



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2016 30 stp
Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Fakultet for miljøvitenskap og teknologi
Institutt for matematiske realfag og teknologi

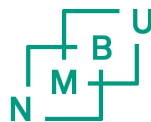
Livsløpsvurdering av en representativ batteriladestasjon utenfor strømmettet i Malawi.

Life Cycle Assessment of a representative Battery
Charging Station outside mains in Malawi.

Håkon Osland Sandvik
Industriell økonomi

Livsløpsvurdering av en representativ batteriladestasjon utenfor strømmettet i Malawi

av
Håkon Osland Sandvik



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet



Mastergradsarbeide i Industriell økonomi
Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Institutt for matematiske realfag og teknologi
Våren 2016

FORORD

Denne mastergradsoppgaven er skrevet ved institutt for matematiske realfag og teknologi (IMT) på Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Mastergradsoppgaven er det siste obligatoriske emnet i masterprogrammet "Industriell Økonomi", og markerer med det slutten på studietiden.

Motivasjonen bak valg av tematikk for oppgaven har jeg fra et ønske om å få bidra til å løse de store utfordringene verden står overfor i dag. Jeg har tro på at teknologi innen fornybar energi har stort potensiale til å være med på å løse utfordringer knyttet til fattigdom, miljø og klima, dersom den implementeres på riktig måte. Livsløpsvurdering (LCA) er i mine øyne et godt egnet verktøy til å belyse systemers påvirkning på mennesker og miljø, og gir et godt grunnlag for å foreta bedre valg.

I forbindelse med arbeidet med denne oppgaven er det mange som fortjener en takk.

Jeg ønsker å rette takk til min hovedveileder Førsteamanuensis ved IMT, Jan Kåre Bøe, for hjelp til strukturering av oppgaven, kreative innspill og god humor.

Takk også til min biveileder Professor II ved INA, Ole Jørgen Hanssen, for mange gode faglige innspill. Jeg ønsker også å takke min mentor fra Ingeniører Uten Grenser, Anne Zimmer Jacobsen for utallige "mentor moments" under oppholdet Malawi. Du var til stor hjelp! En annen som fortjener takk er førsteamanuensis ved IMT, John Morken, for at du betingelsesløst har tatt deg tid til å svare på mine henvendelser. Takk også til kontaktpersoner i Ingeniører Uten Grenser, det Norske Fredskorpset og Kumudzi Kuwale. Til slutt vil jeg takke venner og familie for all støtten gjennom studieløpet. Jeg elsker dere!

Oslo, Mai 2016

Håkon Osland Sandvik

SAMMENDRAG

Befolkningen i Nkhotakota i Malawi er avskåret fra strømmettet og benytter i utgangspunktet primærbatterier koblet til LED-lamper for belysning. Solcelledrevne batteriladestasjoner er bygget for å tilby elektrisitet på en måte som er bærekraftig med tanke på miljø og økonomi. Hovedmålsettingen med denne oppgaven er å undersøke om batteriladestasjoner er en miljøvennlig løsning for produksjon og distribusjon av elektrisitet på landsbygda i Malawi. Oppgaven ble innledet med feltarbeid, der målet var å få innsikt i den lokale settingen, definere systemgrenser og samle inn data til livsløpsvurderingen.

Et litteraturstudie ble gjennomført. Det ble ikke funnet noen tidligere livsløpsvurderinger av batteriladestasjoner. Likevel finnes relevante studier. Blant livsløpsvurderinger av frittstående solcellesystemer, er det konsensus om at energitilbakebetalingstid er lavere enn levetiden. Livsløpsvurderinger av batterier for bruk i el-bil konkluderer med at litiumbatterier har lavere karbonavtrykk enn blybatterier. ”Cradle-to-gate”-studier konkluderer med at blybatterier har lavest karbonavtrykk per kg batterimasse.

En representativ batteriladestasjon ble definert og livsløpsvurdering ”fra vugge til og med bruk” ble foretatt. Modelleringen ble gjort med analyseverktøyet SimaPro, med data fra feltopphold, Ecoinvent-database og litteratur. Sluttlivsfasen ble diskutert kvalitativt. Bygningsmasse, småkomponenter som strømledning, skruer og panelstativ ble utelatt fra livsløpsvurderingen. Det samme ble ikke-fysiske aktiviteter.

For sammenlikningsøyemed ble også livsløp ”fra vugge til og med bruk” for primærbatterier modellert og vurdert.

Totalt utslipp ”fra vugge til og med bruk” for en representativ batteriladestasjon er 1786,2 kg CO₂ – ekvivalenter og 2296,4 kg 1,4-DB-ekvivalenter.

Størst karbonavtrykk er knyttet til produksjon av blybatterier og multikrystallinske solcellepaneler. Produksjon av multikrystallinske solcellepaneler og inverter medfører størst utslipp av kg 1,4-DB-ekvivalenter. Transportfasen står for 16,9% CO₂-utslippet.

Litiumbatterier har et mindre karbonavtrykk enn blybatterier, forskjellene øker dersom antakelser om brukstid, temperatur eller dybde på ladesykler øker.

En representativ batteriladestasjon med 10 års brukstid, har netto energi-ratio på 27,2% og greier derfor ikke betale tilbake akkumulert energimengde gjennom sin levetid.

Sluttlivsfasen for en batteriladestasjons komponenter er usikker. Systematisk avfallshåndtering finnes ikke på landsbygda i Malawi. Blybatterier kan resirkuleres hos produsent i Sør Afrika. Elektronisk avfall kan resirkuleres i Nairobi.

Relativt til bruk av primærbatterier er batteriladestasjoner en miljøvennlig løsning for å produsere og distribuere elektrisitet på landsbygda i Malawi.

ABSTRACT

The population of Nkhotakota in Malawi is cut off from electrical grid and uses basically primary batteries connected to LEDs for lighting. Solar-powered battery charging stations are built to provide electricity in a way that is sustainable in terms of environment and economy.

The main objective of this thesis is to investigate whether battery charging stations are an environmentally friendly solution for the production and distribution of electricity in rural Malawi.

The mission began with fieldwork, whose aim was to gain insight into the local setting, define system boundaries and collect data for the life-cycle assessment.

A literature review was conducted. No previous life cycle assessments of battery charging stations were found. Yet relevant studies on photovoltaics and batteries were found. Among life cycle assessments of standalone photovoltaics, there is consensus that the energy payback time is less than the systems expected lifespan. Life cycle assessments of batteries for use in electric vehicles concludes that lithium batteries have a lower carbon footprint than lead acid batteries. "Cradle-to-gate" studies conclude that lead-acid batteries have the lowest carbon footprint per kg battery mass.

A representative battery charging station was defined and its life cycle "from cradle to use" were assessed. The modeling was done with analysis tool SimaPro, with data collected from fieldwork, Ecoinvent database and literature. End of Life phase was discussed qualitatively. Building Mass, minor components such as power cord, screws and panel stand was omitted from the life cycle assessment. The same was non-physical activities.

The life cycle of primary batteries from "cradle to use" were modeled and assessed for comparison purposes.

During its life cycle "from cradle to use", a representative battery charging station emits 1786.2 $kgCO_2$ -equivalents and 2296.4 kg 1,4-DB-equivalents.

The biggest carbon emissions is related to the production of lead-acid batteries and multicrystalline photovoltaic modules. Production of multicrystalline photovoltaic modules and the inverter causes the greatest emissions of kg 1,4-DB-equivalents. The transportation phase accounts for 16.9% of the CO_2 -emissions.

Lithium batteries contributes less to global warming than lead-acid batteries, the differences increase if assumptions about usage time, temperature or depth of discharge increases.

For a representative battery charging station with 10 years of life, the net energy ratio is 27.2% and is therefore unable to pay back its accumulated energy demand.

The components end of life phase is uncertain. Systematic waste management does not exist in rural Malawi. Lead-acid batteries can be recycled at the manufacturer in South Africa. Electronic waste can be recycled in Kenya.

The battery charging stations is a environmental friendly way of producing and distributing electricity in rural Malawi, relative to the use of primary batteries.

INNHOLDSFORTEGNELSE

| | Side: |
|---|------------|
| <i>FORORD</i> | <i>I</i> |
| <i>SAMMENDRAG</i> | <i>II</i> |
| <i>ABSTRACT</i> | <i>III</i> |
| <i>INNHOLDSFORTEGNELSE</i> | <i>IV</i> |
| <i>BEGREPSBRUK OG FORKORTELSER</i> | <i>VII</i> |
| 1 INNLEDNING | 1 |
| 1.1 Bakgrunn..... | 1 |
| 1.2 Feltarbeid..... | 2 |
| 1.3 Forhold i Malawi..... | 4 |
| 1.4 Kumudzi Kuwale..... | 6 |
| 1.5 Batteriladestasjoner..... | 7 |
| 1.6 Problemstilling og forskningsspørsmål..... | 10 |
| 2 PROSJEKTPLAN | 11 |
| 2.1 Målsetninger..... | 11 |
| 2.1.1 Hovedmål..... | 11 |
| 2.2 Delmål..... | 11 |
| 2.3 Milepeler..... | 11 |
| 2.4 Arbeidsplan med milepeler..... | 12 |
| 2.5 Begrensninger..... | 13 |
| 3 METODEBESKRIVELSE | 14 |
| 3.1 Symboler og SI-enheter..... | 14 |
| 3.2 Undersøkellesmetodikk..... | 14 |
| 3.2.1 Livsløpsvurdering..... | 14 |
| 3.2.2 Formål og omfang..... | 15 |
| 3.2.3 Livsløpsregnskap..... | 15 |
| 3.2.4 Livsløpseffektvurdering..... | 16 |
| 3.2.5 Livsløpstolkning, rapportering og kritisk granskning..... | 17 |
| 3.3 Analyse..... | 17 |
| 3.3.1 Excel..... | 17 |
| 3.3.2 SimaPro..... | 17 |
| 3.3.3 Ecoinvent 3.0..... | 17 |
| 3.3.4 ReCiPe midpoint/ endpoint..... | 17 |
| 3.4 Kvalitetssikring..... | 19 |
| 3.5 Prosesstrinn:..... | 19 |
| 4 SOLCELLER OG SMÅ ELEKTRISKE SYSTEMER | 20 |
| 4.1 Innstrålingspotensiale..... | 20 |
| 4.2 Komponenters virkemåte i batteriladestasjon..... | 21 |
| 4.2.1 Solcellers virkemåte:..... | 21 |
| 4.2.2 Batterienes virkemåte..... | 23 |
| 4.2.3 BOS komponenters virkemåte..... | 25 |
| 4.3 Litteraturstudie..... | 26 |
| 4.3.1 Litteraturstudie om livsløpsvurdering av frittstående solcellesystemer..... | 26 |
| 4.3.2 Litteraturstudie av livsløpsvurdering av solcelleteknologier..... | 26 |
| 4.3.3 Litteraturstudie av livsløpsvurdering av batteriteknologier..... | 27 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.3.4 | Oppsummering av litteraturstudiet..... | 28 |
| 5 | <i>PRODUKSJONSPROSESSER</i> | 29 |
| 5.1 | Produksjon av multikrystallinske solcellemoduler..... | 29 |
| 5.1.1 | Produksjon av ren silisium..... | 29 |
| 5.1.2 | Waferproduksjon..... | 29 |
| 5.1.3 | Solcelleproduksjon..... | 30 |
| 5.1.4 | Laminering og modulproduksjon..... | 30 |
| 5.2 | Produksjon av bly-syre batterier..... | 30 |
| 5.2.1 | Produksjon av bly-legering til positive elektrodeplater..... | 30 |
| 5.2.2 | Elektrodesammensetning og "pasting"..... | 30 |
| 5.2.3 | Separatorer og batterisyre..... | 31 |
| 6 | <i>LIVSLØPSVURDERING AV BATTERILADE-STASJONER</i> | 32 |
| 6.1 | Formål og omfang av studien..... | 32 |
| 6.1.1 | Formål med studien..... | 32 |
| 6.1.2 | Omfang av studien..... | 32 |
| 6.1.3 | Avgrensninger..... | 33 |
| 6.1.4 | Funksjonell enhet..... | 33 |
| 6.2 | Referansestrøm..... | 34 |
| 6.2.1 | Beregning av referansestrøm for paneler, MPPT, inverter og batterilader for basis case..... | 34 |
| 6.2.2 | Beregning av referansestrøm for hus- og BOS- batterier for basis case..... | 35 |
| 6.2.3 | Basis Case..... | 38 |
| 6.2.4 | Allokering..... | 38 |
| 6.3 | Modellering av batteriladestasjon..... | 39 |
| 6.3.1 | Modellering i av produksjonsprosesser i Simapro..... | 39 |
| 6.3.2 | Modellering av transportprosesser i SimaPro..... | 41 |
| 6.3.3 | Bruksfasen..... | 42 |
| 6.3.4 | Sluttlivsfasen..... | 42 |
| 6.3.5 | Modellering av primærbatterier..... | 43 |
| 6.4 | Livsløpsregnskap og livsløpseffektvurdering for batteriladestasjon med blybatterier (basis case)..... | 44 |
| 6.4.1 | Klassifisering..... | 45 |
| 6.4.2 | Karakterisering..... | 45 |
| 7 | <i>RESULTATPRESENTASJON</i> | 47 |
| 7.1 | Resultater tilknyttet forskningsspørsmål 1..... | 47 |
| 7.2 | Resultater tilknyttet forskningsspørsmål 2..... | 51 |
| 7.3 | Resultater tilknyttet forskningsspørsmål 3..... | 55 |
| 8 | <i>LIVSLØPSTOLKNING OG RESULTATDRØFTING</i> | 58 |
| 8.1 | Forskningsspørsmål 1..... | 58 |
| 8.2 | Forskningsspørsmål 2..... | 60 |
| 8.3 | Forskningsspørsmål 3..... | 62 |
| 8.4 | Forskningsspørsmål 4..... | 63 |
| 9 | <i>PROSESSEVALUERING</i> | 65 |
| 10 | <i>KONKLUSJON</i> | 67 |
| 10.1 | Resultater..... | 67 |
| 10.2 | Anbefalinger..... | 67 |
| 10.3 | Videre arbeid..... | 67 |
| 11 | <i>REFERANSER</i> | 68 |
| | <i>VEDLEGG</i> | 70 |
| | Figurer..... | 70 |

| | |
|--|----|
| Tabeller..... | 71 |
| Input til figurer i resultatdelen | 72 |
| Oppdeling av transport for figur 24..... | 72 |
| Input til figur 24..... | 73 |
| Input til figur 25..... | 73 |
| Input til figur 26 og 27 | 74 |
| Input til figur 28..... | 75 |
| Input til figur 30 og 31 | 76 |
| Input til figur 32..... | 77 |
| Input til figur 33..... | 78 |

BEGREPSBRUK OG FORKORTELSER

Tabell 1 Begreper og Definisjoner

| Forkortelse | Forklaring |
|--------------------------|---|
| W_p | Watt -Peak |
| AC | Vekselstrøm |
| Basis case | Representativ batteriladestasjon. 10 års brukstid, 25°C og 60%DOD for BOS-batterier. |
| BOS | Balance of System |
| CO_2 - PBT | Tiden det tar å bespare like mange $kgCO_2$ -ekvivalenter, som systemets livsløp forbruker. |
| CED | Akkumulert energiforbruk |
| DC | Likestrøm |
| DOD | Utladningsdybde på sekundærbatterier |
| EPBT | Energy Pay Back Time |
| ESCOM | Electricity Supply Corporation of Malawi |
| GTI | Global innstråling til en tiltet overflate |
| ISO | International Organization for Standardization |
| ISO14040:2006 | Internasjonal Standard for livsløpsvurdering fra 2006. |
| kg 1,4-DB-ekvivalenter | Kategoriindikator for ”potensiale for menneskelig forgifting” |
| kg CO_2 – ekvivalenter | Kategoriindikator for ”potensiale for global oppvarming” |
| LCA | Life Cycle Assessment - Livsløpsvurdering |
| LCI | Life Cycle Inventory- Livsløpsregnskap |
| LCIA | Life Cycle Inventory Assesment - livsløpseffektvurdering |
| MKW | Malawisk Kwacha, Nasjonal valutaenhet i Malawi |
| MPPT | Maximum Power Point Tracker |
| NER | Net Energy Ratio |
| NYO | Nkhotakota Youth Organisation |
| SAPP | South African Power Pool |
| SAPV | Stand Alone Photo Voltaic |
| WEEE | Waste of Electric and Electronic Equipment |

1 INNLEDNING

Denne seksjonen forklarer bakgrunnen for oppgaven, litt om feltarbeidet, forhold i Malawi og bistandsforetaket og dets batteriladestasjoner. Seksjonen avrundes med hvilke problemstillinger og forsknings spørsmål som skal løses i mastergradsarbeidet.

1.1 Bakgrunn

Denne masteroppgaven har intensjon om å være et bidrag til å løse en konkret problemstilling for et bistandsprosjekt, i dette tilfellet, Kumudzi Kuwale i Malawi i sør-øst Afrika. Feltarbeidet ble foretatt i samarbeid med ingeniører uten grenser.

I 2015 definerte FN 17 mål for bærekraftig utvikling, som skal nås innen 2030. Disse målene oppsummerer de største og viktigste globale utfordringene menneskeheten står overfor i dag. Tematikken for denne oppgaven er rettet mot flere av bærekraftsmålene (United Nations 2015):

Mål 7. ”Sikre tilgang til bærekraftig energi som alle kan ha råd til.”

Ifølge FNs utviklingsprogram lever mer enn 1,3 milliarder mennesker uten tilgang til moderne elektrisitetstjenester på verdensbasis (UNDP.org 2016).

Mål 1. ”Utrydde all fattigdom.”

Verdensbanken estimerte i 2012 at andelen av verdens befolkning som lever under fattigdomsgrensen var 12,7% på verdensbasis, men at andelen skulle synke til 9,7% innen 2015 (World Bank Group 2016).

Mål 13. ”Handle umiddelbart for å stoppe klimaendringene og bekjempe konsekvensene.”

Disse målene har tett relasjon til hverandre og deler flere av løsningene med hverandre.

Ifølge FNs utviklingsprogram (UNDP.org 2016) truer påvirkningen fra de globale klimaforandringene med å underminere tiår med utviklingsarbeid og å sette i fare forsøk på å utrydde fattigdom. Videre skriver FNs utviklingsprogram på sine hjemmesider at uten tilgang til fornybar energi kan ikke målene om bærekraftig utvikling nås.

Til tross for at solen for alle praktiske formål, anses som en fornybar energikilde, er det ingen automatikk i at alle typer solcellesystemer er miljøvennlige og uten helserisiko. Dersom vi tar for oss hele solcellesystemets livsløp fra vugge til grav, med blant annet råvareuttak, produksjon av forskjellige komponenter på forskjellige steder, transport, bruk, levetid, vedlikehold og hva som skjer med komponentene når de slutter å virke, får vi et bedre grunnlag for å si noe om hvor miljø- og helsevennlig solcellesystemet er.

I tillegg spiller skalering og måten systemene implementeres på også en viktig rolle for hvor godt teknologien kommer ut. Teknologi kan ofte være et tveegget sverd. Derfor er det viktig å belyse så mange sider av den som mulig. I denne mastergradsoppgaven skal jeg vurdere miljø- ressurs- og helse- påvirkninger livsløpet til et solcellesystem som leverer elektrisitet til fattige mennesker på landsbygden i Malawi.

1.2 Feltarbeid

I første fasen av arbeidet med denne masteroppgaven ble det gjennomført feltarbeid. Formålet med feltarbeidet var å få tilegnet meg innsikt i situasjonen på landsbygda i Malawi, bistandsprosjektet, definere systemgrenser, og forstå hvordan systemene brukes. Gjennomføringen var i stor grad kvalitativ, i form av observasjon, samtaler og intervjuer. Med meg i feltarbeidet hadde jeg en mentor fra ingeniører uten grenser, som hjalp meg med kartleggingen.



Figur 1 Installasjon av solcellepanel, leie-kjøps-løsning. (eget foto)

De første dagene gikk med på å skaffe oversikt over de ulike solcelleløsningene Kumudzi Kuwale leverer. Etter noen dager forstod jeg at det var mest hensiktsmessig å fokusere på batteriladestasjoner av tre grunner:

1. Fordi de tekniske løsningene er relativt like på tvers av batteriladestasjoner, dermed ville det bli lettere å definere meningsfulle systemgrenser.
2. Fordi batteriladestasjoner når ut til mange mennesker, gjerne de aller fattigste.
3. Fordi det er planlagt bygging av flere batteriladestasjoner. En livsløpsvurdering kan bidra til bevisstgjøring og forbedring av systemet.

En ulempe med batteriladestasjoner, i forhold til de andre løsningene, er at de ikke har vært like lønnsomme som leie-kjøp-modellen, eller andre produkter.

Da et førsteutkast til systemgrenser var satt, begynte jobben med å kartlegge hvor komponentene var produsert og hvordan de ble transportert til Nkhotakota. Gjennom samtaler med arbeidere i Kumudzi Kuwale gikk det frem at panelene og batteriene var produsert i Sør-Afrika og fraktet med lastebil til Lilongwe, deretter fraktet med bil til Nkhotakota. Inverteren og maximum power point tracker (MPPT)-charge controlleren ble importert fra Shanghai med båt til Durban og derfra fraktet med lastebil til Lilongwe og bil til Nkhotakota. Batteriladene

ble fraktet til Lilongwe med fly fra Shanghai. Solcellestativ og batterikasser ble produsert lokalt, med metall fra lokale markeder.

Det ble ført register over hvilke batterier som var leid ut til hvem og hvor mye batteriene var utladet når de ble levert tilbake, for å sikre at batteriene ikke ble overutladet og ødelagt. Det ble jevnlig gjort vedlikehold av batteriene, der teknikere fylte opp batteriene med destillert vann. Panelene ble også rengjort.



Figur 2 Charge operator og mentor på innsiden av en batteriladestasjon. På bordet: Registreringsbøker for hus-batterier. (eget foto)

En del av hensikten med feltarbeidet var også å forsøke å forstå prosjektets kontekst, gjennom å bo på landsbygda og være sammen med lokalbefolkningen. Vi fikk oppleve hvordan folk lever i en hverdag som mangler mye vi tar for gitt, der de færreste har en jobb og likevel lever med et smil om munnen. Det virker som et premiss for at et bistandsprosjekt skal fungere, at prosjektene har lokal forankring. Det nytter med andre ord ikke å komme fra utsiden med en god idé, hvis ikke det er vilje til gjennomføring lokalt.

Vi fikk oppleve at selv om man har penger, er det likevel ikke tilgang på alle varer og tjenester. Dette gjør at enkle ting kan ta mye tid. I tillegg gjør varmen det nesten uutholdelig å arbeide midt på dagen, og mørket det umulig å gjøre stort på kvelden.

Under feltarbeidet fikk vi også oppleve de daglige strømbruddene, siden huset vi bodde i var et av de få som var tilknyttet strømmettet. Vi observerte behovet for å ha tilgang til elektrisitet, og så at den ofte ble brukt til belysning og opplading av mobiltelefoner.

Vi gjorde flere forsøk på å finne ut av systemer rundt avfallshåndtering. Vi fant ingen reell systematisk avfallshåndtering. Det kom frem at alt som kunne gjenbrukes eller benyttes som materialer til å lage nye ting, ble benyttet til det. Lokalbefolkningens kreativitet er stor. Ellers ble det resterende avfallet stort sett brent på gårds plassene. Vi besøkte en søppelfylling, men

den var nesten ikke i bruk. Naboene kunne fortelle at det kun hadde vært tømt søppel der tre ganger siste året. På den Norske ambassaden i Lilongwe fortalte diplomaten oss at han ikke visste om det fantes noe system for avfallshåndtering, men at han trodde det ikke gjorde det. I alle fall ikke på landsbygda.

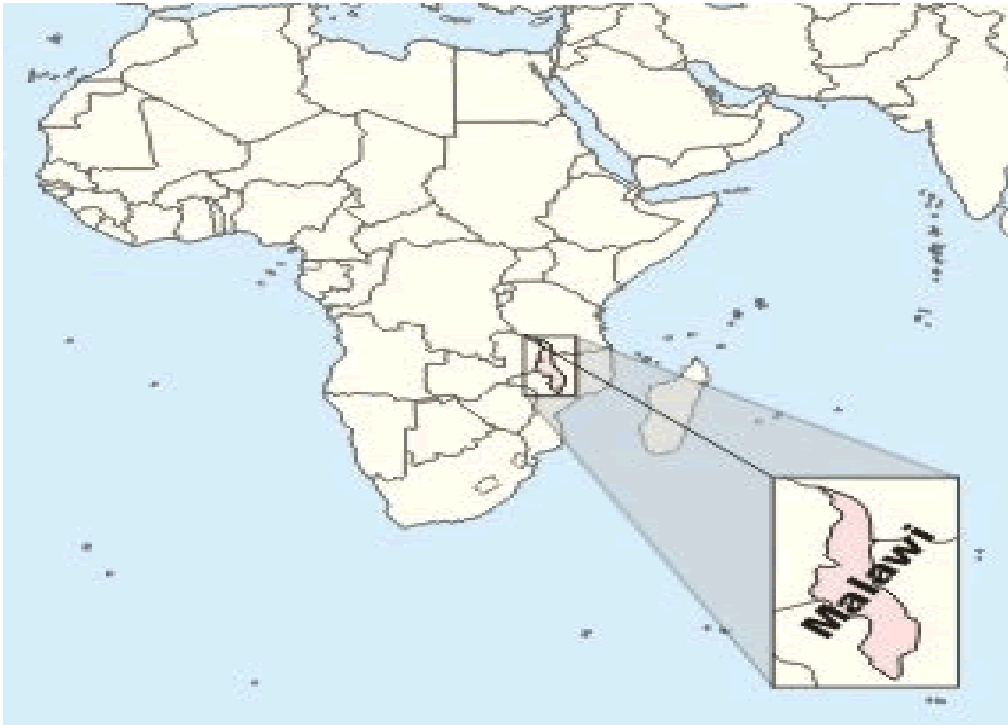


Figur 3 Lokal dumping og brenning av avfall på en gårds plass nær sentrum av Nkhotakota. (eget foto)

I de neste avsnittene går jeg dypere inn på situasjonen i Malawi, litt om bistandsforetaket og batteriladestasjoner.

1.3 Forhold i Malawi

Malawi er lokalisert i Sørøst-Afrika og er et av verdens fattigste land. På FNs utviklingsprogramms indeks for menneskelig utvikling (HDI) er Malawi rangert som nummer 173 av 188 land (United Nations Development Programme 2015). Indeksen vektlegger i hovedsak tre faktorer; skolegang, inntekt og forventet levetid. Flestparten av Malawis 16,7 millioner innbyggere bor på landsbygda, og livnærer seg som fiskere eller bønder. Tall fra FNs utviklingsprogram (United Nations Development Programme 2015) viser et lavt utdanningsnivå, der den gjengse malawier gjennomsnittlig fullfører 4,3 års skolegang. Tallene viser også at bruttonasjonalprodukt per innbygger ligger på om lag 2 USD (kjøpekrafts justert 2011). Ifølge data fra verdensbanken lever omtrent halvparten av befolkningen under fattigdomsgrensen. Tall fra 2013 viser til en forventet levetid ved fødsel på 61 år. (World Bank 2016)



Figur 4 Malawi, Lokalisert i Sørøst-Afrika

Forbedring av infrastrukturen i Malawi utgjør en stor del av det økonomiske vekstpotensialet. En tilstandsrapport fra verdensbanken (Foster 2010) melder at infrastruktur bidro til 1,2 prosentpoengs vekst i brutto nasjonalprodukt per innbygger, hovedsakelig på grunn tilgjengeliggjøringen av informasjons- og kommunikasjonsteknologi. Tilgangen på drikkevann er god og Malawi nådde FNs tusenårsmål på dette området nesten et tiår før målet. Til tross for at en god del har gått i riktig retning, peker rapporten på at det er innen kraftsektoren at forbedringspotensialet er størst. Dersom Malawi klarer å få infrastruktur på nivå med mellominntektsland i regionen, vil veksten i Malawis brutto nasjonalprodukt per innbygger øke med 3,5 prosentpoeng.

Electricity supply corporation of Malawi (ESCOM) har monopol som strømnetsleverandør og baserer seg i hovedsak på flere vannkraftverk som til sammen produserer 351 MW. På nasjonalt nivå er kun 8% av husholdningene tilkoblet strømmettet og kun 3% i Nkhotakota, der Kumudzi Kuwale opererer. Strømproduksjonen dekker ikke fullt ut etterspørselen. For å sørge for at nettet ikke byter sammen, forhåndsmelder ESCOM i hvilke tidsrom gitte områder vil oppleve strømkutt. (Escom 2016)

I tillegg til mangel på belysning skaper energimangelen blant annet problemer med varme kjøleskap og frysebokser i butikkene, som igjen ødelegger for konservering av kjøtt og meieriprodukter. Det er også utfordrende for mange industribedrifter som gjerne har behov for reservegeneratorer til å holde produksjonen i gang.

Utbyggingen av strømmettet går sakte, blant annet fordi det er kundene selv som må betale for infrastrukturen, noe de færreste har råd til.

Reuters melder at fattigdom og mangel på elektrisitet har gjort avskoging til et utbredt problem i Malawi siden få familier har råd til elektrisitet til matlaging. Istedenfor fyres det med ved og kull, som igjen skaper store problemer for helse og miljø. (Reuters 2015)



Figur 5 Kull til matlaging. (eget foto)

Etterspørselen etter elektrisitet er forventet å øke fra dagens nivå på 350MW til 1600MW i 2030. For å møte den forventede etterspørselen har myndighetene blant annet planlagt utbyggingen av kullkraftverk (G. Gamula 2013).

Selv om det arbeides med å koble Malawi til det sør-afrikanske kraftmarkedet (SAPP), er ikke landet i 2016 koblet på et internasjonalt kraftnettverk, hvilket medfører at landet ikke har mulighet til å drive internasjonal handel med elektrisitet.

