell 12.5: CO_2-avtrykk i løpet av 60 år for vegger med ulik stenderdybde 42
Tabell 12.6: Temperaturforskjell mellom varm og kald side av trevirke 43
Tabell 12.7: U-verdi ved ulike vindtettingssjikt 43
Tabell 12.8: Energiforbruk grunnet varmetap gjennom yttervegger (BKI) 43
Tabell 12.9: CO_2-avtrykk i løpet av 60 år for ytterveggene 44
Tabell 12.10: Antall kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år fordelt på faser 44
Tabell 12.11: U-verdi ved horisontal og vertikal påføring 44
Tabell 12.12: Energiforbruk etter 60 år ved horisontal og vertikal påføring 45
Tabell 12.13: CO_2-avtrykk etter 60 år ved horisontal og vertikal påføring 45
Tabell 12.14: Kondenskontroll av yttervegg (Veggtype: BKI – asfaltplate – 148 mm stender) 46
Tabell 12.15: CO_2-avtrykk for optimalisert BKI-vegg fordelt på MAT og B6 med mellomliggende differanse 47
Tabell 12.16: CO_2-avtrykk for optimalisert BKI-vegg fordelt på MAT og B6 med mellomliggende differanse og estimert veggtykkelse på 450 mm 48
Tabell 12.17: U-verdier for enkelt og dobbelt bindingsverk 49
Tabell 12.18: Energiforbruk grunnet varmetap gjennom yttervegger (B, DB) 50
Tabell 12.19: CO_2-avtrykk etter 60 år for enkelt- og dobbelt bindingsverk 50
Tabell 12.20: U-verdier for massivtre 50
Tabell 12.21: Energiforbruk grunnet varmetap gjennom yttervegger (M150, M300) 50
Tabell 12.22: CO_2-avtrykk etter 60 år for massivtre 51
Tabell 12.23: CO_2-avtrykk etter 60 år for yttervegger etter TEK17 51
Tabell 12.24: CO_2-avtrykk etter 60 år fra MAT fordelt på byggematerialer (TEK17) 52
Tabell 12.25: CO_2-avtrykk etter 60 år for yttervegger etter passivhusstandarden 54
Tabell 12.26: CO_2-avtrykk etter 60 år fordelt på byggematerialer (passivhusstandard) 55
Tabell 12.27: Sammenligning av byggestandard og veggsystemer 56

5 Ordforklaringer

CO_2-ekv.: Karbondioksid-ekvivalenter

Dibk: Direktoratet for byggkvalitet

GU: Gips utvendig

ISO: International Organization for Standardization

LCA: Life-Cycle Assessment

MUF: melamin-urea-formaldehyd

NS: Norsk Standard

PH: Passivhus

RF: Relativ fuktighet

SAK: Byggesaksforskriften

TEK: Byggteknisk forskrift

tkm: Tonnkilometer

Forkortelse av veggsystemer:
B: Bindingsverk

BKI: Bindingsverk med utvendig kontinuerlig isolasjon
- Sammen med BKI kommer ofte et tall som representerer [mm] kontinuerlig isolasjon.
- Eksempelvis: BKI50 – Bindingsverk med 50 mm utvendig kontinuerlig isolasjon.

DB: Dobbelt bindingsverk

M: Massivtre
- Sammen med M kommer et tall som representerer [mm] kontinuerlig isolasjon.
- Eksempelvis: M150 – Massivtre med 150 mm kontinuerlig isolasjon.

Forkortelse av LCA-faser:
B6: CO_2-utslipp fra energibruk i bruksfasen.

MAT: Samlebetegnelse for CO_2-utslipp fra LCA-fasene som har med materialer å gjøre. I MAT inkluderes LCA-fasene A1-A4 + B4 + C2-C4.

6 Innledning

Verdens klimautfordring er et av de største problemene menneskeheten står ovenfor i moderne tid. Utslipp av drivhusgasser gir et stadig tynnere ozonlag og resulterer i en global oppvarming. De økte temperaturene medfører igjen mer ekstremvær og naturkatastrofer som blant annet smelting av isbreer, stigning i havnivå, jordras og hetebølger med medfølgende tørke og branner [1]. FN viser til at mennesket er ansvarlig for å ha påvirket til denne utviklingen utover det normale [2]. Dette fører klimaproblematikken inn på FNs globale arbeidsplan (FNs bærekraftmål), som har til hensikt å *«utrydde fattigdom bekjempe ulikheter og stoppe klimaendringene»* [3]. Bærekraftmål nr 13 med delmål er følgende*:*

- *Handle umiddelbart for å bekjempe klimaendringene og konsekvensene av dem*
    - *Styrke evnen til å stå imot og tilpasse seg klimarelaterte farer og naturkatastrofer i alle land.*
    - *Innarbeide tiltak mot klimaendringer i politikk, strategier og planlegging på nasjonalt nivå.*
    - *Styrke enkeltpersoners og institusjoners evne til å motvirke, tilpasse seg og redusere konsekvensene av klimaendringer og deres evne til tidlig varsling, samt styrke kunnskapen og bevisstgjøringen om dette.*

Parisavtalen er en global avtale som forplikter alle land til å ta miljøproblematikken på alvor. Det felles målet er å redusere den årlige gjennomsnittstemperaturen ned til 2°C og helst ned mot 1,5°C innen år 2100. For at dette skal oppnås er alle land pliktet til å lage en plan for å nå et satt nasjonalt mål. Hvert femte år skal planene og målet evalueres og revideres til stadig mer ambisiøse [4].

Byggebransjen står på verdensbasis for rundt 40% av både det totale CO_2-utslippet og energibruken og bærer av den grunn et stort ansvar i klimaproblematikken [5]. Livssyklusanalyse (LCA) er en mye brukt metode i byggebransjen for å identifisere bygningsdelene med størst miljøbelastning. Analysemetoden kan ta for seg CO_2-utslippet til bygningsdelen i løpet av hele sin levetid [6]. LCA er derfor et nyttig verktøy for å kunne gjennomføre en sammenlignende studie av miljøpåvirkningen til ulike materialer, bygningsdeler eller hele bygg. På den måten kan den mest miljøvennlige løsningen velges, og dermed bidra til byggebransjens mål om en grønn omstilling

Bransjens CO_2-utslipp kommer blant annet fra produksjon av materialer, transport og energi brukt i produksjonsprosesser og drift av bygg. Ytterveggene til bygg er en stor del av byggets totale masse med en tilsvarende stor andel av materialbruken. I tillegg er dette bygningsdelen som er årsak til store varmetap. Det medfører igjen økt energiforbruk i bruksfasen av bygget. Norge har lange tradisjoner med oppføring av småhus i tre - der bindingsverk, med yttervegger av trestendere og med myk isolasjon imellom er mest brukt [7, s. 87].

Gitt at alle målene og planene som er utarbeidet og meldt inn i forbindelse med Parisavtalens forpliktelser så langt blir gjennomført, er årlig gjennomsnittstemperatur estimert til å være rundt 3°C i år 2100 [8, 9]. Det er med andre ord helt nødvendig å stadig søke nye og klima-optimaliserte løsninger.

7 Samfunnsperspektiv

Som følge av et felles globalt fokus, samt felles mål og forpliktelser trådte det 1. januar 2017 i kraft et nytt anskaffelsesregelverket i Norge. Her pålegges det at alle offentlige innkjøp skal ta hensyn til blant annet miljø ved sine anskaffelser [10]. Tiltak har altså blitt iverksatt, men mye må fortsatt skje. Om man fortsetter å føre dagens klimapolitikk i fremtiden kan det få store konsekvenser, ikke bare for natur og miljø, men også for økonomi og samfunn [9, 11].

Med dagens klimapolitikk ville den årlige nedbørsmengden i slutten av dette århundret økt med ca. 18%, samt at kraftig nedbør vil øke både i hyppighet og intensitet. Kraftig nedbør defineres i dag som mengde nedbør per døgn som opptrer bare to ganger i året. Denne mengden ligger på 150 mm/døgn på de mest nedbørsrike områdene i landet. Den kraftige nedbøren er ventet en økning i intensitet på ca. 19%, i tillegg til at antall dager med kraftig nedbør er ventet å øke med ca. 89% [9, 12].

Økt hyppighet og intensitet av kraftig nedbør vil øke faren for både jord- og flomskred. Det er hovedsakelig allerede skredfareutsatte områder som vil bli rammet av dette, men med endret nedbørsmønster vil det også kunne være sannsynlig at områder som ikke har vært i faresonen for skred tidligere vil kunne bli utsatt [9, 13].

Den økte nedbørsmengden vil bære med seg store økonomiske utgifter. Allerede har forsikringsselskapene opplevd å måtte utbetale store pengesummer for å reparere ødeleggelser etter perioder med kraftig nedbør, flom eller skred. Disse konsekvensene vil man også potensielt sett kunne få i økende grad i fremtiden [9, 13].

Uten ytterligere forbedringer i dagens klimapolitikk vil gjennomsnittstemperaturen øke med ca. 4,5°C mot slutten av dette århundret. Dette vil få konsekvenser både for det norske kultur- og arbeidslivet. Blant annet vil den norske snøsesongen bli kortere og mengdene av snø som da kommer vil være mindre enn i dag [12]. Dette kan føre til utfordringer i forbindelse med blant annet reinsdyrdrift. Etter hvert vil også temperaturen i havet stige, noe som kan være svært uheldig for det norske fiskeoppdrettet og spesielt for laksen. Lengre tørkeperioder og økt markvannsunderskudd om sommeren vil også være sannsynlig. Det vil gi utfordringer for jord- og skogbruk, samt øke vanningsbehov og skogbrannfare [9].

8 Teoribakgrunn

I dette kapittelet samles alt i fra faktabaserte materialbeskrivelser til kunnskap og erfaringer fra tidligere forskning innen fagfeltene livssyklusanalyse (LCA), byggteknikk og bygningsfysikk.

8.1 LCA

Life-Cycle Assessment, heretter forkortet LCA, er en anerkjent og standardisert (ISO 14040) metode for å estimere og vurdere miljøkonsekvenser [14, 15]. Metoden kartlegger all materialbruk, energi og miljøpåvirkninger som kan knyttes til et produkt, en tjeneste eller en prosess. Formålet er å gi en helhetlig oversikt over total miljøpåvirkning, identifisere forbedringspotensialet og hjelpe beslutningstaker til å ta bærekraftige og miljøvennlige valg [16]. LCA-analysen kan basere seg på EPDer («Environmental Product Declaration»/Miljødeklarasjon), som på en kortfattet måte oppgir miljøbelastningen til det enkelte produktet [17].

Systemgrenser og funksjonell enhet er to viktige faktorer som spiller inn for å oppnå tillitsfulle og sammenlignbare resultater [18, 19]. Systemgrensene er selve rammene for en LCA-analyse. De definerer hvor studiets livssyklus begynner og slutter, samt identifiserer systemets utganger og innganger. Et flytskjema (strømningskart) er ofte brukt for å visualisere systemet [18]. Se *Figur 11.2* for oppbygningen av et flytskjema.

En funksjonell enhet er referanseenheten som tilhører analysens sluttresultat og som alle innganger og utganger relateres til [20]. Med andre ord er utslippene direkte knyttet opp mot den funksjonelle enheten. Mye brukte enheter er blant annet m^2, m^3 oppvarmet areal eller kg. For at LCA-analyser skal være sammenlignbare er det nødvendig med så like systemgrenser og funksjonelle enheter som mulig [19].

Et produkt som det utføres en LCA-analyse på har påvirkningskategorier på midtpunkt- og endepunktnivå. Ifølge Holthe et al. er ReCiPe midpoint og CML 2001 de to mest brukte metodene i norske livsløpsvurderinger [21]. Midtpunktsnivået er kjent som det problemorienterte nivået med miljømekanismer som lett kan måles med vitenskapelige tester og prøver. Et eksempel på en påvirkningskategori på midtpunktsnivå er globalt oppvarmingspotensial (GWP). GWP oppgis i CO_2-ekvivalenter (CO_2-ekv.), som er en referanseverdi for å måle forskjellige drivhusgassers effekt på den globale oppvarmingen [22].

En tidligere studie av Haflinger et al. undersøker usikkerhet knyttet til resultater fra LCA-analyser [23]. Ifølge forfatterne har valg tatt for LCA-metodikken påvirkning for LCA-resulatet, og det er særlig isolasjon og trematerialer som har stor sensitivitet for valg tatt. Dette er valg av ulike databaser, systemgrenser og levetid for materialene. Usikkerhet på grunn av isolasjonsmaterialer og trevirke samstemmer med funn i fra en studie av Hoxha et al. [24].

Figur 8.1 viser en modifisert utgave av tabell for livssyklusfaser med delfaser fra EN 15804. Fra venstre finner man fase A som igjen deles inn i produksjon- og konstruksjonsfase. A1-A3 utgjør produksjonsfasen og inkluderer utvinning av råmaterialer, transport til fabrikk og produksjonsprosess

for endelig produkt. A4 og A5, henholdsvis transport til byggeplass og installasjon i bygning, utgjør konstruksjonsfasen [25].

Bruksfasen, B1-B7, kan igjen deles inn i B1-B5 som angår bruk/anvendelse og slitasje på byggets materialer og produkter, mens B6 og B7 angår forsyning og bruk av energi og vann ved driften av bygget [25]. Fase C utgjør «Livets slutt» og inkluderer rivning/demontering av bygget, transport til avfallshåndtering, prosess ved resirkulering, gjenbruk, gjenvinning og avhending (C1-C4) [25].

Product Stage			**Construction Process Stage**		**Use Stage**							**End-of-Life Stage**			
Raw material supply	Transport	Manufacturing	Transport to building site	Installation into building	Use/application	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operational energy use	Operational water use	Deconstruction/demolition	Transport	Waste processing	Disposal
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4

Figur 8.1: En modifisert fremstilling av livssyklusfaser med delfaser hentet fra EN 15804: 2012 [23]

8.1.1 Produksjon- og konstruksjonsfase (A1-A5)

Produksjonsfasen er en stor bidragsyter til både energiforbruk og CO_2-utslipp [26-28]. Flere faktorer spiller inn når det gjelder klimagassutslipp ved produksjon av materialer, deriblant hvor råstoffene kommer fra. Om det er naturlige råstoffer som utvinnes fra naturen eller om det er avfallsstoffer fra tidligere produktsystem vil ha betydning. Andre faktorer som påvirker klimagassutslippet ved produksjon er utnyttelsesgrad av råstoffene, transportavstand til fabrikk og emballasje. I tillegg har energi-forsyning og -gjenvinning ved utvinning, bearbeiding, samt selve produksjonssystemet betydelig påvirkning på klimagassutslippet. Resultater fra en studie av Iribarren et al. av ulike bygningskomponenter i ytterveggsystemer viser at yttervegger med fornybare materialer er de mest miljøvennlige. Dette gjelder likevel for de materialene som i liten grad er industrielt bearbeidet, som tømmer og hamp. Bearbeidede materialer som massivtre (limtre) viser ifølge studien til å være mindre miljøvennlig [29].

Det har blitt utført tidligere studier som inkluderer konstruksjonsfasen (A4-A5). I følge Dodoo et al. er energibruken brukt for å føre opp en bygning generelt liten sammenlignet med andre aktiviteter knyttet til produksjon av en bygning [30]. Monahan og Powell beskriver mengden avfall fra byggeprosjekter i Storbritannia [31]. Ifølge forfatterne blir 10-15% av materialene som blir transportert til byggeplassen transportert vekk igjen som avfall. En av årsakene er blant annet bestilling av større materialmengder enn nødvendig til byggeplassen.

8.1.2 Bruksfase (B1-B7)

Utskifting av materialer gjennom levetiden inngår i fase B4. Her er faktorer for klimagassutslipp produksjon og avhending av materialer, transportavstander, materialmengder samt hyppighet av utskifting [25]. I følge Wærp et al. er slitasjen på byggematerialene gjennom 60 års bruk så omfattende at de opprinnelige materialene har blitt skiftet ut, og at det av den grunn er normalt å definere levetid for et bygg til 60 år [32].

Studier er i stor grad samstemte om at bruksfase for boliger etter vanlig byggestandard er den mest energikrevende livssyklusfasen. For energieffektive bygninger vil bidraget fra avgitt energi bli redusert og derav utgjøre en mindre andel av det samlede utslippet [33]. Det er ikke bare energimengde som spiller inn i klimaberegningene, men vel så mye energikilde [26]. Spart energi på 2000 kWh kan ifølge Folvik et al. variere mellom 30-1000 kg CO_2-ekvivalenter avhengig av valgt strømmiks i LCA-beregningene [28].

8.1.3 Livets slutt (C1-C4)

I fase C, «End-of-life», identifiseres klimagassutslipp fra rivning/demontering, transportavstander til avfallshåndteringen og ikke minst hvordan avfallet behandles videre [25]. For behandling av avfall er det flere alternativer som blant annet gjenvinning, forbrenning, energigjenvinning, biogassproduksjon og deponi. Hva som er den minst klimabelastende håndteringen av avfallet, varierer i stor grad mellom materialer og behandlingsmåte. En studie utført av Østfoldforskning for Avfall Norge konkluderer med at for glass, metall og plast er gjenvinning den minst klimabelastende behandlingen, mens for treavfall, papp og papir er energigjenvinning den best løsningen. Deponi regnes som den mest klimabelastende behandlingen av avfall for de fleste materialer [34]. En lov innført 1. juli 2009 gir et forbud mot deponering av organisk avfall, hvor trebaserte byggematerialer er inkludert [35].

For transport kommer overnevnte studie frem til en gjennomsnittlig avstand fra byggeplass til avfallshåndtering på 85 km. Utslipp i forbindelse med transport beregnes som relativt små sammenlignet med besparelse ved gjenvinning og energigjenvinning [34].

8.1.4 SimaPro

SimaPro har gjennom de siste 25 årene vært en av de aller største og beste aktørene i markedet for LCA-programvarer. Det regnes for å være en profesjonell programvare for en rekke bruksområder, deriblant rapportering om bærekraft, karbonfotavtrykk, produktdesign og generering av miljødeklarasjoner (EPD) [36]. Programvaren inneholder blant annet data fra databasen til Ecoinvent. Dette er en sveitsisk ideell forening med den mest omfattende internasjonale LCI-databasen. Denne databasen inneholder rundt 17000 LCI datasett for blant annet energiforsyning, transport, kjemikalier, konstruksjonsmaterialer, tre og avfallsbehandling [37]. SimaPro gir mulighet til valg av ulike typer datasett fra ecoinvent, som er generert basert på LCA-metodikk. To av disse er:

- Ecoinvent 3 – allocation at point of substitution – unit
- Ecoinvent 3 – allocation, cut-off by classification – unit

Førstnevnte er enhetsprosesser («unit») der miljøpåvirkninger fordeles proporsjonalt til spesifikke prosesser [38]. Sistnevnte er også en enhetsprosess («unit»). Den tar likevel hensyn til resirkulerte materialer som blir fjernet («cut-off») i starten av behandlingsprosessen, og som av den grunn ikke gir noen miljøpåvirkning for fremtidig bruk. «Classification» betyr at alle mellomsteg til enhetsprosessen blir klassifisert i tre kategorier: Ordinært biprodukt, resirkulert materiale eller avfall. Denne inndelingen påvirker hvordan miljøpåvirkningen blir fordelt [39].

Type LCA-programvare kan ha mye å si for resultatet. Hver programvare er bygget opp forskjellig og ikke nødvendigvis med de samme verdiene, samt at omfang av inkluderte faktorer kan variere. Studier viser at analyser med identisk inndata kan komme ut med forskjellige resultater når de kjøres gjennom ulike programvarer [40]. I en sammenligningsstudie av ulike LCA-programvarer ble det identifisert at SimaPro har et større omfang i sine beregninger sammenlignet med de konkurrerende LCA-verktøyene [41].

8.2 Bygningsfysikk

Bygningsfysikk beskriver hvordan klimapåkjenninger påvirker ulike prosesser i et bygg. Det kan for eksempel dreie seg om transport av -varme, -fukt og -luft, eller egenskapene til ulike bygningsmaterialer som isolasjonsevne eller bestandighet. Bygningsfysikk har blitt et eget sentralgodkjenningsområde i byggesaksforskriften (SAK10), og det ble obligatorisk med uavhengig kontroll for dette fagområdet i 2013 [42].

8.2.1 U-verdi

I forbindelse med vurdering av et byggs energieffektivitet er U-verdi en viktig parameter. U-verdi, også kalt varmegjennomgangskoeffisient, beskriver hvor mye varme som strømmer gjennom 1 m^2 av en bygningsdel per tidsenhet og med én grad temperaturforskjell på hver side av bygningsdelen. Enheten er gitt som W/m^2K, der en lav U-verdi betyr god isoleringsevne [43].

NS-EN ISO 6946:2007 er en standard for U-verdiberegninger [44]. For å beregne U-verdi behøves parameteren varmemotstand (R [m^2K/W]) som beskriver hvor godt materialet forhindrer varmegjennomgang. Varmemotstanden er oppgitt som $R = d/\lambda$, det vil si materialets tykkelse (d) over materialets varmekonduktivitet (λ). Sistnevnte er materialets evne til å lede varme. I overgangen mellom veggens overflater og omgivelsene skal det regnes med en varmeovergangsmotstand. For overgang til inneluft er denne varmeovergangsmotstanden (R_{si}) lik 0,13 m^2K/W, mens for overgangen til uteluft (R_{se}) settes den lik 0,04 m^2K/W [43]. For tilfeller med luftet kledning utvendig, vil kledningen bidra med litt varmemotstand til veggen og varmeovergangsmotstand kan av den grunn settes lik R_{si}. For konstruksjonsdeler av sammensatte sjikt er R_{tot} snittet av øvre og nedre grenseverdi. U-verdien er omvendt proporsjonal med den totale varmemostanden, $U = 1/R_{tot}$ [7, s. 395 og 396].

8.2.2 Kuldebroer

For beregninger av transmisjonstap (varmetap gjennom klimaskall) vil det ikke være tilstrekkelig å beregne kun U-verdier for den enkelte bygningsdel. Det vil også være et varmetap i overgangene mellom bygningsdeler (lineære kuldebroer [ψ]) eller der hvor bygningsdeler med liten utstrekning bryter klimaskjermen (punktkuldebroer [χ]) som f.eks. ved søyler, skorstein og andre gjennomføringer. Dette er i tillegg til varmetap gjennom bygningsdeler og skal være med i beregninger av varmetap [45, 46].

En kuldebro defineres på følgende vis i SINTEF Byggforsks prosjektrapport 25; *Kuldebroer – Beregning, kuldebroverdier og innvirkning på energibruk [46]:*

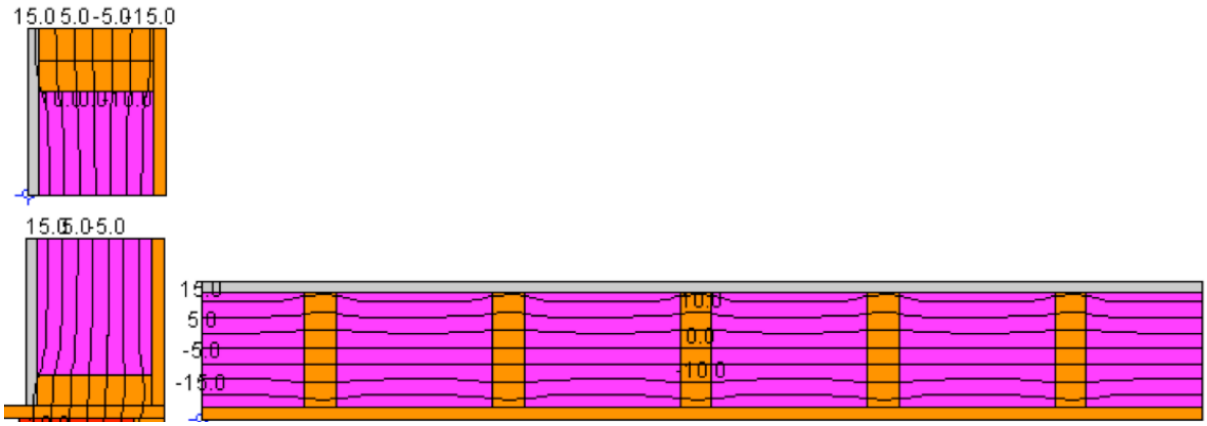
«En kuldebro er en del av omsluttende konstruksjon der den ellers ensartede varmemotstanden endres betydelig av en eller flere av punktene nedenfor:

a) hel eller delvis gjennomtrengning av den omsluttende konstruksjonen av materialer med høyere varmekonduktivitet
b) en endring av konstruksjonens tykkelse
c) en forskjell mellom innvendig og utvendig areal, som ved overganger mellom vegg/gulv/tak»

Å oppnå kuldebrofrie konstruksjoner virker å være ganske urealistisk. Dette ettersom bidrag ifra geometrien, altså fra overganger mellom bygningsdeler eller ved endringer av vinkel eller tykkelse er så og si umulig å unngå [46]. De største geometriske kuldebroene er konstruksjonshjørner, vinduer og ringmur. I tillegg til det geometriske bidraget har kuldebroene også et materialbidrag. Dette bidraget kan man i større grad påvirke ved å gjøre kloke materialvalg [47]. Det viser seg at det i tilfeller hvor man bedrer U-verdien for bygningsdelene i en konstruksjon, vil ofte varmetapet gjennom kuldebroene øke. Dette kan gjøre det utfordrende for godt isolerte småhus å oppfylle krav til kuldebroverdier [47].

8.2.3 Kuldebroer gjennom kontinuerlig trevirke

Ettersom tre har en høyere varmekonduktivitet enn isolasjonsmaterialer, vil gjennomgående stendere, sviller og bæring over vinduer og dører fungere som kuldebroer i veggen [46]. Treets varmeledende evner i forhold til isolasjonen kommer tydelig frem i en todimensjonal varmestrømsmodellering i *Figur 8.2* foretatt av Straube og Smegal. Her ser man enkelt økende varmestrøm i nærheten av stendere og sviller [48].



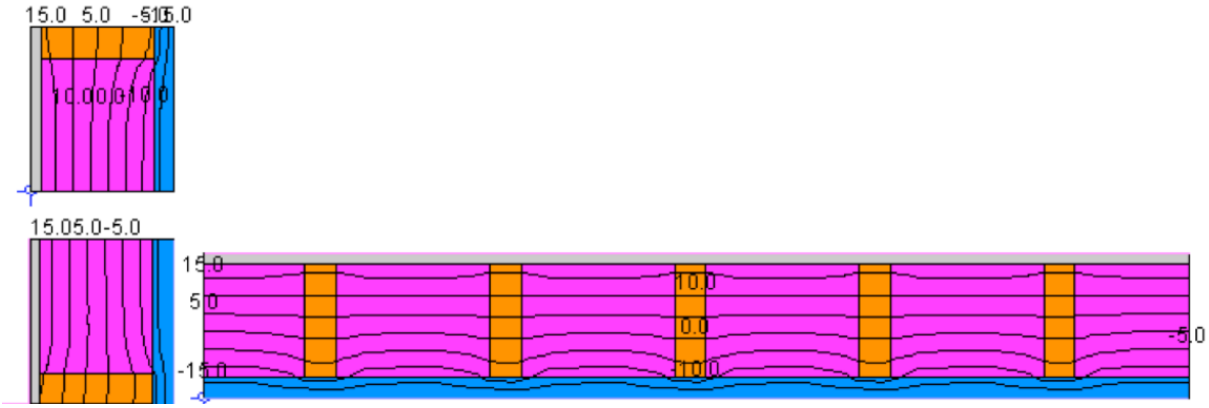
Figur 8.2: Viser varmestrømmen i en vegg av bindingsverk [48]

Andelen av tre i veggen vil av den grunn spille en betydelig rolle for veggens U-verdi, varmetap og derav også til slutt klimabelastning [49, 50]. Lu og Memari viser til en reduksjon i treandel på 10% (fra 25-15%) ved å øke senteravstand for stendere fra 400 mm til 600 mm [51]. Tilsvarende endring er gjort av Wijnants et al. og viser til en reduksjon på 2,5% av veggens klimabelastning [49].

For yttervegger i bolighus i Norge anbefales det å beregne 13% trevirk i veggen om man bruker 36 mm stendere og 17% om man bruker 48 mm stendere. For vegger uten dører og vinduer anbefales en treandel på 9% og 12% for henholdsvis 36 mm og 48 mm stendere [7, s. 394]. Case-studier fra Storbritannia gir en andel trevirke på 30-40% ved bruk av 38 mm stendere i bolighus av bindingsverk. Forfatterne påpeker at det avviker i fra Storbritannias vanlige praksis for U-verdiberegninger som er å regne med 6-7% treandel. Det vil si at beregnet U-verdi langt ifra er representativ for veggen [52].

8.2.4 Reduserte kuldebroer i vegger av bindingsverk

Ved å redusere temperaturforskjellen mellom kald og varm side av trevirke reduseres varmetapet gjennom trevirket. Dette kan gjøres ved å montere et kontinuerlig lag med isolasjon på utsiden. Da vil kuldebroen være «brutt». Flere studier viser til et slikt veggsystem som et energieffektivt og godt alternativ til vanlig bindingsverk [48, 51]. Lu og Memari viser til en energibesparelse på 7,11% ved å legge til 50 mm EPS på utsiden av veggen med bindingsverk [51]. Også Straube og Smegal har lagt et lag med kontinuerlig isolasjon på utsiden av veggen og viser til at veggens totale R-verdi øker mer enn hva selve isolasjonsmaterialets R-verdi vil bidra med. Dette vil også ha positive konsekvenser for kondensfaren. En todimensjonal varmestrømsmodellering i *Figur 8.3* visualiserer tydelig effekten av kontinuerlig isolasjon utvendig [48].

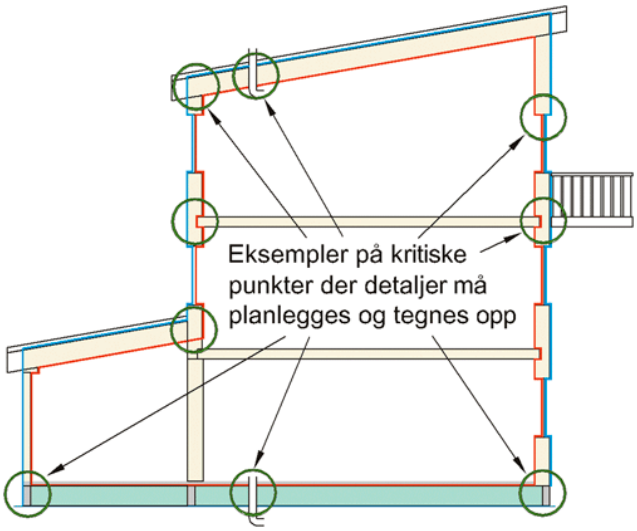


Figur 8.3:Viser varmestrømmen i en vegg av bindingsverk med kontinuerlig utvendig isolasjon [45]

Samme prinsipp for brutte kuldebroer gjelder også på innsiden av veggen. Dette kan gjøres med et lag horisontal påforing. Straube og Smegal fôret på veggen med 48x73 mm og fikk et redusert varmetap grunnet brutte kuldebroer. Det bemerkes at dette tiltaket vil føre til en noe lavere temperatur bak vindsperren og fører dermed også til en økt fare for kondens i veggen. Det var likevel ikke fare for kondens i veggen etter deres beregninger [48]. Kosny et al. har også sett på effekten av et lag med horisontal påforing (48x48 mm) og kommet frem til en redusert effekt av kuldebroer på 30% [53].

8.2.5 Tetting

Det kan oppstå stort varmetap grunnet luftlekkasjer gjennom klimaskjermen. I tillegg kan følelsen av uønsket trekk medføre at innetemperaturen blir skrudd opp, og en 2 °C temperaturheving vil medføre ytterligere 10% økning i energibruken [54]. Av den grunn må dampsperresjiktet og vindsperresjiktet være kontinuerlig - uten skader og perforeringer. Utett vindsperre kan medføre at kald uteluft trekker inn i isolasjonen, og svekker isoleringsevnen [55]. Ulike steder i klimaskjermen er også spesielt kritiske for å unngå luftlekkasjer, slik *Figur 8.4* viser:



Figur 8.4: Kritiske punkter i sperresjiktet [51]

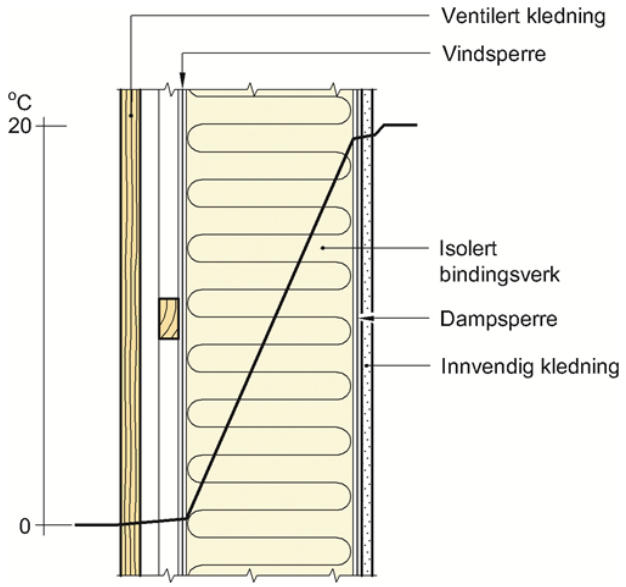
Det er ulikt lufttrykk mellom ute og inne som medfører luftlekkasjer, og det er i hovedsak tre grunner til at det skapes trykkforskjell mellom bygningsdelene: Vind, temperaturforskjell mellom inne og ute, samt vifter i ventilasjonsanlegg og kjøkkenhetter [54].

Et lekkasjetall blir brukt for å si hvor mange luftutskiftninger bygget har hver time ved 50 pascal (Pa) trykkforskjell, og kan maksimalt være 0,6 h^{-1} for hus prosjektert etter TEK17 og for passivhusstandard [56, 57]. Lekkasjetallet blir brukt i simuleringsprogram som SIMIEN for å beregne det forventede energibehovet.

