

# Livsløpsvurdering av geopolymerbetong lagd med avgangsmasser fra ilmenittgruvedrift



**Simon Brekke**

## **Veiledere**

Reyn O'Born, Universitetet i Agder  
Frank Pedersen, Norconsult

## **Universitetet i Agder, 2022**

Fakultetet for teknologi og realfag  
Institutt for ingeniørvitenskap



# Obligatorisk egenerklæring

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

|    |   |                                     |
|----|---|-------------------------------------|
| 1. | Jeg erklærer herved at min besvarelse er mitt eget arbeid, og at jeg ikke har brukt andre kilder eller har mottatt annen hjelp enn det som er nevnt i besvarelsen.  | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 2. | Jeg erklærer videre at denne besvarelsen:<br>- ikke har vært brukt til annen eksamen ved annen avdeling/universitet/høgskole innenlands eller utenlands.<br>- ikke refererer til andres arbeid uten at det er oppgitt.<br>- ikke refererer til eget tidligere arbeid uten at det er oppgitt.<br>- har alle referansene oppgitt i litteraturlisten.<br>- ikke er en kopi, duplikat eller avskrift av andres arbeid eller besvarelse. | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 3. | Jeg er kjent med at brudd på ovennevnte er å betrakte som fusk og kan medføre annullering av eksamen og utestengelse fra universiteter og høgskoler i Norge, jf. Universitets- og høgskoleloven §§4-7 og 4-8 og Forskrift om eksamen §§ 31.   | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 4. | Jeg er kjent med at alle innleverte oppgaver kan bli plagiatkontrollert.  | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 5. | Jeg er kjent med at Universitetet i Agder vil behandle alle saker hvor det foreligger mistanke om fusk etter høgskolens retningslinjer for behandling av saker om fusk.   | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 6. | Jeg har satt meg inn i regler og retningslinjer i bruk av kilder og referanser på biblioteket sine nettsider.   | <input checked="" type="checkbox"/> |

# Publiseringsavtale

Fullmakt til elektronisk publisering av oppgaven

Forfatter(ne) har opphavsrett til oppgaven. Det betyr blant annet enerett til å gjøre verket tilgjengelig for allmennheten (Åndsverkloven. §2).

Alle oppgaver som fyller kriteriene vil bli registrert og publisert i Brage Aura og på UiA sine nettsider med forfatter(ne)s godkjennelse.

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

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

Er oppgaven båndlagt (konfidensiell)?  JA  NEI

(Båndleggingsavtale må fylles ut)

- Hvis ja:

Kan oppgaven publiseres når båndleggingsperioden er over?  JA  NEI

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

# Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet ved Universitetet i Agder med ekstern veiledning fra Norconsult. Formålet med oppgaven er å vurdere miljøpåvirkningene til en ny type betong som er utviklet av Saferock i Stavanger. Det har vært et spennende prosjekt som jeg håper hjelper selskapet på veien videre mot en grønnere betongindustri.

Jeg ønsker å rette en stor takk til UiA-veileder Reyn for uvurderlig hjelp under arbeidet med oppgaven, og for faglig påfyll og oppmuntring i forvirrede stunder. Takk også til Frank ved Norconsult og Ida Marie ved Saferock, for innblikk i bransjen og perspektiver utenfra akademia. Jeg har følt meg velkommen, og gleder meg til å bli en del av arbeidsmiljøet til høsten. Til slutt ønsker jeg å takke venner og familie, og spesielt min mor for gjennomlesinger og nådeløse tilbakemeldinger på oppgaven.

Universitetet i Agder, Grimstad

27.05.2022



---

Simon Brekke

# Summary

Global CO<sub>2</sub> emissions from cement production represent a major challenge on the path towards a future of net zero emissions. Alternative concrete binders are therefore being developed, and one such binder is called geopolymers. Mixing industrial wastes and an alkaline solution, such as sodium or potassium hydroxide, the cement can completely replace ordinary portland cement in concrete. The Norwegian company Saferock are developing a new geopolymer cement which utilises mine tailings from ilmenite production, together with potassium hydroxide. Today, millions of tons of mine tailings are deposited in Sokndal, and this is a major environmental concern. The purpose of this master's thesis is to evaluate the environmental impacts of Saferock's geopolymer cement. This is done by using life cycle assessment (LCA) to quantify the emissions that come from producing the geopolymer cement and concrete. The research question is: what are the environmental impacts of geopolymer concrete made with tailings from ilmenite mining?

The results of the LCA study show that the CO<sub>2</sub> emissions from the geopolymer concrete are exactly half of those of a comparable standard concrete. The potassium hydroxide accounts for 90% of the emissions; however the background data on the emissions from this process are insufficient. It is recommended that Saferock acquire potassium hydroxide produced using renewable resources in order to further reduce their emissions. An LCA study was also carried out on a school building in Ørsta to compare the impacts of different building materials. The school was modelled in standard concrete, geopolymer concrete and cross-laminated timber, and was then analysed. The timber version performed best, and the standard concrete performed worst. Overall, however, the total emissions were not that different from each other, due to high emissions from other building components, such as steel columns, insulation and windows.

# Innhold

|   |          |
|---|----------|
| Obligatorisk egenerklæring  | i        |
| Publiseringsavtale  | ii       |
| Forord  | iii      |
| Summary   | iv       |
| Figurer   | viii     |
| Tabeller  | x        |
| <b>1 Introduksjon</b>   | <b>1</b> |
| <b>2 Samfunnsperspektiv</b>   | <b>2</b> |
| 2.1 Miljø . . . . .   | 2        |
| 2.2 Sirkulær økonomi . . . . .  | 4        |
| 2.3 Avgangsmasser fra gruvedrift . . . . .                                | 4        |
| <b>3 Kunnskapsbakgrunn</b>  | <b>6</b> |
| 3.1 Betong . . . . .  | 6        |
| 3.1.1 Portlandsement . . . . .  | 6        |
| 3.1.2 Pozzolaner og andre sementerstatninger . . . . .                    | 6        |
| 3.1.3 Tilslag og tilsetningsstoffer . . . . .                             | 7        |
| 3.2 Geopolymerer . . . . .  | 8        |
| 3.2.1 Geopolymersement og -betong . . . . .                               | 8        |
| 3.2.2 Tidlige geopolymerer . . . . .                                      | 9        |
| 3.2.3 Geopolymerbetong med flyveaske . . . . .                            | 9        |
| 3.2.4 Geopolymerbetong med granulert råjernslag . . . . .                 | 10       |
| 3.2.5 Geopolymerbetong med silikastøv . . . . .                           | 10       |
| 3.2.6 Steinbaserte geopolymerbetonger . . . . .                           | 11       |
| 3.2.7 Geopolymerbetong med avgangsmasser fra wolframgruvedrift . . . . .  | 12       |
| 3.2.8 Geopolymerbetong med avgangsmasser fra ilmenittgruvedrift . . . . . | 13       |
| 3.3 Massivtre . . . . .   | 14       |
| 3.3.1 Limtre (glulam) . . . . .   | 14       |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.3.2    | Krysslaminert tre (CLT) . . . . .   | 15        |
| 3.4      | Livsløpsvurdering . . . . .   | 16        |
| 3.4.1    | Fastsettelse av hensikten og omfanget (goal and scope) . . . . .              | 16        |
| 3.4.2    | Livsløpsregnskapsfasen (LCI – life cycle inventory) . . . . .                 | 17        |
| 3.4.3    | Livsløpseffektvurderingsfasen (LCIA – life cycle impact assessment) . . . . . | 18        |
| 3.4.4    | Livsløpstolkning (interpretation) . . . . .                                   | 19        |
| 3.5      | LCA-programmer . . . . .  | 19        |
| 3.5.1    | One Click LCA . . . . .   | 19        |
| 3.5.2    | SimaPro . . . . .   | 20        |
| 3.6      | Tidligere LCA-studier på geopolymertbetong . . . . .                          | 22        |
| 3.7      | Prosjektering . . . . .   | 22        |
| 3.8      | Modelleringsprogrammer . . . . .  | 23        |
| <b>4</b> | <b>Forskerspørsmål</b>  | <b>25</b> |
| 4.1      | Avgrensninger . . . . .   | 25        |
| <b>5</b> | <b>Case og materialer</b>   | <b>26</b> |
| 5.1      | Saferock sin geopolymertbetong . . . . .                                      | 26        |
| 5.2      | Sæbø skule i Ørsta . . . . .  | 27        |
| 5.2.1    | Skolens oppbygning . . . . .  | 27        |
| 5.2.2    | Tidligere klimagassberegning for Sæbø skule . . . . .                         | 27        |
| <b>6</b> | <b>Metode</b>   | <b>29</b> |
| 6.1      | Litteraturstudie . . . . .  | 29        |
| 6.2      | LCA på Saferock sin geopolymertbetong . . . . .                               | 30        |
| 6.2.1    | Fastsettelse av hensikten og omfanget . . . . .                               | 30        |
| 6.2.2    | Livsløpsregnskapsfasen (LCI) . . . . .  | 31        |
| 6.2.3    | Livsløpseffektvurdering (LCIA) . . . . .                                      | 32        |
| 6.3      | Omprosjektering av Sæbø skule til betong . . . . .                            | 33        |
| 6.4      | LCA på Sæbø skule . . . . .   | 34        |
| 6.4.1    | Sæbø skule med vanlig betong . . . . .  | 35        |
| 6.4.2    | Sæbø skule med geopolymertbetong . . . . .                                    | 36        |
| 6.4.3    | Sæbø skule med massivtre . . . . .  | 37        |
| 6.5      | Sensitivitetsanalyse og scenarioanalyse . . . . .                             | 37        |
| <b>7</b> | <b>Resultater</b>   | <b>38</b> |
| 7.1      | LCA på geopolymertbetong . . . . .  | 38        |
| 7.1.1    | LCI . . . . .   | 39        |
| 7.1.2    | LCIA . . . . .  | 39        |
| 7.2      | Sæbø skule omprosjektert til betong og stål . . . . .                         | 41        |
| 7.2.1    | Lastberegning . . . . .   | 42        |



|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 7.3       | LCI-er på Sæbø skule . . . . .  | 43        |
| 7.3.1     | LCI på Sæbø skule i vanlig betong . . . . .                           | 43        |
| 7.3.2     | LCI på Sæbø skule i geopolymertbetong . . . . .                       | 45        |
| 7.3.3     | LCI på Sæbø skule i massivtre . . . . .                               | 46        |
| 7.4       | LCIA på Sæbø skule . . . . .  | 46        |
| 7.5       | Sensitivitetsanalyse . . . . .  | 49        |
| 7.6       | Scenarioanalyser . . . . .  | 50        |
| <b>8</b>  | <b>Diskusjon</b>  | <b>52</b> |
| 8.1       | LCA på geopolymertbetongen . . . . .                                  | 52        |
| 8.1.1     | Mål og omfang og LCI . . . . .  | 52        |
| 8.1.2     | Utslipp sammenlignet med andre betonger . . . . .                     | 53        |
| 8.1.3     | Usikkerhet rundt KOH . . . . .  | 53        |
| 8.1.4     | Potensiell reduksjon av utslipp i KOH . . . . .                       | 54        |
| 8.1.5     | Praktiske og juridiske utfordringer ved geopolymertbetongen . . . . . | 55        |
| 8.1.6     | Flyveaske, slagg og avgangsmasser som sementerstatning . . . . .      | 55        |
| 8.2       | LCA på Sæbø skule . . . . .   | 55        |
| 8.2.1     | LCI-fasen . . . . .   | 56        |
| 8.2.2     | LCIA . . . . .  | 57        |
| 8.2.3     | Sammenligning av betongskoler . . . . .                               | 57        |
| 8.2.4     | Kostnader og CO <sub>2</sub> -utgifter . . . . .                      | 58        |
| 8.3       | Begrensninger og anbefalinger . . . . .                               | 58        |
| <b>9</b>  | <b>Konklusjon</b>   | <b>60</b> |
| <b>10</b> | <b>Anbefalinger</b>   | <b>61</b> |
|           | <b>Referanser</b>   | <b>62</b> |
|           | <b>Vedlegg</b>  | <b>73</b> |
| A         | E-post fra Titania om avgangsmasser . . . . .                         | 74        |
| B         | Saferock sin geopolymertbetong . . . . .                              | 75        |
| C         | Kaliumhydroksid-prosessen i SimaPro . . . . .                         | 76        |
| D         | Bæresystem, lastarealer og laster i Sæbø skule . . . . .              | 78        |
| E         | Betongprosess lagd i SimaPro, med utslipp . . . . .                   | 81        |
| F         | Sæbø skule i vanlig betong . . . . .                                  | 83        |
| G         | Sæbø skule i geopolymertbetong . . . . .                              | 85        |
| H         | Sæbø skule i massivtre . . . . .                                      | 86        |
| I         | Fremdriftsplan . . . . .  | 88        |
| J         | Referat fra møter og veiledningstimer . . . . .                       | 88        |
| K         | Excel-filer . . . . .   | 88        |
| L         | A3 poster . . . . .   | 88        |

# Figurer

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Utvalgte bærekraftsmål fra FN-sambandet . . . . .   | 2  |
| 2.2  | Globalt sluttbruk av energi og CO <sub>2</sub> -utslipp i 2019, med BAE-næringen i oransje . . . . .    | 3  |
| 3.1  | Wolframgruve og landsby i Panasqueira, Portugal . . . . .   | 12 |
| 3.2  | Titania dagbrudd, deponi og dam . . . . .   | 13 |
| 3.3  | Limtre: Saltaksbjelke, krum bjelke og hjørne i tre-leddet ramme . . . . .                               | 15 |
| 3.4  | CLT-bygning i Linköping, Sverige. Hentet fra Hasslacher . . . . .                                       | 15 |
| 3.5  | Eksempel på prosessflytdiagram for produksjon av armeringsstål . . . . .                                | 17 |
| 3.6  | Utdrag fra nettverksdiagrammet til produksjonen av en passasjerbil i SimaPro . . . . .                  | 21 |
| 5.1  | Sæbø skule vist i Solibri, med og uten fasade . . . . .   | 27 |
| 6.1  | Førsteutkast til prosessflytskjema for Saferock sin geopolymertbetong . . . . .                         | 31 |
| 7.1  | Prosessflytskjema for geopolymertbetongen til Saferock . . . . .  | 38 |
| 7.2  | Effektvurdering for 1 m <sup>3</sup> geopolymertbetong analysert i SimaPro . . . . .                    | 40 |
| 7.3  | Bidrag til global oppvarming per m <sup>3</sup> i forskjellige typer geopolymertbetong . . . . .        | 40 |
| 7.4  | Utslippskilder i den globale og europeiske KOH-prosessen . . . . .                                      | 41 |
| 7.5  | Sæbø skule omprosjektert til betong og stål i Revit . . . . .   | 42 |
| 7.6  | Lastarealer i andre etasje i Sæbø skule . . . . .   | 42 |
| 7.7  | Utdrag fra Excel av lastberegninger i omprosjektert skole . . . . .                                     | 43 |
| 7.8  | Effektvurdering for Sæbø skule i vanlig betong analysert i SimaPro . . . . .                            | 47 |
| 7.9  | Effektvurdering for Sæbø skule i geopolymertbetong analysert i SimaPro . . . . .                        | 47 |
| 7.10 | Effektvurdering for Sæbø skule i massivtre analysert i SimaPro . . . . .                                | 48 |
| 7.11 | Effektvurdering for Sæbø skule i alle tre versjoner . . . . .   | 49 |
| 7.12 | Bidrag til CO <sub>2</sub> -utslipp fra materialer i betong- og geopolymertbetongskolene . . . . .      | 49 |
| 7.13 | Effekt på Sæbø skules CO <sub>2</sub> -utslipp med 100% europeisk, 100% global og blandet KOH . . . . . | 50 |
| 7.14 | Scenario med armeringsstål fra Rest-of-World sammenlignet med Europa . . . . .                          | 51 |
| 10.1 | Hele livsløpseffektvurderingen for den vanlige geopolymertbetongen . . . . .                            | 75 |
| 10.2 | Litt av nettverksdiagrammet til KOH . . . . .   | 76 |
| 10.3 | Største bidrag til CO <sub>2</sub> -utslipp i kaliumhydroksid i SimaPro . . . . .                       | 77 |
| 10.4 | Nytt bæresystem i første etasje . . . . .   | 78 |
| 10.5 | Nytt bæresystem i andre etasje . . . . .  | 78 |
| 10.6 | Lastarealer i omprosjektert første etasje . . . . .   | 79 |

|  |    |
|--|----|
| 10.7 Lastarealer i omprosjektert andre etasje . . . . .  | 79 |
| 10.8 Lastarealer på taket . . . . .  | 80 |
| 10.9 Beregnede laster i Excel . . . . .  | 80 |
| 10.10 Bidrag til kg CO <sub>2</sub> -eq fra 1 m <sup>3</sup> B35 fra Unicon lagd i SimaPro . . . . . | 82 |
| 10.11 Hele livsløpseffektvurderingen for Sæbø skule i betong . . . . .                               | 84 |
| 10.12 Hele livsløpseffektvurderingen for Sæbø skule i geopolymertbetong . . . . .                    | 85 |
| 10.13 Hele livsløpseffektvurderingen for Sæbø skule i massivtre . . . . .                            | 87 |

# Tabeller

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Utdrag fra “Avfall fra industrien” (SSB, 2015) . . . . .  | 5  |
| 3.2  | NS-EN 1990: NA.A1.2(B) – Dimensjonerende verdier for laster (STR/GEO) (Sett B)                          | 23 |
| 5.1  | Livsløpsfasene som er vurdert i klimagassberegningen til Norconsult for Sæbø skule .                    | 28 |
| 5.2  | Resultatet av Norconsult sin klimagassberegning på et referansebygg og Sæbø skule i massivtre . . . . . | 28 |
| 6.1  | Sammenligning av utslipp fra EPD fra Unicon og ulike betongprosesser i SimaPro .                        | 36 |
| 7.1  | Betongreseptene til den vanlige og den optimale geopolymertbetongen . . . . .                           | 39 |
| 7.2  | Oppbygning av den vanlige geopolymertbetongen i SimaPro . . . . .                                       | 39 |
| 7.3  | Materialliste for Sæbø skule prosjektert i betong . . . . .   | 44 |
| 7.4  | Oppbygning av betongyttervegger i SimaPro . . . . .   | 45 |
| 7.5  | De totale utslippene i de utvalgte effektkategoriene for de tre skolene . . . . .                       | 46 |
| 7.6  | Resultat av sensitivitetsanalyse på betong- og geopolymertbetongskolene . . . . .                       | 50 |
| 7.7  | Resultat av sensitivitetsanalyse på geopolymertbetong . . . . .   | 50 |
| 10.1 | Oppbygning av Sæbø skule med betong i SimaPro . . . . .   | 83 |
| 10.2 | Materialliste for Sæbø skule i massivtre . . . . .  | 86 |

# 1 | Introduksjon

Det mest brukte byggematerialet i verden er betong [1]. Det består av sement, vann, tilslag og eventuelle tilsetninger. Produksjonen av klinker i sementen er en karbonintensiv prosess som står for hoveddelen av CO<sub>2</sub>-utslippene i betongen. Med det enorme årlige forbruket av betong fører dette til at sementindustrien står for rundt 8% av verdens klimagassutslipp [2]. I følge FNs klimapanel må klimagassutslippene drastisk reduseres for å ikke få katastrofale følger i fremtiden [3]. Et av tiltakene for å oppnå dette målet er å finne løsninger som reduserer utslippene i betongindustrien.

En miljøutfordring som har fått mye omtale i Norge er gruvedrift. Når verdifulle mineraler utvinnes, skilles det ut store mengder avgangsmasser som ofte er verdiløse. Disse må enten deponeres på land eller i vann, og begge alternativene medfører totalødeleggelse av økosystemet ved deponiet [4]. Deponering har i tillegg flere negative konsekvenser knyttet til både miljø, bærekraft og økonomi. Felles for betongindustrien og gruveindustrien er at de begge står overfor betydelige utfordringer, hvor løsningen ikke er så enkel som å bare redusere driften; begge industriene er helt nødvendige i overgangen til en karbonnøytral verden, og vil derfor fortsette å produsere [5], [6].

Det vanligste tiltaket for å redusere CO<sub>2</sub>-utslipp i sement er å erstatte deler av den karbonintensive klinkeren med biprodukter som flyveaske, råjernslag og silikastøv [7]. Sementerstatningene utgjør gjerne mellom fem og 35% av sementens masse, som vil si at mye av klinkeren fortsatt gjenstår. Et alternativ til tradisjonell portlandsement ble utviklet på 70-tallet og kalles geopolymersement [8]. Denne bruker aluminiumsilikater blandet med en alkalisk løsning, og er helt uten klinker. Sementen kan blandes med vann og tilslag og kalles da en geopolymerbetong. Ingrediensene som brukes i geopolymersementer varierer, men ofte er målet å bruke biprodukter fra industri. Det norske selskapet Saferock har utviklet en ny geopolymerbetong som benytter seg av avgangsmasser fra gruvedrift i Sør-Norge. I denne oppgaven blir miljøkonsekvensene ved denne nye geopolymerbetongen kartlagt og vurdert.

## 2 | Samfunnsperspektiv

Bygge-, anleggs-, og eiendomsnæringen (BAE) er en av de største industriene i verden, og består av alt fra hus til skyskrapere, og fra kloakkrør til motorveier. Den har stor estetisk og funksjonell påvirkning på dagliglivet til mennesker, den utgjør en viktig del av privat og offentlig sektor, og den bidrar til enorme mengder klimagassutslipp og naturinngrep verden over. I dette kapitlet vil noen av disse samfunnsaspektene presenteres og drøftes.

### 2.1 Miljø

“FNs bærekraftsmål er verdens felles arbeidsplan for å utrydde fattigdom, bekjempe ulikhet og stoppe klimaendringene innen 2030”, i følge FN-sambandet [3]. Det finnes 17 overordnede mål, hvor det i dette kapitlet er naturlig å trekke frem målene i Fig. 2.1. Etersom bærekraftsmålene er relativt generelle vil det videre i kapitlet fokuseres på mer konkrete tiltak.

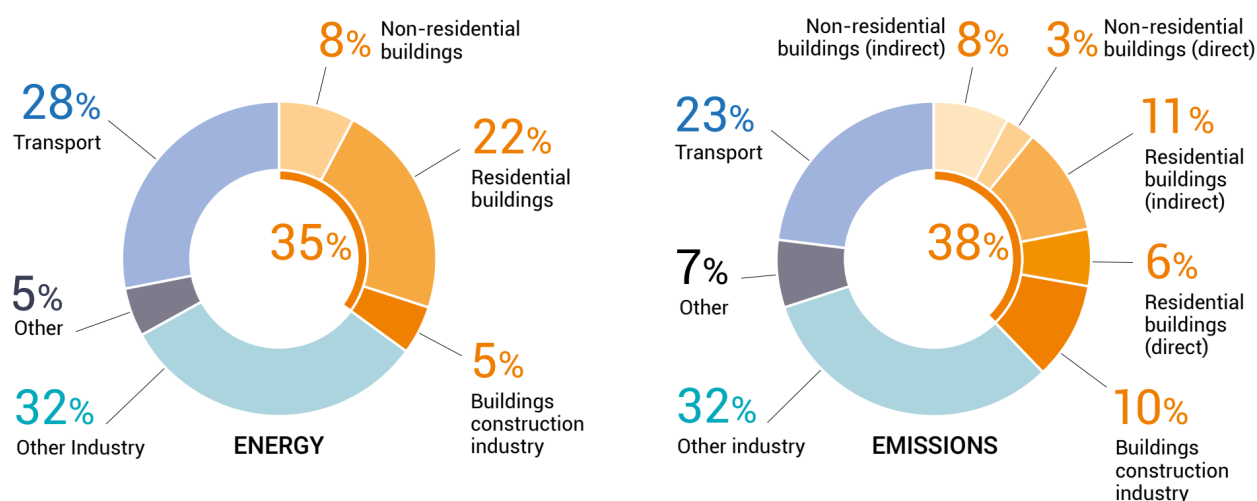


Figur 2.1: Utvalgte bærekraftsmål fra FN-sambandet [3].

Det internasjonale energibyrået (IEA) er en organisasjon som samarbeider med internasjonale energiaktører som FNs klimakonvensjon, OPEC og G7 [9]. En av aktivitetene til organisasjonen er å analysere verdens energisektor og måle den opp mot Parisavtalen sitt mål om netto nullutslipp fra rundt 2050 [10]. I rapporten “Net Zero by 2050” deles energisektoren inn i hovedkategoriene bygninger, industri, transport, strøm og oppvarming, og annet. Rapporten inneholder en detaljert oversikt med hundrevis av individuelle mål og tiltak for å begrense temperaturstigningen til 1,5 grader. Noen eksempler på tiltak er å elektrifisere all privattransport, bytte ut kull- og gasskraft med sol-, vind- og atomkraft, fange CO<sub>2</sub> i stor skala og å gjøre både nye og eksisterende bygninger karbonnøytrale. Det innebærer en “komplett transformasjon av det globale energisystemet”, og det er en underdrivelse å kalle målet om globalt netto nullutslipp for ambisiøst. Likevel er det i følge FNs klimapanel [11] nødvendig for å forhindre katastrofale menneskeskapte klimaendringer i verden.

For å kunne si noe om BAE-næringen sin rolle i det globale klimaperspektivet er det valgt å se på data fra FNs miljøprogram sammen med rapportene fra IEA. På grunn av koronaviruset ble 2020 og 2021 unntaksår, både på industrielt og menneskelig nivå. Det var store svingninger i produksjonen av varer, transport og forbruk av energi på steder som skoler og fabrikker [12]. Det er derfor valgt å bruke data fra 2019 og tidligere ettersom disse representerer mer normale år. I følge miljøprogrammets rapport [13] stod BAE-næringen for 35% av sluttbruket av energi og 38% av klimautslippene i verden i 2019. Som Fig. 2.2 viser er energibruket og utslippene til BAE-næringen delt inn i kategoriene boligbygg, andre bygg og “Buildings construction industry”. Sistnevnte vil si produksjon av byggematerialer og utgjør 10% av verdens klimagassutslipp.

#### Global share of buildings and construction final energy and emissions, 2019



Figur 2.2: Globalt sluttbruk av energi og CO<sub>2</sub>-utslipp i 2019, med BAE-næringen i oransje. Hentet fra FNs miljøprogram [13].

Betong er som kjent verdens mest brukte bygningsmateriale, og blir regnet som det mest brukte materialet etter vann [1]. På grunn av de enorme mengdene som produseres og en karbonintensiv tilvirkning av sement spiller dermed materialet en viktig rolle i det globale klimaregnskapet. Produksjonen av sement innebærer to hovedkilder til utslipp (forenklet): oppvarming av kalkstein, som regel ved hjelp av fossile brensler; og frigjøring av CO<sub>2</sub> når kalksteinen kalsinerer og danner klinker [2], [14]. Totalt står sementproduksjon for opptil 8% av de globale CO<sub>2</sub>-utslippene. Utenom forbrenning av fossile brensler og avskoging, er produksjon av sement den største bidragsyteren til menneskeskapte CO<sub>2</sub>-utslipp til atmosfæren [2]. Det er derfor av stor interesse å jobbe mot løsninger som kan redusere utslippene, både ved å forbedre produksjonsprosessen til sement og ved å utvikle sementerstatninger. I rapporten “Net Zero by 2050” [10, s. 127-132] foreslår IEA å redusere klinker-til-sement-forholdet fra 0,71 (som det er i 2020) til 0,57 innen 2050. Det vil si at andelen kalsinerte klinker i sement erstattes med andre tilsetninger. For å kutte de resterende utslippene fra sementen kreves det karbonfangst, -utnyttelse og -lagring (CCUS) og andre innovative løsninger; og hele 93% av den globale sementproduksjonen må foregå med slike tiltak.

Det er ikke bare byggematerialer som er kilder til bygningsutslipp; på grunn av sine lange levetider og

store energibehov utgjør bruksfasen til bygninger den største delen av det totale utslippet. Figur 2.2 viser at direkte og indirekte utslipp fra bygninger utgjorde 28% av verdens utslipp i 2019. Disse kommer hovedsaklig fra kilder som strømbruk og -produksjon, oppvarming, matlaging, varmtvann, osv. Det er derfor tydelig at både energieffektiviteten til bygninger og energikildene de bruker er avgjørende for utslippene. IEA har en rekke rapporter som følger utviklingen av energibruk i bygninger, målt opp mot nullutslippsmålet [15]–[22]. Av disse er det kun belysning som er “i rute”, takket være innføringen av LED-lys. De andre kategoriene krever derimot videre arbeid, som å øke markedsandelen til varmepumper fra 20 til 80%, øke antallet boliger som har solceller fra 250 til 1 200 millioner, og å gjøre nye og gamle bygninger karbonnøytrale. Som med resten av de foreslåtte tiltakene i energisektoren krever også dette en omveltning av BAE-næringen gjennom utvikling og implementering av nye teknologier, politiske tiltak i stor skala, og elektrifisering gjennom fornybar energi.

## 2.2 Sirkulær økonomi

Dagens økonomi er i høy grad lineær og innebærer å hente ut ressurser fra kloden, bearbeide og bruke dem, og så kaste dem [23]. Sirkulær økonomi beskriver et kretsløp hvor færre ressurser hentes ut og mengden avfall reduseres kraftig. Dette gjøres blant annet ved å slutte å se på avfall og sløseri som uunngåelig, og heller gjøre tidlige designvalg som reduserer disse. En sirkulær økonomi innebærer også å danne ressurslooper, hvor avfallsstoffer og andre biprodukter brukes til nye formål i andre sammenhenger [24]. Produkter lages med høyere kvalitet og mulighet for reparasjon og oppgradering slik at de varer lengre. Økosystemer gjenbygges og styrkes gjennom naturlige prosesser, som å bruke bioavfall til å styrke jorda og å redusere bruk av insektsmiddel. Sirkulær økonomi henger tett sammen med tiltakene beskrevet i IEA sine rapporter ovenfor.

I juni 2021 la Solberg-regjeringen frem *Nasjonal strategi for ein grøn, sirkulær økonomi* [25]. Rapporten legger frem hvordan Norge kan bli et foregangsland i sirkulær økonomi, og peker spesielt på noen områder hvor det er størst muligheter for å oppnå sirkularitet. Bygg og anlegg er et av disse områdene, sammen med prosessindustrien, bioøkonomien og handels- og tjenesternæringene. I følge rapporten står BAE-næringen for 15% av klimagassutslipp i landet, og bidrar også med mest avfall. 26% av avfallet blir deponert, mens 70% blir gjenvunnet eller energiutnyttet. Det blir foreslått å redusere bruken av nytt materiell ved å rehabilitere eksisterende bygg istedenfor å bygge nytt. Gjenvinningsgraden til bygningsmateriell og avfall forsøkes også å økes gjennom forskning og pilotprosjekter innen nye teknologier og løsninger. Tabell 2.1 viser det totale avfallet fra norske næringer i 2015, i tillegg til mengden levert til deponering.

## 2.3 Avgangsmasser fra gruvedrift

En mye omtalt industri som genererer avfall er gruveindustrien. Tabell 2.1 viser at mineralproduktindustrien leverer nest-mest avfall til deponering. I 2019 fikk Nussir ASA driftskonsesjon til utvinning av kopper og å bruke Repparfjorden som sjødeponi [27]. Saken har møtt mye motstand fra blant



Tabell 2.1: Utdrag fra “Avfall fra industrien” (SSB, 2015) [26].

| Næring (2015)                           | Totalt avfall* | Levert til deponering* |
|---|----------------|------------------------|
| Nærings-, drikkevare- og tobakkindustri | 278            | 10                     |
| Mineralproduktindustri                  | 104            | 38                     |
| Maskinindustri                          | 84             | 1                      |
| Papir- og papirvareindustri             | 83             | 41                     |
| Metallindustri                          | 77             | 15                     |
| Kjemisk industri                        | 42             | 22                     |
| Metallvareindustri                      | 41             | 1                      |
| Trelast- og trevareindustri             | 37             | 2                      |
| <b>Alle næringer</b>                    | <b>906</b>     | <b>135</b>             |

\*i 1000 tonn

annet miljøaktivister, fiskere, Sametinget og politiske partier [28]–[30]. I 2020 fikk Nordic Mining siste nødvendige godkjenning til å starte gruvedrift med deponi i Førdefjorden [31]. I avfallsforskriften [32] er avgangsmasser definert som følgende:

*Avgangsmasse:* fast avfall eller slam som gjenstår etter behandling av mineraler ved en separasjonsprosess (f.eks. knusing, maling, størrelsessortering, flotasjon og andre fysisk-kjemiske teknikker) for å trekke ut verdifulle mineraler fra mindre verdifull stein.

Miljødepartementet gjorde i 2019 en vurdering av forbud mot sjødeponi av avgangsmasser fra gruvevirksomhet [4]. Alternativet til sjødeponi er deponi på land ettersom det ikke er realistisk å drive gruvevirksomhet uten noen form for deponering. I følge vurderingen medfører begge løsningene “betydelig arealbeslag hvor alt liv i deponiområdet forsvinner”, men sjøliv re-etableres raskere etter endt deponering. Selv om begge løsningene medfører betydelige miljøskader er landdeponier mer usikre, både økonomisk, miljømessig og sikkerhetsmessig. Konklusjonen til Miljødepartementet er at det vil være urimelig å forby sjødeponering, blant annet fordi dette ble vurdert til å være den beste løsningen i både Repparfjorden og Førdefjorden.

Gruveselskapet Titania A/S i Sokndal bruker et såkalt drenerende landdeponi til avgangsmassene fra ilmenittutvinningen [4]. Det vil si at massene har tilgang til oksygen og dermed forvitrer raskere enn under vann, noe som fører til utlekking av metaller. Deponiet er demmet opp, og i november 2021 ble trykket på demningen vurdert til å være høyere enn den er dimensjonert for [33], [34]. Deponiet er dessuten beregnet fullt innen 2024 [35] og Titania trenger dermed nye deponier. Det er rimelig å konkludere at å finne et nytt bruksområde til avgangsmassene vil være fordelaktig både i et miljømessig og sirkulær-økonomisk perspektiv.

## 3 | Kunnskapsbakgrunn

Denne oppgaven handler om et relativt nytt byggemateriale kalt geopolymerebetong. Kapitler 3.1 *Betong* og 3.2 *Geopolymerer* er viet til historien og materialteknologien bak de to hovedtypene betong i oppgaven. Dette legger grunnlaget for å forstå hvilke materialer og prosesser som inngår i betongene, og hvilke utfordringer som foreligger. Betongene skal også sammenlignes med massivtre, som er beskrevet i kapittel 3.3. For å vurdere miljøkonsekvenser ved byggematerialer utføres det livsløpsvurderinger. Denne metodikken er gjennomgått i 3.4 *Livsløpsvurdering*. Til slutt blir det gitt en forenklet gjennomgang av prosjektering og modellering av konstruksjoner, som skal brukes senere i oppgaven.

### 3.1 Betong

En betongresept består som regel av en kombinasjon av følgende ingredienser: sement, vann, flyveaske eller andre sementerstatninger, tilslag og tilsetningsstoffer. Dette kapitlet vil ta for seg ingrediensene som brukes i betong og hvilken påvirkning de har på materialet.

#### 3.1.1 Portlandsement

Siden 2013 har det på verdensbasis blitt produsert over fire milliarder tonn sement hvert år [5]. Portlandsement, den desidert vanligste sementtypen, ble brukt helt tilbake i antikken, men den moderne versjonen ble “gjenoppfunnet” og patentert i 1824 [36]. Hovedingrediensen i portlandsement er kalkstein, som hovedsaklig består av kalsiumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) [37]. Knust kalkstein tilsettes andre mineraler som kvarts, bauxitt, silisiumdioksid og jernoksid, og males til råmel [38], [39]. Råmelet varmes først til 5 til 600 °C i et syklontårn før det går inn i kalsinatoren [40]. Ved rundt 840 °C kalsinerer kalsiumkarbonatet og danner kalsiumoksid ( $\text{CaO}$ ) og frigjør store mengder  $\text{CO}_2$ . Råmelet brennes så i roterende ovner ved rundt 1 450 °C og danner klinker. De bråkjøles og males til slutt til sement under tilsetning av 3 til 7% gips og eventuelt andre tilsetninger som flyveaske og granulert råjernslag [38].

#### 3.1.2 Pozzolaner og andre sementerstatninger

Pozzolaner er materialer som inneholder høye andeler silisium og eventuelt aluminium, og kan forekomme naturlig fra for eksempel vulkansk aktivitet, eller fra industrielle prosesser [41]. Pozzolaner reagerer ikke med vann alene, men ved å tilsette dem under malingen av klinker danner de sementlimet

kalsiumsilikathydrat (C-S-H) [42]. Dette skjer gjennom en reaksjon med kalsiumhydroksid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) og fukt, og kalles en pozzolansk reaksjon [43]. De vanligste pozzolanene i sement er flyveaske fra kullkraftverk, silikastøv fra ferrosilisiumindustrien og granulert råjernslagge fra råjernfremstilling [44], [45]. Egentlig er slagge<sup>1</sup> et såkalt latent hydraulisk materiale, som vil si at det kan reagere med vann alene. Men slagge trenger uansett portlandsement for å akselerere prosessen, og er dermed ikke veldig ulikt pozzolanene [46]. Samlebetegnelsen for disse materialene er “supplementary cementitious materials” (SCM), eller simpelthen sementerstatninger. Ved å tilsette dem i vanlig sement kan mengden kalkstein i sementen reduseres, og med det, mengden som må brennes og kalsineres; og følgelig reduseres  $\text{CO}_2$ -utslippet også.

Ulike sementtyper og -erstatninger er beskrevet i den norske standarden NS-EN 197-1 *Sammensetning, krav og samsvarskriterier for ordinære sementtyper* [7, s. 14-15]. De fem ordinære sementklassene er definert som følger:

|         |                         |
|---------|-------------------------|
| CEM I   | Portlandsement          |
| CEM II  | Portlandblandingssement |
| CEM III | Slagge-sement           |
| CEM IV  | Pozzolansement          |
| CEM V   | Blandingssement         |

Sementklassene defineres ut fra innholdet av portlandsement og andre sementerstatninger. Med unntak av CEM I som inneholder 95 til 100% portlandsement deles klassene inn i flere sementtyper. Totalt er det 27 sementtyper, hvor hele 19 er CEM II. Felles for denne klassen er at klinkertallet  $K$  (mengden portlandsement) er mellom 65 og 94%. For eksempel er CEM II/B-S en portlandslagge-sement som inneholder mellom 21 og 35% slagge. Klassene III, IV og V har klinkertall lavere enn 65%, og slagge-sementen CEM III/C kan inneholde hele 95% slagge.

### 3.1.3 Tilslag og tilsetningsstoffer

Tilslag består som regel av sand, grus, stein og pukke, og utgjør rundt 60 til 70% av totalvolumet i betong [47]. Tilslag er som regel helt naturlige mineraler som ikke har blitt bearbeidet utover vasking, sikting og eventuelt knusing [48]. Den norske standarden NS-EN 12620 *Tilslag for betong* [49] deler tilslag inn i størrelsene grovt, fint, naturlig gradert 0/8, samfengt og filler. Nedre og øvre siktstørrelser betegnes henholdsvis med bokstavene  $d$  og  $D$ , eller med uttrykket  $d/D$ . Fint tilslag har en øvre siktstørrelse  $D \leq 4$  mm, mens grovt tilslag gjelder for  $D \geq 4$  mm og  $d \geq 2$  mm. Naturlig gradert 0/8 tilslag har “glasial og/eller fluvial opprinnelse” med  $D \leq 8$  mm. Samfengt tilslag vil si blandinger av fint og grovt tilslag opp mot 0/45 mm. Filler er svært fint tilslag hvor minst 70% går gjennom 0,063 mm-sikten.

Til tross for det store volumet tilslaget opptar i betongen, er det som regel bindemiddelet som blir ansett som avgjørende for styrken til betongen [47]. Dette er fordi bergartene som brukes i tilslag stort sett har en-aksiale trykkfastheter på over 100 MPa, mens vanlige sementer har lavere

<sup>1</sup>Med slagge menes alltid granulert råjernslagge i denne oppgaven.

trykkfasthet. Likevel fant en studie fra Vegvesenet [50] tilslag med så lave trykkfastheter at de kunne være uegnet for betongkvaliteter over B45. Dermed er det ikke sikkert at tilslag alltid er av tilstrekkelig kvalitet, selv om dette ofte er blitt tatt for gitt i Norge. I tillegg til styrke har tilslaget stor påvirkning på faktorer som betongens E-modul, temperaturutvidelseskoeffisient og reduksjon av svinn [48].

Betongens egenskaper i fersk og herdet tilstand kan endres etter ønske ved å tilsette kjemiske tilsetningsstoffer. Disse utgjør ikke mer enn én prosent av sementmassen, iht. pkt. 5.5 i NS-EN 197-1, men kan likevel påvirke betongen drastisk. Et eksempel er sprøytebetong i tunneltak, hvor betongen blir tilsatt en akselerator på vei ut av dysen [51]. Dermed herder betongen i det lille sekundet fra den sprøytes ut og kleber seg til taket. Andre eksempler på tilsetningsstoffer er retardere, som forlenger herdetiden; plastiserende og superplastiserende stoffer, som gir økt vannreduksjon, og dermed økt styrke og redusert svinn; og luftinnførende tilsetninger, som øker frostbestandigheten [52].

## 3.2 Geopolymerer

Ordet *geopolymer* består av *geo*, som er noe som kommer fra jorda, og *polymerer*, som er lange kjeder av molekyler som binder seg sammen i et repeterende mønster [53], [54]. Geopolymerer er hovedsaklig uorganiske materialer, og kalles gjerne for mineralske polymerer eller uorganiske polymerer [8, s. 19]. I denne oppgaven vil begrepet geopolymer bli brukt.

### 3.2.1 Geopolymersement og -betong

Geopolymerer lages ved å blande pulveriserte aluminiumsilikater med en flytende aktivator [55]. Aluminiumsilikater er stoffer og mineraler som er aluminium- og silikatholdige. Dette gjelder de fleste bergarter, samt tidligere nevnte stoffer som flyveaske og slagg [55], [56]. Aktivatoren er en alkalisk løsning med høy pH-verdi, som for eksempel natriumhydroksid (NaOH – også kjent som lut eller kaustisk soda), eller kaliumhydroksid (KOH). Når aluminiumsilikatene blandes med aktivatoren oppløses stoffet og det blir dannet aluminosilikatgeler [57]. En gel kjennetegnes ved at den består av to sammenhengende faser, hvor minst én er flytende, og de to fasene danner sammen et mer eller mindre fast nett [52, s. 17]. Hele prosessen kalles geopolymerisasjon og resultatet er en geopolymersement [57]. Som med vanlig portlandsement kan geopolymersementen blandes med fint og grovt tilslag og vann, og man får da geopolymerbetong. Tilsetningsstoffer er imidlertid hovedsaklig lagd for portlandsement, og er dermed ikke nødvendigvis like effektive i geopolymerbetong [58].

De vanligste aktivatorene i geopolymersement, NaOH og KOH, fremstilles ved elektrolyse av natriumklorid (salt) eller kaliumklorid oppløst i vann [59], [60]. Så evaporeres løsningen ved hjelp av damp, og natrium- eller kaliumhydroksidet skilles ut [61, s. 702-706]. Kloridet krystalliserer ved fordamping, og resirkuleres. Energibehovet for ett kilo KOH (90% rent) er rundt 6,5 MJ til elektrolysen og 6,2 MJ til fordampingen. I motsetning til portlandsementproduksjon, som krever fossilt brensel til sementovnene og som slipper ut mye CO<sub>2</sub> fra kalsineringen, er det mulig å produsere aktivator med fornybare energikilder og redusere utslippene.

### 3.2.2 Tidlige geopolimerer

Da geopolimerer først ble definert på 70-tallet av J. Davidovits [62], var formålet å finne varmebestandige og brannsikre byggematerialer. Diverse aluminiumsilikater ble undersøkt, og gjennombruddet kom ved å blande meta-kaolin, som er brent kaolin-leire, med natriumhydroksid og natriumsilikat [8]. Davidovits fant ut at geopolimerer kunne produseres ved lave temperaturer (under 100 °C) og samtidig tåle opptil 1 200 °C. Disse første geopolimerene ble brukt til å brannsikre trepanel ved å påføre et lag geopolimer på hver side.

Bruken av geopolimerer i betong kom først på 80-tallet, da Davidovits, i et samarbeid med sementprodusenten Lone Star Industries, patenterte en geopolimerbetong med tilsatt granulert råjernslag. Denne kunne brukes til langtidssikring av farlig avfall. En annen geopolimerbetong, kalt Pyrament Blended Cement, ble også utviklet og bestod av 80% portlandsement og 20% geopolimermaterialer. Siden den gang har flere geopolimerbetonger blitt utviklet. Videre blir et utvalg av dem presentert.

### 3.2.3 Geopolimerbetong med flyveaske

I en artikkel fra 1994 av J. Wastiels [63] kalt “Mineral polymer based on fly ash” (MiP) beskrives en betong bestående av flyveaske, natriumsilikatløsning, 0/0,6 kvartssand og 7/14 grus. Natriumsilikatløsningen består av natriumhydroksid, silisiumdioksid og vann. MiP-betongen herdet i 60 °C i 24 timer, før den ble trykktestet til 56 MPa. Betongen ble også testet mot syreinntrengning, og konklusjonen var at den hadde “excellent resistance”. I en patent som ble godkjent i 1997 [64] blir det dog nevnt at MiP-betongen har for lang herdetid. Dette skyldes den store mengden natriumsilikatløsning, som igjen består av mye silisiumdioksid ( $\text{SiO}_2$ ) i forhold til natriumoksid ( $\text{Na}_2\text{O}$ ). Patenten, som heter “Fly ash cementitious material and method of making a product”, beskriver en hurtigherdende og sterk bindemiddelblanding, kalt CAFA (CAFA binder mixture). CAFA består av flyveaske og alkali-metalliske silikatbindemidler. Innholdet i disse bindemidlene er detaljert beregnet slik at det endelige  $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ -forholdet blir lavere enn i MiP-betongen. Det anbefales å bruke mellom 60 og 80% flyveaske i CAFA-blandingen. Den herdes ved 40 til 120 °C i opptil 60 timer. Det tillates også å tilsette opp til 15% portlandsement i blandingen. Blandingen kan blandes med fint og grovt tilslag for å få CAFA-betong. Dette er dermed en geopolimerbetong med flyveaske, selv om patenten og artikkelen bruker begrepet mineralsk polymer.

Forskeren bak geopolimerbetong, J. Davidovits, kritiserer flyveaske-baserte geopolimerbetonger som den ovenfor på grunn av de korroderende og irriterende alkaliske løsningene som brukes [8, s. 434-436].  $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ -forholdet i CAFA-blandingen er mellom 0,20 og 0,75, som tilsvarer konsentrert NaOH, altså lut. I patenten anbefales CAFA-betong til vanlige betongarbeider, som vegger, gulv og veibygging; dette mener Davidovits er “nonsens” med tanke på arbeidernes sikkerhet. Som nevnt tok patenten utgangspunkt i at  $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ -forholdet i den opprinnelige artikkelen fra 1994 var for høyt, og dermed ga for lang herdetid. Betongprøvene i artikkelen hadde  $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ -forhold mellom 0,80 og 1,7 [63]. For å få en mild, basisk og homogen blanding anbefaler Davidovits et  $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ -forhold

mellom 1,4 og 2,0 [8, s. 296]. Dette gir dog utilstrekkelig trykkfasthet (mellom 20 og 25 MPa) ved bruk av flyveaske, noe som også er tydelig i resultatene fra 1994-prøvene; blandingene med 1,4 og 1,7 SiO<sub>2</sub>:Na<sub>2</sub>O-forhold hadde vesentlig lavere trykkfasthet enn de med 1,0 og 0,70 [63, s. 137-138].

### 3.2.4 Geopolymerbetong med granulert råjernslag

Fra begynnelsen av 1900-tallet ble det utviklet såkalte alkali-aktiverte sementer som bestod av råjernslag, en aktivator og eventuelt ekstra alkalier [65]. Blandingsforholdet i disse sementene er gjerne 3% aktivator og 97% slag [8, s. 11-12], og karboninnholdet i aluminiumsilikatet er høyt. Geopolymerer består derimot av en høyere andel aktivator (20 til 30% i CAFA-patenten [64]) og aluminiumsilikatet har et lavt karboninnhold. Den første geopolymerbetongen som brukte slag var den tidligere nevnte Pyrament utviklet i 1983 [8, s. 216-221]. Den lages ved å blande 15 til 26% slag med en blanding som blant annet består av aktivator, vann og aluminiumsilikater [66]. Sementen skal ha rask herdetid og høy tidligstyrke. Den kan også blandes med opptil 80% portlandsement for å få den tidligere nevnte Pyrament Blended Cement.

Davidovits beskriver en annen geopolymersement med slag som han kaller for "Cement Base" [8, s. 231-241]. Denne består av om lag en fjerdedel hver av meta-kaolin, aktivator av vannglass (47% kaliumsilikat og 53% vann), slag og tilsatt vann. Det er både meta-kaolinen og slagget som reagerer med aktivatoren, ettersom begge er aluminiumsilikater. Sementen har en trykkfasthet på rundt 30 til 65 MPa etter åtte dager, avhengig av andelen meta-kaolin; mer gir nemlig lavere trykkfasthet, men sørger for at sementen får bedre korrosjonsmotstand. Som navnet tilsier kan sementen brukes som et grunnlag for videre tilsetninger. For eksempel foreslår Davidovits å tilsette flyveaske tilsvarende 38% av totalvekten til sementen [8, s. 296-297]. Dermed får man en geopolymersement med flyveaske og slag som har høy styrke og samtidig er trygg å jobbe med.

I en studie fra 2016 [67] sammenlignes størkningstiden og bearbeidbarheten til geopolymerbetonger med ulike andeler flyveaske og slag. Her ble det brukt aktivator i pulverform som løses opp i sementblandingen. Dette anses som tryggere enn å bruke flytende aktivator som i de tidligere nevnte geopolymerene, men de ferske egenskapene til sementen og betongen kan endre seg. Andelen flyveaske i sementene i studien var prosentvis 100, 90, 70, 60, 50, 40 og 0; andelen slag var henholdsvis de resterende prosentene. Det ble tilsatt sand som tilslag og vann. Resultatet var at blandingene med 90 og 100% flyveaske hadde alt for lang størkningstid (over 13 timer), og 28-dagers trykkfasthet under 20 MPa. Ved å legge til mer og mer slag ble trykkfastheten økt og størkningstiden redusert, men det ble også bearbeidbarheten til mørtelen. Studien viser at ferskeegenskapene til geopolymerbetonger er avhengige av blandingsforholdet i resepten. Dette er spesielt viktig da tradisjonelle tilsetningsstoffer, som retardere og akseleratorer, ikke har like god effekt i geopolymerer.

### 3.2.5 Geopolymerbetong med silikastøv

Silikastøv er som nevnt tidligere et industrielt biprodukt fra silisium- og ferrosilisiumproduksjon. Støvet består av sfæriske partikler på mellom 0,05 og 1  $\mu\text{m}$  i diameter [8, s. 268], som er rundt en hundredel av størrelsen til portlandsementpartikler [52, s. 215]. I vanlig betong kan silikastøv erstatte

4 til 10% av sementen. I geopolymerebetong kan silikastøv erstatte deler av aluminiumsilikatene, som slagg og flyveaske. En studie fra 2022 [68] testet geopolymerebetong med slagg som ble erstattet av ulike andeler silikastøv (20, 40 og 60%). Det ble brukt grovt og fint tilslag og aktivator av NaOH. Resultatet av trykkfasthetsprøvene viste en økning i styrke i betongene med 20 og 40% silikastøv, men en reduksjon ved 60%.

En annen studie [69] sammenlignet hvordan tilsetninger av silikastøv og risskallaske påvirket frostbestandigheten til geopolymerecement med meta-kaolin. Risskallaske er et biprodukt fra risproduksjon, hvor riskorn males ned og skallet brennes. Asken fra denne brenningen inneholder rundt 90% silisiumdioksid og brukes blant annet som sementerstatning. I studien ble meta-kaolinen erstattet med 10, 20, 30 og 40% av hvert stoff. Prøvene gjennomgikk opptil 50 fryse-/tinesykler. Resultatene var at risskallaske hadde størst forbedring på både trykkfastheten og frostbestandigheten til sementen. Størrelsen på partiklene var rundt en tredjedel av silikastøvet og meta-kaolinen, slik at asken fylte hulrommene mellom porene bedre. Ved mer enn 20% tilsetning av risskallaske ble dog påvirkningen på sementen negativ. For silikastøv var 10% den optimale mengden. Det konkluderes med at begge stoffene er velegnede tilsetninger i geopolymerecement for å forbedre frostbestandigheten. I et nordisk perspektiv er det derimot naturlig å fokusere på silikastøv foran risskallaske på grunn av tilgjengelighet.

### 3.2.6 Steinbaserte geopolymerebetonger

Davidovits [8, s. 250-259] beskriver en studie fra 1999 hvor 16 bergartsdannende mineraler ble knust og blandet med aktivatorene NaOH og KOH. Hver blanding bestod av 50% mineral, 25% kaolinit og 25% aktivator. Kaoliniten var nødvendig for å få tilstrekkelig aluminium-solvatisering (binding av løse partikler). Prøvene ble støpt og herdet ved 35 °C i 72 timer. Solvatiseringen av silisium og aluminium var høyest ved bruk av KOH-aktivator. Det var også trykkfastheten, men styrkene var fremdeles lave; fra 6,7 til 18,9 MPa, med et gjennomsnitt på 11,5 MPa. De to høyeste trykkfasthetene var i blandingene med mineralene stilbitt og grossular.

En annen studie fra 1999 [70] forsøkte å gjøre geopolymerecement billigere ved å erstatte deler av kalium-aktivatoren med vulkansk tuff, som er en porøs bergart dannet av vulkansk aske. Mengden aktivator ble redusert fra 25% til mellom 4 og 9%. Det ble testet vulkansk tuff fra tolv forskjellige kilder rundt Middelhavet. Tuffen ble iblandet meta-kaolin og sammen utgjorde de 68 til 76% av blandingen. Slagg stod for de siste 20 til 23 prosentene. I halvparten av prøvene var tuffen kalsinert ved 800 °C, som for det meste økte trykkfastheten sammenlignet med den ubehandlede tuffen. Det var stor variasjon i fasthetene til de forskjellige sementene, med den laveste på 22 MPa og den høyeste på 52 MPa (av sementene med ukalsinerte tuffer). Størkningstiden til sementene ble ansett som for rask, og de hadde dårlig bearbeidbarhet. Likevel går det an å endre ferskegenskapene ved å endre blandingsforholdet til ingrediensene, men dette går gjerne på bekostning av trykkfastheten. Studien konkluderer ikke, men det er tenkelig at de vulkanske tuffene som ga høyest trykkfasthet er ønskelige å bruke videre.

### 3.2.7 Geopolymerbetong med avgangsmasser fra wolframgruvedrift

Avfall fra gruvedrift er hovedsaklig mineralske stoffer med blant annet høyt silisium- og aluminiuminnhold [71]. I en portugisisk studie fra 2007 [72] ble avgangsmasser fra en wolframgruve brukt i geopolymerbetong. Gruven har to typer avfallsmasser: grove steiner fra steinbruddet, og slamaktige avgangsmasser som består av muskovitt og kvarts [73]. I følge en rapport om gruven [74, s. 36] utvinnes det bare tre promille wolfram fra massen som hentes ut. Med en årlig wolframproduksjon på litt over tusen tonn fører dette til avfallsmasser på flere hundre tusen tonn i året [75, s. 36]. Figur 3.1 viser gruven og området rundt.



Figur 3.1: Wolframgruve og landsby i Panasqueira, Portugal. Bilde fra Almonty Industries [76].

I studien ble avgangsmassene av muskovitt og kvarts kalsinert ved 950 °C i to timer [72]. Det ble også testet ubehandlede avgangsmasser, men disse ga tre ganger lavere trykkfasthet. Geopolymersementen bestod av 45% avgangsmasse, 5% kalsiumhydroksid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), 14% NaOH og 36% vannglass. Det ble brukt tre forskjellige tilslag og disse ble tilsatt i fire forskjellige proporsjoner hver. Tilslagene var 0/4 sand, 1/8 kalksteingrus og 0/8 granittgrus. Betongprøvene herdet i romtemperatur og ble så testet for trykk- og strekkfasthet. Betongene hadde høy trykkfasthet etter bare én dag, på rundt 25 til 45 MPa. Etter 28 dager var trykkfasthetene på rundt 55 til 75 MPa, avhengig av tilslagtypen og mengden. Strekkfasthetene ble vurdert som svært høye sammenlignet med portlandsement/-betong. Den tidlige styrkeutviklingen antas å skyldes den høye reaktiviteten til gruveavfallet sammen med alkalisk løsning.

Samtidig må det stilles spørsmål ved mengden aktivator som ble brukt; i sementblandingen stod den for halvparten av innholdet, og i betongen med mest tilslag stod den for 29%. Til sammenligning har de forrige geopolymerbetongene stort sett innholdt maks 25% aktivator. Med tanke på prisen for aktivator kan dette være en vesentlig hindring for implementeringen av denne geopolymerbetongen. En tidligere studie av de samme forfatterne [73] sammenlignet kostnadene til to geopolymerbetonger og tre vanlige betonger. Her var aktivatorinnholdet bare 13 og 7%, men likevel stod det for henholdsvis 83 og 71% av totalkostnaden til geopolymerbetongene. Det konkluderes med at geopolymerbetongene bare kan bli konkurransedyktige ved hjelp av økte priser for  $\text{CO}_2$ -utslipp. Når det kommer til geopolymerbetongen beskrevet over er kalsineringen av avgangsmassene ved 950 °C også en økonomisk og miljømessig faktor som må tas i betraktning.



### 3.2.8 Geopolymerbetong med avgangsmasser fra ilmenittgruvedrift

Forekomsten av det titanholdige mineralet ilmenitt i Sokndal er en av de største i verden [77]. Titania har drevet gruvedrift på Tellnes siden 1960 og utvinner årlig rundt 850 000 tonn ilmenittkonsentrat. På Tellnes er det et dagbrudd hvor de ilmenittholdige steinene noritt og anortositt blir hentet ut [56]. I følge en e-post fra Titania (Vedlegg A) blir rundt 25 til 30% ilmenitt skilt ut av den uthentede malmen. Dette gjøres ved magnetseparator, gravimetri, som bruker tyngdekraft og vann til å skille mineralkornene, og flotasjon, som er en prosess som bruker innblåste luftbobler til å heve visse mineraler til overflaten [78]. Prosessen etterlater store mengder avgangsmasser av hovedsaklig knust noritt. Disse deponeres i dag på land i Lundetjørna, og er sikret av en 100 meter høy dam. Dagbruddet, deponiet og dammen er synlige i satellittbildet i Fig. 3.2. Som nevnt i kapittel 2.3 *Avgangsmasser fra gruvedrift* er kapasiteten til deponiet og dammen i ferd med å overskrides. Avgangsmassene har inntil nylig ikke hatt noen bruksområder og representerer et stort miljøproblem.



Figur 3.2: Titanias dagbrudd, deponi og dam (sør i bildet). Fra Google Earth [79].

Doktorstipendiaten M. Khalifeh ved UiS oppdaget at norittmassene fra deponiet til Titania kan blandes med aktivator for å få en geopolymersement [80]. I 2014 søkte Khalifeh patent på oppfinnelsen og fikk den godkjent i 2018 [57]. Patenten beskriver et “norittbasert, sementerende geopolymermateriale” hvis formål er å erstatte vanlig portlandsement i plugging av undersjøiske oljebrønner. Norittpartiklene skal være maks 75  $\mu\text{m}$  og aktivatoren skal være enten NaOH eller KOH. Det anbefales et væske/faststoff-vektforhold på 0,40 til 0,45 i sementen. I en studie av Khalifeh et al. [56] ble ulike norittbaserte geopolymersementer lagd. Det ble brukt forskjellige aktivatorer, sement med og uten slagg, og herding i både romtemperatur og 87 °C. Norittpartiklene som var levert av Titania var i størrelsesorden 0,4 til 2 mm. Disse ble malt ned til en gjennomsnittlig diameter på 47  $\mu\text{m}$ , med 90% av partiklene under 100  $\mu\text{m}$ . Det ble også forsøkt å støpe en sement med noritten slik den ble levert fra Titania, men denne dannet ikke aluminosilikatgeler. Sementene som ikke innholdt slagg hadde svært sakte styrkeutvikling (3 MPa etter 7 dager). Tilsetning av slagg ga trykkfastheter ved 7 dager på 9 til 26 MPa, avhengig av resepten. Av aktivatorene ga KOH best styrke, mens en blanding av

KOH og NaOH ga lavest styrke. Mengden aktivator i blandingene var rundt 30%, som er vesentlig lavere enn geopolymersementen med avgangsmasser fra wolframgruven.

I 2019 ble Stavanger-selskapet Saferock AS etablert med Khalifeh som forskningssjef [80]. Selskapet har som formål å videreutvikle den norittbaserte geopolymersementen til anvendelse i byggebransjen. Som de fleste andre geopolymersementer kan også denne blandes med fint og grovt tilslag for å få geopolymerbetong. Trykkfastheten skal kunne tilsvare B30- og B35-betong, ettersom disse utgjør en stor markedsandel i byggebransjen. Dersom betongen kan implementeres vil det potensielt medføre en stor nedgang i CO<sub>2</sub>-utslipp i bransjen. I denne oppgaven skal det senere bli gått mer i dybden på miljøaspektene ved geopolymerbetongen.

### 3.3 Massivtre

Massivtre er en type byggemateriale som har hatt stor vekst både i Norge og resten av Europa de siste årene. I 2019 åpnet Splitkon AS verdens største massivtrefabrikk (på den tiden) i Åmot [81]. Det samme året ble verdens høyeste trebygg, Mjøstårnet, ferdigstilt [82]. Massivtre har høy styrke og kan brukes i både gulv, vegger og bjelker, og omtales ofte som et miljøvennlig, fullverdig alternativ til betong og stål [83]. I en state-of-the-art-studie fra 2021 [84] ble et utvalg LCA-studier på massivtrebygg oppsummert. I samtlige studier hadde massivtre lavere CO<sub>2</sub>-utslipp sammenlignet med betong og stål. Det er dog en del usikkerhet i resultatene, ettersom studiene ikke alltid dokumenterer hvilke antakelser som er blitt gjort. Det er også usikkerhet rundt hvordan karbonlagring i massivtre skal beregnes, og hvordan avskogingen påvirker klimaregnskapet. Det har dessuten blitt rettet kritikk mot bruken av massivtre her til lands; i en artikkel i Teknisk ukeblad [85] anklages treindustrien for “grønnvasking”, og for å bruke mangelfulle miljødeklarasjoner. Blant annet sies det at beregningene ikke tar hensyn til at skogen tar 60 til 120 år på å vokse tilbake, og at dette dermed ikke er forenelig med å nå klimamålene innen 2050. Det argumenteres samtidig med at Norge har nok skog til at dagens forbruk kan fortsette, samtidig som at karbon akkumuleres i skogene.

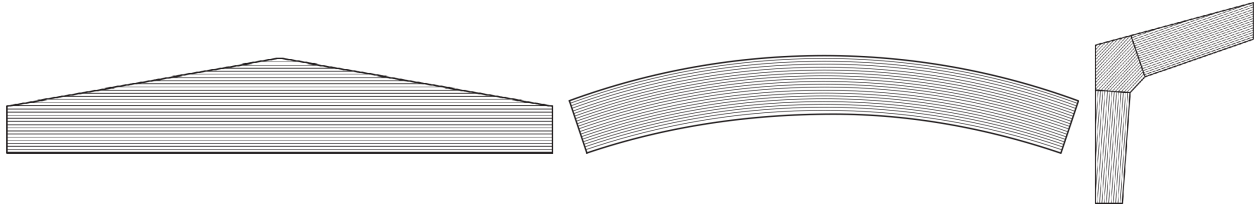
Det finnes hovedsaklig to typer massivtre: krysslaminerte elementer og parallelt laminerte elementer. Innen disse to kategoriene finnes det mange varianter, og videre vil de to mest vanlige bli gjennomgått.

#### 3.3.1 Limtre (glulam)

På engelsk kalles limtre *glue laminated timber* (GLT) eller *glulam*. Limtre består av sammenlimte, parallelle lameller med tykkelser mellom 6 og 45 mm [86]. Lamellene produseres ved å sage bort svake punkter, som kvister og sprekker, og så fingerskjøte lamellene sammen i lengden. Lamellene sorteres etter styrke, slik at kvaliteten på trevirket kan kontrolleres. Når mange lameller så limes sammen oppå hverandre får man et treprodukt som er sterkere og mer homogent enn tradisjonelt konstruksjonstre. Dersom styrkeklassen på alle lamellene er den samme, kalles materialet homogent limtre [87]. Dersom de ytre og indre lamellene består av ulike styrkeklasser, kalles materialet kombinert limtre. De ytre lamellene bør da være de sterkeste, ettersom spenningene er størst der.

Limtre er slanke elementer og brukes derfor hovedsaklig til bjelker, søyler, fagverk og rammer [86].

Limtrebjelker brukes gjerne i tak på grunn av sin estetiske verdi og mulighet for lange spenn. Det er mulig å bruke et variabelt tverrsnitt i bjelken, slik at det brukes mindre materiale der spenningene ikke er like store. I Fig. 3.3 vises en saltaksbjelke, en krum bjelke og hjørnet i en tre-leddet ramme. Den maksimale spennvidden for limtrebjelker kan variere fra produsent til produsent; det østerrikske selskapet Hasslacher Norica Timber [88] oppgir mulige spennvidder opptil 42 m, mens norske Moelven [86] oppgir at transportlogistikk begrenser bjelkene til rundt 35 m.



Figur 3.3: Limtre: Saltaksbjelke, krum bjelke og hjørne i tre-leddet ramme. Fra Timber Engineering [87].

### 3.3.2 Krysslaminert tre (CLT)

Som navnet tilsier består krysslaminert tre av lameller som ligger på tvers av hverandre. Det ligner dermed på kryssfiner, men består av lameller med tykkelser på rundt 15 til 40 mm [87]. Som med limtre er krysslaminert tre (eller CLT på engelsk) et mer homogent og kontrollert materiale enn konstruksjonstre. Minst tre lameller limes eller spikres sammen, og tykkelsen på elementet kan variere mellom 60 og 400 mm. CLT-elementer brukes som regel til dekker, tak, vegger og balkonger [89]. På tross av bedre isolasjonsevne enn betong, utføres yttervegger av CLT omtrent som betongelementer; det vil si at de behøver tilleggsisolering for å tilfredsstille energikrav. Utsparinger til dører og vinduer, samt mindre utsparinger til el-anlegg og VVS kan forhåndsfreses på fabrikk før elementet leveres til byggeplassen. Figur 3.4 viser en bygning i Sverige oppført med CLT-elementer fra Hasslacher. De synlige elementene i bildet består av fem lag med lameller.



Figur 3.4: CLT-bygning i Linköping, Sverige. Hentet fra Hasslacher [90].

## 3.4 Livsløpsvurdering

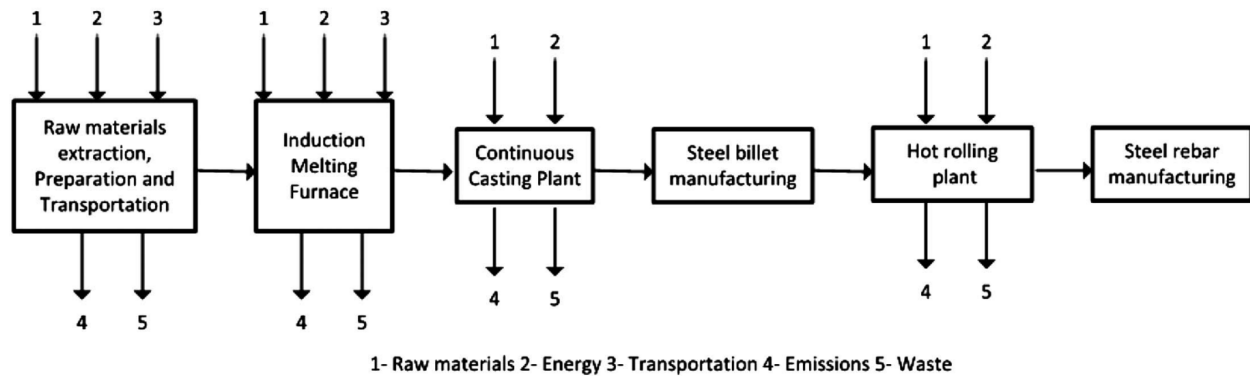
En livsløpsvurdering, også kalt livsløpsanalyse eller LCA, er definert i NS-EN ISO 14040 [91] som en “sammenstilling og evaluering av inngangsfaktorer, utgangsfaktorer og de potensielle miljøpåvirkningene til et produktsystem gjennom dets livsløp”. Livsløpsvurderinger kan utføres på så godt som alle tenkelige produkter og tjenester i verden, fra det å sende en e-post [92] til byggingen av skyskrapere [93]. En LCA-studie består av fire faser i henhold til ISO 14044 [94] og disse vil nå bli gjennomgått. Hele dette kapitlet bruker ISO 14040 og 14044 som kilde, med mindre noe annet er spesifisert.

### 3.4.1 Fastsettelse av hensikten og omfanget (goal and scope)

En livsløpsvurdering er en svært iterativ prosess som medfører kontinuerlige endringer og oppdateringer. Det første steget er å tydelig avklare målet med studien og hva den skal omfatte. Oppdragsgiveren og målgruppen for studien kan nevnes her, i tillegg til hva resultatene skal brukes til. Det oppgis hvilke krav som har blitt satt til datakvaliteten og hvilke datasett som er brukt. Eksempler på krav er alder på dataene, geografisk relevans for systemet, og hvor stor grad av dataene som er målt i forhold til estimert. Dersom en prosess består av flere inngangs- eller utgangsstrømmer kan det bli nødvendig å bruke allokering. Hvilke allokeringsprosedyrer som er brukt skal nevnes i denne første fasen, selv om selve allokeringen foregår i den neste fasen (LCI). Det blir også nevnt hvilke effektkategorier, kategoriindikatorer og karakteriseringsmodeller som skal vurderes under livsløpseffektvurderingsfasen. Disse er ofte standardiserte, men det er også mulig å definere egne, dersom det er nødvendig for LCA-studien.

Den funksjonelle enheten defineres, og resultatene av livsløpsvurderingen uttrykkes basert på denne. Eksempler på funksjonelle enheter er 1 m<sup>3</sup> betong, én 60 m<sup>2</sup> leilighet i en boligblokk, en iPhone 13 eller 100 km reising. Sistnevnte kan gjerne brukes i en studie som sammenligner utslipp fra privattransport og kollektivtransport. Det er dog viktig at den funksjonelle enheten som velges er rettferdig ovenfor systemene som sammenlignes; i transporteksempelet, hva med andre faktorer som reisetid, komfort, pris, fleksibilitet, osv? Dersom en B30- og en B45-betong sammenlignes bør den funksjonelle enheten ta hensyn til forskjellen i trykkfasthet per m<sup>3</sup>.

Systemet som skal analyseres i studien må beskrives nøye. Dette innebærer å nevne forutsetninger, avgrensninger og antakelser som har blitt gjort. Tidsperspektivet på studien kan defineres ved hjelp av standardiserte livsløpsfaser som *A1: Råmaterialer*, *A4: Transport*, *B2: Vedlikehold* og *C1: Demontering*, i henhold til NS 3720 [95]. Dersom studien omfatter hele livsløpet til et produkt kalles det fra vugge til grav; dersom studien stopper før bruksfasen kalles det fra vugge til port. Systemet fremstilles gjerne grafisk i et prosessflytdiagram som viser hvilke prosesser som er tatt med og hvilke som ekskluderes. Skjemaet viser hvor det er transport mellom prosessene og hvordan de bearbeides, som for eksempel uthenting av jernmalm, transport til fabrikk, smelting og valsing av stål, og transport til kunde. Figur 3.5 viser prosessflytdiagrammet til systemet fra en LCA på armeringsstål [96].



Figur 3.5: Eksempel på prosessflytdiagram for produksjon av armeringsstål [96].

### 3.4.2 Livsløpsregnskapsfasen (LCI – life cycle inventory)

Denne fasen går ut på å samle inn data for prosessene som er definert i systemet. Det skal oppgis hvor dataene kommer fra og eventuell tilleggsinformasjon om kvaliteten på dataene. Hver prosess kan få et eget prosessflytdiagram som viser strømmer inn og ut, i tillegg til forholdet mellom andre prosesser. Datainnsamlingskjema brukes for å registrere kvantitative data for hver prosess. Typiske strømmer er forbruk av strøm, forbruk av diesel under transport, mengde produkt produsert og avfallsmasser. Dataene skal verifiseres og så relateres til den funksjonelle enheten. LCI-fasen er også en iterativ prosess, hvor nye funn kan avdekke flere prosesser som det må samles inn data for. De opprinnelige systemgrensene kan også endres som følge av funn gjort under LCI-fasen. Sensitivitetsanalyse bør også utføres, og denne kan avdekke prosesser som kan utelukkes fra studien på grunn av manglende betydning for resultatene. Den kan også avdekke nye prosesser som må inkluderes eller utdypes siden de har stor betydning for resultatene.

Som nevnt kan allokering bli brukt dersom en prosess består av flere inputer og outputer, eller prosessen inngår i flere produktsystemer. En prosess har gjerne ett totalt utslipp, men genererer flere produkter og biprodukter. Dersom en analyserer ett av disse produktene kan det være vanskelig å finne ut hvor mye av det totale utslippet som skyldes det ene produktet. Uten direkte innsyn i prosessen (for eksempel gjennom kontakt med en spesifikk produsent og tilgang til interne tall) er det dermed nødvendig å bruke allokering.

Det finnes hovedsaklig tre allokeringmetoder: fysisk allokering, økonomisk allokering og energiallokering. Fysisk allokering kan brukes dersom outputene fra en prosess alle har en fysisk størrelse. Da kan massen av hver output deles på den totale massen, og så ganges med utslippene fra prosessen. Denne metoden antar implisitt at hver output har tilnærmet likt utslipp per masse, noe som ikke nødvendigvis stemmer. For eksempel kan en fabrikk gjerne produsere et høyverdig produkt i mindre kvanta enn et lavverdig produkt, men som krever vesentlig mer energi og utslipp å produsere. Med masseallokering vil det lavverdige produktet fremstå som like miljøskadelig (per masse) som det høyverdige, og mer miljøskadelig totalt siden det genereres mer av det i prosessen.

For å ta hensyn til dette kan det brukes økonomisk allokering. Da brukes markedsværdien fra hver output, i stedet for massen. Markedsværdien deles på den totale verdien, og ganges så med de totale

utslippene. Økonomisk allokering er nyttig i prosesser som ikke bare har fysiske outputer, og i prosesser som i eksemplet ovenfor, hvor det er en vesentlig forskjell mellom outputene. Det høyverdige, energiintensive produktet har kanskje en ti ganger høyere markedsverdi enn det lavverdige produktet, og med økonomisk allokering vil utslippene gjenspeile dette mer rettferdig. Et eksempel på en prosess som inneholder ulike former for outputer er energiproduksjon i et kullkraftverk. To av outputene vil være selve strømmen generert, målt i MJ, og biproduktet flyveaske, målt i tonn. Fysisk allokering er ikke mulig, ettersom strømmen ikke har en fysisk størrelse. Men begge outputene har en markedsverdi som kan brukes til å fordele det totale utslippet mellom dem.

Den siste allokeringmetoden kan brukes dersom alle outputene har en energiverdi målt i MJ. Et eksempel på dette er et oljeraffineri som produserer ulike typer brensel fra råolje. Et brensel som høyoktanbensin vil ha en høyere energiverdi per kg enn diesel. Med energiallokering brukes disse verdiene sammen med mengden brensel produsert til å fordele det totale utslippet. Denne metoden ligner på økonomisk allokering, men kan kun brukes når alle outputene har en energiverdi.

### 3.4.3 Livsløpseffektvurderingsfasen (LCIA – life cycle impact assessment)

Etter at livsløpsregnskapet er ferdigstilt, brukes disse dataene sammen med kriteriene valgt i hensikten og omfanget til å utføre en livsløpseffektvurdering (LCIA). Vurderingen gir resultater basert på den funksjonelle enheten som ble valgt tidligere. Outputene fra livsløpsregnskapet, altså utslipp av diverse molekyler, må sorteres til de valgte effektkategoriene. Dette kalles klassifisering og er nødvendig for å kunne vurdere følgene av de ulike utslippene, og hva slags skade de gjør på miljøet. Hver effektkategori har en kategoriindikator uttrykt med et indikatornavn og -enhet. Effektkategorien “global oppvarming” har indikatornavnet “infrarød strålingspådriv” og enheten  $W \times yr/m^2$ . Noen utslipp klassifiseres til flere effektkategorier, som svoveldioksid ( $SO_2$ ) som har påvirkning på både menneskelig helse og forsurening.

Når alle outputene har blitt klassifisert til sine tilhørende effektkategorier, beregnes miljøpåvirkningene ved hjelp av klassifisering. Hver effektkategori har en enhet som de samlede utslippene skal uttrykkes i. Ved hjelp av karakteriseringsfaktorer blir utslippene omgjort til den felles enheten, som for effektkategorien “global oppvarming” er kg  $CO_2$ -ekvivalenter. Verdien kalles et kategoriindikatorresultat og er skalert etter den funksjonelle enheten.

Avhengig av karakteriseringsmodellen som brukes (definert i hensikt og omfang) kan kategoriindikatorne videre samles til såkalte kategoriendepunkter. Disse er langtidseffekter av miljøpåvirkningene, og kan betegnes som skade på menneskehelse, skade på økosystemer og skade på tilgjengelighet av ressurser. Kategoriendepunktene bruker enheter som DALY (disability-adjusted life years), PDF (potentially disappeared fraction of species) og prisøkning per år. Om kategoriendepunkter skal inkluderes i en LCA er avhengig av hensikten og omfanget til studien.

Til slutt er det vanlig å fremstille resultatene i LCIA-fasen ved hjelp av normalisering. Kategoriindikatorresultatene blir omregnet til en felles enhet basert på en gitt referanseverdi. Referanseverdien kan for eksempel være gjennomsnittlig miljøpåvirkning i en region, delt på antall mennesker. Hver

effektkategori får en egen normaliseringsfaktor som indikatorresultatet deles på. De normaliserte resultatene presenteres så i en graf eller tabell med felles y-akse og enhet. Det er også mulig å bruke vektingsfaktorer på de forskjellige kategoriindikatorresultatene. Vektingsfaktorene er subjektive og bygger på egne verdivalg basert på hvordan en ønsker å vektlegge de forskjellige effektkategoriene.

#### 3.4.4 Livsløpstolkning (interpretation)

Den siste fasen av en LCA-studie er tolkningsfasen. Som navnet tilsier, handler denne fasen om å tolke resultatene fra LCI- og LCIA-fasene. Resultatene vurderes mot kriterier satt i hensikten og omfanget av studien, som systemgrensene, den funksjonelle enheten og kravene til datakvalitet. Det kontrolleres at alle nødvendige data er samlet inn, og eventuelt om manglende data må samles inn eller kan utelukkes fra studien. En sensitivitetskontroll bør utføres for å avdekke usikkerheter i dataene og beregningsmetoden. Denne baserer seg på sensitivitetsanalysen(e) som ble utført tidligere i LCA-en. Sensitivitetskontrollen kan føre til nye iterasjoner i studien, eller anbefalinger til videre arbeid. En samsvarskontroll skal også utføres i tolkningsfasen. Samsvarskontrollen kan variere basert på hensikten og omfanget til studien, men skal hovedsaklig kontrollere at metoder og data er konsekvente. Den kan brukes til å vurdere om kildene og kvaliteten til dataene er konsekvente, om regionale forskjeller har blitt tatt hensyn til, og om det er brukt samme allokeringmetoder i systemet. Til slutt blir studien konkludert ved å oppsummere resultatene, nevne begrensninger ved studien og komme med anbefalinger til brukere av studien.

### 3.5 LCA-programmer

En LCA består av enormt mange datapunkter og beregningsprosesser. Derfor er det helt essensielt med dataprogrammer som kan håndtere informasjonen som blir lagt inn av brukeren, og som kan beregne denne i henhold til ISO-standardene. Det finnes en rekke programmer som er lagd for å utføre livsløpsvurderinger, og her blir de to som er relevante for oppgaven beskrevet.

#### 3.5.1 One Click LCA

One Click LCA er et verktøy utviklet for å utføre LCA-beregninger og lignende i bygge- og anleggsbransjen [97]. Det er en nettbasert tjeneste som kan integreres med diverse programmer, som Revit, Tekla og Solibri, gjennom plugins. Det gjør det mulig å enkelt hente ut materialmengder fra prosjektet, som så blir analysert i netjtjenesten. I følge One Click LCA har de samlet verdens største miljødatabase for byggeprodukter [98]. Denne baserer seg på EPD-plattformer fra nesten hele verden, som blant annet ecoinvent og EPD Norge. EPD står for “Environment product declaration”. Databasen til One Click LCA inneholder også generiske prosesser som kan brukes dersom brukeren ikke kjenner leverandør enda, eller dersom leverandørens produkt ikke finnes i databasen. I programmet er det også mulig å lage og publisere egne EPD-er. I tillegg kan One Click LCA brukes til BREAAAM-godkjenning, som er det mest brukte miljøsertifiseringssystemet for bygg i Norge [99].

### 3.5.2 SimaPro

SimaPro regnes som det mest brukte LCA-verktøyet i verden, særlig innen akademisk arbeid [100]. I motsetning til One Click LCA er det beregnet på alle industrier, ikke bare BAE-næringen. Programmet inneholder diverse databaser, som ecoinvent, Agri-footprint og Environmental Footprint database [101]. Prosessene i SimaPro er generiske, i motsetning til produktspesifikke, som vil si at det ikke brukes EPD-er. Riktignok kan noen prosesser være basert på ett produkt fra én leverandør, men oftest er prosessene basert på data samlet inn fra flere kilder. Prosessene er ofte delt inn i geografiske områder, som land og kontinenter. En prosess for et spesifikt land er dermed et nasjonalt gjennomsnitt av flere datapunkter [102].

Det skilles mellom markedsprosesser og transformasjonsprosesser. En transformasjonsprosess er bygd opp av alle inputene som er nødvendige for å produsere produktet. Markedsprosesser bruker derimot det ferdige produktet sammen med gjennomsnittlige transportavstander til å “flytte” produktet fra produsenten til markedet (brukeren). Dette kan forklares ved å sammenligne to prosesser for mandler: først transformasjonsprosessen kalt “Almond {CN}| almond production”. Denne er bygd opp av inputer som opptak av CO<sub>2</sub> (gjennom fotosyntesen), vanning av avlingen, gjødsling, høsting, dieselbruk av traktor og innpakking av produktet. Outputene består av utslipp til luft, land og vann, som nitrogen, kopper, kvikksølv og CO<sub>2</sub>. Den andre prosessen, markedsprosessen “Almond {GLO}| market for almond”, består derimot av bare tre typer inputer: ferdig produserte mandler, transport av mandlene og kjøling under transport. Transportmetodene og -avstandene er basert på gjennomsnittlige verdier basert på produktet og markedsområdet. De eneste outputene i prosessen er “Biowaste”, som følge av svinn under transporten.

En systemmodell beskriver hvordan prosessene i en database skal beregnes, og hvilke valg og antakelser som må gjøres [103]. I ecoinvent 3-databasen er det tre systemmodeller å velge mellom. Disse heter Allocation, cut-off by classification; Allocation at point of substitution (APOS); og Consequential. Hver av disse er igjen delt inn i Unit eller System. Unit vil si at en prosess består av koblinger til andre enhetsprosesser, og SimaPro regner ut alle disse prosessene under beregningen. I en systemprosess er alle koblingene til prosessen allerede beregnet og innbakt i prosessen, og SimaPro kan dermed bruke et ferdig tall under utregningen i prosjektet [104].

De tre systemmodellene behandler biprodukter på forskjellige måter. Allocation, cut-off by classification vil si at biprodukter behandles som en output i prosessen som genererer biproduktet [103]. Dersom biproduktet kan brukes i en annen prosess, blir det tilgjengelig i denne prosessen utslippsfritt. For eksempel, dersom prosessen er strømproduksjon i kullkraftverk, vil flyveaske være et biprodukt som kan brukes i sementindustrien. Utslippene assosiert med strøm- og flyveaskeproduksjonen beholdes i kullkraft-prosessen, mens sementprosessen kan bruke flyveasken helt utslippsfritt, med unntak av transport til sementfabrikken.

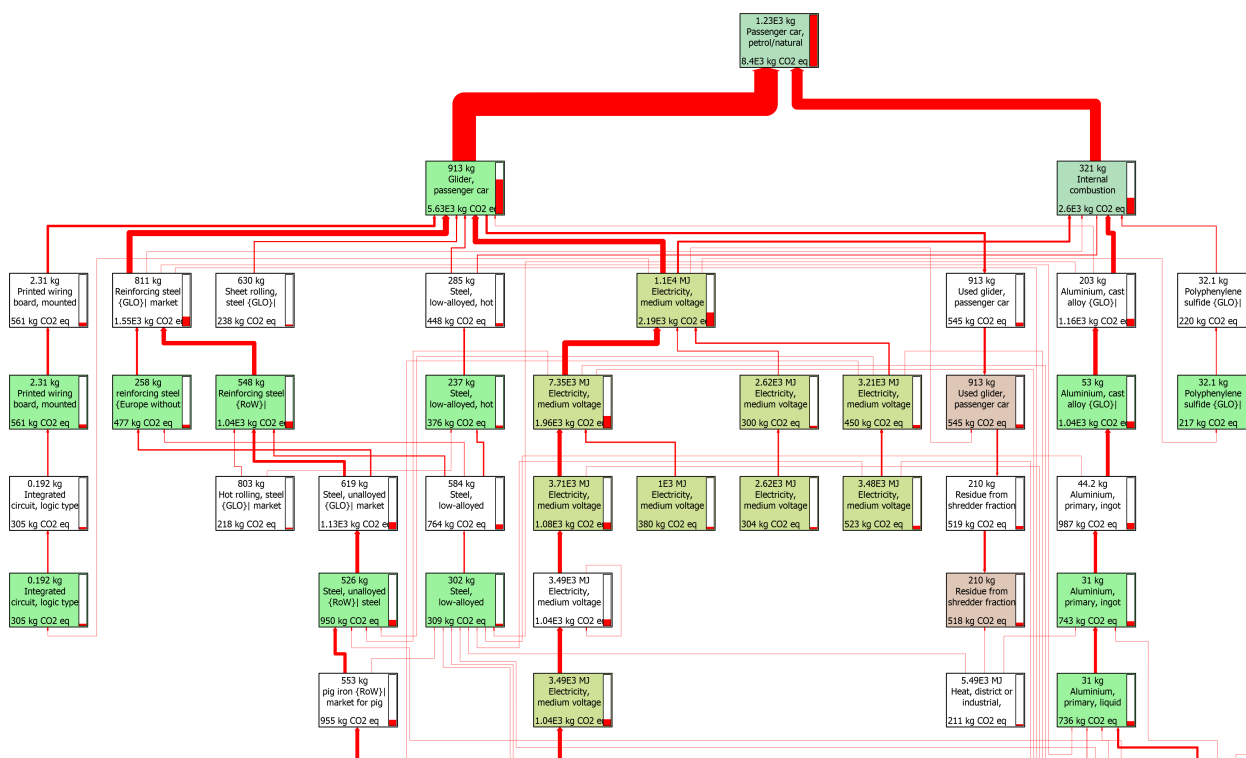
Forskjellen på den ovennevnte cut-off-modellen og APOS-modellen er at de positive effektene av et biprodukt inkluderes i prosessen som genererer produktet. Det vil si at et kullkraftverk vil ha flyveaske som en negativ input (for massebalanse) i prosessen sin, ettersom flyveaske erstatter



portlandsement i sementprosesser. Dette gjelder for øvrig også for negative biprodukter, som avfallsprodukter som ikke har et bruksområde i en annen prosess. Behandlingen av avfallet legges da også inn som en negativ input i prosessen.

Den siste systemmodellen, Consequential, definerer også biprodukter som negative inputer i prosessen som genererer dem. Det er derimot ingen allokering i denne modellen, som vil si at alle påvirkninger fra inputene og utslippene inngår i prosessen. Modellen tar også hensyn til tilbud og etterspørsel av prosesser; biprodukter genereres som følge av produksjonen av et hovedprodukt, og er dermed avhengige av dette produktet. Flyveaske er et aktuelt eksempel på dette. Da flyveaske viste seg å være en brukbar sementerstatning, gikk etterspørselen opp og det ellers verdiløse biproduktet fikk kommersiell verdi. På grunn av utfasing av kullkraftverk i nyere tid vil tilbudet av flyveaske gå ned, og det vil i fremtiden være urealistisk å bruke dette produktet i miljøanalyser uten å ta hensyn til dette.

I SimaPro er det mulig å få innsyn i alle inputer og outputer som inngår i en prosess. Disse kan fremstilles grafisk i et nettverksdiagram med Network-funksjonen. I Fig. 3.6 vises et utdrag av nettverksdiagrammet for en passasjerbil. Produktet heter “Passenger car, petrol/natural gas {GLO}| production | Cut-off, U”. Tallverdiene nede til venstre i hver prosess er mengden CO<sub>2</sub>-ekvivalenter den prosessen genererer. Totalt genererer produksjonen av bilen rundt 8 400 kg CO<sub>2</sub>-ekvivalenter. Det har blitt satt en cut-off på 2,4%, som vil si at alle prosesser som bidrar til mindre enn 2,4% av totalutslippet ikke vises. Dersom cut-offen ble satt til 0% ville det blitt vist hele 13 518 prosesser.



Figur 3.6: Utdrag fra nettverksdiagrammet til produksjonen av en passasjerbil i SimaPro.

### 3.6 Tidligere LCA-studier på geopolymerebetong

Det har blitt utført flere LCA-studier på geopolymerelementer og -betonger. På grunn av den store variasjonen i ingredienser og bruksområder til de forskjellige geopolymerelementene, er ikke studiene nødvendigvis sammenlignbare. Det har derfor blitt forsøkt å finne studier på geopolymerebetonger som ligner mest på den til Saferock; det vil si strukturelle betonger i styrkeklasse rundt B30 til B35.

I en LCA-studie fra 2011 [105] ble en rekke geopolymerebetonger analysert og sammenlignet med tilsvarende betonger med portlandsement. Geopolymerelementene bestod av flyveaske, slagg eller metakaolin, og aktivator av NaOH. Den funksjonelle enheten i studien var 1 m<sup>3</sup> betong i tilhørende styrkeklasse (fra 5 MPa til over 70). Et resultat i studien var en flyveaskebasert geopolymerebetong med styrke på 36 MPa som hadde et utslipp på 168,5 kg CO<sub>2</sub>-eq. En tilsvarende vanlig betong hadde et utslipp på 305,9 kg CO<sub>2</sub>-eq. Dette gir en reduksjon på 45% i geopolymerebetongen. Aktivatoren utgjorde 70% av utslippene i geopolymerebetongen. Det er viktig å påpeke at den vanlige betongen i sammenligningen består av 100% sementklinker, noe som gir høyere utslipp enn for eksempel en CEM II-sement med 25% flyveaske. Av de andre geopolymerebetongene som ble analysert i studien, hadde de fleste lavere utslipp enn en tilsvarende CEM I-betong. Men allokeringsprosedyren har mye å si for resultatene, særlig ved bruk av flyveaske og slagg. Det vil si at dersom disse ikke behandles som rene avfallsprodukter, øker geopolymerebetongen sine miljøpåvirkninger betraktelig. Derfor anbefales det i studien å finne alternative avfallstoffer som ikke har noen andre bruksområder, som avgangsmasser fra gruvedrift. Det blir også anbefalt å bruke avfallstoffer som har et optimalt forhold mellom silisium og aluminium, slik at mengden aktivator kan reduseres.

I en australsk studie fra 2013 [106] ble en geopolymerebetong lagd med flyveaske og NaOH sammenlignet med vanlig betong. Også her ble det brukt 100% portlandsement i betongen. Blandingene hadde trykkfastheter på rundt 40 MPa. Resultatet av studien var at geopolymerebetongen hadde et utslipp på 302 kg CO<sub>2</sub>-eq, mens den vanlige betongen hadde 336 kg CO<sub>2</sub>-eq. Dette er en reduksjon på 10%. Geopolymerebetongen krevde herding ved 60 til 80 °C i 24 timer, og dette førte til et utslipp på hele 40 kg CO<sub>2</sub>-eq. Dette, sammen med produksjonen av aktivatoren, førte til det høye totalutslippet sammenlignet med tidligere studier. Det blir dessuten nevnt at dersom det hadde blitt brukt sementerstatninger i den vanlige betongen ville denne hatt lavere utslipp enn geopolymerebetongen.

### 3.7 Prosjektering

Prosjektering av konstruksjoner er et stort fagområde som ofte involverer flere fagfelt, som arkitektur, geoteknikk, brann, elektro, VVS og konstruksjonsteknikk [107]. Konstruktørens oppgave er å prosjektere konstruksjonen slik at kravene fra de øvrige disiplinene i høyest mulig grad blir ivaretatt, samtidig som at konstruksjonen er tilstrekkelig dimensjonert for lastsituasjonene som er definert i regelverket. I Norge i dag ligger Eurokode-serien fra Norsk Standard til grunn for prosjektering av konstruksjoner. I denne oppgaven vil særlig de to første Eurokodene bli brukt: NS-EN 1990 – *Eurokode 0: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner* og NS-EN 1991 – *Eurokode 1: Laster på*

konstruksjoner [108], [109].

I forordet til Eurokode 0 står det at “NS-EN 1990 beskriver prinsipper og krav til konstruksjoners sikkerhet, brukbarhet og bestandighet”. Standarden legger grunnlaget for de resterende ni Eurokodene ved å blant annet definere pålitelighetsnivåer for prosjektering, dimensjonerende brukstid, dimensjonerende grensetilstander og beregningsmodeller for konstruksjonsanalyse. De dimensjonerende grensetilstandene er som regel definert som bruks- og bruddgrensetilstanden. Bruksgrensetilstanden omfatter påvirkninger på konstruksjonen som følge av normal bruk. Denne tilstanden brukes blant annet under beregning av nedbøyning av konstruksjonsdeler som bjelker og dekker. Bruddgrensetilstanden omfatter påvirkninger som gir varige deformasjoner og/eller brudd i konstruksjonen, og brukes under dimensjonering for menneskers og konstruksjonens sikkerhet.

Hovedsaklig deles laster inn i tre kategorier: permanente laster ( $G$ ), variable laster ( $Q$ ) og ulykkeslaster ( $A$ ). Lastene ganges med tilhørende koeffisienter, avhengig av grensetilstanden det dimensjoneres for. I bruksgrensetilstanden er disse koeffisientene lik 1, mens de i bruddgrensetilstanden er gitt i det nasjonale tillegget i Tabell NA.A1.2(B), som er gjengitt i Tab. 3.2. Verdiene for koeffisientene finnes også i det nasjonale tillegget. Den totale lasten skal regnes ut både ved hjelp av (Ligning 6.10a) og (b), og det er den største verdien som blir dimensjonerende bruddlast. Denne oppgis som regel i  $\text{kN/m}^2$ ,  $\text{kN/m}$  eller  $\text{kN}$ , avhengig av hvilken type konstruksjonsdel som tar opp lasten.

Tabell 3.2: NS-EN 1990: NA.A1.2(B) – Dimensjonerende verdier for laster (STR/GEO) (Sett B) [108].

| Vedvarende og forbigående dimensjonerende situasjoner | Permanente laster                  |                              | Dominerende variabel last         | Øvrige variable laster            |
|---|------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|   | Ugunstig                           | Gunstig                      |                                   |                                   |
| (Ligning 6.10a)                                       | $\gamma_{Gj,sup} G_{kj,sup}$       | $\gamma_{Gj,inf} G_{kj,inf}$ | $\gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1}$ | $\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$ |
| (Ligning 6.10b)                                       | $\zeta \gamma_{Gj,sup} G_{kj,sup}$ | $\gamma_{Gj,inf} G_{kj,inf}$ | $\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$            | $\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$ |

Når den dimensjonerende bruddlasten er funnet for en konstruksjonsdel, må delen dimensjoneres for lasten. Typen materiale og konstruksjonsdel avgjør hvilken standard som skal brukes til dimensjoneringen. For betongkonstruksjoner gjelder Eurokode 2, for stål gjelder Eurokode 3, og så videre. Eurokodene inneholder en rekke bruddtyper og situasjoner det skal kontrolleres for. Dette gjelder blant annet krav til nedbøyning, ulike typer brudd som knekking, skjærbrudd og utmatting, brannteknisk dimensjonering og sikring mot seismiske påvirkninger. I denne oppgaven vil dog ikke dimensjonering av konstruksjonsdeler bli nærmere gjennomgått.

### 3.8 Modelleringsprogrammer

Prosjektering og modellering av bygg blir i dag nesten utelukkende gjort med bygningsinformasjonsmodellering (BIM). Dette vil si å bruke digitale løsninger og dataprogrammer til å lage 3D-modeller. Disse kan inneholde flere nivåer med metadata som kan integreres med de ulike fagfeltene på et byggeprosjekt. I denne oppgaven vil de to BIM-programmene Revit og Solibri bli brukt.

Revit leveres av Autodesk og er det mest brukte modelleringsprogrammet innen bygge- og anleggsbransjen [110]. Det er lagd for arkitektur, konstruksjonsteknikk, VVS og elektro [111]. Modelling i Revit foregår i 3D, med mulighet for plantegninger og snitt i 2D. Revit kan åpne og generere IFC-filer, som er et allsidig filformat som brukes i mange typer modelleringsprogrammer. I motsetning til Revit er Solibri et kvalitetssikringsprogram som brukes til å kontrollere en samlemodell fra flere disipliner [112]. Programmet kan blant annet brukes til å utføre kollisjonskontroller, kommentere og markere problemer og å hente ut materialmengder. Kort sagt kan en si at Revit er et modelleringsprogram, mens Solibri er et program for gjennomgang og samhandling, hvor det ikke er mulig å gjøre endringer i samlemodellen [113].

## 4 | Forskerspørsmål

Saferock A/S har utviklet en geopolymersement som bruker avgangsmasser fra ilmenittgruven til Titania i Sokndal. Sementen skal gjøre det mulig å erstatte all portlandsement i vanlig betong, slik at CO<sub>2</sub>-utslippene reduseres betraktelig. Man får da en geopolymerbetong, og hensikten med denne oppgaven er å kartlegge miljøkonsekvensene av dette nye materialet. Forskerspørsmålet er som følger:

**Hvilke miljøpåvirkninger har geopolymerbetong lagd med avgangsmasser fra ilmenittgruvedrift?**

For å svare på spørsmålet skal det utføres en livsløpsvurdering på geopolymerbetongen. Materialet skal så settes i sammenheng med et byggeprosjekt, og sammenlignes med vanlig betong og massivtre. Følgende underspørsmål er utarbeidet:

- Hvilke materialer og prosesser inngår i geopolymerbetongen til Saferock?
- Hva er miljøkonsekvensene av å oppføre et bygg i geopolymerbetong sammenlignet med vanlig betong og massivtre?

### 4.1 Avgrensninger

Det er satt et par avgrensninger for å kunne svare på forskerspørsmålet:

- Økonomiske aspekter vil ikke bli vurdert.
- Enkelte konstruksjonsdeler og materialer vil bli ekskludert fra livsløpsvurderingene.
- Geopolymerbetongen antas å være godkjent til strukturell bruk, selv om dette ikke er tilfellet per dags dato.

## 5 | Case og materialer

Formålet med denne oppgaven er å undersøke miljøpåvirkningene til geopolymerebetongen til Saferock. Materialet utgjør derfor en betydelig del av casen i oppgaven. I tillegg er det valgt å se på et skolebygg i Ørsta som er utført i massivtre. Skolen skal omprosjekteres til vanlig betong og geopolymerebetong, slik at det kan utføres miljøanalyser på de forskjellige versjonene av bygget.

### 5.1 Saferock sin geopolymerebetong

Foreløpig er selskapet Saferock i utviklingsfasen av sin geopolymerebetong. De lager sementen og betongen på et laboratorie, ved bruk av små apparater som kjøkkenmaskiner [80]. De har imidlertid fått støtte fra blant annet Enova til å bygge en pilotfabrikk til å teste produksjonen i storskala [53]. Etter planen skal fabrikkene være ferdigstilt i 2022 og ha en produksjonskapasitet på 30 m<sup>3</sup> geopolymerebetong til dagen. Det neste steget er å bygge en fabrikk ved Titania-gruven [114]. Her skal avgangsmasser males ned til et pulver på mindre enn 63  $\mu\text{m}$ . Dette sendes så ut, sammen med aktivator i pulverform, til kunder som hovedsaklig vil være blandeverk. I blandeverkene blandes så norittpulveret sammen med aktivatoren, vann og tilslag.

Livsløpsvurderingen på geopolymerebetongen i denne oppgaven vil imidlertid ta utgangspunkt i at alle ingrediensene blandes ved Titania. Derfor er det valgt at tilslaget transporteres 80 km til Titania fra en teoretisk leverandør av tilslag.

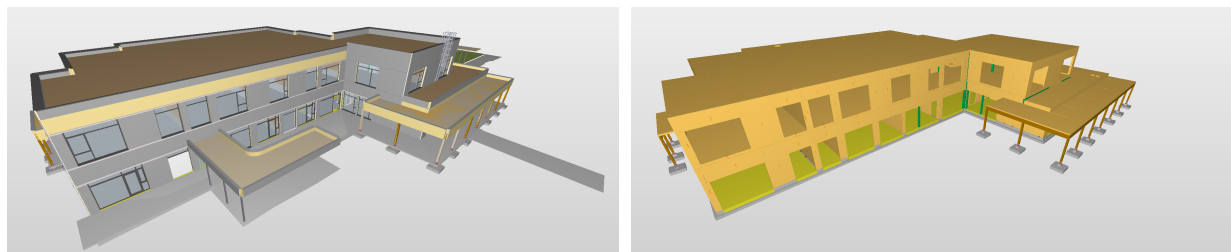
Geopolymerebetongen til Saferock har trykkfastheter tilsvarende B30 og B35. Derfor vil det ikke være mulig å bruke andre styrker under prosjekteringen av skolebygget. Det antas at betongen armeres på samme måte som vanlig betong, selv om dette ikke har vært prøvd i virkeligheten. Det er dessuten utfordringer med regelverket for hvilken sement som kan brukes i konstruksjoner. I følge betongstandarden NS-EN 206 [115] kan det kun brukes sementer fra tre standarder: EN 197-1, NS-EN 14647 og NS-EN 15743. Som beskrevet tidligere består EN 197-1 av de fem sementtypene CEM I til CEM V. De to andre standardene beskriver spesialsementene kalsiumaluminatsement og supersulfat-sement. Ingen av de tre standardene innbefatter geopolymerebetong, som vil si at sementen ikke er godkjent for bruk i konstruksjoner i henhold til Eurokode 2. I denne oppgaven er det sett bort ifra disse restriksjonene, slik at det er mulig å gjøre beregninger på skolebygget med geopolymerebetong.

## 5.2 Sæbø skule i Ørsta

Som case for oppgaven er Sæbø skule i Ørsta kommune valg. Dette er en delt skole og barnehage som i stor grad er utført i massivtre. Skolen (inkludert barnehagen) er under bygging og skal ferdigstilles høsten 2022. Byggherre på prosjektet er Ørsta kommune. Peab K. Nordang har blitt kontrahert som totalentreprenør, og Norconsult er ansvarlig for prosjekteringen. Siden denne oppgaven utføres med veiledning fra Norconsult er det blitt gitt tilgang til alle interne dokumenter fra prosjekteringen av skolen. Norconsult har i tillegg utført en såkalt klimagassberegning for skolen; mer om denne i kapittel 5.2.2.

### 5.2.1 Skolens oppbygning

Skolen har et bruttoareal på 1 612 m<sup>2</sup> og et oppvarmet bruksareal på 1 504 m<sup>2</sup>. Den består av to etasjer over grunnplan og ingen under. I Fig. 5.1 er bygget vist i programmet Solibri, med og uten detaljer som kledning, vinduer og uteområder. Bærende og ikke-bærende vegger er utført i krysslaminert massivtre (CLT). Ytterveggene er isolert med steinull og kledd med et trykkimpregnert tremateriale. Mange av innerveggene er også isolert med steinull og i tillegg kledd med lyddempende plater av gips. Dekket mellom første og andre etasje, i tillegg til taket, er også utført i CLT med steinullisolasjon. Bjelker og søyler er utført i limtre. Fundamenteringen og gulv på grunn er utført i armert betong. I overgangen fra punktfundament i betong til limtresøyler er det brukt 360 mm høye stålsøyler.



Figur 5.1: Sæbø skule vist i Solibri, med og uten fasade.

### 5.2.2 Tidligere klimagassberegning for Sæbø skule

Klimagassberegningen ble utført av Norconsult i november 2021 på oppdrag fra Peab K. Nordang. Rapporten er tilgjengelig på Miljødirektoratet sine sider [116]. Beregningen er basert på en IFC- og en samordningsmodell av skolen. Disse har også blitt brukt i denne oppgaven for å få et likt sammenligningsgrunnlag. Samordningsmodellen er vist i Fig. 5.1. I rapporten har Norconsult brukt verktøyet One Click LCA til å regne ut klimagassutslippene. De har brukt produktspesifikke EPD-er der disse har vært tilgjengelige. Produktspesifikke vil si at det er en EPD for det faktiske produktet som er brukt i prosjektet, eller tilnærmet det samme. Av de 76 inputene som er brukt i beregningene, hadde ca. 32 stk. produktspesifikke EPD-er. Resten er generiske prosesser fra One Click LCA. Norconsult har også benyttet seg av en funksjon i One Click LCA kalt Carbon Designer. Denne genererer et rektangulært referansebygg med likt bruttoareal, antall etasjer og

bygningsskategorier som skolen. Referansebygget er oppført i hovedsaklig betong og stål og brukes som et grovt sammenligningsgrunnlag for massivtreskolen.

Det ble revet en barneskole fra 1958 der den nye skolen bygges. Det ble gitt tillatelse fra Miljødirektoratet å gjenvinne 2 000 tonn betong og tegl til bruk i den nye skolen [117]. Kravet var at armering og blymaling ble fjernet og levert til spesialavfall før betongen kunne tas i bruk. Den gamle betongen måtte også tildekkes av det nye bygget eller av asfalt. I en delrapport levert til Miljødirektoratet er det opplyst om at 660 m<sup>3</sup> betong ble gjenvunnet og brukt som fyllmasse under den nye skolen [118]. Denne rapporten ble dog levert den 29. november, mens klimagassberegningen er datert den 11. november. I beregningen nevnes det aldri at det er brukt gjenvunnet betong i skolen; i stedet står det at det er 81,8 m<sup>3</sup> med (ny) B30-betong i gulv på grunn, og 79,9 m<sup>3</sup> B35 i direkte fundamentering. Derfor vil det i denne oppgaven også bli brukt ny betong i grunnen.

Tidsperspektivet i rapporten er satt til 60 år. Når det kommer til hvilke livsløpsfaser som er vurdert, er det noe motstridende informasjon i rapporten. Fasene som er oppramset i teksten er ikke de samme som står i resultatene. Det antas at fasene i resultatene er de korrekte. De vurderte livsløpsfasene er gitt i Tab. 5.1. Resultatene fra beregningen er fordelt på de forskjellige fasene, slik at det er mulig å for eksempel se hvor mye CO<sub>2</sub> som kommer fra produktfasen. Dette kan brukes når massivtreskolen skal sammenlignes med versjonene i betong og geopolymerbetong. I Tab. 5.2 er resultatene fra klimagassberegningen vist.

Tabell 5.1: Livsløpsfasene som er vurdert i klimagassberegningen til Norconsult for Sæbø skule.

| Produktfase |           |            | Gjennomføringsfase |            | Bruksstadium |            | Livsløpets sluttstadium |           |                   |           |
|-------------|-----------|------------|--------------------|------------|--------------|------------|-------------------------|-----------|-------------------|-----------|
| A1          | A2        | A3         | A4                 | A5         | B4           | B5         | C1                      | C2        | C3                | C4        |
| Råvarer     | Transport | Produksjon | Transport          | Byggeplass | Utskifting   | Renovering | Riving                  | Transport | Avfallshåndtering | Avhending |

Tabell 5.2: Resultatet av Norconsult sin klimagassberegning på et referansebygg og Sæbø skule i massivtre.

| Livsløpsstadium                | Referansebygg            |             | Prosjektert bygg         |             |
|--------------------------------|--------------------------|-------------|--------------------------|-------------|
|                                | tonn CO <sub>2</sub> -eq | Andel       | tonn CO <sub>2</sub> -eq | Andel       |
| A1-A3 Byggematerialer          | 394                      | 80%         | 196                      | 63%         |
| A4 Transport til byggeplass    | 11                       | 2%          | 2                        | 1%          |
| A5 Byggeplass                  | 19                       | 4%          | 16                       | 5%          |
| B4-B5 Utskifting og renovering | 48                       | 10%         | 54                       | 17%         |
| C1-C4 Livsløpets slutt         | 23                       | 5%          | 44                       | 14%         |
| <b>Total</b>                   | <b>495</b>               | <b>100%</b> | <b>318</b>               | <b>100%</b> |



## 6 | Metode

Denne oppgaven bruker hovedsaklig kvantitative metoder for å svare på forskerspørsmålet. Metoden er en firedelet prosess, som består av litteraturstudie og etablering av teorigrunnlag; datainnsamling og LCA på Saferock sin geopolymerebetong; en omprosjektering av Sæbø skule fra massivtre til betong og geopolymerebetong; og til slutt en LCA på de forskjellige skoleversjonene. Dette kapitlet går nærmere inn på de ulike metodene.

### 6.1 Litteraturstudie

I starten av prosjektet var geopolymere et nytt konsept for meg. Det er et bredt tema med mange ulike varianter, og det ble derfor viet mye tid til å forstå hvordan materialet får sine egenskaper, og hvilket relevant forskningsarbeid som har blitt utført på geopolymere. Mannen bak de moderne geopolymere som kan brukes som sement og betong, J. Davidovits, var en svært viktig kilde under litteraturstudien. Boken hans, *Geopolymer Chemistry and Applications* [8], inneholder en detaljert gjennomgang av de kjemiske prosessene som inngår i geopolimerisasjon, hvordan materialet har utviklet seg siden han tok patent på 70-tallet, hvilke bruksområder materialet kan ha i bygge- og anleggsbransjen, og hvilke utfordringer som gjenstår før det kan bli innført på lik linje med portlandsement. Davidovits er sitert i så og si alt forskningsarbeid som er gjort på området, og også gjennom hele kapittel 3.2 *Geopolymere* i denne oppgaven.

Forskningsartikler om geopolimersementer har hovedsaklig blitt hentet fra nettstedene ScienceDirect og SpringerLink. Nettstedene inneholder tusenvis av fagfelleverderte artikler, journaler og bøker. Artikkelen inneholder som regel kildehenvisninger til andre artikler på samme nettsted; dette gjør det enkelt å lage en samling av relevant, vitenskapelig litteratur. Samtidig ble det forsøkt å gjøre søk på andre steder, som på Google Scholar, for å unngå å havne i en loop av selvrefererende artikler. Søkene førte til treff i andre nettsteder, som MDPI og ASCE Library, i tillegg til de to ovennevnte. Dessverre er ikke all litteratur fritt tilgjengelig, spesielt bøker og oppslagsverk, så de to første nettstedene forble de viktigste kildene for forskningsartikler. Det mer usikre nettstedet ResearchGate ble også brukt i tre tilfeller, men her var forfatterne henholdsvis Davidovits [70] og to andre med rundt 150 til 200 publikasjoner [63], [73].

Forskningsarbeidet til M. Khalifeh, professoren bak den norittbaserte geopolymerebetongen til Saferock, var også en viktig del av litteraturstudien. Publikasjonene hans fra 2012 og fremover

[119] viser utviklingen av de ulike geopolymersementene hans, og hva som førte til den som er utgangspunktet for denne oppgaven. Formålet med arbeidet hans har vært å utvikle en alternativ sement til plugging av oljebrønner, og det har dermed blitt stilt andre krav til sementen enn i byggsammenheng. Mesteparten av forskningen har fokusert på bearbeidbarheten til sementen under høyt trykk under vann. Unntaket er to artikler fra 2016 [120] og 2017 [56] som beskriver en aplittbasert og en norittbasert geopolymersement som herder under normalt trykk. Den sistnevnte er den eneste tilgjengelige artikkelen til Khalifeh om norittbaserte geopolymersementer, og det antas at videre arbeid var konfidensielt etter at Saferock ble etablert.

Kapittel 3.1 *Betong* er viet til å beskrive betong og ulike sementerstatninger. Selv om disse har vært gjennomgående temaer under hele utdanningen, var det likevel nyttig å gjennomgå produksjonsprosessen til portlandsement. Dette la et bedre grunnlag for å forstå geopolymerasjon, og hva som skiller de to sementtypene. Det var også nødvendig å gjennomgå pozzolaner og andre sementerstatninger, ettersom de spiller en viktig rolle i både vanlig betong og geopolymerbetonger. De norske standardene for sement [7] og tilslag [49] var viktige kilder under skrivingen av dette kapitlet. Det ble også brukt diverse oppslagsverk og forskningsartikler, i tillegg til rapporter fra Statens vegvesen [47], [50].

Kapittel 3.3 *Massivtre* beskriver de to vanligste massivtreetypene limtre og krysslaminert tre, og noen av miljøfordelene og -ulempene med materialet. Som med betong var teorien bak massivtre også gjennomgått tidligere i studieløpet. De viktigste kildene i kapitlet var bøkene *Timber Engineering – Principles for Design* [87] og *Limtreboka* [86]. Byggeforskserien 520.205 – *Massive treelementer* [89] inneholdt også nyttig informasjon om utføring og bruksområder for CLT-elementer i Norge.

Kunnskapsbakgrunnen for livsløpsvurderinger var forholdsvis mangelfull og overfladisk før oppgavestart. Det ble derfor viet tid til å gjennomgå standardene ISO 14040, 14044 og NS 3720 [91], [94], [95] for å få en dypere forståelse for LCA-metodikken. Her beskrives de forskjellige konseptene i LCA i nøye detalj. Det ble også sett på annen litteratur, som *LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment* fra Springer, men dette var i stor grad bare en omskriving av ISO-standardene 14040 og 14044. Dokumentasjonen i SimaPro, og spesielt den for ecoinvent-databasen og ReCiPe-metodikken, inneholdt svært nyttig teoretisk og praktisk informasjon om temaet [102]–[104].

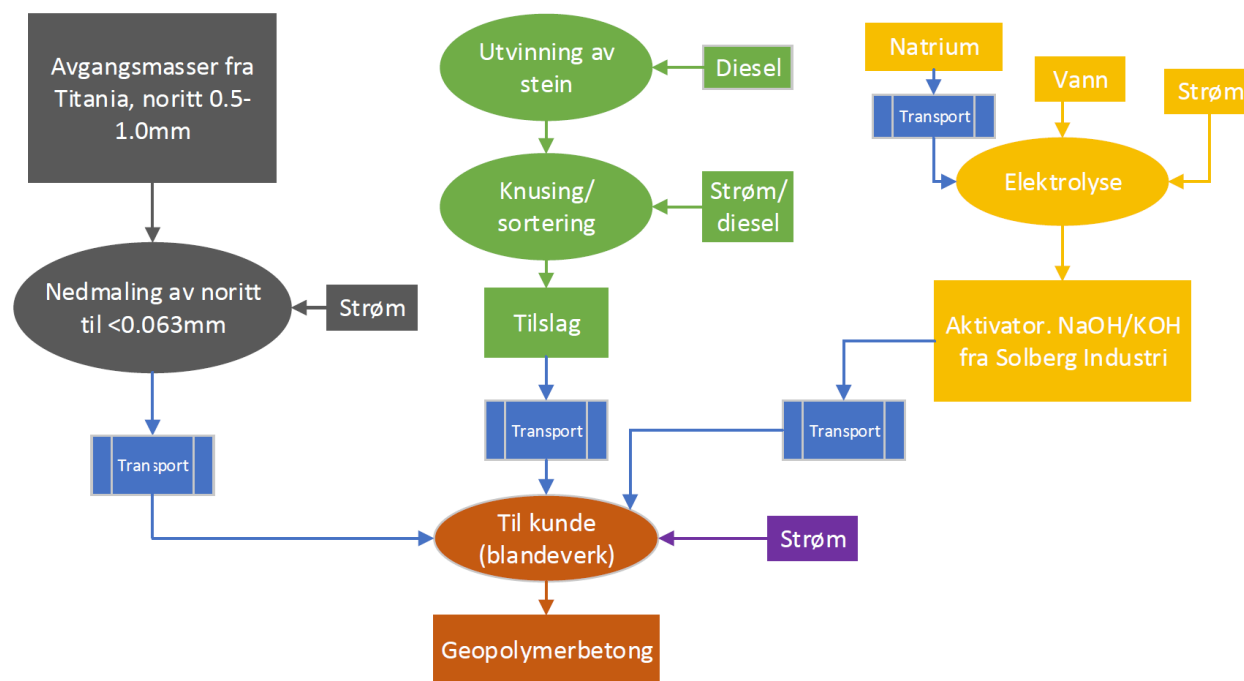
## 6.2 LCA på Saferock sin geopolymerbetong

Etter at kunnskapsgrunnlaget var etablert, begynte den andre delen av oppgaven. Dette var å utføre en livsløpsvurdering på Saferock sin geopolymerbetong ved hjelp av SimaPro. I starten av oppgaven ble det etablert kontakt med daglig leder Espen Lea og forsker Ida Marie Gabrielsen ved Saferock. Kontakten ble opprettholdt gjennom arbeidet med oppgaven.

### 6.2.1 Fastsettelse av hensikten og omfanget

Ettersom firmaet er i forskningsfasen, ble det bestemt at studien skulle ta utgangspunkt i en fremtidig produksjon av betongen. Et førsteutkast til prosessflytdiagrammet for systemet ble tegnet i

Microsoft Visio. Dette er vist i Fig. 6.1. Den funksjonelle enheten ble satt til  $1 \text{ m}^3$ , som er det samme som EPD-er for vanlig betong bruker. Livsløpsfasene A1 til A3 ble valgt, til forskjell fra EPD-er som inkluderer A4 - transport til byggeplass. A4 er ekskludert i denne studien fordi transportavstanden kan variere med flere hundre kilometer, avhengig av kunden. Det er derfor ikke ønskelig å ha én fast avstand på for eksempel 50 km innbakt i resultatene.



Figur 6.1: Førsteutkast til prosessflytskjema for Saferock sin geopolymerbetong.

Studien går fra såkalt vugge til port, altså fra uthenting av råmaterialer til ferdig produkt i fabrikk. Det ble derfor valgt metoden ReCiPe MidPoint i SimaPro. Denne inkluderer ikke kategoriendepunkter, som vil si at langtidseffekter som langtidsskader på menneskelig helse og økosystemer ikke er med i vurderingsfasen. På bakgrunn av teorien om SimaPro ble det valgt å bruke databasen “ecoinvent 3.7.1 - allocation, cut-off by classification - unit”. Der det var flere prosesser tilgjengelig for én type produkt ble det i høyest mulig grad forsøkt å bruke de nyeste dataene med de mest relevante geografiske lokasjonene. Det ble også forsøkt å bruke EPD-er og andre LCA-studier til å sammenligne med prosessene i databasen, og vurdere om innholdene stemte overens.

### 6.2.2 Livsløpsregnskapsfasen (LCI)

Det ble satt opp tabeller for livsløpsregnskapsfasen (LCI) i Excel. Disse bestod av betongresepten og stegene i produksjonsprosessen. Innholdet ble oppdatert fortløpende når data ble tilgjengelig, hovedsaklig fra Saferock. I SimaPro ble geopolymerbetong-prosessen oppdatert parallelt med tabellene i Excel. Den ble også analysert sporadisk for å se hvordan endringer i prosessen påvirket resultatene.

Det var kjent at aktivatoren, bestående av kaliumhydroksid (KOH) og vann, ville være den største

kilden til utslipp i geopolymerebetongen. Derfor var det viktig å prøve å oppdrive gode data for denne prosessen. Solberg Industri, som har levert KOH-pulver til Saferock, ble kontaktet for å få mer informasjon om hvilke leverandører og produksjonsprosesser de bruker. Dessverre manglet de denne informasjonen, eller kunne ikke dele den. Dermed måtte prosessen for aktivatoren bygges opp ved hjelp av ferdige underprosesser i SimaPro, og med verdier for mengder fra Saferock. Det ble valgt å bruke en markedsprosess, istedenfor transformasjon, siden produksjonsstedet var ukjent.

I ecoinvent-databasen ligger det én prosess for europeisk KOH, kalt “Potassium hydroxide {RER}”. Denne er basert på en rapport fra 2007 [61, s. 702], som beskriver in- og outputene, strømforbruket, transporter og antakelser som har blitt gjort. Prosessen i SimaPro tar utgangspunkt i de samme tallverdiene og oppbygningen av den opprinnelige prosessen, men bruker oppdaterte prosesser som inputer. For eksempel er strømkildene mer representative for dagens strømnnett. Det ble også forsøkt å finne tidligere livsløpsvurderinger og EPD-er på KOH, slik at disse kunne sammenlignes med prosessen i SimaPro. Etter å ha søkt i Google Scholar ble det kun funnet livsløpsvurderinger på produkter som inneholdt KOH, men ikke på rent KOH. Flere av studiene brukte SimaPro til analysene, og det antas at de dermed har brukt den samme prosessen som er beskrevet i dette avsnittet.

Andre inputer i geopolymerebetongen er norittpulver fra Titania, tilslag, energibruk i blandeverk og transportetapper. Etersom noritt er et avfallsprodukt, har tilvirkningen av den ingen effekt på geopolymerebetongen. Men den må males ned til under  $63 \mu\text{m}$ . Energien nedmalingen krever ble oppgitt av Saferock og lagt inn i SimaPro som en norsk strøminput. Tilslaget består av sand og pukk, og disse ble også lagt inn basert på verdier fra betongresepten. Det ble lagt til en transport på 80 km fra en teoretisk leverandør til blandeverket. Energibruket i blandeverket ble kopiert fra en prosess i SimaPro for kanadisk betong. Energikildene ble endret fra diesel, naturgass og kanadisk strøm, til kun norsk strøm. Antakelsen om at et norsk blandeverk kun bruker strøm som energikilde ble gjort etter samtaler med Norsk Spennbetong og med R. T. Thorstensen ved UiA [121], [122].

### 6.2.3 Livsløpseffektvurdering (LCIA)

Da all informasjonen til livsløpsregnskapet var samlet inn, og prosessen var ført inn i SimaPro, ble geopolymerebetongen analysert i programmet. I tillegg ble det lagd en “optimal blanding” av betongen, basert på en betongresept Saferock ønsker å realisere i fremtiden. Denne blandingen består av vesentlig mindre noritt og aktivator, og vil ha lavere utslipp. Men siden selskapet foreløpig ikke klarer å lage en brukbar betong med denne resepten, vil ikke den optimale blandingen få mye oppmerksomhet i LCA-studien. Det ble også undersøkt hvilken påvirkning KOH fra forskjellige steder ville ha på de totale utslippene.

Under simuleringen beregner SimaPro automatisk alle de 18 effektkategoriene som er inkludert i ReCiPe MidPoint-metoden. Derfor ble det valgt å ikke ekskludere noen i forkant av beregningene, men heller vurdere forskjellene og relevansen av dem individuelt i tolkningsfasen. I utgangspunktet er det likevel mest naturlig å fokusere på kategorien GWP (Global Warming Potential), som uttrykkes i kg CO<sub>2</sub>-ekvivalenter.

