

Åshild Faller Råheim

Klimagassutslipp fra tekniske systemer i bygninger

En utforskende studie av
beregningsmetoder og resultater

Masteroppgave i Byggeprosess

Veileder: Ole Jonny Klakegg

Juni 2023

Åshild Faller Råheim

Klimagassutslipp fra tekniske systemer i bygninger

En utforskende studie av
beregningsmetoder og resultater

Masteroppgave i Byggeprosess
Veileder: Ole Jonny Klakegg
Juni 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for bygg- og miljøteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Sammendrag

FNs miljøprogram (UNEP) sin statusrapport for 2022 viser at bygge- og anleggsnæringen står for en betydelig del av det globale energi- og CO₂-utslippet. Rapporten peker på økende materialbruk som en viktig utfordring i arbeidet med å redusere utslippene. Det er imidlertid lite kunnskap om miljøpåvirkninger som kommer fra de tekniske systemene i bygninger. Formålet med denne masteroppgaven er å utforske dette temaet, med spesielt vekt på klimagassutslipp fra produksjon av komponenter i klimakontrollsystemet, vann- og avløpssystemet, samt det elektriske systemet i bygninger. Det vil bidra til å fylle kunnskapsgapet om miljøpåvirkningene fra tekniske systemer, og gi innsikt som kan være nyttig for beslutninger om rehabilitering og utskifting av komponenter i bygninger. Oppgaven har fire forskningsspørsmål som tar sikte på å undersøke tidligere studier, klimagassberegninger gjennom en casestudie og en sammenligning av disse.

Forskningsdesignet for oppgaven kan beskrives som en blanding av kvalitative og kvantitative metoder, kjent som en “mixed method research”. Det involverer en kvalitativ litteraturstudie av tidligere forskning, som ble utført ved hjelp av både tradisjonelle og systematiske tilnærminger. Utvalgt litteratur ble identifisert gjennom søk i anerkjente databaser som Scopus og Web of Science. Videre involverte det en casestudie av Tordenskiolds gate 12 (T12), der klimagassutslippene fra bygningens tekniske systemer i produktfasen (A1-A3) ble beregnet gjennom kvantitativ dataanalyse. Som indikator for klimagassutslipp ble “Global Warming Potential” (GWP) benyttet. Klimagassutslippet ble beregnet ved å følge en arbeidsflyt som innebar bruk av en bygningsinformasjonsmodell (BIM), i kombinasjon med analyser av miljødeklarasjoner (EPD-er) og produktdatablader. Miljødataene ble hovedsakelig innhentet gjennom bruk av verktøyet One Click LCA, supplert med EPD-er fra nettsider til produktleverandører, samt utslippsfaktorer for materialer.

Tidligere studier konkluderer med at klimagassutslippene fra tekniske systemer utgjør en betydelig andel av produktfasen til en bygning. Beregningene er imidlertid avhengige av ulike parametere, slik som metode for kvantifisering av komponenter og materialer, samt tilgang på pålitelige miljødata. Det er av felles erfaring, både fra annen forskning og fra casestudien av T12, at det er mangel på produktspesifikk miljødata for tekniske komponenter. Det er derfor nødvendig å basere seg på EPD-er for lignende produkter og datablader med sammenlignbare materialekomposisjoner, noe som gir usikkerheter i beregningene. Generelle konklusjoner i litteraturen og i casestudien av T12 antyder at klimakontrollsystemet, spesielt ventilasjonsaggregater og -kanaler, genererer det største utslippet. Det er på grunn av komplekse komponenter som enten har høy vekt, inneholder metaller med stort utslipp i produktfasen, eller begge deler.

Resultatene fra klimagassberegningene for de tekniske systemene i T12 er i stor grad påvirket av lav detaljeringsgrad i den anvendte BIM-modellen. Denne begrensningen medfører usikkerheter som skyldes betydelige antagelser i mengdeberegningene og ved innhenting av miljødata for komponentene. Vurderingen er likevel omfattende i den forstand at en stor andel av elementene i BIM-modellen er medberegnet, noe som anses som en styrke ved studien. Tabellen viser beregnet "Global Warming Potential" (GWP) per m^2 oppvarmet bruksareal (BRA) for de tekniske systemene i T12.

Tordenskiolds gate 12 - GWP [kg CO₂-e/ m^2 oppvarmet BRA]

| Klimakontroll | Vann og avløp | Elektrisk | Totalt |
|---------------|---------------|-----------|--------|
| 44,90 | 22,07 | 11,76 | 78,65 |

Videre arbeid bør legge vekt på å redusere usikkerhetene i resultatene og utvikle mer tidseffektive metoder, for eksempel ved å forbedre datakvaliteten i BIM-modeller, og samarbeide med produsenter og leverandører for å få mer pålitelig informasjon om materialinnholdet i komponentene. Flere casestudier bør gjennomføres for å etablere generiske verdier for klimagassutslipp fra tekniske systemer, i tillegg til at alle livsløpsstadier og relevante miljøindikatorer bør inkluderes i miljøvurderingene. Implementeringen av slike forbedringer vil bidra til å styrke påliteligheten og effektiviteten av klimagassberegninger og miljøvurderinger av tekniske systemer.

Abstract

The United Nations Environment Programme's (UNEP) status report for 2022 reveals that the construction industry accounts for a significant portion of global energy and CO₂ emissions. The report highlights increasing material usage as a crucial challenge in efforts to mitigate emissions. However, there is a lack of knowledge regarding the environmental impacts arising from the technical systems within buildings. The objective of this master's thesis is to explore this subject, with particular emphasis on the greenhouse gas emissions resulting from the production of components in the building's climate control system, water and sanitation system, and electrical system. This research aims to fill the knowledge gap concerning the environmental impacts of technical systems and provide insights that can inform decisions regarding the rehabilitation and replacement of components in buildings. The thesis encompasses four research questions that seek to investigate previous studies, conduct greenhouse gas calculations through a case study, and compare the findings.

The research design for this thesis can be described as a mixed-method approach, incorporating both qualitative and quantitative methods. It involves a qualitative literature review of prior research conducted using traditional and systematic approaches. Relevant literature was identified through searches in reputable databases such as Scopus and Web of Science. Furthermore, it entails a case study of Tordenskiolds gate 12 (T12), where the greenhouse gas emissions from the building's technical systems during the production phase (A1-A3) were quantitatively analyzed. The Global Warming Potential (GWP) was employed as the indicator for greenhouse gas emissions. The emissions were calculated by following a workflow that involved utilizing a building information model (BIM) in conjunction with analyses of environmental product declarations (EPDs) and product datasheets. Environmental data were primarily gathered using the One Click LCA tool, supplemented by EPDs from product suppliers' websites and emission factors for materials.

Previous studies conclude that greenhouse gas emissions from technical systems constitute a significant proportion of a building's production phase. However, these calculations rely on various parameters, such as the quantification method for components and materials, as well as access to reliable environmental data. Both literature reviews and the T12 case study indicate a lack of product-specific environmental data for technical components. Consequently, reliance on EPDs for similar products and datasheets with comparable material compositions introduces uncertainties into the calculations. General conclusions in the literature and the T12 case study suggest that the climate control system, particularly ventilation units and ducts, generate the highest emissions due to complex components that either have high weight, contain highly emitting metals in the production phase, or both.

The results of the greenhouse gas calculations for T12's technical systems are largely influenced by the low level of detail in the applied BIM model. This limitation introduces uncertainties resulting

from significant assumptions in quantity estimations and data collection for the components. Nonetheless, the assessment is comprehensive in the sense that a substantial portion of elements in the BIM model is included, which is considered a strength of the study. The table below displays the calculated Global Warming Potential (GWP) per m^2 of heated floor area for T12's technical systems.

Tordenskiolds gate 12 - GWP [kg CO₂-e/ m^2 HFA]

| HVAC | Plumbing | Electrical | Total |
|-------|----------|------------|-------|
| 44,90 | 22,07 | 11,76 | 78,65 |

Future work should focus on reducing uncertainties in the results and developing more time-efficient methods. This can be achieved by improving data quality in BIM models and collaborating with manufacturers and suppliers to obtain more reliable information regarding the material content of components. Conducting additional case studies to establish generic values for greenhouse gas emissions from technical systems is also recommended, along with incorporating all life cycle stages and relevant environmental indicators in the assessments. Implementing such improvements will strengthen the reliability and effectiveness of greenhouse gas calculations and environmental assessments of technical systems.

Forord

Denne masteroppgaven utgjør avsluttende vurdering i studieprogrammet bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet i Trondheim. Oppgaven veker 30 studiepoeng og er utarbeidet våren 2023.

Negative miljøpåvirkning fra byggeaktivitet og bygningsmassen for øvrig er et kjent problem. Miljøpåvirkning fra de tekniske systemene i bygninger er likevel et lite utforsket område, og ofte neglisjert i livsløpsvurderinger av bygninger. Denne tematikken ble introdusert av Julie Skullestad ved Aase Teknikk, og fanget min interesse. Det var både fordi tematikken var ny for meg, og fordi jeg har et sterkt engasjement for klima- og miljøvern. Jeg har valgt bygg og anlegg som studieretning, med byggeprosess som hovedprofil. Hovedvekten av mine emner har gitt meg kunnskap om de ulike fasene av et byggeprosjekt og byggeledelse, men jeg hadde ingen forkunnskaper om livsløpsanalyser av bygninger før jeg høsten 2022 valgte å skrive prosjektoppgave om miljødeklarasjoner. Julie Skullestad har sammen med Helene Lauvland vært eksterne og faglige veiledere for arbeidet, og gitt meg verdifull innsikt og innføring i metoder og verktøy for livsløpsanalyser og beregninger av miljøpåvirkninger. Veileder ved instituttet har vært Ole Jonny Klakegg, som har hjulpet meg med selve prosessen og oppbygning av oppgaven. Jeg vil med det rette en stor takk til hjelpsomme veiledere. Deres perspektiver på oppgaven har vært nyttige.

Til slutt vil jeg takke alle medstudenter og venner som har gitt faglig og sosialt påfyll gjennom mange år i Trondheim. Spesielt takk til familie, kjæreste, kollektiv, gamle venner og nye venner på lesesal, som det siste semesteret har vært viktig støttespillere i et krevende masterarbeid.

Innhold

| | |
|---|-------------|
| Sammendrag | iii |
| Abstract | vi |
| Forord | ix |
| Figurer | xii |
| Tabeller | xiii |
| 1 Introduksjon | 1 |
| 1.1 Bakgrunn | 1 |
| 1.2 Problemdefinering | 2 |
| 1.3 Omfang og avgrensninger | 3 |
| 1.4 Disposisjon | 4 |
| 2 Metode | 5 |
| 2.1 Forskningsdesign | 5 |
| 2.2 Gjenbruk fra prosjektoppgaven | 6 |
| 2.3 Litteraturstudie | 7 |
| 2.3.1 Innledende arbeid | 7 |
| 2.3.2 Systematisk tilnærming | 8 |
| 2.3.3 Problemformulering | 8 |
| 2.3.4 Datainnsamling | 8 |
| 2.3.5 Evaluering av data | 11 |
| 2.3.6 Analyse, tolkning og presentasjon av data | 11 |
| 2.3.7 Styrker og svakheter med metoden | 12 |
| 2.4 Beregning av klimagassutslipp | 13 |
| 2.4.1 Informasjonsuttak fra BIM-modell | 13 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.4.2 | Innhenting av miljødata | 16 |
| 2.4.3 | Dokumentanalyse | 17 |
| 2.4.4 | Styrker og svakheter ved metoden | 17 |
| 3 | Teoretisk rammeverk | 19 |
| 3.1 | Formål med vurderingen | 20 |
| 3.2 | Spesifisering objektet | 20 |
| 3.3 | Valg av scenarier | 21 |
| 3.4 | Kvantifisering av bygningen | 22 |
| 3.5 | Valg av miljødata | 22 |
| 3.6 | Beregning av miljøindikatorer | 23 |
| 3.7 | Rapportering og kommunisering | 25 |
| 4 | Resultater fra litteraturstudien | 26 |
| 4.1 | Beskrivelse av studiene | 26 |
| 4.2 | Detaljer og systemgrenser | 28 |
| 4.3 | Kvantifisering av bygningen og miljødata | 29 |
| 4.4 | Funn fra studiene | 31 |
| 4.5 | Utfordringer og usikkerheter | 33 |
| 5 | Resultater fra casestudien | 35 |
| 5.1 | Presentasjon av case: Tordenskiolds gate 12 | 35 |
| 5.2 | VENT-modell | 36 |
| 5.3 | RIVr-modell | 39 |
| 5.4 | RIE-modell | 43 |
| 5.5 | Tekniske systemer | 48 |
| 6 | Diskusjon | 49 |
| 6.1 | Hvordan har tidligere studier gjennomført livsløpsanalyser av tekniske systemer i bygninger | 49 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 6.2 | Hva sier tidligere studier om miljøpåvirkningene forbundet med de tekniske systemene i bygninger? | 51 |
| 6.3 | Hvor stort er klimagassutslippet forbundet med produktfasen til de tekniske systemene i Tordenskiolds gate 12? | 52 |
| 6.4 | Hva sier resultatene fra livsløpsanalysen av de tekniske systemene i Tordenskiolds gate 12 sammenlignet med funn i litteraturen? | 54 |
| 7 | Konklusjon | 57 |
| 7.1 | Klimagassutslipp fra tekniske systemer | 57 |
| 7.2 | Til ettertanke | 58 |
| 7.3 | Videre arbeid | 59 |
| | Referanser | 60 |
| | Vedlegg | 64 |
| A | Teoretisk rammeverk | 64 |
| B | Mengde- og miljødata - VENT-modell | 64 |
| C | Mengde- og miljødata - RIVr-modell | 64 |
| D | Mengde- og miljødata - RIE-modell | 64 |
| E | Ekskluderte elementer | 64 |

Figurer

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Disposisjon av oppgaven og leserveiledning. | 4 |
| 2 | Forskningsdesignet for oppgaven. | 6 |
| 3 | Prosedyre for vurderte artikler. | 10 |
| 4 | Arbeidsflyt for klimagassberegning. | 13 |
| 5 | Illustrasjon av “bounding box” i BIM | 14 |
| 6 | Eksempel på målt muffe. | 15 |
| 7 | Eksempler på kanal- og rørdeler fra VENT- og RIVr-modell. | 15 |
| 8 | Teoretisk rammeverk. | 19 |
| 9 | Bilder av T12 | 35 |
| 10 | BIM-modell av T12 | 36 |
| 11 | VENT-modell | 37 |
| 12 | Kvantifisering av elementene i VENT-modell. | 37 |
| 13 | Kilder til miljøinformasjon for VENT-modell. | 38 |
| 14 | GWP fra VENT-modell fordelt etter tosifret systemkode. | 39 |
| 15 | RIVr-modell | 40 |
| 16 | Kvantifisering av elementene i RIVr-modell. | 40 |
| 17 | Kilder til miljøinformasjon for RIVr-modell. | 41 |
| 18 | GWP fra RIVr-modell fordelt etter tosifret systemkode. | 43 |
| 19 | RIE-modell | 44 |
| 20 | Kvantifisering av elementene i RIE-modell. | 44 |
| 21 | Kilder til miljøinformasjon for RIE-modell. | 45 |
| 22 | GWP fra RIE-modell fordelt etter tosifret systemkode i tabell 4. | 46 |
| 23 | GWP fra RIE-modell fordelt etter tosifret systemkode i tabell 5. | 47 |
| 24 | GWP fra de tekniske systemene i T12 fordelt etter tabell 3, 4 og 5. | 48 |

Tabeller

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Litteratur funnet ved hjelp av “snowballing”. | 8 |
| 2 | Kriterier for artikler som ble vurdert og ekskludert. | 9 |
| 3 | Resultatet fra litteratursøket. | 10 |
| 4 | Forskjellige typer data. | 22 |
| 5 | Indikatorer for miljøpåvirkninger med beskrivelse. | 24 |
| 6 | Detaljerer fra casestudiene. | 28 |
| 7 | Beregnet GWP fra produksjon (A1-A3) av tekniske systemer hentet fra studiene. | 33 |
| 8 | Informasjon om Tordenskiolds gate 12. | 35 |
| 9 | GWP fra VENT-modell fordelt etter tabell 3 i NS 3451. | 38 |
| 10 | GWP fra RIVr-modell fordelt etter tabell 3 i NS 3451. | 42 |
| 11 | GWP fra RIE-modell fordelt etter tabell 4 i NS 3451. | 46 |
| 12 | GWP fra RIE-modell fordelt etter tabell 5 i NS 3451. | 47 |
| 13 | Sammenligning av GWP i produksjonsfasen til tekniske systemer. | 54 |
| 14 | Klimagassutslipp målt i GWP for tekniske systemer i T12. | 57 |

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn

FNs miljøprogram (UNEP) utvikler årlig en statusrapport som kartlegger aktivitet, energibruk og klimagassutslipp i bygge- og anleggsnæringen (UNEP, 2022). Rapporten for 2022 hevder at næringen står for 37% av det globale energi- og *prosessrelaterte* CO₂-utslippet. I begrepet prosessrelatert utslipp ligger karbon som er bundet i byggematerialer. *Bundet karbon* defineres som karbonutslipp knyttet til råvareuttak, produksjon, montering og avhending av byggematerialer. Rapporten setter økende materialbruk i søkelyset: Slik det ser ut nå, vil det globale klimagassutslippet knyttet til materialbruk nesten doubles innen 2060.

Lenge har energibruk for bygninger i drift blitt ansett som det største bidraget til negative miljøeffekter (Blengini og Di Carlo, 2010). Det er dermed iverksatt tiltak for å redusere klimagassutslippet og energibehovet til bygninger i drift (Kiamili *et al.*, 2020). Fremskrittene har vært store (Ylmén *et al.*, 2019), blant annet gjennom utvikling av energieffektiv teknologi, samt skiftet fra fossile til fornybare energikilder (Kiamili *et al.*, 2020). Økt energieffektivitet for bygninger i drift, fører imidlertid til mer komplekse og materialkrevende komponenter. Større utslipp og ressursbruk i produktfasen vil med det utgjøre en større andel av det totale klima- og miljøfotavtrykket til en bygning.

Bundet karbon har tidligere vært underestimert i strategier for å redusere utslipp fra bygninger (UNEP, 2022; WorldGBC, 2019). For å avkarbonisere byggematerialer må interessenter som er involvert i beslutninger om materialvalg ta ansvar og forstå miljøkonsekvensene. Dette fordrer at de er i stand til å veie ulike miljøaspekter ved materialene opp mot hverandre: Karbon som er bundet i materialene, utslipp i drift og utslipp ved avhending. Blant prioriteringene bør forlengelse av bygninger sin levetid og gjenbruk av byggematerialer stå øverst på listen. World Green Building Council (WorldGBC) har formulert to mål som tar i betraktning både bundet karbon og energibruk for bygninger i drift:

- Innen 2030 skal alle nye byggeprosjekter som omfatter nybygg, renoveringer og infrastrukturer redusere mengden bundet karbon med 40% sammenlignet med 2020, i tillegg til å være karbonnøytrale i drift.
- Innen 2050 skal alle nye byggeprosjekter som omfatter nybygg, renoveringer og infrastrukturer ha netto null bundet karbon, samt være karbonnøytrale i drift.

Livsløpsanalyse (LCA) er en globalt akseptert metode for å vurdere og kvantifisere miljøeffekter gjennom livsløpet til en bygning (WorldGBC, 2019). Etter at LCA ble innført i byggeindustrien, har det blitt større bevissthet rundt utslippsbidrag fra de ulike livsløpsfaser for bygninger og byggematerialer. Likevel er sammenligningen av studier om livssyklusanalyser for bygninger utfordrende,

da det tas hensyn til ulike parametere. Dette omfatter forskjellige bygningstyper, varierende omfang av inkluderte bygningsdeler og ulike livsfaser som blir tatt i betraktning. Dessuten har de fleste studier en tendens til å begrense livssyklusanalyser av bygninger til å omfatte bæresystem, tak og fasader, mens de tekniske systemene ofte blir neglisjert. (Junnila og Horvath, 2003; Kiamili *et al.*, 2020; Passer *et al.*, 2012; Rodriguez *et al.*, 2020). 1. juli 2022 innførte TEK17, som er gjeldende byggetekniske forskrift i Norge, krav om klimagassregnskap i forbindelse med oppføring og større ombygginger av boligbygg og yrkesbygg. Det er imidlertid ikke krav om å inkludere tekniske systemer.

Gjenbruk av byggematerialer for å redusere utslipp er spesielt interessant i næringsbygg (Rodriguez *et al.*, 2020). Denne bygningstypen gjennomgår et stort antall renoveringer i løpet av bruksstadiet, typisk i form av leietakertilpasninger og utskifting av tekniske systemer. Dermed øker ressursbruken og andre negative virkninger på miljøet. Tekniske systemer som ventilasjon-, vann- og sanitærinstallasjoner (VVS-installasjoner), samt elektriske installasjoner, inneholder komponenter med komplekse materialsammensetninger. Det gjør at de er utfordrende å håndtere i en livsløpsanalyse. Utilstrekkelig data og mangel på metoder og retningslinjer er andre utfordringer som hindrer detaljerte beregninger av miljøpåvirkninger fra disse systemene (Junnila og Horvath, 2003; Medas *et al.*, 2015; Passer *et al.*, 2012; Rodriguez *et al.*, 2020). Dette utgjør et kunnskapsgap og et behov for mer forståelse rundt miljøpåvirkninger fra tekniske systemer. Det vil gi innsikt i hvilke systemer og komponenter som er av størst betydning i utslippssammenheng. Det vil også bidra i beslutninger som angår rehabilitering av bygninger, og ved spørsmål om utskifting av komponentene.

1.2 Problemdefinering

Denne masteroppgaven ønsker å rette oppmerksomhet mot miljøpåvirkninger fra av komponenter i de tekniske systemene i bygninger, med særlig vekt på produktfasen. De tekniske systemene er definert som bygningsmaterialer og -komponenter som i henhold til bygningsdelstabellen NS 3451 tilhører *Tabell 3 - VVS-installasjoner*, *Tabell 4 - Elkraftinstallasjoner* og *Tabell 5 - Ekom og Automatisering. Livsløpsanalyse, miljøvurdering og vurdering av miljøprestasjon* er i oppgaven definert som det samme. Følgende problemstilling er definert:

Hvor mye klimagassutslipp kan knyttes til produksjon av de tekniske systemene i et kontorbygg?

Det er innledningsvis valgt å gjennomføre en litteraturstudie med mål om å skaffe oversikt over eksisterende forskning. Det er undersøkt hvilke metoder som er anvendt og hvilke resultater som er funnet i studier som tar for seg miljøpåvirkninger fra de tekniske systemene, hovedsakelig i kontorbygg. Videre utføres en casestudie av Tordenskiolds gate 12 i Oslo, heretter kalt T12, med mål om å utarbeide en detaljert klimagassberegning for de tekniske systemene i bygningen. Den valgte tilnærmingen til problemstillingen gir grunnlag for følgende fire forskningsspørsmål:

FS1: Hvordan har tidligere studier gjennomført livsløpsanalyser av tekniske systemer i bygninger?

FS2: Hva sier tidligere studier om miljøpåvirkningene forbundet med de tekniske systemene i bygninger?

FS3: Hvor stort er klimagassutslippet forbundet med produktfasen til de tekniske systemene i Tordenskiolds gate 12?

FS4: Hva sier resultatene fra livsløpsanalysen av de tekniske systemene i Tordenskiolds gate 12 sammenlignet med funn i litteraturen?

1.3 Omfang og avgrensninger

Studien er avgrenset med hensyn til tids- og arbeidsomfanget som er forventet for en masteroppgave ved institutt for bygg- og miljøteknikk ved NTNU. Arbeidet skal dekke 30 studiepoeng, som tilsvarer omtrent 800 arbeidstimer, og har en tidsbegrensning på 20 uker.

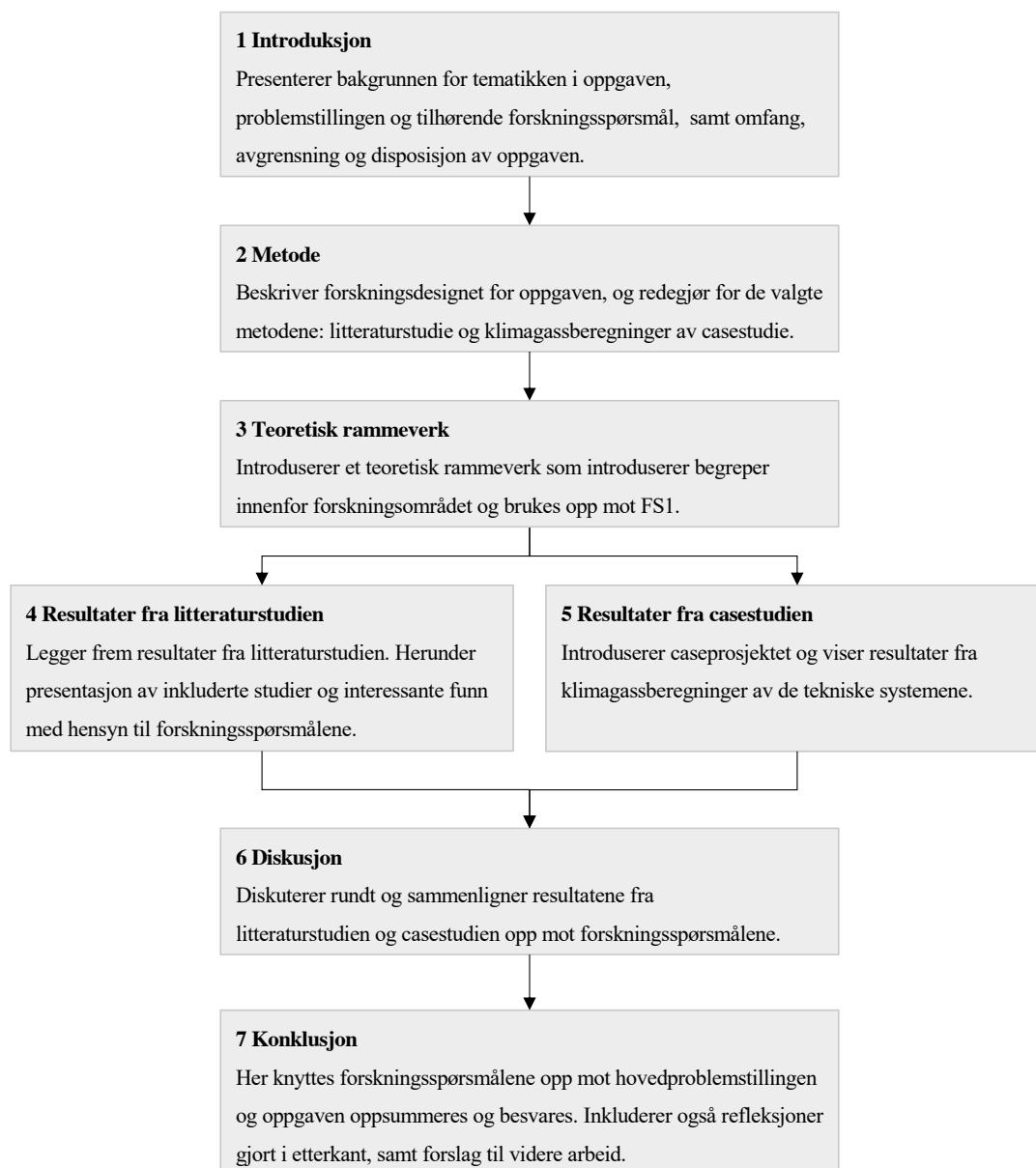
Livsløpsanalyser av tekniske systemer i bygninger utgjør et relativt bredt forskningstema. Problemstillingen er derfor avgrenset til å omfatte kontorbygg, samt klimagassutslipp i produktfasen (A1-A3), målt ved hjelp av indikatoren “Global Warming Potential”.

Forskningsspørsmålene bidrar til å presisere og avgrense hva som skal vektlegges i litteraturstudien og casestudien. Litteraturstudien har et bredere interesseområdet, da det er ønskelig å undersøke flere livsstadier og miljøindikatorer. I tillegg til at det er inkludert noen andre bygningstyper enn kontorbygg. Dette er for å utvide omfanget av oppgaven og utforske flere perspektiver innenfor tematikken. I tråd med forskningsspørsmål 1 og 2, er det i litteraturstudien lagt vekt på valg av metode for livsløpsanalyse, og kvantitative og kvalitative funn som gjelder miljøpåvirkninger fra tekniske systemer.

Casestudien tar for seg et kontorbygg som er lokalisert i Tordenskiolds gate 12 i Oslo. Det gjennomføres en klimagassberegning av komponentene og materialene som tilhører det tekniske systemet i kontorbygget. Det er mål om at klimagassberegningen skal ha høy detaljeringsgrad med hensyn til omfanget av byggematerialer og komponenter. Klimagassutslippet er beregnet ved hjelp av indikatoren “global warming potential” (GWP). På grunn av oppgavens omfang i tid og størrelse, er det valgt å avgrense vurderingen til å omfatte produktfasen (A1-A3) til materialene og komponentene. Det vil si at gjennomføringsfasen (A4, A5), bruksstadiet (B1-B7) og sluttstadiet (C1-C3) ikke er undersøkt. Ytterligere detaljer om klimagassberegningene er beskrevet i kapittel 2 *Metode*.

1.4 Disposisjon

Oppgaven er strukturert i seks hovedkapitler, hvorav hoveddelen er todelt; Første del omfatter litteraturstudien, mens andre del omfatter casestudien. Figur 1 viser hvordan oppgaven er disponert, med en kort beskrivelse av hvert kapittel. Figuren har som hensikt å vise hovedtrekkene i arbeidsprosessen, i tillegg til å veilede leseren.



Figur 1: Disposisjon av oppgaven og leserveiledning.

2 Metode

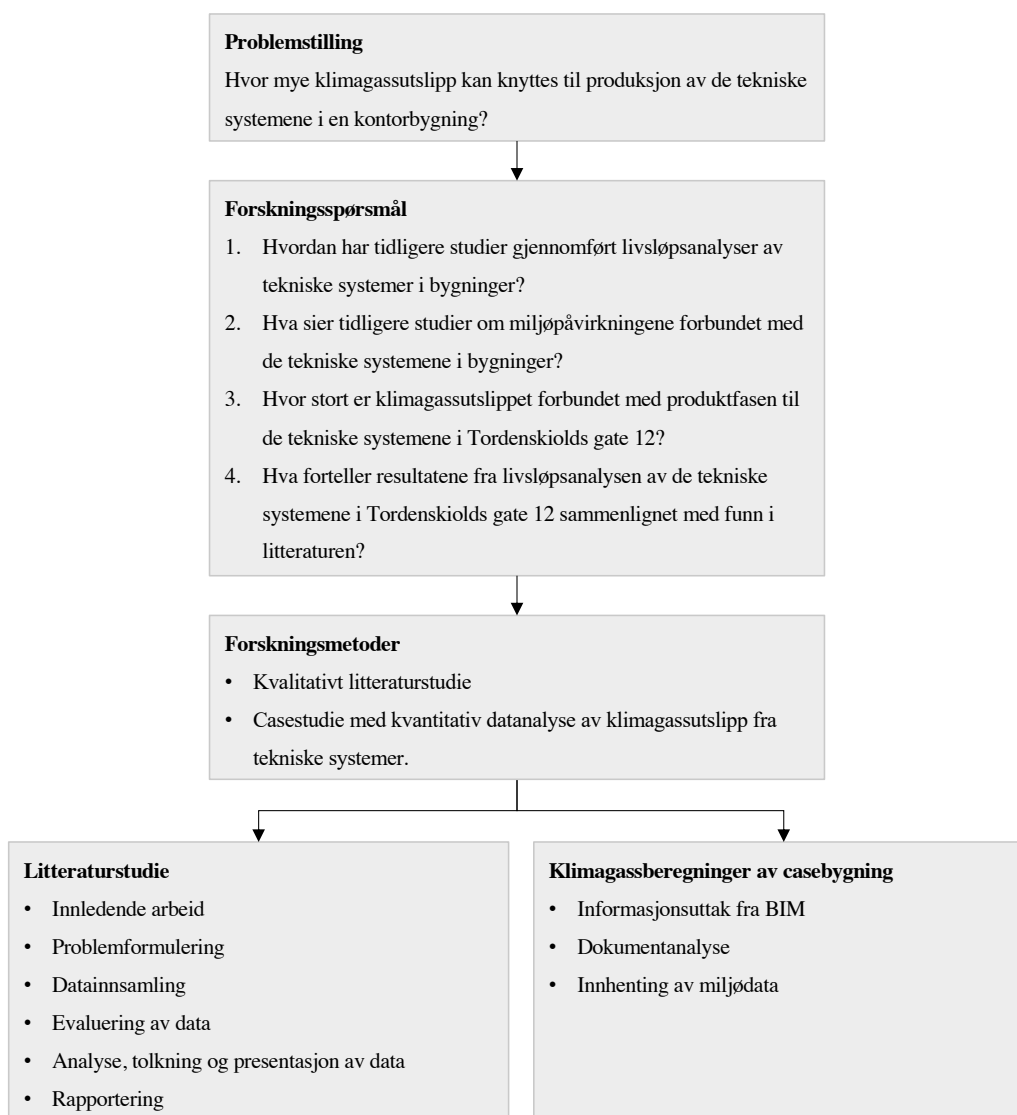
Dette kapitlet gir en presentasjon av forskningsdesignet og metodene som er benyttet i oppgaven. Det omfatter en beskrivelse av litteraturstudien, som utgjør den første delen av forskningsarbeidet. Videre følger en detaljert redegjørelse av de anvendte metodene for beregning av klimagassutslipp i sammenheng med casestudien, som utgjør den andre delen av forskningsarbeidet.

2.1 Forskningsdesign

Forskningsdesignet i denne oppgaven er basert på en “mixed method research”, som kombinerer elementer fra både kvalitativ og kvantitativ forskning (Schoonenboom og Johnson, 2017). Kvalitativ forskning konsentrerer seg om å tolke menneskelig erfaring, og benytter ulike metoder for innsamling, bearbeiding og analyse av data (Hovland *et al.*, 2009). Dataen kan for eksempel komme fra samtale, observasjon eller produsert tekst. Kvantitativ forskning benytter statistiske metoder for å tallfeste og deretter tolke data (Kaiser, 2015). Da presenteres dataen gjerne gjennom diagrammer, grafiske figurer, eller statistiske indikatorer som gjennomsnitt, variasjon og korrelasjon. Det er ulike formål med å blande disse to metodene, og ifølge Greene *et al.* (1989) har det minst én av følgende hensikter:

1. **Triangulering** → Å søke konvergens, bekreftelse, samsvar mellom resultater;
2. **Komplementaritet** → Å søke utdyping, forbedring, klarhet;
3. **Utvikling** → Å bruke resultater fra én metode til å informere eller utvikle en annen metode;
4. **Initiering** → Å søke oppdagelse av paradokser, motsetninger og nye perspektiver;
5. **Ekspanisjon** → Å utvide bredden og omfanget av forskningen.

Målet med det valgte forskningsdesignet er å utvide bredden på oppgaven og søke andre perspektiver innenfor forskningsområdet gjennom en kvalitativ litteraturstudie. Videre er det interessant å undersøke samsvar mellom resultater gjennom å sammenligne funn i litteraturen med funn fra casestudien. FS1 og FS2 besvares ved hjelp av litteraturstudien, mens FS3 og besvares ved hjelp av kvantitative data fra casestudien. Dataanalysen i casestudien gir kvantifiserbare resultater, og det er dette som utgjør den kvantitative forskningsmetoden i oppgaven. FS4 besvares ved å kombinere resultater fra litteraturstudien og casestudien. Samlet utgjør dette forskningsdesignet for oppgaven, som vist i Figur 2. I tillegg til dette, er det inkludert et kapittel som tar for seg det teoretiske rammeverket for forskningsområdet. Det bygger på en litteraturstudie av *grå litteratur*.



Figur 2: Forskningsdesignet for oppgaven.

2.2 Gjenbruk fra prosjektoppgaven

I forbindelse med emnet *TBM4500 - Bygg- og miljøteknikk, fordypningsprosjekt*, ble det høsten 2022 gjennomført et prosjektarbeid som skulle utgjøre en fordypning i et spesifikt tema. Fordypningen omhandlet bruk av miljødeklarasjoner i forbindelse med klima- og miljøriktige materialvalg. Denne masteroppgaven tar for seg noe av den samme tematikken. Prosjektoppgaven utgjorde med det et kunnskapsgrunnlag, og noe materiell var relevant å gjenbruke. Teksten i kapittel 3 *Teoretisk rammeverk* inneholder gjenbruk. Konkret omfatter det følgende delkapitler:

- 3.5 Valg av miljødata
- 3.6 Beregning av miljøindikatorer

Informasjonen er funnet gjennom litteraturstudie, hvorav litteraturen går under begrepet *grå litteratur*. Det omfatter norske, europeiske og internasjonale standarder. Grå litteratur er gjerne publisert av offentlige organer, forskere og industri, men er ikke kontrollert av kommersielle utgivere (Nekolaichuk, 2023). Det kan være nyttig for å unngå forutinntatthet, bidra til å gjøre studien grundigere og oppdage kilder som ikke dukker opp ved søk i databaser. I dette tilfelle er de valgte informasjonskildene både retningsgivende og veiledende dokumenter for livsløpsanalyser, og anses som valide.

2.3 Litteraturstudie

Litteraturstudie er en forskningsmetode som kan beskrives som en mer eller mindre systematisk måte å samle inn, vurdere og framstille tidligere forskning på (Tranfield *et al.*, 2003). Ved å ta ulike perspektiver og empiriske funn i betraktning, gir det grunnlag for å adressere forsknings spørsmål og videreutvikle eksisterende kunnskapen innenfor et fagfelt (Snyder, 2019), i tillegg til at det er med på å forhindre at studenter og andre med forskningsinteresser gjentar tidligere arbeid (Danson og Arshad, 2015). En litteraturstudie kan utføres på forskjellige måter, avhengige av hva som er målet med den. Danson og Arshad (2015) beskriver tradisjonell og systematisk litteraturstudie som de to vanligste metodene. En tradisjonell litteraturstudie er nyttig for å identifisere kunnskapsgap, mens en systematisk litteraturstudie konsentrerer seg om å legge fram eksisterende forskning. Snyder (2019) presiserer imidlertid at elementer fra ulike metoder ofte kombineres.

2.3.1 Innledende arbeid

Det første steget i litteraturstudien var å lese litteratur foreslått av oppdragsgiver, og ta utgangspunkt i den for å finne annen relatert forskning. Den anbefalte litteraturen omfattet tre studier som tar for seg livsløpsanalyser av klimakontrollsystemer og elektriske systemer. Dette bidro til å øke kunnskapsgrunnet innenfor forskningsområdet og belyse nye problemstillinger. Neste steg i prosessen, var å bruke metoden “snowballing” for å finne mer forskning på området. “Backward snowballing” innebærer å bruke referanselisten i litteraturen til å identifisere eldre informasjonskilder, mens “forward snowballing” avdekker nyere litteratur ved å se på siteringer av studiene (Badampudi *et al.*, 2015). Litteratur som ble vurdert som interessante var i hovedsak casestudier som tar for seg livsløpsanalyser av tekniske systemer i bygninger generelt, men kontorbygg ble betraktet som mest relevant. Disse ble identifisert ved å lese titler og eventuelt sammendrag. Videre ble det fastsatt et krav om at studiene måtte være fagfellevurdert for å bli inkludert videre. Det ble kontrollert ved å søke etter artiklene i Scopus eller Web of Science, som er en databaser for fagfellevurderte tidsskrifter, konferanseavhandlinger og bøker (Elsevier, 2023; Web of Science Group, 2019). Tabell 1 gir en oversikt over artiklene som ble funnet ved hjelp av “snowballing”, og som enten ble brukt til videre iterering, eller inkludert i oppgaven.

| “Snowballing” | Litteraturfunn |
|--------------------------------|----------------------------------|
| (Borg, 2016) | (Kiamili <i>et al.</i> , 2020) |
| (Kiamili <i>et al.</i> , 2020) | (Passer <i>et al.</i> , 2012) |
| | (Ylmén <i>et al.</i> , 2019) |
| | (Nutter og Tan, 2011) |
| (Nutter og Tan, 2011) | (Rodriguez <i>et al.</i> , 2020) |

Tabell 1: Litteratur funnet ved hjelp av “snowballing”.

2.3.2 Systematisk tilnærming

I neste steg av litteraturstudien ble det brukt en mer systematisk tilnærming. Dette for å identifisere flere relevante studier. Prosedyren tar utgangspunkt i en arbeidsflyt beskrevet av Randolph (2009): (1) Problemformulering (2) Datainnsamling (3) Evaluering av data (4) Analyse og tolkning (5) Presentasjon av data.

2.3.3 Problemformulering

Tematikken og problemstillingen i denne oppgaven er basert på empiri fra oppdragsgiver. Det innebærer en oppfatning om at det er lite kunnskap og erfaring knyttet til klimagassberegninger av tekniske bygningssystemer, og at dette vil være nyttig, spesielt i forbindelse med rehabilitering av kontorbygg. Både problemstilling og forskningsspørsmål springer ut fra dette. De to første forskningsspørsmålene danner grunnlaget for litteraturstudien og fungerer som et referansepunkt gjennom hele arbeidsflyten:

- FS1: Hvordan har tidligere studier gjennomført livsløpsanalyser av tekniske systemer i bygninger?
- FS2: Hva sier tidligere studier om miljøpåvirkningene forbundet med de tekniske systemene i bygninger?

2.3.4 Datainnsamling

Neste steg i arbeidsprosessen er innsamling av data, som skjer ved hjelp av databasesøk. Ifølge Randolph (2009) er målet med databasesøk å hente ut en representativ, semi-fullstendig eller fullstendig samling av relevant litteratur. Som nevnt, var hensikten med denne litteraturstudien å se på et representativt utvalg studier som tar for seg livsløpsanalyser av tekniske systemer i bygninger, der kontorbygg var av spesielt stor interesse. Det ble foretatt søk i databasene Scopus og Web of

Science. Filtreeringsverktøyet til databasene ble brukt for ytterligere avgrensing av søketreffene. I Scopus ble søkene avgrenset til å gi treff innen tittel, abstrakt og nøkkelord, mens Web of Science ga treff i tittel, abstrakt og tema. Vide søk kan potensielt gi et stort og uhandterlig antall treff, mens snevre søk kan på den andre siden bli for avgrensende, og relevant litteratur kan gå tapt. Tabell 2 viser kriteriene for inkluderte og ekskluderte artikler.

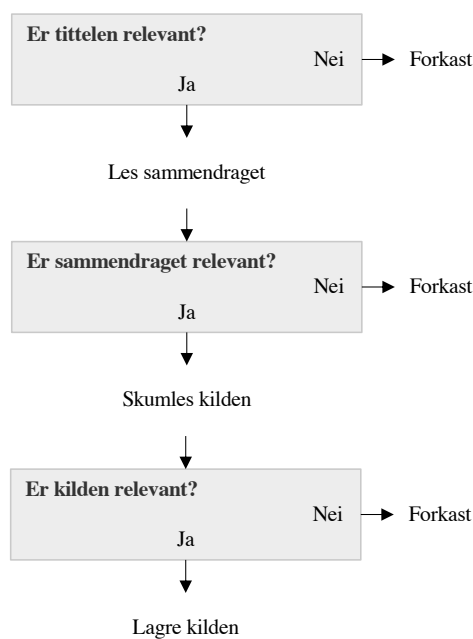
| Vurdert litteratur | Ekskludert litteratur |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Publisert fra og med 2013 • Skrevet på norsk eller engelsk • Empiriske studier | <ul style="list-style-type: none"> • Publisert før 2013 • Skrevet på andre språk enn norsk og engelsk • Begrenset tilgang • Bak betalingsmur • Fagområder som medisin, økonomi, økonometri og finans, fysikk og astronomi, geovitenskap, biologi og landbruksvitenskap |

Tabell 2: Kriterier for artikler som ble vurdert og ekskludert.

I henhold til forskningsspørsmålene, var det i litteratursøket et mål om å treffe studier som inneholdt temaene *livsløpsanalyse*, *tekniske systemer* og *bygninger*. Med dette som utgangspunkt, ble det satt sammen søkestrenger med ulike kombinasjoner av ord, i tillegg til å ta hensyn til synonymer som “**LCA**”, “**Life cycle assessment**” og “**Life cycle analysis**”. Videre ble det brukt boolske operatører: **AND** binder søkestrenger sammen, mens **OR** sørger for å gi treff i synonymer. Asterisksymbolet (*) er også nyttig for å inkludere treff i både entall og flertall, slik som “**technical system***”. Nye søkestrenger ble formulert basert på tematikker og begreper beskrevet i noe av den leste litteraturen. Søkestrenger og tilhørende treff i databasene vises i tabell 3. Etter at duplikater var fjernet, ble kildene gjennomgått ved å lese titler. Kildene som videre kategoriseres som *vurderte* har gjennomgått den trinnvise prosedyren vist i Figur 3.

| Database | Søkestreng | Treff | Vurderte |
|----------------|---|-------|----------|
| Scopus | “LCA” OR “life cycle assessment” OR “life cycle analysis” | 36 | 6 |
| Web of Science | AND “technical system*” | 26 | 1 |
| Scopus | “LCA” OR “life cycle assessment” OR “life cycle analysis” | 12 | - |
| Web of Science | AND “technical system*” AND “building*” | 9 | - |
| Scopus | “LCA” OR “life cycle assessment” OR “life cycle analysis” | 4 | 3 |
| Web of Science | AND “technical installation*” | 4 | 1 |
| Scopus | “LCA” OR “life cycle assessment” OR “life cycle analysis” | 15 | 8 |
| Web of Science | AND “office building*” AND “retrofitting*” | 10 | 2 |

Tabell 3: Resultatet fra litteratursøket.



Figur 3: Prosedyre for vurderte artikler.

2.3.5 Evaluering av data

På bakgrunn av det innledende arbeidet og den mer systematiske tilnærmingen til litteraturstudien ble et utvalg artikler validert ved hjelp av TONE-prinsippet, beskrevet av Overland (2018):

- **Troverdighet** → **Er kilden sikker?**
 - Vurdere forfatter, avsender, domenenavn
- **Objektivitet** → **Er kilden nøytral?**
 - Vurdere innholdet, forfatterens hensikter og nøytralitet
- **Nøyaktighet** → **Er kilden detaljert og presis?**
 - Vurdere skrivefeil, kildereferering, siste oppdatering
- **Egnethet** → **Er kilden egnet til denne oppgaven?**
 - Vurdere kildens målgruppe og tilgjengelighet, eget formål

Herfra ble sju artikler tatt ut for videre informasjonsuthenting og analyse. Seks av sju artikler er funnet i vitenskapelige databaser. Den siste er en masteroppgave fra NTNU som også anses å være av relevans og valid i tråd med TONE-prinsippet. Videre er det målet med forskningen som bestemmer hva slags informasjon som skal trekkes ut fra litteraturen (Randolph, 2009). I denne oppgaven er FS1 og FS2 først styrende for hvilke artikler som er aktuelle, og deretter styrende for hva slags informasjon som skal trekkes ut.

2.3.6 Analyse, tolkning og presentasjon av data

Strategien for analyse og tolkning av informasjon gikk ut på å kode interessante påstander og funn etter tema. De valgte temaene omfatter formålet med studien, valg av metode for LCA, kvalitative og kvantitative resultater, samt styrker og svakheter i studien. Samtlige artikler er skrevet på engelsk og med et akademisk språk, noe som stiller ekstra krav til leseren og tolkning av innholdet. Til å begynne med ble hver artikkel lest gjennom en nøytral linse for å få overblikk over informasjonen. Deretter begynte et mer målrettet arbeid med å hente informasjon som angikk de valgte temaene. Dette utgjorde en iterativ prosess, hvor interessante deler av teksten ble lest flere ganger, for å ikke gå glipp av eller feiltolke informasjon. Denne framgangsmåten gjorde det enklere å se likhetstrekk og forskjeller i studiene innenfor de respektive temaene. Ifølge Randolph (2009) øker det i tillegg forståelsen innenfor forskningsområdet.

Samtlige studier har oppnådd kvantifiserbare resultater gjennom beregninger av ulike miljøindikatorer. Disse dataene ble ansett som betydningsfulle, og det var viktig å tolke dem rett, og identifisere

parameterne som virket inn på verdiene. De kvantitative resultatene ble typisk presentert i tabeller og diagrammer, men de beskrivende tekstene av stor viktighet for å tolke og ekstrahere verdiene.

Kapittel 4 *Resultater fra litteraturstudien* er resultatet av den beskrevne arbeidsprosessen.

