

Primærenergikonseptet og beregning av primærenergifaktorer

Petter Johan Aalerud

Master i energi og miljø

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Hans Martin Mathisen, EPT

Medveileder: Rolf Ulseth, EPT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for energi- og prosesseteknikk

EPT-M-2012- 98

MASTEROPPGAVE

for

Stud.techn. Petter Aalerud

Våren 2012

Primærenergikonseptet og beregning av primærenergifaktorer

The Primary Energy Concept and calculation of Primary Energy Factors

Bakgrunn og målsetting

Energi og klima har fått en sterkt økende oppmerksomhet over hele verden i løpet av de siste par 10-årene. De Forende Nasjoner har vært den toneangivende politisk pådriver i denne utviklingen. I erkjennelsen av at energi- og klimaproblematikken er et globalt problem, har man gradvis innsett at man må utvide systemgrensene ved alle betraktninger i denne sammenheng. Utviklingen av det såkalte Primærenergikonseptet ved analyse av den total energieffektivitet og CO₂-produksjon ved bruk av energi er en logisk følge av at utfordringen er av global karakter.

”Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings” sier at primærenergiforbruk, beregnet ved bruk av primærenergifaktorer (PEF), skal være en obligatorisk indikator på energisertifikatene som ”alle” bygninger i EU-området skal ha fra nå av.

Hovedmålsettingen for denne oppgave er å belyse problemområdet vedrørende Primærenergikonseptet, samt å beregne typiske verdier for PEF og koeffisienter for utslipp av CO₂-ekvivalenter for utvalgte typer biobrensel.

Opgaven bearbeides ut fra følgende punkter

1. Redegjør for den historiske utviklingen av det vi kan kalle Primærenergikonseptet, og klarlegg alle de aktuelle elementene som må tas hensyn til i hele konseptet.
2. Redegjør for den prinsipielle metodikken som anvendes ved beregning av primærenergifaktorer (PEF) for ulike energislag og de ulike metodene som finnes i dag for å beregne PEF-verdier og koeffisienter for utslipp av CO₂-ekvivalenter for ulike energislag.
3. Klarlegg hvordan ulike allokeringmetoder påvirker resultatene av beregningene, og drøft hvilke allokeringmetoder som bør velges ut fra en logisk og praktisk avveining.
4. Klarlegg hvilke hensyn som både direkte og indirekte ivaretas ved henholdsvis primærenergiforbruk og utslipp av CO₂-ekvivalenter, og drøft hvorvidt begge disse indikatorene bør brukes på energisertifikatene.
5. Beregn PEF-verdier koeffisienter for utslipp av CO₂-ekvivalenter for utvalgte typer biobrensel, og klarlegg spesielt hvordan aktuelle bearbeidingsgrader og transportavstander påvirker verdiene for ulike typer pellets.
6. Klarlegg størrelsesorden av hvordan energibruk ved byggingen av infrastruktur (varme sentral, distribusjonsnett etc.) påvirker de totale verdiene for PEF og utslipp av CO₂-ekvivalenter ved typiske nærvarme- og fjernvarmesystemer ved bruk av pellets.

Senest 14 dager etter utlevering av oppgaven skal kandidaten levere/sende instituttet en detaljert fremdrift- og eventuelt forsøksplan for oppgaven til evaluering og eventuelt diskusjon med faglig ansvarlig/veiledere. Detaljer ved eventuell utførelse av dataprogrammer skal avtales nærmere i samråd med faglig ansvarlig.

Besvarelsen redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag både på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse etc. Ved utarbeidelsen av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelsen legges det stor vekt på at resultatene er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte, og at de er diskutert utførlig.

Alle benyttede kilder, også muntlige opplysninger, skal oppgis på fullstendig måte. For tidsskrifter og bøker oppgis forfatter, tittel, årgang, sidetall og eventuelt figurnummer.

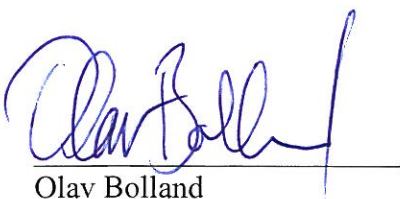
Det forutsettes at kandidaten tar initiativ til og holder nødvendig kontakt med faglærer og veileder(e). Kandidaten skal rette seg etter de reglementer og retningslinjer som gjelder ved alle (andre) fagmiljøer som kandidaten har kontakt med gjennom sin utførelse av oppgaven, samt etter eventuelle pålegg fra Institutt for energi- og prosesssteknikk.

Risikovurdering av kandidatens arbeid skal gjennomføres i henhold til instituttets prosedyrer. Risikovurderingen skal dokumenteres og inngå som del av besvarelsen. Hendelser relatert til kandidatens arbeid med uheldig innvirkning på helse, miljø eller sikkerhet, skal dokumenteres og inngå som en del av besvarelsen.

I henhold til ”Utfyllende regler til studieforskriften for teknologistudiet/sivilingeniørstudiet” ved NTNU § 20, forbeholder instituttet seg retten til å benytte alle resultater og data til undervisnings- og forskningsformål, samt til fremtidige publikasjoner.

Besvarelsen leveres digitalt i DAIM. Et faglig sammendrag med oppgavens tittel, kandidatens navn, veileders navn, årstall, instituttnavn, og NTNUs logo og navn, leveres til instituttet som en separat pdf-fil. Etter avtale leveres besvarelse og evt. annet materiale til veileder i digitalt format.

NTNU, Institutt for energi- og prosesssteknikk, 16. januar 2012



Olav Bolland
Instituttleder



Hans Martin Mathisen
Faglig ansvarlig/veileder

Medveileder:
Rolf Ulseth

Forord

Denne masteroppgaven ble utført fra januar til juni 2012 på institutt for energi- og prosessteknikk på Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet i Trondheim.

Mange personer har hjulpet meg i løpet av oppgaven, og jeg skylder alle disse en stor takk for deres bidrag.

Medveileder på oppgaven, Rolf Ulseth, som utformet oppgaven, var en stor hjelp i oppstartsfasen og har bidratt med innspill vedrørende primærenergi-konseptet.

Geir Skjevraak hjalp meg med å forstå verdikjedene for ulike biobrensel-sortimenter i Norge.

Truls Jemtland i Hafslund og Ståhle Bakstad hos Hallingdal Trepellets hjalp meg med å kartlegge energiforbruket i forskjellige prosesser for pellets.

Anders Møyner Eid Hohle og Leif Kjøstelsen bidro i stor grad med informasjon vedrørende energibruken knyttet til flis som brensel.

Flere andre som har tatt seg bryet med å besvare spørsmålene mine skylder jeg en stor takk.

En spesiell takk går til Monica Berner på Sintef som har brukt flere timer på å diskutere oppgaven min med meg.

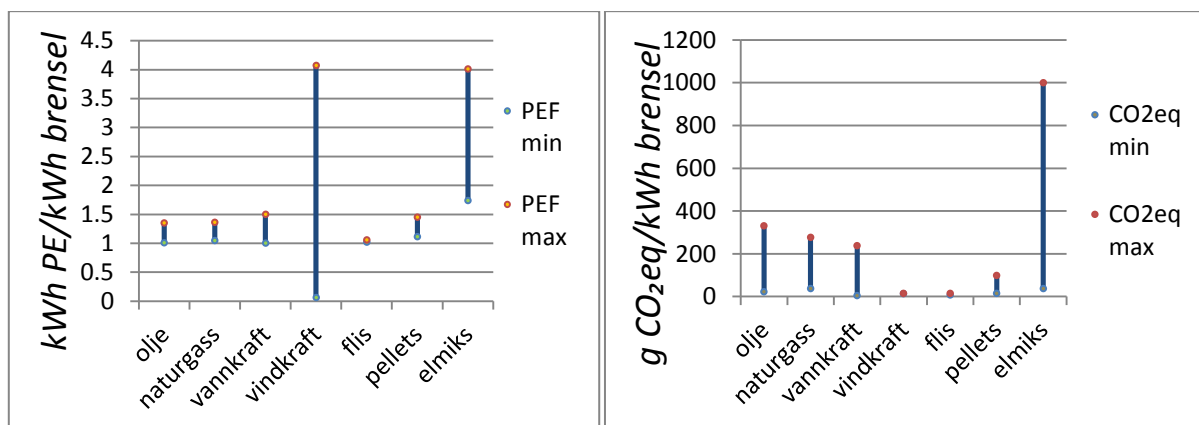
Sammendrag

Det globale energibehovet øker for hvert år og vil fortsette å gjøre det i framtiden. Siden omtrent 1850 har energiforsyningen vært dominert av fossile brenslere. Konvertering til el fra fossile brenslere er lite energieffektivt og bruk av fossile brenslere medfører store utslipp av klimagasser. Energi og klima har fått økende oppmerksomhet i løpet av de siste par 10-årene. Som en konsekvens av dette har man innsett at systemgrensene for energibruk må utvides. Primærenergifaktor tar for seg dette ved at det tar hensyn til den totale energieffektiviteten og utslippet av klimagasser i hele verdikjeden for energi.

Formålet med denne oppgaven har vært å belyse primærenergifaktor og problemområdene vedrørende dette konseptet. I tillegg har primærenergiforbruket (PE-forbruket) og utslippet av klimagasser (GHG-utslippene) blitt analysert for forskjellige energiresurser. Omtrent 40 % av den totale energibruken i Norge brukes i bygninger. Av denne energien er igjen 80 % elektrisitet. Det er et mål i Norge å øke andelen fornybar energi, og varme produsert fra forbrenning av biomasse er et av satsningsområdene. Flis og pellets er de to mest kommersielle biobrensler som brukes i dag, og det har derfor blitt lagt vekt på disse to brenslerne i analysene av energiresurser.

Valg av systemgrenser og metodikk gjør at verdier for PE-forbruk og GHG-utslipp varierer i ulike studier. Den europeiske standarden EN 15603:2008 setter rammene for hvordan primærenergifaktor og utslippskoeffisient for energiresurser skal beregnes i Europa. Det er i henhold til denne standarden valgfritt å inkludere energibruk og GHG-utslipp knyttet til infrastruktur for energikonvertering og distribusjon av elektrisitet og varme. Det er også valgfritt å inkludere andre gasser enn CO₂ som gir bidrag til drivhuseffekten.

Figur A: Variasjon i primærenergifaktor (t.v) og utslippskoeffisient (t.h) i forskjellige studier



Utslipp av N₂O fra dyrking av energivekster gir betydelige bidrag til drivhuseffekten.

Utslippskoeffisienten for vannkraft kan stige fra 4 til 237 g CO₂eq/kWh hvis indirekte effekter som endring av landområder inkluderes. Beregninger i denne oppgaven viste at konstruksjon og demontering av varmesentral og distribusjonsnett utgjør 0,16 – 1 % av PE-forbruket og 1,15 – 6 % av GHG-utslippet for nærvarme. For vannkraft er infrastruktur det som bidrar mest til det totale PE-forbruket.

For beregning av PE-forbruk og GHG-utslipp for flis ble data fra flere ulike rapporter benyttet. I tillegg ble det tatt kontakt med flere personer i Norge som jobber eller har jobbet med å kartlegge energibruken i verdikjeden for flis. Alt fra hogst til levering av flis hos sluttbruker ble inkludert i analysen.

Primærenergifaktoren for flis varierer fra 1,017 til 1,086 kWh PE/kWh brensel. Utslippskoeffisienten varierer fra 5,468 til 22,663 g CO₂eq/kWh brensel. Variasjonene skyldes forskjellige verdikjeder, volum på tømmeret, transportavstander og allokering metode. For flis fra stammevirke og buntet GROT var det transport av tømmer og bunter som bidro mest til det totale PE-forbruket og GHG-utslippet. For flis fra heltre og GROT som ble fliset på velteplass var det prosessene på hogstfeltet som bidro i størst grad.

Økonomisk allokering viste seg å være det mest gunstige fordi en stor del av energiforbruk og GHG-utslipp for hogst og administrasjon ble allokert til sagtømmer. Allokering basert på energiinnhold gav større primærenergifaktor og utslippskoeffisient enn hvis allokering ble unngått for flis fra buntet GROT. Dette skyldtes antagelsen om at energiforbruk og utslipp knyttet til administrasjon skulle allokere på lik linje som hogst.

Pelletsproduksjonen til Hallingdal Trepellets ble analysert for å beregne PE-forbruk og GHG-utslipp for pellets. Resultatene ble sammenlignet med en analyse av pelletsproduksjonen på Averøy utenfor Kristiansund. For pellets fra Hallingdal ble alt fra hogst av tømmer til levering av pellets hos kunde inkludert innenfor systemgrensene.

Det ble utarbeidet et referansescenario i tillegg til flere scenarioer der distribusjonsmengde, fuktighet på tømmer, tørkeprosessen, elforsyningen og endring i transportavstand for tømmer og pellets ble analysert. Ved å kombinere flere av scenarioene ble det opprettet et realistisk «beste utfall»-scenario og et «verste utfall»-scenario. Resultatet viste at primærenergifaktor for pellets varierer mellom 1,152 og 1,334 kWh PE/kWh pellets. Utslippskoeffisienten varierer mellom 14,867 og 68,962 g CO₂eq/kWh pellets.

Variasjonene skyldes i hovedsak to ting: tørking av råvarer (flis) og elforsyning. Primærenergifaktoren for pellets ble betydelig lavere når man kun inkluderte primærenergien som blir brukt til tørking av flis, istedenfor den totale energien som blir brukt. Mesteparten av energien som blir brukt til tørking kommer fra forbrenning av husholdningsavfall. Utslippskoeffisienten ble betydelig lavere når utslippene fra forbrenning av avfall ble allokert til produktene i avfallsblandingen. I referansescenarioet ble det antatt at el som brukes i prosesseringen av pellets kommer fra vannkraft. Dersom kullkraft erstattet vannkraft økte utslippene i referansescenarioet fra 42,034 til 98,603 g CO₂eq/kWh pellets. I «verste utfall»-scenarioet var det antatt at elforsyningen var en europeisk elmiks. Uttak av råmaterialer utgjorde kun 2,8 – 4,8 % av det totale energiforbruket i referansescenarioet og 6,93 % av det totale GHG-utslippet.

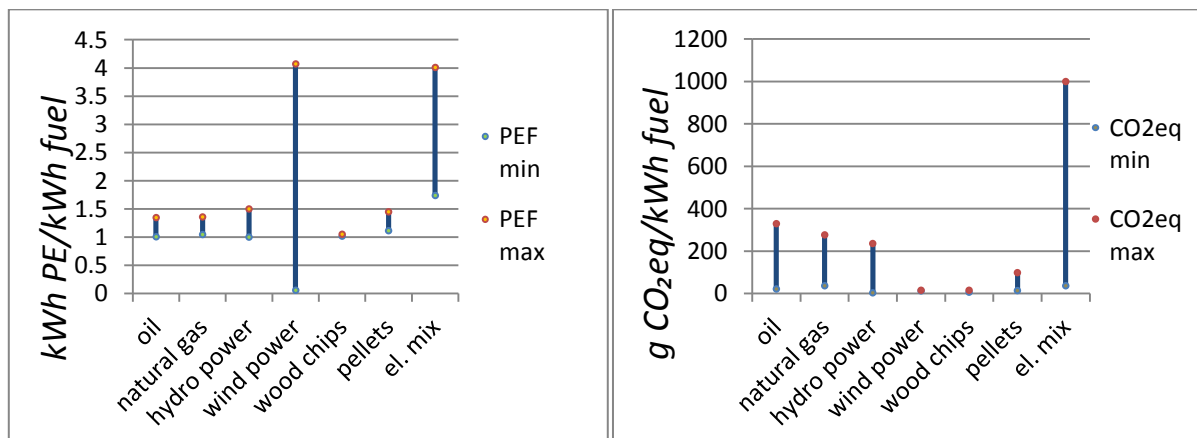
Abstract

The global energy consumption is increasing and it will continue to increase in the future. Since around 1850, the global energy supply has been dominated by fossil fuels. Generating electricity from fossil fuels has low efficiency and leads to great emissions of greenhouse gases. Energy and climate have received an increasing attention the last two decades. As a consequence of this, one has realized that the system boundaries of energy use have to be extended. The primary energy concept includes this by accounting for the total energy efficiency and the emissions of greenhouse gases in the whole value chain of energy resources.

The objective of this master thesis has been to scrutinize the primary energy concept and the different problem areas concerning this concept. In addition, the primary energy consumption (PE-consumption) and the emissions of greenhouse gases (GHG-emissions) have been analyzed for different energy resources. About 40 % of the total energy consumption in Norway is used in buildings. Out of these 40 %, 80 % is electricity. As the rest of Europe, Norway is aiming for an increased share of renewable energy, and heat produced by combustion of biomass is one of the priority areas. Wood chips and pellets are the two most commercial biofuels in use today, and these two fuels have therefore been given special attention in this master thesis.

Different choice of system boundaries and methodology gives a large range in the values for PE-consumption and GHG-emissions. The European standard EN 15603:2008 sets the conditions for calculation of primary energy factor and emission coefficient in the European countries. According to this standard, it is optional to include the energy use and GHG-emissions related to the infrastructure for energy conversion and distribution of electricity and heat. It is also optional to include other gases than CO₂ that gives contributions to the greenhouse effect.

Figure A: Variation in primary energy factor (left) and emission coefficient (right) in different studies



The emissions of N₂O from cultivation of energy crops give significant contributions to the greenhouse effect. The emission coefficient for hydro power can rise from 4 to 237 g CO₂eq/kWh fuel if land flooded by hydro reservoirs is included. Calculations made in this master thesis proved that the construction and demolition of heat central and distribution grid constitutes 0,16 – 1 % of the PE-consumption and 1,15 – 6 % of the total GHG-emissions from district heat by combustion of pellets. Infrastructure is what contributes the most to the total PE-consumption for hydro power.

For the calculations of PE-consumption and GHG-emissions from wood chips, data was collected from several different reports. In addition, several persons who have worked with analyzing the energy use in forest operations were contacted. The study in this thesis includes everything from logging to delivery of chips to customer within the system boundaries.

The primary energy factor for wood chips is varying from 1,017 to 1,086 kWh PE/kWh chips. The emission coefficient varies from 5,468 to 22,663 g CO₂eq/kWh chips. The variations are caused by different value chains, different volume of the logs, transport distance and allocation method. Transport of stemwood and bundles gave the biggest contributions to the PE-consumption and GHG-emission for chips from stemwood and chips from bundled forest residues. For chips from small diameter trees and forest residues chipped on roadside, the processes on the cutting site contributed the most.

Economic allocation proved to be most favorable because a large share of the PE-consumption and GHG-emissions from logging and administration was allocated to roundwood. Allocation based on energy content gave a larger primary energy factor and emissions coefficient than if allocation was avoided for chips from bundled forest residues. This result was caused by the assumption that consumption and emissions related to administration should be allocated in the same way that logging was.

The production of pellets at Hallingdal Trepellets was analyzed to calculate the primary energy factor and the emission coefficient for pellets. The results were compared with an analysis of the pellets production on Averøy outside of Kristiansund. For the production process in Hallingdal, everything from logging to delivery of pellets to customer was included within the system boundaries.

A reference scenario was established in addition to several scenarios where distribution volume, moisture content of the logs, the drying process, the electricity supply and changes in transport distances were analyzed. By combining the scenarios it was established a realistic best-case scenario and a worst-case scenario. The results revealed that the primary energy factor for pellets vary between 1,152 and 1,334 kWh PE/kWh pellets. The emission coefficient varies between 14,867 and 68,962 g CO₂eq/kWh pellets.

The variations were mainly caused by two things: The drying of raw materials (chips) and the electric supply. The primary energy factor was significantly lower when only the primary energy used for the drying of chips was considered, instead of the total energy used for drying. Most of the energy used for drying of chips comes from combustion of household waste. The emission coefficient was significantly lower when the emissions from combustion of household waste were allocated to the products in the waste mix before they were combusted. In the reference scenario it was assumed that the electricity used in the processing of pellets comes from hydro power. If coal was to replace the hydro power, the emissions in the reference scenario increased from 42,034 to 98,603 g CO₂eq/kWh pellets. In the worst-case scenario it was assumed that a European supply mix was used, which caused lower emissions than for the coal power scenario. Extraction of raw materials accounted for only 2,8 – 4,8 % of the total energy use in the reference scenario and 6,93 % of the total GHG-emissions.

Innhold

Forord.....	III
Sammendrag	V
Abstract	VII
Liste over figurer	XIV
Liste over tabeller.....	XV
Terminologi	XVI
1 Introduksjon	1
1.1 Innledning.....	1
1.2 Bakgrunn	2
1.3 Hva som skal besvares i denne oppgaven.....	3
1.4 Generelle antagelser og begrensninger	4
1.5 Rapportstruktur.....	5
2 Primærenergikonseptet	6
2.1 Primærenergikonseptet og relevante direktiver.....	6
2.2 Hva som inngår i primærenergikonseptet	7
2.2.1 Systemgrenser	8
2.2.2 Primærenergifaktorer og CO ₂ -utslippskoeffisienter.....	10
2.3 Problemområder vedrørende primærenergikonseptet.....	11
2.4 PEF og utslippskoeffisient: Fordeler og ulemper ved de forskjellige indikatorene.....	13
3 Metodikk for beregning av PEF og utslippskoeffisient for ulike energislag	16
3.1 Ecolnvent og SimaPro.....	16
3.2 Metodikk for ulike energislag.....	17
3.2.1 Naturgass og fyringsolje.....	18
3.2.2 Vannkraft fra vannreservoarer.....	23
3.2.3 Vindkraft.....	25
3.2.4 Bioenergi fra flis og pellets.....	27
3.2.5 Elektrisitetmiks	29
3.3 Diskusjon av metodikk for ulike energislag.....	33
4 Allokering.....	36
4.1 Allokeringsmetoder	36

4.1.1	<i>Allokering ved substitusjon</i>	37
4.1.2	<i>Power Bonus Method</i>	38
4.1.3	<i>Allokering ved partisjon</i>	38
4.2	Konsekvenser ved valg av allokeringsmetode.....	40
4.2.1	<i>Allokering og bioenergi</i>	41
5	Biobrensler	45
5.1	Antagelser og begrensninger	45
5.2	Karbonsøytralitet for biobrensler	45
6	Biobrensler: Flis	47
6.1	Metodikk	51
6.1.1	<i>Stammevirke og heltre</i>	51
6.1.2	<i>GROT</i>	52
6.1.3	<i>Allokering i verdikjeden for flis</i>	53
6.2	Resultater	55
6.2.1	<i>Maksimale og minimale verdier</i>	60
6.2.2	<i>Konsekvenser ved ulik allokering</i>	61
6.3	Diskusjon av resultater for flis	61
7	Biobrensler: Pellets.....	65
7.1	Metodikk	66
7.1.1	<i>Averøy</i>	66
7.1.2	<i>Hallingdal Trepellets</i>	66
7.2	Resultater i referansescenarioer med el fra vannkraft	67
7.2.1	<i>Averøy</i>	67
7.2.2	<i>Hallingdal Trepellets</i>	69
7.2.3	<i>Diskusjon av referansescenario for pellets</i>	71
7.3	Analyse av forskjellige scenarioer for pellets	74
7.3.1	<i>Distribusjonsmengde</i>	77
7.3.2	<i>Forhåndstørking</i>	78
7.3.3	<i>Endring i type el</i>	78
7.3.4	<i>Inkludering av PEF for el</i>	79
7.3.5	<i>Endring i tørkeparametere</i>	79
7.3.6	<i>Endring i transportavstand for pellets og tømmer</i>	82
7.4	«Beste» og «dårligste» scenario	83

8	Påvirkning av PEF og utslippskoeffisient ved inkludering av infrastruktur for nærvarmeanlegg som fyres på pellets.....	86
8.1	Infrastruktur for varmesentral	86
8.2	Infrastruktur for distribusjonsnett	88
8.3	Tap, virkningsgrader og GHG-utslipp	89
8.4	Metodikk for bidrag til total PEF og utslippskoeffisient.....	91
8.5	Resultater	93
8.6	Diskusjon av bidrag til PEF og utslippskoeffisient for infrastruktur	94
9	Konklusjoner.....	96
9.1	Primærenergikonseptet	96
9.2	Flis og pellets	96
9.3	Forfatters synspunkter	98
9.4	Hva som bør arbeides videre med	98
9.4.1	<i>Primærenergikonseptet</i>	98
9.4.2	<i>Energiresurser</i>	99
	Bibliografi	100
	Vedlegg A	104
	<i>Omregninger i kapittel 3</i>	104
	Vedlegg B.....	105
	<i>Formler</i>	105
	Vedlegg C.....	106
	<i>Data for flis</i>	106
	Vedlegg D	109
	<i>Data for pellets</i>	109
	<i>Leveranse av pellets og sted for tømmerhogst, Hallingdal</i>	111
	Vedlegg E.....	113
	<i>Resultater for pellets Hallingdal</i>	113
	Vedlegg F.....	118
	<i>Beregninger for infrastruktur</i>	118

Liste over figurer

Figur 1.1: Andel fra forskjellige energiressurser i total global primærenergiforsyning [1].....	1
Figur 2.1: Eksempel på systemgrense	8
Figur 3.1: Verdikjede for naturgass og fyringsolje.....	18
Figur 3.2: Energiforbruk for forskjellige prosesser i verdikjeden til olje [15].....	20
Figur 3.3: Energiforbruk for forskjellige prosesser i verdikjeden til naturgass [15].....	22
Figur 3.4: Verdikjede for elektrisitet fra vannkraft	23
Figur 3.5: Verdikjede for elektrisitet fra vindkraft	25
Figur 3.6: <i>Variasjon i utslippskoeffisient ved forskjellig effekt og kapasitetsfaktor [26]</i>	26
Figur 3.7: Sveriges elproduksjon i 2008 [17]	30
Figur 4.1: Allokering ved substitusjon	37
Figur 4.2: Allokering ved partisjon der masse er valgt som partisjonsvariabel.....	39
Figur 4.3: Illustrasjon av behandlingsmetoder for fjerning av GROT	44
Figur 6.1: Bilde av henholdsvis stammevirke, heltre og GROT [Google].....	47
Figur 6.2: Verdikjeden for stammevirke (t.v) og heltre (t.h)	48
Figur 6.3: Verdikjede for flis fra GROT som flises på velteplass (t.v) og flis fra GROT som bUNtes og fraktes til terminal før flising (t.h)	50
Figur 6.4: Prosentvis fordeling av delbestander i tre [30].....	54
Figur 6.5: Resultater for ulike flissortimenter i referansescenarioet	57
Figur 6.6: <i>Energiforbruk og GHG-utslipp fordelt på forskjellige prosesser i referansescenarioet for flis</i> 57	
Figur 6.7: Fordeling på forskjellige prosesser for de forskjellige sortimentene i referansescenarioet	58
Figur 6.8: Maksimale og minimale verdier for PEF og utslippskoeffisient for de ulike sortimentene, med og uten allokering	60
Figur 6.9: Endring i energiforbruk for hogst og administrasjon ved ulike allokeringmetoder for stammevirke (t.v) og GROT (t.h).....	61
Figur 7.1: Verdikjeden for pellets.....	65
Figur 7.2: Energiforbruk og GHG-utslipp for anlegget i Hallingdal.....	69
Figur 7.3: Energibruk i verdikjeden for anlegget i Hallingdal	69
Figur 7.4: GHG-utslipp i verdikjeden for anlegget i Hallingdal	70
Figur 7.5: <i>Prosentvis fordeling på hovedprosesser for anlegget i Hallingdal</i>	71
Figur 7.6: <i>Prosentvis fordeling på hovedprosesser for anlegget på Averøy</i>	72
Figur 7.7: Grafisk framstilling av PEF ved ulike scenarier.....	76
Figur 7.8: Grafisk framstilling av utslippskoeffisient ved ulike scenarier	77
Figur 7.9: Prosentvise bidrag til GHG-utslipp fra hver prosess ved forskjellig type el	79
Figur 7.10: GHG-utslipp fordelt på hovedprosesser for forskjellige tørkescenarier	81
Figur 7.11: Energibruk fordelt på hovedprosesser for forskjellige tørkescenarier	82
Figur 7.12: Variasjon i PEF og utslippskoeffisient for forskjellige transportavstander	82
Figur 7.13: Energiforbruk fordelt på hovedprosesser for beste og verste scenario	84
Figur 7.14: GHG-utslipp fordelt på hovedprosesser for beste og verste scenario	85
Figur 8.1: Sammenheng mellom installert effekt og PE-forbruk/utslipp	87
Figur 8.2: Årlig last fra varmeproducent [9]	90
Figur 8.3: Systemgrenser for varmeproduksjon med pellets.....	91

Liste over tabeller

Tabell 2.1: PEF og utslippskoeffisienter [11]	10
Tabell 2.2: Utvalgte verdier fra vedlegg E i EN 15603:2008	13
Tabell 3.1: PEF og utslippskoeffisient for olje	18
Tabell 3.2: Beregningsmetode for energiforbruk ved dieselproduksjon [22]	19
Tabell 3.3: Beregningsmetode for energibruk ved produksjon av naturgass [22]	20
Tabell 3.4: PEF og utslippskoeffisient for naturgass.....	21
Tabell 3.5: PEF og utslippskoeffisient for el fra vannkraft.....	24
Tabell 3.6: PEF og utslippskoeffisient for el fra vindkraft.....	26
Tabell 3.7: PEF og utslippskoeffisient for flis.....	27
Tabell 3.8: PEF og utslippskoeffisient for pellets.....	28
Tabell 3.9: Beregning av PEF og utslippskoeffisient for svensk elmiks [11]	30
Tabell 3.10: Beregning av PEF og utslippskoeffisient for nordisk elmiks [11].....	31
Tabell 3.11: Metodikk for beregning av PEF (EPA) [16].....	32
Tabell 3.12: PEF og utslippskoeffisient for forskjellige elmikser	32
Tabell 3.13: Sammenligning av metoder for å vurdere primærenergibruk [24].....	34
Tabell 4.1: Forskjell i resultater ved forskjellige allokeringmetoder [36]	40
Tabell 4.2: Bioprodukter og konvensjonelle alternativer til produktene [20]	42
Tabell 4.3: Resultater for forskjellige allokeringmetoder for produkter fra et bioraffineri [14]	42
Tabell 4.4: Konsekvenser ved valg av hovedprodukt i substitusjonsmetoden [14]	42
Tabell 4.5: Priser for ulike tresortimenter.....	43
Tabell 6.1: Partisjonskoeffisienter for ulike sortimenter av biobrensel.....	55
Tabell 6.2: Verdiintervaller for forskjellige prosesser	55
Tabell 6.3: Variasjon i forbruk ved forskjellig transportavstand for tømmer og bunter.....	62
Tabell 6.4: PEF og utslippskoeffisient for ulike sortimenter i referansescenarioet med inkludering av PEF for diesel på 1,16	63
Tabell 7.1: Energibruk per tonn pellets for forskjellige prosesser for anlegget på Averøy.....	68
Tabell 7.2: GHG-utslipp per tonn pellets for forskjellige prosesser for anlegget på Averøy	68
Tabell 7.3: Energiforbruk i % av energiinnhold i pellets og GHG-utslipp for anlegget på Averøy.....	71
Tabell 7.4: Energiforbruk i % av energiinnhold i pellets og GHG-utslipp for anlegget i Hallingdal	71
Tabell 7.5: PEF og utslippskoeffisient for pellets fra anlegget i Hallingdal ved forskjellige scenarioer	75
Tabell 7.6: Energiforbruk for el i % av energiinnhold i pellets for forskjellige typer el	79
Tabell 7.7: PEF og utslippskoeffisient for beste og verste scenario	84
<i>Tabell 8.1: Data for konstruksjon og demontering av varmesentral</i>	<i>86</i>
Tabell 8.2: Bidrag til PEF og utslippskoeffisient for utvalgte biokjeler.....	86
Tabell 8.3: Bidrag til PEF og utslippskoeffisient for fliskjel på 5000 og 10000 kW	88
Tabell 8.4: Energibruk og GHG-utslipp for biokjeler på 50 kW	88
Tabell 8.5: PEF og utslippskoeffisient for distribusjonsnett ved forskjellig levetid og energitetthet [9]	89
Tabell 8.6: Utslipp ved forbrenning [15]	89
Tabell 8.7: Varmetap og forbruk av el i pumper i distribusjonsnett [15].....	90
<i>Tabell 8.8: Underprosesser i verdikjeden for varme fra pellets</i>	<i>92</i>
Tabell 8.9: Største og minste bidrag fra infrastruktur til total PEF og utslippskoeffisient.....	93

Terminologi

Forkortelser

EC	European Community
CEN	European Committee for Standardisation
ISO	International Organization for Standardisation
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
PEF	Primærenergifaktor
PE	Primærenergi
GHG	Green House Gases (Drivhusgasser)
CHP	Combined Heat and Power
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
UCPTE	Union for the Co-ordination of Production and Transmission of Electricity
UCTE	Union for the Co-ordination of the Transmission of Electricity
EPA	United States Environmental Protection Agency
NREL	National Renewable Energy Laboratory
CENTREL	Sentral-europeisk TSO (transmission system operator)
NORDEL	Nord-europeisk TSO
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IEA	International Energy Agency
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
Btu	British thermal unit
T&D	Transport og Distribusjon
GROT	Grener og Topper
tkm	Tonn-kilometer
CO ₂	Karbondioksid
CH ₄	Metan
N ₂ O	Dinitrogenoksid, bedre kjent som lystgass
PV	Photovoltaics (elektrisitet generert av solenergi)
EI	elektrisitet
GWP	Global Warming Potential

Ordforklaring

Utslippskoeffisient	Utslipp av gasser som bidrar til drivhuseffekten målt i gram CO ₂ -ekvivalenter per kWh (g CO ₂ eq/kWh)
PE	Energi i råstoffer som blir utvunnet direkte fra naturen og som ikke har vært gjennom noen forvandling. Eksempler: Kull, olje, gass, vann og vind
PEF	Total tilført primærenergi delt på den energien man kan gjøre nytte av

tkm	Transport, antall tonn transportert multiplisert med distanse i km
Klimagasser	Gasser som gir bidrag til drivhuseffekten. Kalles også for GHG (Green House Gases eller drivhusgasser på norsk)
Sagtømmer	Også kalt skurtømmer. Tømmer som brukes til skurproduksjon (produksjon av planker og bord)
Massevirke	Tømmer til treforedlingsindustrien. Dette er tømmer som ikke er egnet for skurproduksjon og kommer både fra lavkvalitet rot- og midtstokk og fra toppstokk og tynning som har for liten dimensjon for skur. Brukes også som energivirke.
Energivirke	Energivirke er alle former for mindreverdige trevirke/tømmer som kan brukes til brensel. Det kan være døde/tørre stammer, stokker/stammer med mye råte eller andre skader og stammer eller hele trær som er for små til skurproduksjon

Symboler

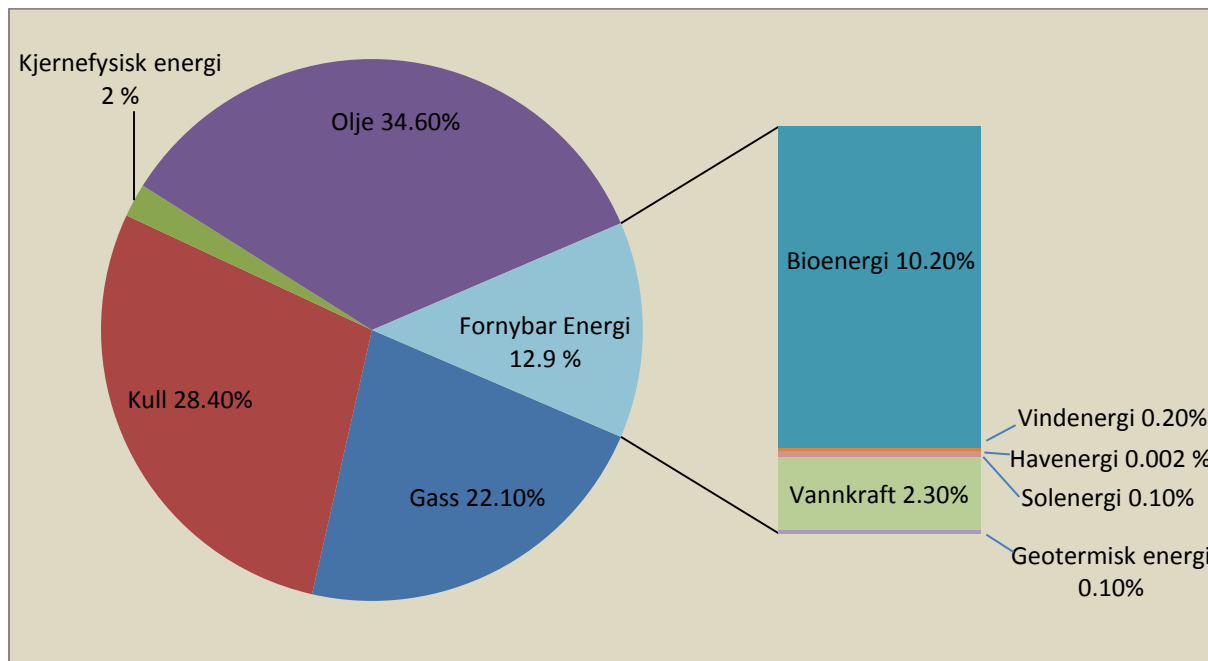
fm^3	Fastkubikkmeter	fm^3
lm^3	Løskubikkmeter	lm^3
FM	Fastmasseprosent, andel fm^3 i.f.t lm^3	%
H_e	Effektiv brennverdi	kWh (per kg, fm^3)
MC_{wet}	Fukttinnhold på våtbasis (se vedlegg B for formel)	%
MC_{dry}	Fukttinnhold på tørrbasis (se vedlegg B for formel)	%

1 Introduksjon

1.1 Innledning

Etterspørsmål etter energi før å imøtekomme sosial og økonomisk utvikling øker. Siden omtrent 1850 har det globale forbruket av fossile brensler økt, og det dominerer i dag energiforsyningen [1].

Figur 1.1: Andel fra forskjellige energiresurser i total global primærenergiforsyning¹ [1]



Både temperatur og mengde CO₂ i atmosfæren har endret seg i begge retninger gjennom historien uten at menneskeheten har bidratt til dette. Men økningen i temperatur og CO₂-innhold i atmosfæren fra begynnelsen av den industrielle revolusjon strider mot tidligere historiske sykluser [2], og det er en bred konsensus om at disse endringene er menneskeskapt, og at de skyldes klimagassutslipp (hovedsakelig CO₂) fra fossile brensler.

Den raske temperaturøkningen, som vil fortsette med mindre GHG-utslippene² minkes, har alvorlige konsekvenser. Store deler av biosfæren klarer ikke å tilpasse seg verken økning i temperatur eller konsekvensene temperaturøkningen har. Landområder endres ved at de blir tørrere eller fuktigere, is ved polene og på Grønland smelter, og dette fører igjen til at havnivået øker og mange dyre- og plantearter trues. Konsekvensene for menneskeheten ved endringer i biosfæren på grunn av temperaturøkning vet forskere fortsatt svært lite om, men de kan være svært alvorlige.

Samtidig som mengden klimagasser i atmosfæren øker, så øker også verdens behov for energi. EIA spår en årlig økning i energibruk fram mot år 2035 på 1,8 % [3]. For å begrense GHG-utslipp og samtidig redusere bruken av fossile energiresurser i størst mulig grad, er det viktig at energieffektive ressurser og ressurser med lave GHG-utslipp utgjør en større del av den globale energiforsyningen.

¹ Data i figuren er beregnet ved å bruke *The direct equivalent method* som blir beskrevet i kapittel 3.3.

² GHG = Green House Gas. GHG-utslipp er synonymt med klimagassutslipp og utslipp av drivhusgasser og er gasser som gir bidrag til drivhuseffekten og forårsaker global oppvarming.

Energieffektivitet kan måles i hvor mye primærenergi som brukes for å framstille og levere en energibærer som varme eller el. Prosesser med lave virkningsgrader, som generering av el fra kull, gir et høyt forbruk av primærenergi. Energi fra biomasse, vann og vind er fornybare. For å framstille el og varme fra disse ressursene kreves det lite fossil primærenergi. Energi fra disse ressursene har samtidig lave GHG-utslipp per produsert energimengde.

Omtrent 40 % av den totale energibruken i Norge brukes i bygninger. Av denne energien er igjen 80 % elektrisitet [4]. Kraftmarkedet er ikke lenger nasjonalt, og Norge importerer stadig mer el fra Europa. Vannkraft krever at det er tilstrekkelig med vann i reservoarene. På kalde vinterdager, når elforbruket er på det høyeste, er Norge avhengige av import fra andre land. El fra Europa har et større primærenergiforbruk og GHG-utslipp enn el fra vannkraft i Norge, og varmeproduksjon fra biomasse i Norge kan være en stor bidragsyter i reduksjonen av det nasjonale primærenergiforbruket og GHG-utslippet. I tillegg vil flaskehalsen i transmisjonsnettet bli avlastet hvis mindre el brukes til oppvarming.

For å fremme energiresurser som har lavt primærenergiforbruk og GHG-utslipp må tiltak som kommer forbrukere til gode verdsettes i større grad. Energisertifikater for bygninger blir stadig mer utbredt. En utslippskoeffisient beskriver hvor stort GHG-utslipp det er per levert energimengde. Ved å vise GHG-utslippene for forbrukt energi på disse energisertifikatene, vil forbrukere få bedre kunnskap om deres egne bidrag til drivhuseffekten, og energisertifikater med lave GHG-utslipp kan føre til høyere verdi for yrkesbygg og boliger.

For å imøtekomme kravene i EU om 20 % energieffektivisering er det samtidig viktig at primærenergibruken i bygg reduseres. Primærenergifaktor (PEF) defineres som totalt tilført primærenergi dividert med den energien man kan gjøre nytte av. På samme måte som for en utslippskoeffisient vil en lav primærenergifaktor gjøre at en bolig får et bedre energisertifikat og dermed en høyere verdi.

1.2 Bakgrunn

Den historiske utviklingen av det vi kan kalle primærenergikonseptet kan man se spor av helt tilbake til *World Commission on Environment and Development*, også kalt Brundtlandkommisjonen, og rapporten som ble gitt ut av dem i 1987, *Our Common Future* [5]. Der blir det slått fast at energieffektivisering bør være det fremste virkemidlet for å ha en bærekraftig utvikling. Det nevnes også at bygninger har et enormt potensiale for energieffektivisering, og at effektivisering av energibruken i bygninger kanskje er den mest forenlige måten å oppnå generell energieffektivisering på. Kommisjonen legger også vekt på viktigheten ved kogenerering av strøm og varme for å oppnå høyere energieffektivitet i energiproduksjonen.

Arbeidet fra denne kommisjonen ble videreført og førte til en handlingsplan for internasjonal bærekraftig utvikling og miljøvern. Denne planen ble kalt *Agenda 21* og er et resultat av Rio-konferansen [6] som ble avholdt i 1992. Denne handlingsplanen førte ikke til konkrete, bindende tiltak for å fremme energieffektivitet og miljøvern, men bestemte at statene skulle iverksette blant annet en effektiv, miljøbesparende lovgivning og også utarbeide miljøstandarder.

I Kyotoavtalen[7] ble det bestemt pliktige kutt i GHG-utslipp. De landene som deltok i kommisjonen og som godkjente Kyotoavtalen forpliktet seg til å kutte de samlede utslippene av menneskeskapt CO₂-ekvivalenter av drivhusgasser med 5 % av 1990-nivå fram til 2012. Tre av de viktigste drivhusgassene er karbondioksid (CO₂), metan (CH₄) og dinitrogenoksid (N₂O). Dette er alle gasser som kan omregnes til CO₂-ekvivalenter ved hjelp av et ekvivalenttall. Kapittel 2.3 går nærmere inn på dette. Kyotoavtalen omhandler også energieffektivisering og pålegger alle landene som har godkjent avtalen å utarbeide politikk for å forbedre energieffektiviseringen i «relevante» deler av økonomien.

EC (*European Community*) og flere av landene som i dag er en del av EU godkjente Kyotoavtalen og forpliktet seg dermed til utslippskuttene som ble bestemt i Kyotoavtalen. Oppfølgingen av Kyotoavtalen har i EU blitt implementert gjennom flere direktiver der alle medlemslandene skal oppnå målet i direktivet. Før Kyotoavtalen trådte i kraft hadde allerede medlemslandene i daværende EC innført direktiver der utslippene av karbondioksid skulle reduseres gjennom energieffektivisering. Men det er først gjennom fornybardirektivet [8], kogenereringsdirektivet [9] og direktivet som omhandler energiytelsen for bygninger [10], at primærenergikonseptet har utviklet seg, og i dag er obligatorisk ved beregning av energiytelsen for bygninger i EU. Siden Norge er en del av EØS er vi også mer eller mindre nødt til å følge direktivene som EU oppretter.

1.3 Hva som skal besvares i denne oppgaven

I denne oppgaven skal primærenergibruk og utslipp av klimagasser for ulike energiresurser belyses nærmere. Utvalgte studier og verdier for primærenergifaktor og utslippskoeffisient for forskjellige energiresurser vil bli drøftet med tanke på metodikk som er benyttet, og da spesielt systemgrensene som er valgt.

Primærenergikonseptet kan tolkes på flere måter. [10] definerer primærenergi som all som energi fra fornybare og ikke-fornybare ressurser som ikke har vært gjennom noen form for konvertering eller transformasjon. Fornybare ressurser som vind og sol kan med denne definisjonen få en høy primærenergifaktor siden det er store tap i energikonvertering av disse ressursene. Oppgaven tar opp ulike definisjoner av primærenergi og konsekvensene av disse for forskjellige energiresurser.

I en utslippskoeffisient er det et spørsmål om hvilke gasser som skal inngå. CO₂ gir de største bidragene til drivhuseffekten, men utslipp av andre gasser gir også bidrag. Det er implementert i EU-direktiver at energisertifikatet for et bygg skal baseres på primærenergiforbruk som beregnes ved primærenergifaktorer. CO₂-utslipp for energiresurser, eller en utslippskoeffisient for flere klimagasser, har så langt ikke blitt påkrevd ved vurdering av et byggs energiytelse. Allikevel er økningen i utslipp av klimagasser en av de største miljøutfordringene verden står ovenfor. Det vil derfor også bli sett nærmere på hvilke hensyn som ivaretas ved bruk av både primærenergifaktorer og utslippskoeffisienter som indikatorer på energisertifikatene.

Varmeproduksjon basert på biomasse er ansett for å være energibesparende og klimavennlig. Men det kan være interessant å se hvor godt dette faktisk stemmer i Norge. Beregninger på primærenergifaktor og utslippskoeffisient vil derfor bli utført for flis og pellets som produseres i Norge. I tillegg vil total primærenergifaktor og utslippskoeffisient for varme fra pellets bli beregnet, og bidragene fra bygging og demontering av infrastruktur vil bli vurdert.

Allokering er noe som påvirker resultatet for flere ulike energiressurser. Ulike allokeringsmetoder vil derfor bli beskrevet og konsekvensene av allokering vil bli gjort rede for i beregningene for flis.

1.4 Generelle antagelser og begrensninger

Ved analyse av primærenergifaktor og utslippskoeffisient for energiressurser har det blitt tatt utgangspunkt i energiressurser som det brukes mye av i Norge. El og varme fra sol, kjernekraft og geotermisk kraft er derfor ikke studert. Biogass og bioenergi produsert fra 1. generasjons eller 3. generasjons drivstoff er heller ikke studert.

For allokering er det kun de allokeringsmetoder som er relevante i verdikjeden for brensler fram til energikonvertering som er nøye forklart. En sentral del i primærenergikonseptet er besparelsene i primærenergi ved kraft-varme produksjon (CHP). For CHP brukes det ofte andre allokeringsmetoder som kan være mer egnet enn de som er diskutert i denne oppgaven.

Analysering av energibruk og GHG-utslipp er et dataintensivt og tidkrevende arbeid. Mye av tiden dette semesteret har gått med til å undersøke verdikjeder og samle inn data for produksjon av flis og pellets. Det har blitt laget et «enkelt» beregningsprogram i excel for primærenergifaktorer og utslippskoeffisienter, både for flis og for pellets, der den informasjonen som har blitt samlet inn har blitt brukt.

Et produksjonsanlegg for pellets i Hallingdal studert. Dette anlegget har blitt sammenlignet med et anlegg på Averøy utenfor Kristiansund. Det er vesentlige forskjeller i verdikjeden til disse to anleggene.

Mer korrekte verdier for primærenergibruk og GHG-utslipp for norsk pelletsproduksjon krever at flere produksjonsanlegg studeres. I denne oppgaven har det blitt opprettet et referansescenario for anlegget i Hallingdal, og konsekvensene av forskjellige scenarioer der ulike parametere endrer seg har blitt analysert. Disse scenarioene ser på konsekvensene ved «vanlige» endringer, som endring i transportdistanse og distribusjonsmengde, og på konsekvensene ved forskjellige tolkninger av primærenergikonseptet. Dette gjelder blant annet systemgrenser og hvordan energi fra restprodukter skal behandles.

Det ble forsøkt å få tak i empirisk data for brenselflis fra norske flisprodusenter uten hell. Derimot har det blitt samlet inn data fra andre rapporter, samt fra fagpersoner som jobber eller har jobbet med energibruk for skogbrensler. Dette gjør at resultatene er mer usikre og i liten grad kan være representative for én enkelt flisprodusent. Derimot så kan resultatene, i motsetning til pellets, være mer representative på nasjonalt nivå.

Konstruksjon og demontering av varmesentral og distribusjonsnett for nær- og fjernvarme gir bidrag til både primærenergifaktor og utslippskoeffisient for varme fra pellets. Det har ikke blitt funnet data for varmesentraler med kapasitet større enn 1000 kW. Denne oppgaven begrenser seg derfor til det som kan kalles nærvarmeproduksjon (se kapittel 8.1 for forklaring). I tillegg gjelder mye av den informasjonen som er funnet for fliskjeler. Med bedre data for pelletskjeler og kjeler med større kapasitet kan kvaliteten på resultatene forbedres.

I oppgaven brukes flere betegnelser for samme ting. Energiforbruk blir i oppgaven betegnet både primærenergiforbruk, PE-forbruk eller bare forbruk. Med mindre det kommer klart fram at det ikke er snakk om forbruk av noe annet enn energi, så betyr «forbruk» energiforbruk. Utslipp av

klimagasser betegnes også som GHG-utslipp. Utslipp betyr i denne oppgaven utslipp av klimagasser med mindre det eksplisitt blir forklart at det gjelder noe annet.

1.5 Rapportstruktur

Masteroppgaven går først inn på primærenergifaktor og problemområdene tilknyttet dette konseptet i kapittel 2.

I kapittel 3 vil det bli sett nærmere på primærenergifaktorer og utslippskoeffisienter for ulike energiresurser.

I kapittel 4 vil de mest relevante allokeringemetodene for energiresurser bli beskrevet og diskutert.

Kapittel 5 går inn på biobrensler generelt og karbonnøytralitet for biobrensler er diskutert. Deretter vil flis og pellets bli behandlet i kapittel 6 og 7. Her vil også primærenergifaktorer og utslippskoeffisienter for ulike scenarioer bli beregnet og diskutert.

I kapittel 8 blir infrastruktur (konstruksjon og demontering) for varmesentral og distribusjonsnett behandlet. Det vil bli klarlagt i hvilken grad infrastruktur påvirker de totale verdiene for primærenergifaktor og utslippskoeffisient.

2 Primærenergikonseptet

2.1 Primærenergikonseptet og relevante direktiver

Fornybardirektivet - *Directive 2001/77/EC on the promotion of electricity produced from renewable sources in the internal electricity market*, som på nytt ble gitt ut i 2009 med enkelte endringer, tar opp hvor viktig det er med kontroll av det europeiske energiforbruket, og å øke forbruket av energi fra fornybare kilder for å imøtekomme kravene Kyotoavtalen bestemte. Direktivet sier at energieffektivitet er et av nøkkelmålene og at innen 2020 skal målet være å oppnå 20 % energieffektivisering. Energieffektivisering og energisparing er noen av de mest effektive metodene medlemslandene kan bruke for å redusere utslippene av klimagasser. Dette direktivet sier ikke noe direkte om primærenergi og sammenhengen mellom energieffektivisering og primærenergi, men det henviser til andre direktiver der dette kommer direkte frem, blant annet til *Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings*. Derimot så sier fornybardirektivet i artikkel 13, paragraf 6, at medlemslandene skal promotere bruken av fornybar varme og kjøling i bygninger og også promotere annet utstyr som kan gi en betraktelig reduksjon i bygningers energibruk. Det blir også slått fast at medlemslandene skal bruke energisertifikater eller andre passende standarder utviklet på nasjonalt eller internasjonalt nivå, for å framdrive kravet om fornybar varme og kjøling og utstyr som reduserer energibruken.

Det er i *Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings (EPBD-direktivet)*, som omhandler energiytelsen for bygninger, at selve primærenergikonseptet blir belyst. I artikkel 2, paragraf 2, blir det slått fast at energiytelsen for et bygg skal bli definert ut i fra mengden energi som blir konsumert i bygget. Denne mengden skal bli reflektert i en eller flere numeriske indikatorer. Videre blir det i artikkel 3 bestemt at medlemslandene skal ta i bruk en metodikk for beregning av energiytelsen basert på et rammeverk der flere aspekter i en bygnings energibruk inngår. For å implementere dette direktivet måtte en rekke nye EN-standarder, der selve beregningene av energiytelsen fremgår, bli opprettet. EC har gitt standardiseringsorganisasjonen CEN et spesifisert mandat til å utarbeide nødvendige standarder for oppfølging av direktivene. En av standardene som ble opprettet for å følge opp direktivet om energiytelsen for bygninger var *EN 15603:2008 [11]*. Denne standarden anbefaler at beregnede verdier for primærenergiforbruk og CO₂-utslipp bør brukes som indikatorer for energiytelsen til et bygg.

I 2010 kom en omarbeidet utgave av direktivet om energiytelsen i bygninger ut. Dette direktivet sier at 40 % av den totale energibruken i EU kommer fra bygninger, og reduksjon i bygningers energibruk, samt bruk av fornybare kilder i bygningssektoren, er viktige forutsetninger for å redusere den totale energibruken og også utslippene av klimagasser. Dette direktivet drar også inn Kyotoavtalen og sammenhengen mellom bygningers energibruk og målene for Kyotoavtalen. Hovedpoenget i dette direktivet relatert til primærenergikonseptet er artikkel 3. Artikkelen sier at medlemsstatene skal ta i bruk en metodikk for beregning av energiytelsen for bygninger som er angitt i vedlegg 1 i direktivet. Dette vedlegget sier følgende:

“The energy performance of a building shall be expressed in a transparent manner and shall include an energy performance indicator and a numeric indicator of primary energy use, based on primary

energy factors per energy carrier, which may be based on national or regional annual weighted averages or a specific value for on-site production.

The methodology for calculating the energy performance of buildings should take into account European standards and shall be consistent with relevant Union legislation, including Directive 2009/28/EC”.

Dette direktivet sier altså at beregningen av energiytelsen for et bygg skal inneholde en numerisk indikator for primærenergiforbruk basert på en primærenergifaktor per energibærer. Beregningen av denne energiytelsen bør ta i betraktning europeiske standarder.

Kogenereringsdirektivet – *Directive 2004/8/EC of the European Parliament and of the Council of 11 February 2004 on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending [9]*, fremhever nytten av kogenerering i forhold til besparelse av primærenergi og reduksjon av GHG-utslipp. Det sier også hvordan kogenerering kan være en viktig del av å nå målene i Kyotoavtalen. Hensikten med direktivet er å øke energieffektiviteten og forsyningssikkerheten gjennom å lage et rammeverk for å promotere og utvikle kogenerering av strøm og varme basert på varmebehov og besparelse av primærenergi. Vedlegg 3 i dette direktivet gir en metodikk for hvordan primærenergibesparelsene ved kogenerering skal beregnes.

2.2 Hva som inngår i primærenergikonseptet

Primærenergi er definert som energi fra fornybare og ikke-fornybare ressurser som ikke har vært gjennom noen form for konvertering eller transformasjon [10].

Levert energi er den energien man kan lese av på en energimåler. Før denne energien har nådd det stedet den brukes har den vært gjennom flere prosesser. Alle prosessene som inngår fra uttak av råmaterialer til levert energi kan kalles verdikjeden for en energiressurs. Langs hele denne kjeden er det tap. Enten i form av direkte tap i konvertering og transformasjon, eller i form av indirekte tap ved at energi kreves for å framstille energi. Som et eksempel kan det nevnes at det kreves mye el for å lage pellets.

En primærenergifaktor (PEF) forteller hvor mye primærenergi som brukes i hele verdikjeden per energimengde levert. På samme måte forteller en utslippskoeffisient hvor stort utslipp det er av klimagasser, eller bare CO₂, i hele verdikjeden per levert energimengde.

En bygning bruker vanligvis flere enn én energibærer. I standarden EN 15603:2008 [11] blir det derfor bestemt at et felles uttrykk skal brukes for å samle den totale primærenergibruken til bygget. Dette uttrykket skal vise hvor stor bruk av primærenergi bygget har og også hvor stort CO₂-utslipp bygget har. For å kunne beregne det samlede primærenergiforbruket og CO₂-utslippet er man avhengig av å ha PEF og utslippskoeffisienter for ulike energiressurser. Disse indikatorene skal bestemmes på nasjonalt nivå i følge EN 15603:2008. Disse indikatorene vil bli diskutert senere i kapitlet. Ved kjennskap til disse indikatorene kan man beregne primærenergiforbruk, E_p , og CO₂-utslipp, m_{CO_2} , på følgende måte:

$$E_p = \sum_i (E_{del,i} f_{p,del,i}) - \sum_i (E_{exp,i} f_{p,exp,i}) \quad (2.1)$$

$$m_{CO_2} = \sum_i (E_{del,i} K_{del,i}) - \sum_i (E_{exp,i} K_{exp,i}) \quad (2.2)$$

Hvor

$E_{del,i}$ er den leverte energien for energibærer i ;

$E_{exp,i}$ er den eksporterte energien for energibærer i ;

$f_{p,del,i}$ er primærenergifaktoren for den leverte energibæreren i ;

$f_{p,exp,i}$ er primærenergifaktoren for den eksporterte energibæreren i ;

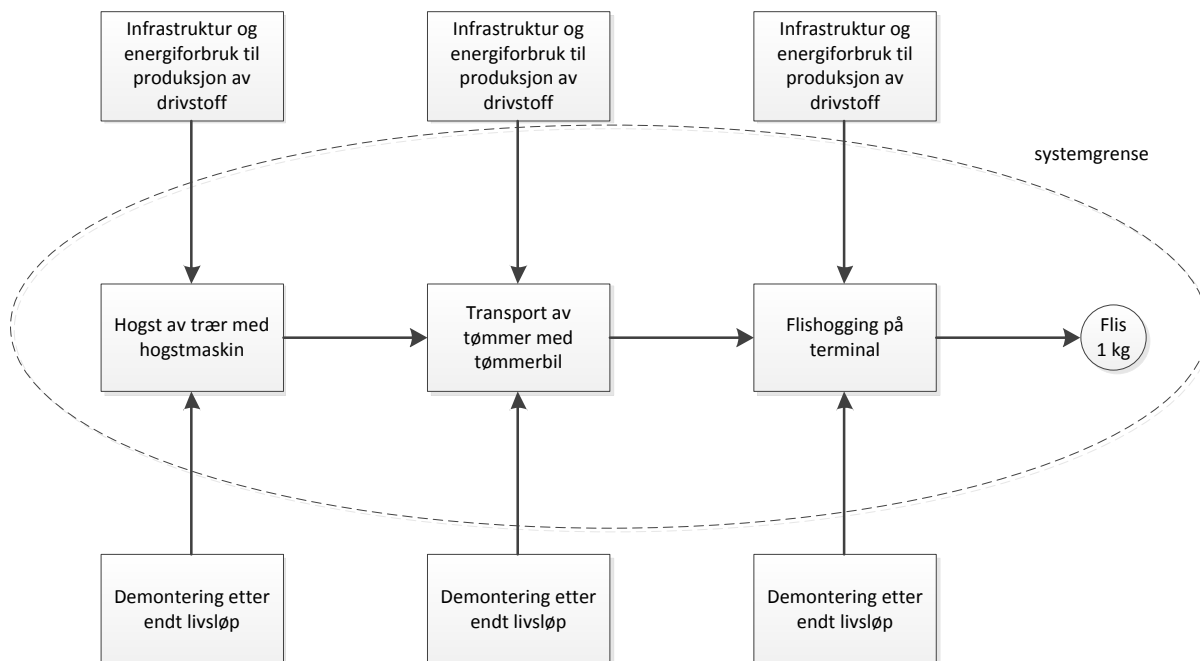
$K_{del,i}$ er CO₂-utslippskoeffisienten for den leverte energibæreren i ;

$K_{exp,i}$ er CO₂-utslippskoeffisienten for den eksporterte energibæreren i ;

2.2.1 Systemgrenser

Systemgrensene er et «cut-off»-punkt mellom hva som skal inkluderes og hva som skal bli utelatt i beregning av primærenergiforbruk og CO₂-utslipp. Det som ligger utenfor systemgrensene blir ikke medregnet. Hvor disse grensene settes påvirker resultatet av beregningene, men ved en viss grense vil alt utenfor bidra i så liten grad at det kun vanskeliggjør beregningene uten å endre resultatet nevneverdig. Et illustrativt eksempel på dette er gitt i Figur 2.1. Denne figuren er kun ment som et eksempel og representerer ikke verdikjeden som bør brukes for produksjon av flis.

Figur 2.1: Eksempel på systemgrense



Konstruksjon av maskiner som benyttes til tømmerhogst, transport og flishogst krever energi og medfører utslipp av klimagasser. Det samme gjelder for demontering eller behandling av disse

maskinene ved endt bruk. Med infrastruktur menes bruk av maskiner og utstyr der energi ligger lagret som følge av konstruksjon og vedlikehold av maskinene. Dette kan betraktes ved:

- Energien som ligger lagret i materialer som brukes i maskinene
- Energien som kreves for å sette sammen materialene til en maskin
- Energi som kreves for framstilling av reservedeler og vedlikehold

Avhengig av en maskins levetid kan man fordele denne energibruken på det den produserer. For eksempel kan en hogstmaskin kun felle et bestemt antall trær før den blir utslitt og må byttes ut. Den totale energimengden (med tilhørende CO₂-utslipp) som kreves for å bygge og vedlikeholde maskinen, kan da fordeles på det totale antallet trær som blir felt i løpet av hogstmaskinens levetid.

Drivstoff som diesel og bensin krever også energi for å bli produsert, og inkludering av dette vil føre til en større total energibruk i verdikjeden for produksjon av flis. Dette energiforbruket er langt mindre per enhet drivstoff forbrukt enn selve energiinnholdet i én enhet diesel eller bensin. Spørsmålet er hvor stort bidrag energien som kreves for å framstille drivstoff gir til den totale energibruken for produksjon av flis. Hvis man antar at det kreves 0,1 liter drivstoff i hver prosess (hogst, transport og flishogging) for å framstille 1 kg flis, kreves det 0,3 liter drivstoff totalt for produksjon av 1 kg flis. Hvis energien som kreves for å framstille drivstoff til sammen utgjør energi tilsvarende energimengden i 0,1 liter drivstoff, bør dette inkluderes i verdikjeden. Dersom det kun utgjør energimengden tilsvarende 0,001 liter drivstoff vil det bidra i svært liten grad til det totale energiforbruket og CO₂-utslippet i verdikjeden for flis.

Transport av tømmer krever at det bygges og vedlikeholdes veier som igjen krever energi. For et enkelt system, som ved produksjon av flis til brensel, vil dette sannsynligvis bidra i svært liten grad til energiforbruk og CO₂-utslipp per enhet flis. I større skala, som for eksempel på nasjonalt nivå, vil konstruksjon og vedlikehold av veier føre med seg et stort energiforbruk og CO₂-utslipp. På individuelt nivå er det vanskelig å argumentere for at energiforbruk og CO₂-utslipp knyttet til produksjon og vedlikehold av veier skal allokere til de ulike forbrukerne av veinettet. På nasjonalt nivå vil energiforbruk og CO₂-utslipp for vei være såpass stort at det bør fordeles på de forskjellige forbrukerne, som for lastebiler som frakter tømmer for flisproduksjon. Dette gjør imidlertid beregningene av energiforbruk og CO₂-utslipp i verdikjeden for flisproduksjon mye mer komplisert, og bidragene vil være nærmest neglisjerbare i den totale verdikjeden for flis.

Et cut-off-kriterium bør settes slik at de viktigste bidragene til PEF og utslippskoeffisient blir inkludert. [12] bruker vekt på komponentene for materialene i en vindmølle som kriterium. Materialer som til sammen utgjør 95 % av massen til fundamentet og 85 % av massen til nacelle og rotor blir inkludert. ISO-standarden for livssyklusanalyse (LCA) [13], sier at cut-off-kriteriet i en LCA-studie bør være klart definert og lett og forstå. Når systemgrensene settes bør følgende elementer tas i betraktning [13]:

- Uthenting av råmaterialer
- Strømmer inn og ut av hovedprosessen
- Distribusjon og transport
- Produksjon og bruk av drivstoff, el og varme
- Bruk og vedlikehold av produkt
- Behandling av avfall

- Resirkulering og gjenbruk av materialer og energi
- Konstruksjon av hjelpeutstyr
- Konstruksjon, vedlikehold og demontering av infrastruktur
- Andre operasjoner som inngår som lys og varme

Fordelen med å velge masse som kriterium er at det forenkler beregningene og er klart definert. Ulempen ved det er at enkelte ressurser og råvarer krever mye energi per masseenheter for å bli utvunnet. Ved beregning av PEF for energiresurser vil energistrømmer være et passende cut-off-kriterium. Ulempen ved dette er at hele verdikjeden med alle hjelpeprosesser må evalueres for å finne energibruken i de ulike prosessene. Først når man kjenner energibruken i ulike prosesser kan man sette et cut-off-kriterium og bestemme systemgrensene.

2.2.2 Primærenergifaktorer og CO₂-utslippskoeffisienter

I EN 15603:2008 finnes det to forskjellige definisjoner av primærenergifaktor. Den første er det som kalles den totale primærenergifaktoren. Denne faktoren representerer all energi som blir brukt ovenfor levering til brukssted. Den andre definisjonen gjelder for fornybare energiresurser og er den samme som den totale, bortsett fra at den fornybare komponenten ikke blir tatt med i faktoren. På grunn av dette kan primærenergifaktoren for fornybare energiresurser være lavere enn 1. Utslippskoeffisienten er en koeffisient som skal inkludere alt CO₂-utslipp relatert til primærenergiforbruket. I vedlegg E i EN 15603:2008 er det gitt informative verdier for primærenergifaktor og utslippskoeffisient. Disse verdiene kan brukes ved beregning av primærenergiforbruk og CO₂-utslipp, men det er opp til hvert enkelt land å beregne sine egne faktorer.

Tabell 2.1: PEF og utslippskoeffisienter [11]

	Primary energy factors f_p		CO ₂ production coefficient K
	Non-renewable	Total	kg/MWh
Fuel oil	1,35	1,35	330
Gas	1,36	1,36	277
Anthracite	1,19	1,19	394
Lignite	1,40	1,40	433
Coke	1,53	1,53	467
Wood shavings	0,06	1,06	4
Log	0,09	1,09	14
Beech log	0,07	1,07	13
Fir log	0,10	1,10	20
Electricity from hydraulic power plant	0,50	1,50	7
Electricity from nuclear power plant	2,80	2,80	16
Electricity from coal power plant	4,05	4,05	1340
Electricity Mix UCPTÉ	3,14	3,31	617

Ved beregning av primærenergifaktorer er det enkelte elementer som skal være med i henhold til EN 15603:2008, og andre elementer som kan bli tatt med. Ved beregning av nasjonale verdier skal det nevnes hvilke av elementene som inngår i faktoren. De elementene som skal være med er:

- Energi som går med til å hente ut/høste energiresursen.
- Energi som går med til transport fra produksjonssted til brukssted for energiresurs.

- All energi som blir brukt til prosessering, lagring, generering, transmisjon, distribusjon og alle andre ledd som er nødvendige for leveranse til bygget der den leverte energien blir brukt.

De elementene som kan være med, altså valgfrie elementer, er:

- Energien som brukes for å bygge omformingsstasjoner (for eksempel varmesentral)
- Energien som brukes for å bygge transportsystemer
- Energien som brukes for å behandle avfall knyttet til energiresurs og energibærer

I Tabell 2.1 er energien som går med til å bygge omformingsstasjoner og transportsystemer inkludert.

Det kommer frem i denne standarden at systemgrensene er viktige ved utregning av PEF. Ved å ha systemgrensene slik som denne standarden bestemmer, der nesten alt energiforbruk knyttet til bearbeiding av energiresursen er tatt med, får man bedre innsikt i hvor effektiv en energiresurs er. En energiresurs som har en høy PEF kan sies å være en lite energieffektiv ressurs. Strøm produsert fra kullkraft har lav virkningsgrad, og dermed en høy PEF. Brundtlandkommisjonen la vekt på at energieffektivisering bør være det fremste virkemidlet for å ha en bærekraftig utvikling. 20 % energieffektivisering ble satt som et mål i fornybardirektivet, og bruken av PEF til å måle en bygnings energiytelse er et verktøy som nå er tatt i bruk for å kunne måle hvor effektiv en bygnings energiforsyning er, og også for å kunne sammenligne ulike energiresursers og energibæreres effektivitet.

2.3 Problemområder vedrørende primærenergikonseptet

I direktivet som omhandler energiytelsen i bygninger blir det slått fast at det kun er PEF som skal brukes som en numerisk indikator ved beregning av et byggs energiytelse. CO₂-utslipp er altså en valgfri indikator, men det anbefales å ta den med. Et problem knyttet til CO₂-utslipp er hvorvidt det er bare CO₂ som skal være med når man beregner utslippene, eller om utslipp av alle gasser som gir bidrag til drivhuseffekten skal være med. I et klimaperspektiv kan flere gasser som slippes ut i forbindelse med produksjon, transport og bruk av energi regnes om til CO₂-ekvivalenter. De tre gassene som bidrar mest til drivhuseffekten (og da menes den menneskeskapte drivhuseffekten) er karbondioksid, metan og dinitrogenoksid. CO₂-ekvivalenttallene til disse gassene er angitt i [8] som følger:

CO₂: 1

N₂O: 296

CH₄: 23

CO₂ er den viktigste bidragsyteren til drivhuseffekten i dag. CO₂-ekvivalenttallen viser at de to andre gassene bidrar mye mer enn CO₂ per utslippsenhet. Derfor er det viktig å se på utslippene av disse gassene når man skal beregne bidrag til drivhuseffekten. Kyotoprotokollen sier at CO₂-ekvivalentene også skal være med ved beregning av klimakonsekvenser, og dette blir gjengitt i fornybardirektivet der det er et mål å redusere klimagassutslippene. I EN 15603:2008 blir det bestemt at det skal bli definert på nasjonalt nivå om CO₂-ekvivalenter skal være med i beregningene eller ikke. Dette kan føre til variasjoner i utslippskoeffisientene, og enkelte energiresurser kan slå bedre ut i noen land

enn i andre. N_2O gir et betydelig bidrag til drivhuseffekten ved bruk av såkalte energiavlinger som dyrkes frem og høstes på årlig basis [14]. Dette skyldes at det brukes mer kunstgjødsel for slike avlinger. CH_4 blir blant annet sluppet ut ved ufullstendig forbrenning og ved lagring av biomasse. Senere i denne oppgaven blir det antatt at forbrenning av biomasse er karbonnøytralt. Med tanke på CO_2 er dette riktig under visse omstendigheter, men det vil uansett være et utslipp av CH_4 og N_2O ved forbrenning av biomasse [15]. Siden CH_4 gir et større bidrag til drivhuseffekten enn CO_2 bør utslipp av CH_4 bli tatt med i klimagassregnskapet. N_2O er ikke en del av det naturlige karbonkretsløpet og må også inkluderes. Utslipp av CH_4 og N_2O ved forbrenning av biomasse blir tatt hensyn til i kapittel 8.

I denne masteroppgaven vil det fra nå av kun bli brukt utslippskoeffisient og ikke CO_2 -koeffisient. Denne utslippskoeffisienten har benevnelse gram CO_2 -ekvivalent pr kWh produsert energi (g CO_2eq/kWh). I tillegg til CO_2 -utslipp består denne koeffisienten også av CH_4 - og N_2O -utslipp som blir omregnet til CO_2 -ekvivalenter.

Energi blir brukt langs hele verdikjeden til de fleste produkter og prosesser. For energiproduksjon i seg selv så kreves det energi, eller det er et tap av energi, ved konvertering, prosessering og til alt som har med transport av energi og gjøre. Denne energien er avhengig av hva slags brensler som blir brukt, teknologi, geografisk beliggenhet for bruk av energien og tilgang og beliggenhet for ressurser. Alt dette påvirker primærenergien som blir brukt i produksjonsprosessen for energi. Pellets bruker mye el i produksjonen, og hvis PEF for el som benyttes i produksjonen inkluderes vil total PEF for pellets endre seg. En annen viktig faktor er hvorvidt det er maksimal eller marginal energiproduksjon eller gjennomsnittlig energiproduksjon som betraktes. Dette gjelder både i liten skala for et enkelt produksjonsanlegg der virkningsgraden, og dermed energiforbruket og GHG-utslippene, er avhengig av lasten, og i stor skala på nasjonal basis. Dersom Norge har et stort overskudd av vannkraft og det er liten etterspørsel i markedet vil mye av den elektriske energien som brukes i Norge komme i fra norsk vannkraft. Denne vannkraften har en lav PEF og en lav utslippskoeffisient. Men ofte er energisituasjonen i Norge anstrengt, og vi importerer strøm i fra utlandet. Det er også vanlig at Norge selger strøm på dagen og importerer på natten siden dette har prisgunstige fordeler. Den strømmen vi importerer kommer ofte fra ressurser med høyere energitap i produksjonen enn for vannkraft, som kullkraft og gasskraft, i tillegg til at det er store transporttap ved store avstander. Dersom man verken vet hvor energien man bruker kommer fra, eller man vet ved hvilken last og virkningsgrad den er produsert, vil det være vanskelig å beregne en presis PEF og utslippskoeffisient på energien man bruker.

Et annet problem vedrørende dette konseptet er hvordan PEF skal beregnes. I EN 15603:2008 er det gitt klare retningslinjer for hva som skal og bør være med. Det er etter denne standarden valgfritt om man skal ta med energien som går med til å bygge transportsystemer og omformingsstasjoner. I en LCA-studie gjort på Institutt for Energi og Prosessteknikk ved NTNU på CHP fra biomasse[16], er det kommet fram til at infrastruktur (konstruksjon og demontering) for distribusjonsnettet er den nest største bidragsyteren til global oppvarming etter de direkte GHG-utslippene fra forbrenningen. Dette gjelder for varmeproduksjonen i CHP-anlegget. Denne studien tar utgangspunkt i biomasseproduksjon i Trondheims-området, og det er fjernvarmenettet i Trondheim som blir brukt som distribusjonsnett. Dersom det er valgfritt om man skal inkludere infrastruktur eller ikke, vil det være hensiktsmessig for varmeproduksjon å unngå og inkludere denne infrastrukturen ved beregning av PEF og utslippskoeffisient. Det er som tidligere nevnt opp til hver nasjon om denne infrastrukturen

skal inkluderes eller ikke. Derfor vil de energiresursene som har et høyt energiforbruk for byggingen av infrastruktur score langt bedre for PEF og utslippskoeffisient i de landene der denne energibruken blir utelatt i forhold til de landene der den blir inkludert.

2.4 PEF og utslippskoeffisient: Fordeler og ulemper ved de forskjellige indikatorene

Bruk av indikatorer for både PEF utslippskoeffisient vil føre til bedre forståelse for primærenergiforbruk og GHG-utslipp i et samfunn som blir stadig mer miljøorientert. Men bruk av begge indikatorene kan også føre til forvirring blant forbrukere. Dette skyldes at det ikke alltid er sammenheng mellom PEF og utslippskoeffisient. En ressurs med høy PEF kan ha lav utslippskoeffisient og vice versa.

PEF varierer i langt mindre grad enn utslippskoeffisient. Nedenfor er fire av ressursene i vedlegg E i EN15603:2008 trukket ut.

Tabell 2.2: Utvalgte verdier fra vedlegg E i EN 15603:2008

	Primærenergifaktor f_p		CO ₂ -produksjonskoeffisient K Kg/MWh
	Ikke-fornybar	Total	
Olje	1,35	1,35	330
Sagflis	0,06	1,06	4
El fra vannkraft	0,5	1,5	7
El fra kjernekraft	2,8	2,8	16

Det kan være fornuftig å vise andel fornybar energi, eller andel ikke-fornybar energi, på energisertifikatene. Dette forsvarer til en viss grad hvorfor sagflis har så lave GHG-utslipp som de har, og det gjør at man kan oppfatte en sammenheng mellom PEF og utslippskoeffisient.

Kjernekraft har en PEF som er over det dobbelte av PEF for olje, samtidig som at utslippskoeffisienten er mye lavere. Hvis kjernekraft utgjør en betydelig del av total elforsyningen vil da PEF for el bli høy og utslippskoeffisienten lav. Metodikken brukt av blant annet IPCC og FN (se kapittel 3.3) gir en lav PEF for kjernekraft. Tap ved konvertering vil ved denne metoden neglisjeres og føre til at el fra kjernekraft vil få en total PEF i overkant av 1.

Valg av metodikk er viktig for fornybare kilder der det er store tap i konvertering fra ressurs til el. Hvis tap i konvertering blir tatt med i beregning av PEF for vind- og solenergi, vil PEF og utslippskoeffisient bli svært høye for disse ressursene. Det er et ønske om en vridning av energibruken i samfunnet – mot en mer fornybar energiforsyning. Da er det viktig at metodikken som brukes ved utarbeiding av energisertifikatene favoriserer fornybare kilder. Dette kan gjøres på (minst) to måter:

- 1) I tillegg til PEF inngår det en indikator på energisertifikatene som viser andelen fornybar energi. Her bør det også diskuteres om spillvarme fra prosesser som bruker fossile energiresurser skal inngå som en «fornybar» ressurs.

- 2) I PEF så er det kun bruk av fossile ressurser (ikke-fornybare) som inngår. PEF beregnes da ved andel fossil energi per levert energienhet.

Begge disse metodene for PEF vil favorisere fornybare ressurser. For den andre metoden vil alle fossile ressurser ha en PEF som er større enn 1, og alle fornybare ressurser har en PEF som er mindre enn 1 (hvis de ikke har det ved denne andre metoden burde energiressursen forbys).

ReCiPe-metoden for å miljøvurdere ulike ressurser og produkter er en av de mest brukte metodene i LCA-sammenheng, og den er inkludert i alle større LCA-dataprogrammer og databaser, som SimaPro og EcolInvent (forklart i kapittel 3). Denne metoden tar ikke med primærenergiforbruk som en kategori i miljø- og klimavurderingen. Dette skyldes at det er stor usikkerhet til primærenergi og hvordan primærenergi skal defineres, spesielt for fornybare ressurser. I tillegg er det mer interessant å se på hvor mye fossile brensler som brukes. Derfor har ReCiPe en kategori som heter «Fossil fuel depletion» som måler bruken av fossile brensler i kg oljeekvivalent. Denne metoden kan sammenlignes med den ikke-fornybare delen i Tabell 2.2. Ved å benytte PEF der bruken av fossile brensler er det eneste som inngår vil det bli mer tydelig å skille PEF for ulike energiressurser fra hverandre. På denne måten vil man også unngå «uheldige» vurderinger som at energi fra enkelte biomasseressurser får et tillegg på 1 (inkludering av energien i biomassen) samtidig som energi fra blant annet avfall og returtre ikke får det [17].

Fordelen med utslippskoeffisient er at en slik koeffisient tydeliggjør forskjellene for fornybare ressurser. I [17] kommer det fram at el fra vindenergi krever mindre fossile ressurser enn el fra vannkraft per produsert energimengde. Derimot er GHG-utslippene større for el fra vind enn fra vann per produsert energimengde. El fra PV har en utslippskoeffisient som varierer fra 50 – 250 g CO₂eq/kWh el [18]. En utslippskoeffisient på 250 g CO₂eq/kWh er nesten like høy som utslippskoeffisienten for gass i EN 15603:2008 som er på 277 g CO₂eq/kWh.

Ved bruk av både PEF og utslippskoeffisienter som indikator på energisertifikatene vil hensyn til Kyotoavtalen, fornybardirektivet og kogenereringdirektivet ivaretas. Det er ønskelig å bruke begge som indikator for å ivareta hensyn til energieffektivisering, økning i fornybar energiforsyning og reduksjon i GHG-utslipp. Ved valg av kun én indikator risikerer hensynet til det den andre indikatoren ivaretar å forsvinne. Dette kan eksemplifiseres på følgende måte:

- *PEF som eneste indikator:* Fossile brensler som kull, gass og olje favoriseres framfor kjernekraft og pellets (dersom høy PEF for pellets, se kapittel 3.2.4) siden de har lavere PEF. GHG-utslippene er derimot lavere for energi fra kjernekraft og pellets. GHG-utslipp skyldes dessuten ikke bare bruk av fossil energi. Utslippskoeffisienten for vannkraft varierer mye avhengig av hvor store og hva slags type landområder som demmes opp (se kapittel 3.2.2). For vannkraft og andre ressurser er det liten vitenskapelig data på hvordan endringen av landområder bidrar til GHG-utslipp [1].
- *Utslippskoeffisient som eneste indikator:* Enkelte energiressurser som husholdningsavfall og biooljer har stor utslippskoeffisient i forhold til flis og pellets [17]. Ved å benytte metodikken brukt i [17], der avfall og biooljer kun blir ansett som restprodukter, vil PEF for flis og pellets være over 1 mens PEF for avfall og biooljer bare er litt over 0.

Et av de viktigste formålene med primærenergikonseptet er energieffektivisering. El fra vind og sol er fornybare ressurser som ikke kan brukes opp på samme måte som fossile ressurser. Oppvarming med el generert av vind- eller solenergi er derimot ineffektivt i forhold til oppvarming ved forbrenning av biomasse. På kalde vinterdager er det store tap i transmisjon og distribusjon av el. På grunn av fysiske begrensninger i nettet oppstår det også flaskehals når lasten er høy. De fleste varmepumper får også en kraftig reduksjon i virkningsgrad når utetemperaturen er veldig lav. El bør brukes der den gjør størst nytte. Fornybar el gjør større nytte globalt sett dersom det erstatter fossil el i prosesser som krever el, enn dersom det erstatter varmeproduksjon fra biomasse. På de kaldeste dagene og når det i tillegg er lite vann i magasinene, vil det være mye import av fossil el. Med økende grad av varme fra biomasse vil behovet for å importere fossil el fra Europa synke. Dette bør også på en eller annen måte tas hensyn til i en indikator på energisertifikatene. Slik energimerkingen er i dag er dette allerede til en viss grad tatt hensyn til ved at det er en indikator som viser andel el og fossil energi som brukes til oppvarming.

Oppsummering av delkapittel og forfatterens synspunkt

PEF kan brukes som eneste indikator. Men for å minimere GHG-utslipp bør metodikken som brukes for å beregne PEF for energiresurser favorisere fornybar energi og energiresurser med lave GHG-utslipp. I tillegg bør fornybar varme favoriseres framfor fornybar el. En mulig metode kan være følgende:

- Det er kun bruk av ikke-fornybare ressurser som blir inkludert i PEF. Dersom det er total PEF som benyttes bør det inngå en indikator i tillegg som viser andel fornybar energi.
- Videre blir energiresursene satt i en klasse som får fram besparelsen i GHG-utslipp. En slik klasse kan være enklere å forholde seg til enn en utslippskoeffisient for den jevne forbruker. I tillegg kan man ved en slik klasseinndeling inkludere de indirekte klimabesparelsene for en energiresurs. Dette betyr at for oppvarming så vil el fra fornybare kilder få en dårligere klasse enn varme fra biomasse. Dersom det er lite vann i magasinene og lite vind, vil det være import av el, noe som betyr at utslippsfaktoren for el vil variere mye.
- Disse klassene kan kategoriseres med farger fra grønn til rød slik de eksisterer i dag. Grønn gir et lite bidrag til drivhuseffekten og bør brukes for energiresurser som har et konstant, lavt GHG-utslipp uavhengig av utetemperatur og andre indirekte effekter. Dette gjelder for blant annet varme produsert fra flis. Rød gir et høyt bidrag til drivhuseffekten og bør brukes for energiresurser med høyt GHG-utslipp, som el fra kull, olje og gass.

3 Metodikk for beregning av PEF og utslippskoeffisient for ulike energislag

Analyse av energibruk og GHG-utslipp knyttet til hele verdikjeden for bruk av energiresurser stammer fra teorien om livssyklusanalyse, også kalt LCA. LCA er en etablert metode for å gi et helhetsbilde over et produkts totale miljøpåvirkning fra vugge til grav. LCA tar med klima- og miljøpåvirkningen knyttet til alt ved utvinning av råvarer, tilvirkning, transport, bruk og demontering eller gjenvinning etter endt bruk. I denne oppgaven er det energibruk og utslipp av klimagasser det blir lagt vekt på, men i LCA ser man på miljøpåvirkningen innenfor en rekke ulike kategorier. Innenfor LCA så skiller det mellom LCI-data og LCA-data. LCI-data kan beskrives som en sammensetning av alle strømmer av materialer og energi til og fra et produkt under hele et produkt sin livssyklus, men uten beregning av miljøpåvirkning. LCA-data tar derimot med miljøpåvirkningen fra de forskjellige strømmene av materialer og energi også.

LCI-analyse er nødvendig å gjennomføre ved beregning av PEF og utslipp av klimagasser. I ISO-standarden for LCA- og LCI-analyser [13], er det beskrevet at data for hver prosess som inngår innenfor systemgrensene til et produkt kan klassifiseres under følgende overskrifter:

- det som tilføres av energi, råmaterialer, hjelpeutstyr og annet fysisk utstyr
- produkter, bi-produkter og avfall
- utslipp til luft, vann og jord
- andre miljøaspekter

Når man skal beregne PEF og utslipp av klimagasser bør man altså ta i betraktning punktene nevnt over, men det er kun krav til at elementene som inngår i EN 15603:2008 skal følges.

3.1 EcoInvent og SimaPro

LCA er et veldig dataintensivt verktøy for beregning av energibruk og miljøpåvirkninger. For å kunne analysere energiresurser så korrekt som mulig er det nødvendig med et godt datagrunnlag. Resultatene som blir oppnådd avhenger i stor grad av det empiriske datamaterialet man benytter seg av. Innsamling av slik data er tidkrevende, og man foretrekker derfor ofte å belage seg på data som allerede er samlet inn og sortert i databaser. Det finnes i dag flere forskjellige slike databaser, og det er vanlig at de spesialisere seg på ulike felt, og at det er ulike elementer som inngår i systemgrensene. Enkelte av databasene tar ikke hensyn til infrastruktur, mens andre gjør dette. Det er derfor viktig å ta hensyn til hva som inngår for de forskjellige produktene, materialene og prosessene i de forskjellige databasene når man skal gjøre en LCI- eller en LCA-analyse.

EcoInvent er kjent for å være den mest komplette og beste databasen for europeiske formål [19]. Det er en videreføring av ETH-ESU 96 – databasen, og den er opprettet gjennom et prosjekt mellom flere forskjellige institusjoner. Noen av disse er: Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETHZ), Paul Sherrer Institute (PSI), Swiss Federal Research Station for Agro ecology and Agriculture og ESU services. Denne databasen består av en rekke forskjellige kategorier med prosesser og materialer som energiforsyning, brensler, varme- og elektrisitetsgenerering, plastikk, papir, kjemikalier, vaskemidler, avfallsbehandlingsprosesser, metaller, treprodukter, byggematerialer, transport og landbruksprodukter. Denne databasen inkluderer også infrastruktur knyttet til de forskjellige prosessene og er dermed en mer komplett database enn mange andre.

EcoInvent-databasen er blant annet tilgjengelig i dataprogrammet SimaPro. Dette dataprogrammet er det mest brukte LCA-dataprogrammet i verden. SimaPro er et profesjonelt verktøy som kan beregne miljøkonsekvenser og energibruk knyttet til flere produkter, materialer og prosesser. I programmet har man muligheten til å definere sine egne produkter med alle strømmer av materialer og energi som inngår i produktene. I EcoInvent-databasen finnes det over 4000 forskjellige prosesser og materialer fra flere forskjellige land. Denne databasen, sammen med SimaPro som dataprogram, er et godt redskap for å beregne kvantitative verdier for primærenergiforbruk og klimagassutslipp.

Mye av datamaterialet i EcoInvent-databasen er ment for sveitsiske forhold og sentraleuropeiske forhold, og mange av de andre databasene er basert på andre geografiske steder. Det må derfor vurderes om dette datamaterialet er gyldig for norske forhold når man skal gjøre en analyse av en energiressurs eller et hvilket som helst annet produkt i Norge.

3.2 Metodikk for ulike energislag

Når det er opp til hvert enkelt land å beregne sine egne PEF'er og utslippskoeffisienter for ulike energiressurser vil resultatene ofte bli forskjellige. Beregningene er ofte stedsspesifikke. For eksempel så er elektrisiteten som brukes for å bearbeide ressurser i Norden mer miljøvennlig enn elektrisitet fra Sentral-Europa (dersom man forutsetter en Nordisk elmiks i Norden og UCPTÉ-miks i Sentral-Europa). I tillegg vil det ofte være ulike allokeringemetoder som blir brukt. Dersom en produksjonsprosess gir flere forskjellige produkter, er man nødt til å allokere energibruken og GHG-utslippene til de forskjellige produktene. Dette blir forklart mer nøyere kapittel 4. Valget av allokeringemetode for en prosess som gir flere produkter er en av de mest diskuterte metodologiske aspektene ved LCA [20]. Forskjellige allokeringemetoder gir forskjellige resultater for energibruk og GHG-utslipp. I tillegg bruker forskjellige analyser ofte forskjellige LCI-databaser når de beregner energiforbruket og utslippene av klimagasser.

I dette delkapittelet vil metodikken som er brukt for enkelte energiressurser bli beskrevet, og hvilke resultater som er oppnådd i forskjellige studier. Energiressurser som el og varme fra solkraft, kjernefysisk og geotermisk energi er ikke vurdert siden dette brukes i liten utstrekning i Norge. To rapporter er mye brukt; den ene er laget av EcoInvent [21] og den andre er laget av Värmeforsk [17] i Sverige. Begge to benytter seg av data fra EcoInvent-databasen, men rapporten fra Värmeforsk benytter seg også av verdier som er hentet fra andre databaser. Värmeforsk bruker og svensk eller nordisk elektrisitet i de fleste av sine beregninger og resultatene gjelder for svenske forhold, mens resultatene fra EcoInvent gjelder stort sett sveitsiske forhold. EPA (United States Environmental Protection Agency) har opprettet en metode for å vurdere energiytelsen til bygg [22], og de har beregnet «source-site factors» for flere ulike energiressurser. En source-site factor er det samme som en primærenergifaktor. NREL (National Renewable Energy Laboratory) er en annen amerikansk institusjon som har gitt ut en rapport om kildeenergi (primærenergi) og utslippsfaktorer for energibruk i bygninger [23]. Rapportene fra Värmeforsk og EcoInvent baserer seg på europeiske LCI-databaser (hovedsakelig EcoInvent) og europeiske forhold. Systemgrensene til disse to rapportene omfatter, dersom ikke annet er angitt, alle prosesser som inngår for en energiressurs fra vugge til grav. Rapporten fra NREL tar med all energi som brukes til utvinning, transport og bearbeiding av råvarer, og også utslippene av klimagasser. Derimot tar ikke denne rapporten med energi og GHG-utslipp knyttet til konstruksjon og demontering av infrastruktur. Rapporten fra NREL baserer seg på en amerikansk LCI-database gitt ut av NREL. Rapporten fra EPA inkluderer kun tap i produksjon, transmisjon og distribusjon ved beregninger. Rapporten tar ikke med energien som brukes i utvinning

av ressursene, transport av råvarer og bearbeiding. Rapporten til EPA tar heller ikke med utslippene av klimagasser knyttet til tapene som oppstår. Til sammenligning er også verdiene i EN 15603:2008 tatt med. De energiressursene som er valgt å se på er fyringsolje, naturgass, el fra vindkraft, el fra vannkraft og miks av forskjellige typer el. Resultater for flis og pellets vil også bli presentert i dette kapittelet, men det vil også bli behandlet mer grundig i kapittel 6 og 7.

3.2.1 Naturgass og fyringsolje

Fyringsolje

Figur 3.1: Verdikjede for naturgass og fyringsolje³



Figuren over beskriver på en forenklet måte systemgrensene for olje og naturgass, og er i samsvar med kravene i EN 15603:2008. For olje og gass går systemgrensene helt ut til boring. Boring krever store mengder energi, både til prøveboring og til boring av selve brønnen som skal brukes til å hente ut olje og gass. I tillegg brukes mye energi til konstruksjon av plattformen dersom olje- og gassproduksjonen foregår til havs. For olje så foregår transporten både i rør og i store tankskip og transporten er ofte over store avstander. Ved prosessering av råolje er tung og lett fyringsolje bare noen av produktene som blir fremstilt. Diesel og bensin er to andre produkter som blir framstilt i et raffineri. Dette gjør at allokering blir et viktig element i beregningen av PEF og utslippskoeffisient. Rapporten fra EcoInvent gir verdier for tung fyringsolje, mens rapporten fra Värmeforsk gir verdier for lett fyringsolje. Siden disse oljetyperne har forskjellige komposisjoner og brennverdier vil det ikke være helt riktig å sammenligne de to oljetyperne. Systemgrensene som blir brukt for de to europeiske rapportene er like, bortsett fra at rapporten til Värmeforsk går et hakk lengre ved å ta med distribusjon til forbruker. EcoInvent stopper ved distribusjon til regionalt lager. Värmeforsk bruker en svensk elmiks til alt som kreves av elektrisitet i prosessen. EPA tar kun med tap knyttet til distribusjon og lagring og gir også kun en felles faktor for fyringsoljene 1,2,4,5,6 samt diesel og parafin. NREL skiller mellom residual fyringsolje og destillat fyringsolje. Residual olje kan sammenlignes med tungolje og destillat olje kan sammenlignes med lettolje (selv om det er forskjellige egenskaper blant disse også).

Tabell 3.1: PEF og utslippskoeffisient for olje

	<i>EcoInvent (tungolje)</i>	<i>Värmeforsk (lettolje)</i>	<i>EN 15603:2008 (uspesifisert)</i>	<i>EPA (sammensetning)</i>	<i>NREL lettolje</i>	<i>NREL tungolje</i>
PEF	1.31	1.11	1.35	1.01	1.158	1.191
<i>g CO₂eq / kWh</i>	38	21.6	330	-	48.69	48.74

³ Basert på referanse 21. Dones, R., et al., *Life cycle inventories of energy systems: results for current systems in Switzerland and other UCTE countries*. Data v1, 2007. 1.

Verdiene er omregnet fra slik de står oppgitt i de forskjellige rapportene til å ha samme benevninger. Omregningene kan finnes i **Vedlegg A** . Brennverdier for lett og tung fyringsolje er hentet fra [24].

EN 15603:2008 har en langt høyere utslippskoeffisient enn de andre kildene. Dette skyldes at i de andre kildene så er ikke forbrenning inkludert i beregningen, og systemgrensene stopper etter distribusjon. I en rapport om utslippsfaktorer fra norsk fjernvarme utgitt av Norsk Energi [25], er utslippene av CO₂-ekvivalenter ved forbrenning av tungolje angitt til å være 288 g CO₂e/kWh, mens utslippene knyttet til produksjon og transport bare er på 21 g CO₂e/kWh. Det er derfor naturlig å anta at EN 15603:2008 tar med forbrenning ved beregning av utslippskoeffisient og at de andre ikke gjør det.

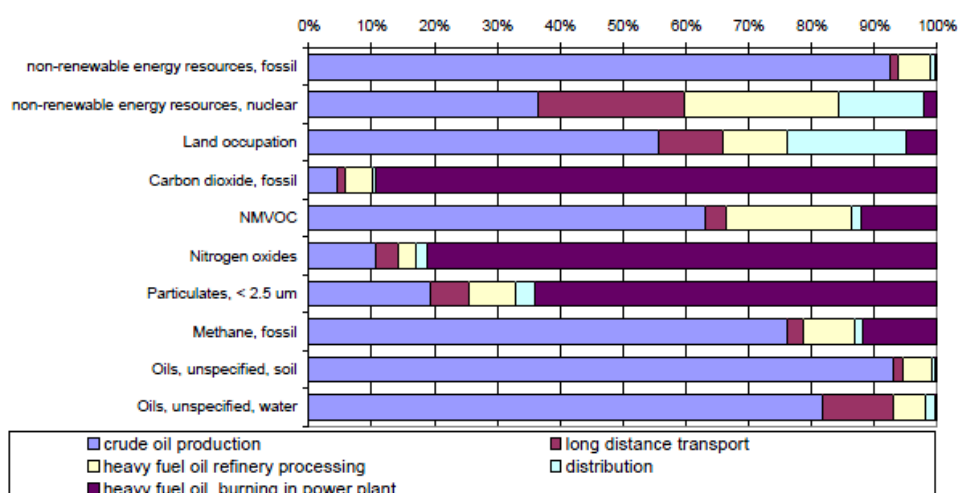
Värmeforsk oppgir verdi for lett fyringsolje i tillegg til at det er en svensk elmiks de bruker. Dermed blir både PEF og utslippskoeffisient lavere enn resultatene for EcoInvent. NREL har store GHG-utslipp i forhold til PEF dersom man måler den mot de andre rapportene. Det er vanskelig å spore hva som gir disse forskjellene. NREL kommer fram til et lavere primærenergiforbruk enn EcoInvent. Dette kan skyldes at NREL ikke inkluderer infrastruktur i systemgrensene. De høye utslippene kan for eksempel skyldes større utslipp fra raffinierene eller forskjellig metodikk ved beregningene, men dette er ikke gjort rede for i denne oppgaven. I tillegg er ikke utslippene av N₂O medregnet i utslippskoeffisienten i rapporten fra EcoInvent. EPA beregner PEF etter metode i Tabell 3.2. Som det går fram av tabellen er det langt mindre som inngår i systemgrensene enn i de andre tilfellene. Tabellen viser også at det er diesel som er brukt som beregningsgrunnlag, og resultatet for denne mener EPA er gyldig for både tung og lett fyringsolje.

Tabell 3.2: Beregningsmetode for energiforbruk ved dieselproduksjon [22]

Table 6 Summary of LEM Study Figures for Highway Diesel Fuel		
Highway Diesel Fuel Lifecycle	Energy Required (Btu/mile)	Energy Proportion Relative to End Use
Fuel Distribution and Storage	189	0.8%
Fuel Dispensing	45	0.2%
End Use	24,600	100.0%
Total	24,834	101.0%
Source: Table 51B, LEM Study, p. 400. Excludes feedstock recovery, transmission, and refining to be consistent with the method used for electricity.		

Figur 3.2 er hentet fra EcoInvent-rapporten og viser hvor det største forbruket av primærenergi oppstår. Bruk av kjernekraft utgjør under 0,1 % av total energi. Denne figuren viser derfor at det største energiforbruket oppstår i produksjonen av råolje.

Figur 3.2: Energiforbruk for forskjellige prosesser i verdikjeden til olje [15]



Naturgass

Naturgass har samme energiforbruk og GHG-utslipp knyttet til boring og infrastruktur som olje ved produksjon til havs i EcoInvent-rapporten. I denne rapporten og i rapporten til Värmeforsk gjelder systemgrensene helt i fra utforsking av gassfelt til regional distribusjon. EcoInvent oppgir to forskjellige typer gass; gass hos konsument under høyt trykk og gass hos konsument under lavt trykk. Det er antatt at gass under høyt trykk er det som best kan sammenlignes med verdiene i rapporten til Värmeforsk siden systemgrensene til Värmeforsk stopper ved energisentral. I begge disse rapportene brukes en miks av gass fra flere ulike nasjoner der de største er Russland, Norge, Nederland, Tyskland, England og Algerie. Naturgass i EcoInvent-rapporten er transportert til Antwerpen i Belgia og i Värmeforsk sin rapport er det transportert til Sverige. LNG inngår i beregningene i begge rapportene. Som for olje så tar EPA kun hensyn til tap mellom produksjon og sluttbruker. Energibruk og GHG-utslipp knyttet til utvinning og produksjon inngår ikke. Videre beregner de PEF på bakgrunn av gjennomsnittlig produksjon, tap og levering til sluttbruker som vist i Tabell 3.3.

Tabell 3.3: Beregningsmetode for energibruk ved produksjon av naturgass [22]

Table 5 Source-Site Ratio Calculations for Natural Gas				
Year	Sum of Pipeline and Distribution Use, Plant Fuel, and Delivery to Consumers (MM ft ³)	Sum of Pipeline and Distribution Use, Plant Fuel (MM ft ³)	Delivery to Consumers (MM ft ³)	Source-Site Ratio
2001	21,491,213	996,105	20,495,108	1.049
2002	22,276,435	1,049,423	21,227,012	1.049
2003	21,518,122	955,395	20,562,727	1.046
2004	21,657,411	932,528	20,724,883	1.045
2005	21,484,879	939,972	20,544,907	1.046
Average (2001-2005)				1.047
Source: Table 1. Summary Statistics for Natural Gas in the United States, 2004-2005. <i>Natural Gas Annual 2005</i> . Excludes Lease Fuel to be consistent with the method for electricity. http://www.eia.doe.gov/oil_gas/natural_gas/data_publications/natural_gas_annual/nga.html				

For verdiene i fra NREL gjelder samme forutsetninger som for fyringsolje. Verdiene er også her omregnet fra slik de står angitt i originalrapportene, og omregningene finnes i **Vedlegg A**.

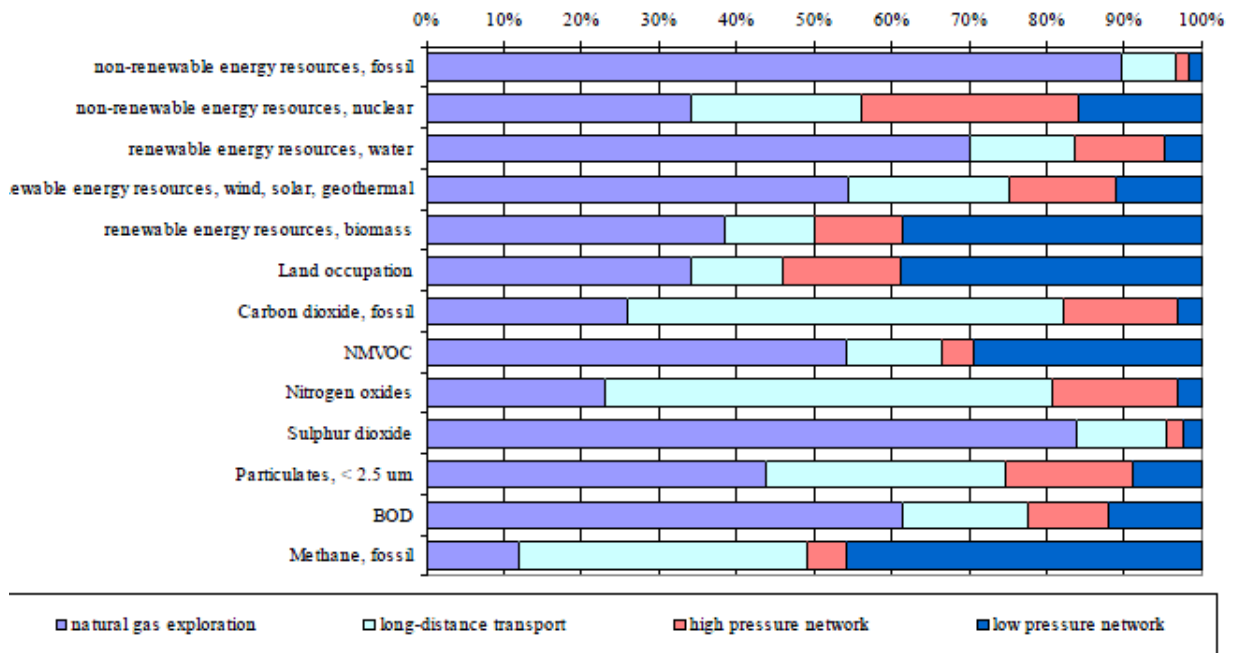
Tabell 3.4: PEF og utslippskoeffisient for naturgass

	<i>EcoInvent</i>	<i>Värmeforsk</i>	<i>EN 15603:2008</i>	<i>EPA</i>	<i>NREL</i>
<i>PEF</i>	1.244	1.09	1.36	1.047	1.092
<i>g CO₂eq / kWh</i>	39.89	36.47	277		38.76

Som for olje så utgjør energibruken knyttet til utvinning av naturgass den største delen av total energibruk. Dette kommer frem i Figur 3.3. Av den totale energibruken i verdikjeden til naturgass utgjør fossil energi over 99,5 %. (Dette kommer ikke fram i Figur 3.3, men er vist i EcoInvent-rapporten). Systemgrensene benyttet av EPA vil føre til langt lavere for PEF enn det de andre kildene oppgir. Utslippskoeffisienten er i EN 15603:2008 langt høyere enn de andre. Dette skyldes igjen at forbrenning er inkludert i EN 15603:2008, men ikke i de andre rapportene. PEF er også høyere i EN 15603:2008. Utslippskoeffisientene er relativt like for de rapportene som angir denne (bortsett fra EN 15603:2008). I rapporten fra NREL så er ikke energibruk og GHG-utslipp knyttet til infrastruktur tatt med. Men i samme rapport sier de at utslippene knyttet til dette er meget små og lite viktige. Grunnen til at det derfor er et større energiforbruk og utslipp i denne rapporten kan skyldes forskjell i databaser, eller forskjellig utstyr brukt til å pumpe opp og transportere gassen. Transportavstanden som blir brukt kan også spille inn.

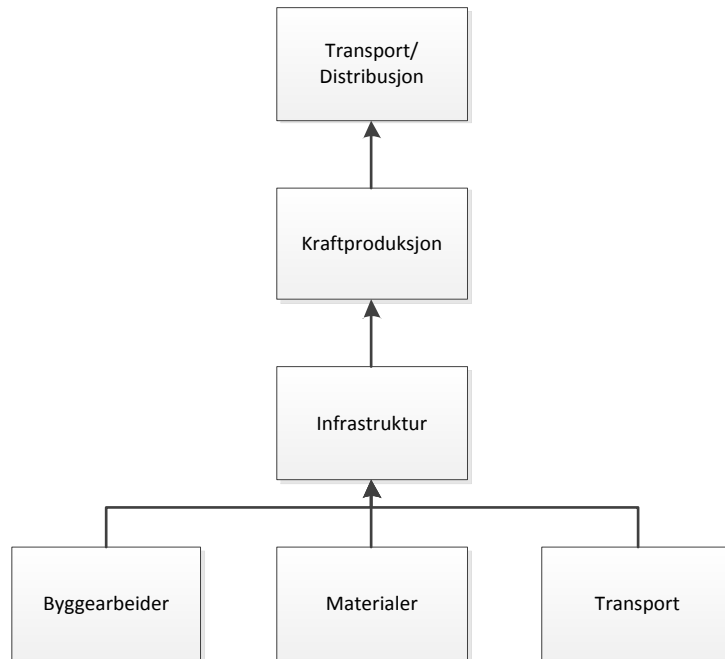
Noe som også kan påvirke PEF i de forskjellige rapportene er den funksjonelle enheten som blir brukt. I EN 15603:2008 blir det bestemt at det er den øvre brennverdien som skal benyttes ved beregninger. En PEF vil bli påvirket av om det er øvre eller nedre brennverdi som blir brukt. Värmeforsk bruker 1 MJ med en nedre brennverdi på 37,468 kJ/Nm³ (omregnet fra slik den står i rapporten) som funksjonell enhet, mens de samtidig sier at det er øvre brennverdi som benyttes på alle inndata. Resultatet av dette er en PEF som er høyere enn det den ville vært dersom øvre brennverdi ble brukt som funksjonell enhet. Derfor er det litt merkelig at PEF i denne rapporten er såpass mye lavere enn PEF som er angitt i EcoInvent-rapporten. EcoInvent-rapporten angir ikke om det blir brukt øvre eller nedre brennverdi, men den viser at forskjellene er betydelige, både mellom øvre og nedre brennverdi, og mellom brennverdiene for naturgass i de forskjellige landene som er med i beregningene.

Figur 3.3: Energiforbruk for forskjellige prosesser i verdikjeden til naturgass [15]



3.2.2 Vannkraft fra vannreservoarer

Figur 3.4: Verdikjede for elektrisitet fra vannkraft⁴



Figuren over viser systemgrensene for vannkraft, fra konstruksjon av demning til elektrisk energi levert hos kunde. Infrastruktur er det som bidrar mest til energiforbruk og GHG-utslipp for et vannkraftverk [21], og infrastruktur bør dermed være med innenfor systemgrensene ved beregning av PEF og utslippskoeffisient for vannkraft.

I rapporten fra EPA så inngår ikke vannkraft. For vann-, vind- og solkraft antar NREL at primærenergien som brukes er den samme som elektrisiteten som blir produsert av disse kildene. De tar altså ikke hensyn til energibruken i bygging av demninger og annen infrastruktur. De oppgir heller ingen utslippskoeffisient. EcoInvent tar utgangspunkt i sveitsiske demninger med en høyde på mer enn 30 meter. De tar hensyn til de viktigste materialene som brukes, energien som kreves, transport av materialer og alle GHG-utslipp knyttet til materialer, energi og transport av materialer. De tar og hensyn til GHG-utslippene som forårsakes av endring av landområder. Beregningene er utført på bakgrunn av mer enn 50 sveitsiske anlegg. Rapporten fra EcoInvent tar også med beregninger for andre områder som for eksempel Finland. Data som er brukt i disse beregningene er de samme som for de sveitsiske, bortsett fra at det er brukt en annen elmiks, størrelse på oversvømte områder og dermed utslipp av klimagasser, enn for de sveitsiske anleggene. Som for EcoInvent så omfatter også systemgrensene i rapporten fra Värmeforsk alt fra vugge til grav, med konstruksjon av demning, kraftstasjon og drift av kraftverket. De tar utgangspunkt i 14 svenske kraftverk. Elektrisiteten som brukes til å drifte kraftverket kommer i fra vannkraft. Det er ikke nevnt hva slags elektrisitet som brukes til konstruksjon av demning og kraftstasjon. Levetiden i de svenske kraftverkene er anslått til å være 60 år. I rapporten fra EcoInvent har stålet som brukes i turbin og rør en levetid på 80 år mens sement til demning og vannveier har en levetid på 100 -150 år. Rapporten fra Värmeforsk angir PEF

⁴ Basert på referanse [21].

og utslippskoeffisienter for vannkraft med og uten distribusjon. Denne distribusjonen antas å være til industrikunder, og det er kun 3 % tap i overføringen. Ecolnvent tar derimot ikke med tap i distribusjon i rapporten sin, kun el ut fra kraftverk er oppgitt.

Tabell 3.5: PEF og utslippskoeffisient for el fra vannkraft

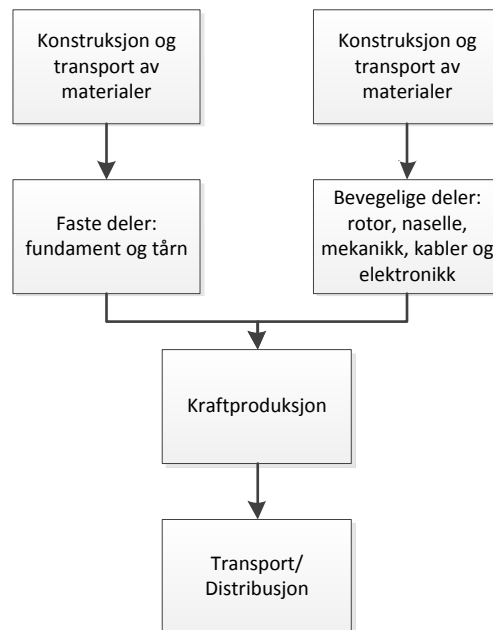
	<i>Ecolnvent Sveits</i>	<i>Ecolnvent Finland</i>	<i>Värmeforsk Prod</i>	<i>Värmeforsk Prod+dist</i>	<i>NREL</i>	<i>EN 15603:2008</i>
<i>PEF</i>	1.294	1.294	1.10	1.21	1.0	1.5
<i>g CO₂eq / kWh</i>	4.10	34.2	4.54	5.82		7

Ecolnvent tar med tap i konvertering ved beregning av PEF. Dette er ikke tatt med i beregningene fra Värmeforsk. Kun den potensielle energien i vannet er tatt med her (som gir i seg selv en PEF på 1,0).

I Ecolnvent-rapporten blir det klarlagt at material- og energibruk under konstruksjon er den største bidragsyteren til totalt energiforbruk og utslipp av klimagasser for vannkraft. Värmeforsk kommer frem til at de største utslippene av klimagasser knyttet til vannkraft kommer fra konstruksjon og oversvømming av landområder. EN 15603:2008 krever ikke at konstruksjon av demninger og oversvømming av landområder blir medregnet i PEF og utslippskoeffisient. De store forskjellene i utslipp i de to rapportene fra Ecolnvent skyldes at det er et mye større GHG-utslipp fra biomateriale for finske kraftverk enn for sveitsiske. Også andre rapporter kommer frem til at det er konstruksjon og oversvømming av landområder som fører til de største utslippene av klimagasser [18, 26], men det er stor spredning i resultatene de forskjellige rapportene kommer frem til. Utslippene av klimagasser varierer helt i fra 4,10 g CO₂eq/kWh til 237 g CO₂eq/kWh [27]. 237 g CO₂eq/kWh i [27] gjelder teoretiske beregninger for Tucuri-prosjektet i Brasil. Rapporten legger vekt på at oversvømming av tropiske områder kan gi mye større bidrag til drivhuseffekten enn andre områder. Det er ikke klarlagt hvorfor PEF i EN 15603:2008 er så mye høyere enn de andre. Verdiene i EN 15603:2008 er hentet fra Ecolnvent, så PEF burde vært i nærheten av verdiene for Sveits og Finland.

3.2.3 Vindkraft

Figur 3.5: Verdikjede for elektrisitet fra vindkraft⁵



Som for vannkraft så er infrastruktur for vindkraft en av de viktigste årsakene til energiforbruk og utslipp av klimagasser. Dermed bør dette også inngå innenfor systemgrensene ved beregning av PEF og utslippskoeffisient for vindkraft.

Ecolnvent oppgir energibruk og utslipp av klimagasser både for offshore og onshore vindkraft. Offshore vindkraft er basert på vindparker i Oceania med 2 MW vindmøller som har en levetid på 20 år. Onshore vindkraft er basert på sveitsiske vindparker med 800 kW vindmøller som har en levetid på 40 år for faste deler, og 20 år for bevegelige deler. Innenfor systemgrensene inngår alt fra vugge til grav med konstruksjon av faste og bevegelige deler, transport, avfallshåndtering og også operasjon av vindmøllen. Med konverteringstap innenfor systemgrensene vil vindkraft få en svært høy PEF som kan gjøre at vindkraft ser ut som et langt mer ugunstig alternativ enn fossile brensler. Dette skyldes den lave kapasitetsfaktoren til vindkraft. Värmeforsk sin rapport inkluderer også alt fra vugge til grav når de analyserer vindmøller. Levetiden til vindmøllene er antatt å være 20 år. Videre oppgir Värmeforsk resultater fra vindkraftproduksjonen alene og for produksjon sammen med distribusjon. Distribusjonstapene er antatt å være 5 %. Värmeforsk inkluderer verken konverteringstap eller den produserte energien.

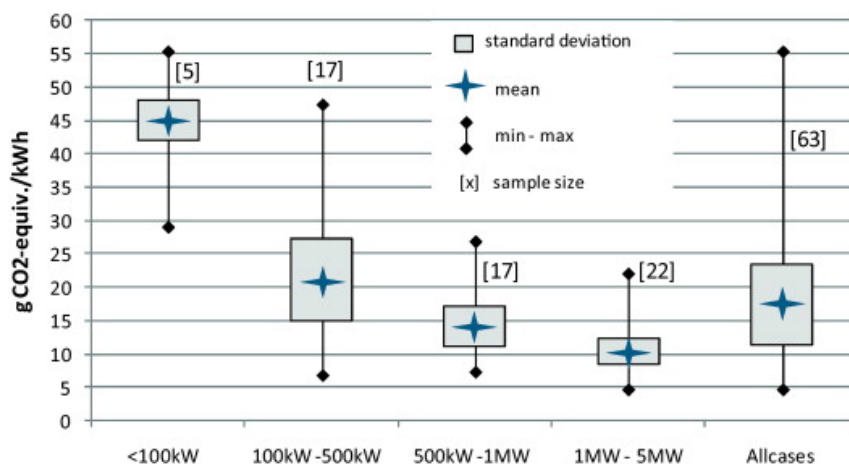
⁵ Basert på referanse [21].

Tabell 3.6: PEF og utslippskoeffisient for el fra vindkraft

	EcolInvent onshore ⁶	EcolInvent onshore ⁷	EcolInvent offshore ⁶	EcolInvent offshore ⁷	Värmeforsk produksjon	Värmeforsk prod+dist
PEF	4,075	0,074	4,061	0,060	0,069	0,079
g CO ₂ eq/ kWh	13,6	13,6	12,3	12,3	13,2	15,23

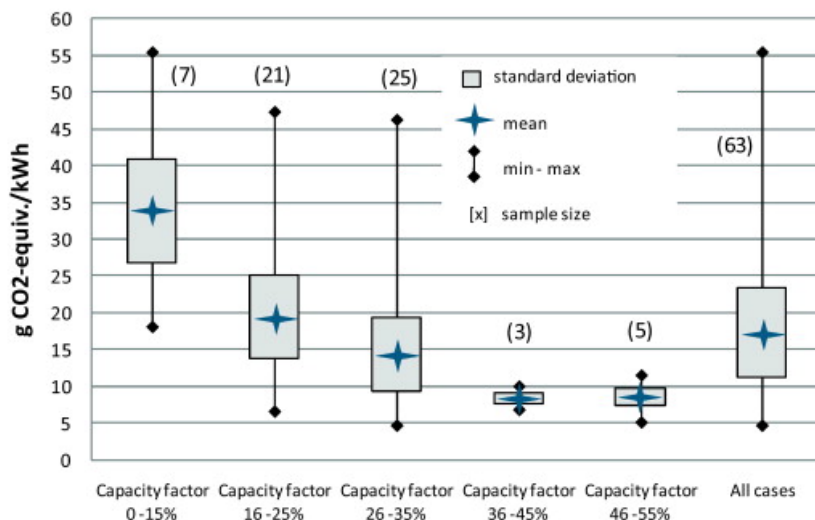
Utslippene av klimagasser er relativt like i begge de to rapportene. Det samme er PEF, bortsett fra hvis man tar med energien fra vinden, og de store tapene av denne energien på grunn av vindkraftens lave kapasitetsfaktor. Värmeforsk hevder at konstruksjon av vindmølleparken, lokale vindforhold, installert effekt, antall driftstimer og teknisk levetid er det som avgjør forbruket av primærenergi og GHG-utslipp. EcolInvent kommer fram til at det er kapasitetsfaktoren, infrastrukturen, levetiden og den installerte effekten som avgjør forbruket av primærenergi og GHG-utslippene. Dermed spiller vindforholdene på stedet der vindmølleparken ligger en viktig rolle. [26] påpeker at det finnes mange forskjellige studier på vindkraft og klimakonsekvensene vedrørende vindkraft. Disse studiene baserer seg enten på én spesifikk vindmølle, én bestemt vindmøllepark eller gjennomsnittsverdier for mange forskjellige studier. *Figur 3.6* viser grafisk hvordan utslippskoeffisienten avhenger av både kapasitetsfaktor og effekt. Resultatene er basert på mange forskjellige studier. Det kommer klart frem av figuren at GHG-utslippene knyttet til vindkraft er veldig varierende avhengig av kapasitetsfaktor og turbinstørrelse.

Figur 3.6: Variasjon i utslippskoeffisient ved forskjellig effekt og kapasitetsfaktor [26]



⁶ Inkludert vindenergi og tap av denne ved konvertering

⁷ Inneholder ikke tap av energi fra vind eller sagt på en annen måte er virkningsgraden 100 %



3.2.4 Bioenergi fra flis og pellets

Flis og pellets er behandlet i kapittel 6 og 7. Derfor vil kun verdiene som er kommet frem til i denne masteroppgaven bli gjengitt i dette kapittelet og sammenlignet med verdier fra andre studier. Systemgrenser og metodikk som er brukt i denne masteroppgaven står nøye forklart i kapitlene for flis og pellets.

Flis

Tabell 3.7: PEF og utslippskoeffisient for flis

	Flis fra stammevirke ⁸	Skogsflis Värmeforsk	Flis fra heltre ⁸	Tynningsvirkeflis Värmeforsk
PEF	1,042	1,050	1,026	1,020
g CO ₂ eq/ kWh	10,46	8,61	7,62	6,55
	Flis fra GROT, velteplass ⁸	Flis fra GROT, bunter ⁸	Flis fra GROT Värmeforsk	EN 15603:2008
PEF	1,026	1,056	1,030	1,08 ⁹
g CO ₂ eq/ kWh	7,91	15,19	6,92	12,75

Systemgrensene i rapporten fra Värmeforsk går helt i fra bestandspleie som stammekvisting, ungskogpleie og gjødsling. I denne masteroppgaven, (1), er ikke dette tatt med innenfor systemgrensene. I tillegg inkluderer Värmeforsk produksjon av arbeidsmaskiner. I (1) er dette bare inkludert for maskiner som brukes til transport av tømmer, bunter og flis. Verdien som er oppgitt fra EN 15603:2008 er et gjennomsnitt av de verdiene som finnes i vedlegg E i denne rapporten. Dette er verdier for sagflis, «log» (vedkubbe), vedkubbe av bøk og vedkubbe av gran.

For skogsflis i rapporten fra Värmeforsk er det antatt en blanding av stammevirke som flises og GROT. GROT betyr hogstavfall som grener og topper. Fuktigheten i brenselet er på 40 % og H_e er på 2138 kWh/fm³ som er brennverdien for furu [17]. Stammevirke i (1) har til sammenligning en brennverdi på 1941 kWh/fm³ ved samme fuktinnhold siden det her er antatt gran som tresort. PEF og

⁸ Beregninger utført i denne masteroppgaven

⁹ Gjennomsnitt av verdier i EN 15603

utslippskoeffisient blir redusert med økning i brennverdi. Värmeforsk bruker en middelavstand på 47 km for transport av skogsflis. I (1) transporteres først tømmer 90 km til terminal før det flises for deretter å bli transportert 30 km til kunde. Siden GROT er inkludert for skogsflis i rapporten fra Värmeforsk, kan det antas at energiforbruk knyttet til hogst og terrengtransport er en av grunnene til at Värmeforsk har en høyre PEF. Lengre transportavstand kan være en av grunnene til at utslippskoeffisienten er større i (1) enn i rapporten fra Värmeforsk.

Tynningsvirke i rapporten fra Värmeforsk forutsetter transport av tynningsvirket fra velteplass til forbruker før det flises hos forbruker. Transportavstanden er 40 km. Det er kun GHG-utslipp knyttet til brenselforbruket som er inkludert. Tynningsvirket fjernes for GROT i skogen før det transporteres. På denne måten kan det sammenlignes med flis fra stammevirke i (1). Fuktigheten i brenselet varierer mellom 35-60 %. Beregningen av utslipp av klimagasser er i henhold til fornybardirektivet [8] for flytende biobrensler. Siden GROT fjernes fra trestammene til tynningsvirket i [17] vil terrengtransport ha et lavere energiforbruk enn i (1). Dette kan være en av grunnene til at tynningsvirke i [17] får en så lav PEF og utslippskoeffisient som den gjør.

For GROT starter Värmeforsk sine systemgrenser etter hogst av stammevirke. I motsetning til (1) blir altså ikke noe av energiforbruket og GHG-utslippet ved hogst allokert til GROT. Verdien for flis fra GROT i rapporten til Värmeforsk er basert på flising av GROT på velteplass siden dette dominerer for GROT i Sverige. Transportavstanden for flis er 50 km, altså 20 km lengre enn det som er forutsatt i referansescenariot i (1). Videre oppgir Värmeforsk brennverdien til å være 19,2 MJ/kg med $MC_{wet}=0$ %, og fuktinnhold på flisen til å være 40 %. I (1) er brennverdien 19,15 MJ/kg og fuktinnholdet er også 40 %. Värmeforsk inkluderer også massetap for lagring, noe som ikke er inkludert i (1). Ved å unngå allokering og starte systemgrensene for GROT ved terrengtransport i (1) vil PEF øke til 1,027 og utslippskoeffisienten øker til 8,149 g CO₂eq/kWh. Hvorfor de øker når man ikke allokere er forklart i kapittel 6.2.1. Økt transportavstand kan være en av grunnene til at PEF er høyere i rapporten fra Värmeforsk, men det er da litt vanskelig å forklare hvorfor de har en lavere utslippskoeffisient. Uten å vite alle antagelser og prosesser som er benyttet langs hele verdikjeden kan det ikke gis svar på dette.

Flis fra GROT som bntes og transporteres til terminal før det flises er det ikke funnet noe sammenligningsgrunnlag for.

Pellets

For pellets vises PEF og utslippskoeffisient for «beste» og «verste» scenario som har blitt beregnet i denne masteroppgaven. Antagelser, metodikk og analyse av disse resultatene samt andre mulige scenarioer for pellets står forklart i kapittel 7.

Tabell 3.8: PEF og utslippskoeffisient for pellets

	«beste scenario» ¹⁰	«verste scenario» ¹⁰	Pellets Värmeforsk
PEF	1,152	1,334	1,180
g CO ₂ eq/ kWh	14,867	68,962	15,276

¹⁰ Beregninger utført i denne masteroppgaven

Verdiene i rapporten fra Värmeforsk tar utgangspunkt i pellets som framstilles av våt sagflis fra sagbruk. Systemgrensene går i fra skogbruk med hogst, terrengtransport og transport av tømmer til sagbruk til levering av pellets hos kunde. Masseallokering er brukt i skogbruksprosessene og transporten av tømmeret, og energiallokering er brukt for sagbruksproduktene. Energien som brukes til tørking består av en miks av faste biobrensler. El som benyttes i prosessen er antatt å være en nordisk elmiks.

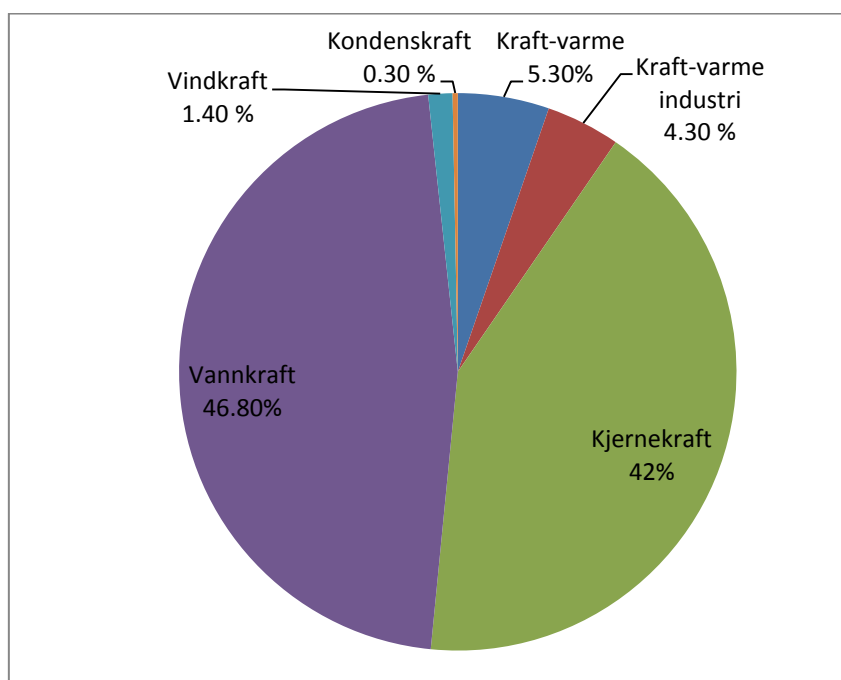
Pellets i beste scenario i (1) og pellets fra Värmeforsk har omtrent samme verdier for PEF og utslippskoeffisient. Siden råstoffet er sagflis vil energibruken for flishogging være mye lavere enn i (1), men dette energiforbruket utgjør en svært liten del av det totale energiforbruket også i (1). Transportavstand for råvarer har også langt lavere bidrag til PEF og utslippskoeffisient siden det er allokert mellom sagtømmer og sagflis. Transportavstand for pellets og råvarer er ukjent.

Elmiks er i beste scenario i (1) også antatt å være samme nordiske miks som Värmeforsk har brukt. I dette beste scenarioet utgjør bruken av el til pelletering, kjøling og annet elforbruk på anlegget for omtrent 75 % av det totale primærenergiforbruket. Transport av pellets utgjør over 11 % mens det resterende er fordelt på tørking av råvarer, skogbruk og transport av tømmer. Bruken av el fører også til 43,5 % av utslippene av klimagasser. Transport av pellets fører til 24 % av utslippene, mens de resterende utslippene fordeler seg på samme måte som for energibruken. Det er uvisst hvordan energibruken og utslippene fordeler seg mellom ulike prosesser i rapporten fra Värmeforsk.

3.2.5 Elektrisitetmiks

Hvordan el skal miljøvurderes er et spørsmål som diskuteres mye, spesielt i de nordiske landene. Forskjellige valg av metodikk har mye å si når det kommer til primærenergiforbruk og utslipp av klimagasser. Om det er marginalproduksjon av el eller gjennomsnittsproduksjon av el er også avgjørende. Värmeforsk gjør sine beregninger for svensk elmiks basert på gjennomsnittsproduksjon av el i året 2008. Sverige hadde da en fordeling i elproduksjonen som vist i Figur 3.7. Videre har de ved kraftvarmeproduksjon allokert ved å bruke substitusjonsmetoden. Denne blir nøyere forklart i kapittel 4.1.1. Beregningene inkluderer import, eksport og tap i overføring og resultatet av beregningene til Värmeforsk er vist i Tabell 3.9. Värmeforsk har også beregnet PEF og utslippskoeffisient for en nordisk elmiks. Dette er beregnet på samme måte som for den svenske elmiksen. Värmeforsk presiserer at disse beregningene kan variere, avhengig av allokeringsmetode, virkningsgrader og utslippsfaktorer.

Figur 3.7: Sveriges elproduktion i 2008 [17]



Tabell 3.9: Beräkning av PEF och utslippskoefficient för svensk elmiks [11]

Energislag/ Produktionsteknik	Genererad El, TWh	g CO _{2-eq} / kWh bränsle ⁸	g CO _{2-eq} / kWh el ⁹	PEF (vagga t. grind)	PEF (vagga t. el)	CO _{2-eq} Mton	Primärenergi, TWh
Vindkraft	2.0	-	13.2		0.05	0.03	0.1
Vattenkraft	68.4	-	4.5		1.10	0.31	75.6
Kärnkraft	61.3	-	3.5		2.92	0.21	178.8
Kondenskraft ¹	0.8	295	654	1.11	2.51	0.55	2.1
Kraftvärme el ²	7.2	-	242		1.35	1.74	9.7
Mottryck i industri ³	6.3						
varav:							
El från bio & torv ⁴	3.6	52	105	1.05	2.12	0.38	7.7
El från olja	1.1	295	582	1.11	2.23	0.65	2.5
El från gas	0.4	249	425	1.09	1.85	0.16	0.7
El från kol och koks	1.1	412	768	1.15	2.29	0.87	2.6
Gasturbiner	0.03	249	474		2.07	0.01	0.054
Totalt genererat⁵	146.0						
Netto	-2.0						
Import(+)/Export(-)⁶							
Nätförluster	-11.0						
Elanvändning i Sverige⁷	-133.0						
Totalt [Mton CO_{2-eq} och TWh primärenergi] per kWh levererad el inklusive import/export, g CO_{2-eq}/kWh och kWh/kWh						4.9	280
						36.4	2.1

Tabell 3.10: Beregning av PEF og utslippskoeffisient for nordisk elmiks [11]

	TWh	g CO ₂ - eq/kWh bränsle	g CO ₂ - eq/kWh el	PEF (vagga till grind)	PEF (vagga till el)	CO ₂ eq- Mton	Primärenergi, TWh
Kärnkraft	83.3		3.5		2.92	0.3	243
Annan termisk kraft¹	53.5						
- Kol	25.2	385	759	1.15	2.26	19.1	57
- Olje	1.8	289	571	1.11	2.19	1	4
- Torv	5.9	425	862	1.01	2.06	5.1	12
- Naturgas	19.5	249	474	1.09	1.97	8.8	38
- Övrigt ²	1.0	249	474	1.09	2.07	0.5	2
Totalt fornybart	277.2						
-Vattenkraft	238.4		4.5		1.10	1.1	263
- Övrigt fornybart	38.8						
- Vindkraft	10.2		13		0.05	0.1	1
- Biobränslen ³	20.2	10.8	23	1.06	2.3	0.5	47
- Avfall ⁴	4.4	113	222	0.05	0.09	1.0	0.4
- Geotermi	4.0	0	0	0	0	0	0
Totalt genererat⁵	412.5						
Import(+)/Export(-)	-1.5						
Nätføluster	-27.8						
Elanvändning i Norden ⁶	-383.4						
Totalt [Mton CO₂eq och TWh primärenergi]						37.5	668.1
per kWh levererad el inklusive import/export, g CO₂eq/kWh og kWh/kWh						97.3	1.74

Ecolnvent beregner energibruk og utslipp av klimagasser for flere forskjellige europeiske områder. Blant dem er UCTE som består av Østerrike, Belgia, Tyskland, Spania, Frankrike, Hellas, Slovenia, Kroatia, Bosnia, Serbia, Montenegro, Makedonia, Luxemburg, Nederland, Portugal og Sveits, CENTREL som består av Tsjekkia, Ungarn, Polen og Slovakia og NORDEL som består av Sverige, Finland, Danmark og Norge. Beregningene tar med import og eksport til områdene, samt tap i overføringer. For alle energiresursene som inngår i elproduksjonen inngår alt fra vugge til grav i systemgrensene (dette gjelder for resultatene fra Värmeforsk også). Videre gir Ecolnvent resultater avhengig av spenningen i nettet. Tapene i nettet er avhengige av om det er høyspenning, medium spenning eller lavspenning. Omforming fra høyspent til lavspent vil gi tap og dermed en økning i PEF. For en sluttbruker er det ofte lavspenning som blir brukt, og det er derfor viktig å se på denne når PEF skal vurderes i forhold til energibruk i bygninger. Resultatene for de forskjellige områdene for produksjon og lavspent elmiks er angitt i Tabell 3.12. Resultatene for Ecolnvent gjelder for gjennomsnittlig europeisk produksjon i år 2000.

EPA beregner PEF på bakgrunn av en amerikansk elmiks på omtrent 70 % elektrisitet fra fossile brensler, 20 % fra kjernekraftverk og 10 % fra fornybar energi. De tar hensyn til tap i omforming fra primær til sekundær energi (elektrisitet) og tap i nettverket. Beregningen deres er basert på all primärenergi som er konsumert for å generere elektrisitet i USA. Dette er dividert med netto generert elektrisitet minus tap i transmisjon og distribusjon. Resultatet er funnet ved å ta gjennomsnittet for årene 2000-2005 og vises i Tabell 3.11. NREL beregner sin PEF fra data for året 2004. Systemgrensene er de samme som for EPA. I 2004 så besto elektrisitetsproduksjonen i USA av 71 % el fra fossile brensler, 20 % el fra kjernekraft, 7 % fra vannkraft og 2 % fra andre fornybare kilder i følge NREL. Utslippsfaktorer er verken oppgitt fra EPA eller NREL.

Tabell 3.11: Metodikk for beregning av PEF (EPA) [16]

Table 4 Source-Site Ratio Calculations for Electricity				
Year	Primary Energy Consumed for Generation	Net Generation	T&D Losses	Source-Site Ratio
2001	38.56	12.69	1.20	3.356
2002	39.56	13.10	1.24	3.336
2003	39.62	13.13	1.24	3.332
2004	40.77	13.49	1.28	3.339
2005	41.60	13.78	1.31	3.336
Average (2001-2005)				3.340
Source: Electricity Flow (Figure 8.0) in the Annual Energy Review. Values in Quadrillion Btus (Quads). http://www.eia.doe.gov/emeu/aer/contents.html				

Tabell 3.12: PEF og utslippskoeffisient for forskjellige elmikser

	Värmeforsk svensk	Värmeforsk nordisk	EcolInvent NORDEL produksjon	EcolInvent NORDEL lavspent	EcolInvent UCTE produksjon
PEF	2,1	1,74	2,161	2,472	3,153
g CO ₂ eq / kWh	36,4	97,3	120	140	450
	EcolInvent UCTE lavspent	EcolInvent CENTREL produksjon	EcolInvent CENTREL lavspent	EPA	NREL
PEF	3,561	3,494	4,014	3,34	3,365
g CO ₂ eq / kWh	510	890	1000		

I Tabell 3.12 ser man at både PEF og utslippskoeffisient endrer seg i de forskjellige rapportene, og også for forskjellige områder. De to amerikanske rapportene oppgir en relativt lik PEF. For året 2004 beregnet EPA en PEF for amerikansk el på 3,339. Denne er ikke svært ulik NREL sin PEF for året 2004 som er på 3,365. Hovedgrunnen til at de er forskjellige skyldes at energiresursene som blir brukt til å produsere el også har forskjellig primærenergiforbruk. Derimot er det en stor forskjell mellom resultatene til EcolInvent og Värmeforsk. Värmeforsk nordisk og EcolInvent NORDEL lavspent ser på elmiks for samme land, bortsett fra at Island ikke inngår i beregningene til EcolInvent. Data for infrastruktur er basert på det sveitsiske nettverket i EcolInvent-rapporten, og levetiden til nettverket er antatt å være 30-40 år. Det er ikke angitt i rapporten til Värmeforsk hva slags antagelser som er gjort rundt nettverk, men alt tap knyttet til distribusjon er inkludert. I rapporten til Värmeforsk er distribusjonstapet på 6,7 %. EcolInvent angir derimot et tap i distribusjonsnett i Norden på 7,5 %.

Tap i distribusjonsnett vil påvirke PEF og utslippskoeffisient. EPA oppgir et tap i det amerikanske distribusjonsnett på 9,5 %. For enkelte land i Europa er distribusjonstapene langt høyere. Kroatia har et tap på 18,2 % i distribusjonsnett [21]. Med et så stort tap kreves det mye mer primærenergi per leverte energienhet, og PEF og utslippskoeffisient øker som følger av dette.

Island er ikke inkludert i EcolInvent-rapporten og det er en liten forskjell i distribusjonstap mellom rapportene fra EcolInvent og Värmeforsk. En annen grunn til at resultatet er forskjellig for EcolInvent og Värmeforsk, er at EcolInvent-rapporten baserer seg på nordisk elmiks i 2000 mens Värmeforsk

bruker nordisk elproduksjon i 2008 for å finne PEF og utslippskoeffisient. Ettersom teknologi utvikler seg og effektiviteten øker vil primærenergiforbruket synke. Det er ikke vurdert i denne oppgaven hvor mye dette faktisk har å si i Norden fra år 2000 – 2008, men det kan ha en innvirkning på resultatene. Det kan også ha vært en endring i elektrisitetssammensetningen i Norden fra år 2000 – 2008 uten at dette heller har blitt utforsket i denne oppgaven. Dersom det er en større grad av fornybar energi samlet sett i Norden i 2008 enn det var i 2000, så vil det også bidra til at PEF er lavere. Valg av allokeringsmetode og allokeringsfaktorer for kraftvarmeproduksjon er ikke nevnt i rapporten til EcoInvent. Dersom allokering ikke er brukt, men energibruken og GHG-utslippene fra all energi (varme og el) har blitt allokert til elproduksjon i rapporten til EcoInvent, vil dette slå negativt inn på PEF og utslippskoeffisient i EcoInvent-rapporten. Det er også viktig og merke seg at det kun er utslipp av CO₂ som er oppgitt i rapporten til EcoInvent, mens Värmeforsk oppgir CO₂-ekvivalenter.

3.3 Diskusjon av metodikk for ulike energislag

Det er ikke oppgitt hva slags virkningsgrad som brukes i de forskjellige beregningene. Ved kraftproduksjon fra vann eller vind vil virkningsgraden (for vannkraft) eller kapasitetsfaktoren (for vindkraft) ha mye å si for en PEF og en utslippskoeffisient. Värmeforsk bruker en virkningsgrad på 90 % for vannkraft. Ingen av de andre rapportene oppgir hva de bruker som virkningsgrad. En god francis- eller peltonturbin kan oppnå virkningsgrader på 90-95 % ved full vannføring [28], men det er viktig å huske på virkningsgraden til generator og transformator. Settes for eksempel virkningsgraden lik 0,90 for turbinen ved full vannføring, 0,95 for generatoren og 0,99 for transformatoren, får man en total virkningsgrad på $0,90 \cdot 0,95 \cdot 0,995 = 0,846$ [29].

Värmeforsk inkluderer fornybardelen av energien for vannkraft, men ikke for vindkraft. Vindkraft har en lav kapasitetsfaktor som gjør at primærenergibruken fra vind blir stor i forhold til hvor mye energi i form av elektrisitet man får ut. EcoInvent oppgir en PEF der primærenergien fra vind er inkludert på over 4, hvilket bare kan sammenlignes med PEF for el fra kullkraft i EN 15603:2008 som er på 4,05. En så høy PEF gjør at vindkraft virker meget ugunstig med tanke på primærenergibruk. Det samme gjelder for el produsert fra solenergi der virkningsgraden for solcellepanelene ofte er mellom 10 og 20 %. Det finnes tre dominerende metoder for å tolke primærenergiforbruk for fornybare energiresurser:

- *The direct equivalent method:* IPCC og FN definerer PEF for fornybare kilder utenom biomasse ut ifra første ledd med nyttbar energi [1]. I denne kategorien faller også kjernekraft og geotermisk energi. Primærenergi for fossil energi og bioenergi defineres ut i fra nedre brennverdi for brenslene. Primærenergiekvivalenten for el generert fra sol og kjernekraft er lik den mengden el som produseres.
- *The physical energy content method:* IEA og OECD bruker denne metoden til beregning av PEF for fornybare kilder der det fysiske energiinnholdet til primærenergikilden betraktes som primærenergiekvivalent [1]. For kjernekraft og geotermisk kraft er varme betraktet som den primære energiformen, og de konvensjonelle virkningsgradene for disse kildene er henholdsvis 33 % og 10 %. Dermed får disse ressursene en langt høyere PEF enn ved IPCC sin metode. Alle andre ikke-fossile ressurser har el som den primære fysiske energiformen og kan dermed betraktes som energiproduksjon med 100 % virkningsgrad (slik som i *The direct equivalent method*).

- *The substitution method*: Denne metoden brukes i litt forskjellige varianter av blant annet US Energy Information Administration (EIA) og BP (tidligere British Petroleum) [1]. Metoden går ut på at ikke-brennbare ressurser blir betraktet som om de blir substituert med brennbare energiresurser (som kull og olje). BP substituerer ved å anta en virkningsgrad på 38 % for generering av el fra vannkraft og kjernekraft.

Fornybardirektivet krever 20 % energi fra fornybare kilder samt 20 % energieffektivitet i EU innen 2020. For å oppnå energieffektivisering er hvordan man betrakter ikke-brennbare energiresurser svært viktig. Verdien for PEF som er oppgitt i EN 15603:2008 følger prinsippene til *The physical content method*. El fra kjernekraft har her en langt høyere PEF enn el fra vannkraft. Dersom *The direct equivalent method* hadde blitt valgt isteden ville målene om 20 % energieffektivisering vært lettere å oppnå. IPCC velger denne metoden fordi den gjør det enklere å sammenligne energiresurser som ikke slipper ut CO₂. Siden kjernekraft og geotermisk kraft ikke slipper ut CO₂ vil det bli enklere å se sammenhengen mellom PEF og utslippskoeffisient for energiresurser ved å bruke *The direct equivalent method*. Tabell 3.13 viser globalt primærenergiforbruk i 2008 ved de tre forskjellige metodene som beskrevet over. Figuren viser at kjernekraft og geotermisk kraft bruker mye mindre primærenergi globalt sett ved *Direct equivalent method* i forhold til ved *Physical content method*. Vannkraft og vindkraft får et mye større primærenergiforbruk ved å velge *The substitution method*. Fossile ressurser og bioenergi har samme primærenergiforbruk uavhengig av metode. I kapittel 3.2.2 -3.2.3 er det ikke eksplisitt forklart i referansene hvilke metodikk som ligger til grunn for resultatene. For vannkraft tar Värmeforsk kun med den potensielle energien i vannet ved beregning av PEF mens Ecolnvent tar med tap i konvertering i tillegg. For vindkraft oppgir Ecolnvent verdier der de både tar med tap i konvertering og der de unngår det. Värmeforsk tar ikke med konverteringstap for beregning av PEF for vindkraft.

Tabell 3.13: Sammenligning av metoder for å vurdere primærenergibruk [24]

Table A.II.1 | Comparison of global total primary energy supply in 2008 using different primary energy accounting methods (data from IEA, 2010a).

	Physical content method		Direct equivalent method		Substitution method ¹	
	EJ	%	EJ	%	EJ	%
Fossil fuels	418.15	81.41	418.15	85.06	418.15	79.14
Nuclear	29.82	5.81	9.85	2.00	25.90	4.90
Renewable:	65.61	12.78	63.58	12.93	84.27	15.95
<i>Bioenergy²</i>	50.33	9.80	50.33	10.24	50.33	9.53
<i>Solar</i>	0.51	0.10	0.50	0.10	0.66	0.12
<i>Geothermal</i>	2.44	0.48	0.41	0.08	0.82	0.16
<i>Hydro</i>	11.55	2.25	11.55	2.35	30.40	5.75
<i>Ocean</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
<i>Wind</i>	0.79	0.15	0.79	0.16	2.07	0.39
Other	0.03	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01
Total	513.61	100.00	491.61	100.00	528.35	100.00

Notes:

- 1 For the substitution method, conversion efficiencies of 38% for electricity and 85% for heat from non-combustible sources were used. BP uses the conversion value of 38% for electricity generated from hydro and nuclear sources. BP does not report solar, wind and geothermal in its statistics; here, 38% for electricity and 85% for heat is used.
- 2 Note that IEA reports first-generation biofuels in secondary energy terms (the primary biomass used to produce the biofuel would be higher due to conversion losses, see Sections 2.3 and 2.4).

Energikilder som ikke kan levere energi til enhver tid bør vurderes sammen med reservekraften de krever for å ha forsyningssikkerhet [27]. Dette gjelder spesielt variabel energi som vind og sol og sesongavhengig energi som elvekraftverk. Av de 20 % med fornybar energi Europa skal ha innen 2020, skal mye komme fra vind og sol. Samtidig er det viktig at man opprettholder energiforsyningssikkerhet. Dermed er man avhengig av fossile energikilder som kull, gass og olje når det er lite vind eller sol. Det er ikke funnet tegn i noen av rapportene som er studert om dette inngår eller ikke.

Energi fra vann og vind er vurdert med konvertering til elektrisitet og transmisjonstap i enkelte av tilfellene. For olje og gass er verken konvertering eller transmisjonstap inkludert i de fleste tilfellene. Dermed kan ikke PEF og utslippskoeffisient sammenlignes uten videre. Avhengig av metodikk så kan konvertering av energi stå for det største primærenergiforbruket for vannkraft og vindkraft. PEF for vind vil bli svært høy dersom energiinnholdet i vinden og tapet av denne energien ved konvertering til el skal inkluderes. Det vil derfor ikke være riktig å sammenligne PEF for fossile brensler som olje og gass før de er konvertert til varme eller el med elektrisk energi fra fornybare ressurser som vann og vind.

4 Allokering

Allokering er et sentralt tema ved beregning av PEF og utslippskoeffisienter for energiresurser. Når flere produkter oppstår som et resultat av en prosess må energiforbruket og GHG-utslippene knyttet til prosessen allokere til de forskjellige produktene. I mange tilfeller deler man opp i hovedprodukter og biprodukter eller flere co-produkter fra en prosess. Her er hovedproduktene de produktene som en gitt prosess primært er til for å framstille, mens biproduktene er produkter som kan bli gjort nytte av og som har en verdi i en eller annen form. Disse biproduktene vil uansett oppstå, selv om det ikke alltid er ønskelig at de gjør det. Hva som er hovedproduktet i en prosess er mer eller mindre subjektivt, men det er ofte det produktet som har den største økonomiske verdien som blir ansett å være hovedproduktet. Dette kan illustreres med to eksempler:

- Ved foredling av trevirke til sagtømmer og energivirke er sagtømmeret ofte hovedproduktet siden dette har den største økonomiske verdien. Fra trevirket er 50 % av stammevirket egnet til plankeproduksjon. Resten kan blant annet brukes som energivirke. I tillegg vil GROT fra hogst av stammevirke utgjøre omtrent 25 % av volumet til et helt tre[30]. Energivirke kan også bli ansett som hovedprodukt dersom det er med energiskog som formål at man feller trær.
- I et CHP-anlegg blir det produsert både varme og el ved forbrenning og disse kan sees på som co-produkter. Begge disse produktene er ønskelige, selv om el ofte har en større økonomisk verdi, og valget av hovedprodukt er subjektivt. Produksjon av både varme og el øker anleggets totale virkningsgrad, og det vil dermed redusere PEF og utslippskoeffisient per energimengde produsert i anlegget.

Problemet som oppstår ved flere produkter er hvordan man skal fordele primærenergiforbruket og klimagassutslippet mellom de forskjellige produktene. Innen LCA så er allokering et av de mest diskuterte aspektene, og en uniform konsensus om hvilke allokeringmetode som i alle tilfeller egner seg best finnes ikke [20].

4.1 Allokeringsmetoder

ISO 14040 anbefaler at allokering unngås så langt det lar seg gjøre, og at primærenergiforbruket og klimagassutslippene blir fordelt mellom de ulike produktene dersom det er tydelig hvor mye primærenergi og utslipp som er knyttet til hvert produkt [31]. Dersom primærenergiforbruket og utslippene av klimagasser ikke kan spores til de forskjellige produktene, må de allokere. De to mest brukte allokeringmetodene er allokering ved substitusjon, også kalt allokering ved systemekspansjon, og allokering ved partisjon, der produktene blir gitt en partisjonskoeffisient basert på energi, eksergi, pris eller andre. I følge [20] kan de totale bidragene for en gitt kategori (primærenergiforbruk eller utslipp av klimagasser) tilknyttet et biprodukt i uttrykkes med følgende forenklede notasjon:

$$W_{tot} = \sum_i^n w_i = \sum_i^n u_i y_i \quad (4.1)$$

Der:

W_{tot} Totalt bidrag for en gitt kategori

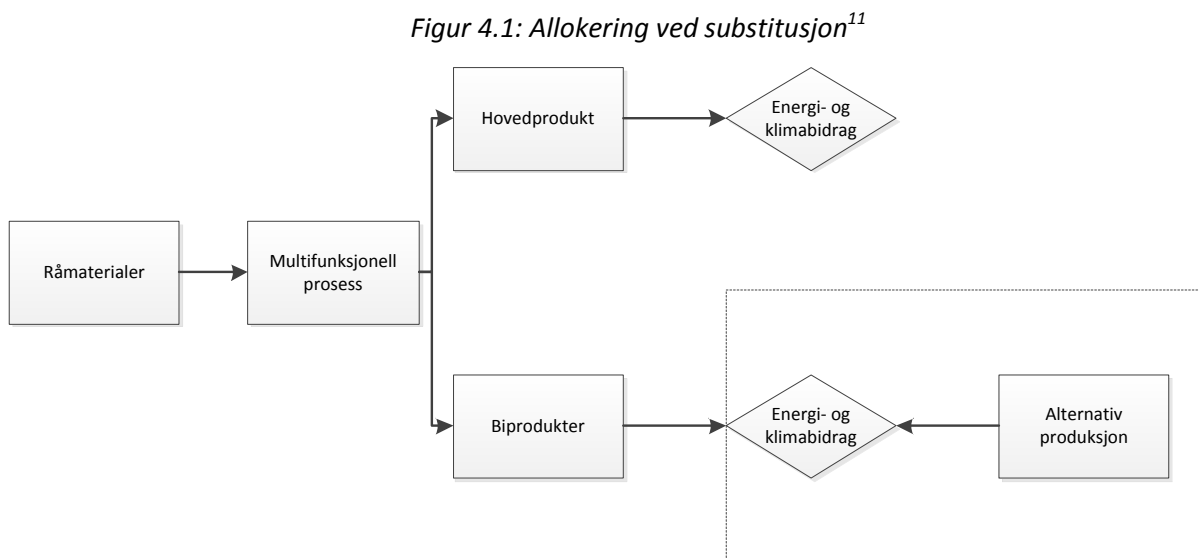
u_i enhetsbasert bidrag for biprodukt i (for eksempel kg CO₂eq/enhet)

y_i enhetsbasert mengde av de forskjellige produktene (for eksempel kWh_{varme}/kWh_{totalt} for CHP)

I tillegg er det gjort flere studier der allokering unngås og alle bidragene til energibruk og utslipp av klimagasser blir allokert til hovedproduktet. [32] hevder at dette er en passende metode dersom et av produktene dominerer med tanke på masse eller økonomisk verdi i tillegg til miljøkonsekvensene.

4.1.1 Allokering ved substitusjon

Når denne metoden blir benyttet utvides systemgrensene og det inkluderes en alternativ produksjonsmetode for produktene som produseres uten flere biprodukter. Primærenergiforbruk og utslipp av klimagasser for et produkt kan vurderes fra kjente utslippsfaktorer og primærenergiforbruk for den alternative produksjonsmetoden. Dette illustreres i Figur 4.1.



For denne metoden så er $i=1$ i ligning (4.1) definert som hovedprodukt og $i \neq 1$ er biproduktene.

Ligning (4.1) kan da skrives om til:

$$W_{tot} = u_1 y_1 + \sum_{i \neq 1}^n u_i y_i \quad (4.2)$$

Ved substitusjon så antar man at alle biprodukter har samme bidrag som bidragene ved det alternative produktet ($u_{i \neq 1} = u_{i \neq 1}^*$). Dermed kan ligning (4.2) omformes og skrives:

¹¹ Basert på referanse 20. Cherubini, F., A.H. Strømman, and S. Ulgiati, *Influence of allocation methods on the environmental performance of biorefinery products—A case study*. Resources, Conservation and Recycling, 2011. 55(11): p. 1070-1077.

$$u_1 = \left(W_{tot} - \sum_{i \neq 1}^n u_i^* y_i \right) y_1^{-1} \quad (4.3)$$

Denne metoden forutsetter at man kjenner til primærenergiforbruk og GHG-utslipp for de alternative produktene og det totale primærenergiforbruket og GHG-utslippet. Ved produksjon av el og varme sammen i et biobasert CHP-anlegg, kan man for eksempel erstatte varmeproduksjonen med varmeproduksjon fra en gasskjel som man kjenner primærenergiforbruk og GHG-utslipp for. Dermed kan man finne primærenergiforbruk og GHG-utslipp for den elektriske energien hvis man i tillegg vet det totale primærenergiforbruket og GHG-utslippet for kraftvarmeproduksjonen. Valget av alternativt produkt er ofte basert på marginalproduksjon [20] og det reflekterer hvordan biproduktet hadde blitt produsert dersom det ikke hadde oppstått i produksjonen. Dersom el produsert fra kull blir betraktet som alternativ produksjon til el fra et biobasert CHP-anlegg, vil hovedproduktet, varmen som blir produsert, ha et lavt primærenergiforbruk og lavt utslipp av klimagasser.

4.1.2 Power Bonus Method

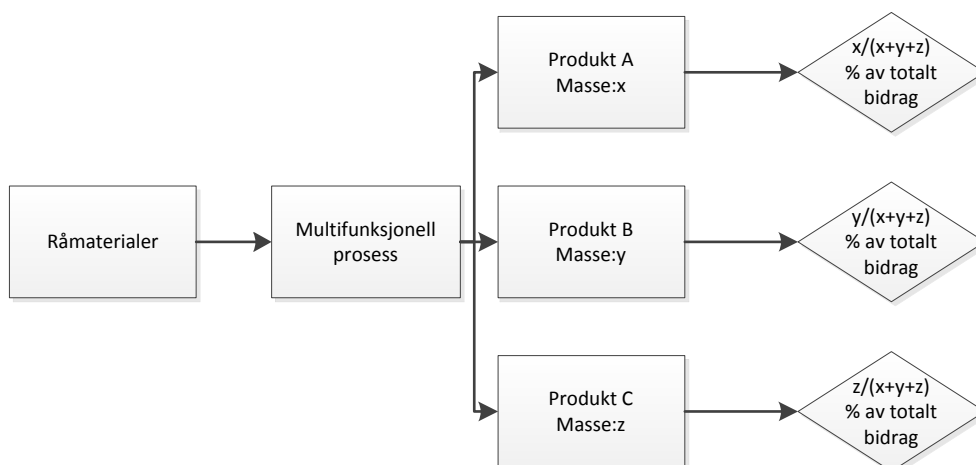
Denne metoden er en variant av substitusjonsmetoden for samproduksjon av kraft og varme i et CHP-anlegg. EN 15316-4-5:2007 [33] sier at denne metoden skal benyttes for å beregne ytelsen til fjernvarme fra CHP. Varmen blir i denne metoden ansett som hovedprodukt, mens el som blir produsert er en bonus som fører til at man unngår å produsere el et annet sted med en annen teknologi.

Siden el produsert blir sett på som en bonus, så kan primærenergien som ville blitt brukt for å generere samme mengde el et annet sted subtraheres fra primærenergien som brukes i CHP-anlegget. Besparelsene i primærenergi er derfor avhengig av hvilke type el man velger å erstatte. Marginalproduksjon av el er enten el fra kull eller gass, og en av disse vil det da være fornuftig å erstatte den produserte elektrisiteten med.

4.1.3 Allokering ved partisjon

Allokering ved partisjon er basert på en kunstig oppdeling av en multifunksjonell prosess til et antall uavhengige monofunksjonelle prosesser som er matematiske konstruksjoner og ikke eksisterer som reelle tilfeller [20]. Dette betyr at bidragene (primærenergiforbruk og GHG-utslipp) blir delt mellom de forskjellige co-produktene ved å benytte et bestemt kriterium basert på for eksempel energi, masse eller pris. Dette blir illustrert i Figur 4.2.

Figur 4.2: Allokering ved partisjon der masse er valgt som partisjonsvariabel¹²



Denne metoden krever at man innfører en partisjonsvariabel, α , som beskriver andelen av bidragene til primærenergiforbruk og GHG-utslipp til hvert co-produkt. Da kan ligning (4.1) skrives om til:

$$u_i y_i = \alpha_i W_{tot} \quad (4.4)$$

Slik at

$$u_i = \alpha_i W_{tot} y_i^{-1} \quad (4.5)$$

Partisjonskoeffisienten kan regnes ut på følgende måte:

$$\alpha_i = \frac{y_i c_i}{\sum_i^n y_i c_i} \quad (4.6)$$

Der

y_i er strømmen av co-produkt gitt i masse, energi, pris eller andre enheter

c_i er spesifikk partisjonstall som er relatert til enheten for y_i (f.eks. MJ/enhet eller €/enhet)

$0 < \alpha < 1$

$$\sum_i^n \alpha_i = 1$$

For eksempel kan man allokere basert på økonomi ved å bruke denne metoden. Tar man kraftvarmeproduksjon som et eksempel vil α_{el} være den økonomiske verdien til elektrisiteten som blir levert dividert på den samlede økonomiske verdien til elektrisiteten og varmen som blir levert. Partisjonskoeffisienten for varme, α_h , blir dermed $1 - \alpha_{el}$. Ved massebasert allokering så er utregningen av α basert på den relative vekten til co-produktene til den totale massen for alle produktene. Denne allokeringmetoden kan brukes så lenge co-produktene har en masse av

¹² Basert på referanse [20].

betydning. Når produktene er uten vesentlig masse, som for eksempel varme og el, så vil det være bedre å allokere basert på energiinnhold eller eksergiinnhold.

4.2 Konsekvenser ved valg av allokeringsmetode

Valg av allokeringsmetode påvirker beregningen av PEF og utslippskoeffisient i de fleste tilfeller. Siden det ikke er noen felles enighet om hvilke metode som skal brukes i alle tilfeller er det opp til forskere og andre som jobber med LCA å vurdere hvilke metode som skal brukes. Enkelte rapporter unngår alle former for allokering mellom co-produkter og allokere alle energi- og miljøkonsekvenser til hovedproduktet i en prosess [34]. Motivasjonen for dette er at det ikke finnes store nok markeder for co-produktene til at de vil ha noen påvirkning, eller at det er så stor usikkerhet rundt hvilke metode som skal velges.

I et oljeraffineri prosesseres råolje til flere ulike produkter som blant annet diesel, parafin, fyringsoljer, LNG og LPG. For å finne PEF og utslippskoeffisient for fyringsolje må man allokere den totale energibruken og GHG-utslippene fra prosesseringen til de forskjellige produktene. [21] bruker massebasert partisjonsallokering. Masse velges også som partisjonsvariabel i [23] og i [17]. Alle produktene fra et oljeraffineri har et stort bruksområde så det vil være galt å unngå allokering for enkelte av produktene. Produktene fra et oljeraffineri kan antas å være marginalprodukter siden samme produkter produsert fra et bioraffineri ville blitt prioritert. Dermed vil det ikke være logisk å bruke substitusjonsmetoden. Prisene på produktene er også relativt like [35], så en forskjell i bidrag til PEF og utslippskoeffisient blir lite tydelig gjennom en økonomisk allokering. [36] kommer fram til i deres studie om allokering for petroleumsprodukter at allokering basert på masse, økonomi og energiinnhold kan gi forskjellige resultater for energibruken og GHG-utslippene ved de forskjellige prosessene. Deres vurdering er at allokering skal gjøres på laveste underprosessnivå, noe som også anbefales av ISO. Tabell 4.1 viser forskjellene mellom allokering basert på masse, energi og markedsverdi på både raffinerinivå og prosessnivå. Raffinerinivå betyr at all energibruken knyttet til raffineriet blir allokert til de ulike produktene mens prosessnivå betyr at kun energibruken i prosesseringen blir allokert til de forskjellige produktene.

Tabell 4.1: Forskjell i resultater ved forskjellige allokeringsmetoder [36]

Table 4: Energy allocation for refinery products at the refinery plant level and at the refining process level

Product	Refinery Plant Level (%)			Refining Process Level (%)		
	Mass	Energy Content	Market Value	Mass	Energy Content	Market Value
Residual oil ^a	5.2	5.3	1.9	3.0	2.7	0.9
Diesel	19.1	19.9	21.2	6.6	6.7	8.2
Kerosene	8.9	9.0	5.3	8.3	8.5	6.8
Gasoline	37.5	41.6	57.6	53.7	53.3	58.7
LPG	7.1	8.8	8.4	3.0	2.7	3.0
Others ^b	22.2	15.4	5.7	25.4	26.2	22.3

^a For the refining-process-level-based allocation, energy use for residual oil and heavy fuel oil were added together.

^b The 'others' category includes many refinery products. Here we use residual oil's energy content and market value as weights to allocate energy use to this category.

For naturgass så kan allokering baseres på nedre brennverdi dersom olje og gass produseres samtidig [21]. Utover det er det ikke redegjort for om allokering brukes ved produksjon av naturgass.

Naturgass består av flere produkter som metan, etan og butan, men en allokering til de forskjellige gassene i naturgass er unødvendig ettersom naturgass i denne oppgaven blir sett på som sammensetningen av alle gassene den består av, og ikke de gassene den kan bli prosessert videre til.

El generert av vannkraft og vindkraft går ikke igjennom noen prosess der andre produkter oppstår. PEF og utslippskoeffisient for el fra vann og vind kan derfor beregnes uten å ta hensyn til allokering. Ved Vallestadfossen kraftverk i Viksdalen i Sogn og Fjordane blir spillvarmen fra kraftverket brukt til å tørke flis. Omtrent 1-2 % av energien i vannet er tilgjengelig som spillvarme [37]. Spillvarme oppstår både i prosessindustrien og i kraftverk. Denne energien kan brukes til fjernvarme og nærvarme samt for eksempel tørking av flis. Alternativet er å dumpe spillvarmen i naturen uten at den nyttiggjøres. Siden kun 1-2 % av energimengden fra vannkraftproduksjonen blir brukt til tørking av flis, vil primærenergiforbruket og utslippene av klimagasser som kan allokere til denne spillvarmen være svært lavt.

Spillvarme kan ha forskjellige temperaturer. Ved høy temperatur kan det være økonomisk forsvarlig å bruke varmen til å generere el i en dampprosess. Ved lav temperatur er ikke dette like gunstig. Dette avhenger av eksergiinnholdet som kan uttrykkes:

$$E_Q = Q * \left(1 - \frac{T_a}{T_h}\right) \quad (4.7)$$

Her er T_a temperatur i omgivelsene, og T_h er temperaturen på spillvarmen.

Høyere eksergiinnhold gir høyere verdi på varmen, og dette bør inkluderes ved allokering av primærenergiforbruk og GHG-utslipp for spillvarme. Dersom el fra vannkraft er opphavet til spillvarmen, vil PEF for vannkraften reduseres med økende temperatur på spillvarmen (forutsatt at spillvarmen benyttes).

4.2.1 Allokering og bioenergi

Allokering basert på masse eller volum vil gi et større bidrag til primærenergiforbruk og GHG-utslipp for biobrensler enn det allokering basert på økonomi vil gjøre. Sagtømmer (eller skurtømmer) som blir til materialer har større verdi målt per m^3 hugget skog enn det som blir igjen som hogstavfall, og som ikke kan brukes til materialproduksjon. Ved allokering basert på økonomi vil det da bli allokert vesentlig mer til sagtømmeret. Men målt i volum så er det mer av tømmeret som brukes til energivirke enn til materialproduksjon.

Fornybardirektivet [8] anbefaler at alle co-produkter fra produksjon og bruk av fornybar energi (til energi- og drivstofformål) skal tas i betraktning ved beregning av GHG-utslipp. For politiske formål er substitusjonsmetoden en passende metode. Denne metoden tydeliggjør besparelsene i energiforbruk og GHG-utslipp og er oversiktlig i forhold til en nasjons mål for å redusere energiforbruk og utslipp av klimagasser. På individuelt nivå bør derimot allokering basert på energiinnhold benyttes [8]. PAS2050 anbefaler å unngå allokering for bioenergisystemer ved å utvide systemgrensene, og dersom ikke dette er mulig anbefales det å bruke partisjonsmetoden basert på økonomi [34]. ISO anbefaler også å unngå allokering ved å utvide systemgrensene. Dersom dette ikke er mulig anbefaler de å bruke markedsverdi eller energiinnhold til de ulike co-produktene ved allokering [34]. Tabell 4.3 og Tabell 4.4 viser klimagasskonsekvensene av forskjellige allokeringemetoder for produktene fra et bioraffineri. I første kolonne i Tabell 4.3 brukes substitusjonsmetoden, der bioetanol er valgt som hovedprodukt, og de resterende produktene er erstattet med konvensjonelle alternativer. Tabellene er hentet fra [20], og de konvensjonelle alternativene til bioproduktene er som følger:

Tabell 4.2: Bioprodukter og konvensjonelle alternativer til produktene [20]

Bioprodukt	Konvensjonelt alternativ
Bioetanol	Bensin
Varme	Varme fra naturgass
El	El fra naturgass
Fenoler	Konvensjonelle fenoler

De øvrige kolonnene i Tabell 4.3 viser resultatet av GHG-utslippet ved partisjon basert på masse, energi, eksergi og økonomi. I tillegg er det tatt med en hybrid metode som ikke vil bli diskutert nærmere i denne oppgaven. Det er verdt å merke seg at allokering basert på masse vil favorisere produksjonen av varme og el, siden disse to produktene ikke har noen utslipp ved masseallokering.

Tabell 4.3: Resultater for forskjellige allokeringmetoder for produkter fra et bioraffineri [14]

Table 3
Total annual GHG emissions assigned to the biorefinery products using the selected allocation methods.

Product	GHG emissions kt CO ₂ -eq./a					
	Substitution method	Mass	Energy	Exergy	Economic	Hybrid method
Bioethanol	81.0	126	108	115	116	107
Heat	25.4	0	14.4	8.55	8.68	11.2
Electricity	16.1	0	3.68	3.63	2.49	7.08
Phenols	5.71	1.88	1.91	1.94	0.98	2.51
Total	128	128	128	129	128	128

Tabell 4.4 viser konsekvensene forskjellig valg av hovedprodukt har i substitusjonsmetoden. Som i Tabell 4.3 så er de totale GHG-utslippene fra raffineriet konstante, men her blir utslippene av klimagasser for hovedproduktet i enkelte tilfeller negative fordi en stor mengde av de totale GHG-utslippene blir allokert til biproduktene. Avhengig av hva som velges som hovedprodukt og hva biproduktene erstattes med, vil enkelte produkter fra et bioraffineri på denne måten redusere utslippene av klimagasser til atmosfæren.

Tabell 4.4: Konsekvenser ved valg av hovedprodukt i substitusjonsmetoden [14]

Product	Main prod kt CO ₂ -eq./a			
	Bioethanol	Heat	Electricity	Phenols
Bioethanol	81.0	244	244	244
Heat	25.4	-138	25.4	25.4
Electricity	16.1	16.1	-147	16.1
Phenols	5.71	5.71	5.71	-158
Total	128	128	128	128

Sagtømmer, massevirke og energivirke blir ofte produsert samtidig i skogsindustrien. Sagtømmeret er ikke bare den viktigste delen av tømmeret, det er også den økonomiske driveren for skogsdrift [32]. På denne måten kan det argumenteres for at alle bidrag til primærenergiforbruk og GHG-utslipp for hogst av skog kan allokere til sagtømmeret ved samproduksjon. Hogstavfall (GROT) ligger igjen på bakken etter at tømmerstokkene er rensset for grener og topper. Dersom man ser bort i fra nytten av å la avfallet ligge igjen for å tilføre næringsstoffer til jorda, så har dette avfallet ingen annen nytte enn å bli brukt til energiproduksjon. Dette avfallet vil oppstå uansett som en konsekvens av

tømmerdrift for å produsere sagtømmer, og på denne måten kan det også da argumenteres for at det er feil å allokere noe av energibruken og utslippene av klimagassene knyttet til hogst til GROT. Massevirke kan brukes til å lage bygningsplater, papp, papir, kartong i tillegg til energiproduksjon. Som vist i Tabell 4.5 så har også massevirke en stor økonomisk verdi, selv om den ikke er like stor som for sagtømmer. Derfor kan det stilles spørsmål til at alle energi- og klimagassbidrag skal allokere til sagtømmeret.

Tabell 4.5: Priser for ulike tresortimenter

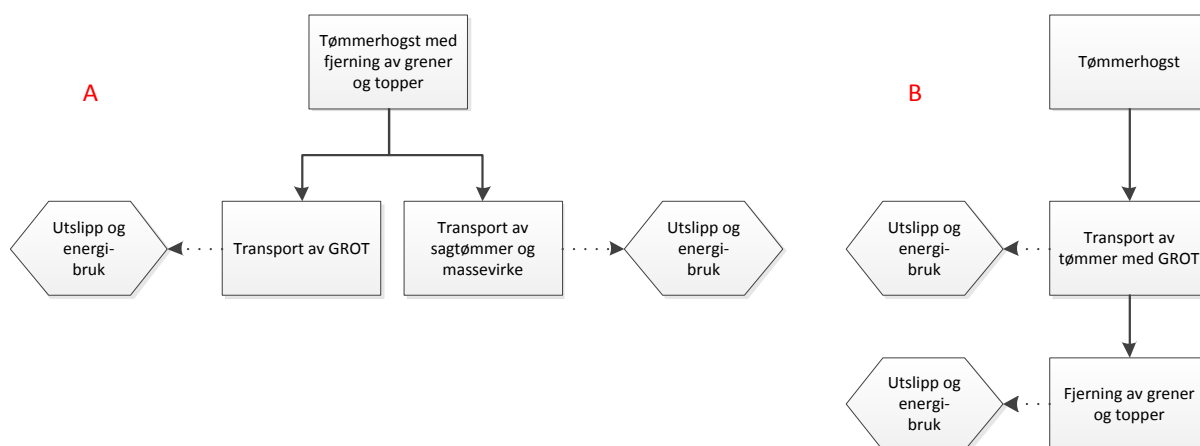
Tabell 11. Gjennomsnittspriser for ulike sortiment tømmer, levert bilveg ved skog.

	2004*		2005*		2006		1.halvår 2007	
	kr/m ³	øre/kWh	kr/m ³	øre/kWh	kr/m ³	øre/kWh	kr/m ³	øre/kWh
I alt	305	15.2	318	15.9	313	15.7	360	18.0
Gran skurtømmer	385	21.9	403	22.9	415	23.6	476	27.0
Gran sams skurtømmer og massevirke	313	15.4	326	16.1	329	16.2	344	17.0
Gran massevirke	220	12.5	232	13.2	220	12.5	237	13.5
Furu skurtømmer	363	20.6	376	21.4	399	22.7	466	26.5
Furu sams skurtømmer og massevirke	282	16.0	299	17.0	333	18.9	343	19.5
Furu massevirke	174	9.9	189	10.7	189	10.7	209	11.9
Lauvtré skurtømmer	384	16.6	413	17.9	435	18.8	451	19.5
Lauvtré sams skurtømmer og massevirke		0.0		0.0	297	12.9	207	9.0
Lauvtré massevirke	214	9.3	201	8.7	195	8.4	241	10.4

Kilde: Statistisk sentralbyrå
 * Tallene er beregnet for å tilpasses sortimentsinndeling for 2006 og 2007

Etter hogst av trestammene blir grener og topper enten fjernet der hogsten har skjedd, eller så blir stammene med grener og topper transportert til skogsbilvei før grenene og toppene blir fjernet. Dette utvider allokeringproblematikken ytterligere. Transporten i skogen vil gi bidrag til det totale energiforbruket og GHG-utslippet. Spørsmålet som nå reiser seg, er om det fortsatt er akseptabelt å allokere alle bidragene til sagtømmeret. Dersom grener og topper fjernes før transport i skogen, kan det argumenteres for at transport av GROT (Figur 4.3 A) er første ledd i verdikjeden for GROT, og at det er her man begynner å analysere energibruk og utslipp av klimagasser. Men hvis grenene og toppene ikke blir fjernet før ankomst ved skogsbilvei (Figur 4.3 B), så er det vanskelig å si om bidragene til energibruken og utslippene av klimagasser skal allokere til sagtømmeret, eller om noe av det skal allokere til GROT. Hva som velges her vil påvirke PEF og utslippskoeffisient for GROT.

Figur 4.3: Illustrasjon av behandlingsmetoder for fjerning av GROT



Dersom det kun er hogst av energivirke, som for eksempel ved vegkantrydding, så kan ikke bidragene allokere til sagtømmeret. Siden formålet med hogsten varierer, så er det vanskelig å konkludere med en korrekt allokering metode for biobrensel, og allokeringproblematikken knyttet til hogst bør behandles separat for hvert enkelt tilfelle.

Prisen og mengden av biobrensler som blir produsert og omsatt i Norge har hatt en stor vekst de siste årene. Fra 2004 til 2009 økte prisen på pellets med nesten 10 øre/kWh, fra omtrent 20 til 30 øre/kWh, og salget doblet seg i samme periode fra omtrent 20000 til 40000 tonn [38]. For flis har det også vært en prisøkning de siste årene [39]. Siden biobrensler øker i verdi, og uttaket fra skogen for biobrenselformål øker, kan det diskuteres om det er gyldig å unngå allokering av energiforbruk og utslipp av klimagasser for hogsten til biobrenslene. Dersom man velger å allokere bidragene til energiforbruk og GHG-utslipp fra hogsten mellom de ulike produktene, vil valg av allokering metode påvirke resultatene. Dette blir gått nærmere inn på i kapittel 6.1.3.

5 Biobrensler

5.1 Antagelser og begrensninger

Biobrensel er en fornybar energikilde som er basert på levende organismer. Biobrensler kan for eksempel være ved, torv, flis, briketter, pellets, biodiesel, bioolje og bioetanol. I denne masteroppgaven er det faste biobrensler det er fokusert på, siden disse primært blir brukt til varmeproduksjon. Flis og pellets er de to typene faste biobrensler som blir mest brukt til fjern- og nærvarmeproduksjon i Norge i dag [40], og det vil derfor bli sett nærmere på disse to brenslene i et energi- og klimaperspektiv.

Ved betraktninger av PE-forbruk (primærenergiforbruk) og GHG-utslipp i verdikjeden for biobrensler, må enhetene som benyttes tas nøye hensyn til. Man snakker ofte om fastvolum og løsvolum for biobrensler. Fastvolum er det volumet brenselet opptar dersom man ikke tar hensyn til lufttrommene mellom brenselbitene. Løsvolum er det volumet brenselet opptar dersom man tar med lufttrommene mellom brenselbitene. Fastmasseprosenten, FM, er andel fastvolum i forhold til løsvolum. Fastvolum måles i fast kubikkmeter, fm^3 , og løsvolum måles i løs kubikkmeter, lm^3 .

Systemgrensene er angitt for hvert biobrensel i deres respektive delkapittel. Felles for pellets og de ulike sortimentene flis er at systemgrensene slutter ved levering av brensel til sluttbruker. Eventuelle energitap og GHG-utslipp ved lagring hos sluttbruker, konvertering til varme, varmedistribusjon og alle underprosesser knyttet til dette er ikke analysert for brenslene. Energikonvertering og varmedistribusjon vil derimot inngå i en total PEF for varme fra biobrensler.

EcoInvent [21] inkluderer planting av trær, ungsogspleie og tynning i deres systemgrenser. Resultatene i [21] gjelder riktignok for varme produsert fra biomasse og kan dermed ikke sammenlignes med resultatene som er utarbeidet i kapittel 6 og 7 i denne masteroppgaven. Värmeforsk [17] inkluderer planting av trær og ungsogspleie for enkelte av brensel-sortimentene, men ikke for alle. For flis fra tynningsvirke utgjør dette omtrent 2,5 % av bidrag til energiforbruk og GHG-utslipp. I denne masteroppgaven starter systemgrensene ved hogst av trær. Planting av trær, ungsogspleie og tynning er utelatt for alle brensel-sortimenter. Eneste unntak er pellets fra produksjonsanlegget på Averøy.

GHG-utslipp fra prosesser hentet i EcoInvent-databasen er beregnet med «ReCiPe midpoint method, hierarchist version». Dette er standardmodellen i LCA som blir mest brukt i vitenskapelige modeller. PE-forbruk fra prosesser i EcoInvent-databasen er beregnet med «Cumulative Energy Demand». Begge beregningsmetodene er innebygget i SimaPro.

5.2 Karbonnøytralitet for biobrensler

Forbrenning av biomasse kan bli sett på som karbonnøytralt dersom man antar at karbonet som slippes ut til atmosfæren ved forbrenning blir tatt opp igjen av trær, planter og annet biomateriale. Når planter vokser så absorberer de karbon og lagrer dette i stammen, bladene og røttene. Når planter dør, og nedbryting av det biologiske materialet oppstår, så slippes det lagrede karbonet ut i atmosfæren. Bioenergi er en utvidelse av denne karbonsyklusen, der den mengden karbon som slippes ut ved forbrenning er den samme som den mengden som slippes ut ved nedbryting [32].

Ved vurdering av hele verdikjeden for biobrensel, fra uttak i skog til forbrenning, vil det være utslipp av klimagasser. Prosesser som hogst og transport bruker fossile brensler som vil gi GHG-utslipp. Blant forskningen som er gjort på GHG-utslipp fra biomasse er det ofte brukt forskjellig metodikk, noe som gjør det vanskelig å sammenligne resultatene. Resultatene som er funnet varierer hovedsakelig på grunn av valg av systemgrenser, allokeringmetoder og inkludering av effekter ved bruk av landområder til biobrenselformål [34].

Skog bruker lang tid på å bli ferdig utvokst. CO₂ som slippes ut ved forbrenning av et helt tre bruker derfor lang tid på å bli tatt opp igjen av annen biomasse. Dersom man betrakter en svært lang tidshorison på flere hundre år, og det forutsettes at det blir plantet ny skog der skogen hogges, så kan man anta at karbonutslipp fra forbrenning av biomasse ikke gir bidrag til drivhuseffekten. Men siden skog bruker lang tid på å vokse ut, og utslippene fra forbrenning av biomasse skjer momentant, så vil mer karbon akkumuleres i atmosfæren enn det som blir tatt opp av nyplantet skog. Dermed vil drivhuseffekten i dag øke som følge av mer bioenergi, som igjen kan gi konsekvenser for klimaet. Bidrag til drivhuseffekt måles med forskjellige tidshorisonter der 20, 100 og 500 år blir brukt [1]. Ved bruk av 500 år som tidshorison kan man regne med at all biomateriale som er gjenplantet etter hogst har nådd full modenhet og tatt opp karbonet som ble sluppet ut ved forbrenning. I Norge har det de siste 50 årene vært en årlig økning i skog på 1,3 % [16]. Det kan derfor antas at all CO₂ som slippes ut ved forbrenning blir tatt opp av ny biomasse.

Flis som brukes til å lage pellets krever at fuktigheten i flisen er lav. Derfor forbrennes ofte en del av flisen for å tørke den resterende mengden flis. I kapittel 7 blir det antatt at utslippene fra denne forbrenningen er karbonnøytrale. Denne antagelsen er gjort for å kunne sammenligne de to produksjonsanleggene som er analysert. I kapittel 8 blir utslippene av CH₄ og N₂O ved forbrenning av biomasse inkludert.

I denne oppgaven blir ikke konsekvensene ved endring av landområder gjort rede for, siden informasjon som er funnet om det er veldig usikker. I en rapport utarbeidet på NTNU [41] er det kommet fram til at endring av landområder fører til større GHG-utslipp enn energibruk i skogprosesser for produksjon av bioenergi. Denne rapporten tar utgangspunkt i norske skogprosesser.

6 Biobrensler: Flis

Flis kan produseres fra flere ulike skogsortimenter, men i denne oppgaven er det bare de tre mest kommersielle sortimentene av skogsflis som vurderes. Det benyttes ulike logistikksystemer avhengig av hvilket brenselstypement som inngår. Disse tre sortimentene er stammevirke (eller rundvirke), heltre og GROT.

Figur 6.1: Bilde av henholdsvis stammevirke, heltre og GROT [Google]



Fra stammevirke så er det trestammer med råte, massevirke og småvirke som benyttes [42]. Dette er de trestammene som ikke egner seg for skurproduksjon (produksjon av planker og bord). Tømmer som kan brukes til skurproduksjon har størst økonomisk verdi, og tømmeret vil dermed brukes til dette hvis kvaliteten er god nok. Tynningsvirke fra tynning i skog, eller rydningsvirke fra rydding av jorder og vegkanter og lignende, går under betegnelsen heltre, og GROT betyr grener og topper, altså avfall fra hogst av stammevirke. Figur 6.2 viser verdikjeden for henholdsvis stammevirke og heltre.

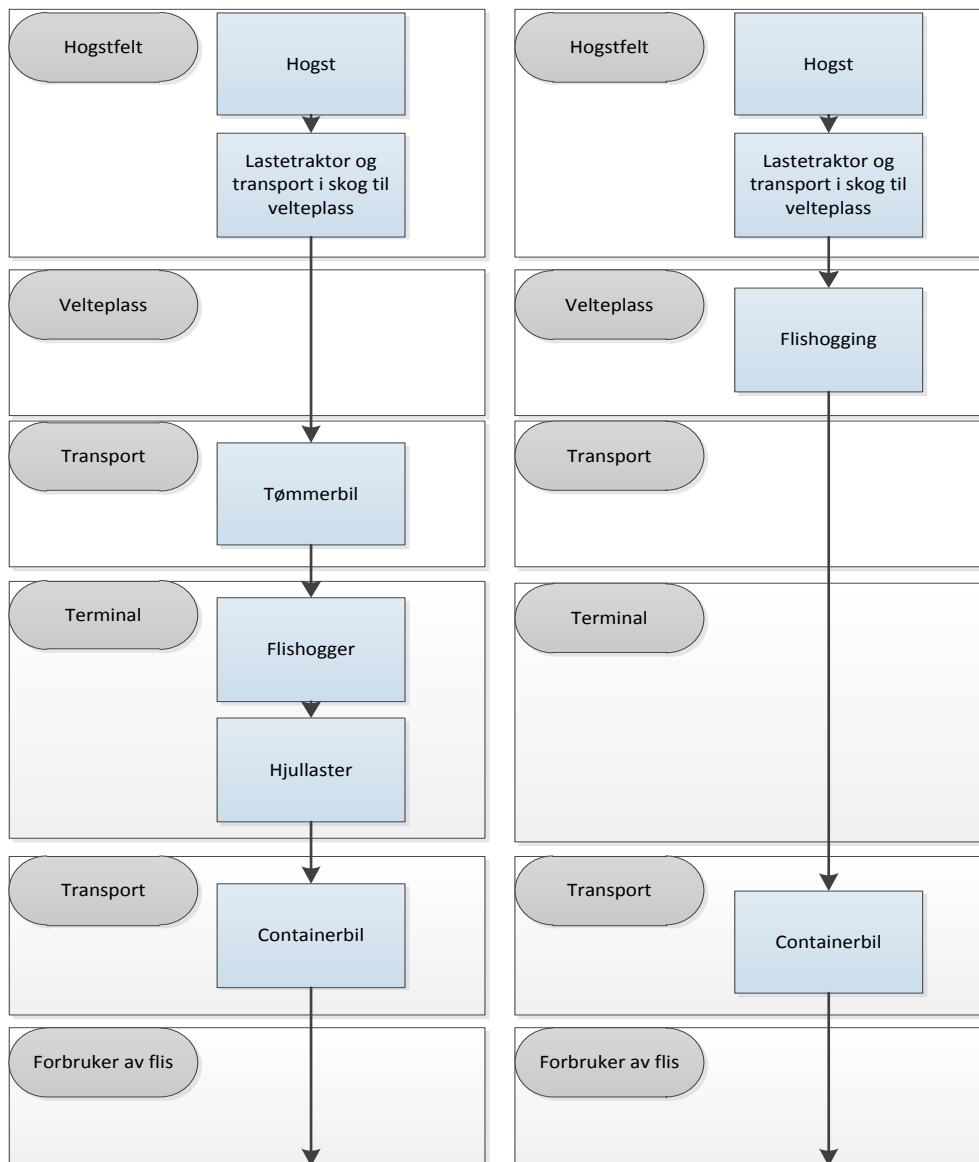
For de fleste prosessene er det kun det direkte energiforbruket som er inkludert i analysene. Det indirekte forbruket som konstruksjon av høstmaskiner, veiarbeid og lignende, er utenfor systemgrensene. Derimot vil det indirekte energiforbruket bli inkludert i enkelte prosesser. Transportdata fra Ecolnvent-databasen for transport av tømmer, bunter og flis på vei, inkluderer indirekte prosesser som bygging av vei og konstruksjon av lastebilene.

Verdikjeden stopper ved levering av flis til forbrukere. Flis er ferskvare, og ved lagring hos sluttbruker kan det oppstå massetap og dermed energitap. Dette er utelatt fra analysen.

For stammevirke og heltre avvirkes trærne med hoggemaskin før de transporteres til velteplass med en lastetraktor. Velteplassen ligger ofte ved siden av en vei der tømmerbiler og containerbiler kan leses med tømmer og flis for transport videre. Stammevirke transporteres nesten utelukkende på tømmerbil til terminal, eller direkte til forbruker for flishogging der. Dette fordi det er den mest kostnadseffektive transporten, samt at det som regel er god tilgang på tømmerbiler i de fleste distrikter [43]. I tillegg er det billigere å hogge flis på en terminal enn på en velteplass i skogen, siden flishoggeren blir mer effektiv når den slipper venting på containere eller flisbiler, samt at det er større volumer som flises per flytting [43]. I denne analysen forutsettes det at stammevirke blir transportert til terminal før det flises. Deretter blir flisen transportert til forbruker.

Heltre og GROT flises derimot nesten alltid i skogen, siden det er mer kostnadseffektivt å transportere flis enn ufliset heltre og GROT. FM for flis er høyere enn for ufliset heltre og GROT, og dermed får man transportert en større energimengde når det er flis. I tillegg transporteres ofte flis fra heltre og GROT direkte fra skogen til forbruker for å unngå ekstra terminal/omlastningskostnader [43]. Det er ikke behov for hjullaster ved flising på velteplass siden flishoggeren spruter flisen rett opp i ventende containere eller flisbiler. Heltre kan også buntes og fraktes på tømmerbil som vanlig stammevirke, men det blir ikke sett på i denne analysen.

Figur 6.2: Verdikjeden for stammevirke (t.v) og heltre (t.h)¹³



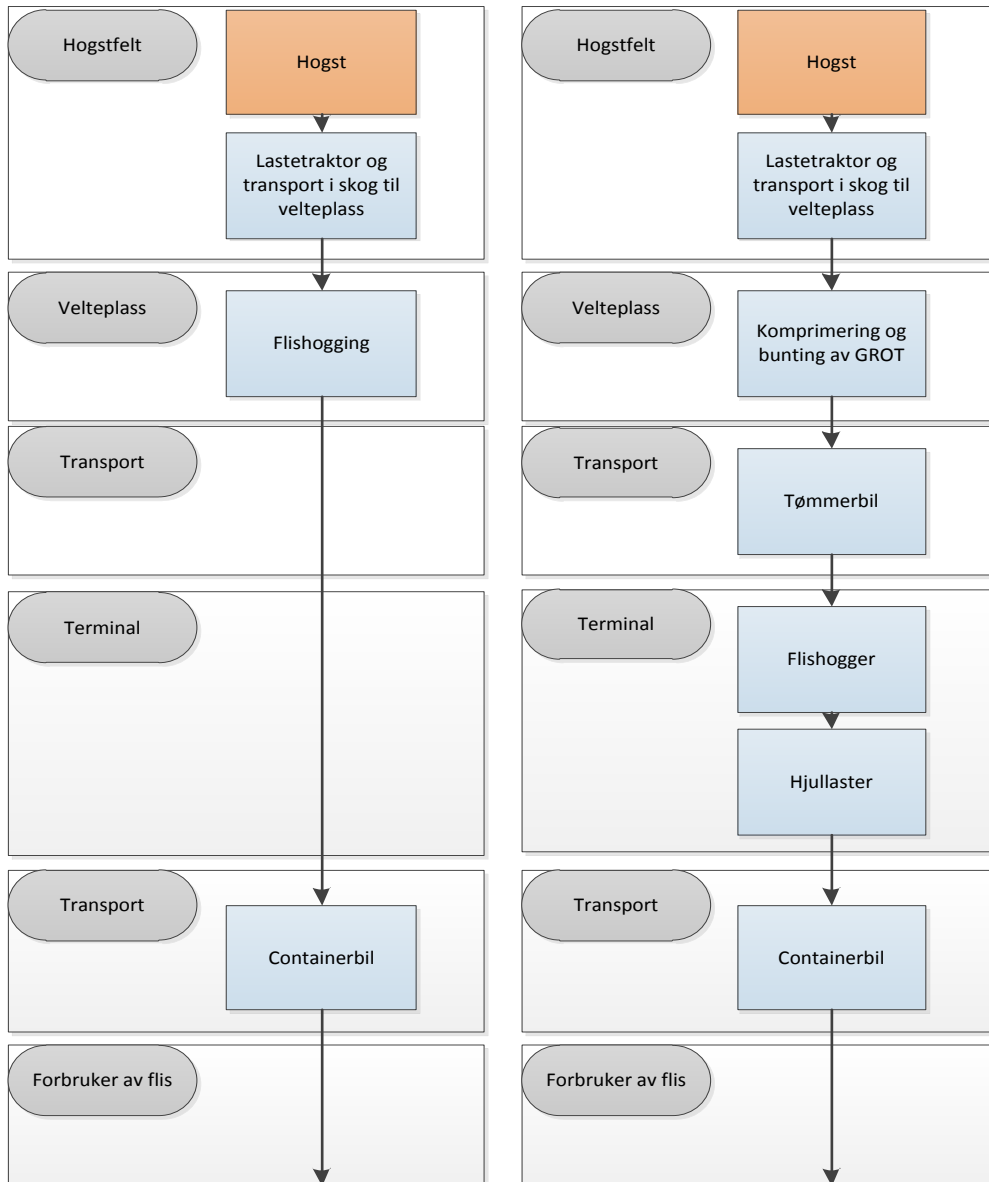
¹³ Basert på referanse: 44.Skjevrak, G., *Samtale med Geir Skjevrak om verdikjeder for biobrensler*, 2012.

GROT er et avfallsprodukt fra stammevirke, og det diskuteres om noe av energiforbruket ved hogst kan allokere til GROT, eller om alt skal allokere til stammevirket. Siden GROT begynner å bli utnyttet i større grad, kan noe av energiforbruket plasseres på dette sortimentet. Biobrensel defineres ikke lengre som et «restprodukt», men et sortiment på lik linje med sagtømmer og massevirke [43]. Med dette som utgangspunkt vil det være riktig å allokere noe av energiforbruket ved hogst til GROT. Dette vil bli diskutert videre i kapittel 6.1.3.

GROT kan enten transporteres løst på lastetraktor til velteplass, eller den kan bunes med en buntemaskin på hogstfeltet. Den kan også transporteres løst til velteplass for så å bli buntet der istedenfor å bli hogget til flis på velteplass. I en studie fra Skog og Landskap [45] kommes det frem til at bunting på velteplass er mer effektivt enn bunting på hogstfelt. Derfor vil kun den verdikjeden der GROT komprimeres og bunes på velteplass bli vurdert i denne analysen. Derimot nevnes det også i denne rapporten fra Skog og Landskap at hva som er mest effektivt må undersøkes nærmere, siden resultater i andre lignende studier konkluderer med at bunting på hogstfelt er mest effektivt.

Fra velteplass kan enten ferdigfliset GROT transporteres med containerbil eller flisbil til forbruker, eller så kan buntet GROT transporteres med tømmerbil til terminal der det flises, før det leses på flisbiler og transporteres til forbrukere. Verdikjedene for de to ulike GROT-systemene som vurderes i denne analysen er illustrert under.

Figur 6.3: Verdikjede for flis fra GROT som flises på velteplass (t.v) og flis fra GROT som bntes og fraktes til terminal før flising (t.h)¹⁴



¹⁴ Basert på referanse [44].

6.1 Metodikk

Den funksjonelle enheten som er brukt i beregningene for stammevirke, heltre og GROT er 1 fast kubikkmeter (fm^3). For de ulike prosessene er energiforbruk og GHG-utslipp beregnet som MJ/fm^3 og $\text{kg CO}_2\text{eq}/\text{fm}^3$. PEF er beregnet ved å dividere totalt energibehov på energimengden i 1 fm^3 .

Fornybardelen er inkludert i PEF for enkelt å kunne sammenligne med andre studier.

Utslippskoeffisienten er beregnet ved å konvertere de totale GHG-utslippene for alle prosesser (i $\text{kg CO}_2\text{eq}/\text{fm}^3$) til $\text{g CO}_2\text{eq}/\text{kWh}$ brensel.

6.1.1 Stammevirke og heltre

Energiforbruk (diesel) for hogstmaskinene avhenger av volumet på trestammene som hogges (målt i liter diesel per fm^3). PEF og utlippskoeffisient for flis vil dermed være avhengig av hva slags tømmer volum som velges for de respektive sortimentene. Stammevirke antas å være 100 % gran, og heltre antas å være 50 % gran og 50 % bjørk [42]. Hogstmaskinene må forflyttes 20 km på bil for hvert andre felt som bli hogget. Et felt er på 100 dekar. I tillegg kommer personbiltransport. Data for dette er underlagt administrasjon og hentet fra [42]. Data for dieselforbruk ved forskjellig tømmer volum er hentet fra [46], og dette er basert på studier gjennomført av Skog og Landskap. Data for trevirke (brennverdier og massetetthet) er hentet fra [47].

Energiforbruk ved terrengtransport for hogst av heltre og stammevirke er basert prestasjonsstudier gjennomført av skog og landskap [46]. Dette avhenger i stor grad av transportavstanden. Variasjon i energiforbruk for hogst og terrengtransport finnes i **Vedlegg C**. Det er antatt at man får like mange fm^3 med heltre som stammevirke på et lass. I denne analysen er det 15 fm^3 . I lignende studie utført av Anders Hohle [42], er kapasiteten per lass heltre transportert i skog kun 10 fm^3 ved bruk av en middels stor lassbærer.

For flising av heltre ved velteplass antas det at det benyttes en trommelhogger, og for flising av stammevirke ved terminal antas det at det benyttes en skivehogger. Skivehoggere egner seg best for homogent stammevirke mens en trommelhogger egner seg for heltre og GROT [42]. Erfaringstall på dieselforbruk for både trommelhogger og skivehogger hentet fra [42].

Terminalarbeid utover flising av stammevirke begrenser seg hovedsakelig til opplasting av flis i containerbiler med hjullaster. Dieselforbruk for hjullaster er også hentet fra [42].

Data for transport av tømmer og bunter på vei er hentet fra EcoInvent-databasen, og SimaPro er benyttet for å beregne energiforbruk og GHG-utslipp per tkm (tonn-kilometer) transport. Massen tømmer per lass er omtrent 27 tonn ved transport av gran. Prosessen som heter «Transport, lorry >28t, fleet average/CH» er benyttet.

For transport av flis så antas det at flisbilene har en kapasitet på 110 lm^3 [44] og at skogsflis har en FM på 40 % [47]. Det benyttes ofte også containere som rommer 45 lm^3 og man frakter to containere av gangen, men det er 110 lm^3 som er antatt i denne analysen. Prosessen er modellert i SimaPro på samme måte som for transport av tømmer og bunter. Transportavstanden for flis ønskes å bli holdt så kort som mulig for å øke lønnsomheten. Holmgren AS, som driver med flisproduksjon, fliser biomasse i området rundt Gardermoen og leverer flisen til Gardermoen Fjernvarme. I denne

analysen er det sett på transportavstander for flis mellom 10 og 60 km. Det er antatt at alle flisbilene kjører tilbake til velteplass uten lass. Dette gjelder også for tømmerbiler.

Det er også inkludert tap av tørrstoff ved flising i analysen. Dette tapet er på 5 % ved flising ved terminal og 10 % ved flising i skog [48]. Dette tapet er inkludert ved å anta at flishoggerne har et større dieselforbruk enn det som er oppgitt i [42]. Tap av tørrstoff ved transport i skog og lagring ved velteplass kan utgjøre omtrent 2-15 % [48]. Energitalp ved lagring og transport i skog er ikke inkludert i analysen. Det er antatt at flisen som produseres kun lagres i kort tid før den forbrennes. På denne måten blir energitalpene minimert.

Ved beregning av energimengden i flis så er det effektiv brennverdi, H_e , som benyttes. Den effektive brennverdien til et brensel er den nedre brennverdien til brenselet redusert med varmen som kreves til å fordampe vannet i brenselet. H_e måles i kWh/kg, kWh/fm³ eller kWh/lm³ og kan med god tilnærming beregnes som følgende:

$$H_e = 5,32 - 6,02 \times MC_{wet} \text{ (kWh/kg)} \quad (6.1) [49]$$

Energiinnhold i diesel er hentet fra [50], og GHG-utslipp fra anlegg- og skogsmaskiner er beregnet i SimaPro. Det er prosessen «Diesel, burned in building machine» fra EcoInvent-databasen som er benyttet, siden beregninger ved å bruke denne prosessen stemmer godt overens med GHG-utslipp knyttet til dieselforbruk for skogprosesser i andre rapporter, som for eksempel [50].

Bestandspleie av skog som stammekvisting, ungsogpleie og gjødsling er utenfor systemgrensene til denne analysen. Dette er antatt å være prosesser som utelukkende er tilknyttet skurproduksjon.

6.1.2 GROT

GROT antas å være avfall fra gran. Data for terrengetransport av GROT er hentet fra [46] og energiforbruket for GROT avhenger også i stor grad av transportdistanse. Siden GROT har en mye lavere FM enn heltre og stammevirke, så er energiforbruket per fm³ mye større enn for de to andre brenselstypene.

For flising av GROT så antas det at det foregår på samme måte som for heltre og med samme energiforbruk.

Data for bunter og bunting av GROT på velteplass er hentet fra [51] og [45]. Transport av bunter foregår på samme måte som transport av tømmer, og avstanden forutsettes å være i samme intervall som for tømmer også. Flishoggingen antas å foregå på samme måte og med samme effektivitet og energiforbruk som for stammevirke. FM for bunter ligger i intervallet 35-50 % [45]. I denne analysen er det antatt at den er den samme som for skogsflis, det vil si 40 %. For vegtransport av bunter er det tatt utgangspunkt i [45], der data for veitranport av buntet, ferskt heltre er gitt. Bunter fra GROT har tilnærmet samme dimensjoner som bunter fra heltre. Lastevolum på tømmerbilen er 90,8 lm³ og det går 47 bunter på et lass med totalt buntvolum på 57,3 lm³. Dette gir en buntvolumandel på 0,63. Medregnet FM for buntene så blir volum biomasse pr lass på 22,92 fm³/lass med 40 % MC_{wet} .

Lessing og lossing av bunter får et litt høyere energiforbruk enn for tømmer. Det tar omtrent 1 time for på- og avlessing til sammen [45], og med et forbruk for lesse/lossemaskin på 10 l/h gir dette et forbruk på 0,44 l/fm³.

6.1.3 Allokering i verdikjeden for flis

Hvordan energiforbruk og GHG-utslipp allokeres i verdikjeden for flis vil påvirke resultatene for PEF og utlippskoeffisient. Flis som produseres fra stammevirke er i samproduksjon med sagtømmer. Fra hogst av 1 million m³ stammevirke blir 50 % av volumet til energitømmer (stammevirke til biobrenselformål) og 50 % er tømmer egnet for plankeproduksjon (sagtømmer)[30]. I kapittel 4 ble allokering for biomasse drøftet. Sagtømmer har en større økonomisk verdi enn energivirke. Det antas at sagtømmer har samme energiinnhold, volum og masse som energivirke, og allokering vil derfor ikke påvirke drivstofforbruket ved noen av disse allokeringemetodene (forutsatt at 50 % av volumet er sagtømmer). Dette kan være feil grunnet råte og andre skader på energitømmer. Ved allokering basert på økonomi så vil derimot energiforbruket endre seg. Ved å benytte formlene i kapittel 4.1.3 og prisene på ulike sortimenter angitt i Tabell 4.5, er det kommet frem til partisjonskoeffisientene gitt i Tabell 6.1. I beregningen er prisen på energivirke antatt å være den samme som prisen på massevirke. Eksempel på utregningen vises her:

$$\alpha_{sagtømmer} = \frac{pris_{sagtømmer} andel_{sagtømmer}}{pris_{sagtømmer} andel_{sagtømmer} + pris_{energivirke} andel_{energivirke}}$$

$$\alpha_{energivirke} = 1 - \alpha_{sagtømmer}$$

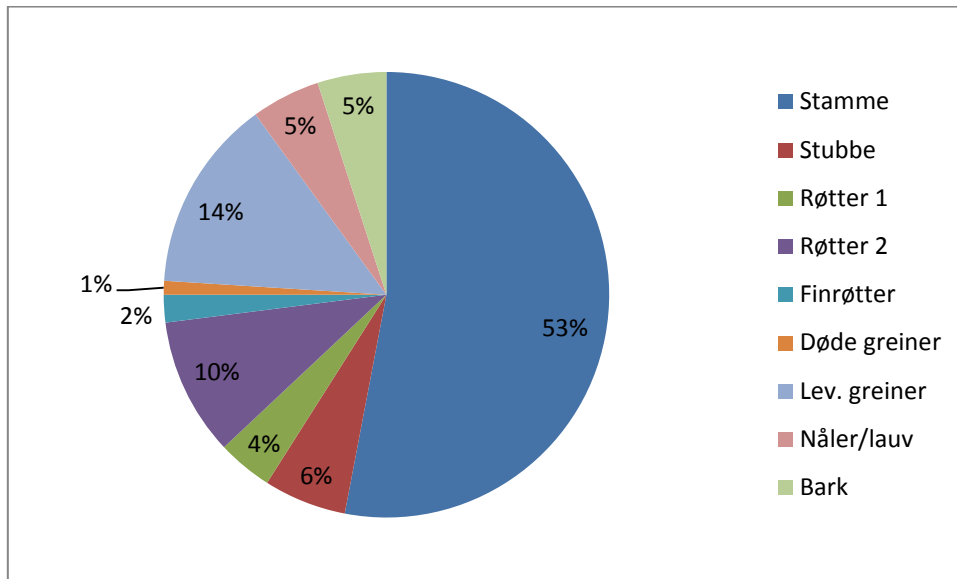
$$\alpha_{sagtømmer} = 0,67$$

$$\alpha_{energivirke} = 0,33$$

Ved å si at GROT ikke lengre er et restprodukt, men et tresortiment på samme måte som stammevirke, må også noe av PE-forbruket og GHG-utslippet knyttet til hogst av stammevirke allokeres til GROT. I kapittel 4.2.1 blir det gjort rede for at PEF og utlippskoeffisient for GROT også vil avhenge av om kvisting av tømmer foregår i skogen eller på velteplass. I denne analysen er det antatt at all kvisting foregår i skogen, og energiforbruket for kvisting inngår i energiforbruket for hogst. Prisen på flis fra GROT er omtrent 5 øre lavere enn prisen på fuktig flis fra stammevirke (i øre/kWh) [52]. Dette tilsvarer 77 % av prisen på fuktig flis fra stammevirke. Det antas derfor at råvareprisen på GROT utgjør 77 % av råvareprisen på massevirke fra gran som finnes i Tabell 4.5. Dermed kan man foreta en allokering basert på økonomi for GROT.

Figur 6.4 viser den prosentvise fordelingen av tredeler. Figuren er et gjennomsnitt for gran, furu og løvtre.

Figur 6.4: Prosentvis fordeling av delbestander i tre [30]



Fra stamme med bark blir omtrent 10 % fjernet [30]. Dette er blant annet tretoppene. Det antas på bakgrunn av dette at stamme med bark utgjør 50 % av tredelene og GROT utgjør 25 % (tretopper i tillegg til både levende og døde greiner). Dersom man fortsatt antar at 50 % av stammevirket som hogges går til tømmerproduksjon og 50 % blir stammevirke til biobrensel, vil sagtømmer, energivirke og GROT utgjøre 1/3 hver på volumbasis (fm^3). Med volum som partisjonsparameter vil da 1/3 av PE-forbruk og GHG-utslipp allokere til GROT. Dette er i samsvar med informasjon fått fra Anders Hohle [43].

Grener har større massetetthet enn stamme med bark, og de har også en høyere brennverdi ved samme fuktinnhold [47]. Det er derfor også foretatt allokering av PE-forbruk og GHG-utslipp basert på energiinnhold i de ulike tredelene. Ved denne allokeringen er ikke formel (6.1) benyttet. Da ville energiinnholdet vært det samme når fuktinnholdet er den samme. Videre antas det at toppen av treet som går under GROT-sortimentet har samme energiinnhold som grener.

For heltre så er det antatt at det er en egen prosess som ikke er i samproduksjon med hogst av sagtømmer, og allokering er dermed ikke nødvendig for dette sortimentet.

Tabell 6.1: Partisjonskoeffisienter for ulike sortimenter av biobrensel

Partisjonskoeffisienter når GROT IKKE er inkludert	Partisjonskoeffisienter når GROT ER inkludert		
Økonomi	Økonomi		
α , sagtømmer	0.668	α , sagtømmer	0.532
α , energivirke	0.332	α , energivirke	0.265
		α , GROT	0.204
Volum	Volum		
α , sagtømmer	0.500	α , sagtømmer	0.333
α , energivirke	0.500	α , energivirke	0.333
		α , GROT	0.333
Energiinnhold	Energiinnhold		
α , sagtømmer	0.500	α , sagtømmer	0.329
α , energivirke	0.500	α , energivirke	0.329
		α , GROT	0.342

Siden ingen av sortimentene har en alternativ produksjonsmetode med kjent utslippskoeffisient og PE-forbruk (så langt forfatteren av denne oppgaven kjenner til) så er ikke substitusjonsmetoden beskrevet i kapittel 4.1.1 vurdert ved allokering av hogst.

Det antas videre at de resterende prosessene i verdikjeden for de ulike sortimentene, bortsett fra administrasjon, er separate prosesser. Sagtømmer transporteres for seg selv, både i skogen og på vei, og energitømmer transporteres for seg selv. Dette kan også føre til ukorrekte beregninger fordi sagtømmer og energitømmer ofte transporteres sammen. Det er ikke funnet noe data på fordeling av sagtømmer og energitømmer ved tømmertransport, så allokering for transport av tømmer har ikke blitt utført. Energiforbruk knyttet til administrasjon allokeres på samme måte som for hogst.

6.2 Resultater

For flis så er det vurdert konsekvenser for PEF og utslippskoeffisient der verdier for transportavstand og tømmervolum endrer seg.

Tabell 6.2: Verdiintervaller for forskjellige prosesser

Parameter	Intervall
Volum heltre og stammevirke	150 – 500 dm ³ , 50 dm ³ mellom hvert intervall
Terrengtransport heltre og stammevirke	100 m, 300 m, 500 m, 750 m, 1000 m
Terrengtransport GROT	150 – 600 m, 150 m mellom hvert intervall
Transportavstand tømmer og bunter	30 – 150 km, 30 km mellom hvert intervall
Transportavstand flis	10 – 60 km, 10 km mellom hvert intervall

I tillegg har det blitt sett på konsekvensene ved ulike allokeringmetoder som ble beskrevet i kapittel 6.1.3.

Det har blitt opprettet et referansescenario der følgende verdier for de forskjellige prosessene i Tabell 6.2 er blitt brukt:

- Volum stammevirke: 250 dm³
- Volum heltre: 150 dm³
- Terrenngtransport heltre og stammevirke: 500 m
- Terrenngtransport GROT: 300 m
- Transportavstand for tømmer og bunter: 90 km
- Transportavstand for flis: 30 km

I tillegg er det i dette referansescenariot valgt økonomisk allokering der GROT er inkludert som produkt på lik linje som sagtømmer og energitømmer.

I en studie utført av Leif Kjóstelsen [46] på tømmertransport med tømmerbil og henger ble det klarlagt at middelstokken på et lass var på 230 dm³. Heltre er et sortiment som ofte kommer fra tynning i skog og hogst i veikant og lignende, og tømmeret er derfor ofte noe mindre i volum enn stammevirke. [42] oppgir gjennomsnittlig volum på tynningsvirke til 120 dm³. Denne verdien ligger nærmest et tømmer volum på 150 dm³. 150 dm³ er det minste volumet det er samlet inn data for i denne oppgaven. Derfor er 150 dm³ antatt i referansescenariot for heltre. Siden GROT er avfall fra stammevirke vil det være naturlig at det har samme transportavstand i skog som stammevirke. 300 m er derimot benyttet i referansescenariot siden data som ble funnet på transport for GROT hadde transportavstander fra 150-600 m.

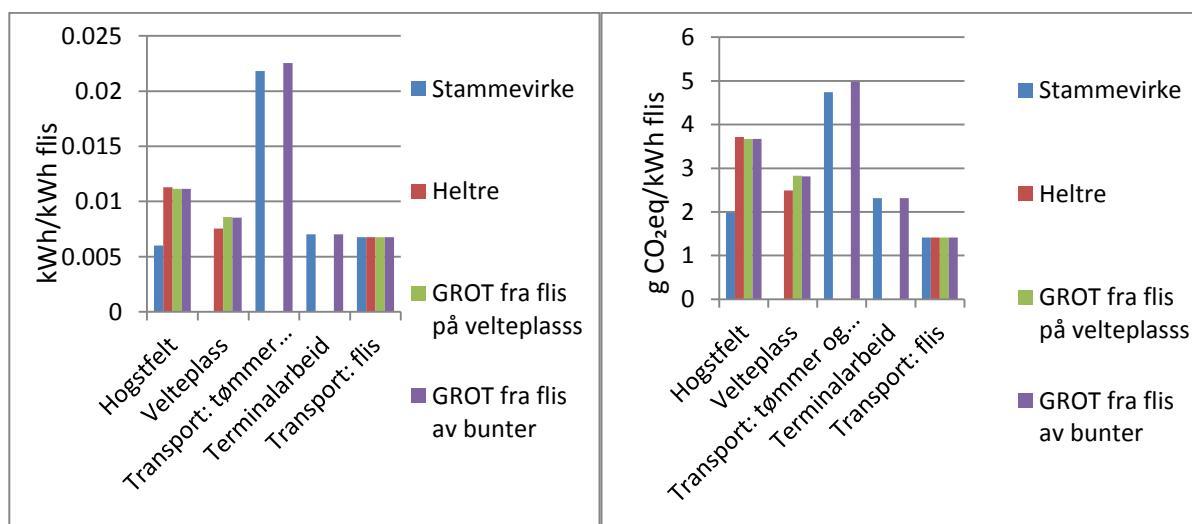
Tømmer transporteres ofte lengre enn flis. Derfor er det i referansescenariot antatt at tømmer og bunter transporteres 90 km til terminal, og at flis transporteres 30 km, både fra terminal og fra velteplass.

Figur 6.5 viser hvordan energiforbruk og GHG-utslipp fordeler seg på de ulike hovedprosessene i referansescenariot. I tillegg er PEF og utslippskoeffisient angitt for alle sortimentene som er analysert.

Figur 6.5: Resultater for ulike flissortimenter i referansescenariot

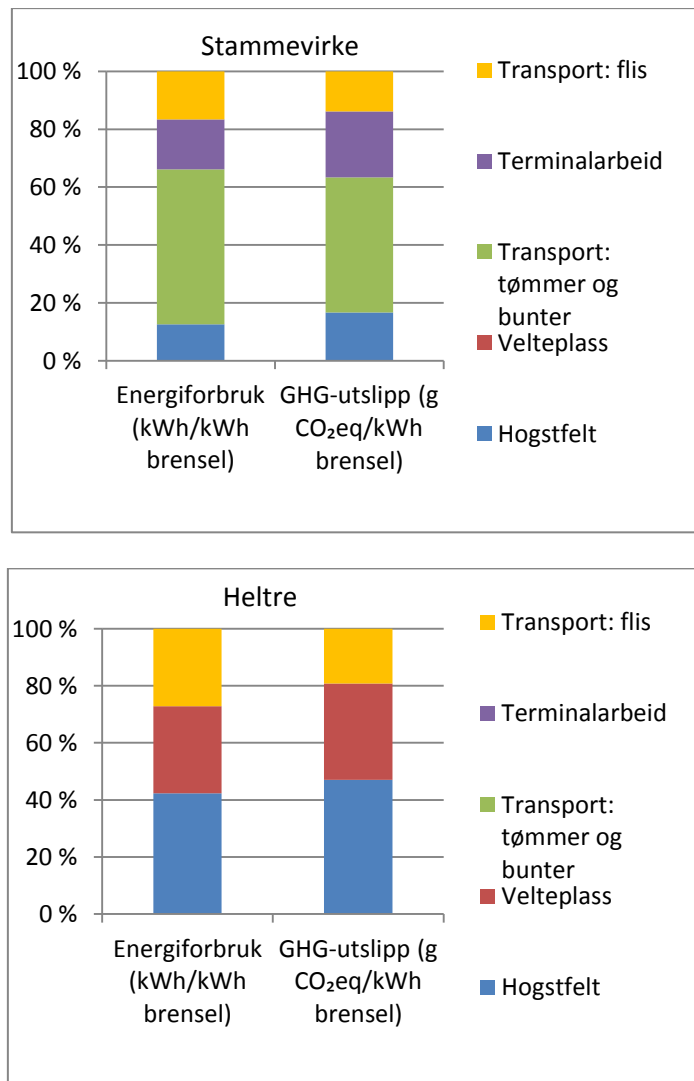
Sortiment	Stammevirke		Heltre	
	Energiforbruk (kWh/kWh brensel)	GHG-utslipp (g CO ₂ eq/kWh brensel)	Energiforbruk (kWh/kWh brensel)	GHG-utslipp (g CO ₂ eq/kWh brensel)
<i>Prosessområde</i>				
Hogstfelt	0.006	1.985	0.011	3.718
Velteplass			0.008	2.489
Transport: tømmer og bunter	0.022	4.744		
Terminalarbeid	0.007	2.315		
Transport: flis	0.007	1.411	0.007	1.411
SUM	0.042	10.455	0.026	7.619
	Stammevirke		Heltre	
PEF (kWh/kWh)	1.042		1.026	
Utslippskoeffisient (g CO ₂ eq/kWh)	10.455		7.619	
Sortiment	GROT fra flis på velteplass		GROT fra flis av bunter	
	Energiforbruk (kWh/kWh brensel)	GHG-utslipp (g CO ₂ eq/kWh brensel)	Energiforbruk (kWh/kWh brensel)	GHG-utslipp (g CO ₂ eq/kWh brensel)
<i>Prosessområde</i>				
Hogstfelt	0.011	3.670	0.011	3.670
Velteplass	0.009	2.831	0.009	2.811
Transport: tømmer og bunter			0.023	4.982
Terminalarbeid			0.007	2.315
Transport: flis	0.007	1.411	0.007	1.411
SUM	0.026	7.913	0.056	15.189
	GROT, flising på velteplass		GROT, bunter med flising på terminal	
PEF (kWh/kWh)	1.026		1.056	
Utslippskoeffisient (g CO ₂ eq/kWh)	7.913		15.189	

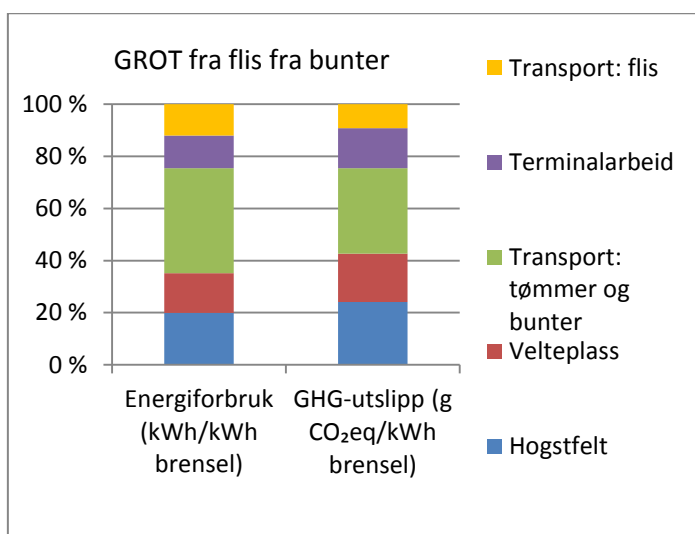
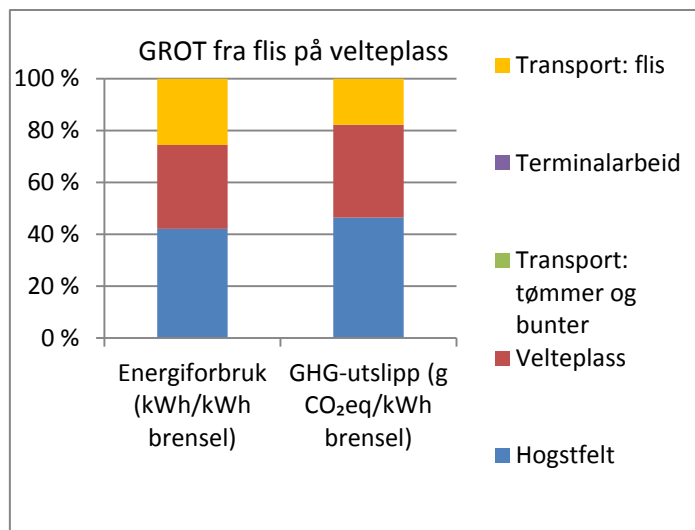
Figur 6.6: Energiforbruk og GHG-utslipp fordelt på forskjellige prosesser i referansescenariot for flis



Av de 4 sortimentene som er studert så er det heltresortimentet som kommer best ut for PEF og utslippskoeffisient, men forskjellene er ikke store fra GROT som flises på velteplassen. Målt i kWh/fm³, så er det totale energiforbruket og GHG-utslippet for heltre større enn for flis fra GROT, men siden flis fra heltre har et større energiinnhold enn flis fra GROT blir PEF og utslippskoeffisient lavere. Heltre har det største PE-forbruket og GHG-utslippet av samtlige for prosesser på hogstfeltet med over 40 % av det totale forbruket og utslippet. Dette skyldes at energiforbruk per fm³ er større dess mindre volum på trestammene. I tillegg er det ingen allokering for heltre. Mye av energiforbruket og GHG-utslippene knyttet til hogst av stammevirke blir allokert til sagtømmer og GROT. Det er antatt at det er samproduksjon av sagtømmer og energivirke. Den største bidragsyteren til PEF og utslippskoeffisient for stammevirke og bunter er transport av tømmer og bunter. Dette gjør at flis fra bunter og stammevirke er de sortimentene som får høyest PEF og utslippskoeffisient. Ved kortere transportavstand vil resultatet endre seg. For eksempel ville PEF for stammevirke vært på 1,028, og utslippskoeffisienten ville ha vært 7,632 g CO₂eq/kWh, hvis transportavstanden for tømmer hadde vært 30 km istedenfor 90 km.

Figur 6.7: Fordeling på forskjellige prosesser for de forskjellige sortimentene i referansescenariot





På hogstfeltet har stammevirke lavere PE-forbruk og GHG-utslipp enn de andre sortimentene. For selve hogsten har GROT lavere forbruk og utslipp, men forbruk og utslipp ved terrengtransport av GROT er mye høyere enn ved terrengtransport av heltre og stammevirke. Dette skyldes at GROT har en mye lavere FM. For stammevirke kan FM være på omtrent 80 %, og for GROT ligger den på 10-30 %. Dette gjør at dieselforbruket per fm³ er mye større for transport av GROT i terreng enn for stammevirke og heltre.

Heltre har ikke terminalarbeid som gir et bidrag til PE-forbruket og GHG-utslippene. Derimot er flishogging ved terminal mer effektivt enn flishogging på velteplass, og selv med bruk av hjullaster på terminal så er energiforbruk og utslipp lavere for flishogging på terminal enn på velteplass.

Transport av flis fra heltre krever mer energi enn transport av flis fra stammevirke og GROT. Dette skyldes at det er forutsatt en blanding av bjørk og gran for heltre. Bjørk har høyere massetetthet enn gran og dermed øker den totale massen på lassene for flis fra heltre. Dette fører igjen til større PE-forbruk og GHG-utslipp. Men en slik blanding av bjørk og gran fører også til et høyere energiinnhold i flisen. Resultatet av dette er at energiforbruket for transport av flis fra stammevirke og heltre er like stort hvis man ser på det i % av energiinnholdet i brenselet.

For heltre og GROT som flises på velteplass så fører prosessene før transport av selve flisen til over 70 % av både PE-forbruk og GHG-utslipp. Dette skyldes også transportavstanden som er valgt for flis. Dersom transportavstanden øker til 60 km vil PEF øke til henholdsvis 1,032 og 1,033, og utslippskoeffisienten vil øke til 9,030 og 9,324 g CO₂eq/kWh, for heltre og GROT.

6.2.1 Maksimale og minimale verdier

Ved å endre på verdiene i Tabell 6.2 er det funnet maksimale og minimale verdier for PEF og utslippskoeffisient for de ulike flissortimentene, med og uten allokering. Avhengig av transportavstander, tykkelse på trestammer og type allokering som betraktes, så endrer PEF og utslippskoeffisient seg mye for de ulike sortimentene. Maks volum for heltre er satt til å være 300 dm³, ikke 500 dm³ som for stammevirke.

Det vises i Figur 6.8 at flis kan variere i PEF mellom 1,017 og 1,086 avhengig av sortiment, transportavstander, tømmer volum og allokering. Utlippskoeffisienten kan variere mellom 5,468 og 22,663 g CO₂eq/kWh. De laveste verdiene fås ved å velge flis fra heltre. Allokering er ikke blitt brukt for heltre, så dette vil ikke ha noen innvirkning på resultatet. I andre enden av skalaen så er det flis fra GROT som bUNtes og flises på terminal som får de høyeste verdiene. Energiforbruk og GHG-utslipp vil være større ved allokering enn hvis allokering unngås. Dette skyldes at ved allokering så allokeres også energiforbruk og GHG-utslipp for administrasjon. Dersom allokering unngås vil energiforbruk ved hogst være 0 og for administrasjon vil det være på 14,400 MJ/fm³ for GROT. Ved allokering basert på energiinnhold vil andelen av energiforbruket ved hogst som allokeres til GROT være på 10,836 MJ/fm³, og andelen som allokeres til administrasjon vil være på 4,926 MJ/fm³. Summen av disse to utgjør mer enn 14,400 MJ/fm³.

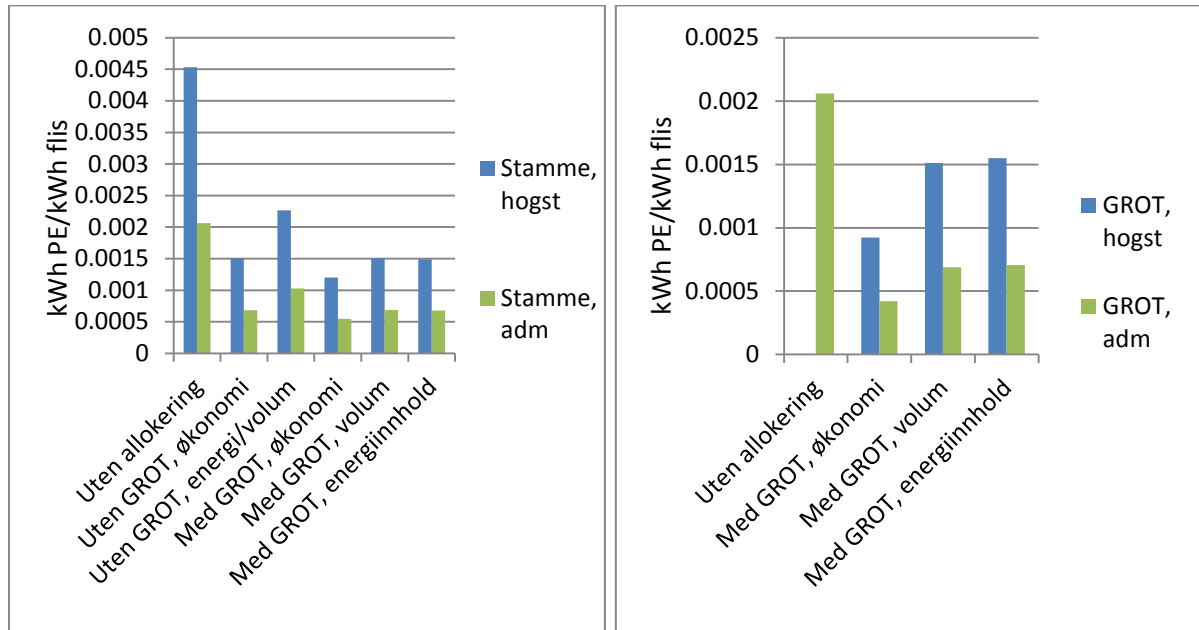
Figur 6.8: Maksimale og minimale verdier for PEF og utslippskoeffisient for de ulike sortimentene, med og uten allokering

Maks PEF og utslippskoeffisienter for forskjellige sortimenter uten allokering				
	Stammevirke	Heltre	GROT, flising på velteplass	GROT, bunter med flising på terminal
PEF (kWh/kWh)	1.071	1.034	1.042	1.085
Utslippskoeffisient (g CO ₂ eq/kWh)	17.664	9.672	12.278	22.378
Min PEF og utslippskoeffisienter for forskjellige sortimenter uten allokering				
	Stammevirke	Heltre	GROT, flising på velteplass	GROT, bunter med flising på terminal
PEF (kWh/kWh)	1.025	1.017	1.019	1.035
Utslippskoeffisient (g CO ₂ eq/kWh)	7.237	5.468	5.849	10.303
Maks PEF og utslippskoeffisienter for forskjellige sortimenter MED allokering				
	Stammevirke	Heltre	GROT, flising på velteplass	GROT, bunter med flising på terminal
PEF (kWh/kWh)	1.067	1.034	1.043	1.086
Utslippskoeffisient (g CO ₂ eq/kWh)	16.254	9.672	12.564	22.663
	*Forbruk uten GROT, masse/volum	*ingen allokering	*allokering basert på energiinnhold	*allokering basert på energiinnhold
Min PEF og utslippskoeffisienter for forskjellige sortimenter MED allokering				
	Stammevirke	Heltre	GROT, flising på velteplass	GROT, bunter med flising på terminal
PEF (kWh/kWh)	1.021	1.017	1.018	1.034
Utslippskoeffisient (g CO ₂ eq/kWh)	5.988	5.468	5.516	9.970
	*Forbruk med GROT, økonomi	*ingen allokering	*økonomisk allokering	*økonomisk allokering

6.2.2 Konsekvenser ved ulik allokering

Energiforbruk og GHG-utslipp endrer seg for hogst og administrasjon avhengig av hvilke allokeringemetode som benyttes. Resultatet av hvordan dette endrer seg vises i Figur 6.9.

Figur 6.9: Endring i energiforbruk for hogst og administrasjon ved ulike allokeringemetoder for stammevirke (t.v) og GROT (t.h)



I samsvar med resultatene for maksimale og minimale verdier gitt i kapittel 6.2.1, vil det for stammevirke være en økonomisk allokering der GROT inngår som et produkt i hogstprosessen som er mest gunstig. For GROT så er også økonomisk allokering det mest gunstige alternativet siden sagtømmer vil ta en stor del av energi- og klimakonsekvensene grunnet sin økonomiske verdi. For stammevirke så vil det å unngå allokering være klart minst fordelaktig. Det er antatt samme administrativt energiforbruk for GROT som flises på velteplass og GROT som buntes. GROT som buntes har derfor samme energiforbruk som GROT som flises på velteplass for hogst, administrasjon og terrengtransport.

6.3 Diskusjon av resultater for flis

Transport av tømmer og bunter får i denne analysen det samme PE-forbruket og GHG-utslippet for samme transportavstand. SimaPro tar inn data i form av tkm. For tømmer og bunter så beregnes forbruk ut i fra følgende formel:

$$\frac{(masse på lass i tonn) * (distanse tur – retur i km) * lastefaktor * \frac{2,36 MJ}{tkm}}{volum på lass i fm^3} \quad (6.2)$$

Lastefaktoren beskriver hvor stor del av fullt lass som transporteres, tur-retur. Med fullt lass én vei, og tomt lass tilbake blir denne faktoren 0,5.

Denne formelen gir samme energiforbruk for transport av tømmer og bunter. En studie gjort av Leif Kjøstelsen i Skog og Landskap [46], kom fram til at dieselforbruket ved transport av tømmer der volumet på lasset var på 43 fm³, var på 5,1 l/mil for tomt lass, og 6,4 l/mil for fullt lass. Målt i volum biomasse (fm³) per lass får man bare litt over halvparten av volumet på et lass bunter i forhold til et lass tømmer. Det kan dermed antas at kjøring med fullt lass buntet GROT har et energiforbruk på halvparten av et fullt lass med tømmer, det vil si et forbruk på 5,75 l/mil. Med dette som utgangspunkt vil man få energiforbruk for ulike transportavstander som vist i Tabell 6.3.

Tabell 6.3: Variasjon i forbruk ved forskjellig transportavstand for tømmer og bunter

Variasjon ved forskjellig avstand (tur-retur) for tømmertransport av stammetre (gitt i l/fm ³)				Variasjon ved forskjellig avstand for tømmertransport av bunter (gitt i l/fm ³)			
Avstand (km)	Lessing/lossing	Kjørebruk	Totalbruk	Avstand	Lessing/lossing	Kjørebruk	Totalbruk
30	0.3	0.8	1.1	30	0.44	1.42	1.86
60	0.3	1.6	1.9	60	0.44	2.84	3.28
90	0.3	2.41	2.7	90	0.44	4.26	4.70
120	0.3	3.21	3.51	120	0.44	5.68	6.12
150	0.3	4.01	4.31	150	0.44	7.10	7.54

Med dette som utgangspunkt ville transport av bunter hatt et langt større energiforbruk enn transport av tømmer, og i tillegg et større GHG-utslipp. Dette ville ført til en høyere PEF og utslippskoeffisient for bunter. Utfallet av å bruke verdiene for forbruk som står i Tabell 6.3 er ikke studert videre i denne analysen.

For heltre er det ikke foretatt noen allokering da det er antatt at dette er et sortiment med verdikjede uavhengig av de andre sortimentene. Det kan være tilfelle at sluttavirkning (hogst av stammevirke) og tynning skjer parallelt, og det ville da vært riktig å allokere energiforbruk og GHG-utslipp til heltre i tillegg til stammevirke og GROT. Dette gjelder spesielt for administrasjon siden det for hogst og tynning av heltre ofte brukes andre hogstmaskiner med mindre effekt enn for stammevirke.

Allokeringen av energiforbruk og GHG-utslipp knyttet til hogst kunne vært analysert grundigere. Det ble forutsatt i beregningene at 50 % av det som hogges er sagtømmer som brukes til ulike tømmerprodukter. Det er store massetap i verdikjeden fra sagtømmer til tømmerprodukter, noe som fører til at det faktisk bare er 20 % av det som hogges som ender opp som tømmerprodukter [30]. De resterende 80 % av stammevirket fordeler seg mellom energivirke, massevirke og avfall i diverse sagprosesser (som sagflis). Ved nærmere analyse av dette kunne allokeringfaktorene blitt forandret.

I denne analysen er det også antatt at terrengtransport av stammevirke og heltre har samme energiforbruk. Grener fjernes ikke fra heltre før transport i terreng og det vil dermed være naturlig å anta at FM til heltre er lavere enn FM til stammevirke. Ved lavere FM øker energiforbruket per fm³. I denne analysen er transportmengden for terrengtransport av heltre og stammevirke 15 fm³. I lignende studie utført av Anders Hohle [42], er kapasiteten per lass heltre transportert i skog kun 10 fm³. Med en transportavstand på 250-300 m tilsvarer dette et forbruk på 1,06 l/fm³ heltre. I denne analysen er det antatt et forbruk på 0,66 l/fm³ ved en transportavstand på 300 m. Ved å bruke 1,06 l/fm³ for transportavstand på 300 m, vil man trolig komme frem til et mer korrekt resultat i

beregningene. Dette har ikke blitt utført i denne analysen fordi informasjonen ble funnet etter at alle beregninger og tolking av resultater hadde blitt utført.

Ved transport av tømmer kan det diskuteres om det er riktig å skille mellom transport av sagtømmer og energivirke. Mye av tømmeret som transporteres er ikke egnet for skurproduksjon og vil bli benyttet som massevirke til produksjon av papir eller treplater, eller så vil det bli benyttet til produksjon av flis eller pellets. Da det ikke er funnet noe litteratur om hvor stor del av transportert tømmer volum som brukes til skurproduksjon, og hvor stor del som blir til andre produkter, er det antatt at stammevirke som brukes til skurproduksjon og stammevirke som brukes til flisproduksjon transporteres hver for seg, og at det dermed ikke er behov for å allokere energiforbruk og GHG-utslipp ved transport av tømmer.

Grunnen til at heltre får en lavere PEF og utslippskoeffisient enn GROT selv om GROT har lavere energiforbruk og utslipp per fm^3 , er at det for heltre er antatt 50 % bjørk og 50 % gran. Bjørk har høyere energiinnhold per fm^3 enn gran ved samme fuktinnhold. Hvilke tresorter som brukes kan variere, og også fuktigheten. Det er ofte vanlig at GROT blir liggende omtrent en vår og en sommer for at barnåler skal falle av og at GROT'en skal tørke. Dette gjør at skogen får tilført mange nødvendige næringsstoffer og at brennverdien i brenselet øker [49]. Heltre og tømmer kan også lagres under dekke i skog, eller på velteplass for å redusere fuktigheten i tømmeret. Konsekvensene for PEF og utslippskoeffisient ved å bruke trevirke med lavere fuktighet er ikke analysert for flis, men det er utredet i et scenario i kapittel 7.3.2 for pellets.

I [17] er PEF for diesel inkludert. Det er det ikke i analysen av flis i denne masteroppgaven. PEF for diesel er i [17] oppgitt til å være på 1,16. Dersom dette hadde blitt inkludert ville PEF for de ulike sortimentene i referansescenarioet blitt følgende:

Tabell 6.4: PEF og utslippskoeffisient for ulike sortimenter i referansescenarioet med inkludering av PEF for diesel på 1,16

	<i>Stammevirke</i>	<i>Heltre</i>	<i>GROT, flising på velteplass</i>	<i>GROT, bunter med flising på terminal</i>
<i>PEF, uten inkludering av PEF diesel</i>	1.042	1.026	1.026	1.056
<i>PEF, med inkludering av PEF diesel</i>	1.044	1.029	1.030	1.061

Ved å inkludere PEF for diesel som brukes i de ulike skogs- og anleggsmaskiner, vil altså total PEF øke, men økningen er minimal. Utslippskoeffisienten vil ikke øke ved å ta med PEF for diesel. Dette skyldes at data for diesel i EcoInvent-databasen allerede inkluderer hele verdikjeden for diesel og GHG-utslippene i denne verdikjeden. GHG-utslipp fra bruk av diesel er i denne masteroppgaven beregnet i SimaPro der EcoInvent-databasen benyttes. Ved bruk av 1 liter diesel inngår altså GHG-utslippene i alle ledd fra uttak av råolje til bruk av diesel.

Tap av tørrstoff ved transport i skog og ved lagring, både på velteplass og ved sluttbruker, er ikke inkludert i analysen. Tap ved transport i skog og ved lagring på velteplass kan utgjøre 2-15 % av energiinnholdet i flisen. Tapet ved lagring hos sluttbruker kommer i tillegg. Det kan være interessant å se på konsekvensene for PEF og utslippskoeffisient for flis når disse tapene er inkludert. I verste fall kan disse tapene føre til en stor økning for både PEF og utslippskoeffisient.

Selv om heltre og flis fra GROT er de to typene brensel som kommer best ut i energi- og klimasammenheng, så er det ikke gjort rede for økonomien til de forskjellige sortimentene av flis.

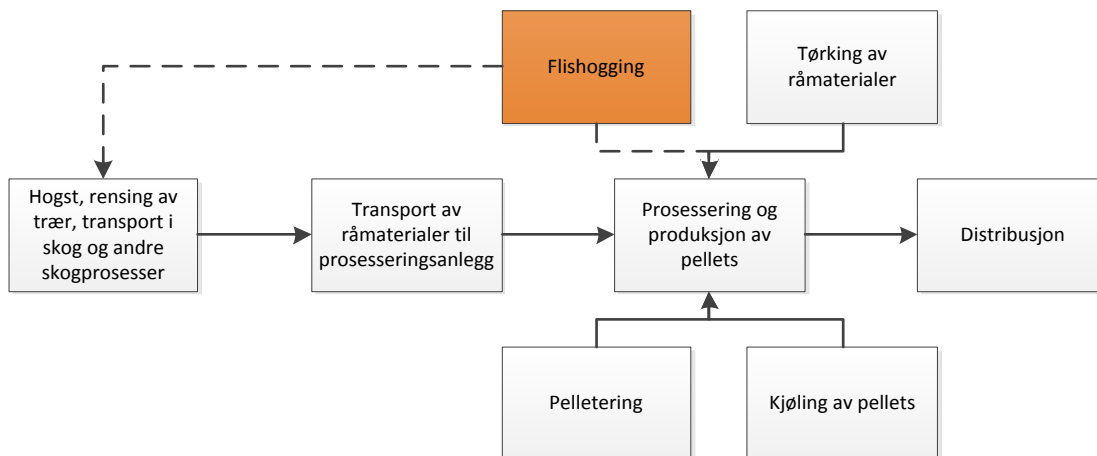
Sammenlignet med PEF og utslippskoeffisient for andre energiresurser (kapittel 3.2.1- 3.2.5), kommer flis fra alle forskjellige sortimenter svært godt ut, og besparelsene i primærenergibruk og GHG-utslipp vil være betydelige for alle sortimenter. Hvor flisen skal brukes er avgjørende for hva slags sortiment man produserer. Ulike varmesentraler er egnet til ulike typer flis med tanke på fuktinnhold og størrelse på flisen. Skivehoggere på terminal hogger mer homogen flis enn trommelhoggere på velteplass [49], og flis fra terminal egner seg derfor bedre til små flisfyringsanlegg som krever mer homogent brensel [40]. Dette øker også den økonomiske verdien på flisen, noe som gjør at den lange transportavstanden til terminal før transport av flis kan være verdt strevet.

7 Biobrensler: Pellets

Pellets er kvernet treflis presset sammen til små, sylindriske enheter med en maksimal diameter på 25 mm [53]. Pellets deles etter Norsk Standard inn i tre forskjellige klasser. Disse klassene skiller mellom forskjellige spesifikasjoner for pellets. Dimensjon, tetthet og fuktinnhold er noen av spesifikasjonene som varierer mellom de tre klassene. Fuktinnholdet skal i klasse 1 og 2 være under 10 % og i klasse 3 skal den være under 12 %. I denne masteroppgaven er det antatt at pellets har en effektiv brennverdi på 4,8 kWh/kg. Dette energiinnholdet er også brukt i flere andre studier. Ved å benytte ligning (6.1) får pellets et fuktinnhold på 8,6 %. Ligning (6.1) er derimot bare en «god» tilnærming, og fuktinnholdet kan variere noe. Pellets har på grunn av sin høye energitetthet relativt like egenskaper som fyringsolje, og oljefyrte kjelanlegg kan enkelt bygges om til anlegg for pelletsfyring.

To forskjellige produsenter av pellets som holder til i Norge er analysert med tanke på primærenergiforbruk og GHG-utslipp for pellets. Selv om verdikjeden for de to anleggene er forskjellig, så kan den på forenklet form forklares som i Figur 7.1 for begge produsentene.

Figur 7.1: Verdikjeden for pellets



Pelletering er i denne oppgaven sett på som én prosess selv om denne prosessen innebærer fjerning av uønskede gjenstander, kverning og pressing av pellets [54]. For anlegget til Biowood Norway på Averøy, så er flishoggingen en del av uttak av råmaterialer (første leddet i verdikjeden), mens den inngår som et ledd i pelletsprosesseringen for anlegget i Hallingdal.

Biowood Norway [55] holder til på Averøy utenfor Kristiansund, og er Norges og en av verdens største produsenter av pellets. De benytter seg av flis fra ulike tresorter som transporteres fra andre kontinenter. Flisen hogges enten i skog eller ved båtterminal før den sendes til Averøy med skip. På prosesseringsanlegget på Averøy så tørkes flisen med varme fra forbrenning av omtrent 8 % av råstoffet før det pelleteres, kjøles og fraktes til kunder nær kysten av Nord- og Nordvest-Europa samt Storbritannia. Kundene er varmekraftverk og kraftkrevende industri.

Hallingdal Trepellets [56] holder til i Ål i Hallingdal og produserer pellets for det norske markedet. De benytter seg av stammevirke som kjøres inn fra leverandører i Sør-Norge. Ved pelletsanlegget kuttes

stammevirket til flis i en elektrisk fliskutter, før den tørkes ved å bruke fjernvarme fra forbrenningsanlegget til Hallingdal renovasjon. Deretter blir flisen pelletert, før den kjøles ned og transporteres til forbrukerne som er alt fra skoler til kontorbygg og privatboliger i Sør-Norge.

7.1 Metodikk

Den funksjonelle enheten er forskjellig for de to anleggene som er studert. For anlegget på Averøy så er den funksjonelle enheten ett tonn pellets. For anlegget i Hallingdal så er det totalt årlig energiforbruk og utslipp relatert til total årlig produksjonsmengde som er studert. All data som er blitt benyttet for pelletsprosesseringen i Hallingdal har blitt oppgitt på årsbasis.

7.1.1 Averøy

Det er tatt utgangspunkt i rapporten «Greenhouse gas emission impacts of use of Norwegian wood pellets: a sensitivity analysis» [50], som klarlegger GHG-utslippene og energibruken for hele verdikjeden til pellets. Denne rapporten ble utarbeidet før produksjonen av pellets startet opp, og det er derfor også tatt kontakt med produksjonsanlegget på Averøy for å kunne vurdere resultatene i rapporten i forhold til hvordan anlegget faktisk opererer etter oppstart. I motsetning til rapporten som tar utgangspunkt i flisleveranser kun fra Canada, så har anlegget også fått flisleveranser i fra Buchanan i Liberia. I denne oppgaven blir det antatt at energibruken og GHG-utslippene er de samme uavhengig av hvor flisen kommer ifra. Dette kan være feil fordi flisen som blir levert fra Liberia har mindre fuktighet enn den som blir levert i fra Canada [57], og det kreves dermed mindre energi til tørking. I tillegg kan råvarene til flisen fra Liberia utelukkende bli sett på som avfall fra gummitrær, siden produksjon av gummi er den eneste økonomiske driveren til å felle disse trærne [32]. Dermed blir det et spørsmål om noe av utslippene og energiforbruket knyttet til hogst skal allokere til råvarene for gummitreflis. Allokering for skogprodukter ble behandlet i kapittelet om flis, og vil ikke bli tatt opp i dette kapittelet om pellets.

Bjørk med 40 % MC_{wet} er tresorten som blir benyttet i analysen. Den hogges i Canada, og blir igjen hogget til flis ved skogsvei før den transporteres til kai i Halifax. Deretter blir den transportert til Averøy. 8 % av flisen forbrennes og brukes til tørking av den resterende flisen på Averøy. Deretter blir pellets produsert med bruk av el som kommer fra norsk vannkraft. I denne rapporten er også energiforbruk og GHG-utslipp tilknyttet konstruksjon av anlegg tatt med. Etter pelleten er ferdig produsert blir den transportert til Hamburg med lasteskip, før den transporteres videre til forbrukere i lastebiler. Data som er brukt i beregningene stammer fra ulike LCI-databaser, og er gjengitt i

Vedlegg D.

7.1.2 Hallingdal Trepellets

For å beregne primærenergiforbruk og GHG-utslipp for pellets produsert i Hallingdal ble Ståhle Bakstad i Hallingdal Trepellets kontaktet. Gjennom telefonsamtaler og e-postkorrespondanse ble en stor del av datamaterialet samlet inn.

Råvarene som benyttes er stammeved fra gran og furu [58] med 40 % MC_{wet} . Det antas at 50 % av hver sort brukes. Informasjon om tresortene er hentet fra [47]. Trestammene blir fraktet til Hallingdal fra forskjellige steder i Sør-Norge, med avstander helt opptil 157 km. Energiforbruk knyttet til hogst og transport i skog er hentet fra [42]. SimaPro har blitt brukt til å beregne GHG-utslippene for skogsmaskinene. Det er prosessen «Diesel, burned in building machine» fra EcoInvent-databasen som er benyttet. Energibruk og GHG-utslipp ved transport av tømmer og ferdig pellets er også beregnet i SimaPro. Et lass bestående av 40 fm³ med tømmer, som er mengden tømmer per lass

levert til Hallingdal, veier 28 tonn. Se **Vedlegg D** for beregninger. Snittkapasiteten for transport av pellets er 30 tonn, men mengden pellets per lass kan variere fra 27 – 35 tonn. Konsekvensene av denne variasjonen blir sett nærmere på i kapittel 7.3.1. Transportprosessen er også hentet fra EcoInvent-databasen, og prosessen som er benyttet er «Transport, lorry >28t, fleet average/CH».

Forbruk av el i forskjellige maskiner på anleggsplassen er angitt i **Vedlegg D**. Alt elforbruket er knyttet til pelletsprosessen, selv om pelletering, fliskutting og kjøling samlet sett ligger langt under det totale forbruket av el. PEF og GHG-utslipp for el er hentet fra [17] for vannkraft og [21] for de andre el-ressursene som er vurdert. Dette er også gjengitt i **Vedlegg D**. Det benyttes truck/hjullaster/gravemaskiner i svært liten utstrekning på anleggsplassen, og energiforbruk for dette kan neglisjeres. All håndtering av varestrømmen gjennom fabrikk er elektrisk drevet og er inkludert i det totale elforbruket.

I motsetning til Averøy så er ikke infrastruktur med i beregningene. Derimot er det tatt med et administrativt drivstofforbruk for uttak av råmaterialer, som blant annet innebærer personaltransport, knyttet til uttak av råvarer fra skogen. Dette fremgår av [42].

Tørking står for den største energibruken i pelletsprosessen med forbruk på omtrent 20 % av energiinnholdet i pellets [58]. Varmen til tørking kommer fra forbrenningsanlegget til Hallingdal renovasjon. De forbrenner søppel og flis som gir effekt ut på henholdsvis 6 og 2 MW ved maks last. På bakgrunn av dette antas det at 75 % av varmen kommer fra forbrenning av avfall og 25 % fra forbrenning av flis. Virkningsgraden er omtrent 85 % for begge kjelene [59]. Tap i distribusjonsnett for varme er satt til 10 % [40], siden det ikke ble funnet informasjon om energitettheten i distribusjonsnettet. Effektforkbruk for elektriske komponenter knyttet til fjernvarmen er neglisjert. Resultatene i referansescenarioet tar utgangspunkt i PEF og GHG-utslipp fra [17] for husholdningsavfall. Flisen kommer fra returtre. Siden det ikke er funnet noe litteratur om energiforbruk og GHG-utslipp for returtre, antas det at skogsflis benyttes, og PEF og GHG-utslipp for skogsflis er hentet fra [17]. Analysen av pellets ble utført før analysen av flis. Derfor har ikke resultatene som ble utarbeidet i kapittel 6 benyttet.

Videre antas det i referansescenarioet at en stor del av innholdet i avfallet er organisk avfall siden de gjenvinner plast og annet uorganisk materiale på Hallingdal Renovasjon. Energiinnholdet i avfallet er ikke medregnet i PEF for avfallet siden avfallet kun er betraktet som et restprodukt [17]. Utslippene av GHG-gasser antas å være de samme som for et CHP-anlegg for husholdningsavfall. I [17] legges all miljøbelastning på avfallet ved forbrenning, men dette blir drøftet nærmere i kapittel 7.3.5. GHG-utslippene er derfor de samme for tørkeenergien, uavhengig om man betrakter total tørkeenergi eller primærenergiforbruk ved tørking. Forskjellige betraktninger av hvordan tørkeenergien skal behandles med tanke på bidrag til PEF og GHG-utslipp behandles i kapittel 7.3.5.

7.2 Resultater i referansescenarioer med el fra vannkraft

7.2.1 Averøy

Resultatene for ressursbruk og GHG-utslipp er hentet fra [50] og vises i Tabell 7.1. Analysen av anlegget var delt inn i tre deler: Innkjøp og transport av råvarer, produksjon av pellets og distribusjon av pellets med bruk og askebehandling. Utslipp av gassene CO₂, CH₄ og N₂O ble inkludert langs hele verdikjeden, bortsett fra ved forbrenning av flis som blir brukt til å tørke den resterende flisen.

Det er også blitt vurdert hvor store utslippene i verdikjeden vil være dersom el som blir brukt kommer fra lignittbasert kullkraft istedenfor vannkraft. Dette resultatet blir diskutert i kapittel 7.2.3.

Tabell 7.1: Energibruk per tonn pellets for forskjellige prosesser for anlegget på Averøy

Table 2 – Resource use over the life cycle of pellets (per tonne pellets) and energy input as share of energy content in the pellets (%).				
Step in life cycle	Factor	Per tonne pellets	Unit	Energy input as share of pellet energy content (%)
Raw materials	Fuel for silviculture and harvest	6.7	l	1.5
	Fuel for chipping and loading on trucks	2.8	l	0.6
	Fuel for road transport	8.4	l	1.9
	Fuel for loading on vessels	0.5	l	0.1
Production	Heavy oil for vessel transport	28.5	kg	6.7
	Steel	0.08	kg	–
	Concrete	0.72	kg	–
	Asphalt	0.04	kg	–
	Fuel for construction and transport of construction parts	0.002	l	5E-4
	Electricity	720	MJ	4.2
	Moist chips and bark used for drying of pellets	130	kg	13
Transport and use of pellets	Heavy oil for vessel transport	13.2	kg	3.1
	Fuel for road transport	1.2	l	0.3
	Fuel for loading/unloading	0.62	l	0.1
	Electricity for crushing	15.2	MJ	0.1
	Fuel for handling of pellets and ash disposal	0.12	l	0.02
Total				32

Tabell 7.2: GHG-utslipp per tonn pellets for forskjellige prosesser for anlegget på Averøy

Table 3 – GHG emissions over the life cycle of pellets (kg CO₂eq/tonne pellets) and share of total emissions (%) over the life cycle.		
Factor	kg CO ₂ eq/tonne pellets	Share of total emissions (%)
Silviculture	0.4	0.2
Felling, terrain transport	14	5.9
Chipping	7	3.1
Road transport	27	11.4
Cargo boat transport	99	42
Subtotal raw material procurement and transport	148	62.6
Construction of factory	0.2	0.1
Chips	0	0.0
Electricity	1	0.4
Subtotal production	1	0.5
Loading	1	0.3
Cargo boat transport	46	19.5
Unloading and loading	1	0.3
Truck Hamburg – customers	3	1.4
Unloading	0.02	0.01
Crushing	4	1.7
Loading of crushed pellets	0.02	0.01
Emissions of methane and nitrous oxide during combustion	32	13.7
Handling of ash	0.2	0.1
Subtotal transport and use	87	36.9
Total	236	100

I tabellene vises bidragene fra forbrenning av pellets siden systemgrensene i denne rapporten også omfatter forbrenning. Tabell 7.1 viser at transport av flis og pellets, tørking samt bruken av el i prosesseringen er de største forbrukerne av energi. Den totale energibruken i verdikjeden utgjør til sammen 32 % av energiinnholdet til pellets, noe som tilsvarer en PEF på 1,32. Mesteparten av dette skyldes energien som brukes til tørking av flisen. De totale utslippene på 236 kg CO₂eq/tonn pellets

tilsvarende 49,167 g CO₂eq/kWh pellets. For GHG-utslipp så er transport av flis til Averøy den største bidragsyteren med 62,6 % av de totale utslippene. Transport av pellets og transport på vei bidrar også i vesentlig grad. Bruken av elektrisitet bidrar i svært liten grad når det er forutsatt at el kommer fra vannkraft.

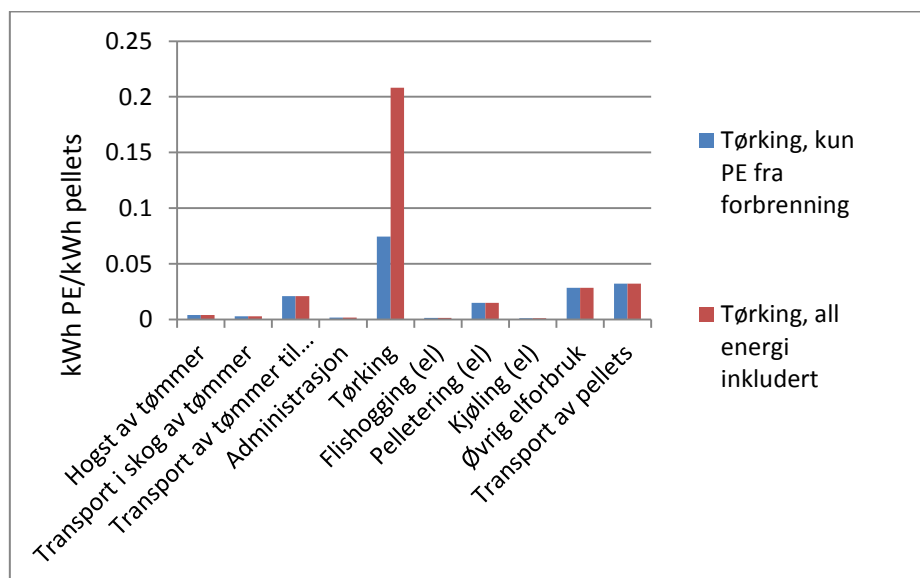
7.2.2 Hallingdal Trepellets

Resultatene fra analysen er gitt i Figur 7.2. Med el fra vannkraft i prosesseringen blir PEF 1,183 dersom det kun er tatt hensyn til PE ved tørking, og 1,316 dersom den totale tørkeenergien er medregnet. I dette scenarioet vil pellets få en utslippskoeffisient på 42,03 g CO₂eq/kWh.

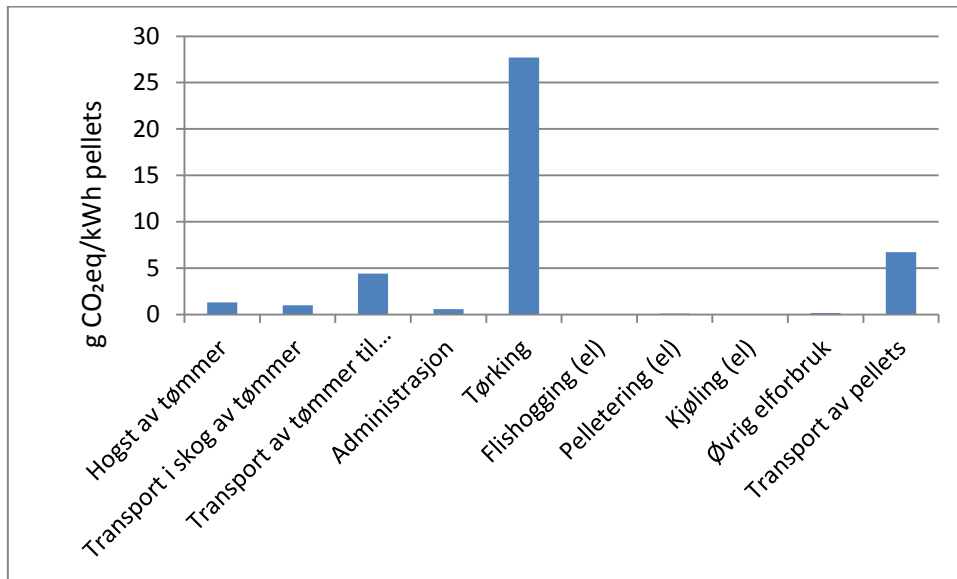
Figur 7.2: Energiforbruk og GHG-utslipp for anlegget i Hallingdal

Prosess	Energiforbruk i %		GHG-utslipp kg CO ₂ eq	GHG-utslipp i % av totalt
	Energiforbruk GJ/år	av totalt produsert energimengde		
Energimengde produsert pellets	352401			
Anskaffelse og transport av råmateriale				
Hogst av tømmer	1411.978	0.401	129337.148	3.143
Transport i skog av tømmer	1058.983	0.301	97002.861	2.357
Transport av tømmer til Hallingdal trepellets	7425.410	2.107	431051.320	10.476
Administrasjon	641.808	0.182	58789.613	1.429
Produksjon				
type el: Vannkraft			GHG (kg CO ₂ eq/GJ)	
Tørking, kun primærenergi fra forbrenning	26205.406	7.436	2712565.059	65.924
Tørking, all energi inkludert	73332.000	20.809	2712565.059	65.924
Flishogging (el)	538.268	0.153	1.617	0.021
Pelletering (el)	5279.904	1.498	1.617	0.207
Kjøling (el)	439.992	0.125	1.617	0.017
Øvrig elforbruk	10010.128	2.841	1.617	0.393
Transport av pellets	11363.612	3.225	659667.330	16.032
			PEF g CO ₂ eq/kWh	
Totalt forbruk og utslipp med total energi til tørking	111502.083	31.641	4114713.736	42.034
Totalt forbruk og utslipp kun med PE til tørking	64375.489	18.268	1.183	100.000

Figur 7.3: Energibruk i verdikjeden for anlegget i Hallingdal



Figur 7.4: GHG-utlipp i verdikjeden for anlegget i Hallingdal



Tørking er klart den største energiforbrukeren i pelletsprosessen med over 20 % energi per totalt produsert energimengde. Dersom det kun tas hensyn til primærenergien (PE) som brukes til tørking, er energiforbruket lavere, men det er fortsatt den prosessen med størst energiforbruk.

I dette scenarioet, der alt forbruk av el kommer fra vannkraft, er transport, pelletering og øvrig elforbruk de prosessene som bidrar mest til energiforbruket hvis man ser bort i fra tørking. I øvrig elforbruk inngår kjøling på pelletslager, elektromotorer som brukes til diverse automatiserte prosesser på anlegget (blant annet transport av flis og pellets på anleggsområdet) og forbruk av el til administrative formål (som for eksempel lys). Forbruket til administrative formål utgjør en svært liten del. Det har ikke vært mulig å dele opp disse prosessene, men i følge [58] så er kjøling av pellets på lager den prosessen som bruker mest strøm i øvrig elforbruk. Med el fra vannkraft så er tørking den prosessen som bidrar klart mest til GHG-utslippene, med over 65 % av utslippene. Transport gir også betydelige GHG-utslipp, mens de øvrige prosessene bidrar i liten grad til GHG-utslippene.

7.2.3 Diskusjon av referansescenario for pellets

Tabell 7.3 og Tabell 7.4 viser de prosentvise bidragene til energiforbruk og GHG-utslipp for de fire hovedleddene i verdikjeden som er angitt i Figur 7.1. For Averøy så er verdiene for forbrenning av pellets trukket i fra.

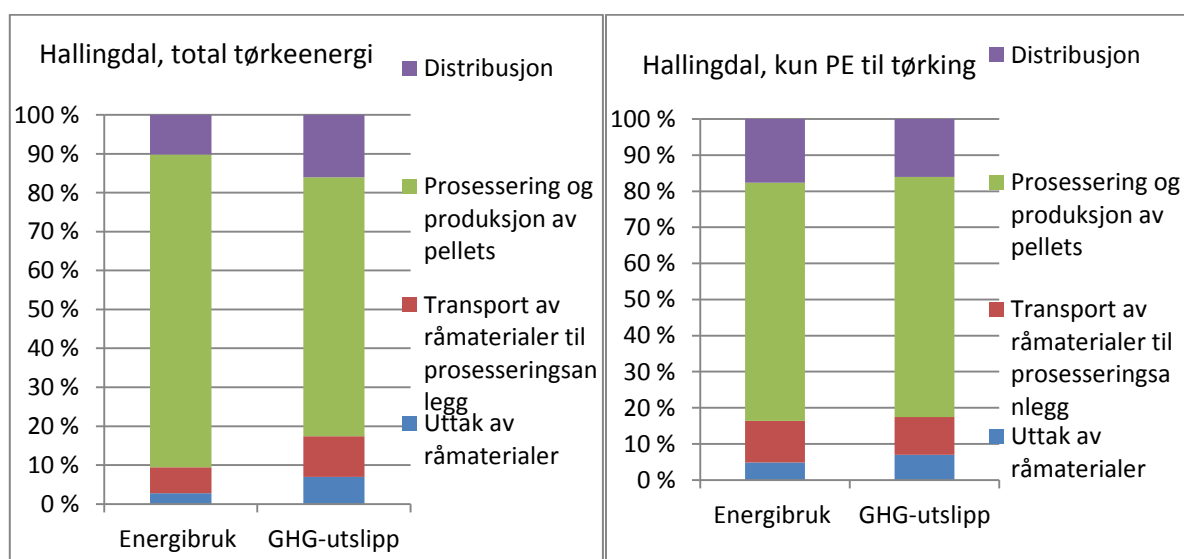
Tabell 7.3: Energiforbruk i % av energiinnhold i pellets og GHG-utslipp for anlegget på Averøy

Prosess	Energibruk i % av energiinnhold i pellets	Utslipp i % av totale utslipp
Uttak av råmaterialer	4.1	24.4
Transport av råmaterialer til prosesseringsanlegg	6.7	49.7
Prosessering og produksjon av pellets	17.2	1.2
Distribusjon	3.5	25.4
Totalt	31.5	100.7

Tabell 7.4: Energiforbruk i % av energiinnhold i pellets og GHG-utslipp for anlegget i Hallingdal

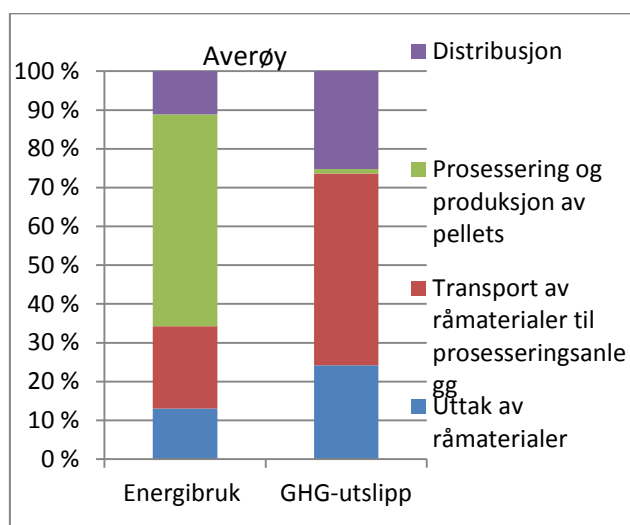
Prosess	Energibruk i % av energiinnhold i pellets	Utslipp i % av totale utslipp
Uttak av råmaterialer	0.88	6.93
Transport av råmaterialer til prosesseringsanlegg	2.11	10.48
Prosessering og produksjon av pellets (med total energi til tørking/ kun PE til tørking)	25.42/12.05	66.56
Distribusjon	3.22	16.03
Totalt (med total energi til tørking/ kun PE til tørking)	31.64/18.27	100

Figur 7.5: Prosentvis fordeling på hovedprosesser for anlegget i Hallingdal



Som Tabell 7.3 og Tabell 7.4 viser så får pellets omtrent samme PEF ved begge de to anleggene når alt energiforbruket fra tørkingen inngår i energibalansen for pellets. Dersom kun primærenergien fra tørkingen blir medregnet, vil PEF for anlegget i Hallingdal synke til 1,183. I henhold norsk og europeisk standard [11] skal all energi som brukes til prosessering av energiresurser bli tatt med i beregning av PEF. På denne måten blir det riktig å inkludere total energi fra tørking i PEF for pellets. [17] opererer med en PEF på varme fra husholdningsavfall på 0,019. Siden 75 % av energien som brukes til tørking kommer fra forbrenning av avfall, vil bidraget til total PEF for pellets bli lavere når kun PE for tørking betraktes.

Figur 7.6: Prosentvis fordeling på hovedprosesser for anlegget på Averøy



De totale GHG-utslippene ved de to anleggene er også relativt like. Anlegget på Averøy har en utslippskoeffisient på 41,67 g CO₂eq/kWh pellets levert (her er altså forbrenning og askebehandling trukket fra), og anlegget i Hallingdal har 42,03 g CO₂eq/kWh. Forbrenning av avfall til tørking av flis er den største bidragsyteren til utslippene ved anlegget i Hallingdal, mens transport av flis til Norge har de største utslippene for anlegget på Averøy.

Uttak av råmaterialer har et langt større energiforbruk i Canada enn i Norge, men for prosessen i Canada så er transport av flis fra skog til kai inkludert i uttak av råmaterialer. I tillegg inngår flishogging og lasting av flis, noe det ikke gjør for Hallingdal. Disse prosessene gir til sammen et energibruk på over 2 % av energiinnholdet i pellets. Men selv hvis dette trekkes i fra så er uttak av råmaterialer en langt mer effektiv prosess i Norge enn i Canada. Dette skyldes datagrunnlaget som er brukt til beregningene. I en studie utført av Ottar Michelsen [60] kommes det frem til at det totale dieselforbruket for hogst og transport i skog varierer mellom 0,94 og 4,45 l/fm³. For anlegget på Averøy så er det tatt utgangspunkt i at uttak av råmaterialer har et forbruk på 2,938 l/fm³ når man ser bort i fra transport til kai og flishogging. For anlegget i Hallingdal så er forbruket kun 1,94 l/fm³. GHG-utslippene for uttak av råmaterialer blir også større for anlegget på Averøy siden transport til kai og flishogging er inkludert her.

Det ble valgt å benytte verdiene i [42] for beregning av energiforbruk ved hogst og terrengtransport av skogsbrensel for anlegget i Hallingdal. I kapittel 6 ble andre verdier brukt avhengig av volum på tømmerstokkene og transportavstand for terrengtransport. Forutsatt at tømmerstokkene har volum på 250 dm³, at avstanden for terrengtransport er på 300 m og at forbruk for hogst ikke allokeres, har hogst og terrengtransport samme energiforbruk og GHG-utslipp for flis og pellets.

Transport av råmaterialer til pelletsanlegg har et stort energiforbruk og GHG-utslipp for anlegget på Averøy. Dette skyldes lang transportvei for flisen og bruk av tungolje på skipene som frakter flisen. Denne prosessen gir omtrent halvparten av de totale utslippene for anlegget på Averøy, mot 10 % av de totale utslippene for anlegget i Hallingdal. De prosentvise lave utslippene for transport for anlegget i Hallingdal skyldes at forbrenningen av husholdningsavfall i prosessering og produksjon av

pellets gir store utslipp. Konsekvensene for et annet syn på utslippene fra husholdningsavfall blir tatt opp i kapittel 7.3.5.

Flishogging inngår i produksjon av pellets for anlegget i Hallingdal, men ikke for anlegget på Averøy. Denne flishoggingen har derimot kun et energiforbruk på 0,15 % av energiinnholdet i pellets, og GHG-utslippene er svært lave når det brukes el fra vannkraft. Totalt elforbruk er på 4,61 % av energiinnholdet i pellets for anlegget i Hallingdal og 4,2 % for anlegget på Averøy. For anlegget på Averøy så er også infrastruktur (bygging av anlegget) tatt med i beregningene, men dette bidrar i svært liten grad til både energiforbruk og GHG-utslipp. Siden det i dette scenarioet er forutsatt at all el kommer i fra vannkraft, så er utslippene knyttet til prosessering og produksjon av pellets svært lave når tørkingen ikke er tatt med.

For begge anleggene så er det energien som brukes til tørking som står for det største energiforbruket. For anlegget på Averøy så brukes 13 % av energiinnholdet i pellets til tørking og anlegget i Hallingdal bruker 20 % av energiinnholdet i pellets til tørking. Anlegget på Averøy har altså en langt mer effektiv tørkeprosess enn i Hallingdal. GHG-utslippene fra tørkingen bidrar ikke til de totale GHG-utslippene for anlegget på Averøy. Dette skyldes at det er forbrenning av råvarene (flis) som brukes til tørking, og i [50] blir dette blir sett på som karbonnøytralt. I tillegg så er all bruk av fossil energi for å lage denne flisen allokert til den delen av flisen som blir til pellets. På anlegget i Hallingdal så er derimot GHG-utslippene fra tørkeprosessen svært store. Det skyldes at alle utslipp for innholdet i avfallet er allokert til forbrenningen i dette scenarioet. I [25] allokeres alle utslipp til produktene som inngår i forbrenningen av avfall, og ikke til selve forbrenningen. Dermed blir utslippene ved forbrenning av avfall 0 g CO₂eq/kWh. Konsekvensene av en slik allokering vises i kapittel 7.3.5. AvfallNorge har analysert fornybarandelen i avfall på landsbasis og mengden avfall ved norske forbrenningsanlegg [61]. Mengden avfall for forbrenningsanlegget i Hallingdal ble også oppgitt. Denne består av omtrent 9000 tonn husholdningsavfall, 9000 tonn usortert næringsavfall og 2000 tonn sortert næringsavfall. I følge denne rapporten vil avfallet som brukes i Hallingdal ha et energiinnhold på 10,75 MJ/kg, en fornybarandel (organisk) på 51 % og en fossil andel på 49 %. Med en så stor andel fossilt materiale i brenselet så er det klart at det vil være bidrag til drivhuseffekten ved forbrenning. Hvordan dette skal allokeres mellom produkter i avfallet og forbrenningen er vanskelig å si noe om og bør arbeides mer med. EcoInvent-databasen oppgir GHG-utslipp for varmeproduksjon fra organisk husholdningsavfall på 50 g CO₂eq/kWh. Her er det brukt økonomisk allokering for varmen som genereres og produktene i avfallet. Innholdet i denne blandingen er 100 % organisk. Økonomisk allokering vil gi et større GHG-utslipp for varmen når det er et fossilt innhold på 50 %. Utslippene som er brukt i referansescenarioet på 173,9 g CO₂eq/kWh varme fra avfall, kan nok da være realistiske, selv om de sannsynligvis vil være lavere hvis en del av utslippene allokeres til produktene i avfallet. Derimot så ble det også forutsatt i referansescenarioet at «en stor del» av avfallet er organisk, noe som sannsynligvis tilsvarer mer enn 50 %. Dermed kan igjen 173,9 g CO₂eq/kWh være realistisk uavhengig av allokering. Dette vil det ikke bli gått nærmere inn på i denne oppgaven, men betraktning av ingen GHG-utslipp fra forbrenning blir vurdert senere.

Det bør også nevnes at forbrenning av avfall er et klimatiltak, dersom alternativet er forråtnelse på deponi med tilhørende metanutslipp – noe som har større klimapåvirkning [62]. Fra 1.1.2009 er det innført forbud mot deponering av nedbrytbart avfall. Alternativet til forbrenning i Norge er da eksport av avfall med de utslippene av klimagasser det fører med seg, og de totale GHG-utslippene vil da øke. Avfallet kan ha alternative bruksmetoder som for eksempel råstoff til produksjon av

biogass. Biogass kan erstatte fossilt brensel og ha en større positiv effekt for GHG-utslipp enn det forbrenning og varmeproduksjon har. Dette blir ikke vurdert nærmere i denne oppgaven, men er også noe som bør arbeides videre med.

Med økende grad av kildesortering vil mer av innholdet i husholdningsavfallet bli fornybart og dette vil føre til lavere energimengde i avfallet. Dermed må andelen brensel fra biomasse (flis) økes for å ha samme energiproduksjon i forbrenningsanlegget. Når skogsflis brukes vil dette føre til et lavere GHG-utslipp, men en høyere PEF for varmen.

Som sagt i metodikken så er det flis fra returtre som benyttes i forbrenningsanlegget, ikke skogsflis som er brukt i dette referansescenarioet. [17] har ingen tall på energibruk og GHG-utslipp for returtreflis, men de sier at denne typen flis kun skal bli sett på som avfall, og at det kun er hjelpeenergien og GHG-utslipp knyttet til framstilling av flisen som skal medregnes. Norsk Energi [25] oppgir en PEF på 0,05 og en utslippskoeffisient på 3 g CO₂eq/kWh for produksjon og distribusjon av returtreflis. Dersom disse tallene blir brukt vil PEF for pellets for anlegget i Hallingdal reduseres når det forutsettes at kun PE fra tørking medregnes. GHG-utslippene vil også bli redusert.

Anlegget på Averøy har et energiforbruk på 3,5 % av energiinnholdet i pellets for distribusjonen og anlegget i Hallingdal har et energiforbruk på 3,22 %. Transportdistansen er mye lengre for pelletsen fra Averøy, men båtene som frakter denne pelletsen har langt større kapasitet enn lastebilene som brukes til distribusjon av pellets fra anlegget i Hallingdal. Dermed blir ikke forskjellen i energiforbruk per kWh pellets så stor. Prosentvis er GHG-utslippene større for distribusjon for anlegget på Averøy, med 25 % av de totale utslippene. Distribusjonen fra Averøy gir utslipp på 10,6 g CO₂eq/kWh, mens fra Hallingdal er utslippene på 6,7 g CO₂eq/kWh.

7.3 Analyse av forskjellige scenarier for pellets

I dette delkapittelet vil ulike scenarier for pelletsanlegget i Hallingdal bli sett nærmere på.

Siden mengden pellets varierer mellom 27 og 35 tonn per lass med pellets kan det være interessant å se på konsekvensene av dette for PEF og utslippskoeffisient.

I referansescenarioet ble det forutsatt at tømmeret som benyttes har et fuktinnhold på 40 %. Dersom tømmeret lagres før det flises og tørkes vil det kreve mindre energi til tørking, noe som vil redusere PEF og utslippskoeffisient.

El som ble benyttet i referansescenarioet var 100 % vannkraft. I dagens strømmarked kan det ikke bevises at strømmen som benyttes er ren vannkraft med mindre man har en eget vannkraftverk som forsyner anlegget med el året rundt. Det vil derfor bli sett nærmere på utfallet av el fra en nordisk elmiks, en europeisk elmiks og el i fra kullkraft.

I referansescenarioet er heller ikke PEF for el inkludert. Siden pelletsproduksjon krever en betydelig mengde el kan det være interessant å se på hvor mye primærenergi som brukes for å lage elektrisiteten, og hvordan dette påvirker total PEF for pellets.

Det er delte meninger om hvordan varme fra forbrenning av husholdningsavfall og returtre skal vurderes. Konsekvensene for PEF og utslippskoeffisient ved ulikt syn på dette er store. Derfor vil endringer i parametere for denne varmen også analyseres.

For anlegget på Averøy er store deler av energibruken og GHG-utslippene relatert til transport av råvarer og distribusjon. Konsekvenser ved forskjellige transportdistanser for tømmer og pellets for anlegget i Hallingdal vil derfor bli sett nærmere på.

De ulike scenarioene som er utarbeidet tar altså for seg følgende:

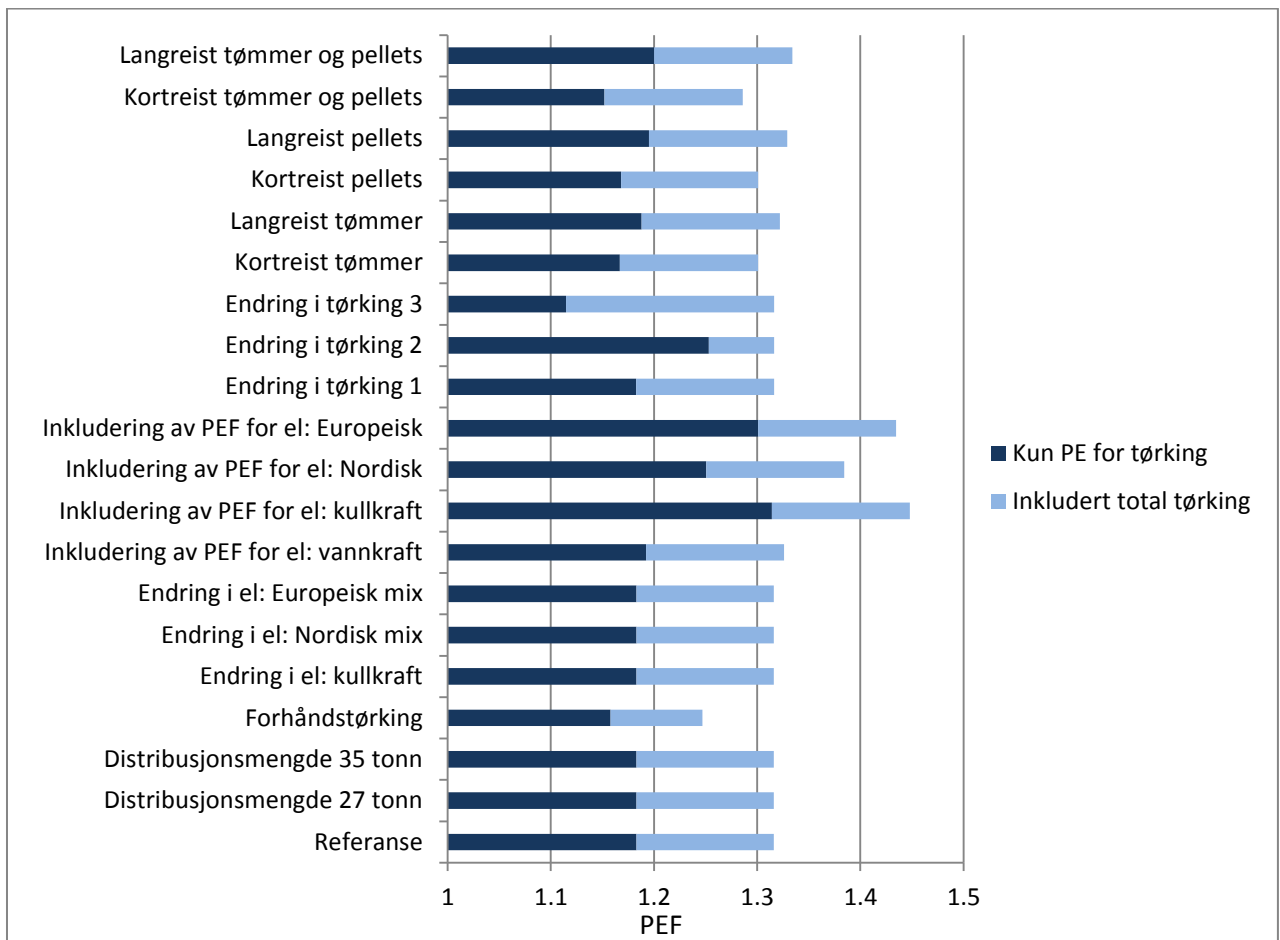
- Variasjon i mengden pellets ved distribusjon
- Endring i fuktigheten i tømmeret som brukes
- Endring i type el som benyttes i prosessen
- Inkludering av PEF for el
- Endring av syn på parametere brukt i tørkeprosessen
- Endring i transportavstand for både pellets og tømmer

Tabell 7.5, Figur 7.7 og Figur 7.8 nedenfor viser total PEF med all energien som brukes til tørking, PEF der kun PE som brukes til tørking er med, og utslippskoeffisientene i de forskjellige scenarioene. Utslippskoeffisientene blir ikke påvirket av om man betrakter total tørkeenergi eller PE-tørkeenergi. Dette skyldes at GHG-utslipp langs hele verdikjeden for husholdningsavfall og biomasse ikke endres av hvordan man betrakter energien. Referansescenarioet ble drøftet i kapittel 7.2.3.

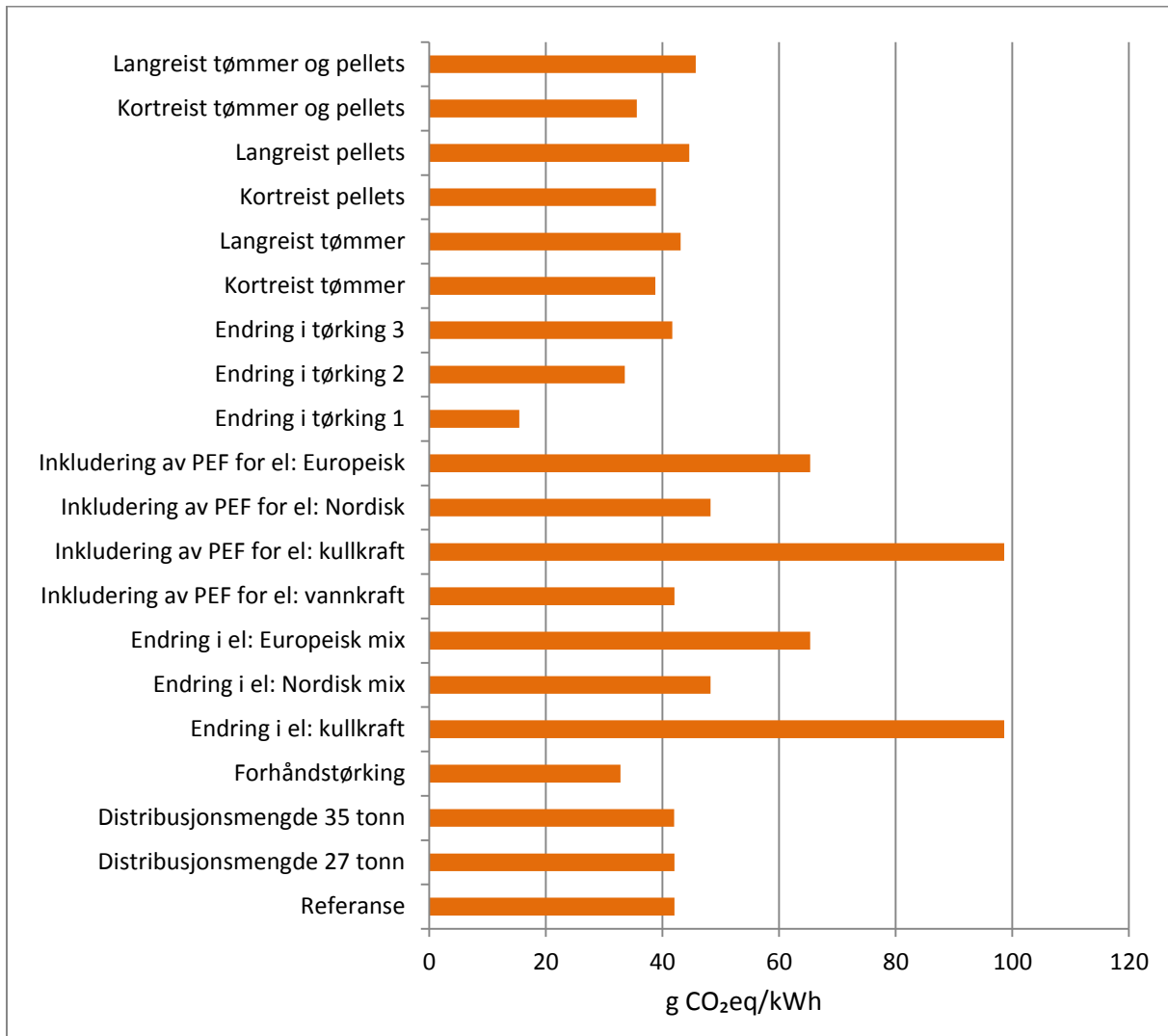
Tabell 7.5: PEF og utslippskoeffisient for pellets fra anlegget i Hallingdal ved forskjellige scenarioer

Scenario	PEF inkludert all energi til tørking	PEF kun med PE til tørking	Differanse	g CO ₂ eq/kWh
Referanse	1.316	1.183	0.133	42.034
Distribusjonsmengde 27 tonn	1.316	1.183	0.133	42.035
Distribusjonsmengde 35 tonn	1.316	1.183	0.133	42.003
Forhåndstørking	1.247	1.158	0.089	32.807
Endring i el: kullkraft	1.316	1.183	0.133	98.603
Endring i el: Nordisk mix	1.316	1.183	0.133	48.229
Endring i el: Europeisk mix	1.316	1.183	0.133	65.309
Inkludering av PEF for el: vannkraft	1.326	1.192	0.134	42.034
Inkludering av PEF for el: kullkraft	1.448	1.314	0.134	98.603
Inkludering av PEF for el: Nordisk	1.384	1.251	0.134	48.229
Inkludering av PEF for el: Europeisk	1.435	1.301	0.134	65.309
Endring i tørking 1	1.316	1.183	0.134	15.450
Endring i tørking 2	1.316	1.253	0.063	33.552
Endring i tørking 3	1.316	1.115	0.202	41.673
Kortreist tømmer	1.301	1.167	0.134	38.766
Langreist tømmer	1.322	1.188	0.134	43.133
Kortreist pellets	1.301	1.168	0.133	38.888
Langreist pellets	1.329	1.195	0.134	44.589
Kortreist tømmer og pellets	1.286	1.152	0.134	35.619
Langreist tømmer og pellets	1.334	1.200	0.134	45.688

Figur 7.7: Grafisk framstilling av PEF ved ulike scenarioer



Figur 7.8: Grafisk framstilling av utslippskoeffisient ved ulike scenarier



7.3.1 Distribusjonsmengde

En endring i distribusjonsmengde for pelletsleveransene har svært lite å si for PEF og utslippskoeffisient. PEF holder seg omtrent uendret uavhengig av distribusjonsmengde mellom 27 og 35 tonn, og utslippene varierer kun fra 42,035 g CO₂eq/kWh for 27 tonn til 42,003 g CO₂eq/kWh for 35 tonn. En reduksjon i distribusjonsmengde til 27 tonn fører til at det må kjøres flere turer, men det blir mindre masse på hvert lass. Transportprosessen som er benyttet i SimaPro for å beregne PEF og GHG-utslipp tar inn data i form av tkm, tonn-kilometer. Det totale antallet tkm varierer i svært liten grad, fra 4815585 tkm for 27 tonn til 4792620 tkm for 35 tonn, og dette forklarer de små variasjonene ved endring i distribusjonsmengde. Det er forutsatt en lastefaktor på 0,5, både ved transport av tømmer og pellets. Dette betyr at lastebilene kjører med tomme lass tilbake etter levering. Dersom lastebilene frakter varer tilbake vil antall tkm øke, men ved allokering mellom pellets og de produktene som er med på lasset tilbake vil energiforbruket og GHG-utslippene som allokeres til pelletsen bli redusert. Et slikt scenario er ikke utarbeidet for anlegget i Hallingdal, men i

[50] fører en høyere lastefaktor ved transport til reduserte GHG-utslipp. Ved en distribusjonsmengde på 27 tonn så kunne EcoInvent-prosessen «Transport, lorry >16t, fleet average» blitt valgt. Bruk av denne transportprosessen ville ført til en reduksjon i PEF til 1,315 eller 1,181 og en reduksjon i utslipp til 41,834 g CO₂eq/kWh. Det ikke er funnet informasjon om hvilke type lastebil som brukes og drivstofforbruk og GHG-utslipp for denne typen lastebil. Derfor har det blitt valgt å benytte samme type lastebil uavhengig av masse på lasset.

Transport og valg av metode for å beregne energiforbruk og GHG-utslipp for transport ble også diskutert i kapittel 6.3.

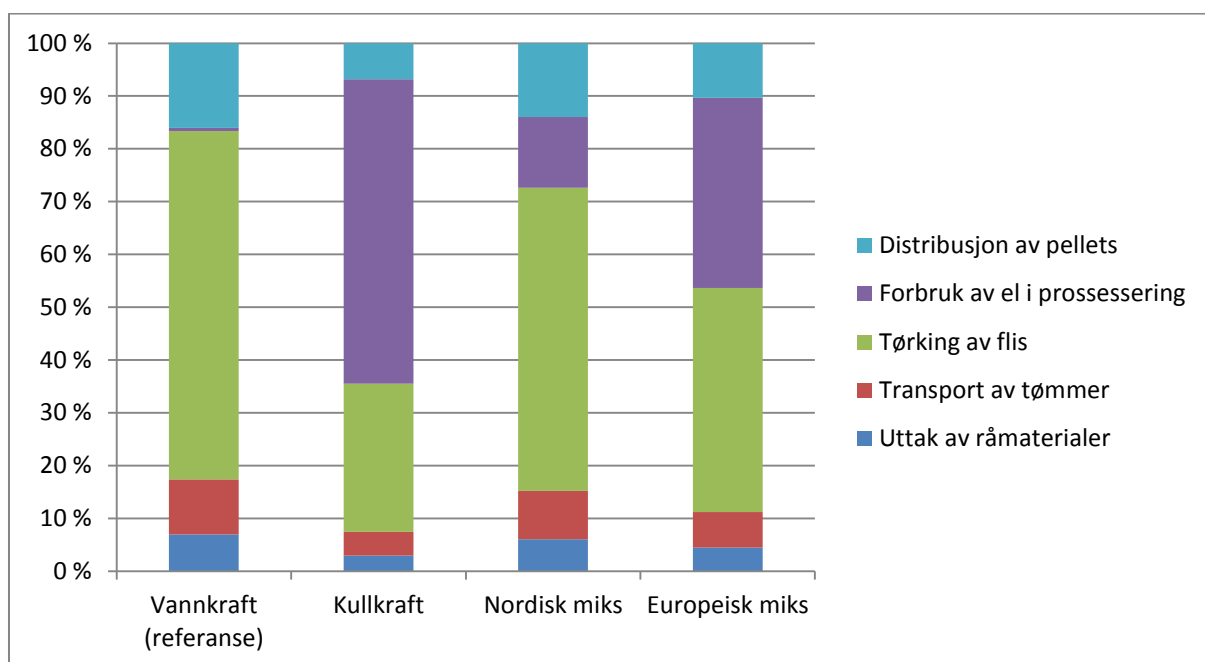
7.3.2 Forhåndstørking

Tømmeret kan lagres en stund under dekke for å få redusert fuktigheten i tømmeret. Ved lagring i omtrent et halvt år kan fuktigheten reduseres med 10 % [40]. Dette vil føre til et lavere forbruk av energi til tørking ved pelletsanlegget, og dermed også et lavere utslipp av klimagasser. Ved forhåndstørking av tømmer reduseres energibruken i verdikjeden for pellets fra 31,6 % til 24,7 % av energiinnholdet i pellets ved betraktning av den totale energien som brukes til tørking. Utslippene reduseres med nesten 10 g CO₂eq/kWh. Ulempen ved å tørke tømmeret slik, er at det forrentes når det lagres (økonomisk tap). I tillegg kan det forekomme tørrstofftap ved lagring og utslipp av metan og nitrogenoksid [63]. Derimot kan den økonomiske gevinsten ved å bruke mindre energi til tørking veie opp for dette. De økonomiske konsekvensene, tørrstofftapene og GHG-utslippene ved lagring av tømmer for å redusere fuktinnholdet blir ikke gått nærmere inn på i denne oppgaven.

7.3.3 Endring i type el

GHG-utslipp og PEF for vannkraft er hentet fra [17], og de øvrige verdiene på utslipp og PEF er hentet fra [21]. Endring i type el som brukes i pelletsprosessen er det som påvirker de totale GHG-utslippene mest. PEF for pellets blir ikke påvirket av en endring i type el som benyttes med mindre man tar hensyn til PEF for den elektrisiteten som benyttes. Dette blir sett nærmere på i kapittel 7.3.4. GHG-utslippene varierer fra 42,034 g CO₂eq/kWh når det benyttes vannkraft, til 98,603 g CO₂eq/kWh ved kullkraft. Dette resultatet stemmer godt overens med [50], der det for anlegget på Averøy blir beregnet at el fra kullkraft omtrent vil doble GHG-utslippene. De store endringene i utslipp fører også til at prosessen som bidrar mest til GHG-utslipp endres. Dette illustreres i Figur 7.9 der de prosentvise bidragene fra hver hovedprosess er angitt. Her er tørking av flis ved pelletsanlegget tatt ut av «prosessering og produksjon av pellets» i Tabell 7.4 fordi den utgjør en så stor del av både energiforbruk og GHG-utslipp.

Figur 7.9: Prosentvise bidrag til GHG-utslipp fra hver prosess ved forskjellig type el



Forbruk av el bidrar i svært liten grad til de totale GHG-utslippene dersom man bruker vannkraft. Ved bruk av kullkraft vil derimot forbruk av el føre til større prosentvise utslipp enn tørking av flis. Siden Norge har felles strømmarked med de nordiske landene gjennom NordPool, så vil det være mer realistisk å anta en nordisk elmiks fremfor ren vannkraft ved prosessering av pellets. Ren kullkraft er det også lite sannsynlig at blir brukt i prosesseringen. Norge importerer mye elektrisitet fra Europa på natten som gjør at en europeisk elmiks også kan sees som et realistisk alternativ.

7.3.4 Inkludering av PEF for el

Dersom PEF for el blir inkludert i beregningene vil total PEF for pellets øke avhengig av PEF for den elektrisiteten som blir brukt. Her er derimot GHG-utslippene uavhengig av PEF for el, de er kun avhengige av type el. Dette skyldes at GHG-utslippene for de forskjellige el-typene allerede tar hensyn til hele verdikjeden for elproduksjonen. Tabell 7.6 viser hvor stor del av energiinnholdet i pellets el utgjør ved forskjellige typer el der PEF for el er inkludert.

Tabell 7.6: Energiforbruk for el i % av energiinnhold i pellets for forskjellige typer el

	Uten PEF for el	Vannkraft	Kullkraft	Nordisk elmiks	Europeisk elmiks
Elforbruk med inkludering av PEF gitt i % av energiinnhold i pellets	4.616	5.586	17.773	11.412	16.439

For vannkraft så er økningen liten i forhold til referansescenariotet der vannkraft uten inkludering av PEF blir benyttet. Kullkraft er den som gir størst økning i energiforbruk, men selv ved betraktning av nordisk eller europeisk el som kilde er økningen stor og vil påvirke pellets sin totale PEF i stor grad.

7.3.5 Endring i tørkeparametere

En endring i tørkeparametere vil endre både PEF og utslippskoeffisient for pellets. I referansescenariotet er alle GHG-utslipp allokert til forbrenningen av flis og avfall. Forbrenning av flis blir her sett på som karbonnøytralt. Forbrenning av flis bidrar derfor ikke til de totale GHG-utslippene, kun til PE-forbruket. Det vil være et utslipp av andre klimagasser ved forbrenning av flis,

men disse er neglisjert i dette kapitlet. Derimot vil det bli sett nærmere på disse utslippene i kapittel 8.

Avfallet bidrar til det totale energiforbruket og GHG-utslippet i stor grad. I referansescenarioet utgjør energien fra tørking over 60 % av de totale GHG-utslippene, og forbrenningen av avfall bidrar alene med omtrent 59 %. [25] mener at klimapåvirkningen fra forbrenning av avfall må kunne legges fullt og helt på den som opprinnelig genererte avfallet, og ikke på den som forbrenner avfallet for energiproduksjon. Et slikt synspunkt begrenser også risikoen for dobbelttelling av utslipp. Produkter i Ecolnvent-databasen har ofte med et «end-of-life»-scenario for produktene der dette ofte er plassering av produkter på avfallsdeponi. Hvis alle produktene som inngår i avfallsmiksen allerede har blitt gitt et tall for klimapåvirkning der produktene opprinnelig var tenkt plassert på avfallsdeponi ved slutten av livssyklusen, så vil det føre til dobbelttelling av utslipp fordi forbrenning av avfall hindrer utslipp av metan fra deponi. Det er på bakgrunn av dette vurdert PEF og utslippskoeffisient for pellets når alle GHG-utslipp fra forbrenning er allokert til produktene i avfallet før det blir forbrent. Sagt på en annen måte så gir ikke forbrenning av avfall noe GHG-utslipp, det er kun distribusjon av avfallet til forbrenningsanlegget som bidrar til utslippene fra avfallet. Dette scenarioet er kalt «Endring i tørking 1» i Figur 7.7, Figur 7.8, Figur 7.10 og Tabell 7.5.

Ved forbrenningsanlegget i Hallingdal så har de en avfallskjel på 6 MW og en fliskjel på 2 MW. I referansescenarioet ble det derfor tatt utgangspunkt i at 75 % av energien til tørking kom i fra forbrenning av avfall og 25 % kom i fra forbrenning av flis. Dersom kildesorteringen blir enda bedre vil det være mer organisk avfall i avfallsmiksen og mindre fossilt avfall. Dette vil føre til at nedre brennverdi for brenselet vil bli redusert, og det vil kreve mer avfall for å produsere samme mengde energi. Det vil også være mindre avfall tilgjengelig for forbrenning hvis kildesorteringen bedres. Det scenarioet som kalles «Endring i tørking 2» tar utgangspunkt i at det ikke blir forbrent mer avfall, men at det blir forbrent mer flis i forbrenningsanlegget. Det er her sett på konsekvensene av en blanding der 50 % av energien kommer fra forbrenning av avfall og 50 % fra forbrenning av flis. Utslippene fra avfallet er de samme som i referansescenarioet (173,9 g CO₂eq/kWh). Dette kan være en feilaktig antagelse siden en større del av avfallet nå er organisk og dermed vil ha lavere utslipp per innfyrt energimengde. Derimot tar utslippsfaktoren som ble brukt i referansescenarioet for forbrenning av avfall også utgangspunkt i at en stor del av avfallet er organisk.

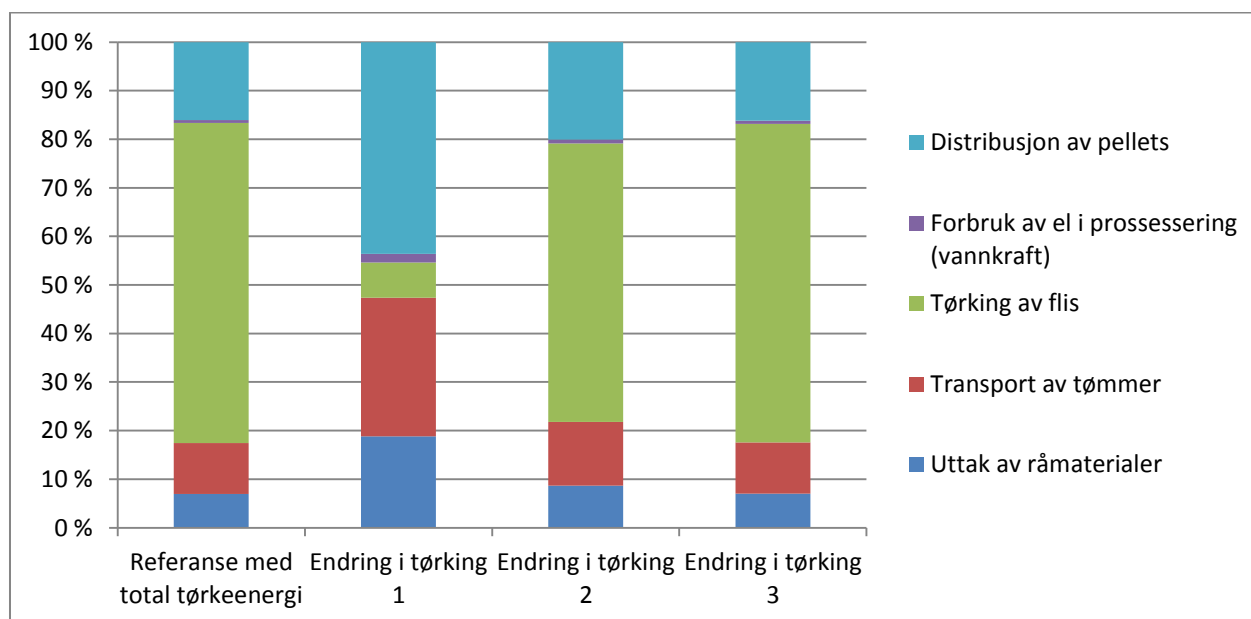
Forbrenningsanlegget i Hallingdal bruker returtre og ikke skogsflis i forbrenningen. Skogsflis er det som er brukt i referansescenarioet siden Miljøfaktaboken [17] ikke har data på PEF og GHG-utslipp for returtreflis. [25] har verdier for returtreflis som i følge denne rapporten er hentet fra Miljøfaktaboken, og den oppgir PEF for returtre til å være 0,05. Det er på grunn av disse «informasjonshullene» at skogsflis ble benyttet i referansescenarioet. Derimot hevder begge disse kildene at returtre kun skal betraktes som et restprodukt, og at hjelpeenergien er det eneste som skal inkluderes i PEF for returtre. Skogsflis er betraktet som et nytteprodukt, og energiinnholdet i flisen er dermed inkludert i PEF for skogsflis [17]. I forhold til et produkt som kun blir ansett som et restprodukt, som returtre, får dermed skogsflis et tillegg i PEF på +1. PEF for varme fra forbrenning av skogsflis, som er brukt i referansescenarioet, etter tap i energiomforming og distribusjonsnett er på 1,373. For returtre, der verdien fra [25] er benyttet, får returtre etter tap i energiomforming og distribusjon en verdi på 0,065. En annen grunn til at skogsflis har høyere PEF er at skogsflis har høyere fuktinnhold enn returtre. Høyere fuktinnhold reduserer brennverdien. Det vil også være en reduksjon i utslipp ved å erstatte skogsflis med returtre. Varme fra forbrenning av skogsflis har et

utslipp på 10,87 g CO₂eq/kWh etter tap mot 3,92 g CO₂eq/kWh for returtre. Konsekvensene av å erstatte skogsflis med returtre vises som «Endring i tørking 3».

I Tabell 7.5 er resultatene fra de forskjellige tørkescenarioene angitt. PEF for pellets inkludert total energi som brukes til tørking blir ikke påvirket av de ulike tørkescenarioene. Men ved betraktning av PE som brukes til tørking vil resultatet for PEF for pellets endre seg i scenario «Endring i tørking 2» (2) og «Endring i tørking 3» (3). Den blir høyere i (2) fordi det brukes mer skogsflis som har en høyere PEF enn avfall, og den blir lavere i (3) fordi skogsflis erstattes med returtre.

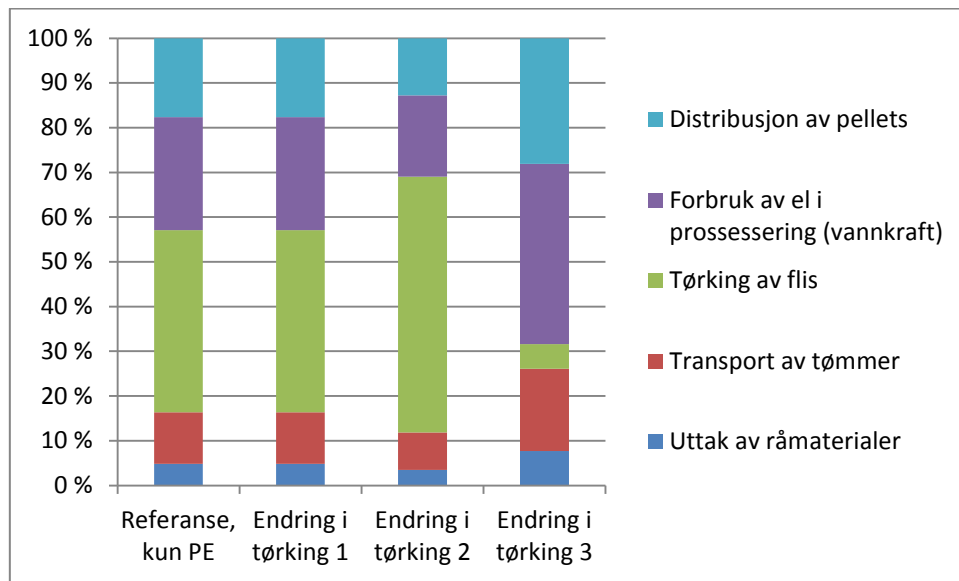
Utslippskoeffisienten endrer seg ikke i takt med PEF for pellets. Den laveste utslippskoeffisienten får man hvis man tar utgangspunkt i «Endring i tørking 1» (1), altså at forbrenning av avfall ikke har noe GHG-utslipp. Selv om (3) gir en mye lavere PEF for pellets enn (2), vil utslippskoeffisienten være større. Alle de tre tørkescenarioene gir lavere utslippskoeffisienter enn referansescenarioet. Hvordan utslippene fordeler seg på de forskjellige hovedprosessene i de forskjellige scenarioene vises i Figur 7.10. Hvordan den totale energibruken for pellets fordeler seg på de ulike hovedprosessene vises i Figur 7.11. Siden (1) kun allokere vekk utslippene fra avfallsforbrenning vil det ikke være noe forskjell mellom dette scenarioet og referansescenarioet for PEF.

Figur 7.10: GHG-utslipp fordelt på hovedprosesser for forskjellige tørkescenarioer



Det vises i Figur 7.10 at distribusjon av pellets og transport av tømmer er de to prosessene som bidrar mest til de totale GHG-utslippene i (1). I (2) og (3) er det fortsatt tørkingen som bidrar mest til utslippene. De store prosentvise endringene mellom (1) og de andre to scenarioene skyldes antagelsen om at GHG-utslipp ikke skal allokere til forbrenningen av avfall.

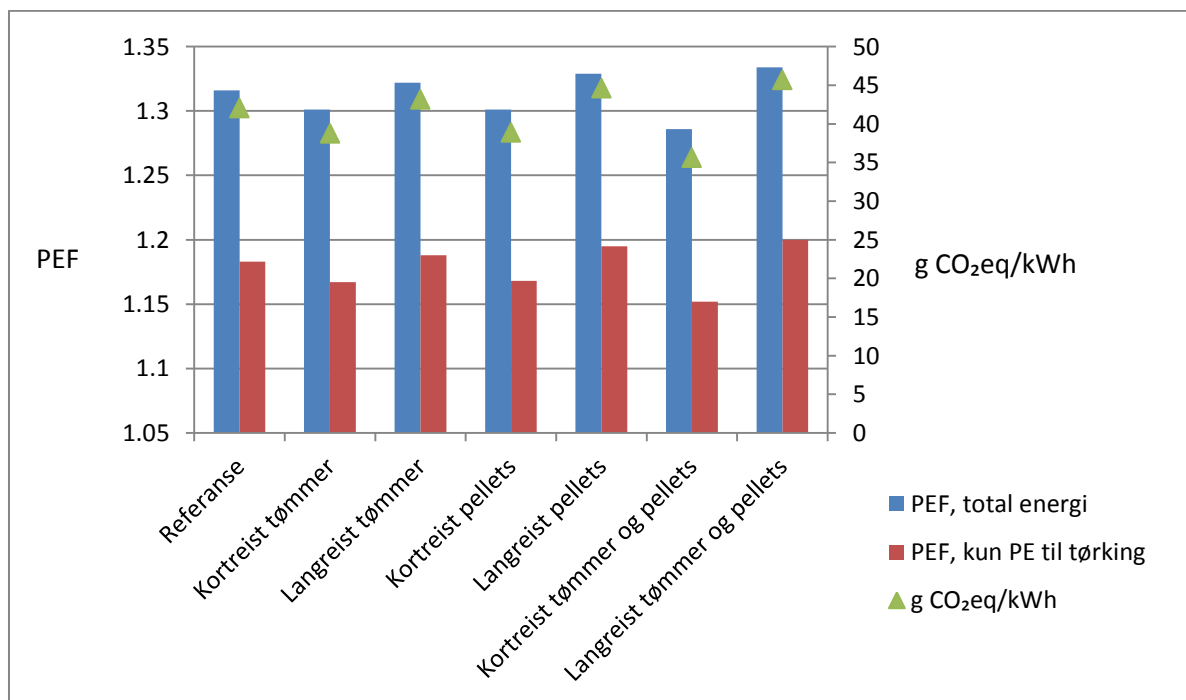
Figur 7.11: Energibruk fordelt på hovedprosesser for forskjellige tørkescenarioer



7.3.6 Endring i transportavstand for pellets og tømmer

Distribusjon av pellets fra anlegget i Hallingdal har en gjennomsnittlig kjørelengde på 226 km, og transport av tømmer har en gjennomsnittlig kjørelengde på 76 km. Det er derfor valgt å se på konsekvensene av distribusjonsavstander for pellets på 126 km og 326 km (kortreist og langreist i Tabell 7.5) og 26 km og 126 km for tømmer. I referansescenarioet er det ikke gjennomsnittlig kjørelengde som er brukt, men et veid gjennomsnitt basert hvor mye tømmer/pellets som kommer fra/blir kjørt til ulike steder i Norge. Dette vises i **Vedlegg D**. Det er også valgt å se på konsekvensene av både kortreist tømmer og pellets og langreist tømmer og pellets.

Figur 7.12: Variasjon i PEF og utslippskoeffisient for forskjellige transportavstander



Endring i transportavstand for pellets og tømmer gir en sammenheng mellom PEF og utslippskoeffisient. Som forventet så fører en kortere transportdistanse til lavere PEF og utslippskoeffisient. Dersom både pellets og tømmer er kortreist vil PEF synke til 1,286 eller 1,152 (avhengig av syn på energi til tørking) og utslippskoeffisienten vil synke til 35,619 g CO₂eq/kWh. Ved langreist pellets og tømmer øker PEF til 1,334 eller 1,200, og utslippskoeffisienten øker til 45,688 g CO₂eq/kWh.

7.4 «Beste» og «dårligste» scenario

For å ha mest mulig konsekvent metodikk bør man enten benytte seg av PE-forbruk i alle prosesser, eller unngå det i alle prosesser. Dette blir et spørsmål om hvor man setter systemgrensene. Det blir mer komplisert å beregne PEF for energiresurser dersom for eksempel PEF for diesel som benyttes i transportmidlene skal inkluderes, og ikke bare mengden diesel. Men for pellets der tørking av flis og forbruk av el er store forbrukere av energi i den totale prosessen, så vil denne vurderingen påvirke resultatet i stor grad. Dersom man unngår å inkludere PEF for el vil det være mer riktig å ta utgangspunkt i den totale energien som brukes til tørking av flisen, og ikke bare PE som blir brukt til denne tørkingen. Hvis PEF for el blir tatt med i beregningene, mener forfatteren av denne oppgaven at det vil være riktig å benytte seg av PE for tørking.

Ved å kombinere flere av de ulike scenarioene har det i denne oppgaven blitt laget et realistisk «beste utfall»-scenario, og et realistisk «verste utfall»-scenario.

Med realistisk menes hva som oppfattes som mest forsvarlige antagelser i beste og verste fall fra forfatterens ståsted. Ikke nødvendigvis det som gir best eller verst utslag for PEF og utslippskoeffisient. Derfor er det i «beste utfall» antatt følgende:

- Varmen fra flisen som brukes i forbrenningsanlegget kommer fra returtre og har PEF på 0,065 kWh/kWh varme, og utslippskoeffisient på 3,92 g CO₂eq/kWh varme.
- Alt GHG-utslipp fra husholdningsavfall blir allokert til produktene før forbrenning, og forbrenning av avfall gir dermed ikke klimakonsekvenser. Det er kun PE-forbruk og GHG-utslipp knyttet til innsamling og distribusjon av avfallet som medregnes.
- Det antas ikke større grad av kildesortering. En slik antagelse vil bare føre til høyere PEF og utslippskoeffisient når det allerede er antatt at forbrenning av avfall ikke har noen klimakonsekvenser.
- El som benyttes er en nordisk elmiks.
- Både tømmer og pellets er kortreist.
- PEF inkluderes for el, og det er også PE som benyttes ved vurdering av energien som brukes til tørking.
- Mengden pellets som distribueres forholder seg på 30 tonn siden en endring i distribusjonsmengde er så og si neglisjerbart.

For «verste utfall» er det antatt følgende:

- Flisen som brukes til tørking er skogsflis som har en PEF på 1,373 kWh/kWh varme, og utslippskoeffisient på 10,871 g CO₂eq/kWh varme (tap i konvertering og distribusjon inkludert).
- Alt GHG-utslipp fra husholdningsavfall blir allokert til varmemproduksjonen.
- El som benyttes er europeisk elmiks.
- Både tømmer og pellets er langreist.
- PEF inkluderes ikke for el og det er total energimengde for tørking som benyttes. En slik antagelse gjør at PEF og utslipp blir større enn hvis PEF blir inkludert for el og kun PE-forbruk betraktes til tørking når det benyttes en europeisk elmiks med PEF på 3,561.

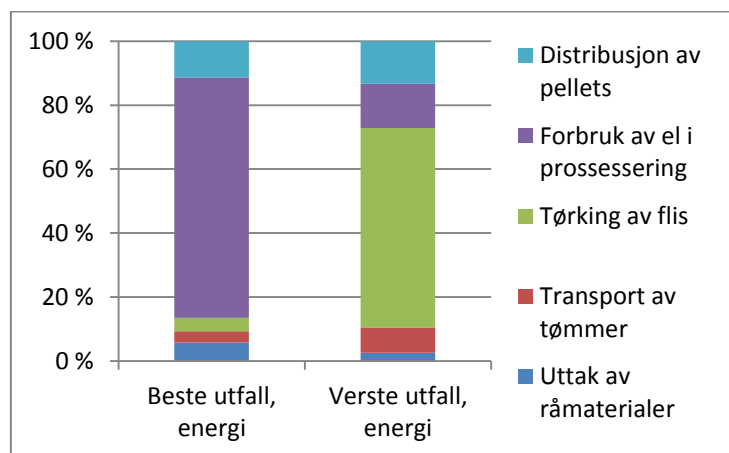
Resultatene fra beregningene er gitt under i Tabell 7.7.

Tabell 7.7: PEF og utslippskoeffisient for beste og verste scenario

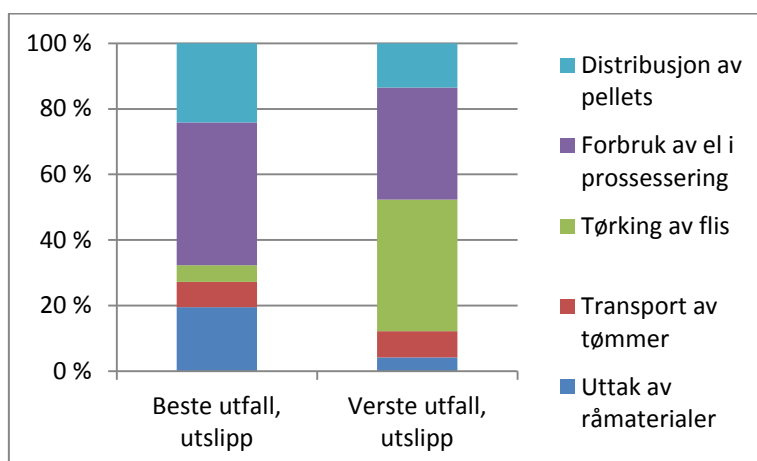
Scenario	PEF	g CO ₂ eq/kWh
Beste utfall	1.152	14.867
Verste utfall	1.334	68.962

Hvordan energibruken og utslippene fordeler seg mellom de ulike prosessene i disse to scenarioene er vist under i Figur 7.13 og Figur 7.14

Figur 7.13: Energiforbruk fordelt på hovedprosesser for beste og verste scenario



Figur 7.14: GHG-utslipp fordelt på hovedprosesser for beste og verste scenario



Det vises i figurene at de største bidragsyterne til både PEF og utslippskoeffisient varierer avhengig av scenario. For energibruken så er hvordan man definerer tørkeprosessen avgjørende. Elforbruket fører til den største delen av energiforbruket i beste utfall med omtrent 75 % av det totale forbruket, mens tørkingen har størst energiforbruk i verste utfall. Transport og distribusjon har også en større prosentvis andel av energiforbruket i verste utfall, men tørkingen er avgjørende med over 60 % av det totale energiforbruket.

Tørkingen er også avgjørende for GHG-utslippene. Den utgjør minst av de fem hovedprosessene i beste utfall og mest av de fem hovedprosessene i verste utfall.

8 Påvirkning av PEF og utslippskoeffisient ved inkludering av infrastruktur for nærvarmeanlegg som fyres på pellets

Infrastruktur for nærvarmeanlegg defineres i denne oppgaven som konstruksjon og demontering av varmesentral og distribusjonsnett. Infrastruktur for varmesentral og distribusjonsnett krever energi og fører til GHG-utslipp. I dette kapitlet vil det bli sett på hvor store bidrag dette gir til total PEF og utslippskoeffisient for levert varme. Det er valgt å kun se på nærvarmeanlegg, siden det ikke er funnet et godt datagrunnlag for fjernvarmeanlegg. I tillegg vil et fjernvarmeanlegg ofte ha flere forskjellige kjeler og brenslersom gjør beregningene mer omfattende. [40] definerer et nærvarmeanlegg som et anlegg med total kapasitet i intervallet 500-10000 kW. Total kapasitet betyr samlet kapasitet fra topplast og grunnlast. Topplasten dekkes ofte av olje, gass eller el, men den dekkes også i enkelte tilfeller av biomasse [40].

8.1 Infrastruktur for varmesentral

Det er tatt utgangspunkt i data fra Ecolnvent-databasen for konstruksjon og demontering av varmesentral. Databasen inneholder informasjon om nærvarmeanlegg fyrt på flis for tre relevante størrelser og kun ett pelletsanlegg av relevant størrelse.

Tabell 8.1: Data for konstruksjon og demontering av varmesentral

Varmesentral	Størrelse (kW)	Datakilde i Ecolnvent
Flis	50	Furnace, wood chips, softwood, 50kW/CH/I
Flis	300	Furnace, wood chips, softwood, 300kW/CH/I
Flis	1000	Furnace, wood chips, softwood, 1000kW/CH/I
Pellets	50	Furnace, pellets, 50kW/CH/I

I [40] er det klarlagt at et «typisk» nærvarmeanlegg i Norge har en størrelse på omtrent 2000 kW der biokjelen utgjør opptil 1000 kW. Resterende kapasitet, topplasten, dekkes ofte av el, gass eller olje. Det er kun vurdert bidrag til PEF og utslippskoeffisient fra anlegg med én biokjel i denne oppgaven.

Fra 2008-2011 ga Enova støtte til 4 anlegg der kapasiteten på biokjelen var 1000 kW og 4 anlegg der kapasiteten var 300 kW [40]. Alle disse er fyrt på flis. Mengden fornybar energi produsert i hvert av anleggene er forskjellig. Det er antatt at alle anleggene har en levetid på 20 år [49] og at samme energimengde produseres hvert år. Med data fra Ecolnvent er da bidragene til PEF og utslippskoeffisient som vist i Tabell 8.2.

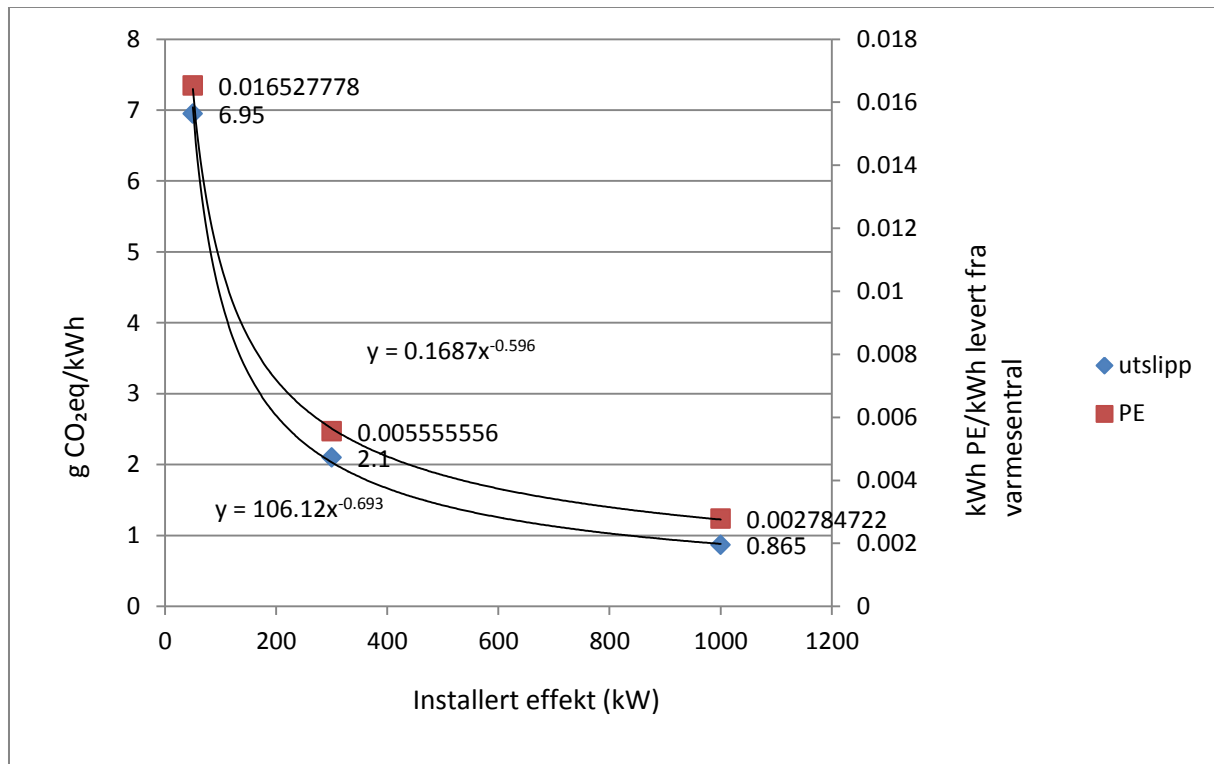
Tabell 8.2: Bidrag til PEF og utslippskoeffisient for utvalgte biokjeler

Anlegg nr	1	2	3	4	5	6	7	8
Installert effekt fliskjel (kW)	1000	1000	1000	1000	300	300	300	300
Lever energi pr år (kWh)	2205000	1900000	3780000	2353500	500000	1960000	846000	790000
Brukstid	2205	1900	3780	2353.5	1667	6533	2820	2633
Energi totalt i løpet av levetid (kWh)	44100000	38000000	75600000	47070000	10000000	39200000	16920000	15800000
g CO ₂ eq/kWh levert	0.7846	0.9105	0.4577	0.7351	2.5200	0.6429	1.4894	1.5949
kWh PE/kWh levert	0.0025	0.0029	0.0015	0.0024	0.0067	0.0017	0.0039	0.0042

Det vises i tabell 8.2 at bidrag til GHG-utslipp og PE-forbruk er endrer seg med både brukstid og størrelse på anlegg. Ecolnvent har ikke data for anlegg basert på biobrensel med effekt større enn 1000 kW. Derfor er det vanskelig å klarlegge bidragene til PEF og utslippskoeffisient for fjernvarme- og nærvarmesentral med kapasitet større enn 1000 kW.

Med antatt brukstid på 2000 timer, vil man ut i fra fliskjelene beskrevet i Tabell 8.1 få følgende sammenheng mellom installert effekt og PE-forbruk/utslippskoeffisient:

Figur 8.1: Sammenheng mellom installert effekt og PE-forbruk/utslipp



Figur 8.1 viser hvordan bidragene til total PEF og utslippskoeffisient vil bli redusert med størrelse på varmesentral. Ut i fra verdiene for de tre forskjellige størrelsene er det funnet en funksjon for både PE-forbruk og GHG-utslipp som varierer med størrelse. Disse funksjonene har blitt brukt for å anslå

PE-forbruk og GHG-utslipp for infrastruktur for en fliskjel på 5000 og 10000 kW. Brukstiden er 2000 timer.

Tabell 8.3: Bidrag til PEF og utslippskoeffisient for fliskjel på 5000 og 10000 kW

	5000 kW	10000 kW
<i>g CO₂eq/kWh levert</i>	0,290	0,179
<i>kWh PE/kWh levert</i>	0,00105	0,00069

Bidragene til total PEF og utslippskoeffisient er små for konstruksjon og demontering av fliskjel. Pellets har større energitetthet og er et mer homogent brensel enn flis. Derfor er varmesentraler fyrt på pellets ofte mindre enn varmesentraler fyrt på flis for samme kapasitet. Siden energitettheten er større for pellets kreves det også et mindre brenselager ved varmesentralen. EcoInvent oppgir følgende data for varmesentral for flis og pellets med kapasitet på 50 kW:

Tabell 8.4: Energibruk og GHG-utslipp for biokjeler på 50 kW

<i>Energibruk og GHG-utslipp for hele sentralen</i>	<i>Varmesentral, flis, 50 kW</i>	<i>Varmesentral, pellets, 50 kW</i>
<i>Energibruk (MJ)</i>	119000	58900
<i>Utslipp (kg CO₂eq)</i>	13900	5550

En varmesentral på 50 kW fyrt på pellets har altså et energiforbruk som utgjør omtrent 50 % av energiforbruket for en varmesentral fyrt på flis. Utslippene utgjør omtrent 40 %. Det kan antas at bidragene fra en pelletskjel til PE-forbruk og GHG-utslipp også er mindre for større varmesentraler. For større varmesentraler øker kompleksiteten til anlegget, men det vil gjøre dette både for anlegg basert på flis og pellets.

8.2 Infrastruktur for distribusjonsnett

Dette delkapittelet er basert på [15]. I infrastruktur for distribusjonsnett inngår bygging av rør, varmevekslere, pumper, ventiler, graving av grøfter og produksjon av ulike materialer som brukes i prosessen. PE-forbruk og GHG-utslipp er avhengig av energitettheten. Ved lav energitetthet er avstanden vannet tilbakelegger før det returnerer til varmesentral lengre. Dette resulterer i større varmetap og større pumpearbeid. Dette gir høyere PE-forbruk og GHG-utslipp. PE-forbruk og GHG-utslipp er også avhengig av hva slags rør som benyttes og om rørene legges i urbant eller ruralt område. Legging av rør i urbant område krever mer energi, blant annet fordi asfalt må fjernes og legges på nytt etter at rørene er plassert i bakken. Verdiene som brukes i denne masteroppgaven er basert på et kunstig distribusjonsnett der rør med forskjellige dimensjoner inngår.

Det er antatt at rørene har en levetid på 30 år. Dette er et «verste utfall» for rørene siden flere av dagens rør er forventet å kunne holde i 50-60 år. PE-forbruk og GHG-utslipp for demontering er ikke inkludert siden de fleste delene av rørene blir resirkulert. Tabell 8.5 viser PEF og utslippskoeffisient for distribusjonsnett ved forskjellig energitetthet og levetid for rør. Tabellen viser kun ikke-fornybar PEF, men den fornybare energien som brukes for infrastrukturen til distribusjonsnett utgjør en svært liten del av total PEF.

Tabell 8.5: PEF og utslippskoeffisient for distribusjonsnett ved forskjellig levetid og energitetthet [9]

	Low intensity		Medium intensity		High intensity	
	3 MWh/m		8.2 MWh/m		15 MWh/m	
	30 years	60 years	30 years	60 years	30 years	60 years
PEF non-renewable per kWh	0,01164	0,00582	0,00420	0,00235	0,00078	0,00039
CO ₂ equivalents per kWh	2,86	1,43	1,16	0,58	0,19	0,10

8.3 Tap, virkningsgrader og GHG-utslipp

Varmesentral

Varmesentralen krever el til blant annet forbrenningsprosessen og administrative formål. Det er antatt at dette utgjør 1,5 % av energiinnholdet i brenselet [15]. El er antatt å være en nordisk elmiks. I tillegg krever forbrenningen tilsetningsstoffer. Bruk av disse tilsetningsstoffene fører til et PE-forbruk på 0,06 kWh/kWh brensel og et utslipp på 12,6 g CO₂eq/kWh brensel [15]. Asken som oppstår i forbrenningen må bli transportert vekk fra anlegget. I beregningene i dette delkapittelet brukes data fra [15] for energibruk og GHG-utslipp knyttet til askebehandling. 80 % av asken blir transportert til deponi 30 km unna anlegget. De resterende 20 % er farlig avfall og blir transportert 1000 km. Dette gir et PE-forbruk på 0,0004 kWh/kWh brensel og et GHG-utslipp på 0,0001 g CO₂eq/kWh brensel.

GHG-Utslipp fra forbrenning er hentet fra [15]. Det er antatt at forbrenning av pellets har samme utslipp som forbrenning av flis siden det ikke er funnet spesifikk data for pellets.

Konverteringsfaktorer fra CH₄ og N₂O til CO₂ er angitt i kapittel 2.3. I kapittel 7 ble det antatt at forbrenning av flis var karbonnøytralt. Ufullstendig forbrenning fører blant annet til utslipp av CH₄ og N₂O. [25] sier at disse gassene ikke er en del av det naturlige karbonkretsløpet, og at utslipp av disse gassene gir bidrag til drivhuseffekten. Dette er i samsvar med [15].

Tabell 8.6: Utslipp ved forbrenning [15]

Brensel	Utslippsfaktor (g/kWh)		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Flis	0	0.108	0.022

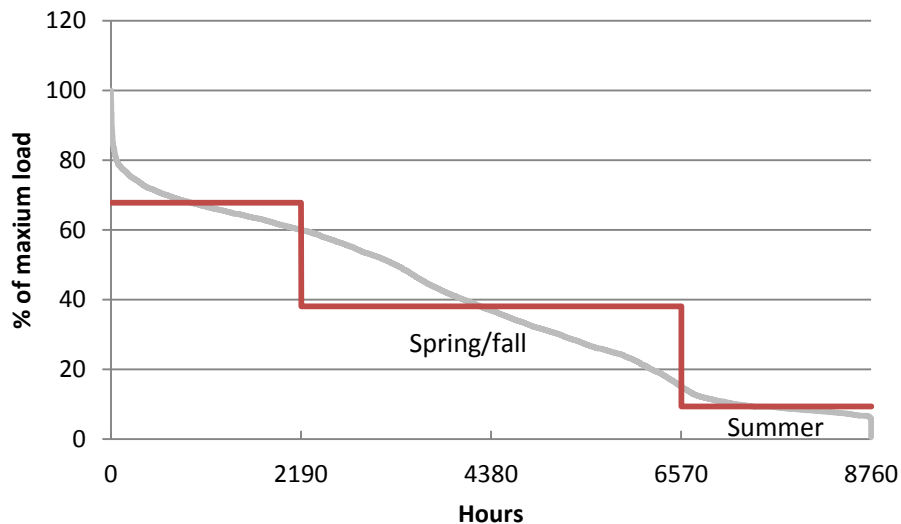
Virkningsgraden til en varmesentral er avhengig av forbrenningen. For å oppnå fullstendig forbrenning og så høy virkningsgrad som mulig er følgende faktorer avgjørende [64]:

- God blanding av forbrenningsluft og brensel i forbrenningskammeret.
- Nok tilgjengelig oksygen.
- Høy nok forbrenningstemperatur.

- Lang nok oppholdstid for brenselet i forbrenningskammeret.

Endring i lasten fører også til at virkningsgraden endrer seg. Lasten i en varmesentral er sesongavhengig (temperaturavhengig) som vist i Figur 8.2.

Figur 8.2: Årlig last fra varmeproducent [9]



Enkelte forbrenningsanlegg klarer å ha en flat virkningsgradskurve (liten endring i virkningsgrad) når lasten endrer seg [65]. Biokjelene i en varmesentral dekker primært grunnlasten, og denne brukes store deler av året for å dekke varmtvannsbehovet. Det antas derfor at lastendringen er liten og at virkningsgraden er konstant året gjennom. Flere referanser oppgir virkningsgraden for en pelletskjel til å være på omtrent 90 %, uavhengig av kapasitet [40, 66, 67]. Dette er derfor benyttet i denne masteroppgaven også.

Distribusjonsnett

Tap i distribusjonsnett og pumpearbeidet som kreves avhenger av energitettheten. På samme måte som i Tabell 8.5 er det i [15] angitt varmetap og el som kreves til pumper for ulike energitettheter.

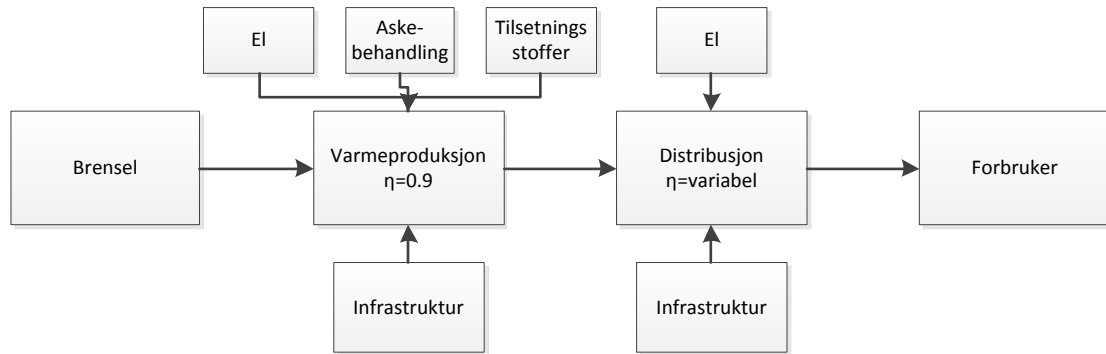
Tabell 8.7: Varmetap og forbruk av el i pumper i distribusjonsnett [15]

Grid	Energy density in grid (MWh/m)	Heat loss (%)	Elec (pumps) (kWh elec/ kWh delivered heat)
Low density	3.0	13.3%	$3.38 \cdot 10^{-5}$
Medium density	8.2	4.9%	$1.24 \cdot 10^{-5}$
High density	15	0.9%	$2.26 \cdot 10^{-6}$

8.4 Metodikk for bidrag til total PEF og utslippskoeffisient

For å klarlegge bidragene infrastruktur gir til de totale verdiene for PEF og utslippskoeffisient for pellets er hele verdikjeden for pellets inkludert. Alt fra uttak av råmaterialer til levert varme inngår i systemgrensene i henhold til EN 15603:2008.

Figur 8.3: Systemgrenser for varmeproduksjon med pellets



Med systemgrensene som definert i Figur 8.3 kan man beregne primærenergifaktor og utslippskoeffisient for varme fra pellets. Her er utslippskoeffisienten forkortet til GWP (Global Warming Potential) for å forenkle. Formlene er basert på [15].

$$PEF_{varme} = \frac{PE_{brensel} + PE_{underprosesser}}{Q_{levert}} \quad (8.1)$$

PE-forbruket er delt inn i to deler. Den ene er relatert til produksjonskjeden der pellets blir konvertert til varme og levert til forbruker. Den andre delen er relatert til alt PE-forbruk knyttet til infrastruktur, forbruk av el, askebehandling og tilsetningsstoffer. PE-forbruket knyttet til produksjonskjeden kan uttrykkes på følgende måte:

$$PE_{brensel} = PEF_{brensel} * Q_{brensel} \quad (8.2)$$

Her er

$$Q_{brensel} = \frac{Q_{levert}}{\eta_{dist} * \eta_{prod}} \quad (8.3)$$

η_{dist} og η_{prod} er virkningsgraden til henholdsvis distribusjon og produksjon.

$PE_{underprosesser}$ kan uttrykkes på følgende måte:

$$PE_{underprosesser} = \frac{Q_{levert}}{\eta_{dist} * \eta_{prod}} * \sum PE_i + Q_{levert} * PE_{inf} + Q_{levert} * \sum PE_j \quad (8.4)$$

Hvor PE_i er PE-forbruk for alle underprosesser relatert til forbrenningen bortsett fra infrastruktur for varmesentral (PE_{inf}), og PE_j er PE-forbruk for alle underprosesser relatert til distribusjonen. I Tabell

8.2 inngår allerede tap i forbrenning og distribusjon. Disse tapene er ikke kjent, men det antas at de er tilnærmet like de tapene som er angitt i kapittel 8.2 og 8.3.

GWP deles inn i en del for GHG-utslipp fra varmeproduksjon og en del fra varmedistribusjon:

$$GWP_{varme} = \frac{GWP_{prod} + GWP_{dist}}{Q_{levert}} \quad (8.5)$$

Her er

$$GWP_{prod} = Q_{brensel} * \sum GWP_i + Q_{levert} * GWP_{inf} \quad (8.6)$$

Og

$$GWP_{dist} = Q_{levert} * \sum GWP_j \quad (8.7)$$

Hvor GWP_i er utslipp for alle underprosesser relatert til forbrenningen bortsett fra infrastruktur for varmesentral (PE_{inf}), og GWP_j er utslipp for alle underprosesser relatert til distribusjonen.

Ved å kombinere ligningene (8.1) til (8.7) får man følgende to ligninger for PEF og utslippskoeffisient:

$$PEF_{varme} = \frac{1}{\eta_{dist} * \eta_{prod}} \left(PEF_{brensel} + \sum PE_i \right) + PE_{inf} + \sum PE_j \quad (8.8)$$

$$GWP_{varme} = \frac{1}{\eta_{dist} * \eta_{prod}} * \sum GWP_i + GWP_{inf} + \sum GWP_j \quad (8.9)$$

Tabell 8.8: Underprosesser i verdikjeden for varme fra pellets

<i>PE_i – PE-forbruk ved:</i>	<i>GWP_i – GHG-utslipp ved:</i>
-Bruk av el til forbrenning -Bruk av tilsetningsstoffer -Askebehandling	-Forbehandling av brensel -Bruk av el til forbrenning -Bruk av tilsetningsstoffer -Askebehandling -Forbrenning
<i>PE_j – PE-forbruk ved:</i>	<i>GWP_j – GHG-utslipp ved:</i>
-Infrastruktur for distribusjonsnett -Bruk av el i pumper i distribusjonsnett	-Infrastruktur for distribusjonsnett -Bruk av el i pumper i distribusjonsnett

8.5 Resultater

Beregningene i dette delkapittelet gjelder for fliskjeler på grunn av manglende detaljeringsgrad i datagrunnlaget for pelletskjeler. Derimot er det PEF for pellets fra Tabell 3.8 som blir brukt. For «beste utfall» i denne tabellen inngår PEF for el. For «verste utfall» er dette ikke inkludert. For å være konsekvent i metodikken brukes dette også i beregningene av total PEF og utslippskoeffisient for nærvarme. PEF for el inngår for all el relatert til forbrenning og distribusjon med «beste» pellets, og det er utelatt ved «verste» pellets.

Det er beregnet bidrag til total PEF og utslippskoeffisient fra infrastruktur for alle anleggene i Tabell 8.2. For å klarlegge størrelsesordenen av hvordan infrastruktur påvirker total PEF og utslippskoeffisient, er det tatt utgangspunkt i to scenarier.

- Scenario 1: Beste pellets + høy energitetthet: Her er det antatt at det er pellets fra «beste utfall» i Tabell 3.8 som brukes. I tillegg er det en høy energitetthet på 15 MWh/m
- Scenario 2: Verste pellets + lav energitetthet: Her er det antatt pellets fra «verste utfall» i Tabell 3.8. I tillegg er det en lav energitetthet på 3 MWh/m

Tabell 8.9: Største og minste bidrag fra infrastruktur til total PEF og utslippskoeffisient

	Minste bidrag til PEF	Minste bidrag til utslippskoeffisient	Største bidrag til PEF	Største bidrag til utslippskoeffisient
Scenario	1	1	2	1
Anlegg nummer	3	3	5	5
Kapasitet (kW)	1000	1000	300	300
Bruktid (timer)	3780	3780	1667	1667
PEF totalt	1,391	1,391	1,825	1,396
% for infrastruktur av total PEF	0,163	0,163	1,001	0,535
Utslippskoeffisient	43,117	43,117	123,309	45,239
% for infrastruktur av utslippskoeffisient	1,523	1,523	4,363	6,012

Alle beregninger og resultater er også gitt i **Vedlegg F**. I dette vedlegget er også resultatene for et anlegg på 5000 kW og 10000 kW angitt. Brukstiden for disse to anleggene er satt til 2000 timer. Disse anleggene er ikke inkludert i Tabell 8.9 fordi det er større usikkerhet knyttet til dem.

For PEF så varierer bidragene fra infrastruktur fra 0,163 % til 1,001 %. Bidragene til utslippskoeffisient varierer fra 1,523 % til 6,012 %. Variasjonene skyldes hovedsakelig:

- Kapasitet på anlegg
- Bruktid for anlegg
- Energitetthet i distribusjonsnettverk
- PEF og utslippskoeffisient for pellets

Pellets i «beste utfall» gir mye lavere GHG-utslipp enn pellets fra «verste utfall». Dette er grunnen til at de prosentvise bidragene fra infrastruktur til utslippskoeffisient er størst i scenario 1.

8.6 Diskusjon av bidrag til PEF og utslippskoeffisient for infrastruktur

Infrastruktur for varmesentral i dette kapittelet gjelder for fliskjeler. Infrastruktur for en pelletskjel på 50 kW krever kun 50 % av den energien infrastruktur for en fliskjel krever. GHG-utslippene er kun 40 %. Pelletskjeler gir sannsynligvis mindre bidrag til PEF og GHG-utslipp enn fliskjeler ved større kapasitet enn 50 kW også, selv om det ikke er funnet noe litteratur som støtter dette. Derfor kan verdiene for PE-forbruk og GHG-utslipp for infrastruktur for kjel antas å være svært konservative verdier.

Sammenlignet med andre studier er resultatene for bidrag fra infrastruktur i denne masteroppgaven lavere. [16] kommer fram til at infrastruktur for distribusjonsnett er den nest største bidragsyteren til global oppvarming etter de direkte GHG-utslippene fra forbrenningen. Dette gjelder for varmeproduksjonen i et CHP-anlegg. [16] tar utgangspunkt i biomasseproduksjon i Trondheimsområdet, og det er fjernvarmenettet i Trondheim som blir brukt som distribusjonsnett. Siden dette gjelder for CHP, og ikke ren varmeproduksjon, vil ikke dette resultatet bli analysert nærmere i denne masteroppgaven. I [15] brukes flis som brensel. Dette brensel har en PEF på 1,19 og en utslippskoeffisient på 9 g CO₂eq/kWh brensel. Pellets i «Verste utfall» har i motsetning en PEF på 1,334 og en utslippskoeffisient på 68,96 g CO₂eq/kWh brensel. I tillegg er PE-forbruk og GHG-utslipp ved infrastruktur for varmesentral større i [15]. Dette gjør at de prosentvise bidragene infrastruktur gir til total PEF og utslippskoeffisient blir mindre i denne masteroppgaven. I [15] har infrastruktur for varmesentral et GHG-utslipp på 5 % og distribusjonsnett et GHG-utslipp på 2 % av de totale GHG-utslippene. Totalt for varmesentral og distribusjonsnett er det kommet fram til et utslipp på 1,523-6,012 % av de totale GHG-utslippene i denne masteroppgaven.

De prosentvise bidragene til PEF fra infrastruktur er små. Ved lav energitetthet vil de største bidragene skyldes distribusjonsnett. Dersom energitettheten er høy, vil de største bidragene skyldes varmesentralen. Det samme gjelder for bidrag til utslippskoeffisient. Tap i konvertering og distribusjonsnett for de biokjelene det er sett på er inkludert i Tabell 8.2. Virkningsgraden og energitettheten er her ukjent. Dersom dette hadde vært kjent, kunne det vært en endring i resultatene, men denne endringen ville vært liten.

Når kapasiteten til varmesentralen øker så minker både PE-forbruk og GHG-utslipp per kWh levert varme. For anlegget på 10000 kW er bidragene til PEF og utslippskoeffisient fra varmesentral mindre enn bidragene fra distribusjonsnett, selv med høy energitetthet. Det er ikke funnet datagrunnlag for energibruk og GHG-utslipp for konstruksjon og demontering av varmesentraler større enn 1000 kW. Når kapasiteten øker vil andre forbrenningsteknologier for biomasse som «fluidized bed» erstatte teknologiene som vanligvis brukes for nærvarmesentraler, men «fluidized bed» er ikke et alternativ før kapasiteten overstiger 20 MW [68].

Konsekvensene for en annen topplast er heller ikke vurdert. I en varmesentral er det vanlig å ha en topplastkilde i form av el, gass eller olje. PE-forbruk og GHG-utslipp for konstruksjon og demontering av disse kjelene kan antas å være mindre enn for biokjelene. Dette skyldes at fundament for varmesentral og andre elementer som brukes for både topplastkjel og grunnlastkjel allerede inngår for biokjelen. Derimot utgjør energidekningen for topplastkjelene ofte bare omtrent 20 % av total energidekning [40]. Det betyr at bidrag til PE-forbruk og GHG-utslipp per levert energimengde fra topplast kan være større enn for grunnlast. Det bør bli sett nærmere på i et videre arbeid hvordan infrastruktur for topplast påvirker de totale verdiene ved forskjellig energidekning.

I [51] er energiforbruk ved spredning av aske fra forbrenning på hogstfelt 0,025 % av energiinnholdet i brenselet. Hvis det antas at asken fra forbrenning blir spredd på hogstfeltene vil altså total PEF (og sannsynligvis utslippskoeffisient) ha en minimal økning, men dette vil bare redusere de prosentvise bidragene fra infrastruktur.

Ved bruk av spillvarme som energiressurs vil bidragene til PEF og utslippskoeffisient knyttet til selve energien fra spillvarmen være lave. Dette bygger på antagelsene i [17] om at energiinnholdet i restprodukter ikke inkluderes i PEF. Bidrag til PEF og utslippskoeffisient fra infrastruktur for distribusjonsnett vil da utgjøre en langt større del av total PEF og utslippskoeffisient for spillvarme. Siden det ikke er et krav i EN 15603:2008 at infrastruktur skal inkluderes i beregningene så kan energi fra spillvarme komme svært gunstig ut når man vurderer PEF og utslippskoeffisient.

9 Konklusjoner

9.1 Primærenergikonseptet

EN 15603:2008 er en europeisk standard opprettet for å beregne energiytelsen til et bygg. Denne standarden ble opprettet som en følge av EPBD-direktivet, og tar for seg beregningsmetode av både PEF og utslippskoeffisient. Enkelte elementer i denne standarden fører til at PEF og utslippskoeffisient kan variere avhengig av hvor systemgrensene settes. Denne standarden bestemmer blant annet at:

- Det er valgfritt å inkludere energibruken og GHG-utslippene tilknyttet infrastruktur for energiomforming, distribusjon av energibærere og energi tilknyttet avfallsbehandling.
- Det er valgfritt å inkludere utslipp av CH₄ og N₂O i de totale GHG-utslippene.

N₂O gir betydelige bidrag til drivhuseffekten ved bruk av energiavlinger, og CH₄ slippes ut i blant annet forbrenning av biomasse. Størrelsen på bidragene til drivhuseffekten fra andre gasser enn CO₂ avhenger av energiressurs. I fornybardirektivet er CO₂, CH₄ og N₂O oppgitt som de tre gassene som bidrar mest til drivhuseffekten. For å være konsekvent i beregning av utslippskoeffisient bør minst disse tre gassene inkluderes.

For PEF er viktigheten av hvor systemgrensene settes avhengig av energiressurs. Infrastruktur for vannkraft er det som bidrar mest til både PE-forbruk og GHG-utslipp for el fra vannkraft. EcoInvent oppgir et totalt PE-forbruk for infrastruktur for vannkraft på $1,53 \cdot 10^{11}$ MJ og GHG-utslipp på $1,37 \cdot 10^{10}$ kg CO₂eq. Et 100 MW kullkraftverk har i motsetning et PE-forbruk på $4,41 \cdot 10^8$ MJ og et GHG-utslipp på $3,01 \cdot 10^7$ kg CO₂eq. Derimot gjør tap i konvertering at kullkraft får en langt høyere PEF og utslippskoeffisient enn vannkraft. I tillegg er levetiden til et vannkraftverk mye lengre enn for et kullkraftverk. Dette gjør at bidragene fra infrastruktur per kWh produsert ofte blir mindre for et vannkraftverk enn et kullkraftverk.

I denne masteroppgaven er det kommet fram til at infrastruktur for varmeproduksjon (produksjon og demontering av varmesentral og distribusjonsnett) utgjør 0,16 – 1,00 % av det totale PE-forbruket og 1,15 – 6,01 % av det totale GHG-utslippet. Når systemgrensene utvides øker kompleksiteten i beregningene. Derfor bør alle prosesser som gir svært lave bidrag til enten PEF eller utslippskoeffisient neglisjeres. Når bidragene fra en prosess til enten PEF eller utslippskoeffisient utgjør over 1 % av de totale bidragene, bør denne prosessen inkluderes.

PEF og utslippskoeffisient slik de står i EN 15603:2008 kan bli feil oppfattet og føre til forvirring. Det er mål å ha mer fornybar energi i energiforsyningen, og samtidig lavere GHG-utslipp. Da er et viktig at PEF favoriserer fornybare ressurser og ressurser med lavt GHG-utslipp. Siden lav PEF og lav utslippskoeffisient ikke alltid er forenlig, bør det brukes en indikator som viser bruken av fossil energi, eller en ikke-fornybar PEF, og en indikator for bidrag til drivhuseffekten for oppvarmingssystemet.

9.2 Flis og pellets

PEF for flis varierer fra 1,017 til 1,086 kWh PE/kWh brensel. Utslippskoeffisienten varierer fra 5,468 til 22,663 g CO₂eq/kWh brensel. Flis fra GROT som buntet og transporteres til terminal før det flises

og distribueres til kunder, gir størst PEF og utslippskoeffisient. Flis fra heltre som flises på velteplass før det distribueres til kunder gir minst PEF og utslippskoeffisient.

For flis fra stammevirke og flis fra GROT som bntes er det transport av tømmer og bunter som gir de største bidragene til PEF og utslippskoeffisient. Dette bidraget utgjør over 40 % for flis fra stammevirke i referansescenarioet, og over 30 % for flis fra buntet GROT. For heltre og GROT som flises på velteplass er prosessene på hogstfeltet det som gir de største bidragene med over 40 %. Alle prosessene innenfor systemgrensene gir betydelige bidrag til både PEF og utslippskoeffisient, og ingen av dem bør neglisjeres.

Valg av allokeringmetode påvirker beregningene for flis. Allokering basert på økonomisk verdi gir det laveste energiforbruket for både flis fra stammevirke og GROT (både buntet GROT og GROT som flises på velteplass). Hogst av stammevirke til biobrensel er ofte i samproduksjon med hogst av sagtømmer. Siden sagtømmer har størst økonomisk verdi blir en stor del av energiforbruket allokert til dette sortimentet. Det har vært vanlig å unngå allokering av energiforbruk ved hogst til GROT. Økonomisk allokering fører til at det totale energiforbruket for hogst og administrasjon blir lavere enn dersom allokering ved hogst unngås for GROT. Dette skyldes besparelsene ved å allokere vekk noe av energiforbruket knyttet til administrasjon. Energiforbruk knyttet til administrasjon vil oppstå for alle sortimentene.

PEF og utslippskoeffisient for pellets avhenger i stor grad av hva slags energi man bruker til tørking, og hva slags type el man antar blir brukt i prosesseringen. Pelletsanlegget i Hallingdal bruker mye varme fra forbrenning av avfall til tørking. Avhengig av hvordan denne varmen betraktes varierer PEF i referansescenarioet. Ved å kun betrakte PE-forbruket for avfallet, vil PEF for pellets bli 1,183 med el fra norsk vannkraft. Dersom total energi betraktes blir PEF 1,316. Utslippskoeffisienten er på 42,034 g CO₂eq/kWh pellets, uavhengig av hvordan tørkeenergien betraktes. Til sammenligning har pellets produsert på Averøy i Norge en PEF på 1,32 og en utslippskoeffisient på 41,67 g CO₂eq/kWh.

Prosessering og produksjon av pellets bidrar mest til PEF og utslippskoeffisient for anlegget i Hallingdal, med omtrent 60-80 % av de totale verdiene. Dette skyldes i hovedsak tørking av flis. Ved anlegget på Averøy blir flis sett på som karbonnøytralt, og prosessering og produksjon av pellets bidrar her med kun 1,2 % av de totale GHG-utslippene.

Hvordan energien som brukes til tørking av flis på anlegget i Hallingdal betraktes er avgjørende for PEF og utslippskoeffisient. Returtre har lavere PEF enn skogsflis siden returtre blir sett på som et restprodukt. Ved bruk av returtre, og ved å anta kun PE-forbruk for tørking, blir PEF for pellets redusert til 1,115. Ved å allokere GHG-utslipp fra avfallet til produktene i avfallet før de blir forbrent vil utslippskoeffisienten bli redusert til 15,450 g CO₂eq/kWh.

En reduksjon i fuktigheten i tømmeret fra 40 til 30 % gjennom naturlig tørking vil gi de største besparelsene i PE-forbruk. Dette gjelder kun hvis total tørkeenergi i prosesseringen brukes som utgangspunkt. PEF blir da redusert til 1,247. Utslippskoeffisienten blir redusert til 32,807 g CO₂eq/kWh pellets.

Inkludering av PEF for el som blir brukt i prosesseringen øker total PEF for pellets. El fra kullkraft istedenfor vannkraft vil gi en maksimal PEF for pellets på 1,448. Type el er også avgjørende for utslippskoeffisienten. Denne stiger til 98,603 g CO₂eq/kWh med el fra kullkraft. Ved å redusere

transportdistansen for pellets med 100 km, og tømmer med 50 km, blir PEF redusert fra 1,316 til 1,286. En endring i mengden pellets som distribueres påvirker PEF og utslippskoeffisient i svært liten grad og er neglisjerbart. Inkludering av PEF for diesel vil også være neglisjerbart for både flis og pellets.

Ved å kombinere de ulike scenarioene for pellets på en mest mulig realistisk måte vil PEF for pellets variere mellom 1,152 og 1,334. Utslippskoeffisienten vil variere fra 14,867 – 68,962 g CO₂eq/kWh pellets.

9.3 Forfatters synspunkter

PEF og utslippskoeffisient for fornybare energiresurser vil variere avhengig av systemgrenser og metodikk.

- For pellets er PEF og utslippskoeffisient i stor grad avhengig av hvordan varmen som brukes til tørking av flis betraktes, og hva slags type el som brukes i prosesseringen.
- PEF og utslippskoeffisient for flis varierer med allokeringmetode.
- PEF og utslippskoeffisient for el fra vind, vann og sol varierer med metodikk.

For å dreie energiforsyningen i en mer fornybar retning er det viktig at metodikken som brukes for beregning av PEF og utslippskoeffisient favoriserer fornybare kilder. I Sverige er ikke energiinnholdet i spillvarme, varme fra husholdningsavfall og el fra vind inkludert i PEF. PEF har derfor en verdi i overkant av 0 for disse ressursene. Slik bør det også være ved beregning av PEF og utslippskoeffisient i Norge.

Ved å bruke økonomisk allokering for hogst av tømmer, vil mesteparten av PE-forbruket og GHG-utslippene bli allokert til sagtømmer. Dette bidrar til mer gunstige verdier for flis, selv om det vil føre til et høyere energiforbruk og GHG-utslipp for plankeproduksjon. Energiforsyningen er kanskje det viktigste området for reduksjon av GHG-utslipp. Derfor bør allokeringmetoder som favoriserer fornybar energi veie tyngre enn allokeringmetoder som favoriserer produkter som er i samproduksjon med energi.

Prosessering av pellets krever mye el. For å få lav PEF og utslippskoeffisient for pellets bør det da antas at det brukes en nordisk elmiks. Videre bør PEF for el inkluderes. Når forbrenning av avfall er opphav til energien som brukes til tørking, er det da logisk og «metodikkonsekvent» at man kun betrakter PE som brukes til tørking.

9.4 Hva som bør arbeides videre med

9.4.1 Primærenergikonseptet

LCA er et verktøy som blir stadig mer brukt på mange forskjellige områder, som for beregning av PE-forbruk og GHG-utslipp for energiresurser. Per i dag er det få gode studier som er gjort på GHG-utslipp fra energiresurser som ikke skyldes bruk av materialer eller fossile brenslers. Endring av landområder kan gi store bidrag til drivhuseffekten. Det har blitt foreslått i oppgaven at en PEF bør vise andel fornybar energi, eller at det bør brukes en ikke-fornybar PEF. Utslippskoeffisienten bør derimot ta med alle GHG-utslipp, både de direkte fra bruk av fossile brenslers, og de indirekte som fra endring av landområder. Derfor er det viktig at effekten av indirekte klimagassutslipp studeres nærmere for energiresurser.

Det er kommet fram til at infrastruktur for varmesentral og distribusjonsnett bidrar i liten grad til total PEF og utslippskoeffisient for nærvarme. De fleste varmesentraler har en topplastkjel i tillegg til en biokjel. Topplastkjeler har høy kapasitet men lav brukstid. Dette fører til at totalt energiforbruk og GHG-utslipp per levert energimengde fordelt over kjelens levetid kan være betydelig. Konsekvensene ved å inkludere dette i beregningene har ikke blitt utredet, og bør bli sett på i et videre arbeid.

Det kan være interessant å se på kraftstrømmen (elkraft) inn og ut av Norge for å beregne PEF og utslippskoeffisient for norsk el. Spesielt interessant kan det være å se på hvordan PEF og utslippskoeffisient for norsk el endrer seg når det er lite vann i magasinene (som ved prismekanismer i strømmarkedet fører til større grad av import) og når temperaturen endrer seg (spesielt på vinterstid når det er kaldt).

9.4.2 Energiressurser

For å kunne anslå PEF og utslippskoeffisient for flis og pellets med større sikkerhet i Norge bør flere produsenter av flis og pellets studeres.

Tap ved transport i skog og ved lagring kan øke PEF og utslippskoeffisient for både pellets og flis. I verste fall kan tapene utgjøre over 15 % av energiinnholdet i flis. Det kan være interessant å se på hvor lenge flis blir lagret, både på velteplass eller terminal, og hos sluttbruker, og hva konsekvensene ved dette faktisk er. Tap av tørrstoff ved transport i skog bør også undersøkes nærmere.

PEF og utslippskoeffisient for pellets varierer i stor grad av hvordan man betrakter energien som brukes til tørking. Skal total energi som brukes til tørking betraktes, eller kun primærenergien som brukes? Hvis det er PE-forbruket som betraktes vil energien som brukes til tørking være avhengig av det som forbrennes. Hvis det er skogsflis som forbrennes, er det da riktig at denne flisen skal ha en PEF på over 1? Og hvis det er avfall eller returtre som forbrennes, er det da riktig å unngå inkludering av energiinnholdet i brenselet? Og for forbrenning av avfall, skal miljøbelastningen legges på produktene i avfallet, eller på varmeproduksjonen?

Varmeproduksjon fra husholdningsavfall kan erstatte oppvarming med el eller fossile brensler. Husholdningsavfall kan også brukes til å lage biogass som igjen kan brukes i et CHP-anlegg. PE-forbruk og GHG-utslipp for husholdningsavfall er avhengig av metodikk, systemgrenser og allokeringmetode. Hva slags bruk av avfallet som gir de største energi- og klimabesparelsene, og hvordan forskjellig valg av metodikk, systemgrenser og allokering påvirker resultatene, kan være interessant å se på i et videre arbeid.

Bibliografi

1. Edenhofer, O., et al., *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* 2011: United Nations Pubns.
2. Houghton, J., *Global Warming - The complete briefing* 2009: Cambridge university press.
3. Linda E. Doman, et al., *International Energy Outlook 2011* 2011: U.S Energy Information Administration.
4. Ingrid H. Magnussen, Dag Spilde, and M. Killingland. *Energibruk i Fastlands-Norge*. 2011 [cited 2012 5. juni]; Available from: <http://www.nve.no/Global/Publikasjoner/Publikasjoner%202011/Rapport%202011/rapport9-11.pdf>.
5. UN. *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. 1987; Available from: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>.
6. Sitarz, D., *Agenda 21: The Earth summit strategy to save our planet* 1993. Medium: X; Size: Pages: (331 p).
7. UN, *The Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, 1998.
8. EC, *DIRECTIVE 2009/28/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC*. 2009.
9. EC, *DIRECTIVE 2004/8/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 February 2004 on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EEC*. 2004.
10. EU, *DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast)*. 2010.
11. Norge, S., *NS-EN 15603:2008: Bygningers energiytelse: Bestemmelse av total energibruk og energiytelse*, 2008.
12. Martínez, E., et al., *LCA sensitivity analysis of a multi-megawatt wind turbine*. *Applied Energy*, 2010. **87**(7): p. 2293-2303.
13. ISO, *ISO 14040:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*, 2006.
14. Cherubini, F., et al., *Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations*. *Resources, Conservation and Recycling*, 2009. **53**(8): p. 434-447.
15. SINTEF Energy Research, et al., *The potential for increased primary energy efficiency and reduced CO2 emissions by district heating and cooling: Method development and case studies*, 2011.
16. Guest, G., et al., *Life Cycle Assessment of Biomass-based Combined Heat and Power Plants*. *Journal of Industrial Ecology*, 2011.
17. Jenny Gode, F.M., Linus Hagberg, Andreas Öman, Jonas Höglund, David Palm, *Miljöfaktaboken 2011 Uppskattade emissionsfaktorer för bränslen, el, värme och transporter* 2011: värmeforsk.
18. Varun, I.K. Bhat, and R. Prakash, *LCA of renewable energy for electricity generation systems— A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009. **13**(5): p. 1067-1073.
19. Strømman, A.H., *Methodological Essentials of Life Cycle Assessment*, 2010, NTNU.
20. Cherubini, F., A.H. Strømman, and S. Ulgiati, *Influence of allocation methods on the environmental performance of biorefinery products—A case study*. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011. **55**(11): p. 1070-1077.
21. Dones, R., et al., *Life cycle inventories of energy systems: results for current systems in Switzerland and other UCTE countries*. Data v1, 2007. **1**.

22. EPA. *Methodology for Incorporating Source Energy Use*. 2011 [cited 2012 5. juni]; Available from: http://www.energystar.gov/ia/business/evaluate_performance/site_source.pdf.
23. Deru, M. and P. Torcellini. *Source Energy and Emission Factors for Energy Use in Buildings*. 2007 [cited 2012 5. juni]; Available from: <http://www.nrel.gov/docs/fy07osti/38617.pdf>.
24. KLIF. *Omregningstabeller for energiinnhold i ulike energivarer*. [cited 2012 5. juni]; Available from: http://www.klif.no/artikkel_40918.aspx.
25. Løseth, M. *Klimaregnskap for fjernvarme - Felles utslippsfaktorer for den norske fjernvarmebransjen*. 2011 [cited 2012 5. juni]; Available from: http://www.fjernvarme.no/uploads/Rapport_Klimaregnskap%20for%20fjernvarme_2.pdf.
26. Raadal, H.L., et al., *Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from the generation of wind and hydro power*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011. **15**(7): p. 3417-3422.
27. Gagnon, L. and J.F. van de Vate, *Greenhouse gas emissions from hydropower: The state of research in 1996*. *Energy Policy*, 1997. **25**(1): p. 7-13.
28. FORNYBAR.NO. *Vannkraft*. [cited 2012 5. juni]; Available from: <http://www.fornybar.no/file.axd?fileID=6>.
29. Fladen, B., et al. *Veileder i planlegging, bygging og drift av små kraftverk*. 2010 [cited 2012 5. juni]; Available from: <http://www.nve.no/global/publikasjoner/publikasjoner%202010/veileder%202010/veileder1-10.pdf>.
30. Hege Haugland, E.Ø., Magnus Utne Gulbrandsen, Ingrid Strømme, Per Fjeldal og Harold Leffertstra. *Skog som biomasseressurs*. 2011 [cited 2012 5. juni]; Available from: <http://www.klif.no/no/Publikasjoner/Publikasjoner/2011/Februar/Skog-som-biomasseressurs/>.
31. Kallhovd, M., *Analysis on Methods and the Influence of Different System Data When Calculating Primary Energy Factors for Heat from District Heating Systems*, in *Department of Energy and Process Engineering 2011*, NTNU.
32. Sjølie, H.K. and B. Solberg, *GREENHOUSE GAS IMPLICATIONS BY PRODUCTION OF WOOD PELLETS AT THE BIOWOOD NORWAY PLANT AT AVERØY, NORWAY*, 2009.
33. Norge, S., *NS-EN 15316-4-5:2007: Varmesystemer i bygninger - Metode for beregning av systemets energikrav og systemvirkningsgrader - Del 4-5: Systemer for varmeproduksjon til romoppvarming, ytelsen og kvalitet ved fjernvarme og systemer med stort volum*, 2007.
34. Cherubini, F. and A.H. Strømman, *Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges*. *Bioresource Technology*, 2011. **102**(2): p. 437-451.
35. EIA. *Spot prices, Petroleum and other liquids*. [cited 2012 5. juni]; Available from: http://205.254.135.7/dnav/pet/pet_pri_spt_s1_d.htm.
36. Wang, M., H. Lee, and J. Molburg, *Allocation of energy use in petroleum refineries to petroleum products*. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2004. **9**(1): p. 34-44.
37. Nordhagen, E. *Tørking av flis med overskuddsvarme fra vannkraftverk*. 2010 [cited 2012 5. juni]; Available from: http://www.skogoglandskap.no/filearchive/glimt_03_10_torking_av_flis_med_overskuddsvarme_fra_vannkraftverk.pdf.
38. NOBIO. *Bioenergi i Norge, Markedsrapport pellets og briketter 2010*. 2010 [cited 2012 5. juni]; Available from: http://www.nobio.no/images/tidsskrifter_pdf/Pris-%20og%20salgsstatistikk%20for%20pellets%20og%20briketter%202010.pdf.
39. Energimyndighet, S. *Trädränsle- och torvpriser*. 2011 [cited 2012 5. juni]; Available from: <http://webbshop.cm.se/System/DownloadResource.ashx?p=Energimyndigheten&rl=default:/Resources/Permanent/Static/3206cbb3952c4e6088cbd1f297503c16/2327NYw.pdf>.
40. Aalerud, P., *Teknisk-økonomisk analyse av nærvarmeanlegg med biobrensel*, 2011, Norwegian University of Science and Technology.
41. Michelsen, O., F. Cherubini, and A.H. Strømman, *Impact Assessment of Biodiversity and Carbon Pools from Land Use and Land Use Changes in Life Cycle Assessment, Exemplified with Forestry Operations in Norway*. *Journal of Industrial Ecology*, 2011.

42. Hohle, A.M.E., *Energiforbruk ved høsting av skogsbrensel*, 2008.
43. Hohle, A.M.E., *Svar på spørsmål vedrørende energiforbruk ved høsting av skogsbrensel*, 2012.
44. Skjevraak, G., *Samtale med Geir Skjevraak om verdikjeder for biobrensler*, 2012.
45. Belbo, H. and L. Kjøstelsen. *Bunting av vegkantvirke*. 2012 [cited 2012 5. juni]; Available from:
http://www.skogoglandskap.no/filearchive/rapport_01_12_bunting_av_vegkantvirke2.pdf.
46. Kjøstelsen, L., *Svar på spørsmål vedrørende energiforbruk ved høsting av skogsbrensel*, 2012.
47. Belbo, H. and S. Gjølshjøl. *Trevirke - Brennverdier og Energitetthet*. 2008 [cited 2012 5. juni]; Available from: http://www.skogoglandskap.no/filearchive/viten-01-08_trevirke_brennverdier.pdf.
48. Eriksson, L.N. and L. Gustavsson, *Biofuels from stumps and small roundwood—Costs and CO2 benefits*. Biomass and Bioenergy, 2008. **32**(10): p. 897-902.
49. Hole, E.E., *Bioenergi - MILJØ, TEKNIKK OG MARKED*2001: Energigården.
50. Sjølie, H.K. and B. Solberg, *Greenhouse gas emission impacts of use of Norwegian wood pellets: a sensitivity analysis*. Environmental Science & Policy, 2011. **14**(8): p. 1028-1040.
51. Eriksson, L. and L. Gustavsson, *Costs, CO2- and primary energy balances of forest-fuel recovery systems at different forest productivity*. Biomass and Bioenergy, 2010. **34**(5): p. 610-619.
52. Tekniske Nyheter, D., *ENERGIRAPPORTEN, Årgang 8 Nummer 36*, 2011.
53. Norge, S., *NS 3165: Biobrensel - Sylinderformede pelleter av rent trevirke: Klasseinndeling og krav* 1999.
54. Bjerg, J., et al., *Træpillehåndboken*2002: dk-TEKNIK ENERGI & MILJØ.
55. *Biowood Norway*. 2012; Available from: <http://www.biowood.no/>.
56. *Hallingdal Trepellets*. 2012; Available from: <http://www.htp.as/>.
57. Jemtland, T., *Samtale om energibruk langs hele verdikjeden for produksjon av pellets på Averøy*, 2012.
58. Bakstad, S., *Samtale om energibruk langs hele verdikjeden for produksjon av pellets i Hallingdal*, 2012.
59. Slettemoen, P.Å., *Samtale om forbrenningsanlegget til Hallingdal Renovasjon*, 2012.
60. Michelsen, O., C. Solli, and A.H. Strømman, *Environmental impact and added value in forestry operations in Norway*. Journal of Industrial Ecology, 2008. **12**(1): p. 69-81.
61. Marthinsen, J., K. Sandberg, and M. Johansen. *Fornybar andel i avfall til norske forbrenningsanlegg i 2009*. 2010 [cited 2012 5. juni]; Available from:
http://avfallnorge.web123.no/article_docs/Sluttrapport%20-%20AN%20mal101215-rev110204.pdf.
62. Hamnaberg, H. and S. Asle;. *Klimagassutslipp fra fjernvarme: Tiltak og virkemidler*. 2010 [cited 2012 5. juni]; Available from:
http://www.nve.no/Global/Publikasjoner/Publikasjoner%202010/Rapport%202010/rapport2010_03.pdf.
63. Wihersaari, M., *Greenhouse gas emissions from final harvest fuel chip production in Finland*. Biomass and Bioenergy, 2005. **28**(5): p. 435-443.
64. Bjørnstad, E. and A. Norheim. *Småskala varmeproduksjon fra skogsbrensel*. 2007 [cited 2012 5. juni]; Available from: http://generator.firmanett.no/t/tforsk/doc/No_4_07.pdf.
65. Berner, M., *Samtale om virkningsgrad ved varierende last*, 2012.
66. Sweco, et al. *kostnader ved produksjon av kraft og varme*. 2011 [cited 2012 5. juni]; Available from: <http://www.nve.no/global/konsesjoner/fjernvarme/handbok1-07.pdf>.
67. Hansen, M.T., et al., *Træpillehåndboken*2002: FORCE Technology.
68. Van Loo, S. and J. Koppejan, *The handbook of biomass combustion and co-firing*2008: Earthscan/James & James.

Vedlegg A

Omregninger i kapittel 3

klif.no	1 liter lett fyringsolje	0.84 kg	36.2 MJ	10.1 kWh	1kg = 12.02 kWh
klif.no	1 liter tung fyringsolje	0.97 kg	39.4 MJ	11.0 kWh	1kg = 11.34 kWh
klif.no	1 m3 naturgass	0.85 kg	41.5 MJ	11.5 kWh	

enhetsomforming	
kWh	MJ
1	3.6
lb	kg
1	0.454
gal	l
1	3.785
m ³	ft ³
1	35.315

Energiressurs	PE-forbruk	PEF (kWh/kWh)	utslipp CO2	utslipp CH4	utslipp CO2			utslippskoeffisient (gCO2-eq/kWh)
					biogenic	utslipp N2O	utslipp CO2-eq	
tung fyringsolje Ecoinvent	53.596 MJ/kg	1.31	0.39 kg/kg	0.0018 kg/kg				38.04
lett fyringsolje Värmeforsk	1.11 MJ/MJ	1.11	5.31 g/MJ	2.91e-2 g/MJ		5.26e-05 g/MJ		21.58
fyringsolje EN 15603:2008		1.35						330
olje (flere typer) EPA		1.01						ikke oppgitt
lett fyringsolje NREL		1.158					4.10 lb/gal	48.69
tung fyringsolje NREL		1.191					4.47 lb/gal	48.74
naturgass Ecoinvent	1.244 MJ/MJ	1.244	7.4e-3 kg/MJ	1.6e-4 kg/MJ				39.89
naturgass Värmeforsk	1.09 MJ/MJ	1.09	5.53 g/MJ	2.75e-1 g/MJ		2.59e-12 g/MJ		36.47
naturgass EN 15603:2008		1.36						277.00
naturgass EPA		1.047						ikke oppgitt
naturgass NREL		1.092					2.78e1 lb/ft ³	38.76
vannkraft Ecoinvent Sveits	4.66 MJ/kWh	1.294	3.67e-3 kg/kWh	1.4e-5 kg/kWh	4.98e-5 kg/kWh	1.85e-7 kg/kWh		4.10
vannkraft Ecoinvent Finland	4.66 MJ/kWh	1.294	4.06e-3 kg/kWh	4.5e-9 kg/kWh	3.01e-2 kg/kWh	1.17e-7 kg/kWh		34.2
vannkraft Värmeforsk prod		1.1	4.5 g/kWh	9.6e-4 g/kWh		7.6e-5 g/kWh		4.54
vannkraft Värmeforsk prod + dist		1.21	5.7 g/kWh	4e-3 g/kWh		9.2e-5 g/kWh		5.82
vind Ecoinvent onshore ¹	14.67 MJ/kWh	4.075	0.0136 kg/kWh					13.6
vind Ecoinvent onshore ²	0.266 MJ/kWh	0.074	0.0136 kg/kWh					13.6
vind Ecoinvent offshore ¹	14.62 MJ/kWh	4.061	1.23e-2 kg/kWh					12.3
vind Ecoinvent offshore ²	0.217 MJ/kWh	0.060	1.23e-2 kg/kWh					12.3
vind Värmeforsk produksjon	6.99e-2 kWh/kWh	0.069	1.30E+01	2.90E-03		4.60E-04		13.20
vind Värmeforsk prod+dist	7.92e-2 kWh/kWh	0.079	1.50E+01	3.40E-03		5.00E-04		15.23
elmiks Värmeforsk svensk		2.1						36.4
elmiks Värmeforsk nordisk		1.74						97.3
elmiks Ecoinvent NORDEL produksjon	7.78 MJ/kWh	2.161	1.2e-1 kg/kWh					120
elmiks Ecoinvent NORDEL lavspent	8.9 MJ/kWh	2.472	1.4e-1 kg/kWh					140
elmiks Ecoinvent UCTE produksjon	11.35 MJ/kWh	3.153	4.5e-1 kg/kWh					450
elmiks Ecoinvent UCTE lavspent	12.82 MJ/kWh	3.561	5.1e-1 kg/kWh					510
elmiks Ecoinvent CENTREL produksjon	12.58 MJ/kWh	3.494	8.9e-1 kg/kWh					890
elmiks Ecoinvent CENTREL lavspent	14.45 MJ/kWh	4.014	1e+0 kg/kWh					1000
elmiks EPA		3.34						ikke oppgitt
elmiks NREL		3.365						ikke oppgitt

¹) Inkludert tap i energikonvertering fra vind til el

²) Kun ikke-fornybare ressurser medregnet

³) gassvolum ved 60°F og 14.7 PSIA. (15° celcius, 1 atm)

Vedlegg B

Formler

$$MC_{dry} = \frac{\text{vannvekt}}{\text{total tømmervekt på tørrbasis}} * 100$$

$$MC_{wet} = \frac{\text{vannvekt}}{\text{total tømmervekt inkludert vann}} * 100$$

$$H_e = 5,32 - 6,02 * MC_{wet}$$

Brukstid:

$\tau = \frac{W}{P}$, der W er årlig produsert energimengde og P er maksimal effekt (kapasitet)

Vedlegg C

Data for flis

Forbruk i hogstmaskin ved forskjellig trestørrelse i liter per fm ³				
Volum per tre (l)	Forbruk	Personbilforbruk	Maskinflytt	Sum
150.00	1.25	0.04	0.01	1.30
200.00	1.01	0.03	0.01	1.05
250.00	0.87	0.03	0.01	0.91
300.00	0.78	0.02	0.01	0.81
350.00	0.71	0.02	0.01	0.74
400.00	0.66	0.02	0.01	0.69
450.00	0.62	0.02	0.01	0.65
500.00	0.59	0.02	0.01	0.62

Variasjon ved utkjøring av stammetre og heltre for forskjellige transportavstand til velteplass (gitt i l/fm ³)				
Avstand (m)	Utkjøring 2km/time	Personbil 20km/dag	Maskinflytt	Sum utkjøring
100	0.48	0.03	0.01	0.52
300	0.65	0.03	0.01	0.69
500	0.82	0.03	0.01	0.86
750	1.04	0.03	0.01	1.08
1000	1.25	0.03	0.01	1.29

Variasjon ved utkjøring av GROT for forskjellige transportavstand til velteplass (i l/fm ³)	
Avstand (m)	Forbruk l/fm ³
150	1.1
300	1.9
450	2.7
600	3.5

Terminalbruk, bunter	
0.66 min/bunt, 47 bunter/lass -->	31 min for lessing
1 time for på- og avlesing,	10 l/h i forbruk for lastemaskin
10 l totalt for lessing og lossing -->	0.44 l/fm ³
kjørebruk	
tomt lass	0.51 l/km
fullt lass	0.575 l/km
volum pr lass	22.92 fm ³ /lass

Kilde for de tre øverste tabellene: [46]

Kilde for terminalbruk, bunter: [45]

kilde	Data for flis	mengde	enhet
Flishogging			
[42]	Trommelhogger	1.5	l/fm ³
[42]	Skivehogger	1	l/fm ³
Terminalarbeid			
[42]	Forbruk diesel hjullaster ved lessing	0.31	l/fm ³
Transport av tømmer			
[58]	Volum tømmer pr lass	40	fm ³
Transport av flis			
[44]	Kapasitet containerbiler	110	lm ³
Administrativt			
[42]	Forbruk uten allokering	0.4	l/fm ³
Tredata			
[58]	Fuktinnhold tømmer, Fr	40 %	
[47]	Fastmasse skogsflis	40 %	
[47]	Vekt Gran	400	kg/fm ³ (0 % MC_wet)
[47]	Vekt Bjørk	510	kg/fm ³ (0 % MC_wet)
Tap langs verdikjeden			
[48]	Tørrstofftap ved flising i skog	10 %	
[48]	Tørrstofftap ved flising ved terminal	5 %	
Øvrig info			
[50]	Energiinnhold diesel	36	MJ/l
EcoInv	GHG-utslipp, diesel i bygningsmaskin	0.0916	kg CO ₂ eq/MJ
EcoInv	GHG-utslipp, diesel i bygningsmaskin	3.2976	kg CO ₂ eq/l
EcoInv	Energiforbruk transport	2.36	MJ/tkm
EcoInv	GHG-utslipp transport	0.137	kg CO ₂ eq/tkm
Datatillegg for GROT		mengde	enhet
Bunting			
[51]	Dieselforbruk buntemaskin	12	l/h
[45]	Antall bunter pr time	28	bunter/h
[45]	Vekt bunt	164	kg/bunt (0 % MC_wet)
[45]	Massetetthet, løs	152	kg/lm ³ (40 % MC_wet)
[45]	Fastmasse bunt	40 %	
Transport av bunter			
[45]	Lastevolum tømmerbil	90.8	lm ³
[45]	antall bunter pr lass	47	
[45]	Totalvolum bunter på lass	57.3	m ³
[45]	Buntevolumandel	0.631057	
Allokeringsdata			
Økonomi			
SSB	Pris sagtømmer gran	476	kr/m ³
SSB	Pris massevirke gran	237	kr/m ³
	Pris GROT gran (77 % av gran)	182.49	kr/m ³
Volum			

	Volumandel sagtømmer når GROT ikke inngår	50 %	
	Volumandel massevirke når GROT ikke inngår	50 %	
	Volumandel sagtømmer med GROT	33 %	
	Volumandel massevirke med GROT	33 %	
	Volumandel GROT	33 %	
	Energiinnhold		
[47]	Gran, hele stammen	5.28	kWh/kg (0 % MC_wet)
[47]	GROT, gran	5.49	kWh/kg (0 % MC_wet)

For all annen informasjon om flis med omregninger og utregninger og fremgangsmåte for beregning av PEF og utslippskoeffisient henvises det til excel-dokumentet «primærenergi_flis.xlsx»

Vedlegg D

Data for pellets

kilde	data for pellets Averøya	mengde	enhet
Anskaffelse og transport av råmateriale			
	Dieselforbruk skogbruk	0.088	l/m ³
	GHG-utslipp skogbruk	2.677	kg CO ₂ eq/m ³
	Dieselforbruk hogst og transport i skog	2.85	l/m ³
	GHG-utslipp hogst og transport i skog	9.374	kg CO ₂ eq/m ³
	Dieselforbruk flishogging	1.5	l/solid m ³
	Dieselforbruk lasting av flis	0.31	l/solid m ³
	Dieselforbruk veitransport for tømmer og flis	5.53	l/m ³
	GHG-utslipp veitransport	11.628	kg CO ₂ eq/m ³
	Avstand Halifax - Averøya	20	dager
	Flisvekt på lastede skip	27500	tonn (0 % MC_wet)
	Drivstofforbruk på skip	24	tonn/dag
	CO ₂ -utslipp skip	3.17	tonn CO ₂ /ton drivstoff
Produksjon			
	Tørking av flis	8 %	(prosent av råvare)
	Årlig produksjon	450000	tonn
	Årlig elforbruk	90000	MWh
	Forbruk av stål på Averøya	2200	tonn
	Forbruk av asfalt på Averøya	1050	tonn
	Forbruk av betong på Averøya	19500	tonn
	Tidsbruk for konstruksjon	18000	h
	Dieselforbruk anleggsmaskiner	3	l/h
	Levetid fabrikk	60	år
Transport av pellets			
	Pellets på skip	5000	tonn
	Avstand Averøya-Hamburg (tur-retur)	6	dager
	Drivstofforbruk på skip	11	tonn/dag
	Transportdistanse til forbruker i Tyskland	50	km
kilde	data for pellets Hallingdal	mengde	enhet
Anskaffelse og transport av råmateriale			
[58]	Mengde tømmer pr lass	40	fm ³ /lass
[58]	Total bruk av tømmer i 2011	44570	fm ³ /år
[58]	Andel gran	50 %	
[58]	Andel furu	50 %	
[58]	Antall leverte lass pr år	1115	
[42]	Dieselforbruk hogst	0.88	l/fm ³
[42]	Dieselforbruk transport i skog	0.66	l/fm ³
[42]	Administrasjon	0.4	l/fm ³
EcolInvent	Energiforbruk tømmertransport	2.36	MJ/tkm
EcolInvent	GHG-utslipp tømmertransport	0.137	kg CO ₂ eq/tkm

Produksjon			
[58]	Produksjon av pellets i 2011	20370	tonn
[58]	Energiinnhold pellets	4800	kWh/tonn pellets
[58]	Tørking av flis	1000	kWh/tonn pellets
[58]	Årlig elforbruk i fabrikk	4 518 970	kWh
[58]	Årlig elforbruk for fliskutter	149 519	kWh
[58]	Elforbruk pelletering	72	kWh/tonn pellets
[58]	Elforbruk kjøling	6	kWh/tonn pellets
[58]	Årlig elforbruk pelletering	1466640	kWh
[58]	Årlig elforbruk kjøling	122220	kWh
[17]	GHG-utslipp ved forbrenning av avfall	36.96	g/MJ brensel
[17]	GHG-utslipp distribusjon av avfall	0.997	g/MJ brensel
[25]	PEF returtre	0.05	
[25]	GHG-utslipp returtre	3	g/kWh
[17]	PEF produksjon og distribusjon av avfall	0.0145	
[17]	GHG-utslipp prod + dist av flis	2.31	g/MJ brensel
[17]	PEF produksjon og distribusjon av flis	1.05	
[59]	Andel varme fra flis	25 %	
[59]	Andel varme fra avfall	75 %	
[59]	Virkningsgrad kjeler	0.85	
[40]	Tap i varmedistribusjon	0.1	
Transport av pellets			
[58]	snittkapasitet pr lass pellets	30	tonn
[58]	variasjon pr lass pellets nedre grense	27	tonn
[58]	variasjon pr lass pellets øvre grense	35	tonn
EcolInvent	Energiforbruk pelletstransport	2.36	MJ/tkm
EcolInvent	GHG-utslipp pelletstransport	0.137	kg CO ₂ eq/tkm
Energi- og treverdier			
[47]	Vekt Furu	440	kg/fm ³ (0 % MC_wet)
[47]	Vekt Gran	400	kg/fm ³ (0 % MC_wet)
[58]	Fuktinnhold tømmer	40 %	
[58]	Vekt pr lass tømmer	28000	kg
Øvrig info			
		PEF	GHG (kg CO ₂ eq/GJ)
[17]	Vannkraft	1.21	1.6
[50],[21]	Kullkraft	3.85	342.0
[21]	Nordisk elmiks	2.472	38.9
[21]	Europeisk elmiks	3.561	141.7
[47]	Fastmasse skogsflis	40	%
EcolInvent	GHG-utslipp, diesel i bygningsmaskiner	0.0916	kg CO ₂ eq/MJ
EcolInvent	GHG-utslipp, diesel i bygningsmaskiner	3.2976	kg CO ₂ eq/l diesel
[50]	Pellets, energiinnhold	17.3	GJ/tonn
[50]	Energiinnhold diesel	0.036	GJ/l
[50]	Energiinnhold tungolje	40.7	GJ/tonn
[50]	Flis, energiinnhold	6.8	GJ/tonn (40 % MC_wet)

Leveranse av pellets og sted for tømmerhogst, Hallingdal

Destinasjoner, største kunder 2011

Pnr	Psted	Årstonn
198	OSLO	400
280	OSLO	300
688	OSLO	300
754	OSLO	500
2007	KJELLER	500
661	OSLO	500
2013	SKJETTEN	500
1350	LOMMEDALEN SKOLE	100
1401	SKI	3500
1451	NESODDTANGEN	150
1532	MOSS	200
1540	VESTBY	2000
1658	TORP	75
1890	RAKKESTAD	200
2770	JAREN	500
3007	DRAMMEN	3000
3055	KROKSTADELVA	50
3158	ANDEBU	150
3158	ANDEBU	200
3174	REVETAL	200
3168	MELSOMVIK	300
3177	NO-3177 VÅLE	200
3186	HORTEN	60
3260	LARVIK	1500
3292	STAVERN	1000
3282	KVELDE	300
3280	TJODALYNG	200
3320	NO-3320 VESTFOSSEN	120
3341	ÅMOT	150
3504	HØNEFOSS	300
3513	HØNEFOSS	100
3536	NORESUND	800
3536	NORESUND	100
3560	HEMSEDAL	120
3570	ÅL	150
3570	ÅL	150
3580	GEILO	100
3580	GEILO	130
3612	KONGSBERG	20

3630 RØDBERG	100
3630 RØDBERG	50
3647 HVITTINGFOSS	50
3750 DRANGEDAL	100
3944 PORSGRUNN	75
3960 STATHELLE	120
4604 KRISTIANSAND S	100
4604 KRISTIANSAND S	50
4950 RISØR	100
5111 BREISTEIN	100
5147 FYLLINGSDALEN	100
6821 NO-6821 SANDANE	50
6891 VIK I SOGN	250
Sum	20370

Tømmer 2011	
Innkjørt fra	
542 - Nord-Aurdal	6 %
605 - Ringerike	35 %
615 - Flå	8 %
616 - Nes	8 %
617 - Gol	13 %
618 - Hemsedal	1 %
619 - Ål	8 %
620 - Hol	1 %
622 - Krødsherad	9 %
632 - Rollag	6 %
633 - Nore og Uvdal	7 %

Beregningseksempel for tømmertransport i referansescenario (tkm):	
- Antall kbm fra hvert Pnr er dividert med kbm tømmer per lass (40) for å finne antall tur-retur til anlegget i Hallingdal	
- Distanse tur-retur i km er multiplisert med lastefaktor og med antall tonn per lass for å finne tkm per lass	
- tkm per lass er multiplisert med antall turer og deretter total tkm per år fra alle pnr summert	
Vekt furu (0 % MC_wet)	440 kg/fm ³
Vekt gran (0 % MC_wet)	400 kg/fm ³
Vekt furu med fukt (40 % MC_wet)	733.3 kg/fm ³
Vekt gran med fukt (40 % MC_wet)	666.7 kg/fm ³
Vekt tømmer	700 kg/fm ³
Vekt tømmer pr lass (40 * 700)	28 tonn
Tømmertransport per år i tkm	3146360 tkm

All «data for pellets Averøya» er hentet fra [50]

For all annen informasjon om pellets med omregninger og utregninger og fremgangsmåte for beregning av PEF og utslippskoeffisient henvises det til excel-dokumentet «primærenergi_pellets.xlsx»

Vedlegg E

Resultater for pellets Hallingdal

Distribusjonsmengde: 27 tonn pr lass				
Prosess	Energiforbruk GJ/år	Energiforbruk i % av totalt produsert energimengde	GHG-utslipp kg CO ₂ eq	GHG-utslipp i % av totalt
Energimengde produsert pellets	352401			
Anskaffelse og transport av råmateriale				
Hogst av tømmer	1411.978	0.401	129337.148	3.143
Transport i skog av tømmer	1058.983	0.301	97002.861	2.357
Transport av tømmer til Hallingdal trepellets	7425.410	2.107	431051.320	10.476
Administrasjon	641.808	0.182	58789.613	1.429
Produksjon				
	type el: Vannkraft		GHG (kg CO₂eq/GJ)	
Tørking, kun primærenergi fra forbrenning	26205.406	7.436	2712565.059	65.922
Tørking, all energi inkludert	73332.000	20.809	2712565.059	65.922
Flishogging (el)	538.268	0.153	1.617 870.201	0.021
Pelletering (el)	5279.904	1.498	1.617 8535.845	0.207
Kjøling (el)	439.992	0.125	1.617 711.320	0.017
Øvrig elforbruk	10010.128	2.841	1.617 16183.040	0.393
Transport av pellets	11364.781	3.225	659735.145	16.033
			PEF	g CO₂eq/kWh
Totalt forbruk og utslipp med total energi til tørking	111503.251	31.641	1.316 4114781.551	42.035 100.000
Totalt forbruk og utslipp kun med PE til tørking	64376.657	18.268	1.183 4114781.551	42.035 100.000

Distribusjonsmengde: 35 tonn pr lass				
Prosess	Energiforbruk GJ/år	Energiforbruk i % av totalt produsert energimengde	GHG-utslipp kg CO ₂ eq	GHG-utslipp i % av totalt
Energimengde produsert pellets	352401			
Anskaffelse og transport av råmateriale				
Hogst av tømmer	1411.978	0.401	129337.148	3.146
Transport i skog av tømmer	1058.983	0.301	97002.861	2.359
Transport av tømmer til Hallingdal trepellets	7425.410	2.107	431051.320	10.484
Administrasjon	641.808	0.182	58789.613	1.430
Produksjon				
	type el: Vannkraft		GHG (kg CO₂eq/GJ)	
Tørking, kun primærenergi fra forbrenning	26205.406	7.436	2712565.059	65.973
Tørking, all energi inkludert	73332.000	20.809	2712565.059	65.973
Flishogging (el)	538.268	0.153	1.617 870.201	0.021
Pelletering (el)	5279.904	1.498	1.617 8535.845	0.208
Kjøling (el)	439.992	0.125	1.617 711.320	0.017
Øvrig elforbruk	10010.128	2.841	1.617 16183.040	0.394
Transport av pellets	11310.583	3.210	656588.940	15.969
			PEF	g CO₂eq/kWh
Totalt forbruk og utslipp med total energi til tørking	111449.054	31.626	1.316 4111635.346	42.003 100.000
Totalt forbruk og utslipp kun med PE til tørking	64322.459	18.253	1.183 4111635.346	42.003 100.000

Reduksjon i fuktighet i tømmer før tørking, fra 40 % til 30 % fuktighet (MC_wet)				
Prosess	Energiforbruk GJ/år	Energiforbruk i % av totalt produsert energimengde	GHG-utslipp kg CO ₂ eq	GHG-utslipp i % av totalt
Energimengde produsert pellets	352401			
Anskaffelse og transport av råmateriale				
Hogst av tømmer	1411.978	0.401	129337.148	4.027
Transport i skog av tømmer	1058.983	0.301	97002.861	3.021
Transport av tømmer til Hallingdal trepellets	7425.410	2.107	431051.320	13.422
Administrasjon	641.808	0.182	58789.613	1.831
Produksjon				
	type el: Vannkraft		GHG (kg CO₂eq/GJ)	
Tørking, kun primærenergi fra forbrenning	17479.006	4.960	1809280.894	56.339
Tørking, all energi inkludert	48912.444	13.880	1809280.894	56.339
Flishogging (el)	538.268	0.153	1.617 870.201	0.027
Pelletering (el)	5279.904	1.498	1.617 8535.845	0.266
Kjøling (el)	439.992	0.125	1.617 711.320	0.022
Øvrig elforbruk	10010.128	2.841	1.617 16183.040	0.504
Transport av pellets	11363.612	3.225	659667.330	20.541
			PEF	g CO₂eq/kWh
Totalt forbruk og utslipp med total energi til tørking	87082.527	24.711	1.247 3211429.572	32.807 100.000
Totalt forbruk og utslipp kun med PE til tørking	55649.089	15.791	1.158 3211429.572	32.807 100.000

Kort kjørelengde for både pellets og tømmer					
Prosess	Energiforbruk GJ/år	Energiforbruk i % av totalt produsert energimengde		GHG-utslipp kg CO ₂ eq	GHG-utslipp i % av totalt
Energimengde produsert pellets	352401				
Anskaffelse og transport av råmateriale					
Hogst av tømmer	1411.978	0.401		129337.148	3.709
Transport i skog av tømmer	1058.983	0.301		97002.861	2.782
Transport av tømmer til Hallingdal trepellets	1914.371	0.543		111130.838	3.187
Administrasjon	641.808	0.182		58789.613	1.686
Produksjon					
	type el: Vannkraft		GHG (kg CO ₂ eq/GJ)		
Tørking, kun primærenergi fra forbrenning	26205.406	7.436		2712565.059	77.796
Tørking, all energi inkludert	73332.000	20.809		2712565.059	77.796
Flishogging (el)	538.268	0.153	1.617	870.201	0.025
Pelletering (el)	5279.904	1.498	1.617	8535.845	0.245
Kjøling (el)	439.992	0.125	1.617	711.320	0.020
Øvrig elforbruk	10010.128	2.841	1.617	16183.040	0.464
Transport av pellets	6057.223	1.719		351626.940	10.085
			PEF	g CO ₂ eq/kWh	
Totalt forbruk og utslipp med total energi til tørking	100684.655	28.571	1.286	3486752.864	35.619 100.000
Totalt forbruk og utslipp kun med PE til tørking	53558.061	15.198	1.152	3486752.864	35.619 100.000
Lang kjørelengde både for pellets og tømmer					
Prosess	Energiforbruk GJ/år	Energiforbruk i % av totalt produsert energimengde		GHG-utslipp kg CO ₂ eq	GHG-utslipp i % av totalt
Energimengde produsert pellets	352401				
Anskaffelse og transport av råmateriale					
Hogst av tømmer	1411.978	0.401		129337.148	2.892
Transport i skog av tømmer	1058.983	0.301		97002.861	2.169
Transport av tømmer til Hallingdal trepellets	9277.335	2.633		538557.138	12.042
Administrasjon	641.808	0.182		58789.613	1.315
Produksjon					
	type el: Vannkraft		GHG (kg CO ₂ eq/GJ)		
Tørking, kun primærenergi fra forbrenning	26205.406	7.436		2712565.059	60.652
Tørking, all energi inkludert	73332.000	20.809		2712565.059	60.652
Flishogging (el)	538.268	0.153	1.617	870.201	0.019
Pelletering (el)	5279.904	1.498	1.617	8535.845	0.191
Kjøling (el)	439.992	0.125	1.617	711.320	0.016
Øvrig elforbruk	10010.128	2.841	1.617	16183.040	0.362
Transport av pellets	15671.863	4.447		909764.940	20.342
			PEF	g CO ₂ eq/kWh	
Totalt forbruk og utslipp med total energi til tørking	117662.259	33.389	1.334	4472317.164	45.688 100.000
Totalt forbruk og utslipp kun med PE til tørking	70535.665	20.016	1.200	4472317.164	45.688 100.000

Endring i type el					
Prosess	Energiforbruk GJ/år	Energiforbruk i % av totalt produsert energimengde		GHG-utslipp kg CO ₂ eq	GHG-utslipp i % av totalt
Energimengde produsert pellets	352401				
Anskaffelse og transport av råmateriale					
Hogst av tømmer	1411.978	0.401		129337.148	3.143
Transport i skog av tømmer	1058.983	0.301		97002.861	2.357
Transport av tømmer til Hallingdal trepellets	7425.410	2.107		431051.320	10.476
Administrasjon	641.808	0.182		58789.613	1.429
Produksjon type el: Vannkraft GHG (kg CO₂eq/GJ)					
Tørking, kun primærenergi fra forbrenning	26205.406	7.436		2712565.059	65.924
Tørking, all energi inkludert	73332.000	20.809		2712565.059	65.924
Flishogging (el)	538.268	0.153	1.617	870.201	0.021
Pelletering (el)	5279.904	1.498	1.617	8535.845	0.207
Kjøling (el)	439.992	0.125	1.617	711.320	0.017
Øvrig elforbruk	10010.128	2.841	1.617	16183.040	0.393
Transport av pellets	11363.612	3.225		659667.330	16.032
			PEF	g CO ₂ eq/kWh	
Totalt forbruk og utslipp med total energi til tørking	111502.083	31.641	1.316	4114713.736	42.034
Totalt forbruk og utslipp kun med PE til tørking	64375.489	18.268	1.183	4114713.736	42.034
Prosess					
Energimengde produsert pellets	352401				
Anskaffelse og transport av råmateriale					
Hogst av tømmer	1411.978	0.401		129337.148	1.340
Transport i skog av tømmer	1058.983	0.301		97002.861	1.005
Transport av tømmer til Hallingdal trepellets	7425.410	2.107		431051.320	4.466
Administrasjon	641.808	0.182		58789.613	0.609
Produksjon type el: Kullkraft GHG (kg CO₂eq/GJ)					
Tørking, kun primærenergi fra forbrenning	26205.406	7.436		2712565.059	28.103
Tørking, all energi inkludert	73332.000	20.809		2712565.059	28.103
Flishogging (el)	538.268	0.153	342.000	184087.793	1.907
Pelletering (el)	5279.904	1.498	342.000	1805727.168	18.708
Kjøling (el)	439.992	0.125	342.000	150477.264	1.559
Øvrig elforbruk	10010.128	2.841	342.000	3423463.639	35.468
Transport av pellets	11363.612	3.225		659667.330	6.834
			PEF	g CO ₂ eq/kWh	
Totalt forbruk og utslipp med total energi til tørking	111502.083	31.641	1.316	9652169.195	98.603
Totalt forbruk og utslipp kun med PE til tørking	64375.489	18.268	1.183	9652169.195	98.603
Prosess					
Energimengde produsert pellets	352401				
Anskaffelse og transport av råmateriale					
Hogst av tømmer	1411.978	0.401		129337.148	2.740
Transport i skog av tømmer	1058.983	0.301		97002.861	2.055
Transport av tømmer til Hallingdal trepellets	7425.410	2.107		431051.320	9.130
Administrasjon	641.808	0.182		58789.613	1.245
Produksjon type el: Nordisk elmiks GHG (kg CO₂eq/GJ)					
Tørking, kun primærenergi fra forbrenning	26205.406	7.436		2712565.059	57.457
Tørking, all energi inkludert	73332.000	20.809		2712565.059	57.457
Flishogging (el)	538.268	0.153	38.889	20932.660	0.443
Pelletering (el)	5279.904	1.498	38.889	205329.600	4.349
Kjøling (el)	439.992	0.125	38.889	17110.800	0.362
Øvrig elforbruk	10010.128	2.841	38.889	389282.740	8.246
Transport av pellets	11363.612	3.225		659667.330	13.973
			PEF	g CO ₂ eq/kWh	
Totalt forbruk og utslipp med total energi til tørking	111502.083	31.641	1.316	4721069.131	48.229
Totalt forbruk og utslipp kun med PE til tørking	64375.489	18.268	1.183	4721069.131	48.229

Prosess	Energiforbruk GJ/år	Energiforbruk i % av totalt produsert energimengde	GHG-utslipp kg CO ₂ eq	GHG-utslipp i % av totalt		
Energimengde produsert pellets	352401					
Anskaffelse og transport av råmateriale						
Hogst av tømmer	1411.978	0.401	129337.148	2.023		
Transport i skog av tømmer	1058.983	0.301	97002.861	1.517		
Transport av tømmer til Hallingdal trepellets	7425.410	2.107	431051.320	6.742		
Administrasjon	641.808	0.182	58789.613	0.920		
Produksjon						
			GHG (kg CO ₂ eq/GJ)			
Tørking, kun primærenergi fra forbrenning	26205.406	7.436	2712565.059	42.430		
Tørking, all energi inkludert	73332.000	20.809	2712565.059	42.430		
Flishogging (el)	538.268	0.153	141.667	1.193		
Pelletering (el)	5279.904	1.498	141.667	747986.400		
Kjøling (el)	439.992	0.125	141.667	62332.200		
Øvrig elforbruk	10010.128	2.841	141.667	1418101.410		
Transport av pellets	11363.612	3.225	659667.330	10.318		
			PEF	g CO ₂ eq/kWh		
Totalt forbruk og utslipp med total energi til tørking	111502.083	31.641	1.316	6393088.031	65.309	100.000
Totalt forbruk og utslipp kun med PE til tørking	64375.489	18.268	1.183	6393088.031	65.309	100.000

GHG-utslipp for utslipp allokert til avfall før forbrenning

Prosess	Energiforbruk GJ/år	Energiforbruk i % av totalt produsert energimengde		GHG-utslipp kg CO ₂ eq	GHG-utslipp i % av totalt
Energimengde produsert pellets	352401				
Anskaffelse og transport av råmateriale					
Hogst av tømmer	1411.978	0.401		129337.148	8.552
Transport i skog av tømmer	1058.983	0.301		97002.861	6.414
Transport av tømmer til Hallingdal trepellets	7425.410	2.107		431051.320	28.502
Administrasjon	641.808	0.182		58789.613	3.887
Produksjon					
type el: Vannkraft			GHG (kg CO₂eq/GJ)		
Tørking, kun primærenergi fra forbrenning	26205.406	7.436		110192.474	7.286
Tørking, all energi inkludert	73332.000	20.809		110192.474	7.286
Flishogging (el)	538.268	0.153	1.617	870.201	0.058
Pelletering (el)	5279.904	1.498	1.617	8535.845	0.564
Kjøling (el)	439.992	0.125	1.617	711.320	0.047
Øvrig elforbruk	10010.128	2.841	1.617	16183.040	1.070
Transport av pellets	11363.612	3.225		659667.330	43.619
			PEF	g CO ₂ eq/kWh	
Totalt forbruk og utslipp med total energi til tørking	111502.083	31.641	1.316	1512341.151	15.450
Totalt forbruk og utslipp kun med PE til tørking	64375.489	18.268	1.183	1512341.151	15.450
Mer kildesortering som fører til varmemix bestående av 50 % energi fra avfall og 50 % fra flis					
Prosess	Energiforbruk GJ/år	Energiforbruk i % av totalt produsert energimengde		GHG-utslipp kg CO ₂ eq	GHG-utslipp i % av totalt
Energimengde produsert pellets	352401				
Anskaffelse og transport av råmateriale					
Hogst av tømmer	1411.978	0.401		129337.148	3.938
Transport i skog av tømmer	1058.983	0.301		97002.861	2.953
Transport av tømmer til Hallingdal trepellets	7425.410	2.107		431051.320	13.124
Administrasjon	641.808	0.182		58789.613	1.790
Produksjon					
type el: Vannkraft			GHG (kg CO₂eq/GJ)		
Tørking, kun primærenergi fra forbrenning	51020.859	14.478		1882188.000	57.308
Tørking, all energi inkludert	73332.000	20.809		1882188.000	57.308
Flishogging (el)	538.268	0.153	1.617	870.201	0.026
Pelletering (el)	5279.904	1.498	1.617	8535.845	0.260
Kjøling (el)	439.992	0.125	1.617	711.320	0.022
Øvrig elforbruk	10010.128	2.841	1.617	16183.040	0.493
Transport av pellets	11363.612	3.225		659667.330	20.085
			PEF	g CO ₂ eq/kWh	
Totalt forbruk og utslipp med total energi til tørking	111502.083	31.641	1.316	3284336.677	33.552
Totalt forbruk og utslipp kun med PE til tørking	89190.942	25.310	1.253	3284336.677	33.552
Returte med lavere PEF og GHG-utslipp enn flis					
Prosess	Energiforbruk GJ/år	Energiforbruk i % av totalt produsert energimengde		GHG-utslipp kg CO ₂ eq	GHG-utslipp i % av totalt
Energimengde produsert pellets	352401				
Anskaffelse og transport av råmateriale					
Hogst av tømmer	1411.978	0.401		129337.148	3.171
Transport i skog av tømmer	1058.983	0.301		97002.861	2.378
Transport av tømmer til Hallingdal trepellets	7425.410	2.107		431051.320	10.567
Administrasjon	641.808	0.182		58789.613	1.441
Produksjon					
type el: Vannkraft			GHG (kg CO₂eq/GJ)		
Tørking, kun primærenergi fra forbrenning	2240.700	0.636		2677177.176	65.628
Tørking, all energi inkludert	73332.000	20.809		2677177.176	65.628
Flishogging (el)	538.268	0.153	1.617	870.201	0.021
Pelletering (el)	5279.904	1.498	1.617	8535.845	0.209
Kjøling (el)	439.992	0.125	1.617	711.320	0.017
Øvrig elforbruk	10010.128	2.841	1.617	16183.040	0.397
Transport av pellets	11363.612	3.225		659667.330	16.171
			PEF	g CO ₂ eq/kWh	
Totalt forbruk og utslipp med total energi til tørking	111502.083	31.641	1.316	4079325.854	41.673
Totalt forbruk og utslipp kun med PE til tørking	40410.783	11.467	1.115	4079325.854	41.673

Vedlegg F

Beregninger for infrastruktur

Data for varmesentraler:

kilde	prosess	
(prosjektoppgave)	levetid (år):	20 år
EcolInvent	GHG-utslipp for infrastruktur kjel, 1000 kW	3.46E+04 kg CO ₂ eq
EcolInvent	Forbruk av primærenergi for infrastruktur kjel, 1000 kW	4.01E+05 MJ
EcolInvent	GHG-utslipp for infrastruktur kjel, 300 kW	2.52E+04 kg CO ₂ eq
EcolInvent	Forbruk av primærenergi for infrastruktur kjel, 300 kW	2.40E+05 MJ
EcolInvent	GHG-utslipp for infrastruktur kjel, 50 kW	1.39E+04 kg CO ₂ eq
EcolInvent	Forbruk av primærenergi for infrastruktur kjel, 50 kW	1.19E+05 MJ
EcolInvent	GHG-utslipp for infrastruktur kjel, Pellets, 50 kW	5.55E+03 kg CO ₂ eq
EcolInvent	Forbruk av primærenergi for infrastruktur kjel, Pellets, 50 kW	5.89E+04 MJ

	Anlegg nr	1	2	3	4	5
	Installert effekt fliskjel (kW)	1000	1000	1000	1000	300
	Brukstid (timer)	2205	1900	3780	2353.5	1667
Infrastruktur varmesentral	PE (kWh/kWh levert varme)	0.00253	0.00293	0.00147	0.00237	0.00667
	Utslippskoeffisient (g CO ₂ eq/kWh levert varme)	0.78458	0.91053	0.45767	0.73508	2.52000
beste pellets + høy energitetthet	PEF total	1.392	1.392	1.391	1.392	1.396
	Infrastruktur i % av total PEF	0.239	0.268	0.163	0.228	0.535
beste pellets + høy energitetthet	Utslippskoeffisient	43.504	43.630	43.177	43.454	45.239
	Infrastruktur i % av utslippskoeffisient	2.263	2.545	1.523	2.152	6.012
verste pellets + lav energitetthet	PEF total	1.820	1.821	1.819	1.820	1.825
	Infrastruktur i % av total PEF	0.776	0.798	0.719	0.767	1.001
verste pellets + lav energitetthet	Utslippskoeffisient	121.574	121.700	121.247	121.524	123.309
	Infrastruktur i % av utslippskoeffisient	2.998	3.098	2.736	2.958	4.363

	Anlegg nr	6	7	8	9	10
	Installert effekt fliskjel (kW)	300	300	300	5000	10000
	Brukstid (timer)	6533	2820	2633	2000	2000
Infrastruktur varmesentral	PE (kWh/kWh levert varme)	0.00170	0.00394	0.00422	0.00105	0.00069
	Utslippskoeffisient (g CO ₂ eq/kWh levert varme)	0.64286	1.48936	1.59494	0.29000	0.17900
beste pellets + høy energitetthet	PEF total	1.391	1.393	1.394	1.390	1.390
	Infrastruktur i % av total PEF	0.180	0.340	0.360	0.133	0.107
beste pellets + høy energitetthet	Utslippskoeffisient	43.362	44.208	44.314	43.009	42.898
	Infrastruktur i % av utslippskoeffisient	1.944	3.821	4.050	1.139	0.883
verste pellets + lav energitetthet	PEF total	1.820	1.822	1.822	1.819	1.819
	Infrastruktur i % av total PEF	0.731	0.853	0.868	0.695	0.676
verste pellets + lav energitetthet	Utslippskoeffisient	121.432	122.279	122.384	121.079	120.968
	Infrastruktur i % av utslippskoeffisient	2.885	3.557	3.640	2.602	2.512