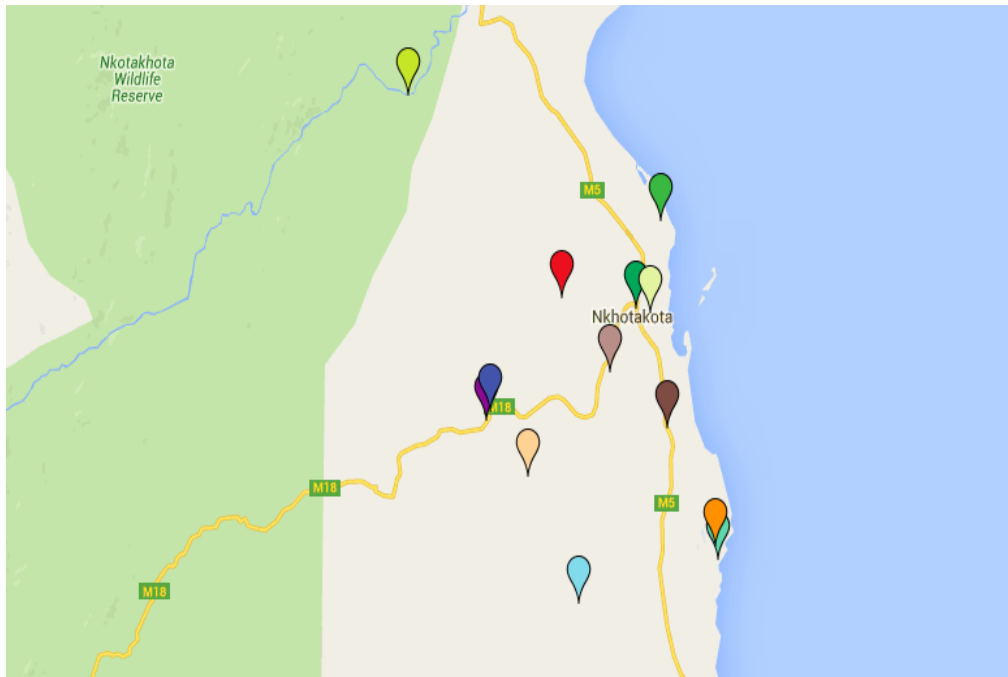
Mulighetene for å utnytte fornybare energikilder som geotermisk energi og vindkraft er store, rapporten "An Overview of the Energy Sector in Malawi"(G. Gamula 2013) poengterer at det er solenergi som har det største potensialet for å bli implementert på en vellykket måte.

1.4 Kumudzi Kuwale

Kumudzi Kuwale er et "Social for Profit"-selskap som arbeider for å tilby elektrisitet til husholdninger og bedrifter utenfor strømmettet i Nkhotakota i Malawi. Selskapet eies av den lokale ungdomsorganisasjonen, Nkhotakota Youth Organisation (NYO), som igjen er støttet av det norske fredskorpset.

I tillegg til å være et kulturutviklingstilbud driver NYO "vocational skills", der de tilbyr opplæring i yrkesfaglige ferdigheter. Personer som utmerker seg i relevante ferdigheter har mulighet til å få fast jobb i Kumudzi Kuwale, som i dag har 17 ansatte, hvorav 5 er kvinner. I 2014 vant bedriften "SEED Africa Award" som årets entreprenør innen bærekraftig utvikling. Det sosiale entreprenørskapet har som mål å kunne tilby ren energi til en pris befolkningen kan betale for, i tillegg til å være økonomisk bærekraftig og bidra til lokal

sysselsetting. For å få til dette har selskapet startet et landsby elektrifiseringsprogram som grovt kan deles i to strategier: Opprettelse av lokale batteriladestasjoner og leie-kjøpsavtaler. Med kun 3% av husholdningene i Nkhotakota tilknyttet strømmettet, er potensialet stort dersom de tekniske og økonomiske aspektene ved løsningene er gode nok. Begge løsningene har sine styrker og svakheter, i denne oppgaven vil jeg fokusere på batteriladestasjoner. (Kumudzi Kuwale 2016)



Figur 6 Kumudzi Kuwales Prosjekter i Nkhotakota (google maps)

1.5 Batteriladestasjoner

Kumudzi Kuwale har bygget batteriladestasjoner i fire landsbyer i Nkhotakota-distriktet. På batteriladestasjonene kan lokalbefolkningen i de tilknyttede landsbyene lade sine hus-batterier, oppladbare lykter og mobiltelefoner. Batteriladestasjonene forsyner i overkant av 750 husstander med elektrisitet.

Batteriladestasjonene er bemannet på dagtid av en ”charge operator” som sørger for at innbetaling og opplading går riktig for seg. På nattestid er batteriladestasjonene bemannet av en nattvakt som ivaretar sikkerheten. Kumudzi Kuwale sørger for vedlikehold av hus-batteriene og fører logg over hvilke hus-batterier som er lånt ut til hvilke kunder, for å sørge for at bruken av hus-batteriene ikke overstiger tillatt utladningsgrad.



Figur 7 Charge operator på innsiden av en batteriladestasjon. (eget foto)

Kundene betaler en engangssum på 38000MWK (ca. 450 kr) for å få installert hjemmesystemene og deretter 1000MWK (ca.12 kr) hver måned for oppladning. Hus-batteriene kobles på hjemmesystemer som gjerne består av LED belysning til fire rom og mulighet til å lade mobiltelefon eller koble på radio og annen elektronikk. Hjemmesystemene blir spesialtilpasset for hver enkelt husstand.



Figur 8 Installasjon av hjemme-anlegg - Sikker tilgang til strøm i hjemmet for første gang! (eget foto)

Det er en enorm forskjell mellom å ha tilgang til elektrisitet og ikke, belysning gir mulighet til å gjøre aktiviteter som lekselesing på kveldstid, dette frigjør dermed tid til å gjøre andre aktiviteter på dagtid. Før batteriladestasjonene var alternativet til belysning å koble engangsbatterier til små LED-lamper. Bruk av engangsbatterier ble ansett som en billigere og bedre belysningsløsning enn parafin, særlig etter at myndighetene sluttet å subsidiere parafin.



Figur 9 Alternativ til belysning - Engangsbatteri koblet til LED. (eget foto)

At hjemmesystemene gjør det mulig å lade mobiltelefoner hjemme, forenkler kommunikasjon betraktelig og gjør planlegging av gjøremål langt mer effektivt. Med mobiltelefon kan man blant annet unngå bomturer til markedet, som kan være opptil ti kilometer hver vei til fots. I Malawi er det svært viktig å møte i begravelser (som det er mange av). Kommunikasjonsteknologi har gjort det mulig å få beskjed om dødsfall i tide for å delta i begravelser. Strøm til mobiltelefoner er noe folk er villig til å betale for. For en del brukere representerer hjemmesystemene også en liten inntektskilde ettersom naboer betaler en liten sum for å få lade sine mobiltelefoner.



Figur 10 Mobiltelefoner til opplading på batteriladestasjon. (eget foto)

I gjennomsnitt varer en oppladning av hus-batteriene 5-7 dager før de må lades på ny. Muligheten til å plassere batteriladestasjoner midt i en landsby eller midt mellom flere landsbyer er helt essensielt, fordi man på denne måten når ut til mennesker som sannsynligvis ikke ville fått tilgang på det nasjonale strømnettet.

1.6 Problemstilling og forskningsspørsmål

I en livsløpsvurdering er det mulig å utforske flere problemstillinger. Jeg ønsker i denne oppgaven å se nærmere på følgende problemstilling og forskningsspørsmål for å gi et bedre beslutningsgrunnlag til å foreta valg og/eller iverksette mulige tiltak. Fordi det allerede er satt opp fire ladestasjoner skal jeg se nærmere på disse og modellere et basis case som skal være representativ for de fire batteriladestasjonene. Kumudzi Kuwale har planer om å bytte ut bly-batterier med litium-batterier. Jeg ønsker derfor å analysere hvilken påvirkning valg av batteriteknologi har på batteriladestasjoners livsløp. Det vil være interessant å utforske hvilket bidrag komponentenes reisevei har på miljøregnskapet.

Opgavens overordnede problemstilling er:

- **Er batteriladestasjoner en miljøvennlig løsning for produksjon og distribusjon av elektrisitet på landsbygda i Malawi?**

For å gi et best mulig svar på den overordnede problemstillingen blir følgende fire forskningsspørsmål definert:

1. Hvilke komponenter og faser tilknyttet livsløpet "fra vugge til og med bruk" for en representativ batteriladestasjon, bidrar potensielt til global oppvarming og forgiftning av mennesker?
2. Er batteriladestasjoner en 100% fornybar energikilde?
3. Hvilken batteriteknologi gir lavest karbonavtrykk ved bruk i batteriladestasjoner i Malawi?
4. Hva kan gjøres med komponentene når de slutter å virke?

2 PROSJEKTPLAN

Hensikten med prosjektplanen er å gi retning for hvordan prosjektet skal gjennomføres, slik at prosjektets hovedmål nås innen tidsfristen uten å overskride prosjektets budsjettamme.

2.1 Målsetninger

Nedenfor defineres hovedmålsetning, delmålsetninger og milepeler for denne mastergradsoppgaven.

2.1.1 Hovedmål

Å benytte livsløpsvurdering (LCA) til å belyse miljø- og helse- påvirkning av småskala solcelleanlegg til bruk utenfor strømmettet i Malawi og sammenlikne med alternative løsninger for strømleveranse.

- Livsløpsvurderingen i denne mastergradsoppgaven skal gi et godt beslutningsgrunnlag for miljø-tiltak tilknyttet Kumudzi Kuwales batteriladestasjoner.
- Å benytte livsløpsvurdering og litteraturstudie (avsnitt 1.6) til å besvare hovedproblemstillingen og forskningsspørsmålene på en god måte.

2.2 Delmål

Følgende delmål er definert for å sikre oppfyllelse av hovedmålet:

1. Gjennomføre feltarbeid
2. Skrive innledning og metode
3. Litteratursøk og videre datainnsamling
4. Sette opp miljøregnskap for batteriladestasjon
5. Analysere, diskutere og vurdere resultatene fra miljøregnskapet
6. Ferdigstille mastergradsoppgaven

2.3 Milepeler

Følgende milepeler er definert:

1. Fullført feltarbeid, innen 1. Februar.
2. Del 1-3 (innledning, metodikk, datainnsamling), innen 28. Februar.
3. Del 4-5 (Forklare teknologi og produksjonsprosesser), innen 7. Mars.
4. Modellert batteriladestasjoner i SimaPro (basis case, følsomhet og primærbatterier) innen 3. April.
5. Gjøre ferdig livsløpsvurdering (diskusjon, analyse og vurdering) innen 17. April.
6. Ferdigstille masteroppgaven innen 12. Mai
7. Presentasjon / disputas

2.4 Arbeidsplan med milepeler

Tabell 2 Prosjektplan

| Aktivitet | UKE NR: | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| Planlegge feltarbeid | → | → | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Kartlegge komponenter og deres reiserute | | | → | → | → | | | | | | | | | | | | | | |
| Kartlegge bruk av batteriladestasjoner | | | | → | → | | | | | | | | | | | | | | |
| Kartlegge lokal avfallshåndtering | | | | → | → | | | | | | | | | | | | | | |
| Oversikt over kultur, infrastruktur og økonomi | | | → | → | → | | | | | | | | | | | | | | |
| Gjennomført feltarbeid | | | | | ☑ | | | | | | | | | | | | | | |
| Sortere data fra feltarbeid | | | | | | → | | | | | | | | | | | | | |
| Skrive innledning | | | | | | | → | | | | | | | | | | | | |
| Beskrive metodikk | | | | | | | | → | | | | | | | | | | | |
| Del 1-3 | | | | | | | | ☑ | | | | | | | | | | | |
| Litteraturstudie | | | | | | | | → | → | | | | | | | | | | |
| Beskrive teknologi | | | | | | | | → | → | | | | | | | | | | |
| Del 4-5 | | | | | | | | | | ☑ | | | | | | | | | |
| Formål og omfang | | | | | | | | | → | | | | | | | | | | |
| Definere systemgrenser, funksjonell enhet og referansestrøm | | | | | | | | | → | → | | | | | | | | | |
| Modellering | | | | | | | | | | → | → | ☑ | | | | | | | |
| vurdering | | | | | | | | | | | | | → | → | | | | | |
| Tolkning og granskning | | | | | | | | | | | | | → | → | → | | | | |
| Komplett LCA | | | | | | | | | | | | | | | ☑ | | | | |
| Diskusjon | | | | | | | | | | | | | | | | → | → | | |
| Konklusjon | | | | | | | | | | | | | | | | | → | → | |
| Finpusse oppgave | | | | | | | | | | | | | | | | | | → | → |
| Ferdigstilt oppgave | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ☑ |
| Disputas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ☑ |

2.5 Begrensninger

Tiden begrenses av at oppgaven skal leveres inn innen fristen. Oppgaven vil derfor kun fokusere på visse miljøeffekter, mens andre blir utelatt fra analysen.

Datainnhenting begrenses av hvilke data som er tilgjengelig. For eksempel kan spesifikk fabrikkdata være vanskelig å skaffe til veie.

3 METODEBESKRIVELSE

Under følger en generell forklaring av terminologi, begreper, symboler, formelbruk, forklaring av metodebruk, i tillegg til en litteraturstudie.

3.1 Symboler og SI-enheter

Tabell 3 Symboler og SI-enheter

| Symboler benyttet: | Betydning: | SI-enhet: |
|---------------------------|--------------------|---------------------------|
| W | Elektrisk Effekt | Watt |
| V | Elektrisk Spenning | Volt |
| A | Elektrisk Strøm | Ampere |
| J, Wh | Energi | Joule |
| m | Lengde | Meter |
| kg | Masse | Kilogram |
| T, °C | Temperatur | Kelvin (Celsius benyttes) |

3.2 Undersøkellesmetodikk

3.2.1 Livsløpsvurdering

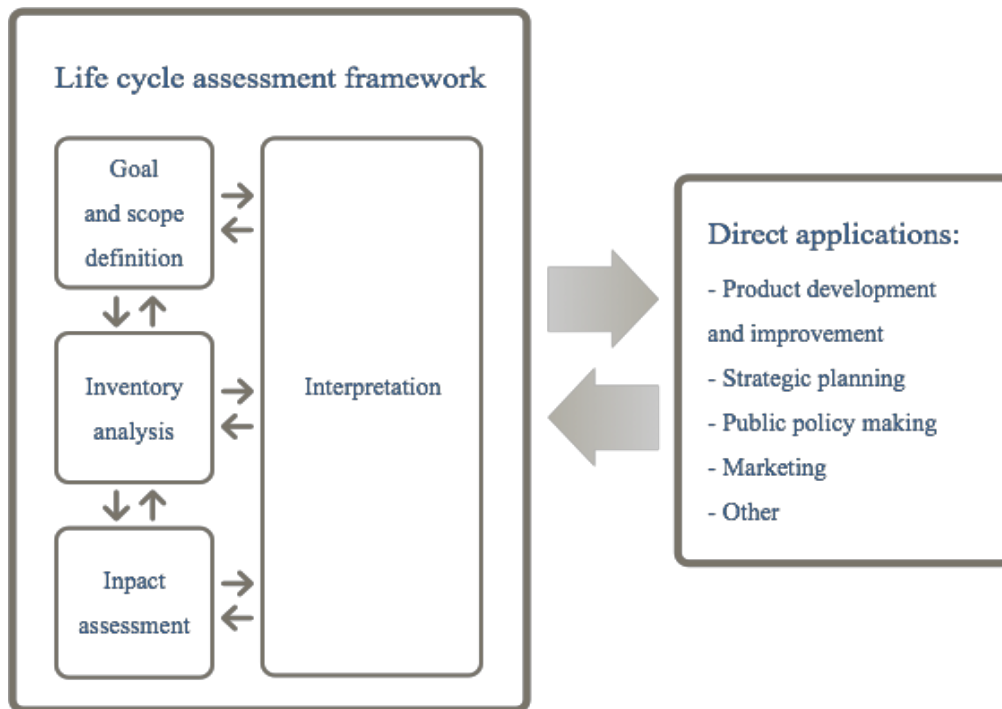
Livsløpsvurdering (LCA) er et systematisk verktøy som benyttes til å vurdere hvilke miljø- og helse- påvirkninger et produkt, et produktsystem eller en tjeneste har på omgivelsene gjennom sitt livsløp.

I denne oppgaven vil produktsystemets livsløp ha en ”fra vugge til og med bruk”- tilnærming, der alle faser fra råvareutvinning, produksjon, transport, til og med bruksfasen er inkludert. Analysen vil inkludere effektkategorier angående ressursbruk, helse og økologiske konsekvenser. (International Organization for Standardization 2006a)

Verktøyet livsløpsvurdering gjør det mulig å kvantifisere og vurdere et produktsystems påvirkning på miljøet og gjøre meningsfulle sammenlikninger mellom produktsystemer som oppfyller samme funksjonelle enhet.

Man kan identifisere hvor livsløpet ulike påvirkninger skjer, utforske hva som kan gjøres for å bedre dette. Disse funksjonene gjør at livsløpsvurderinger kan benyttes til mange formål.

Rammeverket for livsløpsvurderinger er formelt standardisert av International Organization for Standardization (ISO) i standardene ISO14040 og ISO14044.



Figur 11 Rammeverk for livsløpsvurdering ISO 14040

3.2.2 Formål og omfang

Livsløpsvurderingens formål og omfang (Goal and Scope) skal klart defineres og være i tråd med den tiltenkte bruken. På grunn av livsløpsvurderingens iterative natur, kan omfanget raffineres underveis i studien. (International Organization for Standardization 2006a)

Formålsdefinisjonen skal gi svar på hva som er målet med studien, hvorfor studien foretas og for hvem livsløpsvurderingen er tiltenkt. I tillegg bør studiens dybde og treffsikkerhet tas i betraktning. Hvilke miljø- og ressurs- påvirkninger det skal fokuseres på, vil komme klart frem i denne delen av livsløpsvurderingen.

Omfangsdefinisjonen skal klart definere hva som inngår i systemet som skal studeres og hva som skal utelates. Definisjonen av produktsystemet skal vises gjennom flytdiagram. Cutoff-regler for å utelate data defineres, med den hensikt å lette datainnhenting uten vesentlig å forringe studiens verdi. I tillegg skal geografisk systemgrense og tidshorisont skal defineres. For å kunne sammenlikne ulike produktsystemer skal en funksjonell enhet defineres. Denne skal være kvantitativt målbar og skal angi et produkts ytelse i forhold til et brukskrav. Referansestrømmen er en normering av produktsystemets masse- og energi-strømmer opp mot systemets funksjonelle enhet, denne skal bestemmes.

3.2.3 Livsløpsregnskap

Livsløpsregnskap (LCI) defineres i ISO14040:2006 som den fasen av livsløpsvurderingen som involverer sammenstilling og kvantifisering av inngående- og utgående- masse og energistrømmer gjennom produktsystemets livssyklus.

I denne fasen skal datagrunnlaget innhentes og regnskapsmodellen bygges. Modellen vil bestå av flere enhetsprosesser som knyttes sammen i et flytdiagram og skal gjenspeile produktsystemet innenfor bestemte systemgrensene. Datainnsamling vil foretas for

inngående- og utgående- masse og energistrømmer. De data det er vanskelig å få tak i vil bli estimert ved dette stadiet. Det skilles gjerne mellom forgrunns- og bakgrunns-systemer.

Forgrunns-systemet er den delen av datasettet der man har spesifikke data, for eksempel data fra egen bedrift. Bakgrunns-systemet baserer seg gjerne på generiske data.

Siden mange produkter deler prosesser med andre produkter må allokeringsregler for co-produkter defineres, det samme gjelder for resirkulering og bruk av resirkulerte materialer.

Selve kvantifiseringen av inngående- og utgående- masse og energistrømmer i livsløpsregnskapet skal regnes opp mot den funksjonelle enheten og vil baseres på følgende vitenskapelige lover: (Grahl 2014)

- Masse- og energi- konservering (Termodynamikkens 1. Lov)
- Økt entropi (Termodynamikkens 2. Lov)
- Støkiometri
- $E = mc^2$

3.2.4 Livsløpseffektvurdering

I standarden ISO 14044:2006 defineres livsløpseffektvurdering (LCIA) som den fasen i en livsløpvurdering der hensikten er å evaluere og forstå, omfanget og betydningen av miljø- og helse- påvirkninger fra et produkt gjennom dets livsløp.

De kvantifiserte effektene i en livsløpseffektvurdering skal normalt kun sees på som potensielle effekter og ikke faktiske observerbare effekter.

I LCIA-fasen skal klassifisering og karakterisering gjøres.

Klassifisering:

Definering av effektkategorier som representerer miljø- og helse- påvirkninger som resultatene fra livsløpsregnskapet skal deles inn i. Det skilles mellom mid-point- og end-point-effektkategorier. Indikatorene i midpoint-effektkategoriene har en relativt sikker årsak-virkning sammenheng, men omfanget av midpoint-indikatorer kan i mange tilfeller være vanskelig å forstå. I endpoint kategoriene aggregeres midpoint indikatorene videre til en mer håndgripelig indikator, og gir et resultat som er lettere å forstå, men med svakere kausalitet.

Karakterisering:

Karakterisering involverer omgjøringen av LCI resultater til felles enheter og aggregeringen av omgjorte resultater innenfor hver effektkategori. Til denne omgjøringen benyttes karakteriseringsfaktorer. Utfallet av beregningen resulterer i en numerisk indikator for hver effektkategori (International Organization for Standardization 2006b).

Eksempelvis vil utslipp av CO_2 og CH_4 tilhøre midpoint-effektkategorien ”global oppvarming”. Utslippene blir regnet om til kg CO_2 -ekvivalenter, ved at mengden utslipp av hver substans multipliseres med sine respektive karakteriseringsfaktorer; 1 for CO_2 og 25 for CH_4 i et hundreårs perspektiv (GWP_{100}). Karakteriseringsfaktorene er vitenskapelig forankret.

Det er valgfritt om man ønsker å foreta fasene normalisering og vektning. Jeg kommer til å utelate dette i denne oppgaven. Her gis kun en kort forklaring på disse fasene.

Normalisering:

Ved normalisering sees resultatene av hver indikatorverdi opp mot en referanseverdi. Hensikten med dette er å øke forståelsen av resultatenes størrelse relativt til en standard.

Vekting:

Resultatene av hver effektkategori gis en tallvekt og rangeres. Standarden (International Organization for Standardization 2006b) slår fast at vekting ikke kan brukes til produktsammenlikning som er tiltenkt offentligheten.

3.2.5 Livsløpstolkning, rapportering og kritisk granskning

I denne fasen skal resultatene tolkes i lys av hensikten med og rammene for studien. Det vil trekkes konklusjoner og gis anbefalinger basert på resultatene fra fasene LCI og LCIA.

Rapporteringen skal inneholde alle fasene i en livsløpsvurdering med resultater og konklusjon. Det skal komme klart frem av rapporten for hvem studien er tiltenkt, hvilke data, forutsetninger og metoder som benyttes, samt begrensninger for studien.

Det skal foretas kritisk granskning for å sikre at livsløpsvurderingen er gjennomført i tråd med internasjonal standard. (Grahl 2014)

3.3 Analyse

3.3.1 Excel

Excel vil bli brukt til å sammenstille informasjon om batteriladestasjonenes komponenter og beregne referansestrømmer for disse. I tillegg til å analysere output fra SimaPro.

3.3.2 SimaPro

Selve livsløpsmodelleringen skal gjøres i SimaPro. Programmet gir tilgang til flere LCA-databaser, blant annet Ecoinvent, som benyttes for denne oppgaven. I tillegg gir programmet tilgang til flere metoder for livsløpseffektvurdering, deriblant ReCiPe og CED som benyttes i denne oppgaven.

3.3.3 Ecoinvent 3.0

Denne studien skal i hovedsak benytte data fra databasen Ecoinvent 3.0. Ecoinvent 3.0 er verdensledende database for livsløpsvurderinger. Databasen består av fulle LCI datasett med over 10000 prosesser fra en rekke områder. Disse inkluderer energi, råvareuttak, transport, bygging av materialer og produksjon av komponenter. Dataene i databasen representerer et bransjegjennomsnitt. Ecoinvent 3.0 var ferdigstilt i 2013 og oppdateres kontinuerlig.

3.3.4 ReCiPe midpoint/ endpoint

ReCiPe er den mest brukte livsløpseffektvurderings metoden. Metoden benytter 18 midpoint klassifiseringskategorier for å kategorisere data fra livsløpsregnskapet og multipliserer disse med tilhørende midpoint-karakteriserings faktorer. Resultatet er midpointindikatorer med rimelig god treffsikkerhet innenfor sine respektive kategorier.

I denne oppgaven vil det fokuseres på midpointeffektkategoriene ”potensiale for global oppvarming” og ”potensiale for menneskelig forgiftning”.

”Potensiale for global oppvarming” (GWP_{100}) regnes fra en indeks som veier substansers akkumulerte effekt på global oppvarming i et 100 års perspektiv. Effekten måles i ”kg CO₂-ekvivalenter”.

”Potensiale for menneskelig forgiftning” regnes fra en indeks som reflekterer potensielle skadevirkninger ved utslipp av kjemikalier til omgivelsene. Indeksen medregner opphoping av kjemikalie i matkjeden, i tillegg til kjemikalies giftighet. Effekten måles i ”kg 1,4-DB (dichlorobenzene)-ekvivalenter”. Det er knyttet usikkerhet til denne effektkategorien, blant annet fordi det kan være vanskelig å sammenlikne helsepåvirkninger fra ulike substanser over tid. Indeksverdiene regnes ut fra tillatte grenseverdier for de ulike substansene. Et annet usikkerhetsmoment er at man i denne kategorien kun medregner effekter som er påvist, på den måten utelates de substanser som enda ikke er påvist skadelige, men som kan være det.

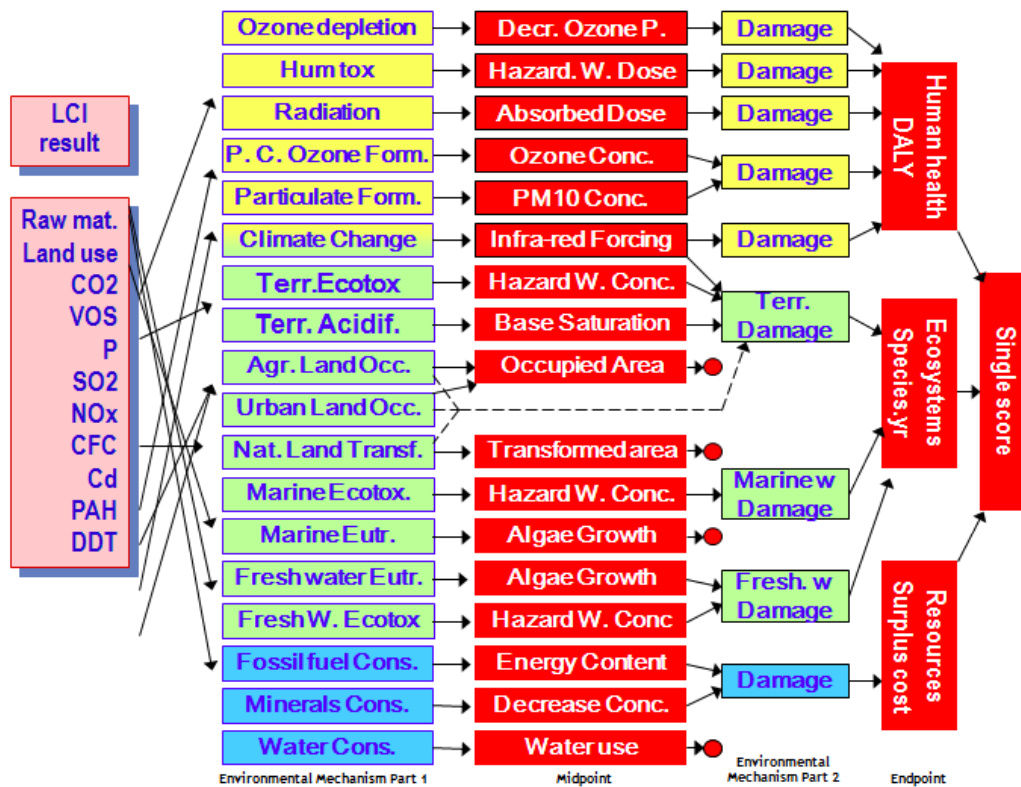
Metoden kan aggregere midpointindikatorerne videre til tre endpointindikatorer tilhørende tre endpointklassifiseringskategorier;

Menneskelig helse (human health), økosystemer (ecosystems) og merkostnad av ressursforbruk (resource surplus costs). For å få til dette multipliseres de respektive midpointindikatorerne med tilhørende skadefaktorer. Til slutt veies endpointindikatorerne til en enkelt poengsum (single score).

Endpointindikatoren for menneskelig helse regnes i antall tapte friske leveår. For økosystemer er indikatoren et uttrykk for tap av antall arter i et gitt område over en viss tidsperiode.

Enheten er i antall år. Indikatoren for merkostnad av ressursforbruk er uttrykt ved merkostnaden ved fremtidig ressursproduksjon over en uendelig tidshorisont med diskonteringsrente på 3%. Enheten er i 2000 USD.

Metoden erkjenner usikkerhet ved aggregering av data og gir mulighet til å velge mellom tre perspektiver: Individualist (I), hierarkist (H) og egalitær (E). Der perspektiv I er kortsiktig og optimistisk. Perspektiv H baserer seg på vanlige retningslinjer med tanke på tidsperspektiv og de effektkategoriene som er best dokumentert. Perspektiv E er det mest pessimistiske perspektivet og tar med langtidseffekter og effektkategorier som ikke er fullt ut etablert. Ved vektning er perspektiv H det perspektivet som er mest anerkjent både politisk og vitenskapelig. (ReCiPe 2016)



Figur 12 ReCiPe metodens struktur

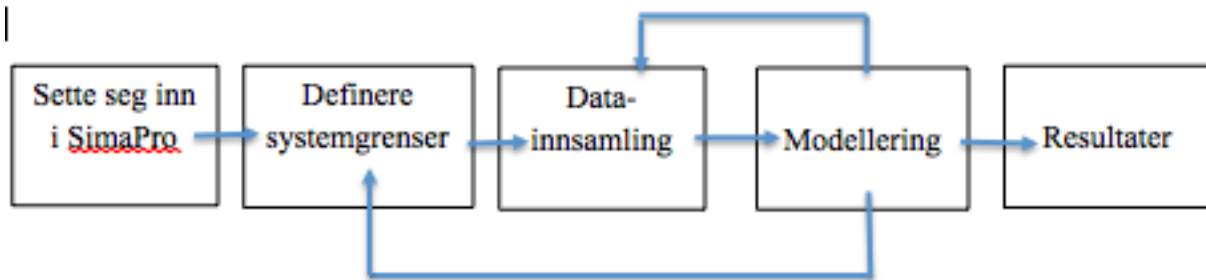
3.4 Kvalitetssikring

Jeg stiller følgende krav til gjennomføring av masteroppgaven:

- Kilder: Data skal innhentes fra faglitteratur og/ eller ledende forskning innen livsløpsvurdering på solceller og batterier, der Ecoinvent er mangelfull.
- Innhentede opplysninger fra feltarbeidet skal dobbeltsjekkes med bedriften/litteratur eller fagpersoner før de benyttes.
- Dersom det blir gjort forenklinger, skal disse komme klart frem av oppgaveteksten, slik at disse kan utbedres ved videre arbeid.
- Eventuell usikkerhet i resultatene skal komme klart frem av oppgaveteksten, slik at leser er oppmerksom på disse.

3.5 Prosesstrinn:

Under følger prosessstrinnene i det videre arbeidet med livsløpsvurderingen.



Figur 13 Prosesstrinn for videre arbeid

4 SOLCELLER OG SMÅ ELEKTRISKE SYSTEMER

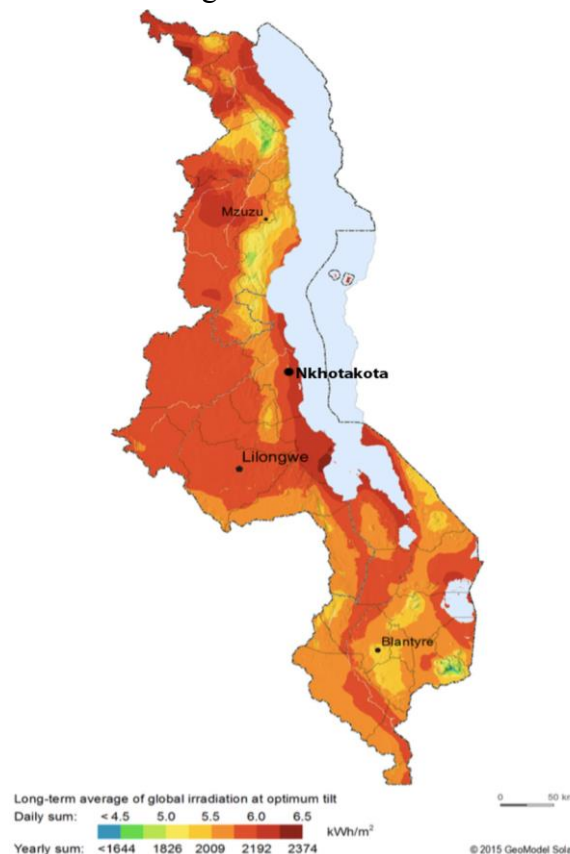
I denne seksjonen skal jeg forklare kort om innstrålingspotensiale i Nkhotakota, samt virkemåte for solceller, BOS-komponenter og sekundærbatterier. Avslutningsvis presenteres funn fra tidligere livsløpsvurderinger på solcellesystemer og batterier.

4.1 Innstrålingspotensiale

Nkhotakota er lokalisert i Malawis sentrale region. Området har god innstråling fra solen hele året og egner seg godt til strømproduksjon fra solceller.

Det er den globale innstrålingen til en tiltet overflate (GTI) man ser på når man beregner potensiell strømproduksjon med solcellepanel. Global innstråling til en tiltet overflate (GTI) defineres som summen av diffus, direkte og reflektert innstråling for en tiltet flate. Siden en del av innstrålingen fra solen blir reflektert fra bakken, vil en tiltet overflate kunne ta imot mer strålingsenergi. Siden jorden er tiltet, relativt til sola, treffer ikke innstrålingen fra sola rettvinklet på en flate på jorden. Solcellepanelene bør derfor vinkles (tiltes). Optimal vinkling avgjøres i hovedsak av hvilken breddegrad panelene befinner seg på, men også av forholdet mellom diffus innstråling og horisontal innstråling. For eksempel varierer optimal vinkling noe dersom mye av innstrålingen blir diffus som følge av høy luftfuktighet. Den optimale vinklingen av solcellepaneler i Malawis midtregion er ifølge en rapport fra verdensbanken (Suri 2015) mellom 14° og 16° . Optimal vinkling varierer også med tid på døgnet.

Kumudzi Kuwales batteriladestasjoner er fastmontert til batteriladestasjonens hustak med vinkel = 15° for å maksimere innstråling.



Figur 14 Solinnstrålingskart over Malawi (Suri 2015)

Vi ser av figur 14 at gjennomsnittlig daglig global tiltet innstråling for Nkhotakota ved optimal tilt, er beregnet til å være $6-6,5kWh/m^2$. Området egner seg dermed utmerket til bruk av solcellepaneler. (Chen 2011b)

4.2 Komponenters virkemåte i batteriladestasjon

4.2.1 Solcellers virkemåte:

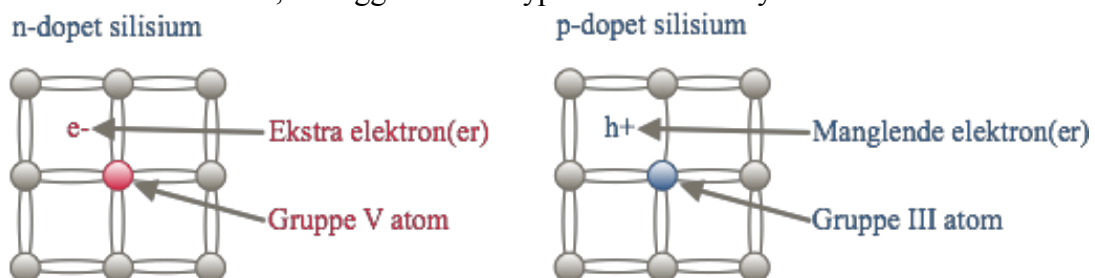
Solceller bruker fotovoltaisk effekt for å omdanne solenergi til elektrisk energi. Når sollys treffer en solcelle, vil den produsere en strøm og sette opp en spenning for å generere effekt. (Chen 2011b)

En solcelle består av positivt og negativt dopede halvledere. Halvledermaterialer er materialer med mellomstort energi-gap (båndgap) mellom valensbåndet og ledningsbåndet. Dette gjør at materialet kan lede strøm dersom det utsettes for de rette betingelsene. Det vanligste halvledermaterialet for solceller er silisium. Silisiumatomer bindes til hverandre med elektronparbindinger og danner et krystallgitter. Ved å dope silisium kan man endre halvlederens egenskaper. Dette gjøres ved at man erstatter noen silisiumatomer med noen atomer fra gruppe 3 og gruppe 5 i periodesystemet for henholdsvis p- og n- dopede halvledere.

N-dopede silisiumhalvledere er halvledere der gruppe 5 atomer (fem valenselektroner) tilføres silisiummaterialet. Ofte benyttes fosforatomer (P). Når fosfor blir tilsatt silisiummaterialet dannes kovalente bindinger. Fire av fosforatomets valenselektroner binder seg med fire silisiumatomer. Det overflødig elektronet er løst bundet, slik blir det flere elektroner i ledningsbåndet. N-dopede halvledere har overskudd av frie elektroner.

P-dopede silisiumhalvledere er halvledere der gruppe 3 atomer (tre valenselektroner) tilføres silisiummaterialet. Grunnstoffet bor (B) benyttes ofte. Bor- og silisiumatomene danner kovalente bindinger. Ettersom bor kun har tre valenselektroner, mangler et elektron for å fullbyrde gitterstrukturen. Dermed oppstår et såkalt elektronhull i valensbåndet. Elektronhullet kan sees på som en positiv ladningsbærer. P-dopede halvledere har underskudd av elektroner.

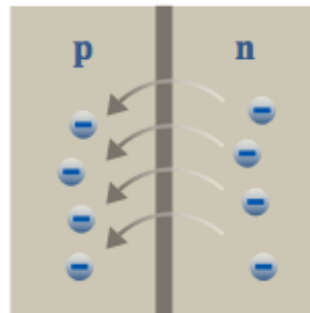
Selv om p-dopede halvledere har underskudd av elektroner og n-dopede halvledere har overskudd av frie elektroner, er begge materialtypene elektrisk nøytrale.



Figur 15 n- og p- dopet silisium (selvlaget basert på (Rossling 2011))

Pn-overgang

Når n-dopede og p-dopede halvledere legges inntil hverandre, oppstår en pn-overgang. De frie elektronene fra n-området vil diffundere over til p-området og fylle elektronhullene der. (Rossling 2011)

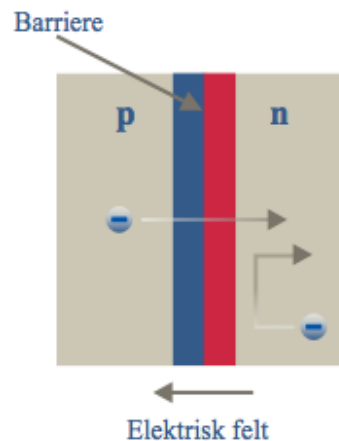


Ladningsforflytning

Figur 16 diffusjon i pn-overgangen (selvlaget, basert på (Rossling 2011))

Elektrisk felt

Etterhvert som elektronhullene i p-området fylles med elektroner, vil p-området bli negativt ladet og n-området bli positivt ladet. Dermed danner det seg et elektrisk felt over pn-overgangen som gjør det vanskeligere for elektroner å bevege seg fra n-området til p-området. I tillegg oppstår et utarmingssjikt i nærheten av pn-overgangen fordi både p- og n- områdene tappes for ladningsbærere. Det elektriske feltet sørger for at eventuelle frie elektroner i p-området sendes over til n-området, og at eventuelle elektronhull i n-området blir sendt over til p-området.

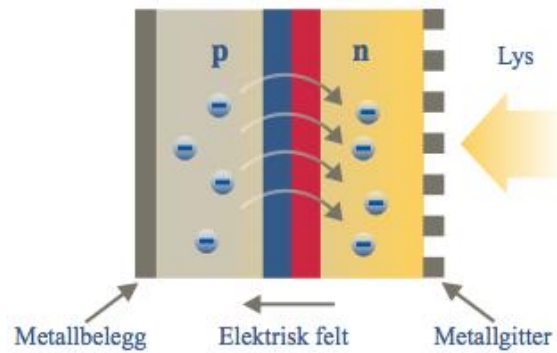


Elektrisk felt

Figur 17 elektrisk felt over pn-overgangen (selvlaget, basert på (Rossling 2011))

Metallbelegg

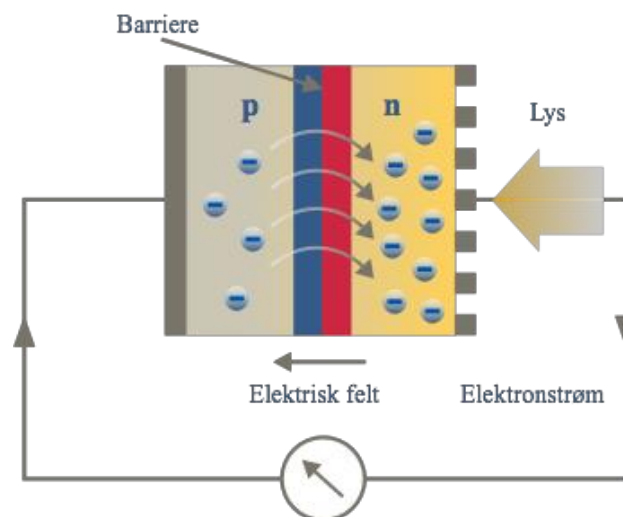
Et metallbelegg legges på utsiden av både p- og n-området. Over n-området er metallbelegget utformet som et gitter slik at lys skal slippe inn til materialet, samtidig som det skal fange opp frie elektroner.



Figur 18 metallbelegg på utsiden av p- og n- området (selvlaget, basert på (Rossling 2011))

Lys tilfører elektronene energi

Når sollys treffer pn-overgangen, vil fotoner med energi større enn båndgapet til silisium, kunne slå løs elektroner fra krystallgitteret på begge sider. Elektroner som frigjøres i p-området, nær pn-overgangen, blir påvirket av E-feltet og trekkes over til n-området. For at det skal produseres en elektrisk strøm må balansen gjenopprettes. Kretsen slutes ved å koble en leder mellom metallbeleggene på hver side. Denne elektronstrømmen kan utnyttes til for eksempel å lade batterier.



Figur 19 innstråling av sollys skaper elektrisk strøm (selvlaget, basert på (Rossling 2011))

4.2.2 Batterienes virkemåte

Batteriladestasjonenes batteribank består av seks parallellkoblede 12 volts batterier, hver med batterikapasitet på 96 Ah. Disse fungerer som energibank, slik at kundenes hus-batterier også kan lades på nattetid, når solcellepanelene ikke er operative.

Det skilles mellom primær- og sekundærbatterier. Sekundærbatterier er oppladbare batterier. Batterier består av flere elektrokjemiske celler som er koblet sammen. En elektrokjemisk celle består av en positiv og en negativ elektrode samt elektrolytisk væske som leder ioner mellom elektrodene, samtidig som den er en elektrisk isolator. Dersom elektrolytten hadde vært en elektrisk leder, ville batteriet kortsluttet. I sekundærbatterier er det vanlig koble flere

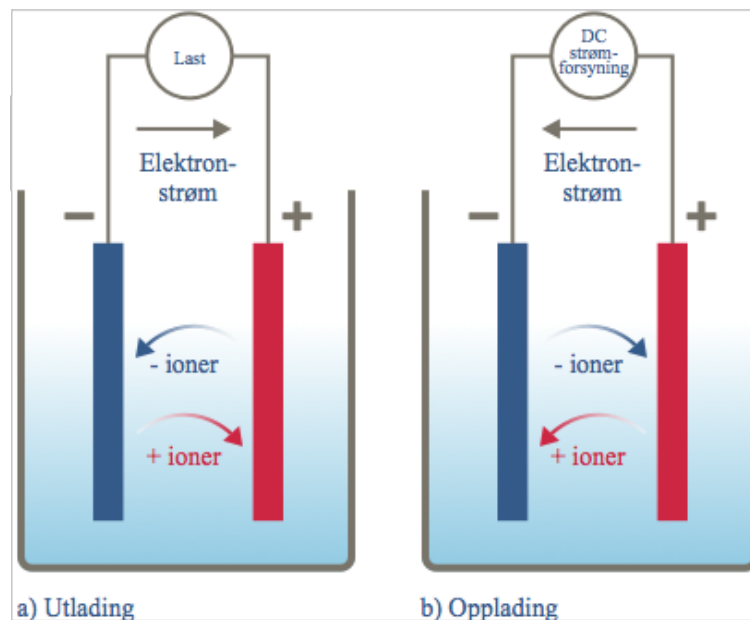
elektrodeplater med samme polaritet i parallell for å øke batterikapasiteten (Ah), uten å øke spenningen (V). Dersom man seriekobler battericellene, øker spenningen.

De kjemiske reaksjonene som genererer elektrisitet, skjer ved hver av elektrodene.

Elektrodene bytter på å være anode og katode avhengig av om batteriet utlades eller opplades, men siden batteriers funksjon normalt sees på som utlading, blir den negative elektroden gjerne omtalt som anode og den positive for katode.

Ut- og opp-ladning av sekundærbatterier skjer ved redoksreaksjoner.

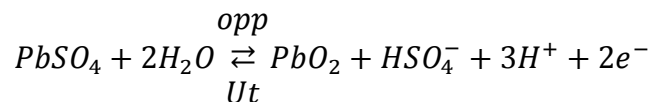
Ved utlading tvinger potensialforskjellen mellom elektrodene den negative elektroden til å avgi elektroner til den positive elektroden via kretsen. Samtidig beveger positive ioner seg fra den negative elektroden til den positive elektroden gjennom elektrolytten, og motsatt. På vei til den positive elektroden passerer elektronene gjennom en ekstern last, og utfører et arbeid. Ved opplading reverseres reaksjonen ved hjelp av en ytre spenningskilde.



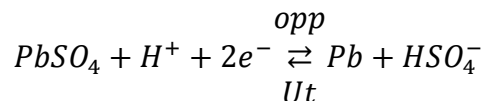
Figur 20 Opp- og ut-lading av batterier (selvlaget, basert på (R.M. Dell 2001))

For blybatterier er redoksreaksjonene ved elektrodene slik:

Ved den positive elektroden:

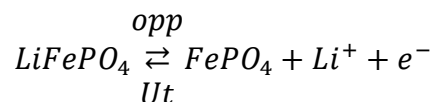


Ved den negative elektroden:

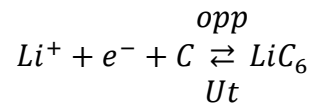


For litiumbatterier (LiFePO_4) er reaksjonene ved elektrodene slik:

Ved den positive elektroden:



Ved den negative elektroden:

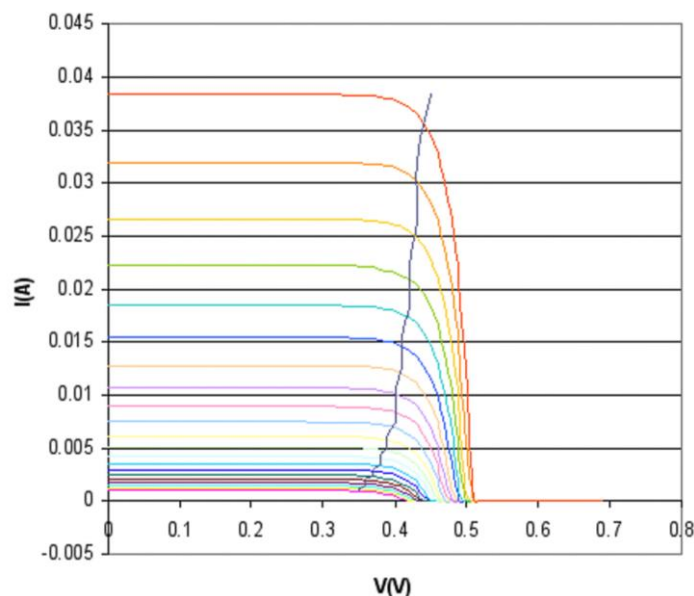


Ved oppladning går reaksjonene fra venstre til høyre side. Ved utladning går reaksjonen fra høyre til venstre. (R.M. Dell 2001)

4.2.3 BOS komponenters virkemåte

BOS står for balance of system. I Kumudzi Kuwales batteriladestasjon er BOS komponentene en MPPT charge controller, en inverter og tre batteriladere.

Strømmen som genereres i solcellepanelene går via en MPPT charge controller til batteribanken. MPPT charge controlleren har to funksjoner; for det første beskytter den både batterier og paneler ved at den kutter ut enten strømkilden eller lasten fra kretsen når det er behov for det. Dermed blir verken batteriene overladet eller panelene utsatt for strøm fra batteriene om natten. For det andre er den en maximum power point tracker (MPPT), som egentlig er en DC-til-DC converter som sørger for at oppladningsspenningen til enhver tid er nær det maksimale lade-effekt punktet, ettersom solinnstrålingen varierer.



Figur 21 Eksempel på MPPT-kurve for solceller ved varierende solinnstråling (wikipedia).

Når hus-batteriene skal lades, trekkes strøm fra batteribanken via en inverter. Inverteren omgjør likestrøm (DC) med lav spenning til vekselstrøm (AC) med høyere spenning. Grunnen til at man i det heletatt benytter en inverter i batteriladestasjonene er at de billigste og mest tilgjengelige batteriladere operer på vekselstrøm. Batteriladere innehar en "step-down" transformator som omgjør fra 120V AC til 24V AC, deretter bruker den en likeretter som konverterer fra AC til DC. Batteriladere justerer ladespenningen automatisk og sørger også for at strømmen blir kuttet av når hus-batteriene er fulladet.

Når hus-batteriene er fulladet, kobles de opp mot kundenes hjemme-anlegg og fungerer som strømkilde for opplysning, mobillading og annen elektronikk. (Twidell 2006)

4.3 Litteraturstudie

Det er gjort mange livsløpsvurderinger på solcelleteknologi og batteriteknologi hver for seg. Siden disse studiene kun sammenlikner ulike solcelleteknologier eller forskjellige batteriteknologier isolert sett, er ikke disse direkte sammenliknbare med livsløpsvurdering av batteriladestasjon i Malawi.

Jeg kunne ikke finne noen livsløpsvurderinger som tok for seg batteriladestasjoner. Heller ikke om frittstående solcelleanlegg i Malawi.

Likevel finnes det noen studier på off-grid solcellesystemer som inkluderer paneler, charge controller, batterier og inverter. Disse studiene er heller ikke direkte sammenliknbare, da de har svært ulike forutsetninger, systemgrenser og datakvalitet, men de har kWh som funksjonell enhet og kan derfor sees på som referanse til sammenlikning.

4.3.1 Litteraturstudie om livsløpsvurdering av frittstående solcellesystemer

Rydh og Sandén (Rydh and Sandén 2005b) foretok en livsløpsvurdering på et frittstående solcellesystem, der de testet for åtte ulike batteriteknologier. Ifølge studien gikk mellom 24-70% av systemets totale energiforbruk med til produksjon og transport av batteriene, avhengig av batteritype. Produksjon og transport av solcellepanelene bidro med 26-70% av det totale energiforbruket, avhengig av batteriteknologien. Transporten som ble antatt å være 3000 km med lastebil for alle komponenter, bidro alene med 1-9% av energiforbruket. Studien konkluderer med at litium-batterier gir et mindre karbonavtrykk og lavere energiforbruk enn bly-batterier.

Del to av studien (Rydh and Sandén 2005a) estimerer EPBT (Tiden energisystemet bruker på å produsere like mye energi som det har forbrukt i livsløpet) til 2,5-13 år. EPBT for panelene varierte mellom 1,8-3,3 år, og 0,72-10 år for batteriene. Dette belyser betydningen valg av batteriteknologi har for mengden energi som går med i systemet.

En studie av et $4,2kW_p$ SAPV (stand-alone photo voltaic) på en skole i Spania (García-Valverde et al. 2009), slår fast at det er de singelkrystallinske solcellepanelene og bly-batteriene som er de mest energi- og CO_2 -intensive komponentene. Den største miljøpåkjenningen kommer fra produksjonsfasen. Studien viser at solcellesystemet er miljøvennlig sammenliknet med et standard dieselaggregat og den spanske strømmiksen.

En annen studie (Kabakian et al. 2015) av et $1,8kW_p$ SAPV i Libanon, benytter data fra Ecoinvent og ReCiPe-metode for LCIA på samme måte som i denne masteroppgaven. Studien hevder at solcellepanelene, etterfulgt av henholdsvis inverteren og batteriene gir det største bidraget i de fleste midpoint-kategoriene. I denne studien var det relativt få batterier i forhold til solcellepaneler. Sammenliknet med den libanesiske strømmiksen og et dieselaggregat er SAPV-systemet mer miljøvennlig. Systemet har en EPBT på 16,9 år. Systemets NER (net energy ratio), systemets levetid (25år) delt på EPBT, er 1,48. Et solenergisystem med NER-verdi på mer enn 1 ansees som fornybart.

4.3.2 Litteraturstudie av livsløpsvurdering av solcelleteknologier

Det er foretatt en mengde livsløpsvurderinger av forskjellige solcelleteknologier, studiene sammenlikner gjerne singelkrystallinske- og multikrystallinske-solcellepaneler. Ved

livsløpsvurderinger av ulike solcelleteknologier sammenlikner man gjerne på grunnlag av W_p . Anleggene antas koblet til strømmettet. Enkelte ganger sammenliknes strømproduksjon fra solcelleteknologi med andre produksjonsformer. Studiene tar gjerne for seg akkumulert energiforbruk (CED), EPBT og CO_2 -PBT. Resultatene av slike studier varierer litt, avhengig av geografiske antakelser om produksjon og bruk. Felles for alle studiene er at de har en tilbakebetalingstid som er kortere enn forventet levetid. Singel-krystallinske paneler er mest effektive i bruk, men livsløpet kommer dårligere ut enn multi-krystallinske solcellepaneler på grunn av høyere energiforbruk og utslipp under produksjon (Niels Jungbluth 2012). Sammenliknet med hydro- og vind-kraft kommer solcelleteknologi dårligere ut (Pehnt 2006). Disse studiene sammenlikner gjerne ikke effekter rundt arealbruk. I tillegg er det ofte ikke praktisk mulig å bytte ut solceller med vann eller vindkraft. Livsløpsvurdering av solcelleteknologi er nyttig for denne masteroppgaven som et referanseverk for data og metodikk.

4.3.3 Litteraturstudie av livsløpsvurdering av batteriteknologier

Det er gjort en del forskning knyttet til batterier til bruk i El-biler. Man skal være klar over at batterier til bruk i el-bil har et litt annet livsløp enn batterier i et SAPV-system og at de også har andre ytelseskrav. Likevel slike studier ha en viss interesse for denne oppgaven.

En studie (Hammond and Hazeldine 2015) som undersøkte energi, miljø og økonomi-påvirkninger knyttet til livsløpet til fire el-bil batterityper; litium-ion polymer, litium-ion, ZEBRA batterier og Ni-Cd batterier. Studien konkluderte med at litiumbatteriene var overlegne med tanke på CO_2 - og SO_2 -utslipp per kWh. Litium batteriene kom best ut med tanke på energiegenskaper. Likevel har brukstemperatur stor innvirkning på hvordan batteriene presterer. For litiumbatteriene i studien er optimal brukstemperatur 15-20°C. Dersom brukstemperaturene økes til 35°C reduseres antall ladesykler (cycle life) med 45%. Ni-Cd-batteriene blir ikke like påvirket. ZEBRA-batteriene operer på temperaturer fra 250-400°C.

Studien poengterer at resirkulering av batteriene er svært viktig og kan være lønnsomt, siden energibruken ved bruk av resirkulerte materialer er langt lavere enn ved ny-utvinning. Studien gjør også et poeng av at dersom batteriene havner på fyllingen istedenfor å resirkuleres, kan tungmetaller komme i kontakt med syre og lekke ut i grunnvannet og til slutt drikkevannskildene. Dette kan føre til store skader på mennesker, dyr og natur. I tillegg utgjør litiumbatteriene en brannfare dersom de dumpes fordi de er svært reaktive med vann.

En annen studie (McManus 2012) som tar for miljøkonsekvensene ved produksjon (cradle-to-gate) av ulike batterityper, sammenlikner bly-batterier, Ni-Cd, Nikkel-metallhydrid, Litium-ion og Natrium-Svoel. På samme måte som i denne masteroppgaven benyttet studien SimaPro som analyseverktøy og hovedsakelig data fra Ecoinvent. ReCePe midpoint/endpoint impact assessment metode ble benyttet. Resultatet viste at det var litium-ion batteriene som hadde størst innvirkning på uttømming av metallressurser, fordi mengden ferritt som gikk med, denne uttømmingen er ikke reell, fordi det finnes store forekomster på verdensbasis, men fordi etterspørselsraten langt overgår tilbudsraten. Det er ikke mangel på litium i dag, men det kan bli det i fremtiden.

Produksjon av litiumbatterier har et betydelig potensiale for forgiftning av mennesker.

Litium-ion-batterier og Ni-Cd-batterier konsumerer mest energi under produksjon per enhet. Batteriene med lavest energikonsum er bly-syre- og Natrium-Svovel-batterier. Det samme mønsteret gjentar seg for kgCO₂-ekvivalenter. Studien poengterer at sammenlikningen ikke er rettferdig, siden faktorer som batterienes vekt, energitetthet, selvnedbryting og cycle-life ikke er tatt med i denne sammenlikningen.

En annen cradle-to-gate studie (Sullivan and Gaines 2012) sammenlikner fem batterityper; PbA, Ni-Cd, NiMH, Na-S og Li-ion. Studien konkluderer med at for batteriproduksjon har Lead-Acid det laveste energikonsumet per kg, og lavest utslipp kg CO₂-ekvivalenter per kg. Det samme gjelder dersom en regner per kWh. Av årsaker nevnt ovenfor har ikke overføringsverdien av resultatene fra en cradle-to-gate studie et 1:1 forhold med en ”fra vugge til og med bruk”-studie. Resultatene kan likevel brukes som grunnlag for deler av livsløpet i cradle-to-grave studier.

4.3.4 Oppsummering av litteraturstudiet

Litteratursøket i ”The international journal of LCA” er gjort gjennom springer.

Litteratursøk er også gjort i Science Direct og Google Scholar.

Jeg fant ingen livsløpsvurderinger gjort for en batteriladestasjon. Transportveien for komponenter var antatt å være mye kortere i studiene som kom frem av litteratursøket, enn det som skal modelleres i denne oppgaven. Komponenter som hus-batterier og batteriladere er heller ikke medregnet, og kan utgjøre en forskjell. Forskjell i forutsetninger om systemgrenser, mål og omfang for studiene, samt datakvalitet gjør at ingen av studiene kan sammenliknes direkte. Dette gir variasjoner i resultater.

Likevel er det konsensus om at frittstående solcellesystemer er miljøvennlige med tanke på global oppvarming. Alle systemene i litteraturstudien har en energitilbakebetalingstid som er mindre enn levetiden.

Livsløpsvurderingene av solcelleteknologier virker enige om at selv om singelkrystallinske solceller er mer effektive for strømproduksjon, er livsløpet til multikrystallinske solceller mer miljøvennlig. Dette kan endre seg i fremtiden dersom produksjonsprosessen til singelkrystallinsk silisium blir mindre energikrevende.

Livsløpsvurderinger av batteriteknologi til bruk i el-biler peker på at Li-ion batterier kommer best ut og at denne teknologien er relativt ung og fortsatt har forbedringspotensiale.

Fra et ”cradle-to-gate” (produksjon) perspektiv er det blybatteriene som har lavest miljøpåvirkninger per kg. Disse studiene kan benyttes som datagrunnlag for livsløpsregnskap av større systemer.

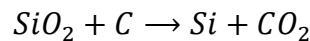
5 PRODUKSJONSPROSESSER

I denne seksjonen skal jeg kort forklare produksjonsprosesser for multikrystallinske solceller og bly-syre batterier.

5.1 Produksjon av multikrystallinske solcellemoduler

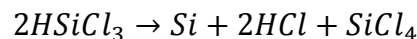
5.1.1 Produksjon av ren silisium

Råmaterialet for silisium er silisiumoksid (SiO_2), jordklodens vanligste mineral. Første steg for å produsere ren silisium, er å redusere smeltet silisiumoksid med koks for å generere metallurgisk silisium.



