



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2023 30 stp

Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning

Livsløpsanalyse av to regionalnettstrekninger i Agder, med fokus på materialbruk, klimagassutslipp og arealbruk

Life cycle analysis of two regional grids in Agder,
focusing on material use, greenhouse gas
emissions and land use

Agnes Elise Finsrud Kirkebøen

Fornybar energi

Forord

Denne masteroppgaven markerer slutten på mitt toårige masterstudie i Fornybar energi ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet i Ås. Oppgaven er skrevet våren 2023 ved fakultetet for miljøvitenskap og naturforvaltning. I masterperioden har jeg lært at datahåndtering er både komplekst og tidkrevende. Med tiden jeg hadde ønsket jeg å gjøre en så omfattende og representativ oppgave som mulig.

Jeg vil rette en stor takk til min dyktige veileder, Ole Jørgen Hanssen, for gode veiledningsmøter, råd og konstruktiv tilbakemelding. Jeg setter stor pris på at du har stilt opp i en ellers travel hverdag. Jeg vil også å rette en stor takk til Regina Skattenborg, forsker ved Norsk Institutt for Bærekraftforskning, for all hjelp, gode råd og diskusjoner. Jeg setter stor pris på ditt engasjement gjennom hele oppgaven.

I tillegg fortjener Hege Jortveit og Ronald Storenes i Glitre Nett en stor takk for godt samarbeid, innspill og oppfølging underveis i oppgaven.

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet

Ås, 15. mai 2023

Elise Finsrud Kirkebøen

Agnes Elise Finsrud Kirkebøen

Sammendrag

Klimaendringer er en av nåtidens største utfordringer, og det er en forventning i samfunnet at verdier skal skapes på en bærekraftig måte. Et viktig tiltak for å nå nasjonale klimamål er elektrifisering, og et robust og effektivt kraftnett med god forsyningsikkerhet er viktig arbeid mot dette. Masteroppgaven har analysert forbruk av materialressurser, klimagassutslipp og arealbruk av to alternative traseer i to ulike kraftstrekninger av regionalnett i Agder.

Opgaven er skrevet i samarbeid med Glitre Nett, og er en del av Fornybar Norge sitt prosjekt «Bære kraft med Bærekraft». Målet med oppgaven har vært å sammenligne traseene ut fra tre ulike case, samt finne betydningen av hver livsløpsfase med hensyn til klimagassutslipp, og sammenligne ulike typer master og fundamenter. Case 1 inkluderte hovedsakelig bruk av komposittmaster, case 2 inkluderte kun bruk av stålmaster og case 3 er lik som case 2, men med en optimalisert løsning for fundamenter.

Metoden livsløpsanalyse ble benyttet til å finne klimagassutslippene i kraftstrekningene gjennom hele livsløpet. I tillegg ble det gjort materialanalyse og analyse av arealbruk direkte knyttet til kraftstrekningenes traseer. Den funksjonelle enheten er 1 terrawattime overført og levert per km ledningsnett i en periode på 100 år.

Et av hovedfunnene var at casene med komposittmaster hadde lavest forbruk av materialressurser med omtrent 2400 kg per funksjonelle enhet, samt lavest klimagassutslipp med mellom 16 000 og 30 500 kilo CO₂ ekvivalenter per funksjonelle enhet. Av livsløpsfaser sto bruksfasen (med nett-tap som største bidragsyter) for størst bidrag til totale klimagassutslipp med 54 til 75 prosent for de ulike casene. Produksjon av materialer sto for nest høyest bidrag til totale klimagassutslipp med 23 til 41 prosent i de ulike casene. Stålmaster og komposittfundamenter ga lavere klimagassutslipp enn henholdsvis komposittmaster og stålfundamenter.

Opgaven vil kunne inspirere til videre arbeid og analyser av hvordan valg av ulike typer komponenter og materialer kan bidra til å redusere forbruk av materialressurser og klimagassutslipp, og koble linjetraseenes arealbruk med påvirkning på biologisk mangfold.

Abstract

Climate change is one of today's greatest challenges, and society expects value to be created in a sustainable way. Electrification is an important measure for achieving national climate targets, and a robust and efficient power grid with good supply is important work towards this. The master's thesis has analysed the use of material resources, greenhouse gas emissions and land use of two alternative routes in two different powerline sections of regional grid in Agder. The thesis is written in collaboration with "Glitre Nett" and is part of a project in "Fornybar Norge" called "Bære kraft med Bærekraft". The objective of the thesis has been to compare the routes based on three different cases, find the significance of each life cycle phase regarding greenhouse gas emissions, and compare different types of utility poles and foundations. Case 1 mainly included the use of composite poles, case 2 included only the use of steel poles and case 3 is similar to case 2, but with an optimized solution for foundations.

The life cycle analysis method was used to find greenhouse gas emissions in power sections throughout the life cycle. In addition, material analysis and land use analysis directly related to the power sections' routes were used. The functional unit is 1 terawatt hour transferred and delivered per km of wiring for a period of 100 years.

One of the main findings was that the cases with composite poles had the lowest use of material resources with about 2400 kg per functional unit, as well as the lowest greenhouse gas emissions with between 16 000 and 30 500 kg CO₂ equivalents per functional unit. Of life cycle phases, the use phase (with grid losses as the largest contributor) accounted for the largest contribution to total greenhouse gas emissions, with 54 to 75 percent for the various cases. Production of materials made the second highest contribution to total greenhouse gas emissions, with 23 to 41 percent in the various cases. Steel poles and composite foundations had lower greenhouse gas emissions than composite poles and steel foundations, respectively.

The thesis will inspire further work and analyses of how the choice of different types of components and materials can contribute to reduction in the usage of material resources and greenhouse gas emissions and link the land use of the powerline routes with the impact on biodiversity.

Innholdsfortegnelse

Forord	ii
Sammendrag	iii
Abstract	iv
Tabelliste	vii
Figurliste.....	viii
Ordforklaring.....	ix
1. Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	3
2. Kunnskapsgrunnlag	4
2.1 Materialressurser	4
2.1.2 Klima.....	5
2.1.3 Arealbruk.....	7
2.1.4 Biologisk mangfold	8
3. Metodikk, studieobjekter og datagrunnlag.....	10
3.1 Livsløpsvurdering (LCA).....	10
3.2 Areal metode	11
3.3 Studieobjekt.....	11
3.3.1 Det norske kraftsystemet	11
3.3.2 Komponenter i kraftsystemet	13
3.3.3 Kraftlinjetraseene	15
3.4 Datagrunnlag	18
3.4.1 Livsløpsdata	19
3.4.2 Arealdata	21
4. Systembeskrivelse og avgrensning.....	22
4.1 Systembeskrivelse	22
4.2 Avgrensning	23
5. Inventaranalyse (LCI)	26
5.1 Introduksjon	26
5.2 Produksjon av materialer.....	26
5.3 Installering og demontering	30
5.4 Bruksfase	31
5.5 Avhending	32
5.6 Inn- og utgangsdata	32

6.	Resultater.....	34
6.1	Konsekvenser på forbruk av materialressurser, klimagassutslipp og arealbruk	34
6.1.1	Forbruk av materialressurser	34
6.1.2	Klimagassutslipp og miljøpåvirkning	36
6.1.3	Arealbruk.....	39
6.2	Betydningen av hver livsløpsfase for samlet klimagassutslipp.....	44
6.3	Material- og klimaeffekter av valg av ulike typer master og fundament	47
6.3.1	Forbruk av materialressurser	47
6.3.2	Klimaeffekter	52
6.4	Klimagassutslipp i stålcase og stålcase med optimalisert fundament	55
7.	Diskusjon.....	56
7.1	Oppsummerende funn.....	56
7.2	Resultatenes robusthet	62
7.3	Fremtidig bruk	65
7.4	Fremtidig forskningsbehov.....	66
8	Konklusjon	68
9	Referanser.....	70
10.	Vedlegg	76
	Vedlegg A: Gjennomsnittsmaster	76
	Vedlegg B: Gjennomsnittsfundamenter	80

Tabelliste

TABELL 1 SKALERING AV MASTER.	27
TABELL 2 ANTALL OG TYPE MASTER KOMPOSITTCASE.	27
TABELL 3 ANTALL OG TYPE MASTER STÅLCASE.	27
TABELL 4 ANTALL OG TYPE FUNDAMENT KOMPOSITTCASE.	29
TABELL 5 ANTALL OG TYPE FUNDAMENT STÅLCASE.	29
TABELL 6 VEKT AV FASELINER OG OPGW.	30
TABELL 7 MATERIALER SOM GÅR TIL NORSK GJENVINNING KRISTIANSAND.	32
TABELL 8 PROSESSER FRA BMB I SIMAPRO.	33

Figurliste

FIGUR 1 KOMPONENTER I DOBBELMAST KOMPOSITT.....	14
FIGUR 2 KOMPONENTER I ENKELTMAST STÅL.....	15
FIGUR 3 LOKASJON AV KYSTLINJA 1 (BLÅ) OG KYSTLINJA 2 (RØD).....	16
FIGUR 4 KULIA – LEIRE KYSTLINJA 1.	17
FIGUR 5 LYNGDAL – KVINESDAL KYSTLINJA 2.	18
FIGUR 6 SYSTEMFLYTDIAGRAM.....	25
FIGUR 7 MATERIALBRUK KYSTLINJA KOMPOSITTCASE.	34
FIGUR 8 MATERIALBRUK KYSTLINJA STÅLCASE.....	35
FIGUR 9 GWP KYSTLINJA.....	36
FIGUR 10 RELATIV MILJØPÅVIRKNING KYSTLINJA 1.	37
FIGUR 11 RELATIV MILJØPÅVIRKNING KYSTLINJA 2.	38
FIGUR 12 AREALRESSURSER.....	39
FIGUR 13 LØSMASSER.	40
FIGUR 14 SKOGRESSURSER.....	41
FIGUR 15 ARTSDATA.....	42
FIGUR 16 ARTSDATA PER KM.	43
FIGUR 17 GWP FORDELT PÅ KATEGORIER KYSTLINJA 1 KOMPOSITT- OG STÅLCASE.	44
FIGUR 18 GWP FORDELT PÅ KATEGORIER KYSTLINJA 2 KOMPOSITT- OG STÅLCASE.	45
FIGUR 19 GWP FORDELT PÅ KATEGORIER UTEN BRUKSFASEN.....	46
FIGUR 20 MATERIALRESSURSER STÅLMASTER.....	47
FIGUR 21 MATERIALRESSURSER KOMPOSITTMASTER.	48
FIGUR 22 MATERIALRESSURSER STÅLFUNDAMENTER.....	49
FIGUR 23 MATERIALRESSURSER KOMPOSITTFUNDAMENTER.....	50
FIGUR 24 MATERIALBRUK AV KOMPOSITT VS. STÅL DOBBELMAST MED FUNDAMENT.	51
FIGUR 25 GWP FORDELT PÅ LIVSLØPSFASER FOR ALLE MASTETYPEN.	52
FIGUR 26 GWP FORDELT PÅ LIVSLØPSFASER FOR ALLE FUNDAMENTTYPER.	53
FIGUR 27 GWP AV KOMPOSITT VS. STÅL DOBBELMAST MED FUNDAMENT.....	54
FIGUR 28 GWP FORDELT PÅ KATEGORIER UTEN BRUKSFASE FOR STÅL- OG RONSTOFOTCASE.....	55

Ordforklaring

K1Ø_K/S/R	Kystlinja 1 øvre kompositt/ stål/ Ronstofot
K1N_K/S/R	Kystlinja 1 nedre kompositt/ stål/ Ronstofot
K2Ø_K/S/R	Kystlinja 2 øvre kompositt/ stål/ Ronstofot
K2N_K/S/R	Kystlinja 2 nedre kompositt/ stål/ Ronstofot
LCA	Livsløpsanalyse
LCI	Inventaranalyse
OPGW	Optisk jordledning
FU	Funksjonell enhet
GWP	Globalt oppvarmingspotensial
CO ₂	Karbondioksid
SF ₆	Sulphur hexafluoride
Eq	Ekvivalent
Kg	Kilogram
Km	Kilometer
Kgkm	Kilo-kilometer
TWh	Terawatt time
kWh	Kilowatt time
m ²	Kvadratmeter
m ³	Kubikkmeter

1. Innledning

1.1 Bakgrunn

I dagens samfunn er det en økende forventning til at verdier skal skapes på en bærekraftig måte. Næringslivet påvirkes av klimaendringer, tap av naturmangfold, knapphet av ressurser, globalisering og teknologisk utvikling. Klimaendringer er en av de største utfordringene verden står ovenfor i dag, og et viktig tiltak for å nå globale og nasjonale klimamål er elektrifisering. Et robust kraftnett og god forsyningssikkerhet er viktige forutsetninger for arbeidet mot fremtidens utslippsfrie energisystem (Statnett, 2021). For å tilpasse seg forventede klimaendringer og redusere effekten av økte klimagassutslipp er det også viktig å opprettholde biologisk mangfold (Norad, 2015). Det biologiske mangfoldet kan være sårbart, og en liten endring kan føre til store konsekvenser. Rapporter fra FNs klimapanel tilsier at naturmangfoldet allerede påvirkes av klimaendringer (UngEnergi, 2021).

I kraftforsyningen er det tre grunnleggende funksjoner; produksjon, overføring og omsetning. Sikker strømforsyning er avgjørende for næringsliv, offentlig tjenesteyting og husholdninger, og nesten alle viktige samfunnsoppgaver er kritisk avhengige av et fungerende og pålitelig kraftsystem. I Norge er det store avstander mellom strømproduksjon og forbruk. Et velutbygd strømmnett bidrar til at strøm for eksempel kan overføres fra magasinverkene i Nord-Norge og på Sør-Vestlandet til andre deler av Norge, og til utlandet. For å sikre forsyningen til enhver tid, må strømmettet kunne tåle variasjoner i forbruk og produksjon av kraft som kan skje på kort og lang sikt. På grunn av store variasjoner mellom produksjon og forbruk i Norge er det behov for overføringskapasitet mellom landsdelene og ut av landet (Olje og Energidepartementet, 2019).

I Norge er det tre nettnivåer; transmisjons-, regional- og distribusjonsnett. Transmisjonsnettene binder sammen store produsenter og forbrukere i hele landet og omfatter også utenlandsforbindelser. Distribusjonsnettene sørger for distribusjon av kraft lokalt til mindre sluttbrukere, og regionalnettet er et bindeledd mellom transmisjons- og distribusjonsnettene. (Olje og Energidepartementet, 2019). Det er ikke lønnsomt å bygge konkurrerende strømmnett ved siden av hverandre, og derfor finnes det bare én netteier i hvert

område. Hver netteier har monopol innenfor sitt område, og strømkunder er bundet til sitt lokale nettselskap. Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) fører tilsyn med og regulerer nettvirksomheten (Olje og Energidepartementet, 2021). Statnett er operatør for transmisjonsnettet, og kommuner og fylkeskommuner eier det meste av regional- og distribusjonsnettet via nettselskaper (Olje og Energidepartementet, 2019).

Kraftsystemutredninger er en ordning for transmisjons- og regionalnettet som skal bidra til en samfunnsmessig rasjonell utvikling av nettene gjennom koordinering og langsiktige vurderinger av utviklingen til kraftsystemet. Utredningene beskriver det eksisterende kraftnettet, produksjon og forbruk, overføringsforhold nå og i fremtiden og forventede tiltak. Det finnes 18 utredningsområder; ett for transmisjonsnettet og resterende 17 for regionalnettet. 17 regionale nettselskap utarbeider kraftsystemutredninger for ulike deler av regionalnettet, og Statnett gjør dette for transmisjonsnettet. Utredningene er viktige for Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE) når de vurderer konsesjonssøknader for energianlegg (Olje og Energidepartementet, 2019).

Utbygging av kraftnett fører til inngrep i natur, som påvirker landskap og biologisk mangfold. I tillegg fører klimaendringer til et økt press på naturen og gjør den mer sårbar (Pwc, 2022). Det er viktig at ny kraftnettutbygging er bærekraftig og ressurseffektiv, og tar hensyn til påvirkning på klima, arealendringer og biologisk mangfold. Det er også viktig å overveie muligheten for målkonflikter; at en aktivitet som bidrar positivt med hensyn til en miljøeffekt kan ha negative konsekvenser for en annen effekt (Statnett, 2021).

Formålet med denne masteroppgaven er å analysere miljø- og ressurseffekter i to alternative traseer i to ulike kraftstrekninger av regionalnett i Agder av Glitre Nett, med fokus på forbruk av materialressurser, klimagassutslipp og arealbruk. NVE har utpekt Agder Energi Nett, nå Glitre Nett, som utredningsansvarlig konsesjonær for Aust- og Vest-Agder (Agder Energi, 2015). Glitre Nett er resultat av fusjonen mellom Agder Energi Nett og Glitre Energi Nett. Selskapet er Norges nest største nettselskap med 320 000 nettkunder (Glitre Nett, u.å.). De to kraftstekningene er del av prosjektet «Kystlinja», der eksisterende 110 kV kraftlinje skal

erstattes med en 132 kV linje. Den ene strekningen er del av «Kystlinja 1» og går fra Kulia til Leire og den andre er del av «Kystlinja 2» og går fra Lyngdal til Kvinesdal (Agder Energi Nett, 2021).

Masteroppgaven er skrevet som en del av prosjektet «Bære kraft med bærekraft» (BmB), av Norsk institutt for bærekraftforskning (NORSUS), og i samarbeid med Glitre Nett. Andre samarbeidpartnere er Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) og Geodata, og prosjektet utføres på oppdrag av Enfo Norge. Varigheten av prosjektet er ca. tre og et halvt år, fra 01.04.2021 til 30.09.2024. Prosjektets mål er å gi nettselskaper et rammeverk for å kunne kartlegge og dokumentere miljømessig bærekraft i etablering, drift og vedlikehold og demontering av kraftnett. Slik kan nettselskapene utvikle strategier og sette mål for det miljømessige bærekraftarbeidet internt. Rammeverket skal kunne gi data og resultater både i store overordnede analyser av energisystemer og i mindre skala ved for eksempel valg av enkeltkomponenter i en transformator (Skattenborg, u.å.).

1.2 Problemstilling

Den overordnede problemstillingen i denne studien er å dokumentere forskjellene mellom to alternative løsninger for de to krafttraseene Kulia til Leire (Kystlinja 1), og Lyngdal til Kvinesdal (Kystlinja 2) med hensyn til forbruk av materialressurser, klimagassutslipp og arealbruk.

Følgende delproblemstillinger skal besvares i oppgaven:

- Hva er konsekvensene av de ulike trasevalgene i Kystlinja for samlet forbruk av materialressurser, klimagassutslipp gjennom livsløpet og arealbruk av selve traseområdet?
- Hvor stort bidrag representerer hver livsløpsfase til samlet klimagassutslipp?
- Hva er konsekvensene for klimagassutslipp og forbruk av materialressurser av ulike typer master og fundament?
- Hva er forskjellen i klimagassutslipp mellom vanlig stålcasse og stålcasse med optimalisert fundament?

2. Kunnskapsgrunnlag

2.1 Materialressurser

Boer et al. (2021) har analysert hvordan det globale materialforbruket knyttet til kraftsektoren kan utvikle seg frem mot 2050. Studien har fokus på tre delsystemer for elektrisitet; produksjon, overføring og lagring. Resultatene viser en rask vekst i etterspørsel av de fleste materialer i elektrisitetssektoren, som følge av økt etterspørsel og skifte mot fornybare teknologier. Studien peker på at under klimapolitiske forutsetninger vil årlig etterspørsel av neodym vokse med en faktor 4,4. Etterspørselen av stål og aluminium vil vokse med en faktor 2 i et referansescenario og med 2,6 i et 2-gradets klimapolitisk scenario.

Deetman et al. (2018) har også beskrevet scenarier mot 2050 for etterspørselen av metaller i elektrisitetsproduksjon, biler og elektroniske apparater. Metallene som er undersøkt er kobber, tantal, neodym, kobolt og litium. Resultater viser at total etterspørsel etter kobber, neodym og tantal kan øke med en faktor på 2 til 3,2, hovedsakelig som følge av befolkningsvekst og økning i BNP. Etterspørselen etter litium og kobolt er forventet å øke mye mer, med en faktor ti til mer enn 20, som følge av en økning i fremtidig produksjon og bruk av elbil. Studien peker på viktigheten av å studere utfordringene med klimaendringer og ressursutarming i sammenheng.

På bestilling av et norsk energiselskap er en masteroppgave som belyser muligheter for å håndtere glassfiberarmerte plastkompositter (GFK) i vindturbinblader gjennomført av (Bjerkomp, 2020). I studien bekreftes det at det til nå har vært lite føringer for hvordan materialene i vindturbinbladene skal resirkuleres. Når studien ble gjennomført hadde én tysk sementprodusent og noen få nordiske aktører utviklet forretningsmodeller som håndterte avfallet. Resultatene fra studien viste at de tre mest lovende resirkuleringsmetodene for glassfiberarmerte plastkompositter var mekanisk resirkulering, pyrolyse og co-prosessering. Mekanisk resirkulering inneholder flere steg, hvor man til slutt ender opp med en knust masse som kan brukes som fyllmateriale i f.eks. betong. De resirkulerte produktene har imidlertid en lav verdi, fordi de mekaniske egenskapene til fibrene er sterkt redusert. Pyrolyse skjer i et brennkammer mellom 300 – 800 °C. Ved optimale forhold vil fibrene kunne gjenvinnes med

samme bøyelige egenskaper som jomfruelige fibre. Ved co-prosessering blir glassfiberen malt opp og brent i en kalkovn ved 900 °C. Fibrene blir til aske som brukes i sement.

2.1.2 Klima

En livsløpsvurdering av kraftoverføring fra sentral- til distribusjonsnettet i Norge ble utført av Hertwich & Jorge (2013). Den funksjonelle enheten var 1 kWh levert fra sentralnettet til distribusjonsnettet. Resultatene fra studien viste, forutsatt norsk strømmiks, at for hver kWh- elektrisitet som ble overført var klimapåvirkningen mellom 1,3 og 1,5 g CO₂-ekv. Halvparten av utslippene var tilknyttet strømtap, og halvparten til infrastrukturprosesser. I infrastrukturprosessene kom 15 prosent fra lekkasjer av SF₆ gass, og 12 prosent fra transformatorstasjoner. En masteroppgave av Hauan (2014) så på livsløpet til elektrisitetstransmisjon og -distribusjon i Norge, med spesifikke data fra Nord-Trøndelag. Funksjonell enhet var levering av 1 MWh elektrisk energi, forutsatt 2011-forhold. Resultatene viste at den totale klimapåvirkningen fra de tre nettnivåene var 13,0 kg CO₂-ekv per MWh levert energi, hvorav 9,2 kom fra distribusjonsnettet, 2,9 fra regionalnettet og 0,9 fra sentralnettet. Det ble pekt på at distribusjonsnettet hadde høyest konsekvenser på grunn av høyere krafttap. Studien inkluderte blant annet nett-tap, transformatorstasjoner, gassisolerte koblingsanlegg, kabler i luft og i bakken og SF₆ lekkasjer.

Dette resultatet fikk også en LCA-studie om det danske distribusjon- og transmisjonsnettet av Turconi et al. (2013) der virkninger for distribusjon var 1,6 – 2,5 ganger høyere enn for transmisjon i alle påvirkningskategorier. Årsaken var at distribusjonsnettet hadde lavere spenning som ga større tap, i tillegg til at det var mer komplekst og hadde mer materialbruk. Studien fant også at 50 kV-luftledninger hadde lavere påvirkning i alle kategorier enn underjordiske kabler. Dette var hovedsakelig på grunn av råvarene kobber og aluminium som ble brukt i kablene.

En livsløpsanalyse (LCA) som omhandler transmisjon og distribusjon i Danmark ble gjennomført av Hawkins et al. (2011). Studien tok for seg kraftledninger og kabler, forutsatt europeisk strømmiks. Resultater viste at krafttap ga størst påvirkning i nesten alle

miljøkategorier og bidro med opptil 99 prosent av utslippene til klimaendringer. I infrastruktur var produksjon av kabelmateriale en dominerende prosess. EFLA Consulting Engineers (2019) utførte en livsløpsanalyse av det islandske transmisjonssystemet, som omfattet luftledninger, jordkabler og transformatorstasjoner. Systemets karbonavtrykk per overførte kWh var 0,9 g CO₂-ekv. Nesten halvparten av klimagassutslippene kom fra overføringstap, og ca. 15 prosent kom fra SF₆ lekkasjer. Andre bidragsyttere var systemkomponenter, spesielt ledere som utgjorde 13 prosent. I studien var minimering av overføringstap og SF₆ lekkasjer pekt på som tiltak for å redusere miljøpåvirkning.

I en LCA analyse av Harrison et al. (2010) presenteres en vurdering av karbonutslippene til transmisjonsnettet i Storbritannia. Forutsatt en levetid på 40 år var globalt oppvarmingspotensial (GWP) av overføringsnettet rundt 11 g CO₂-ekv per kWh elektrisitet overført. Omtrent 19 ganger mer energi ble overført av nettet gjennom levetiden enn det som ble brukt i konstruksjon og drift. Utslipp under drift sto for 96 prosent av totale utslipp, og av dette var 85 prosent overføringstap. CO₂-utslipp fra råmaterialene til nettinfrastrukturen sto for beskjedne tre prosent. Studien peker på at for å redusere CO₂ utslippene bør det investeres i infrastruktur som gir lavere nett-tap.

En LCA av ledningsstolper er gjennomført av Johannesson et al. (2020). Studien dekker det svenske markedet og bruk under svenske forhold. Tre typer trestolper og én komposittstolpe på tolv meters høyde ble evaluert. Klimapåvirkningen til trestolpe med polyetylen var lavest på ca. 100 kg CO₂-ekv per stolpe. Komposittstolpen hadde høyest klimapåvirkning med ca. 535 kg CO₂-ekv per stolpe. Den største påvirkningen kom fra utvinning av ressurser og produksjon av stolpematerialet (glassfiber og polymerer). For komposittstolpene var ca. 90 prosent knyttet til denne fasen og ni prosent til transport. Avfallshåndteringen hadde liten påvirkning fordi stolpene ble deponert, men det ble påpekt at de også kunne brukes som fyllmateriale, og at de i fremtiden vil kunne resirkuleres. Det ble pekt på at fordelene med komposittstolper var at de ikke lakk metaller eller organiske miljøgifter til omgivelsene i bruksfasen. Komposittstolpene hadde en levetid på 80-100 år (Johannesson et al., 2020).

En livsløpsanalyse av Erlandsson (2011) sammenlignet miljøpåvirkningen til kraftstolper i stål, kompositt, betong og trestolpe med kreosot. Studien omhandlet 9 m høye ledningsstolper i distribusjonsnettet. Resultatene, som ble presentert i et normalisert resultat, viste at det var stålstoipen som hadde høyest klimagassutslipp, etterfulgt av komposittstoipen. Trestolpene hadde lavest klimagassutslipp, og betongstoipen nest lavest. Det ble opplyst at det i stålstoipene ble brukt 50 prosent resirkulert stål. Resultater fra rapporten Gottfridsson et al. (2020), om humant toksisitetspotensial som følge av produksjon av kraftstolper, viste at det er produksjon av råmaterialene polyetylen, polyester og glassfiber som bidrar til høyest utslipp.

En livsløpsanalyse av Blackett et al. (2008) har analysert miljøpåvirkningen knyttet til bruk av nåværende og mulige alternative materialer i høyspent elektrisitetsoverføring i England og Wales. Der ble elektrisiteten hovedsakelig overført gjennom stål- og aluminiumledere over bakken og med tårn av stål. Resultatene fra studien viste at miljøbelastningen til stål- og aluminiumtårn var svært like, og sistnevnte ble stadig mer attraktivt da en stadig større andel resirkulert materiale ble brukt i produksjonen. Videre bidro isolatorene svært lite til de samlede miljøbelastningene. Studien fant også at miljøbelastningene til et malt ståltårn (for å forhindre korrosjon av metaller) var mindre enn for umalt stål.

2.1.3 Arealbruk

Evju et al. (2022) har evaluert vegetasjonsutviklingen på 295 byggeplasser tilknyttet vedlikehold av strømnettet i Norge og vurdert hvordan aktive tiltak for vegetasjonsgjenvinning kan redusere negative effekter på biologisk mangfold og naturlig karbonlagring. De registrerte vegetasjonsbehandlingene var blant annet såing med kommersielle frøblandinger, gjenbruk av original matjord, tilsetning av grus og naturlig gjenvekst. Store installasjonstyper som anleggsområder, deponier og restaurerte midlertidige veier sto for de største virkningene, da de hadde fullstendig omformet landskapsfunksjonene uten at det gjensto noe opprinnelig vegetasjon. Studien påpekte at manglende dokumentasjon under implementering og fravær av systematisk prosjektering og overvåking var store hindringer for å utføre relevante avbøtende tiltak i byggeprosjekter. Det var behov for en mer detaljert oversikt over gjennomførte tiltak, samt data om landskapsfaktorer, artsrikdommer og jordegenskaper. Størstparten av det påvirkede arealet var tidligere skogøkosystemer og det

nest mest påvirkede økosystemet var torvmyr. Studien påpeker at torvmyrer er ekstremt karbonrike økosystemer som bør unngås i byggearbeid for å redusere klimaendringer.

På oppdrag fra Klima- og miljødepartementet har Miljødirektoratet (2022) sammenstilt en rapport om virkemidler for å hindre nedbygging av myr. Formålet var å redusere klimagassutslipp, i tillegg til å redusere effekten på naturmangfold og andre økosystemtjenester. En betydelig reduksjon av myrer og våtmarker har skjedd ved nedbygging til fordel for et urbanisert samfunn med bebyggelse, samferdselsårer, kraftlinjer, vindkraft og vannkraftmagasiner. Myr er et svært viktig karbonlager som (med kun tre prosenr av verdens areal) lagrer to til tre ganger mer karbon enn verdens regnskoger. Nedbygging fører til store klimagassutslipp, redusert karbonbinding, tap av naturmangfold og andre viktige økosystemtjenester. Rapporten peker på at redusert omdisponering av skog og andre økosystemer er viktige tiltak, da dette er den største trusselen for tap av naturmangfold. I studien er tre typer virkemidler utredet og presentert, disse er forbud mot nedbygging, avgift og innstramning av virkemidler for arealplanlegging.

2.1.4 Biologisk mangfold

I en rapport av Eldegard et al. (2012) ble resultater fra en treårs datainnsamling av plante- og dyresamfunn langs kraftgater og tilgrensende skog presentert. Resultatene viste en betydelig forskjell i plante- og insektssamfunnet mellom kraftgater og tilgrensende skog. I kraftgaten var det en større andel av gress og løvfellende busker enn i skogen. Det var flere planteetende og pollinerende insekter i kraftgatene, og høyere diversitet av fugler i skogen. En undersøkelse av Bommarco et al. (2020) er også gjort på habitater og biologisk mangfold langs lineær infrastruktur. Resultater viste at landskap med kraftledningskorridorer hadde i gjennomsnitt seks flere plantearter enn landskap uten.

Vegetasjonssammensetning langs en kraftlinjekorridor i New England og dens påvirkning på plante- og dyreliv ble undersøkt av Leicht-Young et al. (2014) og Frye et al. (2019). I begge studiene ble 27 tilfeldig valgte områder langs en 140-km lang kraftlinje undersøkt, både linjestykkene og de parallelle skogområdene. Totalt ble 326 plantearter registrert i

linjestrekkene og 157 i skogområdene. Videre ble mer enn dobbelt så mange biearter og mer enn ti ganger så mange bie-individer observert i kraftkorridorene som i skogen. Det ble påpekt at selv om studien var for bier, kan resultatene være gjeldende for et bredt utvalg av pollinerende insekter.

En studie av Bartomeus & Hill (2016) har sammenlignet mangfoldet av humlearter mellom kraftlinjekorridorer og tilgrensende natur på ti ulike steder i Sverige. Resultatene viste at korridorer og andre typer vedlikeholdte habitater som veikanter har et viktig nivå av humleforekomst og vertsplanter. En studie av Berg et al. (2016) om betydningen av kraftledningskorridorer som sommerfuglhabitat, viste at slike korridorer er viktige habitater uavhengig av tilgrensende habitatsammensetning. Artsrikdommen av sommerfugl avtok med økende avstand til kraftledningskorridorer fra 0 til 500 meter.

Mulige effekter av vindparker og kraftledninger på den sårbare eurasiske uglen hubro er undersøkt av Husby & Pearson (2022). 48 hubroområder ble undersøkt med lydålere før og etter byggeperioden og en kort driftsperiode. Resultater viste at territorielle hubroer innenfor fire til fem km fra konstruksjonsforstyrrelser av kraftledninger forlot deres territorier i betydelig større grad (41 prosent reduksjon i antall hubroterritorier) enn hubroer lengre unna (23 prosent reduksjon). Studien pekte på at mulige årsaker kan være død som følge av kollisjoner, forstyrrelser fra utbygging og reduserte byttedyrarter. I rapporten «Overvåking av Hubro i Sør-Norge» (Gunnleifsen et al., 2020), har Norsk Ornitologisk Forening overvåket hubro i utvalgte områder i Sør-Norge siden 2012. I 71 prosent av overvåkingsterritoriene ble det registrert trusselfaktorer, og av disse utgjorde kraftlinjer 39 prosent og menneskelige forstyrrelser 28 prosent. Den største trusselen ved kraftlinjer var risikoen for elektrokusjon, og denne var hovedsakelig tilknyttet strømmaster ved linjer med middels sterk spenning (22 – 132 kV). Elektrokusjon er når en fugl får strømgjennomgang ved å komme i berøring med to strømførende ledninger, eller en strømførende ledning og en jordet enhet.

3. Metodikk, studieobjekter og datagrunnlag

3.1 Livsløpsvurdering (LCA)

Livsløpsanalyse er en metode som analyserer miljøaspekter og mulig miljøpåvirkning til et produkt eller tjeneste gjennom livsløpet. Livsløpet inkluderer utvinning av råvare, produksjon, transport, bruk og avfallshåndtering i form av resirkulering, deponi eller forbrenning.

Resultatene av en LCA tildeles ulike konsekvenskategorier, i form av miljø, naturressurser og menneskehelse. En internasjonal standardisert metode for å gjennomføre LCA er utarbeidet av International Organization for Standardization (ISO). Rammeverket og prinsippene til en LCA er beskrevet av ISO 14040. Der deles LCA inn i fire faser: hensikt og omfang, inventaranalyse (LCI), konsekvensanalyse (LCIA) og tolkning av resultater. Kravene for å gjennomføre en LCA går frem av ISO 14044 (ISO, 2006).

I første fase blir systemgrensene og detaljnivået til analysen satt gjennom definisjon av hensikt og omfang. I fase to gir inventaranalysen oversikt over ressurser som går inn og ut av systemet. Konsekvensanalysen er fase tre, der ytterligere informasjon blir oppgitt for å vurdere LCI-resultatene. I fase fire skal resultatene fra fase to og tre oppsummeres og tolkes. Dette gir grunnlag for konklusjoner, beslutninger og anbefalinger i samsvar med det som er bestemt i hensikt og omfang. LCA er en iterativ analyse som bruker resultatene fra de ulike fasene i hver enkelt fase, som gjør analysen til en omfattende og konsekvent studie. Det er viktig med åpenhet for å sikre en troverdig og riktig tolkning av resultatene. Produktet eller tjenesten som studeres i en LCA defineres ut fra funksjonell enhet (FU) (ISO, 2006).

Livsløpsanalyser er bygget opp av bakgrunns- og forgrunnsdata. Bakgrunnsdata gir informasjon om energi og materialer til forgrunndelen av systemet der interessen er størst og det skjer individuelle målinger (European Commission et al., 2010). Systemgrensen bestemmer hvilke prosesser som er inkludert i systemet, og settes blant annet ut fra hensikt og omfang, målgruppen, databegrensninger og kostnader. LCA kan benyttes til ulike formål, f.eks. til å identifisere hvor i livsløpet et produkt eller tjeneste har størst potensiale for å forbedre sin miljøpåvirkning. Videre kan metoden styrke beslutningsgrunnlaget til beslutningstakere i ulike bedrifter og industri som arbeider med produkt, design og redesign, prioritetsbestemmelser eller strategisk planlegging. LCA kan også brukes til å markedsføre et

produkt eller tjeneste, f.eks. med miljømerker og ved å dokumentere hvor miljøvennlig et produkt er (ISO, 2006).

SimaPro 9.4 er benyttet til å gjennomføre livsløpsanalysen, og Ecoinvent 3.8 er brukt som bakgrunnsdatabase. SimaPro har vært blant de ledende LCA-programvareløsningene i over 30 år og er brukt i mer enn 80 land. SimaPro er en kilde til vitenskapsbasert informasjon som er designet for full åpenhet. Med programvaren kan man enkelt modellere og analysere komplekse livssykluser på en systematisk og transparent måte, og måle miljøpåvirkningen av produktene og tjenestene på tvers av alle livssyklusstadier (SimaPro, u.å.-a).

3.2 Areal metode

Metoden som er brukt til å hente ut arealstatistikk er et geoprosesseringsverktøy i ArcGIS Pro. Dette er en automatisert analyseprosess som gjør det mulig å kjøre analysen på alle kraftlinjestrekninger man ønsker å undersøke. Input i analysen er kraftlinjen i linjeformat, bredde på traseen og hvilke datasett som skal analyseres. Når trasélinjen tegnes opp blir dataen hentet ut, og med en python funksjon blir dataen overført til Excel. Man kan få ut data i mange ulike formater, f.eks. per totalt areal, areal per overført energimengde eller areal per km ledningsstrek. Metoden er utviklet gjennom BmB i NORSUS, og er ikke kommersielt tilgjengelig (frokostmøte, presentasjon av Geodata, 28.06.2022).

I denne studien er bredden på traseen 30 meter. Det oppsto en misforståelse i kommunikasjonen med Geodata, som førte til at ryddebeltet ble 60 meter i stedet for 30. Da det ikke var tid til å håndtere en ny analyse av arealstatistikken, ble all statistikk delt på to for å tilsvare arealet til et 30 meters ryddebelte.

3.3 Studieobjekt

3.3.1 Det norske kraftsystemet

I Norge har vi, som tidligere nevnt, tre nettnivåer. Store produksjonsanlegg og forbrukere er knyttet til transmisjons- eller regionalnettet. Mindre produksjonsanlegg er knyttet til regional-

eller distribusjonsnett, og alminnelig forbruk fra husholdninger, småindustri og tjenesteyting er vanligvis knyttet til distribusjonsnett (Olje og Energidepartementet, 2019).

Transmisjonsnett utgjør til sammen om lag 11 000 km, og har et høyt spenningsnivå, normalt mellom 300 og 420 kV. Nettet frakter strøm fra store produsenter til store forbrukere i hele landet, og dekker utlandsforbindelser. Regionalnett er et bindeledd mellom transmisjons- og distribusjonsnett, har et spenningsnivå på mellom 33 til 132 kV og utgjør omtrent 19 000 km. Det skilles mellom høy- og lavspent distribusjonsnett, der høyspent har spenning fra 1 til 22 kV, og lavspent har spenning under 1 kV, normalt mellom 230 – 400 V. Det høyspente distribusjonsnett utgjør omtrent 100 000 km (Olje og Energidepartementet, 2019).

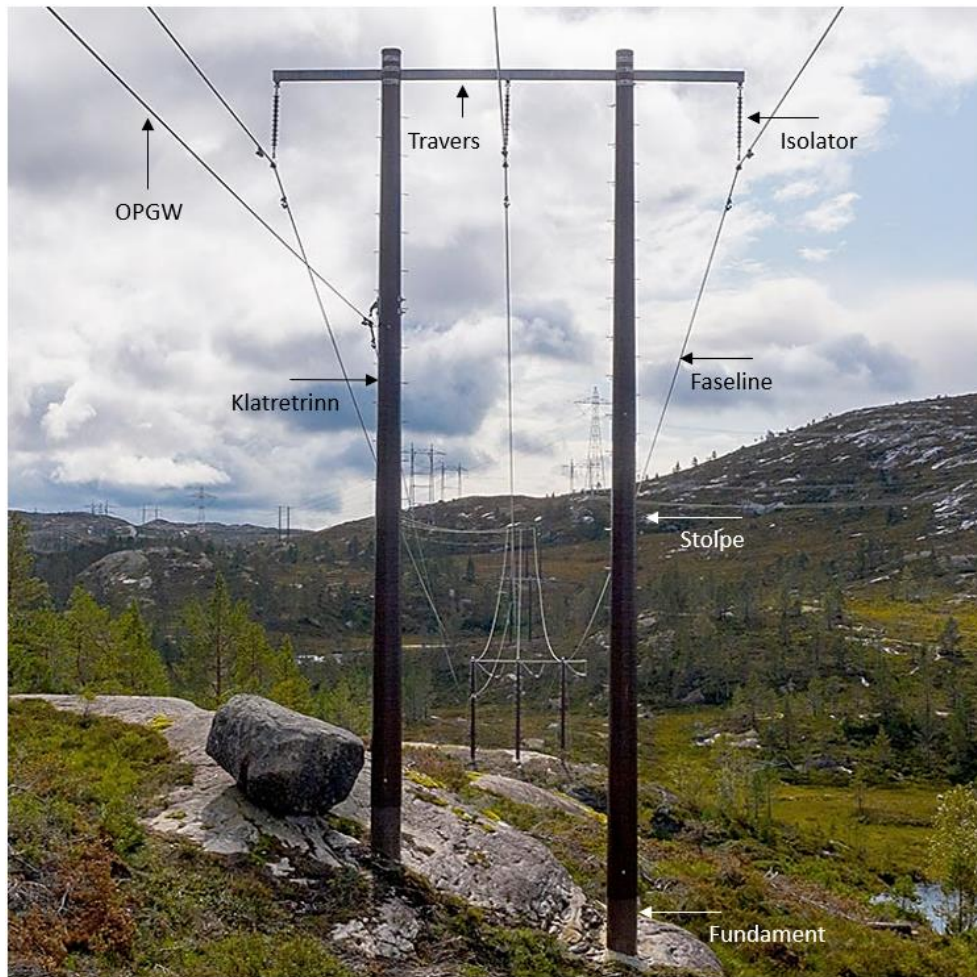
Nett-tap er energi som går tapt ved transport av elektrisk energi i kraftnett, fordi det kreves energi for å frakte strøm. Omtrent ti prosent av strømmen som transporteres gjennom kraftnett går tapt på veien fra kraftprodusent til sluttkunde. Dette inkluderer tap i høyspent nett, regionalnett, lokale distribusjonsnett og transformatorer. Fysiske lover gjør at tapet i nettet ikke er mulig å unngå. Den strømmen som går tapt må nettselskapene kjøpe tilbake for markedspris, og ekstrakostnadene som oppstår for nettselskapene sendes videre til kunden i form av økt nettleie (Norgesnett, u.å.).

Transformatorer med gassisolert anlegg bruker svovelheksafluorid (SF₆-gass) som isolasjons- og slukkemiddel i kapslede anlegg og i andre komponenter som for eksempel effektbrytere (Statnett, 2021). Gassen er flere ganger tyngre enn luft, og vil derfor fortrenge luften i for eksempel kummer og beholdere. SF₆-gass er en usynlig, luktfri og ugiftig gass, men den er svært miljøskadelig og et viktig bidrag til utslipp av klimagasser fra kraftbransjen (Holtet, 2022). 1 kg SF₆ tilsvarer 24 300 kg CO₂-eq (Smith et al., 2021). Hvert år skjer lekkasjer som forårsaker utslipp av SF₆-gass i energisystemet (Istad, 2021). Selv om SF₆ er en viktig klimagass, er den utelatt fra denne studien fordi den ikke inkluderer transformatorstasjoner eller andre komponenter som bruker SF₆-gass.

3.3.2 Komponenter i kraftsystemet

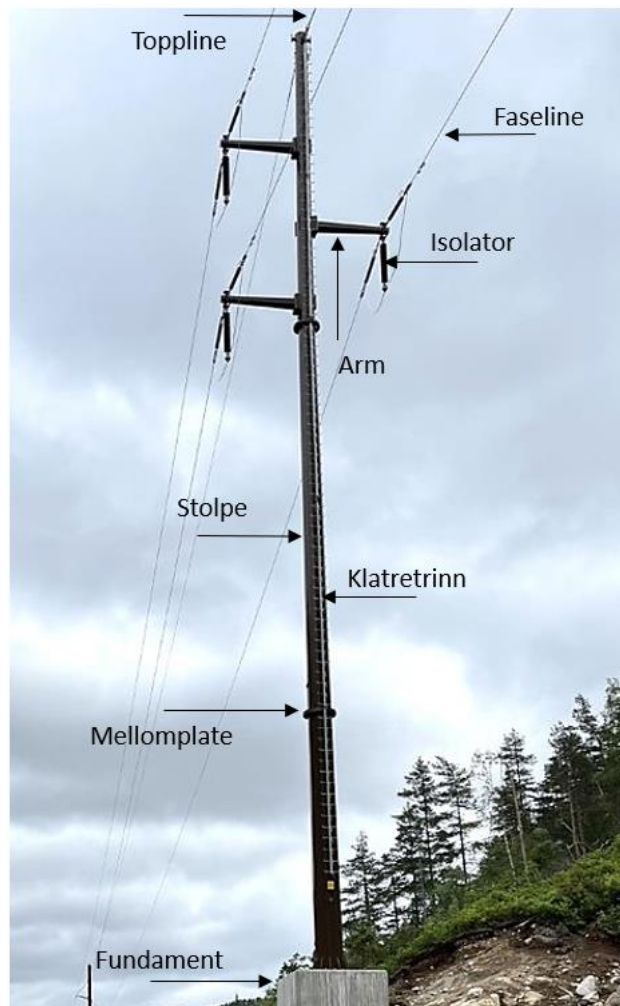
Et kraftnett består av mange ulike komponenter. En mast er en konstruksjon bestående av stolper, travers, isolatorer og evt. annet utstyr. I Kystlinja vil Glitre Nett operere med mastetyperne bæremast, vinkelmast og vinkelforankringsmast. Bæremaster benyttes i rette strekk der kreftene stort sett er vertikale. Vinkelmaster benyttes i vinkler, og skal tåle store krefter både langsetter og på tvers. Vinkelforankringsmaster benyttes i ender eller steder som skal tåle store krefter i tillegg til linebrudd. Videre varierer konfigurasjonen mellom enkel-, dobbel- eller trippelmast. Enkel-, dobbel- og trippel indikerer om masten inneholder én, to eller tre stolpeelementer. En stolpe er et rør av kompositt eller stål (J.T. Amundsen, personlig kommunikasjon, 23. mars 2023).

Figur 1 viser en dobbelmast i komposittmateriale. Bildet er hentet fra hjemmesiden til Comrod, og piler med beskrivelse er deretter plassert (Comrod, u.å.). Traversen kobler de to stolpene sammen, og holder faselinene oppe. Isolatorer skjerner de elektriske lederne fra omgivelsene, og er ofte av porselen eller glass (Hofstad, 2020). I figuren er det brukt en underliggende optisk jordledning (OPGW), som kombinerer funksjonene til jording og kommunikasjon (amokabel, u.å.). Faseline er den linjen som frakter strøm. Overføringsnett har en trefaset vekselstrøm, som betyr at systemet har tre faseledere som utgjør en linje. Linjen går fra en transformatorstasjon til en annen (Giset & Særen, 2017). Fundamentet sørger for å holde masten oppe, og til denne masten er det brukt et fundamentrør i kompositt satt ned i fjell. Stolpene sørger for at linene går over terrenget, og klatretrinn gjør at man kan klatre opp i masten og gjøre vedlikehold.



Figur 1 Komponenter i dobbelmast kompositt.

Figur 2 viser en enkelmast i stål med betongfundament. Bildet var en del av datagrunnlaget fra Glitre Nett, og piler med beskrivelse er senere plassert. I denne masten er det tre armer som holder faselinene, og fundamentet er et betongfundament. Det er brukt en toppline, som også er en jordledning, men som henger høyere enn de strømførende linene (Rosvold, 2021). Stolpen monteres i tre deler, og mellom hver del er en mellomplate. I bunnen, rett over fundamentet er en bunnplate.



Figur 2 Komponenter i enkeltmast stål.

3.3.3 Kraftlinjetraseene

Studieobjektene i denne masteroppgaven er to strekninger med 132 kV regionalnettlinjer i Agder. Glitre Nett har planer om å erstatte eksisterende 110 kV linje med en 132 kV linje fra Kulia transformatorstasjon, via Vallemoen til Øye transformatorstasjon i Kvinesdal.

Norconsult er prosjektleder for prosjektet som er kalt Kystlinja. Kystlinja er delt inn i to delprosjekter, hvor Kystlinja 1 går fra Kulia til Vallemoen og Kystlinja 2 går fra Vallemoen til Kvinesdal (Agder Energi Nett, 2021). Kystlinja 1 ble konsesjonssøkt av Glitre Nett i juli 2021, og utredningsprogram er fastsatt (NVE, 2021). Kystlinja 2 ble konsesjonssøkt i mars 2023 og er under behandling hos NVE (NVE, 2023). Denne oppgaven vil analysere én delstrekning i Kystlinja 1: fra Kulia til Leire, og én delstrekning i Kystlinja 2: fra Lyngdal til Kvinesdal. De to strekningene er presentert i Figur 3.

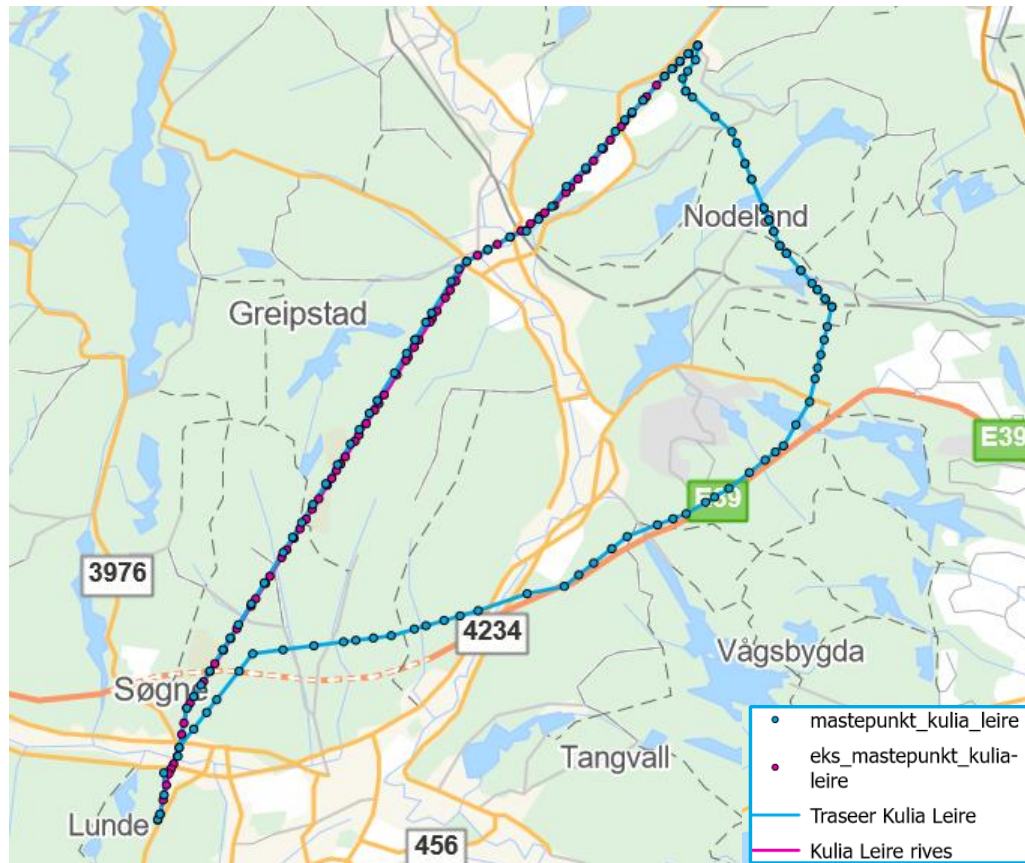


Figur 3 Lokasjon av Kystlinja 1 (blå) og Kystlinja 2 (rød).

Kystlinja ble satt i drift mellom 1969-1971, og nærmer seg teknisk levetid. En rekke master har omfattende skader fra råte og hakkespett, og for å unngå at forsynings sikkerheten trues skal nye master og liner på 132 kV driftsspenning erstatte de gamle. I tillegg har Glitre Nett de siste årene mottatt forespørsler fra store kraftintensive kunder om ny tilknytning. Foreløpige analyser viser at Kystlinja kan bli en flaskehals i fremtiden med hensyn til økt behov for strøm. Derfor mener Glitre Nett at økning av overføringskapasitet er nødvendig for å dekke et økende behov i området (Løvland, 2021).

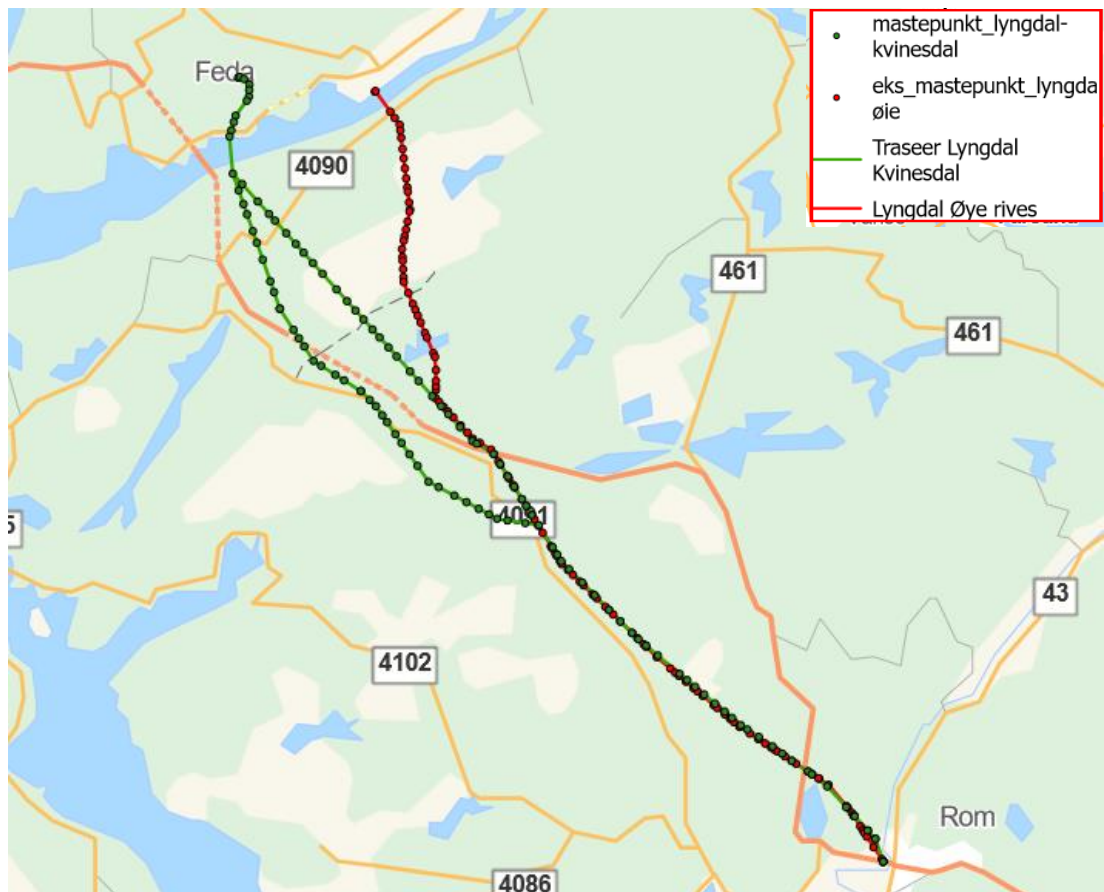
Glitre Nett meldte to hovedalternativer på strekningen Kulia – Leire, se Figur 4. Denne oppgaven har analysert begge alternativene. I alternativ 1 går ny linjetrasé parallelt med eksisterende trasé i en forholdsvis rett linje fra nordøst til sørvest, og med en lengde på tolv km. Det nye nettet vil bygges inntil det gamle og båndlegges 30 m ryddebelte langs hele strekningen. Når det nye nettet står klart, kan den gamle traségaten tilbakeføres til naturen. Denne strekningen omtales med forkortelsen K1Ø (Kystlinja 1 øvre). Alternativ 2 er en lengre trasé som går i sørøstlig retning mot Kristiansand før den går i en forholdsvis rett linje mot Leire i sørvest. Lengden på linjestrekket er 15,7 km, og deler av strekningen vil gå parallelt med nye E39. Ved dette alternativet frigjøres arealet fra tidligere trasé, og et nytt båndlegges. Det er dette alternativet Glitre Nett har konsesjonssøkt, fordi det er forventet økt etterspørsel i dette området i fremtiden. Denne strekningen omtales med forkortelsen K1N (Kystlinja 1

nedre). I Figur 4 viser de blå linjene og punktene traséalternativer og mastepunkter for ny trasé, og den rosa linjen og de rosa punktene viser traseen som skal rives og eksisterende mastepunkt.



Figur 4 Kulia – Leire Kystlinja 1.

I strekningen Lyngdal til Kvinesdal er det også analysert to alternativer, vist i Figur 5. Omtrent halve strekningen fra Lyngdal mot nordvest er lik for begge alternativer. Deretter deler strekningene seg, før de til slutt kommer sammen igjen i Kvinesdal. Når traseene skiller, går de ganske parallelt i nordvestlig retning. Alternativ 1 går litt lenger nordøst og mer over fjell enn alternativ 2 som går mer i skog. Alternativ 1 vil omtales med forkortelsen K2Ø (Kystlinja 2 øvre), og alternativ 2 med K2N (Kystlinja 2 nedre). I Figur 5 viser de grønne linjene og punktene traséalternativer og mastepunkter for ny trasé, og den røde linjen og de røde punktene viser traseen som skal rives og eksisterende mastepunkt.



Figur 5 Lyngdal – Kvinesdal Kystlinja 2.

3.4 Datagrunnlag

I 2012 søkte Glitre Nett om konsesjon til fornying av regionalnettlinjen fra Skjerka via Honna til Logna i Åseral kommune i Vest Agder (Fjermedal & Løvland, 2012). Da denne studien ble gjennomført var Kystlinja ennå ikke detaljplanlagt, og datagrunnlaget som var nødvendig for å gjennomføre en LCA var ikke tilgjengelig. Det ble derfor bestemt at den beste løsningen for å analysere Kystlinja var å ta utgangspunkt i et tidligere prosjekt gjennomført av Glitre Nett der datagrunnlaget var tilgjengelig. Etter ønske fra Glitre Nett er denne masteroppgaven basert på datagrunnlaget fra delstrekningen Honna til Logna. Datagrunnlaget fra Honna til Logna inneholdt ca. 160 PDF dokumenter, blant annet en oversikt over master, detaljerte materialoversikter med vektdata, tegninger av mastene og av et utvalg fundamenter med tilhørende armering, og informasjon om faser, toppliner og optisk jordledning (OPGW). Underveis i studien ble flere dokumenter gjort tilgjengelige (etter forespørsel), blant annet bøyelister for armeringsjern, fundamentrapporter og miljøregnskap for anleggsmaskiner brukt til skogrydding. Arbeidet startet med en systematisk gjennomgang av alle datasettene.

Datagrunnlag for master, fundamenter og liner ble sortert hver for seg. Master ble videre delt inn i kompositt- og stålmaster, fundamenter i ulike typer, og om de tilhørte sål- eller komposittmaster, og liner i faseline og OPGW. Datagrunnlaget i Honna – Logna ble senere oppskalert til å passe Kystlinja.

3.4.1 Livsløpsdata

Fra datagrunnlaget i Honna – Logna fulgte en oversikt over master med informasjon om blant annet mastenummer og mastetype; bære-, vinkel- eller vinkelforankringsmast. Videre inneholdt mastetegningene høyde på mastene og type konstruksjon; enkel-, dobbel- eller trippelmast. Materialoversikten inneholdt vektinformasjon av de ulike komponentene i masten. Honna – Logna besto av 31 komposittmaster og 16 stålmaster. Én av stålmastene ble tatt ut av datagrunnlaget fordi den ikke var representativ for de mastetyperne som skulle benyttes i modelleringen videre. Dermed ble antallet stålmaster 15. Det er oppgitt at stålmaster kommer fra Warszawa i Polen og at komposittmaster kommer fra Tau i Rogaland. Transport fra Warszawa inkluderer ferge- og lastebiltransport, og fra Tau inkluderer kun lastebiltransport.

I Honna – Logna hadde stålmaster tre ulike typer fundament og komposittmaster to. Stålfundamentene besto av tradisjonelle betongfundament på løsmasser, på fjell og på fjell med en egenutviklet løsning av Glitre Nett kalt «Ronstofot». Ronstofot er en stålfot som festes i bunnen av masten og som tar opp krefter som fører til forminsknet betongvolum. Løsningen er inne til patentgodkjenning. Komposittmastene hadde to ulike typer fundament. Den ene var et tradisjonelt komposittfundament basert på å spreng og/ eller grave et hull og sette ned et plastfundamentrør, og deretter fylle igjen med selvkomprimerende pukk og stedlige masser. Det var et slisseboringsfundament, utført ved å slissebore i fjell og sette ned et komposittrør som limes fast i fjellet. Masten boltes så fast i komposittrøret.

For fundamentene benyttet for stålmaster ga fundamentrapporter og bøyelister anslag på volum av betongbruk og vekt av armering. Videre ble volum og/ eller vekt av fjellanker, bolter, mørtel, isolasjon, pukk, spreng-, grave- og fyllmasser beregnet ut fra opplysninger i

datagrunnlaget og forutsetninger om blant annet vekt av betong, pukk, fjell og isolasjon. For fundamentene tilhørende komposittmaster var det i fundamentrapportene oppgitt rørlengde, nedgravnings- og nedboringsdybde, mengde jordlag i forhold til fjell, gysemasse og betongbruk. I tillegg ble det gjort forutsetninger om blant annet vekt- og tykkelse av fundamentrør, vekt av pukk og fast fjell, mengde tilført pukk og diameter på utsprengt/ -gravd grop. Deretter ble vekten av plast- og komposittør og volum av spreng-, grave- og fyllmasser beregnet. Alle forutsetninger er beskrevet i kapittel 4.1. Materialene tilhørende fundamentene hadde ukjent opprinnelse, derfor ble det gjort en forutsetning om 200 kilometer transport med lastebil fra produsent til riggplass, med unntak av komposittfundamentrøret som det er antatt at også kommer fra Tau.

For faseliner ga konsesjonen til Kystlinja 1 informasjon om at linetype AL59-594 skal brukes. Denne består av legert aluminium og har en vekt på 1640 kg per km per line. Det er tatt utgangspunkt i at samme line vil brukes på Kystlinja 2, og at det brukes tre faseliner gjennomgående i alle linjestrekk. Det ble oppgitt av Glitre Nett at optisk jordledningskabel (OPGW) vil bli brukt på Kystlinja. På grunn av mangel på informasjon om denne typen kabel ble det valgt en OPGW for jording og kommunikasjon til bruk i luftledninger fra en Italiensk EPD. Kabelen besto av aluminium og hadde en vekt på 690 kg per km per linje (Prysmian Group, 2022). Materialene tilhørende linene hadde ukjent opprinnelse, og det er derfor også her gjort en forutsetning om 200 kilometer transport med lastebil fra produsent til riggplass.

For skogrydding i forkant av installering av anlegget ble det oppgitt drivstoffbruk for alle anleggsmaskiner, og for persontransport inn til området med skogrydding. Drivstoffet som ble benyttet var diesel for alle maskiner unntatt ATV som brukte bensin. Anleggsmaskinene var gravemaskin, hogstmaskin, lassbærer, motorsag og traktor med henger. Persontransport var personbil og ATV. Det er gjort forutsetninger i samarbeid med Glitre Nett om bruk av helikopter og traktor med henger som transportmiddel fra riggplass og inn til hvert mastepunkt ved installering og fra mastepunkt til riggplass ved demontering. Det er også gjort forutsetninger om sprenging og bruk av grave- og slisseboringsmaskin til installering og demontering av komponenter.

Bruksfasen består av nett-tap, hogst og skjøtsel av traseområdet og inspeksjoner. I denne studien er hogst og skjøtsel av traseområdet ikke inkludert. Det er oppgitt av Glitre Nett at

ingen komponenter i utgangspunktet har behov for å skiftes ut på Kystlinja. For avhending er det oppgitt at nesten alle materialer går til Norsk Gjenvinning Kristiansand etter endt livsløp, men at det er usikkert hva som skjer med kompositstolper og -fundament.

3.4.2 Arealdata

Arealstatistikken er hentet ut av Geodata, og kartlagene som er undersøkt og vurdert er: samlet arealbruk, areal av løsmasser, skogressurser og artsdata knyttet til registrering av sårbare og truede arter. Arealbruksdatalaget består av blant annet areal med bebyggelse, ferskvann, hav, dyrket jord, myr, skog og åpen mark. Arealer av løsmasser består av blant annet bart fjell, morenemateriale, torv og myr og ulike typer avsetning. Areal av skogressurser består av skogtyper som barblanding, løv-, furu- og grandominert skog, og artsdata er observasjoner av ulike typer arter som er sårbare, har ulik type risiko eller er truet i ulik grad. Dataen er direkte knyttet til traseenes 30 meters ryddebelte, som er sonen som påvirkes av direkte arealinngrep. Dataen er undersøkt i areal per funksjonell enhet.

4. Systembeskrivelse og avgrensing

4.1 Systembeskrivelse

Hensikten med masteroppgaven er å bidra til et godt og effektivt beslutningsgrunnlag for vurdering av trasévalg for kraftlinjer, samt valg av mastetyper og fundament. Til dette brukes metodene livsløpsanalyse og analyse av materialbruk og arealstatistikk. Livsløpsanalysen inkluderer produksjon og bruk av materialer, transport, installering, bruk, demontering og avhending. Arealanalysen ser på arealbruk av selve traségaten. Den funksjonelle enheten er 1 terrawattime overført og levert per km ledningsnett i en periode på 100 år. Økonomi er ikke inkludert i denne studien, selv om dette også er en viktig faktor for valg av trasé og materialbruk.

Målgruppen for studiet er Glitre Nett, som er utvikler av de aktuelle krafttraseene som analyseres, og NORSUS som vil bruke resultatene videre i BmB prosjektet. Resultatene og erfaringene kan også ha relevans for andre kraftnettselskaper og beslutningstakere for krafttrasévalg.

Generelle forutsetninger som er tatt

Forutsetning	Enhet	Kilde
Transportavstand for materialer med ukjent opprinnelse.	200 km	Kvalifisert vurdering ut tilgjengelig kunnskap.
Vekt av betong med armeringsjern.	2400 kg/ m ³	(Norsk Gjenvinning, 2015).
Vekt av betong uten armeringsjern.	2200 kg/ m ³	(Norsk Gjenvinning, 2015).
Vekt av pukk.	1500 kg/ m ³	(Molde pukkverk, u.å.)
Vekt av fast fjell.	2700 kg/ m ³	(NVE, 2022).
Vekt av isolasjon til stål løsmassefundament.	31,5 kg/ m ³	(EPD-Norge, 2020).
Tidsbruk helikopter tur retur rigg – masteplass.	8 minutter	Glitre Nett.
Tidsbruk traktor riggplass– masteplass.	13 minutter	Kvalifisert vurdering ut fra avstand og terreng.
Tidsbruk gravemaskin.	10 m ³ / time	Glitre Nett.
Tidsbruk slisseboringsmaskin per fundament.	2,2 time	Glitre Nett.

Gravemaskin effekt.	< 18 kW	Kvalifisert vurdering ut fra SimaPro og samtale med Glitre Nett.
Slisseboringsmaskin effekt.	> 75 kW	Kvalifisert vurdering ut fra SimaPro og Glitre Nett.
Lik vekt per høyde for kompositt-fundamentrør som for komposittmast.	33 kg/m	Kvalifisert vurdering ut fra dokumentasjon.
Galvanisering stål enkelmast (halvparten av stål dobbelmast).	53 kg	Kvalifisert vurdering ut fra dokumentasjon.
Gjennomsnittlig avstand fra betongkloss i stålfundament på fjell til grøftkant.	0,3 m på hver side	Kvalifisert vurdering ut fra tegning.
Tradisjonelt komposittfundament:		
Diameter på utsprengt/-gravd grop.	3 x rørdiameter.	Glitre Nett.
Tilført pukk i bunnen av utsprengt/-gravd grop.	10 cm	Glitre Nett.
Vekt av plastrør.	300 kg / m ³	Antakelse. <i>Ifølge (acplastics, u.å.) er antakelsen for lav, og ligger for PVC plast på 550 kg/m³.</i>
Plastrørtykkelse.	0,02 m	Kvalifisert vurdering ut fra billedokumentasjon.
Avhending:		
Komposittavfall.	100 % deponi	(Johannesson et al., 2020).
Glassavfall.	60 % materialgjenvinning 40 % deponi	(CEN, 2019).
Betongavfall (ink. armering, fjellanker og -bolter som sitter fast i betongen).	100 % deponi	(CEN, 2019).

4.2 Avgrensning

For å ha et godt sammenligningsgrunnlag for de ulike trasévalgene er samme funksjonelle enhet brukt. I Kystlinja 1 er lengden på linjetraseene 12 og 15,7 km, og i Kystlinja 2 er begge traseene 20,5 km. For å kunne sammenligne strekninger med ulik lengde er det i funksjonell enhet satt en avstand på 1 km linjetrasé, i tillegg til 1 TWh overført energi i en analyseperiode

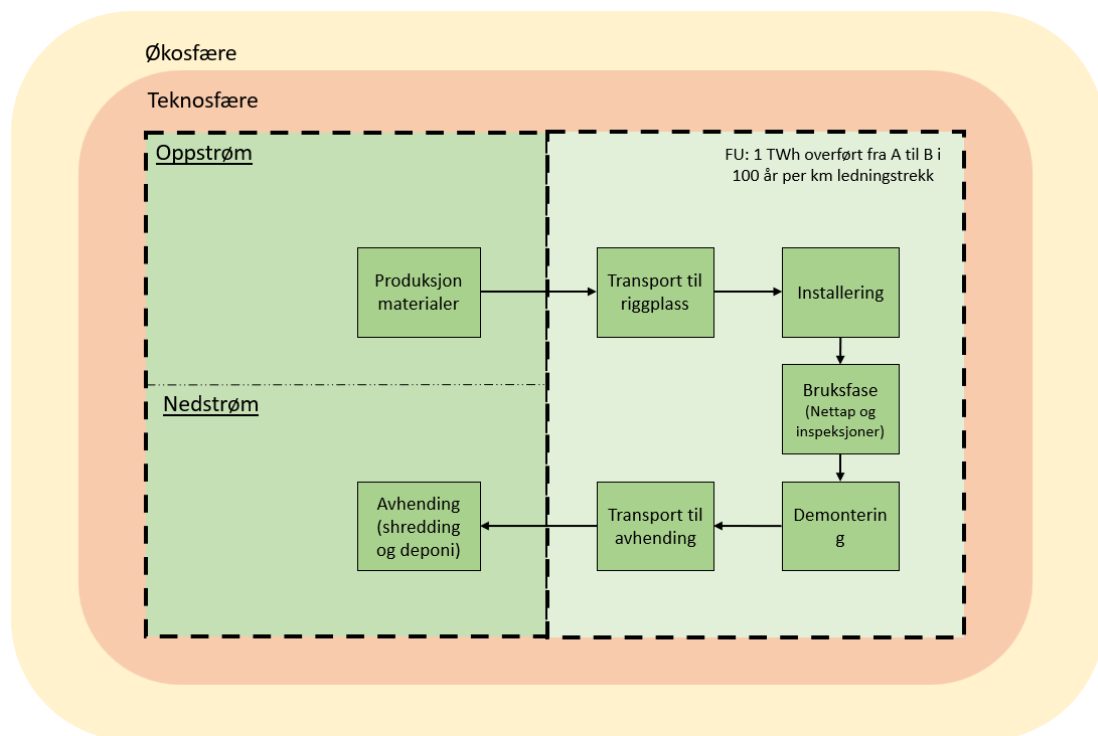
på 100 år. Analyseperioden på 100 år er valgt på bakgrunn av EPD-Norge sine produktkategoriregler (PCR) for elektriske kabler og ledninger. I dokumentet beskriver EPD-Norge at studieperioden innen elektriske kabler og linjer skal være 60 år for bygninger og 100 år for anleggsarbeid (EPD-Norge, 2022).

I SimaPro er databasen Ecoinvent 3.8 brukt. Ecoinvent er en database med høykvalitetsdata for miljøvurderinger over hele verden, og databasen inneholder mer enn 18 000 datasett som modellerer prosesser eller menneskelige aktiviteter, først og fremst bakgrunnsdata for analyser. Ecoinvent står for åpenhet og sporbarhet, og datasett leveres med omfattende dokumentasjon for alle aspekter av databasen. Systemmodellen «Allocation, cut-off by classification» er anbefalt av Ecoinvent for nye brukere av databasen, derfor er denne brukt i masteroppgaven. I systemmodellen er avfall produsentens ansvar. Om et materiale resirkuleres etter første gangs bruk får ikke produsenten noen kreditt for dette, men krediteres i neste ledd ved bruk av resirkulerte materialer som kun får belastningen av resirkuleringsprosessene (Ecoinvent, u.å.). Videre er markedsprosesser brukt, som inkluderer innsatsfaktorer for transportprosesser frem til produsent. Dette er anbefalt når data fra spesifikke leverandører ikke er kjent (SimaPro, u.å.-b).

Metoden som er brukt er EF 3.0 (normalization and weighting set). Dette er en konsekvensutredningsmetode utviklet av EU-kommisjonen til bruk i forbindelse med initiativet «Environmental Footprint» (EF). EF 3.0 er den nyeste tilgjengelige versjonen som er tilgjengelig (PRé Sustainability, 2022). Det finnes to metodiske tilnæringer for LCA (attributional og consequential), og i denne studien brukes attributional tilnærming. Hovedforskjellen er at attributional-tilnærmingen analyserer en eksisterende situasjon, og consequential-tilnærmingen analyserer hvordan en situasjon endres som følge av en beslutning (H. Raadal, personlig kommunikasjon, 03. februar 2022).

Figur 6 viser systemflytdiagrammet. Første trinn er produksjon av materialer. Videre transporteres ferdige materialer fra fabrikk til riggplass i Leire og Lyngdal. Deretter følger installering, som inkluderer transport fra riggplass til masteplass med helikopter og traktor, samt bruk av helikopter, gravemaskin, slisseboringsmaskin og sprenging til installering av

komponenter. Neste trinn er bruksfasen som omfatter nett-tap og inspeksjoner hvert femte år. Videre er demontering, som inkluderer transport fra masteplass til riggplass med helikopter og traktor, samt bruk av grave- og slisseboringsmaskin til å fjerne komponentene. Neste trinn er transport til avhending, hvorav alle materialer blir sendt til Norsk Gjenvinning i Kristiansand. Siste trinn er avhending. Siden cut-off er brukt inkluderer ikke virkningene av resirkulering av materialene.



Figur 6 Systemflytdiagram.

Studien omfatter ikke bygging og drift av transformatorstasjoner og dermed heller ikke belastninger knyttet til utlekking av SF₆-gass. Den inkluderer heller ikke påvirkningen av veinett og riggplasser, eller vedlikehold i form av skogrydding underveis i levetiden.

5. Inventaranalyse (LCI)

5.1 Introduksjon

I dette kapittelet presenteres inventardata for krafttraseene. Kapittelet tar for seg de ulike livsløpsfasene, som er produksjon av materialer, installering og demontering, bruksfase, transport og avfallshåndtering. Det er tre ulike case som er undersøkt for hver av de fire linjestrekkene.

- I. Komposittcase: alle master i rette strekk er av kompositt og følger samme oppbygning som Honna – Logna, med 58, 39 og 3 prosent av henholdsvis enkel-, dobbel- og trippelmaster. Alle master i vinkler er av stål enkelmast og endemaster er av stål vinkelforankringsmast.
- II. Stålcas: alle master er av stål og følger samme oppbygning som i Honna – Logna med 40 prosent enkelmaster og 60 prosent dobbelmaster.
- III. Ronstofotcase: følger samme masteoppbygning som stålcas, men med en optimalisering av fundamenter der alle stålfundamenter på fjell er byttet ut med Ronstofotfundamenter.

Totalt antall master, master i vinkler og i rette strekk ble beregnet ut fra Figur 4 og 5 i kapittel 3.3 Studieobjekt.

5.2 Produksjon av materialer

Av komposittmastene i Honna – Logna var 18 enkelmaster, tolv dobbelmaster og én trippelmast. Stålmastene besto av seks enkelmaster og ni dobbelmaster. For enkel-, dobbel- og trippelmaster i kompositt og enkel-, dobbel- og vinkelforankringsmaster i stål ble det funnet gjennomsnittsmaster basert på gjennomsnittsvekten til mastetypen. Masten med likest vekt som gjennomsnittsvekten ble valgt som gjennomsnittsmast for å representere hver mastegruppe. I gjennomsnittsmastene ble innholdet av materialer sortert fra høyest til lavest vekt. For analysen i SimaPro ble det satt en cut-off av materialer i hver mastetype på 98 prosent, hvilket betyr at 2 prosent av materialene med lavest vekt er utelatt. Videre ble mastene skalert opp for å passe til Kystlinja, hvor kreftene er større. Skaleringsprosentene ble oppgitt av Norconsult, og er presentert i Tabell 1. Antallet master av hver type for hvert

linjestrekk er presentert i Tabell 2 for komposittcase og Tabell 3 for stålcasse.

Materialinnholdet i alle gjennomsnittsmaster kan ses i vedlegg A.

Tabell 1 skalering av master.

Materiale	Mast	Prosentvis økning
Stål	Enkel	96 %
	Dobbel	96 %
	Vinkelforankring	173 %
Kompositt	Enkel	154 %
	Dobbel	32 %
	Trippel	93 %

Tabell 2 antall og type master komposittcase.

Linestrekk	Ant. master	Stål enkel	Stål vinkelforankring	Kompositt enkel	Kompositt dobbel	Kompositt trippel
		Vinkler	Ender	58 %	39 %	3 %
K1 Øvre	50	7	2	24	16	1
K1 Nedre	66	15	2	28	19	2
K2 Øvre	78	11	2	38	25	2
K2 Nedre	80	15	2	37	24	2

Tabell 3 antall og type master stålcasse.

Linestrekk	Ant. master	Enkel	Dobbel
		40 %	60 %
K1 Øvre	50	20	30
K1 Nedre	66	26	40
K2 Øvre	78	31	47
K2 Nedre	80	32	48

Det ble oppgitt av Norconsult at kompositt enkel- og trippelmaster ikke vil bli brukt i Kystlinja. Da denne informasjonen kom etter at datagrunnlaget var ferdig behandlet, er det valgt å se bort fra dette i studien. Leseren gjøres oppmerksom på at dette gjør at studien ikke vil være fullt ut relevant for de nye linjene som planlegges i Kystlinja. Årsaken til at enkelmast i kompositt har svært høy skaleringsprosent er fordi den skal tåle belastningen i Kystlinja. Vinkelforankringsmast i stål har også en relativt høy skaleringsprosent. Dette er fordi den gjennomsnittlige vinkelforankringsmasten i datagrunnlaget er svært mye mindre enn en gjennomsnittlig vinkelforankringsmast i Kystlinja.

I SimaPro ble det laget en egen LCI for alle komponenter i hver mast. Produksjonen av alle materialer ble lagt til i *inputs to technosphere: materials/fuels*, og dette samme ble prosesser for transport, installering og demontering. Market data, som er produksjon av materialer inkludert transport til fabrikk, er konsekvent benyttet. Til slutt ble alle komponentene lagt inn i en samlet LCI for hver mastetype. Det ble brukt prosesser for Europa, globalt eller resten av verden utenom Sveits. Vekten av alle komponenter ble lagt inn tilsvarende dataen i Honna – Logna, og deretter ble de oppjustert basert på Tabell 1.

For transport ble stålmastene fraktet fra fabrikk i Krakow til riggplass i K1 (Leire) og K2 (Lyngdal) med lastebil- og fergetransport. Komposittmastene ble fraktet fra fabrikk på Tau i Rogaland til riggplass i K1 og K2 med lastebiltransport. I SimaPro ble Europeisk lastebil, 16 til 32 tonn brukt, og fergen var en ferge for innenlands transport. Transport ble også bygget opp med egne LCI'er som ble lagt inn i en LCI for transport av hver mast. Også her ble det brukt parametere for oppskalering av mastene. For alle komponenter som ble transportert er enheten kgkm brukt.

I Honna- Logna var 20 og 80 prosent av fundamentene til stålmaster lokalisert på henholdsvis løsmasse, og fjell. Videre var 74 prosent av fundamentene til komposittmaster tradisjonelle og 26 prosent var utført med slisseboring. For alle fundamentene ble det også laget et gjennomsnittsfundament basert på gjennomsnittsvekten av alle materialer tilhørende fundamentet. I komposittcasen ble fordelingen av de ulike kompositt- og stålfundamentene fra Honna – Logna brukt, og i stålcasen ble kun fordelingen av stålfundamenter brukt. I Ronstofotcasen ble alle stålfundamentene på fjell byttet ut med Ronstofotfundament.

I SimaPro ble fundamentene bygget opp uten cut off, da de inneholdt langt færre materialer enn mastene. Fundamentene ble også skalert opp til å passe forholdene på Kystlinja. Det ble oppgitt av Norconsult at armering og fjellanker skulle ha en prosentvis økning på 35 prosent og resten av materialene på 20 prosent. Materialinnholdet i alle gjennomsnittsfundamenter kan ses i vedlegg B. Antallet av hvert fundament i de ulike casene i alle linjestrekk er presentert i Tabell 4 og Tabell 5.

Tabell 4 antall og type fundament kompositcase.

Linestrek	Ant. master	Ant. Stål	Ant. komposit	S_fjell	S_løsmasse	K_tradisjonell	K_slisseboring
				80 %	20 %	74 %	26 %
K1 Øvre	50	9	41	7	2	30	11
K1 Nedre	66	17	49	14	3	36	13
K2 Øvre	78	13	65	10	3	48	17
K2 Nedre	80	17	63	14	3	47	16

Tabell 5 antall og type fundament stålcasse.

Linestrek	Ant. master	S_fjell	S_løsmasse
		80 %	20 %
K1 Øvre	50	40	10
K1 Nedre	66	53	13
K2 Øvre	78	62	16
K2 Nedre	80	64	16

I SimaPro ble fundamentene bygget opp på samme måte som for mastene, med markedsdata og prosesser for Europa, globalt eller resten av verden utenom Sveits. En egen LCI for alle komponenter i hvert fundament ble laget, og deretter ble alle komponentene lagt inn i en samlet LCI for hver fundamenttype. Vekten av alle komponenter ble lagt inn tilsvarende dataen i Honna – Logna, og deretter oppjustert med parametere. Transport ble også bygget opp med egne LCI'er som ble lagt inn i en LCI for transport av hvert fundament. Komponentene i fundamentene er forutsatt å ha en gjennomsnittlig transport med lastebil på 200 km fra produksjonssted til riggplass.

For faseliner og OPGW ble vekten per kilometer ganget opp med antall kilometer i hvert linjestrek, som vist i Tabell 6. I SimaPro ble linene bygget opp på samme måte som master og fundamenter. Transport ble også her bygget opp med egne LCI'er, og det er forutsatt 200 km lastebiltransport for linematerialene.

Tabell 6 vekt av faseliner og OPGW.

Linjestrekk	Lengde [km]	Faseliner [kg]	OPGW [kg]
Liner [kg/km]		4 299	1 380
K1 Øvre	12	59 062	16 560
K1 Nedre	15,7	77 272	21 666
K2 Øvre	20,5	100 897	28 290
K2 Nedre	20,5	100 897	28 290
Totalt	69	338 128	94 806

5.3 Installering og demontering

For skogrydding i forkant av installering ble totalt drivstofforbruk per anleggsmaskin og persontransport delt på antall master i Honna – Logna. Deretter ble verdiene ganget opp med antall master i hvert linjestrekk i Kystlinja. For lastebil, hogstmaskin, lassbærer og traktor med henger ble drivstofforbruket regnet om til kilokilometer per mast. For gravemaskin og motorsag ble drivstofforbruket regnet om til time forbruk per mast, og for persontransport og ATV ble det regnet om til henholdsvis km og liter per installerte mast. I SimaPro ble en egen LCI for alle maskiner i skogryddingen opprettet, og deretter ble alle lagt inn i en felles LCI for skogrydding.

For installering ble det oppgitt av Glitre Nett at transporten fra riggplass til mastepunktene besto av 70 prosent helikoptertransport og 30 prosent traktortransport med henger. Avstand fra riggplass til masteplass er forutsatt å være én og en halv km. Maks nyttelast for helikopteret var 1 100 kg, og 8 000 kg for traktor med henger. For begge er det trukket fra en sikkerhetsmargin på ti prosent, som gir makslast på henholdsvis 990 og 7200 kg. Det er forutsatt at én helikoptertransport tur retur fra riggplass til masteplass tar åtte minutter. For traktor med henger er det forutsatt 13 minutter én vei, og returtransport med tom last er inkludert i prosessen i SimaPro. Faseline og OPGW ble installert med helikopter og det ble forutsatt at turen tar 30 minutter per line per km. Demontering ble bygget opp på lik måte som installering, bortsett fra at transportfordelingen mellom helikopter og traktor var 50 prosent hver, og at traktor ble brukt til å transportere liner i stedet for helikopter. Det ble også oppgitt at helikopteret fløy ti turer til og fra helikopterbase gjennom både installerings- og demonteringsperioden, der hver tur tok én og en halv time.

I SimaPro ble installering og demontering bygget opp på samme måte som øvrige komponenter. Det ble opprettet egne LCI'er for hver prosess, og deretter ble de lagt inn i hver sin LCI-prosess for installering og demontering av de ulike maste-, fundament- og linetyperne. I SimaPro ble det forutsatt at gravemaskinen brukt til installering og demontering var under 18 kW, og at den gravde i gjennomsnitt ti m³ i timen. For slisseboringsmaskinen ble det forutsatt at den var over 75 kW og brukte 2,2 timer per komposittfundament. Beregning av sprenging ble lagt inn per m³ i SimaPro. Det ble forutsatt at all betong i fundamentene hakkes opp under demontering, og at pukk og stedlige masser ble liggende igjen. Også her ble parametere brukt for å øke vekten av mastene og fundamentene som ble installert og demontert. For helikoptertransport og slisseboringsmaskin er timebruk per komponent brukt i SimaPro, for graving og sprenging er m³ brukt, og for traktortransport er kgkm brukt.

5.4 Bruksfase

Prosessene som ble inkludert i bruksfasen var inspeksjoner og nett-tap. Inspeksjoner gjennomføres hvert femte år med bruk av personbil og ATV. Det ble forutsatt bruk av to biler i en avstand på 50 km, og to ATV'er inne på anlegget som kjørte fra riggplass og inn til alle mastepunkter. For nett-tap ble det oppgitt dette var beregnet til 0,25 prosent og 0,82 prosent per line for henholdsvis Kystlinja 1 og 2, som utgjorde 0,74 og 2,47 prosent for tre faseliner. Videre ble spenning (kV), strømstyrke (A) og brukstid på 5000 timer per år oppgitt av Norconsult. Fra dette ble effekt, total overført energimengde og totalt nett-tap regnet ut. For K1 og K2 er gjennomsnittlig effekt i tunglasttimene henholdsvis 39,2 og 36,2 MW, total overført energimengde over 100 år er 19,6 og 18,1 TWh, og nett-tap over 100 år er 146,7 og 446,7 GWh.

I SimaPro ble nett-tapet lagt inn som ekstra energi som må produseres for å veie opp for det som går tapt underveis. Det ble lagt til markedsprosess for Norsk el-miks med høy spenning. Inspeksjoner ble lagt inn som transport og ble oppgitt i km for personbil og drivstoffbruk per mast for ATV.

5.5 Avhending

På Norsk Gjenvinning (u.å.) sine nettsider ble det funnet informasjon om avfallsprosessene for en del av materialene, med unntak av glass, betong og kompositt. For komposittmaterialet var meningen at denne studien skulle bruke data fra komposittprodusenter gjennom et prosjekt i NORSUS. Da denne dataen ble forsinket av produsentene, ble det gjort forutsetninger basert på en svensk studie om kraftstolper om at 100 prosent av materialet går til deponi (Johannesson et al., 2020). I studien ble det oppgitt at materialet i fremtiden vil kunne materialgjenvinnes. For glass og betong ble det brukt opplysninger fra EN 50693. Der oppgis det at 100 prosent betong går til deponi, og at 60 prosent glass går til materialgjenvinning og 40 prosent til deponi. Det ble forutsatt at armering, fjellbolter og fjellanker som sitter fast i betongen også går til deponi. Materialene som gikk til Norsk Gjenvinning er illustrert i Tabell 7. For transport til avhending ble alle materialene fraktet fra riggplass i Leire og Lyngdal til Norsk Gjenvinning sin fabrikk i Kristiansand.

Tabell 7 Materialer som går til Norsk Gjenvinning Kristiansand.

Materiale	Behandling	Gjenvinning
Aluminium kabel	Granuleres	Materialgjennbruk
Aluminium i mastekomponenter	Presses eller klippes	Materialgjennbruk
Stål i mastekomponenter	Klippes eller skjæres	Materialgjennbruk
Hardplast i komposittfundament	Presses, sendes til gjenvinning	Materialgjennbruk

Siden metoden «allocation by cut off» er brukt inkluderes ikke gevinstene av materialgjennbruk. Prosessene som inkluderes i analysen er transport til avhending, shredding av avfall (pressing, granulering, klipping, skjæring) og deponi.

5.6 Inn- og utgangsdata

Nesten all dataen som ble brukt i SimaPro er fra Ecoinvent 3.8. Noen prosesser ble hentet fra BmB sine prosjekter, og disse er listet opp i Tabell 8.

Tabell 8 Prosesser fra BmB i SimaPro.

BmB prosess	Studiens prosess	SimaPro Prosess
BmB Concrete, 30 MPa (RoW).	Betong	Concrete, 30MPa (RoW) market for concrete Cut off, U_A1-A3
BmB Polystyrene, general purpose (GLO).	Isolasjon	Polystyrene, general purpose (GLO) market for Cut-off, U_A1-A3
BmB galvanisert stål (Europe).	Galvanisert stål	Steel, low-alloyed for hot galvanizing (Europe) market for Cut-off, U_A1-A3 Zinc coat, pieces (RER) Cut-off, U
BmB steel, low alloyed (GLO).	Stål	Steel, low alloyed (GLO) market for Cut off, U_A1-A3

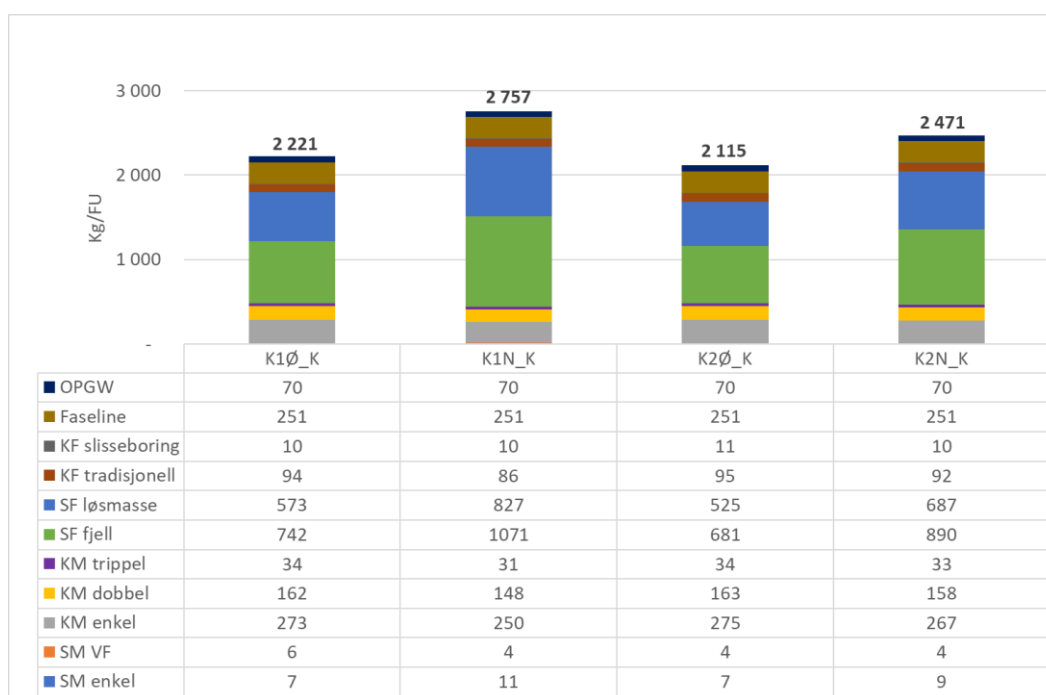
6. Resultater

6.1 Konsekvenser på forbruk av materialressurser, klimagassutslipp og arealbruk

6.1.1 Forbruk av materialressurser

I dette kapittelet presenteres resultater for forbruk av materialressurser i Kystlinja per funksjonelle enhet. I Figur 7 vises materialressursforbruk for komposittcasene i Kystlinja 1 (K1) og Kystlinja 2 (K2) øvre og nedre. K1N har høyest totalt materialforbruk med ca. 2 760 kg/FU, etterfulgt av K2N, K1Ø og K2Ø med 2 henholdsvis ca. 2 470, 2 220 og 2 115 kg/FU. For alle casene utgjør stålfundament på fjell det største bidraget til materialforbruk, med ca. 750 kg/FU (33 %) i K1Ø, 1 100 kg/FU (39%) i K1N, 700 kg/FU (32 %) i K2Ø og 900 kg/FU (36 %) i K2N. Deretter følger stålfundament på løsmasse med ca. 550 kg/FU (25 %) for K1Ø og K2Ø, 830 kg/FU (30 %) for K1N og 690 kg/FU (28 %) for K2N. Enkelmast i kompositt utgjør 250 – 275 kg/FU (9 - 13 %) for alle kraftlinjecasene, og faseliner utgjør 251 kg/FU (12 – 15%) for alle casene.

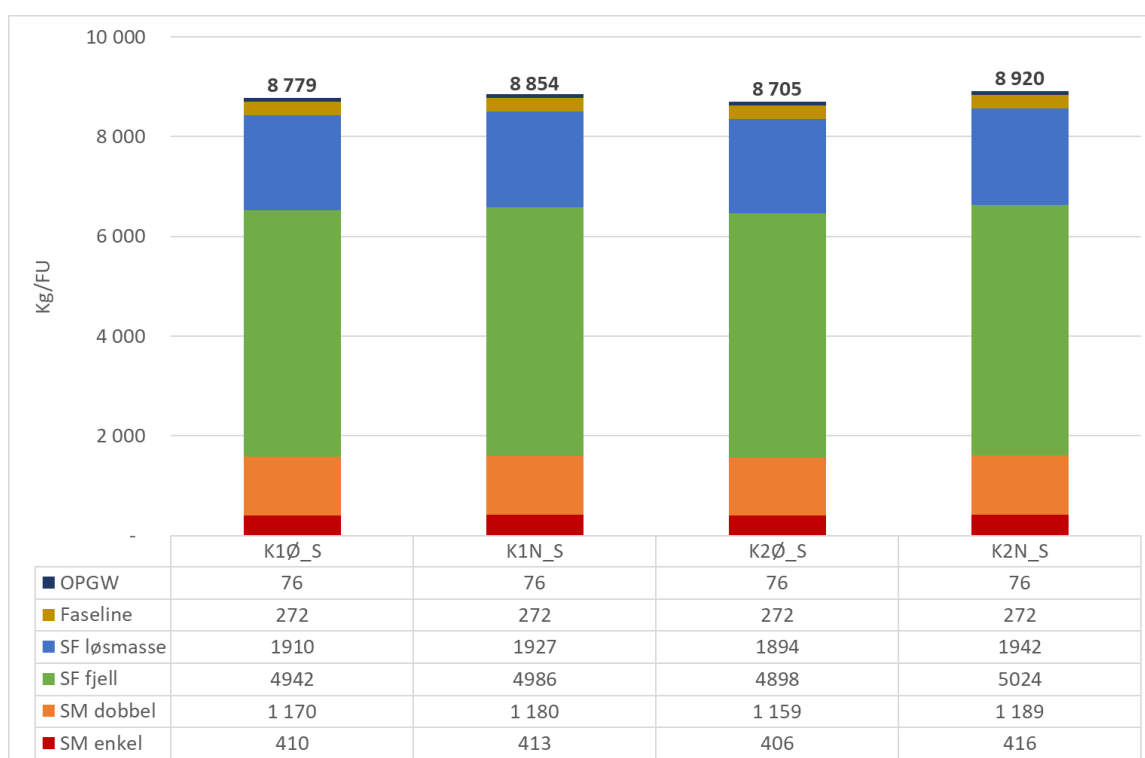
K1/2Ø_K= Kystlinja 1/2 øvre kompositt, K1/2N_K= Kystlinja 1/2 nedre kompositt, KF slisseboring= komposittfundament slisseboring, KF sprenging= tradisjonelt komposittfundament, SF løsmasse= stålfundament løsmasse, SF fjell= stålfundament fjell, KM trippel= komposittmast trippel, KM dobbel= komposittmast dobbel, KM enkel= komposittmast enkel, SM VF= stålmast vinkelforankring, SM enkel= stålmast enkel.



Figur 7 materialbruk Kystlinja Komposittcase.

I Figur 8 presenteres forbruk av materialressurser for stålcase i Kystlinja 1 og 2 øvre og nedre. Leseren gjøres oppmerksom på at det i denne figuren er brukt en skala med høyere verdier enn for komposittcase. Verdiene for stålcase er tre til fire ganger høyere enn for komposittcase. K2N har høyest totalt materialressursforbruk med 8 920 kg/FU, etterfulgt av K1N, K1Ø og K2Ø med henholdsvis ca. 8 850, 8 780 og 8 700 kg/FU. Også her utgjør stålfundament på fjell det største bidraget til forbruk, med ca. 5 000 kg/FU (56 %) for alle case. Deretter følger stålfundament på løsmasse med ca. 1 920 kg/FU (22 %) for K1Ø og K1N, 1 900 kg/FU (22 %) for K2Ø og 1 940 kg/FU (22 %) for K2N. Stål dobbelmast utgjør ca. 1 175 kg/FU (13 %) for alle stålcase, og stål enkelmast ca. 410 kg/FU (5 %) for alle case. Det er lite variasjon mellom de fire case.

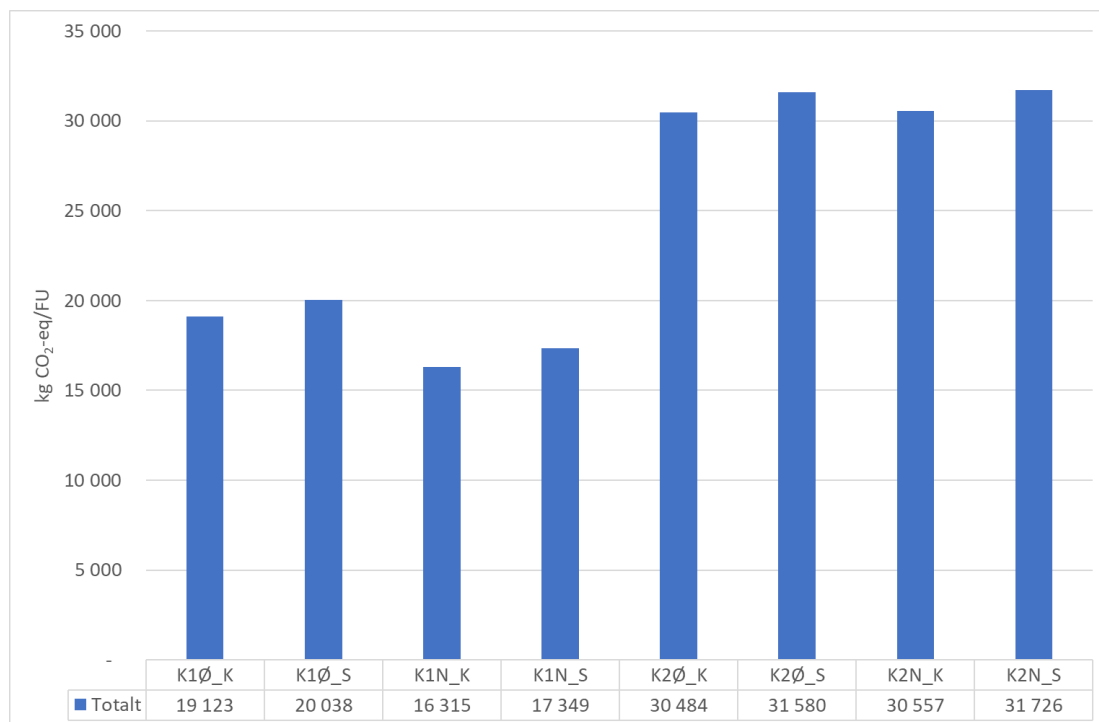
K1/2Ø_S= Kystlinja 1/2 øvre stål, K1/2N_S= Kystlinja 1/2 nedre stål



Figur 8 materialbruk Kystlinja Stålcase.

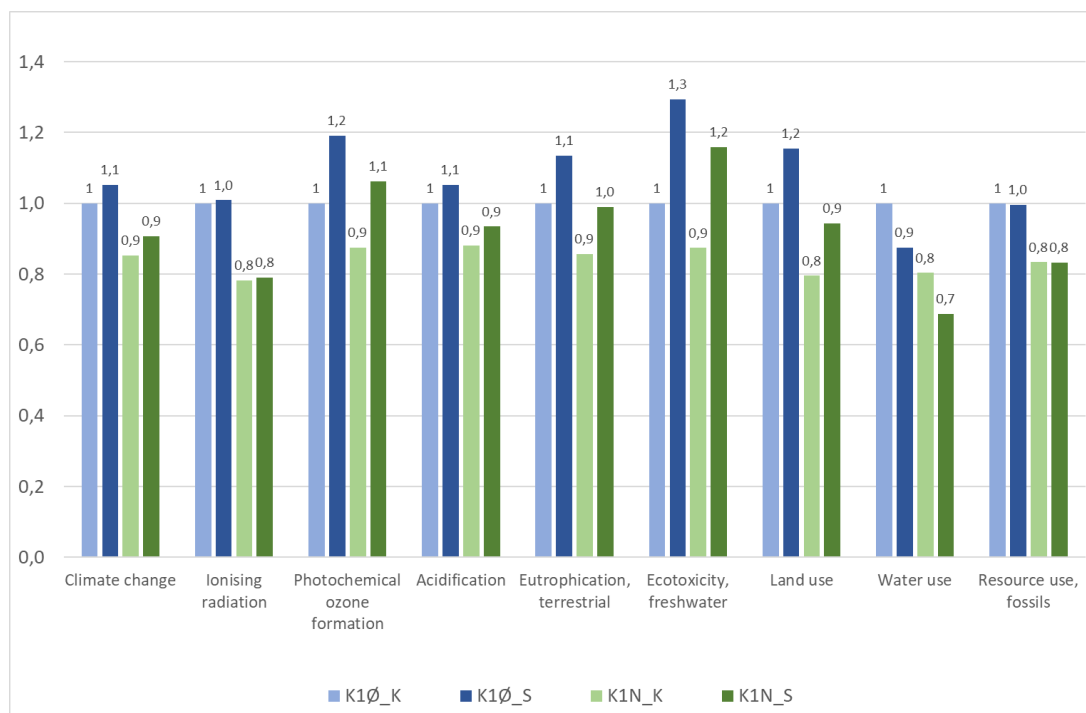
6.1.2 Klimagassutslipp og miljøpåvirkning

I dette kapittelet presenteres resultater for klimagassutslipp per funksjonelle enhet for Kystlinja 1 og 2 øvre og nedre, og påvirkning i ni utvalgte miljøkategorier. Figur 9 presenterer totalt klimagassutslipp for alle scenarier. Generelt har K2 betydelig høyere klimagassutslipp enn K1. I K1 har nedre kompositt- og stålcasene lavest klimapåvirkning med henholdsvis ca. 16 300 og 17 350 kg CO₂-eq/FU. Videre har øvre kompositt- og stålcasene utslipp på henholdsvis ca. 19 100 og 20 000 kg CO₂-eq/FU. K2 har generelt en god del høyere utslipp, men mindre variasjon mellom kraftlinjecasene. Alle ligger på 30 500 – 31 700 kg CO₂-eq/FU. Komposittcasene i K2 øvre og nedre har ca. 1 100 CO₂-eq/FU lavere utslipp enn stålcasene i øvre og nedre. Det som utgjør den store forskjellen mellom K1 og K2 er nett-tap.



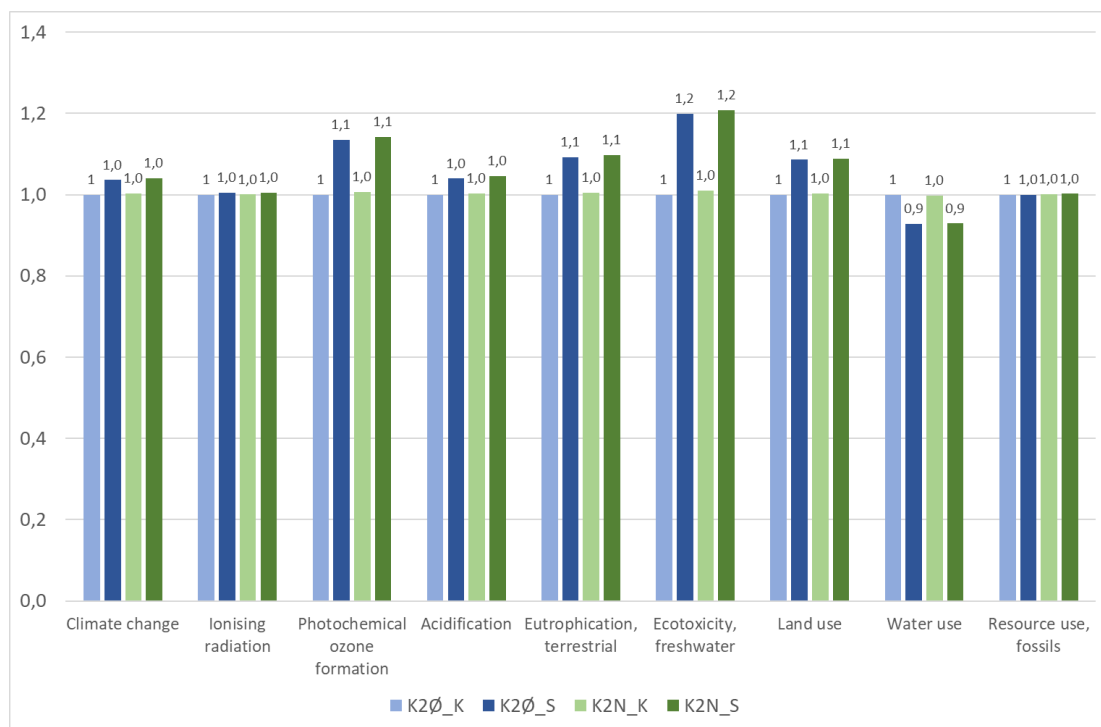
Figur 9 GWP Kystlinja.

Av miljøkategorier har denne studien fokus på klimagassutslipp. Det påpekes allikevel at andre miljøkategorier også kan være viktige for å sammenligne de ulike alternativene i et helhetlig miljø- og ressursperspektiv. Figur 10 presenterer resultater for ni miljøkategorier for Kystlinja 1 med øvre kompositt som referansescenario. Figuren viser at øvre stål har størst relativ påvirkning i åtte av ni kategorier, og størst for «Ecotoxicity, freshwater» med 1,3 og «Photoxhemical ozone formation» og «Land use» med 1,2. Øvre kompositt har høyest relativ påvirkning i kategorien «Water use» med 1,0. Nedre kompositt har lavest relativ påvirkning i klimagassutslipp og alle andre kategorier unntatt water use, med 0,8 – 0,9 for alle kategorier. Nedre stål har også lav relativ påvirkning for klimagassutslipp (0,9), men høyere for spesielt «Photoxhemical ozone formation» (1,1), «Ecotoxicity, freshwater» (1,2).



Figur 10 Relativ miljøpåvirkning Kystlinja 1.

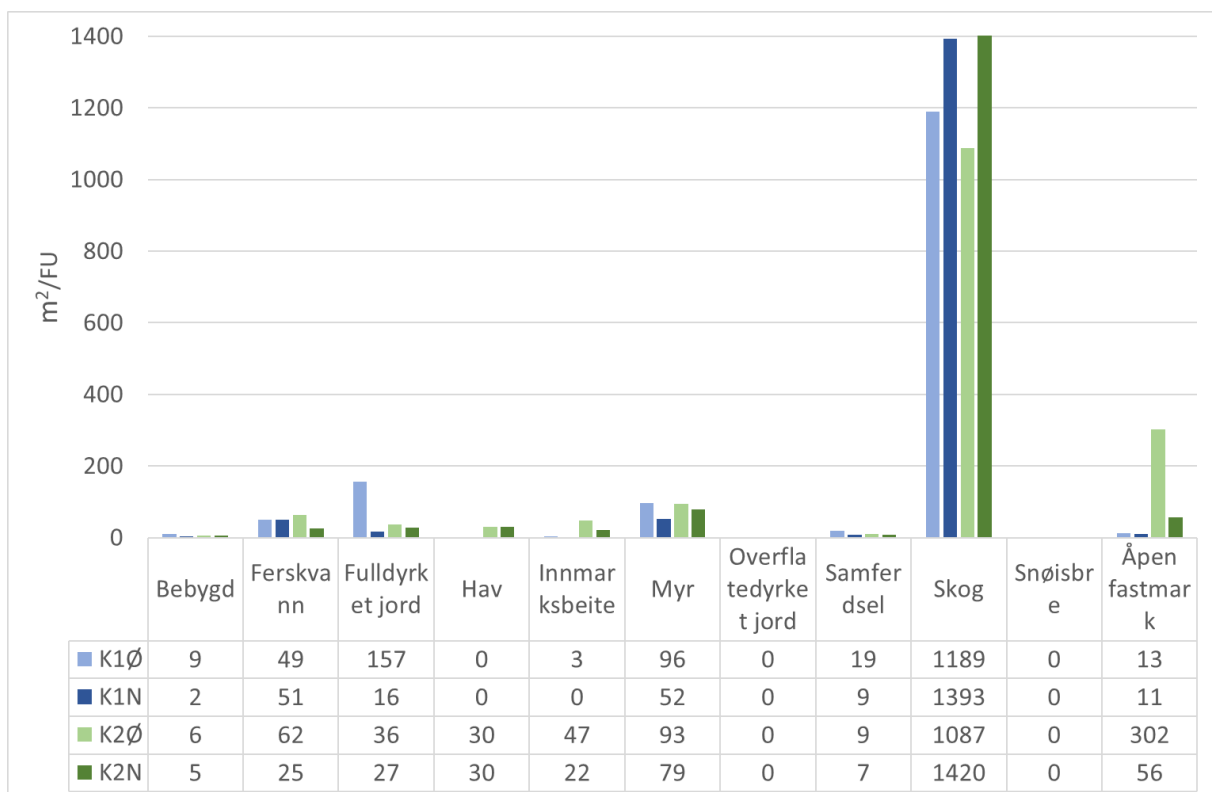
I Figur 11 presenteres resultater for de samme ni miljøkategoriene for Kystlinja 2 med øvre kompositt som referansescenario. I Kystlinja 2 er det mindre variasjon både mellom og innad i de ulike miljøkategoriene. Figuren viser at nedre kompositt har like resultater som referansescenarioet i alle kategorier, med 1,0 i verdi. Øvre og nedre stål har også de samme verdiene i alle miljøkategorier, men noe høyere enn referansescenarioet. Øvre og nedre stål har størst relativ påvirkning i seks kategorier, og størst er påvirkningen for «Ecotoxicity, freshwater» med 1,2 og «Eutrophication, terrestrial» med 1,1. Øvre og nedre kompositt har høyest relativ påvirkning i kategorien, «Water use» med 1,0. Alle kraftlinjescenarier har lik relativ påvirkning med 1,0 i de to kategoriene «Ionising radiation» og «Resource use, fossils».



Figur 11 Relativ miljøpåvirkning Kystlinja 2.

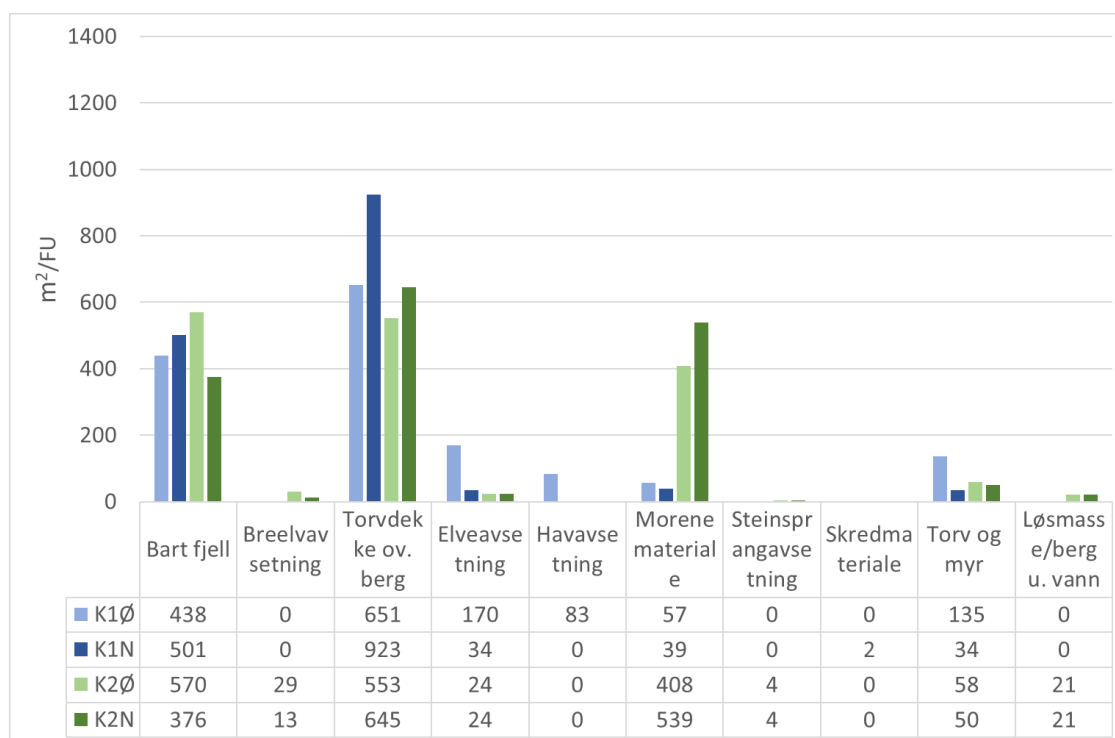
6.1.3 Arealbruk

I dette kapittelet presenteres resultater for arealbruk i Kystlinja med fokus på arealressurser, løsmasser, skog, og artsdata (truede og sårbare arter). Resultatene er presentert i m² per funksjonelle enhet (m²/FU) for de tre førstnevnte og i antall registrerte observasjoner per funksjonelle enhet og per km for artsdata. Figur 12 presenterer resultater for arealressurser. I linjestrekkene i K1 og K2 er totalarealet per funksjonelle enhet henholdsvis 1 535 m², og 1 670 m². Av figuren kommer det frem at det største arealforbruket for alle fire traseer er ulike typer skog. K1N og K2N har en høyere andel skog med henholdsvis 1 390 m²/FU (90 %) og 1 420 m²/FU (85 %), mot K1Ø og K2Ø som har henholdsvis 1 190 m²/FU (78 %) og 1 090 m²/FU (65 %). K2Ø har en del åpen fastmark med ca. 300 m²/FU (18 %), og K1Ø en del fulldyrket jord med ca. 160 m²/FU (10 %). Når det kommer til myr har K1Ø og K2Ø ca. 95 m²/FU (6 %), K1N ca. 50 m²/FU (3 %) og K2N ca. 80 m²/FU (5 %).



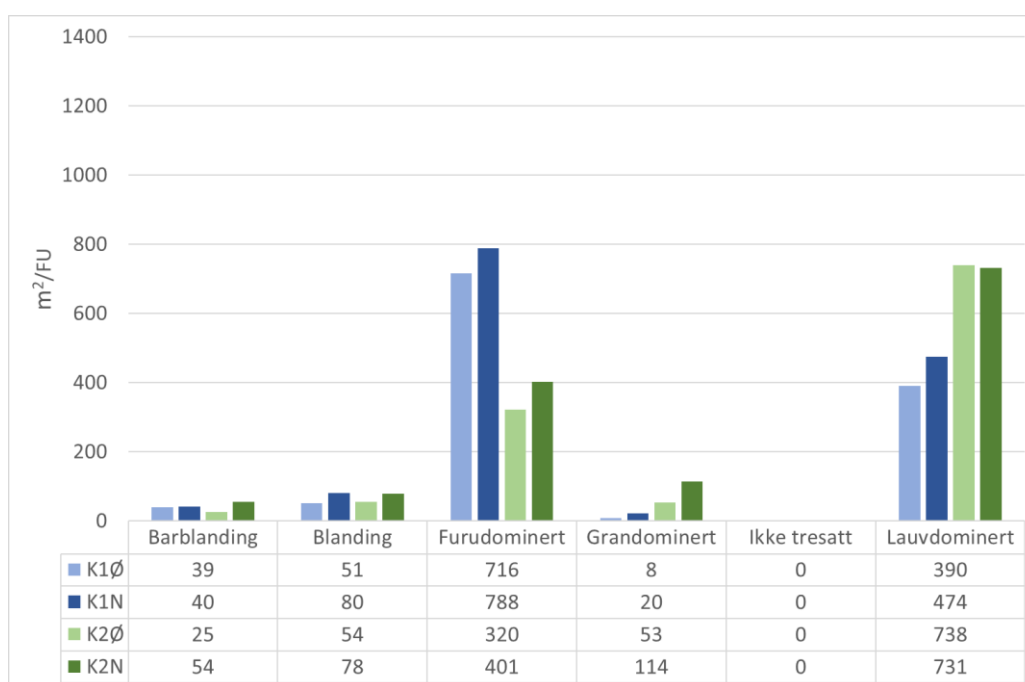
Figur 12 Arealressurser.

Figur 13 presenterer resultater for løsmasser. Også her er totalarealet per funksjonelle enhet 1 535 m² for K1 og 1 670 m² for K2. Av figuren kommer det frem at de typene løsmasser som utgjør størst areal for alle traseer er torvdekke over berggrunnen og bart fjell. K1N har mest torvdekke over berggrunnen med ca. 920 m²/FU (60 %), mens de tre andre traseene ligger på mellom 550 – 650 m²/FU (33 – 42 %). K1N og K2Ø har mest bart fjell med henholdsvis 500 m²/FU og 570 m²/FU (33 - 34 %), og K1Ø og K2N har henholdsvis ca. 440 m²/FU (29 %) og 380 m²/FU (22 %). K2N og K2Ø har en del morenemateriale med henholdsvis ca. 540 m²/FU (32 %) og 410 m²/FU (24 %). K1Ø har 170 m²/FU (11 %) elveavsetning, 135 m²/FU (9 %) torv og myr og ca. 80 m²/FU (5 %) havavsetning.



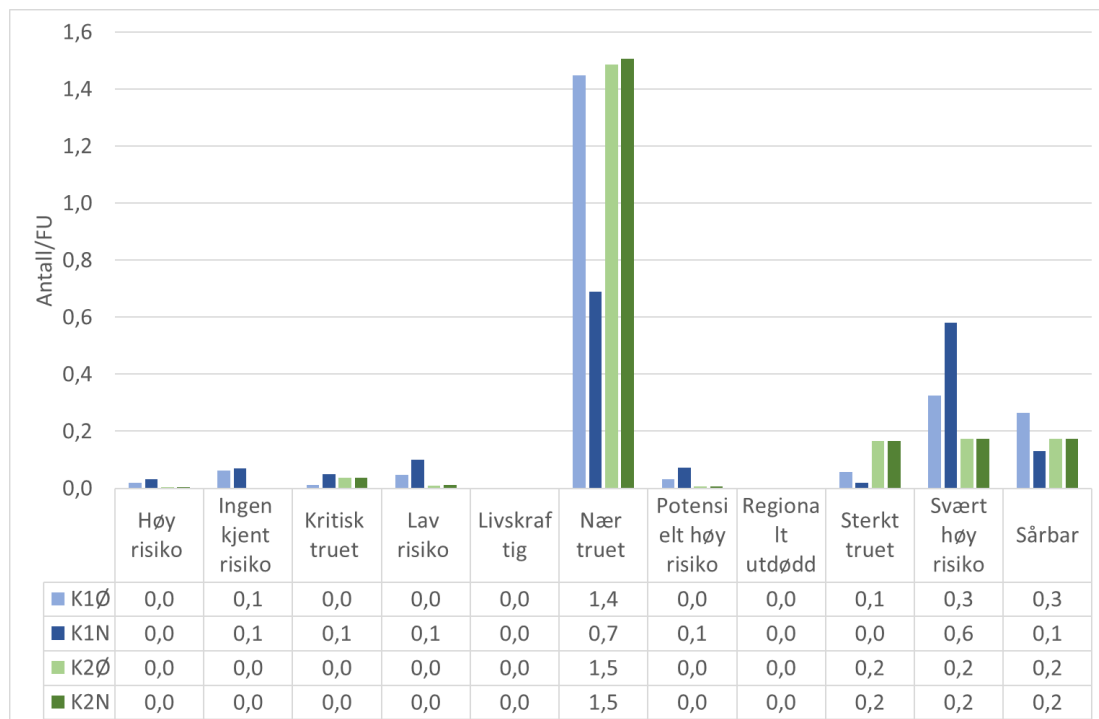
Figur 13 Løsmasser.

Figur 14 presenterer resultater for ulike typer skogressurser. Totalt har K1Ø og K2Ø ca. 1 200 m²/FU med skog, og K1N og K2N har ca. 1 400 m²/FU. Av figuren kommer det frem at furu- og løvskog dominerer for alle fire linjestrekk. K1 har mest furudominert skog, med 720 m²/FU (56 %) i K1Ø og 790 m²/FU (59 %) i K1N, mot 320 m²/FU (27 %) og 400 m²/FU (29 %) i K2Ø og K2N. K2 har mest løvdominert skog, med ca. 735 m²/FU (53 – 62 %) i K2Ø og K2N mot 390 m²/FU (32 %) i K1Ø og ca. 470 m²/FU (34 %) i K1N. For K1Ø, K1N, K2Ø og K2N utgjør barblandings-, blandings- og grandominert skog totalt henholdsvis ca. 100 (8 %), 140 (10 %), 130 (11 %) og 250 m²/FU (18 %).



Figur 14 Skogressurser.

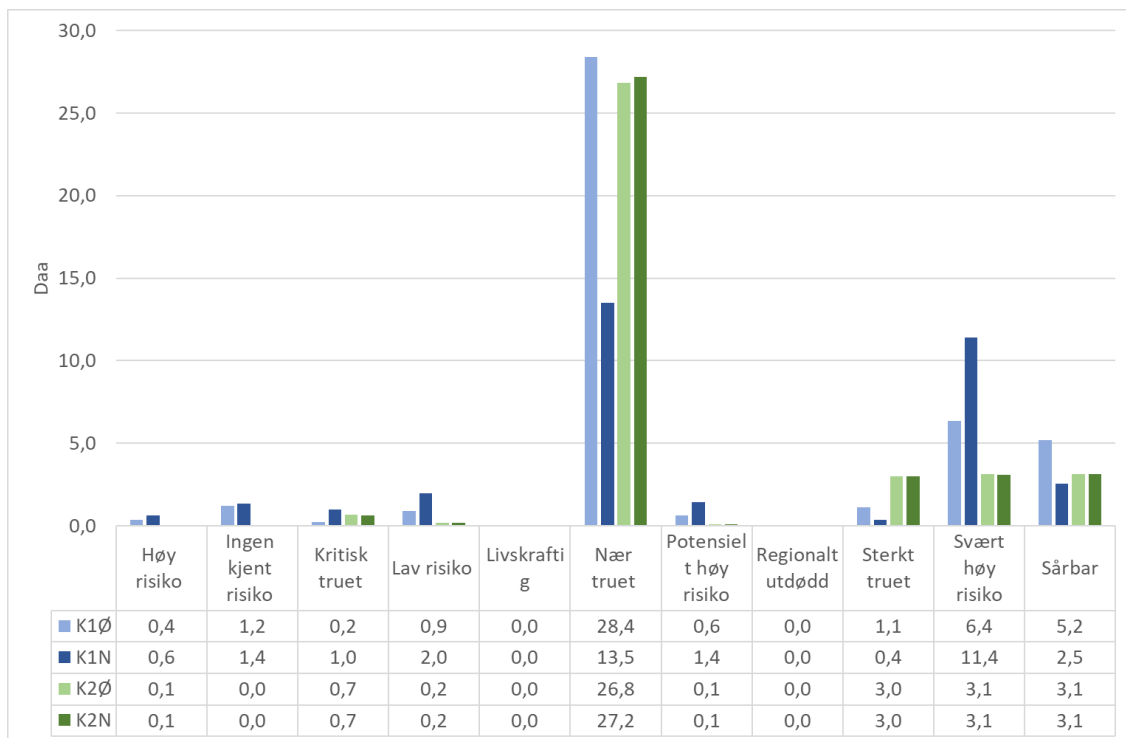
Figur 15 presenterer artsdata. Totalt antall registrerte observasjoner per funksjonelle enhet i K1Ø, K1N og K2Ø/N er henholdsvis 2,3, 1,7 og 2,1. I K1Ø, K1N og K2Ø/N er det henholdsvis 1,4, 0,7 og 1,5 registrerte observasjoner av nær truede arter/FU. Arter med svært høy risiko er det registrert flest av i K1N etterfulgt av K1Ø, med henholdsvis 0,6 og 0,3 observasjoner per FU. I både K2Ø og K2N er det registrert 0,2 observasjoner per FU med svært høy risiko. Av sårbare arter er det registrert 0,3 og 0,1 per FU i henholdsvis K1Ø og K1N og 0,2 per FU i både K2Ø og K2N. Av arter som er sterkt truet har både K2Ø og K2N flest registrerte med 0,2 per FU, etterfulgt av K1Ø med 0,1 per FU. I K1N er det registrert 0,1 art per FU med potensielt høy risiko, samt 0,1 art per FU som er kritisk truet.



Figur 15 Artsdata.

Det er viktig å påpeke at disse registreringene kun representerer tilfeldige observasjoner hentet fra artsdatabanken, og at de ikke sier noe om artene finnes hekkende eller permanent i området. Det er kun indikasjoner på om områdene kan ha betydning, og kan også være et resultat av hvor mye besøkt de er av folk som systematisk registrerer.

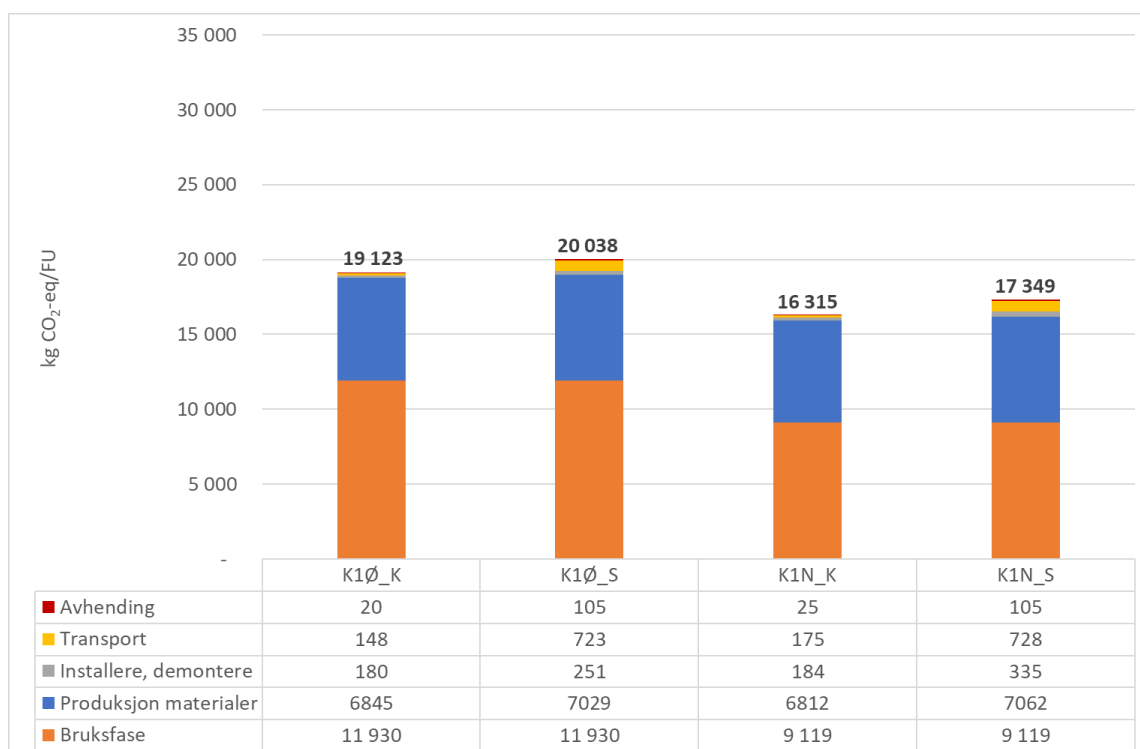
Figur 16 presenterer artsdata per kilometer linjestrekk. Totalt antall registrerte observasjoner per kilometer i K1Ø, K1N og K2Ø/N er henholdsvis 44, 34 og 37. I K1Ø, K1N og K2Ø/N er det henholdsvis 28, 14 og 27 registrerte observasjoner av nær truede arter/km. Arter med svært høy risiko er det registrert flest av i K1N etterfulgt av K1Ø med henholdsvis ca. 11 og 6 observasjoner per km. I både K2Ø og K2N er det registrert 3 observasjoner per km med svært høy risiko. Av sårbare arter er det registrert 5 og 3 per km i henholdsvis K1Ø og K1N, og 3 per km i både K2Ø og K2N. Av arter som er sterkt truet har både K2Ø og K2N flest registrerte observasjoner med 3 per km, etterfulgt av K1Ø med 1 og K1N med 0,5. I K1N er det registrert 1 til 2 arter per km i gruppene potensielt høy risiko, kritisk truet og høy risiko. I K1Ø, K2Ø og K2N er det registrert 0 til 1 art per km i de samme gruppene.



Figur 16 Artsdata per km.

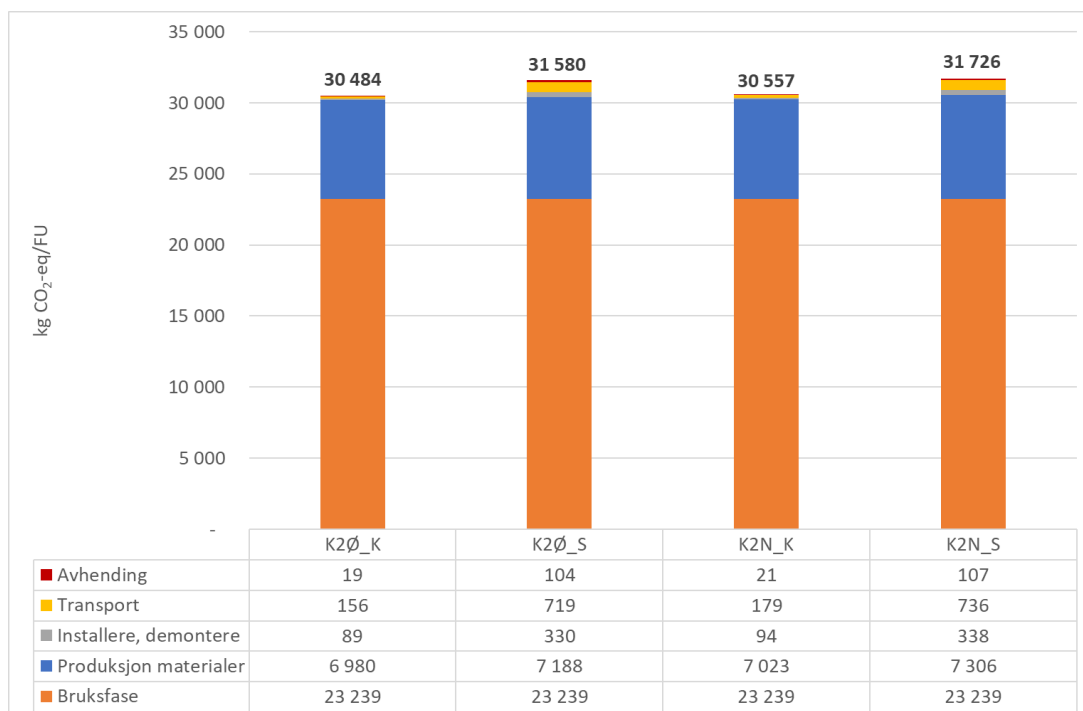
6.2 Betydningen av hver livsløpsfase for samlet klimagassutslipp

I dette kapittelet presenteres resultater for klimagassutslipp per funksjonelle enhet fordelt på de ulike livsløpsfasene for nettsystemene. Figur 17 viser klimagassutslipp fordelt på kategorier for Kystlinja 1 øvre og nedre med kompositt- og stålcase. Øvre stålcase har størst klimagassutslipp med ca. 20 000 kg CO₂-eq/FU, etterfulgt av øvre komposittcase med ca. 19 100 kg CO₂-eq/FU. Nedre kompositt- og stålcase har utslipp på henholdsvis ca. 16 300 og 17 350 kg CO₂-eq/FU. Det er bruksfasen som står for de største utslippene i alle kraftlinjecasene, med ca. 11 900 (ca. 61 %) og 9 100 kg CO₂-eq/FU (ca. 54 %) for henholdsvis øvre og nedre stål- og komposittcase. Klimagassutslippene i bruksfasen fordeler seg med 99,99 prosent på nett-tap og 0,01 prosent på utslipp fra inspeksjoner, noe som klart indikerer hvor stor betydning nett-tapet har for det samlede klimagassutslippet. Videre står produksjon av materialer for ca. 6 800 kg CO₂-eq/FU (ca. 35 %) i øvre og nedre komposittcase, og ca. 7 050 (ca. 41 %) i øvre og nedre stålcase. Transport utgjør ca. 160 kg CO₂-eq/FU (1 %) for komposittcasene og ca. 725 kg CO₂-eq/FU (4 %) for stålcase. Installering, demontering, og avhending utgjør samlet mellom 1 og 3 prosent i alle casene.



Figur 17 GWP fordelt på kategorier Kystlinja 1 kompositt- og stålcase.

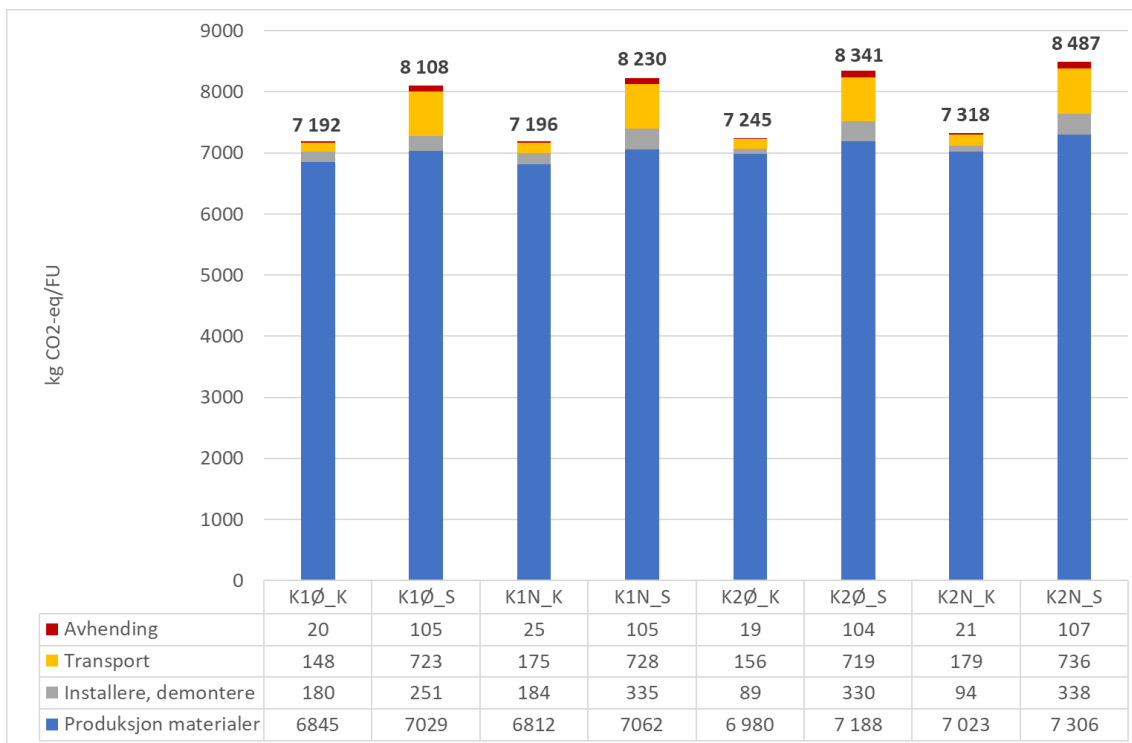
Figur 18 viser klimagassutslipp fordelt på kategorier for Kystlinja 2 øvre og nedre med kompositt- og stålcase. Nedre stålcase har størst klimagassutslipp med ca. 31 700 kg CO₂-eq/FU, etterfulgt av øvre stålcase med ca. 31 600 kg CO₂-eq/FU. Øvre og nedre komposittcase har utslipp på henholdsvis ca. 30 500 og 30 560 kg CO₂-eq/FU. Også her står bruksfasen med nett-tap som største kilde for de største utslippene i alle kraftlinjecasene, med ca. 23 200 kg CO₂-eq/FU (75 %). Nett-tapet er et større bidrag per FU i K2 enn i K1 fordi K2 har et større prosentvis nett-tap oppgitt av Norconsult (3,3 ganger større nett-tap, fordelt på 1,7 lengre avstand enn K1Ø og 1,3 lengre avstand enn K1N). Videre står produksjon av materialer for ca. 7 000 kg CO₂-eq/FU (23 %) i øvre og nedre komposittcase, og ca. 7 200 – 7 300 (23 %) i øvre og nedre stålcase. Transport utgjør ca. 170 kg CO₂-eq/FU (0,5 %) for komposittcasene og ca. 730 kg CO₂-eq/FU (2 %) for stålcase. Installering*, demontering, og avhending utgjør samlet 0,7 for komposittcasene og 1,3 prosent for stålcase.



Figur 18 GWP fordelt på kategorier Kystlinja 2 kompositt- og stålcase.

* Leseren gjøres oppmerksom på at det er oppdaget en feil i datagrunnlaget i K2Ø og K2N med at skogrydding per mast ikke ble multiplisert med antall master i linjestrekket.. Påvirkningen for installering og demontering skulle ha vært ca. 100 kg CO₂-eq/FU høyere enn presentert i figuren, og omtrent likt som for komposittcasene i K1Ø og K1N. Prosenten oppgitt over figuren (0,7 %) er justert for 100 kg CO₂-eq/FU ekstra påvirkning.

Figur 19 presenterer klimagassutslipp fordelt på kategorier i K1 og K2 uten bruksfasen med nett-tap som største kilde til utslipp. Uten bruksfasen har alle komposittcasene ganske like klimagassutslipp på 7 200 – 7 300 kg CO₂-eq/FU, og det samme med stålcaseene på 8 100 – 8 500 kg CO₂-eq/FU. I K1Ø, K1N, K2Ø og K2N ligger stålalternativet ca. 1000 kg CO₂-eq/FU over komposittalternativet. Det er i transportfasen de største forskjellene mellom kompositt- og stålcaseene er, på ca. 550 kg CO₂-eq/FU. Videre har stålcaseene ca. 200 kg CO₂-eq/FU høyere klimagassutslipp under produksjon av materialer. Årsaken til at casene har såpass like klimagassutslipp er at nett-tapet var høyere i K2 enn i K1. Innad i K1 ga bruksfasen høyere bidrag til klimagassutslipp i K1Ø enn K1N, og dette er fordi utslippene som skyldes nett-tapet i K1Ø deles på en kortere avstand enn i K1N (12 km mot 15,7 km).

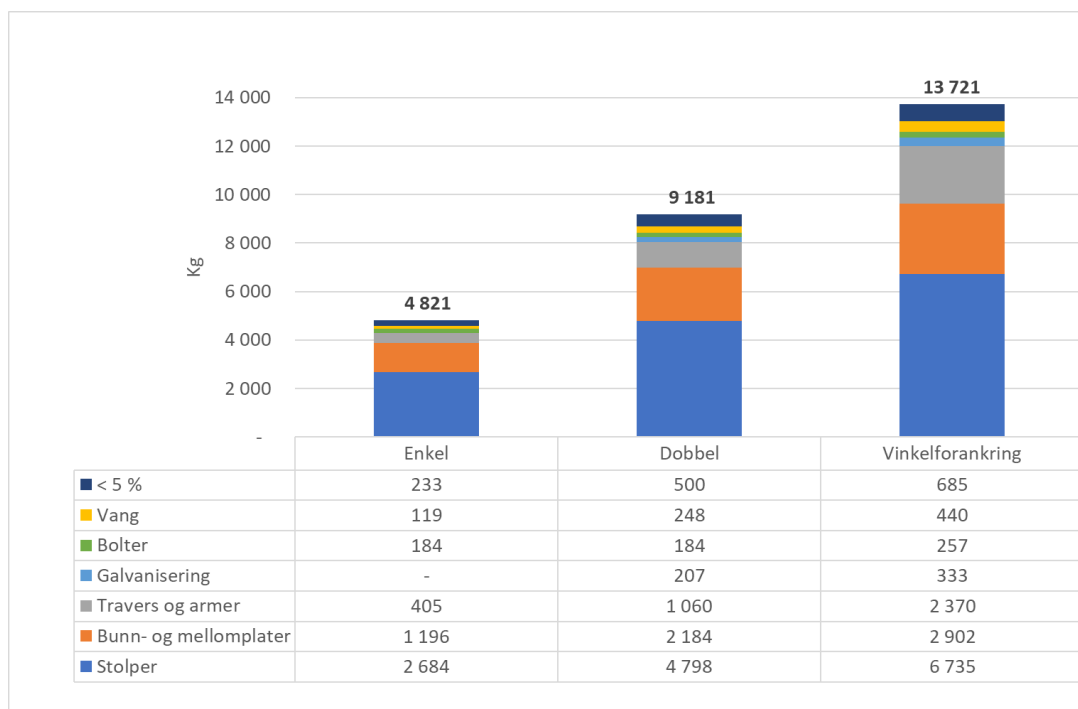


Figur 19 GWP fordelt på kategorier uten bruksfasen.

6.3 Material- og klimaeffekter av valg av ulike typer master og fundament

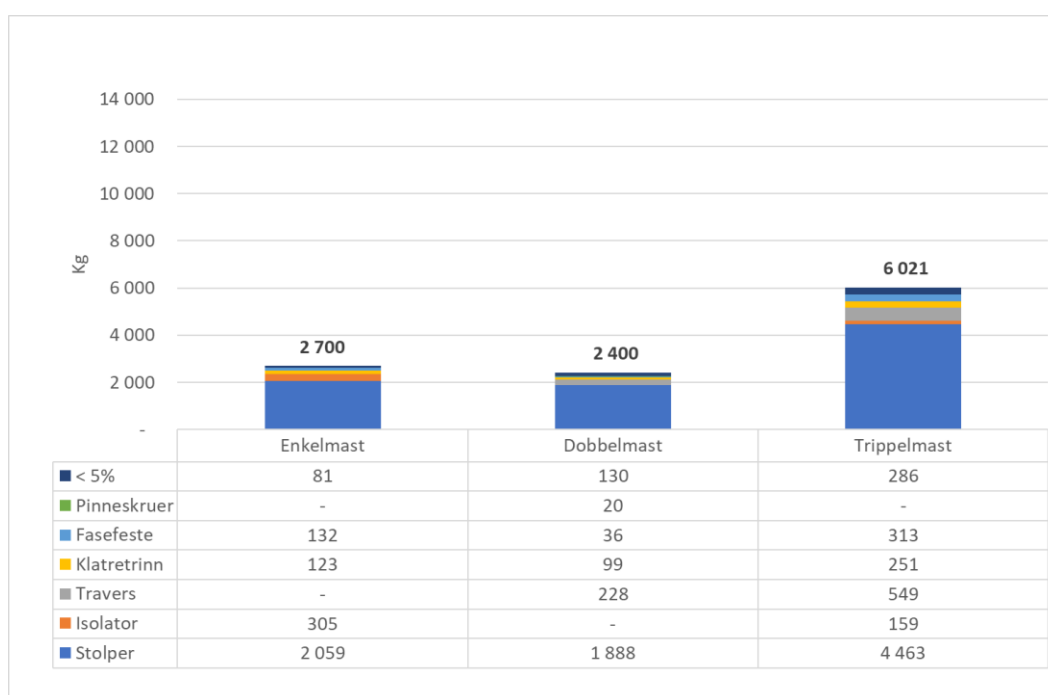
6.3.1 Forbruk av materialressurser

Dette kapittelet presenterer forbruk av materialressurser av alle maste- og fundamenttyper. Siden materialinnholdet i stål- og komposittmaster og fundamenter er veldig ulikt, presenteres de hver for seg. I stålmastene består materialene av stål, og aluminium. Vekten av galvanisering brukt til overflatebehandling av stålkomponentene er også listet opp som et materiale. Figur 20 viser materialinnholdet i en gjennomsnittlig enkel-, dobbel- og vinkelforankringsmast i stål, som har totalvekt på henholdsvis ca. 4 800, 9 200 og 13 700 kg. Stolpen(e) utgjør hoveddelen av totalvekten for alle master med ca. 2 700, 4 800 og 6 700 kg (49 – 56 %) for henholdsvis enkel-, dobbel- og vinkelforankringsmast. Videre utgjør bunn- og mellomplater ca. 1 200, 2 200 og 2 900 kg (21 – 25 %), og travers og armer ca. 400 (8 %), 1 100 (12 %) og 2 400 (17 %) kg av totalvekten for henholdsvis enkel-, dobbel- og vinkelforankringsmast.



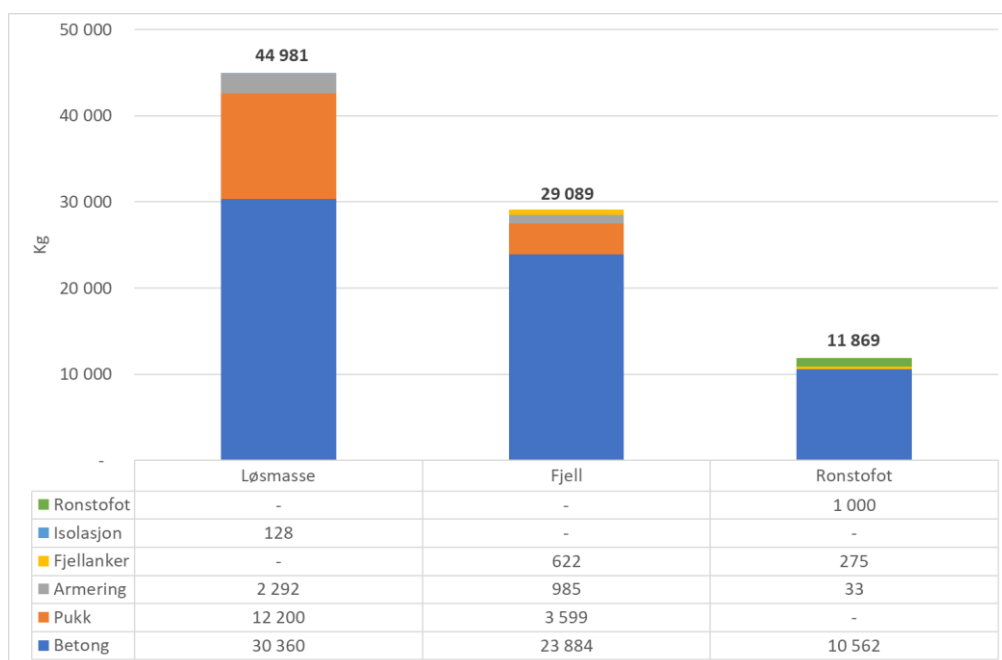
Figur 20 Materialressurser stålmaster.

Figur 21 viser materialinnholdet i en gjennomsnittlig enkel-, dobbel- og trippelmast i kompositt, med totalvekt på henholdsvis 2 700, 2 400 og ca. 6 000 kg. I komposittmastene består materialene hovedsakelig av stål, kompositt og aluminium. Stolpene utgjør også her hoveddelen av totalvekten for alle master med ca. 2 100, 1 900 og 4 500 kg (74 – 79 %) for henholdsvis enkel-, dobbel- og trippelmast. Videre utgjør isolatoren nest mest av totalvekten for enkelmast med ca. 300 kg (11 %), etterfulgt av fasefeste på ca. 130 kg (5 %) og klatretrinn på ca. 120 kg (5 %). For dobbel- og trippelmast utgjør traversen nest mest av totalvekten på henholdsvis ca. 230 kg (9 %) og 550 kg (9 %).



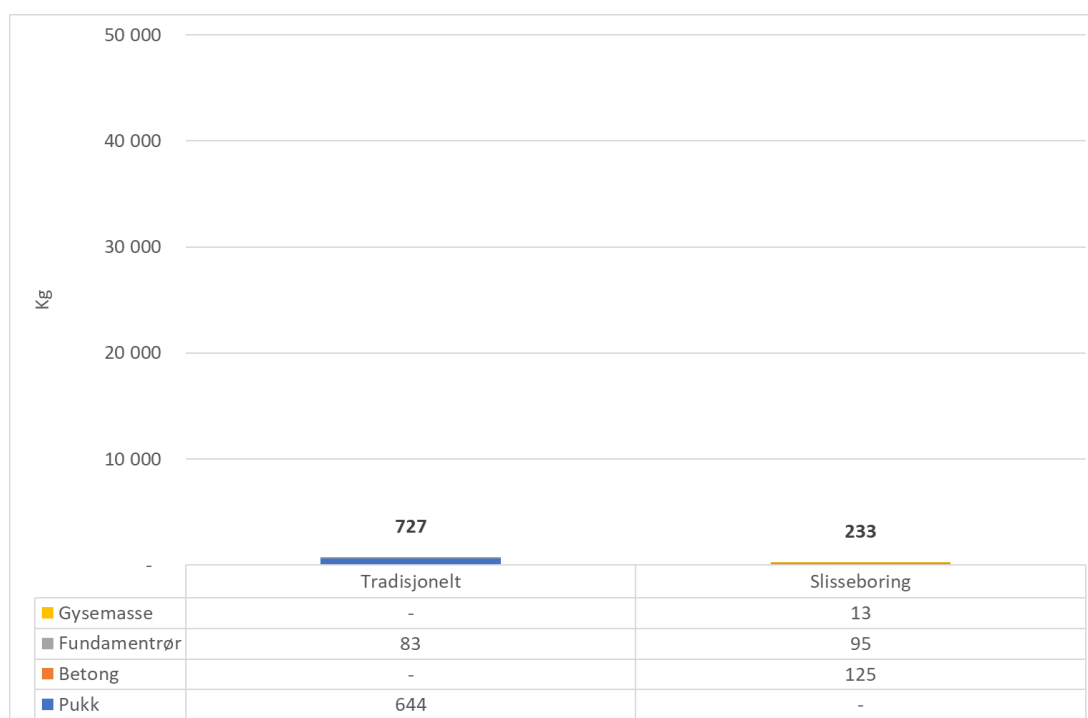
Figur 21 Materialressurser komposittmaster.

Figur 22 presenterer forbruk av materialressurser for stålfundamenter. Fundament på løsmasse har høyest materialressursforbruk med ca. 45 000 kg, etterfulgt av på fjell med ca. 29 100 kg og Ronstofot med ca. 11 900 kg. Betong utgjør det største forbruket for alle fundament med ca. 30 400 (68 %), 23 900 (82 %) og 10 600 kg (89 %) for henholdsvis løsmasse, fjell og Ronstofot. For løsmasse- og fjellfundament utgjør pukk nest mest av totalvekten med henholdsvis 12 200 (27 %) og 3 600 kg (12 %), og for Ronstofot utgjør Ronstofoten nest mest med 1 000 kg (8 %) av totalvekten. Armering utgjør ca. 2 300 kg (5 %) av totalvekten for løsmassefundament, og armering og fjellanker utgjør ca. 1 600 (6 %) og 300 kg (3 %) av totalvekten for henholdsvis fjell- og Ronstofotfundament.



Figur 22 Materialressurser stålfundamenter.

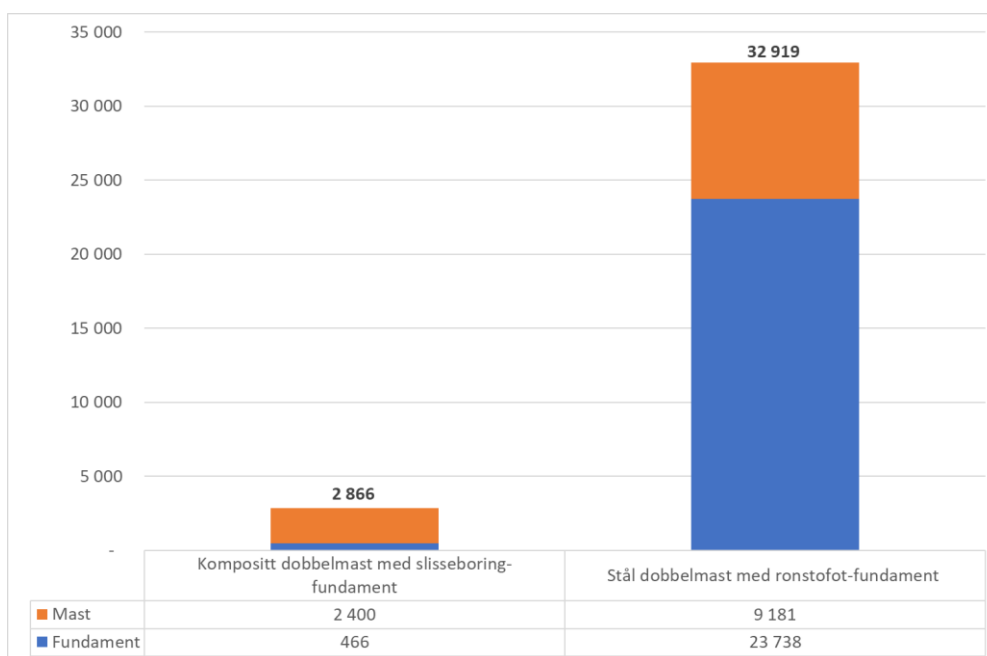
Figur 23 presenterer forbruk av materialressurser for komposittfundamenter. Det tradisjonelle fundamentet har høyest materialressursforbruk med 727 kg, fordelt på 644 kg (89 %) pukk og 83 kg (11 %) komposittfundamentrør. Fundament med slisseboring har ca. tre ganger lavere materialressursforbruk med 233 kg, fordelt på 125 kg (54 %) betong, 95 kg (40 %) plastfundamentrør og 13 kg (6 %) gysemasse. De to komposittfundamentene har i gjennomsnitt 94, 61 og 25 ganger lavere totalt forbruk av materialressurser enn henholdsvis stålfundament på løsmasse, fjell og med Ronstofot.



Figur 23 Materialressurser komposittfundamenter.

Dersom antatt vekt av plastfundamentrøret i det tradisjonelle fundamentet hadde vært 550 kg/m³ (ikke 300 kg/m³), ville fundamentrørets vekt vært ca. 150 kg per fundament, og totalt forbruk av materialressurser ca. 800 kg. Dette utgjør relativt lite både her og for klimagassutslipp i neste kapittel.

I Figur 24 presenteres forbruk av materialressurser i dobbelmast kompositt med slisseboring-fundament vs. dobbelmast i stål med Ronstofot-fundament. Fundamentet som gir lavest forbruk av materialressurser er valgt for begge mastetyper. Siden det er dobbelmast, er også to elementer av hvert fundament inkludert. Stålmast med fundament har et samlet forbruk av materialressurser på ca. 32 900 kg, omtrent 11,5 ganger høyere enn komposittmasten med fundament på ca. 2 900 kg. Det er fundamentene som utgjør størst forskjell i total forbruk av materialressurser, med 51 ganger og 23 270 kg høyere materialvekt i stål- enn komposittfundamentet. Dette skyldes hovedsakelig bruk av betong og Ronstofot. Stålmasten utgjør ca. fire ganger og 6 800 kg høyere materialvekt enn komposittmasten.

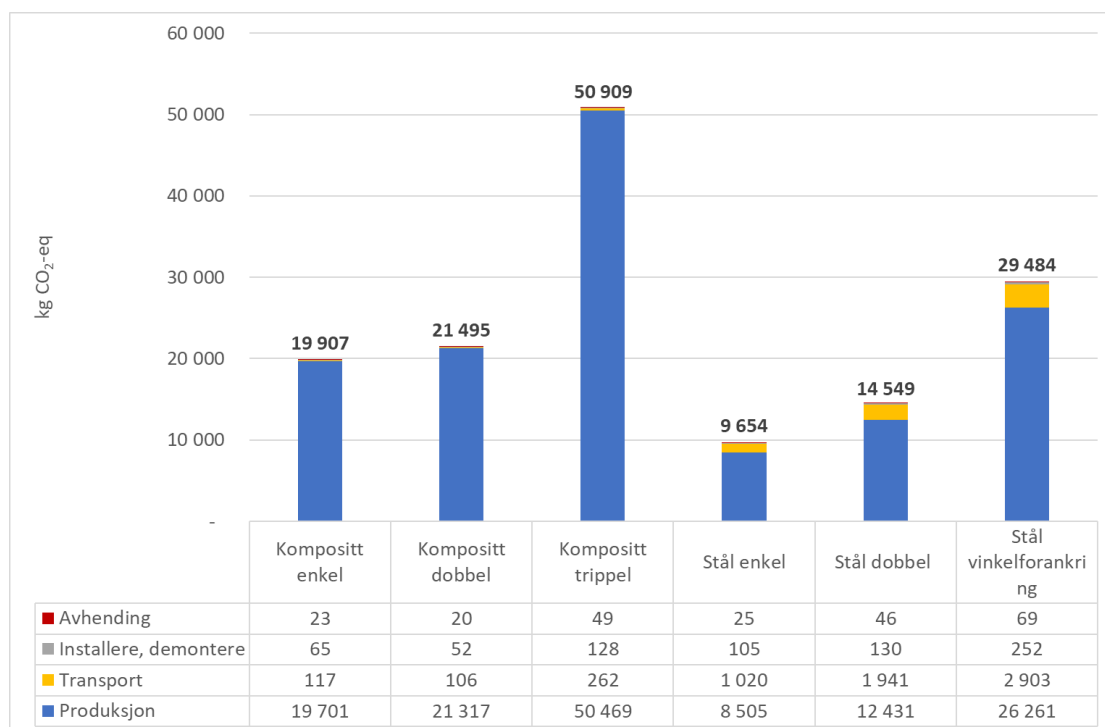


Figur 24 Materialbruk av Kompositt vs. Stål dobbelmast med fundament.

6.3.2 Klimaeffekter

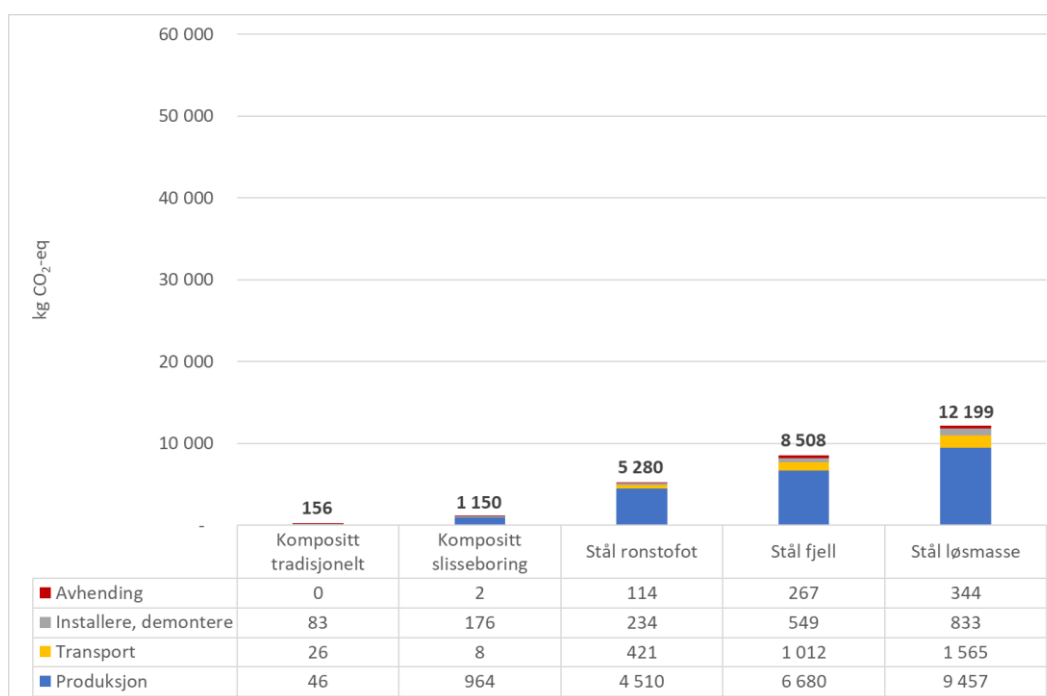
Figur 25 viser klimapåvirkningen til mastetyperne. Selv om stålmastene har mye høyere totalt forbruk av materialressurser enn komposittmastene, har de lavere klimagassutslipp.

Kompositt enkel-, dobbel- og trippelmast har klimagassutslipp på henholdsvis ca. 19 900, 21 500 og 50 900 kg CO₂-eq, og stål enkel-, dobbel- og vinkelforankringsmast på henholdsvis ca. 9 650, 14 550 og 29 500 kg CO₂-eq. Det er gjort en analyse av 1 kg galvanisert stål og 1 kg kompositt i SimaPro som viser at stål har utslipp på 2,4 kg CO₂-eq per kg, og kompositt på 9,2 kg CO₂-eq per kg. Videre har stålet som er brukt en resirkuleringsgrad på 26 prosent. Disse to faktorene kan forklare den store forskjellen. For alle master er hovedandelen av utslippene knyttet til produksjon av materialer. I kompositt enkel-, dobbel- og trippelmast utgjør denne fasen ca. 19 700, 21 500 og 50 500 kg CO₂-eq (99 %). For stål enkel-, dobbel- og vinkelforankringsmast utgjør fasen ca. 8 500, 12 500 og 26 300 kg CO₂-eq (85 – 89 %). For stålmaster går også en del til transport (10 – 13 %). I alle tilfeller har installering, demontering og avhending liten betydning (ca. 1 %). For transport er det tatt utgangspunkt i transport til riggplass i Leire og fra Leire til avhending i Kristiansand.



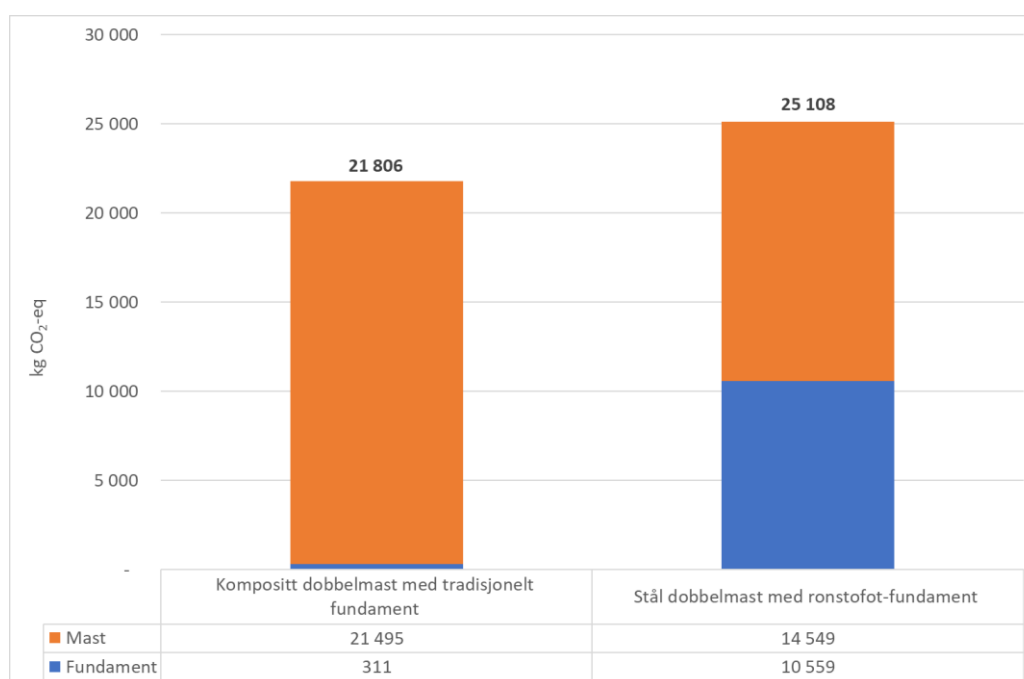
Figur 25 GWP fordelt på livsløpsfaser for alle mastetyper.

I Figur 26 presenteres klimapåvirkningen til alle fundamenttypene. Stålfundamentene har vesentlig høyere utslipp enn komposittfundamentene. Stålfundamentet med løsmasse har høyest klimagassutslipp med 12 200 kg CO₂-eq, etterfulgt av på fjell og med Ronstofot med henholdsvis ca. 8 500 og 5 300 kg CO₂-eq. For stålfundament på løsmasse-, fjell og med Ronstofot har produksjon av materialer størst påvirkning med utslipp på henholdsvis ca. 9 500, 6 700 og 4 500 kg CO₂-eq (78 – 85 %), etterfulgt av transport på henholdsvis ca. 1 600, 1 000 og 400 kg CO₂-eq (8 – 13 %). Videre følger og installering og demontering som utgjør 230 – 830 kg CO₂-eq (4 – 7 %) for alle tre fundamenter. Det tradisjonelle komposittfundamentet har lavest påvirkning med 156 kg CO₂-eq, etterfulgt av slisseboring med 1 150 kg CO₂-eq. For slisseboringsfundament er utslipp fra produksjon av materialer størst på ca. 960 kg CO₂-eq (84 %), etterfulgt av installering og demontering på ca. 80 kg CO₂-eq (15 %). For tradisjonelt komposittfundament er påvirkning fra installering og demontering størst med ca. 80 kg CO₂-eq (53 %), etterfulgt av produksjon av materialer med ca. 50 kg CO₂-eq (30 %) og transport med ca. 30 kg CO₂-eq (17 %). Også her er det tatt utgangspunkt i transport til riggplass i Leire og fra Leire til avhending i Kristiansand.



Figur 26 GWP fordelt på livsløpsfaser for alle fundamenttyper.

I Figur 27 presenteres bidrag til klimagassutslipp i dobbelmast kompositt med tradisjonelt fundament vs. dobbelmast i stål med Ronstofot-fundament. Fundamentet som gir lavest bidrag til klimagassutslipp er valgt for begge mastetyper. Også her er to elementer av hvert fundament inkludert. Stålmast med fundament har et samlet klimagassutslipp på ca. 25 100 kg CO₂-eq, 3 300 høyere enn komposittmasten med fundament på ca. 21 800 kg CO₂-eq. Det er fundamentene som utgjør størst forskjell i bidrag til klimagassutslipp, med 34 ganger og 10 250 CO₂-eq høyere klimagassutslipp i stål- enn komposittfundamentet. Komposittmasten har 1,5 ganger og ca. 7000 kg CO₂-eq høyere klimagassutslipp enn stålmasten.

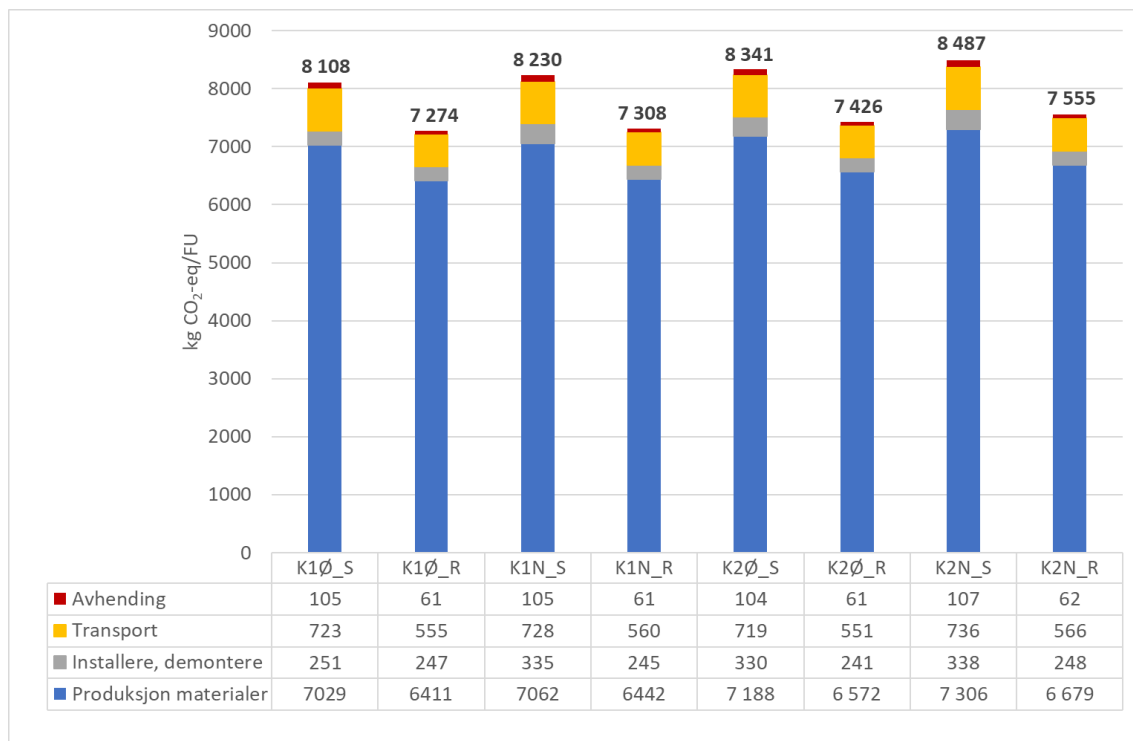


Figur 27 GWP av Kompositt vs. Stål dobbelmast med fundament

6.4 Klimagassutslipp i stålcase og stålcase med optimalisert fundament

I dette kapittelet presenteres resultater for klimagassutslipp per funksjonelle enhet for stålcase og stålcase der fjellfundament er byttet ut med Ronstofotfundament. Resultatene er presentert uten bruksfasen, for å tydeliggjøre forskjellene i de andre fasene. Figur 28 viser at stålcase har totale utslipp på 8100 – 8500 kg CO₂-eq/FU, og Ronstofotcasene på 7300 – 7550 kg CO₂-eq/FU. I K1Ø har stålcase 830 kg CO₂-eq/FU høyere utslipp enn Ronstofotcase, og i K1N, K2Ø og K1N er stålcase ca. 920 kg CO₂-eq/FU høyere. Det er størst forskjell i produksjon av materialer. I stålcase står denne fasen for 7000 – 7300 kg CO₂-eq/FU (86 %), og i Ronstofotcasene står fasen for ca. 6400 – 6700 kg CO₂-eq/FU (88 %). For transportfasen har stålcase klimagassutslipp som er ca. 170 kg CO₂-eq/FU høyere enn Ronstofotcasene. Stålcase har også noe høyere utslipp enn Ronstofotcasene i resterende livsløpfaser, som følge av at materialene som skal installeres, demonteres og avhendes inneholder mer betong.

K1/2Ø_R= Kystlinja 1/2 øvre Ronstofot, K1/2N_R= Kystlinja 1/2 nedre Ronstofot



Figur 28 GWP fordelt på kategorier uten bruksfase for stål- og Ronstofotcase

7. Diskusjon

7.1 Oppsummerende funn

I diskusjonen blir studiens resultater diskutert og sammenlignet med resultater fra lignende studier. Videre vil anbefalinger til hva Glitre Nett og andre kraftutbyggere kan gjøre for å redusere sin påvirkning på forbruk av materialressurser, klimagassutslipp og arealbruk presenteres. Fra resultatene går det frem at totalt forbruk av materialressurser var tre til fire ganger høyere for alle stålcase, med 8 700 – 8 900 kg/FU, enn komposittcase, med 2 100 – 2 800 kg/FU. Innad i komposittcase har K1Ø ca. 540 kg/FU lavere relativt forbruk av materialressurser enn K1N, som totalt for hele linjestrekket utgjør 16 600 kg lavere forbruk. I komposittcase i K2 har øvre ca. 7 300 kg lavere totalt forbruk av materialressurser enn nedre. For stålcase har K1Ø ca. 33 700 kg lavere totalt forbruk av materialressurser enn K1N, og K2Ø ca. 4 400 kg lavere totalt forbruk enn K2N. Basert på dette er det komposittcase i de øvre linjestrekkene i K1 og K2 som gir klart lavest totalforbruk av materialressurser. Det er ikke funnet andre studier som analyserer forbruk av materialressurser i komponenter i kraftstrekninger. Boer et al. (2021) analyserer hvordan globale materiallagre knyttet til kraftsektoren kan utvikle seg frem mot 2050. Studien peker på at etterspørselen av stål og aluminium vil øke med en faktor 2 eller 2,6.

I klimagassutslipp var forskjellene mellom stål- og komposittcase mindre. Selv om komposittcase har lavt materialforbruk, har de mye høyere klimagassutslipp per kg materialenhet enn stålcase, med 9,2 kg CO₂-eq per kg kompositt mot 2,4 kg CO₂-eq per kg stål. I K1 og K2 øvre og nedre har stålcase ca. 1000 kg CO₂-eq/FU høyere klimagassutslipp enn komposittcase. Glitre Nett har opplyst at de planlegger bruk av 50 prosent resirkulert stål i sine fremtidige kraftsystemer. Dette vil redusere klimagassutslippene til stålcase, som i denne studien bruker 26 prosent resirkulert stål. Figur 9 viser at både stål- og komposittcase i K1N har ca. 3000 kg CO₂-eq/FU lavere klimagassutslipp enn stål- og komposittcase i K1Ø. Dette er motsatt av resultatene for forbruk av materialressurser, hvor forbruket var større i K1Ø enn i K1N for både stål- og komposittcase. I K2 er det ingen betydelig forskjell mellom øvre og nedre, men komposittcase har ca. 1 100 kg CO₂-eq/FU lavere utslipp enn stålcase i både øvre og nedre linjestrekk. Basert på dette er det klimamessig best å velge nedre trasé med komposittcase i K1, og øvre eller nedre trasé med komposittcase i K2.

Dersom man ser på total lengden av krafttraseene (ikke per km) vil kompositt- og stålcase i K1Ø ha totale klimagassutslipp på henholdsvis ca. 230- og 240 000 kg CO₂-eq, og K1N på 256- og 272 000 kg CO₂-eq. Totalt vil kompositt- og stålcase i K1Ø ha henholdsvis 26 000 og 32 000 kg CO₂-eq lavere utslipp enn kompositt- og stålcase i K1N. For kompositt- og stålcase tilsvarende forskjellen i klimagassutslipp å kjøre en diesebil med forbruk på 0,6 liter per mil henholdsvis fire og fem ganger rundt jordkloden (Pedersen, 2020), eller å fly tur retur Oslo til London med SAS henholdsvis 160 og 198 ganger (SAS, u.å.). Basert på dette vil det være bedre å velge øvre trasé i K1. Glitre Nett har påpekt at årsaken til at K1N er konsesjonssøkt er en forventet økning i etterspørsel av elektrisitet nærmere Kristiansand-området i fremtiden, noe som ikke er hensyntatt i denne studien.

Resultatene er noe vanskelige å sammenligne med tidligere studier på grunn av forskjeller i valg av funksjonell enhet. Hertwich & Jorge (2013) utførte miljøevaluering av kraftoverføring i Norge med funksjonell enhet på 1 kWh levert fra sentral- til distribusjonsnett. Resultater viste at klimapåvirkningen var 1,3 til 1,5 g CO₂-eq. Videre så Hauan (2014) på livsløpet til elektrisitetsoverføring i tre nettnivåer i Norge. Funksjonell enhet var levering av 1 MWh elektrisk energi. Resultatene viste at klimapåvirkning var 2,9 kg CO₂-eq for regionalnettet. Om denne studien hadde hatt funksjonell enhet på 1 kWh (ikke 1 TWh) overført over hele linjestrekket (ikke per km), ville resultatene for K2 være ca. 31 000 kg CO₂-eq / $1\ 000\ 000\ 000\ \text{kWh} * 1000\ \text{g} * 20,5\ \text{km} = 0,64\ \text{g CO}_2\text{-eq}$. Resultatet for K1 øvre og nedre ville være henholdsvis ca. 0,23 og 0,26 g CO₂-eq.

Resultatene fra denne studien er en god del lavere enn resultatene til Hertwich & Jorge (2013). Dette kan skyldes at studien ser på overføring fra sentralnettet til distribusjonsnett, og at det er knyttet høyere utslipp til distribusjonsnett enn regionalnettet. Videre inkluderte Hertwich & Jorge nett-tap, i tillegg til klimagassutslipp som følge av lekkasjer av SF₆ gass og transformatorstasjoner som til sammen sto for 27 prosent av klimagassutslippene knyttet til infrastrukturprosesser. I en livsløpsanalyse av EFLA Consulting Engineers (2019) av det islandske transmisjonssystemet, utgjorde også utslipp fra lekkasjer av SF₆ gass en betydelig andel med 15 prosent av totale klimagassutslipp. Hauan (2014) har også en god del høyere resultater for klimagassutslipp enn denne studien. Årsaken til dette kan være at studien inkluderte nett-tap, samt flere elementer som ikke er inkludert i denne studien, som kabler i

bakken, transformatorstasjoner, gassisolerte koblingsanlegg og SF₆ lekkasjer. (Videre ser det ut til å være et lavere detaljnivå enn i denne studien, som kan ha spilt inn).

Selv om komposittcasene er foretrukket over stålcasene i forhold til totalt forbruk av materialressurser og klimagassutslipp i denne studien, er det knyttet stor usikkerhet til avfallshåndtering av materialet. Dette har også lenge vært en utfordring med vindturbinblader av glassfiberkompositt, som til nå har basert seg på deponering. Det jobbes med bedre løsninger, og de første modellene med resirkulerbare turbinblader er nå satt i produksjon (NVE & Miljødirektoratet, 2023). En studie av Bjerkomp (2020) ser på muligheter for å håndtere glassfiberarmerte plastkompositter i vindturbinblader. Resultatene presenterer de tre mest lovende resirkuleringsmetodene, som er mekanisk resirkulering, pyrolyse og co-prosessering. Dersom det utvikles gode løsninger for resirkulering av komposittmaster kan det redusere produksjonskonsekvensene, som i denne studien står for 99 prosent av klimagassutslippene for alle komposittmaster.

I Figur 12 kommer det frem at K1Ø har mer skog, fulldyrket jord og myr enn K1N per funksjonelle enhet. K1 øvre og nedre areal på 1 530 m²/FU, men ser man på hele linjestrekket vil arealbeslaget for K1N med 15,7 km lengde totalt sett være større enn for K1Ø på tolv km. Dermed vil K1Ø legge beslag på minst areal totalt sett. Totalt har K1Ø mindre skog enn K1N med ca. 14 300 m² mot 21 900 m². K1Ø har totalt sett fortsatt mer fulldyrket jord og myr enn K1N med ca. 1 900 og 1 100 m² mot ca. 250 og 800 m² i K1N. I K2 har nedre strekk 333 m²/FU mer skog enn øvre, som totalt utgjør ca. 6 800 m². Øvre strekk har ca. 250 m²/FU mer åpen fastmark enn nedre, og også noe mer myr og fulldyrket jord (11 – 14 m²/FU).

I en rapport av Miljødirektoratet (2022) kommer det frem at myr er et svært viktig karbonlager som lagrer to til tre ganger mer karbon enn verdens regnskoger. Rapporten peker på at omdisponering av skog og andre økosystemer er den største trusselen for tap av naturmangfold, og at en betydelig reduksjon av myrer og våtmarker har skjedd ved nedbygging til fordel for et urbanisert samfunn. Kraftledninger over myr kan være negativt fordi mange fugler trekkes mot myr, som gir fare for kollisjoner. Et kraftlinjestrekk trenger ikke nødvendigvis ha stor påvirkning på myr, fulldyrket jord og åpen fastmark. Mastene i

Honna - Logna er plassert med en gjennomsnittlig avstand på 170 meter, og med digitale verktøy i prosjektering er det i større grad mulig å styre unna f.eks. myr i plassering av mastepunkt. Dyrket mark vil fortsatt kunne drives under kraftledningene, og rundt fundamentene.

Det som vil påvirke arealbruk på bakkenivå mest er veinett og riggplasser. Evju et al. (2022) har vurdert hvordan aktive tiltak for vegetasjonsgjenvinning kan redusere negative effekter på biologisk mangfold og naturlig karbonlagring på byggeplasser tilknyttet vedlikehold av strømmettet i Norge. Anleggsområder, deponier og restaurerte midlertidige veier står for de største virkningene. De registrerte vegetasjonsbehandlingene er blant annet såing med kommersielle frøblandinger, gjenbruk av original matjord, tilsetning av grus og naturlig gjenvekst. Det er opplyst av Glitre Nett at riggplasser vil tilbakeføres til naturen etter installering, og at veinettet kun blir et spor i terrenget som kan brukes til ATV.

Skog vil i større grad bli påvirket av linjeutbygging fordi vegetasjonen må fjernes og holdes nede langs hele traseen. Dette kan ha negativ påvirkning på fugl og kollisjonsfare med kraftledninger. En rapport av Eldegard et al. (2012) fant at skog som grenset til kraftgater var et viktig habitat for fugl, og at det var mer fugl i tilgrensende skog enn i kraftgatene. Mulige effekter av vindparker og kraftledninger på hubro er undersøkt av Husby & Pearson (2022). Resultater viste at territorielle hubroer innenfor fire til fem km fra konstruksjonsforstyrrelser av kraftledninger forlot deres territorier i betydelig større grad enn hubroer lengre unna. Studien peker på at mulige årsaker kan være død som følge av kollisjoner, forstyrrelser fra utbygging og reduserte byttedyrarter. I en rapport om overvåking av Hubro i Sør-Norge av Gunnleifsen et al. (2020) ble det registrert trusselfaktorer i 71 prosent av overvåkingsterritoriene, og av disse utgjorde kraftlinjer 39 prosent. Den største trusselen var risikoen for elektrokusjon, som hovedsakelig er tilknyttet strømmaster ved linjer med middels sterk spenning (22 – 132 kV). På den annen side opplever Glitre Nett at kraftlinjebygging i flere tilfeller regnes som positivt av grunneiere fordi skogsveiene som opprettes gjør det mulig å ta ut skog, der det tidligere har vært ufremkommelig.

For planter og pollinerende insekter er det gjort flere funn som går i ulik retning enn for fugl. I en rapport av Eldegard et al. (2012) kom det frem at det var mer gress og løvfellende busker, og flere planteetende og pollinerende insekter i kraftgatene enn i den nært tilgrensende skogen. En undersøkelse av Bommarco et al. (2020) viste at landskap med kraftledningskorridorer hadde i gjennomsnitt seks flere plantearter enn landskap uten. I undersøkelser av Leicht-Young et al. (2014) og Frye et al. (2019) kom det frem at over dobbelt så mange plantearter og bie-arter, og ti ganger så mange bie-individer ble registrert i kraftkorridorene som i skogområdene. Studien peker på at resultatene kan være gjeldende for et bredt utvalg av pollinerende insekter. Resultater fra en studie av Berg et al. (2016) viser at kraftkorridorer også er viktige sommerfuglhabitat.

Figur 17 og Figur 18 viser at nett-tap i bruksfasen står for de største klimagassutslippene, etterfulgt av produksjon av materialer. I K1 står bruksfasen for 54 – 61 prosent av de totale utslippene med ca. 12 000 kg CO₂-eq/FU i K1Ø og 9 000 i K1N. I K2Ø og K2N står fasen for 75 prosent med ca. 23 200 kg CO₂-eq/FU. Produksjon av materialer står i gjennomsnitt for 39 prosent av utslippene i K1 og 23 prosent i K2, men klimagassutslippene er ganske like, med ca. 6 900 kg CO₂-eq/FU i K1 og 7 100 i K2. Figur 19 viser at uten bruksfasen har alle komposittcasene tilnærmet lik totalbelastning på ca. 7 200 kg CO₂-eq/FU, og det samme med stålcase på ca. 8 300 kg CO₂-eq/FU. Sett bort fra nett-tap kommer komposittcasene best ut i alle linjestrekk med ca. 1 100 kg CO₂-eq/FU lavere utslipp enn stålcase, og det er liten forskjell (maks 150 kg CO₂-eq/FU) i klimagassutslipp mellom øvre og nedre traseer i K1 og K2. En observasjon er at K1Ø har mindre forbruk av materialressurser enn K1N per funksjonelle enhet, men høyere klimagassutslipp. Dette skyldes at det oppgitte nett-tapet i prosent av Norconsult er likt for begge strekninger, som fører til at K1N får fordelt tapene på et lengre kraftstrekk (15,7 km) enn K1Ø (12 km).

E. G. Hertwich & Jorge (2013) presenterte klimapåvirkning av kraftoverføring med norsk strømmiks. Studien viste at halvparten av utslippene er fra nett-tap og halvparten fra infrastrukturprosesser. I en livsløpsanalyse av det islandske transmisjonsnett av EFLA Consulting Engineers (2019) stammer også ca. halvparten av klimagassutslippene fra overføringstap. Harrison et al. (2010) presenterte en LCA analyse av karbonutslippene til transmisjonsnett i Storbritannia der det kommer frem at 85 prosent av utslippene kommer

fra overføringstap. En annen bidragsyter er ledere med 13 prosent av utslippene. I K1 utgjør produksjon av ledere (faseline og OPGW) mellom 11,5 til 14 prosent.

Figur 25 Figur 25 viser at stålmaster gir klart lavere klimagassutslipp enn komposittmaster. Trippelmast i kompositt har svært høyt klimagassutslipp i forhold til alle andre master, med ca. 51 000 kg CO₂-eq. Dette påpekes at det ble oppgitt av Norconsult at denne masten ikke vil bli brukt i Kystlinja. Kompositt enkelmast har omtrent dobbelt så høye klimagassutslipp som stål enkelmast, og kompositt dobbelmast har ca. 7 000 kg CO₂-eq høyere utslipp enn stål dobbelmast. I en livsløpsanalyse av miljøpåvirkningen til kraftstolper i distribusjonsnettet viser et normalisert resultat at stålstolper har høyere klimagassutslipp enn komposittstolper, selv med bruk av 50 prosent resirkulert stål (Erlandsson, 2011). Dette er motsatt resultat enn denne studien. Studien omhandler ni meter høye ledningsstolper i distribusjonsnettet, og dermed er det mulig at den ikke er direkte sammenlignbar med denne studien.

I en LCA av ledningsstolper av Johannesson et al. (2020) kommer det frem at komposittstolpen har klimapåvirkning på ca. 535 kg CO₂-ekv per stolpe. Dette er vesentlig lavere enn resultater i denne studien. En årsak kan være at det er tatt utgangspunkt i tolv meter høye stolper, hvor det i denne studien er det tatt utgangspunkt i en gjennomsnittshøyde på 23 meter. Komposittmastene er deretter skalert opp med i gjennomsnitt 121 prosent for enkel-, dobbel- og trippelmast til å passe Kystlinja. I den svenske studien kommer ca. 90 prosent av påvirkningen fra utvinning av ressurser og produksjon av stolpematerialet, ni prosent fra transport og under én prosent fra avfallshåndtering. I denne studien utgjør produksjon av materialer 99 prosent av klimagassutslippene for alle komposittmaster.

Figur 26 viser at komposittfundamentene har mye lavere klimagassutslipp enn stålfundamentene. Tradisjonelt komposittfundamentet har lavest utslipp på 156 kg CO₂-eq. Selv om dette fundamentet gir lavest klimapåvirkning har Glitre Nett formidlet at de prøver å styre unna nedsprengt komposittfundament på grunn av helse, miljø og sikkerhet. Dersom slisseboringsfundamentet kunne benyttet et fundamentrør i plast i stedet for i kompositt, ville det redusert klimagassutslippene betraktelig. Produksjon av materialer utgjør ca. 960 kg CO₂-eq, som i hovedsak er fundamentrøret i kompositt, mens produksjon av materialer for

tradisjonelt fundament kun utgjør ca. 50 kg CO₂-eq. Stålfundamentet med lavest utslipp er Ronstofotfundament med ca. 5 300 kg CO₂-eq. I stålfundamentene er det betong og pukk som utgjør de største utslippene. For å unngå høye klimagassutslipp bør stålfundamenter på løsmasse unngås. Dette har Glitre Nett opplyst at de prøver på, men at de i noen tilfeller må brukes, f.eks. når topografien er vanskelig eller ved store spenn. Det er ikke funnet andre studier over klimagassutslipp spesifikt for fundamenter, så disse resultatene er nye i denne sammenheng.

Til nå bør Glitre Nett velge stålmaster og komposittfundamenter, men problemet er at det ikke er mulig å kombinere disse. Figur 27 viser at stål dobbelmast med Ronstofotfundament har 3 300 kg CO₂-eq høyere utslipp enn kompositt dobbelmast med tradisjonelt fundament som er den beste løsningen ut fra denne studien. Siden Glitre Nett ønsker å gå bort fra nedsprenget fundament og heller bruke slisseboringsfundament, reduseres forskjellen til 2 300 kg CO₂-eq. Ronstofotcasene har 800 – 1 000 kg CO₂-eq lavere utslipp enn stålcasene i K1 og K2. Årsaken til dette er lavere utslipp i Ronstofotfundamenter enn fjellfundamenter som følge av mindre bruk av betong og ingen bruk av pukk. Ronstofotcasene har i gjennomsnitt kun 100 kg CO₂-eq høyere utslipp enn komposittcasene i K1 og 210 høyere enn i K2. Glitre nett opplyser at fremtidig betongbruk i Ronstofot er planlagt å reduseres til 0,75 m³ per fundament, som tilsvarer 1 650 kg. I denne studien er betongbruken ca. 10 600 kg per fundament. Dette vil redusere fundamentets betongbruk med 84 prosent (og totalt forbruk av materialressurser med 75 prosent) som vil kunne gi store utslippskutt. Bruk av 50 prosent resirkulert stål vil også kunne gi utslippskutt og redusere forskjellen ytterligere. Dette kan gjøre at Ronstofotcasene får en lavere klimapåvirkning enn komposittcasene. Da Ronstofoten er inne til patentgodkjenning, er det ingen andre studier å sammenligne denne løsningen med.

7.2 Resultatenes robusthet

Som nevnt i metoddelen er LCA en metode som følger en internasjonal standard, hvor rammeverket og prinsippene er beskrevet av ISO 14040 og 14044 (ISO, 2006). Til å gjennomføre livsløpsanalysen er modell- og analyseverktøyet SimaPro brukt. SimaPro har vært en ledende LCA-programvareløsning i over 30 år, og er brukt i mer enn 80 land. SimaPro er basert på vitenskapelig informasjon og er designet for full åpenhet (SimaPro, u.å.-

a). Metoden for å hente ut arealdata er skreddersydd av Geodata og NORSUS til å passe kraftledningskorridorer. Når trasélinjen tegnes opp i ArcGIS Pro, blir arealstatistikken til det opptegnede området hentet ut og overført til Excel.

Av resultatene fremgår det tydelig at nett-tap utgjør det største bidraget til klimagassutslipp, med 50 – 75 prosent av totale utslipp i de ulike scenariene i Kystlinja 1 og 2. Det er i samsvar med resultater fra andre studier at nett-tap utgjør en stor andel av utslippene i kraftnett generelt. Videre utgjør produksjon av materialer en betydelig andel av utslippene, mens det viste seg at transport, installering, demontering og avhending bidrar lite til totalt utslipp. I arealstatistikken kom det frem at det desidert største arealet i alle kraftraseene er skogsareal, og at skogen hovedsakelig er furu- eller løvdominert.

Selv om livsløpsanalyse er en god metode for å finne miljøpåvirkning, har den noen begrensninger. En LCA adresserer mulige miljøpåvirkninger, men kan ikke oppgi absolutte eller presise miljøpåvirkninger. Den ser heller ikke på økonomiske aspekt knyttet til produktet eller tjenesten (ISO, 2006). En annen svakhet er at innsamling av inventardata kan være svært ressurs- og tidkrevende, og at mangel på lett tilgjengelig inventardata i LCA-databaser kan være et stort hinder. Ofte samles data fra sekundære kilder som rapporter, publikasjoner og databaser, og brukeren må stole på at dataen og metodene som brukes til å samle dem inn har god kvalitet. I denne studien var datahåndteringen svært tidkrevende, men datagrunnlaget var stort sett relevant og detaljert. Det kunne vært større detaljeringsgrad i prosesser rundt installering av master og fundamenter, transportlengde av de ulike komponentene og avfallshåndtering av kompositt. Det er også knyttet usikkerhet til noe inventardata i SimaPro, f.eks. om komposittmastene er bygget opp riktig inventardata i SimaPro. Videre er manglende data for påvirkning og modeller for LCIA en utfordring. Selv om modeller knyttet til global oppvarming og "ozone depletion" er godt utviklet, er andre konsekvensmodeller fortsatt i en tidlig fase og har behov for videreutvikling, f.eks. vannbruk, arealbruk, og biotisk ressursbruk (Curran, 2014).

En svakhet med arealmetoden er at arealstatistikken var resultat av et 60 meters ryddebelte som ble delt på to for å halvere arealet. Dette fører til at fordelingen av skog, myr, åpent

landskap osv. kan være skjevfordelt, men dette vil være likt for alle traseer og vil ikke påvirke sammenligningsgrunnlaget.

Det er flere svakheter knyttet til datagrunnlaget. Den største usikkerheten er knyttet til nett-tapet. I Figur 17 og Figur 18 ser man at klimagassutslippene er vesentlig høyere for K2 enn K1, og for K1Ø enn K1N, og at dette skyldes nett-tapet i bruksfasen. Figur 19 viser at dersom man ser bort fra nett-tap har stålalternativene i K1 og K2 så å si helt like klimagassutslipp, og det samme med komposittalternativene. Nett-tap øker proporsjonalt med avstanden fra kraftverket til forbruker og med overført effekt (Haugen et al., 2004). Nett-tapet ble estimert av Norconsult til å være 0,74 prosent for K1 og 2,47 prosent for K2. K2 har lengre avstand enn K1, så det er riktig at nett-tapet her blir større. Nett-tapet burde også vært større i K1N enn K1Ø, fordi kraftstrekningen er 3,7 km (31 %) lengre. Det er allikevel valgt å bruke estimatene fra Norconsult.

Skaleringen av master fra Honna – Logna til Kystlinja utgjør også en usikkerhet. Mot slutten av studien ble det opplyst at enkel- og trippelmast i kompositt ikke ville bli benyttet i Kystlinja, og at det også var lite sannsynlig at enkelmast i stål ville bli brukt. Siden hele datagrunnlaget fra Honna – Logna var bygget opp, og det var kort tid igjen til leveringsdato, ble ikke disse opplysningene tatt hensyn til. Da Norconsult oppga oppskaleringsprosent for mastene, hadde de ikke regnet på de tre overnevnte mastetyper. Det ble gjort en grov antakelse av Norconsult at enkelmasten måtte oppskaleres med 154 prosent for å kunne tåle belastningen på Kystlinja, noe som førte til at enkelmasten ble tyngre enn dobbelmasten. Videre ble trippelmasten oppskalert med 93 prosent og enkelmasten i stål med samme prosent som dobbelmasten i stål; 96 prosent. Det er usikkerhet knyttet til om skaleringen av disse tre mastene er riktig.

I datagrunnlaget til arealstatistikken er det knyttet usikkerhet til artsdataen og om den representerer artsmangfoldet på en riktig måte. Statistikken er basert på tilfeldige observasjoner hentet fra artsdatabanken, og er kun indikasjoner på om områdene kan ha betydning.

Til slutt er det viktig å påpeke at denne studien ikke omfatter et komplett kraftlinjesystem, og inkluderer blant annet ikke utslipp knyttet til lekkasjer av SF₆ gass og transformatorstasjoner, som har vist seg å stå for betydelige utslipp i andre studier. Den inkluderer heller ikke gassisolerte koblingsanlegg eller kabler i bakken.

7.3 Fremtidig bruk

Resultatene i denne studien kan brukes av Glitre Nett, men erfaringene er også overførbare til kraftnettselskaper. Denne studien er prospektiv, og bruker historiske data for å si noe om fremtidig planlagt infrastruktur. Derfor kan studien være nyttig i planleggingsfasen spesielt, for å bevisstgjøre hva det er viktig å vite i en tidlig fase for å finne de beste løsningene med hensyn til materialforbruk, klima og arealbruk. På den måten kan det legges mest fokus på å finne gode løsninger for de fasene i livsløpet og elementene i systemet som har størst potensiale for forbedring. De fasene som har vist seg å gi størst klimagassutslipp i denne studien er bruksfasen (nett-tap) og produksjon av materialer, særlig kompositt, betong og stål, og derfor er det viktig å ha gode data på dette i en tidlig fase. Dermed kan man velge riktige materialer og leverandører, og jobbe for å bruke resirkulerte materialer der det kan gi store utslippskutt. Harrison et al. (2010) peker på at for å redusere CO₂ utslippene i kraftlinjer bør det investeres i infrastruktur som gir lavere nett-tap. De andre livsløpsfasene har mye lavere klimapåvirkning, og er dermed ikke like viktige å fokusere på. Videre kan studien brukes til å se hvilke enkeltløsninger og kombinasjoner av master og fundamenter som gir lavest forbruk av materialressurser og bidrag til klimagassutslipp.

Arealmetoden, som er spesielt utviklet for kraftlinjetraseer, kan også være et nyttig verktøy for kraftselskaper. En grov analyse av arealbruken kan gi et bilde over hvor mye kraftlinjetraseen består av f.eks. fjell, myr, dyrket mark og løsmasser, som kan gi informasjon om hvor mastepunktene bør plasseres og være grunnlag for å kunne velge den beste fundamenteringsløsningen. Et grovt estimat av forbruk av materialressurser, klimagassutslipp og arealbruk kan være et godt grunnlag for en konsekvensutredning, og modellene i denne studien kan være et godt utgangspunkt for dette.

7.4 Fremtidig forskningsbehov

For videre forskning vil det være behov for å gjøre en ny analyse av kraftstrekningene når detaljplanleggingen av kraftnettet er ferdig. Det vil være interessant å sammenligne med resultatene fra denne studien i et tidlig stadium. Det er også behov for å se på flere miljøkategorier enn klimagassutslipp, som er viktig for å unngå problemskifting mellom miljøkategorier.

Glitre Nett har informert at de er svært nysgjerrige på komposittmaterialet, og har gitt inntrykk av at det samme gjelder for andre nettselskaper. Det er behov for å forske mer på både hvordan komposittstolpene og -fundamentene er bygget opp og ikke minst hvordan de kan avfall-håndteres. Komposittstolpene er mye lettere i vekt og lettere håndterlig enn stålstolpene. Det ble opplyst av Glitre Nett at en komposittstolpe kan flys inn til masteplass på én helikoptertur, men at stålstolpene ofte må flys inn i tre deler. Utfordringen med kompositt er at det per i dag ikke er noen gode løsninger for hvordan materialet kan håndteres etter endt livsløp. Det er funnet noen studier og artikler som ser på vindturbinblader i kompositt, men alle ser ut til å være i et tidlig stadium.

Glitre Nett har opplyst at de planlegger å bruke 50 prosent resirkulert stål i master i sine fremtidige kraftsystemer, noe som vil kunne redusere klimagassutslippene til stålcase og stålcase med Ronstofot. Redusert betongbruk i Ronstofotfundamentet vil også redusere utslippene i stålcase med Ronstofot. Samtidig vil mulig resirkulering av kompositt med eventuell bruk av resirkulert materiale i nye stolper redusere utslippene til komposittcase. Det vil være interessant å kjøre analysen i SimaPro på nytt med lav, middels og høy grad av resirkulering for kompositt- og stålmaterialene. Videre vil det være interessant å gjøre en analyse av aluminiumsmaster, og sammenligne forbruket av materialressurser og klimagassutslipp med kompositt- og stålmaster.

Videre vil det være behov for å koble arealstatistikken inn mot påvirkningen av biologisk mangfold, og forske videre på hvilke naturtyper som er spesielt viktige å fokusere på ved linjeframføring i de ulike krafttraseene i Kystlinja. Det vil være interessant å forske på hvilke

tiltak som kan bidra til at arealet under linjenettet får økt verdi som naturområder, samt hvilke arealer som bør prioriteres for skjøtsel på grunn av forekomst av viktige naturtyper. Det er også viktig å finne ut hvordan ulike avbøtende tiltak kan bidra til lavere kollisjonsrisiko og elektrokusjon for hubro og andre rovfugler. Videre kan det være interessant å finne områdets verdi for friluftsliv, samt hvordan arealbruken påvirker dette.

Ecoinvent har kommet med en oppdatert versjon, Ecoinvent 3.9, der det er mer data for komponenter som inngår i elektrisitetsoverføring i luft, kabler i bakken og sjøkabler (Cilleruelo, 2023). Det vil være interessant å kjøre analysen med denne databasen, og se om den utgjør noen forskjell.

8 Konklusjon

Denne studien har sett nærmere på forskjellene mellom to alternative traseer for de to kraftstrekningene Kulia til Leire (Kystlinja 1), og Lyngdal til Kvinesdal (Kystlinja 2) med hensyn til forbruk av materialressurser, klimagassutslipp og arealbruk. LCA- og materialanalysen har inkludert forbruk og produksjon av materialer, transport til riggplass, installering, demontering, transport til avhending og avhending.

Casene med stålmaster har tre til fire ganger høyere forbruk av materialressurser og ca. 1 100 kg CO₂-eq/FU høyere klimagassutslipp enn casene med komposittmaster i alle scenarier. Casene med Ronstofotfundament har 800 – 1000 kg CO₂-eq/FU lavere utslipp enn stålcasene, og 100 – 210 kg CO₂-eq/FU høyere utslipp enn komposittcasene. Ut fra disse resultatene er komposittcasene det beste valget i et klimaperspektiv for alle traseer. Dersom Glitre Nett reduserer betongbruken i Ronstofotfundamentet slik de har planlagt, med 84 prosent, og bruker 50 prosent resirkulert stål inn i nye komponenter, vil casene med Ronstofotfundament kunne gi lavest klimagasspåvirkning under forutsetningene som ligger til grunn for studien.

Når det kommer til valg av trasé, gir nedre trasé i K1 ca. 3 000 kg CO₂-eq/FU lavere klimagassutslipp per funksjonell enhet enn øvre trasé både for stål- og komposittcase. Om man derimot ser på hele linjestrekket, gir øvre trasé lavest klimagassutslipp, og har i tillegg lavest forbruk av materialressurser per funksjonelle enhet og totalt. En fordel med å bygge ut K1Ø er at den vil bygges tett inntil eksisterende kraftlinjetrasé der arealet allerede er beslaglagt, og hvor det finnes et tilgjengelig veinett. Videre kan det tenkes at fugler og andre arter allerede er vant til eksisterende kraftkorridor. På den annen side vil bygging av K1N frigjøre arealet der eksisterende trasé går, og dermed kan arealet tilbakeføres til slik det var før. I K2 har øvre og nedre stålcase omtrent helt like klimagassutslipp, og det samme har øvre og nedre komposittcase. En vesentlig forskjell er at K2N i arealressurser har totalt ca. 6 800 m² mer skog enn K2Ø. K2Ø har mer åpen fastmark som i mindre grad påvirkes av kraftlinjebygging. Basert på dette hensynet kan det være best å velge øvre trasé.

Av livsløpsfaser har bruksfasen med nett-tap størst bidrag til utslipp av klimagasser med 9- 12 000 kg CO₂-eq/FU for K1 og ca. 23 200 for K2. Produksjon av materialer står for nest høyest bidrag, med i gjennomsnitt 6 900 kg CO₂-eq/FU for kompositt- og stålcaser i K1 og 7 100 for kompositt- og stålcaser i K2. Sett bort fra nett-tap er klimapåvirkningen i kompostittcasene nesten helt lik, og det samme i stålcasene som ligger ca. 1000 kg CO₂-eq/FU over. Stålmaster gir lavere klimagassutslipp enn komposittmaster, og komposittfundamenter lavere utslipp enn stålfundamenter. Siden Glitre Nett prøver å unngå tradisjonelt komposittfundament med sprenging på grunn av HMS, er det slisseboring som anbefales. Ved å bytte ut komposittmaterialet i fundamentrøret med f.eks. plast, vil klimagassutslippene kunne reduseres betraktelig. Av stålfundamentene gir Ronstofotfundamentet lavest klimabelastning.

Noen svakheter er viktig å ta i betraktning når man leser resultatene. Det er knyttet usikkerhet til skaleringen av master og størrelsen på nett-tapet. Det kommer allikevel tydelig frem i denne og i andre studier at nett-tapet har stor betydning for klimagassutslipp. Det er også viktig å presisere at LCA-en hovedsakelig omhandler klimagassutslipp, men at andre miljøkategorier også bør tas i betraktning for å gi et mer helhetlig bilde.

9 Referanser

- acplastics. (u.å.). *Guide to Plastic Weights*. Norges Vassdrags- og Energidirektorat.
<https://www.acplasticsinc.com/informationcenter/r/guide-to-plastic-weights>
- Agder Energi. (2015). *Kraftsystemutredninger*. Agder Energi.
<https://www.aenett.no/virksomhet/publikasjoner-utredninger/utredninger/kraftsystemutredninger/>
- Agder Energi Nett. (2021). *Bakgrunn for utredningsspørsmål om 132 kV Kulia–Vallemoen*. Agder Energi Nett.
<https://webfileservice.nve.no/API/PublishedFiles/Download/67c123c9-cc21-4593-9fa0-0098188e622c/202102446/3424061>
- amokabel. (u.å.). *OPGW*. amazonaws.com. https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/static.wm3.se/sites/260/media/322552_OPGW_190916.pdf?1568637432
- Bartomeus, I., & Hill, B. (2016). *The potential of electricity transmission corridors in forested areas as bumblebee habitat*. <https://doi.org/10.1098/rsos.160525>
- Berg, Å., Bergman, K.-O., Öckinger, E., Wissman, J., & Zmihorski, M. (2016). *Power-line corridors as source habitat for butterflies in forest landscapes*. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.07.034>
- Bjerkomp, T. (2020). *Resirkulerings- og ombruksløsninger for vindturbinblader fra norske vindkraftanlegg* [Norges miljø- og biovitenskapelige universitet]. <https://static02.nmbu.no/mina/studier/moppgaver/2020-Bjerkomp.pdf>
- Blackett, G., Clark, M., Park, G. A. R., Rabjohns, B., Savory, E., & Toy, N. (2008). *An evaluation of the environmental burdens of present and alternative materials used for electricity transmission*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.08.032>
- Boer, H. S. de, Deetman, S., Englenburg, M. V., Voet, E. van der, & Vuuren, D. P. van. (2021). *Projected material requirements for the global electricity infrastructure – generation, transmission and storage*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105200>
- Bommarco, R., Daniel-Ferreira, J., Öckinger, E., & Wissman, J. (2020). *Linear infrastructure habitats increase landscape-scale diversity of plants but not of flower-visiting insects*. <https://www.nature.com/articles/s41598-020-78090-y>
- CEN. (2019, august 30). *EN 50693:2019—Product category rules for life cycle assessments of electronic and electrical products and systems*. ITeh Standards.

- <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/e9720ea4-6916-4c0f-b4c3-fcfd01c90bd/en-50693-2019>
- Cilleruelo, J. (2023, januar 5). *Ecoinvent 3.9.1 – now available for openLCA*.
<https://www.openlca.org/ecoinvent-3-9-1-now-available-for-openlca/>
- Comrod. (u.å.). *Hvorfor benytte Comrods mastesystem?* <https://www.comrod.no/fordelene/>
- Curran, M. A. (2014). *Strengths and Limitations of Life Cycle Assessment*.
https://doi.org/10.1007/978-94-017-8697-3_6,
- Deetman, S., Pauliuk, S., Tukker, A., Voet, E. van der, & Vuuren, D. P. van. (2018).
Scenarios for Demand Growth of Metals in Electricity Generation Technologies, Cars, and Electronic Appliances. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05549>
- Ecoinvent. (u.å.). *Ecoinvent Database*. Hentet 7. februar 2023, fra <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>
- EFLA Consulting Engineers. (2019, mars 1). *Life cycle assessment of the Icelandic transmission system*. [efla-engineers.com. https://www.efla-engineers.com/about-us/news/life-cycle-assessment-of-the-icelandic-transmission-system](https://www.efla-engineers.com/about-us/news/life-cycle-assessment-of-the-icelandic-transmission-system)
- Eldegard, K., Moe, S. R., & Selås, V. (2012). *Kraftgater som habitat: Effekter av bredde, alder, skjøtsel og plassering på biologisk mangfold*. Department of Ecology and Natural Resource Management Norwegian University of Life Sciences.
<https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/handle/11250/2647404>
- EPD-Norge. (2020, september 23). *Jackofoam 300 34mm*.
<https://cdn.bygggtjeneste.no/nobb/81841781-408e-4f80-9674-56550e8dc0e3>
- EPD-Norge. (2022). *Product category rules*. EPD-Norge. <https://www.epd-norge.no/getfile.php/1323449-1650543359/PCRer/NPCR%20027%202022%20Part%20B%20Electrical%20cables%20and%20wires%20A2%20010322.pdf>
- Erlandsson, M. (2011). *Jämförelse av miljöpåverkan från ledningsstolpar av olika material— En livscykelanalys* (Nr. B2004). IVL Svenska Miljöinstitutet. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1552078/FULLTEXT01.pdf>
- European Commission, Joint Research Centre, & Institute for Environment and Sustainability. (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook :general guide for life cycle assessment: Detailed guidance*. (1. utg.). Publications Office.
<https://data.europa.eu/doi/10.2788/38479>
- Evju, M., Grainger, M. J., Hagen, D., Kyrkjeeide, M. O., Mehlhoop, A. C., & Torsæter, E. (2022). *Assessing the effect of mitigation efforts to improve vegetation recovery in*

- powerline construction sites across Norway.*
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106789>
- Fjermedal, T. P., & Løvland, A. T. S. (2012). *KONSESJONSSØKNAD FORNYING AV REGIONALNETTLINJE SKJERKA-HONNA-LOGNA (132kV/110kV)*. Agder Energi Nett.
- Frye, H., Metzler, K. J., & Wagner, D. L. (2019, juli). *Importance of transmission line corridors for conservation of native bees and other wildlife.*
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.03.042>
- Giset, M., & Særen, M. (2017). *Systemjording*. Norges vassdrags- og energidirektorat. Glitre Nett. (u.å.). *Velkommen til Glitre Nett!* <https://www.glitrenett.no/>
- Gottfridsson, M., Gunnarsson, J., Lindskog, N., Rydberg, T., & Tegstedt, F. (2020). *PROSCALE ASSESSMENT WITHIN LCA ON UTILITY POLES* (REPORT 2020:694). Energiforsk. <https://energiforsk.se/media/28433/proscale-assessment-within-lca-on-utility-poles-energiforskrapport-2020-694.pdf>
- Gunnleifsen, Le., Heggøy, O., Husebø, H., Kleven, O., Steen, O. F., Steinsvåg, M. J., Undheim, O., & Øien, I. J. (2020). *Overvåking av hubro i Sør-Norge 2012–2019* (Nr. 1–2020; s. 24). Norsk Ornitologisk Forening.
https://www.birdlife.no/prosjekter/rapporter/2020_01_NOF.pdf
- Harrison, G. P., Karamanlis, S., Ochoa, L. F., & Maclean, E. J. (2010). *Life cycle assessment of the transmission network in Great Britain*. 3622–3631.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.02.039>
- Hauan, I. B. (2014). *Life Cycle Assessment of Electricity Transmission and Distribution* [Norwegian University of Science and Technology (NTNU)].
<http://hdl.handle.net/11250/235701>
- Haugen, S., Haugeland, C.-P., Vingås, L., & Johnsen-Solløs, A. (2004). *Opprustning av kraftnettet for å redusere energitapet* (Nr. 1/2004). Norges vassdrags- og energidirektorat. https://publikasjoner.nve.no/rapport/2004/rapport2004_01.pdf
- Hawkins, T. R., Hertwich, E. G., & Jorge, R. S. (2011). Life cycle assessment of electricity transmission and distribution—part 1: Power lines and cables. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(1), 9–15. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0335-1>
- Hertwich, E. G., & Jorge, R. S. (2013). *Environmental evaluation of power transmission in Norway*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.004>
- Hofstad, K. (2020, mars 24). *Isolator*. Store norske leksikon. <https://snl.no/isolator>

- Holtet, J. H. (2022). *Instruks for arbeid med SF6-anlegg og SF6-effektbrytere og opphold i SF6 innendørsanlegg*. <https://www.statnett.no/globalassets/om-statnett/elsikkerhet/instruks-for-arbeid-med-sf6-anlegg-og-sf6-effektbrytere-og-opphold-i-sf6-innendørsanlegg.pdf>
- Husby, M., & Pearson, M. (2022, april 22). *Wind Farms and Power Lines Have Negative Effects on Territory Occupancy in Eurasian Eagle Owls (Bubo bubo)*. <https://doi.org/10.3390/ani12091089>
- ISO. (2006). *International standard ISO 14040* (ISO 14040:2006 (E)). <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- Istad, M. (2021, april 9). Hva er SF6-gass? *SINTEFblogg*. <https://blogg.sintef.no/sintefenergy-nb/sf6-gassregnskap/>
- Johannesson, C., Johansson, K., & Tegstedt, F. (2020). *Livscykelanalys av ledningsstolpar* (Livsløpsanalyse 2020:639). Energiforsk. <https://energiforsk.se/media/28431/livscykelanalys-av-ledningsstolpar-energiforskrapport-2020-693.pdf>
- Leicht-Young, S. A., Metzler, K. J., Motzkin, G., & Wagner, D. L. (2014). *Vegetation composition along a New England transmission line corridor and its implications for other trophic levels*. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.04.026>
- Løvland, A. T. S. (2021). *110 (132) kV Kulia—Leire – Halshaug—Vallemoen*. Agder Energi Nett. <https://webfileservice.nve.no/API/PublishedFiles/Download/613ea71b-1c93-4cab-8fb8-785da1d33f77/202102446/3422411>
- Miljødirektoratet. (2022). Faglig grunnlag for en strategi for å hindre nedbygging av myr. I *Miljødirektoratet* (s. 49). <https://www.miljodirektoratet.no/aktuelt/fagmeldinger/2022/juni-2022/vurdering-av-virkemidler-for-a-hindre-nedbygging-av-myr/>
- Molde pukkverk. (u.å.). *Masse beregning*. <https://www.moldepukkverk.no/news/61/20/Masse-beregning>
- Norad. (2015, februar 16). *Biologisk mangfold og klima*. Norad. <https://norad.no/tema/klima-miljo-og-naturressurser/biologisk-mangfold/biologisk-mangfold-og-klima1/>
- Norgesnett. (u.å.). *Nettapp – Hva er nettapp?* Norgesnett. <https://norgesnett.no/kunde/hva-er-nettapp/>
- Norsk Gjenvinning. (u.å.). *Norsk Gjenvinning: Kristiansand, Mjåvann—Gjenvinning*. norskgjenvinning.no. Hentet 3. mai 2023, fra

- <https://www.norskgjenvinning.no/kontakt/anlegg/agder/kristiansand-mjaavann-gjenvinning/>
- Norsk Gjenvinning. (2015, februar 1). *Volum- og vektinformasjon*.
<https://www.norskgjenvinning.no/tjenester/avfallstyper/volum-og-vektinformasjon/>
- NVE. (2021, juli 2). *132 kV Kulia—Leire—Halshaug—Vallemoen*. Norges Vassdrags- og Energidirektorat.
<https://www.nve.no/konsesjon/konsesjonssaker/konsesjonssak/?id=7504&type=A-1>
- NVE. (2022, mars 16). *Modul G2.001: Omregning av volum av masser*.
<https://sikringshandboka.nve.no/moduler/modul-g2-001-omregning-av-volum-av-masser/>
- NVE. (2023, mars 14). *132 kV Vallemoen—Lyngdal—Kvinesdal*. Norges Vassdrags- og Energidirektorat.
<https://www.nve.no/konsesjon/konsesjonssaker/konsesjonssak?id=7583&type=A>
- NVE, & Miljødirektoratet. (2023, februar 15). *Forurensing*. Norges Vassdrags- og Energidirektorat.
<https://www.nve.no/energi/energisystem/vindkraft/kunnskapsgrunnlag-om-virkninger-av-vindkraft-paa-land/forurensning/>
- Olje og Energidepartementet. (2019, april 10). *Strømnettet*. Energifakta Norge.
<https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/kraftnett/>
- Olje og Energidepartementet. (2021, oktober 12). *Strømforsyning og strømnettet* [Redaksjonellartikkel]. regjeringen.no.
<https://www.regjeringen.no/no/tema/energi/stromnettet/stromforsyning-og-stromnettet/id2353792/>
- Pedersen, R. (2020, oktober 5). *Beregn bilens CO2-utslipp*. Smarte Penger.
<https://www.smartepenger.no/105-kalkulator/883-beregn-bilens-co2-utslipp>
- PRé Sustainability. (2022, juni). *SimaPro database manual Methods library*. Simapro.com.
<https://simapro.com/wp-content/uploads/2022/07/DatabaseManualMethods.pdf>
- Prysmian Group. (2022). *Environmental product declaration*. EPD Italy.
https://www.epditaly.it/en/wp-content/uploads/2016/12/Prysmian_EPD_8_Brasil_2022_v6_250522.pdf
- Pwc. (2022). *En grønnere fornybarnæring. Muligheter og utfordringer* (s. 76) [Bærekraft].
https://www.fornybarnorge.no/contentassets/26eb5333890349b08dac1bda28210bef/energi_norge_barekraftsrapport-2022.pdf
- Rosvold, K. A. (2021, desember 22). *Toppline*. Store norske leksikon. <https://snl.no/toppline>

- SAS. (u.å.). *BEREGN UTSLIPPENE DINE*. sas.no. Hentet 3. mai 2023, fra <https://www.sas.no/barekraft/klimakalkulator/>
- SimaPro. (u.å.-a). *About SimaPro*. SimaPro. Hentet 7. april 2021, fra <https://simapro.com/about/>
- SimaPro. (u.å.-b). *What is the difference between ecoinvent market and transformation processes?* Simapro.com. <https://support.simapro.com/s/article/What-is-the-difference-between-ecoinvent-market-and-transformation-processes>
- Skattenborg, R. (u.å.). *BmB Bære kraft med bærekraft*. Norsus. Hentet 9. januar 2023, fra <https://norsus.no/prosjekt/bmb-baere-kraft-med-baerekraft/>
- Smith, C., Nicholls, Z. R. J., Armour, W., Collins, W., Forster, M., Meinshausen, M., Palmer, M. D., & Watanabe, M. (2021). *The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity Supplementary Material* (s. 21). https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter07_S1_M.pdf
- Statnett. (2021). *Bærekraftsrapport 2021*. <https://www.statnett.no/globalassets/om-statnett/strategi-og-samfunnsansvar/baerekraftsrapport-2021.pdf>
- Turconi, R., Simonsen, C. G., Byriel, I. P., & Astrup, T. (2013). Life cycle assessment of the Danish electricity distribution network. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(1), 100–108. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0632-y>
- UngEnergi. (2021, november 4). *Biologiske konsekvenser av klimaendringene | UngEnergi*. Ungenergi.no. <https://ungenergi.no/miljo-klima-samfunn/miljo-klima/biologiske-konsekvenser/>

10. Vedlegg

Vedlegg A: Gjennomsnittsmaster

I vedlegg A presenteres datagrunnlaget for materialinnholdet i alle gjennomsnittsmaster etter at mastene er skalert opp til å passe Kystlinja. Det er satt en linje som markerer cut-off på 98 prosent, hvor de resterende 2 prosentene er utelatt fra LCA-analysen.

Appendix 1 Materialinnhold i enkelmast kompositt.

Antall	Beskrivelse	Totalvekt [kg]	Totalvekt [kg]	Prosentandel	Akkumulert andel
1	Stolpe	809	2 059	76,2 %	76,2 %
3	Isolator	120	305	11,3 %	87,6 %
4	Fasefeste	52	132	4,9 %	92,5 %
48	Klatretrinn	48	123	4,6 %	97,0 %
12	Krumskiver	6	15	0,6 %	97,6 %
3	Pinneskrue	4	10	0,4 %	98,0 %
2	Pinneskrue	4	10	0,4 %	98,3 %
2	Pinneskrue	4	9	0,3 %	98,7 %
2	Pinneskrue	4	9	0,3 %	99,0 %
2	Pinneskrue	3	9	0,3 %	99,3 %
2	Pinneskrue	3	8	0,3 %	99,6 %
2	Pinneskrue	3	8	0,3 %	99,9 %
7	Blindplugg	1	2	0,1 %	100,0 %
Totalt			2 700	100 %	

Appendix 2 Materialinnhold i dobbelmast kompositt.

Antall	Beskrivelse	Totalvekt [kg]	Prosentandel	Akkumulert andel
1	Stolpe	984	41,0 %	41,0 %
1	Stolpe	904	37,7 %	78,7 %
1	Travers	228	9,5 %	88,1 %
40	Klatretrinn	53	2,2 %	90,3 %
35	Klatretrinn	46	1,9 %	92,3 %
3	Fasefeste	36	1,5 %	93,8 %
8	Pinneskrue	20	0,8 %	94,6 %
6	Ukjent komponent	19	0,8 %	95,4 %
2	Støtte for travers	16	0,7 %	96,1 %
24	Underlagsskive	16	0,7 %	96,7 %
2	Avspenningsbeslag topline	13	0,6 %	97,3 %
6	Bolt	11	0,5 %	97,7 %
6	Bolt	10	0,4 %	98,2 %
4	Pinneskrue	10	0,4 %	98,6 %
2	Sklisikring	7	0,3 %	98,9 %
3	Masteklave	6	0,2 %	99,1 %
3	Masteklave	6	0,2 %	99,3 %
2	Pinneskrue	4	0,2 %	99,5 %
2	Pinneskrue	4	0,2 %	99,7 %
1	Pinneskrue	2	0,1 %	99,8 %
1	Pinneskrue	2	0,1 %	99,9 %
2	Underlagsskive	2	0,1 %	99,9 %
7	Blindplugg	1	0,0 %	100,0 %
7	Blindplugg	1	0,0 %	100,0 %
Totalt		2 400	100 %	

Appendix 3 Materialinnhold i trippelmast kompositt.

Antall	Beskrivelse	Totalvekt [kg]	Prosentandel	Akkumulert andel
1	Stolpe	1 550	25,7 %	25,7 %
	Stolpe	1 475	24,5 %	50,2 %
1	Stolpe	1 438	23,9 %	74,1 %
1	Travers	346	5,7 %	79,9 %
1	Travers	203	3,4 %	83,2 %
3	Beslag for loopisolator	159	2,6 %	85,9 %
47	Klatretrinn	92	1,5 %	87,4 %
1	Fasefeste	89	1,5 %	88,9 %
1	Fasefeste	89	1,5 %	90,4 %
1	Fasefeste	89	1,5 %	91,8 %
42	Klatretrinn	82	1,4 %	93,2 %
40	Klatretrinn	77	1,3 %	94,5 %
2	Fasefeste	46	0,8 %	95,2 %
6	Pinneskrue	30	0,5 %	95,7 %
6	Pinneskrue	30	0,5 %	96,2 %
6	Pinneskrue	28	0,5 %	96,7 %
2	Bardunfeste	25	0,4 %	97,1 %
	Pinneskrue	19	0,3 %	97,4 %
	Fasefeste med emnerør	19	0,3 %	97,7 %
1	Bardunfeste	17	0,3 %	98,0 %
3	Pinneskrue	13	0,2 %	98,2 %
3	Pinneskrue	12	0,2 %	98,4 %
4	Bolt	9	0,1 %	98,6 %
4	Bolt	9	0,1 %	98,7 %
4	Bolt	9	0,1 %	98,9 %
	Krum skive	8	0,1 %	99,0 %
36	Bøssing for M24	7	0,1 %	99,1 %
3	Fasefeste	6	0,1 %	99,2 %
3	Krum skive	6	0,1 %	99,3 %
3	Krum skive	6	0,1 %	99,4 %
2	Masteklave	4	0,1 %	99,5 %
2	Masteklave	4	0,1 %	99,5 %
2	Masteklave	4	0,1 %	99,6 %
2	Bolt	4	0,1 %	99,7 %
2	Bolt	4	0,1 %	99,7 %
2	Bolt	3	0,1 %	99,8 %
1	Masteklave	3	0,0 %	99,9 %
	Masteklave	3	0,0 %	99,9 %
1	Masteklave	2	0,0 %	99,9 %
7	Pinneskrue	1	0,0 %	100,0 %
7	Blindplugger	1	0,0 %	100,0 %
7	Blindplugger	1	0,0 %	100,0 %
Totalt		6 021	100 %	

Appendix 4 Materialinnhold i enkelmast stå.

Antall	Beskrivelse	Totalvekt [kg]	Prosentandel	Akkumulert andel
1	Stolpe seksjon C	944	19,6 %	19,6 %
1	Stolpe seksjon B	934	19,4 %	39,0 %
1	Stolpe seksjon A	805	16,7 %	55,7 %
2	Mellomplater	567	11,8 %	67,4 %
3	Traversarmer	405	8,4 %	75,8 %
1	Bunnplate	282	5,8 %	81,7 %
2	Mellomplater	260	5,4 %	87,1 %
12	Bolt	184	3,8 %	90,9 %
3	Vang	119	2,5 %	93,3 %
1	Bunnplate	88	1,8 %	95,2 %
	Galvanisering	104	2,1 %	97,3 %
1	Topplate	74	1,5 %	98,9 %
12	Bunnplate	47	1,0 %	99,8 %
1	Pole Cap	8	0,2 %	100,0 %
Totalt		4 821	100 %	

Appendix 5 Materialinnhold i dobbelmast stå.

Antall	Beskrivelse	Totalvekt [kg]	Prosentandel	Akkumulert andel
2	Stolpe seksjon B	1 861	20,3 %	20,3 %
2	Stolpe seksjon A	1 525	16,6 %	36,9 %
2	Stolpe seksjon C	1 412	15,4 %	52,3 %
4	Mellomplater	1 183	12,9 %	65,1 %
1	Travers	651	7,1 %	72,2 %
2	Bunnplate	567	6,2 %	78,4 %
4	Mellomplater	434	4,7 %	83,1 %
2	Traversarmer	409	4,5 %	87,6 %
2	Vang	248	2,7 %	90,3 %
	Galvanisering	207	2,3 %	92,5 %
24	Bolt	184	2,0 %	94,5 %
24	Bunnplate	141	1,5 %	96,1 %
2	Bunnplate	98	1,1 %	97,1 %
2	Topplate	98	1,1 %	98,2 %
2	Vang	98	1,1 %	99,3 %
91	Step and clip	41	0,4 %	99,7 %
2	Pole Cap	25	0,3 %	100,0 %
Totalt		9 181	100 %	

Appendix 6 Materialinnhold i vinkelforankringsmast stål.

Antall	Beskrivelse	Totalvekt [kg]	Prosentandel	Akkumulert andel
2	Stolpe seksjon B	2 686	19,6 %	19,6 %
2	Stolpe seksjon C	2 097	15,3 %	34,9 %
1	Travers	1 684	12,3 %	47,1 %
4	Mellomplater	1 458	10,6 %	57,8 %
1	Stolpe seksjon A	1 035	7,5 %	65,3 %
1	Stolpe seksjon A	917	6,7 %	72,0 %
2	Bunnplate	786	5,7 %	77,7 %
2	Traversarm	685	5,0 %	82,7 %
4	Mellomplater	658	4,8 %	87,5 %
2	Vang	440	3,2 %	90,7 %
	Galvanisering	333	2,4 %	93,1 %
24	Bolt	257	1,9 %	95,0 %
2	Vang	172	1,3 %	96,3 %
2	Bunnplate	137	1,0 %	97,3 %
2	Topplate	137	1,0 %	98,2 %
24	Bunnplate	131	1,0 %	99,2 %
111	Step and clip	57	0,4 %	99,6 %
2	Pole Cap	52	0,4 %	100,0 %
Totalt		13 721	100 %	

Vedlegg B: Gjennomsnittsfundamenter

I vedlegg B presenteres datagrunnlaget for materialinnholdet i alle gjennomsnittsfundamenter etter at de er skalert opp til å passe Kystlinja.

Appendix 7 Materialinnhold i stålfundamenter.

Materialer	Løsmasse	Fjell	Ronstofot
Betong	30 360	23 884	10 562
Pukk	12 200	3 599	-
Armering	2 292	985	33
Fjellanker	-	622	275
Isolasjon	128	-	-
Ronstofot	-	-	1 000
Totalt	44 981	29 089	11 869

Appendix 8 Materialinnhold i komposittfundamenter.

Materialer	Sprenging/graving	Slisseboring
Pukk	644	-
Betong	-	125
Fundamentrør	83	95
Gysemasse	-	13
Totalt	727	233



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway