

Kristin Åsen
Jo André Østmark

Sammenligning av klimagassutslipp fra rekkehus prosjektert etter TEK17 og passivhusstandard

Bacheloroppgave i Ingeniørfag - bygg
Veileder: Lizhen Huang
Mai 2022

NTNU
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for vareproduksjon og byggingsteknikk



Kristin Åsen
Jo André Østmark

Sammenligning av klimagassutslipp fra rekkehus prosjektert etter TEK17 og passivhusstandard

Bacheloroppgave i Ingeniørfag - bygg
Veileder: Lizhen Huang
Mai 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for vareproduksjon og byggingsteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Oppgavens tittel: Sammenligning av klimagassutslipp fra rekkehus prosjektert etter TEK17 og Passivhusstandard	Dato: 19. Mai 2022		
	Antall sider: 63		
Navn Jo André Østmark & Kristin Åsen	Masteroppgave:	Bacheloroppgave	x
Veileder: Lizhen Huang			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/ veiledere: Stian Ervik, Stig-Are Lillemo			

Sammendrag:

Bygg- og anleggsindustrien står for en betydelig del av verdens klimagassutslipp. Følgelig er det ønskelig å forsøke å gjøre industrien mer miljøvennlig. Dermed bør valgene som gjøres i industrien innebære vekt på miljøkonsekvenser av konstruksjonsløsningene som vurderes.

Det er allment kjent at passivhus har mindre energiforbruk enn de som er bygd etter de obligatoriske kravene i TEK17. Dog er det viktig å se hvordan forskjellene utspiller seg sett fra et miljømessig perspektiv gjennom bygningens livsløp. Denne studien vil forsøke å undersøke forskjellene i miljøkonsekvensene fra et hus som prosjekteres etter TEK17 mot et som er endret til å tilfredsstille kravene for passivhus. Målet og hensikten med denne studien er å kunne sammenligne klimagassutslippene i livsløpet til de to scenarioene. Derav er problemstillingen: «*Er passivhus eller TEK17 mest miljøvennlig gjennom et byningslivsløp?*»

For å svare på spørsmålet er et prosjektert rekkehus som skal bygges i Peder Morsets Veg 21 brukt som en case for studien. Ved energiberegninger som evalueringsgrunnlag, ble TEK17 oppgradert til passivhusstandard for sammenligning. BIM-modellene for både TEK-17- og passivhuset er laget i Revit, energiberegninger er gjort i Simien og livsløpsanalysen er utført stort sett med grunnlag i EPDer fra EPD Norge og utslipp er kalkulert i Excel.

For å undersøke hvilke faktorer som spiller inn på utslippene til bygget er de kategorisert etter materialtype og livssyklusfaser. Flere scenarier for energibruk i drift er studert for å gi et innblikk i hvordan forskjellige energimikser vil påvirke resultatene.

Oppgaven forsøker også å svare på innvirkningen på en LCA ved bruk av spesifikt eller generelt datagrunnlag for transportdistanser for et byggeprosjekt.

Gitt dataene og antagelsene i denne studien viser resultatene at passivhuset vil slippe ut om lag $63\text{kgCO}_2\text{e/m}^2$ (45 tonn totalt) mindre i løpet av et livsløp på 60 år enn det originale TEK17 huset. Dette viser at energibruken i driften av bygget er en betydelig del av de totale utslippene fra et rekkehus i Norge. For spørsmålet om generelle eller spesifikke transportdistanser påvirker LCA-resultatene nevneverdig mye, konkluderes det med at det er nødvendig med bruk av spesifikke datagrunnlag for at resultatene skal være nøyaktige.

Stikkord:

LCA
Energieffektive bygninger
Klimagassregnskap
BIM

Forord

Denne bacheloroppgaven er skrevet våren 2022 som det avsluttende arbeidet på vår bachelorgrad i ingeniørfag bygg, ved NTNU i Gjøvik. Vi takker lærere vi har hatt gjennom studietiden for å gi det faglige grunnlaget for å gjennomføre oppgaven. Oppgaven er skrevet i samarbeid med Mesterkonsult AS. Vi takker for muligheten til å jobbe med et tema vi syntes var interessant og for god hjelp med faglige innspill.

Videre er vi enormt takknemlig for svært god veiledning fra veilederen vår Lizhen Huang. Oppgaven var meget ambisiøs da vi ikke hadde noe særlig forkunnskap innen livssyklusanalyser før vi begynte. Vi var dermed heldig som har fått tett og god oppfølging.

Klimagassregnskap er på full fart inn i byggeindustrien, og det har vært spennende å fordype seg i noe som er så nytt og relevant for fremtiden. Flere av aspektene i teamet har vært lærerikt å sette seg inn i, og kunnskapen opparbeidet gjennom oppgaven vil være god å ta med seg inn i videre arbeid eller studier.

Trondheim 18.05.22

Kristin Åsen

Kristin Åsen

Jo André Østmark

Jo André Østmark

Abstract

The building industry contributes a considerable amount of the worlds GHG emissions. Consequently, choices in the industry needs to be done with emphasis on the environmental impacts of the construction choices.

It is widely known that passive houses use less energy than houses designed according to the demands in TEK17. On the other hand, it is also important to look at the differences in an environmental perspective during the whole life cycle. This study aims to investigate the difference in environmental impact from the original design according to TEK17 versus if it was upgraded to passive house standard. The goal and scope of this study is to compare GHG emissions through the lifecycle of these two buildings. Hence the research topic is: *“Is a passive house or a TEK17 house the most environmentally friendly through the building’s lifetime?”*

To answer the question, a planned terraced house in Peder Morsets veg 21 is used as a case study. Using energy simulation to evaluate performance, the original house is upgraded to passive house to be compared. The BIM models for both the TEK17- and passive house is built through Revit, the energy simulations are done in Simien and the LCA is conducted primarily with EPDs gathered from EPD Norge and emissions calculated in Excel.

To examine different factors impacts on the emissions from the buildings, the building is categorized by building components and life cycle phases. Several scenarios for energy mixes are studied to give insight into how different energy sources and scenarios affect the results. The thesis also tries to determine the impact of using specific or general data for transport distances to a building project of materials on the LCA.

Given the data and assumptions made in this study the results shows that the passive house will release $63\text{kgCO}_2\text{e/m}^2$ (45tonnes in total) less during its lifetime of 60 years than the original TEK17 option. This shows that the energy use of the building is a crucial part of the total emissions from terraced houses in Norway. The thesis also concludes that it is necessary to use specific data for transport distances for each individual project if the results aim to be as precise as possible.

Innholdsfortegnelse

Forord	iii
Abstract	iv
Innholdsfortegnelse	v
Figurliste.....	vii
Tabelliste	viii
Begreper/forkortelser	i
Standardliste	i
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn for oppgaven	1
1.2 Problemstilling.....	2
1.3 Beskrivelse av prosjektet	2
1.4 Avgrensninger og forutsetninger	2
1.5 Samfunnsmessige perspektiver.....	3
1.6 Valg av metode	4
1.7 Rapportens oppbygning	5
2 Teori	6
2.1 Energieffektive bygninger	6
2.1.1 Hvorfor energieffektive bygninger.....	6
2.1.2 Energiforsyning	8
2.1.3 Varmetapstall	8
2.1.4 Byggeteknisk forskrift (TEK17)	9
2.1.5 Passivhus	9
2.1.6 ZEB (Zero Emission Buildings).....	10
2.2 LCA	10
2.3 Hvordan utføres en LCA	12
2.3.1 Hensikt og omfang	12
2.3.2 Livssyklusregnskap (LCI).....	13
2.3.3 Livsløpseffektvurdering (LCIA)	13
2.3.4 Tolkningsfasen	15
2.4 LCA for bygg.....	16
2.5 BIM (byggningsinformasjonsmodellering)	18
2.5.1 BIM og LCA	18

3	Metode.....	19
3.1	Casebeskrivelse	20
3.2	Litteratur	23
3.3	Modellering	24
3.4	Bygningsfysiske beregninger	25
3.5	Passivhus oppgradering	26
3.6	Livssyklusanalysen.....	27
3.6.1	Hensikt og omfang	27
3.6.2	Livssyklusregnskap (LCI).....	28
3.6.1	Livsløpseffektvurdering (LCIA)	30
3.6.2	Tolkningsfasen	32
3.7	Spesifikk transport.....	32
3.8	Energibruk i drift	33
4	Resultater.....	36
4.1	Passivhus	36
4.2	Energibehov for TEK17 og Passivhus.....	39
4.3	Utslipp	41
4.3.1	Utslipp fra materialer	41
4.3.2	Utslipp fra energibruk i drift	43
4.4	Spesifikk transport.....	47
4.4.1	Totalt utslipp	48
5	Diskusjon og analyse.....	50
5.1	Diskusjon av resultater	50
5.1.1	Materialer	50
5.1.2	Energiforbruk	51
5.2	Økonomi	53
5.3	Diskusjon av Metode	54
5.4	Usikkerheter.....	56
5.5	Videre arbeid/studier	57
6	Konklusjon	58
	Litteraturliste	59
	Vedlegg	63

Figurliste

Figur 1 - Kostnader knyttet til tiltak som kan redusere utslippene av klimagasser. Kilde: (McKinsey Sustainability, 2010).....	7
Figur 2 - LCA. Illustrasjon: (NILU, 2021).....	11
Figur 3 - Livssyklusens inndeling i moduler. Kilde: (Helgesen, 2020).....	16
Figur 4 - Flyttdiagram for arbeid utført.....	19
Figur 5 - Fasade utgangspunkt (Illustrasjon av: Mesterkonsult AS).....	20
Figur 6 - Plantegninger TEK17 (Illustrasjon av: Mesterkonsult AS).....	21
Figur 7 - Yttervegg TEK17 (Kilde:(SINTEF, 2018b), Fig 235).....	22
Figur 8 - Overgang vegg og gulv mot grunnen (Kilde:(SINTEF, 2013c), Fig 61a).....	22
Figur 9 - Skrått tak TEK17 (Kilde:(SINTEF, 2021), Fig 231a).....	23
Figur 10 - Kompakt tak TEK 17 (Kilde: (SINTEF, 2018c), Fig 221b).....	23
Figur 11 Skissetegninger rekkehus (Mesterkonsult AS).....	23
Figur 12 - Passivhus forskyvning.....	26
Figur 13 - Modell av utslipp fra 1kg med bunnfyllingslist fra SimaPro.....	31
Figur 14 – Datagrunnlag fra EPD av trevirke. (EPD-Norge, 2016).....	32
Figur 15 - Transportutgangspunkt for beregninger av utslipp i fase A4.....	33
Figur 16 - Oppbygningen av modellen for rekkehuset i Simien.....	34
Figur 17 - Utslippsfaktorer for fjernvarmenettverk fra Statkraft. (Statkraft, 2022).....	35
Figur 18 - Oppbygning av yttervegg passivhus Kilde: (SINTEF, 2013b), Fig 1 & 44.....	37
Figur 19 - Oppbygning av skrått tak passivhus (SINTEF, 2013a), Fig 32 & Tabell 32.....	38
Figur 20 - Tabell for U-verdier i gulv på grunnen (SINTEF, 2019), Tabell 52.....	38
Figur 21 - Energibudsjett TEK 17.....	39
Figur 22 - Levert energi til TEK17-bygning.....	39
Figur 23 - Energibudsjett passivhus.....	40
Figur 24 - Levert energi til passivhus.....	40
Figur 25 - Utslipp fra materialer.....	41
Figur 26 - Utslipp fra materialer fordelt på livsstadium (uten A1-A3 & C3).....	42
Figur 27 - Utslipp fordelt på varegrupper.....	42
Figur 28 - Utslipp fra materialer fordelt på faser (Uten biogent karbonopptak og -utslipp.)... 43	43
Figur 29 - Utslipp fra energibruk i drift med NVEs elmiks fra 2021.....	44
Figur 30 - Utslipp fra energibruk i drift med NVEs gjennomsnittsfaktor for direkte el & fjernvarme fra Statkraft Trondheim 60år.....	45
Figur 31 - Lineær prognose for utslippsfaktor fra fjernvarme.....	45
Figur 32 - Utslipp fra fjernvarme med- og uten reduksjon fra prognosert utslippsfaktor.....	46
Figur 33 - Utslipp fra energibruk i drift med europeisk energimiks.....	46
Figur 34 - Utslipp fra transport (A4), spesifikk/generell.....	47
Figur 35 - Utslipp fra generell/spesifikk transport fordelt på varer.....	48
Figur 36 - Totale utslipp sammenlignet for TEK17 og passivhus per m2.....	49
Figur 37 Kart med strømbørs fra Nordpool for prisene i NOK/MWh for 12.05.2022. (Kilde: Nordpool).....	53

Tabelliste

Tabell 1 - Minimumskrav til energieffektivitet TEK17 Kilde:(Direktoratet for byggkvalitet, 2022).....	9
Tabell 2 - Utsnitt 1 mengder, av tabell bygningselementer i Excel	29
Tabell 3 - Utsnitt 2 klimatall, av tabell bygningselementer i Excel	30
Tabell 4 U-verdier TEK17 og beregnet passivhus	36

Begreper/forkortelser

BIM	Bygningsinformasjonsmodellering
BRA	Bruksareal
BTA	Bruttoareal
CO2	Karbondioksid
CO2e	CO2-ekvivalenter
DWG	Filtype
DiBK	Direktoratet for byggkvalitet
EPD	Environmental Product Declaration
GWP	Global Warming Potential
LCA	Life Cycle Assessment (livsløpsanalyse)
LCI	Life Cycle Inventory (livssyklusregnskap)
LCIA	Life Cycle Impact Assessment (livsløpseffektvurdering)
kWh	Kilowattimer
NS	Norsk Standard
NS-EN	Europeisk standard, fastsatt som Norsk Standard
NS-EN ISO	Internasjonal og europeisk standard, fastsatt som Norsk Standard
PCR	Product Category Rules (produktkategoriregler)
TEK17	Byggteknisk forskrift
ZEB	Zero Emission Building

Standardliste

NS3031	Beregning av bygningers energiytelse Metode og data
NS3700	Kriterier for passivhus og lavenergibygninger Boligbygninger
NS3720	Metode for klimagassberegninger for bygninger
NS-EN 15804	Bærekraftige byggverk Miljødeklarasjoner Grunnleggende produktkategoriregler for byggevarer
NS-EN 15978	Bærekraftige byggverk Vurdering av bygningers miljøprestasjon Beregningsmetode
ISO 14040	Miljøstyring Livsløpsvurdering Prinsipper og rammeverk (ISO 14040:2006)
ISO 14044	Miljøstyring Livsløpsvurdering Krav og retningslinjer (ISO 14044:2006)
ISO 21930	Bærekraftige bygninger og anlegg Grunnleggende produktkategoriregler for miljødeklarasjoner for byggevarer og tjenester

1 Innledning

1.1 Bakgrunn for oppgaven

Ifølge FNs generalsekretær må klimaendringene behandles som en umiddelbar trussel (Guterres, 2021). Bygg og anlegg står for om lag 40% av klimagassutslippene globalt (RIF, 2019). Også i Norge står det for en betydelig mengde av utslippene og energiforbruket (Nersund Larsen, 2019). I denne sammenhengen er det viktig å kartlegge klimafotavtrykk, og undersøke tiltak som kan være med på å redusere utslippene.

Om klimamålene som er satt i COP26 skal nås, krever det at fremtidige løsninger tar hensyn til klimaperspektiver i kommende prosjekter (FN, 2021c). I et forsøk på å gjøre byggenæringen mer miljøvennlig, foreslo DiBK at det skal utføres klimagassregnskap ved bygging av alle nye boligblokker og yrkesbygg (Horne, 2021). Følgelig vil det være nødvendig for byggeindustrien med økt kunnskap om klimagassregnskap.

Mesterkonsult AS er et Arkitekt- og ingeniørkontor som ble etablert i 2019 med tilholdssted på Heimdal i Trondheim. De jobber blant annet med energirådgivning i småhus. Som flere andre firma har de mindre erfaring med klimagassberegninger. Gruppen ble tildelt et prosjekt som besto av et rekkehus og en tomannsbolig i skissefase. I fellesskap med Mesterkonsult ble gruppen enige om å se på klimagassutslippene og følgende endringer i CO₂-utslipp ved oppgradering til passivhusstandard for rekkehuset.

Bakgrunnen for at valget falt på dette er ønsket om å se på eventuelle fordeler eller ulemper ved energioppgradering av prosjektet medfører i et miljøperspektiv. Vi er interesserte i å se på mengden ekstra klimagassutslipp som følger av økt materialforbruk. Videre ønsker vi å sammenligne utslippøkningen i denne fasen med besparelsen som følger en senkning i energiforbruket til et passivhus.

Resultatet av denne bacheloroppgaven vil være nyttig for Mesterkonsult å ta med seg inn i framtidig energirådgivning og avgjørelser. Erfaringene og kunnskapen opparbeidet fra klimagassregnskapet vil komme godt med dersom det skulle bli aktuelt med klimagassregnskap i framtidige prosjekter.

1.2 Problemstilling

Problemstillingen som skal undersøkes tar for seg et stort område som vil kunne gi mange delspørsmål og resultater. Problemstillingen på oppgaven er:

«Er passivhus eller TEK17 mest miljøvennlig gjennom et byningslivsløp?»,

I tillegg vil vi også forsøke å besvare underspørsmålet:

«Hvor stor innvirkning har bruk av spesifikke transportdistanser til prosjekter på klimagassutslippene fra transport?»

1.3 Beskrivelse av prosjektet

Prosjektet skal forsøke å undersøke miljøprestasjonen til et rekkehus prosjektert etter kavenene i TEK17 opp mot et passivhusscenario for det samme rekkehuset. Oppgaven vil gjøre dette ved å utføre klimagassregnskap for begge scenarioene, for så å gjøre en sammenligning.

Oppgaven skal ta for seg et rekkehus som er under prosjektering, og ved starten av arbeidet med oppgaven er kun skissetegninger ferdig utarbeidet. Skissetegningene og beskrivelser av bygget i form av bygningsdetaljer er grunnlaget for beregningene i oppgaven. Dette innebærer at alle modelleringer og beregninger for material- og energibehov utføres som en del av oppgaven.

Prosjektet ligger i Trondheim kommune, Peder Morsets veg 21. På tomta skal det bygges et rekkehus i 5 enheter, og to eneboliger i kjede, denne oppgaven skal kun ta for seg rekkehuset. En mer detaljert casebeskrivelse kommer senere i rapporten, etter at teorien er presentert.

1.4 Avgrensninger og forutsetninger

Oppgaven er begrenset av tid. I livsløpsanalysen begrenser oppgaven seg til å kun se på GWP, og utelukker andre effektkategorier for påvirkning av miljøet. Samtidig vil dette føre til en dypere forståelse og økt gjennomsiktighet for resultatene fra regnskapet. Ytterligere er det gjort begrensninger innenfor livsløpsanalysen, som å utelukke klimatall for enkelte produkter

som verken er veldig utslagsgivende for klimagassregnskapet eller det finnes tilfredsstillende informasjon om til å beregne klimagassregnskap for. Valgene diskuteres senere i oppgaven.

Klimagassregnskap utføres kun på rekkehuset i casen og de spesifikke resultatene vil dermed gjelde for dette prosjektet. Også de klimatiske forutsetningene for beregninger gjort for energiforbruk, vil basere seg på klimaverdier for Trondheim. Endringene gjort på rekkehuset er kun én løsning på hvordan boligene kunne oppnådd passivhusstandard og resultatene vil dermed gjelde for den utførte oppgraderingen.

Ved oppgradering til passivhusstandard forsøkes det å beholde innvendig planløsning lik originalen for å gi mest mulig identisk funksjonalitet og brukskvalitet. Dette vil gi større bebygd areal, men for sammenligningen sin del er det viktig at det oppgraderte bygget inneholder de samme kvalitetene som det originale bygget.

1.5 Samfunnsmessige perspektiver

«FNs bærekraftsmål er verdens felles arbeidsplan for å utrydde fattigdom, bekjempe ulikhet og stoppe klimaendringene innen 2030.» (FN-sambandet, 2022)

Denne oppgaven belyser FN's bærekraftsmål ved at den ser på direkte klimagassutslipp knyttet til boliger i Norge. Følgelig vil oppgaven berøre bærekraftsmål 7.3, «Innen 2030 få forbedringen av energieffektivitet på verdensbasis til å gå dobbelt så fort» (FN, 2022b). I tillegg vil det inngå i bærekraftsmål 11 – Bærekraftige byer og lokalsamfunn (FN, 2022a).

Høye utslipp av CO₂ er en av de viktigste påvirkningsfaktorene til at temperaturen på jorda stiger (Barry and Chorley, 2010). Dermed er det svært kritisk at utslippene av CO₂ øker med tiden. Nylig ble det holdt et klimatoppmøte i Glasgow, der ble det erkjent at vi med de nåværende klimatiltak ikke vil holde målet om maksimum 1,5 grader global oppvarming (FN, 2021a). Etter den siste klimarapporten fra FN's klimapanel ble det gjort klart at all økning av global oppvarming over 1,5 grad vil få enorme konsekvenser. I klimatoppmøtet ble det lagt en plan hvor det forventes at tiltakene vil føre til en maksimal global oppvarming på 2 grader om alle planene blir fulgt. I tillegg ble det enighet om at alle land skulle etterstrebe og holde oppvarmingen under 1,5 grad (FN, 2021b).

Ellers er studiet interessant grunnet innblikket i forskjeller ved energibehov for de to forskjellige rekkehusmodellene. Nylig har det vært økt fokus på strømpriser, og hva morgendagens strømpriser vil være. Til tross for at det ikke blir gått inn på de økonomiske perspektivene i oppgraderingen av rekkehuset på et dypt nivå, vil det være et aspekt av stor betydning for samfunnets syn på slike tiltak.

1.6 Valg av metode

Oppgaven er en komparativ case-studie, hvor to caser vi bli studert på samme måte for så å sammenlignes inn mot problemstillingen. Prosjektet vi jobber med består av ett rekkehus prosjektert etter å opprettholde kravene i TEK17, og det første som skal gjøres er å lage en BIM-modell basert på de taggingene som er utarbeidet av Mesterkonsult.

Videre skal bygget vi jobber med oppgraderes til passivhusstandard. Dette gjør vi ved å benytte og utvikle løsninger for bygget som vi tester i et energiberegningsprogram. Dette gir innsikt i endringer som behøves for å gjøre det opprinnelige rekkehuset til et som kan regnes som et passivhus. De nye endringene gir grunnlag for å modellere en BIM-modell hvor endringene er tatt med. Dette gir to separate versjoner av det samme bygget, med forskjellige material- og energibehov. Det er disse som skal analyseres hver for seg, før de sammenlignes inn mot problemstillingen.

Det skal utføres en LCA-studie for begge versjonene av bygget, og dette vil bli gjort i Excel, her samles alt av data og resultatene framstilles i henhold til de spørsmålene som skal besvares. De fleste materialene som er brukt i analysen har allerede beregnet informasjon for utslipp. Denne informasjonen importerer vi til Excel hvor vi beregner totale mengder for hele bygget. Beregningene i Excel baserer seg på behandling av data i form av tall, og framstilling av disse gjennom tabeller og diagrammer. For å gjennomføre en slik studie er det naturlig å bruke en kvantitativ metode. Dette er forskningsmetoder som brukes når man skal samle inn og behandle kvantitative data. Dette er data i form av tall eller andre mengder, i motsetning til kvalitative data, som ofte kan være i form av tekst. (Grønmo, 2021)

1.7 Rapportens oppbygning

Videre er rapporten oppbygd på denne måten:

- Kapittel 1 Innledning
- Kapittel 2 Det teoretiske grunnlaget som er nødvendig for å forstå det videre innholdet i rapporten presenteres.
- Kapittel 3 Gjennomgang av metoden og redegjørelse av fremgangsmåte og valg tatt underveis i studien.
- Kapittel 4 Resultatene presenteres og beskrives for å gi grunnlag for videre diskusjon.
- Kapittel 5 Diskusjon av oppgavens resultater, valg av metode og arbeidsprosess, mulige feilkilder, kritisk blikk på metode og beregninger.
- Kapittel 6 Konklusjon som kommer med en kort oppsummering av de viktigste funnene og diskusjonen, og forslag til videre studier.

2 Teori

I dette kapitlet presenteres det teoretiske grunnlaget for oppgaven. Aktuell teori inneholder energieffektive bygninger, hva energieffektive bygninger er, og ulike klassifiseringer av energieffektive bygninger. Videre omhandler teorien hva LCA er og hvordan den utføres generelt og spesielt for bygninger. Avsluttende er det en del som omhandler BIM generelt og bruk i LCA.

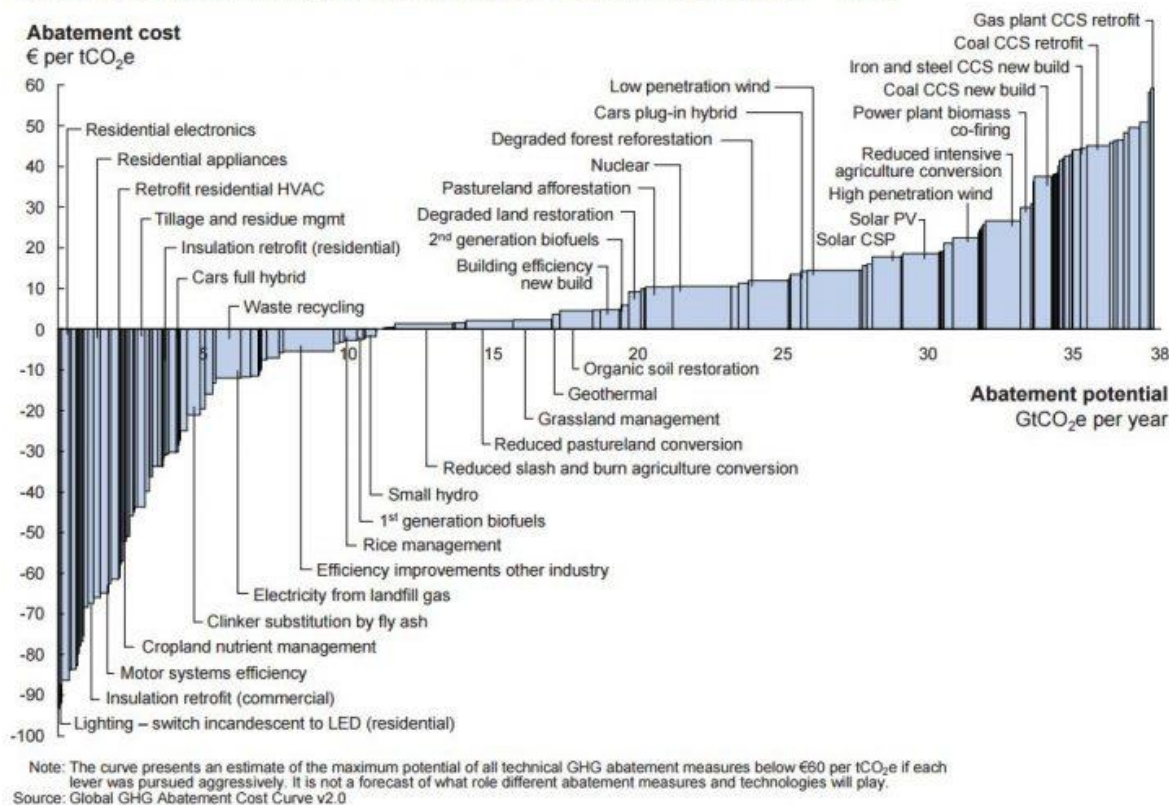
2.1 Energieffektive bygninger

Energieffektivitet er i praksis hvor mye «produkt» du får per energi. I bygningssammenheng handler dette gjerne om temperatur, hvor «produktet» man ønsker å oppnå er et behagelig inneklima (Schwarz, 2018). For å oppnå dette trenger man energi. Desto bedre forhold for å ta vare på varmen du har, desto mindre energi trenger du for å opprettholde det behagelige inneklimaet. Følgelig blir en energieffektiv bygning en bygning som trenger mindre energi for å opprettholde funksjonaliteten sin som klimaskjerm.

2.1.1 Hvorfor energieffektive bygninger

Som nevnt tidligere står drift av bygninger for om lag 40% av den innenlandske energibruken. Det er ingen tvil om at klimapåvirkningene av økt forbruk også av energi er et problem som må løses. Det sies at energieffektivitet er en av de billigste «energikildene».

Global GHG abatement cost curve beyond business-as-usual – 2030



Figur 1 - Kostnader knyttet til tiltak som kan redusere utslippene av klimagasser. Kilde: (McKinsey Sustainability, 2010)

Bygg- og anleggsnæringen står for en stor mengde av Norges klimagassutslipp. Ifølge en rapport fra Asplan Viak på oppdrag fra Byggenæringens Landsforening konkluderes det med at næringen estimeres til å utgjøre 15,3% av klimagassutslippene i landet (Nersund Larsen, 2019). Rapporten fastslår at utslippene står for en enda større prosentandel om man regner med import istedenfor å regne med eksport av byggevarer. En av årsakene til dette er at Norge i stor grad bruker elektrisitet for oppvarming (Statistisk sentralbyrå, 2021). Mye av kraftproduksjonen er fra vannkraft som er en svært ren energiressurs (Statistisk sentralbyrå, 2022). Allikevel vil en reduksjon av energibruk i drift av norske bygg øke muligheten til å eksportere en større andel av den utslippsfattige energien som produseres i Norge. Slik kan klimagassutslippene senkes ved at en større andel av energibehovet i også nabolandene kan dekkes av fornybar energi. Det er derimot knyttet noe usikkerhet rundt akkurat hvor mye reduksjon i klimagassutslipp eksport av norsk energi utgjør (Dokka *et al.*, 2009).

2.1.2 Energiforsyning

For å dekke energibehovet til et bygg er det nødvendig med en eller flere energikilder. Det finnes flere løsninger som kan dekke dette behovet. I Trondheim kommuneplans arealdel er det vedtatt at alle byggeprosjekter som er planlagt over 500m² skal tilknyttes fjernvarmenettverk om byggeområdet er innen konsesjonsområdet (Trondheim Kommune, 2012). Fjernvarme er kort forklart oppvarming av vann hos et sentralvarmelager som sender ut denne varmen til et tilknyttet nettverk av bygg (Statkraft Varme, 2017). Oppvarmingen skjer som regel med varme som hadde gått til spille hvis man ikke hadde brukt den slik som i et fjernvarmeanlegg. I boliger som benytter fjernvarme kan dette dekke behovet for oppvarming av både rom og vann (Bryn, Petersen and Gedsø, 2011). Som med andre energikilder er det knyttet utslipp til produksjon av energien. For et spesifikt fjernvarmeanlegg kan man kalkulere en utslippsfaktor ut fra hvor mye av hvilke energikilder som er brukt (Belgium Torstensen, 2020).

2.1.3 Varmetapstall

Oppvarmingsbehovet til en bygning er avhengig av varmetapet, og varmetilskuddet levert fra internlaster og soltilskudd. For å beregne varmetapet behøver man å regne varmetransportkoeffisienten (Formel 1), denne gis ved å fastslå varmetransmisjonstap til det fri (H_D), til uoppvarmede soner (H_U) og gjennom grunnen (H_g). I tillegg legges det til ventilasjonsvarmetap (H_V) samt infiltrasjonsvarmetap (H_{inf}). Deler man dette på oppvarmet bruksareal får man varmetapstallet (Formel 2), dette sier noe om hvor mye termisk energi man mister gjennom klimaskallet.

$$H = H_D + H_U + H_g + H_V + H_{inf}$$

Formel 1 - Varmetransportkoeffisienten.

$$H'' = \frac{H}{A_{BRA}}$$

Formel 2 - Varmetapstall.

Faktorene for varmetap til det fri, til uoppvarmede soner og gjennom grunnen er avhengig av varmemotstanden til bygningsdelene. Denne varmemotstanden angis gjerne i en bygningsdels «U-verdi» som er et standardisert mål på hvor lett en bygningsdel slipper gjennom varme

(SINTEF, 2018a). Verdien angis i « $\frac{W}{(m^2K)}$ » som beskriver hvor mye varme som strømmer gjennom $1m^2$ per grad forskjell per tidsenhet. Desto lavere U-verdien til en bygningsdel er, desto bedre er evnen dens til å holde på varmen i bygget.

2.1.4 Byggeteknisk forskrift (TEK17)

«Forskrift om tekniske krav til byggverk trekker opp grensen for det minimum av egenskaper et byggverk må ha for å kunne oppføres lovlig i Norge» (Direktoratet for byggkvalitet, 2022). Dette omhandler blant annet krav til dokumentasjon av byggevarer, konstruksjonssikkerhet, inneklima og helse, og energi.

Energibestemmelsene i TEK17 skal legge til rette for forsvarlig energibruk. «Det er satt tallfestede krav til totalt netto energibehov per kvadratmeter oppvarmet bruksareal. Kravene er ulike for ulike bygningstyper. Det gir fleksibilitet i valg av bygningstyping. Men det er satt absolutte minstekrav til U-verdier (varmegjennomgangskoeffisient) på klimaskjermens ulike deler, samt bygningens lufttetthet. Dette er passive tiltak som man har nytte av i hele bygningens livsløp.» (Direktoratet for byggkvalitet, 2022)

Energirammekravet angir totalt netto oppvarmingsbehov i kWh/m² oppvarmet BRA per år, i tillegg til at bygget må overholde minstekravet til U-verdier for klimaskjermen. Tabell 1 viser minimumskravene som gjelder for alle bygninger, unntatt laftede bygninger.

U-verdi yttervegg [W/(m ² K)]	U-verdi tak [W/(m ² K)]	U-verdi gulv på grunn og mot det fri [W/(m ² K)]	U-verdi vindu og dør inkludert karm/ramme [W/(m ² K)]	Lekkasjetall ved 50 Pa trykkforskjell (luftveksling per time)
≤ 0,22	≤ 0,18	≤ 0,18	≤ 1,2	≤ 1,5

Tabell 1 - Minimumskrav til energieffektivitet TEK17 Kilde:(Direktoratet for byggkvalitet, 2022)

Forskriften inneholder også egne verdier for energitiltak, disse er strengere enn minimumskravet, men så lenge man holder seg innenfor alle disse verdiene har man i tilstrekkelig grad dokumentert at man opprettholder kravet til energieffektivitet.

2.1.5 Passivhus

Passivhus er et begrep som brukes om bygninger med spesielt lave energibehov, lavere enn det som er kravene i TEK17. NS3700 (boligbygg) og NS3701 (yrkesbygg) angir krav til bygninger som kan defineres som passivhus i norsk klima. «Standarden omfatter definisjoner, krav til varmetap, oppvarmingsbehov, og energiforsyning, samt minstekrav til enkelte bygningskomponenter. Standarden gir også krav til lekkasjetall, prøvingsprosedyrer, målemetoder og rapportering av energiytelsen ved ferdigstillelse for boligbygninger.» (NS3700, 2013) For øvrig må boligen naturligvis også oppfylle de generelle kravene til energiytelse gitt i standard NS 3031.

For å oppnå et lavt energibehov tar man gjerne i bruk en rekke passive energitiltak som skal redusere behovet. Eksempler på slike tiltak er ekstra god isolasjon i klimaskjermen, bedre isolerte vinduer og ekstra god tetthet. Dette medfører at passivhus typisk ender opp med tykke vegger og tak, for å oppnå kravene som er satt. Utover dette er det gjerne betydelig mindre vindusareal. Dette er en ofring man gjør for å senke varmetapet gjennom vegger ettersom at vinduer har mye høyere U-verdi enn resten av veggen.

Grunnen til at man ønsker å bygge passivhus er at de i livstida er miljøvennlige, dette på grunn av at de bruker lite energi. I et økonomiske perspektiv vil et passivhus være dyrere å konstruere, men dette vil eventuelt kunne hentes inn igjen i løpet av en tidsperiode med lavere strømforbruk.

2.1.6 ZEB (Zero Emission Buildings)

Steget videre fra passivhus er ZEB-bygg. Disse byggene har som mål å nå et netto utslipp av klimagasser på null i løpet av byggets livsløp. Konseptuelt er et ZEB-bygg et bygg som forsøker å minske energibehovet i så stor grad at det kan dekkes av minimum lik mengde produsert energi fra en fornybar kilde. Energiproduksjonen må for øvrig innhente utslippene som forekommer ved produksjon og avfallsbehandling av materialene, slik at målet med nullutslipp kan nås (Hestnes, 2017).

2.2 LCA

Life Cycle Assessment har utviklet seg til å bli en teknikk vi bruker til å systematisk identifisere påvirkninger på miljø knyttet til produkter og tjenester. Det er et verktøy som

brukes for å fastslå en prosess eller et produkts påvirkning på omgivelser og klima. Begrepet LCA er en forkortelse av det engelske «Life Cycle Assessment», som betyr livssyklusanalyse. I en slik analyse beregnes klimapåvirkningen, fra eksempelvis et produkt, hvor alle betydelige prosesser vil være tatt i betraktning (Figur 2). For et produkt vil dette være alt fra ekstrahering og prosessering av råmaterialer, produksjon, transport og distribusjon, bruk, vedlikehold, resirkulering, gjenbruk og avfallsbehandling (F *et al.*, 1993).



Figur 2 - LCA. Illustrasjon: (NILU, 2021)

Det å utføre en LCA-studie er svært omfattende og tidskrevende, da det er store datamengder som må innhentes og kalkuleres. Teknikken har allikevel blitt et verktøy som har vokst i forbindelse med den økende interessen for å minske blant annet utslippene av klimagasser. LCA har blitt standardisert gjennom NS-ISO 14040 som inneholder generelt rammeverk og NS-ISO 14044 som tar for seg metodikken. Det finnes i hovedsak to forskjellige typer LCA, regnskaps-LCA og konsekvens-LCA. Førstnevnte forsøker å allokere utslipp «rettferdig» gjennom å fordele utslippene i den fysiske verdikjeden til ulike produkter. Sistnevnte forsøker å forklare miljøkonsekvensene av en endring i et system (Solli, 2016).

Når man utfører en livssyklusanalyse, begynner man med å definere hensikten og omfanget av studien. Dette etterfølges av livsløpsregnskapsfasen hvor man samler inn data, som for eksempel hvor mye materialer og energi man trenger for å produsere produktet man undersøker. Dette gjøres enten ved å bruke databaser for prosesser og materialer som finnes i

for eksempel databaser som ecoinvent i programmet SimaPro. Eller ved å oppsøke EPDer for å danne et grunnlag for å se på resultatene av studien. Når beregninger er gjort med grunnlag etablert fra livsløpsregnskapet, kan man se på livsløpseffektvurderingsfasen hvor man synliggjør miljøprestasjonene til produktet man studerer. Til slutt kommer tolkningsfasen hvor man oppsummerer resultatene og konkluderer med funnene i henhold til hensikten med studien.

2.3 Hvordan utføres en LCA

Under følger gjennomgang av hvordan en LCA utføres.

2.3.1 Hensikt og omfang

Hensikt

Det første man må gjøre når man skal utføre en LCA-analyse er å fastslå formålet med studien. Videre skal man definere konteksten for analysen, slik som hvem til og hvordan resultatene skal kommuniseres. Årsaken for studien skal også dokumenteres

Omfang

Når man utfører en LCA-studie er det nødvendig å sette et rammeverk for studien. Dette innebærer blant annet hvilke systemgrenser man forholder seg til, hvilke effektkategorier man skal undersøke, hva man skal velge som funksjonell enhet og generelt hvordan man skal utføre livssyklusanalysen (European Commission, Joint Research Centre, and Institute for Environment and Sustainability, 2010). Alle disse avgjørelsene bør gjøres i henhold til hensikten med analysen. Er målet for eksempel å beregne klimapåvirkningen av valget mellom hvilken isolasjonstype man skal benytte seg av i et bygg er det ikke nødvendigvis slik at man behøver å beregne alle andre deler av byggets livssyklus for å oppnå tilfredsstillende svar på hensikten med oppgaven.

For å gjøre resultatene i studien sammenlignbare, er riktig valg av funksjonell enhet viktig. I en livssyklusanalyse av et bygg er det vanlig å se på for eksempel utslipp klimagasser per år,

per m²BTA eller per m²oppvarmet BRA. På denne måten kan man vurdere resultatene opp mot løsninger og valg gjort i andre bygg med utført klimagassregnskap.

Når man utfører en livssyklusanalyse for et bygg deles miljøpåvirkningen gjerne inn i fire hovedfaser. Disse fasene gjør resultatene mer gjennomiktig og enklere å tolke. De fire fasene blir inndelt i subfaser slik som vist senere i Figur 3.

2.3.2 Livssyklusregnskap (LCI)

Denne fasen består av datainnsamling for alle prosesser og materialer som inngår i produktet, som i dette tilfellet er bygningen som skal analyseres. Dette gjøres ved å beregne miljøpåvirkning fra alle prosesser og materialbehov som er en del av bygget. Det finnes flere metoder å gjøre dette på, en av disse er å bruke programvaren SimaPro. programvaren er verdens ledende innenfor LCA. Det er et verktøy som brukes for å samle inn, analysere og overvåke produkter og tjenesters bærekraftsprestasjon. I SimaPro finnes databasen ecoinvent v3.8 som er verdens ledende LCI database som inneholder datasett med en stor mengde produkter, tjenester og prosesser.

For produkter og materialer hvor det er utarbeidet EPDer er det naturlig å bruke disse da de inneholder mer eksakt data enn det mer generelle som ligger i LCI-databaser. Et byggeprosjekt består av svært mange produkter, prosesser og materialer som alle har sine respektive livssykluser som blir en del av det samlede byggets livssyklus. Dermed er det vanlig å velge noen kriterier for hva som skal være med i livssyklusregnskapet. Ved bruk av allerede beregnede data slik som i EPDer er det gjort valg om hvilke faser i produktet/materiallets livssyklus som skal tas med i beregningene. Disse valgene er følger av et/flere «cut-off-kriterier». Disse kan f.eks. være basert på at klimapåvirkningen i faser for produktet er neglisjerbare, eller at det mangler data, tid og/eller finansielle midler for å gjennomføre analysen. Prosesser knyttet til personell slik som persontransport er et eksempel på noe som er ekskludert fra livssyklusanalysen. Kriterier på hva som kan kuttes i analysen er presisert i NS-EN 15978.

2.3.3 Livsløpseffektvurdering (LCIA)

Etter fullført livsløpsregnskap må resultatenes miljøpåvirkning beskrives. Dette gjøres i denne fasen som forsøker å beskrive miljøkonsekvensene som følger av produktets livssyklus. Målet med dette er få frem de miljømessige effektene med informasjonen funnet i livsløpsregnskapet. Det finnes flere effektkategorier som viser til forskjellige påvirkninger et produkts livsløp har på miljøet. I bygningsnæringen er disse relevante effektkategorier (European Commission, Joint Research Centre, and Institute for Environment and Sustainability, 2010):

- Potensielt bidrag til global oppvarming
- Potensial for nedbryting av ozonlaget (i stratosfæren)
- Potensial for forsuring av jord og grunnvann
- Potensial for overgjødning
- Potensial for dannelse av ozon i troposfæren

En EPD er et kortfattet dokument som oppsummerer miljøprofilen til et produkt, en komponent eller en tjeneste (Bentsen, 2015). Det er med andre ord en ferdig LCIA for en viss mengde av et visst produkt. EPDer som er verifisert av uavhengige, sertifiserte organisasjoner og følger ISO-standardene 14025, 14040 og 14044, samt EN15804 eller ISO21930. Dette skal forsikre at dataene som finnes i dokumentet er nøyaktige og brukervennlig. Dessuten er det krav om at informasjonen som befinnes i EPDene skal være sammenlignbare med andre produkter.

For å sikre dette er produkter i samme produktgruppe eller som har samme produktfunksjon nødt til å følge de samme reglene. Disse reglene bestemmes i produktgruppens PCR, produktspesifikke regler. Reglene bestemmes av programoperatørene for landet EPDen utvikles i. PCRene er essensielle for å ha et tilfredsstillende sammenligningsgrunnlag for å utføre velinformerte og bevisste valg med hensyn på miljøkonsekvensene for produktvalgene.

Biogent karbon

For noen EPDer hvor produktet/materialet som dokumenteres er helt eller delvis laget av organisk biomasse slik som for eksempel trevirke, er det mulig å ta med opptak av CO₂ i beregningene. Biogent karbon inngår i det naturlige kretsløpet ettersom at det binder CO₂

gjennom fotosyntesen, og slipper dette ut til atmosfæren når biomassen forbrennes eller brytes ned. Når fossilt karbon forbrennes er det CO₂ som i netto legges til det som allerede finnes i atmosfæren. Det vil si at så lenge det plantes mer biomasse enn det som forbrennes vil det ikke tilkomme mer karbon i det naturlige kretsløpet enn det som allerede er der.

Konsekvensene av at biogent karbonopptak tas med i EPDer vil naturligvis være at utslippene i starten av livsløpet vil være negativt (opptak av CO₂), med lignende store utslipp i avfallsbehandlingen i produktets ende.

Betong er et materiale som også kan binde karbon under en kjemisk prosess som kalles karbonatisering. Prosessen skjer i en reaksjon hvor CO₂ i atmosfæren reagerer med CaO og blir til kalsiumkarbonat (CaCO₃). Mengden karbon som tas opp, samt hvor fort dette skjer er avhengig av flere faktorer som type betong, overflateareal på betongproduktet, hvordan miljøet rundt er og overflatebehandling på betongen. Opptaket vil skje mens produktet brukes eller ved avfallsbehandling etter endt bruk. I 2012 besluttet Norsk Betongforenings miljøkomité å starte en utarbeiding av en STAR (state-of-the-art-rapport) om CO₂-opptak i betong og hvordan dette blir vurdert og tatt i betraktning i LCA-studier. Oppsummeringen var at usikkerheter og utfordringer ved kvantifisering gjør at det som oftest ikke tas med i LCA-studiene (Lyng *et al.*, 2014).

I denne studien skal vi utelukkende se på potensielt bidrag til global oppvarming (GWP). Resultater innenfor denne effektkategorien påvirkes når utslippet av klimagasser øker. Klimagasser er gasser som fanger stråling som emitteres fra jorda (Barry and Chorley, 2010). Når desto mer av disse slippes ut i atmosfæren vil jorden bli varmere. Slik som i de andre effektkategoriene regnes miljøpåvirkningen om til en enhet som reflekterer produktets påvirkning på den spesifikke effektkategorien. For GWP blir resultatene regnet om til CO₂e. Dermed blir resultatene mer oversiktlig og det som ellers ville vært en lengre liste med gassutslipp vises heller som en mengde utslipp CO₂ som tilsvarer det totale utslippet fra produktets livssyklus.

2.3.4 Tolkningsfasen

Den siste fasen av en livssyklusanalyse er tolkningsfasen. I løpet av denne fasen skal det lages et sammendrag av funn gjort i studien. Videre skal resultatene ses i lys av hensikten med studien. Det er med andre ord den delen av analysen hvor man skal formidle og tolke hva

resultatene viser. Konklusjonen av resultatene opp mot hensikten til studien er også en del av denne fasen.

2.4 LCA for bygg

Det finnes som nevnt tidligere standarder for beregninger av livssyklusanalyser i bygningsbransjen. I disse gjennomgås hvordan prosessen skal gjennomføres både for enkle produkter, bygningsdeler eller hele bygg. Livssyklusanalysen gjennomføres med modulbasert tilnærming som er definert i NS-EN 15804. Disse fasene er delt inn i bokstaver og tall som viser når i livsløpet utslippene kommer fra. Desto flere faser som er tatt med i en EPD, desto mer gjennomsiktighet og informasjon for å utføre sammenligninger mellom produkter/materialer og å ta miljøvennlige valg.

For eksempel hvis det skal sammenlignes miljøvennligheten mellom trevirke fra to forskjellige produsenter. EPDene for trevirket har ikke tatt med transportstadiet, men den ene produsenten er nære byggeplassen, men den andre er langt unna. I et slikt tilfelle ville EPDene kunne vise trevirke fra produsenten langt unna som mest miljøvennlig uten at dette trenger å stemme med virkeligheten ettersom at en viktig del av sammenligningsgrunnlaget er borte.

En gjennomgang av fasene følger under.

A1-A3 Product Stage			A4-A5 Construction Process Stage		B1-B7 Use Stage							C1-C4 End of Life Stage				D Benefits and loads beyond the system boundary			
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4
Raw Material Supply	Transport to Manufacturer	Manufacturing	Transport to building site	Installation into building	Use	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operational energy use	Operational water use	Deconstruction / demolition	Transport to end of life	Waste Processing	Disposal	Reuse	Recovery	Recycling	Exported energy / Potential

Figur 3 - Livssyklusens inndeling i moduler. Kilde: (Helgesen, 2020)

Produktfase (A1-A3)

Denne fasen er den eneste som er en obligatorisk del av en EPD. Her inngår alle utslipp knyttet til produksjon av produktet. Det er uthenting av råvarer, transport til produksjonslokalet og selve produksjon. Det er flere EPDer hvor andre faser utelates helt eller velges ut fra hva som er relevant eller tilgjengelig informasjon. Datagrunnlaget for denne fasen er ofte godt ettersom at det baseres på reelle tall for den spesifikke produsenten og deres fremgangsmåte.

Konstruksjonsfasen (A4-A5)

Dette er stadiet for konstruksjon/installasjon av produktet. Herunder går transporten av produktet fra fabrikk til byggeplass(A4) og montering/installasjon(A5).

Som nevnt tidligere forsøker EPDer å gjøre klimadeklarasjoner på produkter hvor forskjellige scenarioer i noen tilfeller kan endre miljøpåvirkningen produktet gir. Transport (A4) er et eksempel på noe som er svært avhengig av hvor produktet produseres og hvor det skal. Et produkt som har en EPD kan noen ganger ha flere produksjonssteder noe som vil endre distansen produktet må transporteres til målet. I tillegg er det naturligvis forskjellige distanser til de forskjellige byggeprosjektene eller byggevareforhandlerne de skal til. Den beste løsningen på dette er å bruke forutsatte distanser.

Bruksfasen (B1-B7)

Stadiet tar for seg informasjonsmodulene som dekker alt fra bygget begynner å brukes til det dekonstrueres. Dette innebærer Bruk (B1), Vedlikehold (B2), Reparasjon (B3), Utskiftning (B4), Renovering (B5), Energibruk i drift (B6) og Vannforbruk i drift (B7).

Livsløps-slutt-fasen (C1-C4)

Sluttfasen for produktene følger alt fra slutten til byggets livssyklus. Fasen tar dermed for seg Dekonstruksjon (C1), Transport til avfallsbehandling (C2), Avfallsbehandling (C3) og Avfall til sluttbehandling (C4).

Gjenvinning / Gjenbruk (D)

Informasjonsmodulen inkluderer klimafordeler som følger med gjenbruk/gjenvinning av produktene og dets deler.

2.5 BIM (byggningsinformasjonsmodellering)

BIM er et verktøy som gjør det mulig å samle informasjon om hele livssyklusen til et bygg i en plattform. Dette muliggjør effektiv utveksling av byggningsinformasjon mellom de ulike spesialitetene som er involverte i et prosjekt, og gjenbruk av informasjon i ulike faser. Dette gjør at man kan utføre en rekke analyser basert på den tilgjengelige byggningsinformasjonen, samtidig som det minimerer behovet for å manuelt legge inn data i de fagspesifikke simuleringverktøyene (Nilsen and Bohne, 2019).

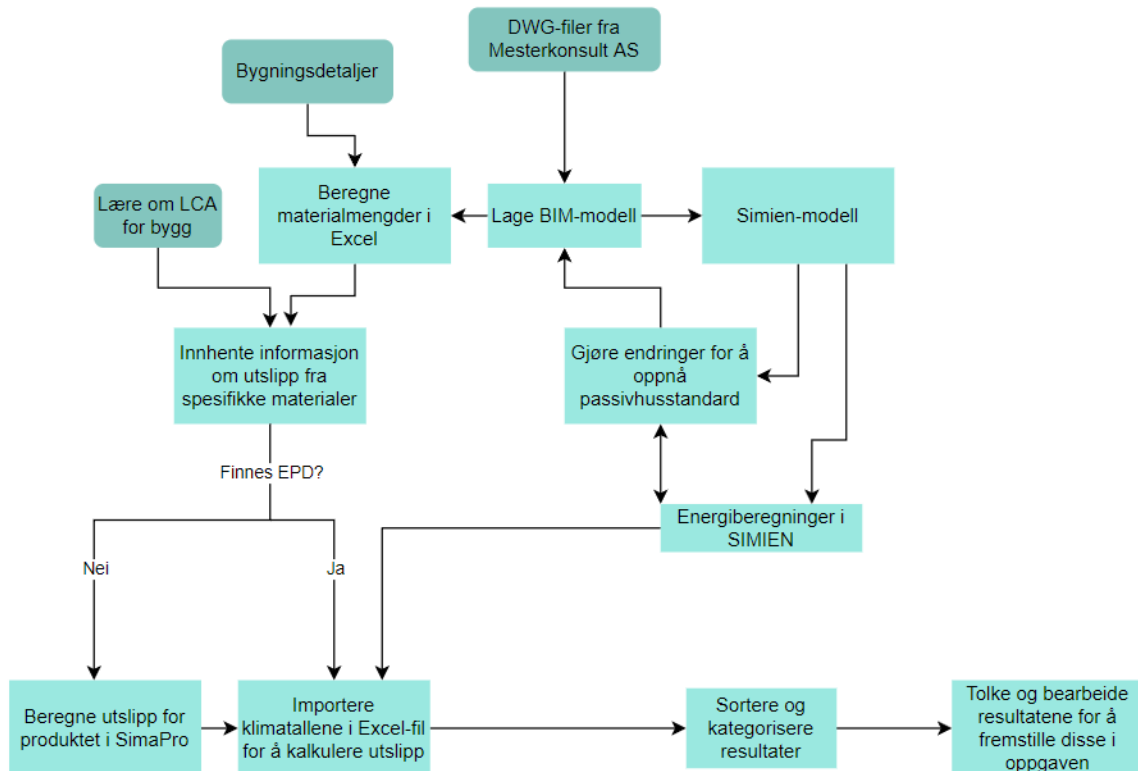
En virtuell modell av prosjektet er digitalt konstruert i foretrukket modelleringsprogram, og nødvendig informasjon legges inn i modellen. BIM-modellen består av en mengde objekter som inneholder informasjon om egenskaper slik som størrelse, geometri, material osv. Denne måten å arbeide på legger til rette for samhandling mellom de ulike aktørene i et byggeprosjekt, eksempelvis arkitekt, elektriker og byggherre.

2.5.1 BIM og LCA

Ved bruk av BIM i et prosjekt legges det til rette for å evaluere miljøpåvirkningene til et prosjekt i tidlig prosjekteringsfase. Løpende vurdering av et byggs miljøpåvirkning gjør det mulig å ta valg i lys av miljøperspektiv i prosjekteringen. I en LCA av et bygg er det behov for store mengder informasjon om bygget som skal evalueres. Ved bruk av BIM vil denne prosessen kunne forenkles i forhold til om man ikke hadde brukt det.

3 Metode

Metoden beskriver hvordan det er arbeidet med oppgaven, hvilke avgjørelser og vurderinger som er tatt underveis i oppgaven, og hvordan resultatene er fremstilt. Under vises et flytdiagram over prosessen.



Figur 4 - Flytdiagram for arbeid utført.

Studien er en Case-studie, og begynner med å beskrive casen det jobbes med, hvor prosjektet befinner seg, utforming, og konstruksjonsløsninger. Videre er prosjektet modellert i Revit med utgangspunkt i DWG-tegninger laget av Mesterkonsult AS. Energiberegninger i Simien har gitt grunnlag for å utforme passivhuset, og endringene ble grunnlag for egen modell i Revit. I Excel er det beregnet mengder av alle bygningsmaterialene i begge bygningene, og det er hentet inn klimadata for alle produktene der dette er mulig. Videre er energibehovet til begge bygningene beregnet til årlig mengde i kWh, før resultatene er sammenstilt for sammenligning og framstilling av resultater.

3.1 Casebeskrivelse

Det første som er gjort i arbeidet med oppgaven er å samle sammen alt som trengs av grunnlag for å gjøre beregninger på casen. Det gjelder beliggenhet, utforming, og materialbruk, og her presenteres det grunnlaget som er blitt brukt i arbeidet med oppgaven.

Casen består av et rekkehus i 5 enheter som skal bygges i Peder Morsets veg 21, og det ligger på Heimdal i Trondheim kommune. Figur 4 viser tre av fasadene før de er satt sammen til et sammenhengende rekkehus, fasade 2 har ingen vinduer. Alle enhetene er identiske innvendig, og den eneste forskjellen er beliggenheten i rekka.



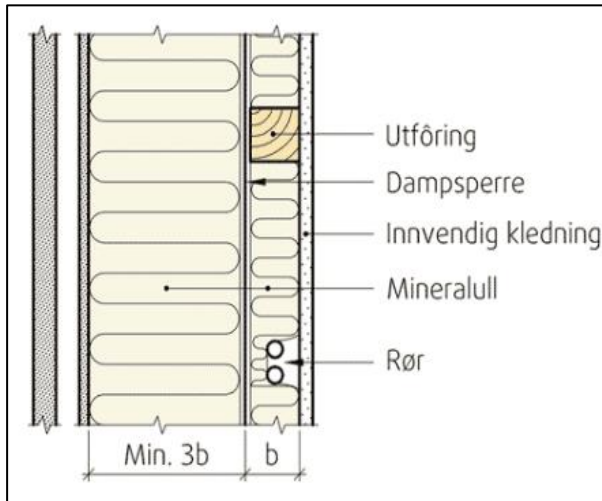
Figur 5 - Fasade utgangspunkt (Illustrasjon av: Mesterkonsult AS)

Figur 5 viser plantegninger av rekkehusets enheter. Disse tegningene i kombinasjon med snittegninger, konstruksjonsløsninger og lokasjon danner grunnlaget for klimagassberegningene. I underetasjen har alle enhetene en kald garasje, i tillegg til inngangsparti, bad, vaskerom og to soverom. I 1. etasje er det åpen stue og kjøkken med utgang til en liten balkong, i tillegg er det ett soverom med tilhørende bad og omkleddningsrom, det er også en bod. I 2. etasjen er det loftstue med utgang til en stor takterrasse i tillegg til ett soverom.

Konstruksjonsløsninger:

Her presenteres konstruksjonsløsningene i klimaskjermen til bygget, det er disse bygningsdelene som vil bli forskjellige ved energioppgradering, ytterligere bygningsdeler kommer fram av Excel-dokumentet som følger med oppgaven.

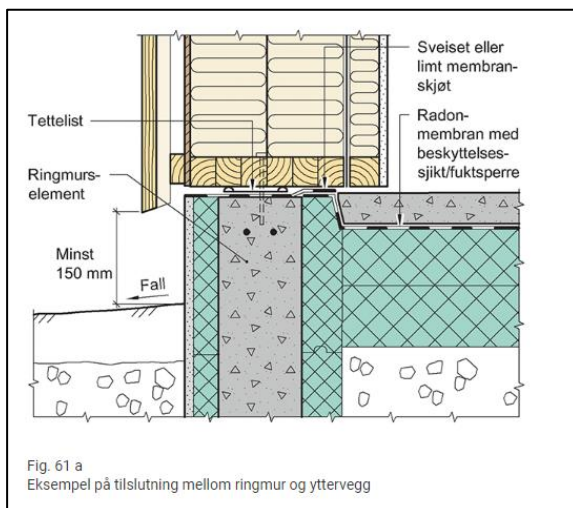
Yttervegger:



- Utvendig kledning 19 mm
- Lufting 23 mm (23 x 36 mm lekter)
- Vindsperre
- 36 x 148 mm konstruksjonsvirke med 200 mm mineralullisolasjon
- Dampsperre
- 48 mm utforing med 50 mm isolasjon
- Innvendig kledning, varierer avhengig av type rom

Figur 7 - Yttervegg TEK17 (Kilde:(SINTEF, 2018b), Fig 235)

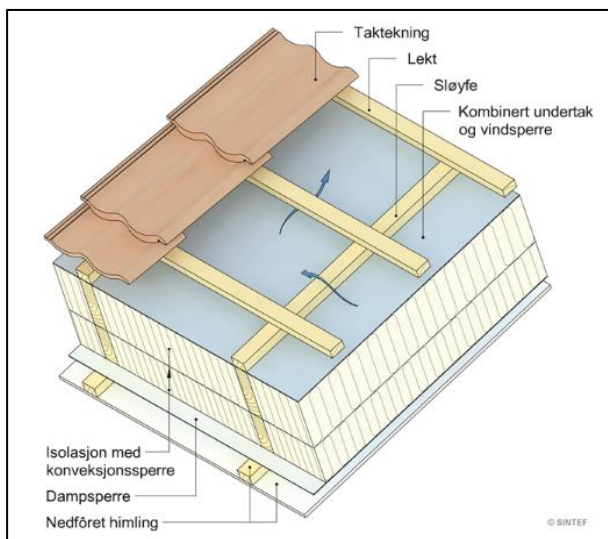
Gulv på grunnen:



- 10 cm betong i gulv
- Radonmembran
- 30 cm isolasjon

Figur 8 - Overgang vegg og gulv mot grunnen (Kilde:(SINTEF, 2013c), Fig 61a)

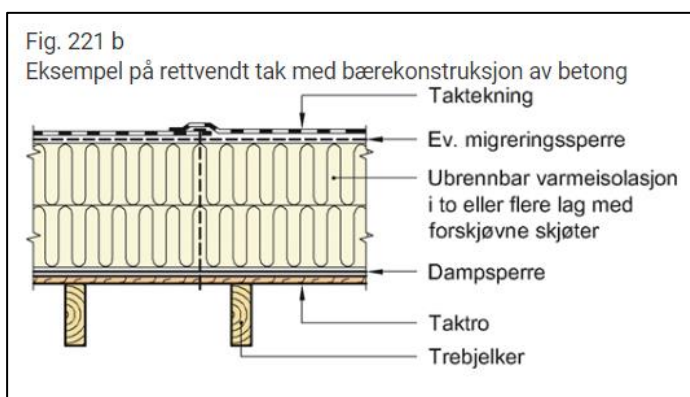
Skrått tak:



- Taktekning
- Krysslufting av tak med 36 x 48 mm sløyfer og lekter
- Taksperre c/c 600 mm med 350 mm isolasjon
- Dampsperre
- Nedføret himling med 36 x 48 mm lekter og gipsplater

Figur 9 - Skrått tak TEK17 (Kilde:(SINTEF, 2021), Fig 231a)

Kompakt tak:



- 270 mm isolasjon
- 0,2 mm dampsperre

Figur 10 - Kompakt tak TEK 17 (Kilde: (SINTEF, 2018c), Fig 221b)

3.2 Litteratur

Det første steget i å utføre LCA-studien av bygget var å se på hvordan dette gjøres og har blitt gjort tidligere. En av de viktigste aspektene ved en slik studie er at den skal kunne øke kunnskapen rundt miljøaspekter ved forskjellige løsninger. Derav er det viktig at de forskjellige løsningene i studien må være sammenlignbare med lignende studier. I den anledning ble det benyttet faglitteratur, tidligere bachelor- og masteroppgaver i tillegg til livssyklusanalyser av spesifikke prosjekt for å skape et bilde av hvordan tidligere studier har gjort lignende analyser.

For en innføring i LCA som verktøy har den viktigste støttelitteraturen vært «The hitch hiker's guide to LCA: an orientation in life cycle assessment methodology and application» skrevet av Henrikke Baumann og Anne-Marie Tillman først ble publisert i 2004. Som en del av oppstarten var det også nødvendig å finne ut hvordan LCA for bygg spesifikt skulle utføres. Dermed ble standardene NS 3720, NS-EN -15804 og -15978, ISO -14040 og -14044 nøye gjennomgått. Disse ga retningslinjer for hvordan en LCA skal gjennomføres innenfor de satte rammene.

For å undersøke hvordan andre studier har gått fram, hva de har funnet ut og anbefalt til videre studier, har vi spesielt sett på en masteroppgave hvor det ble utført en LCA på et boligprosjekt i Nardovegen i 2015 (San Elias Portet, 2015). Utover dette er et klimagassregnskap utført av AFRY for Mestergruppen Arkitekter (Vedlegg D) og en bacheloroppgave som undersøker effekten av miljøvennlige materialvalg på klimagassregnskap (Archer Lohne, Rekdal and Bugten, 2020) brukt som støttelitteratur. Disse bidro med blant annet i valg av funksjonell enhet, for å gi studien et mer solid sammenligningsgrunnlag mot andre klimagassregnskap.

3.3 Modellering

Rekkehuset er modellert i Revit, basert på DWG-skissetegninger som er utarbeidet av Mesterkonsult AS. Videre er denne modellen brukt til å lage en modell som overholder kravene til passivhus, selve oppgraderingen presenteres nøyere senere. Prosjektet var i tidlig skissefase da vi fikk tegningene og avviker noe fra ferdige tegninger som er utarbeidet i etterkant, det er ikke tatt hensyn til disse endringene. Revit-modellen har gitt oss det grunnlaget som er nødvendig for videre klimagassberegninger.

3.4 Bygningsfysiske beregninger

For å dokumentere at rekkehuset overholder energikravene gitt i TEK17, er programmet Simien brukt til å utføre beregninger på blant annet varmetap gjennom de ulike fasadene i bygget. I disse beregningene setter man inn U-verdier for bygningsdelene. Dette ved å velge fra konstruksjonsløsninger som ligger inne med ferdigberegnete U-verdier, eller ved å legge inn U-verdier som er beregnet selv eller hentet fra SINTEF Byggforsk.

Videre har vi brukt Simien til å se på hvilke grep som var nødvendige for å oppgradere huset til et bygg som oppfyller kravene til passivhus som er gitt i NS3700. I samsnakk med Mesterkonsult så vi på hvilke grep som var nødvendige og realistiske for å finne en løsning som tilfredsstiller kravene. Disse endringene ble så brukt til å lage en Revit-modell av passivhuset, som beskrevet tidligere. Endringene utført vises som en del av resultatene.

Når man utfører beregninger for et prosjektert bygg i Simien behøver programmet input på faktorer hvor man må bruke erfaringstall fra standarder. Dette gjelder for faktorer som inngår i varmetap som skjer i ventilasjon, infiltrasjon og kuldebroer. Ved valg utført i alle disse områdene har vi brukt det grunnlaget som gis i standarden NS3031. Verdiene vil kunne medfølge usikkerheter ettersom at de ikke nødvendigvis stemmer for dette spesifikke prosjektet etter bygget er konstruert.

Antagelsene for varmegjenvinner i ventilasjonen er gjort med grunnlag i samtaler med Mesterkonsult AS om hva som er vanlig for TEK17- og passivhus-bygg. Ytterligere er det undersøkt hvilke faktorer som er benyttet for varmegjenvinner i andre passivhus (Myhre *et al.*, 2012). Den totale andelen av varmetapstallet som grunnes disse faktorene er mindre utslagsgivende enn for eksempel varmetap i vegger og tak. Dermed anses antagelsene å gi et datagrunnlag som er tilfredsstillende for denne studien.

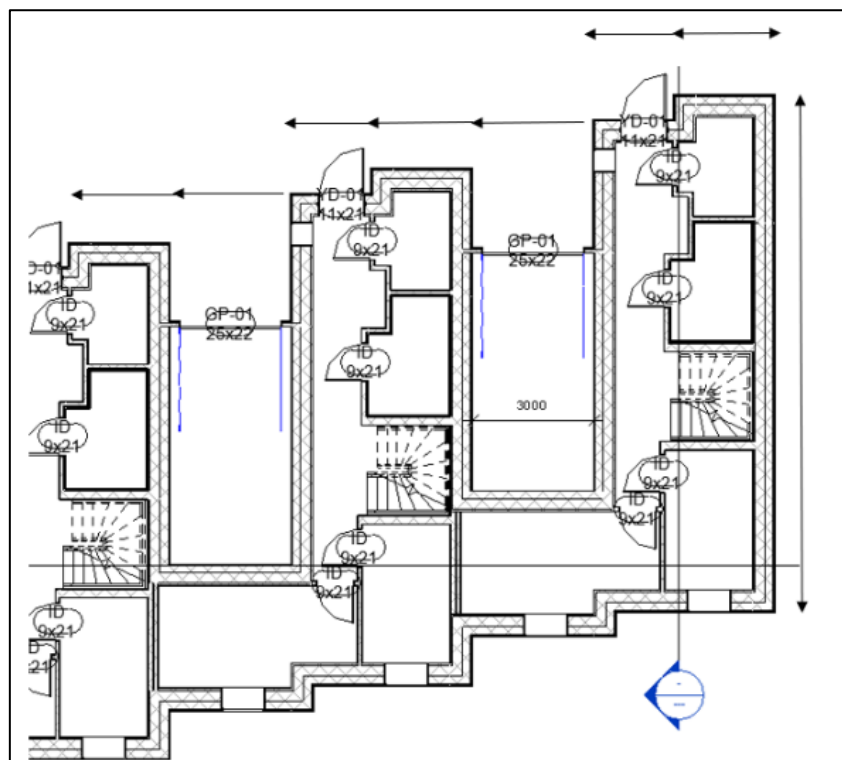
Utover å granske om begge bygningstilfellene holder de respektive kravene, brukes Simien også for å undersøke det årlige energiforbruket. Ved simulering av byggene i Simien, etableres informasjon om energibehov. I omfordelingskravene er det nettopp maksimalt energibehov som er styrende for kravene i NS3031. Programmet regner ut energibehovet med grunnlag i metodene som er angitt i NS3031. Med dette gir Simien et estimat for det årlige energibehovet, i tillegg regner den ut estimert levert energi hvor det tas hensyn til

utnyttelsesgraden for energiresursen som brukes. Med andre ord er fenomen som tap i elektrisitetsnettet tatt hensyn til i verdiene for «levert energi». Derav er dette verdiene som brukes når klimagassutslippet fra energibruk i drift skal beregnes.

3.5 Passivhus oppgradering

Ut fra beregningene i Simien er rekkehuset oppgradert til passivhusstandard ved å velge mellom ferdige konstruksjonsløsninger fra SINTEF Byggforsk som har ønskede egenskaper. Økt isolasjonsmengde vil gi tykkere bygningselementer i klimaskjermen til bygget.

Utgangspunktet for oppgraderingen er at planløsningen skal holdes så lik den originale planløsningen som mulig. For å få til dette er veggtykkelsen lagt på utover. Dette gjør at enhetene er forskjøvet, som vist av de horisontale pilene i Figur 12, og dybden på enhetene øker med ekstra veggtykkelse som vist av de vertikale pilene i Figur 12. Tak og gulv påvirker ikke planløsningen, og vil kun øke sin egen tykkelse, i tillegg til at de får litt større arealer som følge av endringen i vegger.



Figur 12 - Passivhus forskyvning

3.6 Livssyklusanalysen

Denne livssyklusanalysen følger ISO 14040/44 metodikken.

3.6.1 Hensikt og omfang

Hensikt

Hensikten med studien er å analysere miljøprestasjonen til et rekkehus prosjektert etter TEK17s lovgivning opp mot et forslag til en passivhusoppgradering som gruppen har utarbeidet. Det er ønskelig å se på hvilket av de to tilfellene som er mest gunstig for miljøpåvirkningen gjennom byggets livssyklus. Grunnlaget for studien er at utslippene knyttet til konstruksjonen av bygningene vil være forskjellige ettersom de bruker forskjellige materialmengder. Derimot vil det også være forskjeller i utslipp under bruksfasen ettersom at passivhus generelt har et mindre strømforbruk. Det vil være økonomiske forskjeller knyttet til begge disse fasene. Beregninger knyttet til dette utelates ettersom at kun de miljømessige forskjellene skal studeres. Når resultatene skal diskuteres vil noen økonomiske aspekter få en liten del ettersom at det er en viktig faktor når reelle prosjekter skal bygges.

Et annet aspekt som skal undersøkes er hvor mye antagelsene knyttet til transportdistanser avviker fra de reelle tallene i dette spesifikke prosjektet. Med dette vil datakvaliteten til denne modulen evalueres av EPDene for livssyklusanalyser i byggeprosjekter. Det utføres en følsomhetsanalyse av transportantagelsene gitt i EPDene som en del av oppgaven.

Omfang

Ettersom at studien forsøker å analysere differansen i klimagassutslipp ved de to tilfellene vi har valgt, utelater vi noen aspekter som ikke påvirkes i betydelig grad av oppgradering utført. Herunder utelater vi utslipp knyttet til blant annet grunnarbeid da dette vil være lignende for begge scenarioene. Noen produkter som ikke har en utarbeidet verifiserte EPDer og i tillegg er antatt mindre betydelig for livssyklusanalysen er utelatt i beregningene. Valgene er tatt for å gjøre arbeidsmengden overkommelig samtidig som alle produkt-/materialvalgene som er endret i de to modellene er tatt med i beregningene. Altså er alle produkter som har betydning for hensikten med studien tatt med i beregningene. Dermed gjør det at

sammenligningsgrunnlaget for klimagassutslippene i de to tilfellene er tilfredsstillende, da forskjellene er det viktige for denne studien.

For å lettere kunne sammenligne resultatene oppnådd i denne studien er den funksjonelle enheten satt til å være $\text{kgCO}_2\text{e/m}^2$ over 60år. Dermed kan prosjektet i prinsippet settes opp mot andre lignende prosjekter. Levetiden på bygget er antatt å være 60 år og utslippene regnes dermed med 60 års livsløp. I beregningene legges dagens utslippsfaktorer til grunn knyttet til strømforbruk, dette kan endres i fremtiden.

Effektkategorien som undersøkes er «potensiell global oppvarming» (GWP). Valget om å utelate andre effektkategorier er gjort på grunnlag av at studien er tidkrevende og sammenligningen vil gjøres mer oversiktlig og gjennomførbar ved å utelukkende se på en effektkategori. Utslippene av klimagasser i byggenæringen kommer i hovedsak av forbrenning av fossilt brensel når man blant annet utvinner råmaterialer, produserer eller transporterer materialer. I bruksfasen vil energiforbruket være den største kilden for klimagassutslipp om man bruker importert strøm fra fossile energikilder.

For å gjøre prosessen så nøyaktig og effektiv som mulig er det gjort produktvalg etter datagrunnlaget som ligger i EPD-Norges nettside (EPD Norge, 2018). Det er brukt data samlet inn fra EPDer der det er mulig, slik at produktene som blir valgt i det reelle prosjektet vil kunne avvike fra produkter som er valgt i studien. Derimot er det ikke endret på noen konstruksjonsløsninger. Derav er det rimelig å anta at datagrunnlaget er vil være en akseptabel basis for sammenligningen utført i denne oppgaven.

3.6.2 Livssyklusregnskap (LCI)

I livssyklusregnskapsfasen er det Excel som er brukt til å systematisere og sammenstille resultatene. Alle materialmengder for passivhuset er beregnet med grunnlag i Revit-tegninger, og materialmengdene for TEK17-huset er beregnet med grunnlag i Archicad-tegninger, før det videre er importert klimadata for de enkelte produktene og sammenstilt til sammenligning.

Materialmengder

Materialmengdene er beregnet i Excel, og dette er gjort systematisk og separat for passivhuset og TEK17-huset. I tabell 2 presenteres et utsnitt av en tabell som i Excel heter

bygningselementer, og den viser hvordan mengdene er regnet ut og regnet om til aktuelle enheter.

Tabell 2 - Utsnitt 1 mengder, av tabell bygningselementer i Excel

Bygningsdel	Mengde	Enhet	Produkt	Mengde	Enhet	Total mengde		Omregnet enhet	
Yttervegger	1024	m ²	Isolasjon i bindingsverk	0,95	m ² / (m ² vegg)	972,8	m ²	972,8	m ²
			Bindingsverk	4,2	LM/ (m ² vegg)	4300,8	LM	51	m ³
			
Vegger tørre rom	1699	m ²	Gipsplate	1,05	m ² / (m ² vegg)	1783,95	m ²	1783,95	m ²
			Taklist	0,109	STK/ (m ² vegg)	185,19	STK	817	m
			
...									

Det blå området i tabellen viser til mengde av hver enkelt bygningssdel/komponent, og er total mengde for hele bygget. Det grønne området inneholder hvert enkelt produkt som går med i den tilhørende bygningssdelen, og hvor mye av produktet som går med per enhet, eksempelvis m²/ (m² vegg). I det grå området i tabellen har vi først total mengde, som er blå mengde multiplisert med grønn mengde, deretter har vi omregnet enhet, som er samme mengde, bare at den i noen tilfeller må regnes om til annen enhet for videre beregninger av klimatall.

Mengdene i det grønne området, mengde av respektive material per enhet bygningssdel, er tall Mesterkonsult bruker i sine kalkyler, som vi har hentet ut fra SmartKalk til å bruke i våre beregninger. Vedlegg viser hvordan tallene er hentet fra SmartKalk. Det hadde vært mulig, og sannsynligvis mer effektiv å kalkulere ferdig huset i SmartKalk først og så hente ut en ferdig materialliste, men valget falt på å gjøre dette i Excel for å lettere kunne kategorisere bygningssdeler, materialer og produkter etter ønske, og også gjøre det lettere å se alle tall, i tillegg til at dette gjorde det enkelt å bare justere endringene i passivhuset, der SmartKalk ikke inneholdt de valgte konstruksjonsløsningene i passivhuset.

For vinduer og dører med forskjellige størrelser er utslippene fordelt på referansevinduet (i EPD) areal for å skape et estimat på utslipp per m² av hver type vinduer og dører. Dette brukes videre for de forskjellige like vindus- og dørtypene i forskjellige størrelser.

3.6.1 Livsløpseffektvurdering (LCIA)

I denne fasen er effektene av klimatallene beskrevet, og her er resultatene fra materialer og energibruk i drift kategorisert og sammenstilt for å gi grunnlag for tolkning. Den viktigste sammenligningen i denne studien er totalutslippene for begge prosjektene, men det har også vært interessant å se på hvor utslippene ligger. Det er kategorisert etter material, livsløpsfase, og det er også skilt på kun material og energibruk i drift.

For det meste er det brukt EPDer som datagrunnlag for utslipp fra materialene som benyttes i prosjektet. Dette er gjort ettersom at EPD er verifisert av en uavhengig godkjent verifisert EPD-operatør er det mest eksakte datagrunnlaget for utslippene fra materialene. Disse EPDene er utviklet for det spesifikke produktet som undersøkes og er basert på mye mer eksakte data enn noe man kunne modellert i for eksempel SimaPro. For majoriteten av produktene som er benyttet i prosjekteringen er det brukt EPDer fra EPD-Norge. Disse EPDene gir tall på miljøpåvirkningen produktet har. I denne oppgaven har vi som nevnt valgt å kun se på påvirkningen på global oppvarming og vi henter dermed kun ut «GWP»-tallene.

EPD-klimatallene er delt opp i ulike livsløpsstadier som sier noe om hvor i livsløpet et produkt har utslippene sine, og gir på denne måten gode tall med mye informasjon. Vi har importert GWP-tallene for alle de produktene som hadde det til Excel, og videre skalert de opp til våre mengder, dette har vi gjort direkte inn i tabellen for bygningselementer, og fikk da denne tabellen (Tabell 3), som er en utvidet versjon av tabell 1.

Tabell 3 - Utsnitt 2 klimatall, av tabell bygningselementer i Excel

Produkt	Omregnet enhet		A1-A3	A4	A5	B1	B2	...
Isolasjon i bindingsverk	972,8	m ²	1,61E+03	2,34E+02	3,49E+00	0,00E+00	0,00E+00	...
Bindingsverk	51	m ³	-1,41E+04	2,68E+02	1,53E+02	0,00E+00	0,00E+00	...
....		
Gipsplate	1783,95	m ²	2,84E+03	4,68E+02	6,21E+02	0,00E+00	0,00E+00	...
Taklist	817	m	-3,03E+02	7,27E+00	1,21E+01	0,00E+00	0,00E+00	...
...

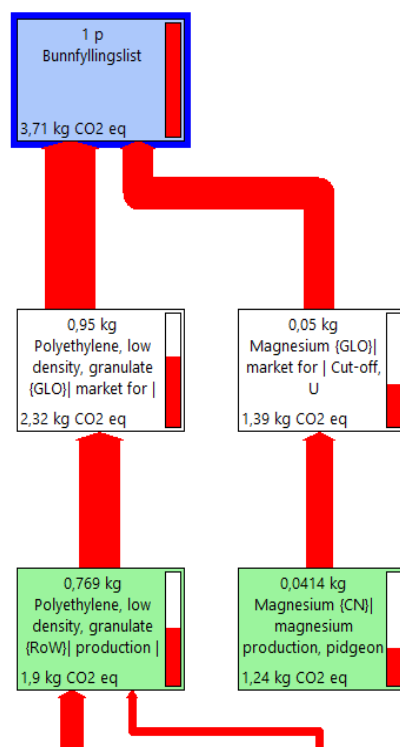
Her ser vi hvordan alle klimatallene er lagt inn i bygningselementer-tabellen, videre til høyre for det som var med i utsnitt 1. Tabellen fortsetter videre til og med fase D. Tabellene for

bygningselementer inneholder alt av klimatall til material i prosjektet. Dette har vi videre summert sammen ut ifra ulike kategorier, som material, bygningsdel og så videre etter hva som var interessant å se på.

Andre datagrunnlag

I de tilfellene hvor det var et produkt med betydelig mengde som ikke hadde EPD. Ble SimaPro brukt for å beregne produktenes GWP. Dette ble gjort ved å utnytte produkters «Helse- miljø- og sikkerhetsfaktablad» hvor det finnes informasjon om hvilke substanser produktet består av. Informasjonen ble derfra importert i SimaPro for å oppnå et anslag av hvor mye for eksempel 1 meter med list ga i utslipp.

I programmet må man velge metode for hvordan utslipp skal regnes ut. Her valgte vi metoden «EPD (2018)» som følger lignende metodikk som EPDene som ellers er brukt. En ulempe ved å bruke SimaPro er at utslippene ikke deles opp i de ulike stadiene, slik som i en EPD. Dette gir mindre innsikt i hvor i prosessen utslippene ligger. Vi brukte også SimaPro for å beregne utslippene knyttet til transport i det spesifikke tilfellet for dette prosjektet, dette kommer vi tilbake til.



Figur 13 - Modell av utslipp fra 1kg med bunnfyllingslist fra SimaPro.

Informasjon for utslipp knyttet til energi- og drivstoffbruk på nordisk byggeplass er hentet fra programvaren OneClickLCA. Det er et firma som spesialiserer seg i å utføre livssyklusanalyser for bygg (OneClickLCA, 2016). Utslippene regnes ut fra størrelsen på BTA for bygget, som på prosjektet er 740m². Datagrunnlaget for utslipp fra drivstoffbruk baserer seg på ecoinvent v.3.3. Ellers brukes det generelle estimater på bruk av drivstoff og energi som er verifisert internt. Derav er det et mindre godt grunnlag for beregninger enn om målte eksakte verdier hadde vært tilgjengelig for bruk. Det anses derimot som godt nok ettersom at estimatet ikke påvirker forskjellen mellom scenarioene som skal sammenlignes i studien.

3.6.2 Tolkningsfasen

Som nevnt er dette hvor resultatene som er funnet skal tolkes. Dette vil bli en del av diskusjon- og analysekapitlet. Her blir funnene diskutert, og deres betydning blir forsøkt forklart.

3.7 Spesifikk transport

Beregningene gjort i forbindelse med de spesifikke transportsenarioene for prosjektstedet ble gjort med grunnlag i informasjon fra EPDer, Google Maps og SimaPro. For å fastslå vekten på materialene/produktene som skulle transporteres ble vekten i kg per funksjonelle enhet ganget med mengdene i de respektive funksjonelle enhetene. For eksempel for trevirke er den deklarererte enheten 1m³ med gran eller furu, og vekten for denne mengden er 511kg.

Materialer	kg	%
Trevirke, tørrvekt	435.00	85.47 %
Vann i treverket	73.95	14.53 %
Sum produkt	508.95	100.00 %
Treemballasje	1.64	
Plastemballasje	0.59	
Sum med emballasje	511.18	

Deklarert enhet:
Produksjon av 1 m³ høvellast av gran eller furu

Figur 14 – Datagrunnlag fra EPD av trevirke. (EPD-Norge, 2016)

Distanse er regnet ut med Google Maps. Samtlige transportsenarioer brukte transport ved forskjellige typer lastebil, og eventuelt ferje, noe som gjorde at distanseberegningene ble enkle å hente fra karttjenesten.

Kapasitetsutnyttelsen ble hentet fra EPDene til produktene, det ble også typen transport. For å forsøke å gjøre beregningene mer eksakte slik at riktig kjøretøytype samsvarer med riktig distanse den typen utførte, ble SimaPro brukt for å innhente informasjon på utslipp per tkm (tonn kilometer). EPD-Norge foreslår å bruke gjennomsnittstall på spesifikke transportberegninger (EPD Norge, 2016). Det ble valgt å gjøre beregninger med eksakte distanser for hver transporttype, som førte til et behov for utslippsfaktorer for disse transporttypene som ble hentet fra SimaPro.

Transport fra produksjonssted til bruker (A4)

Det er forutsatt en transport til byggeplass på 300 km, hvor 270 km skjer på stor lastebil, 30 km på en middels stor lastebil.

Type	Kapasitetsutnyttelse inkl. retur (%)	Kjøretøytype	Distanse km	Brennstoff/ Energiforbruk	Brennstoff/ Energiforbruk
Lastebil	60 %	Euro 6, >32 tonn	270	0.023 l/tkm	0.31 l/km
Lastebil	26 %	Euro 5, 16-32 tonn	30	0.045 l/tkm	0.25 l/km

Figur 15 - Transportutgangspunkt for beregninger av utslipp i fase A4.

For å kalkulere vekten av varene som skal fraktes er det benyttet data fra EPDene som gir masse per funksjonelle enhet. Multipliseres massen med distansen får man et tall for tkm. Dette er nødvendig fordi enheten som brukes for å beregne utslippene for transporttypene som er hentet fra SimaPro er gitt i kgCO₂e/tkm.

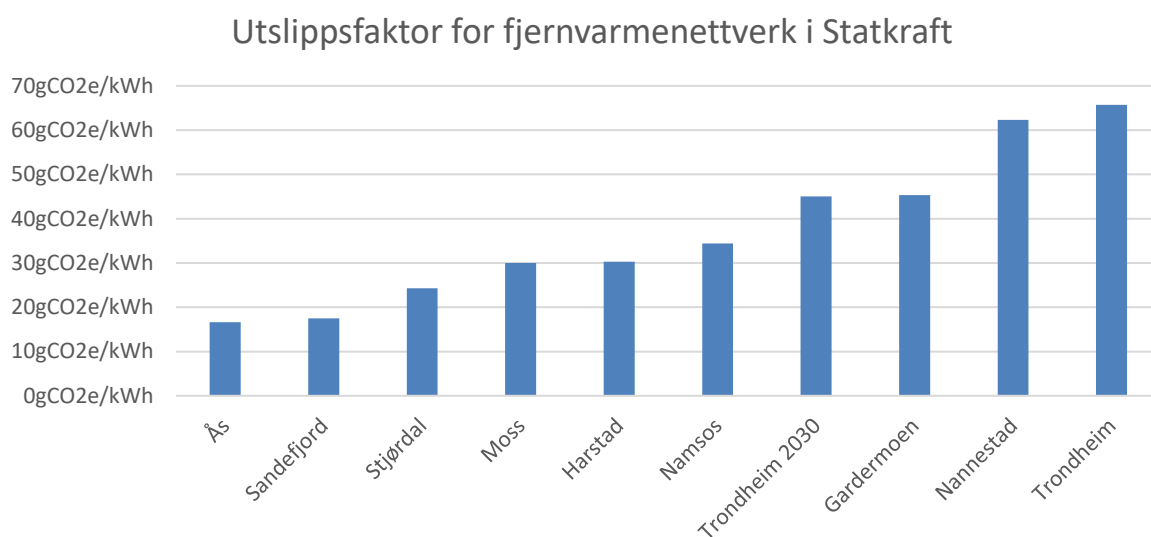
For alle produktene der det ikke er presisert i EPDen at varene antas å transporteres direkte til byggeplass er det antatt at byggevarene leveres til Bygger 'n på Heimdal (Heggstadmoen 13, 7080 Heimdal). Valget er ikke veldig betydningsfullt da distansene ikke endres betraktelig ved endring av byggevareforhandler, men det er en forhandler som er nære prosjektstedet og er derav naturlig å bruke.

3.8 Energibruk i drift

For å måle både energibruk i drift, og for å undersøke endringer for å oppnå passivhuskriteriene som kreves for passivhuset, ble programmet Simien brukt. Vi modellerte rekkehuset i programmet slik at alle bygningsdelene var lagt inn med riktig oppbygning. I Simien kan bygningen modelleres slik at kalkulasjonene tar hensyn til at rom ligger ved siden av hverandre, dermed er etasjene delt inn i Under-, 1.- og 2.Etasje. Videre er det gjort en inndeling i modellen slik at de tre enhetene som blir liggende imellom deler informasjon ettersom at deres klimaskjerm vil være svært lik. De to enhetene på endene får annerledes

Dekningsgrad

Peder Morsets veg 21 ligger innenfor konsesjonsområdet for fjernvarme og antas følgelig å bli benyttet i bygget. Det antas at hele energibehovet for rom- og varmtvannsoppvarming er dekket av fjernvarme (Bryn, Petersen and Gedsø, 2011). Statkraft er eier av fjernvarmenettverket i Trondheim og faktorer for utslipp knyttet til energibruk i form av fjernvarme hentes inn fra deres dokumentasjon av utslipp (Statkraft, 2022).



Figur 17 - Utslippsfaktorer for fjernvarmenettverk fra Statkraft. (Statkraft, 2022)

Utslippsfaktoren for fjernvarmen som vil bli benyttet i rekkehuset vises i (Figur 17). For 2021 var Trondheim det mest forurensende fjernvarmenettverket for Statkraft. Prognosen kalkulert for utslippsfaktor i 2030 viser at det vil bli mer miljøvennlig med tiden. For denne studien er det gjort konservative beregninger. Utslippsfaktorene for kraftproduksjon slik det er i dag, er brukt som grunnlag for beregninger som gjelder utslipp fra energibruk i drift. Det er utført en lineær prognose av hvordan utslippsfaktoren for fjernvarmenettverket kan antas å utvikle seg med tiden med grunnlag i prognosen for 2030 (Statkraft, 2022).

4 Resultater

I dette kapitlet blir resultatene presentert. Først vises valgte konstruksjonsløsninger som er grunnlag for beregningene av passivhuset, før energibehovet og resultatene av klimaregnskapet kommer videre.

4.1 Passivhus

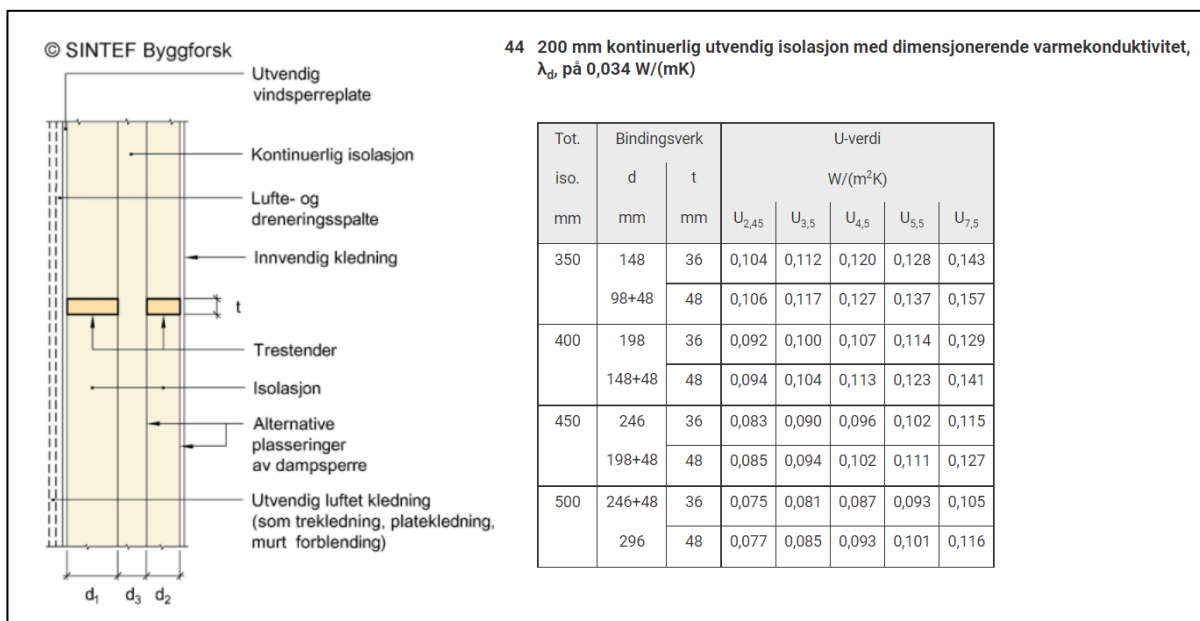
Tabell 4 U-verdier TEK17 og beregnet passivhus

Bygningsdel		Yttervegg	Kompakt tak	Skrått tak	Gulv mot grunnen	Vinduer
Passivhus	U-verdier	0,08	0,11	0,11	0,09	0,74
TEK17		0,17	0,11	0,13	0,12	0,74

Tabell 4 viser beregnede U-verdier for passivhuset og U-verdiene som er lagt til grunn i TEK17-huset. Videre presenteres de konstruksjonsløsningene som er valgt med tilhørende dimensjoner.

Yttervegger:

I ytterveggene er det valgt en konstruksjonsløsning som består av 250 mm isolasjon i bindingsverk, 50 mm isolasjon i innvendig påføring og 200 mm kontinuerlig isolasjon på yttersiden. Dette gir en U-verdi på $0,077 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, som vist i figur 12. Dette er innenfor den U-verdien vi har beregnet at vi trenger, som er $0,08 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.



Figur 18 - Oppbygning av yttervegg passivhus Kilde: (SINTEF, 2013b), Fig 1 & 44

Kompakt tak:

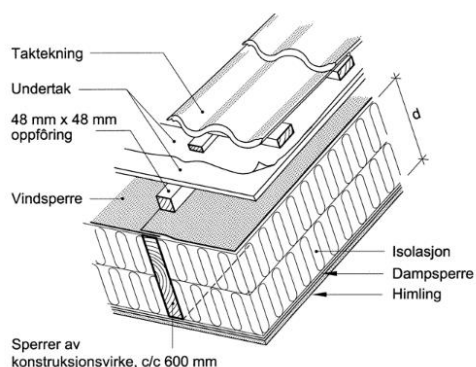
I kompaktaket holder samme løsning som i TEK17-versjonen av huset, og det gjøres ingen endringer her.

Skrått tak:

I taket gir beregningene en nødvendig U-verdi på 0,11 W/(m²K). Velger da bjelkedimensjon 48 x (198 + 198), bruker isolasjon med $\lambda = 0,034$ W/(mK). Denne løsningen gir U-verdi lik 0,11 W/(m²K) som vist i figur 13.

32 Skråtak med sperrer av konstruksjonstrevirke

Beregnet U-verdi er vist i tabell 32. Verdiene gjelder oppbygning som vist i fig. 32.



Tabell 32

Beregnet U-verdi ($W/(m^2K)$)

Skråtak med sperrer av konstruksjonstrevirke

Bjelke- dimensjon mm	Isolasjonens varmekonduktivitet, λ $W/(mK)$			
	0,034	0,037	0,040	0,043
36 x 148	0,25	0,27	0,29	0,30
48 x 148	0,26	0,28	0,29	0,31
36 x 173	0,22	0,23	0,25	0,26
48 x 173	0,23	0,24	0,26	0,27
36 x 198	0,20	0,21	0,22	0,23
48 x 198	0,20	0,22	0,23	0,24
36 x 223	0,18	0,19	0,20	0,21
48 x 223	0,18	0,19	0,21	0,22
36 x (148 + 98)	0,16	0,17	0,18	0,19
48 x (148 + 98)	0,17	0,18	0,19	0,20
36 x (148 + 123)	0,15	0,16	0,17	0,18
48 x (148 + 123)	0,15	0,16	0,17	0,18
36 x (148 + 148)	0,14	0,15	0,15	0,16
48 x (148 + 148)	0,14	0,15	0,16	0,17
36 x (148 + 173)	0,13	0,14	0,14	0,15
48 x (148 + 173)	0,13	0,14	0,15	0,16
36 x (148 + 198)	0,12	0,13	0,13	0,14
48 x (148 + 198)	0,12	0,13	0,14	0,15
36 x (198 + 198)	0,11	0,11	0,12	0,13
48 x (198 + 198)	0,11	0,12	0,12	0,13

Figur 19 - Oppbygning av skrått tak passivhus (SINTEF, 2013a), Fig 32 & Tabell 32

Gulv på grunnen:

Tabell 52

U-verdi¹⁾ for gulvkonstruksjon på grunnen ved bruk av EPS-isolasjon med dimensjonerende varmekonduktivitet, λ_d , på 0,038 $W/(mK)$

Isolasjonstykkelse (mm)	100	150	200	250	300	350	400
U-verdi ($W/(m^2K)$)	0,36	0,24	0,18	0,15	0,12	0,11	0,09

¹⁾ I tabellen er det bare regnet med varmemotstanden i isolasjonssjiktet og innvendig varmeovergangsmotstand.

Figur 20 - Tabell for U-verdier i gulv på grunnen (SINTEF, 2019), Tabell 52

I gulvet ender vi på 400 mm isolasjon, for å oppnå 0,09 $W/(m^2K)$ i U-verdi.

4.2 Energibehov for TEK17 og Passivhus

Under vises resultatene for simulasjon av energibehov i henhold til NS3031 utført i Simien. I energibudsjettet er beregningene gjort for å undersøke om bygningen oppfyller kravene for energibehov. I tabellene med levert energi er energiforsyningen delt inn i energikilde hvor det er tatt hensyn til tap i nettet slik at det en antatt reell verdi på hvor mye energiforbruket er gjennom et år.

TEK17

Etter modellering av det opprinnelige planlagte rekkehuset i Simien viser resultatene at det spesifikke energibehovet i løpet av et år er på 94,6kWh/m². For rekkehuset tilsvarer dette 67 094kWh, eller 13 419kWh per boenhet.

Energibudsjett reelle verdier (§14-2 (5))		
Energipost	Energibehov	Spesifikt energibehov
1a Romoppvarming	19991 kWh	28,2 kWh/m ²
1b Ventilasjonsvarme (varmebatterier)	1671 kWh	2,4 kWh/m ²
2 Varmtvann (tappevann)	21128 kWh	29,8 kWh/m ²
3a Vifter	3107 kWh	4,4 kWh/m ²
3b Pumper	689 kWh	1,0 kWh/m ²
4 Belysning	8079 kWh	11,4 kWh/m ²
5 Teknisk utstyr	12428 kWh	17,5 kWh/m ²
6a Romkjøling	0 kWh	0,0 kWh/m ²
6b Ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	0 kWh	0,0 kWh/m ²
Totalt netto energibehov, sum 1-6	67094 kWh	94,6 kWh/m ²

Figur 21 - Energibudsjett TEK 17.

Levert energi til bygningen (beregnet)		
Energivare	Levert energi	Spesifikk levert energi
1a Direkte el.	25253 kWh	35,6 kWh/m ²
1b El. til varmepumpesystem	0 kWh	0,0 kWh/m ²
1c El. til solfangersystem	0 kWh	0,0 kWh/m ²
2 Olje	0 kWh	0,0 kWh/m ²
3 Gass	0 kWh	0,0 kWh/m ²
4 Fjernvarme	46573 kWh	65,6 kWh/m ²
5 Biobrensel	0 kWh	0,0 kWh/m ²
6. Annen energikilde	0 kWh	0,0 kWh/m ²
7. Solstrøm til egenbruk	-0 kWh	-0,0 kWh/m ²
Totalt levert energi, sum 1-7	71826 kWh	101,2 kWh/m ²
Solstrøm til eksport	-0 kWh	-0,0 kWh/m ²
Netto levert energi	71826 kWh	101,2 kWh/m ²

Figur 22 - Levert energi til TEK17-bygning.

Passivhus

For det planlagte passivhuset blir det årlige energibehovet lavere. Beregningene utført i Simien forteller at passivhuset krever 80,4kWh/m². Dette tilsvarer 57 007kWh for hele bygningskomplekset, eller 11 401kWh per boenhet.

Energibudsjett reelle verdier (§14-2 (5))		
Energipost	Energibehov	Spesifikt energibehov
1a Romoppvarming	11268 kWh	15,9 kWh/m ²
1b Ventilasjonsvarme (varmebatterier)	770 kWh	1,1 kWh/m ²
2 Varmtvann (tappevann)	21128 kWh	29,8 kWh/m ²
3a Vifter	2693 kWh	3,8 kWh/m ²
3b Pumper	641 kWh	0,9 kWh/m ²
4 Belysning	8079 kWh	11,4 kWh/m ²
5 Teknisk utstyr	12428 kWh	17,5 kWh/m ²
6a Romkjøling	0 kWh	0,0 kWh/m ²
6b Ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	0 kWh	0,0 kWh/m ²
Totalt netto energibehov, sum 1-6	57007 kWh	80,4 kWh/m ²

Figur 23 - Energibudsjett passivhus.

Levert energi til bygningen (beregnet)		
Energivare	Levert energi	Spesifikk levert energi
1a Direkte el.	24278 kWh	34,2 kWh/m ²
1b El. til varmepumpesystem	0 kWh	0,0 kWh/m ²
1c El. til solfangersystem	0 kWh	0,0 kWh/m ²
2 Olje	0 kWh	0,0 kWh/m ²
3 Gass	0 kWh	0,0 kWh/m ²
4 Fjernvarme	35563 kWh	50,1 kWh/m ²
5 Biobrensel	0 kWh	0,0 kWh/m ²
6. Annen energikilde	0 kWh	0,0 kWh/m ²
7. Solstrøm til egenbruk	-0 kWh	-0,0 kWh/m ²
Totalt levert energi, sum 1-7	59841 kWh	84,4 kWh/m ²
Solstrøm til eksport	-0 kWh	-0,0 kWh/m ²
Netto levert energi	59841 kWh	84,4 kWh/m ²

Figur 24 - Levert energi til passivhus.

Forskjell

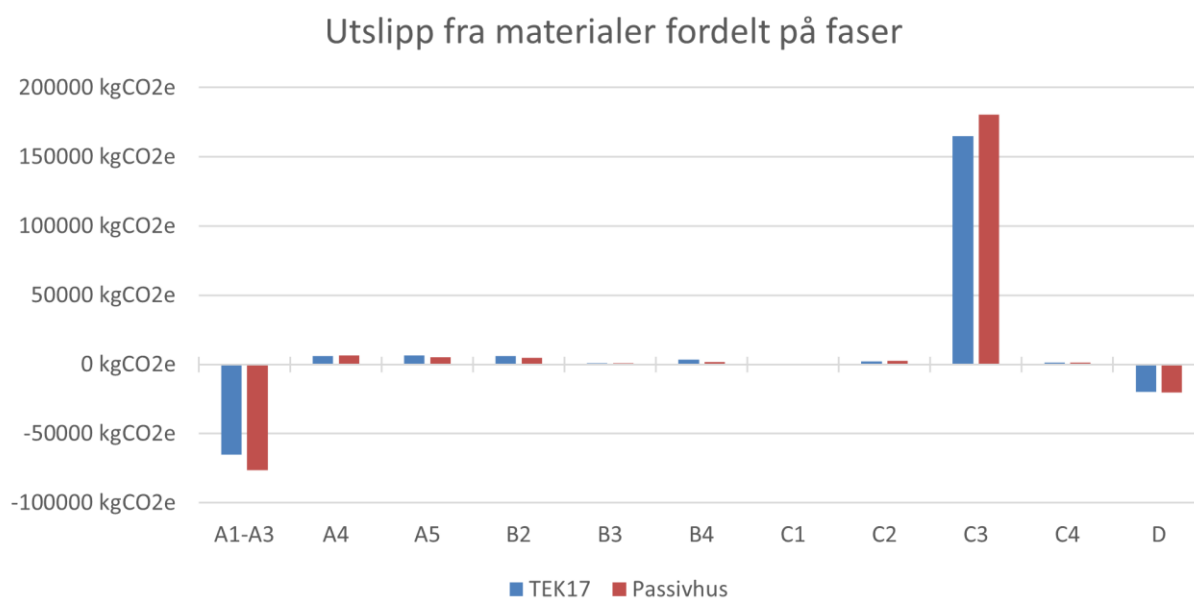
Som følger av endringene gjort på rekkehuset blir energibehovet mindre. Passivhuset er forventet å bruke 16,8kWh/m² mindre energi i året. Det tilsvarer en endring i energibehovet på 11 985kWh i løpet av et år.

4.3 Utslipp

I dette kapitelet vil resultater for utslipp fra byggene gjennom livsløpene deres gjennomgå. Det vil bli vist flere scenarioer og delt inn under forskjellige fordelingskategorier.

4.3.1 Utslipp fra materialer

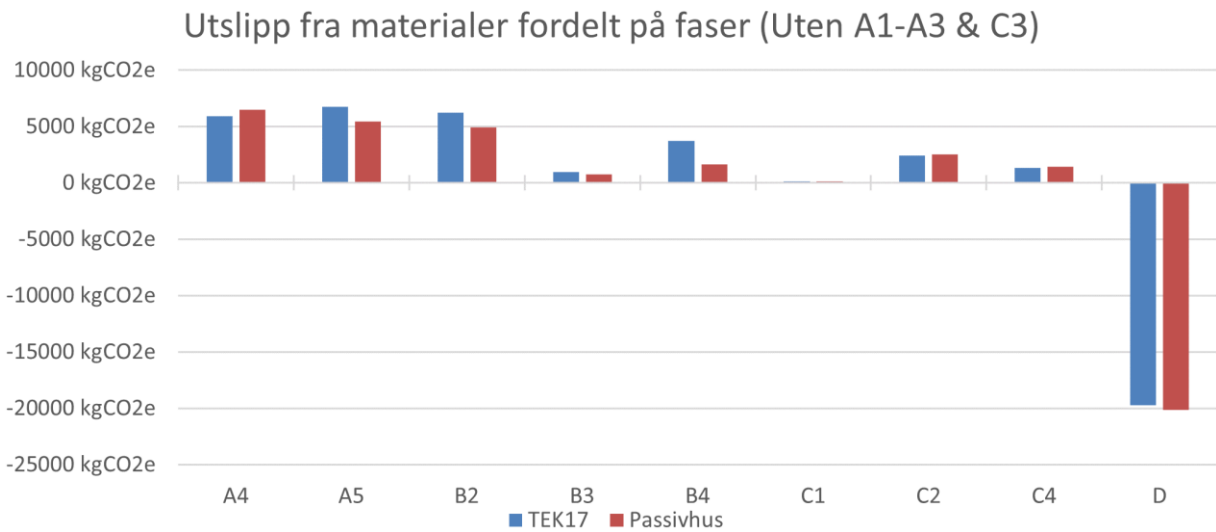
Utslippene som kommer som følger av materialforbruket i bygget viser seg å være relativt likt for begge byggene (Figur 25). Passivhuset har noe mer utslipp i fasene A1-A3 (Produktfasen) og C3 (Avfallsbehandling) som kommer av et økt forbruk av trevirke.



Figur 25 - Utslipp fra materialer.

Som diagrammet viser er det desidert mest utslipp i C3, og mye «negativt utslipp» i A1-A3 og D. Årsaken til dette er at trevirke tar opp mye CO₂ i begynnelsen av livsløpet sitt, som også slippes ut når det forbrennes under avfallsbehandlingen som foregår i C3. Grunnen til at B1 (Bruk), B5 (Renovasjon) og B7 (Driftsmessig vannbruk) er utelatt er fordi de er utslippsløse under valgte systemgrenser. I tillegg er B6 (Driftsmessig energibruk) utelatt da disse utslippene kommer fra energibruk i byggets bruksstadium og blir dermed ikke direkte en del av utslipp fra materialforbruket.

For å se nærmere på bidragene til utslipp som ikke kommer fra A1-A3 og C3 utelukkes de i diagrammet under (Figur 26).

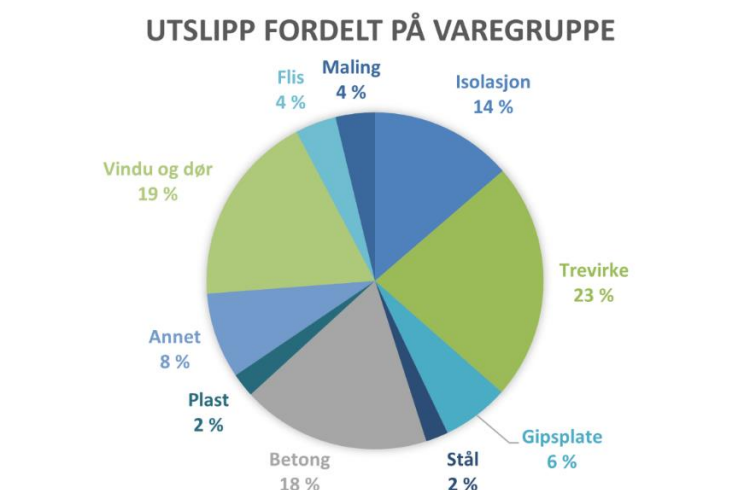


Figur 26 - Utslipp fra materialer fordelt på livsstadium (uten A1-A3 & C3).

Fra dette diagrammet kan man se at de største utslippene fra de resterende fasene er fra Transport (A4), Installasjon (A5), Vedlikehold (B2) i tillegg til betydelig negative utslipp fra Gjenbruk/Gjenvinning (D). Ytterligere kan man se at utslippene i A5, B2 og B4 er noe lavere for passivhuset. Dette er en følge av at noen av vinduene fra TEK17-bygget ble fjernet.

Fordelt på varegruppe

For å gi et innblikk i hvilke materialer og produkter som bidrar mest til utslippene er det fordelt på varegrupper i Figur 27.

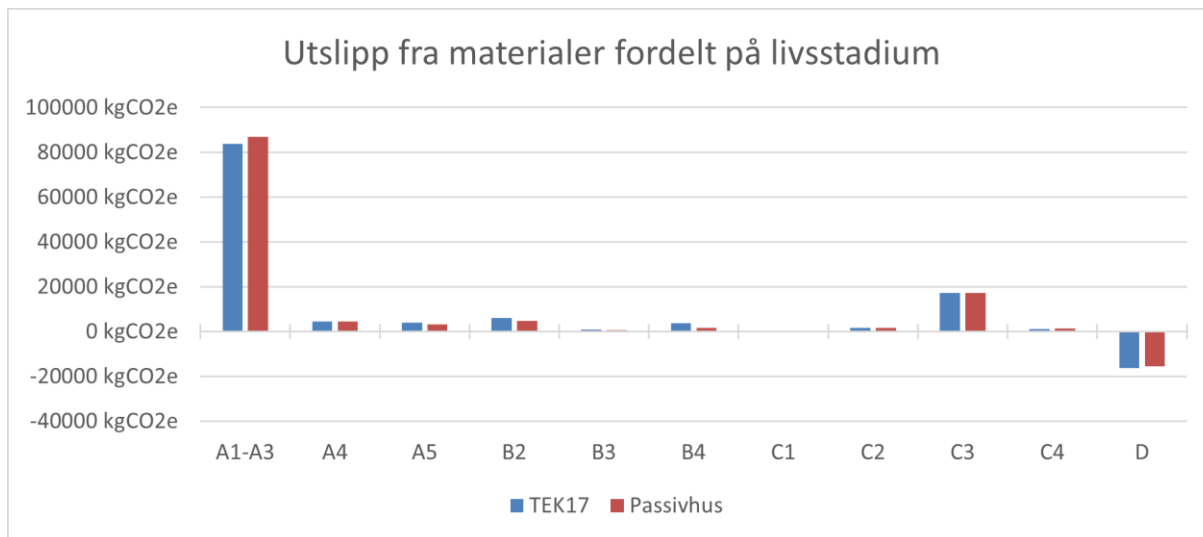


Figur 27 - Utslipp fordelt på varegrupper.

Trevirke, vinduer og dører, betong og isolasjon er de fire største bidragsyterne til utslippene fra materialisten.

Uten opptak- og utslipp av biogent karbon

Hvis man ser bort fra opptaket og etter hvert utslippet av biogent karbon blir utslippene fordelt annerledes i forhold til fasene i livssyklusen (Figur 28).

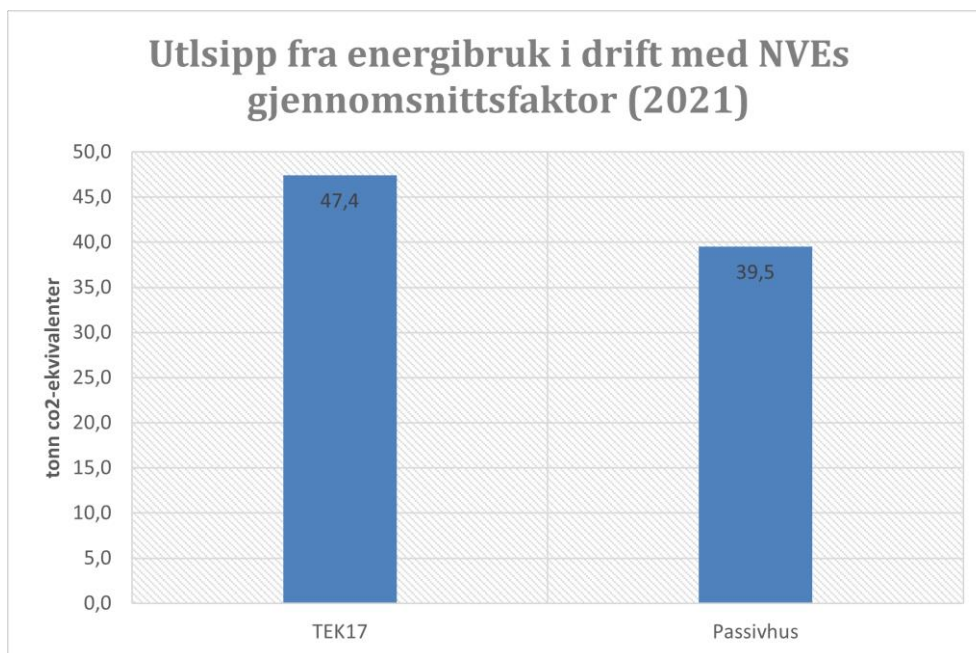


Figur 28 - Utslipp fra materialer fordelt på faser (Uten biogent karbonopptak og -utslipp.)

Utslippene ligger i dette tilfellet for det meste i fasene A1-A3. Det er i produksjon av materialene hvor mye av utslippene forekommer. Uten det «negative» bidraget fra biogent karbonopptak har på utslippene i denne fasen blitt den største utslippskilden. Videre ser man også at utslippene fra C3 er mindre enn når man regner med utslipp av biogent karbon i denne fasen.

4.3.2 Utslipp fra energibruk i drift

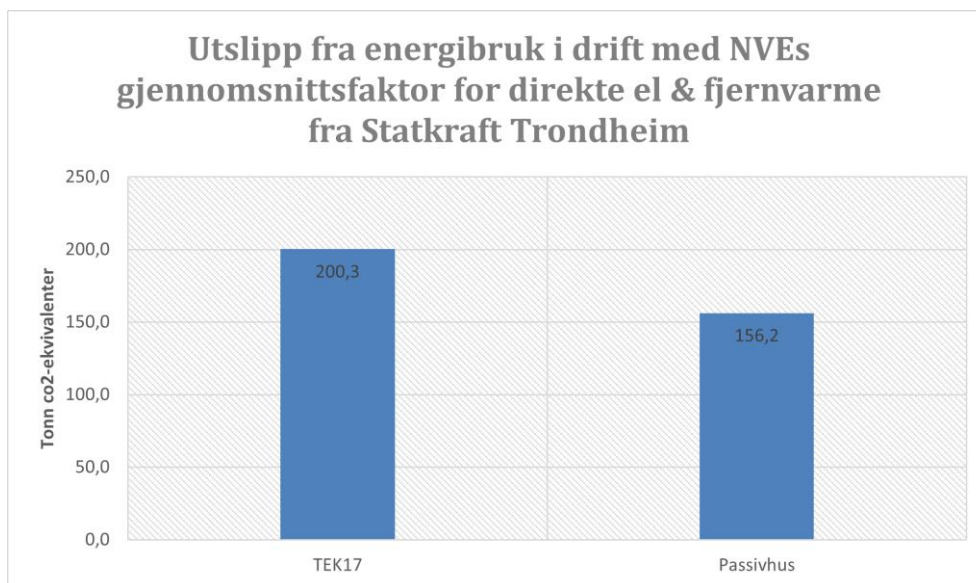
Mengden med brukt energi er forbundet med et utslipp av klimagasser. For å avgjøre utslippene knyttet til energibruk i drift må man avgjøre hvilken energimiks man skal se forbruket i lys av. I Norge blir det stort sett utelukkende produsert fornybar energi som er lite miljøskadelig. Vi bruker derimot ikke utelukkende egenprodusert strøm, men eksporterer og importerer til og fra andre land. NVE har en oversikt på en forenklet beregning av klimagassutslippene knyttet til levert fysisk strøm fra 2021, 2020 og 2019, de er henholdsvis 11gCO₂e/kWh, 8gCO₂e/kWh og 17gCO₂e/kWh (NVE, 2022).



Figur 29 - Utslipp fra energibruk i drift med NVEs elmiks fra 2021.

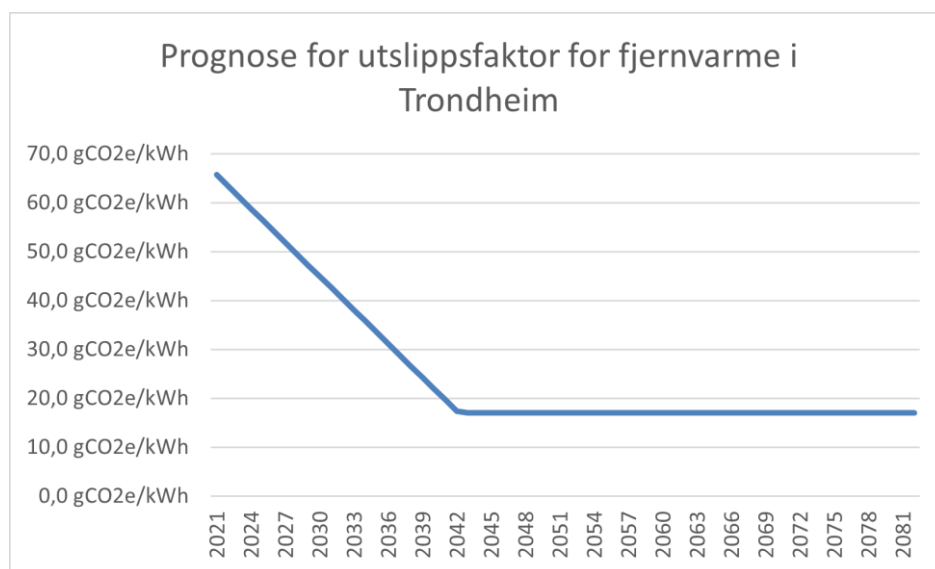
Deler man opp energibruken for energikilden den kommer fra blir det andre utslippsfaktorer. Fjernvarmen i området kommer fra Statkraft Trondheim og utslippene per gCO₂e/kWh ble vist tidligere i Figur 17. Med utslippsfaktor fra reelle data fra 2021 for fjernvarme og gjennomsnittsfaktoren fra NVE for 2021 blir utslippene fra energibruk i drift større. I NS3720 gir standarden mulighet for å regne med projeksjoner for utslippsfaktorer på energikilder hvis disse er tilgjengelige. Statkraft Trondheims anlegg har nettopp en slik projeksjon for 2030.

Ved å gjøre en konservativ beregning med utslippsfaktor for 2021 som basis for de neste 60 årene blir utslippene knyttet til energibruk i drift på hhv. 200 og 156 tonn CO₂e for TEK17 og passivhus (Figur 30).



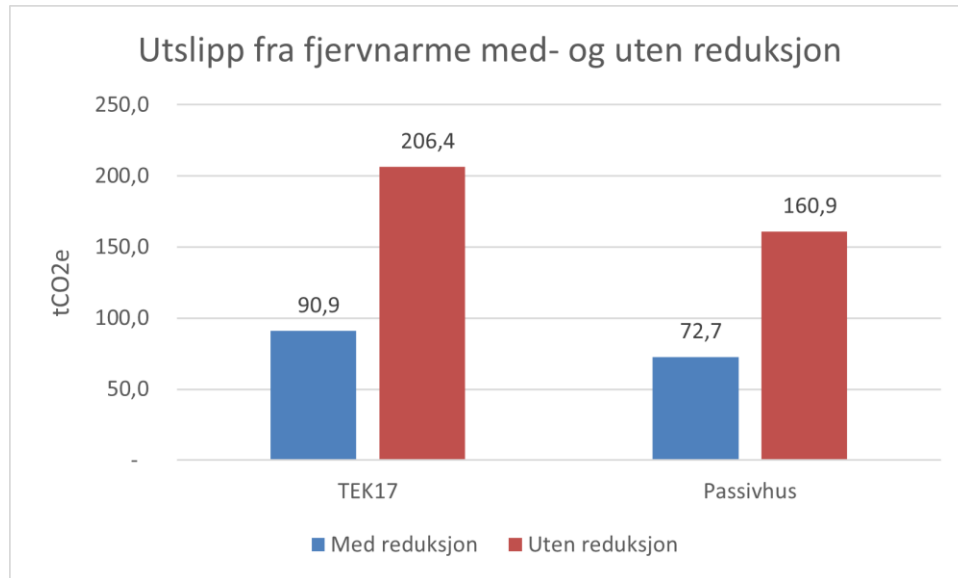
Figur 30 - Utslipp fra energibruk i drift med NVEs gjennomsnittsfaktor for direkte el & fjernvarme fra Statkraft Trondheim 60år.

Det er gjort en tilnærming på hvordan utslippsfaktoren til fjernvarmenettverket kan utvikle seg med grunnlag i data fra Statkrafts prognose. Benytter man lineær prognose for utslippsfaktorene ned til det samme som deres nåværende mest miljøvennlige anlegg vil prognosen blir slik som i Figur 31.



Figur 31 - Lineær prognose for utslippsfaktor fra fjernvarme.

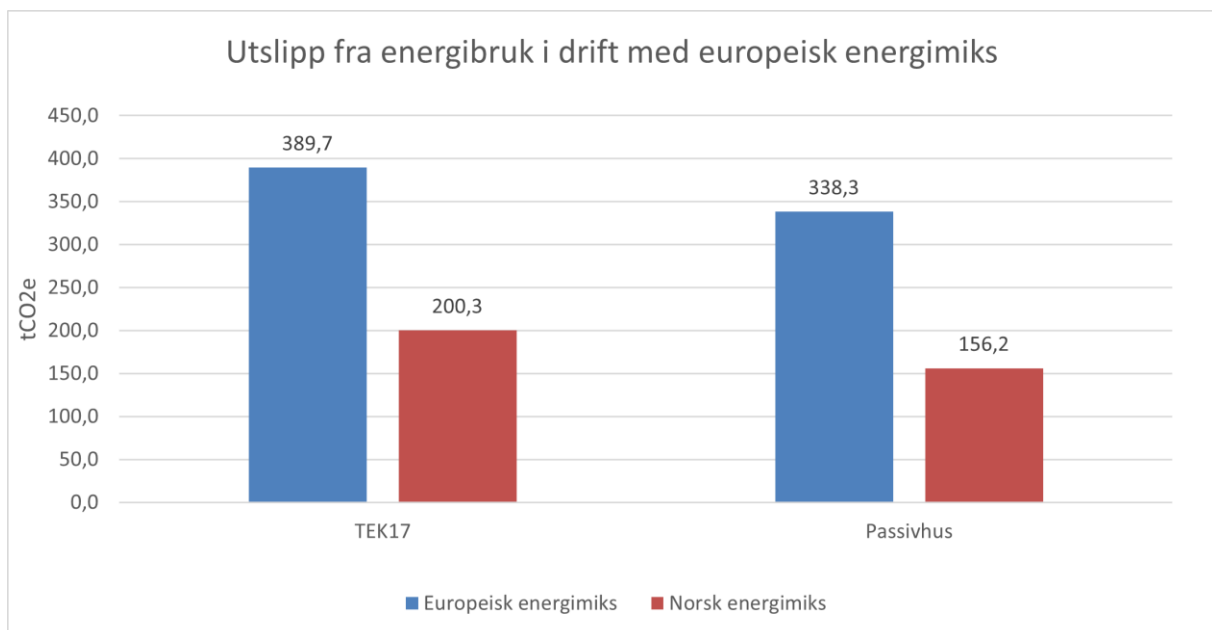
Følgende vil utslippene bli mindre, og forskjellen mellom TEK17 og passivhuset vil også minske (Figur 32).



Figur 32 - Utslipp fra fjernvarme med- og uten reduksjon fra prognosert utslippsfaktor.

Europeisk energimiks

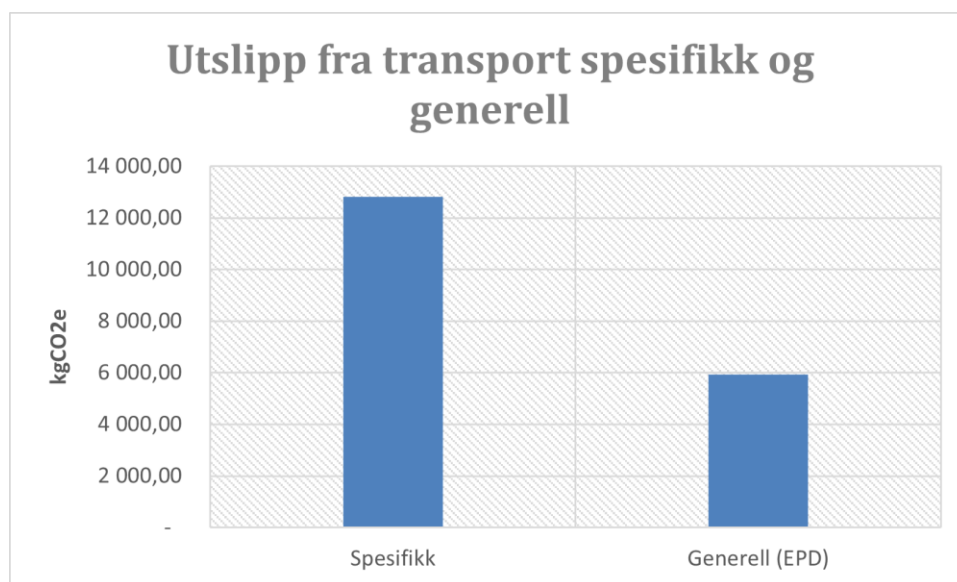
Om man ser på scenarioet hvor man benytter europeisk energimiks slik som nødvendig i NS3720 ser vi at utslippene blir større (Figur 33). Den europeiske energimiksen har en utslippsfaktor på 136gCO₂e/kWh ifølge tillegg A2 i NS3720.



Figur 33 - Utslipp fra energibruk i drift med europeisk energimiks.

4.4 Spesifikk transport

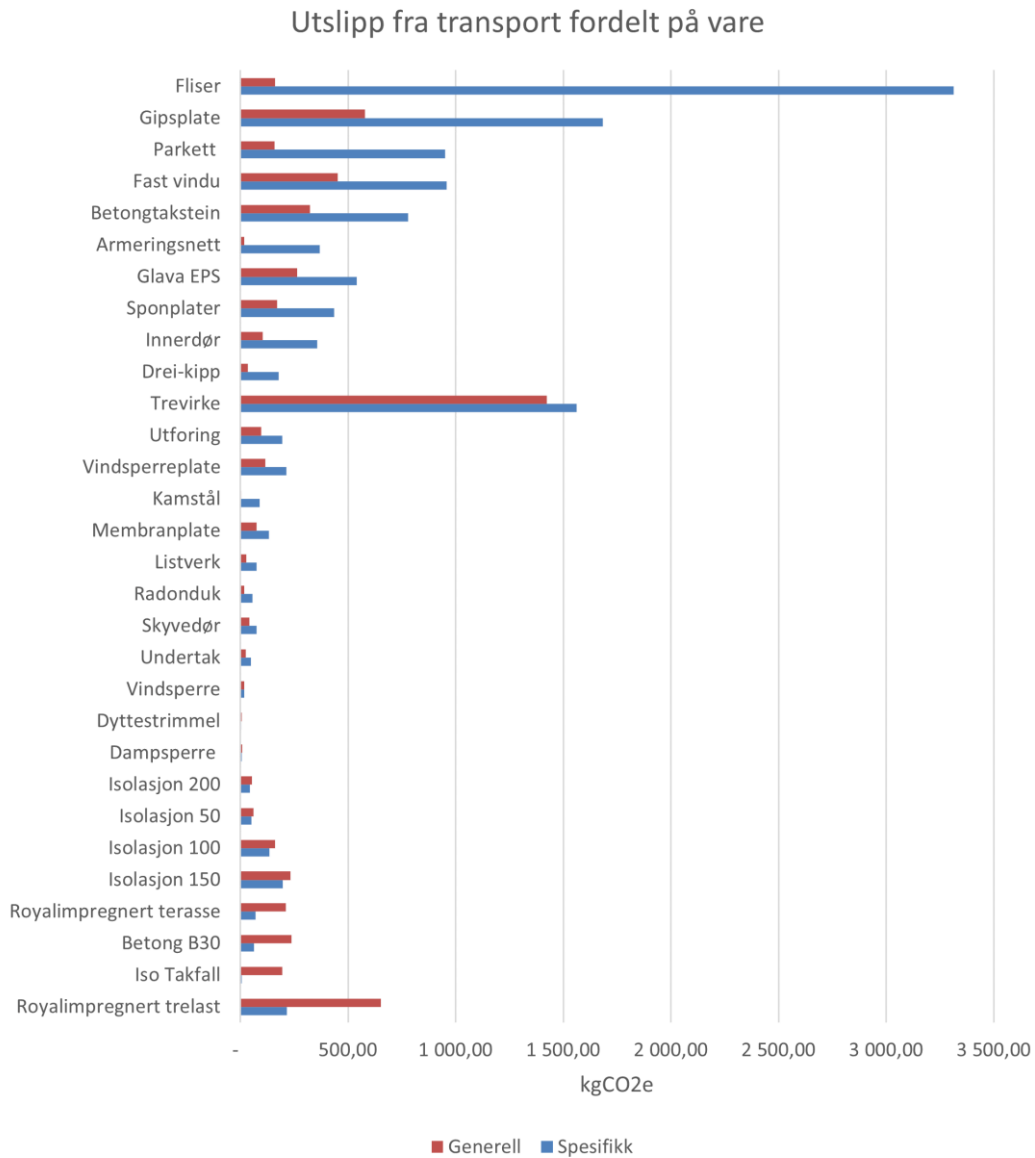
Det ble utført en analyse på forskjellene i utslipp om man regner transporten med gjennomsnittsverdier som gis i EPDene, mot transportutslipp med spesifikke distanser for prosjektet (Figur 34).



Figur 34 - Utslipp fra transport (A4), spesifikk/generell.

Som diagrammet viser, er utslippene kalkulert for det spesifikke tilfellet i overkant av det dobbelte av det generelle tilfellet. Årsaken til dette er hovedsakelig et mer presist datagrunnlag for distansene i transportutslippene.

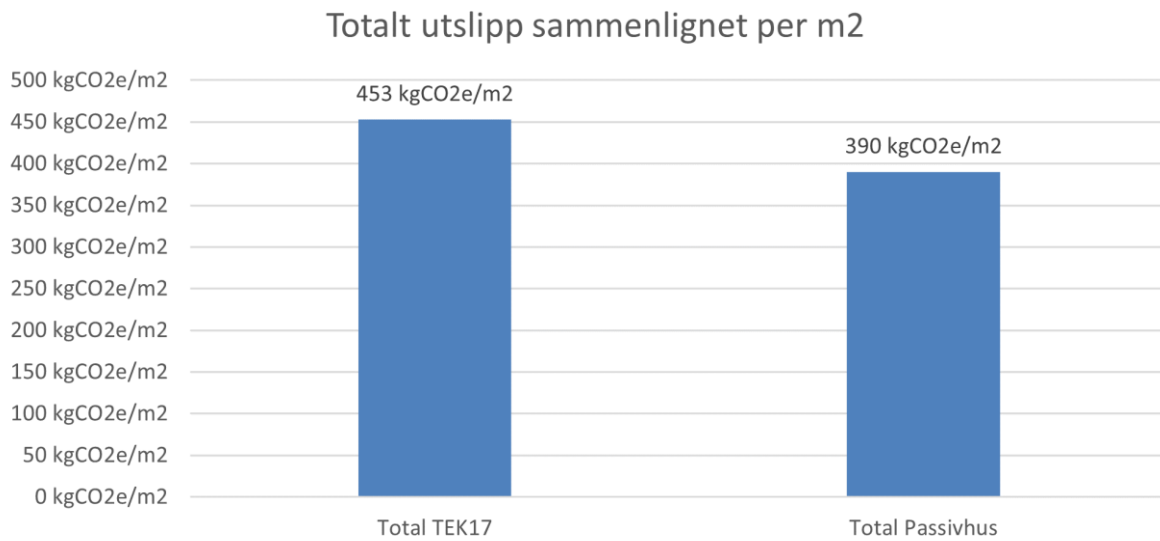
Fordeler vi utslippene på varene ser vi at tyngre varer er mer sensitiv til endringer mellom spesifikt og generelt tilfelle (Figur 35). Dette er naturlig ettersom at utslippene fra transport er direkte resultat av tyngde og distanse. Diagrammet under er sortert etter differansen mellom utslipp fra generell og spesifikk. Følgelig vil diagrammet gå fra størst økning fra generell til spesifikk ned til størst senkning fra generell til spesifikk.



Figur 35 - Utslipp fra generell/spesifikk transport fordelt på varer.

4.4.1 Totalt utslipp

De totale utslippene etter 60 års levetid for byggene med grunnlag for energi fra NVE for direkte el (NVE, 2022), og Statkraft for fjernvarme (Statkraft, 2022) blir slik som vist i Figur 36. Grunnlaget er konservativt ettersom at det bruker dagens utslippsfaktorer for elektrisitet og fjernvarme for hele byggets levetid.



Figur 36 - Totale utslipp sammenlignet for TEK17 og passivhus per m2.

Fra diagrammet ser vi at passivhuset gir mindre utslipp gjennom sitt livsløp. Beregningene viser at det slippes ut om lag 45 tonn mindre CO₂e-utslipp gjennom livsløpet til passivhuset enn TEK17-huset. I samtlige scenarier skissert i denne oppgaven er det tydelig at det totale utslippet fra passivhus er mindre enn det for TEK 17.

5 Diskusjon og analyse

5.1 Diskusjon av resultater

Det er hovedsakelig to faktorer som påvirker mengden klimagassutslipp i de to scenarioene, materialforbruket og energiforbruket. I det følgende kapitlet vil resultatene av faktorene diskuteres og analyseres.

5.1.1 Materialer

I oppgradering til passivhusstandard er det i hovedsak benyttet større isolasjonsmengde og mindre vindus- og dørareal som tiltak for å oppnå energikravene for passivhus, dette er tiltak som påvirker materialmengden i bygget. Materialene i bygget utgjør en del av klimagassutslippet til et bygg og stor økning av materialmengde vil virke negativt inn for passivhuset i et klimagassperspektiv. Det vil ikke være mulig å oppnå kravene for passivhus uten å øke isolasjonsmengden noe, men det er mulig å oppnå med å øke mindre enn det som er gjort i denne studien hvis man tar i bruk andre tiltak. Eksempler på dette er å sikre en ekstra tett konstruksjon, ha færre kuldebroer eller å tegne huset slik at det utnytter solvarmen bedre.

Utgangspunktet for oppgaven var å ikke endre på planløsningen for å oppnå de samme kvalitetene og bruksområde som det opprinnelige rekkehuset. Skal man tegne et hus med utgangspunkt i at det skal være et passivhus vil det være mulig å oppnå gode brukskvaliteter og samtidig prosjektere et hus med lavt energibehov. For eksempel så har rekkehuset mange hjørner, og hjørner er kuldebroer, noe som gjør at det ikke er så veldig egnet som passivhus.

Bebygd areal blir større ved tykkere vegger, noe som i et reelt prosjekt vil begrense om man kan øke på veggtykkelsen utover. Hadde man i dette prosjektet vært nødt til å øke på veggtykkelsen innover, ville man mistet mye areal. Med tanke på at enhetene er ganske smale i utgangspunktet, spesielt i underetasjen, ville man vært nødt til å gjøre om på planløsningen og i verste fall mistet flere rom.

Det er mulig å bygge hus i passivhusstandard som fortsatt har god brukskvalitet hvis det planlegges som et passivhus. Da vil man kunne bruke utformingen av huset på en mer effektiv måte. Resultatet av problemstillinga kommer fram til at passivhuset har det minste klimagassutslippet i livsløpet, men forskjellen kunne muligens blitt annerledes om bygget var tegnet for at det skulle være et passivhus, og deretter degradert til å kun overholde TEK17-kravene, før man hadde utført klimagassregnskapene.

Materialvalg påvirker klimagassene siden det er forskjell fra produkt til produkt hvor mye utslipp de har. Levetida til produktene påvirker også, siden flere utskiftninger gir større utslipp. I dette prosjektet er det brukt de materialene som er gitt av casen, og dette er ganske tradisjonelle/vanlige materialvalg. I bærekonstruksjoner er det tre og mineralullisolasjon, og på innvendige overflater er det brukt mest gips, parkett og flis. Det eneste som går av betong er mot grunnen.

Å bygge i tre har mange fordeler i et klimaperspektiv. Det faktum at dette bygget har bæresystem av tre gjør at man har mindre utslipp fra materialer enn om det var ett bygg med bærekonstruksjon i betong. Dog er klimapåvirkningene fra betong antageligvis noe bedre enn det som fremstilles i EPDene, ettersom at lagring av CO₂ sjeldent tas med i EPDer for betong. Materialer med mindre utslipp i livsløpet, altså klimavennlige materialer, taler negativt for TEK17-huset i denne sammenligningen. Materialbruken vil ha en mindre andel av de totale utslippene, og det er i materialforbruket TEK17-huset vil være det mest miljøvennlige valget.

5.1.2 Energiforbruk

Faktoren som påvirker hvilket valg av bygningstype som er mest miljøvennlig, er utslippsfaktoren på energien som er benyttet i bygget. Hele poenget med et passivhus er å forsøke å senke energibehovet mest mulig. Fra et klimagassperspektiv blir det slik at områder hvor det er renere energi vil det være mindre gunstig å bygge passivhus, og visa versa.

I tilfellet til denne casen er all romoppvarming som nevnt antatt å dekkes av fjernvarme. Fjernvarmen som leveres i Trondheim fra Statkraft har en utslippsfaktor som er verre enn faktoren NVE opererer med for fysisk levert strøm. Ettersom at energibehovet for romoppvarming er det som hovedsakelig er forskjellen mellom TEK17 og passivhuset, og denne dekkes av fjernvarme, vil nettopp utslippsfaktoren for fjernvarme være svært medvirkende i miljøprestasjonen til byggene.

Faktisk ser man at utslippsfaktoren for til og med det mest miljøvennlige fjernvarmeanlegget til Statkraft er større enn det som brukes i NS3720 for anslag for Norsk energimiks for fremtiden. Dette er svært utslagsgivende for studien ettersom tilknytningsplikten krever tilkobling opp mot dette fjernvarmenettverket. Når det er sagt er det allikevel tydelig at enda for de minste utslippsfaktorene brukt for norsk energimiks, at det er mer miljøvennlig med passivhus gjennom byggets livsløp.

Ser man på utslippene fra den europeiske energimiksen er det tydelig at energieffektivitet er desto mer viktig i andre europeiske land. For mange europeiske land vil derimot behovet for oppvarming være mindre gjennom året. Ved miljøprestasjonen til en slik oppgradering i varmere klima må det eventuelt gjøres nye beregninger. Energimiksen til de andre nordiske landene er heller ikke like ren som i Norge, men der er klimaet tilsvarende. Dermed er det naturlig å anta at lignende oppgradering i disse landene vil være miljømessig lønnsomt.

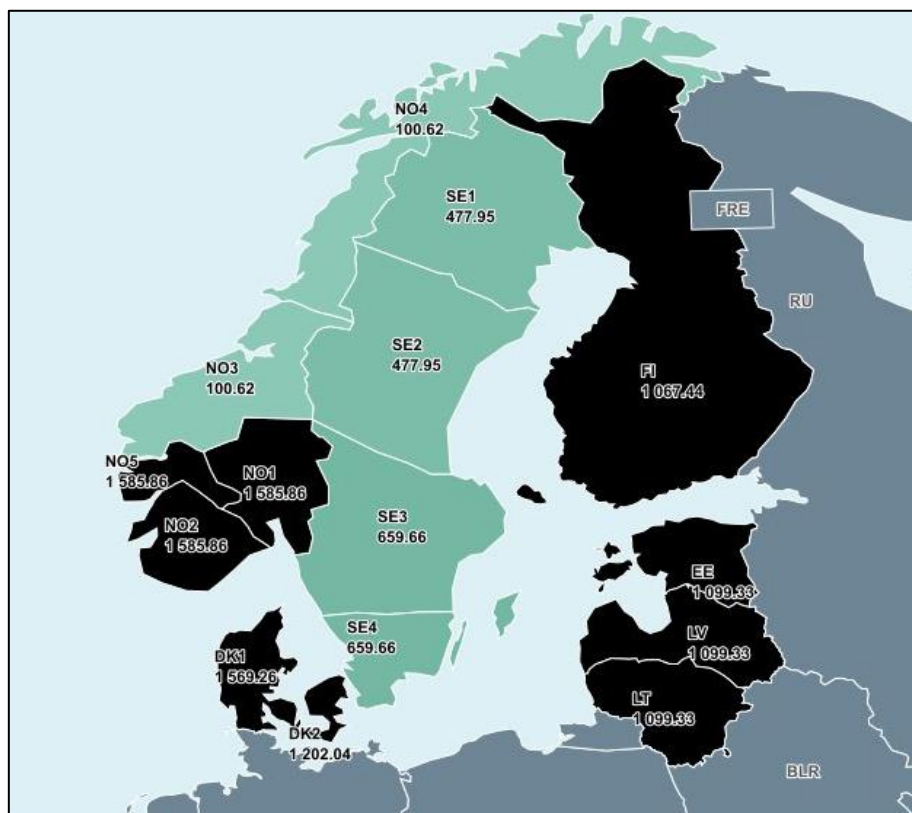
For endringene gjort på rekkehuset kan man se på utslippene fra materialene at det ikke er overdrevent mer i tilfellet ved passivhus enn TEK17. Det som dog må tas i betraktning er at noe av vindusarealet er fjernet på passivhuset for å kunne tilfredsstille kravene om mindre oppvarmingsbehov. Dette er en faktor som vil kunne påvirke utseende og personers opplevelse av byggene. Dette er variabler som ikke er lett å kvantifisere i form av data. Uansett er det allikevel utfordrende å angi verdi på de ulike områdene. Økonomi, romopplevelse og miljøvennlighet må i noen tilfeller vurderes opp mot hverandre for å utføre valg som kan gå på bekostning av hverandre.

Et annet aspekt ved energibruken i fremtiden er at økte temperaturer antageligvis vil føre til en senkning i energiforbruket (Sølverud Larsen, 2021). Dette er en faktor som vil gjøre forskjellene mellom TEK17 og passivhuset mindre. Studien gjort på dette finner et krysningspunkt ved den mest miljøvennlige isolasjonstykkelsen med antagelser på fremtidige temperaturer som grunnlag for energibehovet.

5.2 Økonomi

Økonomi er vanligvis den mest avgjørende faktoren når man sammenligner løsninger som blir valgt i prosjektforslag. Dermed er det viktig å se på mulige økonomiske aspekter ved de to scenarioene.

Når man bygger etter passivhusstandard er det naturligvis en økning i investeringskostnad. Det krever noe mer materialer for å blant annet bedre isolasjonsevnen til mer enn det som kreves for å oppnå minstekravene. Samtidig sparer du inn på mindre strømforbruk årlig. Strømprisene er svært dagsaktuelle for tiden, og det er ingen tvil om at et passivhus er mindre utsatt når det blir høye strømpriser. Det er store forskjeller til og med nasjonalt på disse prisene, følgelig vil det være mer lønnsomt med passivhus på områder hvor strømprisene er mest utsatt for å bli høye. Midt- og Nord-Norge er ofte mindre utsatt for høye strømpriser, der de tre gjenværende strømprissonene i landet ofte er dyrere (Sæter, 2021). Også for andre nordiske land hvor behovet for oppvarming er stort, virker passivhus for å være en god investering med de strømprisene vi ser i dag.



Figur 37 Kart med strømbørs fra Nordpool for prisene i NOK/MWh for 12.05.2022. (Kilde: Nordpool)

For å oppnå klimamålene er det utarbeidet insentiver fra for eksempel ENOVA for å gjøre det tiltrekkende å benytte seg av miljøvennlige løsninger. ENOVA tilbyr støtte til for eksempel privatpersoner som installerer vannbåren varme. Flere banker har begynt å tilby «Grønt boliglån» for personer som bor i, kjøper eller skal bygge bolig med energimerkingsgrad B eller A. Passivhus er energimerket med energiklasse A og vil naturligvis innfri kravene for å søke om et slikt lån. Disse lånene har gjerne bedre renter enn vanlige boliglån. Med slike ordninger blir det fort mer attraktivt å vurdere energieffektive hus økonomisk.

5.3 Diskusjon av Metode

Det å utføre en LCA for et helt bygg er svært tidkrevende. I lys av høringsnotatet for endringer i TEK17 hvor det har blitt vurdert å gjøre klimagassberegninger obligatoriske for boligblokker og yrkesbygg (Horne, 2021). Dette kan være krevende hvor det benyttes produkter som ikke har EPDer som kan fastslå utslippene fra dem. Det finnes programvarer som OneClickLCA som gjør prosessen mer effektiv enn slik den er gjort i denne studien, men det vil fortsatt være utfordrende der hvor det mangler datagrunnlag for klimagassregnskap. Erfaringer fra denne studien har gitt et innblikk i hvor tidkrevende slike prosesser vil være. I NS3720 anbefales det å bruke spesifikke data for spesifikke produkt eller tjenester i all form for detaljprosjektering hvor beregningene skal brukes for sammenligning av for eksempel produkter. Også i alle andre faser bør spesifikk data brukes der dette finnes. Det er med andre ord svært avhengig av allerede utviklede EPDer for å oppnå troverdige resultater.

Høringsforslaget har for øvrig virket å bli møtt med hard kritikk (Dokka, 2022). Det argumenteres for at kravet om å utføre klimagassregnskap av boligblokker og yrkesbygg ikke vil gjøre det som trengs for å nå norske klimamål. Forslaget fra DiBK innebærer nemlig ingen krav om klimagassutslipp som begrenser nybygg som ikke vil være miljøvennlige.

Bruk av Excel som beregningsplattform har gjort det enkelt å systematisere data og resultater etter eget ønske og behov. Det har gjort alt av data og beregninger gjennomskjulte, og det skal være enkelt å se hva som er gjort, og hvordan det er gjort. Samtidig har det gjort beregningene veldig tungvinte og tidkrevende. Inntasting av store mengder data har tatt tid, og det har vært krevende å kontrollere at alt har blitt tastet inn riktig. Mer effektiv bruk av BIM i prosjektet

kunne effektivisert beregningene betraktelig og forminsket usikkerhetene rundt inntasting av data.

Det faktum at prosjektet kun var i skissefasen da vi startet arbeidet, har gjort at det er blitt endringer underveis som vi ikke har kunnet tatt hensyn til. Dette gjør at studien blir mindre eksakt for akkurat den casen det er jobbet med. Samtidig var det viktigste med studien å svare på problemstillinga, som var å sammenligne de to versjonene av huset. For problemstillinga sin del har det ikke hatt så mye å si at prosjektet kun var i skissefasen, da vi lagde egne modeller og beregnet materialmengder selv.

For totale eksakte klimagassutslipp for denne casen, ville det vært en fordel om prosjektet hadde vært helt ferdig ved start av oppgaven. Ved ferdig prosjekt er det mulig å fastslå mer eksakte data på hvilke materialer som har gått med og hvor de har kommet fra. Om man regner klimagassregnskap noen år etter at bygget er ferdig, blir det også mulig å regne med faktiske tall for energibruk.

Hadde klimagassberegningene vært implementert i BIM på en god måte, ville det vært mulig å gjøre klimagassberegningene fortløpende gjennom prosjekteringen av bygget. Dette vil føre til at det blir enklere å gjøre valg sett i et klimaperspektiv, samtidig som det kunne blitt lettere å undersøke faktiske tall knyttet til klimagassutslipp.

I arbeidet med denne oppgaven er det lagt inn veldig mange verdier manuelt, og hver gang man må legge inn noe manuelt, øker sjansen for at noe er lagt inn feil. Det er brukt BIM til å tegne opp modeller av byggene, men prosessen med å få informasjonen fra BIM-modellene og inn i klimaregnskapet har vært 100% manuell. En bedre utnytting av BIM hadde kunnet gjort prosessen i denne studien mye sikrere og mer effektiv. OneClickLCA er et program som kan importere data fra BIM-modeller for å lage klimaregnskap, og det kunne vært hensiktsmessig å bruke det i denne oppgaven.

5.4 Usikkerheter

En LCA-studie for et helt bygg er som nevnt en krevende prosess med mange variabler. Derav er det nødvendigvis knyttet usikkerheter til deler av arbeidet som er gjort ettersom at det er mye manuell modellering og kalkulering i oppgaven. I Simien er modellen som nevnt også laget selv ut fra modellen vi har skapt i Revit. Her kan det forekomme feil i verdier som er lagt inn som grunnlag for energiberegningene ettersom de er skrevet inn manuelt.

Kanskje den mest utslagsgivende usikkerheten er valget av energimiks som brukes for beregningene knyttet til utslipp fra energibruk i drift. Utslippsfaktorene man bruker i disse kalkulasjonene kan føre til enorme forskjeller på resultatet av studien. Når man ser på livssyklusen til et bygg 60 år i fremtiden er det utfordrende å anta eksakte verdier på utslippsfaktorer energikildene som brukes i fremtiden vil gi. For oppgavens hensikt om å analysere miljøkonsekvensene av en oppgradering til passivhusstandard er datagrunnlaget for valg av utslippsfaktorer for energikilder svært betydningsfullt for resultatet.

Videre er det som nevnt gjort antagelser på noen områder slik som varmegjenvinnereffektiviteten som er lagt til grunn for energiberegningene. Også noen av metodene for beregninger av utslipp knyttet til produkter fra EPDer er forenklet såpass at datagrunnlaget for LCAen blir svekket av dette. For eksempel kan det utelates faser i livsløpet til et produkt som ville økt det beregnede klimagassutslippet om det var tatt i betraktning.

Usikkerheter knyttet til klimatall inneholder blant annet utfordringer med at det ikke finnes ferdige EPDer for noen av komponentene. I disse tilfellene har vi som nevnt tidligere brukt EPDer for tilsvarende produkter eller kjørt simulering i SimaPro. Dette gjør tallene mer unøyaktige. Desto større andel data som ikke er spesifikke vi bruker, desto mindre nøyaktig blir resultatene. Dette er et problem i utførelse av nøyaktige klimagassberegninger for bygninger.

For sammenligningen i denne oppgaven sin del, trenger ikke disse usikkerhetene å ha like mye å si som for de totale klimatallene. Det er gjennom hele studien brukt de samme metodene og dataene for begge versjonene av huset. Med andre ord er det for det meste mengdene av produkter/materialer som er endret mellom TEK17 og passivhuset. Dette fører til at vi har de samme usikkerhetene i begge husene.

5.5 Videre arbeid/studier

For videre studier og arbeider som blir gjort på livssyklusanalyser av bygg virker det interessant å se på de økonomiske aspektene ved prosjekter som dette. Det er ingen tvil om at miljøprestasjonene til et bygg kan forbedres om man øker energieffektiviteten. Det hadde vært interessant å sett på dette i forhold til kostnadene en økning i energieffektivitet vil påføre i et lignende prosjekt. Med en økonomisk analyse vil man kunne vurdere om de miljømessige konsekvensene er verdt investeringen. En LCC for scenarioene i denne oppgaven ville gitt svar på dette. Et annet økonomisk aspekt som er interessant å undersøke er hvordan eventuelle utviklinger i priser i strømmarkedet vil påvirke verdien av kostnaden som skjer i investeringen.

At man gjør velinformerte valg i form av miljøaspekter ved et prosjekt vil være svært viktig i byggeindustrien fremover. Det er dessverre fortsatt relativt tidskrevende å utføre en livssyklusanalyse på et helt byggeprosjekt for å undersøke hvordan forskjellige valg vil påvirke miljøkonsekvensene. Det ville dermed vært svært ønskelig med en mer effektivisert prosess slik at disse flere forslag til løsninger kan sammenlignes på grunnlag av miljø.

EPDer er svært viktige i en LCA for å gi så nøyaktige estimater for utslipp som mulig. Dermed er en desto større og mer omfattende database med EPDer noe som hadde gjort det mulig å analysere flere prosjekter med mer nøyaktig datagrunnlag.

Det er tydelig at det med trevirke ikke øker betydelig i utslipp med økt materialforbruk. Dermed hadde det vært interessant å sett studier gjøre en lignende sammenligning for bygg med andre bæresystemer som stål og betong.

6 Konklusjon

Med forutsetningene satt i oppgaven er det tydelig at et passivhus vil være mer miljøvennlig i løpet av et livsløp på 60 år. Det lave energibehovet sammenlignet med TEK17-utgaven av rekkehuset fører til mindre utslipp på årlig basis. Ytterligere ser vi at utslippene knyttet til den økte bruken av materialer i passivhuset blir nærmere neglisjerbar til sammenligning. Det er tydelig at økningen av utslipp for de ekstra materialmengdene i passivhuset er forsvinnende små i forhold til utslippskuttene i driften av bygget.

Det er tydelig at det er nødvendig å gjøre beregninger med spesifikke distanser for transport av byggevarer til hvert prosjekt om man ønsker eksakte resultater. Spesielt for tyngre varer, kan forskjellene i de reelle distansene, og de generelt antatte distansene gi stor innvirkning på utslippstallene.

Studien har vært svært tidkrevende. Som nevnt i teksten er det også knyttet en del usikkerheter til utførelsen av LCAen, dette fører til at resultatene vil kunne være noe upresise. Det er ingen tvil om at et eventuelt fremtidig krav om klimagassregnskap krever bruk av hjelpende verktøy som effektiviserer prosessen.

De økonomiske aspektene med studien er lite utforsket og må vurderes opp mot miljøgevinstene passivhusoppgraderingen medfører. Dette gjelder også for eventuelle forskjeller i utseende og funksjonalitet som endres grunnet de økte prestasjonene i energieffektivitet. Når det er sagt er det tydelig at energibehovet minskes såpass at det virker å være gunstig også økonomisk å oppgradere til passivhus gjennom et byningslivsløp.

Litteraturliste

- Archer Lohne, A., Rekdal, O.K. and Bugten, E.A. (2020) *Effekten av miljøvennlige materialvalg på klimagassregnskap*. Bacheloroppgave. NTNU. Tilgjengelig fra: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2660150>.
- Barry, R.G. and Chorley, R.J. (2010) *Atmosphere, weather, and climate*. 9.utg. London; New York: Routledge.
- Belgum Torstensen, S. (2020) *Klimaregnskap for fjernvarme 2020*. Oppdragsrapport. Norsk Energi, s. 23. Tilgjengelig fra: https://www.fjernkontrollen.no/uploaded/files/2020_06_01_klimaregnskap_for_fjernvarme_2020.pdf.
- Bentsen, E. (2015) *Hva er en EPD? - EPD Norge, EPD Norge*. Tilgjengelig fra: <https://www.epd-norge.no/hva-er-en-epd/> (Hentet: 1. Januar 2022).
- Bryn, I.H., Petersen, A.J. and Gedsø, S. (2011) *Varmeløsninger og deres dekningsgrad*. Oppdragsrapport. Trondheim: Erichsen & Horgen A/S, s. 91.
- Direktoratet for byggkvalitet (2022) *Byggteknisk forskrift (TEK17), Dibk.no*. Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/> (Hentet: 1. Januar 2022).
- Dokka, K. (2022) 'Hva skjer med ny TEK?', 4. Februar. Tilgjengelig fra: <https://www.bygg.no/article/1489956/> (Hentet: 9. Mai 2022).
- Dokka, T.H. et al. (2009) *Energieffektivisering i bygninger – mye miljø for pengene!* Prosjektrapport 40. Oslo: SINTEF, s. 31. Tilgjengelig fra: <https://www.sintef.no/globalassets/upload/sb-prrapp-40.pdf>.
- EPD Norge (2016) 'Bruksanvisning for EPD'. Tilgjengelig fra: <https://www.epd-norge.no/getfile.php/136570-1470750719/Dokumenter/Bruksanvisninger%20tolke%20EPDer/Bruksanvisning%20for%20EPD%20-%20byggevarer.pdf>.
- EPD Norge (2018) *EPD Norge - Forsiden, EPD Norge*. Tilgjengelig fra: <https://www.epd-norge.no/> (Hentet: 15. Mai 2022).
- European Commission, Joint Research Centre, and Institute for Environment and Sustainability (2010) *General guide for Life Cycle Assessment: provisions and action steps*. Luxembourg: Publications Office. Tilgjengelig fra: <http://dx.publications.europa.eu/10.2788/94987> (Hentet: 28. April 2022).
- F, C. et al. (1993) *Guidelines for life-cycle assessment: A 'code of practise'*.
- FN (2021a) *COP26: Her er alt om årets klimatoppmøte*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/nyheter/cop26-her-er-alt-om-aarets-klimatoppmoete> (Hentet: 8. Mai 2022).

FN (2021b) *COP26: Together for our planet, United Nations*. United Nations. Tilgjengelig fra: <https://www.un.org/en/climatechange/cop26> (Hentet: 8. Mai 2022).

FN (2021c) *UN Climate Change Conference (COP26) at the SEC – Glasgow 2021, UN Climate Change Conference (COP26) at the SEC – Glasgow 2021*. Tilgjengelig fra: <https://ukcop26.org/> (Hentet: 14. Mai 2022).

FN (2022a) *Bærekraftige byer og lokalsamfunn*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/baerekraftige-byer-og-lokalsamfunn> (Hentet: 10. Mai 2022).

FN (2022b) *Ren energi til alle*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/ren-energi-til-alle> (Hentet: 10. Mai 2022).

FN-sambandet (2022) *FNs bærekraftsmål, Www.fn.no*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal> (Hentet: 1. Januar 2022).

Grønmo, S. (2021) *Kvantitativ metode – Store norske leksikon, Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: https://snl.no/kvantitativ_metode (Hentet: 1. Januar 2022).

Guterres, A. (2021) *Guterres: The IPCC Report is a code red for humanity, United Nations Western Europe*. Tilgjengelig fra: <https://unric.org/en/guterres-the-ipcc-report-is-a-code-red-for-humanity/> (Hentet: 14. Mai 2022).

Helgesen, P.I. (2020) 'Fotavtrykksmetodikk i Enova (Figur 12)'. Enova. Tilgjengelig fra: https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.enova.no%2Fdownload%3FobjectPath%3Dupload_images%2FB0C3CAA5BEC47A6B1A42A13DE11E4E0.pdf%26filename%3DFotavtrykksmetodikk.pdf&psig=AOvVaw12iDADu85XdXrHroKmgWl4&ust=1652796632443000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjhqFwoTCODUsrOZ5PcCFQAAAdAAAAABAD.

Hestnes, A.G. (2017) *Zero Emission Buildings*. FAGBOKFORLAGET.

Horne, P.A. (2021) *Klimabaserte energikrav til bygg, ref. 21/4140*. DiBK. Tilgjengelig fra: https://dibk.no/globalassets/horinger/horing-tek/010721_klimabaserte-energi-til-bygg/210623-klimabaserte-energi-til-bygg-horingsnotat.pdf (Hentet: 5. September 2022).

Lyng, K.-A. et al. (2014) *Karbonopptak i betong i LCA og EPD*. Oppdragsrapport 1499. Østfoldforskning AS, s. 48. Tilgjengelig fra: <https://norsus.no/wp-content/uploads/720-1.pdf> (Hentet: 5. Mai 2022).

McKinsey Sustainability (2010) *Greenhouse gas abatement cost curves | Sustainability | McKinsey & Company*. Tilgjengelig fra: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/greenhouse-gas-abatement-cost-curves> (Hentet: 16. Mai 2022).

Myhre, L. et al. (2012) *Veileder for prosjektering av passivhus - småhus*. Prosjektrapport 105. Forskningsveien 3B 0314 Oslo: SINTEF, s. 68. Tilgjengelig fra: https://www.sintefbok.no/book/index/938/veileder_for_prosjektering_av_passivhus_smaahus (Hentet: 5. Januar 2022).

- Nersund Larsen, H. (2019) *Bygg- og anleggssektorens klimagassutslipp*. Oppdragsrapport 621256–01. Asplan Viak, s. 14. Tilgjengelig fra: https://www.bnl.no/siteassets/dokumenter/rapporter/klimautslipp_bae_2019.pdf.
- Nilsen, M. and Bohne, R.A. (2019) 'Evaluation of BIM based LCA in early design phase (low LOD) of buildings', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 323, s. 012119. doi:10.1088/1755-1315/323/1/012119.
- NILU (2021) *Utvikling av miljøprestasjoner og klimapåvirkningsindikatorer for vurdering av bærekraft, NILU*. Tilgjengelig fra: <https://www.nilu.no/prosjekt/2521565/> (Hentet: 15. Mai 2022).
- NVE (2022) *Hvor kommer strømmen fra? - NVE*. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/energi/energisystem/kraftproduksjon/hvor-kommer-strommen-fra/> (Hentet: 4. Mai 2022).
- OneClickLCA (2016) *One Click LCA*. Tilgjengelig fra: <https://www.oneclicklca.com/> (Hentet: 12. Mai 2022).
- RIF (2019) *Norges tilstand 2019 - Kommunale og fylkeskommunale bygg*. State of the nation. Oslo: RIF.
- Sæter, S.O. (2021) 'Betaler dobbelt så mye for strøm', *E24*, 22. November. Tilgjengelig fra: <https://e24.no/i/a7abrd> (Hentet: 12. Mai 2022).
- San Elias Portet, S. (2015) *Life Cycle Assessment (LCA) for an apartment project in Nardovegen*. Masteravhandling. NTNU. Tilgjengelig fra: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2402550>.
- Schwarz, P.M. (2018) *Energy economics*. London; New York, NY: Routledge, Taylor & Francis Group (Routledge Textbooks in Environmental and Agricultural Economics, 9).
- SINTEF (2013a) '471.013 U-verdier. Tak - Byggforskserien', *Byggforsk.no*. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/212/u-verdier_tak (Hentet: 1. Januar 2022).
- SINTEF (2013b) '471.411 U-verdier. Vegger over terreng med bindingsverk av tre med kontinuerlig utvendig isolasjon - Byggforskserien', *Byggforsk.no*. Tilgjengelig fra: https://byggforsk.no/dokument/4046/u-verdier_vegger_over_terreng_med_bindingsverk_av_tre_med_kontinuerlig_utvendig_isolasjon (Hentet: 1. Januar 2022).
- SINTEF (2013c) '523.251 Bindingsverk av tre i småhus. Dimensjonering og utførelse - Byggforskserien', *Byggforsk.no*. (Byggforskserien, 523.251). Tilgjengelig fra: https://byggforsk.no/dokument/358/bindingsverk_av_tre_i_smaahus_dimensjonering_og_utforelse (Hentet: 1. Januar 2022).
- SINTEF (2018a) '471.008 Beregning av U-verdier etter NS-EN ISO 6946 - Byggforskserien'. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/208/beregning_av_u-verdier_etter_ns-en_iso_6946 (Hentet: 12. Mai 2022).

SINTEF (2018b) '523.002 Yttervegger over terreng. Egenskaper og konstruksjonsprinsipper. Krav og anbefalinger - Byggforskserien', *Byggforsk.no*. (Byggforskserien, 523.002). Tilgjengelig fra:

https://byggforsk.no/dokument/348/yttervegger_over_terreng_egenskaper_og_konstruksjonsprinsipper_krav_og_anbefalinger (Hentet: 1. Januar 2022).

SINTEF (2018c) '525.207 Kompakte tak - Byggforskserien', *Byggforsk.no*. (Byggforskserien, 525.207). Tilgjengelig fra: https://byggforsk.no/dokument/387/kompakte_tak (Hentet: 1. Januar 2022).

SINTEF (2019) '521.112 Gulv på grunnen med ringmur. Telesikring og varmeisolering av oppvarmede bygninger - Byggforskserien', *Byggforsk.no*. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/1541/gulv_paa_grunnen_med_ringmur_telesikring_og_varmeisolering_av_oppvarmede_bygninger (Hentet: 1. Januar 2022).

SINTEF (2021) '525.101 Skrå, luftede tretak med isolerte takflater - Byggforskserien', *Byggforsk.no*. (Byggforskserien, 525.101). Tilgjengelig fra: https://byggforsk.no/dokument/382/skraa_luftede_tretak_med_isolerte_takflater (Hentet: 1. Januar 2022).

Solli, C. (2016) 'Miljøegenskaper og materialer'. Asplan Viak. Tilgjengelig fra: https://www.epd-norge.no/getfile.php/136819-1479891934/Dokumenter/211116%20Materialseminar%20Oslo%20tidseffekt_Solli.pdf.

Sølverud Larsen, I. (2021) *Konsekvens av klimaendringer for bygninger Endring i behov for oppvarming og varmeisolasjon i et fremtidig klima*. Masteroppgave. NTNU. Tilgjengelig fra: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2784627>.

Statistisk sentralbyrå (2021) *Produksjon og forbruk av energi, energibalanse og energiregnskap, SSB*. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/energi-og-industri/energi/statistikk/produksjon-og-forbruk-av-energi-energibalanse-og-energiregnskap> (Hentet: 15. Mai 2022).

Statistisk sentralbyrå (2022) *Elektrisitet, SSB*. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/energi-og-industri/energi/statistikk/elektrisitet> (Hentet: 15. Mai 2022).

Statkraft (2022) *Lokale miljødata - BREEAM*. Tilgjengelig fra: <https://www.statkraftvarme.no/utbygging/praktisk-informasjon/lokale-miljodata---breeam/> (Hentet: 5. Mai 2022).

Statkraft Varme (2017) *Fjernvarme og overskuddsenergi*. Tilgjengelig fra: <https://www.statkraftvarme.no/kunnskapssenter/fjernvarme/> (Hentet: 11. Mai 2022).

Trondheim Kommune (2012) *Energibruk i bygg, §23.1*.

Vedlegg

- Vedlegg A** Excel beregninger
- Vedlegg B** Skissetegninger Mesterkonsult
- Vedlegg C** Simien beregninger
- Vedlegg D** Klimagassregnskap Oslo Takterrasse
- Vedlegg E** Passivhus Revit