Dette gir silisium med en renhetsgrad på omlag 98%. Silisium til bruk i solceller må ha en renhetsgrad på minst 99,9999% (solar grade). Det finnes flere prosesser for å oppnå dette, Siemensprosessen er den mest utbredte i dag, men det er ventet at dette vil endre seg ettersom det finnes prosesser som er mindre energikrevende.

Under Siemensprosessen blir silisiumstaver varmet til $1150^\circ C$ og eksponert for triklorsilan. Triklorsilan-gassen dekomponerer og legger igjen ytterligere lag silisium på stavene, slik at de forstørres.



Silisium som blir produsert ved Siemensprosessen er multikrystallinsk silisium. Biproduktet silisium-tetraklorid, kan ikke gjenbrukes i denne prosessen og blir til avfall. Solcellepanelene som benyttes i Kumudzi Kuwales batteriladestasjoner er multikrystallinske.

For å lage singelkrystallinsk silisium, benyttes Czochraski prosessen. Jeg skal ikke gå dypere inn på den her, siden det er multikrystallinsk silisium som granskes i denne undersøkelsen. Det er likevel verdt å nevne at singelkrystallinsk silisium har en noe høyere virkningsgrad enn multikrystallinsk silisium, i snitt henholdsvis 18% og 16%. Elektrisitetsmengden som går med Czochraski prosessen blir anslått til å ligge et sted mellom 48 – 670 kWh/kg, mens energimengden som går med i siemensprosessen ligger et sted 15-90 kWh/kg. Dette medfører at de multikrystallinske solcellene er billigere å produsere. Siden batteriladestasjonenes paneler produserer nok elektrisitet til å lade alle kundenes hus-batterier, virker det fornuftig å benytte multikrystallinske solceller. (Chen 2011a)

5.1.2 Waferproduksjon

Solar grade silisium smeltes til multikrystallinske blokker. Fra disse blokkene skjærer man ut wafer (skiver) med tykkelse på $300\mu m$. Deretter etses overflaten for å jevne ut feil fra utskjæringen. (Jungbluth 2005)

5.1.3 Solcelleproduksjon

Produksjonen av solceller inkluderer doping og videre etsing av wafer. Hver individuelle solcelle har en størrelse på $10\text{cm} \times 10\text{cm}$. Etter at waferen er dopet og etsingen er utført, blir bak- og frontflatene satt sammen. (Jungbluth 2005)

5.1.4 Laminering og modulproduksjon

Solcellene blir så innkapslet av lag med etylen-vinylacetat. Dekselet på baksiden består av polyester, aluminium og polyvinylfluoride. Frontdekselet er en 4mm tykk glassplate. Platene varmes til 150°C og presses på solcellene til et laminat. På baksiden av laminatet festes en koblingsboks. Til slutt blir laminatet innrammet i en aluminiumramme. Sluttproduktet er en solcellemodul. (Chen 2011a)

5.2 Produksjon av bly-syre batterier

Prinsippet bak de moderne bly-syre batteriene er over 100 år gammelt. Denne batteriteknologien er raffinert i dag og tilvirkningsprosessen er videreutviklet.

Bly-syre batterier består i hovedsak av positive og negative elektrodeplater, separatorer og elektrolytisk væske. (R.M. Dell 2001)

5.2.1 Produksjon av bly-legering til positive elektrodeplater

Bly (*Pb*) smeltes sammen med kalsium (*Ca*) og danner en bly-kalsium legering med opp til 0,1wt% kalsium. Ofte med tilsettes 0,3-0,7wt.% med tinn (*Sn*) for å øke støpbarheten. Under nedkjøling dannes Pb_3Ca rundt rene bly-korn og med fører en utharding. Denne legeringen reduserer vanntap under batterioppladning drastisk, og øker elektrisk ledeevne.

Den smeltede legeringen støpes til 0,8mm tykke gitterplater. Designet optimeres med tanke på størrelse, indre resistans og økonomisk produksjon. (R.M. Dell 2001)

5.2.2 Elektrodesammensetning og ”pasting”

For å lage det aktive materialet, reagerer man bly-støpblokker med luft. Dette resulterer i et pulver som består av blyoksid (PbO) og rene bly-partikler (*Pb*). Deretter lages en ”pasta” ved at man blander pulveret i en løsning av svovelsyre (H_2SO_4). Under blandingen blir en god del av pulveret omgjort til blyulfat ($PbSO_4$), som fastner og styrker pastaen.

På den negative platen tilsettes såkalte ”utvidere”. Disse er stoffer som bariumsulfat ($BaSO_4$), lignosulfonat og sot for å øke ytelseevnen i kalde temperaturer og for å øke antall lade-utladningssyklus batteriet tåler. Utviderne hindrer at individuelle blykrystaller skal vokse til tette strukturer med liten overflate, og derfor dårlig elektrisk kapasitet.

Pastaen påføres de støpte gitterplatene, som deretter hurtigtørkes og gjennomgår en prosess kalt ”curing”, som sørger for at utviklingen av blyulfat og oksidasjon av bly fullføres.

Til slutt blir platene plassert i batteriet og smidd i grupper med lik polaritet. Platene lades elektrokjemisk, for å produsere blyoksid på de positive elektrodene og porøst, rent bly på de negative elektrodene. (R.M. Dell 2001)

5.2.3 Separatorer og batterisyre

Separatorer med porer, blir plassert mellom de positive og negative platene. Separatorene er gjerne laget av plastikker som polyetylen (PE) eller polyvinylklorid (PVC), iblandet silisiumoksid (SiO_2).

Til slutt blir batteriene fylt med elektrolytt bestående av vann og svovelsyre. (R.M. Dell 2001)

6 LIVSLØPSVURDERING AV BATTERILADE- STASJONER

I denne seksjonen blir det gjort rede for utføringen av de ulike trinnene i livsløpsvurderingen fra formål og omfang til og med karakterisering. Det blir også gjort rede for modelleringen i SimaPro.

6.1 Formål og omfang av studien

6.1.1 Formål med studien

Å benytte livsløpsvurdering (LCA) til å belyse miljø- og helse- påvirkning av småskala solcelleanlegg til bruk utenfor strømmettet i Malawi og sammenlikne med alternative løsninger for strømleveranse.

Dette gjøres gjennom å besvare hovedproblemstillingen og forskningsspørsmålene jamfør avsnitt 1.6.

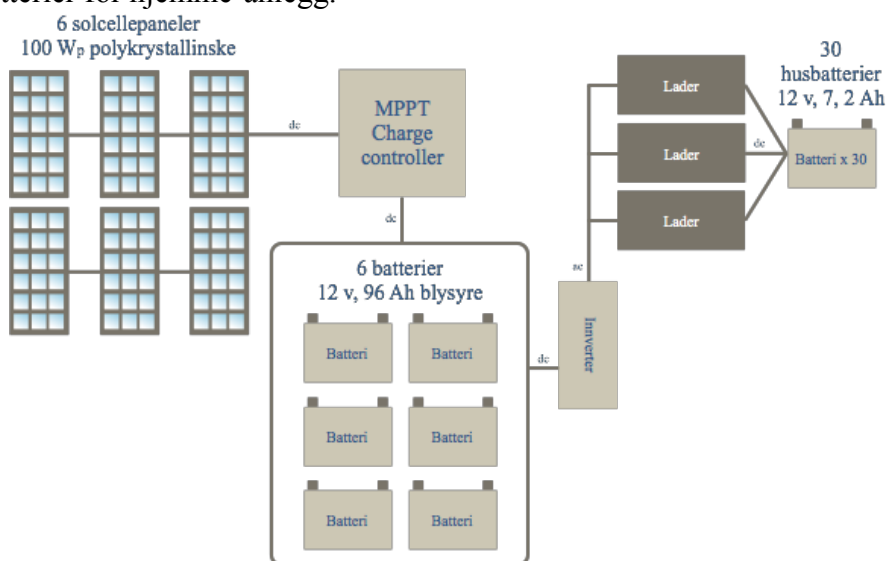
Studien er ment som en screeningundersøkelse til intern bruk av Kumudzi Kuwale. Resultatene vil avhenge av studiens spesifikke produktsystem og forutsetninger og bør derfor ikke benyttes av andre enn Kumudzi Kuwale.

6.1.2 Omfang av studien

Studiens omfang er livsløpet til en representativ batteriladestasjon ”fra vugge til og med bruk”. Dette innebærer uttak av råvarer, foredling av råvarer, produksjon av komponenter, transport og bruksfase, men utelater avfallshåndtering.

Avfallshåndteringen vil bli diskutert kvalitativt.

Det er kun batteriladestasjonens hovedkomponenter som inngår i livsløpsvurderingen: Solcellepaneler, MPPT charge controller, batteribank (BOS-batterier), inverter, batterilader og hus-batterier for hjemme-anlegg.



Figur 22 Skisse av system (selvlaget)

Studien skal basere seg på utslipps- og miljøpåvirknings- data fra Ecoinvent-databasen og vil benytte prosesser som følger med SimaPro. Det vil foretas justeringer slik at de generiske dataene passer best mulig med studieobjektet. Studiens treffsikkerhet er derfor på et generisk nivå.

Studien skal belyse valg av batteriteknologi ved at det skisserte systemet basert på blybatterier (Basis Case) sammenliknes med et identisk system, der produksjon, transport og bruk av litiumbatterier benyttes istedenfor blybatterier. I tillegg skal basis case sammenliknes med bruk av primærbatterier.

Det fokuseres på ReCiPe midpoint effektkategorien ”potensiale for global oppvarming”. Midpoint effektkategorien ”potensiale for menneskelig forgiftning”, vil utforskes for basis case.

Akkumulert energiforbruk (CED) beregnes. CED er egentlig en del av livsløpsregnskapet, men blir presentert i resultatdelen.

6.1.3 Avgrensninger

Følgende utelates fra livsløpsvurderingen:

Batteriladestasjonens bygningsmasse, hjemme-anlegg utover hus-batterier, batterikasser, takfeste for solcellepanelene, skruer, strømledninger, stikkontakter, andre småkomponenter, monteringsarbeid og mennesker.

Immaterielle deler av livsløpet slik som markedsføring utelates.

Brukstiden er avgrenset til 10 år for basis case.

I denne oppgaven foretar jeg verken normalisering eller vekting.

Ved ReCiPe normalisering kan man velge mellom å benytte gjennomsnittstall for Europa eller for verden. Jeg mener derfor at normaliseringsgrunnlaget ikke passer for forholdene i Malawi. Vektingen baserer seg på europeiske politiske normer, som kanskje ikke er gjeldene for forhold i Malawi.

6.1.4 Funksjonell enhet

Med utgangspunkt i dagens bruk av batteriladestasjoner defineres følgende funksjonelle enhet: **”Å årlig levere 6,3kWh elektrisitet til 30 husstander i 10 år.”**

Følgende er forutsatt:

- At dagens teknologi med batterikapasitet på 7,2Ah og 12 V spenning er tilstrekkelig og at den ikke endrer seg over 10år.
- Antar ladesykler på 80% for hus-batterier.
- Antas at kundemassen er statisk. 30 kunder per ladestasjon.
- Antas at et representativt hjemme-anlegg har behov for et fulladet batteri etter 5 dager. Og at dette ikke endrer seg.
- Antas at batteriladestasjonen skal brukes i 10 år.
- Denne energimengden dekker all bruk av hjemme-anlegget.
- Annen strømleveranse fra batteriladestasjonen som for eksempel bruk av ”Beacons” eller lading av mobiltelefoner på batteriladestasjonen løses ved allokering.

6.2 Referansestrøm

Ved beregning av referansestrømmen benyttes et representativt antall av hver komponent for en representativ batteriladestasjon. Selv om batteriladestasjonene er overdimensjonert og har mulighet for å produsere mer strøm enn det gjør i dag, tas ikke det hensyn til i basis caset (dagens batteriladestasjon med blybatterier). Fordi batteriladestasjonene ikke er koblet til strømmettet, er det hus-batteriene som er flaskehalsen i strømleveransen. På grunn av flaskehalsen er ikke effekttap i komponenter medregnet for basis case. For å beregne referansestrøm gjøres antakelser om komponenters levetid, dette er særlig utfordrende for batteriteknologi.

Tabell 4 Datasammenstilling for batteriladestasjon

| Komponent | Masse/ areal | Antall | Leve tid | Kapasitet | Frakt lastebil | Frakt skip | Frakt fly |
|------------------------------|--------------------------------|--------|-------------|-------------------|-------------------|----------------|---------------|
| Multikrystall insk PV | 10 kg / 0,75 m ² | 6 stk | 25 år | 100W _p | 3416 km | Nei | Nei |
| MPPT Charge controller | 2 kg | 1 stk | 10 år | 40A | 2723 km | 11589,9 km | Nei |
| Inverter | 10,5 kg | 1 stk | 10 år | 3000W | 2723 km | 11589,9 km | Nei |
| Batterilader | 0,6 kg | 5 stk | 10 år | 220V- 12V | 170 km | Nei | 9602,61 km |
| Hus-batterier PbA | 2,3 kg | 30 stk | 5 år | 7,2Ah* 12V | 3416 km | Nei | Nei |
| BOS- batterier PbA | 25,9 kg | 6 stk | 6,2 år | 96 Ah*12V | 2043 km | Nei | Nei |
| Hus-batterier Litium | 1,1 kg | 30 stk | 10 år | 7,5Ah* 12,8V | 2723 km | 13995,21 km | Nei |
| BOS- batterier Litium | 11 kg | 6 stk | 13,7 år | 100Ah *12,8V | 2723 km | 13995,21 km | Nei |

Grunnlaget for datasammenstillingen i tabell 4 ble innhentet under feltarbeidet.

6.2.1 Beregning av referansestrøm for paneler, MPPT, inverter og batterilader for basis case.

Solcellepanelene antas å ha 25 års levetid. Referansestrømmen antas derfor å bestå av de seks 100W_p solcellepanelene som installeres ved konstruksjon av batteriladestasjon.

BOS-elementer som MPPT charge controller, inverter og batteriladere antas å ha en levetid på 10 år. Dette gir følgende referansestrøm:

Tabell 5 Referansestrøm paneler, MPPT charge controller, inverter og batterilader

| | 100W _p Multikrystalinske solcellepaneler | MPPT Charge Controller | 3000W Inverter | Batteriladere |
|---------------|---|---------------------------|-------------------|---------------|
| Antall | 6 | 1 | 1 | 5 |

6.2.2 Beregning av referansestrøm for hus- og BOS- batterier for basis case

Under feltarbeidet gikk det frem at batteriene enda ikke hadde sluttet å virke. Det finnes med andre ord ikke noe datasett spesifikt for batterilevetiden til hus-batteriene eller batteriene på ladestasjonene. Levetiden må derfor beregnes.

Batteriers levetid avhenger av flere faktorer, og kan estimeres på forskjellige måter. Årsaken til at det kan være vanskelig å estimere levetiden til batterier er at modellene gjerne gjøres med antakelser om konstante parametere som temperatur, utladningsdybde og utladningsrate. Opplysninger om levetid oppgitt fra fabrikantens datablader, sees ikke på som helt pålitelige, siden disse baserer seg på optimale testforhold. Jeg vil derfor gjøre egne estimater for levetid.

Ifølge yr.no varierer den daglige gjennomsnittstemperaturen i Nkhotakota mellom 20-26°C gjennom året. Gjennomsnittlig maksimal temperatur varierer mellom 25-32°C gjennom året og gjennomsnittlig minimumstemperatur varierer mellom 15-22°C gjennom året.

Det er vanlig å definere batteriers levetid som tiden frem til det kun har 80% av original kapasitet fra fabrikken.

Ved beregning av referansestrømmen for basiscase, tar jeg utgangspunkt i brukstemperatur på 25°C og levetid basert på batterikapasitet frem til 80% av originalkapasitet og utladningsdybde (DOD) på 80% for hus-batteriene og 60% for BOS-batteriene.

Rydh og Sandén benytter følgende modell til å estimere levetid for batterier med daglige dype ladesykler (Rydh and Sandén 2005b).

For batterier med daglige dype ladesykler, antas at levetiden ikke er avhengig av korrosjonsprosesser, men av utladningsdybde, temperatur, batteritypens maksimale antall ladesykler og antall ladesykler som utføres hvert år.

Nedenfor har jeg benyttet denne modellen for hus-batterier og BOS-batterier for Kumudzi Kuwales batteriladestasjoner.

Batterilevetid er da gitt ved:

$$t = \frac{N}{n} \cdot \sigma(T)$$

t = Levetid i antall år

N = Maksimalt antall ladesykler ved 25°C og en gitt DOD

n = Antall ladesykler per år

σ(T) = Temperaturavhengighetsfaktor

Tabell 6 Temperaturavhengighetsfaktorer for batterilevetid. (Rydh and Sandén 2005b)

| Teknologi | Operasjonell Temperatur(°C) | σ(25°C) | σ(30°C) | σ(35°C) | σ(40°C) | σ(45°C) |
|------------------|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| PbA | -30°C til 40°C | 1 | 0,69 | 0,51 | 0,37 | 0,25 |
| Li-ion | -20°C til 50°C | 1 | 0,72 | 0,55 | 0,4 | 0,3 |

Temperaturavhengighetsfaktorene baserer seg på laboratorieforsøk og antar konstante temperaturer. I virkeligheten varierer temperaturene i løpet av en dag og gjennom året.

Tabell 7 Maksimalt antall ladesykler (N) ved DOD og ladesykler/år (n)

| Teknologi | N(DOD ₁₀₀) | N(DOD ₈₀) | N(DOD ₆₀) | n (hus-bat.) | n (BOS-bat.) |
|-----------|------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|--------------|
| PbA | 628 | 1507 | 2261 | 73 | 365 |
| Li-ion | 2000 | 3000 | 5000 | 65,7 | 365 |

Dataene for maksimalt antall ladesykler (N) ved forskjellig utladningsdybde er hentet fra batterienes datablader.

For å levere nok strøm til hjemme-anleggene må dagens hus-batterier (PbA) lades opp etter 5 dager. Dette tilsvarer 73 ladesykler hvert år. Siden litiumbatteriene har noe høyere batterikapasitet (96Wh) antas 65,7 ladesykler årlig ($73 \cdot 0,9 = 65,7$).

Tabell 8 Estimert levetid for hus-batterier bly-syre

| PbA | T25 | T30 | T35 | T40 | T45 |
|--------|------|------|------|------|-----|
| DOD60 | 31,0 | 21,4 | 15,8 | 11,5 | 7,7 |
| DOD80 | 20,6 | 14,2 | 10,5 | 7,6 | 5,2 |
| DOD100 | 8,6 | 5,9 | 4,4 | 3,2 | 2,2 |

Tabell 9 Estimert levetid for hus-batterier litium

| LiFePO ₄ | T25 | T30 | T35 | T40 | T45 |
|---------------------|------|------|------|------|------|
| DOD60 | 76,1 | 54,8 | 41,9 | 30,4 | 22,8 |
| DOD80 | 45,7 | 32,9 | 25,1 | 18,3 | 13,7 |
| DOD100 | 30,4 | 21,9 | 16,7 | 12,2 | 9,1 |

Det er rimelig å anta at disse estimatene er i overkant optimistiske, siden de ikke tar hensyn til korrosjon som oppstår i batteriene. Korrosjonen i batteriene vil påvirke levetiden negativt. For hus-batteriene holder ikke antakelsen om daglige ladesykler, det er derfor rimelig å anta at modellen ikke holder for hus-batteriene.

Tabell 10 Estimert levetid for BOS-batterier bly-syre

| PbA | T25 | T30 | T35 | T40 | T45 |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|
| DOD60 | 6,2 | 4,3 | 3,2 | 2,3 | 1,5 |
| DOD80 | 4,1 | 2,8 | 2,1 | 1,5 | 1,0 |
| DOD100 | 1,7 | 1,2 | 0,9 | 0,6 | 0,4 |

Tabell 11 Estimert levetid for BOS-batterier litium

| LiFePO4 | T25 | T30 | T35 | T40 | T45 |
|----------------|------|-----|-----|-----|-----|
| DOD60 | 13,7 | 9,9 | 7,5 | 5,5 | 4,1 |
| DOD80 | 8,2 | 5,9 | 4,5 | 3,3 | 2,5 |
| DOD100 | 5,5 | 3,9 | 3,0 | 2,2 | 1,6 |

Tabell 12 Fargeforklaring

| | | |
|--|---|--|
| Basis Case 25°C og DOD60 for BOS-batterier | Følsomhetscase for utladningsdybde DOD80%, ved 25°C | Følsomhetscase for temperatur: 30°C, DOD60%. |
|--|---|--|

Levetidsmodellen passer bedre for BOS-batteriene, siden de har daglige ladesykler. Jeg har markert ut i blått estimert levetid for BOS-batterier ved basis case (25°C og 60% utladningsdybde).

Jeg fant ikke noen modell som passet perfekt med forholdene for hus-batteriene. Jeg antar at disse batteriene har kortere levetid enn BOS-batteriene, siden de har dypere utladning. En studie (Dufo-López et al. 2014) som foretok målinger av faktisk levetid for batterier til bruk i SAPV system, fant at faktisk levetid var 5,1 år for blybatterier, ved 80% DOD og 3,5 dager mellom hver ladesykel.

På bakgrunn av dette antas følgende levetid i basis case for hus-batterier av bly-syre teknologi å være 5 år. For litium hus-batterier antas levetiden å være det dobbelte, 10 år.

For en representativ batteriladestasjon er antall hus-batterier som betjenes av en batteriladestasjon til enhver tid 30 stykker. For å tilfredsstille 10 års bruk trengs $10/5 = 2$ sett med 30 blybatterier og $10/10 = 1$ sett med 30 litiumbatterier.

BOS-systemet er dimensjonert med 6 batterier i batteribanken. Batteribankens referansestrøm for basis case anslås til $10/6,2 \approx 1,61 \rightarrow 2$ ganger 6 batterier med bly-syre teknologi. Med litiumbatterier anslåes en referansestrøm for batteribank $10/13,7 \approx 0,73 \rightarrow 1$ ganger 6 batterier.

Tabell 13 Referansestrøm for batterier ved 25°C

| | Hus-batterier (80%DOD) | BOS-batterier (60%DOD) |
|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Bly-syre | 60 batterier | 12 batterier |
| Litium-ion | 30 batterier | 6 batterier |

Videre multipliseres antallet av de respektive komponentene med komponentens vekt/areal. Deretter multipliseres masse med kilometer for å beregne referansestrøm for frakt (tonn·kilometer).

6.2.3 Basis Case

Basis case er livsløpet ”fra vugge til og med bruk” for en representativ batteriladestasjon ved 25°C, slik den står oppført i Nkhotakota i dag. Det antas i basis case 80% ladesykler for hus-batteriene og 60% ladesykler for BOS-batterier.

I basis case gis solcellepaneler, BOS-komponenter og BOS-batterier 63% allokering, batteriladere og hus-batterier allokeres 100%. Dette spesifiseres i avsnitt 6.2.4

Basis case er i hovedsak batteriladestasjoner med blybatterier. For sammenlikning modelleres også basis case med litiumbatterier, dette spesifiseres.

Tabell 14 Referansestrøm for batteriladestasjon med levetid 10 år. (basis case)

| Komponent | Masse/areal | Antall | Frakt lastebil | Frakt skip | Frakt fly | Levetid |
|------------------------|----------------------------|--------|----------------|------------|-----------|---------|
| Multikrystallinsk PV | 60 kg / 4,5 m ² | 6 stk | 204,96 tkm | Nei | Nei | 25 år |
| MPPT Charge controller | 2 kg | 1 stk | 5,4 tkm | 23, 2 tkm | Nei | 10 år |
| Inverter | 10,5 kg | 1 stk | 28,6 tkm | 121,7 tkm | Nei | 10 år |
| Batterilader | 3 kg | 5 stk | 0,51 tkm | Nei | 28,8 tkm | 10 år |
| Hus-batterier PbA | 138 kg | 60 stk | 471,4 tkm | Nei | Nei | 5 år |
| BOS-batterier PbA | 310,8 kg | 12 stk | 635 tkm | Nei | Nei | 6,2 år |
| Hus-batterier Litium | 33 kg | 30 stk | 89,9 tkm | 461,8 tkm | Nei | 10 år |
| BOS-batterier Litium | 66 kg | 6 stk | 179,7 tkm | 923,7 tkm | Nei | 13,7 år |

6.2.4 Allokering

Kumudzi Kuwales batteriladestasjoner produserer strøm til hus-batterier for hjemmesystemer, opplading av lommelykter (beacons) og opplading av mobiltelefoner. Fordi jeg ønsker å inkludere hus-batterier i produktsystemet, men utelater beacons og mobiltelefoner, må det defineres en allokeringsregel. Komponentene i produktsystemet som deltar i strømleveranse til beacons og mobiltelefoner vil gis lavere vekt. På den måten fordeles livsløpsbelastningen mer rettferdig mellom komponentene og deres bidrag til å oppfylle den funksjonelle enheten.

Tabell 15 Årlig strømmengde levert til ulike oppladningsenheter

| Oppladningsenhet | Årlig strømmengde | %-andel |
|------------------|-------------------|---------|
| Hus-batterier | 189, 2 kWh | 63% |
| Beacon | 93,6 kWh | 31% |
| Mobiltelefoner | 18, 25 kWh | 6% |
| Kontroll | | 100% |

Dette forutsetter 150 beacons per ladestasjon med 12 Wh batterikapasitet, som lades en gang i uken hele året.

Gjennomsnittlig lades 10 mobiltelefoner daglig på en batteriladestasjon.

Batterikapasiteten til mobiltelefoner varierer med modellen. Her antas representative mobilbatterier fra 2005 med batterikapasitet på 5 Wh per mobiltelefon.

Tabell 16 Allokering av komponenter

| Komponent | Allokering |
|------------------------|------------|
| Multikrystallinsk PV | 63,00 % |
| MPPT Charge controller | 63,00 % |
| Inverter | 63,00 % |
| Batterilader | 100,00 % |
| Hus-batterier PbA | 100,00 % |
| BOS-batterier PbA | 100,00 % |
| Hus-batterier Litium | 100,00 % |
| BOS-batterier Litium | 100,00 % |

Allokeringen viser andel bidrag fra hver av komponentene for å tilfredsstille funksjonell enhet. For eksempel vil kun 63% av belastningen fra solcellepanelene belastes produktsystemet, siden de også bidrar til å levere strøm til komponenter som er utenfor det definerte produktsystemet.

6.3 Modellering av batteriladestasjon

Under forklares fremgangsmåten for modellering av livsløpet til en representativ batteriladestasjon. Ved sensitivitetsanalysene vil enkelte parametere endres.

6.3.1 Modellering i av produksjonsprosesser i Simapro

Følgende valg av prosesser ble foretatt i SimaPro under modellering av produksjonsprosessene for komponenter til batteriladestasjon.

Tabell 17 Prosesser for komponenter valgt i SimaPro med data fra Ecoinvent 3.0

| Komponent | I simapro | | | | |
|------------------------|--------------|--------------------|-------------------------------|------------|--------------|
| Multikrystallinsk PV | Electronic s | photovoltaic panel | multi-Si wafer (GLO) | market for | Alloc Def, S |
| MPPT Charge controller | Electronic s | Others | for control units (GLO) | market for | Alloc Def, S |
| Inverter | Electronic s | Photovoltaics | inverter 2,5kW (GLO) | market for | Alloc Def, S |
| Batterilader | Electronic s | Others | for control units (GLO) | market for | Alloc Def, S |
| Litium Batterier | Electronic s | Battery, li-ion | Rechargeable, prismatic (GLO) | market for | Alloc Def, S |

Alle prosessene i SimaPro ble modellert med de respektive komponentenes referansestrømmer.

Ved modellering av solcellepanelene ble prosess for multikrystallinske solcellepaneler i SimaPro benyttet. Denne prosessen bygger på produksjonsprosessen som er forklart i avsnitt 5.1.

For å modellere MPPT charge controlleren og batteriladerne, ble prosess for en elektronisk kontrollenhet på verdensmarkedet benyttet. Denne forenklingen ble gjort fordi det er manglende LCI-data for disse komponentene i litteraturen. Andre LCA studier på SAPV-systemer har utelatt materialflyt for disse komponentene, og kun modellert antatt energibruk (Kato et al. 1997; Rydh and Sandén 2005b) ved produksjon. Det er rimelig å anta at dette ikke vil påvirke sluttresultatet i vesentlig grad, siden komponentene ikke utgjør en veldig stor vektandel av det totale systemet (batteriladestasjon).

Inverteren som benyttes i kumudzi kuwales batteriladestasjoner er 3kW. Prosess for inverter av størrelsen 2,5kW ble benyttet, da dette var den beste tilnærmingen, gitt manglende produksjonsdata for 3kW inverter. Inverteren ble ikke skalert, siden 2,5kW-inverteren var av et annet merke og hadde en større masse enn 3kW inverteren. Det er likevel rimelig å anta at produksjonsprosessen er liknende for begge inverterene.

Siden det ikke fantes noen prosess for produksjon av blybatterier, ble data fra Rantik (Rantik M 1999) benyttet til å lage en prosess i Simapro. Produksjonsprosessen for blybatterier er beskrevet i avsnitt 5.2.

Tabell 18 Materialandeler blybatterier

| Materiale: | Vekt % |
|-----------------------|---------------|
| Antimony (Sb) | 0,71 % |
| Arsenic (As) | 0,03 % |
| Copper (Cu) | 0,01 % |
| Glass | 0,20 % |
| Lead(Pb) | 60,96 % |
| Oxygen (O2) | 2,26 % |
| Polyethylene | 1,83 % |
| Polypropylene | 6,72 % |
| Sulfuric acid (H2SO4) | 10,33 % |
| Water (unsalted) | 16,93 % |

Tabell 19 Energimengder for produksjon av blybatterier

| Energi | Energi/kg |
|---------------|------------------|
| Elektrisitet | 1,397 Wh/kg |
| Varme | 1,671MJ/kg |

Data for sør-afrikansk strømmiks ble benyttet da blybatteriene ble produsert i Sør-Afrika.

Tabell 20 kg Utslipp per kg blybatteri produsert

| Utslipp | Hvor | Kg/kg |
|----------|----------|----------------------|
| Bly (Pb) | Til luft | 0,000001242 kg/kg |
| Bly (Pb) | Til vann | 0,000004808 kg/kg |

Ved oppbygningen av prosessen for blybatterier ble prosessdata for råvareuttak, materialer, strømmiks og utslipp hentet fra Ecoinvent 3.0.

Litiumbatteriene ble modellert ved å benytte prosess for oppladbare litium-ion batterier i SimaPro.

6.3.2 Modellering av transportprosesser i SimaPro

Tabell 21 Produksjonssted og transport for komponenter

| Komponent | Produsert | Frakt lastebil | Frakt skip | Frakt fly | VIA | Destinasjon |
|----------------------------|--------------|----------------|---------------|-------------|-----------|-------------|
| Multikrystallinsk PV | Cape Town | 204,96 tkm | Nei | Nei | | Nkhotakota |
| MPPT Charge controller | Hong Kong | 5,4 tkm | 23, 2 tkm | Nei | Durban | Nkhotakota |
| Inverter | Hong Kong | 28,6 tkm | 121,7 tkm | Nei | Durban | Nkhotakota |
| Batterilader | Hong Kong | 0,51 tkm | Nei | 28,8 tkm | Lillongwe | Nkhotakota |
| Hus-batterier PbA | Cape Town | 471,4 tkm | nei | Nei | | Nkhotakota |
| BOS-batterier PbA | Johannesburg | 635 tkm | nei | Nei | | Nkhotakota |
| Hus-batterier Litium | Beijing | 89,9 tkm | 461,8 tkm | Nei | Durban | Nkhotakota |
| BOS-batterier Litium | Beijing | 179,7 tkm | 923,7 tkm | Nei | Durban | Nkhotakota |
| Sum base case (PbA) | | 1345,87 | 144,9 | 28,8 | | |
| Sum Litium - case | | 509,07 | 1530,4 | 28,8 | | |

Avstander knyttet til frakt med lastebil er beregnet med Google maps. Avstander knyttet til frakt med skip og fly er beregnet i nettverktøyet til searates.com.

Kumudzi Kuwale vurderte å kjøpe litiumbatteriene fra en produsent i Beijing. Modelleringen av transportfasen for litiumbatteriene tar derfor utgangspunkt i det. Allokeringsregelen gjelder også for transport av komponenter.

Tabell 22 Valgte prosesser for transport i SimaPro

| Transportmidde l | I SimaPro | | | | |
|---------------------|-----------|---------|-------------------------------|------------|--------------|
| Lastebil | transport | freight | lorry 7,5-16 metric ton (GLO) | Market for | Alloc Def, S |
| Skip | transport | freight | sea, transoceanic ship (GLO) | Market for | Alloc Def, S |
| Fly | transport | freight | aircraft (GLO) | Market for | Alloc Def, S |

6.3.3 Bruksfasen

Det er vanlig å gå eller å sykle i Nkhotakota og operatører bor i landsbyene med umiddelbar nærhet til batteriladestasjonene. Mat, drikke og annet som er tilknyttet mennesker er utelatt fra systemet. Vedlikehold av blybatteriene ble modellert, mens litiumbatteriene antas vedlikeholdsfrie.

Det er antatt 2 liter deionisert vann per år for blybatteriene, transporten for disse antas å være 3416km, fra samme fabrikk som hus-batterier av blytypen. Denne prosessen får 100% allokering siden den tilhører hus-batteriene. Referansestrømmen over 10år er 20kg deionisert vann og 68,32 tonnkilometer transport.

Tabell 23 Modellering av bruksfase, valg i SimaPro

| Prosess | I SimaPro | | | | |
|----------|-----------|-----------|-------------------------------|------------|--------------|
| Vann | Water | deionised | From tap water at user (GLO) | Market for | Alloc Def, S |
| Lastebil | transport | freight | lorry 7,5-16 metric ton (GLO) | Market for | Alloc Def, S |

6.3.4 Sluttlivsfasen

Fordi det den vanligste formen for avfallshåndtering i Nkhotakota og Malawi generelt er å brenne avfall hjemme eller kaste det på gaten, skal jeg kun beskrive dette kvalitativt.

6.3.5 Modellering av primærbatterier

I Nkhotakota er alkaliske primærbatterier og LED-lys det eneste reelle alternativet for belysning. Jeg vil derfor inkludere en sammenlikning mellom bruk av primærbatterier og batteriladestasjon i oppgaven.

Jeg krever at primærbatteriene må levere en strømmengde som tilsvarer ”6,3kWh elektrisitet årlig til 30 husstander i 10 år”. Altså 1892kWh. Det antas at primærbatteriene produseres på samme fabrikk som PbA-hus-batteriene i Sør-Afrika.

Denne direkte sammenlikningen er nok urettferdig, siden brukerne av primærbatterier neppe benytter samme mengde strøm som man gjør med hus-batteriene. Primærbatteriene kan heller ikke benyttes til opplading av mobiltelefon. Dette er derfor kun en grov sammenlikning som muligens gir en større miljøbelastning for primærbatterier, enn faktisk belastning.

Tabell 24 Referansestrøm for alkaliske primærbatterier

| | Gram /stk | Wh /stk | Antall /kg | Wh/kg | kg/år | kg totalt | Distanse (km) | tkm |
|-----------------------|-----------|---------|------------|--------|---------|-----------|---------------|----------|
| Primær-batteri | 32,80 | 3,90 | 30,49 | 118,92 | 1591,16 | 15911,61 | 3416 | 54354,06 |

Til å modellere batteriproduksjonen ble LCI data fra en livsløpsvurdering (E. Olivetti 2010) av alkaliske primærbatterier benyttet.

Tabell 25 Materialkomponenter i alkaliske primærbatterier

| Materiale | Gram | Gram/ kg | Kg(materiale)/ kg(batteri) |
|---|---------------|---------------|----------------------------|
| Electrolytic manganese dioxide | 13 | 396,4 | 0,3964 |
| Potassium hydroxide (35wt% aqueous KOH) | 1,3 | 39,6 | 0,0396 |
| Water deionised | 2,4 | 73,2 | 0,0732 |
| Graphite | 1,2 | 36,6 | 0,0366 |
| Nickel-Plated Steel: | | | |
| Steel low alloy | 5,9 | 179,9 | 0,1799 |
| Nickel | 0,12 | 3,7 | 0,0037 |
| Zink | 5,8 | 176,9 | 0,1769 |
| Brass: | | | |
| Zink primary | 0,36 | 11,0 | 0,0110 |
| Copper | 0,67 | 20,4 | 0,0204 |
| Galvanized steel: | | | |
| Steel, low alloyed | 0,49 | 14,9 | 0,0149 |
| Zink | 0,026 | 0,8 | 0,0008 |
| Nylon | 0,51 | 15,6 | 0,0156 |
| Paper | 0,51 | 15,6 | 0,0156 |
| PVC | 0,51 | 15,6 | 0,0156 |
| Total | 32,796 | 1000,0 | 1,0000 |

På grunn av manglende data på manganese dioxide i Ecoinvent, ble manganese oxide benyttet. Dette er i tråd med den opprinnelige studien data er hentet fra (E. Olivetti 2010).

Tabell 26 Input for produksjon av primærbatterier

| Input for produksjon | Per batteri | Enhet | Per KG | Enhet |
|---------------------------------|-------------|-------|--------|-------|
| Water | 32 | g | 0,9757 | kg |
| Electricity | 0,02 | kWh | 0,61 | kWh |
| Natural Gas, industrial furnace | 25 | kJ | 0,762 | MJ |
| Fuel Oil, industrial furnace | 9,3 | KJ | 0,284 | MJ |

Tabell 27 Valg av transportprosess for alkaliske primærbatterier

| | | | | | |
|----------|-----------|---------|-------------------------------|------------|--------------|
| Lastebil | transport | freight | lorry 7,5-16 metric ton (GLO) | Market for | Alloc Def, S |
|----------|-----------|---------|-------------------------------|------------|--------------|

6.4 Livsløpsregnskap og livsløpseffektvurdering for batteriladestasjon med blybatterier (basis case)

Under følger livsløpsregnskapsdata for batteriladestasjoner i effektkategorien ”potensiale for global oppvarming”. Og karakteriseringsfaktorer, for å forklare hvordan livsløpseffektvurderingen gjøres i SimaPro.

Tabell 28 Utvalg av LCI data (kg) for batteriladestasjon, fokus på global oppvarming. del 1

| Substans | Total | Solcellepaneler | PbA Husbatterier | PbA BOS-batterier |
|-------------------------------------|-------------|-----------------|------------------|-------------------|
| Carbon dioxide, fossil | 1626,408273 | 555,086047 | 354,839366 | 440,933266 |
| Carbon dioxide, land transformation | 1,853492 | 1,208056 | 0,053856 | 0,060254 |
| Dinitrogen monoxide | 0,086024 | 0,022772 | 0,020363 | 0,025963 |
| Ethane, hexafluoro-, HFC-116 | 0,000334 | 0,000326 | 0,000001 | 0,000001 |
| Methane, biogenic | 0,104071 | 0,047970 | 0,006253 | 0,008389 |
| Methane, fossil | 3,845101 | 1,508915 | 0,689622 | 0,889332 |
| Methane, tetrafluoro-, CFC-14 | 0,000792 | 0,000743 | 0,000005 | 0,000005 |
| Sulfur hexafluoride | 0,000803 | 0,000709 | 0,000025 | 0,000035 |

Tabell 29 Utvalg av LCI data (kg) for batteriladestasjon, fokus på global oppvarming. del 2

| Substans | MPPT Charge Controller | Inverter2500 | Batteriladere 5 stk | Vedlikehold PbA |
|-------------------------------------|-------------------------------|---------------------|----------------------------|------------------------|
| Carbon dioxide, fossil | 32,599979 | 120,091123 | 106,937945 | 15,920548 |
| Carbon dioxide, land transformation | 0,072555 | 0,280412 | 0,174173 | 0,004185 |
| Dinitrogen monoxide | 0,002129 | 0,008735 | 0,005316 | 0,000746 |
| Ethane, hexafluoro-, HFC-116 | 0,000001 | 0,000003 | 0,000002 | 0,000000 |
| Methane, biogenic | 0,002371 | 0,033256 | 0,005706 | 0,000125 |
| Methane, fossil | 0,096332 | 0,377448 | 0,260714 | 0,022738 |
| Methane, tetrafluoro-, CFC-14 | 0,000005 | 0,000022 | 0,000012 | 0,000000 |
| Sulfur hexafluoride | 0,000004 | 0,000020 | 0,000010 | 0,000000 |

6.4.1 Klassifisering

Klassifisering er forklart i avsnitt 3.2.4, dette gjøres automatisk i SimaPro.

6.4.2 Karakterisering

Her vises kun et utdrag til karakteriseringsfaktorer for ReCiPe midpoint effektkategorien ”potensiale for global oppvarming” i et 100 års perspektiv (GWP_{100}). ReCiPe-metoden sørger for ulike karakteriseringsfaktorer for hver substans i de ulike effektkategoriene.

Tabell 30 ReCiPe Karakteriseringsfaktorer for GWP 100år

| Substance | Compartment | Unit | GWP100 |
|-------------------------------------|--------------------|-------------|---------------|
| Carbon dioxide, fossil | Air | kg CO2 eq | 1 |
| Carbon dioxide, land transformation | Air | kg CO2 eq | 1 |
| Dinitrogen monoxide | Air | kg CO2 eq | 298 |
| Ethane, hexafluoro-, HFC-116 | Air | kg CO2 eq | 12200 |
| Methane, biogenic | Air | kg CO2 eq | 22,25 |
| Methane, fossil | Air | kg CO2 eq | 25 |
| Methane, tetrafluoro-, CFC-14 | Air | kg CO2 eq | 7390 |
| Sulfur hexafluoride | Air | kg CO2 eq | 22800 |

Karakteriseringsfaktorene multipliseres med mengden av tilhørende substans (LCI-data) og gir effektindikatoren kgCO₂-ekvivalenter.

Totale kg CO₂-ekvivalenter for hver substans og hver komponent er markert ut med blått i tabell 31.

Tabell 31 kg CO2-ekvivalenter for batteriladestasjon med blybatterier

| Substans | Total | Solcellepaneler | PbA Husbatterier | PbA BOS-batterier | MPPT Charge Controller | Inverter 2500 | Batteriladere | Vedlikehold PbA |
|-------------------------------------|--------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| Total | 1786,2 | 631,8 | 379,5 | 472,4 | 35,9 | 134,0 | 115,7 | 16,8 |
| Remaining substances | 5,6 | 4,3 | 0,5 | 0,5 | 0,0 | 0,2 | 0,1 | 0,1 |
| Carbon dioxide, fossil | 1626,4 | 555,1 | 354,8 | 440,9 | 32,6 | 120,1 | 106,9 | 15,9 |
| Carbon dioxide, land transformation | 1,9 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,2 | 0,0 |
| Dinitrogen monoxide | 25,6 | 6,8 | 6,1 | 7,7 | 0,6 | 2,6 | 1,6 | 0,2 |
| Ethane, hexafluoro-, HFC-116 | 4,1 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Methane, biogenic | 2,3 | 1,1 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,7 | 0,1 | 0,0 |
| Methane, fossil | 96,1 | 37,7 | 17,2 | 22,2 | 2,4 | 9,4 | 6,5 | 0,6 |
| Methane, tetrafluoro-, CFC-14 | 5,9 | 5,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,1 | 0,0 |
| Sulfur hexafluoride | 18,3 | 16,2 | 0,6 | 0,8 | 0,1 | 0,5 | 0,2 | 0,0 |





7 RESULTATPRESENTASJON

I denne seksjonen presenteres resultater som benyttes til å besvare forskningsspørsmålene:

1. Hvilke komponenter og faser tilknyttet livsløpet ”fra vugge til og med bruk” for en representativ batteriladestasjon, bidrar potensielt til global oppvarming og forgiftning av mennesker?
2. Er batteriladestasjoner en 100% fornybar energikilde?
3. Hvilken batteriteknologi gir lavest karbonavtrykk ved bruk i batteriladestasjoner i Malawi?
4. Hva kan gjøres med komponentene når de slutter å virke? (Denne løses kvalitativt)

Nettverksfremstillingene nedenfor viser de ulike prosessenes bidrag til effektkategoriene for basis case med blybatterier.

Forklaring av nettverksfremstilling:

- Hvit boks med røde striper  = Prosess fra Ecoinvent.
- Grønn boks  = Prosess for produksjon av blybatterier (forklart i 6.3.1)
- Blå boks  = Assembly, setter sammen underliggende prosesser som produksjon og transport.
- Rød pil  = Viser bidrag fra oppstrøms prosesser. Tykkere pil betyr større bidrag.

Fargeforklaring for stolpediagrammene:

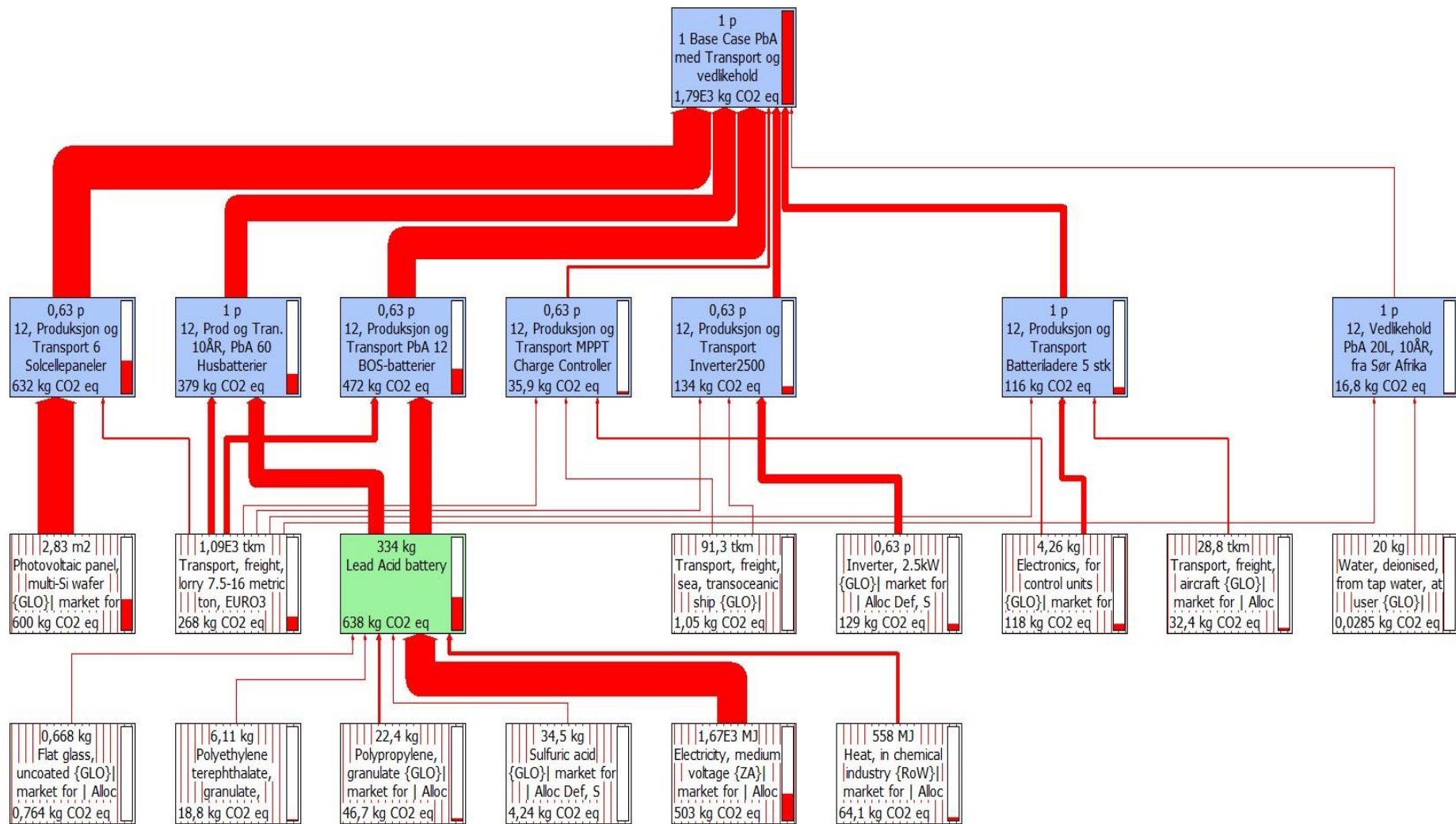
- Blått diagram = CED.
- Grønt diagram = kg CO₂-ekvivalenter.
- Rødt diagram = kg 1,4-DB-ekvivalenter.

7.1 Resultater tilknyttet forskningsspørsmål 1

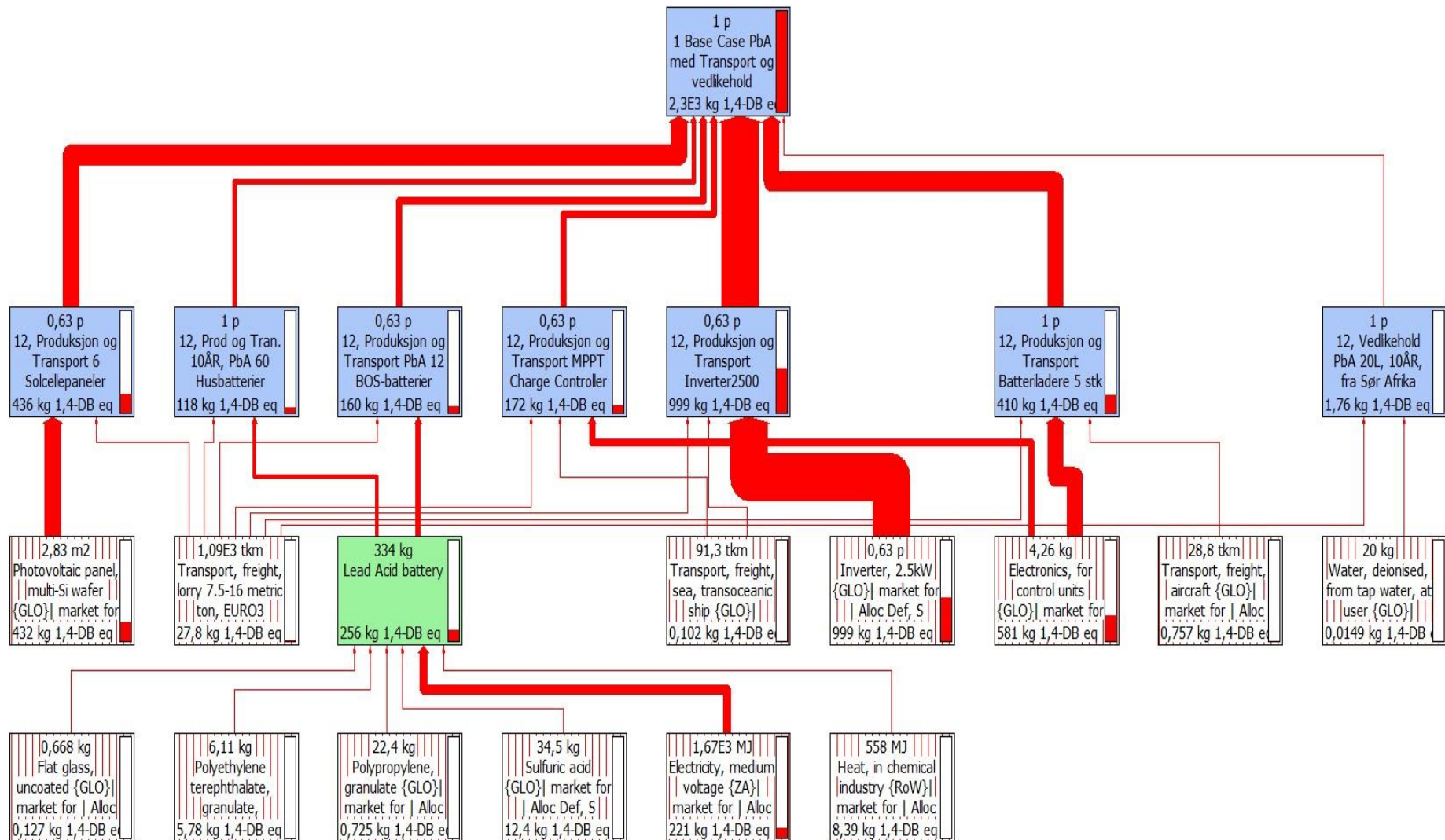
Nedenfor følger nettverksfremstillinger av kvantifisering av utslipp kg CO₂ – ekvivalenter og kg 1,4-DB-ekvivalenter for basis case. Disse resultatene viser en kartlegging av hvilke komponenter og faser av livsløpet som gir størst bidrag til effektkategoriene ”potensiale for global oppvarming” og ”potensiale for menneskelig forgiftning”.

Transportfasens andel av utslipp kg CO₂ – ekvivalenter er presentert for basis case med blybatterier og for basis case der blybatterier er byttet ut med litiumbatterier.

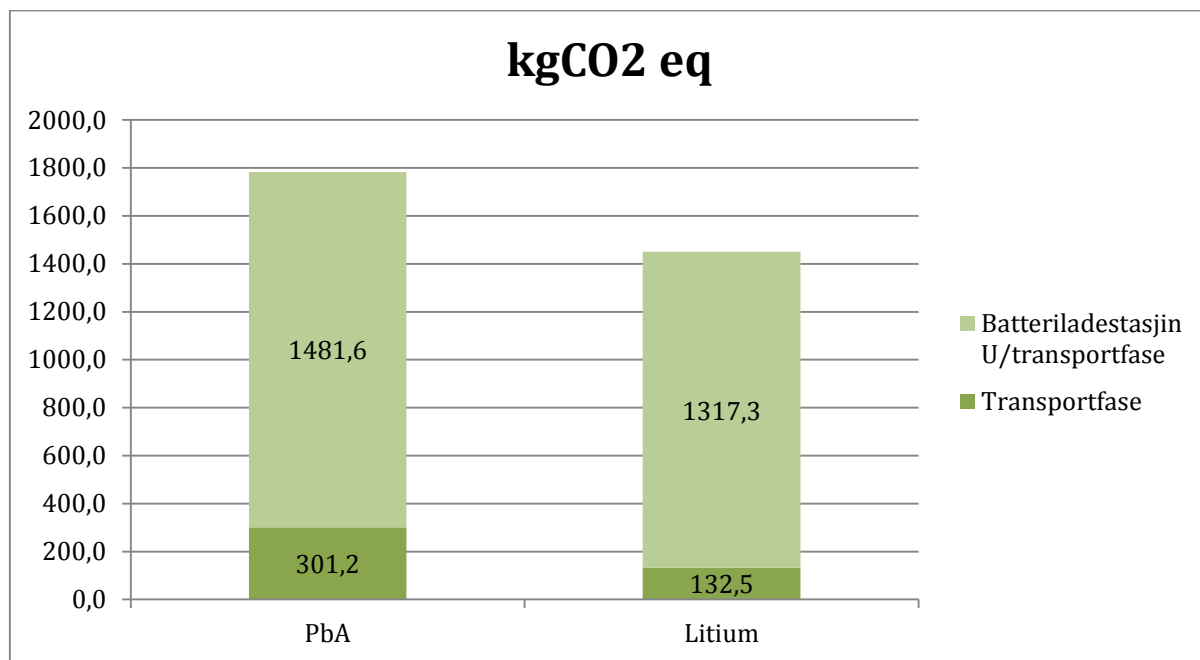
Til sammenlikningsøyemed er det også foretatt en modellering av livsløp ved bruk av primærbatterier, dersom de skal oppfylle den funksjonelle enhet. Resultatene presenteres i dette avsnittet.



Figur 23 Potensiale for global oppvarming, kg CO2-ekvivalenter for batteriladestasjon med blybatterier og brukstid 10 år

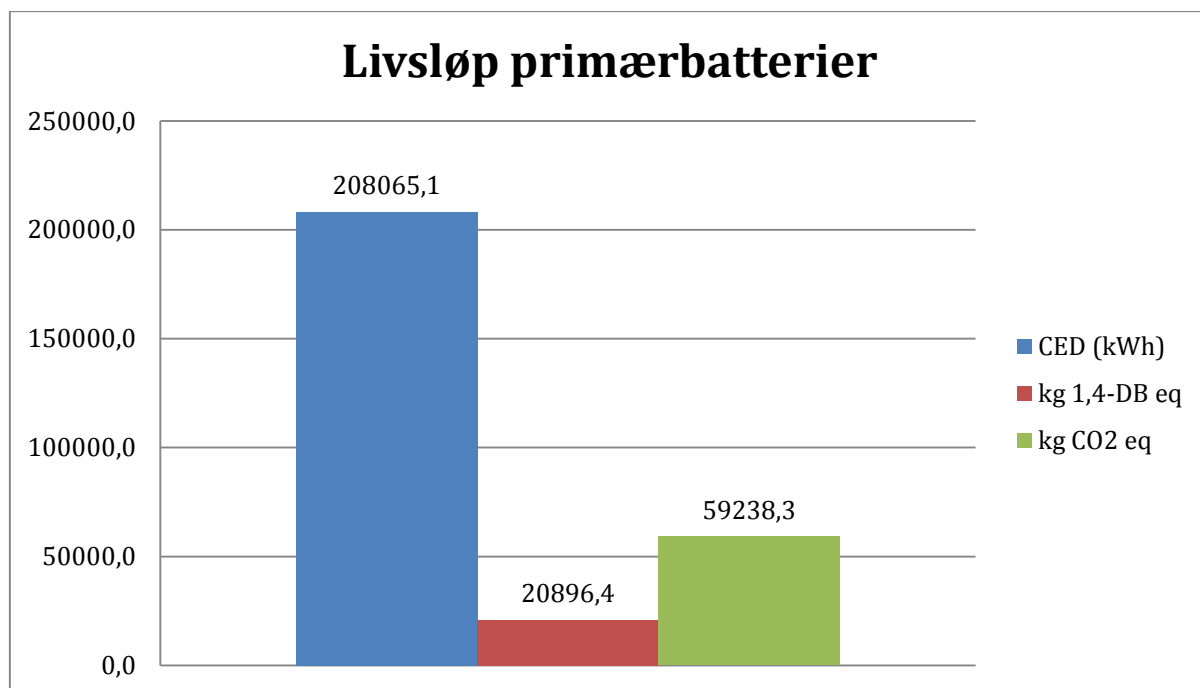


Figur 24 kg 1,4-DB-ekvivalenter for representativ batteriladestasjon med blybatterier og brukstid 10 år



Figur 25 kg CO2-ekvivalenter for transport av alle komponenter og kg CO2-ekvivalenter for batteriladestasjonens livsløp uten transportfase.

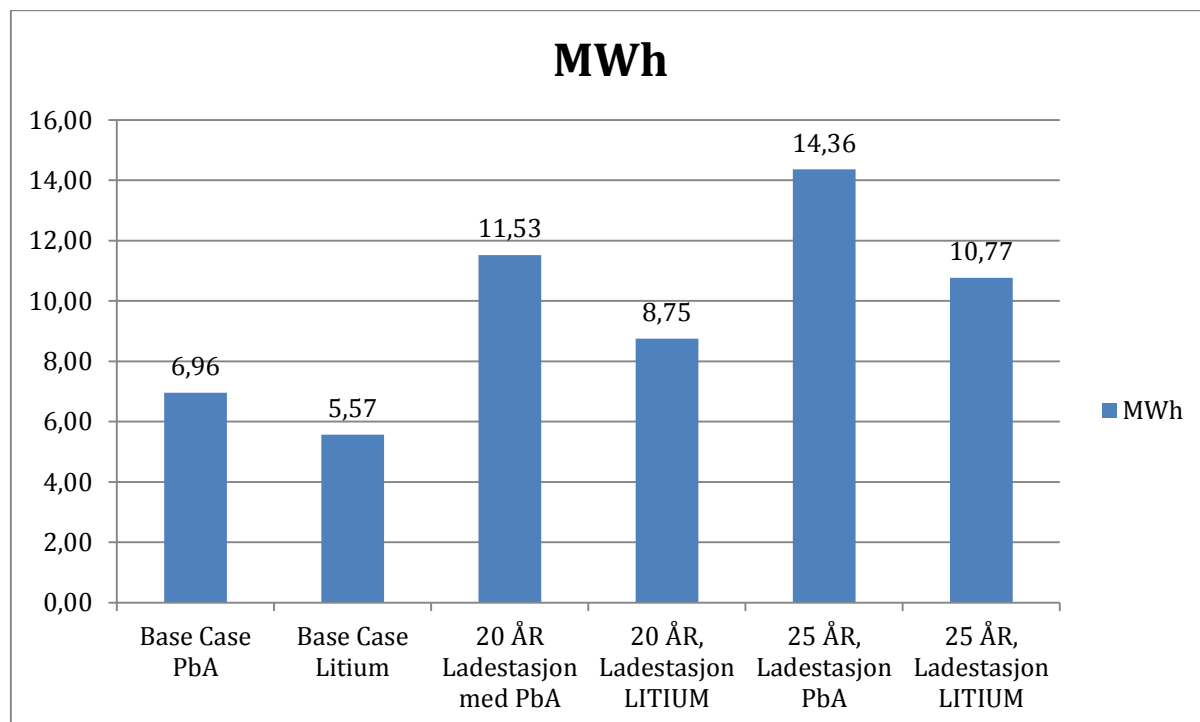
Til sammenlikningsøyemed ble et livsløp for primærbatterier modellert. Dersom primærbatterier skal levere tilsvarende strømmengde til belysning som batteriladestasjoner gjør, vil det medføre energiforbruk og utslipp som vist i figuren under:



Figur 26 Livsløp fra vugge til og med bruk for primærbatterier

7.2 Resultater tilknyttet forskningsspørsmål 2

Resultatene nedenfor skal benyttes til å besvare hvorvidt batteriladestasjoner kan ansees som en 100% fornybar energikilde.