### 6.3 Omprosjektering av Sæbø skule til betong

For å kunne vurdere miljøpåvirkningene til geopolymerbetong i et bygg, ble Sæbø skule valgt. Siden denne var prosjektert i massivtre, måtte den omprosjekteres til betong og stål for at dimensjonene på bæresystemet, og dermed materialmengdene, skulle bli realistiske. Prosjektering av bygg kan være en tidkrevende prosess, og er uansett av liten forskningsinteresse i denne oppgaven. Derfor ble det forsøkt å gjøre omprosjekteringen på en tidseffektiv måte med hjelp fra ingeniører i Norconsult. De anbefalte verdier til senteravstand mellom søyler og dimensjoner på disse. I tillegg anbefalte de hva slags vegger som burde brukes innvendig og utvendig, og som bærende og ikke-bærende. Det ble også valgt hvilke tak, dekker og fundamenter som skulle brukes. Materialene og dimensjonene som ble anbefalt var hovedsaklig erfaringsbaserte, og var et godt utgangspunkt for å komme i gang med omprosjekteringen.

Plantegninger av den opprinnelige skolen ble printet ut slik at det nye bæresystemet kunne tegnes på for hånd. Etter at dette var gjort, måtte den digitale modellen endres. IFC-filen til skolen ble åpnet i Revit, og så endret til å ha materialene og dimensjonene som ble anbefalt av ingeniørene i Norconsult. Dører, vinduer og trapper ble beholdt, mens alle vegger, dekker, tak, bjelker, søyler og fundamenter ble endret.

For å kontrollere at de valgte dimensjonene i bæresystemet ikke var urealistiske, ble lastene i skolen beregnet. Først ble lastarealer definert for hånd ved å tegne på plantegningene. Lastene blir tatt opp av søylene og betongveggene i første etasje. Lastarealene, søylene og betongveggene ble nummerert og ført inn i et regneark i Excel. Her ble egenlaster og nyttelaster lagt inn, iht. NS-EN 1990 [108].

Egenvekter for armert betong, ståltak og stendervegger ble hentet fra Byggforsk-anvisningen 471.031 – *Egenlaster for bygningsmaterialer, byggevarer og bygningsdeler* [123]. På takene ble den karakteristiske snølasten for Ørsta kommune påført, ganget med formfaktoren  $\mu_2 = 0,8$ , iht. NS-EN 1991-1-3 [124]. I de to første etasjene ble det lagt på en nyttelast fra kategori C2 iht. NS-EN 1991-1-1 [109]. Denne er definert for “Arealer med faste seter, f.eks. arealer i kirker, teatre eller kinosaler, konferanserom, forelesningssaler, forsamlingssaler, venterom medregnet forhall på jernbanestasjon osv.” Både kategori C1 og C3 kunne vært brukt i noen av rommene i skolen, men for enkelthets skyld ble C2 valgt som et gjennomsnitt. En dimensjonerende bruddlast  $q$  ble så regnet ut ved å gange egenlastene med 1,2 og nyttelastene med 1,5, iht. NS-EN 1990. Lastene ble så beregnet for alle betongveggene, i tillegg til et representativt utvalg av søylene.

Etter at lastene var funnet, ble verdiene sett over av en ingeniør i Norconsult. Det ble også funnet interne lastberegninger fra en tidligere versjon av massivtreskolen. Etter sammenligning med disse ble det konkludert at lastene var rimelige og kunne brukes i oppgaven. Det ble bestemt å gjøre ca halvparten av søylene én dimensjon større som følge av beregningene. For å bestemme størrelsen på fundamentene og hvor dypt de skulle under bakken, ble interne rapporter fra geoteknikk brukt. Rapportene oppga bakketrykket og krav til minimumsdybde, og dette ble brukt til å anslå dimensjoner til fundamentene.

## 6.4 LCA på Sæbø skule

Etter at skolen var omprosjektert til betong og stål, ble det lagt inn tre hovedprosesser i SimaPro: én for hver versjon av skolebygget. Hver versjon ble bygd opp med prosesser for de forskjellige bygningsdelene. Hver av disse prosessene bestod igjen av underprosesser for de ulike materialene og transportene som inngår i bygningsdelen. Underprosessene ble valgt basert på hvor godt de stemte overens med materialene som var tenkt brukt i skolebygget. Prosessene er generelt godt dokumentert i SimaPro, med detaljerte beskrivelser av produktets oppbygning og produksjonsprosess. Det gjør det mulig å for eksempel velge en europeisk-produsert betongtype med trykkfasthet på 35 MPa som inneholder flyveaske. Andre kriterier, som alderen på dataene som er brukt i prosessen, og hvor stort produksjonsvolum dataene er basert på, var med på å påvirke valg av prosess dersom det var relevant.

Valg av livsløpsfaser i studien ble gjort basert på tilgjengelighet av informasjon. Transformasjonsprosessene for materialer i den valgte databasen gjelder for produktfasene A1 til A3. Transportfasen fra fabrikk til byggeplass (A4) legges inn for hver prosess basert på avstanden fra produsenten til Ørsta. Byggefase A5 er dog mer usikker, ettersom byggingen av betongskolene er teoretisk, og det ikke foreligger tall på dieselforbruk av anleggsmaskiner, o.l. Det er også usikkerhet rundt sluttfasene i livsløpet, C1 til C4, som gjelder avfallshåndteringen av de ulike materialene. I SimaPro er det mulig å definere avfallsscenarioer for prosessene i systemet, men dette er svært komplisert og krever å gjøre antakelser mange tiår frem i tid. Det ble derfor bestemt å unnlate fasene etter A4 i livsløpsvurderingene på skolen, ettersom disse ville ha tilført stor usikkerhet til studien.

For å fylle ut LCI-en ble de ulike konstruksjonsdelene sortert etter materiale i Excel. Med den ferdige Revit-modellen var det mulig å hente ut det totale volumet av hver bygningskomponent, og så føre dette inn i Excel. For komponenter som inneholdt flere materialer, som stendervegger, ble det totale volumet ganget med andelen av hvert materiale i tverrsnittet. Komponenter som stålsøyler ble regnet om til kilogram ved hjelp av massetetthet, siden SimaPro bruker masse, og ikke volum, som input for stål. Materialmengdene for vinduer og dører ble kopiert fra Norconsult sin opprinnelige beregning, ettersom disse var uendret. For å anslå armeringsmengder ble verdier fra Norsk Prisbok brukt. Der er det for eksempel foreslått å bruke  $120 \text{ kg/m}^3$  armering i plasstøpte dekker på 250 og 300 mm tykkelse. Takene består av korrugerte stålplater, og stålvolumentene ble beregnet basert på dimensjoner gitt i produktbrosjyren til Tata Steel [125].

Det ble valgt å ekskludere enkelte konstruksjonsdeler av skolen fra LCI-en. Dette var fordi mengden av disse var for lave til å ha en betydelig virkning på utslippene. Noen av delene som ble ekskludert var stendere i vegger, himling, uteområdene sine dekker, VVS-anlegg og overlyset på taket i andre etasje.

Det ble også lagt inn transportavstander for hvert materiale. Dette innebærer å finne en leverandør av materialet, og finne avstanden i Google Maps. For materialer som stål og massivtre, som ofte leveres fra andre land og i store kvanta, utgjør ofte transporten en betydelig del av utslippene. Derfor var det ønskelig å bruke realistiske tall her. Transporten av betong utgjør også en stor utslippsfaktor,

selv om leverandøren gjerne er mye nærmere prosjektet. I de interne dokumentene til prosjektet ble det funnet produsenter av både betong og massivtre, og transportavstandene til disse ble da lagt inn. En stålleverandør ble derimot ikke funnet i dokumentene, og det ble da forsøkt å finne plausible alternativer basert på tidligere prosjekter. En norsk stålleverandør som produserer de aktuelle stålsøylene ble så funnet, og transportavstanden ble ført inn. Dette ble også gjort for de resterende produktene hvor det var ukjent hvilken leverandør som var brukt i den virkelige skolen.

I SimaPro legges transport inn med enheten tkm (tonn-kilometer). Ettersom noen av materialene, som betong, isolasjon, tre og glass, regnes i kubikk-/kvadratmeter, måtte disse regnes om til tonn. Massetettheter fra Byggforsk 471.031 [123] ble brukt til dette. Massetettheter fra dokumentasjonen i SimaPro og EPD-er ble også brukt, dersom det var oppgitt. Massen ganges så med transportavstanden i kilometer. Det finnes mange transportprosesser i SimaPro, som ulike typer lastebiler, containerskip og fly. I de fleste tilfellene ble det valgt å bruke lastebiler i EURO6-klassen, og EURO5 til betongtransport.

#### 6.4.1 Sæbø skule med vanlig betong

Ettersom betong og stål utgjør en vesentlig del av klimaregnskapet til et bygg, var det viktig å velge prosesser i SimaPro som mest mulig gjenspeilet de materialene som kunne blitt brukt på Sæbø skule. Et søk på “steel” i SimaPro gir over 400 prosesser. For å bestemme hvilken stålprosess som skulle brukes til stålsøylene, ble Byggforskserien 520.235 *Søylar av stål* [126] brukt. Denne krever stålqualität S355, og refererer til NS-EN 10219-1 - *Kaldformede sveiste hulprofiler av ulegerte og finkornbehandlede konstruksjonsstål* [127] for videre krav. Denne standarden ble dermed undersøkt for valg av stålprosess i SimaPro. I standarden står det at produksjonsmetoden til stålet er opp til produsenten. Stål kan produseres på hovedsaklig to måter: ved smelting av malm i masovn ved å brenne koks, eller ved å smelte malmen ved hjelp av elektrisitet i en lysbueovn [128]. Begge metodene er svært energiintensive, men den sistnevnte bruker for det meste resirkulert skrapjern. I Europa produseres rundt 60% av stål i masovn, og 40% i lysbueovn [129]. Videre skiller standarden mellom stål som er ulegert eller legert med andre metaller (kalt finkornstål). Stålqualität S355 finnes som både ulegert og finkornstål. På bakgrunn av funnene ble det valgt den stålprosessen i SimaPro som passet best med kravene til Byggforskserien og den norske standarden.

For å bygge opp prosessen for ståltakene fra Tata Steel, var det ønskelig å vite ståltypen, produksjonsstedet og oppbygningen av produktet. Selskapet ble kontaktet og de oppgav en EPD for produktet kalt “RoofDek D35 0.9mm steel structural roof deck”. Dette var ikke nøyaktig det samme produktet som ble brukt i den omprosjektete skolen, men det antas at ståltypene og produksjonsstedene er de samme. I EPD-en beskrives produksjonsprosessen nøye, og det var mulig å bruke informasjonen som et utgangspunkt for en tilsvarende prosess for takene i SimaPro. Men på grunn av manglende informasjon om energibruk og materialmengder i EPD-en, var det ikke mulig å bygge opp produktet fra bunnen av. Derfor ble det brukt en ferdig stålprosess i SimaPro, og så ble transportetappene lagt inn.

Som med stål inneholder også SimaPro hundrevis av prosesser for ulike typer betong. Foruten

spesialbetonger er konstruksjonsbetongene sortert etter styrke, type sementerstatning og geografisk område. Innen styrkeklassen 35 MPa er det ti typer betong. Disse er basert på tall hentet inn fra Nord-Amerika (med og uten Quebec), Sør-Afrika og Brasil. De inneholder ulike andeler flyveaske eller slagg, og innholdet i betongreseptene er oppgitt. I de interne dokumentene til Sæbø skule ble det funnet hvilke betong-EPD-er som ble brukt i klimagassberegningen. Disse var B30 og B35 fra Unicon AS, som er produsert i Ørsta. Én kubikkmeter av et utvalg av betongprosessene i SimaPro ble analysert for å sammenligne CO<sub>2</sub>-utslippene med de i EPD-en for B35. Dette ble gjort for å bedømme hvor like eller forskjellige verdiene var, og om det var aktuelt å bruke noen av prosessene i LCA-en. Sammenligningen er vist i Tab. 6.1.

Tabell 6.1: Sammenligning av utslipp fra EPD fra Unicon og ulike betongprosesser i SimaPro.

| Prosessnavn/EPD  | Geografisk kilde | Modellert for            | kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>3</sup> |
|--|------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| EPD: B35 M45 Ørsta UN55A-D000  | Ørsta, Norge     | Norge                    | 237                                   |
| concrete, 35MPa {RoW}  | Sør-Afrika       | Rest-of-World            | 257                                   |
| concrete, 35MPa {North America without Quebec}                         | Nord-Amerika     | Nord-Amerika uten Quebec | 319                                   |
| concrete, 35MPa {CA-QC}  | Nord-Amerika     | Quebec                   | 302                                   |
| concrete, 35MPa {RoW}, ready-mix, with cement blast furnace slag 6-34% | Brasil           | Rest-of-World            | 267                                   |

Ettersom det ikke finnes en betongprosess i SimaPro som er basert på europeiske tall, ble det valgt å kopiere en av de andre prosessene og så tilpasse innholdet. I EPD-en til B35-betongen fra Unicon er betongresepten oppført, og denne ble brukt som oppskrift i den nye prosessen. Som utgangspunkt for den nye betongen ble prosessen fra Quebec valgt, ettersom denne inneholdt få inputer som måtte redigeres. Mengden og typen sement, tilslag, flyveaske og vann ble så endret til nærliggende europeiske/norske prosesser. Elektrisitetstetningsmiksen ble også endret fra quebecansk til norsk. Andre inputer, som “Acetic acid” og “Ethylene oxide”, ble endret fra global til europeisk lokasjon. Mengdene ble derimot ikke endret, ettersom disse ikke er konkret oppført i betongresepten i EPD-en; der står det bare 3,06 kg med “Chemicals”. Da betongprosessen var ferdig, ble den brukt i alle konstruksjonsdelene som inneholdt betong i SimaPro.

#### 6.4.2 Sæbø skule med geopolymertbetong

Etter at LCI-en på skolen med vanlig betong var ferdig, ble versjonen med geopolymertbetong påbegynt. Siden begge skolene hadde identiske materiallister, var det kun betongen som måtte endres. Alle prosessene ble derfor kopiert inn i den overordnede prosessen kalt “Sæbø skule i geopolymertbetong”. Så ble den vanlige betongen erstattet med prosessen for geopolymertbetong som ble utviklet tidligere i oppgaven. I tillegg måtte transportprosessene for betongen endres. Ettersom Titania ligger over 70 mil unna Ørsta, ville det være enorme transportutslipp dersom hele betongen skulle transporteres. Derfor ble det valgt å kun transportere norittpulveret og KOH-pulveret fra Titania, og anta at det ble brukt tilslag og vann fra samme sted som den vanlige betongen (Unicon).



### 6.4.3 Sæbø skule med massivtre

I de interne dokumentene fra Norconsult sin klimagassberegning på Sæbø skule, er det oppført en komplett materialliste. Listen er delt inn i bygningskomponenter, som gulv i grunn, dører og vinduer, søyler og primærkonstruksjon. Komponentene består av navnet på inputene som er brukt i One Click LCA, mengden av dem, og eventuelt hvilken EPD som er brukt. Materiallisten ble brukt som grunnlag for massivtreskolen i SimaPro. De samme komponentene ble ekskludert fra denne versjonen av skolen som med betongskolene, slik at sammenligningsgrunnlaget til de tre skolene ble mest mulig likt.

Som nevnt tidligere var det ønskelig å bruke prosesser for massivtre som mest mulig gjenspeilet virkeligheten. Dette er fordi massivtreet naturligvis er den største forskjellen fra betongversjonene av skolen og vil utgjøre en viktig del av miljøanalysen. Norconsult har brukt EPD fra Moelven til limtreet [130] og fra Stora Enso til de krysslaminerte delene [131]. Transportavstandene til disse ble lagt til i materiallisten. I SimaPro er det prosesser for både limtre og CLT produsert i Tyskland. Disse ble redigert til å bruke strøm fra henholdsvis Norge og Sverige. Utover det ble ikke prosessene endret, ettersom det ikke foreligger nok informasjon i EPD-ene til å bygge opp en prosess fra bunnen av.

## 6.5 Sensitivitetsanalyse og scenarioanalyse

I en LCA-studie blir det gjort mange antakelser og forenklinger. Dette kan føre til usikkerhet rundt resultatene. De prosessene som har stor påvirkning på resultatene bør derfor kontrolleres gjennom en sensitivitetsanalyse. Denne kan utføres ved å øke mengden av en prosess med 1% og se hvor mye totalutslippene øker. Dette gjøres så for hver relevant prosess, og man ser hvilke prosesser som har størst påvirkning på totalsystemet. En sensitivitetsanalyse ble derfor utført på betong- og geopolymerbetongversjonen av skolen.

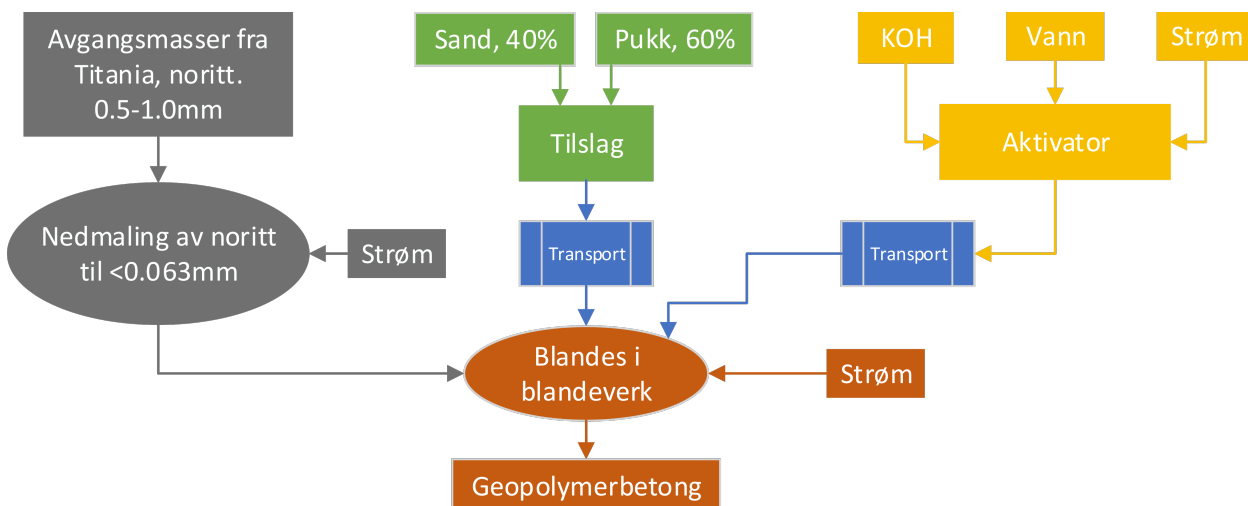
Det ble også lagd flere scenarioer for geopolymerbetongen og skolene. Dette er for å se hvordan små eller store endringer i en input endrer de endelige resultatene. Et av scenarioene var å sammenligne geopolymerbetonger produsert med kaliumhydroksid med ulike geografiske opphav i SimaPro. Et annet scenario var å endre armeringens opphav i betongskolene. Det er ikke gitt at armeringen i det tenkte skolebygget vil komme fra Europa, så derfor ble det forsøkt å endre prosessen fra Europa til Rest-of-World.

## 7 | Resultater

I dette kapitlet presenteres først resultatene fra livsløpsvurderingen på geopolymertbetongen. Så blir den omprosjekterte skolen i betong vist, og hvilke materialer og mengder som er brukt. Så presenteres resultatet av livsløpsvurderingene på Sæbø skule utført i vanlig betong, geopolymertbetong og massivtre. Til slutt kommer resultatene av sensitivitets- og scenarioanalysene.

### 7.1 LCA på geopolymertbetong

Det har blitt utført en LCA-studie på geopolymertbetongen til Saferock. Prosessflytskjemaet for systemet er vist i Fig. 7.1. I figuren er rektangler produkter, mens ovaler er prosesser som blir gjort med produktene. Det er egne, blå rektangler til transportetappene. Systemet er basert på en fremtidig produksjonsprosess, hvor avgangsmasser fra Titania blir nedmalt i en fabrikk ved gruve. Tilslag og aktivator blir levert til fabrikk, hvor alt blandes til geopolymertbetong i et blandeverk. Transport til kunde er ikke inkludert. Den nedmalte noritten og aktivatoren kan også leveres til andre blandeverk som tilsetter vann og tilslag, men dette scenarioet er ikke inkludert i LCA-studien. Det forutsetter nemlig en bestemt avstand til andre blandeverk, men denne avstanden kan variere vesentlig fra kunde til kunde.



Figur 7.1: Prosessflytskjema for geopolymertbetongen til Saferock.

### 7.1.1 LCI

I Tab. 7.1 er betongresepten til geopolymerebetongen vist. Det er også lagt med resepten til den optimale blandingen Saferock ønsker å oppnå i fremtiden. KOH-pulver vil si 100% rent kaliumhydroksid, selv om produktet som regel leveres som en løsning med vektprosent opptil 50%. Løsningen til Saferock tilsettes vann slik at den får en vektprosent på 15%. Dette kalles aktivatoren, og den utgjør 15% av den totale massen til den vanlige betongresepten. I den optimale blandingen utgjør aktivatoren bare 5%, men dette er som sagt et idealisert tilfelle.

Tabell 7.1: Betongreseptene til den vanlige og den optimale geopolymerebetongen.

| Materiale          | Vanlig geopolymerebetong |              | Optimal blanding |              |
|--------------------|--------------------------|--------------|------------------|--------------|
|                    | Prosentdel (%)           | Mengde (kg)  | Prosentdel (%)   | Mengde (kg)  |
| Norittpulver       | 35                       | 1 120        | 25               | 800          |
| KOH-pulver         | 2,25                     | 46           | 0,75             | 15           |
| Vann i aktivator   | 12,75                    | 127          | 4,25             | 42           |
| Sand               | 20                       | 540          | 28               | 810          |
| Pukk               | 30                       | 780          | 42               | 1 040        |
| Tilsetningsstoffer | 0                        | 0            | ~0               | 2            |
| <b>Totalt</b>      | <b>100</b>               | <b>2 613</b> | <b>100</b>       | <b>2 710</b> |

I Tab. 7.2 er inputene til den vanlige geopolymerebetongen i SimaPro vist. Tabellen viser hvilke prosesser som er brukt, og mengden av disse. Som nevnt i metodekapitlet ble det brukt en global markedsprosess til kaliumhydroksidet. Prosessen inkluderer transportmidler og -avstander basert på globale gjennomsnitt.

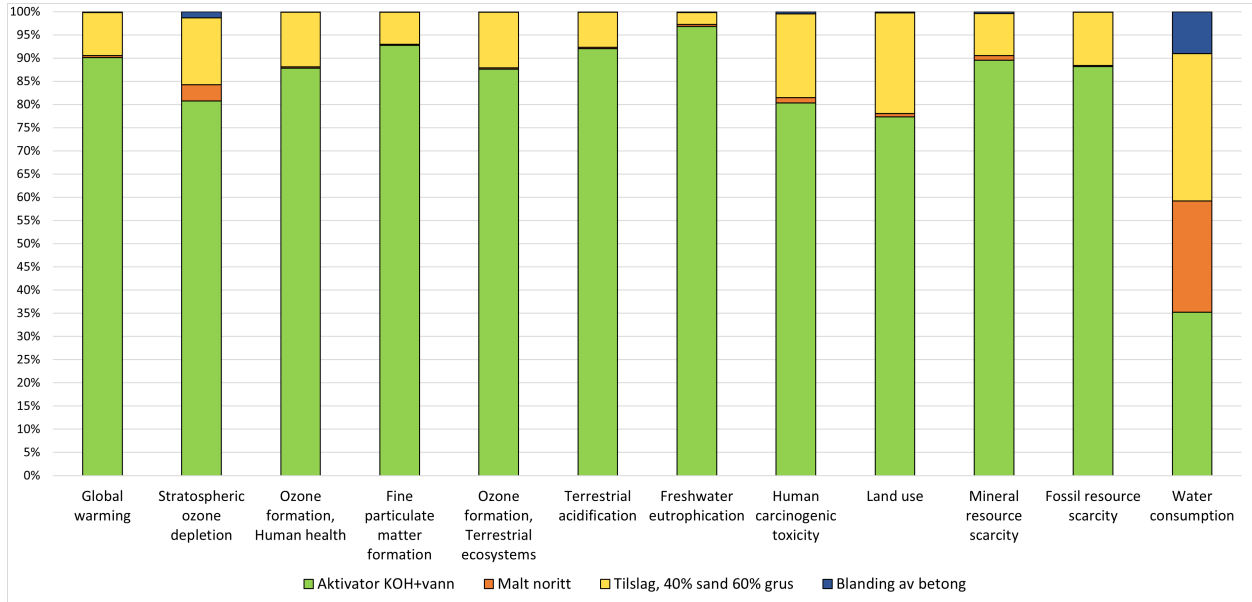
Tabell 7.2: Oppbygning av den vanlige geopolymerebetongen i SimaPro.

| Input: prosessnavn i SimaPro                          | Mengde | Enhet | Kommentar                    |
|---|--------|-------|------------------------------|
| Electricity, medium voltage {NO}  market for          | 108,9  | MJ    | Nedmaling av 1120 kg noritt. |
| Potassium hydroxide {GLO}  market for                 | 46     | kg    | Global markedsprosess.       |
| Tap water {Europe without Switzerland}                | 127    | kg    |                              |
| Sand {NO}  gravel and quarry operation                | 540    | kg    |                              |
| Gravel, crushed {NO}  production                      | 780    | kg    |                              |
| Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} | 105,6  | tkm   | Transport av tilslag, 80 km. |
| Electricity, medium voltage {NO}  market for          | 11,4   | kWh   | Blanding av betong.          |

### 7.1.2 LCIA

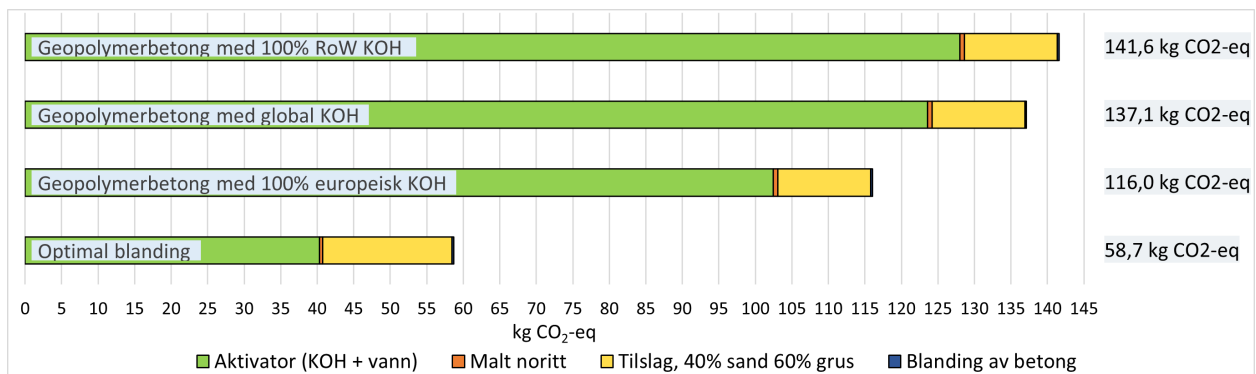
Figur 7.2 viser effektvurderingen for geopolymerebetongen med utvalgte effektkategorier. I Vedlegg B er alle effektkategoriene vist. Aktivatoren er, som forventet, den største kilden til utslipp i alle

effektkategoriene. Tilslaget er den nest-største kilden, mens nedmalingen av noritt og strømmen i blandeverket er neglisjerbare i de fleste kategoriene. Det høye vannbruket i prosessene i den siste kategorien kommer hovedsaklig fra norsk vannkraft. Vannbruket i tilslaget kommer av at prosessen delvis baseres på uthenting av sand og grus fra elvebredder.



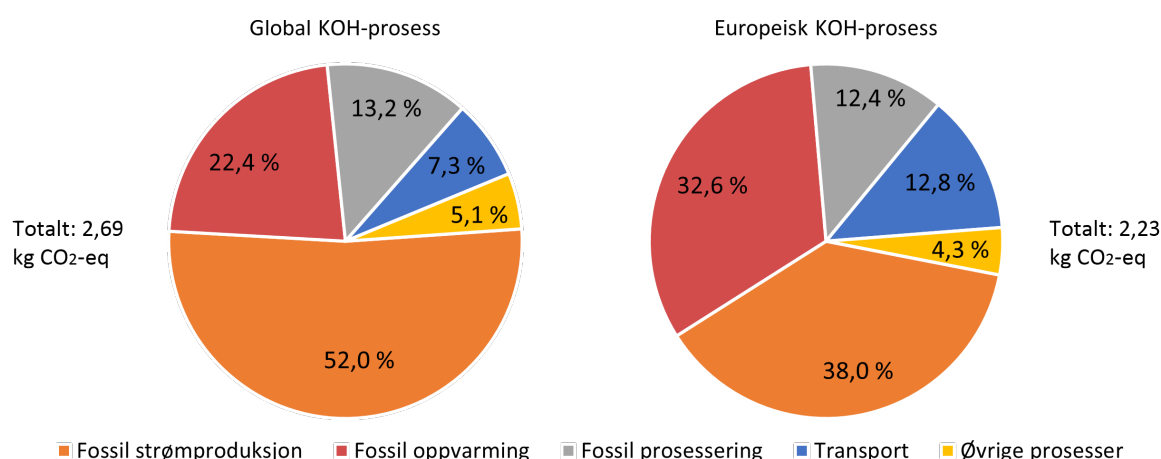
Figur 7.2: Effektvurdering for 1 m<sup>3</sup> geopolymerbetong analysert i SimaPro.

Den vanlige og den optimale geopolymerbetongen ble analysert i effektkategorien “global oppvarming”. Utslippene er henholdsvis 137,1 og 58,7 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup>. I den vanlige geopolymerbetongen står KOH for 90,1% av CO<sub>2</sub>-utslippene, mens den står for 68,6% i den optimale blandingen. Den globale markedsprosessen til KOH i SimaPro består av 17% europeisk og 83% Rest-of-World-KOH som inputer. Ettersom det er uvisst hvor kaliumhydroksidet til geopolymerbetongen produseres, ble det forsøkt å bruke 100% av hver type KOH, og sammenligne CO<sub>2</sub>-utslippene. Resultatet av dette er vist i Fig. 7.3. Den europeiske KOH-en har lavest utslipp på grunn av renere energikilder. Men på grunn av usikkerheten rundt leverandør ble den globale prosessen som består av både europeiske og RoW-inputer brukt i videre simuleringer.



Figur 7.3: Bidrag til global oppvarming per m<sup>3</sup> i forskjellige typer geopolymerbetong.

Ettersom KOH-en spiller en så viktig rolle i utslippene til geopolymerbetonen, ble prosessen “Potassium hydroxide {GLO}| market for” undersøkt nærmere. I Vedlegg C er litt av nettverksdiagrammet til KOH-prosessen vist. Dette viser at nesten alle de største bidragene til utslipp kommer fra fossilbasert strømproduksjon og oppvarming. I SimaPro finnes det en funksjon kalt “Process contribution” som viser hvor mye hver underprosess bidrar til det totale utslippet. Denne listen består av tusenvis av underprosesser, og disse ble sortert etter kategori i Excel. Dette ble også gjort for den europeiske KOH-prosessen, og begge er vist som kakediagram i Fig. 7.4. “Fossil prosessering” vil si underprosesser som er relatert til utvinningen eller tilvirkningen av de fossile energikildene. “Øvrige prosesser” består av diverse inputer som stål, klinker og ikke-fossile energikilder.



Figur 7.4: Utslippskilder i den globale og europeiske KOH-prosessen.

Ett kilo global KOH har et utslipp på 2,69 kg CO<sub>2</sub>-eq. Den europeiske versjonen har et utslipp på 2,23 kg CO<sub>2</sub>-eq. Til sammenligning har ett kilo av portlandsementen som brukes senere i oppgaven et utslipp på 0,7 kg CO<sub>2</sub>-eq. De fossile underprosessene i KOH-ene står for henholdsvis 87,6 og 82,9% av utslippene. Transporten øker i den europeiske prosessen, antakeligvis på grunn av lengre avstander til råvarene. Ellers er det lavere utslipp (i kg CO<sub>2</sub>-eq) i alle de andre kategoriene, sammenlignet med den globale prosessen.

## 7.2 Sæbø skule omprosjektert til betong og stål

Massivtreskolen i Ørsta var utgangspunktet for denne delen av oppgaven. Skolen ble omprosjektert til betong og stål ved hjelp av håndberegninger og programmet Revit. Den omprosjekterte skolen består av betongdekker, ståltak, stålsøyler, bærende betongvegger, og bærende og ikke-bærende stendervegger. Betongdekket over grunnen er 120 mm tykt med 200 mm isolasjon under. Dekket i andre etasje er 250 mm tykt og 300 mm i biblioteket, siden spennviddene er ekstra store der. Ståltakene er 200 mm høye “Acoustic RoofDeks” fra Tata Steel [125] med 300 mm isolasjon. Det er brukt uisolerte, 70 mm tykke ståltak over uteområdene. Det er 13 bærende betongvegger i første etasje, samt en heissjakt i betong. Alle betongveggene er 200 mm tykke. Det er plassert en isolert ringmur på 150x350 mm rundt hele bygget. Betongveggene er fundamentert med 600x300 mm bankett, og søylene har punktfundamenter på 1500x1500x300 og 1200x1200x300 mm, avhengig av

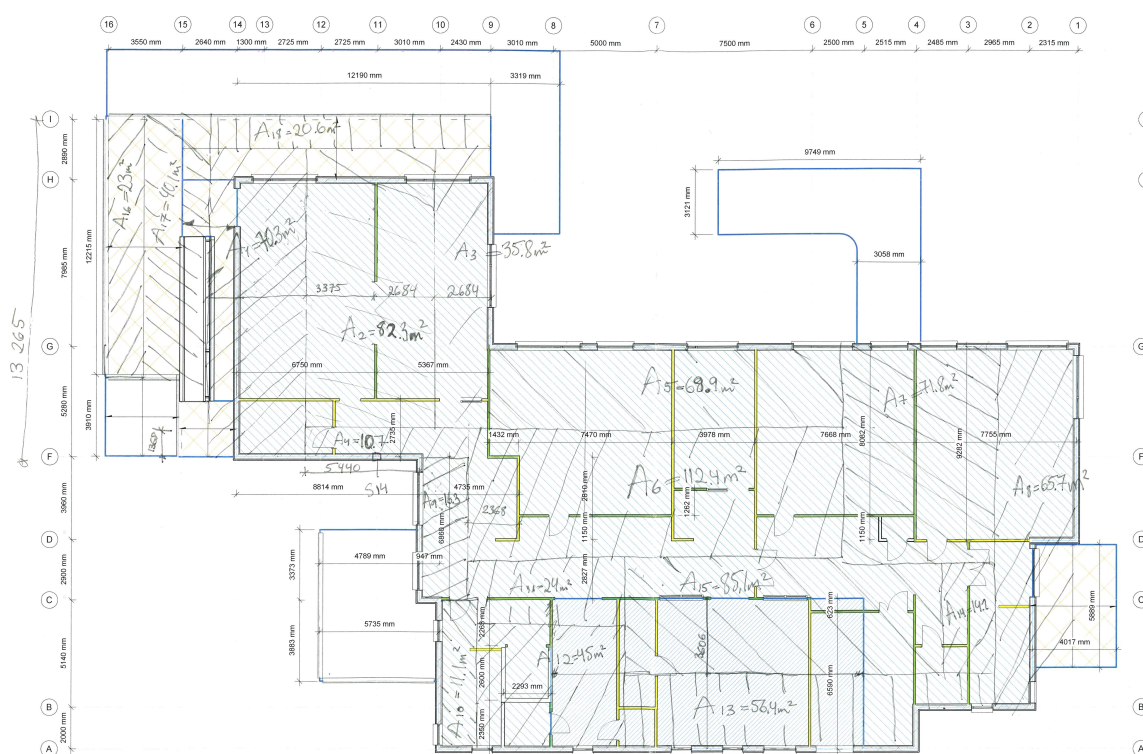
belastningen. Søylerne er en blanding av kaldvalsede rektangulære profiler på 200x100x10, 160x80x8 og 80x5 mm. Sistnevnte ble brukt til å bære taket i uteområdene, sammen med U140-bjelker. Foruten betongveggene er inner- og ytterveggene isolerte stendervegger. Figur 7.5 viser skolen i Revit, med fasade av stående bordkledning.



Figur 7.5: Sæbø skule omprosjektert til betong og stål i Revit.

## 7.2.1 Lastberegning

I Fig. 7.6 vises lastarealene i andre etasje av den omprosjekterte skolen. De grønne veggene og ytterveggene er bærende. Lastene kommer fra taket og går videre ned i første etasje. I Vedlegg D ligger resten av tegningene for lastarealer og bæresystemet. Et utdrag av lastberegningene i Excel er vist i Fig. 7.7. Hele lastberegningen ligger også i Vedlegg D. Som nevnt i metodekapitlet ble resultatene av omprosjekteringen sett over av ingeniører ved Norconsult. Det ble konkludert at de valgte dimensjonene og materialene var rimelige til oppgavens bruk.



Figur 7.6: Lastarealer i andre etasje i Sæbø skule.

|                          | Navn | Areal<br>(m <sup>2</sup> ) | Bærevegg<br>(m) | Areal/vegg<br>(m) | g dekke<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | g vegger<br>(kN/m) | p<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | q<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | Last på bærevegg<br>(kN/m) | Punktlast<br>(kN) |
|--------------------------|------|----------------------------|-----------------|-------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------|
|                          | T1   | 80,9                       | 13,3            | 6,1               | 0,9                             | 0,0                | 3,6                       | 6,5                       | 39,5                       |                   |
|                          | T2   | 48,7                       | 8,0             | 6,1               | 0,9                             | 0,0                | 3,6                       | 6,5                       | 39,5                       |                   |
|                          | T3   | 16,1                       | 1,0             | 16,1              | 0,9                             | 0,0                | 3,6                       | 6,5                       | 0,0                        | 126,0             |
|                          | T4   | 16,1                       | 1,0             | 16,1              | 0,9                             | 0,0                | 3,6                       | 6,5                       | 0,0                        | 126,0             |
| TAK                      | T5   | 203,6                      | 20,6            | 9,9               | 0,9                             | 0,0                | 3,6                       | 6,5                       | 64,2                       |                   |
|                          | T6   | 224,1                      | 23,0            | 9,8               | 0,9                             | 0,0                | 3,6                       | 6,5                       | 63,2                       |                   |
|                          | T7   | 66,9                       | 17,3            | 3,9               | 0,9                             | 0,0                | 3,6                       | 6,5                       | 25,1                       |                   |
|                          | T8   | 35,7                       | 9,2             | 3,9               | 0,9                             | 0,0                | 3,6                       | 6,5                       | 25,1                       |                   |
|                          | T9   | 12,5                       | 8,0             | 1,6               | 0,9                             | 0,0                | 3,6                       | 6,5                       | 10,1                       |                   |
|                          | A1   | 70,3                       | 17,1            | 4,1               | 6,8                             | 2,2                | 4,0                       | 14,1                      | 100,0                      |                   |
|                          | A2   | 82,3                       | 18,2            | 4,5               | 6,6                             | 1,9                | 4,0                       | 13,9                      | 64,7                       |                   |
|                          | A3   | 35,8                       | 16,1            | 2,2               | 6,8                             | 2,2                | 4,0                       | 14,1                      | 73,5                       |                   |
|                          | A4   | 10,7                       | 6,2             | 1,7               | 6,3                             | 2,2                | 4,0                       | 13,5                      | 25,8                       |                   |
|                          | A5   | 68,9                       | 17,2            | 4,0               | 6,3                             | 2,2                | 4,0                       | 13,5                      | 120,8                      |                   |
|                          | A6   | 112,4                      | 18,0            | 6,2               | 6,3                             | 1,5                | 4,0                       | 13,5                      | 86,1                       |                   |
|                          | A7   | 71,8                       | 19,5            | 3,7               | 6,3                             | 1,9                | 4,0                       | 13,5                      | 69,5                       |                   |
|                          | A8   | 65,7                       | 23,2            | 2,8               | 6,7                             | 2,2                | 4,0                       | 14,0                      | 77,3                       |                   |
| 2. etg                   | A9   | 16,3                       | 7,9             | 2,1               | 6,3                             | 2,2                | 4,0                       | 13,5                      | 30,7                       |                   |
|                          | A10  | 11,1                       | 8,6             | 1,3               | 6,3                             | 2,2                | 4,0                       | 13,5                      | 20,0                       |                   |
|                          | A11  | 24,0                       | 9,2             | 2,6               | 6,5                             | 1,9                | 4,0                       | 13,8                      | 38,4                       |                   |
|                          | A12  | 45,0                       | 9,9             | 4,6               | 6,9                             | 19,0               | 4,0                       | 14,3                      | 119,5                      |                   |
|                          | A13  | 56,4                       | 21,7            | 2,6               | 7,5                             | 2,2                | 4,0                       | 15,0                      | 73,3                       |                   |
|                          | A14  | 14,2                       | 5,6             | 2,5               | 6,3                             | 1,5                | 4,0                       | 13,5                      | 43,6                       |                   |
|                          | A15  | 85,1                       | 17,4            | 4,9               | 7,0                             | 1,5                | 4,0                       | 14,4                      | 72,0                       |                   |
|                          | A16  | 23,0                       | 14,0            | 1,6               | 0,9                             | 0,0                | 3,6                       | 6,5                       | 10,7                       |                   |
|                          | A17  | 40,1                       | 18,5            | 2,2               | 0,9                             | 0,0                | 3,6                       | 6,5                       | 14,0                       |                   |
|                          | A18  | 20,6                       | 15,0            | 1,4               | 0,9                             | 0,0                | 3,6                       | 6,5                       | 8,9                        |                   |
|                          | B1   |                            | 16,2            |                   | 0,0                             | 17,5               | 0,0                       |                           | 65,1                       |                   |
|                          | B2   |                            | 16,4            |                   | 0,0                             | 17,5               | 0,0                       |                           | 107,3                      |                   |
| 1. etg -<br>betongvegger | B3   |                            | 9,3             |                   | 0,0                             | 17,5               | 0,0                       |                           | 72,8                       |                   |
|                          | B4   |                            |                 |                   | 0,0                             | 17,5               | 0,0                       |                           | 90,1                       |                   |
|                          | B5   |                            |                 |                   | 0,0                             | 17,5               | 0,0                       |                           | 108,7                      |                   |
|                          | B6   |                            |                 |                   | 0,0                             | 17,5               | 0,0                       |                           | 110,2                      |                   |
|                          | S8   | 14,8                       |                 |                   |                                 |                    |                           |                           |                            | 520,4             |
|                          | S12  | 8,0                        |                 |                   |                                 |                    |                           |                           |                            | 208,3             |

Figur 7.7: Utdrag fra Excel av lastberegninger i omprosjektert skole.

### 7.3 LCI-er på Sæbø skule

Etter at skolen hadde blitt omprosjektert til betong, kunne materiallisten fylles ut. For betongversjonene av skolen ble materialmengder hentet ut fra Revit-modellen. For massivtreskolen ble den opprinnelige materiallisten fra klimagassberegningen til Norconsult brukt. I dette kapitlet presenteres resultatene fra LCI-fasen av studien.

#### 7.3.1 LCI på Sæbø skule i vanlig betong

Hele materiallisten til betongversjonen av skolen er vist i Tab. 7.3.

Tabell 7.3: Materialliste for Sæbø skule prosjektert i betong.

| Materiale                    | Komponent                           | Areal<br>(m <sup>2</sup> ) | Volum<br>(m <sup>3</sup> ) | Masse<br>(kg)  | Trans-<br>port (km) | tkm          |
|------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------|---------------------|--------------|
| Betong                       | Dekke 2etg 250mm                    | 605,5                      | 151,3                      | 363000         | 25,9                | 9402         |
|                              | Dekke 2etg 300mm                    | 108,9                      | 32,6                       | 78120          | 25,9                | 2023         |
|                              | Gulv i grunn 120mm                  | 818,8                      | 98,3                       | 235814         | 25,9                | 6108         |
|                              | Ringmur                             |                            | 6,4                        | 15408          | 25,9                | 399          |
|                              | Bankett                             |                            | 15,8                       | 37920          | 25,9                | 982          |
|                              | Punkt 1,5                           |                            | 37,8                       | 90720          | 25,9                | 2350         |
|                              | Punkt 1,2                           |                            | 7,3                        | 17616          | 25,9                | 456          |
|                              | IV betong 200mm                     | 301,5                      | 60,3                       | 144720         | 25,9                | 3748         |
|                              | YV betong 200mm                     | 96,6                       | 19,3                       | 46381          | 25,9                | 1201         |
|                              | Trapper                             |                            | 4,7                        | 11160          | 25,9                | 289          |
|                              | <b>Sum</b>                          |                            | <b>433,7</b>               | <b>1040859</b> |                     | <b>26958</b> |
| Armerings-<br>stål           | Dekker 2etg 120kg/m <sup>3</sup>    |                            |                            | 22056          | 562                 | 12395        |
|                              | Gulv i grunn 40kg/m <sup>3</sup>    |                            |                            | 3930           | 562                 | 2209         |
|                              | Punktfundament 130kg/m <sup>3</sup> |                            |                            | 5868           | 562                 | 3298         |
|                              | Bankett 140kg/m <sup>3</sup>        |                            |                            | 2212           | 562                 | 1243         |
|                              | Ringmur 100kg/m <sup>3</sup>        |                            |                            | 642            | 562                 | 361          |
|                              | IV betong 100kg/m <sup>3</sup>      |                            |                            | 6030           | 562                 | 3389         |
|                              | YV betong 100kg/m <sup>3</sup>      |                            |                            | 1933           | 562                 | 1086         |
|                              | Trapper 140kg/m <sup>3</sup>        |                            |                            | 651            | 562                 | 366          |
|                              | <b>Sum</b>                          |                            |                            | <b>43322</b>   |                     | <b>24347</b> |
| Stål                         | Tata ståltak 200mm                  | 855                        | 2,7                        | 21072          | EPD                 |              |
|                              | Uisolert ståltak 70mm               | 331                        | 0,5                        | 3974           | EPD                 |              |
|                              | CF-RH200x100x10                     |                            | 0,6                        | 4318           | 562                 | 2426         |
|                              | CF-RH160x80x8                       |                            | 0,5                        | 3533           | 562                 | 1985         |
|                              | CF-RHS80x5                          |                            | 0,2                        | 1884           | 562                 | 1059         |
|                              | S-Frame_Steel U140                  |                            | 0,1                        | 966            | 562                 | 543          |
|                              |                                     | <b>Sum</b>                 |                            | <b>4,6</b>     | <b>35745</b>        |              |
| Isolasjon                    | Gulv i grunn 200mm                  | 819                        | 163,8                      | 4749           | 366                 | 1738         |
|                              | Tata ståltak 300mm                  | 855                        | 256,4                      | 7434           | 366                 | 2721         |
|                              | YV betong 148                       |                            | 14,3                       | 415            | 366                 | 152          |
|                              | YV stender 198+48                   | 767                        | 188,6                      | 5469           | 366                 | 2002         |
|                              | IV stender 148                      | 591                        | 87,4                       | 2536           | 366                 | 928          |
|                              | IV stender 100                      | 590                        | 59,0                       | 1710           | 366                 | 626          |
|                              | Ringmur, 50mm                       |                            | 1,9                        | 56             | 366                 | 21           |
|                              | <b>Sum</b>                          |                            | <b>771,3</b>               | <b>22368</b>   |                     | <b>8187</b>  |
| Gips                         | 26mm i IV stender                   | 1180                       | 30,7                       | 27623          | 633                 | 17486        |
|                              | 13mm i YV stender                   | 767                        | 10,0                       | 8969           | 633                 | 5677         |
|                              | <b>Sum</b>                          |                            | <b>40,7</b>                | <b>36592</b>   |                     | <b>23163</b> |
| Stående<br>bord-<br>kledning | 19mm i YV betong                    | 96,6                       | 1,8                        | 918            | 433                 | 397          |
|                              | 19mm i YV stender                   | 767                        | 14,6                       | 7282           | 433                 | 3153         |
|                              | <b>Sum</b>                          | 863                        | <b>16,4</b>                | <b>8200</b>    |                     |              |
| Glass                        | Planglass, enkeltglasert            | <b>1107</b>                |                            | 11070          | 612                 | <b>6775</b>  |
| Aluminium                    | Aluminiumkarm, Saray                | <b>30,6</b>                |                            | 1550           | 3672                | <b>5692</b>  |
| Tredører                     | Innerdør, Nordic Door               | <b>38,5</b>                |                            | 1063           | 783                 | <b>832</b>   |



I SimaPro ble skolen bygd opp ved å lage prosesser for de forskjellige bygningskomponentene. Prosessene består av materialene og transportene som inngår i komponenten, basert på tallene fra materiallisten. Et eksempel på en slik prosess er vist i Tab. 7.4. Denne viser inputene som går med til 40,1 m<sup>3</sup> isolert yttervegg av betong. Betong-inputen er basert på informasjon fra en annen betongprosess i SimaPro og EPD-en fra Ørsta Betong. I Vedlegg E er hele denne prosessen vist, samt de ulike bidragene til global oppvarming i betongen. Betongen har et utslipp på 273,8 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup>, som er nøyaktig dobbelt så mye som geopolymerbetongen.

Tabell 7.4: Oppbygning av betongyttervegger i SimaPro.

| <b>Input: prosessnavn i SimaPro</b>                                      | <b>Mengde</b> | <b>Enhet</b>   | <b>Kommentar</b>                         |
|--|---------------|----------------|--|
| Betong, 35MPa Unicon Ørsta   | 19,3          | m <sup>3</sup> |  |
| reinforcing steel {Europe without Austria}  reinforcing steel production | 1 933         | kg             |  |
| Stone wool, packed {RoW}  stone wool production, packed                  | 415           | kg             | 14,3m <sup>3</sup> x 29kg/m <sup>3</sup> |
| Wood cladding, softwood {RoW}  production                                | 96,6          | m <sup>2</sup> | 19mm tykk                                |
| Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RER}                    | 1 201         | tkm            | Betong 25,9km                            |
| Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER}                    | 1 086         | tkm            | Stål 562km                               |
| Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER}                    | 152           | tkm            | Isolasjon 366km                          |
| Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER}                    | 397           | tkm            | Kledning 433km                           |

For de kaldvalsede hulprofilene i prosjektet ble følgende prosess i SimaPro valgt: “steel, low-alloyed {Europe without Switzerland and Austria}| steel production, electric”. Denne baserer seg på produksjon av stål ved hjelp av elektrisk lysbueovn. Norsk Stål ble valgt som tenkt produsent og leverandør av stålproduktene. Dokumentasjonen og inputene i stålprosessen i SimaPro ble sammenlignet med EPD-en til Norsk Stål for Kaldformet Hulprofil [132]. EPD-en inneholder ikke detaljer rundt produksjonsprosessen, så det var kun transportavstanden som ble hentet derfra. Prosessene for de andre materialene i skolen, som isolasjon og kledning, ble valgt ved hjelp av dokumentasjonene i SimaPro. Disse ble sammenlignet med materiallisten i klimagassberegningen til Norconsult. De mest relevante prosessene ble så brukt i livsløpsregnskapet. I Vedlegg F er prosessene i skolen vist.

### 7.3.2 LCI på Sæbø skule i geopolymerbetong

For å unngå at all geopolymerbetongen skulle fraktes fra Titania til Sæbø skule, ble ingrediensene transportert fra forskjellige steder. Den knuste noritten og KOH-pulveret ble derfor transportert de 726 kilometerne fra Titania, mens vannet og tilslaget ble fraktet 25,9 km fra Unicon AS til skolen. For å beregne antall tonnkilometer per betonginput, ble det funnet en konstant for tkm/m<sup>3</sup> ved ligning (7.1):

$$\begin{aligned}
 & \text{Avstand fra Titania} \times (\text{Noritt} + \text{KOH}) + \text{Avstand fra Ørsta} \times (\text{Vann} + \text{sand} + \text{pukk}) \\
 & 726 \text{ km} \times (1120 \text{ kg} + 46 \text{ kg}) + 25,9 \text{ km} \times (127 + 540 + 780 \text{ kg}) \\
 & \quad 856,5 \text{ tkm/m}^3 + 37,5 \text{ tkm/m}^3 \\
 & \quad = 884 \text{ tkm/m}^3
 \end{aligned}
 \tag{7.1}$$

Til sammenligning har den vanlige betongen fra Unicon en tilsvarende konstant på bare 62 tkm/m<sup>3</sup>. Det vil si at for hver kubikkmeter geopolymertbetong som transporteres til Sæbø skule er det 14 ganger mer tonnkilometer. I SimaPro ble den oppdaterte transportinformasjonen lagt til i alle prosessene som inneholdt betong, i tillegg til at betongen ble endret til geopolymertbetong.

### 7.3.3 LCI på Sæbø skule i massivtre

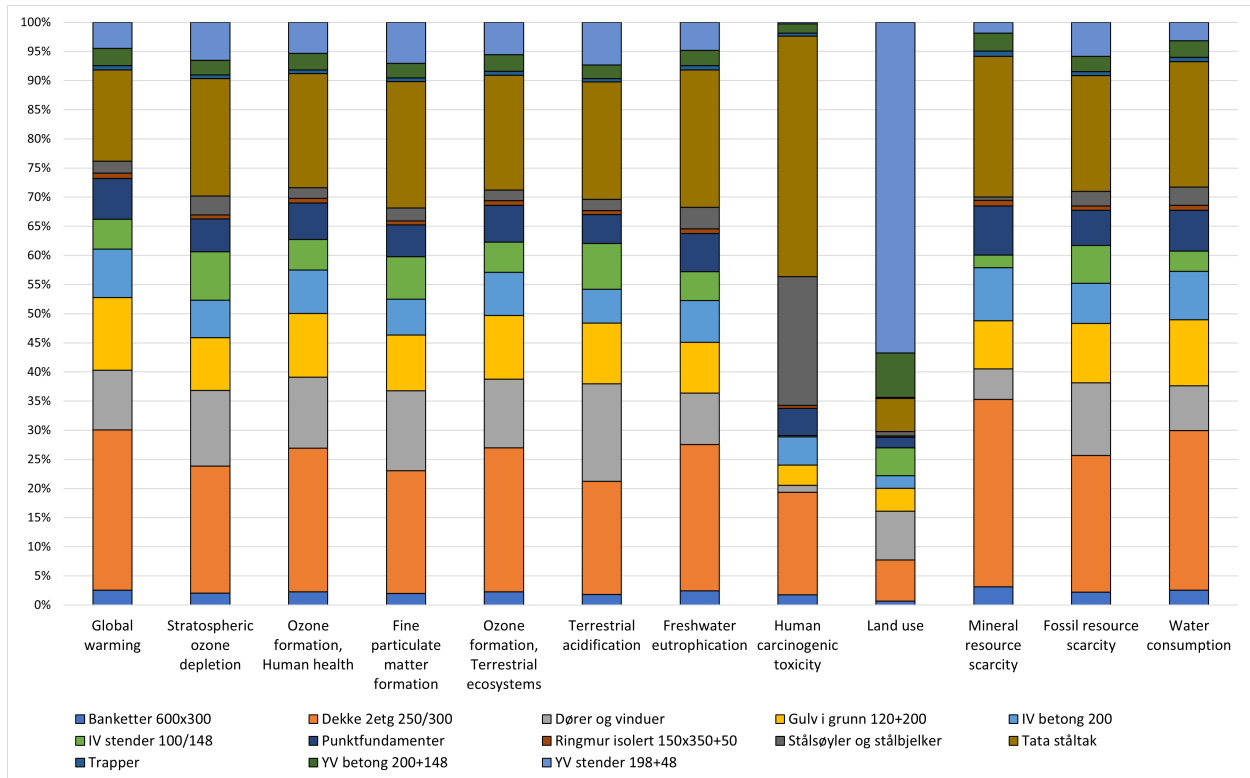
I Vedlegg H ligger materiallisten til Sæbø skule i massivtre. Skolen består av 527 m<sup>3</sup> CLT og 5 m<sup>3</sup> limtre. I SimaPro ble følgende prosesser valgt for massivtre-delene: “cross-laminated timber {RER}” og “glued laminated timber, average glue mix {Europe without Switzerland}”. Totalt bruker skolen 215 m<sup>3</sup> betong, sammenlignet med 433 m<sup>3</sup> i betongskolene. Den bruker mer stål til stålsøyler enn betongskolene, men det totale stålbruket tilsvarer bare 44% av betongskolene sitt. Dette er på grunn av mindre armering og ingen ståltak. Massivtreskolen består også av 593 m<sup>3</sup> isolasjon sammenlignet med 771 m<sup>3</sup>. Øvrige komponenter som vinduer og dører er like i alle versjonene.

## 7.4 LCIA på Sæbø skule

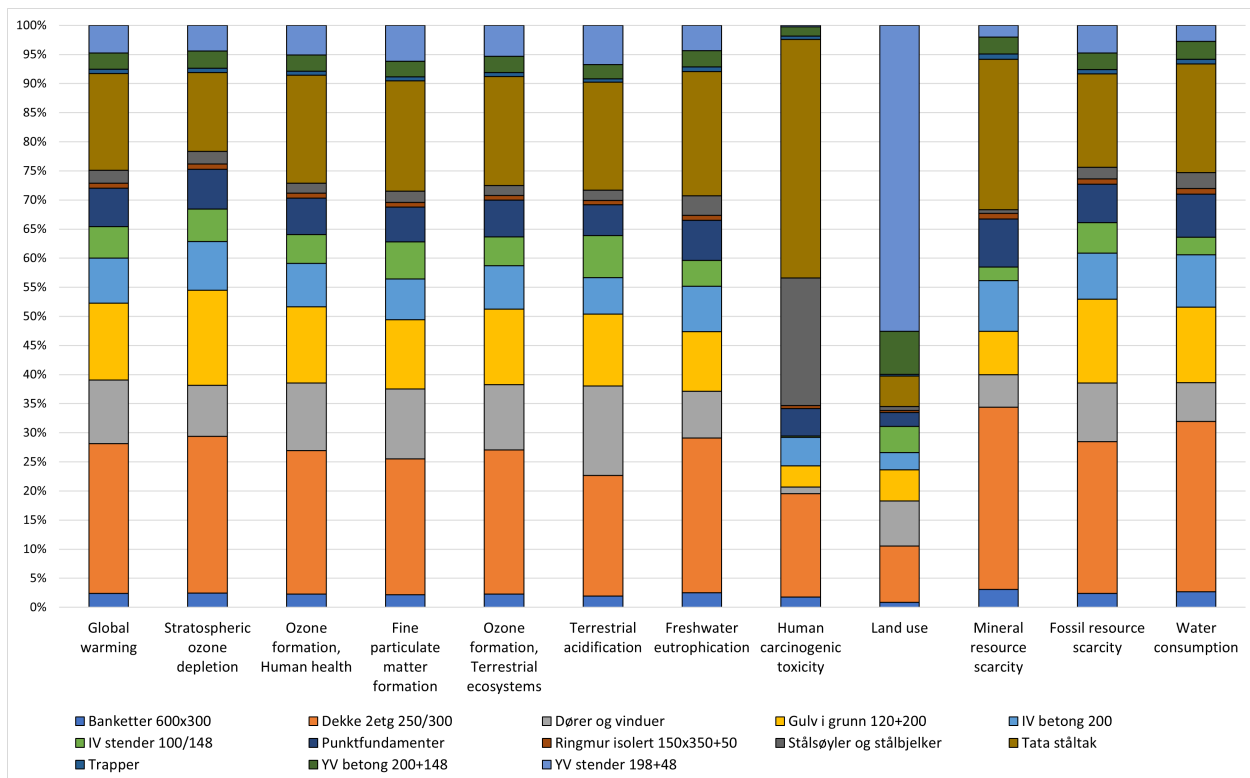
De tre versjonene av skolen har blitt analysert i SimaPro. Som nevnt er det 18 effektkategorier i SimaPro. Noen av dem har blitt ekskludert i denne presentasjonen av resultatene, men i vedleggene for hver skole ligger hele analysen (Vedlegg F til H). I Fig. 7.8 er livsløpseffektvurderingen for Sæbø skule i vanlig betong vist, med de utvalgte effektkategoriene. Merk at skolen er bygd opp av bygningskomponenter, ikke enkeltmaterialer; det vil si at grafen ikke viser hvor mye betongen bidrar med, sammenlignet med stål, for eksempel. I Fig. 7.9 og 7.10 er effektvurderingene til geopolymert- og massivtreversjonen av skolen vist. De totale utslippene i hver effektkategori for hver skole er vist i Tab. 7.5. Dette er de absolutte verdiene, i motsetning til søylediagrammene som er omgjort til relative prosenter.

Tabell 7.5: De totale utslippene i de utvalgte effektkategoriene for de tre skolene.

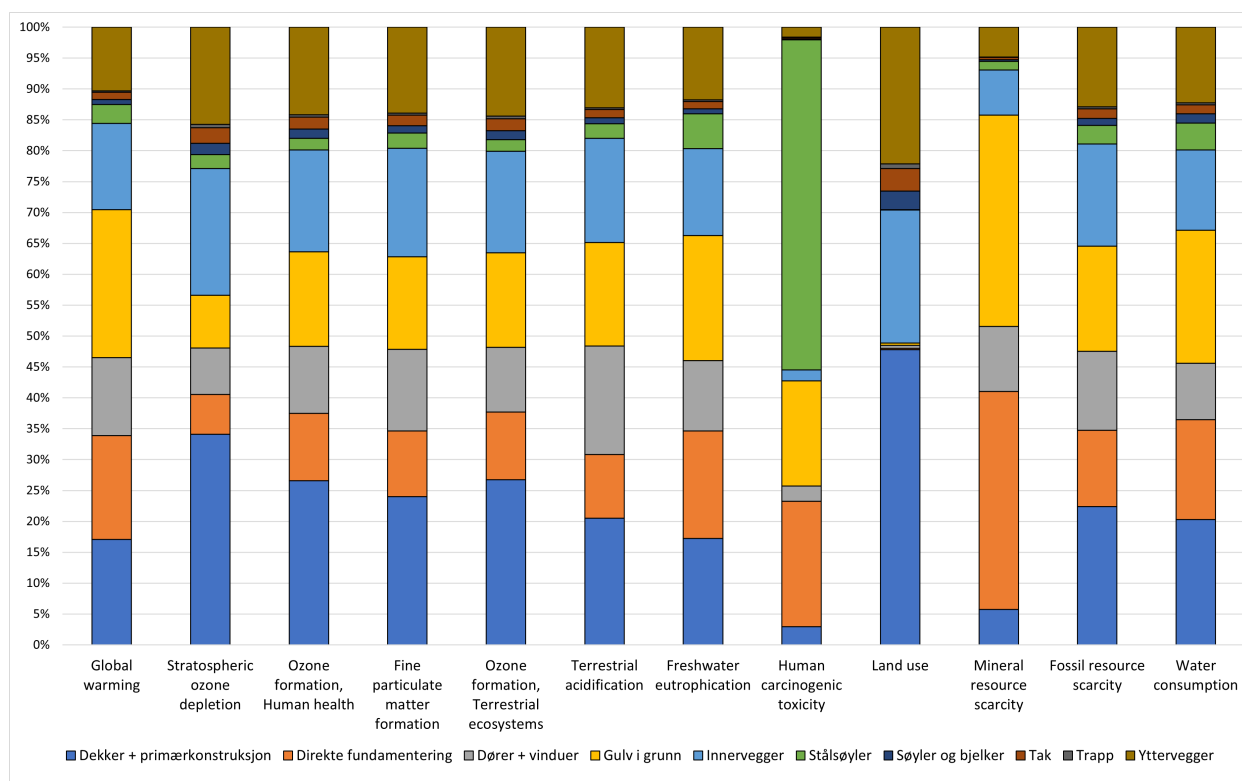
| Effekt-<br>kate-<br>gori | Global<br>warming      | Stratos-<br>pheric<br>ozone<br>depletion | Ozone<br>formation,<br>Human<br>health | Fine<br>particulate<br>matter<br>formation | Ozone<br>formation,<br>Terrestrial<br>ecosystems | Terres-<br>trial<br>acidifi-<br>cation | Fresh-<br>water<br>eutroph-<br>ication | Human<br>carcino-<br>genic<br>toxicity | Land use<br>m <sup>2</sup> a crop-eq | Mineral<br>resource<br>scarcity | Fossil<br>resource<br>scarcity | Water<br>consu-<br>mption |
|--------------------------|------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Enhet                    | kg CO <sub>2</sub> -eq | kg CFC11-eq                              | kg NO <sub>x</sub> -eq                 | kg PM <sub>2.5</sub> -eq                   | kg NO <sub>x</sub> -eq                           | kg SO <sub>2</sub> -eq                 | kg P-eq                                | kg 1,4-DCB                             | m <sup>2</sup> a crop-eq             | kg Cu-eq                        | kg oil-eq                      | m <sup>3</sup>            |
| Betong                   | 338 826                | 0,08                                     | 867,2                                  | 502,7                                      | 905,7  | 1 054                                  | 102,9                                  | 404 426                                | 31 146                               | 5 403                           | 68 560                         | 3 405                     |
| Geo-bet.                 | 317 796                | 0,12                                     | 913,0                                  | 575,0                                      | 954,5  | 1 146                                  | 113,5                                  | 407 274                                | 33 606                               | 5 042                           | 84 763                         | 3 915                     |
| Massivtre                | 274 238                | 0,14                                     | 977,1                                  | 520,9                                      | 1 024  | 1 004                                  | 79,6                                   | 197 152                                | 519 628                              | 2 677                           | 67 022                         | 2 872                     |



Figur 7.8: Effektvurdering for Sæbø skule i vanlig betong analysert i SimaPro.



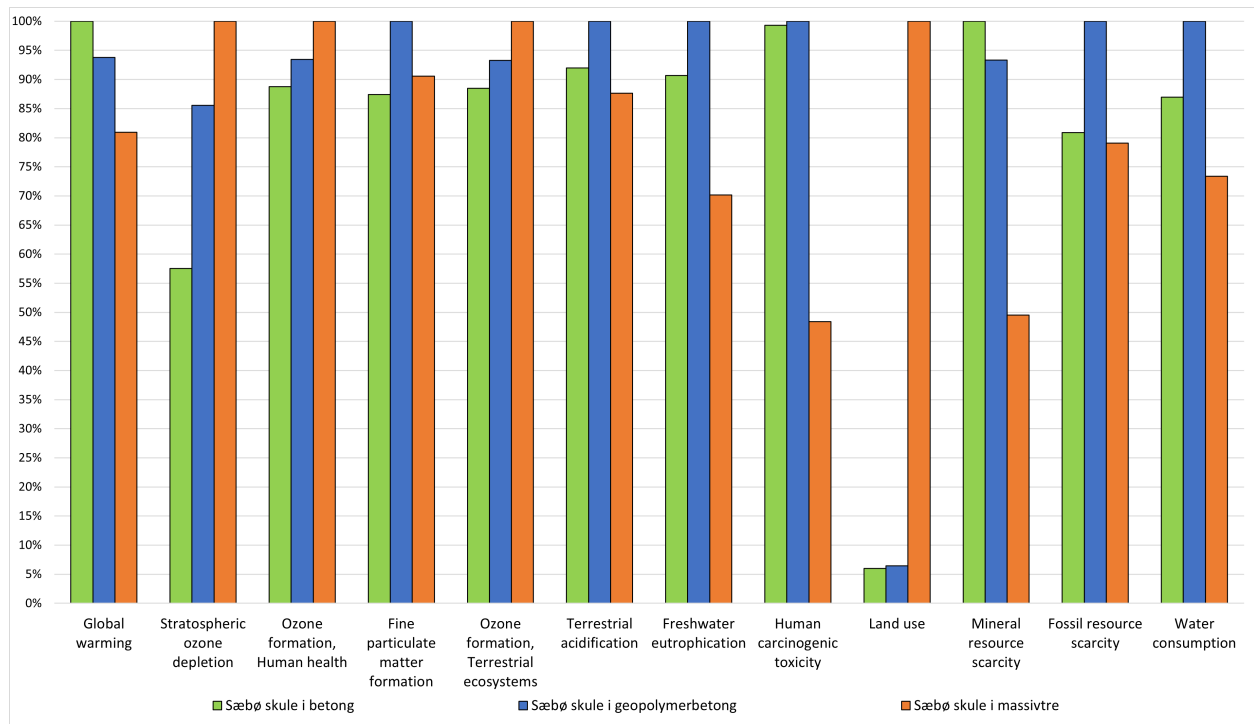
Figur 7.9: Effektvurdering for Sæbø skule i geopolymerbetong analysert i SimaPro.



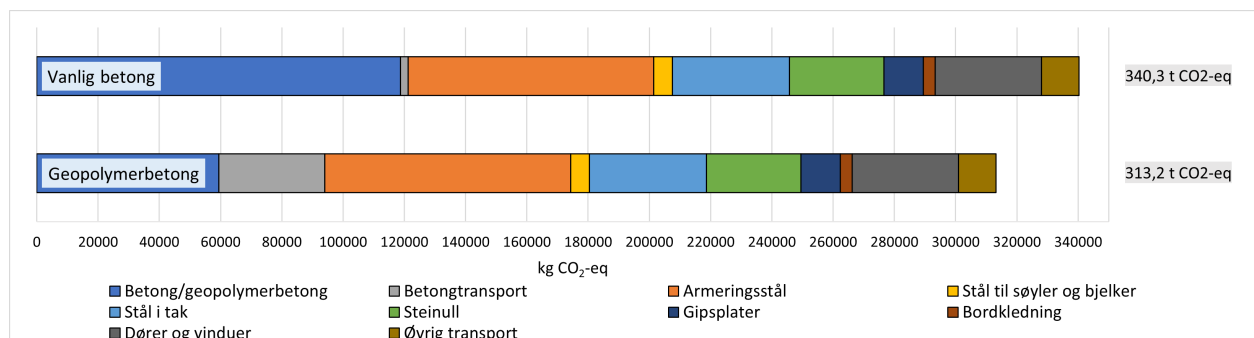
Figur 7.10: Effektvurdering for Sæbø skule i massivtre analysert i SimaPro.

I kategorien for global oppvarming har den vanlige betongskolen høyest utslipp, på 339 tonn CO<sub>2</sub>-eq. Nest-høyest er geopolymerversjonen, med 318 tonn CO<sub>2</sub>-eq, som tilsvarer 94%. Massivtreskolen har lavest utslipp, med 274 tonn CO<sub>2</sub>-eq, som er 81% av den vanlige betongskolens utslipp. Til sammenligning ga Norconsult sin klimagassberegning 198 tonn CO<sub>2</sub>-eq for massivtreskolen, og 405 tonn CO<sub>2</sub>-eq for referansebygget. Den største forskjellen mellom de tre skolene i denne oppgaven finner man i effektkategorien “Land use”. Her gir massivtreskolen 94% mer utslag enn de andre skolene på grunn av den store bruken av tømmer. Ellers er det geopolymerversjonen som er størst i flest effektkategorier (seks), mens den vanlige betongversjonen er størst i to. Massivtrekolen er størst i fire kategorier. Figur 7.11 viser effektvurderingen av de tre skolene samlet.

For å vurdere forskjellene mellom de to typene betongskoler, ble det bygd to prosesser basert på totale materialmengder, istedenfor bygningskomponenter. Transporten ble oppdelt i betongtransport og øvrig transport. I den opprinnelige LCI-en transporteres ståltakene fra Tata Steel med ferje og tog, men dette ble omgjort til lastebil i denne analysen. De to betongskolene ble så analysert, og resultatet i effektkategorien for global oppvarming er presentert i Fig. 7.12. Merk at de totale utslippene er litt annerledes enn for de opprinnelige skoleprosessene på grunn av variasjoner i transportinputene. Grafen viser at reduksjonen i utslipp mellom de to skolene kommer fra bruken av geopolymerbetonng – men transporten av denne reverserer mye av besparelsen.



Figur 7.11: Effektvurdering for Sæbø skule i alle tre versjoner.

Figur 7.12: Bidrag til CO<sub>2</sub>-utslipp fra materialer i betong- og geopolymertbetongskolene.

## 7.5 Sensitivitetsanalyse

Det ble utført en sensitivitetsanalyse på de to betongskolene. Materialene med størst bidrag til CO<sub>2</sub>-utslipp ble økt med 1% hver i SimaPro. Transporten ble også økt sammen med materialet. Den totale økningen i CO<sub>2</sub>-utslipp for hele skolen ble så beregnet basert på de opprinnelige verdiene i Fig. 7.12. Resultatet av sensitivitetsanalysen er vist i Tab. 7.6. I begge skolene kommer den største økningen fra betongene. Geopolymertbetongen har dog lavere påvirkning enn den vanlige betongen, og de andre materialene får følgelig høyere påvirkning i den skolen.

I geopolymertbetongen ble det også utført en sensitivitetsanalyse ved å øke mengden aktivator og tilslag med 1% hver. Strømbruket ble ikke økt, ettersom det bare utgjør en promille av de totale utslippene. Økningen i det totale CO<sub>2</sub>-utslippet fra sensitivitetsanalysen er vist i Tab. 7.7.

Tabell 7.6: Resultat av sensitivitetsanalyse på betong- og geopolymerbetongskolene.

| Materiale               | Vanlig betongskole | Geopolymerbetongskole |
|-------------------------|--------------------|-----------------------|
| Betong/geopolymerbetong | 0,35 %             | 0,30 %                |
| Armeringsstål           | 0,24 %             | 0,26 %                |
| Stål i tak              | 0,11 %             | 0,12 %                |
| Steinull                | 0,09 %             | 0,10 %                |
| Gipsplater              | 0,04 %             | 0,05 %                |

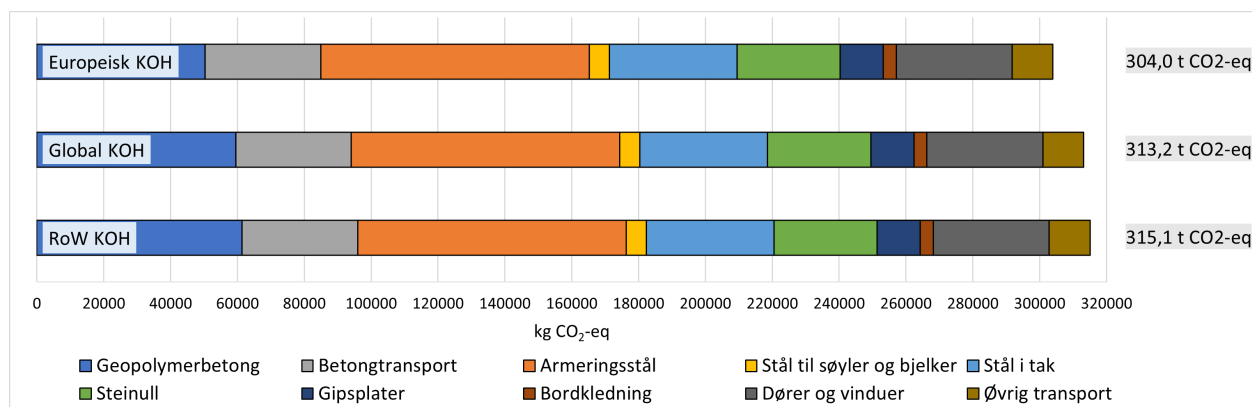
Tabell 7.7: Resultat av sensitivitetsanalyse på geopolymerbetong.

| Materiale | Økning i CO <sub>2</sub> -utslipp |
|-----------|-----------------------------------|
| Aktivator | 0,98%                             |
| Tilslag   | 0,10%                             |

## 7.6 Scenarioanalyser

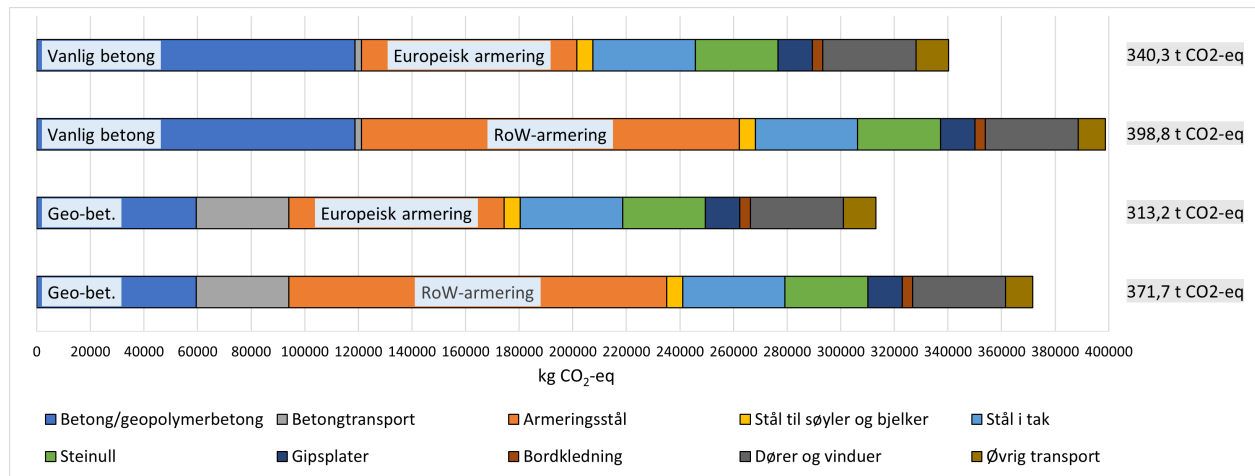
Det ble lagd et scenario for Sæbø skule med geopolymerbetongen fra sensitivitetsanalysen som inneholdt 1% mer KOH-pulver. Dette økte det totale CO<sub>2</sub>-utslippet i skolen med 0,16%.

Et annet scenario var å sammenligne hvordan KOH med 100% europeisk og 100% RoW opphav påvirker skolens totale utslipp. Den europeiske aktivatoren førte til en reduksjon på 3%, mens RoW-aktivatoren økte utslippene med 0,6%. Dette er vist i Fig. 7.13. “Global KOH” er den vanlige markedsprosessen som ligger i SimaPro og som er brukt i de andre analysene i oppgaven.

Figur 7.13: Effekt på Sæbø skules CO<sub>2</sub>-utslipp med 100% europeisk, 100% global og blandet KOH.

Det har blitt brukt en europeisk prosess for armeringsstål i alle skolene. Ettersom stålet utgjør over 20% av CO<sub>2</sub>-utslippene i betongbyggene, ble det lagd et scenario hvor armeringen kommer fra Rest-of-World istedenfor Europa. Prosessen ble endret til en markedsprosess, og alle underprosessene som ikke var fra RoW ble fjernet og erstattet med RoW. Siden transport er inkludert i markedsprosesser ble den opprinnelige transporten fra armeringen i “Øvrig transport” fjernet. Resultatet av scenarioet er vist i Fig. 7.14. Merk at vanlig betong og geopolymerbetong med europeisk armering er de samme

som i Fig. 7.12. Den europeiske armeringen sine utslipp tilsvarer 57% av de fra RoW. Totalt øker begge skolenes utslipp med rundt 18% i dette scenarioet.



Figur 7.14: Scenario med armeringsstål fra Rest-of-World sammenlignet med Europa.

## 8 | Diskusjon

Hovedfunnene fra LCA-studiene som har blitt utført er at geopolymertbetongen har rundt halvparten så mye CO<sub>2</sub>-utslipp som tilsvarende vanlige betonger. Rundt 90% av utslippene kommer fra kaliumhydroksid-pulveret. I de tre versjonene av Sæbø skule hadde den med massivtre lavest utslipp, og så den med geopolymertbetong, mens skolen med vanlig betong hadde høyest. I dette kapitlet vil resultatene bli diskutert. Det vil først bli sett på geopolymertbetongen, og særlig usikkerheten knyttet til kaliumhydroksidet. Deretter vil resultatene fra LCA-en på Sæbø skule bli diskutert. Til slutt blir det gitt anbefalinger til videre arbeid på bakgrunn av begrensninger i LCA-studiene.

### 8.1 LCA på geopolymertbetongen

Livsløpsvurderingen på Saferock sin geopolymertbetong viste at materialet har en stor reduksjon i CO<sub>2</sub>-utslipp sammenlignet med tradisjonelle betonger. Likevel er det knyttet stor usikkerhet til tallene, både på grunn av manglende informasjon rundt kaliumhydroksidet, og fordi studien tar for seg et produkt som enda er i utviklingsfasen. Resultatene vil bli videre diskutert i dette kapitlet.

#### 8.1.1 Mål og omfang og LCI

Under fastsettelsen av målet og omfanget med studien ble det bestemt at produksjonsstedet for geopolymertbetongen skulle være ved Titania. Dette innebærer å transportere tilslag en tenkt avstand på 80 km til gruen og blande betongen der. I realiteten vil nok heller sementen, bestående av norittpulver og KOH-pulver, bli transportert til et blandeverk. Men siden denne avstanden kan variere betydelig, ble det valgt å ikke låse resultatene til én gjennomsnittsverdi, som EPD-er for vanlig betong gjør. I LCA-studien på Sæbø skule ble transporten av geopolymersementen til Ørsta en betydelig utslippskilde, noe som kanskje ikke hadde kommet frem ved bruk av en standardisert transportavstand. Denne transporten vil bli nærmere diskutert i kapittel 8.2.3.

Verdiene som er brukt i LCI-en er basert på betongresepten som ble oppgitt av Saferock. Denne er ikke fast bestemt og vil antakeligvis endre seg med utviklingen til betongen. Selskapet har sagt at betongresepten tilsvarer B30/B35-betong, og dette er akseptert og brukt i oppgaven. Det er vanskelig å sammenligne geopolymerseseppten med vanlige betongresepter eller andre geopolymertbetonger, ettersom de består av så forskjellige ingredienser. Det kan være verdt å nevne at geopolymertbetongen består av bare 50% tilslag, sammenlignet med vanlig betong som har rundt 60 til 70%. Det er derfor en større andel sement i geopolymertbetongen, hovedsaklig bestående av noritt. Den "optimale



blandingen” som Saferock ønsker å oppnå bruker vesentlig mindre aktivator og norittpulver. Ikke overraskende fikk denne betongen det laveste utslippet med god margin. Men med tanke på at den vanlige geopolymerbetongen allerede er basert på en fremtidig produksjonsprosess, ble det valgt å ikke bruke den optimale blandingen i videre analyser.

### 8.1.2 Utslipp sammenlignet med andre betonger

I metodekapitlet ble det presentert utslipp fra ulike betongprosesser i SimaPro og fra EPD-en til Unicon sin B35 (Tab. 6.1). Unicon sin B35 ble også gjenskapt i SimaPro basert på verdier fra EPD-en. Betongene hadde utslipp på mellom 237 til 319 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup>. Sammenlignet med disse verdiene tilsvarer geopolymerbetongen sine utslipp på 137,1 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup> mellom 43 og 53%. Saferock har på sine nettsider skrevet at geopolymerbetongen kan oppnå en reduksjon på 70% [133]. Dette tallet er altså høyere enn resultatene fra denne studien, men en reduksjon på over 50% er likevel betydelig. Det virker også rimelig å kunne oppnå de siste 20 prosentene, eller mer, ved å bruke KOH produsert med grønn energi. Før denne studien ble utført visste Saferock at aktivatoren ville stå for mesteparten av utslippene. Likevel er det nok overraskende hvor mye utslipp denne endte opp med å generere. I kapittel 8.1.3 vil KOH-en bli diskutert nærmere.

I kapittel 3.6 *Tidligere LCA-studier på geopolymerbetong* ble det sett på utslipp fra natriumhydroksid-baserte geopolymerbetonger. En av disse hadde utslipp på 169 kg CO<sub>2</sub>-eq og en annen hadde 302 kg CO<sub>2</sub>-eq. Begge brukte flyveaske som aluminiumsilikat, og hadde trykkfasthet mellom 36 og 40 MPa. Begge disse betongene hadde altså høyere utslipp enn geopolymerbetongen til Saferock. Felles for alle er at aktivatorene står for mesteparten av utslippene. I studiene blir det nevnt at flyveasken ikke nødvendigvis kan regnes som utslippsfri, ettersom den kommer fra kullkraft. Med økonomisk allokering av flyveasken fikk geopolymerbetongene høyere utslipp enn tilsvarende vanlige betonger. Dette problemet har ikke den norittbaserte geopolymerbetongen.

### 8.1.3 Usikkerhet rundt KOH

I effektvurderingen til geopolymerbetongen står aktivatoren for 90% av CO<sub>2</sub>-utslippene. I aktivatoren kommer utslippene utelukkende fra kaliumhydroksid-pulveret. Det er dessverre KOH-pulveret det er mest usikkerhet rundt i studien. Som nevnt tidligere er det brukt en standard, global markedsprosess i SimaPro som input for pulveret. Hverken Saferock eller Solberg Industri hadde noen informasjon om hvor KOH-en deres blir produsert, eller hvordan. I Fig. 7.3 ble det forsøkt å bruke helt europeisk KOH eller helt “Rest of World”-KOH i aktivatoren. Det europeiske pulveret har 17% lavere utslipp enn i den blandede, globale prosessen. RoW-aktivatoren har 3% høyere utslipp enn den globale. Med mer kunnskap rundt produksjonsstedet ville det vært mulig å fjerne denne 20% store usikkerheten. Attpåtil består prosessene fra Europa og RoW av strømmikser fra alle landene i Europa og resten av verden. Det benyttes også gjennomsnittlige prosesser for kaliumklorid, som er en viktig ingrediens i KOH. Dersom Solberg Industri hadde visst produksjonsstedet til pulveret ville det ha vært mulig å redigere prosessene til å bruke inputer fra ett spesifikt land – slik som med betongen fra Unicon.

Med bare én prosess i SimaPro for KOH er det vanskelig å bedømme om in- og outputene er

realistiske. Det ble forsøkt å finne tidligere livsløpsvurderinger og EPD-er på KOH. Disse kunne i så fall blitt sammenlignet med prosessen i SimaPro. Men etter søk på Google Scholar ble det kun funnet LCA-studier på ting som inneholdt KOH, og hvor den samme SimaPro-prosessen var brukt i analysene. Det ble ikke funnet en egen studie på selve kaliumhydroksidet, utenom den studien som prosessen i SimaPro er basert på. Resultatet er at det ikke foreligger noen verdier å sammenligne prosessen sine utslipp med. Attpåtil er studien fra en rapport fra 2007, som kan bety at produksjonsprosessen og verdiene ikke tilsvare dagens metoder.

Både den geografiske uvissheten og mangelen på sammenligningsgrunnlag med andre data gjør at den desidert viktigste miljøfaktoren i geopolymerebetongen også er den som det er minst informasjon om. Dette fører til at det er et stort usikkerhetsspenn i resultatene. Likevel virker verdien på 137,1 kg CO<sub>2</sub>-eq for den vanlige geopolymerebetongen å være rimelig i forhold til de vanlige betongene, og i forhold til den forventede reduksjonen fra Saferock. Selv det mest konservative anslaget med KOH utelukkende fra RoW gir et totalt utslipp på bare 141,6 kg CO<sub>2</sub>-eq. Denne øvre grensen på utslipp er fremdeles betydelig lavere enn de vanlige betongene som ble analysert.

#### 8.1.4 Potensiell reduksjon av utslipp i KOH

Det er opplagt at det er KOH-en som har størst potensiale til å redusere utslippene i geopolymerebetongen. Dette er både på grunn av den høye andelen utslipp pulveret står for, og på grunn av selve produksjonsprosessen og energikildene som brukes. I Fig. 7.4 ble utslippene i den globale og europeiske KOH-prosessen sammenlignet. Den europeiske prosessen har 17% lavere totalutslipp, men likevel utgjør fossile energikilder over 80% av utslippene i begge prosessene. Dette skyldes to ting: mye av europeisk strøm kommer fremdeles fra kull- og gasskraft, og det faktumet at disse har enormt høye utslipp per kWh sammenlignet med rene energikilder. I SimaPro har norsk vannkraft en halv prosent av CO<sub>2</sub>-utslippene til britisk kullkraft per kWh. Det vil si at når deler av strømmiksen erstattes med renere energikilder, som fra den globale KOH-prosessen til den europeiske, står fremdeles de fossile kildene for så og si alle de energirelaterte utslippene. Dette illustrerer hvor skadelige disse energikildene er, og hvor mye som kan spares ved å erstatte dem med fornybar energi.

De to store energikrevende prosessene i produksjon av KOH er elektrolyse og fordamping av løsningen. Å gjøre dette med fornybar energi virker gjennomførbart. I motsetning til tiltakene som kan gjøres med KOH-en, er det vesentlig vanskeligere å redusere utslippene fra vanlig sementproduksjon. Produksjonen krever oppvarming på over 1 400 °C og kalsineringen av klinker vil alltid slippe ut CO<sub>2</sub>. I rapporten “Net Zero by 2050” av IEA [10] er det derfor lagt opp til reduksjoner i sementindustrien på andre måter, som karbonfangst, effektiv materialbruk i byggeindustrien og elektrifisering av sementovner. Men teknologiene for karbonfangst og elektriske sementovner er fremdeles i utviklingsfasen og er ikke klare for å implementeres i dag. Rapporten legger opp til et nødvendig klinkerforhold på 0,57 i sementen som produseres. Det vil si at det er en uunngåelig og høy mengde kalsinerte klinker i all sement som skal brukes, selv i nullutslipp-scenariot. Dersom det produseres KOH med ren energi har geopolymersementen potensial til å hoppe over de utfordringene som vanlig sement står overfor.

### 8.1.5 Praktiske og juridiske utfordringer ved geopolymerbetonen

Som nevnt før er Saferock fremdeles i utviklingsfasen av produktene sine. Geopolymerbetongen har ikke vært utprøvd i konstruksjoner enda, og pilotfabrikken er ikke bygd per våren 2022. Det er uvisst hvilke logistiske utfordringer som vil oppstå på en byggeplass ved bruk av denne typen betong. I boken om geopolymere nevner Davidovits [8] HMS-utfordringene ved å la betongarbeidere håndtere visse alkaliske løsninger. Disse er svært basiske og forårsaker etsing i kontakt med hud. Samtidig er vanlig betong også basisk, og det kan tenkes at en ferdigblandet geopolymerbetong som pumpes ut fra en betongbil ikke utgjør en større fare enn vanlig betong.

Et annet viktig element som ikke har vært utprøvd enda er armering i geopolymerbetongen til Saferock. Betongteknologi er et komplisert fagfelt som innebærer å forstå mange ulike kjemiske prosesser og hvordan de påvirker hverandre og betongen. Det basiske miljøet i geopolymerbetongen bør være et godt utgangspunkt for armeringen, slik som det er i vanlig betong. Det kan likevel tenkes at det kan oppstå uønskede kjemiske reaksjoner som følge av de forskjellige ingrediensene i betongen. Disse kan få negative følger for armeringen og/eller betongen, og dette må antakeligvis utredes før betongen kan tas i bruk.

Den siste, og kanskje største, utfordringen ved geopolymerbetongen er å få den godkjent til strukturelt bruk. Slik regelverket er i dag, er det ikke lov å bruke andre sementer enn de som er beskrevet i betongstandarden NS-EN 206. Saferock må derfor gjennom en omfattende prosess for å kunne ta geopolymerbetongen i bruk i byggeprosjekter. Dette har altså ikke blitt tatt hensyn til i denne oppgaven, men det er viktig å påpeke. Det gjenstår mye arbeid på betongen, både juridisk og med de fysiske egenskapene, før den kan implementeres i byggebransjen.

### 8.1.6 Flyveaske, slagg og avgangsmasser som sementerstatning

I kapittel 2.3 *Avgangsmasser fra gruvedrift* ble utfordringene rundt deponering presentert. Spesielt er Titania-gruven sitt deponi og dam utsatt. Avgangsmassene, som hovedsaklig består av noritt, regnes i dag som verdiløse. Å finne bruksområder til industrielle biprodukter er en essensiell del av sirkulær økonomi, og bruken av flyveaske og slagg i sement er eksempler på dette. Flyveaske har likevel to iboende, motstridende problemer. Som et biprodukt av kullkraftverk har det et problematisk opphav. Og utfasingen av kullkraft på verdensbasis fører til at flyveaske ikke kommer til å være tilgjengelig som sementerstatning. Derimot vil slagg og avgangsmasser fra gruver fortsette å genereres, da stål og andre mineraler er nødvendige for fremtidige, grønne teknologier [6]. Dessuten inneholder deponiet til Titania allerede nok noritt til å erstatte all norsk portlandsementproduksjon i 20 år, i følge Saferock [134].

## 8.2 LCA på Sæbø skule

Livsløpsvurderingen på Sæbø skule ble gjort for å sette geopolymerbetongen i en sammenheng med et ekte byggeprosjekt. I tillegg var det av interesse å se på geopolymerbetongen og vanlig betong sine miljøpåvirkninger sammenlignet med massivtre. Under fastsettelsen av målet og omfanget ble

det bestemt at studien bare skulle inkludere livsløpsfasene A1 til A4. De resterende fasene, fra A5 (byggeplass) og til livsløpets slutt, ville vært basert på helt teoretiske antakelser. Det foreligger blant annet ingen tall på hvordan geopolymertbetong må vedlikeholdes i løpet av 60 år, eller hvordan avfallsbehandlingen gjennomføres. Valget av akkurat Sæbø skule ble gjort av praktiske årsaker; det var et massivtrebygg prosjektert av Norconsult, som det var utført en klimagassberegning for. Lokasjonen i Ørsta viste seg å ha en vesentlig påvirkning på transporten til geopolymertbetongen. Det kan tenkes at produktet i virkeligheten vil bli brukt på prosjekter nærmere Titania.

### 8.2.1 LCI-fasen

Det første steget i LCI-en på Sæbø skule var å omprosjekttere den fra massivtre til betong og stål. Som nevnt før ble det forsøkt å gjøre dette på en effektiv måte som ikke tok opp unødvendig mye tid. Derfor består nok det omprosjekterte skolebygget av flere under- og overdimensjonerte konstruksjonsdeler. Dette vil naturligvis påvirke materiallisten, og dermed resultatet av livsløpsvurderingen. Fra vanlig betong til geopolymertbetong er det riktignok ingen forskjell i modellen, så disse versjonene har et likt sammenligningsgrunnlag. Inputene til massivtreversjonen er derimot basert på materiallisten til Norconsult sin klimagassberegning. Denne listen er mer virkelighetsnær enn det omprosjekterte bygget sin, med tanke på strukturelle dimensjoner og ekstra komponenter som lyddempende gipsplater. Derfor stiller massivtreskolen med en LCI som kanskje er mer konservativ sammenlignet med betongskolene. For å motvirke denne forskjellen ble det forsøkt å ekskludere de samme delene fra materiallistene, som himling, overlys, foldedører og vinylgulv.

LCI-en i SimaPro til den omprosjekterte skolen kan inneholde flere regnefeil og tastefeil. Arbeidsprosessen for å sette sammen LCI-en var å hente verdier fra Revit inn i Excel og så over til SimaPro. Dette ble gjort manuelt for hvert materiale og bygningskomponent, og involverte mange mellomregninger i Excel og for hånd. Innad i SimaPro er det mye navigering inn og ut av de forskjellige prosessene som bygges opp, og det er fort gjort å taste inn feil verdier. Selv om alle inputer i Excel og SimaPro ble minst dobbeltsjekket, er det usannsynlig at det ikke er gjort feil. Dette er tydelig når skolene analyseres basert på materiale istedenfor bygningskomponent; skolene måtte bygges opp på ny i SimaPro med materialene som hovedprosesser, og resultatet av effektvurderingene er at totalutslippene er annerledes. Forskjellen er uansett minimal.

For det meste var det enkelt å finne relevante og oppdaterte prosesser i SimaPro. For eksempel var det flere typer isolasjon å velge mellom, og det ble da valgt steinull fra Europa, ettersom den ekte skolen bruker Rockwool fra Skandinavia. Prosessene for strukturelt stål var derimot vanskeligere å velge. EPD-ene til Tata Steel og Norsk Stål beskriver produksjonsprosessene til produktene sine, men ikke detaljert nok til at det er umiddelbart åpenbart hvilke SimaPro-prosesser som ligner mest. I følge dokumentasjonen til prosessene for stål er det brukt gjennomsnittlige verdier for å lage et slags generisk stålprodukt. Derfor er det ikke sikkert at stålet inneholder like legeringer, samme andel resirkulert stål eller samme energikilder under tilvirkningen, som stålene til de to leverandørene. For å unngå at de valgte prosessene avvek for mye fra EPD-ene, ble det analysert ett kilo i SimaPro av hver type. CO<sub>2</sub>-utslippene viste seg å stemme godt overens med de i EPD-ene. Det ble konkludert

at prosessene var rimelige å bruke, men at det er usikkert hvor like stålene egentlig er.

### 8.2.2 LCIA

Resultatet av analysene på de tre skolene var at den vanlige betongen ga høyest CO<sub>2</sub>-utslipp. Skolen med geopolymerbetong hadde en reduksjon på 6,2%, mens den med massivtre hadde en reduksjon på 19,1%. I sammenligningen av skolene i de tolv effektkategoriene i Fig. 7.11 var det ingen tydelig “vinner”, da alle skolene var størst i noen kategorier. Faktisk var den vanlige betongskolen kun størst i to kategorier, “Global warming” og “Mineral resource scarcity”, men den første er til gjengjeld den viktigste. Sammenlignet med Norconsult sin klimagassberegning var det en stor forskjell i resultatene; deres massivtreskole hadde betydelig lavere utslipp enn i denne oppgaven, og referansebygget hadde høyere enn den vanlige betongskolen her.

I kategorien “Land use” dominerer massivtreskolen. For at tømmer skal være en fornybar ressurs må treindustrien drives på en bærekraftig måte. Det har blitt nevnt kritikk rettet mot industrien fordi en nedhugget skog slipper ut CO<sub>2</sub> i flere tiår, uten at dette blir tatt hensyn til i miljøberegninger [85]. I EPD-ene for limtre og krysslaminert tre [130], [131], brukt av Norconsult, er det en drastisk forskjell fra SimaPro sine tilsvarende prosesser. CO<sub>2</sub>-utslippene i kategori A1 til A3 i EPD-ene er rundt -60 og -76 kg CO<sub>2</sub>-eq per m<sup>3</sup>. I SimaPro har de tilsvarende produktene utslipp på over 130 kg CO<sub>2</sub>-eq (+). Det negative bidraget i EPD-ene skyldes såkalt biogent karbon, som er det karbonet som er lagret i treverket. I denne oppgaven blir ikke dette konseptet gått nærmere inn på, men forskjellene i utslipp bør påpekes. Etttersom denne oppgaven ikke inkluderer slutfasen av skolebygget, hvor det biogene karbonet gjerne slippes ut gjennom forbrenning, er ikke de to massivtreskolene sammenlignbare.

### 8.2.3 Sammenligning av betongskoler

Geopolymerbetongen hadde halvparten så mye utslipp per m<sup>3</sup> som den vanlige betongen. Siden det ble brukt like mye betong i de to skolene ble derfor betongutslippet halvert. Likevel var det et 14 ganger høyere transportutslipp på geopolymerbetongen. Dette skyldes at noritten og aktivatoren kommer fra Titania og må fraktes store avstander for å komme til Ørsta. Avstanden til Titania bør derfor vurderes ved valg av geopolymerbetong til byggeprosjekter. For å implementere materialet på nasjonal basis ønsker Saferock å finne alternative avgangsmasser som kan brukes til geopolymerbetong. Dette krever naturligvis mye forskningsarbeid og kommer nok først etter at den norittbaserte betongen er på plass. Dersom selskapet får til dette, sammen med grønn produksjon av KOH, vil geopolymerbetongen være praktisk talt utslippsfri, sammenlignet med vanlig betong.

Sorteringen av CO<sub>2</sub>-utslipp etter materialer (Fig. 7.12) avslørte hvor mye utslipp armeringsstålet bidrar med. Armeringen står for 40% av utslippet i armert, vanlig betong, og 57% i armert geopolymerbetong. Det ble gjort en scenarioanalyse med armering fra Rest-of-World, istedenfor Europa, og da økte utslippet fra armeringen med 76%. Produksjonsmetoden og andelen resirkulert stål har derfor svært mye å si. Den høye andelen utslipp armeringen står for i skolene viser også hvor viktig det er med tiltak i alle sektorer for å oppnå en total reduksjon i utslipp. Den vanlige

betongen utgjør rundt en tredjedel av de totale utslippene; resten vil fortsette å være der, selv om betongen endres til geopolymertbetong. Det kan trekkes en parallell til de globale klimautfordringene verden står overfor. For å nå 1,5-gradersmålet til FNs klimapanel kreves det inngrepene tiltak i alle næringer, og bare sammen kan målet nås.

#### 8.2.4 Kostnader og CO<sub>2</sub>-utgifter

Pris har ikke vært et tema i denne oppgaven. Likevel bør det nevnes i sammenheng med økende CO<sub>2</sub>-utgifter. Fra litteraturstudien på geopolymere kommer det frem at geopolymerelementer er dyrere enn portlandsementer, og at materialet er vanskelig å gjøre økonomisk lønnsomt [8], [58], [62]. Det ble foreslått av Solberg-regjeringen å gradvis øke CO<sub>2</sub>-avgiftene mot år 2030 fra rundt 600 til 2 000 kr per tonn CO<sub>2</sub>-eq [135]. Klimaplanen oppfordrer til å “kutte utslippene, ikke utviklingen”, og klimaavgifter skal være med på å skape insentiv for bedrifter til å finne grønne løsninger.

I følge Veldre AS sin prisliste [136] koster 1 m<sup>3</sup> med B35 M45-betong 1 635 kr, ekskludert avgifter. Saferock anslår at deres geopolymertbetong produsert ved Titania vil ligge på rundt den samme prisen [137]. En klimaavgift på 2 000 kr tilsvarer 548 kr for 1 m<sup>3</sup> med Unicon sin B35 i denne oppgaven. Totalt blir dette 2 183 kr med utgangspunkt i Veldre sin pris. Klimaavgiften til geopolymertbetongen ville blitt 274 kr/m<sup>3</sup>, basert på tallene fra LCA-studien. Det vil si at med de foreslåtte avgiftene vil geopolymertbetongen være billigere enn Veldre sin betong. Dersom utslippene reduseres i fremtiden ved å produsere KOH med grønn energi vil avgiften naturligvis bli enda mindre.

### 8.3 Begrensninger og anbefalinger

Den største begrensningen i arbeidet som har blitt utført i denne oppgaven er informasjonen rundt kaliumhydroksidet. Det vil alltid være usikkerheter, forenklinger og antakelser i LCA-studier, men dette bør begrenses mest mulig i de viktigste inputene i systemet. For at resultatene i denne oppgaven skal kunne brukes med sikkerhet, bør det gjøres mer arbeid på KOH-prosessen. Nåværende leverandører må kunne oppgi produksjonsstedet og produksjonsprosessen til produktet sitt. Det bør også gjøres en livsløpsvurdering på en eventuell produksjon av KOH i Norge, med fornybare energikilder. Det er viktig at denne baseres på en reell, oppnåelig produksjonsmetode, og ikke bare endrer energiinputene i SimaPro til fornybare kilder. Frem til dette er gjort vil geopolymertbetongen ha høyere utslipp enn det som først var anslått av Saferock, men med usikkerhet i tallene.

Det er også begrensninger i verdiene som er brukt som inputer i geopolymertbetongen. Dette er et fremtidig produkt som ikke har vært utprøvd i byggsammenhenger. Betongresepten er stadig under utvikling og kan bli endret i fremtiden. Praktiske utfordringer rundt støpbarhet, bestandighet, styrkeutvikling, m.m., kan føre til mindre eller større endringer i resepten. Sensitivitetsanalysen viste at én prosent økning i aktivator fører til 0,98% økning i CO<sub>2</sub>-utslipp. Derfor har betongresepten mye å si for utslippene, og Saferock må ta hensyn til dette ved bruk av LCA-resultatene.

Når det kommer til LCA-studien på Sæbø skule er det gjort flere valg angående leverandør og transportavstand, type SimaPro-prosedyr, og dimensjoner og materialer under omprosjekteringen.

Det er varierende hvor sikre disse valgene har vært, men det har blitt forsøkt å være så realistisk som mulig, innenfor rimelighetens grenser. Ved implementeringen av geopolymertbetongen i et faktisk byggeprosjekt vil det foreligge et bedre grunnlag for en LCA-studie, noe som anbefales å gjøre.

Formålet med studien var først og fremst å sammenligne geopolymertbetongen med vanlig betong i et byggeprosjekt. Dette har blitt gjort, men det er usikkerhet rundt hvor stor påvirkning betongen har på bygget totalt sett. Som scenarioanalysen viste, kan armeringens produksjonssted drastisk påvirke resultatet av analysen. Dette belyser viktigheten av helhet i en LCA-studie; datainnsamlingen bør være grundig også på de komponentene som ikke er fokuset i studien. Alle bidrag påvirker sluttresultatet, og ingen bidrag er absolutt sikre. Resultatene fra denne LCA-studien sammenlignet med de fra Norconsult sin klimagassberegning er en påminnelse om hvor mye variasjon og usikkerhet det er i livsløpsvurderinger.

## 9 | Konklusjon

Oppgaven har følgende forskerspørsmål:

### **Hvilke miljøpåvirkninger har geopolymertbetong lagd med avgangsmasser fra ilmenittgruvedrift?**

Det har blitt utført en livsløpsvurdering (LCA) på geopolymertbetongen til selskapet Saferock. Betongen består av knust noritt fra Titania-gruven, kaliumhydroksid (KOH), vann og tilslag. I SimaPro ble betongen bygd opp og analysert. Sammenlignet med en norsk, tilsvarende vanlig betong, hadde geopolymertbetongen halvparten så mye CO<sub>2</sub>-utslipp. 90% av utslippene i geopolymertbetongen kommer fra produksjonen av KOH, og dette er også den komponenten som det er knyttet mest usikkerhet til i LCA-studien. Derfor er resultatene fra LCA-studien antakeligvis ikke helt representative for de faktiske miljøpåvirkningene, men de gir en indikasjon på potensialet til geopolymertbetongen som et mer miljøvennlig alternativ til vanlig betong. Det er også klare samfunnsmessige og økonomiske fordeler ved å ta i bruk avgangsmassene fra Titania-gruven. Saferock anbefales å skaffe KOH produsert med så mye fornybar energi som mulig, da dette vil redusere utslippene vesentlig. Med en kjent produsent av KOH vil det også være mulig å skaffe mer nøyaktige inputer til LCA-studien, og dermed få et mer endelig tall på utslipp.

Det ble også utført en LCA-studie på et skolebygg for å vurdere hvordan geopolymertbetongen ville påvirke de totale utslippene. Massivtreskolen Sæbø skule i Ørsta ble valgt som case, og ble omprosjektert til å ha bæresystem i betong og stål. I SimaPro ble tre versjoner av skolen lagd: en med vanlig betong, en med geopolymertbetong og en med massivtre. Disse ble analysert og sammenlignet. Den vanlige betongen ga høyest CO<sub>2</sub>-utslipp, mens geopolymertbetongen reduserte utslippet med 6%. Massivtreskolen hadde 19% lavere utslipp enn den vanlige betongskolen. Den relativt lave nedgangen i totalutslipp fra betong til geopolymertbetong, til tross for at geopolymertbetongen hadde halvparten så mye utslipp per kubikkmeter, viste at det er mange, viktige kilder til miljøpåvirkninger i et bygg. Den lange avstanden fra Titania til Ørsta hadde også et betydelig negativt bidrag på utslippene til geopolymertbetongen. Dette viser at det ikke holder å kun gjøre betongen mer miljøvennlig; for å oppnå en totalreduksjon må det gjøres tiltak i alle deler av bygningssektoren. I forlengelse av dette, må det gjøres tiltak i alle næringer på verdensbasis, dersom 1,5-gradersmålet til FN's klimapanel skal nås.



## 10 | Anbefalinger

Det meste av arbeidet i denne oppgaven er basert på fremtidige eller teoretiske systemer. Når Saferock kommer lenger i utviklingen av produktene sine, og setter i gang produksjon ved pilotfabrikken, vil det foreligge et mer konkret datagrunnlag til en ny LCA-studie. Dersom de klarer å finne en produsent av kaliumhydroksid med en renere produksjonsmetode enn den som er brukt i SimaPro, vil utslippene antakeligvis synke vesentlig. Saferock anbefales å gjøre en ny livsløpsvurdering når usikkerheten rundt KOH-prosessen er redusert eller fjernet.

De praktiske usikkerhetene rundt geopolymertbetongen er nok Saferock godt kjent med. Det antas at bruk av betongen i byggeprosjekter vil gi mye kunnskap og erfaring, som så påvirker utformingen av betongresepten. Dette vil naturligvis påvirke inputene i en fremtidig LCA-studie. Det ville også vært interessant å vurdere miljøpåvirkningene av geopolymertbetongen i et faktisk byggeprosjekt, og sammenligne med resultatene fra Sæbø skule i denne oppgaven.

Arbeidet med å få geopolymertbetongen godkjent til bruk i Norge er i gang, men som kjent er dette en lang prosess. Siden denne oppgaven har hatt veiledning fra seniorrådgiver i miljøavdelingen til Norconsult, er det mulig at Saferock kan få drahjelp inn i markedet med denne kontakten. Dette avhenger selvsagt av hvorvidt produktet er klart til å leveres. Det kan være aktuelt med en masteroppgave som tar for seg utfordringene og potensielle løsninger til å få betongen godkjent i Norge.

Det bør også bli gjort en reell økonomisk vurdering av produktet, med og uten klimaavgifter, og sammenligne med andre lavkarbonløsninger. Hvordan vil geopolymertbetongen være miljømessig og økonomisk, sammenlignet med for eksempel sement lagd med karbonfangst?

Det anbefales å kartlegge alternative kilder til avgangsmasser i Norge. Dette vil løse transportutfordringene som oppstod i denne oppgaven med Sæbø skule. I tillegg vil det gjøre produksjonen av geopolymertbetong mer tilgjengelig rundt i landet. Selve produksjonen av betongen er enkel og krever ikke mer teknologi enn et typisk blandeverk. Gjennom bachelor-/masteroppgaver kan ulike avgangsmasser testes i laboratorie, og de økonomiske og logistiske aspektene ved de ulike gruvene kan vurderes.

## Referanser

- [1] C. R. Gagg, «Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis,» *Engineering Failure Analysis*, årg. 40, s. 114–140, 1. mai 2014, ISSN: 1350-6307. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.02.004. (hentet 12.01.2022).
- [2] R. M. Andrew, «Global CO2 emissions from cement production, 1928–2018,» *Earth System Science Data*, årg. 11, nr. 4, s. 1675–1710, 2019. DOI: 10.5194/essd-11-1675-2019. (hentet 07.01.2022).
- [3] FN-sambandet, *FNs bærekraftsmål*, 21. okt. 2021. Adresse: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal> (hentet 17.01.2022).
- [4] Miljødirektoratet, *Notat: Forbud mot sjødeponering av avgangsmasser fra gruvevirksomhet*, 24. jan. 2019. Adresse: <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/dokumenter/vannhav-og-kyst/sjodeponering-gruver-notat240119.pdf> (hentet 19.01.2022).
- [5] IEA, «Cement – analysis,» Paris, nov. 2021. Adresse: <https://www.iea.org/reports/cement> (hentet 20.01.2022).
- [6] IEA, «The role of critical minerals in clean energy transitions,» Paris, mai 2021. Adresse: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions> (hentet 05.05.2022).
- [7] Norsk Standard, NS-EN 197-1:2011 *Sement - Del 1: Sammensetning, krav og samsvarskriterier for ordinære sementtyper*, 1. des. 2011. Adresse: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=507733> (hentet 21.01.2022).
- [8] J. Davidovits, *Geopolymer Chemistry and Applications*, 3. utg. Saint-Quentin, France: Geopolymer Institute, 2008, ISBN: 9782954453118.
- [9] IEA, *International collaborations*. Adresse: <https://www.iea.org/areas-of-work/international-collaborations> (hentet 10.01.2022).
- [10] IAE, «Net zero by 2050 - a roadmap for the global energy sector,» Paris, mai 2021. Adresse: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050> (hentet 10.01.2022).
- [11] United Nations, *IPCC report: ‘Code red’ for human driven global heating, warns UN chief*, 9. aug. 2021. Adresse: <https://news.un.org/en/story/2021/08/1097362> (hentet 10.01.2022).

- [12] United Nations Environment Programme, «Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector,» 2021. Adresse: <https://www.unep.org/resources/report/2021-global-status-report-buildings-and-construction> (hentet 06.01.2022).
- [13] United Nations Environment Programme, «Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector,» 2020. Adresse: <https://globalabc.org/news/launched-2020-global-status-report-buildings-and-construction> (hentet 06.01.2022).
- [14] Norcem, *Sementproduksjon og CO2*. Adresse: <https://www.norcem.no/no/sementproduksjon-co2> (hentet 12.01.2022).
- [15] IEA, «Appliances and equipment – analysis,» Paris, nov. 2021. Adresse: <https://www.iea.org/reports/appliances-and-equipment> (hentet 10.01.2022).
- [16] IEA, «Cooling – analysis,» Paris, nov. 2021. Adresse: <https://www.iea.org/reports/cooling> (hentet 10.01.2022).
- [17] IEA, «Data centres and data transmission networks – analysis,» Paris, nov. 2021. Adresse: <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks> (hentet 10.01.2022).
- [18] IEA, «District heating – analysis,» Paris, nov. 2021. Adresse: <https://www.iea.org/reports/district-heating> (hentet 10.01.2022).
- [19] IEA, «Building envelopes – analysis,» Paris, nov. 2021. Adresse: <https://www.iea.org/reports/building-envelopes> (hentet 10.01.2022).
- [20] IEA, «Heating – analysis,» Paris, nov. 2021. Adresse: <https://www.iea.org/reports/heating> (hentet 10.01.2022).
- [21] IEA, «Heat pumps – analysis,» Paris, nov. 2021. Adresse: <https://www.iea.org/reports/heat-pumps> (hentet 10.01.2022).
- [22] IEA, «Lighting – analysis,» Paris, nov. 2021. Adresse: <https://www.iea.org/reports/lighting> (hentet 10.01.2022).
- [23] Ellen MacArthur Foundation, *What is a circular economy?* Adresse: <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview> (hentet 18.01.2022).
- [24] *Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy* COM/0614 final. Europakommisjonen, Brussel, 2. des. 2015. Adresse: <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2015-0614-final> (hentet 01.02.2022).
- [25] Klima- og miljødepartementet, «Nasjonal strategi for ein grønn, sirkulær økonomi,» 16. jun. 2021. Adresse: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/nasjonal-strategi-for-ein-gron-sirkular-okonomi/id2861253/> (hentet 18.01.2022).

- [26] Statistisk sentralbyrå. «08604: Industriavfall. Generert mengde avfall, etter næring (SN2007), materialtype og behandlingsmåte (1 000 tonn) 2008 - 2015.» Adresse: <https://www.ssb.no/statbank/table/08604/> (hentet 19.01.2022).
- [27] Nærings- og fiskeridepartementet. «Gir Nussir ASA driftskonsesjon.» 14. feb. 2019. Adresse: <https://www.regjeringen.no/no/dokumentarkiv/regjeringen-solberg/aktuelt-regjeringen-solberg/nfd/pressemeldinger/2019/nussir/id2629241/> (hentet 19.01.2022).
- [28] S. S. Skiphamn og M. L. Karlsen. «Faktisk.no: Hva skal egentlig dumpes i Repparfjorden?» NRK. 19. feb. 2019. Adresse: [https://www.nrk.no/norge/faktisk.no\\_-hva-skal-egentlig-dumpes-i-repparfjorden\\_-1.14438358](https://www.nrk.no/norge/faktisk.no_-hva-skal-egentlig-dumpes-i-repparfjorden_-1.14438358) (hentet 19.01.2022).
- [29] «Sterke samiske reaksjoner på regjeringens ja til gruvedrift i Kvalsund,» e24. 14. feb. 2019. Adresse: <https://e24.no/naeringsliv/i/rLxx2l/sterke-samiske-reaksjoner-paa-regjeringens-ja-til-gruvedrift-i-kvalsund> (hentet 19.01.2022).
- [30] M. C. S. Holmes. «Vil ha omkamp om dumping av gruveavfall i Repparfjorden,» VG. 6. feb. 2018. Adresse: <https://www.vg.no/nyheter/innenriks/i/vm5evB/vil-ha-omkamp-om-dumping-av-gruveavfall-i-repparfjorden> (hentet 19.01.2022).
- [31] G. B. Hjetland, E. B. Oldeide, S. Knutsen og I. C. Løvseth. «Har fått driftsløyve for gruva i Førdefjorden,» NRK. 17. jun. 2020. Adresse: <https://www.nrk.no/vestland/har-fatt-driftsloyve-for-gruva-i-fordefjorden-1.15057229> (hentet 19.01.2022).
- [32] *Forskrift om gjenvinning og behandling av avfall*, 15. jun. 2012. Adresse: <https://lovdata.no/forskrift/2004-06-01-930> (hentet 14.02.2022).
- [33] NRK. 16. nov. 2021. Adresse: <https://www.nrk.no/rogaland/titania-palegges-sikkerhetstilta-k-1.15732575> (hentet 19.01.2022).
- [34] J. Seehusen, «Trykket mot Titanias største deponidam er større enn dammen er dimensjonert for,» *Teknisk Ukeblad*, 22. nov. 2021. Adresse: <https://www.tu.no/artikler/trykket-mot-titanias-storste-deponidam-er-storre-enn-dammen-er-dimensjonert-for-br/515233> (hentet 19.01.2022).
- [35] S. Løvland, «Store deponiområder utredes,» *Avisen Agder*, 28. jun. 2019. Adresse: <https://www.avisenagder.no/store-deponiomrader-utredes/s/5-99-808887> (hentet 19.01.2022).
- [36] J. F. Young, «Portland cements,» i *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, K. H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings mfl., red., Oxford: Elsevier, 1. jan. 2001, s. 7768–7773, ISBN: 978-0-08-043152-9. DOI: 10.1016/B0-08-043152-6/01398-X. (hentet 20.01.2022).
- [37] R. C. Selley, «Sedimentary rocks | limestones,» i *Encyclopedia of Geology*, R. C. Selley, L. R. M. Cocks og I. R. Plimer, red., Oxford: Elsevier, 1. jan. 2005, s. 107–113, ISBN: 978-0-12-369396-9. DOI: 10.1016/B0-12-369396-9/00305-1. (hentet 21.01.2022).
- [38] *En introduksjon til sement og betong*. Oslo: Norcem Cement A/S, 1986. Adresse: [http://urn.nb.no/URN:NBN:no-nb\\_digibok\\_2011051008093](http://urn.nb.no/URN:NBN:no-nb_digibok_2011051008093) (hentet 20.01.2022).

- [39] T. Årtun, N. Nesse og I. B. Eide. «Sement,» Store norske leksikon. 14. des. 2021. Adresse: <https://snl.no/segment> (hentet 20.01.2022).
- [40] J. Seehusen, «Verdens mest brukte lim – slik virker det,» *Teknisk Ukeblad*, 11. jul. 2021. Adresse: <https://www.tu.no/artikler/verdens-mest-brukte-lim-slik-virker-det/511720> (hentet 20.01.2022).
- [41] D. D. L. Chung, «Cement-matrix composites,» i *Carbon Composites (Second Edition)*, D. D. L. Chung, red., Butterworth-Heinemann, 1. jan. 2017, s. 333–386, ISBN: 978-0-12-804459-9. DOI: 10.1016/B978-0-12-804459-9.00006-3. (hentet 20.01.2022).
- [42] Q. Zeng, K. Li, T. Fen-chong og P. Dangla, «Determination of cement hydration and pozzolanic reaction extents for fly-ash cement pastes,» *Construction and Building Materials*, årg. 27, nr. 1, s. 560–569, 1. feb. 2012, ISSN: 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.007. (hentet 21.01.2022).
- [43] V. H. Dodson, «Pozzolans and the Pozzolanic Reaction,» i *Concrete Admixtures*. Boston, MA: Springer US, 1990, s. 159–201, ISBN: 978-1-4757-4843-7. DOI: 10.1007/978-1-4757-4843-7\_7. (hentet 25.01.2022).
- [44] A. Markestad, *Silika og andre restprodukter i betong*. Oslo: Norges byggforskningsinst., 1980. Adresse: [http://urn.nb.no/URN:NBN:no-nb\\_digibok\\_2012121406031](http://urn.nb.no/URN:NBN:no-nb_digibok_2012121406031) (hentet 20.01.2022).
- [45] S. U. Khan, M. F. Nuruddin, T. Ayub og N. Shafiq, «Effects of different mineral admixtures on the properties of fresh concrete,» *The Scientific World Journal*, årg. 2014, s. 1–11, 2014, ISSN: 2356-6140, 1537-744X. DOI: 10.1155/2014/986567. (hentet 21.01.2022).
- [46] H.-J. Chen, S.-S. Huang, C.-W. Tang, M. Malek og L.-W. Ean, «Effect of curing environments on strength, porosity and chloride ingress resistance of blast furnace slag cement concretes: A construction site study,» *Construction and Building Materials*, årg. 35, s. 1063–1070, okt. 2012, ISSN: 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.052. (hentet 21.01.2022).
- [47] B. Pedersen, «Effekt av tilslag på betongens mekaniske egenskaper: Trykkfasthet, E-modul og spaltestrekkfasthet,» Statens vegvesen Vegdirektoratet, Norge, jan. 2019. Adresse: <http://hdl.handle.net/11250/2580688> (hentet 26.01.2022).
- [48] M. Alexander og S. Mindess, *Aggregates in Concrete*, ser. Modern Concrete Technology. CRC Press, 2005, ISBN: 9781482264647. Adresse: <https://books.google.no/books?id=eWG1DwAAQBAJ>.
- [49] Norsk Standard, NS-EN 12620 *Tilslag for betong*, 1. des. 2016. Adresse: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=866016> (hentet 29.01.2022).
- [50] B. Pedersen og R. Kompen, «Trykkfasthet og E-modul for SV-40 betong : en studie av tilslagets betydning,» Statens vegvesen Vegdirektoratet, Norge, des. 2013. Adresse: <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/handle/11250/2656373> (hentet 26.01.2022).

- [51] T. L. Brekke, H. H. Einstein og R. E. Mason, «State-of-the-Art Review on Shotcrete,» U.S. Department Of Commerce: National Technical Information Service, 1. jun. 1976. Adresse: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA028031> (hentet 27.01.2022).
- [52] P. G. Burström, *Byggnadsmaterial - Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*, 2. utg. Lund: Studentlitteratur, 2007, ISBN: 978-91-44-02738-8.
- [53] K. M. Stensland. «Får Enova-millionar: Skal laga ein meir klimavenleg betong av gruveavfall,» e24. 6. jan. 2022. Adresse: <https://e24.no/det-groenne-skiftet/i/Wj3oXQ/faar-enoa-millionar-skal-laga-ein-meir-klimavenleg-betong-av-gruveavfall> (hentet 27.01.2022).
- [54] L. W. McKeen, «Chapter 1 - Introduction to Plastics and Elastomers,» i *The Effect of Creep and Other Time Related Factors on Plastics and Elastomers*, ser. Plastics Design Library, L. W. McKeen, red., 2. utg., Boston: William Andrew Publishing, 2009, s. 1–31, ISBN: 978-0-8155-1585-2. DOI: 10.1016/B978-0-8155-1585-2.50003-0. (hentet 27.01.2022).
- [55] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo og J. S. J. van Deventer, «Geopolymer technology: the current state of the art,» *Journal of Materials Science*, årg. 42, s. 2917–2933, 9 19. des. 2006. DOI: 10.1007/s10853-006-0637-z. (hentet 27.01.2022).
- [56] M. Khalifeh, A. Saasen, H. B. Larsen og H. Hodne, «Development and characterization of norite-based cementitious binder from an ilmenite mine waste stream,» *Advances in Materials Science and Engineering*, årg. 2017, s. 1–7, 2017, ISSN: 1687-8434, 1687-8442. DOI: 10.1155/2017/6849139. (hentet 11.01.2022).
- [57] M. Khalifeh, «Sementerende, norittbasert geopolymermateriale og fremgangsmåte for å tilveiebringe en pumpbar, herdbar velling av et sementerende, norittbasert geopolymermateriale,» patent 342076, 19. mar. 2018. Adresse: <https://search.patentstyret.no/Patent/20140831> (hentet 28.01.2022).
- [58] J. S. Van Deventer, J. L. Provis og P. Duxson, «Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement,» *Minerals Engineering*, årg. 29, s. 89–104, 2012, Sustainability through Resource Conservation and Recycling, ISSN: 0892-6875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.09.009>. (hentet 11.02.2022).
- [59] B. Pedersen. «Natriumhydroksid,» Store norske leksikon. Adresse: <https://snl.no/natriumhydroksid> (hentet 16.02.2022).
- [60] B. Pedersen. «Kaliumhydroksid,» Store norske leksikon. Adresse: <https://snl.no/kaliumhydroksid> (hentet 16.02.2022).
- [61] N. Jungbluth, M. Chudakoff, A. Dauriat og F. Dinkel, «Life Cycle Inventories of Bioenergy - ecoinvent report No. 17,» Dübendorf, 2007, Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Adresse: [https://db.ecoinvent.org/reports/17\\_Bioenergy.pdf?area=463ee7e58cbf8](https://db.ecoinvent.org/reports/17_Bioenergy.pdf?area=463ee7e58cbf8) (hentet 04.04.2022).
- [62] J. Davidovits, «Geopolymers: Inorganic polymeric new materials,» *Journal of thermal analysis*, årg. 37, s. 1633–1656, aug. 1991. DOI: 10.1007/BF01912193. (hentet 01.02.2022).

- [63] J. Wastiels, X. Wu, S. Faignet og G. Patfoort, «Mineral polymer based on fly ash,» *The Journal of resource management and technology*, årg. 22, s. 135–141, sep. 1994. Adresse: [https://www.researchgate.net/publication/279908335\\_Mineral\\_polymer\\_based\\_on\\_fly\\_ash](https://www.researchgate.net/publication/279908335_Mineral_polymer_based_on_fly_ash) (hentet 01.02.2022).
- [64] T. Silverstrim, H. Rostami, J. Larralde og A. Samadi, «Fly ash cementitious material and method of making a product,» patent US56002-02, 11. feb. 1997. Adresse: <https://patents.google.com/patent/US5601643A/en> (hentet 02.02.2022).
- [65] F. Pacheco-Torgal, J. Labrincha, C. Leonelli, A. Palomo og P. Chindaprasit, red., *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*. Storbritannia: Woodhead Publishing, 2015, ISBN: 978-1-78242-276-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-16511-7>.
- [66] J. Davidovits og J. L. Sawyer, «Early high-strength mineral polymer,» patent US4509985A, 9. apr. 1985. Adresse: <https://patents.google.com/patent/US4509985A/en> (hentet 07.02.2022).
- [67] C. Tennakoon, R. S. Nicolas, J. G. Sanjayan og A. Shayan, «Thermal effects of activators on the setting time and rate of workability loss of geopolymers,» *Ceramics International*, årg. 42, nr. 16, s. 19 257–19 268, 2016, ISSN: 0272-8842. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.092>. (hentet 07.02.2022).
- [68] R. Premkumar, P. Hariharan og S. Rajesh, «Effect of silica fume and recycled concrete aggregate on the mechanical properties of GGBS based geopolymer concrete,» *Materials Today: Proceedings*, 2022, ISSN: 2214-7853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.442>. (hentet 11.02.2022).
- [69] G. Liang, H. Zhu, H. Li, T. Liu og H. Guo, «Comparative study on the effects of rice husk ash and silica fume on the freezing resistance of metakaolin-based geopolymer,» *Construction and Building Materials*, årg. 293, s. 123 486, 2021, ISSN: 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123486>. (hentet 13.02.2022).
- [70] J. Davidovits, L. Buzzi, P. Rocher, D. Gimeno, C. Marini og S. Tocco, «Geopolymeric cement based on low cost geologic material, results from the European Research project GEOCISTEM,» jun. 1999, s. 83–96. Adresse: [https://www.researchgate.net/publication/284757919\\_Geopolymeric\\_cement\\_based\\_on\\_low\\_cost\\_geologic\\_material\\_results\\_from\\_the\\_European\\_Research\\_project\\_GEOCISTEM](https://www.researchgate.net/publication/284757919_Geopolymeric_cement_based_on_low_cost_geologic_material_results_from_the_European_Research_project_GEOCISTEM) (hentet 14.02.2022).
- [71] BRGM, «Management of mining, quarrying and ore-processing waste in the European Union,» des. 2001. Adresse: <https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/mining/0204finalreportbrgm.pdf> (hentet 14.02.2022).
- [72] F. Pacheco-Torgal, J. Castro-Gomes og S. Jalali, «Investigations about the effect of aggregates on strength and microstructure of geopolymeric mine waste mud binders,» *Cement and Concrete Research*, årg. 37, nr. 6, s. 933–941, 2007, ISSN: 0008-8846. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.006>. (hentet 14.02.2022).

- [73] F. Pacheco-Torgal, J. Castro-Gomes og S. Jalali, «Alkali Activated Geopolymeric Binder Using Tungsten Mine Waste,» jun. 2005. Adresse: [https://www.researchgate.net/publication/236345734\\_Alkali\\_Activated\\_Geopolymeric\\_Binder\\_Using\\_Tungsten\\_Mine\\_Waste](https://www.researchgate.net/publication/236345734_Alkali_Activated_Geopolymeric_Binder_Using_Tungsten_Mine_Waste) (hentet 14.02.2022).
- [74] Almonty Industries Inc., «Annual Information Form,» 11. jan. 2019. Adresse: [https://minedocs.com/17/Almonty\\_Industries\\_Annual\\_Form\\_11012019.pdf](https://minedocs.com/17/Almonty_Industries_Annual_Form_11012019.pdf) (hentet 15.02.2022).
- [75] A. Wheeler, «Technical Report on The Mineral Resources and Reserves of the Panasqueira Mine, Portugal,» 31. des. 2016. Adresse: [https://www.miningdataonline.com/reports/Panasqueira\\_Project\\_Technical\\_Report\\_Mineral\\_Resources\\_Reserves\\_31122016.pdf](https://www.miningdataonline.com/reports/Panasqueira_Project_Technical_Report_Mineral_Resources_Reserves_31122016.pdf) (hentet 15.02.2022).
- [76] Almonty Industries, *Panasqueira mine*. Adresse: <https://almonty.com/project/panasqueira/> (hentet 14.02.2022).
- [77] KRONOS. «Hauge i Dalane, Norway.» Adresse: <https://kronostio2.com/en/manufacturing-facilities/haug-norway> (hentet 15.02.2022).
- [78] A. Almar-Næss. «Oppredning,» Store norske leksikon. 11. okt. 2020. Adresse: <https://snl.no/oppredning> (hentet 20.01.2022).
- [79] Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO, hentet 15.02.2022 fra Google Earth Pro, Tellnes, 19. jul. 2017.
- [80] J. Seehusen, «Nå kommer løsningen som erstatter sement – utslippsfri, herder i kulda og takler fukt,» *Teknisk Ukeblad*, 19. nov. 2021. Adresse: <https://www.tu.no/artikler/na-kommer-losningen-som-erstatter-sement-utslippsfri-herder-i-kulda-og-takler-fukt/515116?key=khVIeego> (hentet 19.01.2022).
- [81] J. Hindklev, «Tirsdag åpnes verdens største massivtrefabrikk i Norge - her kan du se hvordan den blir,» *Byggeindustrien*, 30. apr. 2019. Adresse: <https://www.bygg.no/tirsdag-apnes-verdens-storste-massivtrefabrikk-i-norge-her-kan-du-se-hvordan-den-blir/1392782/> (hentet 05.03.2022).
- [82] Moelven. «Mjøstårnet.» Adresse: <https://www.moelven.com/mjostarnet/> (hentet 05.03.2022).
- [83] T. Stensvold. «Behovet for massivtre i været - bygger ny fabrikk for å møte etterspørselen,» TU.no. 10. aug. 2017. Adresse: <https://www.tu.no/artikler/behovet-for-massivtre-i-vaeret-bygger-ny-fabrikk-for-a-mote-ettersporselen/398843> (hentet 05.03.2022).
- [84] R. Azari og M. Singery, «Laminated timber buildings: An overview of environmental impacts,» i *The importance of wood and timber in sustainable buildings*, A. Sayigh, red., Cham: Springer International Publishing, 14. sep. 2021, s. 213–223, ISBN: 978-3-030-71700-1. DOI: 10.1007/978-3-030-71700-1âĀĀL. (hentet 05.03.2022).
- [85] K. Bjørheim. «Sivilingeniør varsler Forbrukertilsynet om grønnvasking i treindustrien. «En intens, nasjonal lobby,» TU.no. 19. jun. 2021. Adresse: <https://www.tu.no/artikler/sivilingenior-varsler-forbrukertilsynet-om-gronnvasking-i-treindustrien-en-intens-nasjonal-lobby-br/511186> (hentet 05.03.2022).



- [86] Norske Limtreprodusenters Forening, *Limtreboka*. Bergen, 2015, ISBN: 978-82-7129-324-6. Adresse: [https://www.moelven.com/globalassets/moelven-limtre/limtreboka\\_2015\\_el2.pdf](https://www.moelven.com/globalassets/moelven-limtre/limtreboka_2015_el2.pdf) (hentet 05.03.2022).
- [87] H. J. Blaß og C. Sandhaas, *Timber Engineering - Principles for Design*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2017, ISBN: 978-3-7315-0673-7. DOI: 10.5445/KSP/1000069616.
- [88] Hasslacher Group, *Glued Laminated Timber. The engineered timber beam*. Østerrike. Adresse: [https://www.hasslacher.com/data/\\_dateimanager/broschuere/HNT-Brettschichtholz-EN.pdf](https://www.hasslacher.com/data/_dateimanager/broschuere/HNT-Brettschichtholz-EN.pdf) (hentet 12.03.2022).
- [89] Byggforskserien, 520.205 – *Massive treelementer. Typer og bruksområder*, 2001. Adresse: [https://www.byggforsk.no/dokument/3009/massive\\_treelementer\\_typer\\_og\\_bruksomraader#i12](https://www.byggforsk.no/dokument/3009/massive_treelementer_typer_og_bruksomraader#i12) (hentet 12.03.2022).
- [90] M. Brännström, *Residential complex “Integrationen Linköpin”*, Hasslacher Group. Adresse: <https://www.hasslacher.com/residential-complex-linkoeping> (hentet 25.03.2022).
- [91] Norsk Standard, NS-EN ISO 14040:2006 *Miljøstyring - Livsløpsvurdering - Prinsipper og rammeverk*, 1. sep. 2006. Adresse: <https://www.standard.no/no/nettbutikk/produktkatalogen/produktpresentasjon/?ProductID=236802> (hentet 18.02.2022).
- [92] L. Farrant og Y. Le Guern, «Which environmental impacts for ICT? - LCA case study on electronic mail,» i *2012 Electronics Goes Green 2012+*, 2012, s. 1–5. Adresse: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6360431> (hentet 18.02.2022).
- [93] G. Lankhorst, J. Arts, K. Terwel og H. Jonkers, «Life Cycle Analysis: Load-Bearing Structures of High-Rise Buildings in Western Europe,» English, *CTBUH Journal: International Journal on Tall Buildings and Urban Habitat*, årg. 2019, nr. III, s. 28–35, 2019, ISSN: 1946-1186.
- [94] Norsk Standard, NS-EN ISO 14044:2006 *Miljøstyring - Livsløpsvurdering - Krav og retningslinjer*, 1. sep. 2006. Adresse: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=236803> (hentet 18.02.2022).
- [95] Norsk Standard, NS 3720:2018 *Metode for klimagassberegninger for bygninger*, 1. sep. 2018. Adresse: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=992162> (hentet 18.02.2022).
- [96] A. Özdemir, Z. Günkaya, A. Özkan, O. Ersen, M. Bilgic og M. Banar, «Lifecycle Assessment of Steel Rebar Production with Induction Melting Furnace: Case Study in Turkey,» *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, årg. 22, apr. 2018. DOI: 10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000385. (hentet 21.02.2022).
- [97] One Click LCA. Adresse: <https://www.oneclicklca.com/> (hentet 24.02.2022).
- [98] One Click LCA, *Database*. Adresse: <https://www.oneclicklca.com/support/faq-and-guidance/documentation/database/> (hentet 24.02.2022).
- [99] Grønn Byggallianse, *Om BREEAM-NOR*. Adresse: <https://byggalliansen.no/sertifisering/om-breeam/> (hentet 24.02.2022).

- [100] T. Liebsch. «Life Cycle Assessment Software Tools – Overview,» Ecochain. Adresse: <https://ecochain.com/knowledge/life-cycle-assessment-software-overview-comparison/> (hentet 02.03.2022).
- [101] *About SimaPro*. Adresse: <https://simapro.com/about/> (hentet 02.03.2022).
- [102] B. P. Weidema, C. Bauer, R. Hischier mfl., *Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3*, St. Gallen: The ecoinvent Centre, 2013. Adresse: <https://pre-sustainability.com/legacy/download/EcoinventOverviewAndMethodology.pdf> (hentet 02.03.2022).
- [103] ecoinvent, *System Models*. Adresse: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/system-models/> (hentet 03.03.2022).
- [104] M. Goedkoop, M. Oele, J. Leijting, T. Ponsioen og E. Meijer, *Introduction to LCA with SimaPro*, PRé Sustainability, jan. 2016.
- [105] G. Habert, J. d’Espinose de Lacaillerie og N. Roussel, «An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends,» *Journal of Cleaner Production*, årg. 19, nr. 11, s. 1229–1238, 2011, ISSN: 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.03.012>. (hentet 19.05.2022).
- [106] L. K. Turner og F. G. Collins, «Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete,» *Construction and Building Materials*, årg. 43, s. 125–130, 2013, ISSN: 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>. (hentet 19.05.2022).
- [107] P. Aune og P. K. Larsen, *Konstruksjonslære for bygningsingeniører*. Tapir, 1982, ISBN: 82-519-0460-9.
- [108] Norsk Standard, NS-EN 1990 *Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner*, 1. mai 2016. Adresse: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=814847> (hentet 07.03.2022).
- [109] Norsk Standard, NS-EN 1991-1-1 *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-1: Allmenne laster - Tetthet, egenvekt og nyttelaster i bygninger*, 1. jan. 2019. Adresse: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1015211> (hentet 07.03.2022).
- [110] NBS, «National BIM Report 2019,» 17. mai 2019, RIBA Enterprises Ltd. Adresse: <https://www.thenbs.com/knowledge/national-bim-report-2019> (hentet 29.03.2022).
- [111] Autodesk, *Funksjoner – Programvare for modellering av bygningsinformasjon*. Adresse: <https://www.autodesk.no/products/revit/features> (hentet 29.03.2022).
- [112] Solibri, *Our offerings*. Adresse: <https://www.solibri.com/our-offerings> (hentet 29.03.2022).
- [113] J. Öman, *Case Skanska: Achieving BIM Requirements*. Adresse: <https://www.solibri.com/customers/skanska-achieving-bim-requirements> (hentet 29.03.2022).
- [114] E. Lea og I. M. Gabrielsen, Teams-møte med Saferock, 17. jan. 2022.

- [115] Norsk Standard, NS-EN 206:2013 *Betong - Spesifikasjon, egenskaper, framstilling og samsvar*, 14. apr. 2021. Adresse: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1350404> (hentet 02.03.2022).
- [116] Miljødirektoratet. «Miljøbygg barnehage og skule Sæbø, Hjørundfjorden.» 15. des. 2021. Adresse: <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/for-myndigheter/kutte-utslipp-av-klimagasser/klimasats/2019/miljobygg-barnehage-og-skule-sabo-hjorundfjorden/> (hentet 22.02.2022).
- [117] K. M. Hessen og P. M. Aakerøy, «Tillatelse til gjenvinning av betong/tegl fra Sæbø skole, Ørsta kommune,» Oslo, 26. mar. 2021, Miljødirektoratet.
- [118] F. Flusund, «Miljøbygg barnehage og skule Sæbø, Hjørundfjorden,» Delrapport - Klimasats - Støtte til klimasatsing i kommuner og fylkeskommuner - 2019, 29. nov. 2021, Ørsta kommune.
- [119] *Mahmoud Khalifeh*, Universitetet i Stavanger, Publications. Adresse: <https://www.uis.no/nb/profile/mahmoud-khalifeh> (hentet 28.02.2022).
- [120] M. Khalifeh, A. Saasen, T. Vrålstad, H. B. Larsen og H. Hodne, «Experimental study on the synthesis and characterization of aplite rock-based geopolymers,» *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, årg. 5, nr. 4, s. 233–246, 2016. DOI: 10.1080/21650373.2015.1044049. (hentet 16.02.2022).
- [121] K. Fjelde, e-post, Norsk Spennbetong, 21. apr. 2022.
- [122] R. T. Thorstensen, e-post, UiA, 21. apr. 2022.
- [123] Byggforskserien, 471.031 – *Egenlaster for bygningsmaterialer, byggevarer og bygningsdeler*, aug. 2013. Adresse: [https://www.byggforsk.no/dokument/215/egenlaster\\_for\\_bygningsmaterialer\\_byggevarer\\_og\\_bygningsdeler](https://www.byggforsk.no/dokument/215/egenlaster_for_bygningsmaterialer_byggevarer_og_bygningsdeler) (hentet 07.03.2022).
- [124] Norsk Standard, NS-EN 1991-1-3 *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-3: Allmenne laster - Snølaster*, 1. mai 2018. Adresse: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1004200> (hentet 07.03.2022).
- [125] Tata Steel, *Acoustic RoofDek*. Adresse: <https://www.tatasteeleurope.com/construction/products/roof/profiles/acoustic-roofdek> (hentet 18.03.2022).
- [126] Byggforskserien, 520.235 – *Søyler av stål. Dimensjoneringstabeller*, mar. 2018. Adresse: [https://byggforsk.no/dokument/307/soeyler\\_av\\_staal\\_dimensjoneringstabeller](https://byggforsk.no/dokument/307/soeyler_av_staal_dimensjoneringstabeller) (hentet 04.04.2022).
- [127] Norsk Standard, NS-EN 10219-1:2006 *Kaldformede sveiste hulprofiler av ulegerte og finkornbehandlede konstruksjonsstål - Del 1: Tekniske leveringsbetingelser*, 1. aug. 2006. Adresse: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=183383> (hentet 04.04.2022).

- [128] Z. Fan og S. J. Friedmann, «Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy,» *Joule*, årg. 5, nr. 4, s. 829–862, 2021, ISSN: 2542-4351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.02.018>. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435121000957>.
- [129] Europakommisjonen, «Towards competitive and clean European steel,» 5. mai 2021. Adresse: [https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/swd-competitive-clean-european-steel\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/swd-competitive-clean-european-steel_en.pdf) (hentet 04.04.2022).
- [130] EPD International AB, *CLT (Cross Laminated Timber) by Stora Enso*, environdec, 11. mai 2020.
- [131] L. G. F. Tellnes, *Prosjektlimtre av Moelven Limtre AS*, EPD Norge, 2. jul. 2018.
- [132] Norsk Stål, *Kaldformet Hulprofil*, EPD Norge, 9. nov. 2020. Adresse: [https://www.norskstaal.no/Files/Files/Norsk/Sertifikater/EPD/NEPD-2525-1263\\_Kaldformet-Hulprofil.pdf](https://www.norskstaal.no/Files/Files/Norsk/Sertifikater/EPD/NEPD-2525-1263_Kaldformet-Hulprofil.pdf) (hentet 12.04.2022).
- [133] Saferock. «A sustainable concrete for the future building industry.» Adresse: <https://www.saferock.no/> (hentet 09.05.2022).
- [134] E. Lea, e-post, Saferock, 13. mai 2022.
- [135] K. og miljødepartementet, «Klimaplan for 2021–2030,» 8. jan. 2021. Adresse: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-13-20202021/id2827405/> (hentet 16.05.2022).
- [136] Velde, *Prisliste ferdigbetong – gjeldende fra 01.01.2021*. Adresse: [Ideas.no/s/Velde-Betongpriser-2021.pdf](https://www.ideas.no/s/Velde-Betongpriser-2021.pdf) (hentet 19.05.2022).
- [137] I. M. Gabrielsen, Teams-møte, Saferock, 20. mai 2022.

# Vedlegg

|   |  |    |
|---|--|----|
| A | E-post fra Titania om avgangsmasser . . . . .            | 74 |
| B | Saferock sin geopolymertbetong . . . . .                 | 75 |
| C | Kaliumhydroksid-prosessen i SimaPro . . . . .            | 76 |
| D | Bæresystem, lastarealer og laster i Sæbø skule . . . . . | 78 |
| E | Betongprosess lagd i SimaPro, med utslipp . . . . .      | 81 |
| F | Sæbø skule i vanlig betong . . . . .                     | 83 |
| G | Sæbø skule i geopolymertbetong . . . . .                 | 85 |
| H | Sæbø skule i massivtre . . . . .                         | 86 |
| I | Fremdriftsplan . . . . .                                 | 88 |
| J | Referat fra møter og veiledningstimer . . . . .          | 88 |
| K | Excel-filer . . . . .                                    | 88 |
| L | A3 poster . . . . .                                      | 88 |

## A E-post fra Titania om avgangsmasser

*fre. 18.02.2022 13:16*

Fra: Elise Opsal

Til: Simon Brekke

Hei Simon,

Masteroppgaven høres spennende ut.

1) Utvinningsgraden for 1 tonn malm (noritt), utvinner Titania mellom 25-30% av malmen.

2) For å utvinne mineralet ilmenitt og biproduktene magnetitt og sulfidkonsentrat, benyttes det magnetseparator, gravimetri (tyngdekraft) og flotasjon.

Den gravimetriske prosesstrinnet står for om lag 70-80 % av prosessen, som skiller mineralkornene ved hjelp av tyngdekraft og vann.

Ga det nok svar? Hvis ikke må du bare spørre igjen.

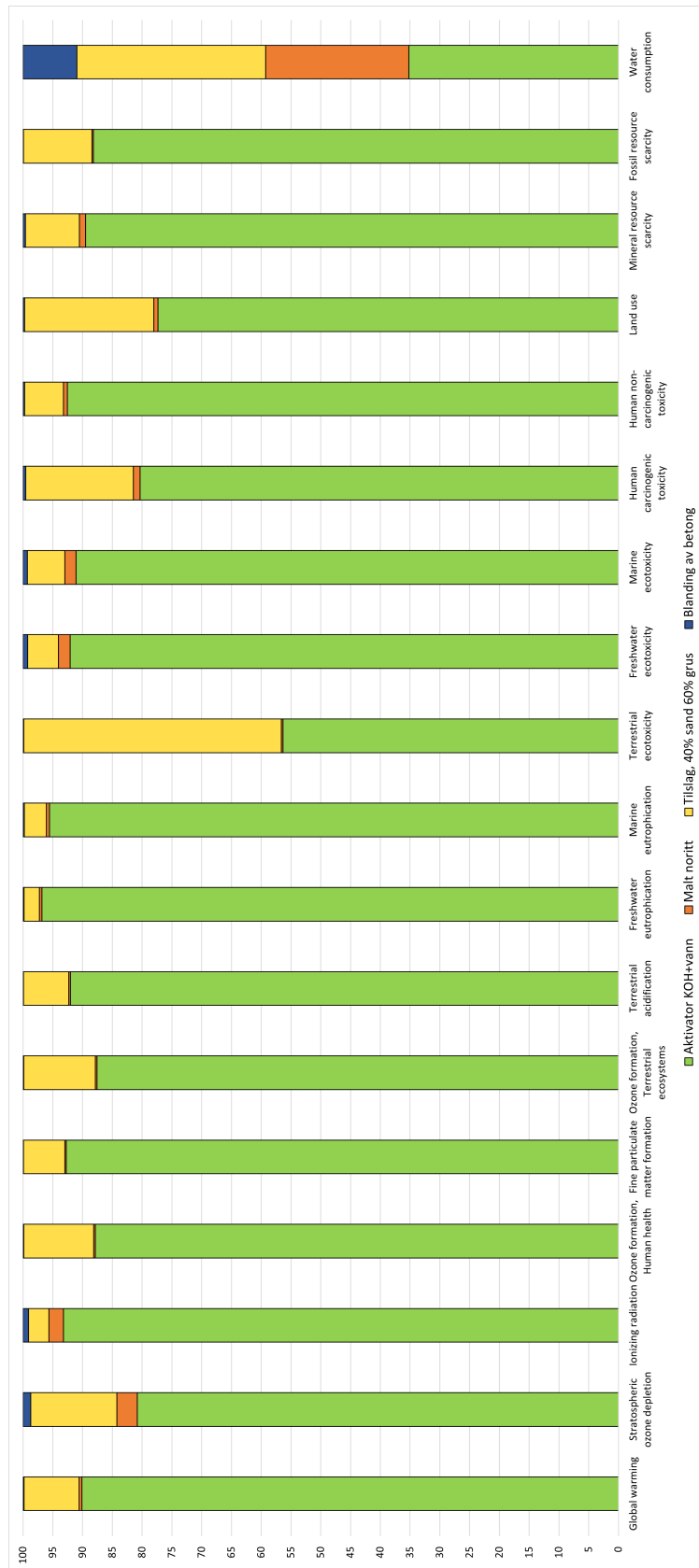
Vennlig hilsen / regards

Elise Opsal

Titania AS

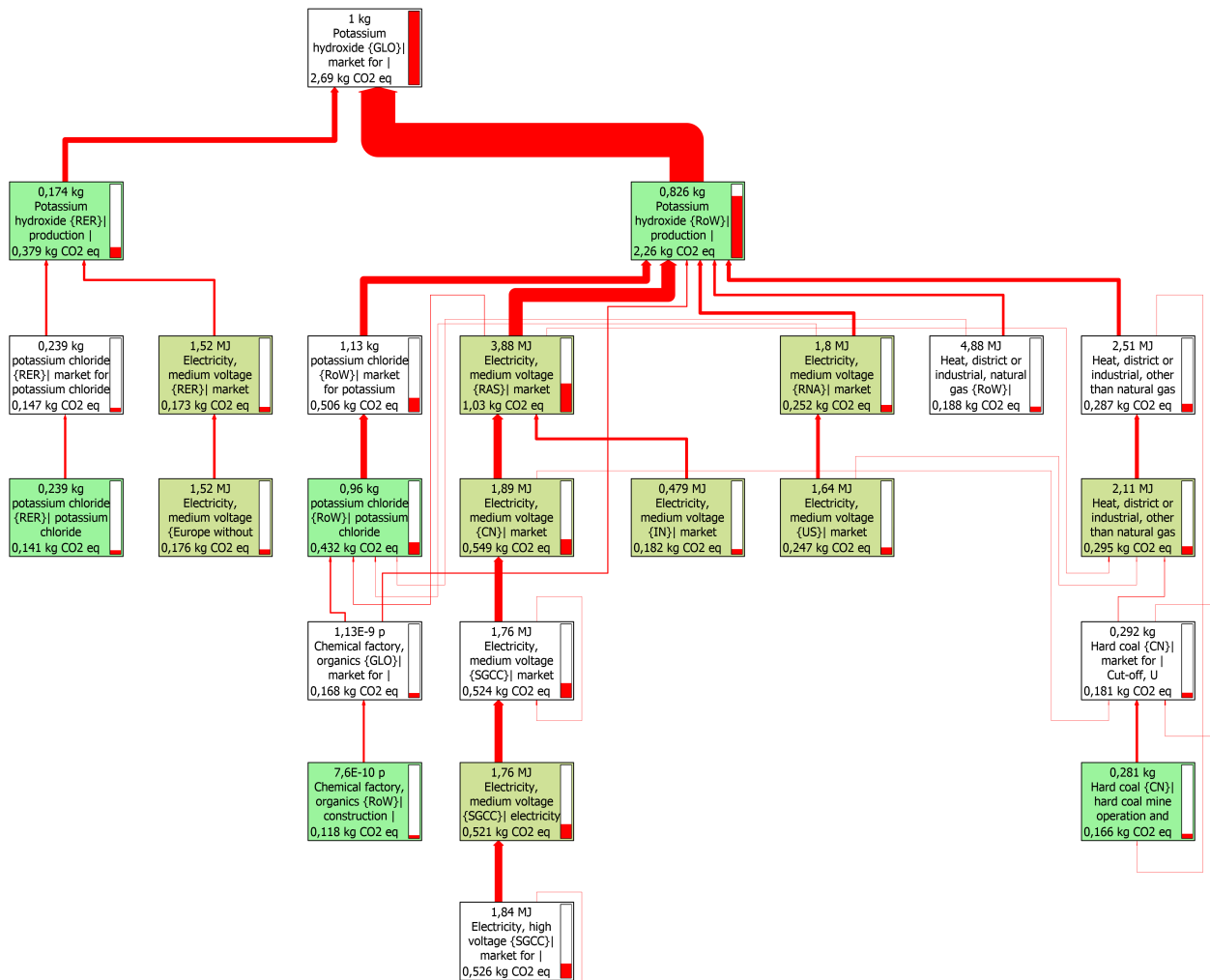
Miljøingeniør

## B Saferock sin geopolymertbetong







Figur 10.1: Hele livsløpseffektvurderingen for den vanlige geopolymertbetongen.

### C Kaliumhydroksid-prosessen i SimaPro



Figur 10.2: Litt av nettverksdiagrammet til KOH. Totalt utslipp er 2,69 kg CO<sub>2</sub>-eq per kg.

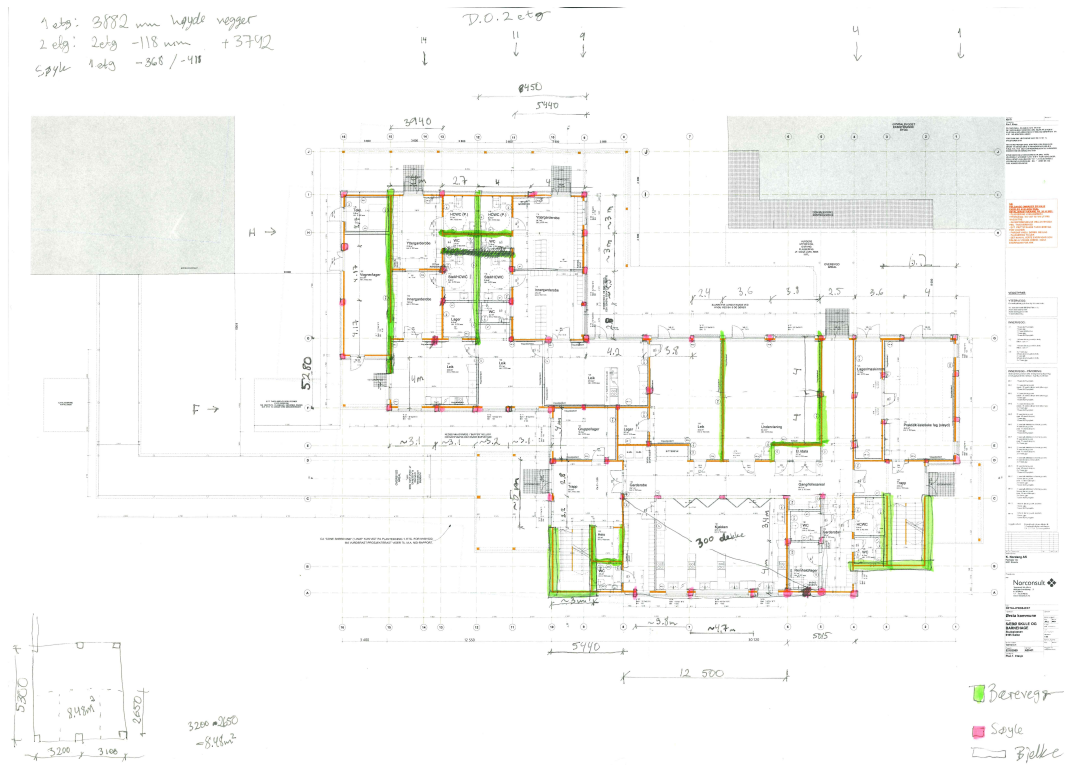


| Network                       |  | Impact assessment                                    | Inventory                                    | Process contribution                      | Setup   |
|-------------------------------|--|--|--|---|---|
| Indicator<br>Characterization |  | Cut-off<br>0 %                                       | <input type="checkbox"/> Default units       |   |     |
| Category<br>Global warming    |  | <input type="checkbox"/> Exclude long-term emissions | <input type="checkbox"/> Per impact category | <input checked="" type="radio"/> Standard | <input type="radio"/> Group   |
| No                            | Process  | Unit   | Potassium hydroxide                          |   |   |
|                               | Total of all processes   | kg CO2 eq  | 2,69   |   |   |
| 1                             | Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW}  heat production, at hard coal industrial furnace     | kg CO2 eq  | 0,243  |   |   |
| 2                             | Hard coal {CN}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U                                  | kg CO2 eq  | 0,136  |   |   |
| 3                             | Heat, district or industrial, natural gas {RU}  heat and power co-generation, natural gas, conventional pow      | kg CO2 eq  | 0,0602                                       |   |   |
| 4                             | Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland}  heat production, natural gas, at indu    | kg CO2 eq  | 0,0585                                       |   |   |
| 5                             | Electricity, high voltage {CN-NM}  electricity production, hard coal   Cut-off, U                                | kg CO2 eq  | 0,0511                                       |   |   |
| 6                             | Heat, district or industrial, natural gas {RoW}  heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW      | kg CO2 eq  | 0,0398                                       |   |   |
| 7                             | Electricity, high voltage {CN-SD}  electricity production, hard coal   Cut-off, U                                | kg CO2 eq  | 0,0382                                       |   |   |
| 8                             | Electricity, high voltage {CN-JS}  electricity production, hard coal   Cut-off, U                                | kg CO2 eq  | 0,0382                                       |   |   |
| 9                             | Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, U      | kg CO2 eq  | 0,0359                                       |   |   |
| 10                            | Electricity, high voltage {RFC}  electricity production, hard coal   Cut-off, U                                  | kg CO2 eq  | 0,0333                                       |   |   |
| 11                            | Diesel, burned in building machine {GLO}  processing   Cut-off, U  | kg CO2 eq  | 0,0307                                       |   |   |
| 12                            | Heat, district or industrial, natural gas {RoW}  heat and power co-generation, natural gas, conventional p       | kg CO2 eq  | 0,0302                                       |   |   |
| 13                            | Electricity, high voltage {JP}  electricity production, hard coal   Cut-off, U                                   | kg CO2 eq  | 0,0294                                       |   |   |
| 14                            | Electricity, high voltage {SERC}  electricity production, hard coal   Cut-off, U                                 | kg CO2 eq  | 0,0292                                       |   |   |
| 15                            | Electricity, high voltage {CN-SX}  electricity production, hard coal   Cut-off, U                                | kg CO2 eq  | 0,0291                                       |   |   |
| 16                            | Heat, district or industrial, other than natural gas {Europe without Switzerland}  heat production, at hard c    | kg CO2 eq  | 0,0289                                       |   |   |
| 17                            | Electricity, high voltage {CN-HE}  electricity production, hard coal   Cut-off, U                                | kg CO2 eq  | 0,0284                                       |   |   |
| 18                            | Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW}  heat production, light fuel oil, at industrial furna | kg CO2 eq  | 0,0281                                       |   |   |
| 19                            | Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, oil   Cut-off, U  | kg CO2 eq  | 0,0271                                       |   |   |
| 20                            | Electricity, high voltage {ZA}  electricity production, hard coal, conventional   Cut-off, U                     | kg CO2 eq  | 0,027  |   |   |
| 21                            | Electricity, high voltage {CN-HB}  electricity production, hard coal   Cut-off, U                                | kg CO2 eq  | 0,0247                                       |   |   |
| 22                            | Electricity, high voltage {KR}  electricity production, hard coal   Cut-off, U                                   | kg CO2 eq  | 0,0235                                       |   |   |
| 23                            | Electricity, high voltage {DE}  electricity production, lignite   Cut-off, U                                     | kg CO2 eq  | 0,0226                                       |   |   |
| 24                            | Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, hard coal   Cut-off, U                                  | kg CO2 eq  | 0,0211                                       |   |   |
| 25                            | Electricity, high voltage {CN-ZJ}  electricity production, hard coal   Cut-off, U                                | kg CO2 eq  | 0,0207                                       |   |   |
| 26                            | Electricity, high voltage {CN-XJ}  electricity production, hard coal   Cut-off, U                                | kg CO2 eq  | 0,0192                                       |   |   |
| 27                            | Electricity, high voltage {MRO, US only}  electricity production, lignite   Cut-off, U                           | kg CO2 eq  | 0,0191                                       |   |   |
| 28                            | Electricity, high voltage {IN-CT}  electricity production, hard coal   Cut-off, U                                | kg CO2 eq  | 0,019  |   |   |
| 29                            | Electricity, high voltage {IN-UP}  electricity production, hard coal   Cut-off, U                                | kg CO2 eq  | 0,0188                                       |   |   |
| 30                            | Electricity, high voltage {IN-MH}  electricity production, hard coal   Cut-off, U                                | kg CO2 eq  | 0,0186                                       |   |   |
| 31                            | Electricity, high voltage, for internal use in coal mining {CN}  electricity production, hard coal, at coal min  | kg CO2 eq  | 0,0182                                       |   |   |
| 32                            | Electricity, high voltage {CN-AH}  electricity production, hard coal   Cut-off, U                                | kg CO2 eq  | 0,0179                                       |   |   |
| 33                            | Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW}  heat production, heavy fuel oil, at industrial furn. | kg CO2 eq  | 0,0178                                       |   |   |

Analyzing 1 kg 'Potassium hydroxide {GLO}| market for | Cut-off, U';Method: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.05 / World (2010) H / Characterization

Figur 10.3: Største bidrag til CO<sub>2</sub>-utslipp i kaliumhydroksid i SimaPro.

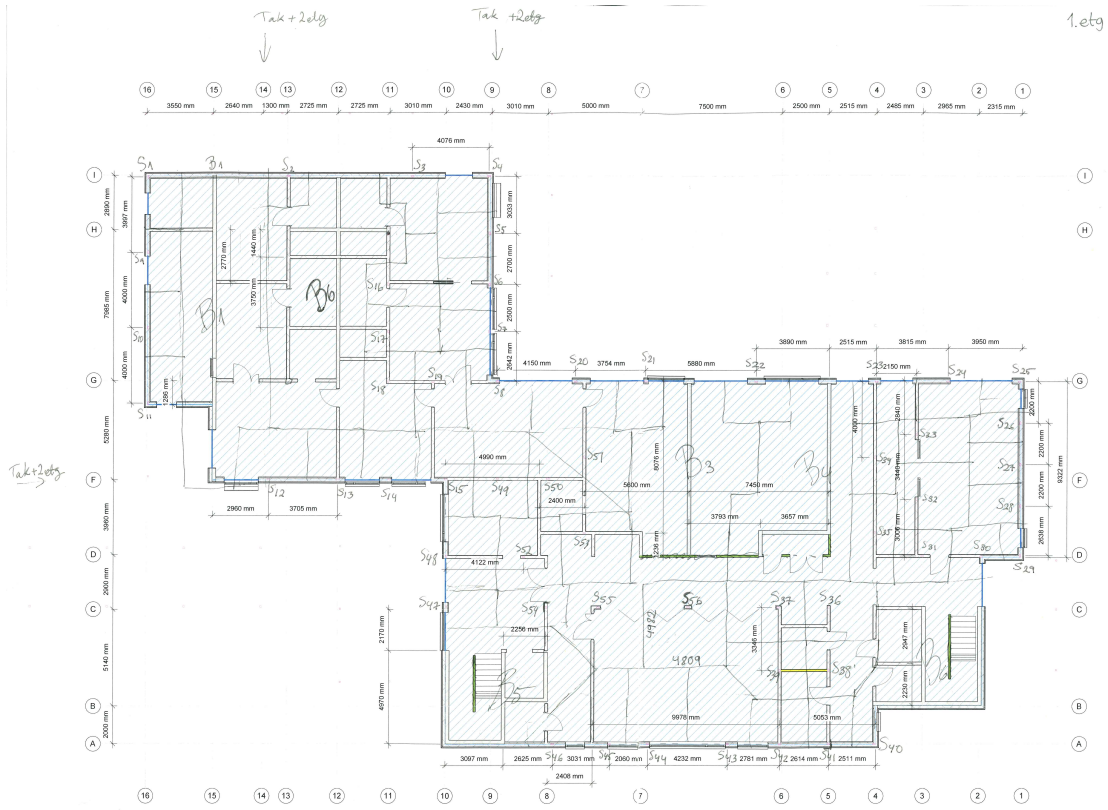
## D Bæresystem, lastarealer og laster i Sæbø skule



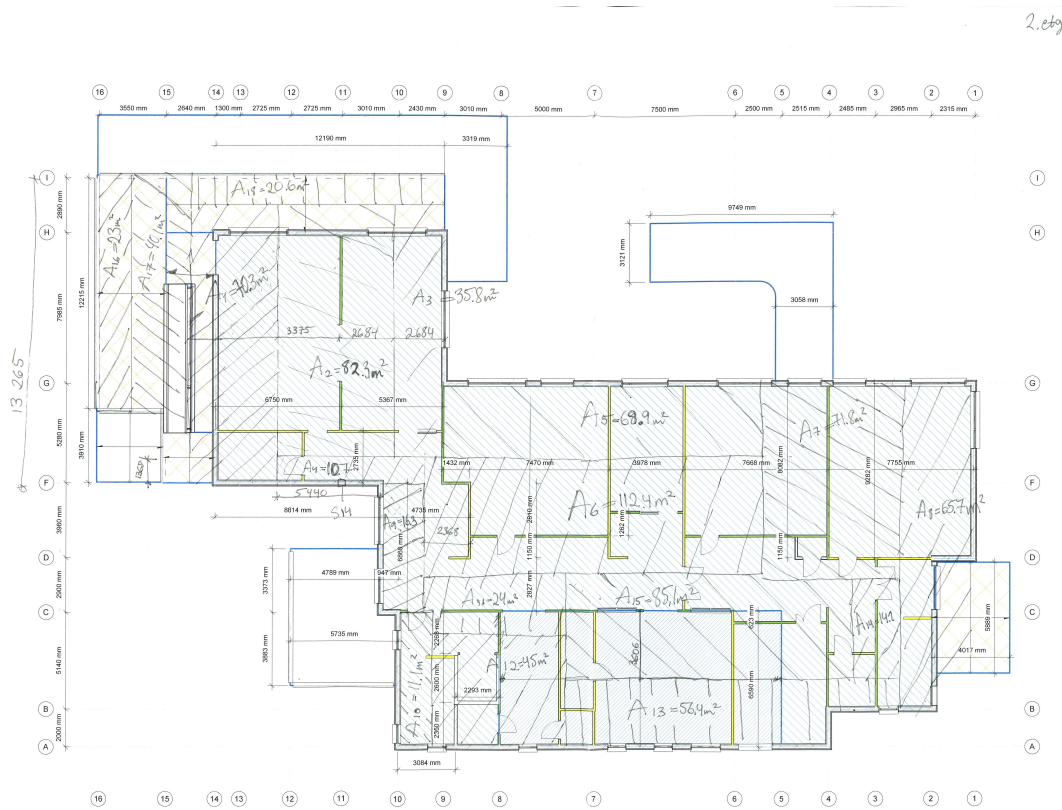
Figur 10.4: Nytt bæresystem i første etasje.



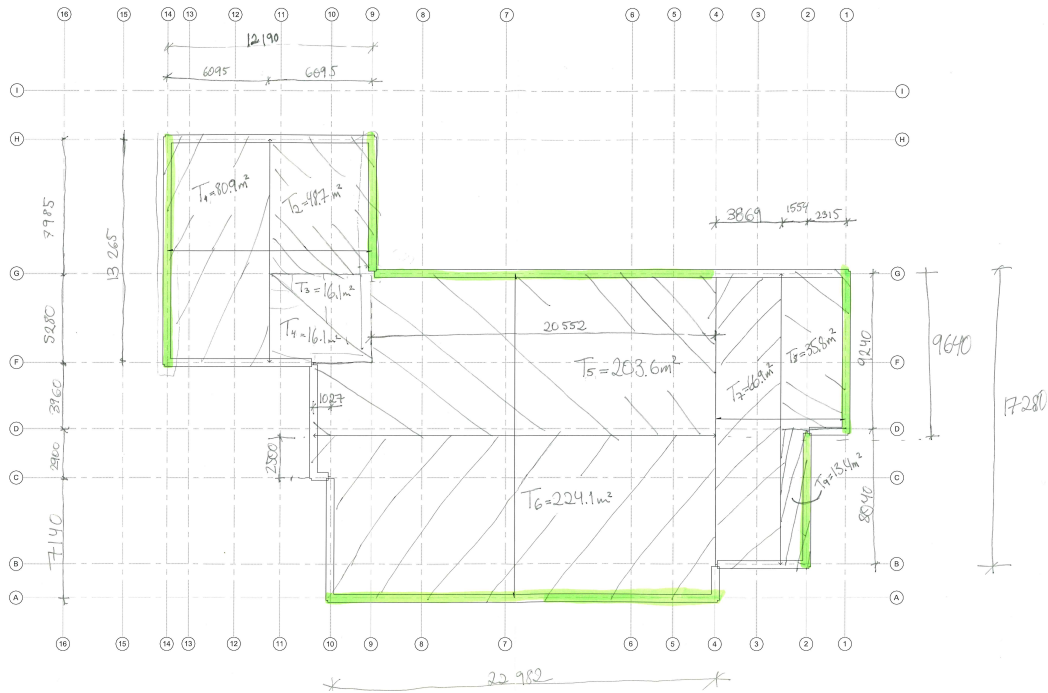
Figur 10.5: Nytt bæresystem i andre etasje.



Figur 10.6: Lastarealer i omprosjektert første etasje.



Figur 10.7: Lastarealer i omprosjektert andre etasje.



Figur 10.8: Lastarealer på taket.

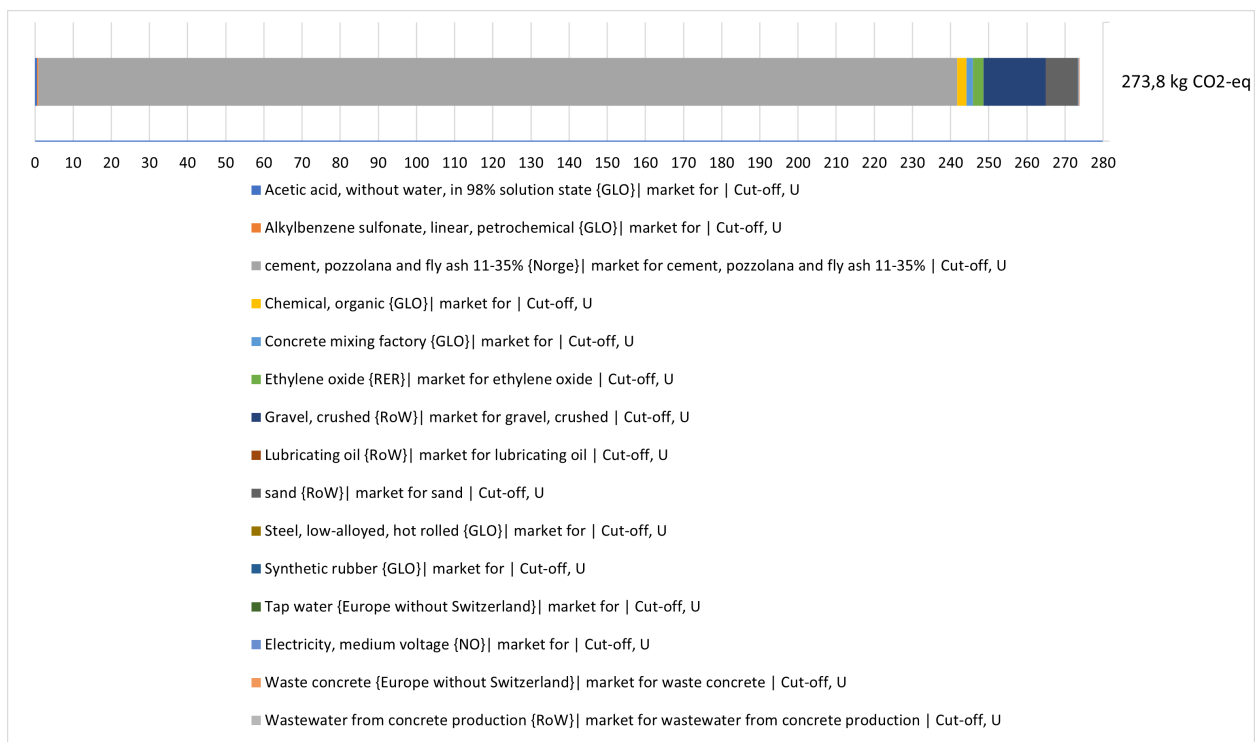
| Navn                        | Areal (m <sup>2</sup> ) | Bærevegg (m) | Areal/vegg (m) | g dekke (kN/m <sup>2</sup> ) | g vegger (kN/m) | p (kN/m <sup>2</sup> ) | q (kN/m <sup>2</sup> ) | Last på bærevegg (kN/m) | Punktlast (kN) | Last går til... | Last kommer fra...                         |
|-----------------------------|-------------------------|--------------|----------------|------------------------------|-----------------|------------------------|------------------------|-------------------------|----------------|-----------------|--|
| TAK                         |                         |              |                |                              |                 |                        |                        |                         |                |                 |  |
| T1                          | 80,9                    | 13,3         | 6,1            | 0,9                          | 0,0             | 3,6                    | 6,5                    | 39,5                    |                | A1              |  |
| T2                          | 48,7                    | 8,0          | 6,1            | 0,9                          | 0,0             | 3,6                    | 6,5                    | 39,5                    |                | A3              |  |
| T3                          | 16,1                    | 1,0          | 16,1           | 0,9                          | 0,0             | 3,6                    | 6,5                    | 0,0                     | 126,0          | S8              |  |
| T4                          | 16,1                    | 1,0          | 16,1           | 0,9                          | 0,0             | 3,6                    | 6,5                    | 0,0                     | 126,0          | S14             |  |
| T5                          | 203,6                   | 20,6         | 9,9            | 0,9                          | 0,0             | 3,6                    | 6,5                    | 64,2                    |                | A5              |  |
| T6                          | 224,1                   | 23,0         | 9,8            | 0,9                          | 0,0             | 3,6                    | 6,5                    | 63,2                    |                | A12/13          |  |
| T7                          | 66,9                    | 17,3         | 3,9            | 0,9                          | 0,0             | 3,6                    | 6,5                    | 25,1                    |                | 0,7A7/A14       |  |
| T8                          | 35,7                    | 9,2          | 3,9            | 0,9                          | 0,0             | 3,6                    | 6,5                    | 25,1                    |                | A8              |  |
| T9                          | 12,5                    | 8,0          | 1,6            | 0,9                          | 0,0             | 3,6                    | 6,5                    | 10,1                    |                | A8              |  |
| A1                          | 70,3                    | 17,1         | 4,1            | 6,8                          | 2,2             | 4,0                    | 14,1                   | 100,0                   |                | 0,3B1/B2        | T1   |
| A2                          | 82,3                    | 18,2         | 4,5            | 6,6                          | 1,9             | 4,0                    | 13,9                   | 64,7                    |                | 0,25B2/S        |  |
| A3                          | 35,8                    | 16,1         | 2,2            | 6,8                          | 2,2             | 4,0                    | 14,1                   | 73,5                    |                |                 | T2   |
| A4                          | 10,7                    | 6,2          | 1,7            | 6,3                          | 2,2             | 4,0                    | 13,5                   | 25,8                    |                |                 |  |
| A5                          | 68,9                    | 17,2         | 4,0            | 6,3                          | 2,2             | 4,0                    | 13,5                   | 120,8                   |                | 0,25(B3+B4)     | T5   |
| A6                          | 112,4                   | 18,0         | 6,2            | 6,3                          | 1,5             | 4,0                    | 13,5                   | 86,1                    |                | 0,25(B3+B4)     |  |
| A7                          | 71,8                    | 19,5         | 3,7            | 6,3                          | 1,9             | 4,0                    | 13,5                   | 69,5                    |                | 0,25B3          | 0,7T7                                      |
| A8                          | 65,7                    | 23,2         | 2,8            | 6,7                          | 2,2             | 4,0                    | 14,0                   | 77,3                    |                | 0,4B6           | T8+T9                                      |
| A9                          | 16,3                    | 7,9          | 2,1            | 6,3                          | 2,2             | 4,0                    | 13,5                   | 30,7                    |                |                 |  |
| A10                         | 11,1                    | 8,6          | 1,3            | 6,3                          | 2,2             | 4,0                    | 13,5                   | 20,0                    |                | 0,8B5           |  |
| A11                         | 24,0                    | 9,2          | 2,6            | 6,5                          | 1,9             | 4,0                    | 13,8                   | 38,4                    |                |                 |  |
| A12                         | 45,0                    | 9,9          | 4,6            | 6,9                          | 19,0            | 4,0                    | 14,3                   | 119,5                   |                | 0,6B5           | 0,5T6                                      |
| A13                         | 56,4                    | 21,7         | 2,6            | 7,5                          | 2,2             | 4,0                    | 15,0                   | 73,3                    |                | 0,2B6           | 0,5T6                                      |
| A14                         | 14,2                    | 5,6          | 2,5            | 6,3                          | 1,5             | 4,0                    | 13,5                   | 43,6                    |                | B6              | 0,3T7                                      |
| A15                         | 85,1                    | 17,4         | 4,9            | 7,0                          | 1,5             | 4,0                    | 14,4                   | 72,0                    |                |                 |  |
| A16                         | 23,0                    | 14,0         | 1,6            | 0,9                          | 0,0             | 3,6                    | 6,5                    | 10,7                    |                |                 |  |
| A17                         | 40,1                    | 18,5         | 2,2            | 0,9                          | 0,0             | 3,6                    | 6,5                    | 14,0                    |                | B1              |  |
| A18                         | 20,6                    | 15,0         | 1,4            | 0,9                          | 0,0             | 3,6                    | 6,5                    | 8,9                     |                |                 |  |
| 1. etg - betongvegger       |                         |              |                |                              |                 |                        |                        |                         |                |                 |  |
| B1                          |                         | 16,2         |                | 0,0                          | 17,5            | 0,0                    |                        | 65,1                    |                |                 | A17+0,3A1+1,2g                             |
| B2                          |                         | 16,4         |                | 0,0                          | 17,5            | 0,0                    |                        | 107,3                   |                |                 | 0,7A1+0,25A2+1,2g                          |
| B3                          |                         | 9,3          |                | 0,0                          | 17,5            | 0,0                    |                        | 72,8                    |                |                 | 0,25A5+0,25A6+1,2g                         |
| B4                          |                         |              |                | 0,0                          | 17,5            | 0,0                    |                        | 90,1                    |                |                 | 0,25A5+0,25A6+0,25A7+1,2g                  |
| B5                          |                         |              |                | 0,0                          | 17,5            | 0,0                    |                        | 108,7                   |                |                 | 0,8A10+0,6A12+1,2g                         |
| B6                          |                         |              |                | 0,0                          | 17,5            | 0,0                    |                        | 110,2                   |                |                 | 0,4A8+A14+0,2A13+1,2g                      |
| Utvalgte søyler (totalt 56) |                         |              |                |                              |                 |                        |                        |                         |                |                 |  |
| S8                          | 14,8                    |              |                |                              |                 |                        |                        |                         | 520,4          |                 | q <sub>A3</sub> *14,8+T2*1,321+T5*2,075+T3 |
| S12                         | 8,0                     |              |                |                              |                 |                        |                        |                         | 208,3          |                 | q <sub>A1</sub> *8,0+T1*2,408              |
| S20                         | 7,9                     |              |                |                              |                 |                        |                        |                         | 360,4          |                 | q <sub>A5</sub> *7,9+T5*3,952              |
| S27                         | 6,1                     |              |                |                              |                 |                        |                        |                         | 139,9          |                 | q <sub>A8</sub> *6,1+T8*2,2                |
| S44                         | 11,2                    |              |                |                              |                 |                        |                        |                         | 367,3          |                 | q <sub>A13</sub> *11,2+T6*3,146            |

Figur 10.9: Beregnede laster i Excel.

## E Betongprosess lagd i SimaPro, med utslipp

| Products  | Amount   | Unit | Comment  |
|---|----------|------|--|
| Betong, 35MPa Unicon Ørsta  | 1        | m3   | Denne prosessen er kopiert og så endret fra prosessen kalt "concrete production 35MPa CA-QC". Verdier i "amount" og geografisk innhold er endret til å ligne mest mulig på EPD-en for B35 fra Unicon i Ørsta. -Simon |
| <b>Inputs from technosphere: materials/fuels</b>  |          |      |  |
| Acetic acid, without water, in 98% solution state {GLO}  market for   Cut-off, U  | 0,35     | kg   | (1,1,5,1,1,na)<br>See parameters   |
| Alkylbenzene sulfonate, linear, petrochemical {GLO}  market for   Cut-off, U  | 0,18     | kg   | (3,2,5,1,1,na)<br>Air-entrainers. Estimated value for Quebec by Association Béton Québec Technical Committee- (Nov 2013)   |
| cement, pozzolana and fly ash 11-35% {Norge}  market for cement, pozzolana and fly ash 11-35%   Cut-off, U                                | 344      | kg   | (1,1,5,1,1,na)<br>Including waste concrete. See Exchange Properties  |
| Chemical, organic {GLO}  market for   Cut-off, U  | 1,15     | kg   | (3,2,5,1,1,na)<br>Water reducing admixture (usually based on lignosulphonate). Estimated value for Quebec concrete by Association Béton Québec Technical Committee- (Nov 2013)                                       |
| Concrete mixing factory {GLO}  market for   Cut-off, U  | 4,57E-07 | p    | (2,1,5,5,1,na)<br>Literature value. From ecoinvent dataset 'concrete production, normal'   |
| Ethylene oxide {RER}  market for ethylene oxide   Cut-off, U  | 1,4      | kg   | (1,1,5,1,1,na)<br>See parameters.  |
| Gravel, crushed {RoW}  market for gravel, crushed   Cut-off, U  | 1092,6   | kg   | (1,1,5,1,1,na)<br>Including waste concrete. See Exchange Properties  |
| Lubricating oil {RoW}  market for lubricating oil   Cut-off, U  | 0,0119   | kg   | (2,1,5,5,1,na)<br>Literature value. From ecoinvent dataset 'concrete production, normal'   |
| sand {RoW}  market for sand   Cut-off, U  | 728,4    | kg   | (1,1,5,1,1,na)<br>Including waste concrete. See Exchange Properties  |
| Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}  market for   Cut-off, U   | 0,0238   | kg   | (2,1,5,5,1,na)<br>Literature value. From ecoinvent dataset 'concrete production, normal'   |
| Synthetic rubber {GLO}  market for   Cut-off, U   | 0,00713  | kg   | (2,1,5,5,1,na)<br>Literature value. From ecoinvent dataset 'concrete production, normal'   |
| Tap water {Europe without Switzerland}  market for   Cut-off, U   | 164      | kg   | (1,1,5,1,1,na)<br>Water use in ready-mix plant, assumed to be sourced from municipal water system. See Exchange properties comment for Sources.  |
| <b>Inputs from technosphere: electricity/heat</b>   |          |      |  |
| Electricity, medium voltage {NO}  market for   Cut-off, U   | 11,4     | kWh  | Simon: Gjort all energibruk elektrisk, basert på informasjon fra Norsk Spennbetong. Antar norske blandeverk kun bruker strøm. (4,1,5,3,1,na) Literature value. Energy use in ready-mix plant.                        |
| Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland}  market for heat, district or industrial, natural gas   Cut-off, U | 0        | MJ   | (1,1,5,1,1,na)<br>See parameters. Energy use in ready-mix plant. Includes air emissions from natural gas combustion.   |
| Diesel, burned in building machine {GLO}  market for   Cut-off, U   | 0        | MJ   | (1,1,5,1,1,na)<br>See parameters. Energy use in ready-mix plant. Includes air emissions from diesel combustion.  |
| <b>Emissions to air</b>   |          |      |  |
| Water/m3  | 0,00614  | m3   | (1,1,5,1,1,na) Calculated value. See exchange propeties.   |
| <b>Emissions to water</b>   |          |      |  |

|   |             |   |
|---|-------------|---|
| Chlorides, unspecified  | 3,09E-09 kg | (2,1,5,3,1,na)<br>Literature value. Table E1a.  |
| Copper  | 1,55E-08 kg | (2,1,5,3,1,na)<br>Literature value. Table E1a.  |
| Iron  | 1,55E-08 kg | (2,1,5,3,1,na)<br>Literature value. Table E1a.  |
| Oils, unspecified   | 2,32E-07 kg | (2,1,5,3,1,na)<br>Literature value. Table E1a.  |
| Suspended solids, unspecified   | 4,64E-07 kg | (2,1,5,3,1,na)<br>Literature value. Table E1a.  |
| Emissions to soil   |             |   |
| Final waste flows   |             |   |
| Non material emissions  |             |   |
| Social issues   |             |   |
| Economic issues   |             |   |
| <b>Outputs to technosphere: waste to treatment</b>  |             |   |
| Waste concrete {Europe without Switzerland}   market for waste concrete   Cut-off, U                    | 24,5 kg     | (2,1,5,3,1,na) Literature value. Solid waste consists of concrete and small amounts of paste (cement and water after aggregate has been reclaimed) Production Volume Amount: 27636000 |
| Wastewater from concrete production {RoW}   market for wastewater from concrete production   Cut-off, U | 0,0348 m3   | (2,1,5,3,1,na) Literature value. Table E1a. Production Volume Amount: 39254.3984375   |

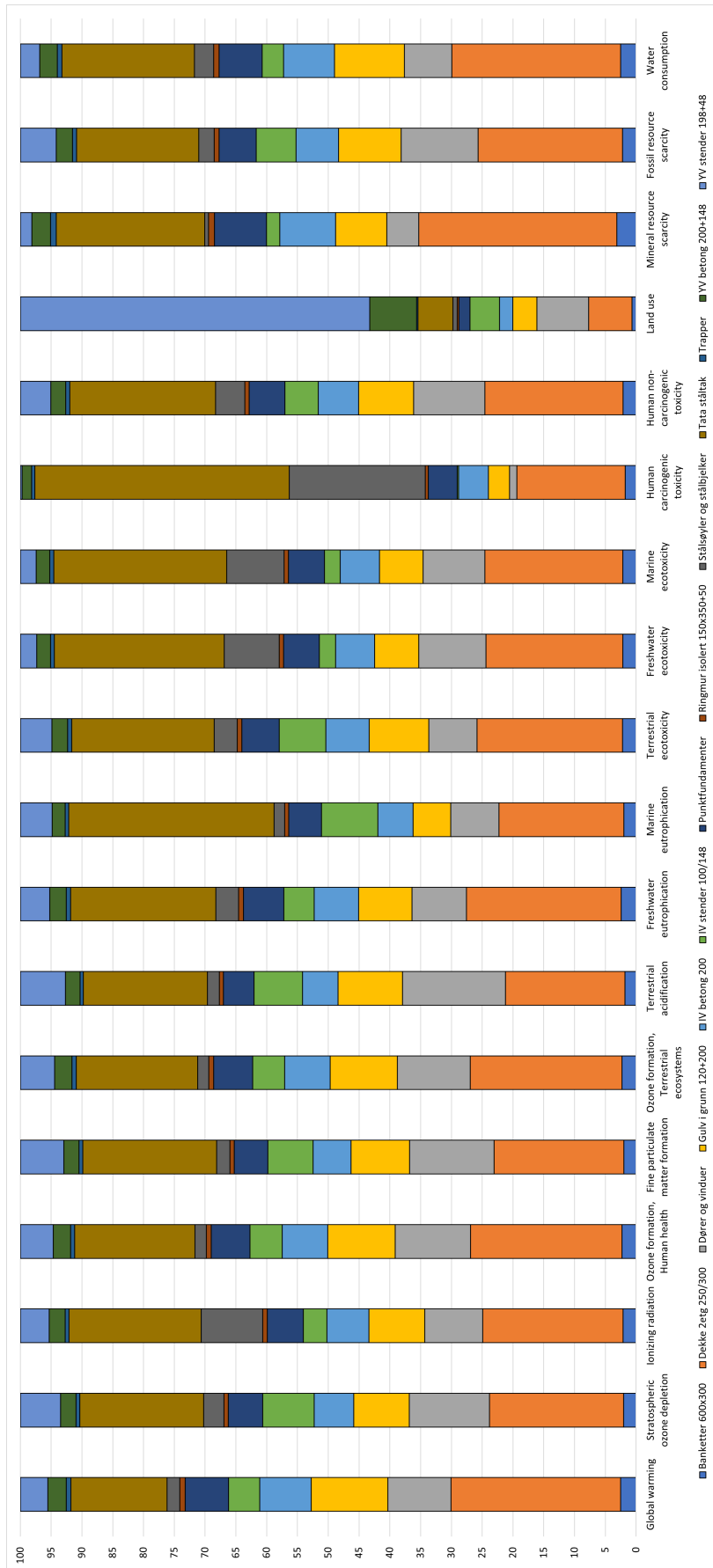


Figur 10.10: Bidrag til kg CO<sub>2</sub>-eq fra 1 m<sup>3</sup> B35 fra Unicon lagd i SimaPro.

## F Sæbø skule i vanlig betong

Tabell 10.1: Oppbygning av Sæbø skule med betong i SimaPro.

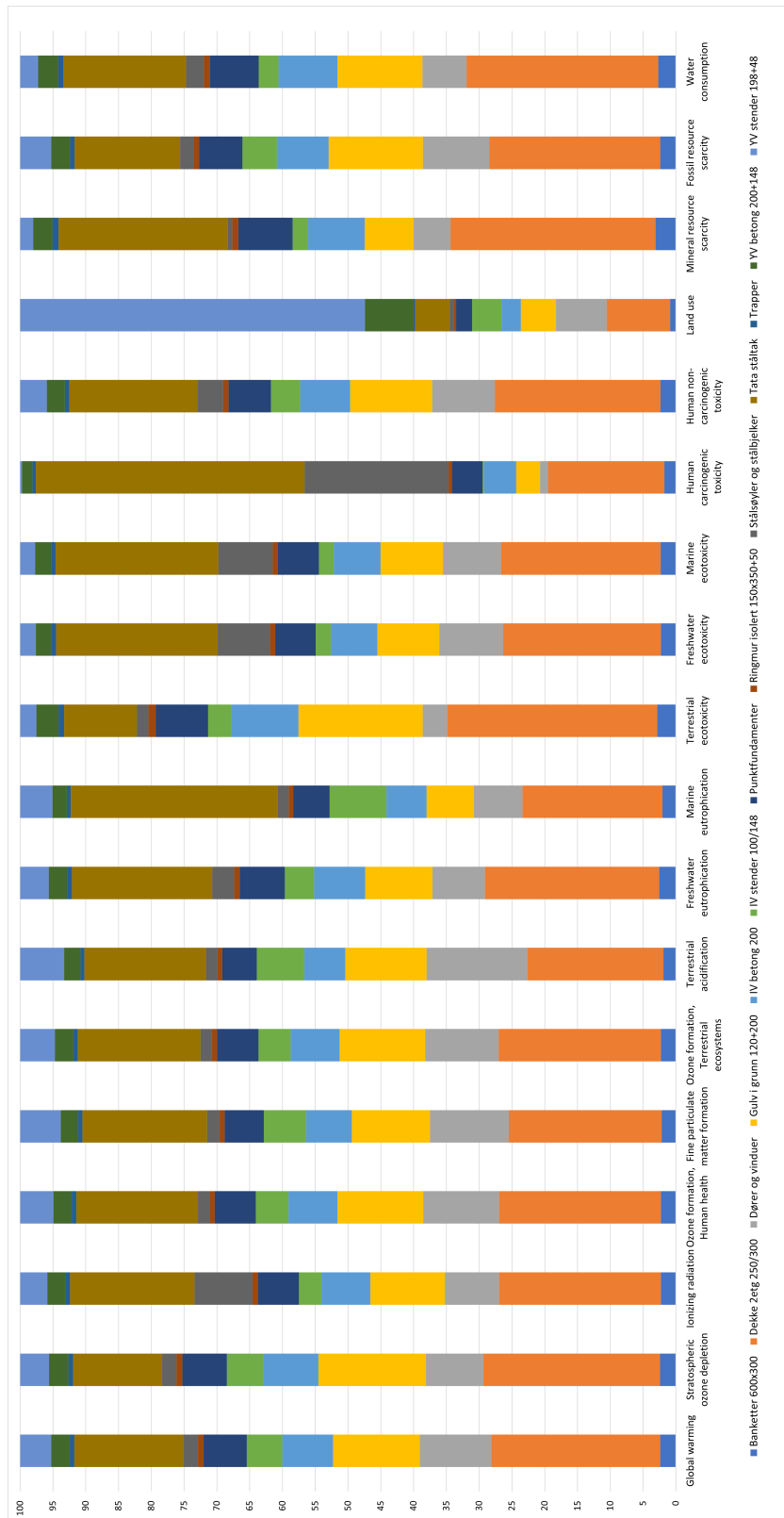
| <b>Input: prosessnavn i SimaPro</b> | <b>Mengde</b> | <b>Enhet</b>   |
|-------------------------------------|---------------|----------------|
| Banketter 600x300                   | 15,8          | m <sup>3</sup> |
| Dekke 2etg 250/300                  | 183,8         | m <sup>3</sup> |
| Dører og vinduer                    | 1 146         | m <sup>2</sup> |
| Gulv i grunn 120+200                | 262           | m <sup>3</sup> |
| IV betong 200                       | 60,3          | m <sup>3</sup> |
| IV stender 100/148                  | 177,1         | m <sup>3</sup> |
| Punktfundamenter                    | 45,1          | m <sup>3</sup> |
| Ringmur isolert 150x350+50          | 6,4           | m <sup>3</sup> |
| Stålsøyler og stålbjelker           | 10 700        | kg             |
| Tata ståltak                        | 1 185         | m <sup>2</sup> |
| Trapper                             | 4,7           | m <sup>3</sup> |
| YV betong 200+148                   | 40,1          | m <sup>3</sup> |
| YV stender 198+48                   | 249,9         | m <sup>3</sup> |



Figur 10.11: Hele livsløpseffektvurderingen for Sæbø skule i betong.



## G Sæbø skule i geopolimerbetong

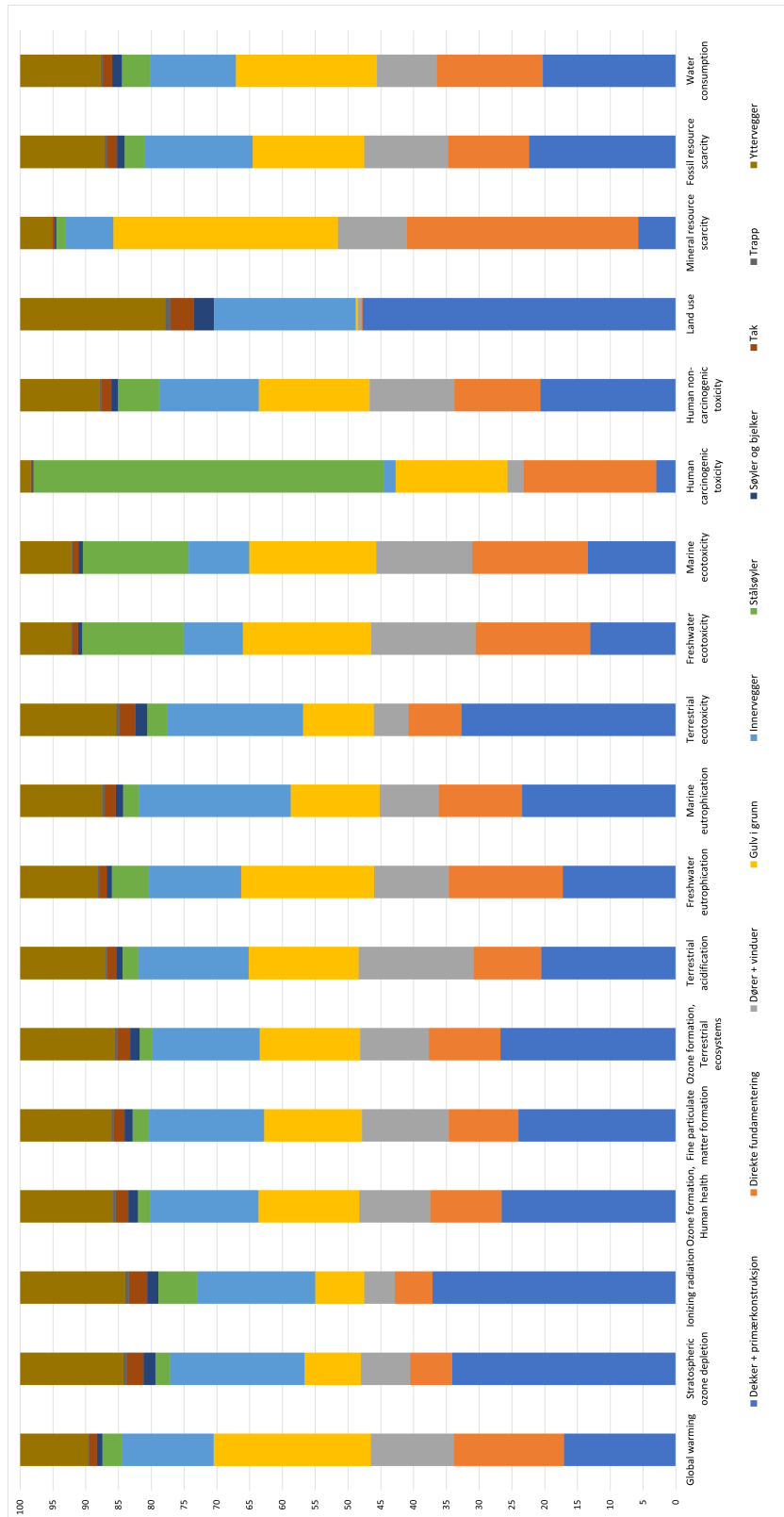


Figur 10.12: Hele livsløpseffektvurderingen for Sæbø skule i geopolimerbetong.

## H Sæbø skule i massivtre

Tabell 10.2: Materialliste for Sæbø skule i massivtre.

| Komponent         | Materiale | Mengde | Masse  | km   | tkm   |
|-------------------|-----------|--------|--------|------|-------|
| Direkte fundament | Betong    | 79,9   | 192    | 25,9 | 4967  |
|                   | Armering  | 12468  |        | 562  | 7007  |
| Gulv på grunn     | Betong    | 135,6  | 325    | 25,9 | 8426  |
|                   | Amering   | 10050  |        | 562  | 5648  |
| Stålsøyler        | Stål      | 12625  |        | 562  | 7095  |
| Søyler og bjelker | Limtre    | 5,05   | 2146   | 393  | 843   |
|                   | CLT       | 12,24  | 5753   | 658  | 3785  |
| Innervegger       | CLT       | 117,8  | 55366  | 658  | 36431 |
|                   | Isolasjon | 149,9  | 4347   | 366  | 1591  |
|                   | Bartre    | 8      | 3360   | 433  | 1455  |
|                   | Gipsplate | 41,7   | 37530  | 633  | 23756 |
| Yttervegger       | CLT       | 90,5   | 42535  | 658  | 27988 |
|                   | Isolasjon | 172,9  | 5013   | 366  | 1835  |
|                   | Bartre    | 8      | 3360   | 433  | 1455  |
|                   | Gipsplate | 4,5    | 4018   | 633  | 2543  |
| Dekker            | CLT       | 280,6  | 131882 | 658  | 86778 |
|                   | Isolasjon | 208    | 6025   | 366  | 2205  |
|                   | Bartre    | 0,391  | 164    | 433  | 71    |
| Tak               | CLT       | 21,3   | 10011  | 658  | 6587  |
|                   | Isolasjon | 8,5    | 247    | 366  | 90    |
| Trapper           | CLT       | 4,65   | 2186   | 658  | 1438  |



Figur 10.13: Hele livsløpseffektvurderingen for Sæbø skule i massivtre.

## **I Fremdriftsplan**

Fremdriftsplanen fra Microsoft Project ligger i vedleggs-zipfilen under navnet

Fremdriftsplan\_Simon-Brekke\_BYG508.mpp

## **J Referat fra møter og veiledningstimer**

Møtereferater er vedlagt i zip-filen.

## **K Excel-filer**

Det er vedlagt to Excel-filer i zip-filen: en for geopolymerbetongen, og en for Sæbø skule. Disse inneholder materialmengder, grafer, beregninger, o.l.

## **L A3 poster**

Posteren til prosjektet finnes på neste side og er også vedlagt i zip-filen.



**Introduksjon**

Betong lagd med vanlig portlandsement står for opptil 8% av verdens klimagassutslipp. For å nå 1,5-gradersmålet til FN's klimapanel er det nødvendig med løsninger som reduserer utslipp, blant annet i betongindustrien. En annen miljøutfordring er deponering av avgangsmasser fra gruvedrift. Ved ilmenittgruven til Titania i Sokndal ligger millioner av tonn med noritt bak en 100 meter høy dam. Noritt er et verdiløst mineral, og deponiet utgjør derfor en sikkerhets- og miljørisiko som øker for hver dag.



Figur 1: Titanias dagbrudd, deponi og dam.

Et mulig alternativ til portlandsement er geopolymertsement. Dette består av et silisium- og aluminiumholdig stoff, og en kjemisk alkalisk aktivator, ofte natrium- eller kaliumhydroksid (NaOH og KOH). Når disse blandes, får man en sementlim. Denne kan blandes med tilslag og vann, og man får da en geopolymertbetong. Det finnes mange ulike geopolymertbetonger, men de fleste bruker biprodukter fra industri, som flyveaske, slagg og silikastøv. Det er også forsøkt å bruke diverse avgangsmasser fra gruvedrift.

**Forskerspørsmål**

Hvilke miljøpåvirkninger har geopolymertbetong lagd med avgangsmasser fra ilmenittgruvedrift?

**Case**

Selskapet Saferock i Stavanger har utviklet en geopolymertsement som bruker avgangsmasser fra Titania sammen med kaliumhydroksid. Det skal utføres en livsløpsvurdering (LCA) på betongen for å kvantifisere miljøutslippene. Det skal også utføres en LCA på en massivtre-skole i Ørsta, kalt Sæbø skule. Denne skal omprosjekteres til betong og geopolymertbetong, for så å analyseres og sammenlignes med hverandre.

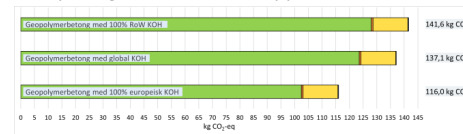
**Metode**

For å samle inn data til LCA-studiene, ble det opprettet kontakt med Saferock, Norconsult og produsenter av materialer og produkter. Sæbø skule ble modellert i betong og stål i Revit ved hjelp av overslagsberegninger. Materialtyper, mengder og transportavstander ble ført inn i Excel, og så inn i programmet SimaPro. Her ble det laget prosesser for de ulike systemene, som geopolymertbetongen, Sæbø skule i de tre materialene, og variasjoner av disse. SimaPro analyserer systemene og viser miljøpåvirkninger i opptil 18 effektkategorier.

**Resultat og diskusjon**

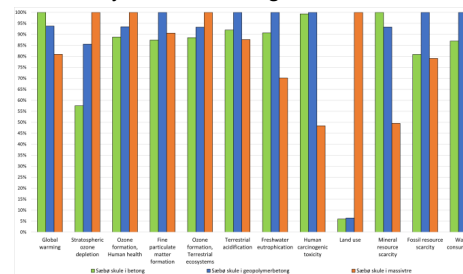
Analysen av Saferock sin geopolymertbetong viste at aktivatoren (KOH og vann) står for mesteparten av miljøpåvirkningene i alle effektkategoriene. 1 m<sup>3</sup> med geopolymertbetong har et utslipp på 137,1 kg CO<sub>2</sub>-eq. Dette er halvparten så mye som en tilsvarende vanlig betong som ble

analysert. På grunn av usikkerhet rundt aktivatorens opphav ble det analysert tre varianter av geopolymertbetongen: en med KOH fra resten av verden, en fra et globalt gjennomsnitt, og en fra Europa. Fig. 2 viser CO<sub>2</sub>-utslippene fra disse tre.



Figur 2: CO<sub>2</sub>-utslipp fra geopolymertbetong med ulike KOH.

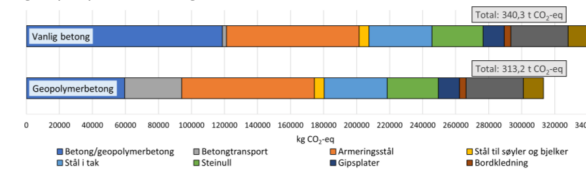
Geopolymertbetong med global KOH ble brukt videre i oppgaven. Analysen av Sæbø skule i betong, geopolymertbetong og massivtre er vist i Fig. 3. Betongskolen har høyest CO<sub>2</sub>-utslipp, mens geopolymertbetongskolen har en reduksjon på 6,2%, og massivtreskolen har en reduksjon på 19,1%. I kategorien «Land use» er massivtreskolen klart størst; utover dette er det for det meste jevnt i effektkategoriene.



Figur 3: Sammenligning av de tre skoleversjonene.

På grunn av den store avstanden fra Titania til Ørsta, er transporten av geopolymertsementen en vesentlig utslippskilde. Dette er med på å motvirke deler av besparelsen fra å gå fra betong til geopolymertbetong. Andre utslippskilder,

som armeringsstål, ståltak og -søyler, isolasjon og vinduer, er også betydelige. Derfor ble den totale reduksjonen mellom de to skolene bare 6,2%. I Fig. 4 er CO<sub>2</sub>-utslippene fra betong- og geopolymertbetongskolene vist.



Figur 4: Utslipp fra betong- og geopolymertbetongskole.

Det ble utført en scenarionalyse hvor armeringsstålet ble endret til å være produsert utenfor Europa. Dette økte de totale utslippene til betongskolene med 18%. Det viser at resultatene er følsomme, og at skolens totalutslipp er avhengige av mer enn bare betongtypen.

**Konklusjon**

LCA-studien på geopolymertbetongen til Saferock viser en halvering av CO<sub>2</sub>-utslipp sammenlignet med en vanlig betong. Det er stor usikkerhet rundt datagrunnlaget til KOH-en, og det anbefales å gjøre en ny studie når Saferock får mer informasjon fra en produsent. For å ytterligere redusere utslippene må KOH-en produseres med fornybare energikilder. LCA-studien på de tre versjonene av Sæbø skule viser at geopolymertbetong reduserer CO<sub>2</sub>-utslippene sammenlignet med vanlig betong, men at massivtre har enda lavere utslipp. Studien viser også at det er betydelige utslipp fra andre bygningskomponenter, og spesielt stål. Det bør gjøres tiltak overalt dersom en skal oppnå en betydelig totalreduksjon.