8.2.6 Fukt og kondens

Fukt er årsaken til 75% av alle byggskader og kan gi problemer som råte, muggsoppvekst og svelling i bygningsmaterialer [58]. Av den grunn er fukt et viktig tema innenfor bygningsfysikk. Et høyt vanndampinnhold i innelufta kan medføre fare for kondens i ytterveggkonstruksjoner. En diffusjonstett dampsperre forhindrer at fuktig inneluft kan trenge inn i isolasjonen, i tillegg til at en diffusjonsåpen vindsperre vil gi innebygget fukt mulighet til å tørke ut [59].

Det er en sammenheng mellom temperatur og den relative fuktigheten (RF). Luft som er mettet på vanndamp har RF lik 100% og det vil da bli dannet kondens (dugg). Temperaturen som luften da har kalles for duggpunktstemperaturen eller duggpunktet. Lavere temperaturer klarer ikke å holde på like mye vanndamp som varm luft med samme RF. En senkning av temperaturen kan dermed medføre dannelse av kondens [58]. Kondens oppstår når vanndampinnholdet i luften er høyere enn hva metningspunktet til temperaturen er. Dette kan hende f.eks. dersom varm luft beveger seg utover i en tykk yttervegg fra varm mot kald side. *Figur 8.5* viser hvordan temperaturen synker utover i en vegg. SINTEF Byggforsk anbefaler at maksimalt 1/4 av den totale varmemotstanden skal være på varm side av dampsperren. Om ikke må det foretas ulike beregninger for å undersøke mulighet for kondens [54].



Figur 8.5: Reduksjon av temperatur utover i en yttervegg [34]

I en tett yttervegg, hvor det verken er konveksjon eller vann i væskeform, er diffusjon den dominerende prosessen for fukttransport. Forskjeller i damp -trykk/-konsentrasjon er hva som driver fukttransporten ved diffusjon [60]. Kondenskontroll kan gjøres ved enkle håndberegninger etter NS-EN ISO 13788. Til tross for disse beregningenes unøyaktigheter og begrensninger vil de kunne gi nyttig innsikt i konstruksjonens fuktegenskaper/kondensmotstand [58, 61].

8.3 SIMIEN

SIMIEN er et simuleringsverktøy som blir brukt for å beregne energibruken til et bygg. Det kan for eksempel bli utført en årssimulering der netto energibruk og levert energi blir bestemt for et helt kalenderår. Resultatet kan bli benyttet for å vurdere byggets energieffektivitet opp mot byggeforskrifter (TEK17) og energimerking (karakter A – G) [62].

Hvor mye strøm som går med til oppvarming av en bolig avhenger av hvor godt isolert boligen er, samt hvor stort areal som skal oppvarmes. Om en bolig skal varmes opp ved hjelp av direkte elektrisitet med f.eks. panelovner blir det anbefalt å beregne en effekt på 60 watt per kvadratmeter oppvarmet gulvareal (W/m^2). For helt nye boliger kan det antas 50 W/m^2, mens det for eldre boliger (fra 50-60-tallet) bør antas 70-100 W/m^2 [63]. For panelovner regnes det i tillegg med at 50% av varmen går direkte over i romluften, det betyr at den konvektive andelen av avgitt effekt er 50% [64].

8.4 TEK17

Direktoratet for byggkvalitet, heretter forkortet dibk, er blant annet landets sentrale myndighet når det kommer til byggteknisk regelverk [65]. For lovlig oppføring av byggverk i Norge må TEK-standarden følges. Den angir et minimumsnivå av egenskaper som kreves av bygget. TEK-standarden er utviklet av dibk, og har følgende formål *[66]*:

«Forskriften skal sikre at tiltak planlegges, prosjekteres og utføres ut fra hensyn til god visuell kvalitet, universell utforming og slik at tiltaket oppfyller tekniske krav til sikkerhet, miljø, helse og energi.»

TEK-standarden revideres jevnlig og den nyeste versjonen er foreløpig TEK17 *[66]*. TEK17s krav til energieffektivitet kan oppnås ved å følge verdiene i underliggende *Tabell 8.1* [67]. For å tilfredsstille krav nr. 1, for yttervegg, er det tilstrekkelig med 250 mm isolasjon med varmeledningsevne $\lambda = 0{,}037$ W/(mK) i en vegg av bindingsverk ifølge SINTEF Byggforsk [68].

Tabell 8.1: Energitiltak for TEK17 [67]

	Energitiltak	Småhus	Boligblokk
1.	U-verdi yttervegg [W/(m² K)]	≤ 0,18	≤ 0,18
2.	U-verdi tak [W/(m² K)]	≤ 0,13	≤ 0,13
3.	U-verdi gulv [W/(m² K)]	≤ 0,10	≤ 0,10
4.	U-verdi vinduer og dører [W/(m² K)]	≤ 0,80	≤ 0,80
5.	Andel vindus- og dørareal av oppvarmet BRA	≤ 25 %	≤ 25 %
6.	Årsgjennomsnittlig temperaturvirkningsgrad for varmegjenvinner i ventilasjonsanlegg (%)	≥ 80 %	≥ 80 %
7.	Spesifikk vifteeffekt i ventilasjonsanlegg (SFP) [kW/(m³ /s)]	≤ 1,5	≤ 1,5
8.	Luftlekkasjetall per time ved 50 Pa trykkforskjell	≤ 0,6	≤ 0,6
9.	Normalisert kuldebroverdi, der m² angis som oppvarmet BRA [W/(m² K)]	≤ 0,05	≤ 0,07

8.5 Passivhusstandard (PH-standard)

Hva som skiller et passivhus fra et hus etter TEK17 er hovedsakelig strengere krav til energibehov. Flere tiltak bidrar til passiv energidesign og tiltakene regnes enten som «aktive» eller «passive». Aktive tiltak er relatert til energiproduksjon og omhandler installasjon av energisystemer. Varmepumpe og solceller/-fanger er mye brukte energisystemer i passivhus. Passive tiltak er relatert til byggingen og omhandler isoleringsevne for bygningsdeler og komponenter, tetthet i forhold til luftlekkasje og varmegjenvinning gjennom ventilasjonsanlegg [69].

I Norge er det standarden NS 3700 som setter kravene for bygg etter passivhusstandard. Dette omfatter blant annet strengere krav til U-verdi, normalisert kuldebroverdi, SFP-faktor (vifteeffekt), lekkasjetall ved 50 Pa, samt temperaturvirkningsgraden for varmegjenvinner. Som et eksempel er kravet til U-verdi for yttervegger på 0,11 W/m^{2}K, samt 0,75 W/m^{2}K for vinduer og dører, mot henholdsvis 0,18 W/m^{2}K og 0,8 W/m^{2}K for TEK17 [70]. Yttervegger etter PH-standard krever vanligvis en isolasjonstykkelse på 300 – 350 mm [71].

8.6 Isolasjonstykkelser i et miljøperspektiv

Det har blitt utført tidligere studier på CO_2-avtrykk i forhold til energibruk i bygninger. Kneifel studerte rehabiliteringstiltak for forretningsbygg, deriblant ved å øke isolasjonstykkelsen. Studien konkluderte med at varmetapet etter tiltakene ble redusert gjennomsnittlig med 20-30% - avhengig av tykkelsen på isolasjonen. Dette resulterte igjen i et redusert gjennomsnittlig CO_2-utslipp på 16% grunnet lavere varmetap fra bygningene [72].

Oppføring av mer energieffektive bygg medfører et høyere materialforbruk og enkelte kan derav stille seg kritisk til passivhus som et mer klimavennlig alternativ. Folvik et al. sammenligner 1 m² vegg av TEK10 (0,18 W/m²K) med en vegg av en eldre versjon av dagens passivhusstandard (0,12 W/m²K). Hensikten med studien var å finne ut om økende isolasjonstykkelse kan lønne seg ut ifra et livssyklusperspektiv til tross for den økte energien lagret i materialene («embodied energy») fra produksjon. Resultatene tyder på at økende isolasjonstykkelse (opp til en viss tykkelse) vil lønne seg og derav være et klimavennlig tiltak sett ifra et livssyklusperspektiv [28]. Verbeeck og Hens har foretatt en lignende studie. Deres studie baserer seg på energiforbruk og ikke CO_2-utslipp direkte. De konkluderer med at det å investere i høyere mengder lagret energi i bedre isolasjonsmaterialer vil lønne seg og faktisk være «tilbakebetalt» etter så lite som 2 år for lavenergihus [73].

Peñaloza et al. har foretatt en analyse i forbindelse med en oppgradering av et leilighetskompleks i Sverige bygget i tre. Resultatene av analysen viser at CO_2-utslippet i produksjonsfasen økes med 3%, og samtidig reduseres med 50% i bruksfasen ved å gå fra vanlig byggestandard til passivhusstandard [27]. Citherlet og Defaux føyer seg også i rekken av studier som viser til en positiv klimaeffekt ved bedre isolerte bygg. De poengterer også at ved et redusert bidrag fra levert energi vil utslipp fra materialer få større betydning [74].

Citherlet og Defaux, samt Folvik et al. legger vekt på at strømmiks spiller en betydelig rolle for klimaberegningene [28, 74]. Ifølge Folvik et al. kommer 98-99% av all energi produsert i Norge fra vannkraft. Ved en slik energikilde ville bruk av strøm nærmest være ubetydelig for klimaberegningene. Tilfellet er at Norge eksporterer mye av denne strømmen og importerer mindre klimavennlig energi. Valg av strømmiks vil derav ha en del å si for resultatet [28].

8.7 Bindingsverk (B)

Bindingsverk er bygget opp av stendere som er satt opp med 600 mm avstand, og holdes sammen av en toppsvill og en bunnsvill. Over vindus- og døråpninger må det forsterkes for bærende vegger. Yttervegger avstives for horisontale krefter med plater, ofte av gips eller type asfaltimpregnert. Disse platene fungerer også som vindtetting. Alternativt kan det brukes en vindsperreduk for vindtetting. Vindsperreduken fungerer ikke som avstivning og denne løsningen krever avstivende skråstag i tillegg. Videre lektes det ut for en luftet kledning. For småhus med husbredde på maks 12 meter og to etasjer, kan man uten videre beregninger bygge sikkert med stendere på 198 mm og avstivende plater [7, s. 177 - 198].

Vegger av bindingsverk kan brukes som bæresystem i mindre bygg som eneboliger, rekke-/kjedehus, hytter og fritidsboliger, lavblokker eller terrassehus. I tillegg kan det brukes som utfyllende vegger mellom søyler i større bygg som skoler, hoteller, kontor-, industri-, lager- og næringsbygg [7, s. 14-16]. Som nevnt i kapittel 8.4 er anbefalt veggtykkelse 250 mm for vegger av bindingsverk i tre. Dette på bakgrunn av isolasjonsmengde og veggens U-verdi. Ettersom SINTEF Byggforsk anbefaler en inntrukken dampsperre, vil det være nærliggende å velge stendere på 198 mm + 48 mm innvendig påforing for å tilfredsstille anbefalt veggtykkelse [68]. Dette til tross for at det i de aller fleste tilfeller for småhus vil være tilstrekkelig bæreevne med stendere på 148 mm [75].

8.8 Bindingsverk med kontinuerlig isolasjon (BKI)

Bindingsverk med kontinuerlig isolasjon (BKI) er bygget opp av stendere og sviller som en vanlig vegg av bindingsverk. Forskjellen er at det er et ekstra kontinuerlig isolasjonssjikt på utsiden [76]. Dette isolasjonslaget har flere fordeler. I tillegg til at det vil bidra som et isolerende sjikt, vil det også fungere som en kuldebrobryter. Alt trevirke i veggen som vanligvis ville opptrådd som kontinuerlige gjennomtrengninger i isolasjonssjiktet, er ikke lenger kontinuerlig fra innsiden til utsiden. Bidraget dette kontinuerlig gjennomtrengende trevirke ville hatt på varmetapet blir nå redusert [46, 77].

Når det gjelder oppbygning av BKI henviser SINTEF Byggforsk til ulike alternativer [76, 77]. I den ene anvisningen er det plassert en 18 mm OSB-plate på stenderne bak laget av kontinuerlig isolasjon. Isolasjonen holdes midlertidig på plass med plugger og blir festet permanent med at en bærelekt skrus utenpå isolasjonen og får feste i OSB-plata [77]. Fra den andre anvisningen har OSB-platen blitt byttet ut med en vindsperreduk [76]. I dette tilfellet er det ingen vindavstivende plate på utsiden og dette må da enten løses med innvendig plateavstivning eller ved avstivende skråstag [7, s. 184 og 185]. For feste av den utvendige isolasjonen i dette tilfellet kreves det at festemiddelet treffer stendere og sviller for god heft. Flere produkter, som ulike braketter, samt stendere og sviller av stuket glassull er utviklet som alternative festemidler for det utvendige isolasjonssjiktet [78, 79].

8.9 Vegger av massivtre (M)

Massivtre-elementer er «plater» bygget opp av planker/bord som enten limes, skrus, spikres, dybles eller blir klemt sammen av gjennomgående strekkstag. En type lim som blir brukt er melamin-urea-formaldehyd (MUF). Det er en av de mest brukte limtypene for trekompositter. Ifølge Wilson er mengden av denne limen på 2-10% av total tørrvekt av trekompositten - avhengig av type kompositt. En LCI-studie av Wilson tar for seg ulike limtyper basert på formaldehyd som blir brukt i trekompositter. Der kommer MUF-lim ut med høyest CO_2-avtrykk, og viser til 1,775 kg CO_2-ekvivalenter per kilogram lim [80].

Siden 1990 har bygging med massivtre blitt en utbredt byggemetode i Østerrike, Sveits og Sør-Tyskland, som nå også etter hvert vekker stadig større interesse i Skandinavia og Norge [81]. Massive tre-elementer kan anvendes både som bærende og ikke-bærende elementer. Det kan brukes som både vegger, tak og etasjeskiller. Hele bæresystemer kan oppføres i massivtre, noe som gjør det anvendbart for bolighus, fleretasjes bygg og næringsbygg. Det finnes en rekke ulike konstruksjonssystemer som er utviklet i forbindelse med bygging i massivtre. Fra et overordnet perspektiv kan det deles inn i to ulike typer elementer: Kantstilte elementer og krysslagte elementer [82].

Kantstilte elementer er planker/bord med stående tverrsnitt som er klemt sammen og festet som nevnt i første avsnitt. Krysslagte elementer er bygget opp av flere lag, hvor lagene er lagt 90 (kan også være 45 [82]) grader i forhold til hverandre. Den kryssende fiberretningen er meget gunstig i forbindelse med fukt, ettersom de ulike lagene holder hverandre igjen. Dette gir elementene en meget dimensjonsstabil egenskap. Antall lag varierer vanligvis mellom 3, 5, 7 og 9. Både type og kvalitet på trevirke kan variere mellom sjiktene på bakgrunn av estetikk, styrke og tilgjengelighet [83]. Produksjon

av massivtre krever større mengder tre enn ved bygging med bindingsverk, men kan til gjengjeld også bruke tre av dårligere kvalitet. Disse brukes som regel i de indre lagene [82, 83]. For tilfredstillelse av krav til U-verdi etter TEK17 er en massivtrevegg med normal veggtykkelse (80-240 mm) ikke isolerende nok i seg selv. Det kreves av den grunn et isolerende sjikt i tillegg [83].

8.10 Bygningsmaterialer

De påfølgende underkapitlene beskriver bruken og produksjonen til diverse bygningsmaterialer og ser det i lys av miljøbelastningen.

8.10.1 Gipsplate

Gips er et naturlig mineral av vannholdig kalsiumsulfat ($CaSO_4$) [84]. Gips må brennes for å kunne bli brukt i gipsplater. Slike plater inneholder også vann, papir, avfallsprodukt fra kullkraftverk, samt lim. Platene har en rekke gode egenskaper som god brannmotstand, lydisolerende evne, vindtetthet og god diffusjonsåpenhet [85]. Dermed kan gipsplater både brukes som innvendig kledning (13 mm) og som vindsperre (9,5 mm). Sistnevnte blir ofte kalt «gips utvendig» eller «GU» og gir i tillegg god sideavstivning for småhus.

Store deler av en gipsplate kan være produsert av resirkulert materiale, både resirkulert gips og papir, opp til 99%. Gips forringes ikke ved gjenvinning og kan dermed gjenvinnes uendelig [86]. De store gipsprodusentene bruker som regel store andeler av resirkulert gips. Norgips oppgir at deres standard gipsplater har 98% gjenbrukt materiale [87].

8.10.2 Asfaltimpregnert trefiberplate

Asfaltimpregnert trefiberplate (asfaltplate) er en type porøs trefiberplate, bestående hovedsakelig av treflis med en asfaltimpregnering. Platene kan brukes som vindtetting og avstivning både for vegger og tak [7, s. 102 og s. 127-130]. Ved produksjon benyttes vanligvis biprodukter/treflis fra treindustrien [86]. Treflisen behandles i en såkalt våtprosess. Ved denne våtprosessen utnyttes treets eget bindemiddel, lignin, som gjør at tilsetting av lim ikke er nødvendig. Treflisens lignin myknes opp ved hjelp av høyt trykk og damp, før den males og bearbeides for deretter å bli tilsatt vann og eventuelle tilsetningsstoffer. Denne flis-grøten legges så på en rist for å sile ut vannet ved hjelp av tykkelsesvalser og sugepumper. Under denne prosessen blir også platene nedkjølt, noe som bidrar til ønsket porøsitet [7, s. 102, 88].

Når det gjelder klimagassutslippet for produksjon av disse platene er det stor variasjon iblant produsentene. Påvirkning på klimagassutslippet omhandler utnyttelse av biprodukt, tilsetningsstoffer og energiforsyning ved oppvarming [86]. Asfaltimpregnerte trefiberplater henvises til restavfall, som brennes og brukes til energigjenvinning [86, 89].

8.10.3 OSB-plate

OSB-plater er en type sponplate som er sammenlimt av større, avlange, tynne sponskiver. Sponskivene er skjært med treets lengderetning. OSB-platene er bygget opp av flere lag, hvor de ytterste lagene har sammenlimte spon som er orientert i samme retning som platens hovedretning, derav navnet «Oriented Strand Board», OSB. Dette vil gi økte styrkeegenskaper i denne retningen. Lag i midten av platen er ofte orientert på tvers av platens hovedretning, men kan også være tilfeldig orientert [88]. Platene har gode styrkeegenskaper og kan brukes både til bærende og ikke-bærende formål. Furu er en vanlig tresort å bruke i europeiske OSB-plater og platene produseres i tykkelser fra 6-40 mm [86].

«Grønn materialguide», en veileder for valg av miljøvennlige produkter, som er utviklet av blant annet Dibk og Grønn Byggallianse omtaler OSB-platers klimagassutslipp som «relativt høyt». Platene importeres hovedsakelig fra Norden og Europa, og det presiseres at det er stor variasjon fra produsentene og at platetykkelsen har mye å si [86]. Når det gjelder gjenvinning av OSB-plater viser dette seg å være utfordrende på grunn av tilsetningsstoffene i platen. Platene kan derimot gjenbrukes om de demonteres med varsomhet, men i stor grad går avhending av OSB-plater til energigjenvinning [86].

8.10.4 Vindsperreduk og dampsperre

Både vindsperreduk og dampsperre er produkter som er laget av høydensitets polyetylen (HDPE) og begge bidrar til lufttettheten i bygget. Vindsperreduken plasseres bak utlektet kledning og har som hensikt å tette både mot vind og regn fra utsiden, samtidig som den er diffusjonsåpen fra innsiden så den kan transportere fuktighet i veggen ut. Dampsperre plasseres derimot på varm side av veggen, er diffusjons- og lufttett og hindrer fukt og luft i å vandre gjennom veggen fra innsiden [7, s. 129-130, 90, 91]. Plastfolier av polyetylen (PE-plast) kan gjenvinnes, men i Norge utnyttes gjenvinning av plast i liten grad til tross for at det kan gi stor miljømessig gevinst. PE-plast kan brukes til energigjenvinning [92].

8.10.5 Isolasjon

I kapittelet 8.2.1 blir λ-verdien, varmekonduktiviteten, beskrevet som materialets evne til å lede varme. Mer eksakt forteller det hvor effektivt varmestrømmen bremses. Dette er den viktigste egenskapen for et isolasjonsmateriale og desto lavere λ-verdi materialet har, desto bedre isolerende evner har det [93].

Det finnes mange ulike typer isolasjonsmaterialer som er laget på ulike måter og av ulike råstoffer. Det betyr også at miljøbelastningen for isolasjonsmaterialet er veldig varierende ut ifra hvilket råstoff man velger å bruke [93]. Mineralull, som er en fellesbetegnelse for glassull og steinull [7, s. 125], er de mest brukte isolasjonsmaterialene i norske trehus [28].

Glassull brukes hovedsakelig som plater eller på rull. Her er det glass som oppvarmes til 1400 °C for deretter å strekkes til tynne fibre. For å binde fiberne sammen og forbedre materialegenskapene tilsettes det fenolharpikslim og støvdempingsolje [7, s. 125]. I de fleste glassullprodukter er det en

betydelig andel gjenvunnet glass (opptil 80%) [86]. Glava isolasjon oppgir 52% som en mye brukt andel av resirkulert glass i sine produkter [94]. Ettersom isolasjon ikke blir forringet over tid, og har en lang levetid gir dette glassullprodukter ofte en bedre klimaprofil enn mange alternative produkter. Resultater fra en studie av Sierra-Pérez et al. for isolasjonsmaterialer i fasader viser at glassull som isolasjonsmateriale er den mest miljøvennlige av de studerte isolasjonstypene. Glassull bidrar med 4-14% av den totale innvirkningen for alle kategorier og fasadesystem [95]. Glassull produseres i Norge, men det importeres også en betydelig andel glassull fra Skandinavia og Europa [86, 96].

Isolasjon kan gjenbrukes, forutsatt at den er tørr, ren og skadefri. I praksis blir dette lite utnyttet og i 2008 gikk kun 1,5% av mineralull til gjenbruk og det antas at resten gikk til deponi. For retursystemene er det store forbedringspotensialer. Energigjenvinning er lite aktuelt [96, 97], men materialgjenvinning jobbes det med [96, 98].

8.10.6 Tre

Bygninger i Norge opp gjennom historien har i stor grad vært preget av tre som byggemateriale. Den lokale tilgangen og relativt enkle produksjonen er nok mye av årsakene til dette. Andre positive egenskaper med tre er blant annet kombinasjonen mellom lav vekt og høy styrke, bearbeidbarhet og estetikk [7, s. 87]. Når det gjelder styrke i forhold til vekt regnes tre som like sterkt som et godt stål [99].

Treet er bygget opp av langstrakte celler (fiber) og kan på en forenklet måte sees på som en bunke med sugerør [7, s. 88]. Fiberne utgjør armeringen og lignin utgjør selve limet i hva som kan betraktes som et kompositttmateriale [100, s. 147]. Treets styrkeegenskaper er svært ulike i og på tvers av fiberretning og blir derav betegnet som et anisotropt materiale. Styrkereduserende faktorer for treet er i størst grad størrelse, plassering og antall kvister, men også med høy fuktighet reduseres styrken. Ved styrkeberegninger av tre beregnes det ut ifra 12% fuktighet [7, s. 89-90]

Hvor tettpakket fiberne ligger, altså hvor mye hulrom som er mellom dem, er definerende for densitet og isoleringsevne for de ulike treslagene. Desto lavere densitet, altså mer hulrom, desto lavere varmeledningsevne. Dette er fordelaktig for tre fremfor andre bærende konstruksjonsmaterialer [100, s. 160].

I et bærekraftig forvaltet skogsområde er tilveksten av trær større enn eller lik mengden trær som blir hugget. Trevirke fra slike skoger regnes for å være klimanøytrale [101]. Dette skyldes treets evne til å ta opp CO_2 ifra atmosfæren via fotosyntesen, for så å frigi dette karbonet (biogent karbon) når treet brennes eller brytes ned [102]. Mellom år 1925 og 2010 var det en tredobling av stående skogsvolum i Norge. Fra 300 m^3 til 900 m^3 på 85 år gir positive tall i et CO_2-regnskap. Ved å ta opp og lagre CO_2 spiller skogen en viktig rolle i den globale karbonsyklusen. Tall fra 2011 viser at skogen det året tok opp 60% av Norges totale klimagassutslipp (32,4 av 53,4 millioner tonn CO_2-ekvivalenter) [103]. Det viser seg at unge trær/skog i god vekst tar opp mer CO_2 enn en hogstmoden skog. Overmoden skog vil derimot bidra til økt CO_2-utslipp. Sett ifra et miljøperspektiv viser det seg derav at hogst og beplantning av trær vil være en positiv faktor i klimaregnskapet [104].

Det er store miljøfordeler ved å bruke trevirke som skal kastes til energiformål i stedet for fossilt brensel. Ifølge Gustavsson et al. kan reduksjonen av CO_2-avtrykk til tre bli betydelig forbedret om trevirke blir benyttet til å erstatte et ikke-trebasert bygningsmaterial enn om trevirke blir brukt direkte som bioenergi [105]. Om trevirke blir brukt som erstatning til fossil energi blir det biogene karbonet som er lagret i trevirke sluppet ut i atmosfæren ved forbrenning, samtidig som fossile utslipp unngås [106].

Vegger av tre anses som en viktig faktor for å kunne oppføre bygninger med liten klimabelastning. Faktorer som bidrar til treets lave klimabelastning er som regel korte transportavstander, enkel produksjon og liten grad av bearbeiding, CO_2-lagrende egenskaper og at det er en fornybar ressurs [53]. Til tross for at treet har en lavere densitet og dermed lavere varmeledende egenskaper enn f.eks. stål og betong [100, s. 160], vil treet i en vegg av bindingsverk fungere som en kuldebro ettersom treet leder varme bedre enn isolasjon. Dette vil føre til økt varmetap gjennom veggens treareal, og er uheldig ved bygging av energieffektive bygg [51].

8.11 Markedspotensialet

Yttervegger av tre har et stort markedspotensial ettersom det kan brukes både som bærende og ikke-bærende vegger for små og store bygg. Tall fra statistisk sentralbyrå viser at det i tidsrommet mellom år 2016 og 2020 ble oppført nærmere 53 000 bygninger [107] som potensielt sett kan bygges fullt og helt med vegger av bindingsverk som bæresystem [7, s. 14-16], se *Tabell 8.2*.

I tillegg ble det i denne perioden bygget godt over 10 000 større bygg hvor bindingsverk potensielt sett kan brukes som utfyllende vegger, se *Tabell 8.3* [107]. Massivtre vil trolig kunne bli brukt fullt og helt som bæresystem i de aller fleste av de over 63 000 byggene som ble oppført i denne perioden [82].

Tabell 8.2: Antall bygninger med kun bindingsverk som bæresystem

Ny bygningsmasse		År 2016 - 2020
		Bygninger oppført
Boligbygg	Enebolig	15499
	Tomannsbolig	9707
	Rekkehus, kjedehus og andre småhus	12436
	Bygning for bofellesskap	362
Andre bygg enn boligbygg	Hytter, sommerhus o.l.	14792
	Helårsboliger og våningshus benyttet som fritidsbolig	179
Sum		52975

Tabell 8.3: Antall bygninger med mulighet for bindingsverk som bærende vegger

Ny bygningsmasse		År 2016 - 2020
		Bygninger oppført
Boligbygg	Boligblokk	3585
Andre bygg enn boligbygg	Industri- og lagerbygning	4273
	Samferdsels- og kommunikasjonsbygning	710
	Hotell- og restaurantbygning	758
	Undervisnings-, kultur- og forskningsbygning	906
	Fengsels-, beredskapsbygning mv.	112
Sum		10344

8.12 Oppsummering av litteraturstudiets hovedfunn

De underliggende punktene finner man spredt rundt i teorikapittelet, men her er det ønskelig å samle de funnene fra tidligere forskning som er av aller størst relevans og som har vært med på å forme denne oppgaven.

- Iribarren et al. viser til resultater som sier at ytterveggsystemer med fornybare materialer er de mest miljøvennlige. Dette gjelder hovedsakelig for fornybare materialer som er lite industrielt bearbeidet, som konstruksjonsvirke og hamp. *Fornybare materialer som i større grad er bearbeidet, som f.eks. massivtre, viser seg som mindre miljøvennlige* [29].

- Gustavsson og Joelsson oppsummerer sitt litteraturstudie med at det er stor enighet om at *bruksfasen er den mest energikrevende livssyklusfasen for boliger etter byggestandard tilsvarende TEK17.* For mer energieffektive bygninger derimot vil bidraget fra avgitt energi være mer redusert og dermed utgjøre en mindre andel av det samlede utslippet [33]. Citherlet og Defaux har funnet ut mye av det samme og de poengterer at materialenes klimaprofil får større betydning når bidraget fra levert energi reduseres [74].

- Straube og Smegal identifiserer gjennomgående trevirke som store kuldebroer i vegger av bindingsverk. Mengden gjennomgående trevirke i veggen vil av den grunn spille en betydelig rolle for veggens energieffektivitet. Både Straube og Smegal, og Lu og Memari viser til at *det å bryte kuldebroene med et kontinuerlig lag med isolasjon utvendig vil ha god effekt på energieffektiviteten* [48, 51]. Wijnants et al. viser til en sammenheng mellom redusert varmetap gjennom kontinuerlig trevirke og redusert CO_2-utslipp [49].

- Det kan også ha effekt å bryte kuldebroene innvendig i følge Straube og Smegal [48]. Kosny et al. viser til en *redusert effekt av kuldebroene på 30% ved å legge på horisontal påforing på 50 mm innvendig* [53].

- Ofte betyr det å bygge energieffektivt større utslipp fra materialproduksjon. Dette er tema for flere studier. Verbeeck og Hens baserer sin studie på energiforbruk og ikke CO_2-utslipp direkte. Deres konklusjon er at bedre isolasjonsmaterialer med større mengde lagret energi («embodied energy») fra produksjon vil lønne seg å investere i. Dette ettersom «tilbakebetalingstiden» av den ekstra investerte energien er så lite som 2 år for lavenergihus

[73]. Folvik et al. konkluderer med at *å øke isolasjonstykkelse (opp til en viss tykkelse) vil lønne seg og derav være et klimavennlig tiltak sett ifra et livssykluserspektiv* [28]. Peñaloza et al. finner ut mye av det samme og i deres studie økes CO_2-utslippet i produksjonsfasen med 3%, samtidig som utslipp fra bruksfasen reduseres med 50% ved oppgradering fra byggestandard tilsvarende TEK17 til PH-standard [27].

9 Forskerspørsmål

På bakgrunn av verdens klimasituasjon, norsk byggetradisjon, litteraturstudiets funn og identifiserte «forskningshull» ble de påfølgende spørsmålene valgt som forskerspørsmål med tilhørende underspørsmål.

Hovedspørsmål:

- **Hvordan kommer yttervegger i bindingsverk med kontinuerlig utvendig isolasjon ut i et miljøperspektiv?**

Underspørsmål:

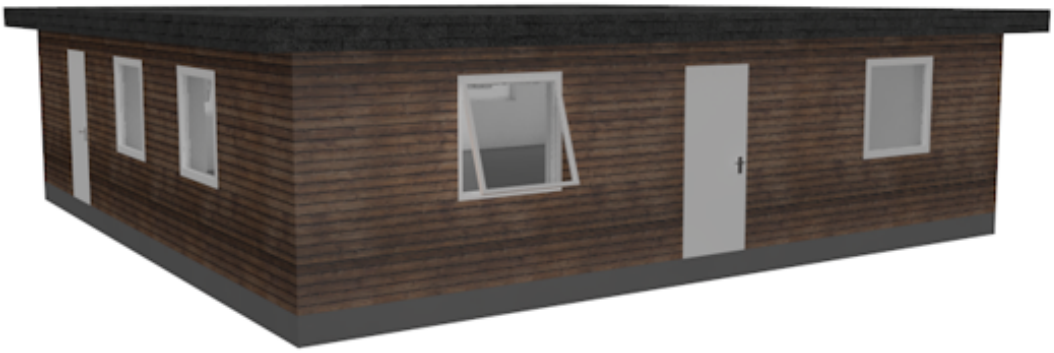
- **Hvordan kommer yttervegger i bindingsverk med kontinuerlig utvendig isolasjon ut miljømessig sammenlignet med et veggsystem i bindingsverk og massivtre etter TEK17- og passivhusstandard?**

- **På hvilke måter kan en yttervegg i bindingsverk med kontinuerlig utvendig isolasjon optimaliseres for et lavere CO_2-avtrykk?**

10 Case

På bakgrunn av verdens klimautfordringer skal vi i denne oppgaven se på miljøkonsekvensene ved oppføring av småhus bygget i tre. Det blir en sammenligningsstudie av ulike yttervegger i tre, med et spesielt søkelys på bindingsverk med kontinuerlig utvendig isolasjon og muligheter for CO_2-optimalisering av denne typen.

Utgangspunktet for sammenligning av veggtypene er et fiktivt referansehus, *Figur 10.1*. Referansehuset er oppført i ett plan med et bruksareal (BRA) på 100 m². Flatt tak og innvendig vegghøyde på 2,4 m gir et oppvarmet volum lik 240 m³. Samtlige vegger er 10 m lange innvendig. Dør og vindusareal er 18,18% av BRA. Gips innvendig samt luftet liggende kledning er felles for alle veggtypene.

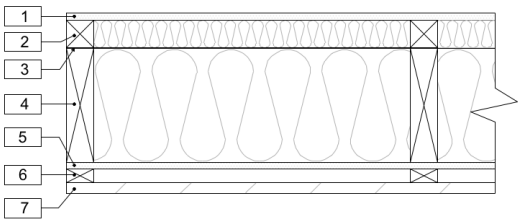
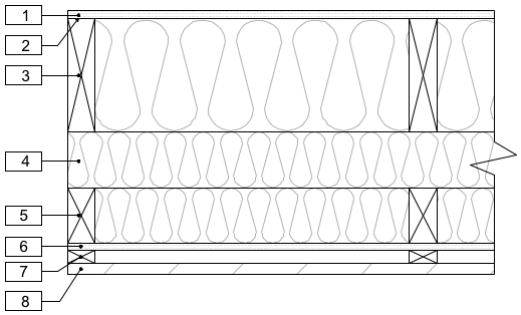


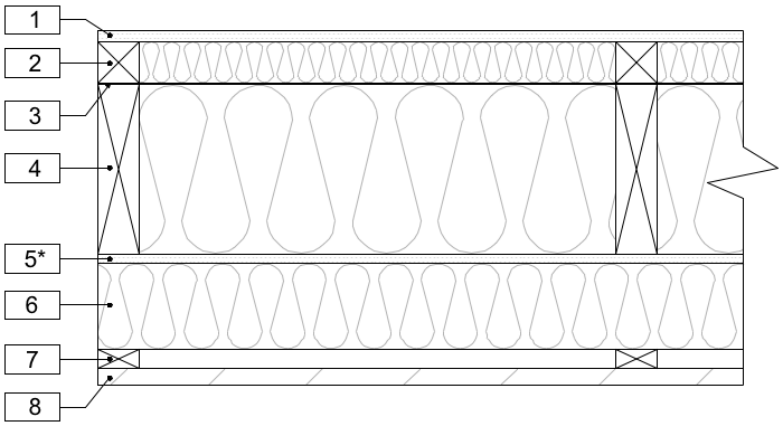
Figur 10.1: Referansehuset benyttet som beregningsgrunnlag

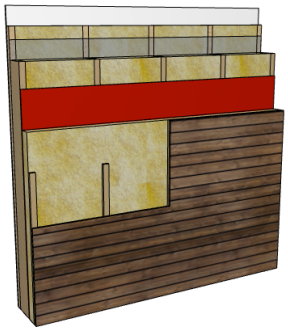
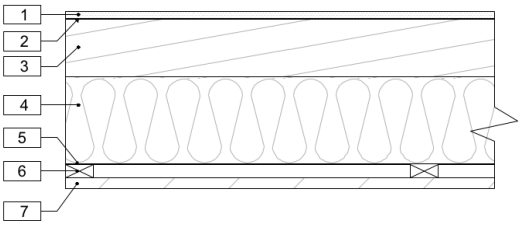
CO_2-optimaliseringen av BKI sees på i tre ulike sjikt: bærende-, vindtetting- og påforingssjikt. For bærende sjikt er utgangspunktet stenderdimensjonen 36x198 mm og det sees på klimaeffekten av å endre denne dimensjonen til 48x148 mm. I vindtettingssjiktet blir fire ulike vindtettingsprodukter sammenlignet for best klimaprestasjon over 60 år. For påforingssjiktet er vertikal påforing utgangspunktet og sammenlignes med horisontal påforing for å identifisere eventuell klimaoptimalisering.

Tabell 10.1 under viser veggtyper brukt i oppgaven. Kolonnen til venstre gir navn på veggen. Videre mot høyre presenteres en illustrasjon av veggen i 3D, samt en detaljtegning gjennom et horisontalt snitt. De ulike sjiktene er nummerert i detaljtegningen og beskrives videre i de neste to kolonnene med navn og dimensjon. Når det gjelder veggen av bindingsverk med kontinuerlig isolasjon (BKI) presenteres det én detaljtegning som gjelder for alle variantene av BKI ettersom det kun er sjikt nr. 5 som avviker mellom variantene. Sjikt nr. 5 er derav merket med «*».

Tabell 10.1: Ytterveggsystemene brukt i sammenligningen

	Illustrasjon	Detaljbeskrivelse (fra innside til utside)	Dimensjon [mm]
Bindingsverk	 	1 – Gips 2 – Trevirke/isolasjon (innvendig påforing) 3 – Dampsperre 4 – Trevirke/isolasjon 5 – Asfaltplate 6 – Sløyfer/lufting 7 – Kledning	13 48 0,20 198 12 23 19
Dobbelt bindingsverk	 	1 – Gips 2 – Dampsperre 3 – Trevirke/isolasjon 4 – Isolasjon 5 – Trevirke/isolasjon 6 – Asfaltplate 7 – Sløyfer/lufting 8 – Kledning	13 0,20 198 100 98 12 23 19

Bindingsverk m/ kont. iso. (BKI)			
BKI (vindsperreduk)		1 – Gips 2 – Trevirke/isolasjon (innvendig påforing) 3 – Dampsperre 4 – Trevirke/isolasjon 5* – Vindsperreduk 6 – Kontinuerlig isolasjon 7 – Sløyfer/lufting 8 – Kledning	13 48 0,20 198 0,15 50/100/150/200 23 19
BKI (asfaltplate)		1 – Gips 2 – Trevirke/isolasjon (innvendig påforing) 3 – Dampsperre 4 – Trevirke/isolasjon 5* – Asfaltplate 6 – Kontinuerlig isolasjon 7 – Sløyfer/lufting 8 – Kledning	13 48 0,20 198 12 50/100/150/200 23 19
BKI (OSB)		1 – Gips 2 – Trevirke/isolasjon (innvendig påforing) 3 – Dampsperre 4 – Trevirke/isolasjon 5* – OSB 6 – Kontinuerlig isolasjon 7 – Sløyfer/lufting 8 – Kledning	13 48 0,20 198 12 50/100/150/200 23 19

BKI (GU-gips)		1 – Gips 2 – Trevirke/isolasjon (innvendig påforing) 3 – Dampsperre 4 – Trevirke/isolasjon 5* – GU-gips 6 – Kontinuerlig isolasjon 7 – Sløyfer/lufting 8 – Kledning	13 48 0,20 198 9,5 50/100/150/200 23 19
Massivtre	 	1 – Gips 2 – Dampsperre 3 – Massivtre 4 – Isolasjon 5 – Vindsperreduk 6 – Sløyfer/lufting 7 – Kledning	13 0,20 100 150/300 0,15 23 19

11 Metode

De påfølgende underkapitlene vil beskrive metoden brukt for gjennomføring av rapportens ulike arbeidsprosesser.

11.1 Litteraturstudie

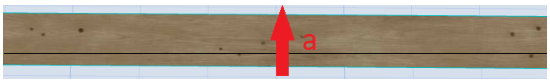
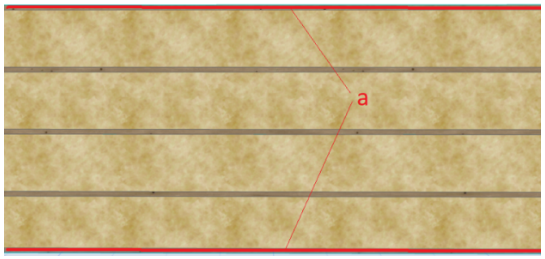
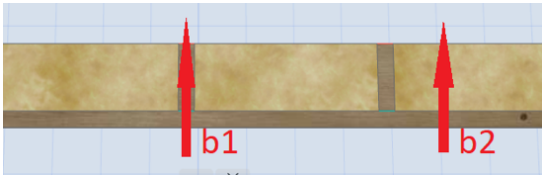
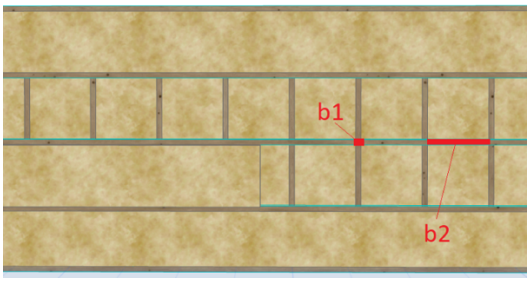
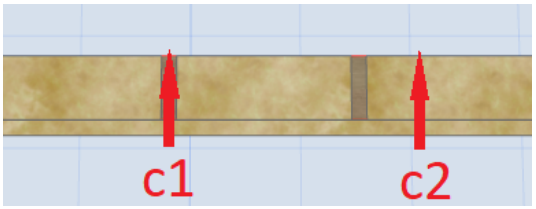
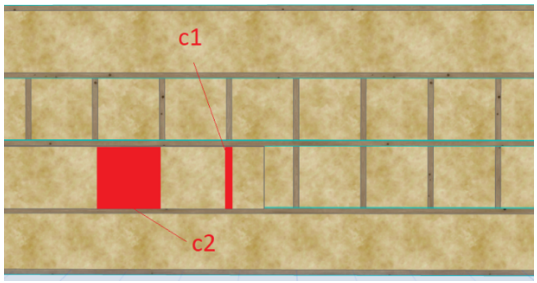
For å bygge opp nødvendige kompetanse og oversikt over tidligere utførte studier blir det utført litteraturstudie kontinuerlig gjennom hele semesteret. Fagfellevurderte tidsskrifter og forskningsartikler fra søkemotorene Oria og Google Scholar blir studert, i tillegg blir SINTEF Byggforsk sine anvisninger på internett benyttet i stor grad. Nettsidene til direktoratet for byggkvalitet (dibk) blir studert for å få nødvendig informasjon om gjeldende krav, bl.a. til energieffektivitet.

11.2 U-verdiberegning

U-verdiberegninger beregnes etter NS-EN ISO 6946:2007 [44]. Valgt treandel i veggene er 13% og 17% for vegger med henholdsvis 36 mm og 48 mm tykkelse. I sjiktet for innvendig påforing brukes treandel 13% til tross for bruk av 48x48 mm lekt. Grunnet luftet kledning utvendig settes utvendig varmemotstand (R_{se}) til 0,13 m^2K/W (se kapittel 8.2.1), samt at isolasjonen antas å fylle alle hulrom og ΔU settes da lik 0. U-verdien beregnes heretter med et massivt og et isolert felt etter anvist metode i NS-EN ISO 6946:2007 ved å bruke gjennomsnittsverdien av øvre og nedre grenseverdi [44].

For U-verdiberegning av horisontal påforing, regnes det med flere felter enn et massivt og et isolert. *Tabell 11.1* viser snitt A, B og C og de ulike feltene i veggen, a, b_1, b_2, c_1, c_2. Arealberegningene for disse feltene baserer seg på en vegg med 10 m lengde og 2,4 m høyde uten vinduer og dører. For tilpasning til vegger i bolighus korrigeres feltenes arealer i etterkant ved å øke treandel med 5%. Altså ved å øke felt b_1 med 1,2 m^2 og trekke fra tilsvarende areal for felt c_2.

Tabell 11.1: Snitt og felt i veggene for U-verdiberegning av horisontal påføring

	Snitt	Felt i x,y-planet
A		
B		
C		

Tabell 11.2 viser til utregning av øvre og nedre grenseverdi, samt utregning av feltenes areal i prosent og til slutt total varmemotstand og U-verdi. I første kolonne i tabellene for øvre og nedre grenseverdi listes veggens oppbygning opp fra utvendig øverst til innvendig nederst. Videre mot høyre kommer tilhørende dimensjon og varmekonduktivitet, og deretter varmemotstand. For øvre grenseverdi presenteres varmemotstanden for hvert felt (a-c2), mens for nedre grenseverdi presenteres en legert varmemotstand. Feltenes arealer multipliseres inn i øvre og nedre grenseverdi i henhold til NS-EN ISO 6946:2007 og total varmemotstand og U-verdi regnes ut [44].

Tabell 11.2: U-verdiberegning ved horisontal påføring

BKI50 - asfalt Veggtykkelse 250 mm							
Øvre grenseverdi							
Sjikt	d m	λ W/mK	Ra m²K/W	Rb1 m²K/W	Rb2 m²K/W	Rc1 m²K/W	Rc2 m²K/W
Ventilert kledning og utvendig varmemotstand			0,130	0,130	0,130	0,130	0,130
Isolasjon	0,050	0,034	1,471	1,471	1,471	1,471	1,471
Hunton asfaltplate	0,012	0,049	0,245	0,245	0,245	0,245	0,245
Isolasjon	0,148	0,034			4,353		4,353
Trevirke	0,148	0,130	1,138	1,138		1,138	
Dampsperre			0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
Isolasjon	0,048	0,034				1,412	1,412
Trevirke	0,048	0,130	0,369	0,369	0,369		
Gips	0,013		0,060	0,060	0,060	0,060	0,060
Innvendig varmeovergangsmotstand			0,130	0,130	0,130	0,130	0,130
Sum varmemotstand			3,573	3,573	6,788	4,616	7,830
Total varmemotstand, øvre grenseverdi			6,658				

Nedre grenseverdi			
Sjikt	d m	λ W/mK	R_{lagert} m²K/W
Ventilert kledning og utvendig varmemotstand			0,130
Isolasjon	0,050	0,034	1,471
Hunton asfaltplate	0,012	0,049	0,245
Isolasjon	0,148	0,034	
Trevirke	0,148	0,130	3,913
Dampsperre			0,030
Isolasjon	0,048	0,034	
Trevirke	0,148	0,130	0,992
Gips	0,013		0,060
Innvendig varmeovergangsmotstand			0,130
Sum varmemotstand nedre grenseverdi			6,970

Andel av areal		
	m²	%
a	0,960	0,040
b1	1,324	0,055
b2	1,316	0,055
c1	1,866	0,078
c2	18,534	0,772
SUM	24	1,000

Krav TEK 17: U ≤ 0,18

Krav Passivhus-standard: U ≤ 0,11

R_T= (Røvre+Rnedre) / 2 = 6,814

U= $1/R_T + \Delta U$ = 0,1468 → TEK 17: OK

11.3 Kondenskontroll

Kondenskontroll gjøres etter fremgangsmåte beskrevet i NS-EN ISO 13788 [61] basert på dampkonsentrasjon (v og Z_v). Det velges å gjøre kontroll med følgende forhold: -10 °C ute med 95% RF og 20 °C inne med 40% RF. Verdier for δ og Z hentes ifra tabell B1.1-B1.3 i boka «Fukt i bygninger» [108] og v_{sat}-verdier hentes ifra tabell på side 510 i boken «Tillämpad Byggnadsfysikk» [109]. Ettersom flere tabeller oppgir verdier kun for damptrykk, blir det nødvendig å regne om til dampkonsentrasjon. Det gjøres ved *Formel 1* og *Formel 2* som vist under [60, 110]. Beregningene gjøres i digitalt regneark som vist i *Tabell 12.14,* valgte forhold er markert i gule ruter.

$$Zp = Zv \times (0{,}133 \times 10^{-6}) \qquad \textit{Formel 1}$$

$$\delta p = \delta v \times (7{,}53 \times 10^{-6}) \qquad \textit{Formel 2}$$

Andre formler som brukes ved diffusjonsberegninger er følgende [109]:

$$\Delta T = \frac{R}{\sum R} \times (T_{inne} - T_{ute}) \qquad \textit{Formel 3}$$

$$Z = \frac{d}{\delta} \qquad \textit{Formel 4}$$

$$\Delta v = \frac{Z}{\sum Z} \times (v_{inne} - v_{ute}) \qquad \textit{Formel 5}$$

$$RF = \frac{v_v}{v_{sat}} = \frac{p_v}{p_{sat}} \qquad \textit{Formel 6}$$

11.4 SIMIEN

Det blir foretatt 18 ulike simuleringer i SIMIEN. Antallet simuleringer skyldes ulike veggtyper og isolasjonstykkelser som igjen gir varierende U-verdier. Det blir først valgt et klimasted for referansehuset, der Kristiansand (Kjevik) blir brukt. Da blir temperaturer automatisk hentet ut ifra programmet, med en dimensjonerende gjennomsnittstemperatur på 19,2 °C for sommer og -22,9 °C for vinter. I tillegg blir årsmiddeltemperaturen 7,9 °C.

Referansehuset blir konstruert som kun et rom, og det blir av den grunn bare opprettet en sone – kalt «Referansehus», med gulvareal på 100 m^2 og oppvarmet luftvolum på 240 m^3. Normalisert kuldebroverdi blir satt lik 0,05 W/(K/m^2) for TEK17 og 0,03 W/(K/m^2) for passivhusstandarden. Lekkasjetallet blir satt til 0,6 h^{-1} for begge standardene. Sonen blir i tillegg valgt til å ha drift alle dager, samt ingen møbler.

For sonen «Referansehus» blir det opprettet fire fasader (nord, sør, øst, vest) som blir husets yttervegger. Her blir det innsatt U-verdien som tidligere har blitt beregnet for de ulike typene yttervegger. På bakgrunn av referansehuset blir det i tillegg lagt til vinduer og dører for de riktige

fasadene. U-verdiene for disse samsvarer med TEK17- eller passivhuskravene - henholdsvis 0,8 W/m^{2}K og 0,75 W/m^{2}K for vinduer og dører. Det blir samtidig benyttet «fast (konstant) solskjerming» med «standard konstant solskjerming» og 400 mm bygningsutspring for alle simuleringene.

For å kunne bestemme eksakt hvor mye av den leverte energien som går til oppvarming blir det kun huket av for elektrisitet som energikilde. Den har en systemvirkningsgrad for oppvarming på 0,98 – noe som gjelder for varmekilder som for eksempel elektriske panelovner. Det blir med andre ord ikke benyttet energikilder som varmepumpe, biobrensel (ved) eller solcellepanel i simuleringen. Siden elektrisitet er den eneste energikilden, blir det ført inn en dekningsprosent av årlig energibehov på 100% for alle de ulike kildene til strømforbruket.

Det blir som en forenkling bestemt at referansehuset ikke har innlagt vann, og huset har dermed ikke et strømforbruk knyttet til oppvarming av tappevann (varmtvannsbereder). Samtidig blir det antatt at elektrisk utstyr, belysning, vifter og pumper ikke finnes i referansehuset. Det blir dermed ikke lagt til noen «internlaster».

Det blir satt inn en oppvarmingskilde, som blir kalt «panelovn». Her blir effekten satt til 50 watt per kvadratmeter oppvarmet gulvareal (W/m^2), som er anbefalt for nye boliger (se kapittel 8.3). I tillegg blir den konvektive andelen av effekten satt til 50%, noe som betyr at halvparten av oppvarmingskildens effekt går direkte til oppvarming av romluften. Det blir valgt drift hele døgnet, og med en settpunkttemperatur på 20 °C. En mindre del av luften blir oppvarmet ved hjelp av varmebatteriene i ventilasjonssystemet. Referansehuset blir bestemt til å ha balansert ventilasjon, noe som er et krav for nye boliger. Temperaturen på tilluften blir satt til 20 °C.

Avslutningsvis blir en årssimulering utført basert på alle parameterne som har blitt valgt. Blant resultatene som SIMIEN genererer er «levert energi» til bygget for direkte elektrisitet. Dette er den energien som bygget trenger å få tilført med hensyn til virkningsgraden på 0,98 for panelovnene og varmebatteriet i ventilasjonssystemet, grunnet varmetap gjennom hele referansehuset. Mengden av levert energi blir bearbeidet, og senere brukt videre i beregningene i SimaPro.

11.5 Fordeling av varmetap

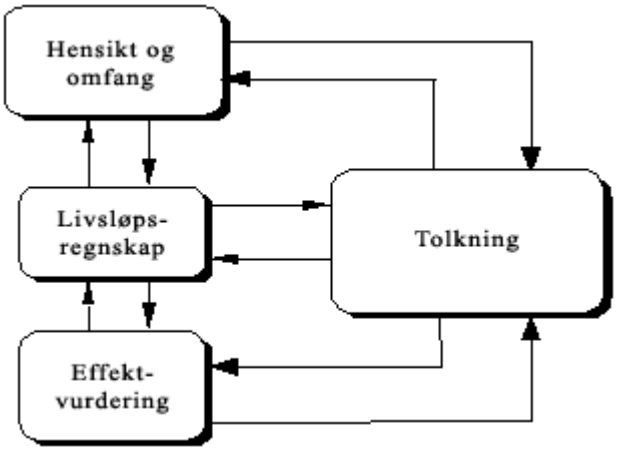
Varmetapstallet for hver enkelt bygningsdel beregnes ved å multiplisere bygningsdelens areal med tilhørende U-verdi. Videre summeres alle varmetapstallene, inkludert varmetapstallet fra den normaliserte kuldebroverdien. Andelen hver enkelt bygningsdel bidrar med finnes ved å dele varmetapstallet for den enkelte bygningsdel med det totale varmetapstallet. Deretter multipliseres bestemt andel med total levert energi per år, som da gir energi tapt gjennom den enkelte bygningsdelen per år. Til slutt multipliseres det med 60 år. Se vedlegg 17.2.2, 17.3.2, 17.4.2 for beregningsskjema.

11.6 LCA

Når det utføres en LCA-analyse benyttes fire ulike faser, som alle henger sammen [111]:

1. Fastsettelse av hensikten og omfanget
2. Livsløpsregnskap (LCI)
3. Livsløpseffektvurdering (LCIA)
4. Livsløpstolkning

Oversikt over hvordan disse fasene samhandler vises i *Figur 11.1:*



Figur 11.1: Sammenhengen mellom de ulike LCA-fasene [112]

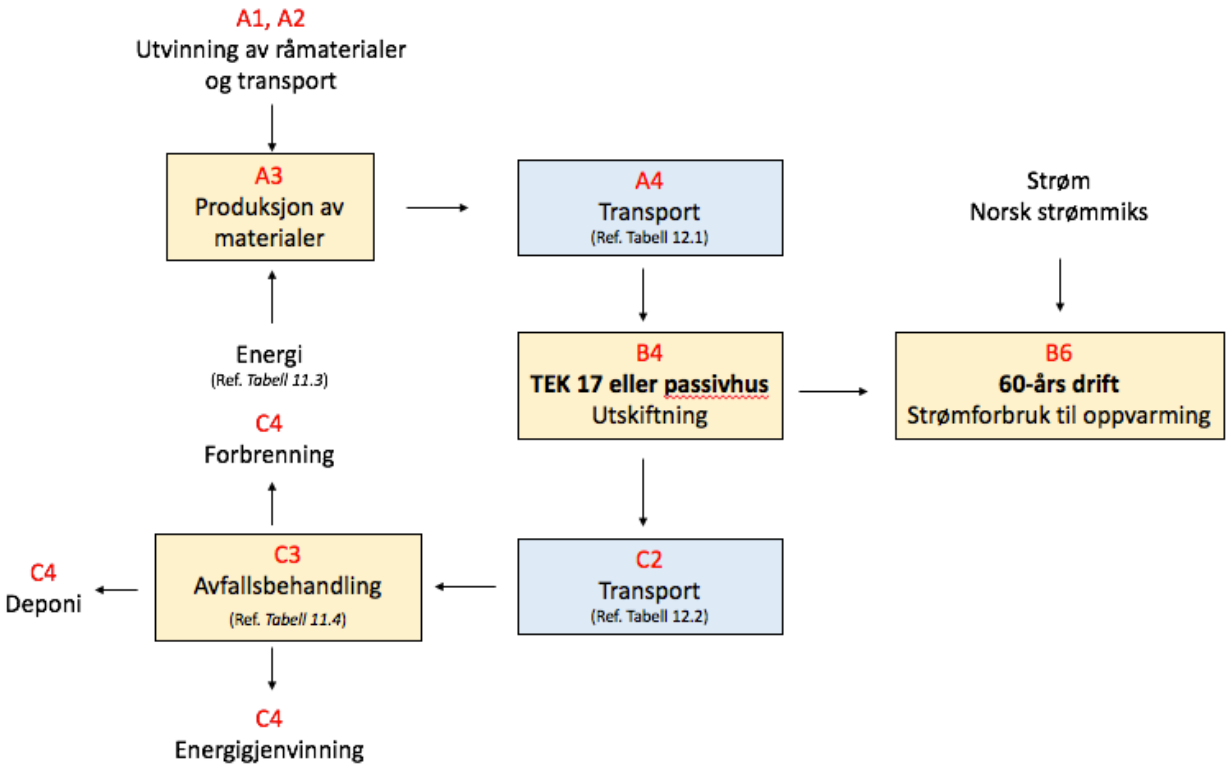
Definering av en funksjonell enhet er viktig og nødvendig for å kunne utføre en LCA-studie. Dette er en kvantitativ beskrivelse av produktet eller systemet som blir brukt som en referanseenhet og som gjør det mulig å foreta en sammenligning [113]. Den funksjonelle enheten til denne oppgaven er: *Referansehusets yttervegger over en levetid på 60 år.*

11.6.1 Fastsettelse av hensikten og omfanget

«Hensikten og omfanget» beskriver hva som er hensikten med LCA-analysen, samt den planlagte bruken av den og hvem resultatene er interessante for. Målet med denne analysen er å vurdere CO_2-avtrykket til yttervegger av bindingsverk med kontinuerlig utvendig isolasjon (BKI). I tillegg ønskes det svar på hvordan BKI-vegger kommer ut miljømessig sammenlignet med yttervegger av bindingsverk og massivtre etter TEK17 og passivhusstandard. Det er også ønskelig å se på effekten av CO_2-optimaliserende tiltak for BKI-veggen. Resultatene fra denne LCA-analysen er interessante for entreprenører, konsulenter og byggherrer – samt andre som ønsker å prosjektere og føre opp bygninger med miljøvennlige yttervegger.

For å kunne oppnå et korrekt livsløpsregnskap må systemgrenser bestemmes. Disse setter rammene for LCA-studien. Det er viktig å være tydelig på hvilke livsløpstrinn, prosesser og data som utelukkes i en studie [114]. De ulike livsløpstrinnene, A1-C4, vises i *Figur 8.1*. I denne studien blir livsløpstrinnene

som er inkludert vist i rødt i *Figur 11.2.* Flytskjemaet viser at LCA-fasene A1-A4, B4 og B6, og C2-C4 er inkludert i studien.



Figur 11.2: Flytskjema av studiens inkluderte LCA-faser

11.6.2 Livsløpsregnskap (LCI)

I «Livsløpsregnskapet (LCI)» blir en beskrivelse av flytskjemaet gitt basert på systemgrensene oppgitt i «Fastsettelse av hensikten og omfanget». Aktivitetene som er inkludert i det analyserte systemet (produksjon, prosesser, transport, bruk og avfallshåndtering) blir vist i flytskjemaet. I denne fasen blir det også gjennomført datainnsamling, der informasjon om råmaterialer, produkter, avfall, og utslipp til luft og vann blir innhentet. Mengden av ressurser som blir benyttet og utslipp av forurensning beregnes i forhold til den funksjonelle enheten [112, s. 26].

Det blir innhentet data for materialmengder slik kapittel 11.6.5 beskriver. Videre gir programvaren SimaPro, utslippet av CO_2 basert på disse materialmengdene for prosessene (bygningsmaterialene) som har blitt satt sammen med råstoffmengder fra ulike EPDer.

11.6.3 Livsløpseffektvurdering (LCIA)

Innvirkningen av de ulike lastene fra «livsløpsregnskapet (LCI)» blir beskrevet i «livsløpseffektvurderingen (LCIA)». På den måten blir det enklere å se hvordan lastene påvirker miljøet. Blant annet ved at informasjonen fra livsløpsregnskapet blir brutt ned til færre parametere.

Det er stegene «klassifisering» og «karakterisering» som gjør dette. Først blir de ulike parameterne fra livsløpsregnskapet klassifisert ut ifra hvilken miljøpåvirkning de bidrar til. Deretter blir bidraget av ressursbruk og utslipp fordelt for hver type av miljøpåvirkning i steget «karakterisering» [112, s. 29]. På den måten kan for eksempel alle utslippene av drivhusgasser samles i en kategori for «global oppvarming».

Programvaren SimaPro behandler data fra livsløpsregnskapet automatisk i en analyse, og både klassifiserer parameterne ut ifra miljøpåvirkningen («klassifisering») og fordeler de ulike utslippene i deres respektive kategorier («karakterisering»). Det blir benyttet «ReCiPe 2016 Midpoint (H)» som vurderingsmetode, som gir miljøpåvirkningen på midtpunktsnivå («midpoint»). Dermed kan antall kilo CO_2-ekvivalenter leses av. I tillegg har metoden et langsiktig tidsperspektiv («H»).

11.6.4 Livsløpstolkning

Avslutningsvis i en LCA-analyse blir resultatene tolket. Med hensyn på de bestemte målene for analysen blir det trukket konklusjoner og gitt anbefalinger basert på funnene i livsløpsregnskapet og livsløpseffektvurderingen. Disse konklusjonene kan benyttes for å utvikle et produkt eller forbedre en prosess [112, s. 176].

Funnene fra SimaPro blir benyttet til å konstruere grafiske fremstillinger av CO_2-avtrykket til de ulike ytterveggsystemene. Dermed blir det lettere å tolke resultatene og komme med anbefalinger for de bygningsmaterialene og ytterveggsystemene med lavest CO_2-avtrykk.

11.6.5 Beregning av materialmengder og transportavstander

Utregning av materialmengder gjøres i Excel, se vedlegg 17.5. Utgangspunktet for beregningene er et konstant oppvarmet BRA på 100 m² (10 m x 10 m). Mengder for gips og dampsperre ønskes oppgitt i areal og baserer seg på innvendige mål for lengde og høyde. For vegger med inntrukken dampsperre økes hver vegglengde med 48 mm i forhold til innvendige veggmål. Deretter trekkes vindusareal fra det beregnede veggarealet.

Tremengden beregnes i volum og ettersom det i U-verdiberegninger brukes 13% og 17% treandel av veggarealet for vegger av bindingsverk, er dette også utgangspunktet ved beregninger av trevirke. Utvendig vegglengde beregnes ved å legge veggens tykkelse til innvendig veggmål. Deretter multipliseres det med høyde og treandel. Veggenes totale treareal multipliseres deretter med tykkelsen av de ulike sjiktene av tre. Her inkluderes også utvendig lekter til tross for at lektene vil utgjøre en noe mindre andel av veggens areal. For vegger av massivtre beregnes veggareal på samme måte, men i dette tilfellet multipliseres totalt veggareal for utenom dør- og vindusareal med tykkelse av massivtresjiktet, for deretter å legge til mengden med utvendige lekter.

Mengde isolasjon mellom stendere regnes i areal og basere seg på resterende veggareal etter at treandelen er trukket fra, altså 83% og 87%.

Areal for plater og duk i vindtettingssjiktet, samt for mengde kontinuerlig isolasjon settes likt utvendig veggareal for utenom dør- og vindusareal. Volum for kledning beregnes ved utvendig veggareal ekskludert dør- og vindusareal, multiplisert med tykkelse. Deretter multipliseres volumet med to grunnet utskifting av kledning.

Transportavstandene blir beregnet ved hjelp av Google Maps. Referansehuset er bestemt å ligge i Grimstad. Plassering av fabrikk hentes ut fra de ulike EPDene, og om produktet blir produsert på to ulike steder velges fabrikken som ligger nærmest. For transport fra byggeplass til avfallshåndtering brukes gjennomsnittlig transportavstand på 85 km for alle byggematerialene, basert på en tidligere studie som nevnt i kapittel 8.1.3.

11.6.6 Begrensninger

Følgende begrensninger blir tatt i dette studiet:

- Ser bort i fra kapp og svinn av byggematerialer.
- For passivhusstandard benyttes kun U-verdien for ytterveggen. Ser med andre ord bort i fra type energiforsyning etc.
- Energiforbruk for produksjon av HDPE i vind- og dampsperre er utelukket, grunnet mangel på data.
- Utelater metall fra skråstag i beregningene ettersom mengdene er minimale.

11.6.7 Valg tatt

Følgende valg blir tatt i dette studiet:

- Generelt
    - Inkluderte LCA-faser er A1-A4 + B4 + C2-C4 (MAT) og B6.
    - 60-års levetid.

- Referansehus i SIMIEN
    - Referansehus er plassert i Norge (Kristiansand 58° nord).
    - Midlere temp. dim: Sommer: 19,2 °C / vinter: -22,9 °C.
    - Årsmiddeltemperatur: 7,9 °C.
    - Ikke innlagt vann.
    - Ingen belysning.
    - Balansert ventilasjon (tilluftstemperatur: 20 °C).
    - Benyttes kun elektrisitet for oppvarming (systemvirkningsgrad lik 0,98).
        - 50 W/m^2 (Panelovnens effekt pr. kvadratmeter oppvarmet areal).
        - 50% andel konvektiv effekt (50% av effekten går til direkte oppvarming av romluften).
    - Like tak-/gulvtyper for å muliggjøre en sammenligning.

- SimaPro
    - Spiker og festeskruer er utelatt.
    - Energiforbruk (strøm/varme) for produksjon av materialer hentes fra lignende byggematerialer i SimaPro (Ecoinvent 3 database).
    - Utelukker overflatebehandling av ytterveggen (maling, beis etc.).
    - Skifter utvendig kledning en gang i løpet av levetiden.
    - Råstoffer for enkelte byggematerialer blir utelatt om mengden oppgitt i EPD er liten, samt at beskrivelsen ikke er spesifikk nok. For eksempel «Wax emulsion» med mindre enn 1% av total materialmengde for byggematerialet «Sterling OSB3». Dette kan vise igjen på massebalansen.
    - Materialemballasje utelukkes.
    - Bruker enkelte prosesser selv med varsel om utdatert prosess.
    - Inkluderer utslipp fra infrastruktur og langtidsutslipp.

Tabell 11.3 under viser de generiske prosessene fra databasen Ecoinvent 3 som har blitt brukt som utgangspunkt for å innhente energikilder brukt i produksjonsfasen (A3) for byggematerialene. Det har blitt valgt å endre den opprinnelige elektrisitetsmiksen fra Sveits (CH) til Norge (NO) for bedre å simulere norske forhold. Varme som både kommer og ikke kommer fra naturgass er likevel valgt å beholde med verdier fra Sveits (CH).

Tabell 11.3: Generiske verdier benyttet for energiforbruket i produksjonsfasen (A3)

Materiale	Generisk data [Energi i produksjonsfasen (A3)]
Gipsplate	- Electricity, medium voltage (NO) I market for I Cut-off, U - Heat, district or industrial, other than natural gas (CH) I market for heat, district or industrial, other than natural gas I Cut-off, U <u>Hentet fra prosessen:</u> Gypsum plasterboard (CH) I production I Cut-off, U
Asfaltplate	- Electricity, medium voltage (NO) I market for I Cut-off, U - Heat, district or industrial, natural gas (CH) I market for heat, district or industrial, natural gas I Cut-off, U - Heat, district or industrial, other than natural gas (CH) I market for heat, district or industrial, other than natural gas I Cut-off, U <u>Hentet fra prosessen:</u> Fiberboard, soft (CH) I fiberboard, soft, from wet process I Cut-Off, U
OSB-plate	- Electricity, medium voltage (NO) I market for I Cut-off, U - Heat, district or industrial, natural gas (CH) I market for heat, district or industrial, natural gas I Cut-off, U - Heat, district or industrial, other than natural gas (CH) I market for heat, district or industrial, other than natural gas I Cut-off, U <u>Hentet fra prosessen:</u> Fiberboard, soft (CH) I fiberboard, soft, from wet process I Cut-Off, U

Vindsperreduk	Utelatt
Dampsperre	Utelatt
Glassull	- Electricity, medium voltage (NO) I market for I Cut-off, U - Diesel, burned in building machine (GLO) I market for I Cut-off, U - Heat, district or industrial, natural gas (CH) I market for heat, district or industrial, natural gas I Cut-off, U <u>Hentet fra prosessen:</u> Glass wool mat (CH) I production I Cut-off, U
Konstruksjons-trevirke	- Electricity, medium voltage (NO) I market for I Cut-off, U <u>Hentet fra prosessen:</u> Sawnwood, board, softwood, dried (u=10%), planed (CH) I planing, board, softwood, u=10% I Cut-off, U
Massivtre	- Diesel, burned in building machine (GLO) I market for I Cut-off, U - Electricity, medium voltage (NO) I market group for I Cut-off, U - Heat, central or small-scale, other than natural gas (CH) I heat production, hardwood chips from forest, at furnace 50kW I Cut-off, U <u>Hentet fra prosessen:</u> Glued laminated timber, for outdoor use (RER) I production I Cut-off, U

Tabell 11.4 under viser de generiske prosessene som har blitt valgt for avfallshåndtering. Asfaltplatene, OSB-platene, konstruksjonstrevirke, samt massivtre blir energigjenvunnet. Videre blir gipsplatene og glassull sendt til sorteringsanlegg, imens den plastbaserte vindsperreduken og dampsperren blir sendt til forbrenning.

Tabell 11.4: Generiske prosesser for avfallshåndtering (LCA-fase C1-C4)

Materiale	Generisk data [Avfallshåndtering (C1-C4)]
Gipsplate	Waste gypsum plasterboard (CH) I treatment of, sorting plant I Cut-off, U
Asfaltplate	Waste wood, untreated (CH) I heat production, untreated waste wood, at furnace 1000-5000 kW I Cut-off, U
OSB-plate	Waste wood, untreated (CH) I heat production, untreated waste wood, at furnace 1000-5000 kW I Cut-off, U
Vindsperreduk	Waste vapour barrier, flame-retarded (CH) I treatment of, municipal incineration I Cut-off, U
Dampsperre	Waste vapour barrier, flame-retarded (CH) I treatment of, municipal incineration I Cut-off, U
Glassull	Waste mineral wool (CH) I treatment of, sorting plant I Cut-off, U
Konstruksjons-trevirke	Waste wood, untreated (CH) I heat production, untreated waste wood, at furnace 1000-5000 kW I Cut-off, U
Massivtre	Waste wood, untreated (CH) I heat production, untreated waste wood, at furnace 1000-5000 kW I Cut-off, U

11.6.8 SimaPro

Beregning av CO_2-utslipp for de ulike ytterveggsystemene blir utført med hjelp av SimaPro 9.0. I starten blir det valgt hvilke databaser som skal benyttes. Ecoinvent versjon 3 (2018) sine databaser for enhetsprosesser («unit») blir benyttet:

- Ecoinvent 3 – allocation at point of substitution – unit
- Ecoinvent 3 – allocation, cut-off by classification – unit

Videre blir det benyttet EPDer for byggematerialene fra i hovedsak EPD Norge, samt tyske «Institut Bauen und Umwelt» (IBU) for å bygge opp egne «prosesser». Dette for å øke kvaliteten og nøyaktigheten på simuleringene ved å i størst mulig grad benytte produktspesifikke verdier. EPDene som blir valgt er produkter av byggematerialer som er vanlige å benytte i norske bygg. Disse er listet opp i *Tabell 11.5* nedenfor.

Tabell 11.5: Bygningsmaterialene med deklarasjonsnummer for benyttede EPDer

Bygningsmateriale	Produktnavn	Produsent	Deklarasjonsnr:
Gipsplate	Standard type A (STD)	Norgips	NEPD-113-177-EN
Utvendig gipsplate (GU)	Windliner-X	Norgips	NEPD-109-177-EN
Asfaltplate	Hunton Vindtett	Hunton Fiber	NEPD-1247-400-NO
OSB-plate	Sterling OSB3	Fritzøe Engros (SWISS KRONO)	EPD-KRO-20150067-IBD2-EN
Vindsperreduk	Isola Soft Xtra (Tyvek)	DuPont	EPD-ISO-20150315-IBE1-EN
Dampsperre	Gram Dampsperre	Tommen Gram	NEPD-341-230-NO
Isolasjon	Proff 34 Veggplate 31	Glava	NEPD-1696-683-EN
Konstruksjonstrevirke	Konstruksjonstrevirke av gran og furu	Treindustrien	NEPD-308-179-EN
Massivtre-elementer	Krysslimt tre	Splitkon	NEPD-2042-902-NO

Fra EPDene hentes råmaterialene som brukes i hvert byggemateriale. De er oppgitt i prosentandel av totalt byggemateriale og/eller masse i kilogram. Råmaterialene blir deretter brukt for å sette i sammen et eget bygningsmateriale («prosess») i SimaPro, der de inngår i «inputs from nature» eller «inputs from technosphere: materials/fuels». På grunn av at isolasjonen fra Glava har ulik tykkelse og densitet blir et skjema i EPDen benyttet, der omregningsfaktorer justerer mengden av råmaterialene i forhold til tykkelse og spesifikt produkt (Proff 34/Veggplate 31). For de byggematerialene som består av resirkulerte råstoff blir mengden av de aktuelle råstoffene redusert i SimaPro tilsvarende den resirkulerte andelen. Vedlegg 17.8 viser et eksempel på en prosess for et byggemateriale.

Transportavstander blir også lagt til for byggematerialene. Det antas at transportmiddelet er det samme for alle de ulike byggematerialene: Lastebil med vekt større enn 32 tonn og med EURO5-motor. Det blir i tillegg opprettet to separat transportetapper for alle materialene; en fra fabrikk til byggeplass (LCA-fase A4) og en fra byggeplass til avfallshåndtering (LCA-fase C2). Avstandene er beregnet slik det er forklart i kapittel 11.6.5. I SimaPro blir transportavstandene lagt inn som tonnkilometer (tkm), og transportavstandene i kilometer blir dermed multiplisert med masse i tonn.

På grunn av EPDers svakhet med til dels lite spesifikk informasjon blir energibruk i produksjonsfasen valgt basert på liknende generiske byggematerialer i SimaPro. Dette i stedet for å hente energiforbruket fra EPDene. Strømforbruket blir her omgjort til norsk energimiks for å gjelde norske forhold. Som eksempel blir energiforbruk til produksjon av Norgips' gipsplate valgt på bakgrunn av den generiske prosessen «Gypsum plasterboard (CH) I production I Cut-off, U». Fra denne prosessen blir følgende energikilder hentet ut:

- Electricity, medium voltage (CH) I market for I Cut-off, U
- Heat, district or industrial, other than natural gas (CH) I market for heat, district or industrial, other than natural gas I Cut-off, U

En fullstendig oversikt over de generiske prosessene som er valgt for energiforbruk i produksjonsfasen finnes i *Tabell 11.3*.

Til slutt for byggematerialene blir type avfallshåndtering lagt til under «Outputs to technosphere: Waste and emissions to treatment». Det blir valgt deponi, forbrenning eller energigjenvinning basert på materialenes oppbygning. Her blir byggematerialets totale masse benyttet. Den totale massen inkluderer resirkulerte masser fra produksjon.

Når alle byggematerialene er ferdig oppbygget blir det opprettet nye «prosesser». Disse er ytterveggene, og de aktuelle byggematerialene som hver veggtype består av blir lagt til under «Inputs from technosphere: materials/fuels». I motsetning til byggematerialene som er blitt definert som 1 m^2 eller 1 m^3 av materialet, defineres ytterveggene som én stykk yttervegg. I denne sammenhengen betyr samlet mengde alle de fire ytterveggene til referansehuset. Antall kvadrat-/kubikkmeter av byggematerialene slik som beregnet i Kapittel 11.6.5 blir ført inn for de ulike ytterveggene.

For å kunne se miljøpåvirkningen grunnet oppvarming av referansehuset i løpet av 60 år blir det i «prosessen» for ytterveggene lagt til elektrisitetsbruk. Dette er elektrisitetsbruken med utgangspunkt i SIMIEN. Det blir benyttet en norsk elektrisitetsmiks med lav spenning: «Electricity, low voltage (NO) I market for I Cut-off, U», som blir lagt under «Inputs from technosphere: electricity/heat». Vedlegg 17.9 viser et eksempel på en prosess for en yttervegg.

Til slutt blir alle de forskjellige ytterveggsystemene analysert hvor «ReCiPe 2016 Midpoint (H)» blir benyttet som metode. Da får man opp fanen «Impact assessment» som viser «Global warming» eller globalt oppvarmingspotensial for de ulike bygningsmaterialene i kg CO_2-ekv., samt for hele ytterveggsystemet. Disse resultatdataene blir bearbeidet i Microsoft Excel.

12 Resultat

De påfølgende underkapitlene viser til hovedresultatene utarbeidet i denne rapporten. Det omfatter blant annet identifisering av transportavstander, beregninger av U-verdier, varmetap og utslipp av kg CO_2-ekvivalenter for materialer og veggsystemer. I flere tabeller sammenlignes samlet CO_2-utslipp fra materialer (A1-A4 + B4 + C2-C4) med CO_2-utslipp fra energiforbruk i bruksfase (B6). For enkelthets skyld er CO_2-utslipp fra materialer (A1-A4 + B4 + C2-C4) forkortet til MAT, mens CO_2-utslipp fra energiforbruk i bruksfase er navngitt B6. CO_2-utslipp i tabellene er summen av MAT og B6 om ikke annet er spesifisert.

12.1 Transportavstander

På bakgrunn av informasjon om plassering av fabrikk fra EPDene, samt estimering av transportavstander ved hjelp av Google Maps, er transportavstandene for LCA-fase A4 (fabrikk til byggeplass) slik *Tabell 12.1* under viser. Unntaket er «Konstruksjonstrevirke av gran og furu» som har en avstand hentet fra EPDen «Structural timber of spruce and pine» på grunn av mangel på en konkret plassering av fabrikk [115]. Vindsperreduken Isola Soft Xtra har den lengste transportavstanden og gips fra Norgips har den korteste.

Tabell 12.1: Transportavstander fra fabrikk til byggeplass (LCA-fase A4)

Produktnavn	Produsent	Plassering av fabrikk	Avstand [km]: Fabrikk – byggeplass
Standard type A (STD)	Norgips	Svelvik, Norge	235
Windliner-X	Norgips	Svelvik, Norge	235
Hunton Vindtett	Hunton Fiber	Gjøvik, Norge	380
Sterling OSB3	Fritzøe Engros (SWISS KRONO)	Heiligengrabe, Tyskland	867
Isola Soft Xtra (Tyvek)	DuPont	Contern, Luxembourg	1352
Gram Dampsperre	Tommen Gram	Levanger, Norge	845
Proff 34, Veggplate 31	Glava	Askim, Norge	250
Konstruksjonstrevirke av gran og furu	Treindustrien	Norge	100
Krysslimt tre	Splitkon	Åmot, Norge	269

Transportavstanden for LCA-fase C2 (byggeplass til avfallshåndtering) er derimot antatt lik for alle byggematerialene på bakgrunn i teori fra kapittel 8.1.3, slik *Tabell 12.2* under viser.

Tabell 12.2: Transportavstand fra byggeplass til avfallshåndtering (LCA-fase C2)

Byggemateriale	Plassering av referansehus	Avstand [km]: Byggeplass - avfallshåndtering
Alle	Grimstad, Norge	85

12.2 Vegger av bindingsverk med utvendig kontinuerlig isolasjon

De påfølgende underkapitlene viser til hovedresultatene utarbeidet for CO_2-optimalisering av vegger av BKI.

12.2.1 CO2-optimalisering i bærende sjikt

De påfølgende resultatene sammenligner en vegg med 198 mm og 148 mm stendere + 48 mm vertikal påforing innvendig. Veggene med 148 mm stendere har 50 mm kontinuerlig isolasjon mer enn veggene med 198 mm stendere. Det er tilfeldig valgt en vegg med asfaltimpregnerte trefiberplater som vindtetting. Differansen er beregnet ved *«198 + 48 mm» – «148 + 48 mm».* Det vil si at ved positive verdier i kolonnen «Differanse» er det veggen *«148 + 48 mm»* som gir lavest CO_2-utslipp. Motsatt ved negative verdier i denne kolonnen.

Tabell 12.3 sammenligner U-verdiene for vegger med ulik stenderdybde og viser til størst effekt av tiltaket ved en veggtykkelse på 250 mm.

Tabell 12.3: U-verdi for ulike stendersjikt

BKI asfalt					
Veggtykkelse	Stendersjikt + påforing:				Differanse
	198 + 48 mm		148 + 48 mm		
[mm]	kont. iso. [mm]	U-verdi [W/m²K]	kont. iso. [mm]	U-verdi [W/m²K]	U-verdi [W/m²K]
250	0	0,167	50	0,148	0,019
300	50	0,131	100	0,120	0,011
350	100	0,109	150	0,102	0,007
400	150	0,093	200	0,088	0,005

Tabell 12.4 sammenligner energiforbruket grunnet varmetapet gjennom referansehusets yttervegger for vegger med ulik stenderdybde. Tiltaket har størst effekt for veggtykkelsen 250 mm og samsvarer med U-verdiresultatene.

Tabell 12.4: Energiforbruk grunnet varmetap gjennom yttervegger

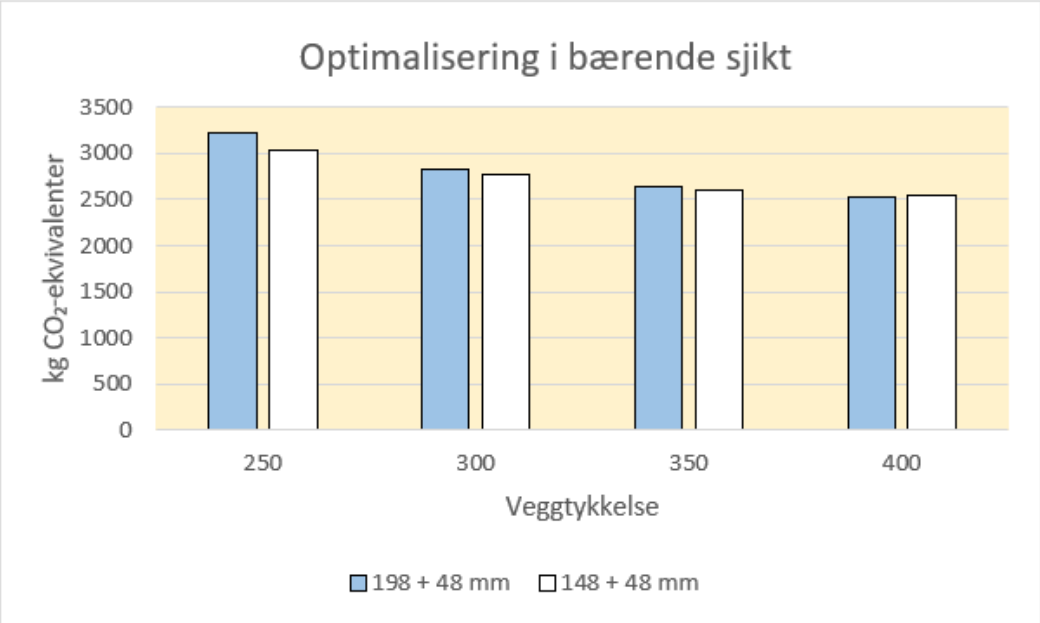
BKI asfalt					
Veggtykkelse	Stendersjikt + påforing:				Differanse
	198 + 48 mm		148 + 48 mm		
[mm]	kont. iso. [mm]	Avgitt energi gjennom vegg etter 60 år [kWh]	kont. iso. [mm]	Avgitt energi gjennom vegg etter 60 år [kWh]	[kWh]
250	0	75294	50	66504	8790
300	50	58930	100	54050	4880
350	100	48993	150	44886	4107
400	150	41036	200	38921	2115

Tabell 12.5 sammenligner kg CO_2-ekvivalenter forårsaket av referansehusets yttervegger etter 60 år for de ulike stenderdybdene. Resultatene viser størst effekt ved veggtykkelse 250 mm, samt en negativ effekt av tiltaket ved veggtykkelse 400 mm.

Tabell 12.5: CO_2-avtrykk i løpet av 60 år for vegger med ulik stenderdybde

BKI asfalt					
Veggtykkelse	Stendersjikt + påforing:				Differanse
	198 + 48 mm		148 + 48 mm		
[mm]	kont. iso. [mm]	Utslipp av kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år	kont. iso. [mm]	Utslipp av kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år	[kg CO_2-ekv.]
250	0	3220	50	3036	184
300	50	2831	100	2766	65
350	100	2644	150	2602	43
400	150	2521	200	2548	-27

Figur 12.1 er en grafisk fremstilling av resultatene fra *Tabell 12.5.* Blå stolper representerer vegger med 198 mm stendere og hvite stolper representerer vegger med 148 mm stendere.



Figur 12.1: Grafisk fremstilling av optimalisering i bærende sjikt

Tabell 12.6 viser temperaturforskjell mellom varm og kald side av trevirke (varm side av vertikal påforing og kald side av stender) for vegger med 198 mm og 148 mm stendere. Resultatene viser at temperaturforskjellen mellom varm og kald side er minst for vegger med 148 mm stendere, og differansen mellom veggtypene viser seg som synkende ved økende lag av kontinuerlig isolasjon.

Tabell 12.6: Temperaturforskjell mellom varm og kald side av trevirke

BKI asfalt					
Temperaturforskjell mellom varm og kald side av trevirke					
Veggtykkelse	Stendersjikt + påforing:				Differanse
	198 + 48 mm		148 + 48 mm		
[mm]	kont. iso. [mm]	ΔT: varm - kald side av trevirke [°C]	kont. iso. [mm]	ΔT: varm - kald side av trevirke [°C]	°C
250	0	27,6	50	22,8	4,9
300	50	22,9	100	19,4	3,5
350	100	19,6	150	16,9	2,7
400	150	17,1	200	15,0	2,1

12.2.2 CO2-optimalisering i vindtettingssjikt

De påfølgende resultatene bygger videre på veggoppbygningen med lavest CO_2-utslipp fra foregående tabell. For sammenligning av vindtettingssjiktet velges en vegg med 50 mm kontinuerlig isolasjon utvendig, stendere på 148 mm og 48 mm vertikal påforing innvendig. Kun vindtettingen er den varierende faktoren.

Tabell 12.7 viser variasjonen i U-verdi ved ulike typer vindtettingssjikt. Asfaltplate viser seg som det mest energieffektive alternativet, med vindsperreduk og GU-gips i motsatt ende av skalaen.

Tabell 12.7: U-verdi ved ulike vindtettingssjikt

Total isolasjonstykkelse	Kont. iso.	U-verdi [W/m²K]			
[mm]	[mm]	Vindsperreduk	Asfaltplate	OSB	GU - gips
250	50	0,153	0,148	0,151	0,153

Tabell 12.8 viser energiforbruket grunnet varmetap gjennom referansehusets yttervegger etter 60 år. Forskjellen på GU-gips og vindsperreduk er på den fjerde desimalen i U-verdiberegningene og er ikke vist i *Tabell 12.7*. Asfaltplaten avgir minst energi og samsvarer med U-verdiresultatene.

Tabell 12.8: Energiforbruk grunnet varmetap gjennom yttervegger (BKI)

Total isolasjonstykkelse	Kont. iso.	Avgitt energi gjennom vegg etter 60 år [kWh]			
[mm]	[mm]	Vindsperreduk	Asfaltplate	OSB	GU - gips
250	50	68919	66504	68111	68778

Tabell 12.9 presenterer den totale mengden kg CO_2-ekvivalenter forårsaket av referansehusets yttervegger etter 60 år. Asfaltplate viser seg som det beste alternativet med OSB på motsatt ende av skalaen.

Tabell 12.9: CO_2-avtrykk i løpet av 60 år for ytterveggene

Total isolasjonstykkelse	Kont. iso.	Utslipp av kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år			
[mm]	[mm]	Vindsperreduk	Asfaltplate	OSB	GU - gips
250	50	3059	3036	3198	3053

Tabell 12.10 gir en oversikt over CO_2-utslipp fordelt på MAT og B6 for de ulike alternativene til vindtetting. 163 kg CO_2-ekvivalenter er den største differansen mellom alternativene, henholdsvis mellom asfaltplaten og OSB-platen.

Tabell 12.10: Antall kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år fordelt på faser

Utslipp av kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år				
	Vindsperreduk	Asfaltplate	OSB	GU - gips
MAT	805	861	972	805
B6	2253	2174	2227	2249
SUM	3059	3036	3198	3053
Differanse til Asfaltplate	23	Ref	163	18
MAT for kun vindtetting	28,1	84,3	194,4	27,6

12.2.3 CO2-optimalisering i påforingssjikt

De påfølgende resultatene bygger videre på veggen med lavest CO_2-utslipp fra foregående tabell, altså en vegg med 50 mm kontinuerlig isolasjon utvendig, stendere på 148 mm og vindtetting av asfaltimpregnerte trefiberplater. Differansen er beregnet ved *«Vertikal påforing» – «Horisontal påforing»*. Det vil si at ved positive verdier i kolonnen «Differanse» er det veggen *«Horisontal påforing»* som gir det laveste CO_2-utslippet.

Tabell 12.11 presenterer U-verdi ved horisontal og vertikal påforing. Endringene er ikke opptredene før fjerde desimal, og effekten av tiltaket viser seg som størst for 250 mm og synker ved økende veggtykkelse.

Tabell 12.11: U-verdi ved horisontal og vertikal påforing

BKI asfalt			
Veggtykkelse	U-verdi [W/m²K] Stendersjikt + påforing: 148+48		Differanse
[mm]	Vertikal påforing	Horisontal påforing	U-verdi [W/m²K]
250	0,1477	0,1468	0,0009
300	0,1202	0,1199	0,0003
350	0,1017	0,1016	0,0001
400	0,0882	0,0882	0

Tabell 12.12 viser energiforbruk grunnet varmetap gjennom referansehusets vegger etter 60 år ved horisontal og vertikal påføring. Besparelsen i energiforbruk er størst ved 250 mm veggtykkelse og samsvarer med U-verdiresultatene i *Tabell 12.11*.

Tabell 12.12: Energiforbruk etter 60 år ved horisontal og vertikal påføring

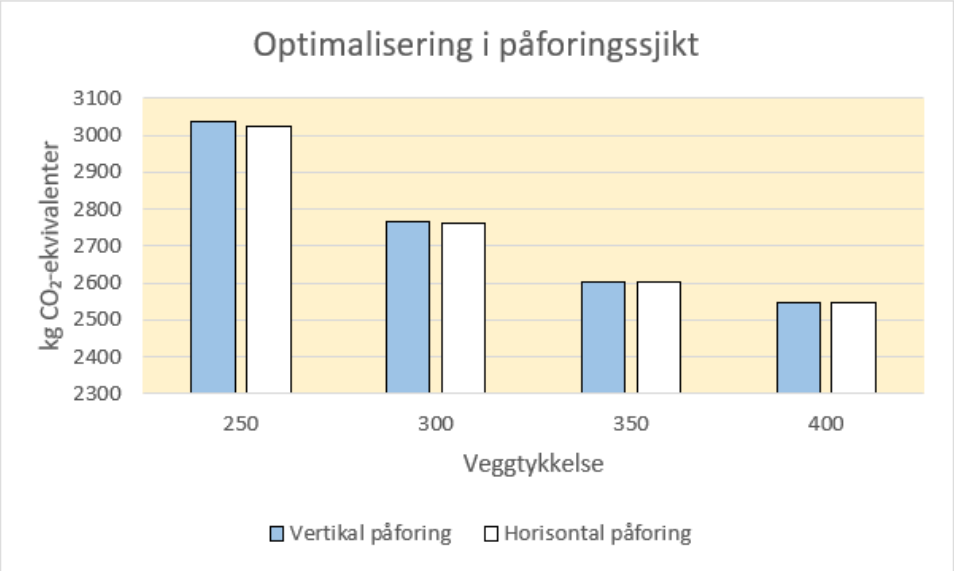
BKI asfalt			
Veggtykkelse	Avgitt energi gjennom vegg etter 60 år [kWh] Stendersjikt + påføring: 148+48		Differanse
[mm]	Vertikal påføring	Horisontal påføring	[kWh]
250	66504	66095	409
300	54050	53907	143
350	44886	44849	37
400	38921	38921	0

Tabell 12.13 viser kg CO_2-ekvivalenter forårsaket av referansehusets vegger etter 60 år ved horisontal og vertikal påføring. Den største effekten av tiltaket er for veggtykkelsen 250 mm med 14 kg CO_2-ekvivalenter. Resultatene viser en synkende effekt ved økende veggtykkelse og ingen effekt for veggtykkelse 400 mm. Se vedlegg 17.10 for et eksempel fra SimaPro for mer detaljert CO_2-utslipp (BKI50 – horisontal påføring).

Tabell 12.13: CO_2-avtrykk etter 60 år ved horisontal og vertikal påføring

BKI asfalt			
Veggtykkelse	Utslipp av kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år Stendersjikt + påføring: 148+48		Differanse
[mm]	Vertikal påføring	Horisontal påføring	[kg CO_2-ekv.]
250	3036	3022	14
300	2766	2761	5
350	2602	2601	1
400	2548	2548	0

Figur 12.2 er en grafisk fremstilling av resultatene fra *Tabell 12.13.* Blå stolper representerer vertikal påføring og hvite stolper representerer horisontal påføring.



Figur 12.2: Grafisk fremstilling av optimalisering i påføringssjikt

12.2.4 Kondenskontroll

Tabell 12.14 viser resultatet av en kondenskontroll gjort på veggtykkelsen 250 mm fra foregående tabell. Gule ruter representerer valgte utgangsverdier. RF overskrider ikke 1,0 og det oppstår altså ikke kondens i veggen ved gitte forhold.

Tabell 12.14: Kondenskontroll av yttervegg (Veggtype: BKI – asfaltplate – 148 mm stender)

Kondenskontroll BKI-asfalt-148											
Sjikt	d m	λ W/mK	R_{lagert} W²K/W	ΔT C°	T C°	v_s g/m³	δ m²/s	Z s/m	Δv g/m³	v g/m³	RF
Ute					-10,000	2,140				2,033	0,950
Ventilert kledning og utvendig varmemotstand , R_{se}			0,130	0,546	-9,454	2,230				2,033	0,912
Kontinuerlig isolasjon	0,050	0,034	1,471	6,172	-3,283	3,730	0,0000195	2564,103	0,005	2,038	0,546
Hunton asfaltplate	0,012	0,049	0,245	1,028	-2,255	4,040		15400,000	0,031	2,070	0,512
Isolasjon	0,148	0,034	3,613	15,163	12,908	11,280	0,0000195	7589,744	0,015	2,085	0,185
Trevirke	0,148	0,130	0,194	0,812	13,721	11,850	0,00000053	279245,283	0,568	2,653	0,224
Dampsperre			0,030	0,126	13,846	11,920		2000000,000	4,066	6,719	0,564
Isolasjon	0,048	0,034	1,228	5,155	19,001	16,300	0,0000195	2461,538	0,005	6,724	0,413
Trevirke	0,048	0,130	0,048	0,201	19,203	16,490	0,00000053	90566,038	0,184	6,908	0,419
Gips	0,013		0,060	0,252	19,454	16,790	0,0000029	4431,818	0,009	6,917	0,412
Innvendig varmeovergangsmotstand , R_{si}			0,130	0,546	20,000	17,280				6,912	0,400
Inne											
Sum			7,148					2399694,421	4,879		

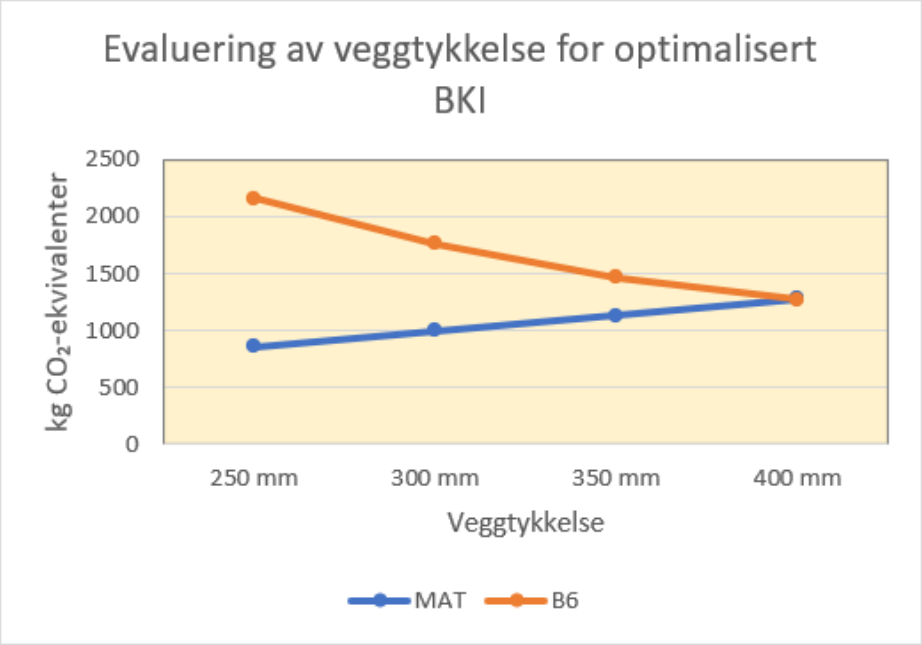
12.2.5 Evaluering av veggtykkelse

Tabell 12.15 tar for seg veggtykkelsene av den optimaliserte veggen, med 148 mm stendere, asfaltplate og med horisontal påforing. Tabellen presenterer bidraget fra MAT og B6, samt summen av de to. Ruter i grått representerer differansen mellom veggtykkelsene på hver side. Ved økende veggtykkelse viser bidraget fra MAT seg å øke, mens bidraget fra B6 synker. Dette resulterer i at det samlede utslippet synker ved økt veggtykkelse, men det bemerkes at fallet blir betydelig redusert for hver overgang. Negative verdier for differansen viser til reduksjon i kg CO_2-ekvivalenter, samt motsatt for positive verdier.

Tabell 12.15: CO_2-avtrykk for optimalisert BKI-vegg fordelt på MAT og B6 med mellomliggende differanse

Optimalisert BKI							
	Utslipp av kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år ved ulike veggtykkelser						
	250 mm	Dif.	300 mm	Dif.	350 mm	Dif.	400 mm
MAT	861	137	999	136	1134	141	1275
B6	2161	-398	1762	-296	1466	-194	1273
Sum	3022	-261	2761	-161	2601	-53	2548

Figur 12.3 er en grafisk fremstilling av resultatene i *Tabell 12.15*. Blå linje viser utviklingen av kg CO_2-ekvivalenter fra MAT ved økende veggtykkelse. Oransje linje viser utviklingen av kg CO_2-ekvivalenter fra B6 ved økende veggtykkelse.



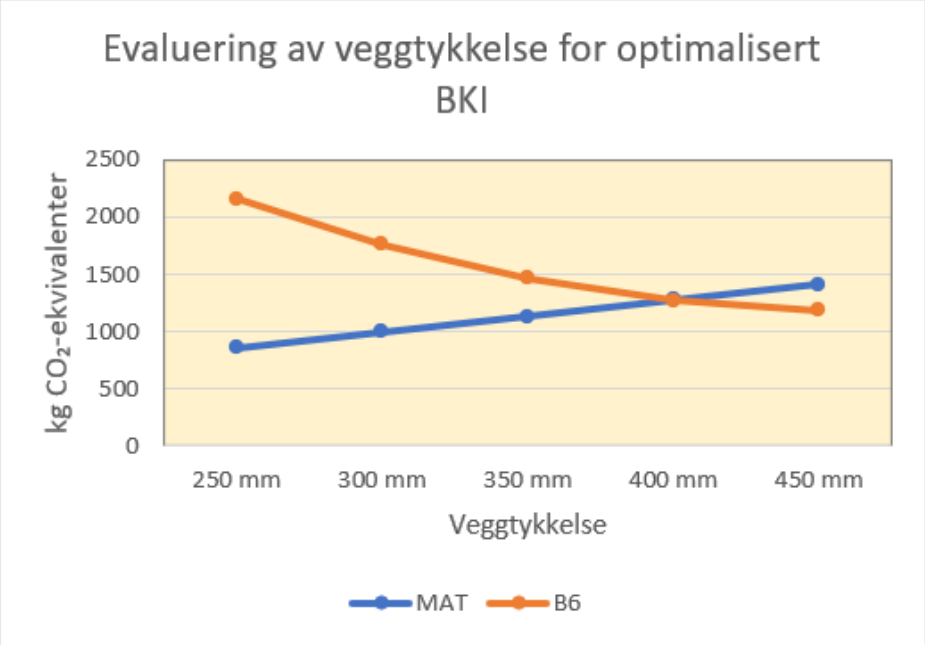
Figur 12.3: Sammenheng mellom veggtykkelse og kg CO_2-ekv. fordelt på MAT og B6

Tabell 12.16 er en fortsettelse av *Tabell 12.15*, hvor verdier for veggtykkelse 450 mm er estimert på bakgrunn av grafenes utvikling og ikke simulert som for de andre veggtykkelsene. Differansen for MAT mellom 400 mm og 450 mm er et gjennomsnitt av stigningstallene/differansen mellom de tidligere veggtykkelsene. For B6 viser det seg å være en konstant reduksjon i stigningstall på 102 kg CO_2-ekvivalenter mellom hver veggtykkelse. Dette legger grunnlaget for å kunne estimere stigningstall og dermed B6s verdi for 450 mm. Negative verdier for differansen viser til reduksjon i kg CO_2-ekvivalenter, samt motsatt for positive verdier. Det bemerkes at den samlede differansen/stigningstallet mellom 400 mm og 450 mm er positivt og forteller altså om en økning i samlet CO_2-utslipp.

Tabell 12.16: CO_2-avtrykk for optimalisert BKI-vegg fordelt på MAT og B6 med mellomliggende differanse og estimert veggtykkelse på 450 mm

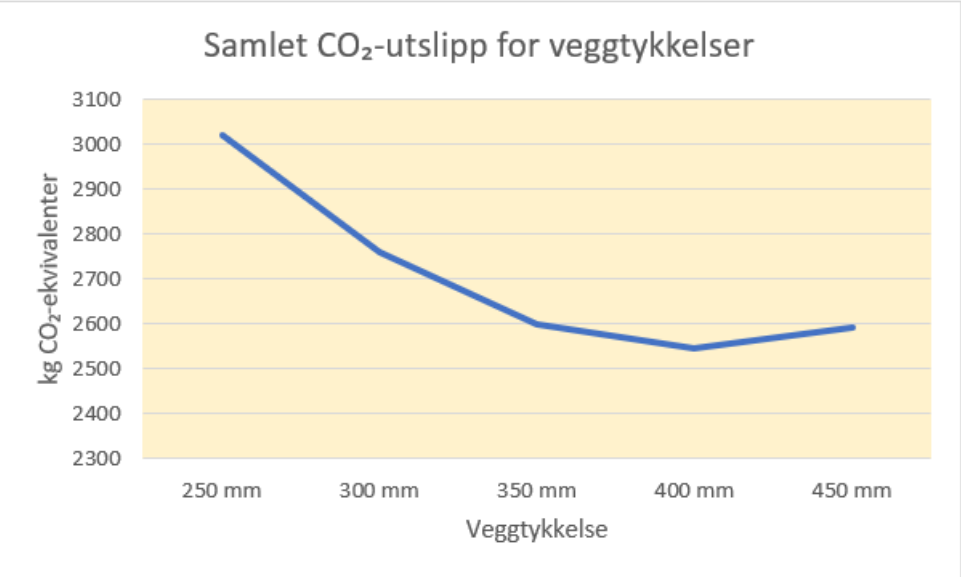
Optimalisert BKI									
	Utslipp av kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år ved ulike veggtykkelser								
	250 mm	Dif.	300 mm	Dif.	350 mm	Dif.	400 mm	Dif.	450 mm
MAT	861	137	999	136	1134	141	1275	138	1413
B6	2161	-398	1762	-296	1466	-194	1273	-92	1181
Sum	3022	-261	2761	-161	2601	-53	2548	46	2594

Figur 12.4 er en grafisk fremstilling av resultatene i *Tabell 12.16*. Blå linje viser utviklingen av kg CO_2-ekvivalenter fra MAT ved økende veggtykkelse. Oransje linje viser utviklingen av kg CO_2-ekvivalenter fra B6 ved økende veggtykkelse.



Figur 12.4: Sammenheng mellom veggtykkelse og kg CO_2-ekv. fordelt på MAT og B6 med estimert veggtykkelse på 450 mm

Figur 12.5 viser samlet CO_2-utslipp for optimalisert BKI for veggtykkelser fra 250-450 mm. 400 mm viser seg som bunnpunkt og grafen er stigende igjen mot 450 mm.



Figur 12.5: Samlet CO_2-utslipp for optimalisert BKI med veggtykkelse til og med 450 mm

12.3 Vegger av enkelt og dobbelt bindingsverk

De påfølgende tabellene viser til hovedresultatene basert på veggene enkelt og dobbelt bindingsverk. Se *Tabell 10.1* i kapittel 10 for detaljert oppbygning.

Tabell 12.17 viser beregnet U-verdi for vegger av bindingsverk etter TEK17 og passivhusstandard (PH) med representativ veggtykkelse. For fullstendige beregninger se vedlegg 17.3.1.

Tabell 12.17: U-verdier for enkelt og dobbelt bindingsverk

Standard	Veggtype	Veggtykkelse [mm]	U-verdi [W/m²K]
TEK 17	Enkelt bindingsverk	250	0,167
PH	Dobbelt bindingsverk	400	0,098

Tabell 12.18 viser beregnet varmetap gjennom vegg etter 60 år for vegger av bindingsverk etter TEK17 og passivhusstandard med representativ veggtykkelse. For fullstendige beregninger av varmetapsfordeling se vedlegg 17.3.2.

Tabell 12.18: Energiforbruk grunnet varmetap gjennom yttervegger (B, DB)

Standard	Veggtype	Veggtykkelse [mm]	Avgitt energi gjennom vegg etter 60 år [kWh]
TEK 17	Enkelt bindingsverk	250	75294
PH	Dobbelt bindingsverk	400	43255

Tabell 12.19 viser beregnet utslipp av kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år for vegger av bindingsverk etter TEK17 og passivhusstandard med representativ veggtykkelse.

Tabell 12.19: CO_2-avtrykk etter 60 år for enkelt- og dobbelt bindingsverk

Standard	Veggtype	Veggtykkelse [mm]	Utslipp av kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år [CO_2-ekv.]
TEK 17	Enkelt bindingsverk	250	3220
PH	Dobbelt bindingsverk	400	2336

12.4 Vegger av massivtre

De påfølgende tabellene viser til hovedresultatene basert på veggene av massivtre. Se *Tabell 10.1* i kapittel 10 for detaljert oppbygning.

Tabell 12.20 viser beregnet U-verdi for vegger av massivtre etter TEK17 og passivhusstandard med representativ veggtykkelse. For fullstendige beregninger se vedlegg 17.4.1.

Tabell 12.20: U-verdier for massivtre

Standard	Veggtype	Veggtykkelse [mm]	U-verdi [W/m²K]
TEK 17	Massivtre -150	250	0,18
PH	Massivtre -300	400	0,100

Tabell 12.21 viser beregnet varmetap gjennom vegg etter 60 år for vegger av massivtre etter TEK17 og passivhusstandard med representativ veggtykkelse. For fullstendige beregninger av varmetapsfordeling se vedlegg 17.4.2.

Tabell 12.21: Energiforbruk grunnet varmetap gjennom yttervegger (M150, M300)

Standard	Veggtype	Veggtykkelse [mm]	Avgitt energi gjennom vegg etter 60 år [kWh]
TEK 17	Massivtre -150	250	78947
PH	Massivtre -300	400	44141

Tabell 12.22 viser beregnet utslipp av kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år for vegger av massivtre etter TEK17 og passivhusstandard med representativ veggtykkelse.

Tabell 12.22: CO_2-avtrykk etter 60 år for massivtre

Standard	Veggtype	Veggtykkelse [mm]	Utslipp av kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år [CO_2-ekv.]
TEK 17	Massivtre -150	250	5327
PH	Massivtre -300	400	4622

12.5 Sammenligning av veggsystemer

De påfølgende underkapitlene sammenligner de overnevnte veggsystemene og deres underliggende resultater opp mot hverandre etter tilhørende byggestandard.

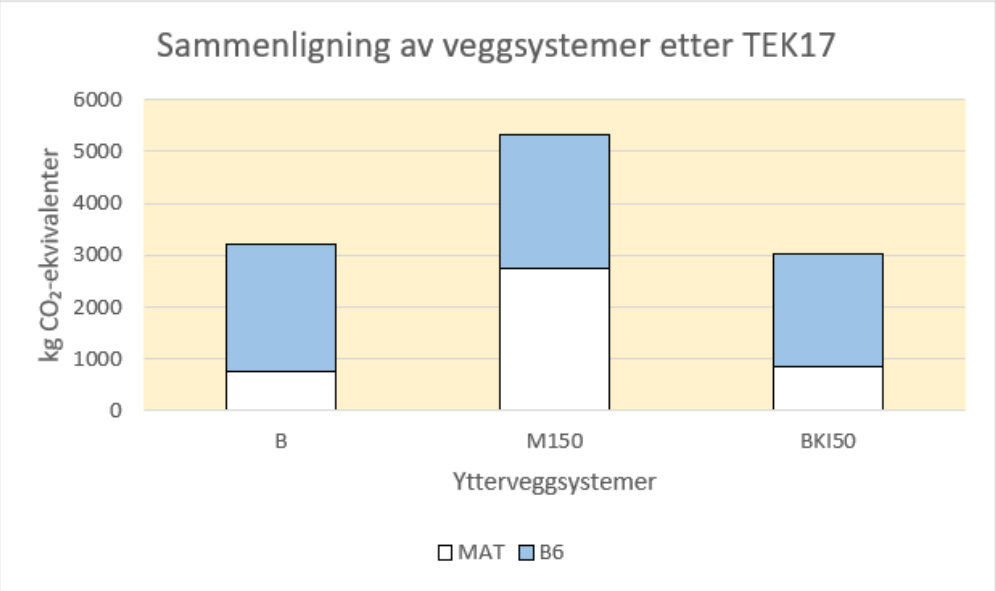
12.5.1 TEK17

Tabell 12.23 viser kg CO_2-ekvivalenter fra MAT og B6 for ulike veggsystemer, samt sammenligner B og M150 opp imot BKI50. Bindingsverk har det laveste bidraget fra MAT og BKI50 har det laveste bidraget fra B6. Samlet viser BKI50 seg å være det beste alternativet for denne byggestandarden. I raden «Differanse til BKI50» vil positive verdier si at veggsystemet har høyere utslipp av kg CO_2-ekvivalenter enn BKI50.

Tabell 12.23: CO_2-avtrykk etter 60 år for yttervegger etter TEK17

Utslipp av kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år			
	B	M150	BKI50
MAT	758	2746	862
B6	2462	2581	2160
Sum	3220	5327	3022
Differanse til BKI50	198	2305	Ref

Figur 12.6 er en grafisk fremstilling av resultatene fra *Tabell 12.23*. Hvit representerer verdier fra MAT. Blå representerer verdier fra B6.



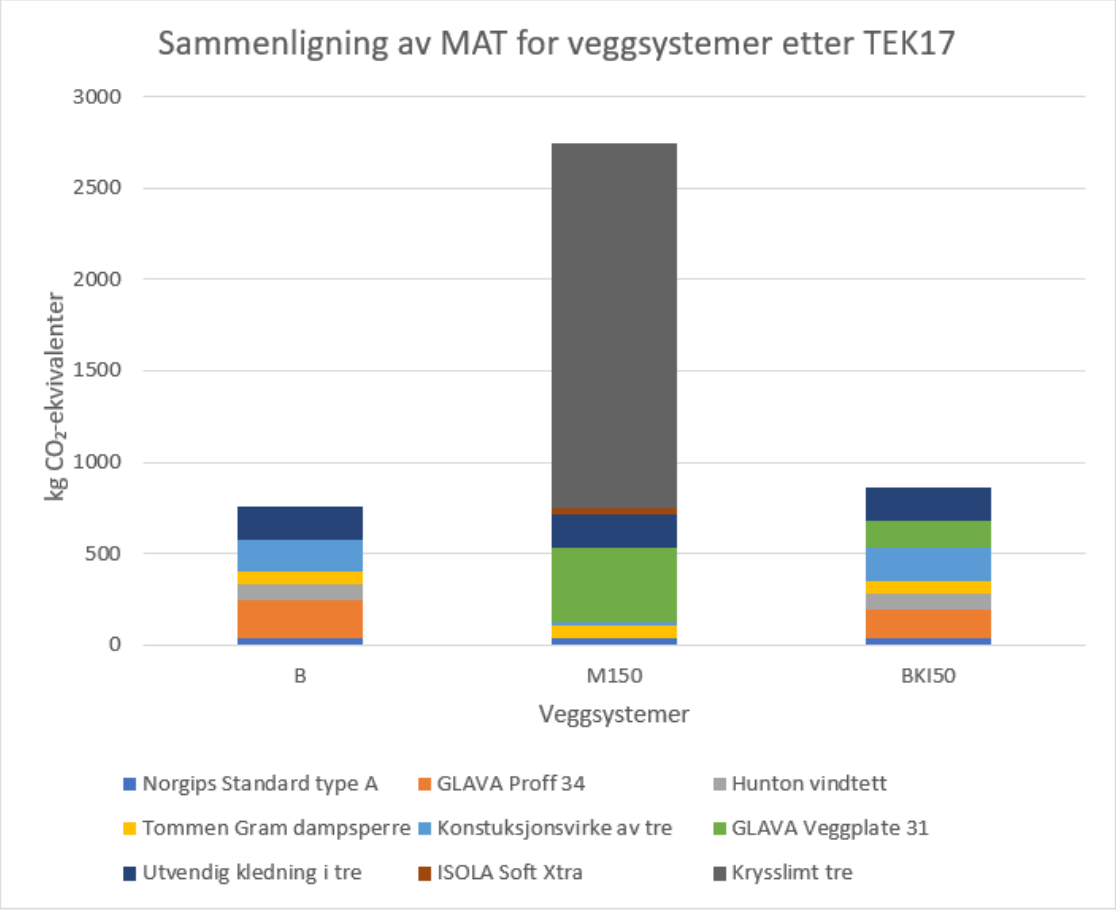
Figur 12.6: Sammenligning av CO_2-avtrykket for yttervegger etter TEK17

Tabell 12.24 viser kg CO_2-ekvivalenter fra MAT fordelt på ytterveggenes materialer. Krysslimt tre peker seg ut som det klart høyeste bidraget.

Tabell 12.24: CO_2-avtrykk etter 60 år fra MAT fordelt på byggematerialer (TEK17)

Sammenligning av MAT for veggsystemer etter TEK17			
Utslipp av kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år			
Materialer	Veggsystemer		
	B	M150	BKI50
Norgips Standard type A	33	33	33
GLAVA Proff 34	213	0	162
Hunton vindtett	85	0	84
Tommen Gram dampsperre	73	73	73
Konstuksjonsvirke av tre	170	14	179
GLAVA Veggplate 31	0	412	145
Utvendig kledning i tre	185	185	185
ISOLA Soft Xtra	0	28	0
Krysslimt tre	0	2001	0
SUM	758	2746	861

Figur 12.7 er en visuell fremstilling av *Tabell 12.24*. Søylediagrammet til massivtreveggen skiller seg ut ved et betydelig utslipp fra krysslimt tre.



Figur 12.7: Sammenligning av byggematerialers CO_2-avtrykk i veggsystemer etter TEK17

12.5.2 Passivhusstandard

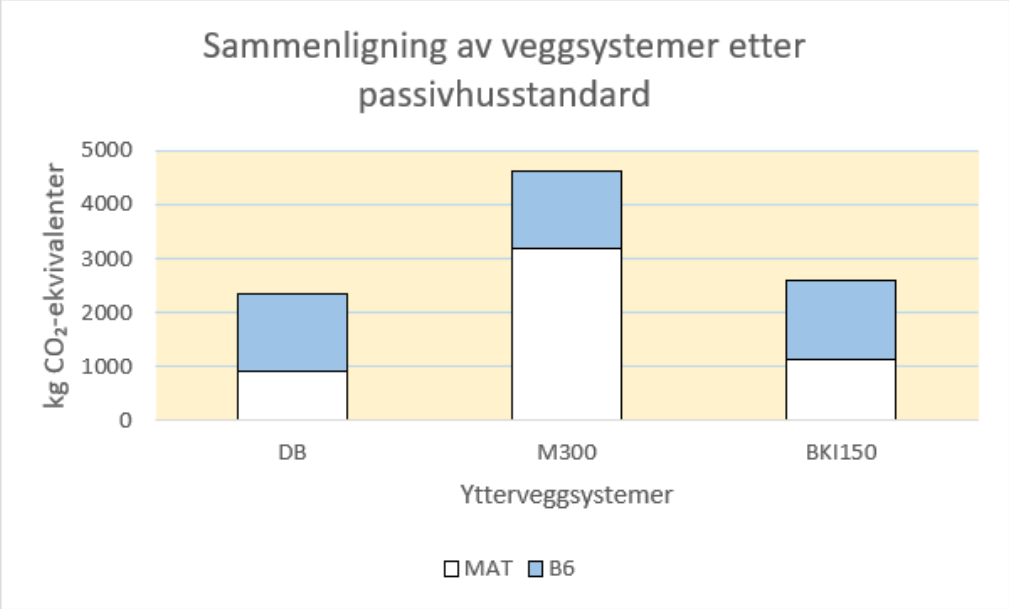
De påfølgende resultater sammenligner veggsystemene ut ifra standard og ikke veggtykkelse. Det vil si at veggen nærmest standardens krav til U-verdi velges uavhengig av veggtykkelse.

Tabell 12.25 viser kg CO_2-ekvivalenter fra fasene MAT og B6 for ulike veggsystemer, samt sammenligner DB og M300 opp mot BKI150. Dobbelt bindingsverk viser seg å ha det laveste utslippet både fra MAT og B6 og dermed også lavest utslipp totalt. I raden «Differanse til BKI150» vil positive verdier si at veggsystemet har høyere utslipp av kg CO_2-ekvivalenter enn BKI150, og motsatt for negative verdier.

Tabell 12.25: CO_2-avtrykk etter 60 år for yttervegger etter passivhusstandarden

Utslipp av kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år			
	DB	M300	BKI150
MAT	922	3179	1134
B6	1414,21	1443,15	1466,33
Sum	2336	4622	2601
Differanse til BKI150	-265	2021	Ref

Figur 12.8 er en grafisk fremstilling av resultatene fra *Tabell 12.25*. Hvit representerer verdier fra MAT. Blå representerer verdier fra B6.



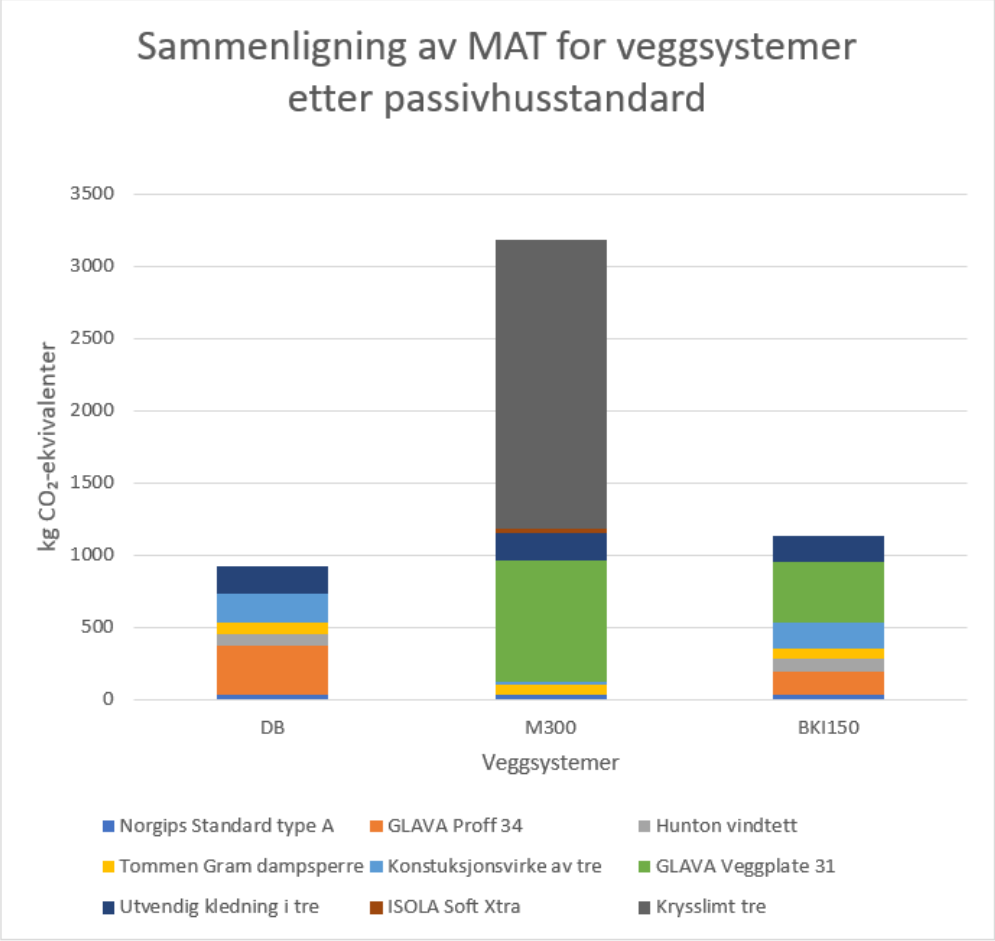
Figur 12.8: Sammenligning av CO_2-avtrykket for yttervegger etter passivhusstandarden

Tabell 12.26 viser kg CO_2-ekvivalenter fra MAT fordelt på ytterveggenes materialer. Krysslimt tre peker seg fortsatt ut som det klart høyeste bidraget.

Tabell 12.26: CO_2-avtrykk etter 60 år fordelt på byggematerialer (passivhusstandard)

Sammenligning av MAT for veggsystemer etter passivhusstandard			
Utslipp av kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år			
Materialer	Veggsystemer		
	DB	M300	BKI150
Norgips Standard type A	33	33	33
GLAVA Proff 34	336	0	162
Hunton vindtett	86	0	84
Tommen Gram dampsperre	73	73	73
Konstuksjonsvirke av tre	205	14	179
GLAVA Veggplate 31	0	842	417
Utvendig kledning i tre	187	187	186
ISOLA Soft Xtra	0	29	0
Krysslimt tre	0	2001	0
SUM	921	3179	1134

Figur 12.9 er en visuell fremstilling av *Tabell 12.26*.



Figur 12.9: Sammenligning av byggematerialers CO_2-avtrykk i veggsystemer etter passivhusstandarden

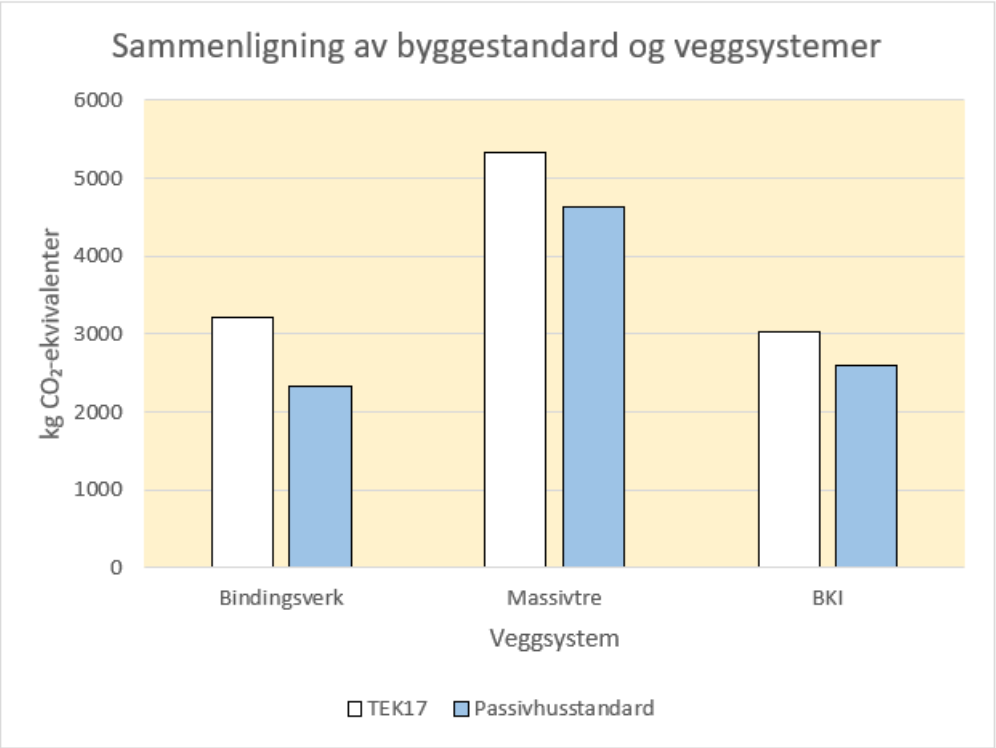
12.5.3 Sammenligning av byggestandard og veggsystemer

Tabell 12.27 sammenligner resultatene for både byggestandard og veggsystemer. Raden «Reduksjon» viser differansen mellom byggestandardene for det bestemte veggsystemet. Det blir tydelig at *Bindingsverk* har størst reduksjon mellom byggestandardene og *BKI* den minste med under halvparten av bindingsverk.

Tabell 12.27: Sammenligning av byggestandard og veggsystemer

	Veggsystemer		
	Bindingsverk	Massivtre	BKI
	[kg CO_2-ekv]	[kg CO_2-ekv]	[kg CO_2-ekv]
TEK17	3220	5327	3022
Passivhusstandard	2336	4622	2601
Reduksjon	884	705	421

Figur 12.10 er en visuell fremstilling av *Tabell 12.27*. Hvite stolper representerer TEK17. Blå stolper representerer passivhusstandard.



Figur 12.10: Sammenligning av byggestandard og veggsystemer

13 Diskusjon

I de påfølgende underkapitlene vil oppgavens resultater og metoder analyseres og diskuteres i lys av bakgrunnsteori og tidligere erfaringer på området.

13.1 U-verdiberegninger

U-verdiberegningene ble gjort etter NS-EN ISO 6946:2007 [44]. Andel tre i veggen baserer seg på anbefalinger fra SINTEF Byggforsk (se kapittel 8.2.3). I sjikt for innvendig påforing ble det valgt å bruke en treandel på 13% på tross av at det er anbefalt 17% ved tykkelsen på 48 mm. Ettersom dette sjiktet ikke er bærende vil tremengden rundt vinduer og dører kunne reduseres sammenlignet med det bærende sjiktet i veggen. Det ble dermed valgt å anta at denne reduksjonen er tilnærmet lik differansen i treandel mellom 36 mm og 48 mm stendere.

I hvor stor grad valgt treandel er passende for referansehuset eller ikke blir ikke videre sjekket. Dette vil være påvirket av bærende vegger og vindusplassering som vil være tilpasset den enkelte tomt. Det bemerkes imidlertid at studier er gjort på området som antyder at tremengden i veggen i praksis kan være opp imot det dobbelte [52]. Dette vil påvirke U-verdi, varmetap og CO_2-beregninger.

13.2 SIMIEN

Energi fra lys og diverse elektrisk anlegg er sett bort ifra. Kun energi til oppvarming og drift av ventilasjonsanlegg blir identifisert ved SIMIEN-beregningene. Å utelukke energibruk fra ventilasjonsanlegget lar seg ikke gjøre i SIMIEN ettersom byggestandarden krever det for nye boliger. Å inkludere energien til drift av ventilasjonsvifte i energi benyttet til oppvarming som gjort i denne oppgaven vil derav være en feilkilde. Denne feilkilden vil være lik for samtlige veggsystemer og være svært liten.

SIMIEN benytter en dimensjonerende gjennomsnittstemperatur for vinteren på -22.9 °C for klimasted «Kristiansand (Kjevik)». Akkurat hvordan denne temperaturen spiller inn er uvisst, men det er mye kaldere enn hva som er realiteten i Kristiansand. Det er ikke mulig å bestemme denne temperaturen selv i SIMIEN da den er direkte koblet opp mot det valgte klimastedet. Om den skulle gi et unaturlig høyt energiforbruk vil det ikke ha noe betydning for sammenligning av veggsystemene ettersom alle har det samme sammenligningsgrunnlaget. Den veldig lave vintertemperaturen vil derimot gi et større energiforbruk grunnet oppvarming, og vil av den grunn gi økt effekt av tiltakene for optimaliseringen av BKI.

13.3 Fordeling av varmetap

Energiberegningene fra SIMIEN angir energibehovet per år for hele referansehuset. Ønsket innetemperatur i referansehuset holdes konstant, hvilket gjør at energibehovet er lik mengden energi

som forsvinner. Denne energien forsvinner ut gjennom gulv, vegger, tak, vinduer og dører, samt kuldebroer. Mengden energi som forsvinner ut gjennom de ulike bygningsdelene fordeles prosentvis på bakgrunn av bygningsdelens og det totale varmetapstallet (se kapittel 11.5 for nærmere beskrivelse og vedlegg 17.3.2 for eksempel).

For kuldebroverdier blir det besluttet å bruke TEK17 og passivhusstandarens krav for normaliserte kuldebroverdier. Nøyaktige verdier for lineære- og punktkuldebroer i forbindelse med overganger mellom bygningsdeler viste seg å være utfordrende å finne i litteratur for enkelte vegger. Spesielt var det vegger med kontinuerlig isolasjon på over 100 mm, samt for alle tilfeller av massivtre var ikke å oppspore. Litteraturen som imidlertid *ble* funnet på området peker på kontinuerlig utvendig isolasjon som en mulig faktor for å redusere varmetap gjennom kuldebroer for både det geometriske- og materialbidraget [46]. Samtidig vil man aldri kunne oppnå kuldebrofrie konstruksjoner og kravene for kuldebroverdier kan være utfordrende å oppnå for godt isolerte småhus [47].

Utfordringen for godt isolerte småhus ligger i veggtykkelsen. Desto tykkere vegg, desto større forskjell mellom innvendig og utvendig areal. Større geometriske forskjeller gir større geometriske kuldebroer [46, 47]. For sammenligning etter passivhusstandard blir det sammenlignet en vegg av BKI på 350 mm mot vegger på 400 mm for DB og M. For begge veggtykkelsene blir det brukt de samme normaliserte kuldebroverdiene, men mye tyder på at det geometriske bidraget for kuldebroene vil være noe mindre for BKI grunnet en mindre veggtykkelse.

Ettersom varmetapet fra kuldebroer viser seg som den minste utslippsposten for energi med 6,7% av varmetapet for BKI150 (se vedlegg 17.2.2), vil trolig små endringer i kuldebroverdi ikke gi betydelige endringer av hovedresultatene.

13.4 SimaPro

Det har hovedsakelig blitt benyttet globale eller europeiske prosesser i SimaPro for råstoffene. Dette skyldes mangel på norske prosesser i Ecoinvent sine databaser. Ved bruk av slike prosesser blir det benyttet gjennomsnittsverdier fra mange land. Andre land i verden kan ta i bruk mindre miljøvennlige metoder for å fremstille råstoffene, f.eks. ved bruk av ikke fornybare energikilder. Dette kan bidra til å fremstille et resultat som har et større karbonfotavtrykk enn om det kun var blitt benyttet prosesser i SimaPro fra norske forhold.

Det blir likevel benyttet en norsk strømmiks, noe som i motsetning har bidratt til å øke nøyaktigheten til analysen i stor grad. Dette på grunnlag av studiene til Citherlet og Defaux, samt Folvik et al. i kapittel 8.6, som påpekte at strømmiksen spiller en stor rolle for klimaberegningene. Når det angår energien som blir benyttet til produksjon av materialer så blir det benyttet generiske verdier fra liknende byggematerialer i Ecoinvent sine databaser. Dette gir et godt overslag på den nødvendige energibruken, og ved å benytte norsk strømmiks også for produksjonsfasen forbedres nøyaktigheten ytterligere. Det blir likevel benyttet gass (naturgass og andre gasser) for å skape varme brukt i produksjonen, slik *Tabell 11.3* viser. I hvor stor grad denne energikilden blir benyttet i norske produksjonsprosesser vites ikke og denne usikkerheten kan igjen bidra til en noe økt unøyaktighet i resultatet.

I og med at mengden av emballasje ikke er inkludert i alle EPDene blir det derfor ikke lagt til i SimaPro. Dette er mest sannsynlig plastfolie, og ville ha bidratt til et større CO_2-avtrykk. Da det i tillegg ikke var mulig å finne ønsket type maling (husmaling) i Ecoinvent sine databaser blir maling heller ikke inkludert i SimaPro. Malingen ville også gitt et ukjent bidrag til CO_2-utslipp, når det i tillegg må påføres husveggen flere ganger i løpet av husets levetid. I den store sammenhengen vil derimot disse utslippene ikke være betydelig store, og heller ikke påvirke sammenligningen av de ulike veggsystemene i stor grad.

EPDer kan være lite spesifikke i beskrivelse av råstoffene som inngår i byggematerialet. Det har vært nødvendig å ekskludere slike råstoffer i SimaPro. Kun råstoffer med en andel mindre enn 1% av total masse er ekskludert. Å inkludere disse i byggematerialene hadde bidratt til økt CO_2-avtrykk.

13.4.1 Materialmengder

Ved beregning av isolasjonsmengde for det doble bindingsverket ble det ikke tatt hensyn til at det midtre isolasjonssjiktet er kontinuerlig. I SimaPro er det her lagt inn isolasjonsplater på 400 mm over 87% av veggens totale areal. Ved denne forenklingen blir ikke mengden isolasjon som ville fylt hulrommene bak stenderne i det kontinuerlige sjiktet medregnet. Det vil si at det i praksis trengs mer isolasjon enn beregnet. Mengdene er små, men reelle og vil bidra til et økt CO_2-utslipp fra MAT for veggen av dobbelt bindingsverk. Hvorvidt dette i det hele tatt vil bli synlig i hovedresultatene er usikkert. Disse forenklingene er ikke gjort ved U-verdiberegningene for DB.

Kapp og svinn er heller ikke medregnet i noen av beregningene. I realiteten blir det bestilt inn mer materialer til byggeprosjektet enn hva som blir benyttet, slik som studien til Monahan og Powell indikerer i kapittel 8.1.1. Det velges å anta at mengden svinn for de ulike veggsystemene vil være tilnærmet lik. Å ta med kapp og svinn i beregningene ville gitt et høyere utslipp for samtlige vegger, men ville ikke utgjort noe forskjell i sammenligningen mellom dem ettersom mengden ville antas lik.

13.4.2 Transport

Det har på grunn av mangel på EPDer fra norske produsenter av OSB-plater blitt valgt å bruke en OSB-plate som blir importert til Norge fra utlandet. Den lengre transportavstanden fører igjen til økt CO_2-avtrykk. Det har likevel blitt valgt å bruke den nærmeste fabrikken til produsenten, en fabrikk i Tyskland framfor en fabrikk i Polen, for å minimere differansen av transportavstandene.

Tabell 12.10 viser at vindsperreduken har det laveste CO_2-avtrykket av alle de studerte vindsperrene i kategorien MAT, med 805 kg CO_2-ekv. Dette til tross for en transportavstand fra Luxembourg til Norge som igjen er lengst av alle. En årsak til dette lave utslippet kan skyldes vindsperredukens oppbygning som en tynn plastfolie. Dette gir lav vekt per kvadratmeter med vindsperre, noe som igjen er gunstig med tanke på transport over lengre avstander. Dette kan være en faktor for det lave CO_2-avtrykket i tillegg til at energibruken i produksjonsfasen er utelatt (se kapittel 11.6.6).

13.5 Isolasjonstykkelser i et miljøperspektiv

Tidligere studier viser at strømforbruket i bruksfasen utgjør en betydelig andel av det totale CO_2-utslippet i bygg etter byggestandard tilsvarende TEK10-17 [33]. Både Folvik et al. og Peñaloza et al. viser at det kan være fordelaktig i det lange løp å investere i godt isolerende materialer fremfor materialer med den beste klimaprofilen etter produksjon [27, 28].

Dette viser seg å samstemme med resultatene fra denne oppgaven. Ut ifra *Tabell 12.23* og *12.25* viser det seg at samtlige av veggsystemene har en økning i CO_2-utslipp fra MAT ved overgang fra TEK17 til passivhusstandard. Tilsvarende har samtlige av veggsystemene en større reduksjon fra B6 og dermed en samlet reduksjon av CO_2-utslipp ved denne overgangen. Ved nærmere sammenligning viser *Tabell 12.27* at BKI er veggsystemet med lavest reduksjon, og reduksjonen er under halvparten enn for bindingsverk. Også massivtreet har en betydelig større reduksjon enn BKI. En av årsakene til dette er nok at BKI har en betydelig bedre U-verdi enn for de andre veggsystemene etter TEK17. Det gjør at differansen i avgitt energi for BKI etter TEK17 og passivhusstandard vil være en del mindre enn for de andre veggsystemene som har et høyere utgangspunkt for vegger etter TEK17. En annen faktor er at BKI oppnår passivhusstandard etter 350 mm, i motsetning til de andre veggsystemene som må opp i 400 mm. Dette gjør også at differansen i materialmengder vil være mindre for BKI mellom TEK17 og passivhusstandard.

13.6 CO2-optimalisering av BKI

Flere studier viser til at bruken av kontinuerlig isolasjon i vegger av bindingsverk kan være energieffektivt. De påfølgende underkapitlene drøfter effekten og nytten av tiltakene som er gjort for CO_2-optimaliseringen av BKI.

13.6.1 CO2-optimalisering i bærende sjikt

Ved å gå ned i stenderdybde fra 198 mm til 148 mm for deretter å isolere de resterende 50 millimeterne med kontinuerlig isolasjon vil trevolumet minke og isolasjonsmengden øke. Produksjonen av isolasjon har en dårligere miljøprofil enn produksjon av trevirke. Dette vil gi et større CO_2-utslipp ved oppføringen av bygget enn man ville uten å gjennomføre dette tiltaket. Det investeres altså i bedre isolerende materialer, og man ser ut ifra *Tabell 12.5* og *Figur 12.1* at dette lønner seg i dette tilfellet opp til og med for veggtykkelsen 350 mm.

For vegger med 400 mm dybde viser *Tabell 12.5* at CO_2-utslippet får negative verdier. Det vil si at veggen med 148 mm stender vil ha et høyere CO_2-utslipp enn veggen med 198 mm stender. Dette kommer av at den kontinuerlige isolasjonen (Veggplate 31) har et betydelig høyere utslipp av CO_2 ved produksjon sammenlignet med myk isolasjon for bindingsverk (Proff 34). Når da effekten av tiltiaket blir så liten, vil utslippet fra de 50 mm med ekstra kontinuerlig isolasjon bidra med et høyere utslipp enn hva det klarer å spare inn og dermed ikke være klimalønnsomt.

I følge Straube og Smegal vil det å legge et lag med kontinuerlig isolasjon på utsiden øke R-verdien på veggen mer enn hva selve R-verdien av isolasjonsmaterialet vil tilføre i seg selv [48]. En vegg av bindingsverk med stenderdimensjon 48x148 mm (bilde nr. 3 i vedlegg 17.3.1), har en R-verdi på 5,147 m²K/W. R for isolasjonsmaterialet alene er 1,471 m²K/W noe som til sammen vil gi en samlet R-verdi på 6,618 m²K/W. R-verdien for veggen av BKI50 er derimot 6,772 m²K/W. Veggens totale R-verdi er økt med mer enn hva isolasjonsmaterialets R-verdi ville tilført alene, og dette har med effekten av de brutte kuldebroene å gjøre.

Ved dette tiltaket for optimalisering av veggen legges det ikke til 50 mm isolasjon, men 50 mm med stenderverk og isolasjon blir derimot erstattet med et kontinuerlig lag av isolasjon. Da brytes altså kuldebroene og R-verdien økes med 0,768 m²K/W. Dette gjenspeiles også tydelig i U-verdi- og energiberegningene, se *Tabell 12.3* og *Tabell 12.4*. En forbedring av U-verdi på 0,019 W/m²K gir 8790 kWh spart etter 60 år. Til tross for et høyere CO_2-utslipp fra produksjonsfasen vil dette tiltaket spare kloden for 184 kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år for vegger etter TEK17-standard (*Tabell 12.5*).

Både veggen av bindingsverk og BKI har en samlet isolasjonstykkelse på 250 mm. Nøkkelfaktoren i dette tiltaket ligger i at man bryter kontinuerlige gjennomføring av trevirke fra varm inneluft, ved vertikal påforing, til kald luft ute. Lu og Memari viser til en energibesparelse på 7,11% ved å legge til 50 mm EPS på veggen. Grunnlaget for deres resultater og resultatene utarbeidet i denne oppgaven er noe forskjellig og gir ikke et gunstig sammenligningsgrunnlag. Ulike faktorer for sammenligning er blant annet veggtykkelse og det at 50 mm isolasjon blir lagt til veggen og ikke bare endres fra bindingsverk til kontinuerlig isolasjon. Ikke kjente faktorer i nevnt studie er isolasjonsmaterialets λ-verdi og veggens treandel. Ut ifra veggtykkelse 250 mm i *Tabell 12.4* ser man at tiltaket fører til en energibesparelse på 8,8% i denne rapporten. Foruten videre sammenligning bemerkes det at effekten av tiltaket går i samme retning og ligger i noenlunde samme størrelsesorden.

Ettersom isolasjon leder varme dårligere enn tre, vil temperaturen bak vindtettingen være høyere i tilfeller med tykkere lag av kontinuerlig isolasjon, altså ved stendere på 148 mm. Dette gjør at temperaturforskjellen på varm og kald side av trevirke vil være mindre i forhold til vegger med 198 mm stendere, se *Tabell 12.6*. Siden temperaturforskjeller ønsker å utligne seg vil en redusert temperaturforskjell gi et redusert varmetap. *Tabell 12.4* viser også at effekten av dette tiltaket vil minke med økende dybde av kontinuerlig isolasjon. Dette i tråd med temperaturforskjeller og varmetap. En mindre differanse i temperaturforskjell i de to tilfellene gir en mindre effekt av tiltaket.

Nå skal det poengteres at disse resultatene ikke bare baserer seg på ulik stenderdybde, men også tykkelse. Stendere med dimensjon 36x198 mm kan brukes i alle tilfeller av snø- og vindlast for småhus. For å oppnå tilnærmet samme fleksibilitet for utforming og plassering av bygning velges det å bruke en tykkelse på 48 mm ved bruk av 148 mm stenderdybde. Denne dimensjonen vil være tilstrekkelig i de aller fleste tilfeller av husbredder og laster [75]. Begrensningene ved husbredder og laster vil være større ved bruk av 36x148 mm stendere, men klimabelastningen vil samtidig være lavere. 36 mm tykke stendere vil derav anbefales for hus etter TEK17-standard i tilfeller hvor 36x148 mm stendere er tilstrekkelig.

13.6.2 CO2-optimalisering i vindtettingssjikt

Fire ulike materialer blir vurdert og sammenlignet til bruk som vindtetting. *Tabell 12.10* er grunnlaget for de neste avsnittene.

Som den klart dårligste vindtettingen ut ifra et miljøperspektiv kommer OSB til tross for den nest beste varmemotstanden (R=0,092 m²K/W). Utslipp fra MAT er derimot betydelig høyere enn de andre produktene, dette trolig på grunn av en høy densitet (600 kg/m^3), lang transportavstand og innhold av lim.

De tre gjenstående produktene er relativt jevngode, spesielt vindsperreduken og GU-gipsen, men vindsperreduken presterer dårligst blant de tre. Til tross for at vindsperreduken har den lengste transportavstanden er utslippet fra MAT lavest sammen GU-gipsen. Vindsperredukens varmemotstand er derimot den dårligste av samtlige produkter, og blir den avgjørende faktoren. Ved bruk av vindsperreduk som vindtetting kreves det også tilleggsprodukter for avstivning (f.eks. skråstag). Dette vil bidra til økt utslipp fra MAT, men blir sett bort ifra i denne oppgaven. Mangel på energi vil også bidra til høyere utslipp, men inkluderes ikke i beregningene grunnet mangel på data (Tabell?).

GU-gipsen viser som sagt den beste klimaprofilen etter produksjon. Dette trolig mye grunnet den høye andelen av resirkulert råmateriale. Med kun en liten bedring i varmemotstand (0,04 m²K/W) sammenlignet med vindsperreduken blir det også for GU-gipsen resultatene fra B6 som trekker ned klimaprestasjonen.

Asfaltplaten viser til den beste klimaprestasjonen til tross for over dobbelt så høyt utslipp fra MAT sammenlignet med både vindsperreduk og GU-gips. Asfaltplatens varmemotstand (0,245 m²K/W) derimot, skiller seg betydelig ut i positiv retning sammenlignet med de alternative produktene. Med en levetid på 60 år viser det seg i denne sammenligningen at varmemotstanden og utslipp fra bruksfasen vil være av stor betydning. Dette er helt i tråd med Folvik et al. [28]. Ved bruk av asfaltplate som vindtetting vil man kunne spare 163 kg CO_2-ekvivalenter i forhold til bruk av OSB, se *Tabell 12.10*.

13.6.3 CO2-optimalisering i påforingssjikt

Prinsippet for denne optimaliseringen er det samme som for optimalisering i bærende sjikt, nemlig å i størst mulig grad bryte kontinuerlig gjennomtrengende trevirke. Dette ettersom trevirke leder varmen bedre enn isolasjon. Ved å montere innvendig påforing horisontalt fremfor vertikalt vil ikke påforing og stendersjikt lenger være ett kontinuerlig sjikt. Da vil man i stor grad ha et dekkende lag med isolasjon på innsiden av stenderen. Det dekkende laget med isolasjon vil føre til brutte kuldebroer og en lavere temperatur på varm side av stenderen. Det betyr mindre temperaturforskjell mellom varm og kald side av stender og derav mindre varmetap.

Denne fordelen vil gjelde i feltene hvor isolasjon dekker stenderen (felt C_1 etter *Tabell 11.1*). Feltene hvor horisontal påforing krysser stender, samt ved topp- og bunnsvill vil trevirket fortsatt være kontinuerlig og lede varme på samme måte som ved vertikal påforing (felt b_1 og a etter *Tabell 11.1*).

Ved korreksjon for dører og vinduer blir det lagt til 1,2 m^2 (5% av veggareal) av feltet a, altså kontinuerlig trevirke, som vil ramme inn dører og vinduer. Tilsvarende blir det trukket fra 1,2 m^2 fra felt c2, som er et kontinuerlig isolasjonssjikt. Dette er et konservativt valg ettersom arealene som hadde forsvunnet i praksis ved innsetting av vinduer og dører ville vært både b1, b2, c1, og til og med a ved dører eller vinduer helt ned til bakkenivå. Resultatene representerer altså et *«worst-case scenario»* som ikke er sannsynlig opptredende i praksis. Effekten av horisontal påføring vil med andre ord gi en større effekt enn resultatene tilsier. Ettersom effekten av tiltaket viser seg å være av mindre betydning, vil ikke denne forenklingen ha særlige konsekvenser for hovedresultatene.

For vegger med stendertykkelse 48 mm, uten dører og vinduer, henviser SINTEF Byggforsk til en treandel på 12%. For vegger i bolighus med samme stendertykkelse henvises det til en treandel på 17% [7, s. 395]. Dette er bakgrunnen for valgt korreksjonsverdi på 5% ved overgang fra vegger uten dører og vinduer til vegger i bolighus. Hvorvidt dette er representativt for oppgavens referansehus er det ikke gjort nærmere beregninger på.

Kosny et al. konkluderer med en reduksjon i kuldebroenes effekt på 30% ved 48 mm horisontal påføring [53]. Det bemerkes at i deres tilfelle blir de 48 millimeterne lagt til veggen, i motsetning til denne oppgavens påføringssjikt som allerede er opptredende, men kun blir rotert 90 grader. Effekten av horisontal påføring er ikke like markant i denne oppgaven som Kosnys, men allikevel til stede. Endringene i U-verdien skjer i fjerde desimal bak kommaet og utgjør 409 kWh eller 14 kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år i det beste tilfellet (se *Tabell 12.12* og *12.13*). Dette utgjør ca. 7 kWh eller 0,2 kg CO_2-ekvivalenter per år hvilket kan virke nesten ubetydelig.

Ettersom det med et tykkere lag med kontinuerlig isolasjon på utsiden vil øke temperaturen bak vindsperren og derav redusere temperaturforskjellen gjennom trevirket, vil effekten av horisontal påføring bli mindre med økende tykkelse kontinuerlig isolasjon på utsiden. Dette kommer tydelig fram om man studerer differanse av tiltaket i *Tabell 12.13.*

13.6.4 Kondenskontroll

Det ble valgt å gjøre en kondenskontroll av den optimaliserte veggen ved forenklede håndberegninger ettersom det ville være meningsløst å sammenligne en vegg som ikke kunne anvendes i praksis. Mindre enn ¼ av varmemotstanden ligger på varm side av dampsperre og faller dermed ikke under kategorien av vegger som etter SINTEF Byggforsks anbefalinger bør sjekkes for kondens [54]. Samtidig konkluderer Straube og Smegal med at faren for kondens i veggen vil være mindre ved kontinuerlig isolasjon utvendig ettersom dette laget vil øke temperaturen bak dette sjiktet [48]. Ettersom det teoretisk sett ikke skulle tilsi noe fare for kondens i veggen regnes de forenklede håndberegningene som tilstrekkelig for kondenskontroll. Det bemerkes at dimensjonerende utetemperatur for vinteren i SIMIEN er -22,9 °C, mens det for kondenskontrollen velges -10°C ettersom det virker mer realistisk.

Resultatet av kondenskontrollen (*Tabell 12.14*) forteller at det ikke er fare for kondens i veggen. Det bemerkes at kontrollen er gjort på vegg med vertikal påføring innvendig. Teorien tilsier at temperaturen bak påføringen vil være noe lavere enn ved vertikal påføring [48]. Betydningen i dette tilfellet vil være minimal og om det skulle øke RF noe vil det fortsatt ikke være en reell fare for kondens.

13.6.5 Evaluering av veggtykkelse

Folvik et al. antyder at det å øke isolasjonstykkelse vil lønne seg klimamessig kun opp til en viss tykkelse. Forfatterne hevder at det vil være et utligningspunkt hvor utslippet fra økende materialmengder vil bli større enn besparelsen fra levert energi og dermed ikke lenger være klimabesparende [28]. Ettersom *Tabell 12.15* viser til stadig mindre reduksjon ved økende veggtykkelse, og siden reduksjonen til 400 mm er mindre enn hva reduksjonen tidligere synker med ville det være interessant å se resultatene for veggtykkelsen 450 mm. Denne veggen er ikke simulert, men blir estimert på bakgrunn av foreliggende verdier. Både grafen for MAT og B6 gir relativt konsekvente endringer, hvilket gir en høy sannsynlighet for at de estimerte resultatene vil være godt representative for veggen på 450 mm.

Som forventet viser 400 mm seg å være nær utligningspunktet for veggen av BKI, se *Figur 12.5*. En vegg av BKI250 vil dermed ikke lønne seg å bygge sett ifra et miljøperspektiv. Trolig vil ikke BKI200 heller være særlig realistisk å bruke i realiteten ettersom BKI150 allerede tilfredsstiller kravene til passivhusstandard. I denne oppgaven sammenlignes veggene etter konstante innvendige mål og et konstant oppvarmet volum. Dette for lettere sammenligning av veggene. Med tanke på at reguleringsplaner regulerer utbygging basert på utvendig mål, vil sammenligning av veggen etter utvendig mål kanskje vært en mer praktisk sammenligning. Hadde veggene blitt sammenlignet basert på utvendig mål ville BKI150 gitt større volumer. Større volumer vil ha sine fordeler, men det vil også kreve mer energi til oppvarming som ville gitt et høyere CO_2-utslipp for BKI150.

13.7 Sammenligning av veggsystemer

Når det gjelder boliger etter byggestandard tilsvarende TEK17 tilsier litteraturen at bruksfasen har det klart største bidraget av energi [33]. Da vil det være nærliggende å tenke at det samme også vil gjelde for CO_2-utslipp i bruksfasen. *Tabell 12.23* kan bekrefte at dette absolutt er gjeldende for vegger av B og BKI. For vegger av massivtre vil utslippet fra MAT være størst. Ettersom B6 utgjør hele 76% av bindingsverkets totale CO_2-utslipp, gir det en god grunn til å forbedre energieffektiviteten for veggen. Energieffektiviteten for BKI50 er betydelig forbedret i forhold til bindingsverk noe som gir en differanse på over 300 kg CO_2-ekvivalenter mellom de to for B6. Veggen av massivtre kommer dårligst ut i B6 med godt over 400 kg CO_2-ekvivalenter mer enn BKI50 til tross 150 mm kontinuerlig isolasjon. Ulempen for massivtre utpeker seg allerede i U-verdiberegningene hvor massivtreet akkurat oppnår kravene, mens de andre veggsystemene har mer margin til kravene. Det viser seg altså at fordelen massivtreet vil ha med lite varmetap gjennom kuldebroer ikke vil være større enn ulempen med en redusert isolasjonstykkelse tilsvarende massivtreets tykkelse.

For MAT-resultatene derimot er det bindingsverk som har det laveste CO_2-utslippet med ca. 100 kg CO_2-ekvivalenter mindre enn BKI50. Dette redusere avstanden til BKI50 noe, men det er fortsatt BKI50 som samlet gir det laveste CO_2-utslippet med 198 kg CO_2-ekvivalenter mindre enn bindingsverk. Massivtreet presterer altså dårligst også for MAT, og det med verdier opp imot 2000 kg CO_2-ekvivalenter mer enn de andre veggsystemene. *Figur 12.7* avslører *«Krysslimt tre»* som den desidert største bidragsyteren.

Dette samsvarer med den tidligere studien av Iribarren et al., om at fornybare bygningsmaterialer som er industrielt bearbeidet (f.eks limtre) er mindre miljøvennlige, slik som beskrevet i kapittel 8.1.1. Utslippet fra massivtreet fordeles ca. 50/50 på selve bearbeidingsprosessen av trevirket og på selve limet. MUF-limet, bidrar altså i stor grad til massivtreveggenes store CO_2-avtrykk. Vedlegg 17.7 viser denne fordelingen av utslipp for 1 m^3 med «krysslimt tre» (massivtre). Dette fremkommer også i studien fra Wilson, slik beskrevet i kapittel 8.9, der MUF har størst CO_2-avtrykk av alle de studerte limtypene.

For veggsystemene etter passivhusstandard er det en tydelig økning for samtlige veggsystemer i kategorien MAT, se *Tabell 12.23* og *12.25*. Peñaloza et al. henviser til en økning på 3% ved oppgradering fra byggestandard tilsvarende TEK17 til PH-standard, mens denne oppgavens resultater gir en økning på 13,6-24% [27]. Her er det BKI som har den største økningen med sine 24%. Dette til tross for at denne veggen også er slankere og har mindre materialmengder enn de alternative veggsystemene som må opp i 400 mm for å oppnå passivhusstandard. Hovedårsaken til at BKI presterer dårligere enn bindingsverk både for TEK17 og PH-standard i MAT er CO_2-utslippet fra den kontinuerlige isolasjonen, *«Veggplate 31». Tabell 12.24* og *12.26.* viser at utslippet fra *«Veggplate 31»* er betydelig høyere enn isolasjonen mellom stenderne, *«Proff 34».* Tabellene viser også at *«Veggplate 31»* er en stor utslippspost for massivtre, men blir satt litt i skyggen av utslippene fra *«Krysslimt tre».* Ettersom sjiktet med kontinuerlig isolasjon virker som å ha et betydelig forbedringspotensial for MAT ville det vært interessant for videre studier og sett på alternative materialer til *«Veggplate 31».*

Tabell 12.25 viser at B6-resultatene for PH-standard ligger innenfor en variasjon på 52 kg CO_2-ekvivalenter og utgjør en reduksjon fra TEK17 på 32-44,1%. Her er det DB som har det laveste CO_2-utslippet og BKI150 det høyeste. Ettersom BKI går fra å prestere klart best i denne kategorien etter TEK17 til å være den dårligste for PH-standard er det BKI som har den laveste reduksjonen. De andre veggsystemene reduseres henholdsvis med 42,6% og 44,1% og er ikke så langt unna verdiene som Peñaloza et al. konkluderte med i sin studie (50%) [27].

At BKI presterer dårligst for B6 har å gjøre med differanse i veggtykkelse og isolasjonsmengde. Om BKI kunne oppnådd TEK17-kravene til U-verdi for en enda slankere veggtykkelse er ikke vurdert i denne oppgaven på bakgrunn av redusert bæreevne [75]. Dermed blir det stenderdybden på bakgrunn av bæreevne som setter premissene for BKI etter TEK17 og ikke U-verdi, i motsetning til sammenligningen for PH-standard hvor bæreevne ikke er et tema. Det medfører at ved sammenligningen etter TEK17 har samtlige veggsystemer lik veggtykkelse (250 mm). For PH-standard derimot er 350 mm tilstrekkelig for BKI, samtidig som 400 mm er veggtykkelsen de alternative veggtykkelsene må opp i for å nå kravene til U-verdi. Sammenligner man B6 verdiene for 400 mm vegger i *Tabell 12.15* og *12.25*, ser man at om veggtykkelse hadde vært sammenligningsgrunnlaget ville BKI200 prestert best også for PH-standard i kategorien B6. Disse tabellene viser samtidig at BKI200 allikevel ikke ville prestert bedre enn DB totalt sett ettersom CO_2-utslippet fra MAT ville vært høyere.

En annen faktor som bidrar i positiv retning for DB er at fordelen BKI har hatt ovenfor bindingsverk med reduserte kuldebroer blir utlignet ettersom DB bryter kontinuerlig trevirke med det mellomliggende isolasjonslaget. Det er ikke bare at kuldebroene blir brutt, men at de blir brutt av et material med en betydelig bedre klimaprofil enn materialet som bryter kuldebroene for BKI. Dette

underbygger poenget til Citherlet og Defaux om at valg av material blir ekstra betydningsfullt for lavenergihus når CO_2-utslippet fra energi blir redusert og andelen fra MAT dermed øker [74].

13.8 Den store sammenhengen

Ved å bygge referansehuset etter TEK17 med CO_2-optimalisert BKI50 i stedet for vanlig bindingsverk vil det spare miljøet for 198 kg CO_2-ekvivalenter i løpet av husets levetid på 60 år. 184 kg CO_2-ekvivalenter kan bli spart ved optimalisering i bærende sjikt og 14 kg CO_2-ekvivalenter i påforingssjikt. I vindtettingssjiktet var det 163 kg CO_2-ekvivalenter i forskjell på vindtettingsproduktene, men asfaltplaten som det beste produktet var utgangspunktet for veggen og får dermed ingen effekt for CO_2-optimalisering.

For å se oppgavens resultater i en større sammenheng tas markedspotensialet i betraktning. 198 kg CO_2-ekvivalenter fordelt på referansehusets veggareal, ekskludert vinduer og dører, gir en besparelse på 2,5 kg CO_2-ekvivalenter/m² vegg. Dette vil være beregnet besparelse som er gjeldende i dette spesifikke tilfellet. Tar man utgangspunkt i *Tabell 8.2* og antar at samtlige av disse byggene har en omkrets på 40 m, to etasjer med etasjehøyde på 2,4 m og et dør- og vindusareal på 25%, ville CO_2-besparelsen ved å benytte BKI50 fremfor vanlig bindingsverk være over 19 070 tonn CO_2-ekvivalenter.

Bruk av BKI kan være et godt alternativ også for utfyllende vegger mellom søyler i større bygg. *Tabell 8.3* viser til over 10 000 slike bygg. Det er ikke bygget på langt nær like mange slike bygg som småhus, men tar man størrelsen på disse byggene i betraktning sammenlignet med småhusene vil det helt klart være et stort potensial for å kunne spare enda noen tusen tonn CO_2-ekvivalenter. Med tanke på at bæreevne i slike tilfeller ikke vil være av betydning kunne det også være interessant å utforske effekten av å redusere stenderdybde ytterligere til 98 mm.

14 Konklusjon

For å konkludere denne oppgaven velges det først å besvare underspørsmålene for så å besvare hovedspørsmålet.

Underspørsmål

- **På hvilke måter kan en yttervegg av bindingsverk med kontinuerlig utvendig isolasjon optimaliseres for lavere CO_2-avtrykk?**

  Det er sett på muligheten for å CO_2-optimalisere veggen i bindingsverk med kontinuerlig isolasjon i bærende-, vindtettings- og påforingssjiktet. Optimaliseringen i bærende sjikt viser seg som den mest effektive med en besparelse på 184 kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år. Valg av produkt i vindtettingssjiktet har også stor betydning. Differansen mellom OSB-plate og asfaltplate er 163 kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år til fordel for asfaltplaten som er produktet med den beste klimaprestasjonen. Ettersom asfaltplaten var utgangspunktet i vindtettingssjiktet, blir det ingen CO_2-reduksjon for veggen i dette sjiktet. Tiltaket ved horisontal påforing fremfor vertikal påforing viser seg å være av mindre betydning med en besparelse på 14 kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år i det beste tilfellet.

- **Hvordan kommer yttervegger av bindingsverk med kontinuerlig utvendig isolasjon ut miljømessig sammenlignet med et veggsystem av bindingsverk og massivtre etter TEK17- og passivhusstandard?**

  Vegger av bindingsverk med kontinuerlig utvendig isolasjon (BKI) har de beste egenskapene fra begge de alternative veggsystemene. Isolasjonsdybden til bindingsverket og kontinuerlig isolasjon fra massivtre. For sammenligning etter TEK17 fører den miljøoptimaliserte veggen av BKI til det laveste CO_2-utslippet fra avgitt energi gjennom 60 år. Denne veggen har 302 kg CO_2-ekv. mindre utslipp fra fase B6 enn veggen av bindingsverk. Likevel har BKI en noe høyere klimabelastning enn bindingsverk for CO_2-utslipp fra materialer, som følge av en dårligere klimaprofil for den kontinuerlige isolasjonen. Det samlede resultatet viser at BKI50 slipper ut 198 kg CO_2-ekvivalenter mindre i løpet av levetiden enn vegger av bindingsverk som er det nest beste alternativet.

  For sammenligning etter passivhusstandard er det dobbelt bindingsverk (DB) som viser seg å være det beste alternativet. Fordelen med brutte kuldebroer som BKI har hatt ovenfor bindingsverk er utlignet med DBs mellomliggende isolasjonssjikt. BKI oppnår PH-standard med en mindre isolasjonstykkelse og ligger tettere opp imot U-verdikravene. Dette gir høyere utslipp fra avgitt energi i bruksfase, samtidig som differanse i utslipp fra materialer har økt ytterligere. 265 kg CO_2-ekvivalenter skiller DB fra BKI150 som er det nest beste alternativet.

  Massivtreveggen skiller seg ut med et utslipp på over 2000 kg CO_2-ekv. mer enn BKI. Dette er tilfellet for begge byggestandardene. En viktig årsak til dette store utslippet til massivtreveggen kommer fra MAT, og skyldes hovedsakelig produksjonen av massivtre-elementene.

Hovedspørsmål

- **Hvordan kommer yttervegger av bindingsverk med kontinuerlig utvendig isolasjon ut i et miljøperspektiv?**

  En yttervegg i bindingsverk med kontinuerlig utvendig isolasjon viser seg å ha en god effekt på energieffektiviteten til veggen, spesielt for vegger etter byggestandarden TEK17. Den kontinuerlige isolasjonen valgt i denne oppgaven har en dårligere klimaprofil enn isolasjonen mellom stenderne. Det viser seg at ved å øke tykkelsen på den kontinuerlige isolasjonen vil CO_2-utslippet fra økt materialmengde være større enn CO_2-utslippet spart fra økt energieffektivitet. Vegger i bindingsverk med kontinuerlig utvendig isolasjon vil av den grunn være å anbefale kun for vegger etter TEK17-standard.

15 Anbefalinger

Gjennom oppgavens forløp dukket det opp følgende områder som kunne være interessante å jobbe videre med.

- CO_2-optimalisering i bærende sjikt viser seg å gi størst effekt. Det vil derav være interessant å se på om ytterligere forbedringer er mulige for dette sjiktet, f.eks. med 48x98 mm stendere for utfyllende vegger i større bygg.

- Den kontinuerlige isolasjonen viser seg å ha god effekt på energieffektiviteten på vegger etter TEK17-standard. CO_2-utslippet for den kontinuerlige isolasjonen viser seg derimot å være mindre heldig for kategorien MAT. Her identifiseres et større forbedringspotensial og det vil av den grunn være interessant å sammenligne alternative produkter til «Veggplate31».

- I forbindelse med litteraturstudiet ble det påpekt at materialer som tre og isolasjon er spesielt sensitive, og endringer rundt disse materialene kan derav utgjøre større variasjoner for det endelige resultatet [23]. For å identifisere hvor stor påvirkning disse materialene har på det totale resultatet, samt identifisere resultatenes robusthet ville en sensitivitetsanalyse være interessant for denne oppgaven.

16 Referanser

[1] Miljødirektoratet. 2020. *Ekstremvær* [Online]. Hentet fra: https://miljostatus.miljodirektoratet.no/Ekstremvar/. Lastet ned: 27.05.

[2] FN-sambandet. 2019. *Klimaendringer* [Online]. Hentet fra: https://www.fn.no/tema/klima-og-miljoe/klimaendringer. Lastet ned: 04.06.

[3] FN-Sambandet. 2020. *Fns bærekraftsmål* [Online]. Hentet fra: https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal. Lastet ned: 28.05.

[4] FM-sambandet. 2020. *Parisavtalen* [Online]. Hentet fra: https://www.fn.no/Om-FN/Avtaler/Miljoe-og-klima/Parisavtalen. Lastet ned: 20.03.

[5] Global Alliance for Buildings and Construction, International Energy Agency og United Nations Environment Programme, "2019 global status report for buildings and construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector," United Nations Environment Programme2019, [Online], http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30950/2019GSR.pdf?sequence=1&isAllowed=y, Lastet ned: 27.05.20.

[6] M. L. Brusseau. 2019. *Sustainable development and other solutions to pollution and global change* [Online]. Hentet fra: https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/life-cycle-assessment. Lastet ned: 28.05.

[7] K. I. Edvardsen, *Trehus*, [10. utg.]. utg. (Sintef byggforsk håndbok (trykt utg.)). Oslo: SINTEF akademisk forl., 2014.

[8] A. O. Berg, C. Clapp, E. Lannoo og G. Peters, "Climate scenarios demystified. A climate scenario guide for investors," *CICERO Report,* 2018.

[9] B. Aamaas, H. A. Aaheim, K. Alnes, B. v. Oort, H. Dannevig og T. Hønsi, "Oppdatering av kunnskap om konsekvenser av klimaendringer i norge," *CICERO Report,* 2018.

[10] Regjeringen.no. 2017. *Nytt anskaffelsesregelverk* [Online]. Hentet fra: https://www.regjeringen.no/no/tema/naringsliv/konkurransepolitikk/offentlige-anskaffelser-/forste-kolonne/nytt-anskaffelsesregelverk/id2518659/.

[11] C. Initiative, "Buildings and climate change," 2009.

[12] I. Hanssen-Bauer *et al.*, "Climate in norway 2100," *Background information to NOU Climate adaptation (In Norwegian: Klima i Norge 2100. Bakgrunnsmateriale til NOU Klimatilplassing), Oslo: Norsk klimasenter,* 2017.

[13] V. Thorgersen, "Klimaendringer kan føre til større flommer og skred–er dagens farekartlegginger gode nok?," NTNU, 2019.

[14] *Goal and scope definition in life cycle assessment* (Lca compendium – the complete world of life cycle assessment). Dordrecht: Springer Netherlands, Dordrecht, 2017.

[15] G. Rebitzer *et al.*, "Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications," *Environment international,* vol. 30, nr. 5, s. 701-720, 2004.

[16] U. S. E. P. Agency. 2020. *Risk management sustainable technology* [Online]. Hentet fra: https://web.archive.org/web/20120423181158/http://www.epa.gov/nrmrl/std/lifecycle.html. Lastet ned: 29.01.

[17] S. Wærp. 2019. *Epd - miljødeklarasjon av byggematerialer*. Hentet fra: https://www.sintef.no/epd-miljodeklarasjon-av-byggematerialer/. Lastet ned: 07.06.

[18] M. A. Curran, "Overview of goal and scope definition in life cycle assessment," i *Goal and scope definition in life cycle assessment*, M. A. Curran, red. Dordrecht: Springer Netherlands, 2017, s. 1-62.

[19] C. K. Anand og B. Amor, "Recent developments, future challenges and new research directions in lca of buildings: A critical review," *Renewable and sustainable energy reviews,* vol. 67, s. 408-416, 2017.

[20] LCA.no. 2019. *4.2.19 declared or functional unit (deklarert eller funksjonell enhet)* [Online]. Hentet fra: https://lca45.zendesk.com/hc/no/articles/360022666773-4-2-19-Declared-or-functional-unit-deklarert-eller-funksjonell-enhet-. Lastet ned: 30.01.

[21] K. Holthe, K. Folvik, T. E. Kalbakk og T. F. Kristjansdottir, "Metode for miljøvurdering (lca) av bygninger – dagens praksis og anbefalinger," SINTEF Byggforsk2011, [Konsensus], https://docplayer.me/22535527-Metode-for-miljovurdering-lca-av-bygninger-dagens-praksis-og-anbefalinger-rapport-delprosjekt-1-konsensus-arena.html#show_full_text, Lastet ned: 16.03.2020.

[22] K. Olerud. 2016. *Co2-ekvivalenter*. Hentet fra: https://snl.no/CO2-ekvivalenter. Lastet ned: 07.06.

[23] I.-F. Häfliger *et al.*, "Buildings environmental impacts' sensitivity related to lca modelling choices of construction materials," *Journal of Cleaner Production,* vol. 156, s. 805-816, 2017/07/10/ 2017.

[24] E. Hoxha, G. Habert, S. Lasvaux, J. Chevalier og R. Le Roy, "Influence of construction material uncertainties on residential building lca reliability," *Journal of Cleaner Production,* vol. 144, s. 33-47, 2017/02/15/ 2017.

[25] *Bærekraftige byggverk : Miljødeklarasjoner : Grunnleggende produktkategoriregler for byggevarer = sustainability of construction works : Environmental product declarations : Core rules for the product category of construction products* (Norsk standard). Oslo: Standard Norge, 2013.

[26] B. Petrovic, J. A. Myhren, X. Zhang, M. Wallhagen og O. Eriksson, "Life cycle assessment of a wooden single-family house in sweden," *Applied Energy,* vol. 251, s. 113253, 2019.

[27] D. Peñaloza, J. Norén og P.-E. Eriksson, "Life cycle assessment of different building systems: The wälludden case study," utg., 2013.

[28] K. Folvik, K. Holthe og H. Einstabland, "Life cycle assessment of energy efficient timber frame outer walls–does thicker insulation pay off," i *2011 Helsinki World Sustainable Building Conference Proceedings*, 2011, nr. s 236, s. 237.

[29] D. Iribarren, A. Marvuglia, P. Hild, M. Guiton, E. Popovici og E. Benetto, "Life cycle assessment and data envelopment analysis approach for the selection of building components according to their environmental impact efficiency: A case study for external walls," *Journal of Cleaner Production,* vol. 87, s. 707-716, 2015/01/15/ 2015.

[30] A. Dodoo, L. Gustavsson og R. Sathre, "Lifecycle carbon implications of conventional and low-energy multi-storey timber building systems," *Energy and Buildings,* vol. 82, s. 194-210, 2014/10/01/ 2014.

[31] J. Monahan og J. C. Powell, "An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework," *Energy and Buildings,* vol. 43, nr. 1, s. 179-188, 2011/01/01/ 2011.

[32] S. Wærp, C. Grini, K. Folvik og J. Svanæs, "Livsløpsanalyser (lca) av norske treprodukter," SINTEF Byggforsk, B 22039, 2009, [Prosjektrapport], https://www.sintefbok.no/book/index/571/livsloepsanalyser_lca_av_norske_treprodukter, Lastet ned: 16.03.2020.

[33] L. Gustavsson og A. Joelsson, "Life cycle primary energy analysis of residential buildings," *Energy and Buildings,* vol. 42, nr. 2, s. 210-220, 2010.

[34] H. L. Raadal, I. S. Modahl og K.-A. Lyng, "Klimaregnskap for avfallshåndtering, fase i og ii," Østfoldforskning, OR.18.09, 2009, [Oppdragsrapport], https://www.ostfoldforskning.no/media/1197/1809.pdf, Lastet ned: 17.03.2020.
[35] Miljødirektoratet. 2019. *Deponering av avfall* [Online]. Hentet fra: https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/avfall/avfallshandtering/deponering-av-avfall/. Lastet ned: 01.04.
[36] SimaPro.com. 2020. *About simapro* [Online]. Hentet fra: https://simapro.com/about/. Lastet ned: 31.01.
[37] Ecoinvent. 2020. *About ecoinvent* [Online]. Hentet fra: https://www.ecoinvent.org/about/about.html. Lastet ned: 06.06.
[38] Ecoinvent. 2020. *Allocation at the point of substitution* [Online]. Hentet fra: https://www.ecoinvent.org/database/system-models-in-ecoinvent-3/apos-system-model/allocation-at-the-point-of-substitution.html. Lastet ned: 06.06.
[39] Ecoinvent. 2020. *Allocation cut-off by classification* [Online]. Hentet fra: https://www.ecoinvent.org/database/system-models-in-ecoinvent-3/cut-off-system-model/allocation-cut-off-by-classification.html. Lastet ned: 06.06.
[40] R. Speck, S. Selke, R. Auras og J. Fitzsimmons, "Life cycle assessment software: Selection can impact results," *Journal of Industrial Ecology,* vol. 20, nr. 1, s. 18-28, 2016.
[41] D. Silva, A. O. Nunes, A. da Silva Moris, C. Moro og T. O. R. Piekarski, "How important is the lca software tool you choose comparative results from gabi, openlca, simapro and umberto," i *VII Conferencia Internacional de anáLisis de Ciclo de Vida En Latinoamérica*, 2017.
[42] Rådgivende Ingeniørers Forening. 2020. *Bygningsfysikk* [Online]. Hentet fra: https://www.rif.no/fag-og-marked/ekspertgrupper/bygningsfysikk/. Lastet ned: 29.01.
[43] S. Uvsløkk, "Beregning av u-verdier etter ns-en iso 6946," SINTEF Byggforsk, 471.008, 2018, [Anvisning], https://www.byggforsk.no/dokument/208/beregning_av_u-verdier_etter_ns-en_iso_6946, Lastet ned: 31.01.2020.
[44] *Bygningskomponenter og -elementer : Varmemotstand og varmegjennomgang : Beregningsmetode (iso 6946:2007) = building components and building elements : Thermal resistance and thermal transmittance : Calculation method (iso 6946:2007)* (Norsk standard). Lysaker: Pronorm, 2007.
[45] H. Høilund-Kaupang, "Kuldebroer. Typer, konsekvenser og bruk av normalisert kuldebroverdi," SINTEF Byggforsk, 472.001, 2019, [Anvisning], https://www.byggforsk.no/dokument/5206/kuldebroer_typer_konsekvenser_og_bruk_av_normalisert_kuldebroverdi, Lastet ned: 03.02.2020.
[46] A. Gustavsen *et al.*, "Kuldebroer–beregning, kuldebroverdier og innvirkning på energibruk," 2008.
[47] SINTEF Byggforsk, "Kuldebroer i godt isolerte bygninger."
[48] J. Straube og J. Smegal, "Building america special research project—high-r walls case study analysis," Building Science Corporation2009.
[49] L. Wijnants, K. Allacker og F. De Troyer, "Life-cycle assessment of timber frame constructions–the case of rooftop extensions," *Journal of cleaner production,* vol. 216, s. 333-345, 2019.
[50] R. Lowe og M. Bell, "Building regulation and sustainable housing. Part 2: Technical issues," *Structural Survey,* 2000.

[51] X. Lu og A. Memari, "Comparative energy analysis and life-cycle assessment of innovative residential wall systems in cold regions," *Practice Periodical on Structural Design and Construction,* vol. 24, nr. 3, s. 04019015, 2019.

[52] M. Bell og P. Overend, "Building regulation and energy efficiency in timber frame housing," i *Proceedings of the Construction and Building Research Conference, Edited by John Kelly and Kirsty Hunter, Glasgow Caledonian University*, 2001, s. 3-5.

[53] J. Kosny, A. Asiz, I. Smith, S. Shrestha og A. Fallahi, "A review of high r-value wood framed and composite wood wall technologies using advanced insulation techniques," *Energy and buildings,* vol. 72, s. 441-456, 2014.

[54] P. Blom, "Bygg tett - og ventiler rett!," SINTEF Byggforsk, Oslo, 9788253612768, 2012, vol. 98 [Prosjektrapport], https://www.sintef.no/globalassets/upload/byggforsk/fagartikler/v_info_pub_utgivelser_prosjektrapport_sintef-byggforsk-prosjektrapporter_sb-prrapp-98_nett_sb-prprapp-98.pdf, Lastet ned: 04.02.2020.

[55] I. Hole og T. Aurlien, "Lufttetting av bygninger. Framgangsmåte for å oppnå lavt lekkasjetall," SINTEF Byggforsk, 520.401, 2013, [Anvisning], https://www.byggforsk.no/dokument/4110/lufttetting_av_bygninger_framgangsmaate_for_aa_oppnaa_lavt_lekkasjetall, Lastet ned: 31.01.2020.

[56] I. Hole, "Dokumentasjon av passivhus og lavenergibygninger i henhold til ns 3700 og ns 3701," SINTEF Byggforsk, 473.015, 2013, [Anvisning], https://www.byggforsk.no/dokument/4109/dokumentasjon_av_passivhus_og_lavenergibygninger_i_henhold_til_ns_3700_og_ns_3701, Lastet ned: 31.01.2020.

[57] Direktoratet for byggkvalitet. 2020. *Byggteknisk forskrift (tek17) med veiledning* [Online]. Hentet fra: https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/14/14-2/. Lastet ned: 31.01.

[58] T. Bøhlerengen, "Fukt i bygninger. Teorigrunnlag," SINTEF Byggforsk, 421.132, 2018, [Anvisning], https://www.byggforsk.no/dokument/184/fukt_i_bygninger_teorigrunnlag, Lastet ned: 29.01.2020.

[59] S. Geving, "Kondens på kalde overflater. Årsaker og tiltak," SINTEF Byggforsk, 740.111, 2007, [Anvisning], https://www.byggforsk.no/dokument/705/kondens_paa_kalde_overflater_aarsaker_og_tiltak, Lastet ned: 29.01.2020.

[60] J. V. Thue, *Bygningsfysikk : Grunnlag*. Bergen: Fagbokforl., 2016.

[61] *Bygningskomponenters og bygningsdelers hygrotermiske egenskaper - innvendig overflatetemperatur for å unngå kritisk overflatefuktighet og kondensasjon i mellomrom - beregningsmetoder = hygrothermal performance of building components and building elements - internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - calculation methods (iso 13788:2012)* (Norsk standard). Lysaker: Norsk Standard, 2012.

[62] ProgramByggerne. 2020. *Simien* [Online]. Hentet fra: http://www.programbyggerne.no/. Lastet ned: 29.01.

[63] Glen Dimplex Nordic AS. Ukjent år. *Hvor stor panelovn trenger jeg?* [Online]. Hentet fra: https://www.glendimplex.no/produkter/kjoepshjelp/hvor-mye-varme-trenger-jeg/. Lastet ned: 25.02.

[64] T. I. Bøhn, "Beregningsgrunnlag energirammer til nye energiregler 2015," Multiconsult2015, [Notat], https://dibk.no/globalassets/energi/beregningsgrunnlag-for-nye-energirammer-i-tek-2015.pdf, Lastet ned: 25.02.2020.

[65] Regjeringen.no. 2020. *Direktoratet for byggkvalitet* [Online]. Hentet fra: https://www.regjeringen.no/no/dep/kmd/org/etater-og-virksomheter-under-kommunal--og-moderniseringsdepartementet/underliggende-etater/direktoratet-for-byggkvalitet-/id85812/. Lastet ned: 24.01.

[66] Direktoratet for byggkvalitet. 2017. *Byggteknisk forskrift (tek17) med veiledning* [Online]. Hentet fra: https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/. Lastet ned: 24.01.

[67] Direktoratet for byggkvalitet. 2020. *§ 14-2. Krav til energieffektivitet* [Online]. Hentet fra: https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/14/14-2/. Lastet ned: 28.01.

[68] S. Geving, "Yttervegger over terreng. Egenskaper og konstruksjonsprinsipper. Krav og anbefalinger," SINTEF Byggforsk, 523.002, 2008, [Anvisning], https://www.byggforsk.no/dokument/348/yttervegger_over_terreng_egenskaper_og_konstruksjonsprinsipper_krav_og_anbefalinger, Lastet ned: 03.02.2020,.

[69] Enova, "Hjelp til deg som skal kjøpe eller bygge passivhus," 09, 2011, [Veileder], https://www.enova.no/upload_images/085B53DE13A542D1809A93605BB8BC5A.pdf.

[70] *Kriterier for passivhus og lavenergibygninger - boligbygninger*, NS 3700, 2013.

[71] I. Hole. 2013. *Generelt om passivhus. Valg og konsekvenser* [Online]. Hentet fra: https://www.byggforsk.no/dokument/4108/generelt_om_passivhus_valg_og_konsekvenser. Lastet ned: 28.01.

[72] J. Kneifel, "Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings," *Energy and Buildings,* vol. 42, nr. 3, s. 333-340, 2010/03/01/ 2010.

[73] G. Verbeeck og H. Hens, "Life cycle optimization of extremely low energy dwellings," *Journal of Building Physics,* vol. 31, nr. 2, s. 143-177, 2007.

[74] S. Citherlet og T. Defaux, "Energy and environmental comparison of three variants of a family house during its whole life span," *Building and Environment,* vol. 42, nr. 2, s. 591-598, 2007.

[75] T. Ø. Ramstad, "Bindingsverk av tre i småhus. Dimensjonering og utførelse," 523.251, 2014, [Online], https://www.byggforsk.no/dokument/358/bindingsverk_av_tre_i_smaahus_dimensjonering_og_utfoerelse, Lastet ned: 01.04.2020.

[76] P. G. Schild, "U-verdier. Vegger over terreng med bindingsverk av tre med kontinuerlig utvendig isolasjon," 471.411, 2012, [Anvisning], https://www.byggforsk.no/dokument/4046/u-verdier_vegger_over_terreng_med_bindingsverk_av_tre_med_kontinuerlig_utvendig_isolasjon#i22, Lastet ned: 25.03.2020.

[77] T. Bøhlerengen, "Passivhus i tre. Eksempler på detaljer for varmeisolering og tetting," 472.435, 2012, [Anvisning], https://www.byggforsk.no/Document/Index/4036/?gclid=CjwKCAjwguzzBRBiEiwAgU0FT50Q54kz48Fjxbcivcuy4hC8eC3w-mMoyZ4Yp0FkjkMDYztMlysWmhoCf_wQAvD_BwE#i61, Lastet ned: 25.03.2020.

[78] GLAVA Isolasjon. *Bindingsverk med glava veggplate 31* [Online]. Hentet fra: https://www.glava.no/bygg/losninger/byggkonstruksjoner/yttervegg/bindingsverk-med-glava-veggplate-31/. Lastet ned: 26.03.

[79] GLAVA Isolasjon. *Bindingsverk med glava pluss system* [Online]. Hentet fra: https://www.glava.no/bygg/losninger/byggkonstruksjoner/yttervegg/bindingsverk-med-glava-pluss-system/. Lastet ned: 26.03.

[80] J. B. Wilson, "Life-cycle inventory of formaldehyde-based resins used in wood composites in terms of resources, emissions, energy and carbon," *Wood and fiber science,* vol. 42, s. 125-143, 2009.
[81] R. Løvaas. 2009. *Massivtrebygging* [Online]. Hentet fra: https://snl.no/massivtrebygging. Lastet ned: 30.01.
[82] J. Aarstad, G. Glasø og A. Bunkholt, "Massivtre," *Fokus på tre,* [Online] nr. 20, 2011.
[83] T. Kristensen, "Massive treelementer. Typer og bruksområder," SINTEF Byggforsk, 520.205, 2001, [Anvisning], https://www.byggforsk.no/dokument/3009/massive_treelementer_typer_og_bruksomraader, Lastet ned: 03.02.2020,.
[84] G. Raade, N. Christensen, N. Ryum og B. Pedersen. 2020. *Gips* [Online]. Hentet fra: https://snl.no/gips. Lastet ned: 26.02.
[85] Klima- og miljødepartementet (KLD). 2019. *Gipsplater* [Online]. Hentet fra: https://www.byggogbevar.no/enoek/groenne-materialvalg/bygningsplater/gipsplater. Lastet ned: 26.02.
[86] K. Bramslev, R. Hagen og H. M. Haupt, "Grønn materialguide veileder i miljøriktig materialvalg," Direktoratet for byggkvalitet, Husbanken, Grønn Byggallianse, Context AS,06 2017, vol. 2.2 [Veileder], https://byggalliansen.no/wp-content/uploads/2018/11/Gronn-Materialeguide-V2.pdf, Lastet ned: 01.04.2020.
[87] Norgips. Ukjent år. *Bærekraft* [Online]. Hentet fra: https://norgips.no/prosjektering/dokumentasjon-og-godkjenninger/epd-milj%C3%B8deklarasjon. Lastet ned: 27.02.
[88] Kjell Helge Solli og G. Glasø, "Trebaserte plater," *FOKUS på tre,* [Online] nr. 26, 2011.
[89] T. Tjelflaat, "Avfallsguide," IVAR05 2014, vol. 3 [Veileder], https://www.ivar.no/getfile.php/1354450-1443684969/Ivar%20bilder/Fotoarkiv/Avfallsguide_LR.pdf, Lastet ned: 02.04.2020.
[90] "Isola soft xtra," ISOLA AS, NEPD-1472-492-EN, 08.06 2016, [EPD,], https://media.bluestonepim.com/571075b9-1b51-47ff-b416-bc99a7eef69d/c2833d07-95bb-44a8-b78a-bd3ec2c1579e/iI0TICgRsfRjv4JyE4FgCPjgG/dw6MgKqFBvyBo7sdElBq0AtJR.pdf, Lastet ned: 02.04.2020.
[91] "Gram dampsperre," Tommen Gram Folie AS, NEPD-341-230-NO, 24.07 2015, [EPD,], https://drive.google.com/drive/folders/1vutyr0wwp43OrxhYoVB-9kEcPEUVVQNB, Lastet ned: 02.04.2020.
[92] S. Wærp, "Byggevarer - egnethet for materialgjenvinning," SINTEF Byggforsk, 470.114, 08 2012, [Anvisning], https://www.byggforsk.no/dokument/4040/byggevarer_egnethet_for_materialgjenvinning, Lastet ned: 16.04.2020.
[93] Bygg og bevar. 2019. *Isolasjonsmaterialer a - å* [Online]. Hentet fra: https://www.byggogbevar.no/enoek/artikler/isolasjonsmaterialer-a-%C3%A5. Lastet ned: 06.02.
[94] "Glava glass wool," Glava AS, NEPD-1696-683-EN, 28.01 2019, [EPD].
[95] J. Sierra-Pérez, J. Boschmonart-Rives og X. Gabarrell, "Environmental assessment of façade-building systems and thermal insulation materials for different climatic conditions," *Journal of Cleaner Production,* vol. 113, s. 102-113, 2016/02/01/ 2016.

[96] Bygg og bevar. 2019. *Glassull* [Online]. Hentet fra: https://www.byggogbevar.no/enoek/groenne-materialvalg/isolasjon/glassull. Lastet ned: 03.04.
[97] B. N. Leland, "Prosjektering for ombruk og gjenvinning," RIF – Rådgivende Ingeniørers Forening ISBN 978-82-91510-87-3 03 2008, [Veileder], RIF – Rådgivende Ingeniørers Forening Lastet ned: 02.04.2020.
[98] GLAVA AS. *Biprodukter fra glassull får nytt liv i leca®* [Online]. Hentet fra: https://www.glava.no/om-glava/presse/biprodukter-fra-glassull-far-nytt-liv-i-leca/. Lastet ned: 02.04.
[99] M. Foslie. 2019. *Tre - egenskaper* [Online]. Hentet fra: https://snl.no/tre - _egenskaper. Lastet ned: 05.02.
[100] A. Sagen, "Tre som byggemateriale," i *Trekonstruksjoner med spikerplater*: Norske Takstolprodusenters Forening – NTF, 1999.
[101] R. Sedjo, "Comparative life cycle assessments: Carbon neutrality and wood biomass energy," vol. 06E001, utg.: Resources For the Future, 2013.
[102] T. S. Plesser og T. F. Kristjansdottir, "Metodiske valg og problemstillinger ved livsløpsvurdering (lca)," SINTEF Byggforsk, 470.102, 2015, [Anvisning], https://www.byggforsk.no/dokument/4144/metodiske_valg_og_problemstillinger_ved_livsloepsvurdering_lca, Lastet ned: 03.02.2020,.
[103] S. M. Tomter og L. S. Dalen, *Bærekraftig skogbruk i norge*. Norsk institutt for skog og landskap, 2014.
[104] G. Hylen og L. S. Dalen, "Klimagasser og skog - ikke med i kyotoavtalen: Skog gjør norge mer klimavennlig," i *Samfunnsspeilet*Statistisk sentralbyrå: Statistisk sentralbyrå, 2008, s. 25.
[105] L. Gustavsson, K. Pingoud og R. Sathre, "Carbon dioxide balance of wood substitution: Comparing concrete- and wood-framed buildings," *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,* vol. 11, nr. 3, s. 667-691, 2006/05/01 2006.
[106] A. Dodoo, L. Gustavsson og R. Sathre, "Chapter 11 - recycling of lumber," i *Handbook of recycling*, E. Worrell og M. A. Reuter, red. Boston: Elsevier, 2014, s. 151-163.
[107] Statistisk sentralbyrå. 2020. *Bygningsmassen*. Hentet fra: https://www.ssb.no/bygg-bolig-og-eiendom/statistikker/bygningsmasse. Lastet ned: 29.04.
[108] S. Geving, *Fukt i bygninger* (Håndbok (norges byggforskningsinstitutt : Trykt utg.)). Oslo: Norges byggforskningsinstitutt, 2002.
[109] B.-Å. Petersson, *Tillämpad byggnadsfysik*, 6. utg. utg. Lund: Studentlitteratur, 2018.
[110] Berit Time og K. L. Friquin, "Materialdata for vanndamptransport," SINTEF Byggforsk, 573.430, 2003, [Anvisning], https://www.byggforsk.no/dokument/606/materialdata_for_vanndamptransport, Lastet ned: 03.03.2020.
[111] M. A. Curran, *Goal and scope definition in life cycle assessment*," nr. Issue, s. Pages, E-Pub, [Online]. Hentet fra:
[112] H. T. Baumann, Anne-M., *The hitch hiker's guide to lca*, 1:9 utg. Lund: Studentlitteratur AB, 2004.
[113] (2004). *The product, functional unit and reference flows in lca*. [Type of Work].
[114] 2002. *Lca-kurs - en innføring i livssyklusvurderinger*. Hentet fra: http://www.sto-projects.com/lcakurs/index6.asp. Lastet ned: 13.05.

[115] "Structural timber of spruce and pine," Norwegian Wood Industry Federation, NEPD-308-179-EN, 09.03 2015, [EPD], https://www.epd-norge.no/getfile.php/135816-1481285791/EPDer/Byggevarer/Heltreprodukter/NEPD-308-179-EN_Structural-timber--English-version.pdf, Lastet ned: 04.06.2020.

17 Vedlegg

17.1 Beregningsgrunnlag

	λ	R	δp	δv	Zp	Zv	
	W/mK	m²K/W	kg/(msPa)	m²/s	m²sPa/kg	s/m	Valgt verdi
Ventilert kledning og utvendig varmemotstand		0,130					
Hunton asfaltplate	0,049				2,05E+09	1,54E+04	
Vindduk		0,030			4,00E+07	3,01E+02	
OSB	0,130			0,54-0,9E-6		16666,6667	*Velger δv = 0,72
GU-gips		0,040			5,00E+08	3,76E+03	
Isolasjon	0,034			15-24E-6			*Velger δv = 19,5E-6
Trevirke	0,130			5,30E-07			
Massivtre	0,130			2,60E-07		3,85E+05	
Dampsperre		0,030					
Gips		0,060	2,20E-11	2,93E-06		4,43E+03	
Innvendig varmeovergangsmotstand		0,130					

17.2 BKI

17.2.1 U-verdiberegninger

Eksempel på U-verdiberegning med flere felt a, b1, b2, c1 og c2 (horisontal påføring).

BKI50 - asfalt
Veggtykkelse 250 mm

Øvre grenseverdi

Sjikt	d [m]	λ [W/mK]	Ra [m²K/W]	Rb1 [m²K/W]	Rb2 [m²K/W]	Rc1 [m²K/W]	Rc2 [m²K/W]
Ventilert kledning og utvendig varmemotstand			0,130	0,130	0,130	0,130	0,130
Isolasjon	0,050	0,034	1,471	1,471	1,471	1,471	1,471
Hunton asfaltplate	0,012	0,049	0,245	0,245	0,245	0,245	0,245
Isolasjon	0,148	0,034			4,353		4,353
Trevirke	0,148	0,130	1,138	1,138		1,138	
Dampsperre			0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
Isolasjon	0,048	0,034				1,412	1,412
Trevirke	0,048	0,130	0,369	0,369	0,369		
Gips	0,013		0,060	0,060	0,060	0,060	0,060
Innvendig varmeovergangsmotstand			0,130	0,130	0,130	0,130	0,130
Sum varmemotstand			3,573	3,573	6,788	4,616	7,830
Total varmemotstand, øvre grenseverdi			6,658				

Nedre grenseverdi

Sjikt	d [m]	λ [W/mK]	R_{lagert} [m²K/W]
Ventilert kledning og utvendig varmemotstand			0,130
Isolasjon	0,050	0,034	1,471
Hunton asfaltplate	0,012	0,049	0,245
Isolasjon	0,148	0,034	
Trevirke	0,148	0,130	3,913
Dampsperre			0,030
Isolasjon	0,048	0,034	
Trevirke	0,148	0,130	0,992
Gips	0,013		0,060
Innvendig varmeovergangsmotstand			0,130
Sum varmemotstand nedre grenseverdi			6,970

Andel av areal	m²	%
a	0,960	0,040
b1	1,324	0,055
b2	1,316	0,055
c1	1,866	0,078
c2	18,534	0,772
SUM	24	1,000

Krav TEK 17: U ≤ 0,18
Krav Passivhus-standard: U ≤ 0,11

R_T= (Røvre+Rnedre) / 2 = 6,814

U= $1/R_T + \Delta U$ = 0,1468 → TEK 17: OK

17.2.2 Energiberegninger

Fordeling av varmetap fra de ulike bygningsdelene.

BKI50 - asfaltplate						
Bygningsdeler	Innvendig areal [m²]	U-verdi/ norm.kuldebroverdi [W/m²K]	Varmetap per bygningsdel [W/K]	Andel	Avgitt energi gjennom bygningsdel [kWh]	Avgitt energi gjennom bygningsdel etter 60 år [kWh]
Tak	100	0,13	13	0,241	1254	75213
Gulv	100	0,1	10	0,185	964	57857
Vegger	77,82	0,1468	11,42	0,212	1102	66095
Vindu	18,18	0,8	14,54	0,269	1402	84147
BRA	100	0,05	5	0,093	482	28928
Sum			53,97	1	5204	312240

BKI150 - asfaltplate						
Bygningsdeler	Innvendig areal [m²]	U-verdi/ norm.kuldebroverdi [W/m²K]	Varmetap per bygningsdel [W/K]	Andel	Avgitt energi gjennom bygningsdel [kWh]	Avgitt energi gjennom bygningsdel etter 60 år [kWh]
Tak	100	0,09	9,00	0,202	851	51052
Gulv	100	0,11	11,00	0,247	1040	62397
Vegger	77,82	0,1016	7,91	0,178	747	44849
Vindu	18,18	0,75	13,64	0,306	1289	77344
BRA	100	0,03	3,00	0,067	284	17017
Sum			44,54	1	4211	252660

17.3 Enkelt og dobbelt bindingsverk

17.3.1 U-verdiberegninger

Eksempel på U-verdiberegning med et massivt og et isolert felt (vertikal påforing) for enkelt bindingsverk.

Bindingsverk etter TEK17
Veggtykkelse 250 mm

Øvre grenseverdi				
Sjikt	d m	λ W/mK	Rmassiv m²K/W	Rlra m²K/W
Ventilert kledning og utvendig varmemotstand			0,130	0,130
Hunton asfaltplate	0,012	0,049	0,245	0,245
Isolasjon	0,198	0,034		5,824
Trevirke	0,198	0,130	1,523	
Dampsperre			0,030	0,030
Isolasjon	0,048	0,034		1,412
Trevirke	0,048	0,130	0,369	
Gips	0,013		0,060	0,060
Innvendig varmeovergangsmotstand			0,130	0,130
Sum varmemotstand			2,487	7,830
Total varmemotstand, øvre grenseverdi			6,121	

Nedre grenseverdi			
Sjikt	d m	λ W/mK	Rlegert m²K/W
Ventilert kledning og utvendig varmemotstand			0,130
Hunton asfaltplate	0,012	0,049	0,245
Isolasjon	0,198	0,034	4,260
Trevirke	0,198	0,130	
Dampsperre			0,030
Isolasjon	0,048	0,034	1,033
Trevirke	0,048	0,130	
Gips	0,013		0,060
Innvendig varmeovergangsmotstand			0,130
Sum varmemotstand nedre grenseverdi			5,887

Krav TEK 17: U ≤ 0,18
Krav Passivhus-standard: U ≤ 0,11

RT= (Røvre+Rnedre) / 2 = 6,004

U= 1/RT+ ΔU = 0,1666 → TEK 17: OK

Eksempel på U-verdiberegning med et massivt og et isolert felt (vertikal påforing) for dobbelt bindingsverk.

Dobbelt bindingsverk med isolert mellomsjikt
Veggtykkelse 400 mm

Øvre grenseverdi

Sjikt	d [m]	λ [W/mK]	Rmassiv [m²K/W]	Riso [m²K/W]
Ventilert kledning og utvendig varmemotstand			0,130	0,130
Hunton asfaltplate	0,012	0,049	0,245	0,245
Isolasjon	0,098	0,034		2,882
Trevirke	0,098	0,130	0,754	
Isolasjon	0,1	0,034	2,882	2,882
Isolasjon	0,198	0,034		5,824
Trevirke	0,198	0,130	1,523	
Dampsperre			0,030	0,030
Gips	0,013		0,060	0,060
Innvendig varmeovergangsmotstand			0,130	0,130
Sum varmemotstand			5,754	12,183
Total varmemotstand, øvre grenseverdi	10,638			

Nedre grenseverdi

Sjikt	d [m]	λ [W/mK]	Rlegert [m²K/W]
Ventilert kledning og utvendig varmemotstand			0,130
Hunton asfaltplate	0,012	0,049	0,245
Isolasjon	0,098	0,034	
Trevirke	0,098	0,130	2,108
Isolasjon	0,098	0,034	2,882
Isolasjon	0,198	0,034	
Trevirke	0,198	0,130	4,260
Dampsperre			0,030
Gips	0,200		0,060
Innvendig varmeovergangsmotstand			0,130
Sum varmemotstand nedre grenseverdi			9,846

Krav TEK 17: U ≤ 0,18
Krav Passivhus-standard: U ≤ 0,11

RT= (Røvre+Rnedre) / 2 = 10,242

U= 1/RT+ ΔU = 0,0976 → Passivhus standard: OK

Eksempel på U-verdiberegning med et massivt og et isolert felt (vertikal påforing) for bindingsverk med stenderdimensjon 48x148 mm (for sammenligning av R-verdi ved tilføring av kontinuerlig isolasjon).

Bindingsverk med 148 mm stender
Veggtykkelse 200 mm

Øvre grenseverdi				
Sjikt	d [m]	λ [W/mK]	Rmassiv [m²K/W]	Riso [m²K/W]
Ventilert kledning og utvendig varmemotstand			0,130	0,130
Hunton asfaltplate	0,012	0,049	0,245	0,245
Isolasjon	0,148	0,034		4,353
Trevirke	0,148	0,130	1,138	
Dampsperre			0,030	0,030
Isolasjon	0,048	0,034		1,412
Trevirke	0,048	0,130	0,369	
Gips	0,013		0,060	0,060
Innvendig varmeovergangsmotstand			0,130	0,130
Sum varmemotstand			2,103	6,360
Total varmemotstand, øvre grenseverdi	4,731			

Nedre grenseverdi			
Sjikt	d [m]	λ [W/mK]	Rlegert [m²K/W]
Ventilert kledning og utvendig varmemotstand			0,130
Hunton asfaltplate	0,012	0,049	0,245
Isolasjon	0,148	0,034	3,935
Trevirke	0,148	0,130	
Dampsperre			0,030
Isolasjon	0,048	0,034	1,033
Trevirke	0,048	0,130	
Gips	0,013		0,060
Innvendig varmeovergangsmotstand			0,130
Sum varmemotstand nedre grenseverdi			5,562

Krav TEK 17: U ≤ 0,18
Krav Passivhus-standard: U ≤ 0,11

RT=	(Røvre+Rnedre) / 2 =	5,147	
U=	1/RT+ ΔU =	0,1943	→ TEK 17: IKKE OK

17.3.2 Energiberegninger

Fordeling av varmetap fra de ulike bygningsdelene ved enkelt bindingsverk.

Enkelt bindingsverk						
Bygningsdeler	Innvendig areal [m²]	U-verdi/ norm.kuldebroverdi [W/m²K]	Varmetap per bygningsdel [W/K]	Andel	Avgitt energi gjennom bygningsdel [kWh]	Avgitt energi gjennom bygningsdel etter 60 år [kWh]
Tak	100	0,13	13,0	0,234	1255	75318
Gulv	100	0,1	10,0	0,180	966	57937
Vegger	77,82	0,167	13,0	0,234	1255	75294
Vindu	18,18	0,8	14,5	0,262	1404	84263
BRA	100	0,05	5,0	0,090	483	28968
Sum			55,5	1,000	5363	321780

Fordeling av varmetap fra de ulike bygningsdelene ved dobbelt bindingsverk.

Dobbelt bindingsverk						
Bygningsdeler	Innvendig areal [m²]	U-verdi/ norm.kuldebroverdi [W/m²K]	Varmetap per bygningsdel [W/K]	Andel	Avgitt energi gjennom bygningsdel [kWh]	Avgitt energi gjennom bygningsdel etter 60 år [kWh]
Tak	100	0,09	9,0	0,203	851	51046
Gulv	100	0,11	11,0	0,249	1040	62389
Vegger	77,82	0,098	7,6	0,172	721	43255
Vindu	18,18	0,75	13,6	0,308	1289	77335
BRA	100	0,03	3,0	0,068	284	17015
Sum			44,3	1	4184	251040

17.4 Massivtre

17.4.1 U-verdiberegninger

Eksempel på U-verdiberegning for en vegg med massivtre.

M150 Veggtykkelse 250 mm			
Varmemotstand			
Sjikt	d m	λ W/mK	Rmassiv m^2K/W
Ventilert kledning og utvendig varmemotstand			0,130
Vindduk	0,030	0,049	0,030
Isolasjon (glava veggplate 31)	0,150	0,034	4,412
Massivtre	0,100	0,130	0,769
Dampsperre			0,030
Gips	0,013		0,060
Innvendig varmeovergangsmotstand			0,130
Sum varmemotstand = RT			5,561
Krav TEK 17: U ≤ 0,18	R_T=	5,561	
Krav Passivhus-standard: U ≤ 0,11			
	U=	$1/R_T + \Delta U$ = 0,180	→ TEK 17: OK

17.4.2 Energiberegninger

Fordeling av varmetap fra de ulike bygningsdelene ved en vegg av massivtre.

M150						
Bygningsdeler	Innvendig areal [m^2]	U-verdi/ norm.kuldebroverdi [W/m^2K]	Varmetap per bygningsdel [W/K]	Andel	Avgitt energi gjennom bygningsdel [kWh]	Avgitt energi gjennom bygningsdel etter 60 år [kWh]
Tak	100	0,13	13,0	0,230	1231	73888
Gulv	100	0,1	10,0	0,177	947	56837
Vegger	77,82	0,18	14,0	0,248	1327	78947
Vindu	18,18	0,8	14,5	0,257	1378	82663
BRA	100	0,05	5,0	0,088	474	28418
Sum			56,6	1	5357	321420

17.5 Materialmengder

Beregning av materialmengder for vegger etter TEK17-standard.

	Veggtyper etter TEK17								
			148 mm stender					198 mm stender	
	B	M150	BKI50 - Vindduk	BKI50 - asfalt	BKI50 - OSB	BKI50 - GU	BKI100 - asfalt	BKI50 - asfalt	BKI100 - asfalt
Veggtykkelse i meter	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,30	0,30	0,35
Utvendig veggareal	80,22	80,22	80,22	80,22	80,22	80,22	80,70	80,70	81,18
Material									
Norgips Standard type A	77,82	77,82	77,82	77,82	77,82	77,82	77,82	77,82	77,82
Tommen Gram dampsperre	78,30	77,82	78,30	78,30	78,30	78,30	78,30	78,30	78,30
Konstuksjonsvirke av tre	2,81	0,24	2,97	2,97	2,97	2,97	2,97	2,81	2,81
Krysslimt tre (m^3)		9,70							
GLAVA Proff 34 (m^2)	69,79		66,18	66,18	66,18	66,18	66,18	69,79	69,79
GLAVA Veggplate 31 (m^2)		80,22	80,22	80,22	80,22	80,22	80,70	80,70	81,18
Hunton vindtett	80,22			79,74			79,74	80,22	80,22
ISOLA Soft Xtra		80,22	80,22						
Sterling OSB					79,74				
Nordgips Utvendig GU-X						79,74			
Utvendig kledning i tre	3,06	3,06	3,06	3,06	3,06	3,06	3,07	3,07	3,08

Beregning av materialmengder for vegger etter passivhusstandard.

	Veggtype etter passivhusstandard				
			148 mm stender		198 mm stender
	DB	M300	BKI150 - asfalt	BKI200 - asfalt	BKI150 - asfalt
Veggtykkelse i meter	0,40	0,40	0,35	0,40	0,40
Utvendig veggareal	81,66	81,66	81,18	81,66	81,66
Material					
Norgips Standard type A	77,82	77,82	77,82	77,82	77,82
Tommen Gram dampsperre	78,30	77,82	78,30	78,30	78,30
Konstuksjonsvirke av tre	3,39	0,24	2,97	2,97	2,81
Krysslimt tre (m^3)		9,70			
GLAVA Proff 34 (m^2)	71,04		66,18	66,18	69,7914
GLAVA Veggplate 31 (m^2)		81,66	81,18	81,66	81,66
Hunton vindtett	81,66		79,74	79,74	80,22
ISOLA Soft Xtra		81,66			
Utvendig kledning i tre	3,10	3,10	3,08	3,10	3,10

17.6 Kondenskontroll

Kondenskontroll BKI-asfalt-148												
Sjikt	d	λ	R_{legert}	ΔT	T	vs	δ	Z	Δv	v	RF	
	m	W/mK	W²K/W	C°	C°	g/m³	m²/s	s/m	g/m³	g/m³		
Ute					-10,000	2,140				2,033	0,950	
Ventilert kledning og utvendig varmemotstand , R_{se}			0,130	0,546								
					-9,454	2,230				2,033	0,912	
Kontinuerlig isolasjon	0,050	0,034	1,471	6,172			0,0000195	2564,103	0,005			
					-3,283	3,730				2,038	0,546	
Hunton asfaltplate	0,012	0,049	0,245	1,028				15400,000	0,031			
					-2,255	4,040				2,070	0,512	
Isolasjon	0,148	0,034	3,613	15,163			0,0000195	7589,744	0,015			
					12,908	11,280				2,085	0,185	
Trevirke	0,148	0,130	0,194	0,812			0,00000053	279245,283	0,568			
					13,721	11,850				2,653	0,224	
Dampsperre			0,030	0,126				2000000,000	4,066			
					13,846	11,920				6,719	0,564	
Isolasjon	0,048	0,034	1,228	5,155			0,0000195	2461,538	0,005			
					19,001	16,300				6,724	0,413	
Trevirke	0,048	0,130	0,048	0,201			0,00000053	90566,038	0,184			
					19,203	16,490				6,908	0,419	
Gips	0,013		0,060	0,252			0,0000029	4431,818	0,009			
					19,454	16,790				6,917	0,412	
Innvendig varmeovergangsmotstand , R_{si}			0,130	0,546								
					20,000	17,280				6,912	0,400	
Inne												
Sum			7,148					239694,421	4,879			

17.7 CO2-avtrykk for 1 m3 «Krysslimt tre»

C:\Users\Public\Documents\SimaPro\Database\Professional; Masteroppgave - [Analyze Krysslimt tre (NO) I market for I Cut-off, U]

File Edit Calculate Tools Window Help

Network | Impact assessment | Inventory | Process contribution | Setup | Checks (524) | Product over

Characterization | Normalization

Skip categories: Never

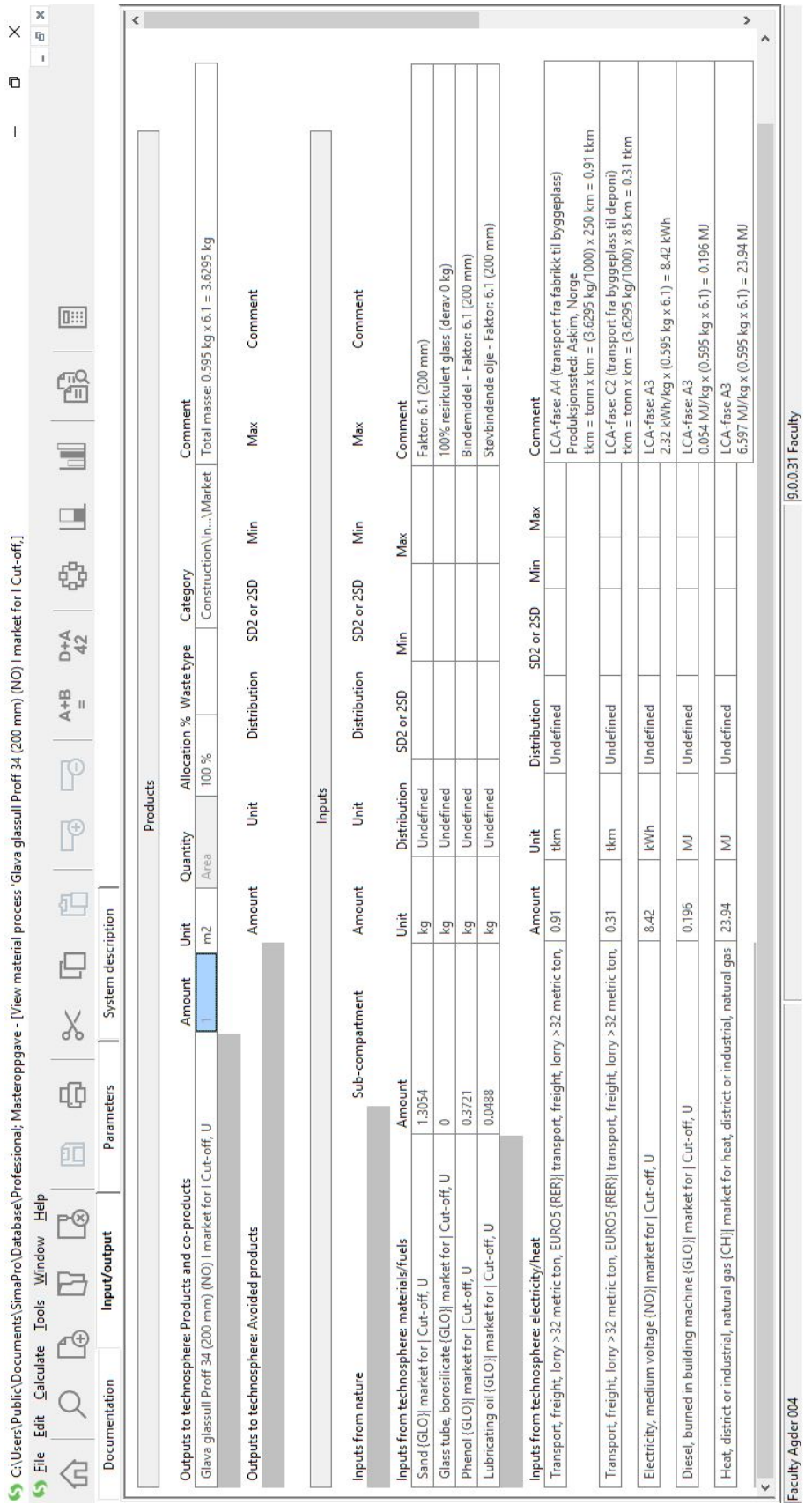
Default units | Exclude long-term emissions | Standard | Group | Per impact category

Se	Impact category	/	Unit	Total	Krysslimt tre (NO) I market	Sawnwood, board,	Melamine formaldehyde	Transport, freight, lorry >32	Transport, freight, lorry >32	Diesel, burned in building	Electricity, medium voltage	Heat, central or small-scale,	Waste wood, untreated {CH}|
☑	Global warming		kg CO2 eq	206	x	82.8	80.7	10.2	3.22	2.93	3.57	11.6	11.2
☑	Stratospheric ozone depletion		kg CFC11 eq	0.000416	x	5.52E-5	3.04E-5	7.46E-6	2.36E-6	1.71E-6	8.85E-6	0.000105	0.000205
☑	Ionizing radiation		kBq Co-60 eq	23.5	x	5.08	2.75	0.216	0.0681	0.0409	1.47	4.14	9.79
☑	Ozone formation, Human health		kg NOx eq	2.67	x	0.502	0.135	0.0341	0.0108	0.0354	0.00511	0.434	1.51
☑	Fine particulate matter formation		kg PM2.5 eq	0.98	x	0.259	0.144	0.0125	0.00395	0.00831	0.00306	0.325	0.224
☑	Ozone formation, Terrestrial ecosystems		kg NOx eq	2.71	x	0.516	0.14	0.0352	0.0111	0.0359	0.0052	0.447	1.52
☑	Terrestrial acidification		kg SO2 eq	1.66	x	0.36	0.421	0.0263	0.0083	0.0165	0.00778	0.189	0.627
☑	Freshwater eutrophication		kg P eq	0.0573	x	0.024	0.0194	0.000805	0.000254	0.000135	0.00118	0.00377	0.00772
☑	Marine eutrophication		kg N eq	0.00592	x	0.00204	0.00274	6.27E-5	1.98E-5	1.03E-5	9.28E-5	0.000484	0.000472
☑	Terrestrial ecotoxicity		kg 1,4-DCB	1.9E3	x	378	425	184	58.1	2.67	14.5	250	584
☑	Freshwater ecotoxicity		kg 1,4-DCB	7.41	x	1.94	2.19	0.126	0.0397	0.0116	0.527	0.88	1.7
☑	Marine ecotoxicity		kg 1,4-DCB	11.1	x	2.83	3.29	0.258	0.0814	0.0184	0.661	1.31	2.62
☑	Human carcinogenic toxicity		kg 1,4-DCB	9.78	x	3.92	3.13	0.184	0.0581	0.0543	0.255	0.794	1.38
☑	Human non-carcinogenic toxicity		kg 1,4-DCB	411	x	63.4	71.8	5.17	1.63	0.347	4.27	75.2	189
☑	Land use		m2a crop eq	1.04E3	x	949	1.22	0.763	0.241	0.00721	0.194	83.4	0.225
☑	Mineral resource scarcity		kg Cu eq	0.721	x	0.229	0.289	0.0167	0.00527	0.00477	0.0228	0.0566	0.0968
☑	Fossil resource scarcity		kg oil eq	67.6	x	24.7	32.7	3.7	1.17	0.98	0.803	2.36	1.2
☑	Water consumption		m3	8.02	x	0.43	3.59	0.0323	0.0102	0.00585	3.48	0.163	0.309

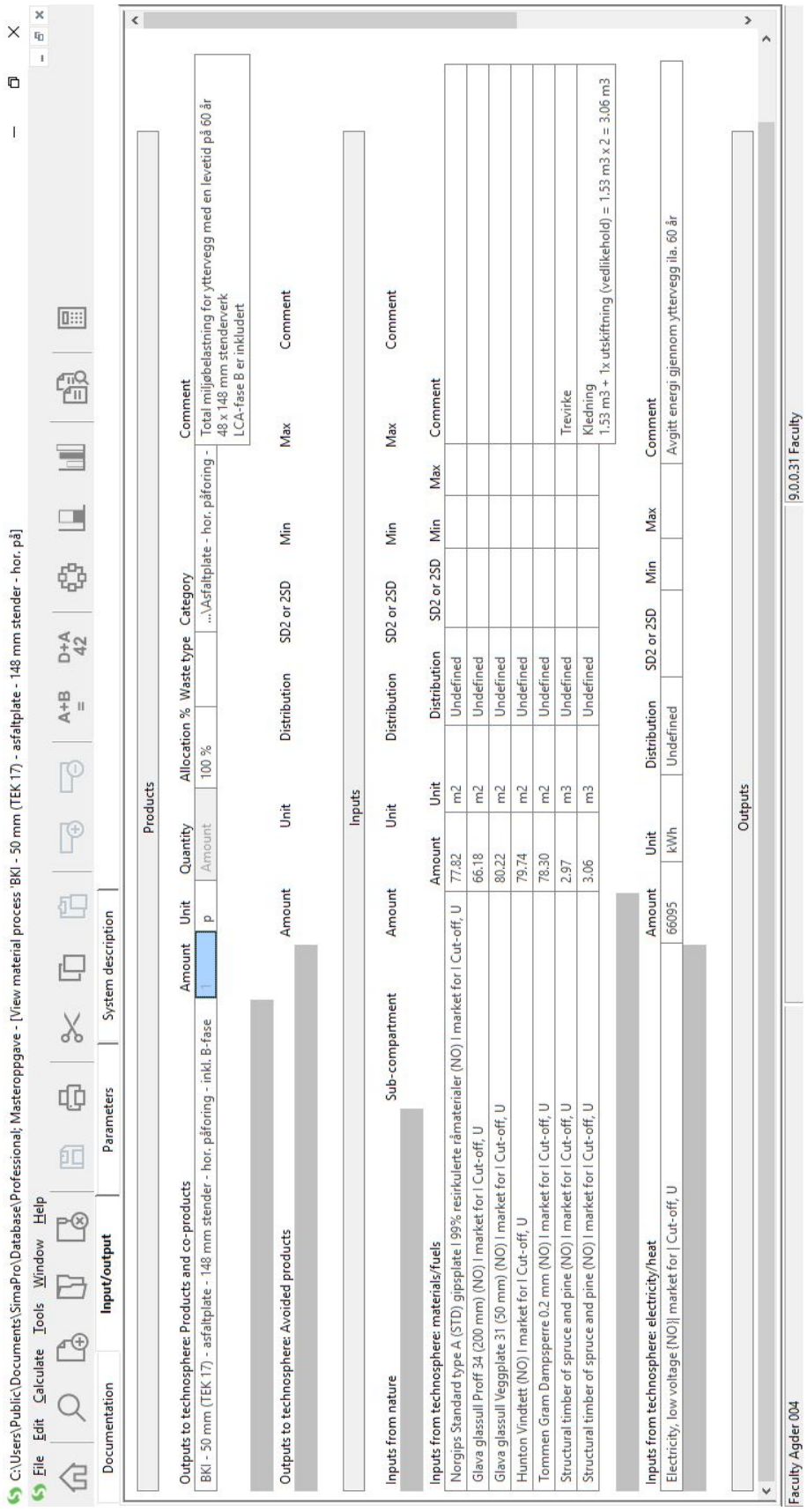
Analyzing 1 m3 'Krysslimt tre (NO) I market for I Cut-off, U';Method: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.03 / World (2010) H / Characterization

Faculty Agder 004 | 9.0.0.31 Faculty

17.8 Eksempel på prosess for byggemateriale (Glava Proff 34)



17.9 Eksempel på prosess for yttervegg (BKI)



17.10 Detaljert CO2-utslipp for optimalisert BKI (BKI50)

C:\Users\Public\Documents\SimaPro\Database\Professional\ Masteroppgave - [Analyze BKI - 50 mm (TEK 17) - asfaltplate - 148 mm stender - hor. påføring - inkl.]

File Edit Calculate Tools Window Help

Network | Impact assessment | Inventory | Process contribution | Setup | Checks (524) | Product over

Characterization | Normalization

Skip categories: Never

Default units | Exclude long-term emissions | Per impact category | Standard | Group

Se	Impact category	Unit	Total	BKI - 50 mm (TEK 17) - asfaltplate -	Norgips Standard type A (STD)	Glava glassull Proff 34 (200	Glava glassull Veggplate 31 (50	Hunton Vindtett (NO) I market for	Tommen Gram Dampsperre 0.2	Structural timber of spruce and	Structural timber of spruce and	Electricity, low voltage {NO}|
☑	Global warming	kg CO2 eq	3022.421085	x	32.96393489	161.9017846	145.035637	84.3101387	73.30860583	179.2536623	184.6855915	2160.96173
☑	Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	0.007224328326	x	3.071209405E-5	0.000110334118	9.858475293E-5	0.000139904226 3	2.428638629E-6	0.000802699087	0.000827023301 8	0.005212662814
☑	Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	1052.170826	x	3.023838169	10.42629251	9.346238912	7.456935869	0.083776771049	85.15486708	87.7353176	848.9435591
☑	Ozone formation, Human health	kg NOx eq	17.29737864	x	0.1557171597	0.3814707066	0.3991250408	0.9647426824	0.076273879 15	5.804948111	5.980855629	3.534245429
☑	Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	10.45935958	x	4.291916453	0.1891497185	0.1865350258	0.2299947371	0.029562989 96	1.207500258	1.244091175	3.080609224
☑	Ozone formation, Terrestrial ecosy	kg NOx eq	17.82805928	x	0.1597452263	0.4183332083	0.4319059889	0.9722196321	0.083645876 23	5.986116862	6.167514343	3.608579264
☑	Terrestrial acidification	kg SO2 eq	29.61579513	x	14.69579444	0.3834623161	0.3651871252	0.6466091215	0.087823987 55	2.66277705	2.743467264	8.030673825
☑	Freshwater eutrophication	kg P eq	1.819902437	x	0.004219934666	0.0359352607	0.03130196406	0.02118049234	0.000778226 9231	0.06169104727	0.06356047294	1.601235038
☑	Marine eutrophication	kg N eq	0.1356405192	x	0.0003812406157	0.002393049986	0.002088883547	0.001371888066	0.000113781 2404	0.01172297986	0.01207822167	0.1054904742
☑	Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	38804.24518	x	414.0828603	362.082198	318.2826541	570.0976045	37.28297892	2808.83517	2893.951387	31399.63033
☑	Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1718.179723	x	3.165400726	4.360585713	3.779221897	1.959281382	1.125508434	9.389470066	9.673999462	1684.726255
☑	Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	2117.454969	x	4.400992154	5.838558686	5.069081109	2.962913831	1.589234103	14.06601285	14.49225566	2069.035921
☑	Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	395.106201	x	1.411433101	4.498785383	4.070528777	2.621809078	0.928430600 2	13.90852067	14.32999099	333.3367024
☑	Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	10408.1802	x	80.01685488	77.23845655	67.49923869	126.2872467	7.373565456	717.293011	739.0291628	8593.442661
☑	Land use	m2a crop eq	3234.288232	x	4.364218693	2.781720793	2.748106718	5.553712708	0.163582997 6	1524.466168	1570.662112	123.5486103
☑	Mineral resource scarcity	kg Cu eq	30.40431156	x	0.09542375487	0.2879691739	0.2646587254	0.126635459	0.011047872 15	1.095453103	1.128648651	27.39447482
☑	Fossil resource scarcity	kg oil eq	787.1992637	x	12.66425922	75.15025615	67.15078427	25.14573763	23.56881882	47.65170745	49.09569859	486.7720016
☑	Water consumption	m3	2045.571163	x	2.164919908	17.2057209	14.79021943	2.697356761	0.195979160 7	3.313146802	3.41354519	2001.790275

Analyzing 1 p 'BKI - 50 mm (TEK 17) - asfaltplate - 148 mm stender - hor. påføring - inkl. B-fase'; Method: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.03 / World (2010) H / Characterization

Faculty Agder 004 | 9.0.0.31 Faculty

Masteroppgave i Bygg

Tittel:

Livssyklusanalyse (LCA) av vegger i bindingsverk med kontinuerlig isolasjon

Kandidat:
Knut André Kaada
Harald Kristian Eidhamar

Veileder:
Reyn Joseph O'Born, UiA

Innledning

Byggebransjen er en betydelig bidragsyter til verdens CO_2-utslipp, og står for omtrent 40% av CO_2-utslippet - i tillegg til energibruken. Utslippene kommer blant annet fra produksjon av materialer, transport, og energi brukt i produksjonsprosesser og drift av bygg. Miljøvennlige byggtekniske løsninger er nødvendig for å bidra til en grønn omstilling.

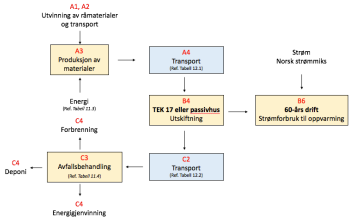
Denne studien benytter livssyklusanalyse (LCA) til å undersøke om yttervegger av bindingsverk med kontinuerlig utvendig isolasjon (BKI) kan være en slik miljøvennlig løsning. Dette gjøres ved hjelp av referansehuset (BRA: 100 m^2) som illustrert i *Figur 1* under.

Figur 1: Referansehuset benyttet i LCA-analysen

Ulike typer ytterveggløsninger blir brukt i sammenligningen for referansehuset; BKI, i tillegg til enkelt (B)- og dobbelt bindingsverk (DB), samt massivtrevegg (M).

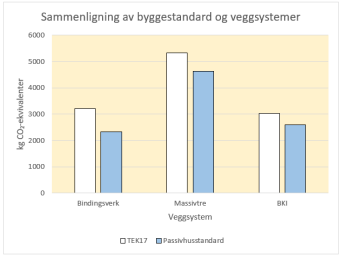
Sammendrag av prosess

Etter vanlig LCA-metodikk blir det laget et flytskjema som viser de inkluderte fasene. Slik flytskjemaet (*Figur 2*) viser blir utslipp fra materialene inkludert, «MAT» (A1-A4 + B4 + C2-C4), samt utslipp fra energibruk i driftsfasen, «B6». Energibruken til referansehuset i løpet av 60 år blir beregnet med programmet SIMIEN. Råstoffene til bygningsmaterialene blir innhentet fra EPDer - før karbonfotavtrykket til hvert ytterveggsystem blir beregnet i programmet SimaPro.



Figur 2: Flytskjema med inkluderte prosesser
LCA-faser er oppgitt i rødt

Innvirkningen ulike isolasjonstykkelser har på CO_2-utslippet blir vurdert for veggene. Slik resultatene i *Figur 3* viser varierer utslippet ut ifra byggestandard. Dette baserer seg på både ulik påvirkning fra materialene (MAT) og energibruken i driftsfasen (B6).



Figur 3: CO_2-avtrykk for ulike byggestandarder og veggsystemer

Videre viser *Tabell 1* under fordelingen av CO_2-utslippet for MAT og B6 for veggene etter TEK 17-standarden. Den viser at energi fra driftsfasen bidrar til det største utslippet. Samtidig illustrerer tabellen at BKI-veggen kommer best ut sammenlignet med de andre veggtypene, samt at massivtreveggen kommer dårligst ut.

Utslipp av kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år			
	B	M150	BKI50
MAT	758	2746	862
B6	2462	2581	2160
Sum	3220	5327	3022
Differanse til BKI50	198	2305	Ref

Tabell 3: CO_2-avtrykk for vegger etter TEK 17-standard
Tall bak yttervegg angir tykkelse med kont. iso. [mm]

For passivhusstandarden har DB-veggen et mindre CO_2-avtrykk enn BKI-veggen, slik *Tabell 2* viser. Utslippet fra MAT nærmer seg utslippet fra B6 for BKI150-veggen, henholdsvis 1134 kg CO_2-ekv. mot 1466 kg CO_2-ekv.

Utslipp av kg CO_2-ekvivalenter etter 60 år			
	DB	M300	BKI150
MAT	922	3179	1134
B6	1414,21	1443,15	1466,33
Sum	2336	4622	2601
Differanse til BKI150	-265	2021	Ref

Tabell 2: CO_2-avtrykk for vegger etter passivhusstandard
Tall bak yttervegg angir tykkelse med kont. iso. [mm]

Konklusjon

Det konkluderes med å besvare oppgavens hovedspørsmål:

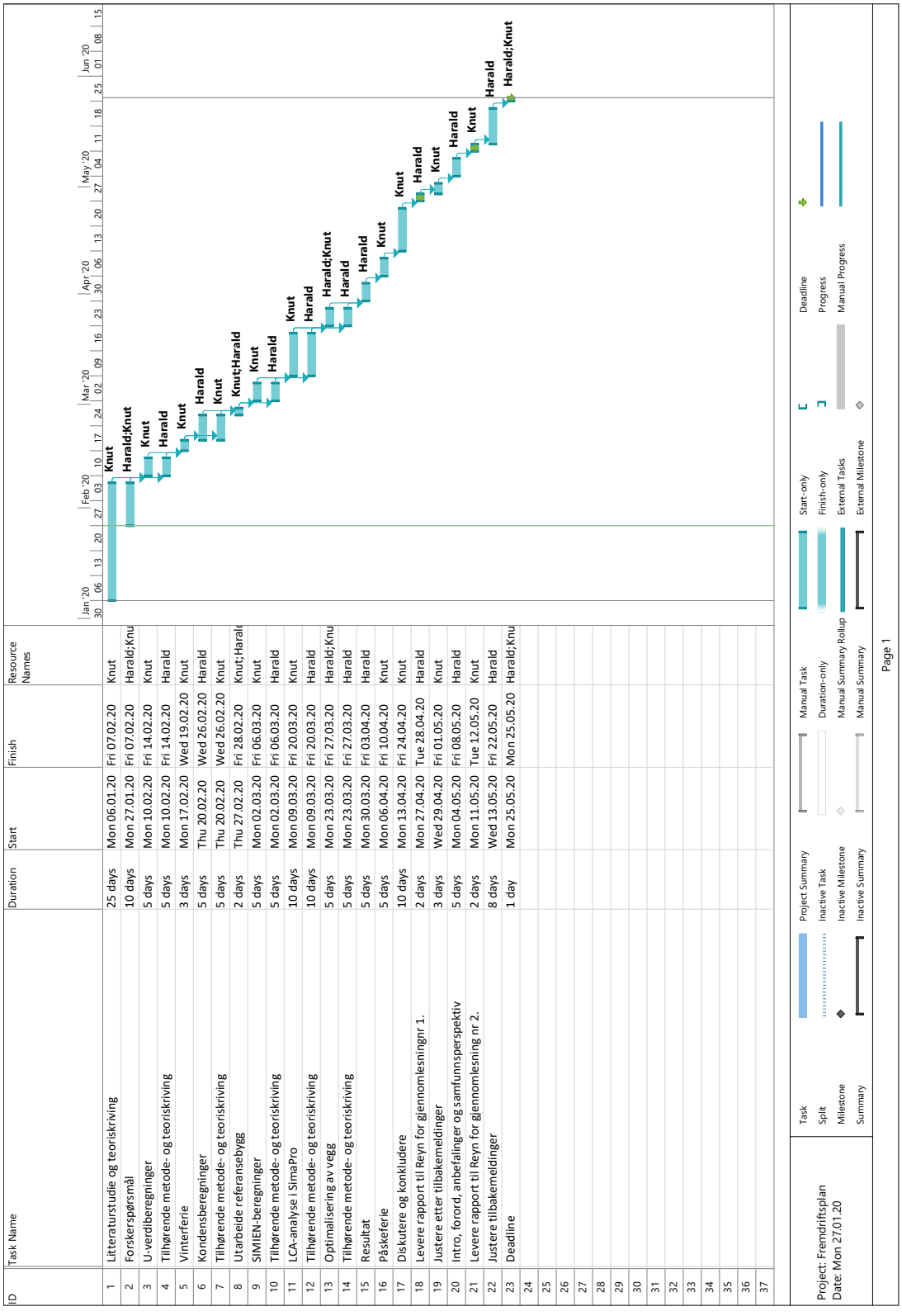
- Hvordan kommer yttervegger av bindingsverk med kontinuerlig utvendig isolasjon ut i et miljøperspektiv?

BKI-vegger har god effekt på energieffektiviteten til veggen, spesielt for vegger etter byggestandarden TEK 17. Den kontinuerlige isolasjonen brukt i denne studien har derimot et dårligere karbonfotavtrykk enn den myke isolasjonen mellom stenderne. Av den grunn vil en økt tykkelse på den kontinuerlige isolasjonen gi et større CO_2-utslipp fra materialet enn innsparingen fra økt energieffektivitet. Det konkluderes derfor med at BKI-vegger er å anbefale for TEK 17 men ikke for passivhusstandarden.

Grimstad Juni 2020

UiA Universitetet i Agder

17.12 Fremdriftsplan



ID	Task Name	Duration	Start	Finish	Resource Names
1	Litteraturstudie og teoriskriving	25 days	Mon 06.01.20	Fri 07.02.20	Knut
2	Forskerspørsmål	10 days	Mon 27.01.20	Fri 07.02.20	Harald;Knu
3	U-verdiberegninger	5 days	Mon 10.02.20	Fri 14.02.20	Knut
4	Tilhørende metode- og teoriskriving	5 days	Mon 10.02.20	Fri 14.02.20	Harald
5	Vinterferie	3 days	Mon 17.02.20	Wed 19.02.20	Knut
6	Kondensberegninger	5 days	Thu 20.02.20	Wed 26.02.20	Harald
7	Tilhørende metode- og teoriskriving	5 days	Thu 20.02.20	Wed 26.02.20	Knut
8	Utarbeide referansebygg	2 days	Thu 27.02.20	Fri 28.02.20	Knut;Harald
9	SIMIEN-beregninger	5 days	Mon 02.03.20	Fri 06.03.20	Knut
10	Tilhørende metode- og teoriskriving	5 days	Mon 02.03.20	Fri 06.03.20	Harald
11	LCA-analyse i SimaPro	10 days	Mon 09.03.20	Fri 20.03.20	Knut
12	Tilhørende metode- og teoriskriving	10 days	Mon 09.03.20	Fri 20.03.20	Harald
13	Optimalisering av vegg	5 days	Mon 23.03.20	Fri 27.03.20	Harald;Knu
14	Tilhørende metode- og teoriskriving	5 days	Mon 23.03.20	Fri 27.03.20	Harald
15	Resultat	5 days	Mon 30.03.20	Fri 03.04.20	Harald
16	Påskeferie	5 days	Mon 06.04.20	Fri 10.04.20	Knut
17	Diskutere og konkludere	10 days	Mon 13.04.20	Fri 24.04.20	Knut
18	Levere rapport til Reyn for gjennomlesningnr 1.	2 days	Mon 27.04.20	Tue 28.04.20	Harald
19	Justere etter tilbakemeldinger	3 days	Wed 29.04.20	Fri 01.05.20	Knut
20	Intro, forord, anbefalinger og samfunnsperspektiv	5 days	Mon 04.05.20	Fri 08.05.20	Harald
21	Levere rapport til Reyn for gjennomlesning nr 2.	2 days	Mon 11.05.20	Tue 12.05.20	Knut
22	Justere tilbakemeldinger	8 days	Wed 13.05.20	Fri 22.05.20	Harald
23	Deadline	1 day	Mon 25.05.20	Mon 25.05.20	Harald;Knu
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					
31					
32					
33					
34					
35					
36					
37					

17.13 Møtereferater fra veiledningstimer

Veiledning 16.01.2020

Til stede: Reyn Joseph O'Born, Harald Eidhamar, Knut André Kaada

Referat: Tema for dette møte var hovedsakelig oppgavens retning, fremdrift og relevant litteratur. Deadlines for forskerspørsmål og innlevering av rapport blir informert om, samt videre veiledning og SimaPro kurs blir planlagt.

Veiledning 29.01.2020

Til stede: Reyn Joseph O'Born, Harald Eidhamar, Knut André Kaada

Referat: Forslag til forskerspørsmål blir presentert og diskutert, og vi blir opplyst om flere fagpersoner ved UIA som kan være aktuelle for besvarelse av spørsmål.

Veiledning 06.02.2020

Til stede: Reyn Joseph O'Born, Harald Eidhamar, Knut André Kaada

Referat: Kurs i SimaPro.

Veiledning 11.03.2020

Til stede: Reyn Joseph O'Born, Harald Eidhamar, Knut André Kaada

Referat: Tema for dette møtet var hovedsakelig SimaPro. Diverse valg og tekniske utfordringer ble diskutert og bearbeidet.

Veiledning 01.04.2020

Til stede: Reyn Joseph O'Born, Harald Eidhamar, Knut André Kaada

Referat: Tema for dette møtet var hovedsakelig SimaPro-resultatene. Prosesser og valg tatt for massivtre fikk spesielt fokus ettersom resultatene ga overraskende høye verdier. Det blir påpekt mangler i forhold til transport og tkm i enkelte tilfeller, men det konkluderes med at prosesser og gjennomføring av analysene for massivtre virker å være riktige.

Det besluttes å etterstrebe opprinnelig fremdriftsplan til tross for koronautsettelser.

Veiledning 06.05.2020

Til stede: Reyn Joseph O'Born, Harald Eidhamar, Knut André Kaada

Referat: Mangler, forbedringspotensialet og den røde tråden blir diskutert på bakgrunn av 1. gjennomlesning.

Veiledning 25.05.2020

Til stede: Reyn Joseph O'Born, Harald Eidhamar, Knut André Kaada

Referat: Mangler, forbedringspotensialet og den røde tråden blir diskutert på bakgrunn av 2. gjennomlesning.