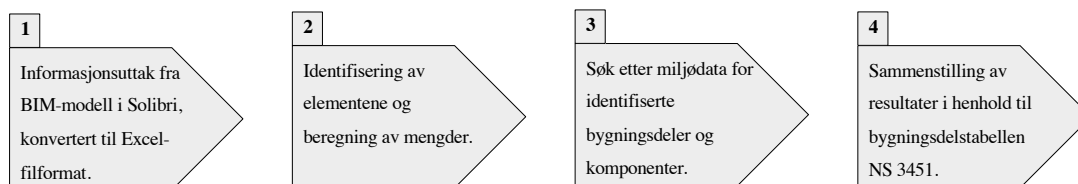
2.3.7 Styrker og svakheter med metoden

Det er gjort flere tiltak for å styrke reliabilitet og validitet i litteraturstudien. I litteratursøket ble det brukt to anerkjente databaser for fagfellevurdert litteratur. Videre sørget andre kriterier for at litteraturen var av ønsket kvalitet og med relevans opp mot tematikken og forskningsspørsmålene. Søk i flere databaser og bedre tilpassede søkestrenger kunne gitt et mer omfattende litteratursøk og på den måten redusert sjansen for å gå glipp av interessant litteratur. I samsvar med dette kan et mer omfattende litteratursøk potensielt identifisere flere og mer egnede studier, og på den måten utvide eller øke kvaliteten på resultatene. Det er også mulig at et større antall inkluderte studier ville gitt flere perspektiver og grunnlag for mer generalisering og sikkerhet i konklusjonene. Begrensingen i antall er likevel gjort bevisst, med den hensikt å foreta grundig gjennomgang av hver enkelt studie, og med hensyn til tidsbruk.

Videre bidro aktiv bruk av TONE-prinsippet til kvalitetssikring av kildene. Gjennom TONE-prinsippet vurderes blant annet hvorvidt forfattere er objektive i sin framstilling av informasjon. Et annet spørsmål er imidlertid om en selv er objektiv ved utvelgelse og evaluering av litteratur. “Confirmation bias” er et kjent fenomen innen forskning som går ut på at en (bevisst eller ubevisst) søker og tolker informasjon slik at det støtter eller bekrefter egne hypoteser (Foster og Jewell, 2017). Hvis det finnes litteratur som støtter ens egne hypoteser og oppfatninger er det fare for at litteratur velges på bakgrunn av det, framfor kvalitet. Dette kan oppfattes som en svakhet med litteraturstudie som metode generelt, og kan forsterkes ved at arbeidet er utført av én person.

2.4 Beregning av klimagassutslipp

Det er gjennomført en beregning av klimagassutslippet som kommer fra produksjon av materialer tilhører de tekniske systemene i et kontorbygg med oppvarmet bruksareal (BRA) på 12 450 m^2 . Systemgrensen er satt til å omfatte A1-A3 og “Global warming potential” (GWP) er valgt som indikator for miljøpåvirkning. Funksjonell enhet er kg CO₂-ekvivalenter per 1 m^2 oppvarmet BRA. Det er tatt utgangspunkt i BIM-modellen fra en reell rehabilitering av eiendommen, men det er ikke tatt hensyn til omfanget av rehabilitering som ble gjort da. Detaljer om materialene og komponentene som er inkludert i denne beregningen er beskrevet i de påfølgende kapitlene. Prosessen har vært stegvis, og avgrensninger og antagelser har blitt gjort etter hvert som nye problemstillinger har dukket opp. Prosessen er beskrevet i korte trekk i Figur 4, og resultatene fra arbeidet er presentert i kapittel 5 *Resultater fra casestudien*.



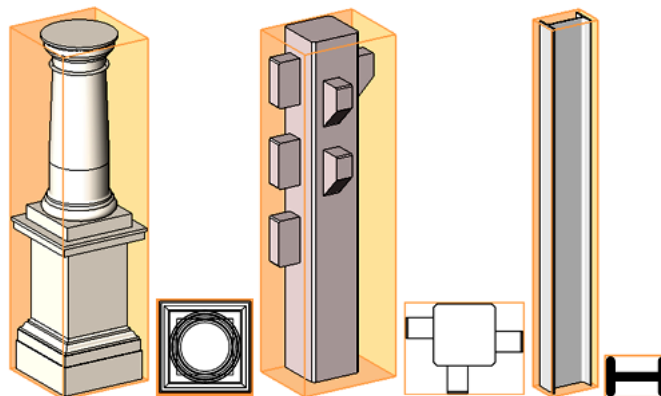
Figur 4: Arbeidsflyt for klimagassberegning.

2.4.1 Informasjonsuttak fra BIM-modell

En sammensatt BIM-modell av bygningen utgjør grunnlaget for materialuttaket. Det ble besluttet å begrense omfanget til *elementer* fra fagmodellene for klimakontroll, vann- og avløp og elektriske systemer. I resten av oppgaven er disse omtalt som VENT-modell, RIVr-modell og RIE-modell. Et element er den grafiske framstillingen av en bygningsdel, et bygningsmateriale eller en bygningskomponent i BIM-modell. Innenfor rammene av de tekniske systemene, kan et element variere fra en liten, materialhomogen bygningsdel som for eksempel et rørlokk, til en sammensatt komponent bestående av flere materialer, som for eksempel et aggregat. Hver fagmodell skal inneholde alle elementene som utgjør de respektive tekniske systemene.

Informasjonsuttaket ble gjort i BIM-programvaren Solibri, ved hjelp av “Information Takeoff”-funksjonen. Hva slags informasjon som var relevant for det videre arbeidet var avhengig av hvilken fagmodell elementet tilhørte. De forskjellige fagpersonene som har vært involvert i prosjekteringen av T12 har brukt ulike programvarer, så da fagmodellene ble konvertert og sammenstilt til et felles filformat, var informasjonen systematisert på forskjellige måter og med varierende kvalitet. Dette gjorde at det var enklest å jobbe med hver fagmodell for seg. Relevant informasjon ble konvert til Excel-filformat og behandlet videre der.

En generell utfordring med mengdeberegningen var at oppgitte dimensjoner for elementene ikke nødvendigvis gjenspeilet dimensjonene til den faktiske komponenten. I de fleste tilfeller var eneste oppgitte mål elementets “bounding box”. “Bounding box” kan forklares som den tredimensjonale kubens høyde, lengde og bredde er bestemt av elementets ytterpunkter, som illustrert i Figur 5.

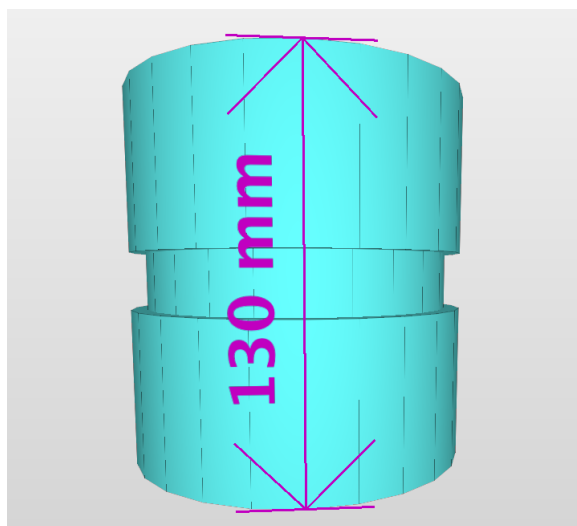


Figur 5: Illustrasjon av “bounding box” i BIM (Autodesk, 2023).

Det finnes et måleverktøy i Solibri som kan brukes til å finne ut andre mål på elementet enn “bounding box”. En usikkerhet som likevel forblir, er at den grafiske representasjonen til en komponent ikke nødvendigvis har de riktige geometriske egenskapene. Dette har å gjøre med BIM-modellens detaljeringsgrad, og kan variere fra element til element. På grunn av det store omfanget elementer og elementtyper, var det for tidkrevende å etterprøve dette for alle elementer. Det var i flere tilfeller heller ikke mulig å identifisere elementet som et produkt, og dermed vanskelig å anta produktets egenskaper. Siden det var et mål om å omfatte flest mulig elementer, medførte dette at kvantifiseringen av de tekniske systemene i noen tilfeller er basert på grove estimater og antagelser.

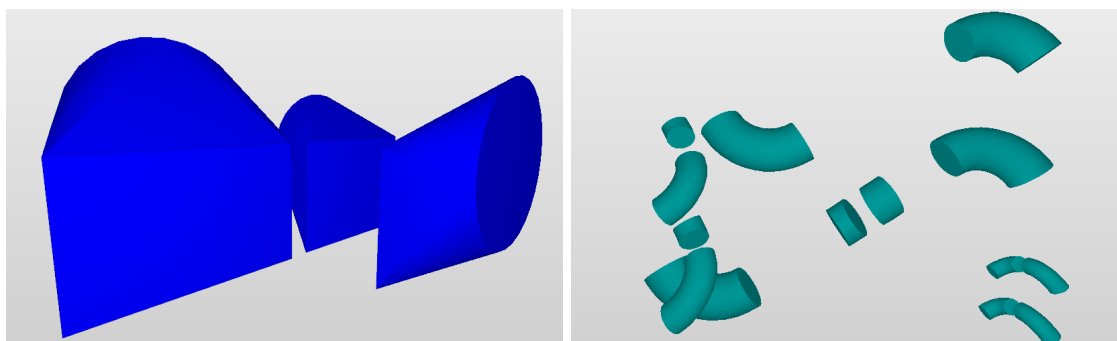
VENT- og RIVr-modellene inneholder store mengder rør og rørdeler av ulike materialer, dimensjoner og geometriske former. Det var mulig å identifisere materialtype på hovedparten av rørene, men produktnavn eller produsent var ikke oppgitt for noen av rørsystemene. Rørdeler, som muffe og nipler, var mer utfordrende, da det i mange tilfeller ble brukt generiske navn som “magi_pipe_cu_joint.001” eller “magi_pipe_fe_centric_90_NOR”. Her ble “cu” tolket som kobber og “fe” som jern i tråd med atomsymbolene for kobber og jern. En annen utfordring med rørelementene var at dimensjonene ikke var oppgitt i Solibri. Gjennom kontakt med prosjekteringsleder for rehabiliteringsprosjektet av T12, ble det gitt tilgang på originalfila for RIVr-modellen, som kunne åpnes i prosjekteringsprogrammet Revit. Da var det mulig å hente ut rørdimensjoner for sirkulære rør, herunder indre diameter, ytre diameter og lengde, og vekten av 18 000 lineære rørelementene fra vann- og avløpssystemet kunne beregnes.

Når det gjelder ventilasjonskanalene, vann- og avløpsrørene og de resterende kanal- og rørdelene i VENT- og RIVr-modell ble bruk av “bounding box” ansett som den beste løsning med hensyn til tidsbruk og oppnåelig nøyaktighet. Det var likevel tidkrevende, da Solibri ikke er konsekvent med valg av lengde-, bredde- og høyderetning. Figur 6 viser et eksempel på dette. Målt *lengde* på muffen er 130 mm, men ifølge gitt “bounding box” for elementet, er det *høyden* som er 130 mm. Alle rørkomponentene kunne derfor ikke adderes basert på gitt lengde. En kombinasjon av “bounding box”-målene, egne oppmålinger i modell og oppgitt volum ble brukt for finne noenlunde realistiske mengder, uten å forbruke uhensiktsmessig mange timer på arbeidet.



Figur 6: Eksempel på målt muffe.

Kanaldeler utgjør 5 618 elementer i VENT-modell, mens det er 15 284 rørdeler i RIVr-modell. Figur 7a og Figur 7b viser eksempler på det geometriske mangfoldet blant disse elementtypene.



(a) Kanaldeler fra ventilasjonssystemet.

(b) Rørdeler fra vann- og avløpssystemet.

Figur 7: Eksempler på kanal- og rørdeler fra VENT- og RIVr-modell.

2.4.2 Innhenting av miljødata

Med forutsetning om at et element var identifisert, ble det tatt i bruk ulike metoder for innhenting av miljødata. Et ikke-identifiserbart element inneholdt for lite eller uklar informasjon, og forenklet geometri i modell. I slike tilfeller ble det ansett som lite hensiktsmessig å inkludere elementet, da det knyttes for stor usikkerhet til komponentens funksjon og materialinnhold. Det var også enkelte elementer som ble ansett som uvesentlige og derfor neglisjerbare. Eksempler på det er et element med beskrivelsen “avsatt plass til kabelføring”. Når det gjelder de identifiserte elementene, var det i utgangspunktet mål om å finne flest mulige representative EPD-er i One Click LCA. Dersom det ikke ga resultater, ble det tatt i bruk andre metoder. Dette kan beskrives som en stegvis arbeidsflyt, der kvaliteten på resultatene er antatt å synke i takt med plasseringen på listen:

1. Funn av EPD for det faktiske produktet i One Click LCA.
2. Funn av EPD for det faktiske produktet, hentet fra nettsiden til produsenten.
3. Funn av EPD for lignende produkt i One Click LCA.
4. Funn av EPD for lignende produkt, hentet fra nettsiden til en produsent.
5. Funn av datablad med informasjon om materialsammensetning til det faktiske produktet, hentet fra produsenten sin nettside.
6. Funn av datablad med informasjon om materialsammensetning til et lignende produkt, hentet fra en nettsiden til en produsent.
7. Neglisjering av element.

EPD-ene opererer med begrepet “deklarert enhet”, som refererer til den enheten som produsenten eller leverandøren av produktet velger å erklære som grunnlaget for rapporten. I One Click LCA er det mulig å velge mellom et sett deklarete enheter, slik at miljødataen kan skaleres opp eller ned. Når det gjelder punktene 1-4, ble det valgt å koble miljødataen til vekten (kg) av det *faktiske* produktet, eller et lignende produkt. Dette ble vurdert til å være den beste måten å gjenspeile den reelle materialkvantiteten til bygningen. Vedrørende alternativ 5 og 6, inneholdt elementene i bestefall produktnavn eller produktnummer. Da var det ofte mulig å spore opp produktdata-blader, som inneholdt dimensjoner, vekt og materialsammensetning for produktet. Informasjonen var sjelden detaljert *nok*, og klimagassutslippet ble kun beregnet for hovedmaterialet eller hovedmaterialene. Mindre plastdeler, som gummipakninger, ble gjerne neglisjert. Utslippsfaktorene for materialene ble gitt av ekstern veileder og finnes sammen med annen miljødata i *Vedlegg B Mengde- og miljødata - VENT-modell*, *Vedlegg C Mengde- og miljødata - RIVr-modell* og *Vedlegg D Mengde- og miljødata - RIE-modell*. Siste alternativ, punkt 7, var å neglisjere elementet fra

vurderingen. Da ble grunnlaget for å gjøre antagelser om elementet ansett som for lite. En oversikt over elementer som ble ekskludert er lagt ved som *Vedlegg E Ekskluderte elementer*.

2.4.3 Dokumentanalyse

Dokumentanalyse er en velkjent og anvendt forskningsmetode innenfor ulike fagområder, inkludert miljøforskning og bærekraftig byggepraksis. I kontekst av casestudien, benyttes dokumentanalyse som en metode for å samle og tolke informasjon fra miljødeklarasjoner og produktdatablader.

En viktig kilde til miljødata for byggematerialer og -komponenter er “Environmental Product Declarations”, på norsk kalt miljødeklarasjoner (EPD-er). EPD-er er dokumenter som gir detaljert informasjon om miljøpåvirkningen fra et produkt gjennom hele eller deler av dets livssyklus. De gir data om utslipp av klimagasser, energiforbruk, ressursbruk og andre miljøindikatorer relatert til produksjon, transport, bruk og avhending av et produkt (International EPD® System, 2021). EPD-er er ofte basert på livsløpsanalyser og standardiserte metoder, og de gir en standardisert og sammenlignbar måte å kommunisere miljøinformasjon på. Ved å utføre en dokumentstudie av EPD-er kan relevante miljødata innhentes for å evaluere miljøpåvirkningen fra byggematerialer og -komponenter.

Produktdatablader ble benyttet som primærkilde for å innhente produktspesifikk informasjon om materialer og komponenter. Dette er dokumenter som ofte er utarbeidet og tilgjengeliggjort av produsenter og leverandører, og kan for eksempel inneholde informasjon om teknisk ytelse, materialsammensetning, vekt og geometri for byggeprodukter. Dokumentene kan også inneholde informasjon om ressursforbruk, utslipp, energieffektivitet og andre miljørelaterte parametere som er vesentlig for å evaluere miljøpåvirkningen av byggeproduktene. Generelt sett spiller innholdet i et produktdatablad en sentral rolle når brukere skal vurdere hvilke produkter som best tilfredsstiller deres krav og behov. Ved søk etter og bruk av produktdatablader ble det vurdert som mest hensiktsmessig å konsentrere seg om norske produsenter og leverandører, med mindre annet var beskrevet i modell. I tilfeller der det ikke ga tilstrekkelig informasjon, ble søket utvidet til å inkludere det nordiske markedet, etterfulgt av det europeiske og det globale markedet.

2.4.4 Styrker og svakheter ved metoden

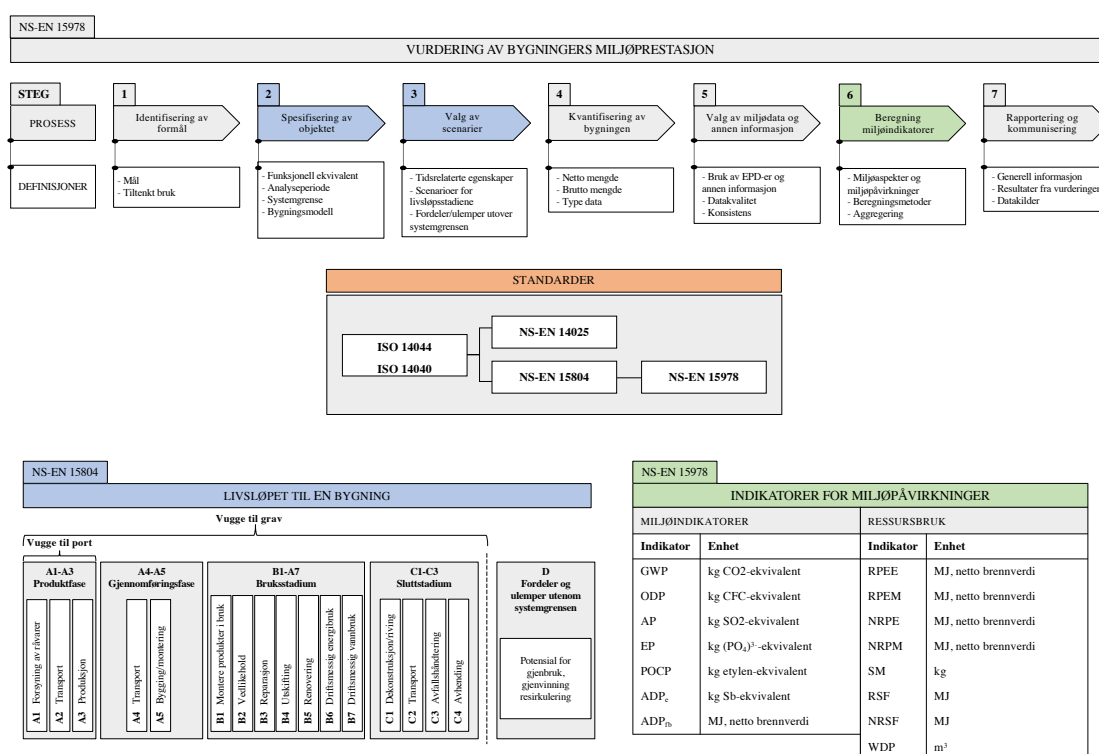
En viktig del av dokumentanalysen er å være kritisk til kildene og vurdere påliteligheten og validiteten av dataene som presenteres. Foruten om informasjonen som lå i modell, ble produktdatablader ansett som eneste kilde til produktspesifikk informasjon om de tekniske komponentene. Det viste seg likevel å være utfordrende å finne adekvat informasjon fra norske produsenter og leverandøren. Det ble anerkjent at aktører som ikke opererer på det norske markedet kunne gi mer utfyllende informasjon, noe som bidro til at færre bygningsmaterialer og -komponenter ble ekskludert fra analysen. Denne tilnærmingen medførte imidlertid utfordringer knyttet til språkbarrierer, og det var

nødvendig å benytte oversettelsesprogrammer og andre hjelpemidler for å tolke og evaluere informasjon. Dette gjaldt både for produktdatablader og EPD-er, og kan ha ført til tap av informasjon og feiltolkning i oversettelsesprosessen.

One Click LCA var hovedkilden til miljødata. Databasen inneholder kun EPD-er utviklet i henhold til enten den europeiske standarden EN 15804, og/eller de internasjonale standardene ISO 14025 og ISO 14040/14044. Andre EPD-er ble hentet på nettsidene til produsenter eller leverandører, med forbehold om at de var i tråd med minst én av de nevnte standardene. EPD-ene som finnes i One Click LCA er utviklet i land fra store deler av verden, og det er ikke krav om et universelt oppsett, innhold eller språk. Det var derfor vanskelig å tolke produktbeskrivelser for EPD-er som ikke var skrevet på engelsk eller et skandinavisk språk. I mange tilfeller var også informasjonen om produktets egenskaper, utover miljødata, svært begrenset og kunne heller ikke spores til et produktnummer eller en modellkode. Valg av representative EPD-er er derfor i mange tilfeller basert på bilder, oppgitt vekt per enhet, og i bestefall stikkord om produktets geometriske eller tekniske egenskaper.

3 Teoretisk rammeverk

Dette kapitlet har som mål å presentere et teoretisk rammeverk innenfor livsløpsanalyser av bygninger. Rammeverket tar sikte på å gi en helhetlig forståelse av prosessen og den grunnleggende terminologien, og er presentert som en figur med tilhørende forklarende tekst. Figur 8 viser en forminskert versjon, mens fullskala versjon er inkludert i *Vedlegg A Teoretisk rammeverk*. Figuren illustrerer et flytskjema som viser prosessen med å miljøvurdere bygninger. Den er basert på informasjon fra standarden NS-EN 15978. Hver fase i prosessen er nummerert, og fungerer som en referanse til de påfølgende delkapitlene. Det vil si at steg 1 forklares i kapittel 3.1 osv. I tillegg til å gi oversikt over og innsikt i emnet, vil det teoretiske rammeverket være relevant som bakgrunnsteori i diskusjonskapitlet.



Figur 8: Teoretisk rammeverk for miljøvurderinger av bygninger.

Delkapitlene gir grundigere forklaringer av stegene i arbeidsflyten og de andre elementene i figuren, men i korte trekk illustrerer Figur 8 følgende:

- **Vurdering av bygningers miljøprestasjon:** Nummerert flytskjema som beskriver stegene i miljøvurderinger av bygninger.
- **Standarder:** Viser relevante europeiske og internasjonale standarder og relasjonen mellom dem.

-
- **Livsløpet til en bygning:** Viser hvordan livsløpet til en bygning deles inn etter livsstadier. Modellen er spesielt relevant for steg 2 og 3, og forklares under tilhørende delkapitler.
 - **Indikatorer for miljøpåvirkninger:** Viser viktige indikatorene for miljøpåvirkninger. Modellen er mest relevant i steg 6, og forklares nøyere under tilhørende delkapittel.

3.1 Formål med vurderingen

Ifølge NS-EN 15978 er *formålet* med en livsløpsanalyse av en bygning definert som mål, omfang og tiltenkt bruk (Standard Norge, 2012a). *Målet* med vurderingen er å kvantifisere miljøprestasjon gjennom å samle miljøinformasjon for et objekt. Når formålet med vurderingen er avklart, må de påfølgende analysestegene tilpasses og samsvare med dette.

3.2 Spesifisering objektet

Objektet som vurderes er en bygning og kan beskrives med sine fysiske og tidsavhengige egenskaper. Bygningen kan betraktes som et system med ulike parametere. Parameterne kan variere, og vil med det påvirke systemets egenskaper. Eksempler på parametere er:

- Å inkludere/ekskludere fundamentering.
- Å inkludere/ekskludere uteområde.
- Å kun vurdere deler av bygningen.
- Å kun vurdere et spesifikt system i byggverket.
- Å begrense til visse livsløpsfaser.
- Å begrense til visse miljøindikatorer.

Begrepene funksjonell ekvivalent, referanseanalyseperiode, systemgrense og fysiske egenskaper er begreper som tilhører steg 2 i flytskjemaet. I livsløpsvurdering av en bygning er den funksjonelle ekvivalenten en minimumsbeskrivelse av de tekniske egenskapene og funksjonene som bygningen krever. Dette skal sørge for at det er mulig å sammenligne resultater fra livsløpsvurderinger en gjennomsiktig og objektiv måte.

Analyseperioden er bestemt av hvilke livsløpsfaser og informasjonsmoduler som er inkludert i vurderingen. En modell som viser livsløpet til en bygning er framstilt i figuren. Modellen er utviklet i henhold til standarden NS-EN 15804, som gir grunnleggende regler for hvordan EPD-er for byggeprodukter og -tjenester skal utledes, verifiseres og presenteres på en koordinert måte (Standard Norge, 2012b). I NS-EN 15978 gjøres den også gjeldende for hele bygningen. Livsløpet er delt

inn i faser eller stadier, som videre kan brytes ned til *informasjonsmoduler*. Informasjonsmodulene omfatter A1-A3, A4, A5, B1-B7 og C1-C3, og har som hensikt å sørge for at ressursbruk og utslipp tilordnes det tidspunktet i livsløpet hvor det oppstår. Det bidrar til å gjøre informasjonen konsistent og sammenlignbar. Produktfasen (A1-A3), gjennomføringsfasen (A4, A5), bruksstadium (B1-B7) og sluttstadium (C1-C3) utgjør en systemgrense, mens gjenbruk, resirkulering og energigjenvinning er definert utenfor systemgrensen, og skal tilordnes modul D. Figuren markerer også “vugge til port” og “vugge til grav”. Dette er begreper som anvendes for å definere omfanget av livsløpsanalyser, og er ofte benyttet innenfor studier av bygningers livssyklus (Pan *et al.*, 2018).

Bygningsmodell introduseres også som begrep. I kontekst av livsløpsanalyser, er formålet med en bygningsmodell og kvantifisere massen og energistrømmene i bygningen. I standarden foreslås det at bygningen skal deles inn etter bestanddeler (bygningdeler, bygningskomponenter, byggevarer, byggematerialer), relaterte prosesser (transport, konstruksjon, vedlikehold, reparasjon, utskifting, prosesser i sluttstadiet) og driftsmessig bruk (energi og vann). Dette skal gjøre kvantifiseringen enklere. Videre skal detaljeringsgraden samsvare med målet og omfanget for vurderingen, samt tilgangen på data.

3.3 Valg av scenarier

I dette steget av vurderingen, tilføres bygningens tidsrelaterte egenskaper, scenarier velges for de inkluderte livsløpsstadiene, og fordeler og ulemper utenfor systemgrensen tas i betraktning. Ifølge standarden bestemmes scenariene av følgende:

- **A1-A3:** Skal være definert i produktets EPD. Dersom produktet ikke har EPD, skal det defineres scenarier i tråd med NS-EN 15804.
- **A4, A5:** Transporten av produkter, materialer, tjenester og utstyr til og fra byggeplassen, montering av produkter på byggeplassen og montering av prefabrikkerte produkter utenfor byggeplassen.
- **B1-B7:** Nødvendig vedlikehold, reparasjon, rengjøring; Planlagt eller typisk hyppighet av renovering; Bruk av energi til oppvarming, kjøling, belysning, varmtvann; Driftsmessig bruk av vann.
- **C1-C4:** Riving og dekonstruksjon på byggeplass; Type transport brukt til avhending; Alle prosesser eller aktiviteter som er nødvendig for disponering.
- **D:** Netto miljømessige fordeler eller ulemper som følge av gjenbruk, resirkulering og energigjenvinning.

3.4 Kvantifisering av bygningen

NS-EN 15978 omtaler netto mengde og brutto mengde av bygningen. Mengden enheter av produkter, materialer, komponenter og elementer tilsvarer netto mengde. Brutto mengde tar i tillegg hensyn til faktorer som fører til svinn, som skade under transport, skade på stedet og planlagt svinn. Dersom utskiftinger og reparasjoner er medtatt i systemgrensen, medberegnes antall iterasjoner av dette i løpet av bygningens levetid.

Grad av tillit til resultatene av vurderingen avhenger av type data, og valg av datatype avhenger av vurderingens mål og omfang. I prosjektsammenheng vil dette avhenge av om vurderingen gjøres under skisseprosjekt, prosjektering, bygging eller drift. Tabell 4 viser eksempler på datatyper hentet fra NS-EN 15879 med beskrivelse.

| Type data | Beskrivelse |
|-------------------------------|---|
| Generiske data | Typiske data for konstruksjonen og materialene som er brukt. |
| Aggregerte data | Enten for bygningen som helhet ved bruk av for eksempel volum, høyde, gulvareal, energi, forbruk, vannforbruk, eller for hovedkomponentene (murstein, gips, gulv, vinduer, festeanordninger, overflater). |
| Midlere data | Midlere data hentet fra ulike leverandører eller produsenter for en type produkt. |
| Spesifikke data for produktet | Spesifisert og detaljert informasjon for produktene og komponentene som er brukt. |
| Målte data | Informasjon målt direkte for utstyr og tjenester som bygd og i drift (energi, vannbehov, avfall). |

Tabell 4: Forskjellige typer data.

3.5 Valg av miljødata

Miljødataen skal ta hensyn til de informasjonsmodulene som er inkludert i valgt systemgrense. Miljødata for bygningskomponenter og -materialer oppnås gjennom miljødeklarasjoner (EPD-er). Det er rapporter som oppsummerer miljøprofiler til komponenter, et produkter eller tjenester (EPD-Norge, 2015). EPD-er skal gi sammenlignbare miljøprofiler til bygningskomponenter eller ferdige produkter innenfor samme kategori, men fra ulike leverandører. En EPD inneholder som et minimum miljødata for produktfasen (A1-A3). Videre skal de være verifiserte, uavhengige, objektive, sammenlignbare, troverdige og adderbare. Det er ulike standarder som bidrar til å sikre tilstrekkelig datakvalitet. Rammeverket viser en strukturering av standardene i forhold til hver-

andre. De kan ha både overlappende og komplementære elementer. Videre følger likevel en kort beskrivelse av innholdet i hver standard:

- **ISO 14040** og **ISO 14044** er to internasjonale standarder som er tett knyttet til hverandre. ISO 14040 er den overordnede standarden som gir retningslinjer og prinsipper for utførelse av livssyklusanalyser (LCA) (Standard Norge, 2006b), mens ISO 14044 er en mer detaljert standard som spesifiserer metodene og kravene for gjennomføring av LCA (Standard Norge, 2006a).
- **ISO 14025** er en internasjonal standard som angir kravene til miljødeklarasjoner og gir retningslinjer for utvikling og bruk av dem. Den vektlegger informasjonsinnhold, kvalitetssikring og kommunikasjon av miljøpåstander for produkter og tjenester (Standard Norge, 2010).
- **NS-EN 15804** spesifiserer kravene til miljødeklarasjoner for byggevarer og byggverk. Den bygger på prinsippene og strukturen i ISO 14025, og tar hensyn til europeiske forhold og behov (Standard Norge, 2012b)
- **NS-EN 15978** gir mer spesifikke krav og veiledning for beregning av miljøpåvirkningen til bygninger basert på livsløpsanalyser. Denne standarden legger spesielt vekt på beregning av klimagassutslipp og energiytelse (Standard Norge, 2012a).

3.6 Beregning av miljøindikatorer

Rammeverket framstilt i Figur 8 viser indikatorer for *miljøpåvirkninger* gjennom bygningens levetid, og kan tallfestes med standardiserte enheter. I standarden er *ressursbruk* definert som en egen gruppe indikatorer som ligger utenfor begrepet miljøpåvirkning. I denne oppgaven er det for enkelhets skyld valgt å bruke termen miljøpåvirkning om alle indikatorer. Det finnes flere indikatorer enn de som er presentert, men NS-EN 15978 viser til at det finnes anerkjente beregningsmetoder for de utvalgte.

Mest vesentlig for denne oppgaven er indikatoren “Global Warming Potential” (GWP), på norsk globalt oppvarmingspotensial. Det er en indikator for de klimaendringene som et produkt eller en tjeneste påfører kloden. Enhetsstandarden for GWP er definert som kilogram CO₂-ekvivalenter (Kiamili *et al.*, 2020). I GWP inngår utslipp av klimagassene karbondioksid (CO₂), metan (CH₄) og lystgass (N₂O), hvorav karbondioksid utgjør den største andelen (Goedkoop *et al.*, 2013). GWP er altså en måleenhet eller indikator som brukes til å kvantifisere klimagassutslippet, og de to begrepene vil i denne oppgaven være gjensidig relaterte. NS-EN 15804 deler GWP inn i tre underkategorier, som til sammen utgjør GWP-total. Disse, og de andre indikatorene som er presentert i rammeverket, er gitt med beskrivelse i Tabell 5.

| Miljøindikatorer | Indikatorer for ressursbruk |
|--|--|
| GWP - fossil: Klimagassutslipp som stammer fra oksidasjon eller reduksjon av fossilt brensel, og materialer som inneholder fossilt karbon fra transformasjon eller nedbrytning. | RPEE: Bruk av fornybar primær energi unntatt energiresurser brukt som råmateriale |
| GWP - biogenic: All CO ₂ som fjernes fra biomasse, unntatt for urskog. Inkluderer overført karbon, som er bundet i levende biomasse, til produksystemet. | RPEM: Bruk av fornybare primære energiresurser brukt som råmateriale |
| GWP - land use and land use change: Utslipp og reduksjon av klimagasser som stammer fra endringer i definerte karbonlagre, forårsaket av arealbruk og endringer i arealbruk. | NRPE: Bruk av ikke-fornybar primær energi unntatt energiresurser brukt som råmateriale. |
| ODP: Uttømmingspotensial for stratosfærisk ozonlag. | SM: Bruk av sekundært materiale. |
| AP: Forsuringspotensial for land og vann. | RSF: Bruk av fornybart sekundært brensel |
| EP: Eutrofieringspotensial. | NRSF: Bruk av ikke-fornybart sekundært brensel |
| POCP: Dannelsespotensial for troposfærisk ozon-fotokjemiske oksidasjonsmidler. | WDP: Netto bruk av ferskvann. |
| ADP - elementer: Potensial for uttømming av abiotiske ressurser knyttet til elementer. | |
| ADP - fossile brensler: Potensial for uttømming av abiotiske ressurser knyttet til fossile brensler. | |

Tabell 5: Indikatorer for miljøpåvirkninger med beskrivelse.

3.7 Rapportering og kommunisering

NS-EN 15978 beskriver informasjonen som skal være med i rapporteringen av resultatene fra miljøvurderinger av bygninger. Det er i all hovedsak en oppsummering av de forskjellige aspektene som er beskrevet tidligere i dette kapitlet. Videre følger en liste med de punktene som anses som mest relevante i denne oppgaven:

- **Generell informasjon:** Formål, bygningstype, vurderingsmetode, påkrevd levetid og referanseanalyseperiode.
- **Grenser og scenarier:** Redegjørelse av valgte grenser og scenarier i henhold til kapittel 3.3 *Valg av scenarier*.
- **Datakilder:** Datakilder, datatyper og kvalitet.
- **Indikatorer:** Oversikt over vurderte miljøindikatorer og begrunnelse for utelatte indikatorer.
- **Verifikasjon:** Det skal være konsistens mellom vurderingens formål og de valgte systemgrensene og scenariene. Dataen brukt for byggeproduktene skal være sporbar. Fullstendigheten av kvantifiseringen av bygningen skal være begrunnet.

4 Resultater fra litteraturstudien

Dette kapittelet viser resultater fra litteraturstudien, og har som mål å legge fram eksisterende forskning på klimagassutslipp fra tekniske systemer i bygninger. Det inkluderer valgte systemgrenser og metoder, resultater fra beregninger, samt viktige funn og svakheter i studiene. Det er tatt utgangspunkt i syv vitenskapelige artikler. Felles for de utvalgte artiklene er at de tar for seg livsløpsanalyser av én eller flere tekniske systemer: klimakontrollsystem, vann- og avløpssystem og elektrisk system. “Klimakontrollsystem” er en norsk oversettelse av det engelske begrepet “HVAC system” (Heat, Ventilation, and Air Conditioning).

4.1 Beskrivelse av studiene

Forskerne har forskjellige tilnærminger og intensjoner med sin forskning. Videre presenteres et kortfattet sammendrag av hver studie, sortert fra nyest til eldst.

1. Rabani *et al.* (2021) tok utgangspunkt i et typisk norsk kontorbygg fra 1980-tallet, og utførte livsløpsanalyser som inkluderte klimagassutslipp fra produksjon av komponenter og materialer og for bygget i drift. Analysen inkluderte fire ombyggingsscenarioer, som ble utviklet slik at de kvalifiserte til passivhus i tråd med NS 3701. Scenariene ble sammenlignet for å se hvilke utslippskutt de gir for referansebygningen. Hovedmålet med studien var å identifisere miljøpåvirkningene assosiert med ettermontering av materialer og komponenter i forbindelse med ombygging. Videre ble det undersøkt designløsninger som skulle bidra til å oppnå nullutslippbygg. Resultatene viser at netto utslipp kunne reduseres med opp til 52% med de valgte scenariene, sammenlignet med referansebygningen. Produksjon av nye komponenter og materialer ga en økning på 18-24%, og hadde på det meste en CO₂-tilbakebetalingstid på 5 år.
2. Hoxha *et al.* (2021) utførte to livsløpsanalyser av et forskningsbygg: Én med en forenklet tilnærming og én med en detaljert tilnærming. Forskjellen på tilnærmingene var at den detaljerte analysen inkluderte bygningskomponenter som rør, kanaler, ledninger og andre komponenter som inngår i tekniske systemer. Hensikten med studien var å framheve feilmarginen mellom metodene, og gi en grundigere vurdering av miljøpåvirkningene til bygningen ved å inkludere alle komponenter. Resultatene viste at klimakontrollsystemet, vann- og avløpssystemet og det elektrisk systemet til sammen stod for 38% av mengden bundet karbon, som er definert som klimagassutslippet knyttet til A1-A4, B4 og C2-C4. Detaljert metode ga en økning på henholdsvis 29% GWP og 7,7% i ressursbruk sammenlignet med forenklet metode.
3. Rodriguez *et al.* (2020) hevder at det er utfordrende å oppnå netto null CO₂-utslipp for kontorbygg, da denne bygningstypen typisk gjennomgår gjentatte renoveringer gjennom dens

levetid. Studien ønsker å gi mer forståelse og etablere plausible resultater for karbonet som bindes som følge av rehabilitering av tekniske systemer og leietakertilpasninger. Det ble derfor utviklet 16 scenarier med ulike varianter av vvs-systemer og elektriske systemer. Ut fra resultatene stod tekniske systemer for 40-75 kg CO₂-eq/m², mens leiertakertilpasningene utgjorde 45-135 kg CO₂-eq/m². Ved gjentatte utskiftinger vil miljøpåkjeningene være betydelig større, og med det sammenlignbare med utslipp fra bæresystem og fasadesystem.

4. I studien til Kiamili *et al.* (2020) var målet å utføre en detaljert beregning av mengden bundet karbon i klimakontrollsystemet i Siemens sitt hovedkontor i Sveits, og med det fastsette hvor stor andel som bindes i ulike typer komponenter. Det var i tillegg et mål om å etablere en automatisk arbeidsflyt for LCA av ved hjelp av BIM. Ifølge resultatene stod klimakontrollsystemet for 183 kg CO₂-eq/m², og vil, sammenlignet med tidligere studier, utgjøre 15-36% av den totale mengden bundet karbon i kontorbygg.
5. Ylmén *et al.* (2019) gjennomførte en livsløpsanalyse av et kontorbygg i Sverige. Analysen omfattet hele livsløpet og alle bygningsdeler, og er gjennomført etter oppføring av bygget. Det benyttes stedsspesifikk informasjon hentet fra involverte entreprenører for å gi en realistisk framstilling av de *store* miljøpåvirkningene som kommer fra materialene og komponentene i bygningen. Noe av hensikten med denne måten å samle inn data på var å redusere risikoen for at viktige miljøfaktorer blir utelatt. Ut fra resultatene hadde klimakontrollsystemet en signifikant miljøpåvirkning for fire av fem indikatorer. Datagrunnlaget ble ansett som pålitelig, da det kommer fra aktører som var direkte involvert i prosjektet.
6. Borg (2016) utførte en livsløpsanalyse av det mekaniske klimakontrollsystem i et kontorbygg ved hjelp av to ulike tilnæringer: konvensjonell og dynamisk LCA. Hensikten med studien var å vurdere miljøpåvirkningene fra klimakontrollsystem, hvor robuste resultatene var mot forskjellige LCA-metoder og scenarier, i tillegg til å evaluere hva resultatene har å si for framtidige livsløpsanalyser av tekniske installasjoner. Resultatene viser at 22-33% av utslippet kommer fra energibruk i bygningen. Den dynamiske metoden ga 33% lavere utslipp, og gir blant annet et bedre bilde på hvor i livsløpet miljøpåvirkningene skjer.
7. Kaspersen *et al.* (2016) studerte sammenhengen mellom utslipp fra produksjon av tekniske installasjoner og bygningshøyde. Studien omfattet vugge-til-port-analyser av to bygninger i henholdsvis Trondheim og Minnesota: Et hotellbygg med 21 etasjer og et kombinert helse- og kontorbygg med fire etasjer. I forbindelse med økt urbanisering og behov for å bygge høyere, ønsket de i studien å undersøke om varierende bygningshøyde spiller en rolle for klimagassutslippet forbundet med vvs-komponenter og heisinstallasjon. Konklusjonen antyder at økningen i klimagassutslipp som følge av økt bygningshøyde er neglisjerbar for de tekniske systemene. Dette skyldes at endringen i utslipp per m² er minimal.

4.2 Detaljer og systemgrenser

Det påpekes at livsløpsanalyser av bygninger har stor variasjon i resultatene, og at det er utfordrende å sammenligne dem. Forskjellige systemgrenser, levetid og materialomfang er viktige årsaker til dette (Pan *et al.*, 2018), i tillegg til at designparametere som bygningstype, type materialer og geometri spiller en vesentlig rolle (Rabani *et al.*, 2021). Tabell 6 gir en oversikt over casestudiene, herunder bygningstyper og valgte systemgrenser i form av informasjonsmoduler og miljøindikatorer som er undersøkt. Størrelsen på bygningene er oppgitt i m^2 bruttoareal (BTA). Indikatorer som ikke er beskrevet i kapittel 3.6 *Beregning av miljøindikatorer* er HTP: potensielle helseeffektene av miljøpåvirkninger, MDP: potensiell uttømming av metallressurser og FDP: potensiell uttømming av fossile ressurser (Goedkoop *et al.*, 2013).

| Studie | Bygningstype | Informasjonsmoduler | Miljøindikatorer |
|----------------------------------|---|------------------------------|--------------------------|
| (Rabani <i>et al.</i> , 2021) | Kontorbygg 3 000 m^2 60 år | A1-A5 B4-B6 C1-C4 | GWP |
| (Hoxha <i>et al.</i> , 2021) | Forskningsbygg 5 412 m^2 50 år | A1-A5 B4, B6, B7 C2-C4 | GWP PED* |
| (Rodriguez <i>et al.</i> , 2020) | Kontorbygg 185-74 322 m^2 60 år | A1-A3 (A1-A5) | GWP |
| (Kiamili <i>et al.</i> , 2020) | Kontorbygg 32 000 m^2 60 år | A1-A3 B4, B6 C1-C3 | GWP |
| (Ylmén <i>et al.</i> , 2019) | Kontorbygg 50 år | A1-A5 B4, B6 C1-C4 | GWP, ODP POCP, AP, EP |
| (Borg, 2016) | Kontorbygg 19 000 m^2 60 år | A1-A5 B1-B4, B6 C1 | GWP, HTP MDP, FDP |
| (Kaspersen <i>et al.</i> , 2016) | Hotell (A), helse- og kontorbygg (B) | A1-A3 | GWP |

*PED: Primary Energy Demand (RPEE, RPEM og NRPE, se kap. 3.6).

Tabell 6: Detaljerer fra casestudiene.

Fem av de syv studiene har valgt en tilnærming hvor de tar for seg *hele* livsløpet til bygningen, det vil si en livsløpsanalyse som går fra “vugge til grav”. Studiene argumenterer for at det gir en helhetlig vurdering av miljøpåvirkningene, og at det på den måten bidrar til mer informerte beslutninger. Rodriguez *et al.* (2020) og Kaspersen *et al.* (2016) har hatt som hovedmål å undersøke bundet karbon fra produksjon, og har dermed avgrenset analysene til å omfatte “vugge til port”. Utilstrekkelig data la begrensninger for hvilke informasjonsmoduler som ble inkludert. Det nevnes imidlertid at energibruk i driftsfasen står for den største utslippsandelen, og bør derfor tas i betraktning i konklusjoner som gjelder miljøpåvirkninger fra tekniske systemer.

Når det gjelder valg av miljøindikatorer, har samtlige studier valgt å beregne GWP. Repeterende argumenter for å legge spesielt stor vekt på GWP i livsløpsanalyser er knyttet til global oppvarming, og et verdensomspennende mål om å redusere utslipp av klimagasser, som er en av hovedårsakene til den økende klimaproblematikken (Rabani *et al.*, 2021). Flere av studiene peker på byggeindustrien som en versting når det gjelder det totale klimagassutslippet i verden (Borg, 2016; Kaspersen *et al.*, 2016; Kiamili *et al.*, 2020; Rabani *et al.*, 2021; Rodriguez *et al.*, 2020).

Hoxha *et al.* (2021) og Ylmén *et al.* (2019) har beregnet miljøpåvirkninger ved hjelp av flere indikatorer. Ifølge Hoxha *et al.* (2021) finnes det få nylige studier som omhandler klimafotavtrykket fra forskningsbygg. De valgte derfor å gjøre en omfattende analyse av et forskningsbygg med levetid på femti år. Det inkluderte GWP, samt energi i drift, med mål om å reflektere økt effektivitet i energibruk for bygninger. Ylmén *et al.* (2019) understreker på sin side at det er viktig å vurdere flere ulike miljøpåvirkninger, da tiltak for å minimere for eksempel karbonutslipp kan ha negative effekter på andre miljøindikatorer. Studien bruker den europeiske standarden EN 15804 som utgangspunkt for valg av miljøindikatorer, og inkluderer alle indikatorene som omtales som obligatoriske. Enkelte informasjonsmoduler ble neglisjert, da prosjektet ikke hadde nok ressurser til å samle all nødvendig informasjon. Ifølge Borg (2016) er trenden at økende kompleksitet i tekniske installasjoner, sammen med mer bruk av fornybar energi, fører til redusert energibruk. Oppmerksomheten bør derfor flyttes til andre livsløpsstadier enn utslipp fra bygninger i drift, deriblant produksjon av tekniske komponenter. Borg (2016) har blant annet valgt å se på indikatoren “Metal Depletion Potential” (MDP). Denne indikatoren er et mål på bruken av metaller som ressurs, og er svært relevant for klimakontrollsystemer, som har høyt innhold av metaller.

4.3 Kvantifisering av bygningen og miljødata

En livsløpsanalyse av hele eller deler av en bygning krever informasjon om egenskapene til komponentene som skal vurderes. Det involverer mengder av det spesifikke materiale eller produkt, med tilhørende miljødata. Ifølge Pan *et al.* (2018) vil omfanget av inkluderte komponenter og materialer ha stor innflytelse på resultatene.

De undersøkte studiene har benyttet forskjellige metoder for å innhente nødvendig materialinfor-

masjon. Rabani *et al.* (2021) har i første omgang prosjektert et generisk norsk kontorbygg i henhold til byggeforskrift 1987, og brukt forskriften til å bestemme egenskapene og materialmengdene. Materialmengden fra klimakontrollsystemet var basert på gjennomsnittlig mengde ut fra gitte ytelseskriterier og gitt bygningsstørrelse. Miljødataen var også generisk og ble beregnet i One Click LCA. Ombyggingsscenarioene ble derimot beregnet for bestemte komponenter som ble tilført referansebygningen. Rodriguez *et al.* (2020) har i likhet prosjektert åtte hypotetiske kontorbygg i samarbeid med en gruppe rådgivere og lokale entreprenører som utga nødvendig informasjon om de tekniske systemene. Bygningene ble sortert i fire størrelseskategorier, da størrelse er en nøkkelvariabel for valg av tekniske systemer. Miljødataene for produktene og materialene kommer fra EPD-er funnet i offentlig tilgjengelige databaser: tyske Ökobaudat og Institut Bauen und Umwelt, franske PEP Ecopassport, amerikanske Underwriters Laboratories og The International EPD System. Det var de europeiske databasene som inneholdt flest EPD-er for tekniske systemer.

Hoxha *et al.* (2021), Kiamili *et al.* (2020), Ylmén *et al.* (2019), Borg (2016) og Kaspersen *et al.* (2016) har undersøkt eksisterende bygninger, og har derfor hatt tilgang på data fra prosjektene. Hoxha *et al.* (2021) studerte et forskningsbygg som ble bygget i 2019. Konkurrans- og prosjekteringsunderlag og fakturaer kunne brukes til å beregne materialmengder. I tillegg utga byggeleder informasjon om transportdistanser og bruk av elektrisitet og drivstoff. Med ønske om å gjøre analysen så omfattende som mulig, ble alle listede komponenter inkludert og brutt ned til materialnivå. Miljødataen er europeisk gjennomsnitt hentet fra Ecoinvent v.3.5, men i den grad det var mulig, ble dataen bearbeidet til å bli mer landsspesifikk. Ylmén *et al.* (2019) har i likhet samlet stedsspesifikk data med hensikt å minimere risikoen for at viktige miljøpåvirkninger utelukkes. Informasjon om komponenter og materialer kom fra entreprenører som var involvert i byggeprosjektet. Herunder mengder, tekniske spesifikasjoner, levetid og vedlikehold. Miljødata og eventuelle informasjonsgap ble dekket av EPD-er for de faktiske produktene eller lignende produkter, det svenske miljøverktøyet Byggvarubedömningen, sikkerhetsdatablader, produktdatablader og Ecoinvent v.3.2.

Kiamili *et al.* (2020) hadde tilgang på en BIM-modell av det ferdige kontorbygget. Informasjon om klimakontrollsystemet ble tatt ut av BIM-modellen og behandlet i tre steg. Første steg innebar å sortere elementene basert på geometri og grad av kompleksitet. Det utgjorde fire grupper av elementer: (1) rør og kanaler, (2) rørmuffer, (3) mekanisk utstyr og ventiler og (4) rør- og kanaltilbehør. Andre steg var å dele inn elementene i undergrupper, slik at for eksempel rør ble delt inne etter rektangulære og sirkulære tverrsnitt. Det tredje steget var å dele inn undergruppene ytterligere etter materialtype, slik at runde stålrør og runde kobberrør ble skilt fra hverandre. Det ble videre fulgt en arbeidsflyt som integrerer BIM-dataen og miljødata i programvaren Dynamo 2.0, som muliggjør visuelt programmeringsspråk (VPL). Beregning av materialmengder baserte seg på tre metoder. Den første metoden kombinerte BIM-data med vitenskapelige formler for å finne materialvekt. Den andre metoden kombinerte BIM-data og produktdatablader, mens den tredje metoden innebar å kartlegge BIM-elementene direkte til produktdatabladene. Da produktdatabla-

der i de fleste tilfeller inneholder vekt per produkt og ikke vekt per materiale, måtte det antas prosentandeler av ulike materialer i et element. Hvis ingen av de tre metodene fungerte, ble “rule of thumb estimations” anvendt. Det er ikke forklart ytterligere hva det innebærer. Sammen med miljødata hentet fra KBOB og Ecoinvent v.3.5, ble informasjonen sammenstilt og eksportert til en Excel-fil.

Borg (2016) brukte programvaren Revit til å gjøre materialuttak fra BIM-modell. Modellen ble utviklet i forbindelse med oppføringen av kontorbygget, og derfor ansett å være *ganske* nøyaktig. Miljøpåvirkning fra klimakontrollsystemet ble beregnet ved å supplere tidligere forskningsarbeid med flere EPD-er og produktdatablader for materialinnhold i komponentene. Kaspersen *et al.* (2016) undersøkte et hotellbygg og et kontorbygg. Materialmengdene fra de tekniske systemene ble tatt ut av BIM-modell og fra tekniske tegninger for de respektive byggene. GWP ble beregnet ved hjelp av programvaren Simapro eller hentet fra EPD-er.

4.4 Funn fra studiene

Valget av systemgrense har betydelig innvirkning på resultatene i en livsløpsanalyse (Pan *et al.*, 2018). Når det gjelder bygninger, spiller også omfanget av inkluderte komponenter og materialer en vesentlig rolle. En veileder for energibruk i bygninger, utviklet av Clark (2013), som Kiamili *et al.* (2020) refererer til, oppsummerer 28 casestudier som undersøker bundet karbon i kontorbygg. Bygningene varierer i størrelse og utforming, og ulike systemgrenser og omfang av materialer er tatt i betraktning. Resultatene av disse studiene viser beregnede utslipp som spenner fra 300 til 1 600 CO₂-ekvivalenter per kvadratmeter, og demonstrerer dermed variasjonsbredden i resultatene. Videre presenteres både kvalitative og kvantitative funn fra livsløpsanalysene i denne oppgaven. Det er beregnet GWP for tekniske systemer som er av størst interesse for videre analyse og sammenligning i denne oppgaven.

Av studiene som tar for seg miljøpåvirkningene fra “vugge til grav”, generelt enighet om at bruksstadiet, inkludert utskifting av komponenter (B4) og drift av bygget (B6), står for den største totale miljøpåvirkningen. Utskifting av komponenter utmerker seg som en prosess som genererer høyt utslipp. Rabani *et al.* (2021) fant at materialene i klimakontrollsystemet utgjorde 21% av den totale mengden GWP i referansebygningen, hvorav mesteparten kan spores til utskifting av komponenter (B4-B5). Ombyggingsscenariene reduserte klimagassutslippet i driftsfasen fra 77% i referansebygningen, til 4-8%. Materialene som ble tilført for å oppnå dette, hadde en CO₂-tilbakebetalingstid på *kun* 3,9-5,1 år. Det var imidlertid uten å endre type energiforsyning, som potensielt kunne gjort CO₂-tilbakebetalingstiden enda kortere. Hoxha *et al.* (2021) sine resultater viser at de tekniske systemene utgjør det største bidraget til GWP, her som en konsekvens av utslipp i produktfasen, samt komponentenes korte levetid og gjentatte utskiftninger. Totalt står forskningsbygget for 28,3 kg CO₂-eq/m² årlig. GWP for vvs-systemet og det elektriske systemet utgjør 2 kg CO₂-eq/m² årlig for produktfasen og 4,93 kg CO₂-eq/m² årlig for utskifting av komponenter. På grunn av

at bygningen driftes av fornybare energikilder er miljøpåvirkningene forbundet med driftsmessig energibruk (B6) betydelig lavere enn for resten av bygningsmassen i Østerrike. Det konkluderes likevel med at mengden bundet karbon gjør at bygningen ikke tilfredsstiller bærekraftsmålene for 2050. I Kiamili *et al.* (2020) sin studie stod klimagassutslippet fra klimakontrollsystemet for 183 kg CO₂-eq/m². Fordelt på de vurderte modulene per år har utskifting (B4) høyest utslipp med 1,70 CO₂-eq/m², etterfulgt av produktfasen med 1,32 CO₂-eq/m².

Rodriguez *et al.* (2020) har beregnet GWP for produkt- og gjennomføringsfasen (A1-A5) til tekniske systemer, men setter også søkelyset på utslipp i forbindelse med utskifting av komponenter gjennom byggets levetid. Beregningene viser at det tekniske systemene kan øke den totale mengden GWP i produktfasen med 30%. Videre ble det konkludert med at GWP varierte mellom 40 og 75 kg CO₂-eq/m² for de tekniske systemene. En vesentlig faktor som bidrar til variasjonen i resultatene, er de ulike scenariene for klimakontrollsystemet. Større oppvarmings- og kjølebehov gir større og mer materialkrevende komponenter som i seg selv har høy GWP. De må i tillegg kobles på rørsystemer med tilsvarende dimensjonskrav. Eksempler på slike komponenter er ventilasjonsaggregat, rørføringer i galvanisert metall, støpejernsrør for avløpsvann, og lysarmaturer. De tekniske systemene utgjør likevel en mindre andel enn bygningsdeler som bæresystem og fasadesystem. Gjennom en grov estimering av klimagassutslipp i forbindelse med utskifting, anses likevel miljøpåvirkningene fra tekniske systemer som mer betydelige.

Ylmén *et al.* (2019), som i sin studie vurderte flere miljøindikatorer, kom fram til at tekniske systemer utgjør 14-32% av miljøpåvirkningene for fire av fem indikatorer. Når det gjelder bygget i sin helhet er det drift (B6) som står for størst andel GWP, deretter kommer produksjonsfasen (A1-A3). Utskifting av komponenter (B4) i klimakontrollsystemet trekkes også fram som en av de mest relevante miljøpåvirkningene, både for GWP, AP og EP. Det skyldes hovedsakelig komponenter som inneholder rustfritt stål, aluminium, mineralull og kobber. Det påpekes imidlertid at det er vanskelig å estimere disse indikatorene med høy nøyaktighet, da de er svært avhengige av om det er brukt fossilt brensel i produktfasen. Borg (2016) beregnet at det undersøkte klimakontrollsystemet gir størst miljøpåkjening som følge av energibruk i drift (B6). Klimakontrollsystemet utgjør 22-33% av det totale energiforbruket til bygget i drift. Miljøpåvirkning fra energiforbruk er imidlertid veldig sensitiv for valg av primærenergikilder.

Til senere sammenligning, viser Tabell 7 beregnet GWP i produktfasen (A1-A3) for ulike tekniske systemer hentet fra de respektive studiene. Klimagassutslippet er målt i kg CO₂-ekvivalenter per m² oppvarmet areal, unntatt verdiene hentet fra Kaspersen *et al.* (2016), som er oppgitt i GWP per m² bruttogulvareal (BTA). “VA” er kort for “vann og avløp”, mens VVS står for “ventilasjon-, vann og sanitær”, og omfatter både klimakontrollsystemet og vann- og avløpssystemet. Tallene er enten hentet direkte i tallformat, eller omtrentlige verdier tolket fra grafer og figurer. Det er videre kun Kaspersen *et al.* (2016) som eksplisitt oppgir bruk av bygningsdelstabellen NS 3451 som referanse for inndelingen av de tekniske systemene. Selv om det ikke er spesifisert i de øvrige studiene, antas

det likevel at de benytter en tilsvarende inndeling basert på materialene og komponentene som er oppgitt.

| Studie | Klimakontroll | VA | VVS | Elektrisk | Teknisk |
|---|---------------|-----|-------|-----------|---------|
| (Rabani <i>et al.</i> , 2021) | 37 | | | | |
| (Kiamili <i>et al.</i> , 2020) | 79 | | | | |
| (Ylmén <i>et al.</i> , 2019) | 35 | | | | |
| (Borg, 2016) | 14-17 | | | | |
| (Kaspersen <i>et al.</i> , 2016) Case A | 12 | 13 | 25 | | |
| (Kaspersen <i>et al.</i> , 2016) Case B | 35-38 | 7-9 | 42-47 | | |
| (Hoxha <i>et al.</i> , 2021) | | | 63 | 38 | 100 |
| (Rodriguez <i>et al.</i> , 2020) | 28-60 | 6-8 | 35-66 | 4-16 | 40-75 |

Tabell 7: Beregnet GWP fra produksjon (A1-A3) av tekniske systemer hentet fra studiene.

4.5 Utfordringer og usikkerheter

Store mengder bygningsmaterialer og komponenter, varierende kvalitet på materialdata og mangel på miljødata trekkes fram som utfordringer i studiene, som skaper usikkerheter i resultatene. Hoxha *et al.* (2021) framhever viktigheten av at livsløpsanalyser av bygninger er omfattende nok:

If we aim for a truly low-impact building stock, we must ground our design proposals on highly detailed LCA studies, covering a comprehensive bill of materials and (almost) all life cycle stages.

Flere av studiene har likevel ekskludert flere bygningskomponenter. Rodriguez *et al.* (2020) har for eksempel ikke medtatt kjølemedier og VVS-armatur med tilbehør, og kommenterer at det kan gi betydelig utslag på resultatene. Kiamili *et al.* (2020) sin bruk av BIM sammen med VPL muliggjorde sporing av miljøpåvirkningene fra bygget i sanntid. Det løste også problemer med BIM-modeller hvor informasjon om bygningskomponenter ligger inne i modell og gjør modellen tung. Alle elementene i BIM-modellen ble inkludert, men når det gjaldt sammensatte elementer som bestod av mange materialtyper, var ikke den tilgjengelige informasjonen tilstrekkelig. I slike tilfeller ble kun hovedmaterialene, som typisk var stål og messing, tatt med i betraktning. Eksempler på dette inkluderer elektroniske kontrollenheter. Generelt var det stor variasjon i hvorvidt elementene inneholdt nok informasjon. For å beregne vekt av komplekse komponenter som varmepumper, var

de avhengige av at elementene var dimensjonert 1-1 i modellen, noe som ikke alltid var tilfellet. Det konkluderes med at modellen ikke hadde høy nok detaljeringsgrad til det som kreves i en detaljert livsløpsanalyse. Borg (2016) har på sin side neglisjert elektroniske kontrollenheter helt, og heller betraktet de som en del av det elektriske systemet, som ikke var en del av studieomfanget. I begge casestudiene utført av Kaspersen *et al.* (2016) ble varmepumper og -kjeler, samt ventiler og radiatorer ikke medberegnet på grunn av manglende data. I casestudie B, hvor det ble beregnet materialmengder ut fra tekniske tegninger, knyttet det usikkerhet til målinger og skaleringer av rør og kanaler.

Rabani *et al.* (2021) erfarer utfordringer med One Click LCA, og kaller bruken av verktøyet for en “black box approach”. I denne sammenhengen betyr det at brukeren ikke har innsikt i eller mulighet til å endre på parameterne som virker på talldataen som kommer ut. Rabani *et al.* (2021) knytter derfor stor usikkerhet til miljødataen hentet for klimakontrollsystemet. Det hevdes videre at det mangler data for mange produktspesifikke bygningsmaterialer og -komponenter (Kiamili *et al.*, 2020). Rodriguez *et al.* (2020) understreker at én EPD ikke reflekterer alle produkter av samme type, og at generaliserte databaser ikke reflekterer alle prosjektspesifikke produkter.

5 Resultater fra casestudien

I dette kapitlet presenteres casebygningen og resultatene fra klimagassberegningen for de tilhørende tekniske systemene. Resultatene er presentert etter BIM-fagmodellene, der VENT-modell representerer klimakontrollsystemet, RIVr-modell representerer vann- og avløpssystemet og RIE-modell representerer det elektriske systemet.

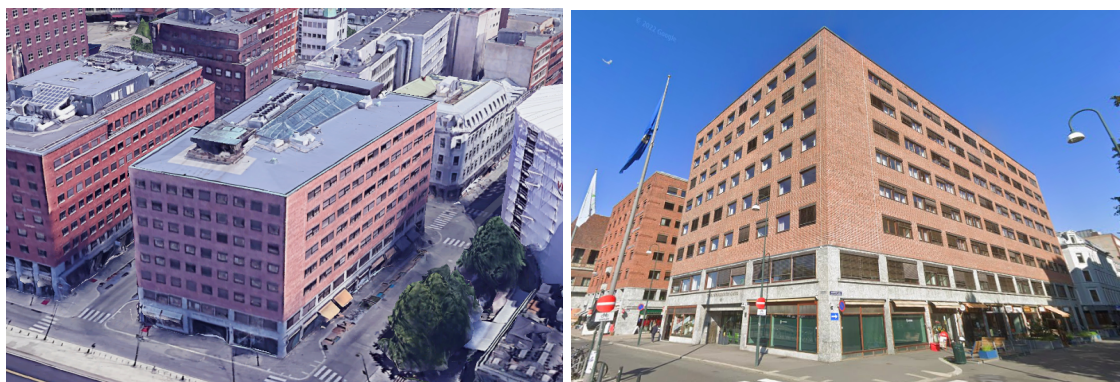
5.1 Presentasjon av case: Tordenskiolds gate 12

Tordenskiolds gate 12 ligger sentralt i Oslo sentrum og ble bygget i 1935-1937 for kontorformål. Det er et atriumsbygg med bruttoareal på 12 969 m^2 , fordelt på handels- og næringslokaler i første etasje og kontorfasiliteter i andre til åttende etasje. Det er i tillegg kjeller og en etasje for tekniske installasjoner på tak. I perioden våren 2021 til høsten 2022 ble bygningen rehabilitert med stor vekt på miljø og gjenbruk av bygningsdeler. Det innebærer sertifiseringen “Excellent” for “BREEAM In-Use”, samt gjenbruk av bærekonstruksjoner, fasader og vinduer, og utskifting til mer energigjerrige tekniske installasjoner. Tabell 8 viser detaljer om bygget, mens Figur 9a og Figur 9b viser hvordan bygningen ser ut utenfra.

Tordenskiolds gate 12

| | |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| Lokasjon: Oslo | BTA: 12 969 m^2 |
| Byggeår: 1935-1937 | Oppvarmet BRA: 12 450 m^2 |
| Sist renovert: 2021-2022 | Antall etasjer: Åtte + kjeller |
| Formål: Kontor og næring | |

Tabell 8: Informasjon om Tordenskiolds gate 12.

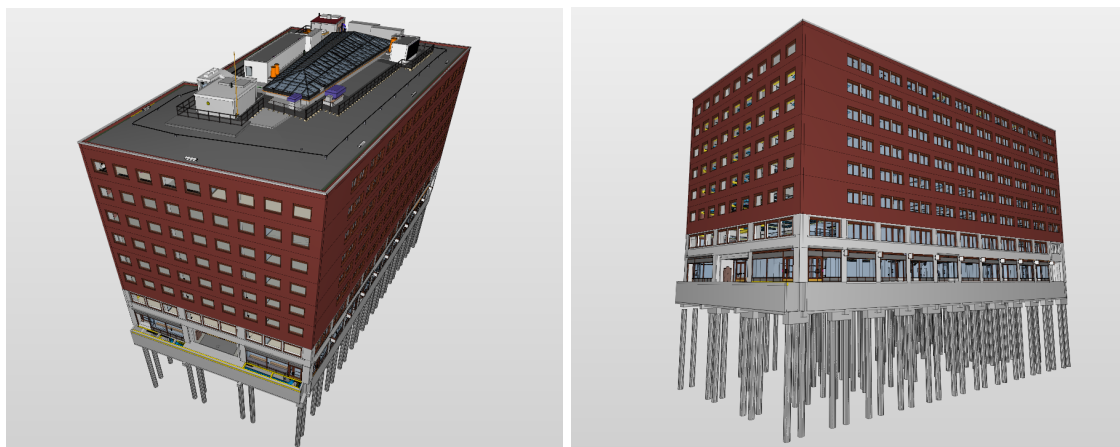


(a) Flyfoto hentet fra Google Earth.

(b) Bilde fra gateplan hentet fra Google Maps.

Figur 9: Bilder av Tordenskiolds gate 12.

Det er i forbindelse med rehabiliteringsprosjektet utviklet en BIM-modell. Den består av en sammenstilling av fagmodellene fra arkitekten og de rådgivende ingeniørene som var involvert i prosjektet: bæresystem, ventilasjonssystem, vann- og avløpsystem og elektrisk system. Figur 10a og Figur 10b viser framstillinger av modellen.



(a) Framstilling av sammenstilt modell.

(b) Framstilling av sammenstilt modell.

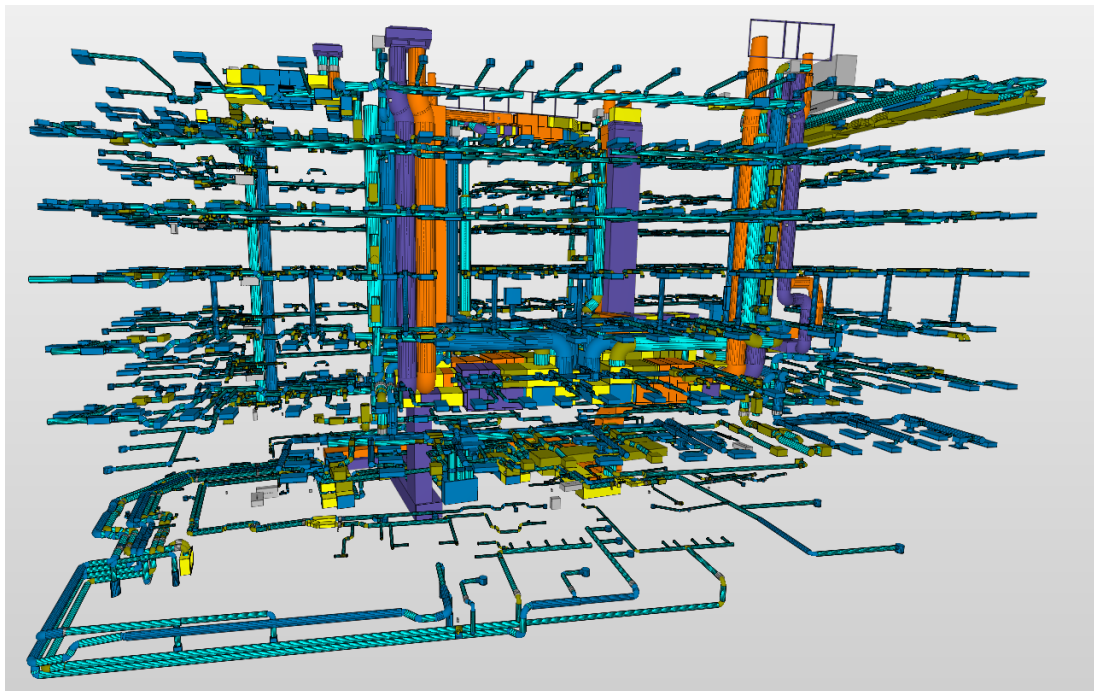
Figur 10: BIM-modell av Tordenskiolds gate 12

5.2 VENT-modell

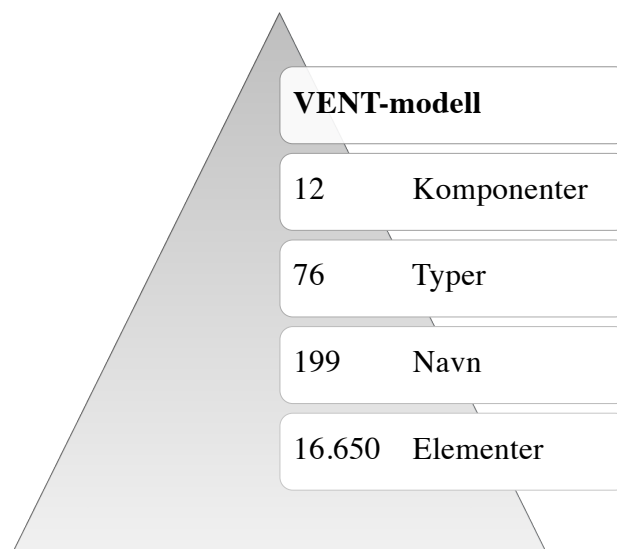
Fagmodellen for ventilasjon består av elementer som kan kategoriseres etter tabell 3 - VVS-installasjoner i henhold til NS 3451. Figur 11 viser en framstilling av modellen i Solibri. Videre viser Figur 12 hvordan modellen kan brytes ned fra komponentnivå til elementnivå. Totalt består modellen av 16 650 unike elementer, hvorav 16 282 ble identifisert og inkludert i analysen. Elementene ble identifisert basert på informasjonsuttak fra modellen. Informasjonen gitt for hvert element var ikke konsistent, men grovt sett ga de utvalgte attributtene følgende informasjon:

- **Komponent:** Samlebegrep for elementtypen.
- **Type:** Mer konkret beskrivelse av elementets egenskaper.
- **Navn:** Ofte produktnavn gitt av produsent.
- **Beskrivelse:** Eventuell tilleggsinformasjon om elementets egenskaper
- **Geometri:** “Bounding box” og oppmålinger gjort direkte i modell.

Elementene som ikke er medberegnet er vedlagt som *Vedlegg E Ekskluderte elementer*.



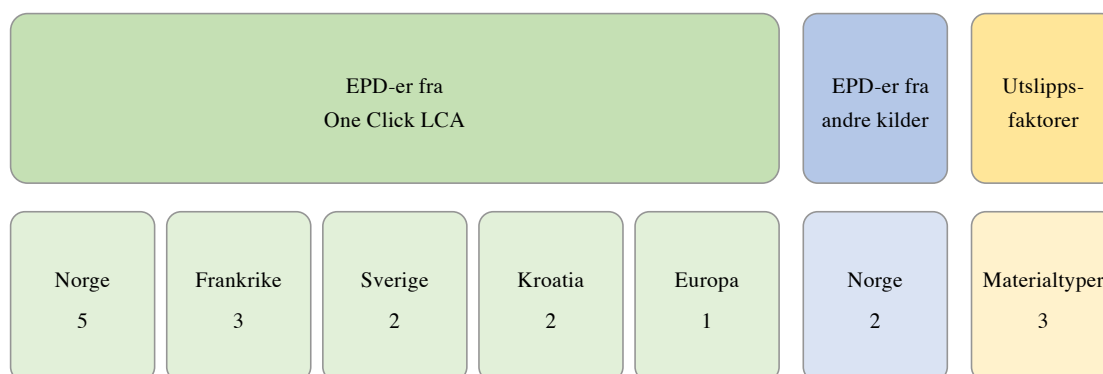
Figur 11: Framstilling av VENT-modell.



Figur 12: Kvantifisering av elementene i VENT-modell.

Figur 13 viser hvor miljødataen er hentet fra. Totalt ble det identifisert 15 *egnede* EPD-er, alle fra Europa. Elementene som i stedet ble brutt ned til materialnivå utgjorde tre materialtyper. *Vedlegg B Mengde- og miljødata - VENT-modell* viser en oversikt over hvilke EPD-er som gjorde seg gjeldende for hvilke elementer i modellen. Videre ble elementene og tilhørende GWP fordelt etter bygningsdelstabellen. Resultatene er framstilt i Tabell 9 og Figur 14. Tabell 9 viser GWP totalt og per m^2 oppvarmet BRA etter to- og tresifret systemkode. Som vist i tabellen, inngår alle elementene i systemkode 36 Luftbehandling. Figur 14 har derfor som hensikt å illustrere hvordan

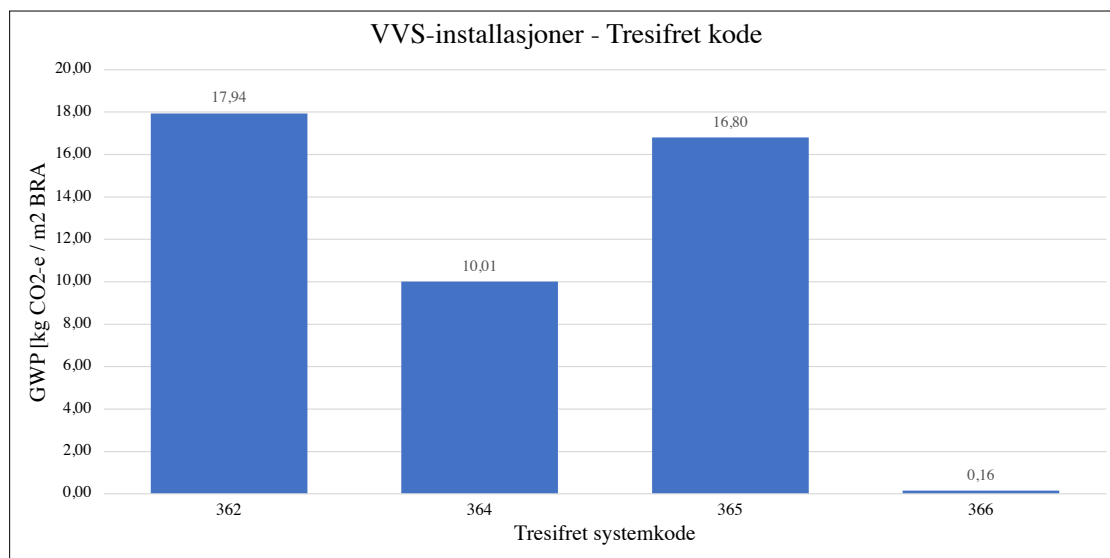
GWP per m^2 oppvarmet BRA fordeles på systemet for luftbehandling etter tresifret systemkode. Det totale utslippet er beregnet til å være 559 018 kg CO₂-e. Den største andelen kommer fra systemkode 362, som i denne modellen utelukkende består av ventilasjonskanaler og tilhørende komponenter i galvanisert stål. Omtrent 60% av utslippet som faller under systemkode 364 stammer fra kjølebjelker, etterfulgt av 17% som stammer fra lydempere. Når det gjelder systemkode 365, stammer 99% av utslippet fra ventilasjonsaggregater. Utslippet knyttet til systemkode 366 kommer fra isolasjonen av ventilasjonskanalene. Det utgjør et relativt stort volum, men utslippet er lite sammenlignet med andre komponenter. Metode Når det gjelder utelatte elementer, er de såkalte “isvannsmaskinene” som tilhører systemkode 365, omfattende og komplekse komponenter. Det er forventet at ekskluderingen av disse vil ha betydelig påvirkning på resultatene.



Figur 13: Kilder til miljøinformasjon for VENT-modell.

| Systemkode | | Navn | GWP [kg CO ₂ -e/m ²] | |
|------------|-----------|--|---|------------------------------|
| 3 | | VVS-installasjoner | Totalt | per m² BRA |
| | 36 | Luftbehandling | 559 018 | 44,90 |
| | 362 | Kanalnett for luftbehandling | 223 324 | 17,94 |
| | 364 | Utstyr for luftfordeling | 124 614 | 10,01 |
| | 365 | Utstyr for luftbehandling | 209 147 | 16,80 |
| | 366 | Isolasjon av installasjon for luftbehandling | 1 932 | 0,16 |

Tabell 9: GWP fra VENT-modell fordelt etter tabell 3 i NS 3451.



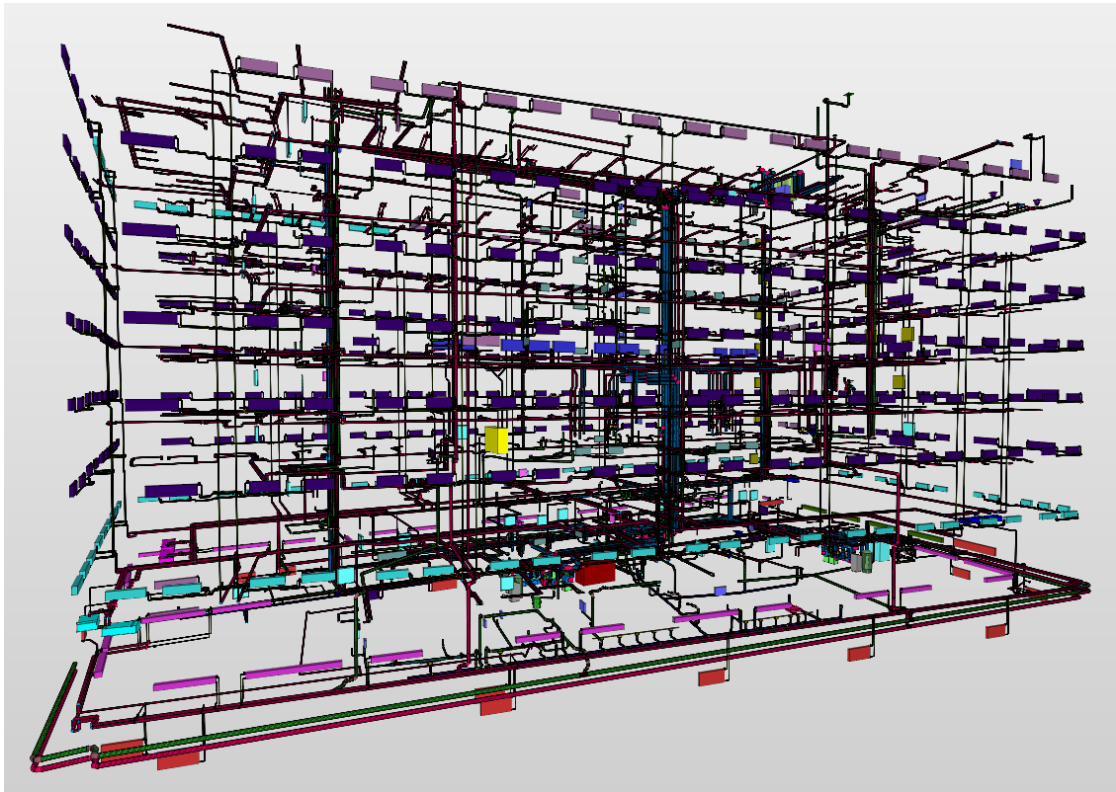
Figur 14: GWP fra VENT-modell fordelt etter tresifret systemkode.

5.3 RIVr-modell

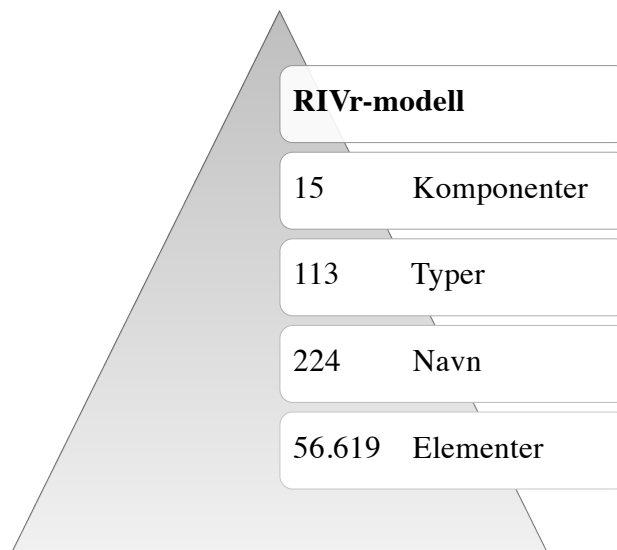
RIVr-modellen utgjør vann- og avløpssystemet i bygningen, som vist i Figur 15. Informasjonsuttaket fra modellen bestod av totalt 56 619 elementer, og av disse er 56 507 identifisert og inkludert i klimagassberegningen. Figur 16 viser samme nedbryting av elementene som i VENT-modellen, fra komponentnivå til elementnivå. Elementene ble identifisert basert på de samme attributtene som VENT-modellen, men hver attributt ga noe annerledes informasjon:

- **Komponent:** Samlebegrep for elementtypen.
- **Type:** Ofte produktnavn eller tall- og bokstavforkortelser.
- **Navn:** Ofte bestillingskode i henhold til produktblad gitt av produsent.
- **Beskrivelse:** I noen tilfeller mer utdypende om elementets egenskaper.
- **Geometri:** "Bounding box", rørdiameter og rørtykkelse, og eventuelle oppmålinger gjort direkte i modell.

Elementene som ikke er medberegnet, omfatter blant annet tre elementer med volum på 1-2 m^3 . Ekskludering av disse antas å gi en viss innvirkning på resultatene. Det ene elementet er identifisert som en fjernvarmesentral, mens de to andre er ikke identifisert som spesifikke komponenter.



Figur 15: Framstilling av RIVr-modell.



Figur 16: Kvantifisering av elementene i RIVr-modell.

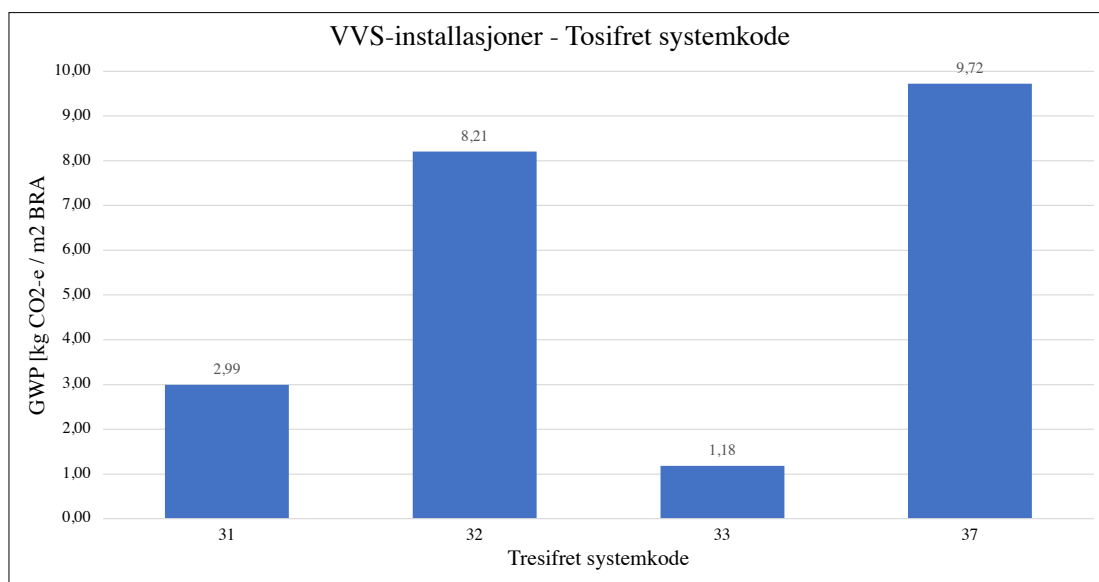
Figur 17 viser hvor miljødataen er hentet fra. Totalt ble det identifisert 39 egnede EPD-er, alle fra Europa. Elementene som i stedet ble brutt ned til materialnivå utgjorde fem materialtyper. Vedlegg C Mengde- og miljødata - RIVr-modell viser en oversikt over hvilke EPD-er som gjorde seg gjeldende for hvilke elementer i modellen. Videre ble elementene og tilhørende GWP fordelt etter bygningsdelstabellen. Resultatene er framstilt i Tabell 10 og Figur 18. Tabell 10 viser GWP totalt og per m^2 oppvarmet BRA etter to- og tresifret systemkode. I likhet med elementene i VENT-modellen, inngår RIVr-modellen i tabell 3 - VVS-installasjoner. I henhold til tosifret systemkode sorteres elementene etter 31 Sanitær, 32 Varme, 33 Brannsløkking og 37 Komfort. Figur 18 illustrerer GWP per m^2 oppvarmet BRA for disse kategoriene. Det totale utslippet er beregnet til å være 275 117 kg CO₂-e, hvorav den største andelen tilhører 37 Komfort. Av det kommer 83% fra ledningsnett for komfortkjøling, der hovedandelen kan knyttes til rørsystem i rustfritt stål. Litt over 60% av utslippet som faller under 32 Varme kommer fra utstyr for varmeinstallasjoner. I overkant av 80% av dette stammer fra radiatorer. Utslippet tilknyttet 31 Sanitær skyldes hovedsakelig ledningsnett for sanitære installasjoner, og omfatter rør av kobber og ulike plastmaterialer som PE, PP, PEX og PVC. Utslippet tilhørende 33 Brannsløkking kommer hovedsakelig fra metallkassetter, blant annet for oppbevaring av brannslanger.



Figur 17: Kilder til miljøinformasjon for RIVr-modell.

| Systemkode | | Navn | GWP [kg CO ₂ -e/m ²] | |
|------------|-----------|--|---|------------------------------|
| 3 | | VVS-installasjoner | Totalt | per m² BRA |
| | 31 | Sanitær | 37 227 | 2,99 |
| | 312 | Ledningsnett for sanitære installasjoner | 21 054 | 1,69 |
| | 314 | Armaturer for sanitære installasjoner | 1 557 | 0,13 |
| | 316 | Isolasjon av sanitære installasjoner | 10 183 | 0,82 |
| | 32 | Varme | 101 910 | 8,19 |
| | 322 | Ledningsnett for varmeinstallasjoner | 20 206 | 1,62 |
| | 324 | Armaturer for varmeinstallasjoner | 18 787 | 1,51 |
| | 325 | Utstyr for varmeinstallasjoner | 62 917 | 5,05 |
| | 326 | Isolasjon av varmeinstallasjoner | 284 | 0,02 |
| | 33 | Brannslukking | 14 684 | 1,18 |
| | 332 | Installasjoner for brannslukking med sprinkler | 1 801 | 0,14 |
| | 334 | Installasjon for brannslukking med pulver | 1 294 | 0,10 |
| | 335 | Installasjon for brannslukking med gass | 11 588 | 0,93 |
| | 37 | Komfort | 121 012 | 9,72 |
| | 372 | Ledningsnett for komfortkjøling | 100 344 | 8,06 |
| | 374 | Armaturer for komfortkjøling | 16 359 | 1,31 |
| | 375 | Utstyr for komfortkjøling | 4 280 | 0,34 |
| | 376 | Isolasjon av installasjon for komfortkjøling | 30 | 0,002 |

Tabell 10: GWP fra RIVr-modell fordelt etter tabell 3 i NS 3451.



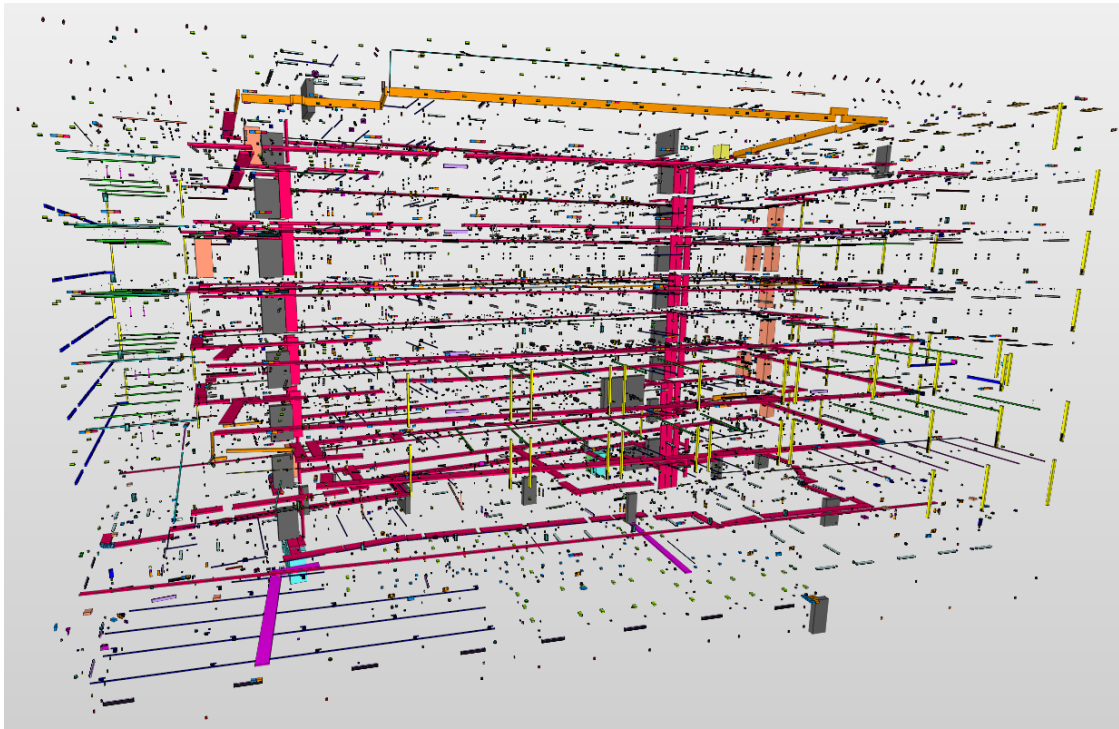
Figur 18: GWP fra RIVr-modell fordelt etter tosifret systemkode.

5.4 RIE-modell

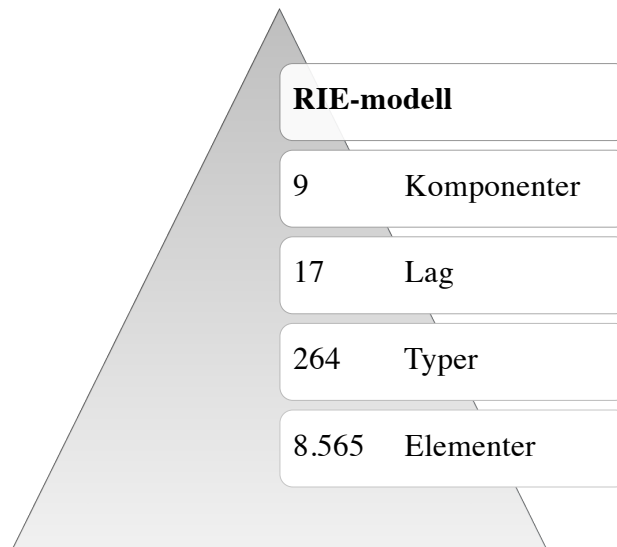
RIE-modellen utgjør det elektriske systemet i bygningen, som vist i Figur 19. Informasjonsuttaket fra modellen bestod av totalt 8 906 elementer, og av disse ble 8 565 inkludert i klimagassberegningen. Figur 20 viser nedbrytningen av RIE-modellen fra komponentnivå til elementnivå. Elementene ble identifisert basert på følgende attributter:

- **Komponent:** Samlebegrep for elementtypen.
- **Lag:** Tresifret systemkode i henhold til bygningsdelstabellen NS 3451.
- **Type:** Enten en kort beskrivelse av elementet, eller produktnavnet/bestillingskoden gitt av produsent, eller tall- og bokstavforkortelser.
- **Geometri:** “Bounding box” og oppmålinger gjort direkte i modell.

Flesteparten av elementene som ikke var identifiserbare eller som ikke inneholdt nok informasjon tilhører Tabell 5 - Ekom og Automasjon. Av disse er elementene med navn “data rack”, som tilhører systemkode 52 Integrert kommunikasjon, mest framtreddende. Det omfatter 22 elementer med et totalvolum på nesten 30 m³. Det antas at dette er stativer med datateknisk utstyr, men det var for lite informasjonsgrunnlag til å finne materialinnhold eller miljødata for disse.



Figur 19: Framstilling av RIE-modell.



Figur 20: Kvantifisering av elementene i RIE-modell.

Figur 21 viser hvor miljøinformasjonen er hentet fra. Det ble tatt i bruk 43 EPD-er, hvorav 26 av de var franske. De resterende kommer fra land både i og utenfor Europa. Elementene som i stedet ble brutt ned til materialnivå utgjorde én materialtype. *Vedlegg D Mengde- og miljødata - RIE-modell* viser en oversikt over hvilke EPD-er som gjorde seg gjeldende for hvilke elementer i modellen.

| EPD-er fra One Click LCA | | | | EPD-er fra andre kilder | Utslippsfaktorer |
|--------------------------|---------------|--------------------|------------------|-------------------------|--------------------|
| Frankrike 26 | Tyskland 5 | Storbritannia 2 | Sverige 2 | Finland 2 | Materialtyper 1 |
| Østerrike 1 | USA 1 | Malaysia 1 | Filippinene 1 | Spania 2 | |

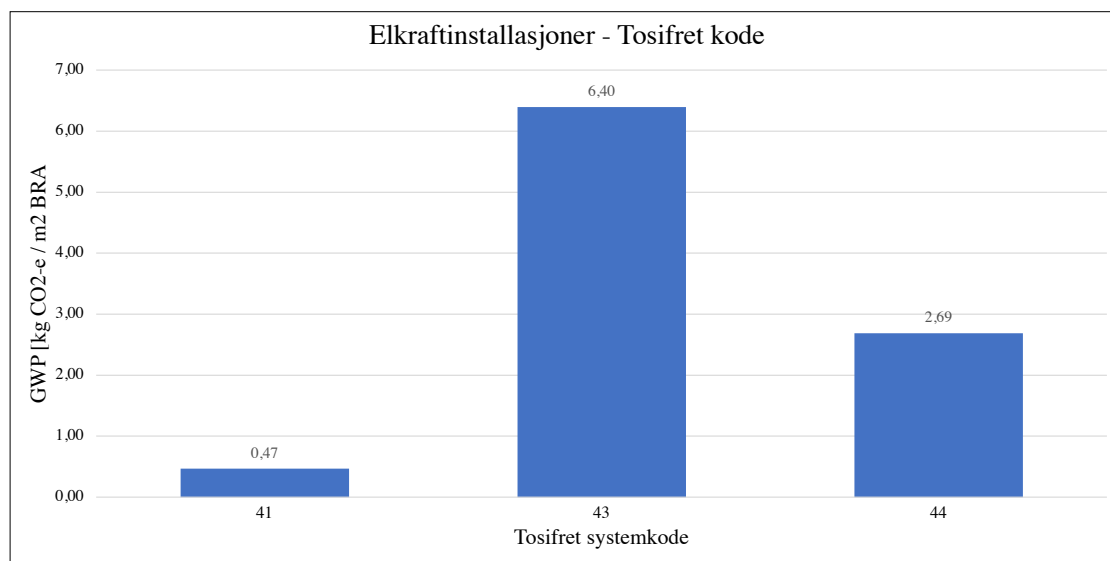
Figur 21: Kilder til miljøinformasjon for RIE-modell.

Elementene og tilhørende GWP er videre sortert etter bygningsdelstabellen, som for RIE hører til tabell 4 - Elkraftinstallasjoner og tabell 5 - Ekom og automatisering. Resultatet av dette vises i Tabell 11 og Tabell 12, herunder GWP totalt og per m^2 oppvarmet BRA delt inn etter to- og tresifret systemkode. Videre er GWP per m^2 oppvarmet BRA framstilt i Figur 22 og Figur 23 etter tosifret systemkode.

Det totale utslippet tilhørende Tabell 4 - Elkraftinstallasjoner er 118 888 kg CO₂-e, og det største bidraget er forbundet med 43 Lavspent forsyning. 97% av denne posten kommer fra elektriske tavler. 44 Lys utgjør 28% av det totale utslippet fra elkraftinstallasjoner, hvorav belysning gir et betydelig større bidrag enn nødlis, da det er av størst kvantitet. GWP som kan knyttes til 41 Basisinstallasjoner for elkraft omfatter hovedsakelig kabelstiger i galvanisert stål og kabelkanaler i plastmaterialet PVC, og utgjør totalt sett en mindre betydelig andel.

| Systemkode | | Navn | GWP [kg CO ₂ -e/m ²] | |
|------------|-----------|--|---|------------------------------|
| 4 | | Elkraftinstallasjoner | Totalt | per m² BRA |
| | 41 | Basisinstallasjoner for elkraft | 5 817 | 0,47 |
| | | 411 Kabelføring for elkraftinstallasjoner | 5 817 | 0,47 |
| | 43 | Lavspent forsyning | 79 636 | 6,4 |
| | | 433 Elkraftfordeling til alminnelig forbruk | 79 634 | 6,40 |
| | | 434 Elkraftfordeling til driftstekniske installasjoner | 2 | 0,0002 |
| | 44 | Lys | 33 436 | 2,69 |
| | | 442 Belysning | 30 143 | 2,42 |
| | | 443 Nødllys | 3 293 | 0,26 |

Tabell 11: GWP fra RIE-modell fordelt etter tabell 4 i NS 3451.

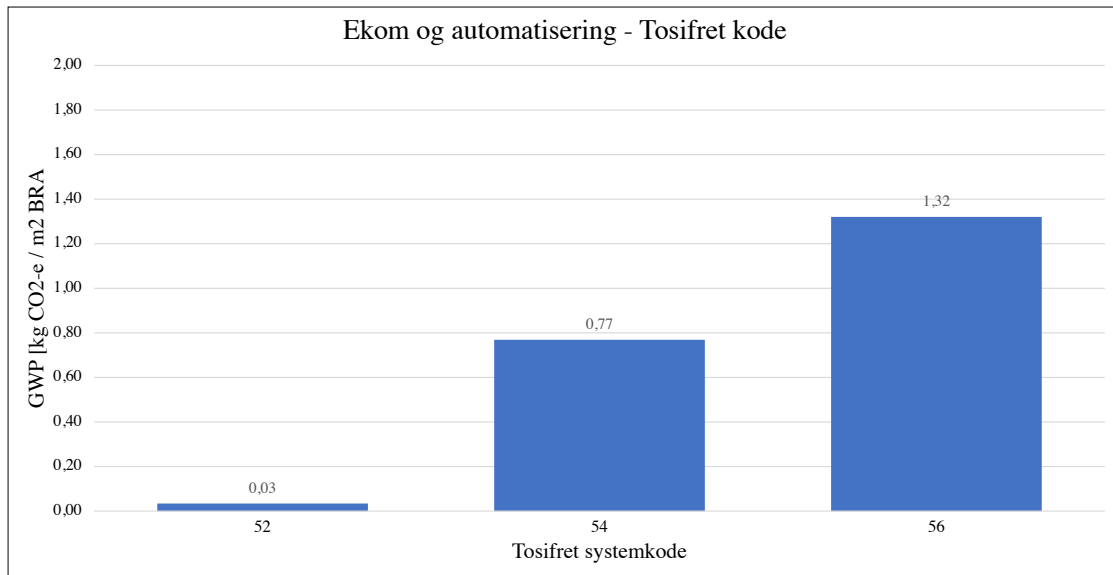


Figur 22: GWP fra RIE-modell fordelt etter tosifret systemkode i tabell 4.

Som vist i Tabell 12 og Figur 23 står 56 Automatisering for det største utslippet relatert til tabell 5 - Ekom og automatisering. Dette kommer av et stort antall brytere og følere til styring av blant annet lys, persienner, temperatur, og CO₂. Elementene som tilhører 54 Alarm og signal utgjør et 40% lavere utslipp. Elementene som inngår her er enheter som har å gjøre med brannalarm-, adgang- og innbruddssystemet. Utslippet assosiert med 52 Integrert kommunikasjon omfatter tilkoblingspunkter i sprednettet, men utgjør en liten andel sammenlignet med de andre kategoriene.

| Systemkode | | Navn | GWP [kg CO ₂ -e/m ²] | |
|------------|-----------|---|---|------------------------------|
| 5 | | Ekom og automatisering | Totalt | per m² BRA |
| | 52 | Integrert kommunikasjon | 427 | 0,03 |
| | 54 | Alarm og signal | 9 572 | 0,77 |
| | 542 | Brannalarm | 3 242 | 0,26 |
| | 543 | Adgangskontroll, innbrudds- og overfallsalarm | 6 317 | 0,51 |
| | 549 | Andre deler for alarm og signal | 14 | 0,001 |
| | 56 | Automatisering | 16 447 | 1,32 |

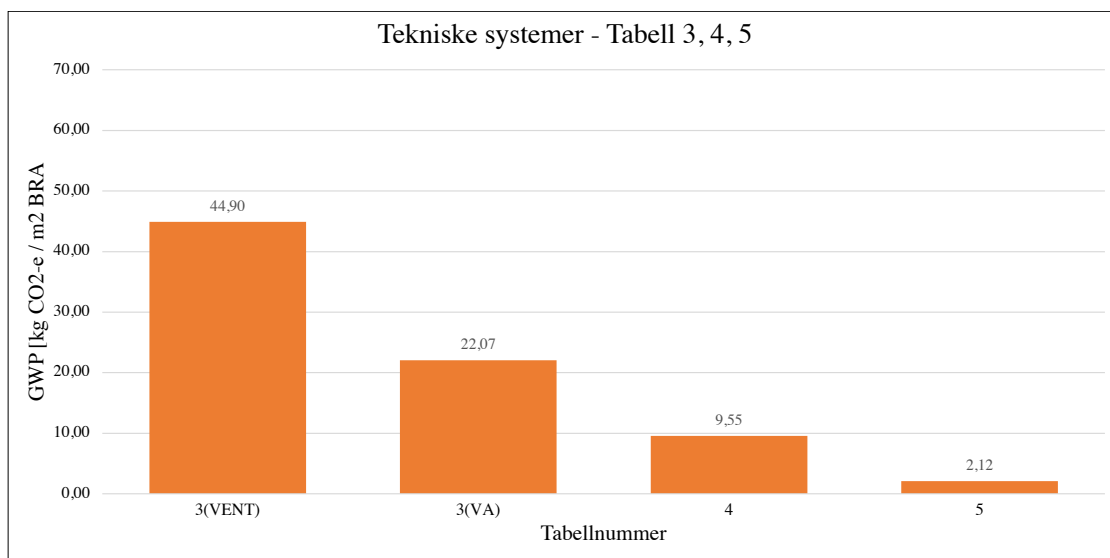
Tabell 12: GWP fra RIE-modell fordelt etter tabell 5 i NS 3451.



Figur 23: GWP fra RIE-modell fordelt etter tosifret systemkode i tabell 5.

5.5 Tekniske systemer

Oppsummert utgjør de tekniske systemene i T12 alle elementene i VENT-, RIVr- og RIE-modellene, som beskrevet i de foregående kapitlene. De kan deles inn etter tabell 3, 4 og 5 i tråd med bygningsdelstabellen i NS 3451. Figur 24 viser en sammenstilt framstilling av GWP per m^2 oppvarmet BRA for de tekniske systemene etter tabell 3, 4 og 5 i bygningsdelstabellen. Tabell 3 VVS-installasjoner er delt mellom VENT-modell, som representerer klimakontrollsystemet, og RIVr-modell, som utgjør vann- og avløpssystemet.



Figur 24: GWP fra de tekniske systemene i T12 fordelt etter tabell 3, 4 og 5.

6 Diskusjon

I dette kapittelet diskuteres resultatene fra litteraturstudien og casestudien opp mot forskningsspørsmålene og det teoretiske rammeverket. Kapittelet er strukturert etter forskningsspørsmålene, og har som mål å oppsummere de viktigste funnene, samt legge grunnlag for konklusjonen.

6.1 Hvordan har tidligere studier gjennomført livsløpsanalyser av tekniske systemer i bygninger

Litteraturstudien omfatter et utvalg studier som utforsker miljøpåvirkninger som kommer fra bygninger. Disse studiene er motivert av ulike forskningsformål, og som beskrevet i det teoretiske rammeverket, har dette innvirkning på gjennomføringene av analysene. Objektene som studeres er hele bygninger eller deler av dem i form av ett eller flere tekniske systemer. Samtlige studerte bygningstyper er også av den kommersielle typen. Disse felles parameterne betyr ikke at miljøvurderingene vil være direkte sammenlignbare, da det er stor variasjon i for eksempel størrelse, valgt levetid og ikke minst valg av framgangsmåter i livsløpsanalysene. Rodriguez *et al.* (2020) setter et eksempel på dette ved å bruke varierende størrelse som hovedparameter ved miljøvurdering av åtte hypotetiske bygninger.

Det er kjent at tekniske komponenter ofte ekskluderes i studier som tar for seg miljøvurderinger av bygninger. Nye krav til klimagassregnskap i byggeteknisk forskrift (TEK17) indikerer at denne praksisen heller ikke er utbredt i norske byggeprosjekter. En felles og viktig parameter i de undersøkte studiene er derfor inkluderingen av ett eller flere tekniske systemer. Disse systemene omfatter vanligvis klimakontrollsystemet, vann- og avløpssystemet og det elektriske systemet. Blant studiene varierer det om de tekniske systemer er hovedmotivet for studien, eller om det er likestilt med andre bygningsdeler. Som beskrevet i det teoretiske rammeverket, vil det ha en innvirkning på valg av framgangsmåte, og dermed også resultatene.

Systemgrense er en annen parameter som velges på bakgrunn av miljøvurderingens formål. Fem av syv studier tok for seg informasjonsmoduler fra hele livsløpet til bygningen, med mål om å gjøre en *helhetlig* vurdering. Av de to resterende studiene tok Rodriguez *et al.* (2020) hovedsakelig for seg produktfasen (A1-A3), men også gjennomføringsfasen (A4-A5) der informasjonen strakk til, mens Kaspersen *et al.* (2016) inkluderte kun produktfasen. Som beskrevet i det teoretiske rammeverket, skal produktfasen være definert i EPD-er for byggeprodukter. EPD-er sentralt i miljøvurderinger av bygninger, og er relativt lett tilgjengelig og håndterbar informasjon. Det vil derfor være en naturlig minste avgrensning. De to studiene begrunner avgrensningen med mangel på informasjon. Det gir også grunnlag for å tro at informasjonstilgang legger føringer for valg av systemgrense. Det er videre viktig å nevne at begge studiene påpeker at flere livsløpsstadier bør tas i betraktning i konklusjoner som angår miljøpåvirkninger fra de tekniske systemene i en bygning. Bortsett fra

produksjonsfasen, nevnes det at *B4 Utskifting* og *B6 Driftsmessige energibruk* er av stor betydning. Disse informasjonsmodulene er inkludert i alle studiene som tar for seg hele livsløpet, i tillegg til at de er signifikante i resultatene.

Ifølge det teoretiske rammeverket, velges datatype med utgangspunkt i omfanget og formålet med miljøvurderingen. Datatype refererer til hvordan bygningen kvantifiseres til mengder av komponenter, produkter og materialer. Dette har videre stor innvirkning på resultatene og tilliten til dem. Sett under ett, tar studiene i bruk alle datatypene beskrevet i det teoretiske rammeverket. Det vil si generiske, aggregerte, midlere, spesifikke og målte data. Valg av datatype ser i stor grad ut til å avhenge av type case og hva slags informasjon som har vært tilgjengelig. Både Rabani *et al.* (2021) og Rodriguez *et al.* (2020) sine caser er hypotetiske bygninger hvor prosjektering er en del av studieomfanget. Denne tilnærmingen kan vise seg fordelaktig, da den gir innsikt i alle aspekter ved bygningen og muliggjør veloverveide beslutninger knyttet til valg av materialer og komponenter.

Rabani *et al.* (2021) har brukt generiske data gjennom å prosjektere etter norsk byggeforskrift, mens Rodriguez *et al.* (2020) har kombinert datatyper ved å hente informasjon fra både tegninger og fagfolk. De resterende studiene har hatt caser av reelle bygninger, og baserte seg på data som fantes fra prosjektene. Det vil si spesifikke data med opphav fra ulike stadier i byggeprosjektet. Det antas å utgjøre store datamengder i ulike formater, som kan være utfordrende å håndtere, men Hoxha *et al.* (2021) og Kiamili *et al.* (2020) argumenterer for at det gir en omfattende analyse med plausible resultater. Det gjør det også mulig å beregne brutto materialmengder, som beskrevet i det teoretiske rammeverket, da svinn kan være medtatt i bestillingsbrev og fakturaer.

Tre av studiene benytter BIM-modeller fra prosjekter for kvantifisering. Kiamili *et al.* (2020) beskriver en systematisk framgangsmåte for å kvantifisere elementene i klimakontrollsystemet. Elementene ble delt inn etter flere nivåer, hvorav det høyeste detaljnivået tok hensyn til komponenttype, geometri og materialinnhold. Kaspersen *et al.* (2016) bruker BIM-modell for å kvantifisere VVS-systemet i case A og tekniske tegninger i case B. Oppmåling og skalering av rør og kanaler basert på tekniske tegninger framheves som utfordrende, og gir usikkerheter i resultatene.

Når det gjelder valg av miljødata, benytter studiene databaser med EPD-er og annen miljøinformasjon fra hele verden. Hovedårsaken til dette er at det ikke finnes tilstrekkelig lands- eller regionsspesifikk miljøinformasjon for tekniske systemer. Både Hoxha *et al.* (2021) og Ylmén *et al.* (2019) har imidlertid gjort tilpasninger for å gjøre miljødataen mer representativ for henholdsvis Østerrike og Sverige. Rodriguez *et al.* (2020), som i sin studie har brukt One Click LCA, legger til at de fleste EPD-ene for komponenter i de tekniske systemene kom fra Europa.

Som vist i det teoretiske rammeverket, eksisterer det en rekke indikatorer for miljøpåvirkninger. Ved verifikasjon av miljøvurderinger av bygninger er det ifølge NS-EN 15978 viktig å gi begrunnelse dersom indikatorer er utelatt. I de utvalgte studiene er det derimot lagt mer vekt på å begrunne

hvorfor indikatorer er inkludert. Samtlige betrakter GWP som en viktig indikator, og i fire av de syv studiene er det også eneste vurderte. Ylmén *et al.* (2019) tar derimot utgangspunkt i EN 15804, og inkluderer de *obligatoriske indikatorene*. Begrunnelser for å vurdere flere indikatorer er at det gir et mer sammensatt bilde av hvilke miljøeffekter bygninger påfører mennesker og omgivelser, i tillegg til at initiativ for å redusere effekten av én indikator kan øke effekten av en annen. Ylmén *et al.* (2019) tar derimot ikke hensyn til indikatorer for ressursbruk. I prosjektfaser hvor det tas beslutninger om designløsninger, både i nybygg og rehabilitering, kan det argumenteres for at disse bør inkluderes. Effektivisering av energibruk kan medføre mer komplekse og materialkrevende komponenter, og på den måten øke ressursbruk i andre livsstadier.

6.2 Hva sier tidligere studier om miljøpåvirkningene forbundet med de tekniske systemene i bygninger?

Flere av studiene etablerer en idé om at miljøpåvirkninger forbundet med tekniske systemer i bygninger er signifikante. Tross forskjellige formål, parametere og metodevalg er det enighet om at bruksstadiet (B1-B7) er av størst betydning. Tidligere har driftsmessig energibruk (B6) stått for den største andelen, men bruk av nye energiløsninger har ført til mindre miljøpåvirkninger. Dette illustrerer Rabani *et al.* (2021), som beregner at driftsmessig (B6) klimagassutslipp kan reduseres fra 77% til 4-8% gjennom å rehabilitere et typisk norsk kontorbygg til å tilfredsstille krav til passivhus. Det ga et netto utslippskutt på opptil 52% for hele bygningens levetid.

I sammenheng med påstanden om at tekniske systemer ikke inkluderes i livsløpsanalyser av bygninger, er det interessant hva studiene har kommet fram til når det gjelder disse systemenes innvirkning på de vurderte miljøindikatorene. For produktfasen viste Rodriguez *et al.* (2020) at inkludering av de tekniske systemene kunne øke klimagassutslippet fra produktfasen til bygningen med 30%, mens Ylmén *et al.* (2019) fant at tekniske systemer utgjorde 14-32% for fire av fem miljøindikatorer. Rabani *et al.* (2021) fant at klimakontrollsystemet i referansebygningen stod for 21% av beregnet GWP for hele livsløpet til en typisk norsk kontorbygning. For forskningsbygget studert av Hoxha *et al.* (2021), kommer 7% av total GWP for bygning fra produksjon av VVS-systemet og det elektriske systemet, mens 17% kommer fra utskifting av de relaterte komponentene.

Generelt trekkes utskifting av komponenter (B4) fram som en viktig årsak til at tekniske systemer utgjør en betydelig andel av klimagassutslippene til en bygning. For fire av de fem studiene som tok for seg hele livsløpet til bygningen, viste resultatene at utskifting av komponenter (B4) gir større miljøpåvirkninger enn produktfasen (A1-A3). Tatt i betraktning at de tekniske systemene inneholder flere materialkrevende komponenter, og at aktivitetene som inngår i utskifting innebærer avhending og produksjon av nye komponenter, flere ganger gjennom en levetid på 50-60 år, så virker dette som et plausibelt resultat. Ylmén *et al.* (2019) kom fram til at utslippet fra produktfasen var større, men trekker fram utskifting av komponenter, spesielt i klimakontrollsystemet, som

betydningsfullt.

Til tross for disse funnene er det verdt å merke seg begrepet *CO₂-tilbakebetalingstid* som introduseres av Rabani *et al.* (2021). I deres resultater indikeres det at klimagassutslippet fra utskifting av komponenter i klimakontrollsystemet har en tilbakebetalingstid på bare 4-5 år, og at den kunne vært kortere med andre energiforsyninger. Det skal understrekes at disse resultatene er basert på ombygging fra et standard norsk kontorbygg til et kontorbygg som kvalifiserer som passivhus. Dette vil ikke nødvendigvis være tilfellet for alle rehabiliteringer og ombygginger av kommersielle bygninger. I lys av økende krav til klima- og miljøhensyn innenfor bygningssektoren, kan det likevel forventes at energieffektivisering vurderes som viktig, både av hensyn til miljømessig og økonomisk bærekraft. I så fall bør vurderinger knyttet til rehabilitering av de delene av de tekniske systemene som er tilknyttet energiforsyninger, inkludere CO₂-tilbakebetalingstid som en relevant faktor. Videre er det interessant å merke seg at Hoxha *et al.* (2021) argumenterer for at selv om den beregnede ressursbruken (PED) og klimagassutslippene (GWP) for driftsmessig energiforbruk (B6) i den undersøkte bygningen anses som lave, blir bærekraftsmålene for 2050 likevel ikke oppnådd på grunn av det karbonet som er bundet i selve bygningen. Dette understreker betydningen av tiltak for å redusere miljøpåvirkningen fra de tekniske systemene, og peker på nødvendigheten av å fokusere på produksjonen av materialkrevende komponenter og deres levetid.

6.3 Hvor stort er klimagassutslippet forbundet med produktfasen til de tekniske systemene i Tordenskiolds gate 12?

Med klimagassutslipp fra produktfasen (A1-A3) til tekniske systemer menes globalt oppvarmingspotensial (GWP), målt i antall kg CO₂-ekvivalenter, generert fra produksjon av komponenter og materialer som tilhører tabell 3, 4 og 5 i bygningsdelstabellen NS 3451. Resultatene fra klimagassberegningene bærer med seg usikkerheter som følge av svakheter og utfordringer med metoden. Kombinasjonen av stort datasett, tidvis lav datakvalitet, utilstrekkelig miljødata, og tidsbegrensning skaper store usikkerheter i resultatene. Alle vurderinger og antagelser underveis er også gjort av en ufaglært med lite eller ingen referansepunkter til klimagassutslipp fra materialer og komponenter i tekniske systemer. En konkret årsak til feil i resultatene er at det ikke er tatt høyde for klimagassutslipp for *alle* elementene. Det kan være av større eller mindre betydning, ettersom hvor store og materialkrevende de ekskluderte elementene er. Resultatene anses likevel som verdifulle i den forstand at det finnes få lignende studier som tar for seg omfattende klimagassberegninger av tekniske systemer i en kontorbygning. Beregningene gir også en indikasjon på hvilke deler av de tekniske systemene de største utslippene oppstår, da resultatene er sortert etter bygningsdelstabellen. Det vil være nyttig både til videre forskning, og dersom det blir praksis i byggebransjen og medberegne de tekniske systemene i klimagassberegninger.

Ifølge resultatene fra totalt klimagassutslipp fra alle de tekniske systemene i T12 979 185 CO₂-e

eller 78,65 CO₂-e/m² oppvarmet BRA.

Utslipet knyttet til luftbehandlingssystemet med systemkode 36 i bygningsdelstabellen er 559 018 kg CO₂-e eller 44,9 kg CO₂-e/m² oppvarmet BRA. Det utgjør 57% av det totale utslippet fra de tekniske systemene. Som beskrevet i kapittel 2.4.1 *Informasjonsuttak fra BIM-modell* knyttes det mye tidsbruk, men likevel store usikkerheter rundt mengdeberegningene av kanal- og kanaldelene i VENT-modell. Dette gjelder både for ventilasjonskanalene, som utgjør det største utslippet i klimakontrollsystemet, og for kanalisolasjonen, som har stort volum i modell, men lavt utslipp per enhet. For å oppnå mer nøyaktige mengde- og klimagassberegninger, ville det vært hensiktsmessig å implementere en arbeidsflyt der tidsbruk per elementtype eller materialtype blir veid opp mot utslippsfaktoren. Det fordrer tilstrekkelig materialinformasjon i modell, samt generell kunnskap om materialers utslippsfaktorer. Av de ekskluderte elementene som var mulig å identifisere, antas "isvannsmaskiner" å ha stor innvirkning på resultatet. Det er store, komplekse komponenter som i modellen er oppgitt med store volum. Usikkerhet rundt komponentenes egenskaper og mangel på miljødata gjorde at de likevel ble sett bort fra.

Utslipet fra vann- og avløpssystemet, som inkluderer systemkode 31, 32, 33 og 37 i bygningsdelstabellen er beregnet til å være totalt 275 117 kg CO₂-e eller 22,07 kg CO₂-e/m² oppvarmet BRA. Det utgjør 28% av det totale utslippet fra de tekniske systemene. Av ekskluderte elementer, antas det at minst tre av disse har en betydningsfull innvirkning på resultatet. Med begrenset kompetanse er et vanskelig å vite hva slags komponenter det er, men de har relativt store volum i modell, og antas å være komplekse tekniske komponenter.

Det elektriske systemet er delt mellom Tabell 4 - Elkraftinstallasjoner og Tabell 5 - Ekom og Automatisering. Beregnet klimagassutslipp for de respektive er 118 888 CO₂-e og 26 336 kg CO₂-e, eller 9,55 CO₂-e/m² oppvarmet BRA og 2,12 kg CO₂-e/m² oppvarmet BRA. Det utgjør henholdsvis 12% og 3% av det totale utslippet. De fleste ekskluderte elementene tilhører systemet for Ekom og Automatisering. Det er også det systemet som er beregnet til å ha lavest utslipp. Elementene med navn "data rack" antas å gi betydelig høyere reelt klimagassutslipp på grunn av stort volum og høy materialteknisk kompleksitet.

6.4 Hva sier resultatene fra livsløpsanalysen av de tekniske systemene i Tordenskiolds gate 12 sammenlignet med funn i litteraturen?

Som påpekt i resultatene fra litteraturstudien, kan det være problematisk å sammenligne livsløpsanalyser av bygninger. Det er likevel interessant å se hva de forskjellige studiene har kommet fram til, og diskutere rundt like og ulike resultater. Tabell 13 viser GWP for produktfasen (A1-A3) til de tekniske systemene undersøkt i studiene fra litteraturstudien og fra casestudien av T12. Alle verdiene har enhet kg CO₂-ekvivalenter per m² BRA, bortsett fra Kaspersen *et al.* (2016) som har oppgitt per m² BTA. Resultatene fra Kaspersen *et al.* (2016) og T12 er delt inn etter bygningsdelstabellen NS 3451. Det antas at denne standardiserte inndelingen også er representativ for de andre studiene.

| Studie | Klimakontroll | VA | VVS | Elektrisk | Teknisk |
|---|---------------|-----|-------|-----------|---------|
| (Rabani <i>et al.</i> , 2021) | 37 | | | | |
| (Kiamili <i>et al.</i> , 2020) | 79 | | | | |
| (Ylmén <i>et al.</i> , 2019) | 35 | | | | |
| (Borg, 2016) | 14-17 | | | | |
| (Kaspersen <i>et al.</i> , 2016) Case A | 12 | 13 | 25 | | |
| (Kaspersen <i>et al.</i> , 2016) Case B | 35-38 | 7-9 | 42-47 | | |
| (Hoxha <i>et al.</i> , 2021) | | | 63 | 38 | 100 |
| (Rodriguez <i>et al.</i> , 2020) | 28-60 | 6-8 | 35-66 | 4-16 | 40-75 |
| T12 | 45 | 22 | 67 | 12 | 79 |

Tabell 13: Sammenligning av GWP i produksjonsfasen til tekniske systemer.

Som det fremgår av resultatene fra litteraturstudien, kan sammenligningen av livsløpsanalyser av bygninger være problematisk. Likevel er det interessant å se hva de ulike studiene har kommet frem til og diskutere likheter og forskjeller i resultatene. Tabell 13 presenterer GWP for produktfasen (A1-A3) til de tekniske systemene som ble undersøkt i både litteraturstudien og casestudien av T12. Alle verdiene er oppgitt i enheten kg CO₂-ekvivalenter per kvadratmeter BRA, med unntak av Kaspersen *et al.* (2016), som oppga verdiene per kvadratmeter BTA. Resultatene fra Kaspersen *et al.* (2016) og T12 er delt inn i henhold til bygningsdelstabellen NS 3451, og det antas at denne standardiserte inndelingen også er representativ for de andre studiene.

Ved å analysere tabellen kan vi observere at det mest studerte tekniske systemet blant alle studiene er klimakontrollsystemet (HVAC). Det er også det systemet som viser størst variasjonsbredde i

beregnete utslipp på tvers av studiene. Ved en slik sammenligning av resultater er det mulig å anta at flere inkluderte studier bidrar til større variasjon, noe som ble illustrert av Clark (2013). Deres studie inkluderte 28 casestudier med ulike metoder og parametere, og dette resulterte i en variasjon på 300 til 1 600 kg CO₂-ekvivalenter per kvadratmeter for kontorbygninger.

Ytterpunktene i utslipp beregnet for klimakontrollsystemet stammer fra Kiamili *et al.* (2020) og Kaspersen *et al.* (2016). Resultatene fra Kaspersen *et al.* (2016) er oppgitt i GWP per kvadratmeter BTA som funksjonell enhet, noe som gir noe lavere utslippsverdier, ettersom BTA er større enn BRA. Likevel er det sannsynlig at andre parametere spiller en større rolle for variasjonen i resultatene. Valg av klimakontrollsystem vil for eksempel være avhengig av bygningstype, geometri og ikke minst bygningens energikilde. Dette illustrerer Rodriguez *et al.* (2020) ved å vise at ulike scenarier basert på forskjellige klimakontrollsystemer og bygningsstørrelser, gir et vidt spekter i resulterende klimagassutslipp. Ifølge Kaspersen *et al.* (2016) vil ikke endringer i bygningsstørrelse, representert ved ulikt antall etasjer, ha en signifikant innvirkning på utslippene per kvadratmeter i deres casestudier. Det er likevel kommet fram til svært ulike

En annen interessant observasjon er at middelverdien i resultatene til Rodriguez *et al.* (2020) er 44 kg CO₂ per m², som er omtrent det samme som utslippet beregnet for T12. Det er enighet om at materialtunge komponenter og galvanisert stål er dominerende utslippsfaktorer i klimakontrollsystemet.

Når det gjelder vann- og avløpssystemene, er det størst utslipp beregnet for T12. Det er kjent at Kaspersen *et al.* (2016) har ekskludert varmpumper og -kjeler, ventiler og radiatorer, mens Rodriguez *et al.* (2020) ikke har medberegnet kjølemedier og vvs-armaturer. Det kan ha gitt signifikante innvirkning på deres resultater. Som kjent, er enkelte tekniske komponenter fra vann- og avløpssystemet i T12 også ekskludert, slik at utslippet her også reelt sett antas å være noe større.

Blant studiene som har tatt for seg *alle* de tekniske systemene, er det enighet om at VVS-systemet totalt sett utgjør det største utslippet. Videre er det klimakontroll , ser det ut til at det er klimakontrollsystemet som utgjør størst andel av utslippet i VVS-systemet.

Videre er det hensiktsmessig å fremheve metodens svakheter, ettersom det er visse gjentakende faktorer som har påvirket resultatene. Store mengder data, varierende kvalitet på informasjon om komponenter og materialer, samt utilstrekkelige miljødata er gjennomgående nøkkelord i alle studiene, inkludert casestudien av T12. Rabani *et al.* (2021) har primært benyttet One Click LCA som kilde til EPD-er og påpekt en betydelig svakhet og utfordring ved at databasen ikke gir tilstrekkelig innsikt i det underliggende grunnlaget for de kvantitative miljødataene. Det beskrives som en “black box approach”. I casestudien av T12 var dette spesielt tydelig i form av at EPD-ene kunne være vanskelige å tolke språklig, i tillegg til at de kunne være kortfattede og for eksempel mangle produktbilder. Som påpekt av Kiamili *et al.* (2020), mangler det spesifikke EPD-er for tekniske komponenter, og en EPD gir ikke nødvendigvis en god representasjon av et annet tilsvarende

produkt. Dette medfører betydelig usikkerhet knyttet til om EPD-ene som er funnet for *lignende* produkter faktisk er representative.

Samtlige studier har ekskludert eller forenklet komponenter i beregningene. Kaspersen *et al.* (2016), som oppnådde det laveste utslippet blant studiene i deres case A, har for eksempel utelatt pumper, kjeler, ventiler og radiatorer. I casestudien av T12 var disse komponentene faktorer som utgjorde en betydelig andel av utslippet knyttet til vann- og avløpssystemet (RIVr-modellen). Radiatorer utgjorde for eksempel 4,04 kg CO₂-e/m². Borg (2016) har på sin side utelatt elektroniske kontrollenheter som tilhører klimakontrollsystemet, og betraktet de som en del av det elektriske systemet. Det er en parameter som avviker fra for eksempel T12, og vil gjøre sammenligningsgrunnlaget dårligere. Kiamili *et al.* (2020), som beregnet det høyeste utslippet for klimakontrollsystemet, opplevde fordeler av å bruke BIM-modell som datagrunnlag og behandle det gjennom visuelt programmeringsspråk (VPL). Foruten bruken av VPL, har metoden for mengdeberegning og innhenting av miljødata mye til felles med det som ble gjort i casestudien av T12. Henviser her til et iterativt arbeid som involverte bruk av mange informasjonskilder for å oppnå ønsket omfang og presisjon. I begge tilfeller er det lav datakvalitet i BIM-modellene og mangel på produktspesifikk informasjon som skaper utfordringer og usikkerheter. Under arbeidet med casestudien av T12, oppstod det noen hypoteser om hvorfor BIM-modellen var av varierende datakvalitet. Siden den ble utviklet i forbindelse med et rehabiliteringsprosjekt, kan all generisk eller kryptisk informasjon være en følge av at visse bygningsdeler og komponenter tilhørte den opprinnelige konstruksjonen fra 1937, og at de manglet datagrunnlag. Det kan også hende at verdien av høy detaljeringsgrad ble sett på som lav, og at det derfor ikke ble prioritert i prosjektet. Som Hoxha *et al.* (2021) understreker, krever likevel en detaljert miljøvurdering av en bygning ved bruk av BIM-modell tilstrekkelig detaljnivå. Dersom digitalisering og klima- og miljøtiltak i byggebransjen fortsetter å øke i takt, bør det stilles strengere krav til BIM, både med tanke på hvordan informasjon er strukturert og detaljnivået.

7 Konklusjon

Konklusjonen begynner med en besvarelse av problemstillingen, etterfulgt av en oppsummering av refleksjoner gjort underveis og i etterkant av arbeidet. Det inkluderer tanker rundt utfordringer som har oppstått underveis, potensielle forbedringer som kunne bidratt til å forhøye kvaliteten på casestudien og videre arbeid med forskningsområdet.

7.1 Klimagassutslipp fra tekniske systemer

Hvor mye klimagassutslipp kan knyttes til produksjon av de tekniske systemene i et kontorbygg?

Denne problemstillingen er utforsket gjennom å se på studier som tar for seg miljøvurderinger av tekniske systemer, samt gjennom å beregne klimagassutslipp i en casestudie av et eksisterende kontorbygg.

Ifølge tidligere studier utgjør klimagassutslipp fra produksjon av tekniske systemer en signifikant andel av det totale utslippet i produktfasen (A1-A3) til en bygning. Analysene av de studerte bygningene og beregningene som ble utført i casestudien er imidlertid unike og bygningsspesifikke. Beregnet utslipp er nemlig i stor grad påvirket av valg av metode for kvantifisering av tekniske komponenter og materialer, og innhenting av miljødata. Det kan likevel dras noen generelle konklusjoner. Av de tekniske systemene, herunder klimakontrollsystem, vann- og avløpssystem og elektrisk system, ser det ut til at klimakontrollsystemet genererer mest utslipp i produktfasen. Dette er en konsekvens av komplekse komponenter med høy vekt, stort innhold av metaller, eller begge deler. Det gjelder hovedsakelig for ventilasjonsaggregater og -kanaler. Resultatene fra klimagassberegningene av de tekniske systemene i kontorbygget i Tordenskiolds gate 12 er oppsummert i Tabell 14.

| Tordenskiolds gate 12 - GWP [kg CO₂-e/m² oppvarmet BRA] | | | |
|--|---------------|-----------|--------|
| Klimakontroll | Vann og avløp | Elektrisk | Totalt |
| 44,90 | 22,07 | 11,76 | 78,65 |

Tabell 14: Klimagassutslipp målt i GWP for tekniske systemer i T12.

Nøyaktige beregninger av klimagassutslippet fra produksjon av tekniske systemer i bygninger er avhengige av høy datakvalitet. Det inkluderer informasjon om alle tekniske komponenter, inkludert totalvekt, materialinnhold og -vekt, tekniske egenskaper og transparente EPD-er eller annen miljødata. Disse kravene sjeldent oppnådd for tekniske komponenter, noe som skaper stor usikkerhet rundt det reelle utslippet. Det kan likevel fastslås at utslippet fra tekniske systemer bør

tas i betraktning i valg som har med prosjektering og rehabilitering å gjøre. Dette satt i lys av en økende interesse for å ivareta eksisterende bygninger ved ombygging og rehabilitering. Dersom komponentene som genererer mest utslipp kan gjenbrukes, spares miljøet for utslipp fra produksjon av nye.

7.2 Til ettertanke

Kvaliteten på BIM-modellen vil i praksis være avgjørende for om materialmengde og utslipp kan beregnes med akseptabel nøyaktighet. Denne oppgaven er sterkt preget av at det var utfordrende og tidkrevende å jobbe med datasettet fra BIM-modell, noe som kommer av at nettopp informasjonen var av varierende kvalitet og lite konsistent. I lys av ivaretagelse og rehabilitering av bygninger, bør et standard oppsett med et minimum av datakvalitet på plass i BIM-modeller. Det ble viet mye tid til hver elementtype for at beregningene skulle bli så virkelighetsnære som mulig. For hver komponent hvor det fantes produktspesifikk miljødata, oppstod det en oppfatning om at presisjonen i klimagassberegningen ville synke. Uten erfaring og referansetall var det vanskelig å forutsi hvor stor betydning en elementtype ville ha i det store bildet, og sett i ettertid ble det brukt for mye tid på *ubetydelige* komponenter. Dette er en utfordring som kan håndteres mer effektivt med økt erfaring, men kunne også til en viss grad vært unngått gjennom rådføring og erfaringsutveksling underveis i arbeidet. Når det er sagt, har det vært svært lærerikt, og gitt verdifull kunnskap og erfaring til senere arbeid, både når det gjelder informasjonsuttak fra BIM-modell, innhenting av miljødata og klimagassberegninger ellers.

Miljødata var for mange tekniske komponenter en mangelvare, eller så var informasjonen vanskelig å tolke. Det ble i de aller fleste tilfeller brukt EPD-er for produkter som lignet de i modell, men på grunn av lite kunnskap innen prosjektering av tekniske systemer i bygninger, var det vanskelig å bedømme om produktene faktisk hadde lignende tekniske egenskaper. I tillegg ble det investert betydelig tid i å søke etter informasjon i produktdatablader og EPD-er for å sørge for mest mulig overensstemmelse. Likevel kom det til et punkt hvor det ble for tidkrevende å finne riktig produktinformasjon, og det ble nødvendig å gå videre. I kontekst av livsløpsanalyser er det mye produkt- og materialinformasjon som er relevant. Det gjelder for eksempel tekniske egenskaper, totalvekt, materialsammensetning og materialvekt. Alle disse egenskapene er sjeldent å finne i produktdatablader for tekniske komponenter, og når det heller ikke finnes nok produktspesifikke EPD-er, blir det vanskelig å oppnå miljøvurderinger som gjenspeiler virkeligheten.

I kontekst av et reelt bygge- eller rehabiliteringsprosjekt, ville metoden brukt i denne miljøvurdering vært uforholdsmessig tidkrevende, selv for en rutinert klima- og miljørådgiver, i et nytte-/kostnadsperspektiv. Disse refleksjonene gir derfor verdifull innsikt som kan brukes til å forbedre nøyaktigheten og effektiviteten av fremtidige klimagassberegninger og miljøvurderinger av tekniske systemer i bygninger.

7.3 Videre arbeid

Videre arbeid for denne oppgaven, samt klimagassberegninger og miljøvurderinger av tekniske systemer generelt, bør legge vekt på å redusere usikkerhetene i resultatene og utvikle mer tidseffektive metoder. BIM-modeller med lav datakvalitet kan for eksempel kombineres med eller erstattes av prosjektdokumenter som FDV-dokumenter eller produktdatablader for de spesifikke komponentene. Dette vil spare tid knyttet til identifisering av elementer i modeller med lav datakvalitet. Videre ville dialog med produsenter og leverandører mulig gitt større innsikt i materialinnholdet til avanserte tekniske komponenter, og på den måten bidratt til mer realistiske beregninger av materialmengder. Når det gjelder materialmengder for rør og rørdeler, så er det mulig at prosjekterende rådgivere kan produsere denne informasjonen enklere gjennom deres anvendte programvarer for prosjektering. Det vil i så fall gi gunstig utfall, både for tidsbruk og nøyaktighet. I tilfeller hvor det ikke er mulig å finne transparente og kompatible EPD-er for komponentene, kan det være mer hensiktsmessig å i stedet utvikle miljødata i en LCA-programvare som Simapro, forutsatt at man har tilgang på materialsammensetninger. Det muliggjør mer produktspesifikke beregninger.

Videre forskning bør inkludere flere casestudier for å etablere generiske verdier for klimagassutslipp fra tekniske systemer i bygninger, og . Dette vil også bidra til å identifisere de komponentene og materialene som har størst betydning. Det ideelle scenarioet er å inkludere alle livsløpsstadier og relevante miljøindikatorer i miljøvurderinger. Dette vil gi muligheten til å veie miljøpåvirkninger fra produksjon, drift, utskifting og avhending i forhold til hverandre. En slik tilnærming vil være nyttig både i nybygg- og rehabiliteringsprosjekter.

Implementeringen av disse forbedringene vil bidra til å redusere usikkerhetene i resultatene og gjøre klimagassberegninger og miljøvurderinger mer pålitelige og tidseffektive.

Referanser

- Autodesk (2023). *Help — About Bounding Boxes — Autodesk*. URL: <https://help.autodesk.com/view/RVT/2022/ENU/?guid=GUID-C88AAF36-7F89-4599-8C57-CD9B02390C27> (Hentet 17. jun. 2023).
- Badampudi, D., C. Wohlin og K. Petersen (2015). «Experiences from Using Snowballing and Database Searches in Systematic Literature Studies». I: *ACM International Conference Proceeding Series*. Bd. 27-29-April-2015. ISBN: 978-1-4503-3350-4. DOI: 10.1145/2745802.2745818.
- Blengini, Gian Andrea og Tiziana Di Carlo (1. jun. 2010). «The Changing Role of Life Cycle Phases, Subsystems and Materials in the LCA of Low Energy Buildings». I: *Energy and Buildings* 42.6, s. 869–880. ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.12.009. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778810000022> (Hentet 30. jun. 2023).
- Borg, Alexander Adam (2016). «The Environmental Impact of Ventilation Systems in a Norwegian Office Building from a Life Cycle Perspective». Masteroppg. NTNU. URL: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2401193> (Hentet 24. jan. 2023).
- Clark, David H. (2013). *What Colour Is Your Building?* URL: <https://www.positivezero.com.au/wciyb> (Hentet 30. jan. 2023).
- Danson, Mike og Norin Arshad (2015). «3 The Literature Review». I: *Research Methods for Business & Management : A Guide to Writing Your Dissertation*. Second edition. The Global Management Series. Wolvercote, Oxford: Goodfellow Publishers Ltd. ISBN: 978-1-910158-50-0. URL: https://www.goodfellowpublishers.com/free_files/Chapter%203-d0a27b4fc2eac406e4509dad1dedecfc.pdf.
- Elsevier (2023). *Content - How Scopus Works - Scopus - — Elsevier Solutions*. URL: <https://www.elsevier.com/solutions/scopus/how-scopus-works/content> (Hentet 22. feb. 2023).
- EPD-Norge (15. apr. 2015). *Hva er en EPD?* EPD Norge. URL: <https://www.epd-norge.no/hva-er-en-epd/> (Hentet 21. okt. 2022).
- Foster, Margaret og Sarah Jewell (2017). *Assembling the Pieces of a Systematic Review: A Guide for Librarians*. Medical Library Association Books. Lanham, Maryland: Rowman & Littlefield. ISBN: 978-1-4422-7701-4.
- Goedkoop, Mark *et al.* (mai 2013). *ReCiPe 2008. A LCIA Method Which Comprises Harmonised Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level*. URL: <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/downloads>.
- Greene, Jennifer C., Valerie J. Caracelli og Wendy F. Graham (1989). «Toward a Conceptual Framework for Mixed-Method Evaluation Designs». I: *Educational Evaluation and Policy*

-
- Analysis* 11.3, s. 255–274. ISSN: 0162-3737. DOI: 10.2307/1163620. JSTOR: 1163620. URL: <https://www.jstor.org/stable/1163620> (Hentet 12. mai 2023).
- Hovland, Beate Indrebø *et al.* (15. des. 2009). «Veiledning for forskningsetisk og vitenskapelig vurdering av kvalitative forskningsprosjekt innen medisin og helsefag». I.
- Hoxha, E. *et al.* (2021). «Influence of Technical and Electrical Equipment in Life Cycle Assessments of Buildings: Case of a Laboratory and Research Building». I: *International Journal of Life Cycle Assessment* 26.5, s. 852–863. ISSN: 0948-3349. DOI: 10.1007/s11367-021-01919-9.
- International EPD® System (12. jan. 2021). *The EPD — EPD International*. URL: <https://www.environdec.com/all-about-epds/the-epd> (Hentet 26. mai 2023).
- Junnila, Seppo og Arpad Horvath (1. des. 2003). «Life-Cycle Environmental Effects of an Office Building». I: *Journal of Infrastructure Systems* 9.4, s. 157–166. ISSN: 1076-0342. DOI: 10.1061/(ASCE)1076-0342(2003)9:4(157). URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291076-0342%282003%299%3A4%28157%29> (Hentet 27. jan. 2023).
- Kaiser, Matthias (27. apr. 2015). *Kvantitativ metode*. Forskningsetikk. URL: <https://www.forskningsetikk.no/ressurser/fbib/metoder/kvantitativ-metode/> (Hentet 26. mai 2023).
- Kaspersen, Benedicte, Jardar Lohne og Rolf André Bohne (1. sep. 2016). «Exploring the CO₂-Impact for Building Height; A Study on Technical Building Installations». I: *Energy Procedia. Sustainable Built Environment Tallinn and Helsinki Conference SBE16 96*, s. 5–16. ISSN: 1876-6102. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.09.089. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216307287> (Hentet 25. jan. 2023).
- Kiamili, C., A. Hollberg og G. Habert (2020). «Detailed Assessment of Embodied Carbon of HVAC Systems for a New Office Building Based on BIM». I: *Sustainability (Switzerland)* 12.8. ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/SU12083372.
- Medas, Mike *et al.* (16. apr. 2015). «Towards BIM-integrated, Resource-Efficient Building Services». I.
- Nekolaichuk, Erica (6. mar. 2023). *Searching the Literature: A Guide to Comprehensive Searching in the Health Sciences: Grey Literature*. URL: <https://guides.library.utoronto.ca/c.php?g=577919&p=4123572> (Hentet 17. jun. 2023).
- Nutter, Darin W. og Aik Jong Tan (1. mai 2011). «CO₂e Emissions from HVAC Equipment and Lifetime Operation for Common U.S. Building Types». I: *International Journal of Energy and Environment* 2.
- Overland, Jan-Arve (26. okt. 2018). *TONE - strategi for kildekritikk*. ndla.no. URL: <https://ndla.no/nb/subject:d1fe9d0a-a54d-49db-a4c2-fd5463a7c9e7/topic:077a5e01-6bb8-4c0b-b1d4-94b683d91803/topic:9b2a0642-1d1f-4aee-a9f3-8fc2e315bcf3/topic:75d0c8ee-0a66-4f50-af56-ddcbd090e0bf/resource:1:169741> (Hentet 24. feb. 2023).
-

-
- Pan, Wei, Kaijian Li og Yue Teng (1. jul. 2018). «Rethinking System Boundaries of the Life Cycle Carbon Emissions of Buildings». I: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90, s. 379–390. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.057. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211830145X> (Hentet 27. jan. 2023).
- Passer, Alexander, Helmuth Kreiner og Peter Maydl (1. nov. 2012). «Assessment of the Environmental Performance of Buildings: A Critical Evaluation of the Influence of Technical Building Equipment on Residential Buildings». I: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 17.9, s. 1116–1130. ISSN: 1614-7502. DOI: 10.1007/s11367-012-0435-6. URL: <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0435-6> (Hentet 24. jan. 2023).
- Rabani, Mehrdad *et al.* (15. okt. 2021). «Life Cycle Analysis of GHG Emissions from the Building Retrofitting: The Case of a Norwegian Office Building». I: *Building and Environment* 204, s. 108159. ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108159. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108159> (Hentet 6. mar. 2023).
- Randolph, Justus (23. nov. 2009). «A Guide to Writing the Dissertation Literature Review». I: *Practical Assessment, Research, and Evaluation* 14.1. ISSN: 1531-7714. DOI: 10.7275/b0az-8t74. URL: <https://scholarworks.umass.edu/pare/vol14/iss1/13>.
- Rodriguez, Barbara X. *et al.* (1. nov. 2020). «Mechanical, Electrical, Plumbing and Tenant Improvements over the Building Lifetime: Estimating Material Quantities and Embodied Carbon for Climate Change Mitigation». I: *Energy and Buildings* 226, s. 110324. ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110324. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778819340071> (Hentet 25. jan. 2023).
- Schoonenboom, Judith og R. Burke Johnson (2017). «How to Construct a Mixed Methods Research Design». I: *Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie* 69 (Suppl 2), s. 107–131. ISSN: 0023-2653. DOI: 10.1007/s11577-017-0454-1.
- Snyder, Hannah (1. nov. 2019). «Literature Review as a Research Methodology: An Overview and Guidelines». I: *Journal of Business Research* 104, s. 333–339. ISSN: 0148-2963. DOI: 10.1016/j.jbusres.2019.07.039. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0148296319304564> (Hentet 6. mar. 2023).
- Standard Norge (1. sep. 2006a). *Miljøstyring - Livsløpsvurdering - Krav Og Retningslinjer (ISO 14044:2006)*. URL: <https://handle.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=236803>.
- (1. sep. 2006b). *Miljøstyring - Livsløpsvurdering - Prinsipper Og Rammeverk (ISO 14040:2006)*. URL: <https://handle.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=236802>.
-

-
- Standard Norge (1. aug. 2010). *Miljømerker Og Deklarasjoner - Miljødeklarasjoner Type III - Prinsipper Og Prosedyrer (ISO 14025:2006)*. URL: <https://handle.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=474248> (Hentet 17. jun. 2023).
- (2. jan. 2012a). *Bærekraftige Byggverk - Vurdering Av Bygningers Miljøprestasjon - Beregningsmetode (NS-EN 15978:2011)*. URL: <https://handle.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=600241> (Hentet 17. jun. 2023).
- (jan. 2012b). *Bærekraftige Byggverk — Miljødeklarasjoner — Grunnleggende Produktkategoriregler for Byggevarer (NS-EN 15804:2012+A2:2019)*. URL: <https://handle.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1504552>.
- Tranfield, David, David Denyer og Palminder Smart (2003). «Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review». I: *British Journal of Management* 14.3, s. 207–222. ISSN: 1467-8551. DOI: 10.1111/1467-8551.00375. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1467-8551.00375> (Hentet 6. mar. 2023).
- UNEP (nov. 2022). «2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector». I: URL: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/41133>.
- Web of Science Group (2019). *Web of Science Core Collection*. URL: https://clarivate.libguides.com/ld.php?content_id=35888196 (Hentet 22. feb. 2023).
- WorldGBC (2019). *Bringing Embodied Carbon Upfront*. URL: <https://worldgbc.org/article/bringing-embodied-carbon-upfront/> (Hentet 26. jan. 2023).
- Ylmén, P., D. Peñaloza og K. Mjörnell (2019). «Life Cycle Assessment of an Office Building Based on Site-Specific Data». I: *Energies* 12.13. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en12132588.

Vedlegg

- A Teoretisk rammeverk
- B Mengde- og miljødata - VENT-modell
- C Mengde- og og miljødata - RIVr-modell
- D Mengde- og miljødata - RIE-modell
- E Ekskluderte elementer