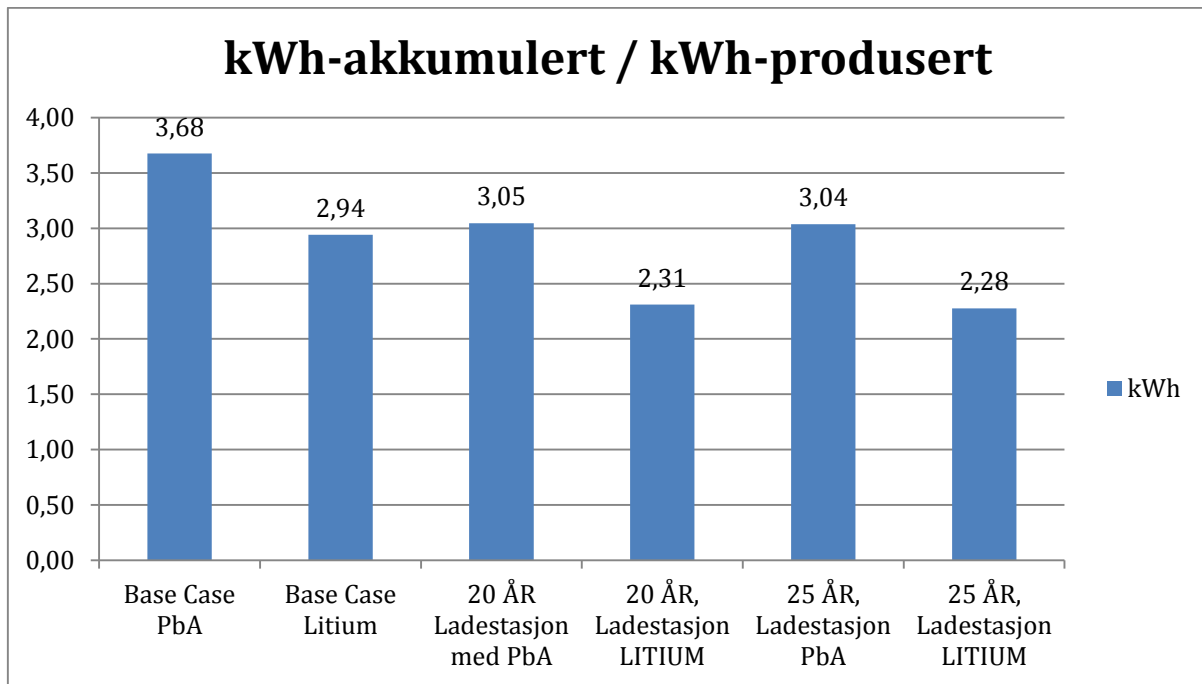
Figur 27 Akkumulert energiforbruk for batteriladestasjoner ved ulike krav til brukstid

Figur 27 viser akkumulert energiforbruk for en representativ batteriladestasjons livsløp ”fra vugge til og med bruk” ved ulik brukstid. Batteriladestasjoner med både bly og litium batterier er modellert. Ved forlenget brukstid, er den funksjonelle enheten fortsatt å ”levere 6,3kWh til 30 husstander” i henholdsvis 20 og 25 år.

Tabell 32 Estimert levert strømmengde batteriladestasjon

| | Batteriladestasjon | |
|-----------------------|--------------------|-------|
| Strømmengde/år | 189216 | Wh/år |
| 10 år | 1892,16 | kWh |
| 20 år | 3784,32 | kWh |
| 25 år | 4730,4 | kWh |

Denne estimeringen tar utgangspunkt i at strømleveransens flaskehals er hus-batteriene, og at batteriladestasjonene akkurat oppfyller den funksjonelle enheten. Estimert årlig strømleveranse på 189216 Wh/år. Strømmengdene blir brukt til å måle effektene av forskjellig levetid på systemene opp mot hverandre.



Figur 28 CED for batteriladestasjoner justert per kWh produsert ved ulike krav til brukstid

Figur 28 viser akkumulert energiforbruk per kWh levert, for en representativ batteriladestasjon med bly- eller litium-batterier.

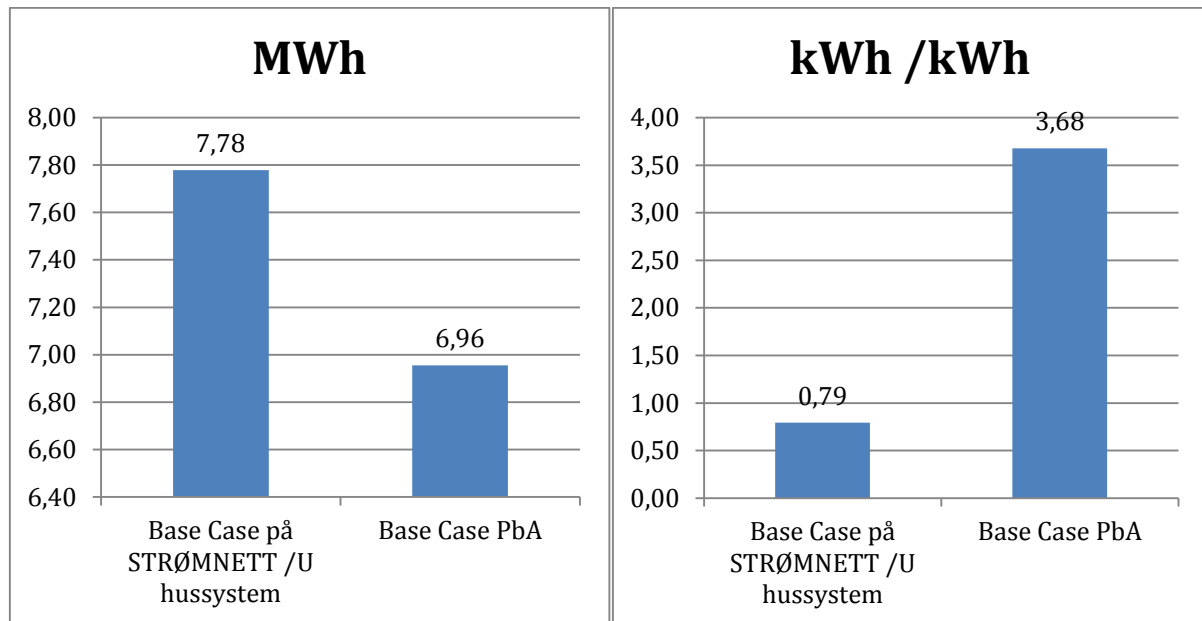
For å utforske hvordan en ”batteriladestasjon” ville prestert dersom den var tilkoblet et strømmnett, foretok jeg en modellering av et solcellesystem uten hus-batterier og batteriladere, alle komponenters livsløp fra vugge til og med bruk ble gitt 100% allokering.

For et teoretisk tilfelle der husstandene er direkte koblet på solcellesystemet og all produsert strøm blir levert til husstandene har jeg estimert følgende produsert strøm-mengde ved hjelp av nettbasert verktøy.

Tabell 33 Estimert strømproduksjon for PV system koblet til strømmettet

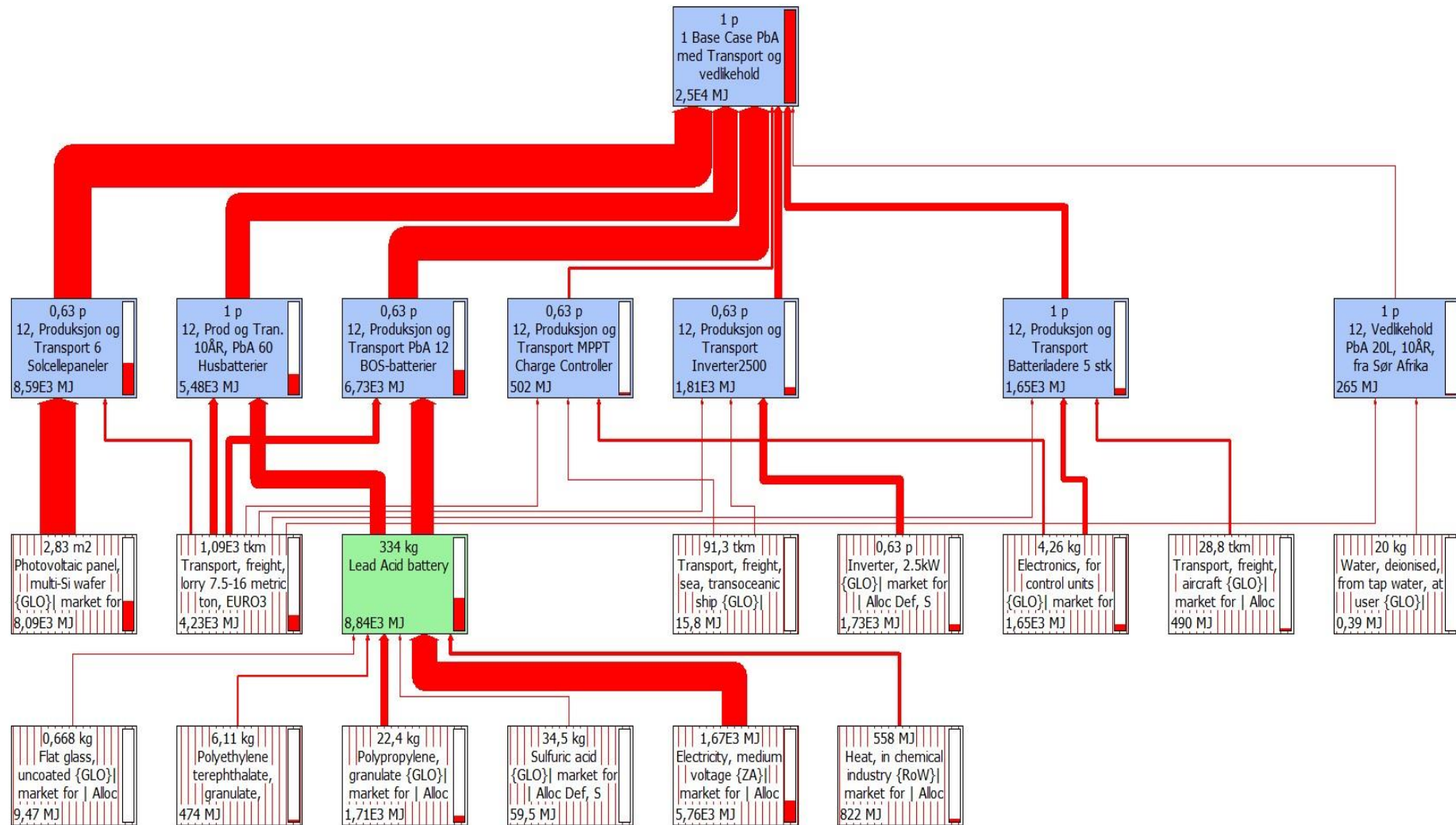
| Grid Connected | |
|----------------|-------|
| 982000 | Wh/år |
| 9820 | kWh |
| 19640 | kWh |
| 24550 | kWh |

Estimatet er gjort for et $600W_p$ solcelleanlegg som er koblet til strømmettet. Solcelleanlegget befinner seg i Nkhotakota og antar totalt 26,7% tap i solcellesystemet. For dette systemet er det ingen flaskehals (hus-batterier) i strømleveransen.



Figur 29 CED for system koblet til strømnett og basis case

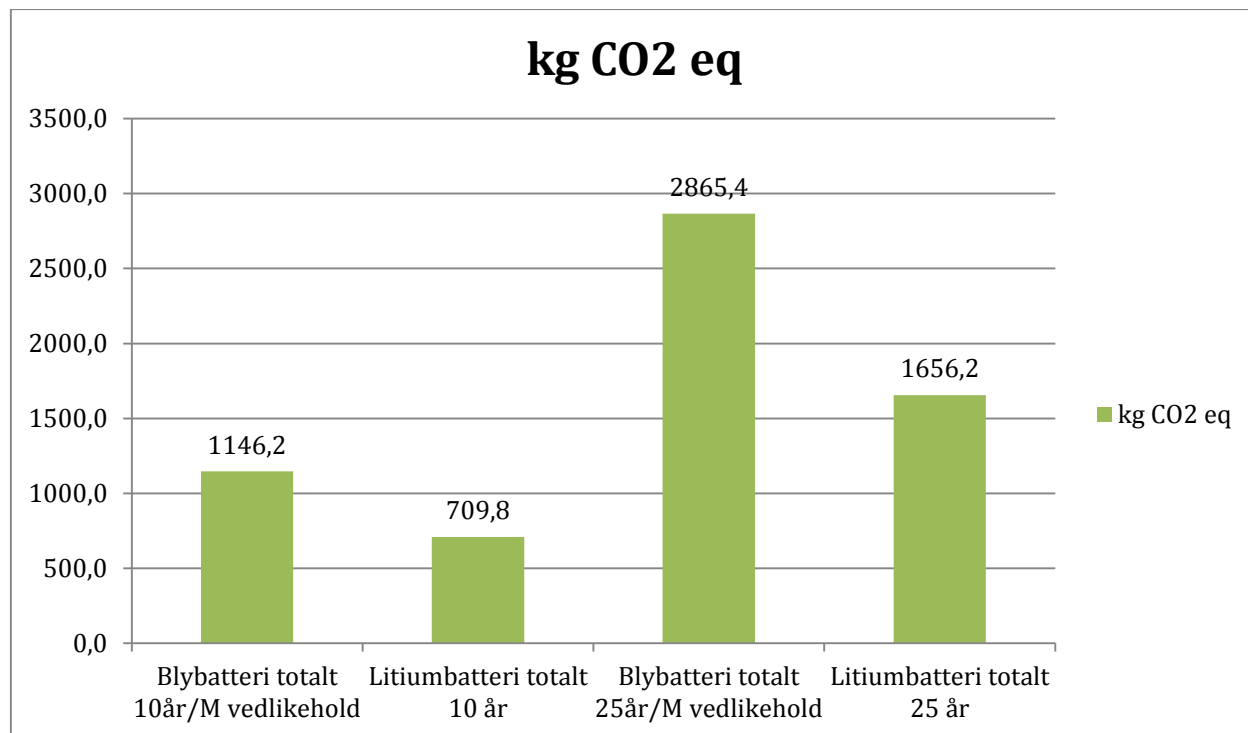
Figur 29 viser sammenlikningen med base case. Legg merke til at diagrammene har forskjellige enheter på y-aksen. "batteriladestasjonen" som er koblet til strømnettet har et høyere akkumulert energiforbruk enn basis case, til tross for at hus-batterier og batteriladere er utelatt. Dette skyldes at allokeringen for de gjenværende komponentene er 100%. Av resultatene kan vi se at bildet endrer seg når man ser på akkumulert energiforbruk per levert kWh.



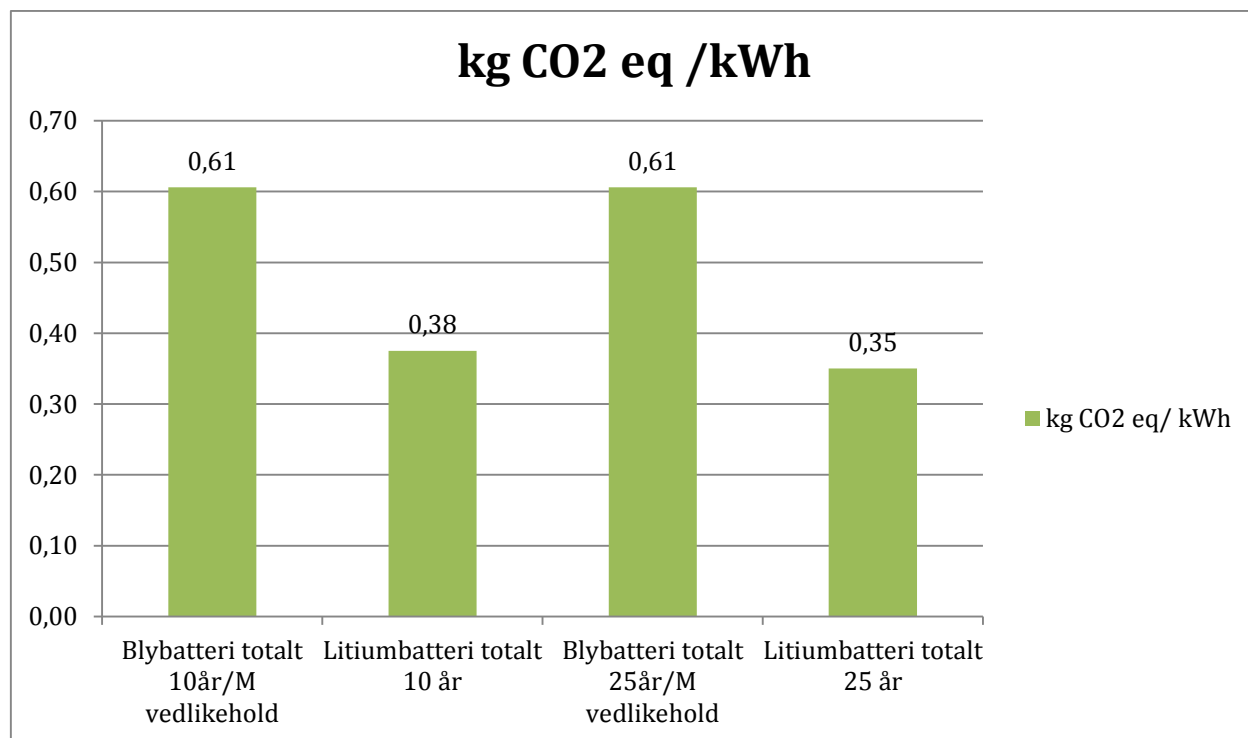
Figur 30 Akkumulert energiforbruk (CED) for representativ batteriladestasjon med blybatterier og 10 års brukstid

7.3 Resultater tilknyttet forskningsspørsmål 3

Figurene under viser totale bidrag sammenlagt for BOS- og hus-batterier.



Figur 31 kg CO2 ekvivalenter for produksjon, transport og vedlikehold av batterier (BOS+ hus-batterier)

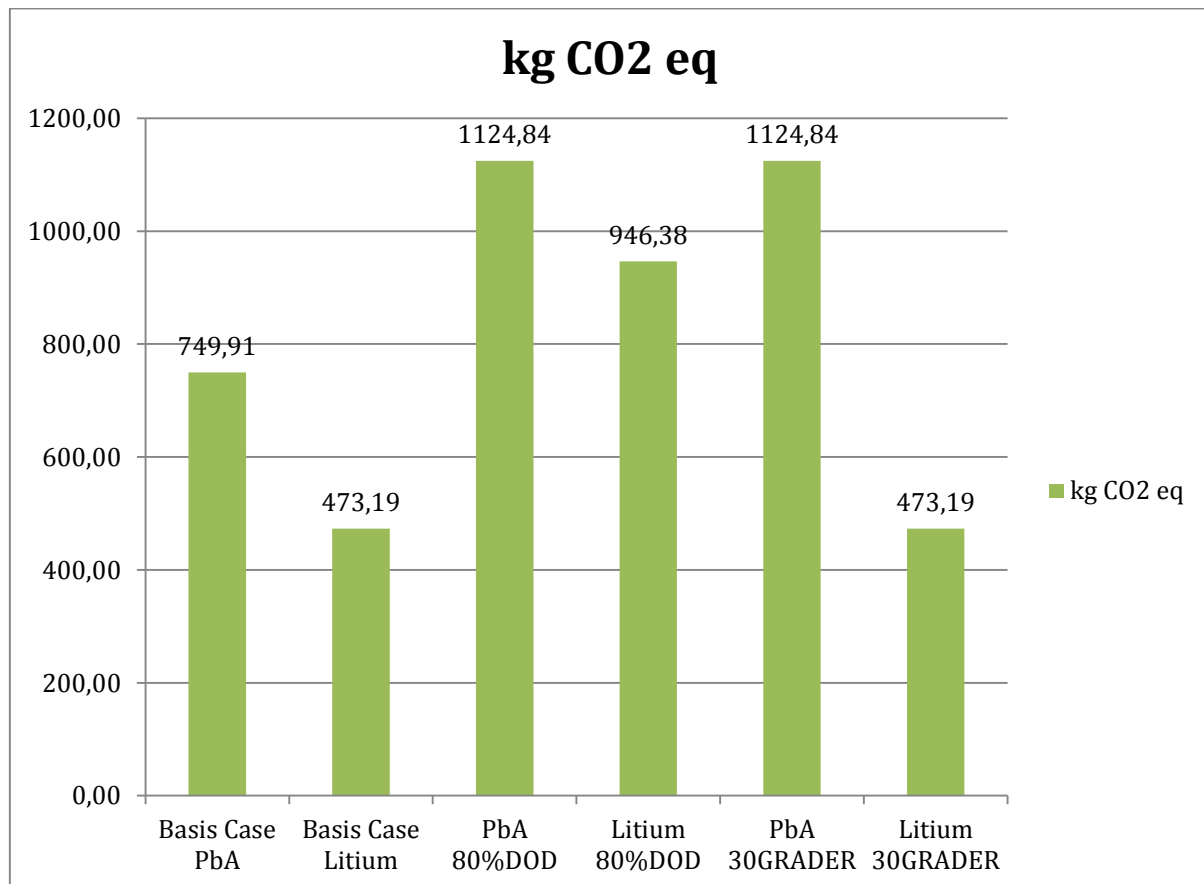


Figur 32 kg CO2 ekvivalenter per kWh levert. Inkluderer produksjon, transport og vedlikehold av alle batterier (BOS + hus-batterier).

For sensitivitetsanalyse ble det modellert scenarier der BOS-batterienes ble modellert for økt i dypde på ladesykler og økt temperatur.

I tillegg til basis case (60%DOD , 25°C og 10 års bruk) viser figuren begge batteritypene ved to scenarier;

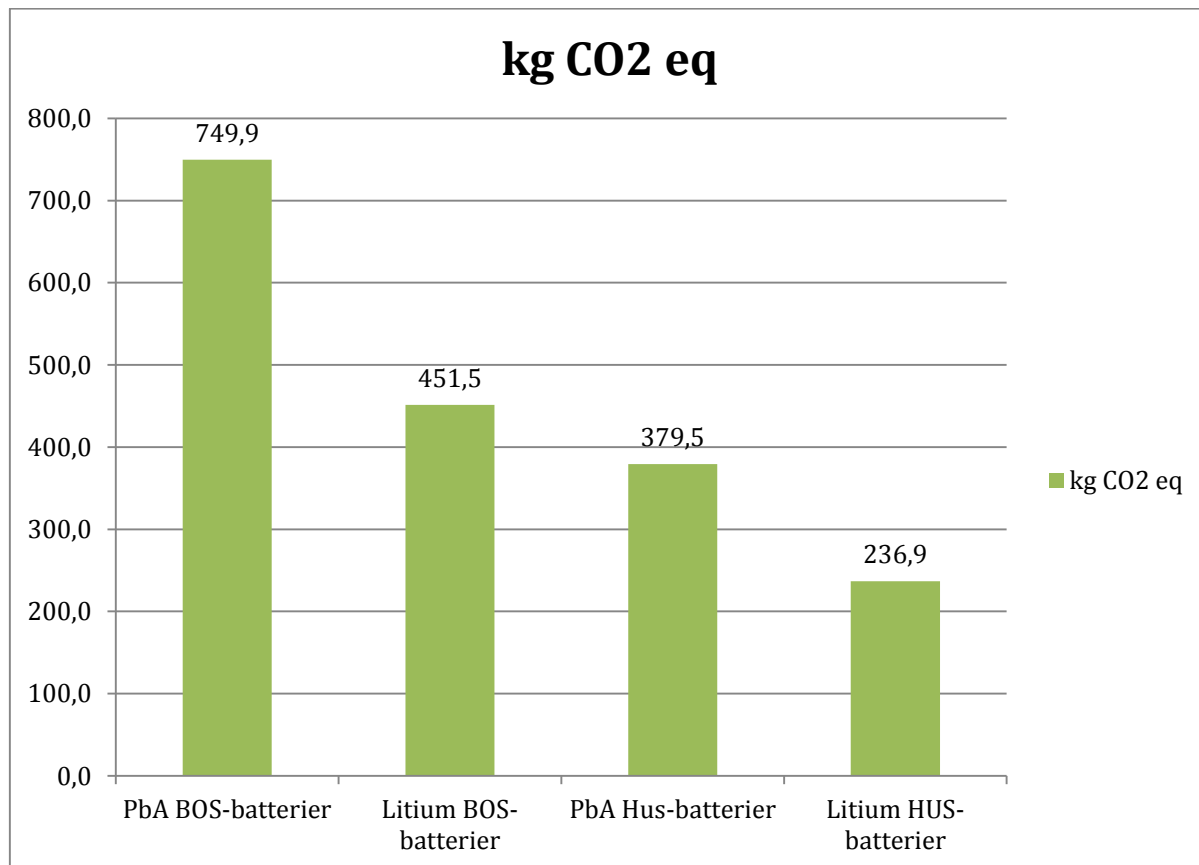
- Utladningsdybden er 80%, temperatur som basis caset.
- Temperaturen er 30°C, utladningsdybde som basis caset.



Figur 33 kg CO2-ekvivalenter for BOS-batterier ved 80% DOD og 30°C

Årsaken til de ulike effektutslagene er at utladningsdybde og temperatur kan endre batterienes levetid. Når dette er tilfelle, endres referansestrømmen og dermed utslag i effektkategori.

Et scenario ble modellert der batteriteknologiernes transportrute var identisk. Resultatene viser utslipp av kg CO₂-ekvivalenter fra de ulike batteriene dersom de blir transportert fra samme fabrikk som blybatteriene (fra Cape town for hus-batterier og fra Johannesburg for BOS-batterier). Diagrammene skal på den måten gi et rettferdig sammenlikningsgrunnlag for batteriteknologi.



Figur 34 kg CO₂-ekvivalenter for BOS- og hus- batterier, forutsatt lik transportrute

Figur 34 gjelder for produksjon, transport og bruk av BOS- og hus-batterier av bly- eller litium- teknologi.

8 LIVSLØPSTOLKNING OG RESULTATDRØFTING

I denne seksjonen tolkes resultatene fra livsløpsregnskapet og livsløpseffektvurderingen. Det fokuseres på akkumulert energiforbruk, ”potensiale for global oppvarming” og ”potensiale for menneskelig forgiftning”. Hver av de fire forskningsspørsmålene fra avsnitt 1.6 blir drøftet etter tur.

8.1 Forskningsspørsmål 1

I denne seksjonen diskuteres utslipp av kg CO₂-ekvivalenter og kg 1,4-DB-ekvivalenter tilknyttet ”basis case” for batteriladestasjoner, altså batteriladestasjoners livsløp ”fra vugge til og med bruk” med blybatteriteknologi, slik de står oppført i Nkhotakota i dag, og med antatt brukstid på 10 år.

Batteriladestasjonens livsløp ”fra vugge til og med bruk” måler totalt en indikatorverdi på 1786,2 kg CO₂-ekvivalenter i kategorien ”potensiale for global oppvarming”. For å forstå om dette er et stort eller lite utslipp er til sammenlikning utslippet fra bruk av en norskregistrert bensinbil uten hybrid plug-in, 117 gram CO₂-ekvivalenter per kilometer, ifølge opplysningsrådet for veitrafikken AS. En bensinbil i Norge kan kjøre 8,547 km per kg utslipp av kg CO₂-ekvivalenter. Utslippet av kg CO₂-ekvivalenter tilknyttet livsløpet til basis case tilsvarer et utslipp fra en norskregistrert bensinbil som kjører 15266,6km. Selv om persontransport i Norge ikke fyller samme funksjon som leveranse av strøm til husstander i Malawi, er denne sammenlikningen med på å sette utslippet i perspektiv. Ifølge statistisk sentralbyrå kjørte norske bensinbiler (personbil) omlag 12000 km i snitt i 2014 (Statistisk sentralbyrå 2016). Totalutslippet av kg CO₂-ekvivalenter fra strømleveranse til 30 husstander i 10 år på landsbygda i Malawi, er omtrent det samme som det gjennomsnittlige utslippet kg CO₂-ekvivalenter fra litt over et år bruk av bensinbil i Norge. At 30 husstander har mulighet for belysning etter solnedgang (ca. klokken 18) og kan lade opp mobiltelefon har nok større implikasjoner for samlet livskvalitet, enn bruk av en personbil i Norge i overkant av et år. Selv om nytteverdi er vanskelig å kvantifisere, har nok batteriladestasjoner i Malawi et relativt lavt utslipp kg CO₂-ekvivalenter per nytte-enhet sammenliknet med bilkjøring i Norge.

Fra figur 23 ser vi at de største CO₂-utslippene kommer fra produksjon av blybatterier og solcellepaneler med henholdsvis 638 og 600 kg CO₂-ekvivalenter. Årsaken til dette er at produksjon av blybatterier og produksjon av multikrystallinske solcellepaneler (siemensprosessen) er energikrevende. Til sammen står transportfasen står totalt for 301,2 kg CO₂-ekvivalenter, transportfasen diskuteres nærmere nedenfor. Produksjon av inverter, MPPT og batteriladere står til sammen for utslipp av 247 kg CO₂-ekvivalenter.

I effektkategori ”potensiale for menneskelig forgiftning” er bildet litt annerledes. Fra figur 24 ser vi at batteriladestasjonens livsløp ”fra vugge til og med bruk” måler en indikatorverdi på 2296,4 kg 1,4-DB-ekvivalenter. Det største bidraget kommer fra produksjon av inverteren (999 kg 1,4-DB-ekvivalenter). Biraget fra inverteren er i stor grad knyttet til utslipp av

mangan og arsen til vann. Mangan brukes til legering av stål og kan i store doser kan gi nerverelaterte sykdommer (O'Neal and Zheng 2015). Arsen brukes i til legering av halvledere i elektronikk. Eksponering av høye doser kan føre til akutt arsenforgiftning. Ved arsenforgiftning forstyrres cellenes energiproduksjon, dette kan medføre kroniske helseplager og mulig død (Ratnaik 2003).

Bidragene fra produksjon solcellepaneler, batteriladere og MPPT er også hovedsaklig knyttet til utslipp av disse stoffene. Det er vanskelig å være sikker på hvorvidt utslippene blir tatt opp i næringskjeden eller ikke, da dette blant annet avhenger av fabrikkens nærhet til drikkevannskilder. Dette kan undersøkes nærmere.

Transportfasen (figur 25) gir et betydelig bidrag til energiforbruket og utslipp av kg CO₂-ekvivalenter for basis case. I effektkategorien "potensiale for global oppvarming" står transportfasen for ca. 16,9% av totalt utslipp av kg CO₂-ekvivalenter.

For en batteriladestasjon med litiumbatterier har transportfasen mindre å si for denne effektkategorien. Dersom litiumbatterier benyttes, synker CO₂-utslipp fra transportfasen fra 301,2 til 132,5 kg CO₂-ekvivalenter, og transportfasens totale andel i effektkategorien "potensiale for global oppvarming" reduseres til ca. 9,9%.

Hovedårsaken til at transportfasen har mindre betydning for batteriladestasjoner med litiumbatterier enn for batteriladestasjoner med blybatterier, er batteriteknologienes forskjell i spesifikk energi (Wh/kg). Fordi blybatterier er tunge relativt til litiumbatterier forbrukes mer drivstoff ved transport av blybatterier.

For basis case er transportrutene forskjellige for litium- og bly-batterier. Blybatteriene blir fraktet med lastebil fra Cape Town og Johannesburg, mens litiumbatteriene er antatt produsert i Beijing og transportert med skip til Durban og derfra med lastebil til Nkhotakota. Dette har innvirkning på karbonavtrykket.

Energiforbruket ved transport av 1000 kg, 1 kilometer med lasteskip er ifølge data fra Ecoinvent 0,174MJ, mens forbruket er 3,67MJ og 17MJ for henholdsvis lastebil og lastefly. Dette forteller oss at transport over store avstander helst bør gjøres med skip, dersom det er mulig. Dersom transportrutene med lasteskip er mindre enn 21 ganger den ekstra transportrutene med lastebil (fratrasket lastebiltransport fra fabrikk til avgangshavn og fra ankomsthavn til destinasjon), vil transport med skip føre til et lavere energiforbruk og med det lavere utslipp av kg CO₂-ekvivalenter.

Fordi transportmidler gjerne benytter energi fra fossile energikilder, medfører som regel økt energiforbruk ved transport, et økt utslipp av kg CO₂-ekvivalenter.

Batteriladene ble transportert med fly og gir derfor et uforholdsmessig stort (i forhold til masse) utslipp av kg CO₂-ekvivalenter.

Under feltarbeidet gikk frem at bruk av primærbatterier koblet til LED-lys, er det eneste reelle alternativet til belysning for innbyggerne i Nkhotakota i dag. For å gi en grov sammenlikning med batteriladestasjoner, ble livsløp fra vugge til og med bruk av primærbatterier i 10 år, modellert. Selv om primærbatterier ikke fullt ut tilfredsstiller batteriladestasjoners funksjon, er primærbatteriernes referansestrøm regnet ut fra at de skal levere samme strømmenge til

husstandene som batteriladestasjonene. Resultatene fra modelleringen av livsløp ”fra vugge til og med bruk” av primærbatterier er sammenstilt i figur 26. Både akkumulert strømforbruk, karbonavtrykk og potensiale for menneskelig forgiftning er langt større ved bruk av primærbatterier, enn bruk av batteriladestasjoner. Karbonavtrykket fra primærbatteriers livsløp er i snitt 16,22 kg CO₂-ekvivalenter hver dag i 10 år. Dette tilsvarer ca. 33 ganger utslippet fra basis case. Batteriladestasjoners CO₂-tilbakebetalingstid kan måles som tiden det tar frem til forhindret utslipp fra primærbatterier tilsvarer totalt utslipp fra basis case. For basis case er CO₂-tilbakebetalingstiden 110 dager, målt mot primærbatteriers livsløp.

Engangsbatterienes livsløp slipper ut 20806,4 kg 1,4-DB-ekvivalenter, som er omtrent 9 ganger utslippet fra basis case. På samme måte som for CO₂, bergenes batteriladestasjoners tilbakebetalingstid av kg 1,4-DB-ekvivalenter til ca. 403 dager.

8.2 Forskningsspørsmål 2

Fra figur 30 ser vi at det er de samme komponentene som gir de største bidragene til akkumulert energiforbruk som til ”potensiale for global oppvarming” (figur 23). Årsaken er at disse komponentenes massestrømmer utgjør en stor andel av batteriladestasjonens totale massestrømmer, og med det mengde produsert og transportert. Fordi det i produksjon av blybatterier og solcellepaneler benyttes mye energi, som i stor grad kommer fra ikke-fornybare energikilder, bidrar energiforbruket ved produksjon til global oppvarming. Derfor er det for batteriladestasjoner en korrelasjon mellom akkumulert energiforbruk og utslipp av kg CO₂-ekvivalenter.

Akkumulert energiforbruk for batteriladestasjonen med blybatterier og ti års brukstid er 6,96MWh. Siden hus-batteriene er en flaskehals for batteriladestasjonens strømleveranse, blir kun 1,892MWh til husstandene i løpet av brukstiden. Denne flaskehalsen gjør at akkumulert energiforbruk aldri blir tjent opp igjen og energi-tilbakebetalingstiden er lenger enn batteriladestasjonens brukstid. Dette gir en netto energi ratio på 27,2%. Dersom kundemassen holdes konstant på 30 hus-batterier per batteriladestasjon, vil ikke batteriladestasjonen tjene inn mer enn 27,2% av energimengden som forbrukes gjennom livsløpet, derfor kan batteriladestasjoner slik de er i dag, ikke regnes som en fornybar energikilde.

Et alternativt scenario ble modellert for å utforske hvordan en batteriladestasjon kunne prestert dersom den leverte strøm direkte til strømmettet, istedenfor via hus-batterier. Modellen i dette scenariet var uten hus-batterier og batteriladere og med 100% allokering til solcellepaneler, BOS-komponenter og BOS-batterier. Resultatet fra dette scenariet er presentert i figur 29. Dette scenariet har en CED 7,78MWh (noe høyere enn for basis case), men siden energisystemet ikke lenger har flaskehals i strøm-leveransen (ser bort fra tap i strømmettet), kan det levere 9,82MWh på ti år. Det modellerte scenariet har en estimert energi-tilbakebetalingstid på ca. 7,9 år. Dette er i henhold til litteraturen, som anslår energi-tilbakebetalingstid fra 2,5 til 13år (Rydh and Sandén 2005a). Energisystemet kan etter definisjonen om levetid lenger enn energitilbakebetalingstiden, defineres som fornybart.

Denne definisjonen av ”fornybar energikilde” skiller ikke mellom energi med høyere eller lavere grad av entropi, siden batteriladestasjoner produserer energi i form av elektrisitet, mens det for eksempel i produksjonen av noen komponenter brukes energi i form av varme, kan energi-tilbakebetalingsperspektivet virke urimelig.

Energi-tilbakebetalingstid sier ikke noe om hvor i systemets livsløp energiforbruket skjer. Dette er et viktig poeng, siden strømlevering på landsbygda i Malawi vil kreve at et hvert energisystem eller energibærer transporteres over store avstander. Det er også vanskelig å sammenlikne strømforbruk i et annet land der tilgangen på elektrisitet er god, med forholdene på landsbygda i Malawi, hvor det er knapphet på elektrisitet.

Batteriladestasjonene er i utgangspunktet overdimensjonert, tanken var at lokale bedrifter skulle kunne koble seg på batteriladestasjonen i et mini-strømnettverk. Dersom strøm ble distribuert på denne måten i praksis, slik at større strømmengde ble levert, ville det bedret netto energi ratio. Utslipp av kg CO₂-ekvivalenter og kg 1,4-DB-ekvivalenter per kWh levert vil også kunne reduseres. Energisystemet kunne levere mer nyttbar energi per miljøbelastning. Dersom elektrisitet ble distribuert ved et mini-strømnett istedenfor ved hus-batterier, ville det ikke vært behov for å bytte ut komponenter så ofte. Færre komponenter med lav levetid, betyr færre innkjøp av komponenter fra utlandet (utenfor Malawi), som igjen betyr at prosjektet vil bli mindre sårbart for negativ utvikling i valutakurser.

Antakelsen om batteriladestasjonens brukstid er usikker. Derfor ble det foretatt sensitivitetsanalyser der antakelsen om brukstid ble omgjort til 20 og 25 år. Resultatene er presentert i figur 27 og 28. I utgangspunktet er akkumulert energiforbruk for en batteriladestasjon med blybatterier 6,96 MWh over 10 år. I scenarier der antakelsen om brukstid ble omgjort til 20 og 25 år, øker akkumulert energiforbruk med henholdsvis 65,6% og 106,3% for batteriladestasjoner med blybatterier.

Dersom antakelsen om levert årlig strømmengde holder uavhengig av om brukstiden endres, betyr det at akkumulert energiforbruk for basis case med blybatterier er 3,68 kWh per kWh levert. Dersom brukstiden økes til 20 og 25 år synker akkumulert energiforbruk per kWh levert med 17,1% og 17,4% med utgangspunkt i basis case med blybatterier.

At akkumulert energiforbruk øker i med brukstiden, men synker relativt til den leverte strømmengden, skyldes antakelser om komponentenes levetid. Produksjon og transport av solcellepaneler, bidrar alene med 34% av akkumulert energiforbruk for basis caset (ti år). Med antatt levetid for solceller på 25 år, behøver ikke solcellepanelene å byttes ut, dermed synker det relative akkumulerte energiforbruket.

Generelt kan man si at netto energi ratio for batteriladestasjoner øker i takt med økt brukstid.

Dersom man erstatter blybatterier med litiumbatterier for både BOS- og hus-batteriene, vil akkumulert energiforbruk for batteriladestasjon synke med ca. 20%, 24,1% og 25% ved brukstid på henholdsvis 10-, 20- og 25 år. Disse resultatene indikerer at litiumbatterier kan være et godt valg, dersom man ønsker å begrense bidrag til global oppvarming. Valg av batteriteknologi vil bli diskutert nærmere i avsnitt 8.3.

8.3 Forskningsspørsmål 3

Batteriladestasjoner slik de står oppført i Nkhotakota i dag har blybatterier både for BOS- og hus-batteriene. Under feltoppholdet ble vi gjort oppmerksom på at Kumudzi Kuwale vurderte å gå til innkjøp av litiumbatterier, ved bygging av nye batteriladestasjoner eller utskiftning av blybatterier. Litiumbatteriene skulle handles fra Kina.

I avsnitt 8.2 ble kunne man se at batteriladestasjoner med litiumbatterier kom bedre ut enn batteriladestasjoner med blybatterier når det kom til utslipp av CO₂-ekvivalenter og at forskjellene økte med økt brukstid.

For å se nærmere på effekten fra ulik batteriteknologi over tid, ble livsløp ”fra vugge til og med bruk” modellert for begge batteriteknologier. Resultatene ble presentert i avsnitt 7.3.

Per kWh levert bidro blybatterier totalt med 0,61 kg CO₂-ekvivalenter uavhengig av brukstid. Til sammenlikning bidro litiumbatterier totalt med 0,38 kg CO₂-ekvivalenter per kWh ved 10 års brukstid og 0,35 kg CO₂-ekvivalenter per kWh ved 25 års brukstid. At litiumbatterier kommer best ut i effektkategorien ”potensiale for global oppvarming” skyldes lenger levetid og lavere vekt.

For å gjøre sammenlikningen av batteriteknologi så rettferdig som mulig, ble livsløp ”fra vugge til og med bruk” med identisk transportrute og ti års brukstid, modellert for begge batteriteknologiene. BOS-batterier med litiumteknologi har 39,8% lavere utslipp av kg CO₂-ekvivalenter enn BOS-blybatterier. For hus-batterier er utslippet 37,6% lavere for litiumbatterier enn blybatterier. Dette forteller oss at bruk av litiumbatterier gir et lavere CO₂-utslipp enn blybatterier og at forskjellene øker med tiden. At litiumbatterier har et lavere karbonavtrykk enn blybatterier, er i tråd med forskning på batterier til elbiler (Hammond and Hazeldine 2015).

Fordi litiumbatterier har høyere spesifikk energikapasitet enn blybatterier, er litiumbatteriene lettere og har derfor et mindre karbonavtrykk under like transportforhold. CO₂-utslipp knyttet til transport av litium-BOS-batterier reduseres med ca. 4,5% dersom batteriene produseres i Sør-Afrika istedenfor Kina. En annen fordel som ikke er tatt høyde for under modellering, er knyttet til raskere leveringstid ved transport fra Sør-Afrika. Fordi batterier eldes, er kortere tid fra produksjon til bruk å foretrekke, dermed maksimeres batterienes faktiske brukstid.

Høyere utladningsdybde og temperatur endrer batteriers levetid forskjellig, avhengig av batteritype. For å undersøke effekter av dette ble livsløp ”fra vugge til og med bruk” for BOS-litium- og BOS-bly-batterier modellert ved 80% DOD og ved 30°C. Resultatene som er presentert i figur 33, viser at dypere ladesykler påvirker levetiden negativt både for blybatterier og litiumbatterier. En økning av fra 60 til 80 prosents dybde på ladesykler medfører 50% økning i CO₂-utslipp for BOS-blybatterier. For BOS-litiumbatterier medfører dypere ladesykler 100% økning i utslipp av kg CO₂-ekvivalenter. Siden BOS-litiumbatteriers livsløp i utgangspunktet gir utslipp på 473,19 kg CO₂-ekvivalenter ved ti års brukstid og BOS-blybatteriers livsløp gir 749,91 kg CO₂-ekvivalenter ved samme brukstid, slipper likevel litiumbatteriene ut ca. 15,8% mindre kg CO₂-ekvivalenter enn blybatteriene ved dypere ladesykler.

Temperaturøkning til 30°C senket levetiden til BOS-blybatterier til 4,3 år. Levetiden til BOS-litiumbatterier ble senket til 9,9 år. Det ble derfor antatt at det ikke var nødvendig å bytte ut BOS-litiumbatteriene i løpet av 10 års brukstid, men at BOS-blybatterier behøver tre sett for å dekke brukstiden på 10 år. Dette medfører at BOS-litiumbatteriers livsløp forutsatt 10 års brukstid gir ca. 58% lavere utslipp av kg CO₂-ekvivalenter ved 30°C, enn BOS-blybatterier. Resultatene for ladesykler av BOS-batterier er ikke direkte overførbare til hus-batterier, siden hus-batteriene ikke har daglige ladesykler. Resultatene for høyere temperaturer er nok i større grad overførbare til hus-batterier. Litiumbatteriene presterer bedre enn blybatterier i høye temperaturer. Temperaturer i Nkhotakota kan komme over 30°C enkelte ganger i løpet av et år. I hvilken grad uregelmessige temperaturopper påvirker batterilevetiden er usikkert, men det er rimelig å anta at endringen i levetid for litiumbatterier vil være mindre enn endringen i levetid for blybatterier.

Litiumbatteriers livsløp ”fra vugge til og med bruk” medfører et lavere karbonavtrykk enn blybatterier for basis case i tillegg til scenarier for økt brukstid, høyere temperatur og dypere ladesykler. Det er likevel interessant å se hvilken teknologi som kommer best ut i forhold til pris. Prisen for hus-batterier antas å være 3USD/stk. og 4,5USD/stk. for henholdsvis bly- og litium-batterier (ikke medregnet transportkostnader). Hvis man sammenlikner teknologiene for scenariet der transportruten er lik (figur 34), og justerer for prisforskjellen, kommer fortsatt litiumbatteriene best ut, selv om forskjellene utjevnes.

Per dollar mer brukt på litiumbatterier enn på blybatterier, reduseres utslippet med 3,16 kg CO₂-ekvivalenter fra vugge til og med bruk. Hvorvidt investering i litiumbatterier ved nybygging av batteriladestasjoner er optimal miljøøkonomi avhenger av hvilke alternative miljøtiltak som kan foretas, prisen på disse, og nybyggingens totale budsjettamme. Et eksempel på et alternativt miljøtiltak er å organisere avfallshåndtering når komponentene slutter å virke. Dette diskuteres i avsnitt 8.4.

8.4 Forskningsspørsmål 4

Avfallshåndteringen ble utelatt fra modellering av batteriladestasjonens livsløp. Under feltoppholdet fant jeg ingen systematisk avfallsbehandling fra myndighetenes side. I dette avsnittet skal jeg diskutere alternativer til avfallshåndtering for batteriladestasjonens komponenter.

Multikrystallinske solcellepaneler har lang levetid, relativt til batteriladestasjonens andre komponenter. Selv etter 25 år, er det rimelig å anta at panelene fortsetter å produsere elektrisitet, selv om effektiviteten kan synke. Dersom batteriladestasjoner ikke lenger benyttes, vil nok solcellepanelene finne veien til lokale markeder og gjenbrukes. Dersom det er ønskelig, kan krystallinske solcellepaneler gjenvinnes. Det er mulig å gjenvinne over 84% av massen, i hovedsak glass, plastikk og metall (Waste management world 2016).

Elektronikk som MPPT, inverter og batteriladere finner sannsynligvis veien til lokale markeder, enten ved at de repareres og selges, eller ved at komponentene blir demontert og solgt del for del. Dumping av el-avfall er et økende problem i Afrika. Elektronisk avfall

inneholder ofte miljø- og helseskadelige stoffer, som vil lekke til naturen, dersom avfallet dumpes. Det er derfor viktig å være sikker på at det elektroniske avfallet blir håndtert så godt som mulig. Siden det ikke finnes systematisk håndtering av elektronisk avfall i Malawi, kan elektronikk samles opp og transpores til WEEE center (waste of electric and electronic equipment) i Nairobi i Kenya. Her tas avfallet fra hverandre og sorteres for videre behandling. Blant annet kan gjenvinning av jern og aluminium medføre en energibesparelse på henholdsvis 75% og 95% (Loop 2016).

Hva som vil skje med sekundærbatterier når de slutter å fungere, er også uvisst. I felt ble jeg gjort oppmerksom på at ”friske” battericeller fra flere døde bilbatterier ble satt sammen til et ”friskt” bilbatteri, for å forlenge levetiden. Til slutt vil også disse slutte å virke.

Det er viktig å sørge for at blybatterier ikke kastes i naturen eller brennes, fordi de inneholder flere helse- og miljø-skadelige stoffer, som blant annet svovelsyre, bly og antimon.

Blybatterier kan gjenvinnes hos produsent. Opp til 95% av batterimassen kan gjenvinnes og estimerer om energibesparelsen varierer fra 4,4 til 28,4 MJ / kg batterimasse (Sullivan and Gaines 2012).

Litiumbatterier kan i teorien resirkuleres, men fordi batteriteknologien er relativt ung og fortsatt i endring, sliter bransjen med lønnsomheten ved resirkulering av litiumbatterier. Dette blir derfor ofte ikke gjort i praksis. Litiumbatterier inneholder mindre helse- og miljø-skadelige stoffer enn blybatterier, men kan være brannfarlige dersom de kommer i kontakt med vann. Litiumbatteriers sluttlev, er ikke fullt ut forstått fra et livsløpsperspektiv og bør i fremtiden undersøkes nærmere (Sullivan and Gaines 2012).

9 PROSESSEVALUERING

Mastergradsarbeidet ble innledet med feltarbeid. Tre uker i Malawi var tilstrekkelig, men også nødvendig fordi ting tok lenger tid enn de ville gjort her hjemme. Dette var også forventet. Jeg startet å skrive på innledningen om lag en uke etter jeg hadde planlagt, fordi jeg hadde behov for å samle tankene etter feltarbeidet. Dette medførte at arbeidet med de påfølgende delene også ble forskjøvet. Under oppholdet i Malawi fikk jeg et godt innblikk i operativt bistandsarbeid, kultur, leveforhold og lokal problematikk. Retrospekt skulle jeg gjerne hatt mulighet til å gjøre en litt større litteraturstudie på tidligere forskning, likevel synes jeg den ble dekkende. Dersom jeg kunne foretatt litteraturstudie før feltarbeidet, ville det forenklet arbeidet i felt. Det var av praktiske årsaker ikke mulig å flytte på feltarbeidet.

Under arbeidet med oppgaven har jeg også tilegnet meg kunnskap om hvordan solcellesystemer fungerer og hvordan solceller og batterier produseres. Jeg har lært å gjøre livsløpsvurderinger av energisystemer i praksis, og økt forståelsen av bredden i livsløpsvurderinger. Det var mer tidkrevende enn planlagt å foreta modellering i SimaPro, hovedsakelig fordi det tok tid å lære å bruke programmet. Selve oppgaveskrivingen har lært meg om disposisjon, klarhet og avgrensning.

Jeg ønsker å peke på følgende usikkerhetsmomenter og styrker ved livsløpsvurderingen:

- Livsløpsvurderingen av batteriladestasjonen i Malawi er ment å være en screeningundersøkelse. Resultatene er basert på data fra Ecoinvent og gjelder derfor ikke spesifikt for noen av komponentenes merker. For eksempel er det ikke ”Deltec” hus-batterier som er undersøkt med produksjonsdata fra Deltecs fabrikker, men generelle data for produksjon av blybatterier.
- Denne undersøkelsen har benyttet modellerings-data fra ulike kilder for blybatterier, litiumbatterier og primærbatterier, dette svekker sammenlikningsgrunnlaget dem imellom. Årsaken til at ulike datasett ble benyttet var mangel på data i Ecoinvent databasen, best tilgjengelig data fra litteraturen ble derfor benyttet til å modellere produksjon av blybatterier og primærbatterier.
- Ved beregning av referansestrøm for primærbatterier, ble det satt krav til at disse skulle oppfylle den funksjonelle enheten, selv om bruken av disse i realiteten avviker fra bruken av hus-batterier. Primærbatteriene blir i realiteten kun benyttet til belysning, mens hus-batteriene gjerne også lader opp mobiltelefoner og annen småelektronikk. Spenningen i primærbatteriene er forskjellig fra sekundærbatteriene. Jeg mener likevel sammenlikningen er relevant fordi primærbatterier er det eneste reelle alternativet til belysning. Sammenlikningen gir et bilde av i hvilken grad utslipp tilknyttet batteriladestasjoner er store eller små.
- Det er en styrke ved oppgaven at ReCiPe-midpoint kategorien ”potensiale for global oppvarming” ble undersøkt. Denne midpointkategorien er godt forankret i vitenskap. CED er også godt forstått, og gir et riktig bilde av energiforbruket gjennom livsløpet.

- Ved modellering av BOS-komponentene er litteraturen mangelfull, her ble det foretatt forenklinger for batteriladere og MPPT.
- Det er knyttet usikkerhet til antakelsene om komponentenes levetid og batteriladestasjonens brukstid, her er beste estimater benyttet, i samråd med tidligere leder av bistandsprosjektet, i henhold til kvalitetssikringen.
- Det kan være en utfordring i livsløpsvurderinger å sammenlikne resultater, fordi det gjerne er snakk om potensielle miljø- og/eller helse- effekter, og ikke faktiske målbare effekter. Utfordringer er også knyttet til geografi, da det kan være vanskelig å sammenlikne eller vekte potensielle effekter av utslipp som skjer på ulike geografiske lokasjoner.
- Indikatoren i effektkategorien ”potensiale for menneskelig forgiftning” er vanskelig å måle vitenskapelig, det er for mange ulike mekanismer som fører til forskjellige sykdommer og sykdomsgrupper og man vet for lite om kausalitet og kvantitative virkninger av ulike substanser. I tillegg erkjennes det at man ikke vet nok om effekter av å bli utsatt for en kombinasjon av ulike substanser (Grahl 2014). Jeg mener det likevel er en styrke at denne kategorien er undersøkt, fordi det viser at noen komponenter kan være relativt miljøvennlig med tanke på global oppvarming, og samtidig være tilknyttet utslipp av giftige stoffer for mennesker. Eksempel på dette er BOS-komponentene.

10 KONKLUSJON

Kumudzi Kuwales batteriladestasjoner er en miljøvennlig løsning for å distribuere elektrisitet på landsbygda i Malawi, relativt til primærbatterier, som i dag er det eneste reelle alternativet. Fra et energitilbakebetalingsperspektiv, kan batteriladestasjoner likevel ikke regnes som fornybare energisystemer.

10.1 Resultater

- Samlet utslipp ”fra vugge til og med bruk” for en representativ batteriladestasjon er 1786,2 kg CO₂-ekvivalenter og 2296,4 kg 1,4DB-ekvivalenter.
- Det største karbonavtrykket kommer fra produksjon av blybatterier og multikrystallinske solcellepaneler. Produksjon av multikrystallinske solcellepaneler og inverter medfører størst utslipp av helseskadelige substanser.
- Transportfasen står for 16,9% av totalt utslipp av kg CO₂-ekvivalenter. Transport av batterier med lastebil fra Cape Town og Johannesburg, gir et marginalt lavere karbonavtrykk enn transport med skip fra Kina til Durban og lastebil Nkhotakota.
- Batteriladestasjoner kan ikke regnes som fornybar energikilde, fordi energiforbruket knyttet til batteriladestasjoners livsløp, er større enn mengden energi de leverer gjennom sin levetid. Dersom batteriladestasjoner distribuerer all potensiell produsert energi, vil den kunne regnes som fornybar, med en energitilbakebetalingstid på 7,9 år og levetid på 10 år. Netto energiratio øker i takt med økt brukstid.
- Bruk av litiumbatterier i nye batteriladestasjoner medfører et lavere karbonavtrykk ”fra vugge til og med bruk” enn blybatterier, uavhengig av transportrute, økt utladningsdybde eller økt temperatur.
- Hva som i praksis skjer med komponentene når de slutter å virke er uvisst, systematisk avfallshåndtering finnes ikke på landsbygda i Malawi. Blybatterier kan resirkuleres hos produsent i Sør-Afrika. Elektronisk avfall kan resirkuleres i Nairobi i Kenya.

10.2 Anbefalinger

- Jeg anbefaler Kumudzi Kuwale å forsøke å bedre distribueringen av elektrisitet, ved å bygge små ledningsnettverk rundt batteriladestasjonene.
- Ved bygging av nye batteriladestasjoner anbefales litiumbatterier.
- Ved bygging av nye batteriladestasjoner kan solcellepaneler fra overdimensjonerte batteriladestasjoner benyttes, fremfor nye.
- Kumudzi Kuwale anbefales å sørge for god avfallshåndtering når komponenter slutter å virke. Blybatterier bør sendes til resirkulering hos produsent.

10.3 Videre arbeid

- Modellerere sluttlevsfasen og kvantifisere utslipp.
- Undersøke produktspesifikk data.
- Utforske andre effektkategorier.
- Undersøke handel med karbon kvoter.

11 REFERANSER

Skriftlige kilder

- Chen (2011b), *Physics of Solar Energy* (New Jersey: John Wiley and sons).
- Dufo-López, Rodolfo, Lujano-Rojas, Juan M., and Bernal-Agustín, José L. (2014), 'Comparison of different lead–acid battery lifetime prediction models for use in simulation of stand-alone photovoltaic systems', *Applied Energy*, 115, 242-53.
- E. Olivetti, J. Gregory, R. Kirchain (2010), 'Life Cycle Impacts Of Alkine Batteries With A Focus On End-Of-Life', (Massachusetts Institute of Technology, Material Systems Lab), Appendix B.
- Foster, Shkaratan (2010), 'Malawi's infrastructure: A continental Perspective', (The World Bank).
- G. Gamula, L.Hui, W. Peng (2013), 'An Overview of the Energy Sector in Malawi', *Energy and Power Engineering*, 5 (1), 8-17.
- García-Valverde, R., et al. (2009), 'Life cycle assessment study of a 4.2 kWp stand-alone photovoltaic system', *Solar Energy*, 83 (9), 1434-45.
- Hammond, Geoffrey P. and Hazeldine, Tom (2015), 'Indicative energy technology assessment of advanced rechargeable batteries', *Applied Energy*, 138, 559-71.
- International Organization for Standardization (2006a), 'ISO 14040:2006', (<http://www.iso.org>: ISO), 20.
- (2006b), 'ISO 14044:2006'.
- Jungbluth, Niels (2005), 'Life Cycle Assessment f Crystalline Photovoltaics in the Swissecoinvent Database'.
- Kabakian, V., McManus, M. C., and Harajli, H. (2015), 'Attributional life cycle assessment of mounted 1.8 kWp monocrystalline photovoltaic system with batteries and comparison with fossil energy production system', *Applied Energy*, 154, 428-37.
- Kato, Kazuhiko, Murata, Akinobu, and Sakuta, Koichi (1997), 'An evaluation on the life cycle of photovoltaic energy system considering production energy of off-grade silicon', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 47 (1–4), 95-100.
- McManus, M. C. (2012), 'Environmental consequences of the use of batteries in low carbon systems: The impact of battery production', *Applied Energy*, 93, 288-95.
- Niels Jungbluth, Matthias Stucki, Karin Flury, Rolf Frischknecht, Sybille Büsser (2012), 'Life Cycle Inventories of Photovoltaics'.
- O’Neal, Stefanie L. and Zheng, Wei (2015), 'Manganese Toxicity Upon Overexposure: a Decade in Review', *Current environmental health reports*, 2 (3), 315-28.
- Pehnt, Martin (2006), 'Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies', *Renewable Energy*, 31 (1), 55-71.
- Rantik M (1999), 'Life Cycle Assessment of five batteries for electric vehicles under different charging regimes', *KFB-Meddelande*.
- Ratnaïke, R. (2003), 'Acute and chronic arsenic toxicity', *Postgraduate Medical Journal*, 79 (933), 391-96.
- Rosling (2011), 'Praktisk solcelleteknologi for skolen', (2 edn.; Trondheim).
- Rydh, Carl Johan and Sandén, Björn A. (2005a), 'Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part II: Energy return factors and overall battery efficiencies', *Energy Conversion and Management*, 46 (11–12), 1980-2000.
- (2005b), 'Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part I: Performance and energy requirements', *Energy Conversion and Management*, 46 (11–12), 1957-79.

- Sullivan, J. L. and Gaines, L. (2012), 'Status of life cycle inventories for batteries', *Energy Conversion and Management*, 58, 134-48.
- Suri, Marcel; Suriova, Nada; Cebecauer, Tomas; Skoczek, Artur; Betak, Juraj; Schnierer, Branislav; (2015), 'Solar resource mapping in Malawi : solar modeling report ', (1 edn., 1: The World Bank Group), 100.
- Twidell, Weir (2006), *Renewable energy resources* (Tylor and Francis) 220-29.
- United Nations (2015), 'Transforming our world: the 2030 Agenda for sustainable Development', 14-28.
- United Nations Development Programme (2015), 'Human Development Report 2015; Work for Human Development', 208-11.
- World Bank Group (2016), 'Global Monitoring Report 2015/2016: Development Goals in an Era of Demographic Change.', *Extreme poverty: Updated numbers and remaining challenges* (Washington, DC World Bank: World Bank Group), 29.

Nettkilder

- Escom (2016), 'ELECTRICITY SUPPLY CORPORATION OF MALAWI LIMITED', <<http://www.escom.mw/index.php>>, accessed 16/02/2016.
- Kumudzi Kuwale <<http://www.kumudzikuwale.com>>, accessed.
- Loop (2016), 'Retursamarbeidet LOOP', <<http://www.loop.no>>, accessed 17. April.
- PV- calculator (2016), <<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?map=africa>>, accessed 19. april 2016.
- ReCiPe (2016), 'ReCiPe', <<http://www.lcia-recipe.net>>, accessed.
- Reuters (2016), 'Malawis forest shrinks as power deficit fuels charcoal business', <<http://www.reuters.com/article/us-malawi-forests-climate-idUSKBN00A12P20150525>>, accessed 17/02/2016.
- Statistisk sentralbyrå (2016), 'Transport og reiseliv', <<http://www.ssb.no>>, accessed 15.april.
- UNDP.org (2016), 'Energy Access', <<http://www.undp.org/content/undp/en/home/ourwork/climate-and-disaster-resilience/sustainable-energy/energy-access>>, accessed 15/02/2016.
- Waste management world (2016), '<https://waste-management-world.com>'.
- World Bank (2016), 'World Bank Open Data', <<http://data.worldbank.org>>, accessed 16/02/2016.

Uncategorized References

- Chen (2011a), *Physics of Solar Energy* (New Jersey: John Wiley and sons) 200-04.
- Grahl, Klöpffer and (2014), *Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice* (WILEY-VCH) 396.
- R.M. Dell, D.A.J. Rand (2001), *Understanding Batteries* (Royal Society of Chemistry).

VEDLEGG

Vedlagt ligger figur- og tabell-liste, samt output fra SimaPro / input Excel.

Figurer

| | | |
|----------|--|----|
| Figur 1 | Installasjon av solcellepanel, leie-kjøps-løsning. (eget foto) | 2 |
| Figur 2 | Charge operator og mentor på innsiden av en batteriladestasjon. På bordet: Registreringsbøker for hus-batterier. (eget foto)..... | 3 |
| Figur 3 | Lokal dumping og brenning av avfall på en gårdsplass nær sentrum av Nkhotakota. (eget foto) | 4 |
| Figur 4 | Malawi, Lokalisert i Sørøst-Afrika..... | 5 |
| Figur 5 | Kull til matlaging. (eget foto) | 6 |
| Figur 6 | Kumudzi Kuwales Prosjekter i Nkhotakota (google maps) | 7 |
| Figur 7 | Charge operator på innsiden av en batteriladestasjon. (eget foto)..... | 8 |
| Figur 8 | Installasjon av hjemme-anlegg - Sikker tilgang til strøm i hjemmet for første gang! (eget foto) | 8 |
| Figur 9 | Alternativ til belysning - Engangsbatteri koblet til LED. (eget foto)..... | 9 |
| Figur 10 | Mobiltelefoner til opplading på batteriladestasjon. (eget foto) | 10 |
| Figur 11 | Rammeverk for livsløpsvurdering ISO 14040..... | 15 |
| Figur 12 | ReCiPe metodens struktur | 19 |
| Figur 13 | Prosesstrinn for videre arbeid | 19 |
| Figur 14 | Solinnstrålingskart over Malawi (Suri 2015) | 20 |
| Figur 15 | n- og p- dopet silisium (selvlaget basert på (Rosling 2011)) | 21 |
| Figur 16 | diffusjon i pn-overgangen (selvlaget, basert på (Rosling 2011))..... | 22 |
| Figur 17 | elektrisk felt over pn-overgangen (selvlaget, basert på (Rosling 2011)) | 22 |
| Figur 18 | metallbelegg på utsiden av p- og n- området (selvlaget, basert på (Rosling 2011)) | 23 |
| Figur 19 | innstråling av sollys skaper elektrisk strøm (selvlaget, basert på (Rosling 2011)).. | 23 |
| Figur 20 | Opp- og ut-lading av batterier (selvlaget, basert på (R.M. Dell 2001))..... | 24 |
| Figur 21 | Eksempel på MPPT-kurve for solceller ved varierende solinnstråling (wikipedia). | 25 |
| Figur 22 | Skisse av system (selvlaget) | 32 |
| Figur 23 | Potensiale for global oppvarming, kg CO ₂ -ekvivalenter for batteriladestasjon med blybatterier og brukstid 10 år | 48 |
| Figur 24 | kg 1,4-DB-ekvivalenter for representativ batteriladestasjon med blybatterier og brukstid 10 år..... | 49 |
| Figur 25 | kg CO ₂ -ekvivalenter for transport av alle komponenter og kg CO ₂ -ekvivalenter for batteriladestasjonens livsløp uten transportfase. | 50 |
| Figur 26 | Livsløp fra vugge til og med bruk for primærbatterier..... | 50 |
| Figur 27 | Akkumulert energiforbruk for batteriladestasjoner ved ulike krav til brukstid..... | 51 |
| Figur 28 | CED for batteriladestasjoner justert per kWh produsert ved ulike krav til brukstid . | 52 |
| Figur 29 | CED for system koblet til strømnett og basis case | 53 |
| Figur 30 | Akkumulert energiforbruk (CED) for representativ batteriladestasjon med blybatterier og 10 års brukstid..... | 54 |

| | |
|---|----|
| Figur 31 kg CO2 ekvivalenter for produksjon, transport og vedlikehold av batterier (BOS+ hus-batterier) | 55 |
| Figur 32 kg CO2 ekvivalenter per kWh levert. Inkluderer produksjon, transport og vedlikehold av alle batterier (BOS + hus-batterier). | 55 |
| Figur 33 kg CO2-ekvivalenter for BOS-batterier ved 80% DOD og 30°C | 56 |
| Figur 34 kg CO2-ekvivalenter for BOS- og hus- batterier, forutsatt lik transportrute..... | 57 |

Tabeller

| | |
|---|-----|
| Tabell 1 Begreper og Definisjoner | VII |
| Tabell 2 Prosjektplan..... | 12 |
| Tabell 3 Symboler og SI-enheter | 14 |
| Tabell 4 Datasammenstilling for batteriladestasjon | 34 |
| Tabell 5 Referansestrøm paneler, MPPT charge controller, inverter og batterilader..... | 34 |
| Tabell 6 Temperaturavhengighetsfaktorer for batterilevetid. (Rydh and Sandén 2005b)..... | 35 |
| Tabell 7 Maksimalt antall ladesyklus (N) ved DOD og ladesyklus/år (n)..... | 36 |
| Tabell 8 Estimert levetid for hus-batterier bly-syre | 36 |
| Tabell 9 Estimert levetid for hus-batterier litium..... | 36 |
| Tabell 10 Estimert levetid for BOS-batterier bly-syre | 36 |
| Tabell 11 Estimert levetid for BOS-batterier litium..... | 37 |
| Tabell 12 Fargeforklaring..... | 37 |
| Tabell 13 Referansestrøm for batterier ved 25°C | 37 |
| Tabell 14 Referansestrøm for batteriladestasjon med levetid 10 år. (basis case)..... | 38 |
| Tabell 15 Årlig strømmengde levert til ulike oppladningsenheter..... | 38 |
| Tabell 16 Allokering av komponenter | 39 |
| Tabell 17 Prosesser for komponenter valgt i SimaPro med data fra Ecoinvent 3.0..... | 39 |
| Tabell 18 Materialandeler blybatterier | 40 |
| Tabell 19 Energimengder for produksjon av blybatterier | 40 |
| Tabell 20 Utslipp ved produksjon av blybatterier | 41 |
| Tabell 21 Produksjonssted og transport for komponenter | 41 |
| Tabell 22 Valgte prosesser for transport i SimaPro | 42 |
| Tabell 23 Modellering av bruksfase, valg i SimaPro | 42 |
| Tabell 24 Referansestrøm for alkaliske primærbatterier..... | 43 |
| Tabell 25 Materialkomponenter i alkaliske primærbatterier | 43 |
| Tabell 26 Input for produksjon av primærbatterier | 44 |
| Tabell 27 Valg av transportprosess for alkaliske primærbatterier | 44 |
| Tabell 28 Utvalg av LCI data (kg) for batteriladestasjon, fokus på global oppvarming. del 1 | 44 |
| Tabell 29 Utvalg av LCI data (kg) for batteriladestasjon, fokus på global oppvarming. del 2 | 45 |
| Tabell 30 ReCiPe Karakteriseringsfaktorer for GWP 100år..... | 45 |
| Tabell 31 kg CO2-ekvivalenter for batteriladestasjon med blybatterier | 46 |
| Tabell 32 Estimert levert strømmengde batteriladestasjon | 51 |
| Tabell 33 Estimert strømproduksjon for PV system koblet til strømmettet..... | 52 |

Input til figurer i resultatdelen

Oppdeling av transport for figur 24

| | | TRANSPORT BASIS CASE | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------------|----------------------|---------------|-------------|-----------|-------------|--------|-------|--|--|
| Komponent | Produsert | Frakt lastebil | Frakt skip | Frakt fly | VIA | Destinasjon | | | | |
| Multikrystallinsk PV | Cape Town | 204,96 tkm | Nei | Nei | | Nkhota kota | 204,96 | | | |
| MPPT Charge controller | Hong Kong | 5,4 tkm | 23, 2 tkm | Nei | Durban | Nkhota kota | 5,4 | 23,2 | | |
| Inverter | Hong Kong | 28,6 tkm | 121,7 tkm | Nei | Durban | Nkhota kota | 28,6 | 121,7 | | |
| Batterilader | Hong Kong | 0,51 tkm | Nei | 28,8 tkm | Lillongwe | Nkhota kota | 0,51 | | | |
| HUS-batterier PbA | Cape Town | 471,4 tkm | nei | nei | | Nkhota kota | 471,4 | | | |
| BOS-batterier PbA | Johannesburg | 635 tkm | nei | nei | | Nkhota kota | 635 | | | |
| HUS-batterier Litium | Beijing | 89,9 tkm | 461,8 tkm | nei | Durban | Nkhota kota | 89,9 | 461,8 | | |
| BOS-batterier Litium | Beijing | 179,7 tkm | 923,7 tkm | nei | Durban | Nkhota kota | 179,7 | 923,7 | | |
| Vedlikehold (deionisert vann) | Cape Town | 68,32 tkm | Nei | nei | | Nkhota kota | 68,32 | | | |
| Sum base case (PbA) | | 1345,87 | 144,9 | 28,8 | | | | | | |
| Sum Litium - case | | 509,07 | 1530,4 | 28,8 | | | | | | |

| | | | |
|------------------------|------------------|-----------------|-------------|
| FELLES FOR E 63% allok | 150,5448 | 91,287 | |
| BOS-BLY 63% allok | 400,05 | | |
| BOS-LITIUM 63% allok | 113,211 | 581,931 | |
| BLY 100% allok | 540,23 | | 28,8 |
| LITIUM 100% allok | 90,41 | 461,8 | 28,8 |
| TOT BLY | 1090,8248 | 91,287 | 28,8 |
| TOT LITIUM | 354,1658 | 1135,018 | 28,8 |

Input til figur 24

SimaPro 8.1.1 Inventory Date: 27.04.2016 Time: 13:14
 Project Batteriladestasjon

Calculation: Compare
 Results: Inventory
 Product 1: 1 p 01, Transport, BaseCase, Bly, totalt BASIS (of project Batteriladestasjon)
 Product 2: 1 p BaseCase BLY U/transport (of project Batteriladestasjon)
 Product 3: 1 p 01, Transport, LITIUM, totalt BASiS (of project Batteriladestasjon)
 Product 4: 1 p BaseCase Litium U/transport (of project Batteriladestasjon)
 Method: ReCiPe Midpoint (H) V1.10 / World Recipe H
 Indicator: Characterization
 Compartment All compartments
 Per sub-comp No
 Skip unused: No
 Category: Climate change
 Cut-off: 0,1 %
 Exclude infras No
 Exclude long-r No
 Sorted on item Substance
 Sort order: Ascending

| No | Substance | Compartment | Unit | Transportfase Batteriladesta | Transportfase Batteriladesta | Transportfase Batteriladesta | Transportfase Batteriladesta |
|----|--------------------|-------------|-----------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | Total | | kg CO2 eq | 301,2 | 1481,6 | 132,5 | 1317,3 |
| | Remaining su | | kg CO2 eq | 1,1 | 1,8 | 0,4 | 2,2 |
| 1 | Carbon dioxid Air | | kg CO2 eq | 286,3 | 1337,1 | 126,4 | 1170,0 |
| 2 | Carbon dioxid Air | | kg CO2 eq | 0,1 | 1,8 | 0,0 | 2,4 |
| 3 | Dinitrogen mo Air | | kg CO2 eq | 3,7 | 21,9 | 1,4 | 17,9 |
| 4 | Ethane, 1,1-di Air | | kg CO2 eq | 0,0 | 1,0 | 0,0 | 2,8 |
| 5 | Ethane, hexaf Air | | kg CO2 eq | 0,0 | 4,1 | 0,0 | 4,6 |
| 6 | Methane, bioç Air | | kg CO2 eq | 0,0 | 2,3 | 0,0 | 3,5 |
| 7 | Methane, chlc Air | | kg CO2 eq | 0,0 | 1,7 | 0,0 | 1,8 |
| 8 | Methane, foss Air | | kg CO2 eq | 9,9 | 85,9 | 4,3 | 86,1 |
| 9 | Methane, tetrç Air | | kg CO2 eq | 0,0 | 5,8 | 0,0 | 8,4 |
| 10 | Sulfur hexaflu Air | | kg CO2 eq | 0,1 | 18,2 | 0,0 | 17,7 |

Input til figur 25

| Unit | CED (kWh) | kg CO2 eq | kg 1,4-DB eq |
|---------------|-----------|-----------|--------------|
| Livsløp engar | 208065,1 | 59238,3 | 20896,4 |

Input til figur 26 og 27

SimaPro 8.1.1 Inventory Date: 20.04.2016 Time: 12:56
 Project Batteriladestasjon

Calculation: Compare
 Results: Inventory
 Product 1: 1 p 1 Base Case PbA med Transport og vedlikehold (of project Batteriladestasjon)
 Product 2: 1 p 1 Base Case Litium med Transport og vedlikehold (of project Batteriladestasjon)
 Product 3: 1 p 2 Levetid 20 ÅR, Ladestasjon med BLY (of project Batteriladestasjon)
 Product 4: 1 p 2 Levetid 20 ÅR, Ladestasjon med LITIUM (of project Batteriladestasjon)
 Product 5: 1 p 3 Levetid 25 ÅR, Ladestasjon med BLY (of project Batteriladestasjon)
 Product 6: 1 p 3 Levetid 25 ÅR, Ladestasjon med LITIUM (of project Batteriladestasjon)
 Method: Cumulative Energy Demand V1.08 / Cumulative energy demand
 Indicator: Single score
 Compartment All compartments
 Per sub-comp No
 Skip unused: No
 Cut-off: 0,1 %
 Default units: No
 Exclude infras No
 Exclude long-i No
 Sorted on iten Substance
 Sort order: Ascending

| No | Substance | Compartment | Unit | Base Case Pt | Base Case Lit 20 ÅR | Ladest: 20 ÅR | Lades: 25 ÅR | Lades: 25 ÅR | Ladest |
|----|----------------|-------------|------|--------------|---------------------|---------------|--------------|--------------|--------|
| | Total | | MWh | 6,96 | 5,57 | 11,53 | 8,75 | 14,36 | 10,77 |
| | Remaining su | | MWh | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 1 | Coal, brown | Raw | MWh | 0,16 | 0,22 | 0,20 | 0,33 | 0,24 | 0,39 |
| 2 | Coal, hard | Raw | MWh | 2,69 | 1,71 | 4,63 | 2,68 | 5,77 | 3,30 |
| 3 | Gas, mine, off | Raw | MWh | 0,04 | 0,03 | 0,06 | 0,05 | 0,07 | 0,06 |
| 4 | Gas, natural/n | Raw | MWh | 1,62 | 1,60 | 2,53 | 2,49 | 3,14 | 3,06 |
| 5 | Oil, crude | Raw | MWh | 1,85 | 1,35 | 3,23 | 2,24 | 4,07 | 2,80 |
| 6 | Uranium | Raw | MWh | 0,60 | 0,64 | 0,87 | 0,94 | 1,07 | 1,15 |

| Unit | Base Case Pt | Base Case Lit 20 ÅR | Ladest: 20 ÅR | Lades: 25 ÅR | Lades: 25 ÅR | Ladest |
|------|--------------|---------------------|---------------|--------------|--------------|--------|
| kWh | 3,68 | 2,94 | 3,05 | 2,31 | 3,04 | 2,28 |
| kWh | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| kWh | 0,08 | 0,12 | 0,05 | 0,09 | 0,05 | 0,08 |
| kWh | 1,42 | 0,90 | 1,22 | 0,71 | 1,22 | 0,70 |
| kWh | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,01 |
| kWh | 0,86 | 0,85 | 0,67 | 0,66 | 0,66 | 0,65 |
| kWh | 0,98 | 0,72 | 0,85 | 0,59 | 0,86 | 0,59 |
| kWh | 0,32 | 0,34 | 0,23 | 0,25 | 0,23 | 0,24 |

Input til figur 28

Calculation: Compare
 Results: Inventory
 Product 1: 1 p Livsløp engangsbatterier 10 år (of project Batteriladestasjon)
 Product 2: 1 p 1 Base Case på STRØMNETT /U hussystem (of project Batteriladestasjon)
 Product 3: 1 p 1 Base Case PbA med Transport og vedlikehold (of project Batteriladestasjon)
 Method: Cumulative Energy Demand V1.08 / Cumulative energy demand
 Indicator: Single score
 Compartment: All compartments
 Per sub-comp: No
 Skip unused: No
 Cut-off: 0,10 %
 Default units: No
 Exclude infras: No
 Exclude long-: No
 Sorted on item: Substance
 Sort order: Ascending

| No | Substance | Compartment | Unit | Livsløp engan | Base Case på | Base Case PbA |
|----|----------------------|-------------|------|---------------|--------------|---------------|
| | Total | | MWh | 208,07 | 7,78 | 6,96 |
| | Remaining substances | | MWh | 0,04 | 0,00 | 0,00 |
| 1 | Coal, brown | Raw | MWh | 3,49 | 0,23 | 0,16 |
| 2 | Coal, hard | Raw | MWh | 77,50 | 3,02 | 2,69 |
| 3 | Gas, mine, off | Raw | MWh | 1,12 | 0,04 | 0,04 |
| 4 | Gas, natural/n | Raw | MWh | 53,12 | 1,90 | 1,62 |
| 5 | Oil, crude | Raw | MWh | 55,42 | 1,80 | 1,85 |
| 6 | Uranium | Raw | MWh | 17,37 | 0,79 | 0,60 |

| No | Substance | Compartment | Unit | Livsløp engan | Base Case på | Base Case PbA |
|----|----------------------|-------------|----------|---------------|--------------|---------------|
| | Total | | kWh /kWh | 109,96 | 0,79 | 3,68 |
| | Remaining substances | | kWh /kWh | 0,02 | 0,00 | 0,00 |
| 1 | Coal, brown | Raw | kWh /kWh | 1,84 | 0,02 | 0,08 |
| 2 | Coal, hard | Raw | kWh /kWh | 40,96 | 0,31 | 1,42 |
| 3 | Gas, mine, off | Raw | kWh /kWh | 0,59 | 0,00 | 0,02 |
| 4 | Gas, natural/n | Raw | kWh /kWh | 28,08 | 0,19 | 0,86 |
| 5 | Oil, crude | Raw | kWh /kWh | 29,29 | 0,18 | 0,98 |
| 6 | Uranium | Raw | kWh /kWh | 9,18 | 0,08 | 0,32 |

Input til figur 30 og 31

SimaPro 8.1.1 Inventory Date: 19.04.2016 Time: 15:09
 Project Batteriladestasjon

Calculation: Compare
 Results: Inventory
 Product 1: 1 p Blybatteri totalt 10år/M vedlikehold (of project Batteriladestasjon)
 Product 2: 1 p Litiumbatteri totalt 10 år (of project Batteriladestasjon)
 Product 3: 1 p Blybatteri totalt 25år/M vedlikehold (of project Batteriladestasjon)
 Product 4: 1 p Litiumbatteri totalt 25 år (of project Batteriladestasjon)
 Method: ReCiPe Midpoint (H) V1.10 / World Recipe H
 Indicator: Characterization
 Compartment All compartments
 Per sub-comp No
 Skip unused: No
 Category: Climate change
 Cut-off: 0,1 %
 Exclude infras No
 Exclude long- No
 Sorted on iten Blybatteri totalt 10år/M vedlikehold
 Sort order: Descending

| No | Substance | Compartment | Unit | Blybatteri totalt | Litiumbatteri t | Blybatteri totalt | Litiumbatteri tot: |
|----|----------------|-------------|-----------|-------------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| | Total | | kg CO2 eq | 1146,2 | 709,8 | 2865,4 | 1656,2 |
| | Remaining su | | kg CO2 eq | 0,81 | 10,19 | 2,02 | 23,79 |
| 1 | Carbon dioxid | Air | kg CO2 eq | 1070,65 | 642,19 | 2676,61 | 1498,43 |
| 2 | Methane, foss | Air | kg CO2 eq | 53,10 | 45,77 | 132,75 | 106,81 |
| 3 | Dinitrogen mo | Air | kg CO2 eq | 18,57 | 10,18 | 46,43 | 23,75 |
| 4 | Sulfur hexaflu | Air | kg CO2 eq | 1,83 | 1,06 | 4,56 | 2,47 |
| 5 | Ethane, 1,1,1, | Air | kg CO2 eq | 1,22 | 0,40 | 3,05 | 0,94 |

Input til figur 32

SimaPro 8.1.1 Inventory Date: 20.04.2016 Time: 13:09
 Project Batteriladestasjon

Calculation: Compare

Results: Inventory

Product 1: 1 p 13, Prod og Tran PbA 80%DOD BOS-batterier (of project Batteriladestasjon)

Product 2: 1 p 13, Prod og Tran Litium 80%DOD BOS-batterier (of project Batteriladestasjon)

Product 3: 1 p 13, Prod og Tran PbA 30GRADER BOS-batterier (of project Batteriladestasjon)

Product 4: 1 p 13, Prod og Tran Litium 30GRADER BOS-batterier (of project Batteriladestasjon)

Product 5: 1 p 12, Produksjon og Transport PbA 12 BOS-batterier (of project Batteriladestasjon)

Product 6: 1 p 12, Produksjon og Transport Litium 6 BOS-batterier (of project Batteriladestasjon)

Method: ReCiPe Midpoint (H) V1.10 / Europe Recipe H

Indicator: Characterization

Compartment All compartments

Per sub-comp No

Skip unused: No

Category: Climate change

Cut-off: 0,1 %

Exclude infras: No

Exclude long: No

Sorted on item Substance

Sort order: Ascending

| | | Batteriladestasjon | |
|--|--------------|--------------------|-------|
| | Strømmengde/ | | Wh/år |
| | 10 år | 1892,16 | kWh |
| | 20 år | 3784,32 | kWh |
| | 25 år | 4730,4 | kWh |

| No | Substance | Compartment | Unit | PbA 80%DOD | Litium 80%DC | PbA 30GRADE | Litium 30GRA | Basis Case Pb/ | Basis Case Lit |
|----|----------------|-------------|-----------|------------|--------------|-------------|--------------|----------------|----------------|
| | Total | | kg CO2 eq | 1124,8379 | 946,381876 | 1124,837897 | 473,190938 | 749,9082948 | 473,190938 |
| | Remaining su | | kg CO2 eq | 1,24626434 | 3,68296352 | 1,246264336 | 1,84148176 | 0,830917258 | 1,84148176 |
| 1 | Carbon dioxide | Air | kg CO2 eq | 1049,81784 | 856,238634 | 1049,817845 | 428,119317 | 699,8940733 | 428,119317 |
| 2 | Dinitrogen mo | Air | kg CO2 eq | 18,4212685 | 13,5724984 | 18,42126851 | 6,78624918 | 12,28106219 | 6,78624918 |
| 3 | Ethane, 1,1-di | Air | kg CO2 eq | 7,5493E-05 | 3,09698491 | 7,54933E-05 | 1,54849245 | 5,03313E-05 | 1,54849245 |
| 4 | Methane, bioç | Air | kg CO2 eq | 0,44443247 | 2,70543714 | 0,444432465 | 1,35271857 | 0,296290978 | 1,35271857 |
| 5 | Methane, foss | Air | kg CO2 eq | 52,9356071 | 61,0319995 | 52,93560707 | 30,5159998 | 35,29095748 | 30,5159998 |
| 6 | Methane, tetr | Air | kg CO2 eq | 0,09268142 | 4,64332204 | 0,092681424 | 2,32166102 | 0,061790445 | 2,32166102 |
| 7 | Sulfur hexaflu | Air | kg CO2 eq | 1,87972287 | 1,41003697 | 1,87972287 | 0,70501848 | 1,253152764 | 0,70501848 |

| Unit | Basis Case Pt | Basis Case Lit | PbA 80%DOD | Litium 80%DC | PbA 30GRADE | Litium 30GRAI |
|-----------|---------------|----------------|------------|--------------|-------------|---------------|
| kg CO2 eq | 749,91 | 473,19 | 1124,84 | 946,38 | 1124,84 | 473,19 |
| kg CO2 eq | 0,83 | 1,84 | 1,25 | 3,68 | 1,25 | 1,84 |
| kg CO2 eq | 699,89 | 428,12 | 1049,82 | 856,24 | 1049,82 | 428,12 |
| kg CO2 eq | 12,28 | 6,79 | 18,42 | 13,57 | 18,42 | 6,79 |
| kg CO2 eq | 0,00 | 1,55 | 0,00 | 3,10 | 0,00 | 1,55 |
| kg CO2 eq | 0,30 | 1,35 | 0,44 | 2,71 | 0,44 | 1,35 |
| kg CO2 eq | 35,29 | 30,52 | 52,94 | 61,03 | 52,94 | 30,52 |
| kg CO2 eq | 0,06 | 2,32 | 0,09 | 4,64 | 0,09 | 2,32 |
| kg CO2 eq | 1,25 | 0,71 | 1,88 | 1,41 | 1,88 | 0,71 |

Input til figur 33

SimaPro 8.1.1 Inventory Date: 20.04.2016 Time: 14:12
 Project Batteriladestasjon

Calculation: Compare
 Results: Inventory
 Product 1: 1 p 12, Produksjon og Transport PbA 12 BOS-batterier (of project Batteriladestasjon)
 Product 2: 1 p 14, Prod og Tran samme sted Litium 6 BOS-batterier (of project Batteriladestasjon)
 Product 3: 1 p 12, Prod og Tran. 10ÅR, PbA 60 Husbatterier (of project Batteriladestasjon)
 Product 4: 1 p 14, Prod og Tran samme sted Litium 30 HUS-batterier (of project Batteriladestasjon)
 Method: ReCiPe Midpoint (H) V1.10 / Europe Recipe H
 Indicator: Characterization
 Compartment All compartments
 Per sub-comp No
 Skip unused: No
 Category: Climate change
 Cut-off: 0,1 %
 Exclude infras No
 Exclude long-r No
 Sorted on item Substance
 Sort order: Ascending

| No | Substance | Compartment | Unit | PbA BOS-batt | Litium BOS-b: | PbA Hus-batt | Litium HUS-b: |
|----|----------------|-------------|-----------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| | Total | | kg CO2 eq | 749,9 | 451,5 | 379,5 | 236,9 |
| | Remaining su | | kg CO2 eq | 0,8 | 1,8 | 0,6 | 0,9 |
| 1 | Carbon dioxid | Air | kg CO2 eq | 699,9 | 407,5 | 354,8 | 214,3 |
| 2 | Dinitrogen mo | Air | kg CO2 eq | 12,3 | 6,6 | 6,1 | 3,4 |
| 3 | Ethane, 1,1-di | Air | kg CO2 eq | 0,0 | 1,5 | 0,0 | 0,8 |
| 4 | Methane, bioç | Air | kg CO2 eq | 0,3 | 1,3 | 0,1 | 0,7 |
| 5 | Methane, foss | Air | kg CO2 eq | 35,3 | 29,8 | 17,2 | 15,3 |
| 6 | Methane, tetr: | Air | kg CO2 eq | 0,1 | 2,3 | 0,0 | 1,2 |
| 7 | Sulfur hexaflu | Air | kg CO2 eq | 1,3 | 0,7 | 0,6 | 0,3 |



Norges miljø- og biovitenskapelig universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway