Analyse av klimagassutslipp fra utnyttelse av skog til energiformål

Litteraturgjennomgang og livsløpsvurderinger

COWI

17
2015

RAPPORT

Analyse av klimagassutslipp fra utnyttelse av skog til energiformål

Norges vassdrags- og energidirektorat
2015

Rapport nr 17-2015

Analyse av klimagassutslipp fra utnyttelse av skog til energiformål (Korrigert utgave)

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat

Redaktører: Torodd Jensen, Dag Spilde, Maria Sidelnikova

Forfattere: Andreas Brekke, Volkmar Timmermann, Janka Dibdiakova, Kenneth Sandberg (Cowi/Norsk Institutt for Skog og Landskap),

Trykk: NVEs hustrykkeri

Opplag: 50

Forsidefoto:

ISBN: 978-82-410-1064-4

ISSN: 1501-2832

Sammendrag: Denne rapporten om klimagassutslipp fra utnyttelse av skog til energiformål i et livsløpsperspektiv er et ledd i arbeidet med å styrke NVEs beslutningsgrunnlag. Konsulentfirmaet Cowi og Norsk Institutt for Skog og Landskap har gjennomført analysene med oppdatert LCA-verktøy. Forøvrig vises det til rapporten.

Emneord: Bioenergi, klimagassutslipp, skog

Norges vassdrags- og energidirektorat
Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstua
0301 OSLO

Telefon: 22 95 95 95
Telefaks: 22 95 90 00
Internett: www.nve.no

Mars 2015

Forord

Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) har ansvaret for å holde oversikt over utviklingen i den stasjonære energibruken og energitilgangen i Norge. Dette innebærer å kunne beskrive endringer i forbruket innenfor de ulike sektorene og beskrive energitilgang basert på kunnskap om teknologi-, kostnad-, miljøutvikling og virkninger på Norges klimagassutslipp og virkninger av klimaendringer.

Bioenergi er en viktig fornybar energikilde da det kan erstatte fossile brensler direkte. Det er i dag et forbruk på ca 18 TWh bioenergi og et mål om å øke dette til 28 TWh i 2020 i Norge. NVE rapport 41/2014 beskriver et realistisk teknisk/økonomisk ikke nyttet potensial på ca 12 TWh der skog utgjør ca 8 TWh. Bioenergi bidrar til sikker forsyning av energi og er sett på som viktig for begrensning av klimagassutslipp.

Denne rapporten om klimagassutslipp fra utnyttelse av skog til energiformål har to hovedtemaer:

- Gjennomgang av tidligere rapporter om klimagassutslipp ved bruk av skog til energiformål
- Livsløpsanalyse for å få fram miljø- og klimabelastning ved bruk av skog til energiformål

På oppdrag fra Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) har COWI i samarbeid med Norsk Institutt for Skog og Landskap gjennomført analysene der NVE har definert problemstillingene, men det faglige arbeidet med oppgaven og resultater som er kommet ut av arbeidet er oppdragstakers ansvar.

Oslo, mars 2015

Anne Vera Skrivarhaug
Avdelingsdirektør

Torodd Jensen
Prosjektleder

NVE

Analyse av klimagassutslipp fra utnyttelse av skog til energiformål

LITTERATURGJENNOMGANG OG LIVSLØPSVURDERING

COWI

SAMMENDRAG

Denne rapporten består av to delrapporter som omhandler miljø- og klimaaspekter knyttet til bruk av skog til energiformål. Hovedfokus har vært på klimaeffekter, ettersom klima som miljøproblem har fått større og større oppmerksomhet de siste tiårene. Rapporten er utarbeidet av Andreas Brekke og Kenneth Sandberg hos COWI AS og Janka Dibdiakova og Volkmar Timmermann hos Norsk Institutt for Skog og Landskap. I tillegg har flere personer i begge organisasjoner vært delaktige i kvalitetssikring og innspill til både litteratur og modellering.

Rundt årtusenskiftet var det mange og til dels opphetede debatter rundt etiske aspekter ved å bruke biomasse til energiformål. Hovedspørsmålet var konkurranse om arealer for produksjon av enten mat eller energi. Noen få stilte spørsmål ved den store bruken av fossile energikilder knyttet til bioenergiprodukter, men det var almen enighet om at bioenergi var bra i et klimaperspektiv. Spesielt var man enige om at biomasse fra skog til energiformål ville være et godt klimamessig tiltak. De fleste metoder og verktøy for beregning av klimagassregnskap har forutsatt skog som en klimanøytral energikilde, ved at samme mengden karbon som frigjøres ved forbrenning vil tas opp når skogen igjen vokser opp. Problemene med bruk av skog til energiformål var derfor ansett å være bruk av fossile energikilder til uttak og transport av tømmer.

For noen år siden begynte imidlertid flere forskere å undersøke andre aspekter som påvirker klimaprestasjonen for skog til energiformål. Et av disse var indirekte arealbruksendringer, mens et annet var tidsaspektet knyttet til opptak av karbon i skog. Flere studier har vist at dersom bruk av biomasse til bioenergi ett sted fører til at arealer andre steder endrer bruk (for eksempel fra skog til jordbruk), vil klimagassutslippene kunne langt overstige de man får ved å benytte fossile energikilder. Dette er imidlertid ikke en veldig viktig problemstilling knyttet til boreal skog, og spesielt ikke om man i Norge, hvor man har årlig tilvekst, holder seg innenfor et bærekraftig uttak.

Tidsaspektet er mer relevant for boreale skoger, hvor det tar lang tid fra hogst av et bestand til bestandet er vokst til samme størrelse. Det betyr at man ved forbrenning av skogsbiomasse vil ha et forhøyet nivå av CO_2 i atmosfæren i lang tid etter hogst, som vil

bidra til økt konsentrasjon av klimagasser i atmosfæren. Mange studier, inkludert LCA-en utført i dette prosjektet, viser at det kan ta lang tid før skog til energiformål er bedre klimamessig enn fossile energikilder.

Det er ikke bare mengden klimagasser i atmosfæren som bestemmer om jorda blir varmere. Mørke boreale skoger tar opp mer varme enn snødekte flater (som reflekterer solstråler). Dette motvirker til en viss grad de uønskede klimaeffektene ved bruk av skog til energiformål. Skog kan også ha andre klimaregulerende mekanismer (som evapotranspirasjon), som man ennå ikke har klart å tallfeste i analyser av klimaeffekten knyttet til bruk av skog.

Det er bedre i klimasammenheng å benytte skog til produksjon av elektrisitet og varme (dersom kull eller olje erstattes) enn til produksjon av drivstoff (hvor bensin eller diesel erstattes). Dette skyldes et større konverteringstap for mer kompliserte energiprodukter fra skogen enn for fossile energiprodukter.

De langt fleste studier av skog til energiformål, selv i nyere tid, har bare noen få hundre år som tidsperspektiv. I en slik sammenheng kan det synes som om det klimamessig er hipp som happ om man velger skogsbaserte eller fossile energiprodukter. Helt nylig publiserte studier, og også i tråd med IPCCs anbefalinger, viser imidlertid at det er et tak for hvor store mengder fossile energikilder som kan benyttes om man vil nå togradersmålet, mens man kan klare å nå målet om man benytter biomassebaserte energikilder. Dette er basert på en forutsetning om at fremvekst av ny biomasse, inkludert skog, skjer på arealer der den høstes, slik at det kan ses på som et lukket system. Det kreves også at det i siste halvdel av dette århundre innføres karbonfangst og –lagring i bioenergisystemer.

INNHOLD

Sammendrag 3

Delprosjekt 1: Gjennomgang av tidligere arbeid 9

Sammendrag Delprosjekt 1 11

1. Innledning 15

2. Skog og klima 18
2.1 Karbongjeld 20
2.2 Utslipp forbundet med hogst 22
2.3 Albedoeffekt 23
2.4 Evapotranspirasjon og aerosoler 23

3. Skog som ressurs 25
3.1 Materialprodukter 26
3.1.1 Skog til konstruksjonsformål 26
3.1.2 Skog til papp og papir 27
3.1.3 Skog til andre materialformål 27
3.2 Energiprodukter 27
3.2.1 Kraft og varme fra biomasse 28
3.2.2 Biodrivstoff 28

4. Hvor mye energi kan vi få ut av norsk skog? 30
4.1 Bruk av skog i Norge 30
4.2 Ikke bare et spørsmål om mengder 32

5. Hvordan finner vi klimaeffekten av skog til energiformål? 34
5.1 Klimagassregnskap basert på LCA 35
5.2 Fordeler med LCA i klimagassanalyser av skog til energiformål 35
5.3 Ulemper med LCA i klimagassanalyser av skog til energiformål 36

6. Hva er klimaeffekten av å bruke skog til energiformål? 38
6.1 Studier av uttak av skog 38
6.2 Overordnede studier av flere bioenergiprodukter 39
6.3 Studier av kraft- og varmeproduksjon 40
6.4 Studier av biodrivstoff 41
6.5 Hva med skog til materialprodukter? 44
6.6 Kapitteloppsummering 45

7. Hvilke andre miljøkonsekvenser gir bruk av skog til energiformål? 46

8. Konklusjon: fordeler og ulemper ved bruk av norsk skog til energiformål med hensyn til klimaeffekter 47

9. Referanser 49

Delprosjekt 2: LCA for skog til energiformål 55

Sammendrag delrapport 2 57

1. Innledning 59
1.1 Struktur og innhold i rapporten 59

2. Oppsett av LCA for skog til energiformål 61
2.1 Hensikt og omfang. 61
2.1.1 Scenarioer 61
2.1.2 Funksjonell enhet 64
2.1.3 Systemgrenser 64
2.1.4 Allokering 66
2.2 Livsløpsregnskap 67
2.3 Effektvurdering 67
2.3.1 Skogen 67
2.3.2 Karbondioksid, andre klimagasser, albedoeffekt og strålingspådriv 70

3. Resultater 74
3.1 Scenario 1: Disponering av flis og massevirke som biprodukt 74
3.2 Scenario 2: Uttak av GROT som ellers ville blitt etterlatt 76
3.3 Scenario 3: Økt hogst forårsaket av økt etterspørsel etter virke til energi 80
3.4 Scenario 4: Økt hogst forårsaket av økt etterspørsel etter sagtømmer 86
3.5 Oppsummering av resultater 89

4. Diskusjon og konklusjoner 91

5. Referanser 95

Bilag A Analyserte alternativer: En grundigere beskrivelse av verdikjedene 97
A.1 Uttak av skog 97
A.2 Tynning 97
A.3 Sluttavvirkning 97
A.4 Annen avvirkning 97
A.5 Hogstavfall (GROT) 98
A.6 Transport av biomasse fra skog 98
A.7 Konvertering til bioenergiprodukter 100
A.8 Flis 102
A.9 GROT 102
A.10 Energiflis fra hogstavfall (GROT) 102
A.11 Pellets og briketter 103
A.12 Biodiesel 103
A.13 Bioetanol 104
A.14 Avfall og restprodukter 104
A.15 Forbrenningsteknologier 104
A.16 Sammenligningsprodukter 104

Bilag B Viktige parametere i modellen 105

Bilag C Datakilder benyttet 108

Bilag D Metode: LCA for analyse av skog til energiformål 110
D.1 Hensikt og omfang 111
D.2 Livsløpsregnskap 114
D.3 Effektvurdering 115
D.4 Tolkning 118

Analyse av klimagassutslipp fra utnyttelse av skog til energiformål

DELPROSJEKT 1: GJENNOMGANG AV TIDLIGERE ARBEID

SAMMENDRAG DELPROSJEKT 1

Denne rapporten beskriver kunnskapsstatus for miljø- og klimaforhold knyttet til bruk av skog til energiformål. Den presenterer skogens rolle i klimasystemet, mengden trevirke i norske skoger, hva man benytter trevirke til, hvordan man har beregnet klimaeffekten av skog til energiformål i tidligere studier og hva resultatene fra slike studier har vært. Generelt er det ganske bred enighet om at skog til energiformål kan bidra til å bremse klimaendringer, i hvert fall under riktige forutsetninger. I mange metoderammeverk for å tallfeste klimaeffektene av skog til energiformål opereres det med en forutsetning om klimanøytralitet. Altså at den samme mengden klimagasser som slippes ut, vil tas opp igjen av ny voksende biomasse. Denne forutsetningen har vært heftig debattert de seneste årene og er også behandlet her.

Skogen har en viktig funksjon i klimasystemet ved å ta opp og å lagre karbon. Ved hogst vil karbon frigjøres fra jordsmonnet og ved bruk til energiformål vil CO_2 slippes ut til atmosfæren og det vil, spesielt for boreale skoger med lang rotasjonstid, ta lang tid før karbonlageret igjen er på samme nivå. Det er også andre måter skogen påvirker klimaet på, for eksempel dens evne til å absorbere eller reflektere solstråler (albedo) og utslipp av vanndamp og organiske og uorganiske små partikler.

Samtidig har skogen også en viktig rolle i samfunnet som råvare for en lang rekke material- og energiprodukter. Som en av få fornybare karbonkilder kan skogsbiomasse enkelt integreres i eksisterende transportsystemer. Skogsbiomasse kan også benyttes til stasjonære energiformål, både kraft og varme. Ved stasjonær forbrenning av biomasse kan man også drive karbonfangst og dermed oppnå å ta CO_2 ut av atmosfæren. IPCC (2014) fremholder at verden frem mot 2100 må innfase mer bioenergi og bioenergi med karbonfangst og –lagring om man skal nå 2-gradersmålet.

Det har vært en forholdsvis jevn avvirkning i norske skoger de siste 100 år, og nesten alle år under balansekvantumet, hvilket gjør at det har vært en tilvekst og etter hvert stigende tilvekst. Det er enighet i litteraturen om at det årlig kan tas ut mellom 6 og 7 millioner fm^3 mer enn det gjøres i dag, hvilket kan oversettes til et sted fra 12 til 14 TWh. I Norge har

det vært lite bruk av GROT, men dette er en tilgjengelig og forholdsvis rimelig energikilde.

For å kunne tallfeste hvilken klimaeffekt skog brukt til energiformål har, må man se på all energi- og materialbruk, og alle utslipp, knyttet til avvirkning og til konvertering og bruk av produkter. Livsløpsvurderinger (LCA) er en metode laget for dette, selv om den i seg selv ikke inneholder modeller for klimaeffektberegninger. De siste årene har det vært en rivende utvikling i modeller som beskriver tidsdynamikk knyttet til opptak av karbon og utslipp av CO_2, albedoeffekter og andre klimapådrivere i tilknytning til skog og klimasystemet.

De aller fleste analyser som er utført av bioenergisystemer har ikke benyttet de nye modellene, men regnet direkte utslipp fra forbrenning av jomfruelig trefiber til energiformål (enten til stasjonær eller mobil energi) som klimanøytralt. Det er dermed ikke rart at de aller fleste analyser finner at skog til energiformål kan redusere utslipp betraktelig sammenlignet med fossile alternativer. I analyser som tar med dynamikken knyttet til utslipp og opptak er resultatene mer sprikende og flere studier viser at det tar mellom 90 og 110 år fra et tre fra boreale skoger er brukt til energi, til den samme mengden karbon er lagret i skogen igjen. Modellering viser imidlertid at energi fra biomasse, selv om de bidrar til økte CO_2-konsentrasjoner i atmosfæren i et 100-årsperspektiv, ikke vil ha like stor påvirkning på temperaturen som utslipp fra fossile energikilder i et lengre tidsperspektiv.

Det er tydelig fra resultatene at norsk skog brukt til energiformål har mulighet til å være med å redusere klimagassutslipp. Akkurat hvor store reduksjoner skogen kan bidra til er avhengig både av hvordan man praktisk benytter skogen og hvordan man regner på reduksjonene. Diskusjonen om tilbakebetalingstid for karbonet som slippes ut i forbindelse med bruk av skog til energiformål er nok langt fra over, men IPPC konkluderer med at bioenergi, og etter hvert bioenergi med karbonfangst og –lagring, er en viktig del av løsningen for fremtidens energisystemer.

Fordelene ved å benytte norsk skog til energiformål er først og fremst:

- Energiproduktene laget fra norsk skog kan erstatte fossile brensler med store klimagassutslipp.
- De sparte klimagassutslippene fra unngått bruk av fossile brensler er mest sannsynlig større enn karbontapet ved at skogen ikke blir stående og lagre karbon, men det er avhengig av virkningsgrader i produksjonskjeden.
- Norsk skog har en årlig tilvekst av biomasse, som kan benyttes uten at det går utover skogens evne til ny vekst.
- Norsk skog består av mange trær i hogstmoden alder.
- Norge har snø om vinteren, som betyr at i perioden umiddelbart etter hogst vil det være en positiv klimaeffekt som følge av albedo.

- Ved å benytte trevirke til både material- og energiformål, kan man oppnå ytterligere klimagassutslippsreduksjoner for skog til energiformål.

Ulempene ved å benytte norsk skog til energiformål er først og fremst:

- Norsk skog har lang rotasjonstid og det tar derfor tid fra karbonet i biomassen blir frigjort ved energigenerering til samme mengde karbon blir bundet i ny biomasse.
- Trær inneholder mye vann og har forholdsvis lav energitetthet.
- Økt avvirkning kan ha en negativ effekt på biomangfold i skog.
- Selv med årlig tilvekst vil man begrense mengden økt karbon som lagres dersom det avvirkes mer skog.
- Kostnadsnivået i Norge er høyt og bioenergi er en relativt dyr energiløsning, på grunn av dyre konverteringsteknologier.

1. Innledning

Skal vi dyrke planter og trær for å bruke dem til energiprodukter som strøm, varme og drivstoff? Hvis vi gjør dét; hvilke konsekvenser har det for miljøet generelt og klimaet spesielt?

Bioenergi var virkelig i vinden i tiden rett etter årtusenskiftet. EU vedtok ambisiøse mål nedfelt i Fornybardirektivet fra 2009 for innfasing av fornybare energikilder, hvor 20 % av all energibruk i EU skulle komme fra fornybare energikilder innen 2020 (Utenriksdepartementet 2011). Som en del av strategien ble det fastslått at 10 % av energibruken i transportsektoren skal baseres på fornybar energi.

Samtidig med innføringen av ambisiøse mål, var det en opphetet diskusjon om arealer i Verden skulle benyttes til mat, fôr eller drivstoff (food, feed or fuel). I diskusjonen ble det både pekt på det etisk problematiske med å benytte arealer der mat kan produseres til heller å produsere drivstoff (Searchinger, et al. 2008) og på det faktum at mye jordbruksproduksjon krever så mye fossil energi at klimagassutslippene vil øke ved en overgang fra fossile drivstoff til biodrivstoff (Pimentel og Patzek 2005). Et av svarene på diskusjonen ligger allerede i EUs direktiver, hvor det kreves en utregning som fremviser minst 35 % reduksjon av klimagassutslipp sammenlignet med standardverdier for fossile drivstoff (økende til 50 % for anlegg fra 2017 og 60 % fra 2018). Direktivet er også påpasselig med å presisere at produksjonen skal foregå på arealer som ikke har høy verdi for biologisk mangfold.

Samtidig forutsetter Fornybardirektivet at klimagassutslippene ved bruk av biodrivstoff settes lik null, da det er antatt at CO_2 som slippes ut ved forbrenning vil tas opp av vekst i ny biomasse. Denne forutsetningen om klimanøytralitet har vært mye debattert i senere år, hvilket vi skal se nærmere på i denne rapporten. Konklusjonen er at bioenergi ikke er klimanøytralt, fordi det i dagens produksjonssystemer kreves fossil energi for å omgjøre

skog til energiprodukter, samtidig vil det ta tid fra en mengde såkalt biologisk CO_2[1] er sluppet ut i atmosfæren til den samme mengden er tatt opp i ny plantevekst.

I den generelle debatten og i klimadirektivet er det konkludert med at andre generasjons biodrivstoff, altså biodrivstoff fra skogsbasert biomasse er et bedre alternativ enn å bruke jordbruksprodukter til energiformål (selv om det også er avhengig av hvilken type tre som anvendes). For kraft- og varmeproduksjon er dette enkelt å omgjøre til praksis, da det krever lite, eller ingen, prosessering å forbrenne trevirke. For transportformål er det imidlertid langt mer komplisert å produsere drivstoff fra en tømmerstokk enn fra de fleste plantevekster. Det skyldes at tømmerstokkens bestanddeler har strukturer som er vanskeligere å bryte ned mekanisk, kjemisk og biologisk.

De siste ti årene har det vært en enorm utvikling i forståelsen av biomassens rolle i forbindelse med klimaendringer. Det gjelder både hvordan ulike biomassetyper på ulike arealer påvirker karbonbalansen og strålingspådrag[2], og hvordan produkter fra biomasse eventuelt kan erstatte fossile material- og energiprodukter.
Mye av årsaken til fokus på bioenergi har vært mulighetene for å redusere klimagassutslipp globalt ved å gå over fra fossile til fornybare energikilder. Med bioenergi vil man, i stedet for å frigjøre karbon som har vært lagret i jordskorpen i millioner av år, frigjøre karbon som har vært bundet i løpet av de seneste ti- eller hundreår, og som også kan bindes i ny biomasse relativt raskt når arealene er frigjort til nye planter.

Denne rapporten omhandler én type biomasse, nemlig skog, brukt til energiformål. Det presenteres hva litteraturen sier om klimamessige fordeler og ulemper ved å bruke norsk skog til energiformål. For bedre å forstå hvordan bruk av norsk skog til energiformål påvirker klimaet, er det nødvendig med kunnskap om en rekke faktorer, blant annet:

- Skogens rolle i klimasystemet;
- skogens rolle som ressurs for material- og energiprodukter;
- tilgjengelige skogressurser i Norge;
- analysemetoder for klimapåvirkning, her i hovedsak livsløpsvurderinger (LCA); og
- hvor store klimagassutslipp skog til energiformål fører til, eller eventuelt kan redusere når bioenergi benyttes til å substituere fossile energikilder.

---

[1] Biologisk CO_2, eller biogent CO_2, er CO_2 som har sin opprinnelse fra levende organismer som planter og alger. Det brukes som motsetning til fossilt CO_2, som har sitt opphav i fossile, lagrede karbonressurser.

[2] Strålingspådrag eller strålingspådriv (på engelsk ’radiative forcing’) er et mål på hvordan ulike faktorer påvirker oppvarmingen av jorda. Denne størrelsen (benevnt med W/m2) fanger opp andre mekanismer enn bare klimagasser som kilde til klimaendringer, for eksempel endringer i refleksjon av solinnstråling (albedo).

I de etterfølgende kapitlene presenteres hva kunnskapsstatus innenfor disse områdene er.

Kort oppsummert kan vi si at de klimamessige fordelene ved å benytte norsk skog til energiformål er at:

- det er en årlig tilvekst av biomasse i norske skoger, som er større enn uttaket
- en stor andel (ca. 40 %) trær i norske skoger er i hogstmoden alder (>80 år),
- hogst kan gi økt albedoeffekt,
- energiproduktene som fremstilles kan erstatte fossile energikilder og kan fraktes og lagres (og derigjennom potensielt redusere klimagassutslipp).

De klimamessige ulempene er at:

- et tre som er hugget ikke lenger kan ta opp eller lagre karbon,
- CO_2 slippes ut fra jordsmonnet etter hogst,
- det tar tid før ny voksende biomasse har tatt opp den mengden karbon som blir frigitt ved forbrenning og spesielt lang tid i Norge hvor skogen har lang rotasjonstid, og
- trær har i utgangspunktet en lav energitetthet, som medfører et stort transportarbeid per energienhet.

I tillegg til klimamessige fordeler og ulemper vil en økt satsing på norsk skog til energiformål selvsagt ha effekter på: økonomi og sysselsetting i ulike skogbaserte næringer, andre næringer i energisektoren, andre potensielle miljøbelastninger som biodiversitet og forsuring og en lang rekke økonomiske og sosiale parametre.

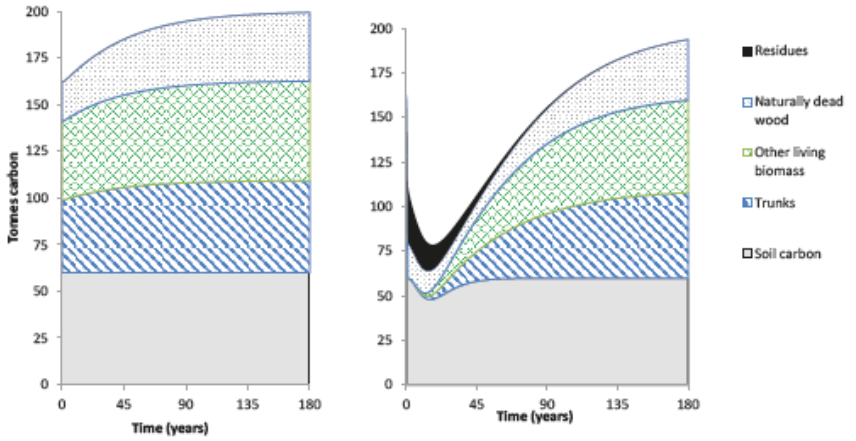
2. Skog og klima

Gjennom fotosyntesen tar trær opp CO_2 fra atmosfæren. Mens trærne vokser vil karbonet akkumuleres og lagres i biomasse både over og under bakken. Når trærne hugges vil de slutte å ta opp CO_2 og karbonet som er lagret i jordsmonnet vil frigjøres over en periode på noen år. Dersom trærne benyttes i produkter med en viss levetid vil karbonet som var lagret i biomassen over bakken fortsette å lagres. Når trærne, eller material- eller energiprodukter laget av trærne, forbrennes vil karbonet frigjøres og den samme mengden CO_2 som ble bundet gjennom fotosyntesen vil på ny ende opp i atmosfæren.

Ulike gassers evne til å påvirke klimaet er beskrevet med CO_2 som referanse, hvor "globalt oppvarmingspotensial" (GWP) for CO_2 er satt lik 1. Verdier blir satt avhengig av gassens levetid i atmosfæren og dens evne til å ta opp infrarød stråling som gjør at atmosfæren blir varmere. Metan har for eksempel en sterk evne til å ta opp varme, men har kort levetid i atmosfæren (relativt til CO_2) og har en GWP på ca 25 CO_2-ekvivalenter i et 100-årsperspektiv. Også tidshorisonten (TH) er viktig i så måte, for ser vi på GWP-verdien for metan i et 20-årsperspektiv vil den være ca 72 og i et 500-årsperspektiv ca. 8. IPCC oppgir GWP-verdier for ulike tidshorisonter, i hovedsak 20, 100 og 500 år. Årsaken er at man kan ha ulike grunner til å gjennomføre en klimagassanalyse. Dersom man ønsker å se hvor raskt klimaendringer oppstår, kan det være hensiktsmessig å bruke et 20-årsperspektiv, mens dersom formålet er å se på den absolutte økningen i klimagasser kan et 500-årsperspektiv være riktig. Det har imidlertid utviklet seg en konsensus rundt bruk av 100 års tidshorisont i de fleste klimagassanalyser. Denne praksisen er imidlertid ikke ukontroversiell. I IPCCs femte hovedrapport (Ciais, et al. 2013)skriver de at usikkerheten i GWP-verdier er opp mot 40 % i et 100-årsperspektiv fordi vi ikke vet hvordan atmosfæriske forhold vil forandre seg, og da særlig knyttet til karbonutveksling mellom atmosfære og hav.

Dette er ekstra interessant i forbindelse med bruk av skog til energiformål, da ulik tidshorisont for beregning av resultater kan gi veldig forskjellige svar. Samtidig har trær og planter, akkurat som klimagasser i atmosfæren, ulik levetid og vil derfor variere i hvor mye karbon de kan ta opp og lagre over et visst tidsrom.

Figure 2. Illustration of the development of carbon stored in the considered forest stand as modelled in the present article. (a) The no-harvest scenario (b) The harvest scenario.



Figur 1 Modell av karbon lagret i skog; uten hogst til venstre, med hogst til høyre, fra (Holtsmark 2014)

Som vi kan se ut fra den høyre delen av figuren, der skogen hogges i år 0, vil man i noen år etter hogst ha et netto utslipp av karbon gjennom utslipp fra hogstavfall og fra karbon i jorda. Deretter vil man ha en ganske bratt kurve hvor karbon tas opp i voksende skog. Etter en del tiår flater denne kurven ut og skogen tar ikke opp karbon med samme tempo. Karbonet er likevel lagret i vegetasjonen og jordsmonnet. Hva som skjer med karbonet etter ca. 200 år er ganske usikkert, ettersom det finnes lite data og få modeller tilgjengelige som beskriver opptak og utslipp av karbon fra skog eldre enn 200 år. Dette kan virke lite relevant for å forstå hvorvidt vi skal benytte skog til energiformål i dag, men det er viktig å ha en forståelse for hvordan karbonlagrene vil utvikle seg for å kunne avgjøre om man bør la skogen stå eller om den skal benyttes som kilde til energiformål.

Beregninger utført av Norsk institutt for skog og landskap viser at nettobindingen i norske skoger tilsvarte 27,6 millioner tonn CO_2-ekvivalenter i 2012 (SSB 2014). SSB har beregnet at de samlede, årlige utslippene av klimagasser i Norge var på 52,7 millioner tonn CO_2-ekvivalenter i 2012 (SSB 2014). Skogen binder altså drøyt halvparten av Norges årlige CO_2-utslipp. Grunnet økt netto tilvekst i norske skoger, har CO_2-bindingen økt betydelig siden 1990. I tropiske skoger er det omtrent like store mengder karbon bundet i vegetasjon som i jordsmonn. I norske skoger det imidlertid beregnet at nesten 80 % av karbonet er lagret i jordsmonnet og resten i røtter og overjordisk biomasse, (det vil si levende biomasse over stubbehøyde, som regnes som 1 % av trehøyden) (Grønlund, et al. 2010).

Levende trær tar opp og binder CO_2. I 1 m^3 grantrevirke er det bundet opp 733 kg CO_2 (Søgaard og Granhus 2012, Astrup, et al. 2010). Det er imidlertid ikke så enkelt som at et tre binder en jevn mengde karbon årlig. Treets evne til opptak er størst i vekstfasen og det kan bindes mer karbon i en skog som pleies riktig enn en skog som overlates til seg selv (Jandl, et al. 2007, Cherubini, Strømman og Hertwich 2011). Hvordan karbonlagret utvikler seg med tid er forholdsvis usikkert. Når trærne blir eldre øker frekvensen av råteangrep. Gjennomsnittlig er hvert 4. grantre i norsk skog råteinfisert ved slutthogst, og 80 % av råteskadene skyldes rotråteangrep (Solheim 2010). Råtesoppenes nedbrytning av

veden fører til CO_2-og metan utslipp fra disse biologiske prosessene. Hvilken innvirkning råtesoppenes vednedbrytning har på skogens totale karbonbudsjett, er foreløpig uklart. Saure (2014) oppsummerer en lang rekke studier som har sett på karbonlagring og alder. Hun skriver at mange studier anbefaler å øke rotasjonstiden til 140 år, mens Holtsmark (2012) anbefaler 250 år fra sine modeller. Vi vet imidlertid lite om dødelighet, vindfelling og naturskader i gammel skog (Saure 2014, s. 22).

Miljødirektoratet (2014b) regner med at opptaket i norsk skog vil gå ned i perioden frem mot 2100 fra rett i underkant av 30 millioner tonn CO_2-ekvivalenter i dag til ca. 13 millioner tonn i 2100. Dette er basert på alderssammensetningen av trær i norske skoger, hvor mye skog som er i hogstmoden eller nær hogstmoden alder, og en forventet økt avvirkning fremover.

2.1 Karbongjeld

Akkurat ved tidspunktet trærne benyttes til energiformål vil man få en tilførsel av karbon i atmosfæren. Ofte vil man få mer CO_2 i atmosfæren enn ved bruk av fossile energikilder, fordi det slippes ut karbon lagret i jorda når trær avvirkes og fordi trær inneholder mindre energi per vektenhet slik at det kreves mer energibruk i verdikjeden, blant annet til transport, for å få nyttbar energi ut.

Etter hvert som ny skog vokser opp der man har hugget, vil karbon igjen tas opp og lagres i biomasse over og under bakken. Hvor lang tid det tar før den samme mengden karbon som før hogst igjen er lagret (i biomassen) vil blant annet avhenge av såkalt rotasjonstid, altså hvor lang tid det tar før trærne igjen er hogstmodne. Typisk rotasjonstid for norsk barskog er 60-140 år, og det indikerer at det tar lang tid fra utslipp knyttet til forbrenning, til skogen igjen har tatt opp den samme mengden karbon. Mer hurtigvoksende vekster vil bruke kortere tid, som vist i Tabell 1.

Tabell 1: Sammenheng mellom globalt oppvarmingspotensial og rotasjonstid (fra Cherubini et al. 2012)

Rotation	**Impuls-responsfunksjon IRF (relativt til 1 kg fossil CO_2)**	
R	**GWP_{bio}** Tidshorisont (TH)=100	**GWP_{bio}** TH=500
1	0,004	0,002
2	0,01	0,003
8	0,03	0,01
10	0,04	0,01
20	0,08	0,02
30	0,12	0,02
40	0,16	0,03
50	0,21	0,04
60	0,25	0,05
70	0,30	0,05
80	0,34	0,06
90	0,39	0,07

100	0,43	0,08

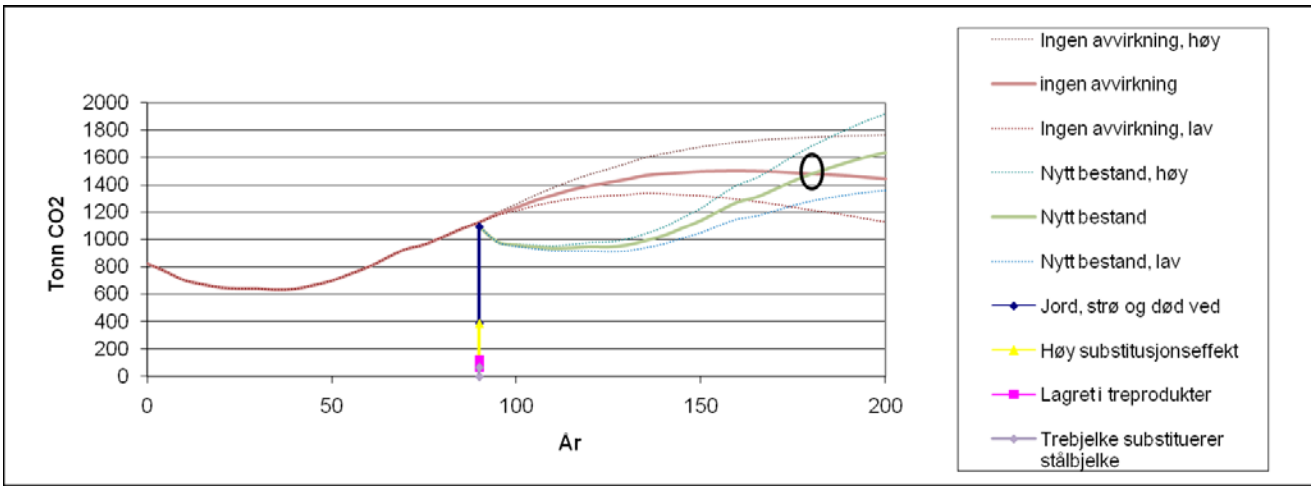
For raskt å forstå tabellen, kan vi si at jo lavere tall i en av de to kolonnene til høyre, jo bedre er det for klimaet. Kolonnen til venstre betegner ulike rotasjonstider. Ved en rotasjonstid på ett eller to år er biomassen så godt som klimanøytral, uansett hvilken tidshorisont man legger til grunn. Det vil si at opptaket av CO_2 foregår omtrent simultant med utslippet. Tallene er beregnet ut fra modeller for karbonopptak for ikke-spesifiserte vekster og er således ikke for spesifikke planter og trær, men gir en indikasjon for hvordan ulike rotasjonstider gir ulik påvirkning på klimaeffekt.

Ut fra tabellen kan det synes som om man skal velge plantevekster med kortest mulig rotasjonstid for å gjøre energiressursene klimanøytrale. Problemet er bare at drift av kortlivede vekster krever mer stell og mer tilførsel av næring, som i sin tur leder til klimagassutslipp. Storskala produksjon av kortlivede vekster er som regel også relatert til bruk av næringsrik jord, som kan anvendes til matproduksjon, og det er derfor en fare for store klimaeffekter knyttet til såkalte indirekte arealbruksendringer (iLUC)[3].

Ut fra det som er skrevet så langt virker det opplagt at vi bør la skogen stå; at trærne – i et klimaperspektiv – bør benyttes for karbonlagring. Regnestykket er imidlertid ikke så enkelt som det. For det første, og sannsynligvis viktigst, kan skog brukt til energiformål være et alternativ til andre energikilder som kan ha en langt dårligere klimaprestasjon. For det andre er det mange faktorer, så som albedoeffekt, evapotranspirasjon og andre klimadrivere enn CO_2, som kompliserer modellene for skogens påvirkning på klima. I neste kapittel vil bruk av skogen som material- og energiressurs beskrives nærmere, mens det i resten av dette kapitlet vil tas opp emner som er knyttet til skogens rolle i klimasystemet og hvordan rollen påvirkes ved hogst.

Men først, for å undersøke hvor lang tid det tar før GWPbio = 0, altså før "karbongjelden" er tilbakebetalt, må man undersøke hvor lang tid det tar for skogen å ta opp den samme mengden karbon som det som blir sluppet ut ved forbrenning. Figur 2 viser hvordan KLIF (2011) har modellert karbonlager i en skog som får stå mot en skog som blir hugget.

[3] Indirekte arealbruksendringer er knyttet til at dersom matjord benyttes til produksjon av energivekster ett sted i verden, betyr det at man må produsere mer mat et annet sted i verden. Klimagassutslippene som er knyttet til ny matproduksjon, enten ved mer intensivt jordbruk eller ved rydding av skog, blir referert til som indirekte arealbruksendringer for energivekstproduksjonen.



Figur 2 Utvikling i karbonlager med avvirkning av trevirke og GROT og substitusjon, (fra KLIF 2011).

Figuren viser hvordan karbonlageret utvikler seg etter at skogen hugges ved en alder på 90 år. Den svarte rundingen indikerer når karbongjelden er tilbakebetalt og man har hatt en positiv klimaeffekt av hogsten. Figuren kan være litt vanskelig å lese da den også indikerer hva som vil skje ved ulike forutsetninger om karbonopptak både i gammel og ny bestand og man kan tydelig se stor forskjell i tilbakebetalingstiden for ulike alternativer.

2.2 Utslipp forbundet med hogst

Vanligvis vil det ikke skje en arealbruksendring etter hogst i Norge, i hvert fall ikke over tid, fordi det etableres ny skog enten ved planting eller ved naturlig foryngelse. Resultatkontrollen for skogbruk og miljø (Granhus, Eriksen og Moum 2013), som utføres årlig av Skog og landskap, viste at rundt 88 % av de undersøkte hogstflatene ble tilrettelagt for foryngelse i 2012, mer enn halvparten av disse ved skogplanting. At ca 12 % av arealet ikke ble tilrettelagt for foryngelse, betyr likevel ikke at en arealbruksendring har skjedd, men heller at foryngelsen skjer av seg selv, som oftest med mindre tilvekst og lavere produksjon som følge.

Imidlertid kan den forventede befolkningsveksten i Norge nødvendiggjøre oppdyrking av rundt 1 million dekar skog til jordbruksformål, mens arealbehovet for byggegrunn antas å være betydelig mindre (Grønlund, et al. 2010).

Hogst kan føre til en midlertidig nedgang i karboninnholdet i skogsjord. Utslipp som direkte følge av hogsten er relatert til prosesser i jorden, nedbrytning av biologisk materiale etter hogst (røtter, stubber og hogstavfall) og til direkte utslipp fra jorda som følge av maskinpåvirkning. Beregninger presentert i Timmermann og Dibdiakova (2014) viser at utslippene av biologisk CO_2 fra skogsjord som direkte følge av hogst kan være 10 ganger så store som utslippene av fossilt CO_2 fra etablering, skjøtsel og hogst av skog og påfølgende tømmertransport, i hvert fall på *kort sikt* (30 år). Størrelsen av CO_2-tapet på *lang sikt* vil være sterkt avhengig av omløpstiden, der en lengre omløpstid vil føre til lavere utslipp fra skogsjorda. I en oppdragsrapport fra Skog og landskap (Nilsen, Hobbelstad og Clarke 2008) antydes det at den høyeste samlede karbonbindingen i

vegetasjon og jord vil oppnås ved ca 30-50 år lengre omløpstid på middels bonitet, enn det som normalt benyttes i skogbruket.

2.3 Albedoeffekt

Klimaet påvirkes på ingen måte bare av innholdet av klimagasser i atmosfæren. En av diskusjonene rundt årsaken til globale temperaturøkninger handler for eksempel om endringer i solaktivitet. Mennesker kan også påvirke klimaet på andre måter enn ved å slippe ut klimagasser, for eksempel vil et områdes albedo kunne endres avhengig av hvordan det benyttes. Albedo betegner en overflates evne til å reflektere sollys. En svart flate har en albedo lik 0, som vil si at ingenting reflekteres, mens en hvit flate har albedo lik 1, som vil si at alt lys reflekteres. Når lyset reflekteres blir det heller ikke lagret varme i overflaten, mens det tilsvarende blir varmere når overflaten absorberer lyset.

En bartreskog gir en forholdsvis mørk overflate med lav albedo. Snødekte flater har høy albedo. Derfor kan man, ved hogst av barskog i områder som er snødekt om vinteren, oppnå at mer lys reflekteres enn om skogen var blitt stående. Det kan gi en nedkjølende effekt (eller snarere ikke-varmende effekt), som er nesten like stort som den varmende effekten fra CO_2-utslippene fra forbrenning av trevirket (Cherubini, Bright og Strømman, Site-specific global warming potentials of biogenic CO2 for bioenergy: Contributions from carbon fluxes and albedo dynamics 2012, O'Halloran, et al. 2012, Bright, Astrup og Strømman 2013). Lauvskog har i utgangspunktet en langt høyere albedo enn barskog, ettersom de mister blader om vinteren og dermed eksponerer større snøflater. Hva som eventuelt skjer ved et endret klima kan være vanskelig å forutse. Prediksjonene forteller om mer vinternedbør og noe høyere temperaturer, men det er vanskelig fra modellene og lese om nedbøren vil komme som snø eller regn.

2.4 Evapotranspirasjon og aerosoler

I tillegg til karbonlagring, CO2-utslipp og endringer i strålingspådriv har også skogen andre funksjoner i tilknytning til klimaregulering. Når trær trekker vann opp fra bakken og dette fordamper i trekronene kalles det evapotranspirasjon. Lokalt vil dette ha en avkjølende effekt, både som en konsekvens av at varme ledes opp fra bakken og at det kan dannes skylag som reflekterer solstråler, men den kan oppveies av en oppvarmende effekt når vannet igjen kondenserer. Globalt er det indikasjoner på at evapotranspirasjon har en nedkjølende effekt (Saure 2014, s. 29). Det er imidlertid usikkert hvordan denne prosessen virker i Norge.

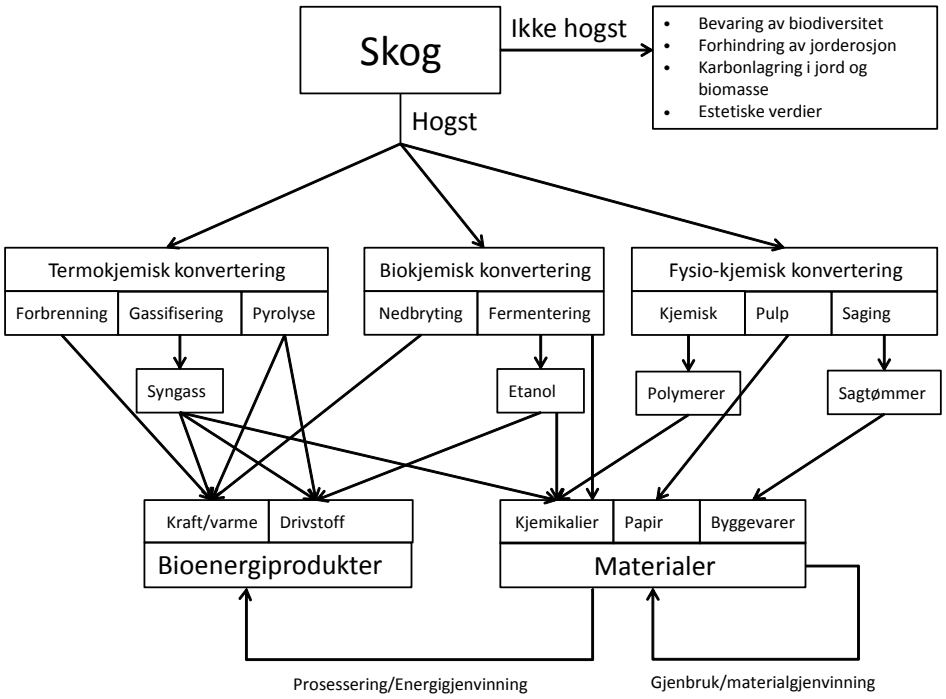
Aerosoler er små partikler som kan avgis fra trær som flyktige organiske komponenter, eller de kan være uorganiske forurensinger. Miljødirektoratet (2014b) skriver at aerosoler kan spre sollyset og gi mer effektiv fotosyntese, som igjen øker karbonopptaket og har en avkjølende effekt. Det er også beskrevet at aerosoler kan danne et ”skylag” over trekronene, som øker albedo, og dermed reflekterer mer av solinnstrålingen med et resulterende lavere klimapådriv. Noen flyktige organiske forbindelser er imidlertid klimagasser med oppvarmende effekt.

For alle disse variablene er det stor usikkerhet knyttet til hvilken klimaeffekt de har og det vil være store variasjoner mellom ulike skogstyper og ulike geografiske posisjoner. Skoger kan også ha andre påvirkninger på klima, som vi ennå ikke har utforsket eller tallfestet.

3. Skog som ressurs

I tillegg til å være hjem for en lang rekke dyr, sopp og planter og tilby rekreasjon for mennesker, har skogen altså en viktig rolle som karbonlager i klimasammenheng. Det er i seg selv gode argumenter for å la skogen stå. På den annen side er trærne i skogen en ressurs som kan benyttes til en lang rekke material- og energiprodukter. Flere av de mest brukte material- og energiressursene vi bruker i samfunnet i dag er basert på fossile råvarer og trenger store mengder fossile råvarer for å tilvirkes, eller avgir store mengder klimagasser ved tilvirkning. Plastmaterialer og drivstoff er eksempler på det første; mange metaller og mineraler på det andre; og sement og stål på det siste. Trær fra skogen kan benyttes til mange av de samme formålene og kan dermed være en viktig ressurs både for å unngå å bruke opp begrensede ressurser og for å unngå klimagassutslipp.

Figur 3 gir en oversikt over produkter man kan få fra trær og prosessrutene som kreves for å fremstille produktene.



Figur 3 En oversikt over prosessruter og produkter fra skog (figuren er laget av Kathrin Sunde).

Mange av produksjonsrutene i figuren har store volumer i dag; blant annet trær til konstruksjonsformål og trær til direkte forbrenning til energi. En del av produksjonsrutene er imidlertid fortsatt på et utviklingsstadium. Det gjelder blant annet mange produksjonsruter for biodrivstoff.

Figuren viser også at trærne fra skogen må konverteres for å bli til nyttbare produkter. Dersom man skal lage konstruksjonsmaterialer av trær må de konverteres mekanisk (fysio-kjemisk konvertering i figuren) og man får et tap av masse i form av avkapp, flis og spon underveis i produksjonskjeden. Denne massen kan benyttes til energiformål. Når man lager bioenergiprodukter må man enten ha en konvertering ved hjelp av varme (forbrenning, gassifisering eller pyrolyse) eller ved hjelp av kjemiske eller biologiske prosesser. I slike konverteringstrinn vil man alltid miste energi til omgivelsene og det er derfor viktig å se på både hvor mye ekstern energi som må tilføres og hvor mye energi som forsvinner, for å kunne si om et produkt er økonomisk og miljømessig bra.

Dersom vi ser på treets bestanddeler er det tre hovedgrupper: cellulose, hemicellulose og lignin. Et grantre består typisk av 35-45 % cellulose, 25-30 % hemicellulose og 20-30 % lignin. I tillegg er det noen få prosent fettsyrer, harpiks og uorganiske forbindelser. Dersom treet skal brukes til konstruksjonsformål, spiller ikke den kjemiske sammensetningen så stor rolle, men straks man skal konvertere trestokken til material- og energiprodukter begynner den å bety en hel del. Bioetanol tilvirkes av sukkeret i treet. Dette kommer fra cellulosen og hemicellulosen og utgjør totalt ca. 50 % av treets tørrstoff. Det betyr at man ikke kan putte en trestamme inn i en prosess og få bare bioetanol ut. Borregaard, som er et eksempel på et såkalt bioraffineri, lager ca 400 kg spesialcellulose, 400 kg ligninprodukt, 50 kg etanol og 3 kg vanillin fra 1.000 kg trestokk. De siste om lag 150 kiloene går til energiformål for å drifte anlegget. Borregaards produktfordeling gjenspeiler at de ønsker en produktmiks med høyest mulig verdiskaping og er ikke satt opp for å produsere mest mulig etanol. De er imidlertid i gang med pilotprosjekter hvor etanolproduksjon er et viktig fokus.

3.1 Materialprodukter

Hvis vi ser på menneskenes historie, er det bare en kort periode vi har vært i stand til å tilvirke produkter fra fossilbaserte råvarer og fra mange metaller og mineraler. I store deler av historien har vi benyttet oss av skog- og plantebaserte produkter til å fylle en lang rekke funksjoner, og fremdeles er det viktige funksjoner som fylles med bruk av materialer fra skogen.

3.1.1 Skog til konstruksjonsformål

En vanlig bruk av trevirke er til konstruksjonsformål utendørs og innendørs i bygninger. Tre brukt til slike formål kan lagrer karbon selv etter at treet er hugget, samtidig som det kan erstatte klimagassintensive byggematerialer som betong og stål.

3.1.2 Skog til papp og papir

I motsetning til hva man kan få inntrykk av som følge av nedleggelser i norsk tremasseindustri og i forbindelse med overgangen til det såkalte "papirløse samfunn", har verdens produksjon av masse til kartong og papir økt de seneste 10 årene (von Troil, Thuresson og Carlsson 2014).

Selv om det er en drastisk nedgang i produksjonen av avispapir, er det fortsatt økende bruk både av papir til hygieniske formål og kartong til emballasje.

3.1.3 Skog til andre materialformål

Skogressurser kan benyttes til en lang rekke produkter via mekanisk behandling, som møbler, kjøkkenutstyr, blyanter og en rekke andre produkter. Mengden trevirke brukt til slike formål er imidlertid liten sammenlignet med de mengder som benyttes til konstruksjon og papp og papir.

Samtidig er det andre, mer kompliserte, ruter for fremstilling av produkter der ulike bestanddeler av treet brytes ned og benyttes. I Norge har vi Borregaard, som er verdensledende innenfor bioraffinering, hvor en tømmerstokk blir omgjort til en lang rekke produkter. Hovedproduktene hos Borregaard er lignosulfonat (som benyttes som tilsats i betong), spesialcellulose (til produkter som beyggematerialer, tannkrem og iskrem), vanillin (til næringsmidler og medisiner) og etanol (til drivstoff, men også til medisinske formål). Et bioraffineri er altså, i likhet med et oljeraffineri, en produksjonsenhet der en råvare kommer inn og blir omformet til et stort spekter med produkter. Foreløpig er det ikke så mange bioraffinerier rundt omkring i verden. Borregaard hevder selv at de lever på produktinnovasjoner og nisjemarkeder (Borregaard 2014), hvilket er en indikasjon på at det kan være vanskelig kostnadsmessig å drive bioraffinerier for masseproduksjon.

I nyere tid er det en hel del forskning og utvikling knyttet til nanomaterialer fra trevirke. Norge har en fremtredende rolle i denne forskningen; mye koordinert av PFI (Papir- og fiberinstituttet AS) i Trondheim. Nanocellulose er likevel forholdsvis langt fra produksjon i stor skala og det er vanskelig å anslå hvor viktig produktet vil være, både økonomisk og miljømessig.

3.2 Energiprodukter

Som en av få fornybare karbonbaserte ressurser kan skog inngå i alle de samme energiproduktene som fossile energikilder som kull, olje og gass. Det vil si at trær kan forbrennes direkte for produksjon av kraft og varme, men også brukes som grunnlag for å produsere produkter med høyere energitetthet for både stasjonær forbrenning (som pellets og briketter) og mobil forbrenning (som biodrivstoff som etanol og biodiesel).

3.2.1 Kraft og varme fra biomasse

Det er lange tradisjoner for varmeproduksjon fra skogsbiomasse i Norge, både som vedfyring i privatboliger og industrielt i både trelast og papirproduksjon. I industriell varmeproduksjon er det også tilfeller av strømproduksjon, men sammenlignet med naboland som Sverige og Finland er kraftproduksjon basert på skogsbiomasse lite utbredt i Norge. Teknologier for forbrenning av trevirke er imidlertid velkjente.

En årsak til at kraftproduksjon fra biomasse ikke er utbredt kan vi lese i en rapport av Hamnaberg, Nybakke og Skau (2010). De skriver: "det er i prinsippet mulig å etablere storskala varmekraft der energivaren kull er erstattet med bioenergi. Dette vil kreve store volumer med tremasse som vanskelig kan skaffes innenlands, men som må importeres ved hjelp av store bulkskip. Selv om økonomien i slike prosjekter kan være gunstig sammenlignet med andre teknologier basert på fornybar energi, vil energiutnyttelsen (elvirkningsgraden) bare være ca. 40 prosent. Bioenergi vil i fremtiden kunne bli en knapphetsressurs og vi har også av den grunn valgt å ikke studere kraftproduksjon fra biomasse nærmere" (*Ibid*, s. 13). En forskjell mellom Norge og andre land er selvsagt at vi har tilgjengelig vannkraft med en lav kostnad per kWh.

IEA (2013) skriver at 8 % av primær energiproduksjon i Norden kommer fra biomasse og avfall. I denne sammenhengen er alt av produksjon av primære energikilder inkludert, totalt 11.391 PJ, og Norges produksjon av olje og gass er en sterk bidragsyter til at tallet er ca en tredjedel av den totale primære energiproduksjonen i EU-27. Noen bioenergimarkeder ser ut til å vokse. Norsk Bioenergiforening (Nobio) (2013) har utgitt en pris- og salgsstatistikk for pellets og briketter for 2012. Der skriver de at produksjonen av pellets ble fordoblet fra 51.788 tonn i 2011 til 124.170 tonn i 2012.

I IPCCs femte hovedrapport, delrapport 3 (IPCC 2014) beskrives det at bioenergi må utgjøre en forholdsvis stor andel av verdens energisystem frem mot 2050, og at man deretter må innføre karbonfangst og –lagring, slik at det både produseres kraft og fjernes CO2 fra produksjonsprosessen.

3.2.2 Biodrivstoff

Det er to hovedtyper biodrivstoff: bioetanol og biodiesel, hvor den førstnevnte er en erstatning for bensin og den sistnevnte en erstatning for diesel. Begge deler kan produseres fra skog gjennom ulike produksjonsruter. I 2013 var den totale produksjonen av biodrivstoff på 65.370 tusen tonn oljeekvivalenter, hvilket er ca 1,5 % av den totale oljeproduksjonen i verden i 2013 (BP 2014). Hoveddelen av dette var bioetanol, men en stor andel også biodiesel. Det er ikke beskrevet hvilke råvarekilder biodrivstoffet er produsert fra, men andre rapporter fremholder at såkalt andregenerasjons biodrivstoff foreløpig bare er på pilotstadiet, mens førstegenerasjons biodrivstoff er basert på moden teknologi (Melbye og Killingland 2013).

I Norge er det et krav om at 3,5 % av salget til selskapene som tilbyr drivstoff til veitrafikk må være biodrivstoff (Miljøverndepartmentet 2014). I utgangspunktet skulle dette økes til 5 % i 2011, men dette har blitt utsatt på grunn av usikkerhet rundt den faktiske klimaeffekten ved bruk av biodrivstoff, som påpekt i innledningen av rapporten.

I Norge i 2013 gikk biodieselbruken ned med 5 prosent sammenlignet med året før, noe som nesten ble oppveid av økt bruk av bioetanol. Til sammen ble det brukt ca 4 prosent biodrivstoff av den samlede drivstoffbruken i veitransport (SSB 2014). Mesteparten av biodrivstoffet var produsert fra raps og ble importert til Norge fra Tyskland, Litauen, USA og Frankrike (Miljødirektoratet 2014c). Bare en liten andel av biodrivstoffet var basert på skogsbiomasse og mesteparten av denne var produsert innenlands hos Borregaard.

Etanolproduksjon fra tømmer skjer gjennom fermentering av sukker og det krever at sukkeret i cellulosen og hemicellulosen er tilgjengelig for fermenterende bakterier. Det er i utgangspunktet en tidkrevende prosess å bryte ned cellulosen og hemicellulosen, men forskere ved NMBU har bidratt til forskning på enzymer som kan gjøre prosessen raskere (Horn, et al. 2012). Xynergo forsøkte å sette opp biodieselproduksjon basert på trevirke, men testproduksjonen ble lagt ned i 2010.

Biodrivstoff har så langt ikke vært spesielt utbredt i flytrafikk. I den senere tid har Norwegian og SAS gjennomført prøveflygninger med biodrivstoff i Norge, men denne har blitt produsert fra gjenvunnet matolje. En av grunnene til at skogsbasert biodrivstoff til fly ikke har nådd noen stor utbredelse er nok kostnadsnivået, samt at drivstoff til fly har hatt strenge krav med hensyn til produktspesifikasjoner som energitetthet, viskositet, overflatespenninger og en lang rekke andre egenskaper (Güell, et al. 2013).

I en rapport, produsert på oppdrag for Avinor, konkluderer Rambøll med at det er både teknisk og økonomisk mulig å produsere biodrivstoff for luftfart i Norge innen 2025 (Rambøll 2013). Med lik avvirkning som i dag, kan hogstavfall og massevirke, dersom alt benyttes til drivstoffproduksjon dekke omtrent en fjerdedel av et antatt behov på 1.000 millioner liter drivstoff (Trømborg, et al. 2012).

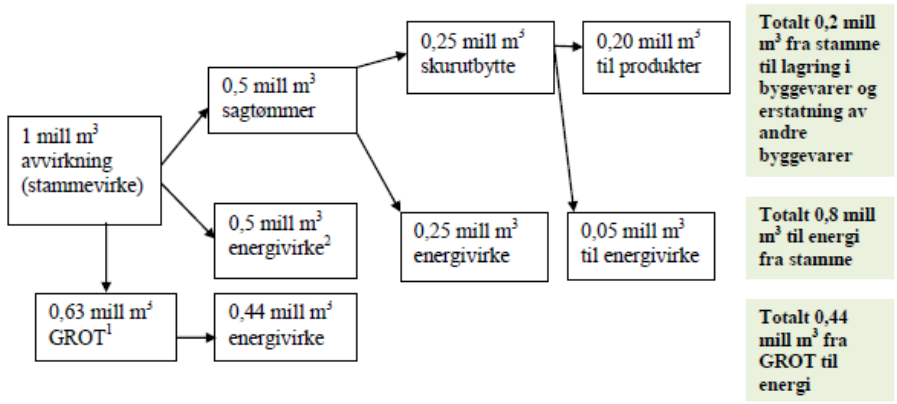
4. Hvor mye energi kan vi få ut av norsk skog?

Hvor mye energi som finnes i skogen er avhengig av flere faktorer: hvor store skogarealer som er tilgjengelige for hogst, hvor mange trær som finnes på disse skogarealene, hvor mange kilo biomasse disse trærne tilsvarer og hva brennverdien (energimengde per vektenhet) er for denne biomassen. I tillegg spiller det en stor rolle hva man forutsetter at ulike trær vil benyttes til.

4.1 Bruk av skog i Norge

Det ble vist en lang rekke ulike produksjonsruter for skogsbaserte produkter i kapittel 3. Avvirkning i norske skoger bestemmes av om skogeieren ønsker å hogge. Dette er igjen avhengig av hvilken pris man kan få for tømmeret. Best pris gis for såkalt skurtømmer (eller sagtømmer), som går til sagbruk for videreforedling. Massevirke, som på grunn av manglende kvaliteter med hensyn til lengde eller tykkelse ikke kan gå til skurtømmer, har vært benyttet i treforedlingsindustrien til fremstilling av papirmasse og har gitt relativt mindre inntekter til skogeierne. Derfor er det som regel etterspørselen etter sagtømmer som bestemmer hvorvidt det skal hogges og som legger føringer for hvilke produktstrømmer man vil få.

I henhold til KLIF (2011) vil en avvirkning av 1 millioner kubikkmeter stammevirke gi en produktfordeling som vist i figur 4.



[1]I tillegg til GROTen innholder denne størrelsen nylig dødt virke, små trær og skadet stamme (råte/ krok).
[2]Kan også brukes som massevirke.

Figur 4 Fordeling av trær til ulike applikasjoner.

I figuren er det beregnet at alt som ikke går til byggevarer i stedet går til energiprodukter. Dette skyldes at rapporten så på mengden energi tilgjengelig. I virkeligheten vil en hel del gå til massevirke til papirproduksjon eller kjemiske produkter.

Det er ikke i rapporten henvist til hvor tallene kommer fra, men svenske Skogforsk (2011) angir ca 0,5 m³ GROT per kubikkmeter virke, altså en noe lavere andel. I praksis vil mengden GROT som faktisk tas ut fra en hogstflate være enda lavere (ca 70 % av totalen) siden mindre greiner og kvister som oftest blir liggende. Mengden GROT som anses som tilgjengelig kan ha mye å si for hvor store energiressurser man regner med kan benyttes.

Det er gjort en lang rekke beregninger av hvor store energiressurser som finnes i norsk skog i dag. De aller fleste tar utgangspunkt i Landsskogtakseringen. Landsskogtakseringen er en ordning som ble innført i 1919 for å få oversikt over tilførsel og avgang av trevirke. Opplegget har endret seg noe over tid, men i dag finnes det 11.000 prøveflater i skog hvor trær telles og måles. Landsskogtakseringen er altså brukt som underlag for flere skogressursstudier; mange på oppdrag for NVE (se for eksempel Berg, et al. 2003, Bergseng, et al. 2012, Bernhard og Bugge 2007, Hamnaberg, Nybakke og Skau 2010, Hamnaberg og Sidelnikova 2011, Jørgensen og Bernhard 2004, Melbye, Rørstad og Killingland 2014). Disse bygger på hverandre og senere studier raffinerer og utdyper de tidligere. Den seneste rapporten ble utgitt i 2014 og anslår et realistisk ressurspotensial fra skog på 16,5 – 17,2 TWh per år, mot et teoretisk potensial på 18,3-19,0 TWh per år (Melbye, Rørstad og Killingland 2014). Det realistiske ressurspotensialet angitt her, er basert på økt hogst av massevirke opp til balansekvantum. Råstoff fra skog er dermed, i følge samme rapport, den klart største kilden til bioenergi, hvor den totale mengden realistisk tilgjengelig biomasse er 20,8 – 22,8 TWh (og den teoretiske 29,6 – 31,6). I rapporten skilles de realistisk og teoretisk tilgjengelige råstoffene fra hverandre basert på bærekraftighet, enkelthet og økonomi.

Balansekvantumet er den mengden tømmer som kan tas ut, uten at det påvirker fremtidige muligheter for uttak. I Norge i dag (2012) er det en årlig tilvekst på 28 millioner m³ per år. Den årlige avvirkningen er på ca 11 millioner m³. Det betyr ikke at man kan ta ut 17 millioner m³ (28 ÷ 11) mer enn hva man gjør i dag. En del av skogen er ung skog som

ikke bør hogges, en del er gammel skog som kan være råteinfisert og en del går bort i topper avkapp, o.l. Det gjør at man beregner balansekvantumet til å være ca 17 millioner m³. Dette tallet inkluderer de 11 millioner m³ som avvirkes i dag og det er bare tilfeldig at netto tilvekst og balansekvantum er samme tall. Det betyr at ca 6 millioner m³ ekstra massevirke kan tas ut årlig til energiformål i følge Melbye, Rørstad og Killingland (2014).

Melbye, Rørstad og Killingland (2014) oppgir at økningen i energimengden som tas ut fra skogen fra dagens avvirkning til avvirkning opp til balansekvantumet vil være på 8 TWh. Hamnaberg og Sidelnikova (2011) har forsøkt med å tallfeste bioenergiressurspotensialet i Norge. De skriver at: "Hovudkonklusjonen frå dette arbeidet er at det er mogleg å gjere tilgjengeleg om lag 14 TWh meir bioenergi i Noreg enn det som vert brukt i dag, til ein kostnad som ligg lågare enn ca. 30 øre/kWh. Nesten heile dette potensialet stammar frå skogen og krev ein auke i uttaket opp til netto balansekvantum (det volumet ein kan ta ut av skogen årleg uten å måtte redusere det i framtida – ressursmessig berekraftig uttak). Dei største ressurskategoriaen er stammevyrke ved auka slutthogst (5 TWh), tynningsvyrke (3,2 TWh) og greiner og toppar (4,4 TWh). Medan ressurspotensialet frå skogen er godt dokumentert, er kostnadsestimata ved auka hogst til balansekvantum svært usikre" (s. 6). Rapporten oppsummerer mye av det tidligere arbeidet med ressurspotensialer og er i tillegg veldig eksplisitte på forutsetningene som ligger til grunn: "I denne rapporten brukar vi effektiv brennverdi for trevyrke med 55 % fukt. Reknar vi med ein nedre brennverdi på 5,32 kWh/kg tørrstoff, vert effektiv brennverdi 4,49 kWh/kg tørrstoff for trevyrke med 55 % fukt. Ut fråd esse føresetnadene får ein ca 1800 kWh (basis densitet er antatt 400 kg/fm³) ut av ein fastkubikkmeter rått vyrke (fm³) og 720 kWh for en lauskubikkmeter (lm³) skogsflis. Ein fastkubikkmeter utgjer 2,5 laus kubikkmeter flis" (s. 14). Slike forutsetninger er ofte godt skjult i rapportene om ressursmengder og gjør ressursestimatene lite etterprøvbare. Slik sett gir rapporten en forbilledlig estimering av ressurspotensialet for bioenergi i Norge.

Det er ikke bare hvor mye skogsbiomasse som er tilgjengelig som avgjør hvorvidt skog kan eller bør avvirkes. Vi var allerede i kapittel 2 inne på konsepter som "karbongjeld" og "tilbakebetalingstid". Disse er knyttet til hvor lang tid det tar fra avvirkning til man igjen har bundet samme karbonmengde i ny skog. I den sammenhengen er det interessant å se hva alderen på skogen i Norge er. I en studie av skogen i Norge viser Granhus, Hylen og Nilsen (2012) at mer enn 25 % av skogen i Norge er eldre enn 100 år og 40 % eldre enn 80 år. Det kan tyde på at mye tømmer i Norge er klart for å avvirkes, på tross av at vi har sett at det anbefales rotasjonstider på 140, ja sågar, 250 år. Det er imidlertid uklart hvordan karbonlagrene i skog vil utvikle seg med slike rotasjonstider, blant annet knyttet til hvor mye skog som vil råtne uten tilgang til luft og dermed slippe ut metan snarere enn CO_2.

4.2 Ikke bare et spørsmål om mengder

Det er ikke bare mengden tilgjengelig skog som bestemmer hvorvidt det vil tas ut virke i Norge. Norge har et kostnadsnivå som ligger over alle sammenlignbare land, med tanke på arbeidskostnader i skogindustrien og tilstøtende industrier, drivstoffkostnader og andre transportkostnader (von Troil, Thuresson og Carlsson 2014). Det er med på å bestemme når skogeiere vil ta ut virke av skogen og til hvilke formål. Mange av analysene av

ressursgrunnlaget i norske skoger har vektlagt hva prisen vil være per kWh trevirke ut fra skogen, nettopp for å ta høyde for hva som er økonomisk, og ikke bare teoretisk, mulig.

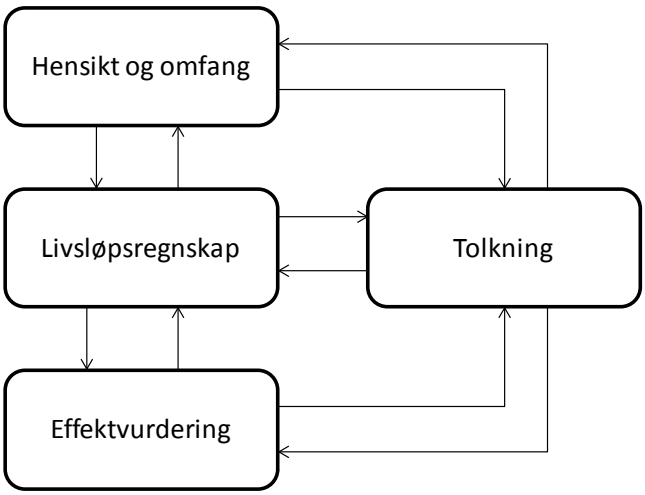
Jørgensen og Bernhard (2004) skriver at av om lag 23,5 TWh bioenergiressurser, ligger de skogsbaserte ressursene i de øvre kostnadsklassene (10 – 20 øre/kWh), mens andre bioenergiressurser som avfall og halm ligger fra 0 – 5 øre/kWh. Disse kostnadene er bare en del av energikostnaden og angir derfor ikke totalkostnaden per kWh. Hamnaberg et al. (2010) konkluderer med at det finnes ca 9 TWh ekstra bioenergi som kan tas ut til en kostnad under 30 øre/kWh, og da i særdeleshet tynningsvirke og GROT. Melbye, Rørstad og Killingland (2014) oppgir også en pris på i underkant av 30 øre/kWh for rundvirke og GROT, til sammen ca 16 TWh Hvis vi utvider til ikke å bare se på råvaren, har NVE (2011) sett på kostnader ved produksjon av kraft og varme og beskriver priser på brensler til å variere fra 17 øre/kWh for bark/sagflis til opp til 60 øre/kWh for pellets i småsekk. Med investeringskostnader for biokjel modelleres prisen til 36,8 – 52,4 øre/kWh. Dersom biokjelen skal benyttes til produksjon av el vil prisen ligge på mellom 67,2 og 94,9 øre/kWh$_{el}$. Dersom man da sammenligner med vannkraft er kostnaden for kraft fra skogsbiomasse to til fem ganger høyere. Det gjør det forståelig at det har vært lite satsing på biomassebasert kraftproduksjon i Norge. I et slikt perspektiv kan det være mer hensiktsmessig å eksportere tømmer til kraftproduksjon i land hvor det allerede er etablert biomassefyrte kraftverk, og spesielt om råvaren vil konkurrere med kull (i et miljømessig, og ikke nødvendigvis økonomisk, perspektiv).

Nå skal vi se nærmere på det miljømessige perspektivet, og vil først raskt beskrive metoden LCA for å kartlegge klimaeffekten av skog til energiformål og fordeler og ulemper ved å benytte denne.

5. Hvordan finner vi klimaeffekten av skog til energiformål?

De langt fleste studiene som har undersøkt klimaeffekten av biomasse brukt til energiformål har benyttet seg av analysemetoden LCA (livsløpsvurderinger). LCA har en forholdsvis lang historie, men bruken, og standardiseringen, av metoden har økt voldsomt siden årtusenskiftet. Enkelt fortalt skal en LCA inneholde alle material- og energistrømmer som er nødvendige i livsløpet til et produkt. Ideelt sett skal en LCA inneholde en lang rekke potensielle miljøeffekter, men selve metoden brukes også til å se på kun klimaeffekter, da fordelen med å ha et rammeverk for å inkludere alle livsløpsprosesser gjør at man unngår å utelate vesentlige utslipp.

I figur 5 er en prinsippskisse over trinnene i en LCA vist, basert på en figur i ISO 14044



Figur 5 De fire fasene i gjennomføring av en LCA

Figuren ser ganske oversiktlig ut, bortsett fra pilene som går til og fra hver boks. De indikerer at LCA er en iterativ prosess, der man ofte må gå tilbake å revidere et tidligere prosesstrinn når ny kunnskap oppnås i et påfølgende.

5.1 Klimagassregnskap basert på LCA

LCA inneholder ikke i seg selv noen metode for å beregne klimaeffekter. I stedet har man importert og utviklet metoder som kan benyttes innenfor LCA-rammeverket. Som grunnlag for de fleste klimaberegninger i LCA ligger metodikk beskrevet i rapporter fra IPCC, og flere forskere innen LCA-feltet har også vært med på å utvikle metodikk knyttet til tallfesting av klimaeffekter, også spesifikt knyttet til skog og til bioenergi. Eksempler på utvikling har vært en overgang fra CO_2-ekvivalenter som indikator til måleindikatorer som strålingspådriv i W/m² (Cherubini, Bright og Strømman, Site-specific global warming potentials of biogenic CO2 for bioenergy: Contributions from carbon fluxes and albedo dynamics 2012) og karbon-klima respons i °C/TtonC (Tton = terratonn = 10^{12} tonn) (Cherubini, Gasser, et al. 2014). Det er kanskje ikke selve måleindikatorene som peker på en utvikling, men det at resultatene ligger nærmere opp mot det vi er interessert i, altså hvordan karbonet som slippes ut i atmosfæren påvirker den gjennomsnittlige temperaturen på kloden.

Det er nok fortsatt mange som utfører en LCA på "gamlemåten" hvor man lager en liste over alle utslipp i verdikjeden og multipliserer disse med karakteriseringsfaktorer relatert til CO_2-ekvivalenter, men det har kommet modeller og hjelpemidler som gjør LCA-praktikere i stand til å modellere for eksempel tidsdynamikk.

5.2 Fordeler med LCA i klimagassanalyser av skog til energiformål

LCA er fremhevet som en god metode for å beregne klimaprestasjonen til ulike produkter. En av de store fordelene med LCA er at man kan dekke alle underliggende prosesser, som for eksempel bruk av fossile drivstoff i skogsmaskiner, produksjon og distribusjon av dette drivstoffet, produksjon og distribusjon av det som skal til for å produsere drivstoffet, og så videre til alle prosesser er dekket. Denne helhetlige tilnærmingen gjør at man får med seg alle klimagassutslipp som er innblandet i produktsystemet. Det gjør at man mer presist kan sammenligne ulike produktsystemer med samme funksjon, for eksempel om man vil sammenligne elektrisitet produsert fra skogsbiomasse mot elektrisitet produsert i et kull- eller vannkraftverk.

Det skyldes at LCA tilbyr et strukturert rammeverk for hvordan man skal kartlegge inn- og utstrømmer av materialer og energi i industrielle (og noen naturlige) prosesser tilknyttet hele livsløpet til produktsystemer. En annen av hovedstyrkene til LCA er nettopp at det kreves en omfattende analyse som skal motvirke at man flytter utslipp fra et sted til et annet i et produktsystem. Et nærliggende eksempel er knyttet til biltrafikk, der elektriske biler har null utslipp av klimagasser i bruksfasen, men dersom en klimagassintensiv energikilde er brukt for å fremstille strømmen som brukes, vil den likevel kunne ha dårligere klimaprestasjon enn en bil drevet av fossile drivstoff (Messagie, et al. 2014). Selv om LCA-metodikk er beskrevet i internasjonale standarder (ISO 14040 og ISO 14044), i en lang rekke lærebøker (f.eks. Baumann og Tillman 2004) og metodesamlinger (JRC 2010), er det likevel store rom for valg innenfor det metodiske rammeverket og det er mange områder hvor det er rom for forbedringer av metodikken.

Innenfor LCA skiller man mellom to ulike analysetyper, såkalt *attributional* ("regnskaps-LCA") hvor man setter opp et regnskap over all material- og energibruk og alt avfall i en faktisk produksjonskjede og såkalt *consequential* ("konsekvens-LCA") hvor man forsøker å kartlegge hvordan et produkt vil medføre endringer i miljøbelastninger, blant annet ved å inkludere hvordan økt omsetning av angjeldende produkt vil endre det globale markedet. Dersom man skal dokumentere hvordan et bioenergiprodukt har blitt produsert vil det være riktig å benytte en "regnskaps-LCA", med så spesifikke data om inn- og utstrømmer som mulig. Dersom man i stedet skal se på effekter i form av økte eller reduserte utslipp som følge av nåværende eller fremtidig bioenergibruk, for eksempel hvordan en dobling i bioenergibruk i Norge i 2020 vil påvirke miljøet, vil det være riktigere å bruke en "konsekvens-LCA". I en slik LCA må man forsøke å kartlegge hvordan systemer endrer seg som følge av økt produksjon av bioenergi og må gjøre forutsetninger om hvilke marginale produksjonsteknologier som vil tas i bruk. Det vil også i en slik analyse være naturlig å regne med et større innslag av biodrivstoff i transportkjeder, samtidig som man må kartlegge ressursbegrensningene som finnes for biomassen og hvordan andre markeder påvirkes. Resultater fra de to ulike analysetypene kan være svært forskjellige for tilsynelatende like produkter. Derfor er det viktig med god kunnskap om LCA-metodikk for å kunne vurdere ulike analyser og resultater i litteraturen.

5.3 Ulemper med LCA i klimagassanalyser av skog til energiformål

Som for mange analysemetoder er det også for LCA slik at noen av de største fordelene samtidig er noen av de største ulempene. Fordelen ved at LCA dekker alle prosesser i et produktsystem innebærer også den ulempen at en LCA inneholder store mengder data om en lang rekke prosesser. På den ene siden gjør det at den som gjennomfører LCAen må skaffe til veie store mengder data og på den andre siden gjør det at den som skal lese LCAen kan ha vanskeligheter med å finne ut hvordan spesifikke prosesser er modellert eller om prosesser er utelatt.

Et av de synligste tegnene på vanskeligheter med hva som er inkludert og utelatt i LCAer av skog til energiformål, har vært en til tider opphetet debatt knyttet til utslipp av såkalt biologisk CO_2 fra bioenergisystemer. Mange studier av bioenergi har benyttet som grunnleggende forutsetning at biomassen er klimanøytral, det vil si at CO_2 frigjort ved forbrenning oppveies av den mengden CO_2 som tas opp i ny plantevekst. Denne forutsetningen om klimanøytralitet har blitt angrepet for å fremstille bioenergi som langt mer klimavennlig enn hva man i virkeligheten kan forutsette. Searchinger *et al.* (2009) understreker at bioenergiprodukter som substitutt for fossile energikilder i seg selv ikke garanterer klimagassreduksjoner. Snarere har kraft og varme fra bioenergikilder omtrent samme klimagassutslipp som tilsvarende fra fossile energikilder, mens biodrivstoff typisk fører til større klimagassutslipp enn fossile drivstoff. Potensialet for utslippsreduksjoner er dermed knyttet til at man kan binde mer karbon i biomassen som gror opp enn i den som ble forbrent. De peker på at gjødsel, jordbruks- og skogsavfall til energi vil være eksempler på bioressurser som ellers ville gitt utslipp uten å tilføre samfunnet noen funksjon. Samtidig understreker de at bruk av skog som begrenser seg til tilvekst, og dermed lar karbonlagret være intakt, likevel har en klimaeffekt ved at karbonlageret ville

økt dersom skogen ikke ble avvirket. Holtsmark (2014) har med flere publikasjoner brakt debatten om karbongjeld til norsk samfunnsdebatt. Dette vil diskuteres videre i kapitlet om klimaeffekten av bruk av skog til energiformål.

Fleksibiliteten som ligger i de to hovedtypene LCA gjør det også vanskelig å sammenligne resultater på tvers av studier. En analyse som skal se på potensielle utslipp knyttet til et bioenergisystem i 2100 vil nødvendigvis basere seg på andre data og forutsetninger enn et studie av et bioenergisystem i 2010, hvor man kan benytte eksisterende data. Selv om fleksibiliteten kan skape vanskeligheter for sammenligning, er den også helt nødvendig for å kunne gjøre et antall ulike studier med ulike formål.

6. Hva er klimaeffekten av å bruke skog til energiformål?

Det er få studier som har sett på det hele det norske energisystemet og forsøkt å gjøre noen analyse av klimaeffekten av økt uttak av skog til energiformål. Det som derimot finnes er en rekke rapporter og artikler som har sammenlignet ulike energiprodukter basert på forskjellige energiråvarer. Generelt kan vi si at studiene viser at skog til energiformål kan gi reduksjoner i klimagassutslipp. Cherubini og Strømman (2011) har gått gjennom en lang rekke artikler og rapporter og slår fast at disse presenterer klimagassutslipp for elektrisitetsproduksjon fra skogsbiomasse på 5-10 % av klimagassutslipp fra fossil strømproduksjon. Det er viktig å merke seg at de aller fleste studiene de har gjennomgått behandler såkalt biologisk CO_2 som nullutslipp av klimagasser. Det er altså tatt med en forutsetning om klimanøytralitet, hvor samme mengde karbon som slippes ut vil bindes igjen over tid.

6.1 Studier av uttak av skog

Det er gjennomført en hel del studier som bare ser på deler av verdikjeden fra uttak av skog og frem til ferdig (levert eller konsumert) bioenergiprodukt. Ingen slike har blitt inkludert i artikkelen av Cherubini og Strømman (2011), men spesielt de som tar for seg uttak av biomasse fra skog er viktige for dette oppdraget. I den sammenheng finnes det flere studier som er laget for nordiske forhold av Berg og Karjalainen (2003); Berg og Lindholm (2005); Lindholm (2010); Michelsen, Solli og Strømman (2008) og Timmermann og Dibdiakova (2014). Mens de tre førstnevnte studiene presenterer beregninger av klimagassutslipp knyttet til skogbruket i Sverige og Finland, legger de to sistnevnte fram tilsvarende beregninger for skogbruket i Norge. Michelsen et al. (2008) konsentrerte seg i sin studie om skogbruket i Midt- og Nord-Norge, mens Timmermann og Dibdiakova (2014) presenterte klimagassutslipp fra skogbruket på Østlandet. Begge de norske studiene er såkalte vugge-til-port analyser, dvs. at klimagassutslipp ble beregnet pr. kubikkmeter tømmer som ble produsert i skogen og framskaffet (levert) til industrien. Begge analysene omfattet de fleste prosessene innen skogbruket fra planteproduksjon, skogplanting og skogskjøtsel til avvirkning og tømmertransport. Mens begge studiene konkluderte med at nesten halvparten av utslippene skyldtes tømmertransport etter hogst, og rundt en tredjedel selve hogsten og utkjøringen av tømmeret, var de totale klimagassutslippene høyere pr. kubikkmeter levert tømmer under nordnorske forhold enn

under østnorske (hhv. 25 og 17,9 kg CO_2-ekv/m^3 tømmer). Dette kan forklares ved både lengre transport- og utkjøringsavstander i de nordlige landsdelene enn på det sentrale Østlandet, og delvis ved buken av noe forskjellige analysemetoder i de to studiene.

6.2 Overordnede studier av flere bioenergiprodukter

Mange studier undersøker bioenergiverdikjeder i en stor, global sammenheng. Målet er å si noe om hvordan verdens energisystem kan, eller bør, se ut for å oppnå god energitilgjengelighet og lave klimagassutslipp.

I studien "Carbon footprint of bioenergy pathways for the future Danish energy system" har COWI Danmark i samarbeid med Syddansk universitet undersøkt endringer i klimagassutslipp som følge av ulike scenarioer med innfasing av bioenergi i det danske energisystemet (Wenzel, et al. 2014). Overordnet tar prosjektet hensyn både til sannsynlig utvikling i verdens energibruk frem til 2050 og til milepæler knyttet til dansk energipolitikk i samme tidsrom. Det er derfor benyttet konsekvens-LCA som tilnærming og satt opp fire hovedscenarioer for energibruk per person i Danmark (fra 45 til 120 GJ/år), hvor det også er ulike forutsetninger knyttet til innfasing av, og konverteringsteknologier for, bioenergi. De har sett på 16 forskjellige konverteringsruter basert på 8 typer trevirke i tillegg til ulike ruter for gjødsel og halm. Det konkluderes med at kraftvarmeverk og endog kraftverk drevet av skogsbasert biomasse kan være klimamessig gunstig de førstkommende år. Allerede i 2020 vil imidlertid vindkraft være så dominant i energisystemet i henhold til modellen som er satt opp, at det ikke vil lønne seg klimamessig med biomassebasert strømproduksjon. Resultatene for skogsbasert bioenergi er veldig avhengig av scenarioer for arealbruksendringer.

IEA (2013) har studert Nordiske energisystemer frem mot 2050. Der konkluderes det med at "**Bioenergy will be the single largest energy carrier in 2050, raising questions over its supply.** The CNS [Carbon-Neutral Scenario] projects a net import of bioenergy to the Nordic region, making sustainability criteria all the more important" (s. 11, fet skrift i original). Det peker mot at det ikke bare er tilstrekkelig å se på miljøforholdene ved bruk av boreal nordisk skog til bioenergiformål, men at det også er viktig å se hvor det vil være aktuelt å hente bioenergikilder fra. IEA skriver også at karbonfangst og –lagring (CCS) vil være viktig både for reduksjon av klimagassutslipp fra industri og for energigenerering. Flere studier konkluderer med at bioenergisystemer inkludert CCS kan gi netto negative klimagassutslipp (se for eksempel Domenichini, et al. 2011, Bibas og Méjean 2013, Lindfeldt og Westermark 2009).

Det er ikke så enkelt fra IEAs rapport å finne hvilke klimagassutslipp som er assosiert med hvilken energiteknologi, men dette er da også et generelt problem med studier av bioenergisystemer; nemlig at detaljene forsvinner fra de overordnede studier og det er vanskelig å undersøke forfatternes forutsetninger, mens det overordnede perspektivet forsvinner fra detaljerte studier, som gjør det vanskelig å si hvordan for eksempel en ny produksjonsteknologi vil påvirke større energisystemer.

For norske forhold har Østfoldforskning, på oppdrag fra KLIF, laget en oversikt over klimagassutslipp knyttet til ulike biomassebaserte verdikjeder og sammenlignet disse med

konvensjonelle produkter (i hovedsak bioenergiprodukter versus fossile energiprodukter, men også en sammenligning av en trebjelke mot en stålbjelke) (Lyng, et al. 2010). De fleste kraftvarme- og biodrivstoffalternativene leverer solide klimagassbesparelser med mellom 180 og 740 kg CO_2/fm³. Det er to verdikjeder som peker seg ut med positive klimagassutslipp også i sammenligning med andre produkter: 1) varmeproduksjon fra ved sammenlignet med varme fra elektrisitet basert på vannkraft og 2) trebasert BtL (biodiesel) sammenlignet med fossil diesel, når det er benyttet fossil energi for å fremstille biodrivstoffet. Utregningene er basert på en rekke litteraturkilder og det presiseres at det har vært viktig å finne kilder som er relevante for norske forhold.

6.3 Studier av kraft- og varmeproduksjon

Vattenfall er en kraftprodusent som tidlig var ute med å ta i bruk LCA-metodikk for å dokumentere miljøegenskapene til egne anlegg. I en rapport fra 2005 (Vattenfall 2005) presenteres resultater for ulike kraftproduserende teknologier i Sverige. "Bio-fuelled CHP" har der utslipp av "fossilt" CO_2 på ca 16 g/kWh, og det er sannsynlig at dette er knyttet til deler av verdikjeden der fossile energikilder benyttes. Biomassedrevet kraft- og varmeproduksjon presterer langt bedre enn kraft- og varmeproduksjon basert på fossile kilder i den samme rapporten, og er snarere sammenlignbart med vann-, vind- og kjernekraft for CO_2-utslipp. I en nyere rapport (Vattenfall 2012) sammenligner Vattenfall produksjonen av strøm fra ulike energikilder ved alle sine anlegg i Norden. I denne nyere rapporten er det delt opp miljøprestasjon mellom kraftvarmeverk basert på treflis og tilsvarende basert på halm. Klimagassutslippene fra trefyrt kraftvarmeverk har et utslipp på 15 g CO_2-ekv./kWh. Legg merke til at notasjonen for klimagassutslipp har endret seg. I stedet for å snakke om fossilt CO_2 som i 2005-rapporten, snakkes det om CO_2-ekvivalenter i 2012-rapporten, hvilket gir inntrykk av at det også er inkludert andre drivhusgasser enn bare CO_2. I beskrivelsen av forutsetninger har de understreket at CO_2-utslipp knyttet til forbrenning av biomasse er utelatt, mens utslipp fra uttak, transport og flising er inkludert.

Brekke, Raadal og Modahl undersøkte kraft- og varmeproduksjon fra skogsbasert biomasse i et oppdrag for NVE (Brekke, Raadal og Modahl 2008). Der ble det gjort en teoretisk studie av fem ulike oppsett for kraftvarmeproduksjon fra biomasse. Alle fem alternativene var realistiske anlegg med anleggsstørrelser på fra 1 til 240 MW elektrisk effekt, med ulik nærhet til råstoff, med nasjonale og importerte råvarer og med ulik avsetning for varme. Alle alternativene var forutsatt å bli basert på ekstra uttak eller økt bruk av restprodukter (GROT), og det var derfor ikke sett på miljøbelastninger knyttet til dyrking av skog. Det er gjort grundige beregninger på hvor stort område rundt hvert av produksjonsanleggene som må levere biomasseressurser, basert på gjennomsnittlig mengde skog i fylket der anlegget er plassert. Det er heller ikke sett på utslipp av såkalt biologisk CO_2, altså CO_2-utslippene ved forbrenning av biomassen, og den tidsforsinkelsen som vil være til tilsvarende mengde karbon er tatt opp i ny biomasse. Konklusjonen er at små anlegg med nærhet til råvare og avsetning for produkt har minst miljøbelastning og nesten sammenlignbart med vannkraft, mens store anlegg med importerte råvarer og liten avsetning for varme har en miljøprestasjon sammenlignbar med gasskraft (selv uten inkludering av biologisk CO_2!).

Raymer (2006) påpeker det at det er viktig å ha med utslipp av CH_4 og N_2O i tillegg til CO_2 hvis biobrensel brukes i små ovner. En kubikkmeter ved avgir 61-73 kg CO_2-eq i løpet av livssyklusen, den laveste verdien for furu og høyest for bjørk. Størsteparten av utslippene skyldes dannelse av CH_4 under forbrenningen av biobrensel. Dette er 14-19 % av klimagassutslippene fra konvensjonell oppvarming, avhengig av om biobrenslet erstatter olje- eller kullbasert elektrisitet. En m^3 av sagflis eller bark avgir 25 og 21 kg CO_2-eq, henholdsvis. Briketter og pellets ble målt i tonn i stedet for m^3, og begge fører til utslipp av 59 kg CO_2-eq pr. tonn. Utslipp fra briketter og pellets stammer hovedsakelig fra produksjon av sagflis og fra forbrenning. Sammenlignet med olje, gir de 5 % av klimagassutslippene.
Solli et al. (2009) evaluerte miljøeffekter av trebaserte oppvarmingsteknologier ved bruk av en gammel og en moderne ovn. Det var en signifikant forskjell i livløpsregnskapene mellom en vedovn med moderne teknologi og en med eldre teknologi. Ved sammenligning av nyere og eldre oppvarmingsteknologi, viser resultatene at den nye teknologien bidrar til en betydelig forbedret ytelse (28-80 %) for alle typer av miljøbelastning som ble studert. Både gamle og nye vedovner gir vesentlig lavere utslipp av klimagasser enn bruk av elektrisitet fra Nordisk elektrisitetsmiks pr. kilowattime. En ny vedovn slipper ut 80g CO_2-eq / kWh, en gammel ovn 110 g CO_2-eq / kWh og bruk av elektrisitet 210 g CO_2-eq / kWh. Ettersom det er en stor andel av gamle vedovner som fortsatt er i bruk i Norge, kan man oppnå betydelige reduksjoner i miljøbelastninger ved å bytte ut disse med moderne vedovner, spesielt når det gjelder forbrenningsprodukter som påvirker menneskets helse.

De viktigste kildene til usikkerhet for å utføre en livsløpsanalyse av forbrenning av biomasse er hvilken teknologi som brukes til forbrenning, hvilke fossile kilder som blir erstattet, biobrenslets densitet, og effektive brennverdier. Hvilken energikilde som er byttet ut, og hvilke teknologier som skal brukes, avhenger av markedsforholdene.

6.4 Studier av biodrivstoff

Mange rapporter og artikler om bioenergiprodukter ser på miljøprestasjonen til ulike typer biodrivstoff. En av grunnene som oppgis er at man for transportsystemer ikke har så mange alternativer til fossile drivstoff, og at biodrivstoff derfor kan være et viktig middel for reduksjon av klimagassutslipp, i hvert fall i et kortsiktig perspektiv. Andre bioenergiprodukter, som strøm og varme, har flere fornybare konkurrenter (for eksempel vind, vann og sol) og det er derfor enklere å substituere fossile energibærere innen slike produktområder.

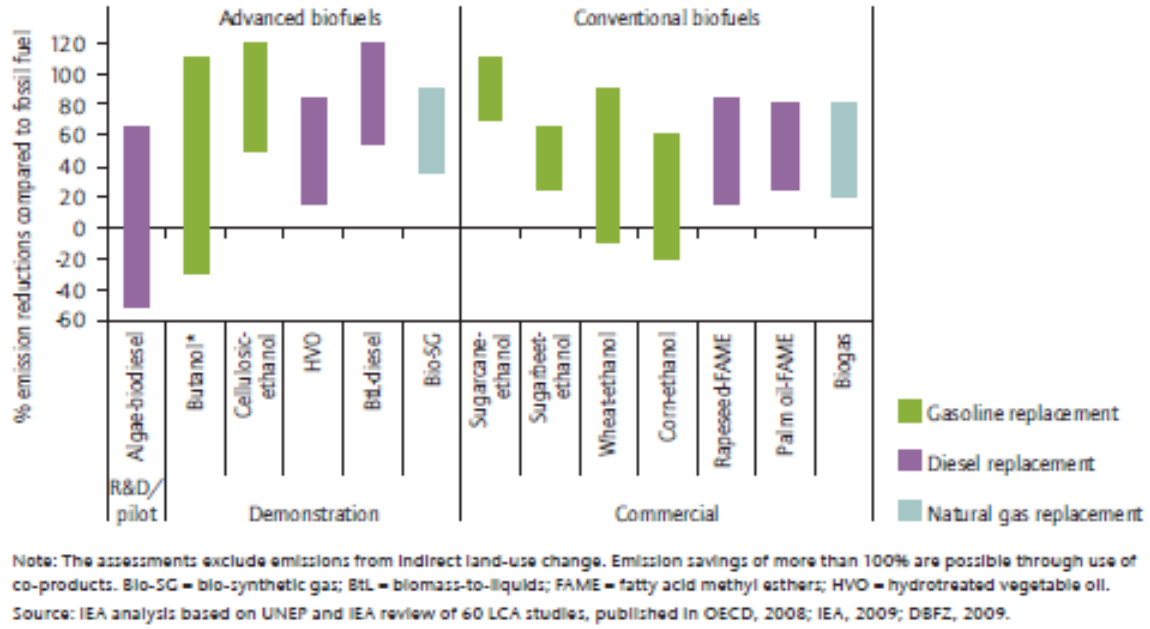
Sunde, Brekke og Solberg (2011a, 2011b) har gjort en gjennomgang av studier av såkalt "Woody BtL", altså biodiesel laget fra skogsbiomasse. I den første av disse, sammenligner forfatterne drivstoff fra skogsbasert biomasse med drivstoff laget fra ulike fettsyrer (palmeolje, slakteavfall, tallolje, rapsolje, osv), enten som hydrogenert vegetabilsk olje (HVO) eller transesterifiserte lipider (Sunde, Brekke og Solberg 2011a). Artikkelen oppgir klimagassutslipp på 8-30 g CO_2/MJ for biodrivstoff basert på skogsbiomasse, 2-26 g CO_2/MJ for biodrivstoff basert på avfalls- eller biproduktoljer og 23-698 g CO_2/MJ for jordbruksbaserte oljer. Til sammenligning er fossil diesel rapportert å ha et utslipp på 83,8 g CO_2/MJ produsert. Den ekstremt høye verdien for jordbruksprodukter er basert på oljepalmer der arealbruksendring fra karbonlagrende skog

til oljepalmeplantasje er inkludert (ILUC). Det konkluderes med at HVO basert på avfalls- og biprodukter gir de minst kostnadskrevende og mest miljøvennlige kombinasjonene av råvarer og produksjonsteknologi. Biodrivstoff fra skogsbiomasse er bedre miljømessig og sammenlignbare kostnadsmessig med jordbruksbaserte råstoff, samtidig som skogsbiomasse i mindre grad må konkurrere med areal for matproduksjon.

I den andre artikkelen gjennomgås en lang rekke LCA-studier for å gi mer detaljerte innsikter i miljøbelastninger og kostnader knyttet til biodrivstoff fra skogsbasert biomasse (Sunde, Brekke og Solberg 2011b). Her er bare skogsbasert biomasse inkludert, selv om det både er sett på ulike skogressurser (skogsavfall, avfallstømmer, og tresorter med kort og lang rotasjonstid) og det er gjort en sammenligning mot fossile drivstoff. De rapporterer at produksjon av skogsbasert biomasse krever fra 1,3 til 2,9 MJ/km mer energi WTW (Well-to-wheel, brønn til hjul) enn hva fossil diesel krever.

På den annen side rapporter de samme studiene som danner grunnlag for artikkelen at kan man oppnå besparelser på alt fra 45 til 205 g CO_2/km med skogsbasert diesel sammenlignet med fossil diesel. Når det gjelder andre miljøbelastninger er bildet mer nyansert; det rapporteres at avfallsprodukter gir en bedre miljøprestasjon for kategorier som *forsuring, eutrofiering* og *toksisitet* enn hva fossil diesel gir, mens uttak av ny skog kan gi høyere miljøbelastning i disse kategoriene. Det er imidlertid høyere kostnader forbundet med skogbasert diesel enn fossil diesel, kostnader som igjen er avhengige av hvilken råvare som benyttes, størrelse på fabrikk og konverteringseffektivitet. Forfatterne diskuterer problemene med ulikheter i LCA-metodikk benyttet for ulike studier. Blant annet har alle studiene som er gjennomgått i artikkelen definert biologisk CO_2 som nullutslipp og forfatterne innfører diskusjonen om karbongjeld. Flere artikler har pekt på at den mest bærekraftige bruken av biomasse fra skog er å først benytte den til langlivede produkter, som til slutt i livsløpet blir energigjenvunnet for eksempel til drivstoff.

IEA (2010) har gjort en sammenfatning av en lang rekke LCA-analyser av biodrivstoff som gjør det mer visuelt synlig hvilket potensiale biodrivstoff har for å redusere klimagassutslipp.



Note: The assessments exclude emissions from indirect land-use change. Emission savings of more than 100% are possible through use of co-products. Bio-SG = bio-synthetic gas; BtL = biomass-to-liquids; FAME = fatty acid methyl esthers; HVO = hydrotreated vegetable oil.
Source: IEA analysis based on UNEP and IEA review of 60 LCA studies, published in OECD, 2008; IEA, 2009; DBFZ, 2009.

Figur 6 Klimagassutslippsreduksjoner fra ulike biodrivstoff (fra (IEA 2010)

Som man kan se fra figuren har de to biodrivstoffene vi fokuserer på her, bioetanol og FT-diesel, et potensiale på å redusere klimagassutslipp med 60 til 120 %. De presiserer at en reduksjon på mer enn 100 % kommer som en følge av at biprodukter fører til ekstra besparelser. I alle studiene inkludert her, er utslippet av biologisk CO_2 regnet som klimanøytralt og satt lik 0.

Bright, Strømman og Peters (2011) undersøkte henholdsvis substitusjon av fossil diesel med biodiesel og substitusjon av oljefyring med biopellets. De inkluderte både albedoeffekt og tidsdynamikk. De konkluderer med at man får en positiv klimaeffekt (reduserte klimagassutslipp også over tid) når man substituerer oljefyring med pellets, men ved substitusjon av diesel til transport med biodiesel var effekten negativ etter noen år. De konkluderer med at bioenergiprodukter fra boreal skog er mer sensitive til alternativene det sammenlignes med, enn bioenergiprodukter fra andre skogstyper på grunn av lang rotasjonstid.

Resultater kan sprike veldig avhengig av hvilke forutsetninger som gjøres. I en studie av biobasert flydrivstoff rapporterer Bailis og Baka (2010) at klimagassutslippene kan bli 85 % mindre hvis biomassen dyrkes på tidligere jordbruksareal, mens de kan bli 60 % større hvis biomassen dyrkes på tidligere skogsareal. Dette skyldes utslipp fra direkte arealbruksendringer (dLUC), som henger sammen med hvor mye karbon som bindes i jordsmonnet. For norske forhold vil det sannsynligvis ikke være like aktuelt med store arealbruksendringer, men Saure (2014) problematiserer en overgang fra en type skog til en annen (fra lauvskog til barskog). Hun skriver at det kan gi en positiv effekt til karbonlagring, men ha negative konsekvenser blant annet for biologisk mangfold.

Holtsmark (2014) har beregnet at klimaeffekten i et 100-årsperspektiv av bruk av saktevoksende skog til energiformål er verre enn å la skogen stå og binde karbon og helle bruke olje og gass som energikilder.

Holtsmarks resultater er ganske like som resultater presentert i KLIFs rapport i 2011 (KLIF 2011) og i arbeid utført ved NTNU (Bright, Strømman og Peters 2011, Cherubini, Bright og Strømman, Site-specific global warming potentials of biogenic CO2 for bioenergy: Contributions from carbon fluxes and albedo dynamics 2012). Likevel er konklusjonene ytterst forskjellige. Ulike konklusjoner kan nok i ganske stor grad tilskrives hvordan man vekter muligheten for et såkalt "tipping-point", altså et punkt hvor klimagassnivået i atmosfæren er så stort at det utløser et sett med irreversible mekanismer. Eksempler på slike mekanismer er smelting av is i Arktis og Antarktis, som i sin tur senker albedoen i de samme områder og bidrar til større temperaturøkning, og smelting av tundra i Sibir, som i sin tur fører til store utslipp av lagret metan. Holtsmark legger stor vekt på nåtidige klimagassutslipp og det ligger

I IPCCs femte hovedrapport, delrapport 3 (IPCC 2014) er det klart formulert at verdens energisystemer er nødt til å ha en stor andel bioenergi innen 2050 med en innfasing av bioenergi med CCS mot 2100 for at det skal være sannsynlig å nå 2-gradersmålet. Med fortsatt bruk av fossile energikilder vil konsentrasjonen av klimagasser i atmosfæren overstige konsentrasjoner som gjør det til et sannsynlig mål.

6.5 Hva med skog til materialprodukter?

Det er gjennomført en mengde livsløpsvurderinger av skogsbaserte produkter som papp, papir, møbler og byggevarer. De kan gi verdier for klimaeffekten av produktene. Problemet er bare at det ofte er vanskelig å velge hvilke alternative produkter man skal sammenligne med. Hvilke alternativer har man til papir, og hvordan skal disse tallfestes? Er byggevarer direkte alternativer, eller må de ses i sammenheng med hele bygg?

Lyng et al. (2010) konkluderer med at trebjelke som erstatning for stålbjelke er det beste bruksområdet for skogsbasert biomasse i et klimaperspektiv, sammenlignet med en lang rekke energiprodukter. En fast kubikkmeter (fm^3) skog kan bidra til en reduksjon på 964 kg CO_2-ekvivalenter om all skogen benyttes til trebjelker som erstatning for stålbjelker (med en gjennomsnittlig mengde resirkulert stål). Nå er det vanskelig å si akkurat hvor mye stålbjelker som kan erstattes og det er lettere å gjøre beregninger av hvordan bioenergiprodukter som kraft eller biodrivstoff kan erstatte kWh eller MJ basert på fossile energikilder.

Likevel vil det være viktig å inkludere materialprodukter i livsløpsvurderinger av trevirke fra skog, både fordi utslippene fra avvirkning bør fordeles riktig på de produktene som lages og fordi karbon kan lagres også i produkter, som i sin tur kan benyttes til energi etter endt levetid.

6.6 Kapitteloppsummering

Kapitlet har presentert en rekke studier som er gjort av verdikjeder for bioenergiprodukter med skog som råmateriale. Det har vært pekt på resultater og på noen metodiske og praktiske utfordringer. Hovedkonklusjonen er at skog brukt til energiformål kan redusere globale klimagassutslipp på lang sikt, selv om det er noen usikkerhet knyttet til konsentrasjonen av klimagasser i atmosfæren på kort sikt. De viktigste faktorer er:

- Tilbakebetalingstid
- Albedo
- Antagelse om "tipping point"
- Biomassens opprinnelse
- Treslag

7. Hvilke andre miljøkonsekvenser gir bruk av skog til energiformål?

Som beskrevet under kapitlet om hvordan man kan finne klimaeffekter ved bruk av skog til energiformål, vil en LCA normalt inneholde flere ulike potensielle miljøbelastninger. I studier av miljøeffektene knyttet til bruk av skog til energiformål laget for bare få år siden gjøres det grundig arbeid med å presentere resultater for forsuring, overgjødsling og andre potensielle miljøbelastninger som kan oppstå i produksjonskjeden. De siste årene har det imidlertid blitt mindre og mindre fokus på andre miljøkategorier enn klimaendringer. Det er nok en lang rekke årsaker til dette: at klimaendringer er det sannsynligvis største og viktigste miljøproblemet (spesielt knyttet til bioenergi), at det er vanskelig å tallfeste biologisk mangfold (som alltid har vært fremhevet som viktig i miljøanalyser knyttet til industriell bruk av skog), og at ulike standarder for hogst og skogpleie har bidratt til at skogeiere må ta hensyn til biologisk mangfold.

I Ibenholts (2011) litteraturgjennomgang viser hun til et studie fra 2007 der det er benyttet flere miljøbelastningskategorier og vekting for å finne de beste drivstoffalternativene i en sammenligning av biodrivstoff og konvensjonelle drivstoff. Også Brekke, Raadal og Modahls (2008) studie av kraftvarmeproduksjon har fokus på at det er mange potensielle miljøbelastninger knyttet til bioenergisystemer og benytter vekting for å sammenligne alternativer. Man ser imidlertid også der at klimaeffektene overskygger de andre resultatene.

Fordi det i senere tid har vært få studier som bringer inn flere miljøbelastninger, et poeng understreket av Sunde, Brekke og Solberg (2011b), er det ikke her gjort noe forsøk på å oppsummere hvilke andre miljøeffekter som vil oppstå ved bruk av skog til energiformål.

8. Konklusjon: fordeler og ulemper ved bruk av norsk skog til energiformål med hensyn til klimaeffekter

Rapporten har beskrevet skogens rolle i klimasystemet, mengden trevirke i norske skoger, hva man benytter trevirke til, hvordan man har beregnet klimaeffekten av skog til energiformål i tidligere studier og hva resultatene fra slike studier har vært.

Det er tydelig fra resultatene at norsk skog brukt til energiformål har mulighet til å være med å redusere klimagassutslipp. Akkurat hvor store reduksjoner skogen kan bidra til er avhengig både av hvordan man praktisk benytter skogen og hvordan man regner på reduksjonene. Diskusjonen om tilbakebetalingstid for karbonet som slippes ut i forbindelse med bruk av skog til energiformål er nok langt fra over, men IPPC konkluderer med at bioenergi, og etter hvert bioenergi med karbonfangst og –lagring, er en viktig del av løsningen for fremtidens energisystemer.

Fordelene ved å benytte norsk skog til energiformål er først og fremst:

- Energiproduktene laget fra norsk skog kan erstatte fossile brensler med store klimagassutslipp.
- De sparte klimagassutslippene fra unngått bruk av fossile brensler er mest sannsynlig større enn karbontapet ved at skogen ikke blir stående og lagre karbon, men det er avhengig av virkningsgrader i produksjonskjeden.
- Norsk skog har en årlig tilvekst av biomasse, som kan benyttes uten at det går utover skogens evne til ny vekst.
- Norsk skog består av mange trær i hogstmoden alder.
- Norge har snø om vinteren, som betyr at i perioden umiddelbart etter hogst vil det være en positiv klimaeffekt som følge av albedo.

- Ved å fordele belastninger på både material- og energiformål, kan man oppnå ytterligere klimagassutslippsreduksjoner.
- Skogen finnes allerede i Norge, man trenger derfor ikke importere trær og eventuelt skape arealbruksendringer andre steder i verden.

Ulempene ved å benytte norsk skog til energiformål er først og fremst:

- Norsk skog har lang rotasjonstid og det tar derfor tid fra karbonet i biomassen blir frigjort ved energigenerering til samme mengde karbon blir bundet i ny biomasse.
- Trær inneholder mye vann og har forholdsvis lav energitetthet.
- Økt avvirkning kan ha en negativ effekt på biomangfold i skog.
- Selv med årlig tilvekst vil man begrense mengden karbon som lagres dersom det avvirkes mer skog.
- Kostnadsnivået i Norge er høyt og bioenergi er en relativt dyr energiløsning.

9. Referanser

Agostini, Alessandro, Jacopo Giuntoli, Aikaterini Boulamanti, og Luisa (red.) Marelli. *Carbon accounting of forest bioenergy: Conclusions and recommendations from a critical literature review.* Brussel: European commission, Joint Research Centre, 2013.

Astrup, R., L. Dalsgaard, R. Eriksen, og G. Hylen. *Utviklingsscenarioer for karbonbinding i Norges skoger.* Oppdragsrapport fra Skog og landskap 16/2010, Ås: Norsk insitutt for skog og landskap, 2010.

Bailis, R. E., og J. E. Baka. «Greenhouse Gas Emissions and Land Use Change from Jatropha Curcas-Based Jet Fuel in Brazil.» *Environmental Science & Technology*, 2010: 44 (22): 8684. doi:10.1021/es1019178.

Baumann, Henrikke, og Anne-Marie Tillman. *The Hitch Hicker's Guide to LCA.* Lund: Studentlitteratur, 2004.

Belbo, Helmer, og Simen Gjølsjø. *Trevirke - brennverdier og energitetthet.* Viten fra skog og landskap 01/08, Ås: Norsk institutt for skog og landskap, 2008.

Berg, Lena N., Per F. Jørgensen, Petter H. Heyerdahl, og Gunnar Wilhelmsen. *Bioenergiressurser i Norge.* Oppdragsrapport A NVE nr 7- 2003, Oslo: NVE, 2003.

Berg, S., og E.L. Lindholm. «Energy use and environmental impacts of forest operations in Sweden.» *Journal of Cleaner Production* 13 (2005): 33-42.

Berg, S., og T. Karjalainen. «Comparison of greenhouse gas emissions from forest operations in Finland and Sweden.» *Forest* 76, nr. 3 (2003): 271-284.

Bergseng, Even, Tron Eid, Per Kristian Rørstad, og Erik Trømborg. *Bioenergiressurser i skog – kartlegging av økonomisk potensial.* NVE-rapport nr. 23-2012, Oslo: NVE, 2012.

Bernhard, Peter, og Lars Bugge. *Biomasse – nok til alle gode formål?* Oslo: KanEnergi, 2007.

Bibas, R., og A. Méjean. «Potential and limitations of bioenergy for low carbon transitions.» *Climate Change* Special Issue Dec2013 (2013).

Borregaard. *Borregaard - Ordinær generalforsamling.* Oslo, 23 April 2014.

BP. *BP Statistical Review of World Energy 2014.* BP, tilgjengelig på: http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2014/BP-statistical-review-of-world-energy-2014-full-report.pdf, 2014.

Brekke, Andreas, Hanne Lerche Raadal, og Ingunn Saur Modahl. *LCA (livsløpsvurdering) av kraft- og varmeproduksjon basert på bioenergi.* NVE rapport nr 1-2008, Oslo: NVE, 2008.

Bright, R. M., A. H. Strømman, og G. Peters. «Radiative Forcing Impacts of Boreal Forest Biofuels: A Scenario Study for Norway in Light of Albedo.» *Environmental Science & Technology*, 2011: 45(17): 7570-7580.

Bright, R. M., R. Astrup, og A. H. Strømman. «Empirical models of monthly and annual albedo in managed boreal forests of Interior Norway.» *Climatic Change*, 2013: 120: 183-196.

Cherubini, F., A.H. Strømman, og E. Hertwich. «Climate impact of CO2 emissions from bioenergy: effect of management practices of boreal forests.» *Ecological modeling* 223 (2011): 59-66.

Cherubini, F., R. M. Bright, og A. H. Strømman. «Site-specific global warming potentials of biogenic CO2 for bioenergy: Contributions from carbon fluxes and albedo dynamics.» *Environmental Research Letters*, 2012: 7.

Cherubini, Francesco, og Anders Hammer Strømman. «Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges.» *Bioresource Technology* 102 (2011): 437-451.

Cherubini, Francesco, Thomas Gasser, Ryan M. Bright, Philippe Ciais, og Anders H. Strømman. «Linearity between temperature peak and bioenergy CO2 emission rates.» *Nature climate change*, 2014.

Ciais, P., et al. «Carbon and other biogeochemical cycles.» I *Climate change 2013: The physical science basis*, av T.F. Stocker, et al. Cambridge, UK og New York, USA: Cambridge University Press, 2013.

Ciraig. «Instruction manual: New Generation Carbon Footprinting - thanks to the Dynamic carbon footprinter v1.0.» 2014. http://www.ciraig.org/pdf/DYNCO2_InstructionManual.pdf.

Clarke, Nicholas, et al. «Vi kan få bærekraftig bioenergi fra skog.» *Aftenposten*, 12 2014.

De Wit, H., og S. Kvindesland. «Carbon stocks in Norwegian forest soils and effects of forest management on carbon storage.» Rapport fra skogforskningen Supplement 14, 1999.

Domenichini, R., F. Gasparini, P. Cotone, og S. Santos. «Techno-economic evaluation of biomass fired or co-fired power plants with post combustion CO2 capture.» *Energy Procedia* 4 (2011): 1851-1860.

Ecoinvent Centre. «Ecoinvent 3.1.» 2014.

Eggers, Thies. *The Impacts of Manufacturing and Utilisation of Wood Products on the European Carbon Budget.* Internal Report 9, Göttingen: European Forest Institute, 2002.

Graabak, Ingeborg, og Nicolai Feilberg. *CO2 emissions in different scenarios of electricity generation in Europe.* Trondheim: Sintef Energi AS, 2011.

Granhus, A., G. Hylen, og J.E.Ø. Nilsen. *Skogen i Norge. Statistikk over skogforhold og skogressurser i Norge registrert i perioden 2005-2009 (Statistics of Forest Conditions and Resources in Norway).* Ressursoversikt fra Skog og landskap 03/2012, Ås: Norsk institutt for skog og landskap, 2012.

Granhus, A., R. Eriksen, og S.O. Moum. *Resultatkontroll skogbruk/miljø. Rapport 2012.* Oppdragsrapport fra Skog og landskap 05/2013, Ås: Norsk institutt for skog og landskap, 2013.

Grønlund, A., K. Bjørkelo, G. Hylen, og S. Tomter. «CO2-opptak i jord og vegetasjon i Norge: Lagring, opptak og utslipp av CO2 og andre klimagasser.» Bioforsk Rapport Vol. 5 Nr. 162 , 2010.

Güell, Berta Matas, Mette Bugge, Rajesh S. Kempegowda, Anthe George, og Scott M. Paap. *Benchmark of conversion and production technologies for synthetic biofuels for aviation.* Tilgjengelig på: http://www.avinor.no/avinor/miljo/10_Biodrivstoff, 2013.

Hamnaberg, Håvard (red.), Karen Nybakke, og Seming Skau. *Tilgangen til fornybar energi i Norge: Et innspill til Klimakur 2020.* NVE-rapport nr 2-2010, Oslo: NVE, 2010.

Hamnaberg, Håvard, og Maria (red.) Sidelnikova. *Bioenergi i Noreg: Mot ein kostnadskurve for meir uttak.* NVE-rapport 25/2011, Oslo: NVE, 2011.

Haugland, Hege, et al. *Målrettet gjødsling av skog som klimatiltak – egnede arealer og miljøkriterier*. . M174/2014, Oslo: Miljødirektoratet, 2014.

Holtsmark, Bjart. *A comparison of the global warming effects of wood fuels and fossil fuels taking albedo into account.* Discussion papers no. 778, Oslo: SSB, 2014.

Holtsmark, Bjart. «Harvesting in boreal forests and the biofuel carbon debt.» *Climatic Change*, 2012: 112(2): 415-428.

Holtsmark, Bjart. «Ikke bærekraftig produksjon.» *Aftenposten*, 12 2014.

Horn, Svein Jarle, Gustav Vaaje-Kolstad, Bjørge Westereng, og Vincent GH Eijsink. «Novel enzymes for the degradation of cellulose.» *Biotechnology for biofuels* 5, nr. 45 (2012).

Ibenholt, Karin. *Biodrivstoff: hva er netto klimaeffekt? - en oversikt over nyere forskning.* Rapport nummer 2011/6, Oslo: Vista Analyse, 2011.

IEA. *Nordic Energy Technology Perspectives: Pathways to a Carbon Neutral Energy Future.* Paris: OECD/IEA, 2013.

IEA. *Technology Roadmap: Biofuels for transport.* Paris: IEA, 2010.

IPCC. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* IPCC, Cambridge, UK og New York, USA: Cambridge University Press, 2014.

Jandl, R., et al. «How strongly can forest management influence soil carbon sequestration?» *Geoderma* 137, nr. 3–4 (2007): 253-26.

Joint Research Centre. *ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance.* Brussel: European Commision, Joint Research Centre, 2010.

Jørgensen, Per F., og Peter Bernhard. *Elproduksjon basert på biobrensler: Teknisk/økonomisk potensial.* Oppdragsrapport A NVE nr 1-2004, Oslo: NVE, 2004.

«Karbonbinding i skogsjord. Fagartikkel.» *Skog og landskap*. 2008. http://www.skogoglandskap.no/fagartikler/2008/karbonbinding_i_skogsjord/newsitem.

KLIF. *Skog som biomasseressurs.* TA 2762, Oslo: KLIF, 2011.

KLIF. *Skog som biomasseressurs.* Oslo: KLIF, 2011.

KLIF. *Utslipp av klimagasser i Norge 1990-2010 – trender og drivkrefter.* TA 3022, Oslo: KLIF, 2013.

Kosberg, og M. *Analyse av tekniske og økonomiskeforhold ved kraft-varmeproduksjon og fjernvarmeanlegg ved økte energipriser og CO2-avgifter*. Masteroppgave, Trondheim: NTNU, 2010.

Levasseur, Annie. «Instruction Manual: New Generation Carbon Footprinting - thanks to the Dynamic carbon footprinter v1.0.» *CIRAIG - DYNCO2 Dynamic Carbon Fottprinter*. 2013. http://www.ciraig.org/pdf/DYNCO2_InstructionManual.pdf.

Lindfeldt, Erik G., og Mats O. Westermark. «Biofuel production with CCS as a strategy for creating a CO(2)-neutral road transport sector.» *Energy Procedia*, 2009: 4111-4118.

Lindholm, og E.L. *Energy use and environmental impact of roundwood and forest fuel production in Sweden.* Dissertation, Lund: Swedish University of Agricultural Sciences, 2010.

Lyng, Kari-Anne, Andreas Brekke, Ingunn Saur Modahl, og Anne Rønning. *Skog som biomasseressurs. Livsløpsdata for utslipp av klimagasser for skog til ulike formål.* OR.30.10, Fredrikstad: Østfoldforskning, 2010.

Melbye, Anne Marit, og Magnus Killingland. *Teknologi og aktøroversikt biobrensel og biodrivstoff: Skogen som energibærer.* Oslo: Rambøll, 2013.

Melbye, Anne Marit, Per Kristian Rørstad, og Magnus Killingland. *Bioenergi i Norge.* . NVE-rapport 41-2014, Oslo: NVE, 2014.

Messagie, M., F. S. Boureima, T. Coosemans, C. Macharis, og J. V. Mierlo. «A Range-Based Vehicle Life Cycle Assessment Incorporating Variability in the Environmental Assessment of Different Vehicle Technologies and Fuels.» *Energies* 7, nr. 3 (2014): 1467-1482.

Michelsen, O., Ch. Solli, og A.H. Strømman. «Environmental impact and added value in forestry operations in Norway.» *Journal of Industrial Ecology* 12 (2008): 69-81.

Miljødirektoratet. *Kunnskapsgrunnlag for lavutslippssamfunnet.* M229, Oslo: Miljødirektoratet, 2014b.

—. «Norske biler kjører på raps.» 2014c. http://www.miljodirektoratet.no/no/Nyheter/Nyheter/2014/Mai-2014/Norske-biler-kjorer-pa-raps/ (funnet 2014).

Miljøverndepartmentet. «Kapittel 3. Omsetningskrav for biodrivstoff og bærekraftskriterier for biodrivstoff og flytende biobrensel.» I *Produktforskriften*, av Miljøverndepartementet. Tilgjengelig på: https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-06-01-922, 2014.

Nilsen, P., K. Hobbelstad, og N. Clarke. *Opptak og utslipp av CO2 i skog. Vurdering av omløpstid, hogstmetode og hogstfredning for CO2-binding i jord og trær.* Oppdragsrapport fra Skog og landskap 06/2008, Ås: Norsk institutt for skog og landskap, 2008.

Nobio. *Bioenergi i Norge: Markedsrapport Pellets og briketter 2012.* Tilgjengelig på: http://nobio.no/upload_dir/pics/Pris-og-salgsstatistikk-for-bioenergi-i-Norge-2012-pellets-og-briketter.pdf, Nobio, 2013.

NVE. *Kostnader ved produksjon av kraft og varme.* Håndbok nr 1/2011, Oslo: NVE, 2011.

O'Halloran, T. L., et al. «Radiative forcing of natural forest disturbances.» *Global Change Biology*, 2012: 18(2): 555-565.

Pimentel, D., og T.W. Patzek. «Ethanol production using corn, switchgrass, and wood: Biodiesel production using soybean and sunflower.» *Natural Resources Research*, 2005: 14: 65-76.

Plevin, Richard J., Mark A. Delucchi, og Felix Creutzig. «Using Attributional Life Cycle Assessment to Estimate Climate-Change Mitigation Benefits Misleads Policy Makers.» *Journal of Industrial Ecology* 18 , nr. 1 (2013): 73-83.

Rambøll. *Bærekraftig biodrivstoff for luftfart.* Tilgjengelig på: http://www.avinor.no/avinor/miljo/10_Biodrivstoff, 2013.

Raymer, og A.K.P. «A comparison of avoided greenhouse gas emissions when using different kinds of wood energy.» *Biomass and Bioenergy* 30 (2006): 605–617.

Saure, Heidi Iren. *Skogplanting som klimatiltak - Litteraturstudie og drøfting med fokus på nordiske tilhøve.* Bergen: NLA Høgskolen Bergen, 2014.

Searchinger, T., et al. «Use of U.S. croplands for biofuels increase greenhouse gases through emissions from land-use change.» *Science*, 2008: 319: 1238-1240.

Searchinger, Timothy D., et al. «Fixing a Critical Climate Accounting Error.» *Science*, 2009: Vol 326, http://10.1126/sceince.1178797.

Solheim, H. «Råtesopper - i levende trær .» *Brosjyre fra Skog og landskap.* 2010.

Solli, Ch., M. Reenaas, A.H. Strømman, og E.G. Hertwich. «Life cycle assessment of wood-based heating in Norway.» *International Journal of Life Cycle Assessment* 14 (2009): 517–528.

Solomon, S., et al. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.* Cambridge og New York: Cambridge University Press, 2007.

SSB. *Energiregnskap og energibalanse, 2012-2013.* Tilgjengelig på: http://ssb.no/energiregn, Oslo: SSB, 2014.

—. «Utslipp av klimagasser, 1990-2012, endelige tall.» 2014. http://www.ssb.no/natur-og-miljo/statistikker/klimagassn/aar-endelige/2014-01-30#content.

Suh, Sangwon, og Shinichiro Nakamura. «Five years in the area of input-output and hybrid LCA.» *The international journal of life cycle assessment* 12, nr. 6 (2007): 351-352.

Sunde, Kathrin, Andreas Brekke, og Birger Solberg. «Environmental Impacts and Costs of Hydrotreated Vegetable Oils, Transesterified Lipids and Woody BTL-A Review.» *Energies* 4, nr. 6 (2011a): 845-877.

Sunde, Kathrin, Andreas Brekke, og Birger Solberg. «Environmental impacts and costs of woody Biomass-to-Liquid (BTL) production and use – A review.» *Forest Policy and Economics* 13, nr. 8 (2011b): 591-602.

Svenske Skogforsk. «Hur mycket grot? - från trädvolym till energi.» 2011. http://www.kunskapdirekt.se/sv/kunskapdirekt/skogsbransle/Grenar-och-toppar/Avverkningsplanering/Hur-mycket-grot/ (funnet 2014).

Søgaard, G., og A. Granhus. *Klimaoptimalt skogbruk. En vurdering av utvalgte skogskjøtseltiltak i Akershus fylke.* Oppdragsrapport fra Skog og landskap 09/2012, Ås: Norsk institutt for skog og landskap, 2012.

Tellnes, Lars Gunnar, Per Otto Flæte, og Anders Q Nyrud. «Material flows in the Norwegian sawmilling industry.» *7th meeting of the Nordic-Baltic network in wood material science and engineering (WSE).* Oslo: Norsk institutt for skog og landskap, 2011. 113-118.

Timmermann, V., og J. Dibdiakova. «Greenhouse gas emissions from forestry in East Norway.» *The International Journal of Life Cycle Assessment* 19, nr. 9 (2014): 1593-1606.

Trømborg, E., T.F. Bolkesjø, E. Bergseng, og P.K. Rørstad. *Bærekraftig biodrivstoff til sivil luftfart i Norge – biomassetilgang fra landbaserte ressurser.* Tilgjengelig på: http://www.avinor.no/avinor/miljo/10_Biodrivstoff, 2012.

Utenriksdepartementet, Det Kongelige. «Prop. 4 S (2011-2012): Samtykke til deltakelse i en beslutning i EØS-komiteen om innlemmelse i EØS-avtalen av direktiv

2009/28/EF om å fremme bruken av energi fra fornybare kilder (fornybardirektivet).» Oslo: Utenriksdepartementet, 2011.

Vattenfall. *Life Cycle Assessment: Vattenfall's electricity generation in the Nordic countries.* Stockholm: Vattenfall, 2012.

Vattenfall. *Life-cycle assessment: Vattenfall's electricity in Sweden.* Stockholm: Vattenfall, 2005.

Vessia, Øyvind, og Karen Byskov Lindberg. «Vil lavere kraftforbruk i Norge gi lavere CO2-utslipp fra europeisk kraftproduksjon?» *Kvartalsrapport for kraftmarkedet - 1. kvartal 2008*, 2008: 51-62.

Vold, Bjørn Ivar, Andreas Brekke, og Kari-Anne Lyng. *Energibruk og konverteringstap ved bioenergiproduksjon.* NVE-rapport nr 10-2011, Oslo: NVE, 2011.

von Troil, Werner, Tomas Thuresson, og Johan Carlsson. *Markedsanalyse skogsnæring i Norge.* Stockholm: Pöyry Managment Consulting (Stockholm) AB, 2014.

Wenzel, Henrik, Linda Høibye, Runde Duban Grandahl, Lorie Hamelin, og Asger Strange Olesen. *Carbon footprint of bioenergy pathways for the future Danish energy system.* . Rapport til den danske miljøstyrelsen, Kongens Lyngby: COWI, 2014.

Xiaoyu, Yan, Oliver R Inderwildi, David A King, og Adam M Boies. «Effects of Ethanol on Vehicle Energy Efficiency and Implications on Ethanol Life-Cycle Greenhouse Gas Analysis.» *Enviromnental Science & Technology*, 2013: 5535-5544.

Analyse av klimagassutslipp fra utnyttelse av skog til energiformål

DELPROSJEKT 2: LCA FOR SKOG TIL ENERGIFORMÅL

SAMMENDRAG DELRAPPORT 2

Denne delrapporten inneholder en livsløpsvurdering (LCA) for skog til energiformål. Den er basert på ulike scenarioer for bruk av norsk skog til forskjellige energiprodukter som varme og drivstoff.

Resultatene viser at man innenfor et undersøkt tidsperspektiv (opptil 90 år) har sammenlignbare påvirkninger på klima for energiprodukter fra skogen og fossile energiprodukter. Resultatene er sterkt avhengige av modellen som ligger til grunn for opptak og lagring av CO_2 i skogen. Det er i undersøkelsen brukt en modell for en granbestand med 90 års rotasjonstid. Andre treslag og andre rotasjonstider ville gitt andre resultater. Etter 90 år er granbestandet fortsatt i en vekstfase. Det er derfor tatt hensyn til tapt opptak i skogen i tillegg til faktiske utslipp av CO_2.

De viktigste resultatene er:

* Bruk av GROT (hogstavfall) til energiformål vil gi mindre bidrag til negative klimaendringer enn det vi har fra bruk av skogen i dag. Det vil altså være et positivt klimatiltak å benytte GROT til energiformål.

* Bruk av virke fra skog til varmeproduksjon gir mindre bidrag til klimaendringer enn bruk av skogsvirke til drivstoff. Generelt viser resultatene at jo mindre konvertering som er nødvendig, jo bedre er det for klimaet.

* Økt bruk av trevirke til konstruksjonsformål vil også medvirke til uønskede klimaendringer. Det er bare omtrent en fjerdedel av avvirket tømmer som ender som trelast. Klimaeffekten forårsaket av bruk av trevirke til konstruksjonsformål vil dermed i stor grad påvirkes av hvilke energiformål man bruker restproduktene til. Det er i denne rapporten ikke fortatt noen sammenligning av trelast og andre konstruksjonsmaterialer som f.eks. stål og betong.

1. Innledning

Denne rapporten er en delrapport i prosjektet ”Analyse av klimagassutslipp fra utnyttelse av skog til energiformål”. Det overordnede prosjektet skal undersøke, og gi forståelse for, omfanget av klimagassutslipp fra bruk av norske skogsråvarer til bioenergiformål. Prosjektet består av to delprosjekter som til sammen skal oppfylle prosjektets mål. Det første delprosjektet består av en litteraturgjennomgang innen emnet ”klimagassutslipp knyttet til bioenergi fra skogressurser”. Det andre delprosjektet, som det rapporteres fra her, består av en livsløpsvurdering (LCA) av ulike bioenergiverdikjeder.

Målet med LCAen er å presentere hvilke klimaeffekter ulike bioenergiprodukter fra til dels ulike skogsråvarer gir.

I denne innledningen finnes ingen presentasjon av for eksempel viktigheten av å redusere klimagassutslipp, skogens rolle i klimasystemet eller bioenergi som klimatiltak. Disse emnene er nærmere beskrevet i litteraturgjennomgangen i det første delprosjektet.

1.1 Struktur og innhold i rapporten

Grunnlaget for analysen er tre spørsmål knyttet til klimakonsekvenser ved bruk av skog til energiformål:

1. Hva er klimaeffekten av å anvende skogsvirke til energiformål dersom alternativet er å la skogen stå og fortsette å binde karbon?

2. Hva er klimaeffekten av å benytte GROT (greiner og topper, hogstavfall) til energiformål, istedenfor å la GROT ligge igjen etter hogst?

3. Hva er klimaeffekten av bruk av tre (sagtømmer) i konstruksjoner, når dette også medfører en produksjonsrest til energi?

1 Det siste spørsmålet er knyttet både til dagens situasjon, hvor etterspørselen etter sagtømmer er bestemmende for hvor mye som hugges, og for en mulig fremtidig situasjon med større etterspørsel etter sagtømmer. Et scenario som innebærer økt hogst skal gi svar på hvordan klimaeffekten vil være i en tenkt situasjon med økt etterspørsel

etter trevirke til konstruksjoner, dersom hele økningen av tilgjengelig flis og massevirke blir benyttet til energiformål.

2 I kapittel 2 er det beskrevet hvordan analysen er satt opp for å besvare spørsmålene. Her presenteres 4 scenarioer som til sammen skal gi svar på spørsmålene som er stilt. Her introduseres også modellene som er benyttet som grunnlag for karbonmengder i skog og for klimagasser (og strålingspådriv) i atmosfæren. Mye av underlagsmaterialet for analysen, som en detaljert beskrivelse av verdikjedene, viktige parametere og datakilder er plassert i bilag, sammen med en mer generell beskrivelse av LCA-metode. Dette er for å lette lesbarheten, samtidig som vedleggene sikrer tilgang til viktige forutsetninger for analysen.

3 I kapittel 3 presenteres resultatene fra analysen. Først gjennomgås hvert enkelt scenario. Deretter er det vist hvordan resultatene fra hvert scenario besvarer de tre spørsmålene.

4 I kapittel 4 gis det først en diskusjon av hvordan forutsetninger og modellbruk påvirker resultatene. Deretter er resultatene sammenlignet med, og satt i sammenheng med, andre resultater fra lignende studier. Til slutt i kapitlet gis en oppsummering av hva resultatene betyr for bruk av skog til energiformål.

2. Oppsett av LCA for skog til energiformål

Dette kapitlet beskriver hvordan denne analysen har spesifisert og gjennomført de ulike trinnene i LCA for skog til energiformål med fokus på klimaeffekter. En presentasjon av LCA-metode generelt er gitt i Bilag D og en grundigere beskrivelse av undersøkte verdikjeder i Bilag A.

2.1 Hensikt og omfang.

Den overordnede hensikten med analysen er *å undersøke klimakonsekvensene ved bruk av norsk skog til energiformål*. Det er stilt tre spørsmål i utgangspunktet:

1 Hva er klimaeffekten av å anvende skogsvirke til energiformål, når alternativet er å la skogen stå og fortsette å binde karbon?

2 Hva er klimaeffekten av å benytte GROT til energiformål, istedenfor å la GROT ligge igjen etter hogst?

3 Hva er klimaeffekten av bruk av tre (sagtømmer) i konstruksjoner, når dette også medfører en produksjonsrest til energi?

4 De tre spørsmålene skal hjelpe til å besvare hvilke klimaeffekter bruk av norsk skog til energiformål har. Selv om det ikke er tydelig fra spørsmålsstillingene, ligger det implisitt at det ønskes å sammenligne med andre måter å skaffe til veie samme mengde energi. Hvilke energiprodukter det sammenlignes med avhenger av hvilke energiformål som undersøkes.

5 Analysen er gjennomført som en konsekvensorientert LCA. Det er likevel, på grunn av hvilke data for verdikjeder fra skog som var tilgjengelige, benyttet noen underliggende data som er basert på resultater av regnskaps-LCA-er.

2.1.1 Scenarioer

Målet med denne analysen er å finne klimaeffekten av at mer virke blir brukt til energiformål enn det som gjøres i dagens situasjon. En slik effekt vil være avhengig av

hva som er *årsaken* til at mer virke blir brukt til energiformål. Det er skilt mellom to mulige årsaker:

- Økning i bruk av trevirke til bioenergi er drevet av en *økt etterspørsel* etter bioenergi. (Scenario 3)

- Økning i bruk av trevirke til bioenergi er drevet av en *økt tilgjengelighet* av trevirke som kan brukes til bioenergi. (Scenario 4)

I tillegg finnes det en mulighet for å utnytte hogstavfall (GROT) som i dag for en stor del er en uutnyttet ressurs. (Scenario 2)

Det er i denne studien ikke gått nærmere inn på hvordan markedet faktisk vil respondere på økt etterspørsel og/eller tilgjengelighet på trevirke. En slik analyse ville være interessant, men falt utenfor rammene til dette prosjektet. Isteden er det stilt opp noen forenklede scenarioer der enkelte faktorer, som f.eks. treforedlingsindustriens etterspørsel, forutsettes å være konstant. I Scenario 1 sees det på ulike måter å benytte treindustriens restprodukter, når disse disponeres til ulike energiformål. I øvrige scenarioer sees det på effekten av en *endring* i bruken av trevirke til energiformål.

Scenario 1:
Dette scenarioet skal speile dagens situasjon, hvor etterspørsel etter sagtømmer er drivende for at hogst gjennomføres. Når sagtømmer avvirkes, avvirkes også massevirke fra samme bestand. I tillegg produserer sagbrukene sagflis når det lages trelast av sagtømmeret. Massevirke og sagflis fordeles til treforedlingsindustri og energiformål. Dersom treforedlingsindustriens behov for massevirke og sagflis er begrenset, vil det nødvendigvis være et overskudd på sagflis og virke som må disponeres på en eller annen måte. Deponering er ikke et alternativ i Norge, ettersom det er forbud mot deponering av organisk materiale i avfallsfyllinger. Overskuddet kan brennes, enten som et brenselsprodukt eller som avfall, som også i all hovedsak brennes med energiutnyttelse, eller det kan benyttes til å fremstille biodrivstoff.

I dette scenarioet brukes kun et overskudd av restprodukter fra skogbruk og treindustri til fremstilling av energivarer. Bruken av sagflis og massevirke forårsaker således ingen hogst utover det som dekker sagbrukenes etterspørsel etter sagtømmer. Det antas at fremstilt varme og biodrivstoff dekker et behov som ellers ville ha måttet blitt dekket med fossile brensler/drivstoff.

Scenario 2:
Hogstavfall (GROT) som ellers ville blitt etterlatt, blir isteden utnyttet til energiformål. I scenarioet tas det ut 70 % av tilgjengelig GROT. Mer bør ikke tas ut av hensyn til næringsstoffer i jorda. All GROT som tas ut blir brukt til energiformål.

Scenario 3:
I dette scenarioet vil økt etterspørsel etter virke til energi føre til en samlet økt hogst som gjør at det tas ut mer sagtømmer enn sagbrukene etterspør. I scenarioet antas sagbrukenes etterspørsel etter sagtømmer og treforedlingsindustriens etterspørsel etter massevirke å

være konstant eller synkende. Dette medfører at skogbruket, på grunn av et høyt uttak for å dekke behovet for virke til energi, vil produsere et overskudd på sagtømmer, og dette overskuddet blir også benyttet til energiformål.

I dagens markedssituasjon er det riktignok mer realistisk at et overskudd på sagtømmer heller ville blitt eksportert. Det er ikke gått nærmere inn på denne problemstillingen av to ulike årsaker: Hvilken effekt eksport av tømmer vil ha på utenlandske markeder og avvirkning er ikke videre analysert. Det kan også tenkes at om prisen på virke til energi skulle være høy nok til å initiere hogst utover det som kreves for å tilfredsstille sagbrukenes behov for tømmer, ville den også være høy nok til å konkurrere med utenlandske markeder om sagtømmeret.

Scenario 4:
I dette scenarioet analyseres effekten av at mer virke blir brukt til sagtømmer. Økt avvirkning og bruk av sagtømmer gir et overskudd av sagflis og massevirke. I scenarioet forutsettes det at treforedlingsindustriens etterspørsel etter massevirke er enten konstant eller synkende. Når samtidig fordelingen mellom sagtømmer og massevirke i skogen er konstant, vil dette tilsi et overskudd på sagflis og massevirke, som blir tilgjengelig for energiformål. Det vil si at for hvert ekstra bestand som avvirkes, vil en større andel massevirke og sagflis kunne bli brukt til energiformål.

Det medregnes også at konstruksjonsvirke blir til energi etter endt levetid, som i analysen er satt til 60 år. (I virkeligheten kan levetiden til trekomponenter være betydelig lengre eller kortere, avhengig av bruksområde. For eksempel kan fasader som er utsatt for vær og vind ha kortere levetid, mens stendere som står inne i et bygg kan ha lengre levetid.)

Fordeling av GROT og tømmer fra et bestand i ulike scenarioer

Tabell 2 viser skjematisk hvordan mengden tømmer og GROT fra et avvirket bestand fordeles i ulike scenarioer.

Tabell 2 Fordeling av tørrstoff tømmer og GROT i ulike scenarioer

		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Fordeling av ts tømmer	Trelast	Ikke medregnet	Ikke relevant	0 %	27 %
	Flis fra sagbruk til energi (hvorav 2 % til eget forbruk)	25 %		0 %	25 %
	Tømmer fra skog direkte til energiprodukter	48 %		100 %	48 %
Fordeling av ts GROT	GROT til energiprodukter	Ikke relevant	70 %	0 eller 70%	0 eller 70%
	GROT etterlatt i skog		30 %	100 eller 30 %	100 eller 30 %

I Scenario 1 anses flis fra sagbruk og massevirke som tilgjengelige biprodukter. Scenario 2 har ingen fordeling av tømmer ettersom scenarioet kun omhandler utnyttelse av GROT. Scenario 3 og 4 angir fordelingen av tømmer for en *økning* i avvirkning, etter de forutsetninger som er beskrevet over.

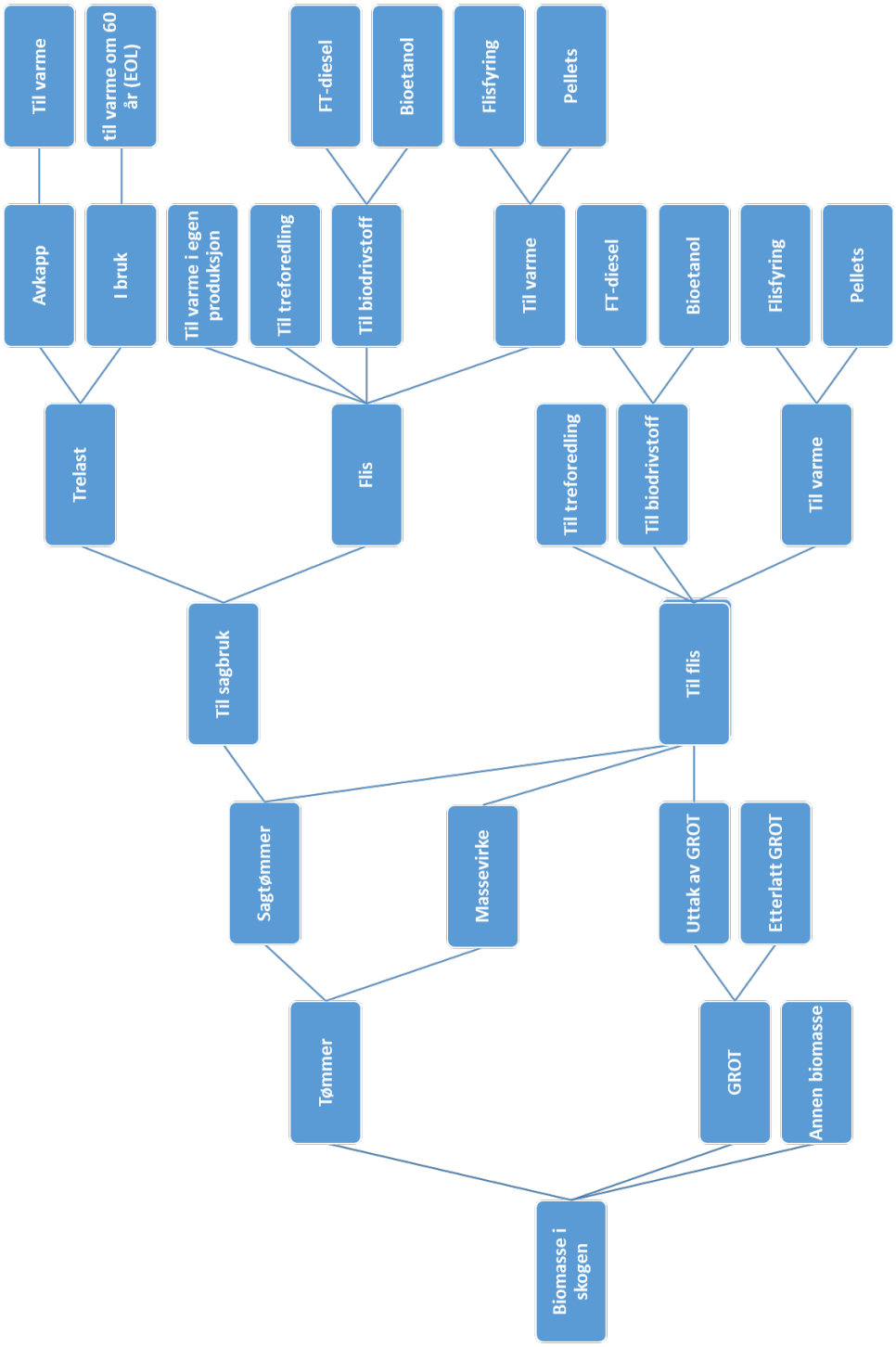
2.1.2 Funksjonell enhet

Det benyttes ulike funksjonelle enheter i resultatpresentasjonene for ulike undersøkte verdikjeder. Resultatene presenteres pr. levert energimengde (i MJ), pr. erstattet fossil energimengde, pr. tonn tørrstoff tatt ut, pr. hektar skog og/eller pr. m^3 produkt.

2.1.3 Systemgrenser

Før vi beskriver valg knyttet til spesifikke systemgrenser, vil vi i Figur 7 vise de verdikjedene som har inngått i oppsettet av modellen.

Modellen er basert på fordeling av tørrstoff (ts), der man starter med et bestand med en gitt mengde ts biomasse, som fordeles gjennom en kaskade. Noen fordelinger er basert på data, f.eks. hvordan tømmer i skogen er fordelt mellom sagtømmer og massevirke, mens andre fordelinger vil avhenge av hvilke scenarioer og energiprodukter som analyseres. Bilag A gir en grundigere gjennomgang av de ulike prosessene.



Figur 7 Prinsippskisse over fordeling av biomasse-tørrstoff gjennom ulike verdikjeder fra uttak av skog

inkludert i analysen.

Tid er et vesentlig aspekt i denne analysen. For det første fordi analysen skal ta hensyn til hvordan karbon fjernes fra, og tilbakeføres til, skogen over tid. For det andre fordi en del verdikjeder for skog til energiformål ikke er basert på modne teknologier (særlig produksjon av biodrivstoff fra skogsråvarer) og derfor vil det kunne oppnås prosessforbedringer i de kommende årene. Det er benyttet så nye data som mulig for verdikjedeprosesser og ikke eldre enn 10 år. Analysene baseres også på en skogmodell som inneholder opptak av karbon i et skogbestand over en 200-årsperiode. Med en valgt rotasjonstid på 90 år er det imidlertid bare sett på klimaendringer i et 90-årsperspektiv.

Geografi er også viktig og denne analysen er basert på norske forhold. Det har avgjørende betydning hva slags skog som inngår i beregningene (for eksempel knyttet til rotasjonstid, vekstkurver, albedoeffekt og transportavstander) og hvilke energikilder som benyttes i verdikjedene. Derfor ble det benyttet en modell over et norsk granbestand, som ble koblet med en modell for dynamisk beregning av klimaeffekter.

Miljøeffekter: I henhold til LCAs fokus på å unngå såkalte problemskifter bør man egentlig inkludere så mange miljøeffekter som mulig, for så å si noe om viktigheten av de ulike. Ettersom det i utgangspunktet var klimaeffekten av skog til energiformål som skulle undersøkes, ble det i løpet av analysen besluttet å ikke beregne andre miljøeffekter enn bidrag til klimaendringer.

Teknologi er ytterligere beskrevet i bilag A, men det er forsøksvis benyttet de lengstkommende teknologier for produksjon av biodrivstoff (FT-diesel og etanol) og ellers de mest benyttede produksjonsteknologier for andre produkter (spesielt flis og pellets) i analysen. Teknologivalgene er også avhengige av tilgjengelige data, og det er muligheter for effektiviseringer i nye teknologier i de kommende årene.

Avgrensning mot natur er viktig når man ser på bruk av skog i industrielle systemer, for å fastslå hva som er menneskeskapte utslipp og hva som er uavhengig av menneskelig aktivitet. I mange tidligere analyser har man regnet skog som implisitt klimanøytral. Her er det benyttet dynamisk modellering av utslipp og av opptak i skog. Det ligger dermed i analysen at bruken av råvarer fra skogen defineres innenfor det teknologiske systemet og at utslippene derfra kan påvirkes av menneskelig aktivitet. En del underliggende prosesser er likevel ikke innbefattet i systemet, fordi naturen "tar seg av dem", slik som tilførsel av vann, for eksempel.

2.1.4 Allokering

Allokering (se bilag om LCA metode) er unngått ved å dele opp prosesser i delprosesser, eller ved systemutvidelse, i henhold til LCA-standarden ISO 14044. I ulike scenarioer som benyttes i analysen behandles virke til energi som et selvstendig produkt eller som et restprodukt. Denne betraktningen påvirker hvilke klimagassutslipp som tilskrives energiprodukter fra trevirke.

2.2 Livsløpsregnskap

En oversikt over datakilder benyttet for ulike prosesser er gitt i Vedlegg B. Viktige faktorer er beskrevet i Vedlegg A.

2.3 Effektvurdering

I motsetning til en fullstendig LCA er det i denne analysen bare sett på klimaeffekter. Det er benyttet nyere metoder og modeller, og tilsvarende data, for karbondynamikk og strålingspådriv (se faktaboks 1). Strålingspådrivet er beregnet med Dyn-CO_2 fra CIRAIG – Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et sercives.

Resten av dette delkapitlet beskriver grunnlagsmodellen for skog som er benyttet.

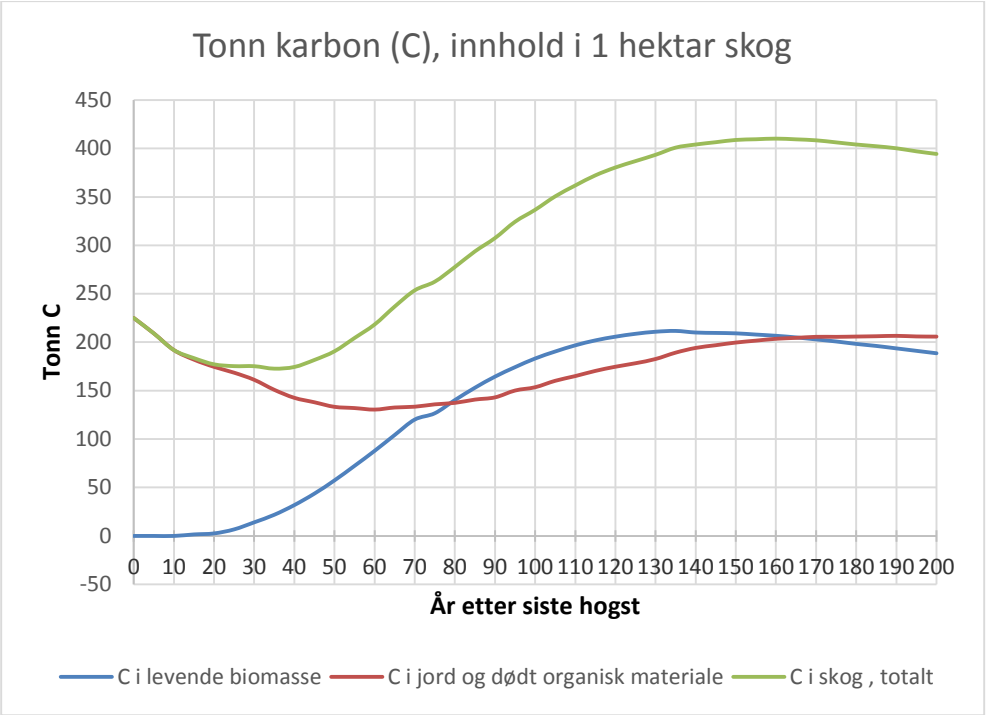
2.3.1 Skogen

Faktaboks 1. ***Strålingspådriv (eller strålingspådråg):***
(på engelsk 'radiative forcing') er et mål på hvordan ulike faktorer påvirker oppvarmingen av jorda. Denne størrelsen (benevnt med W/m^2) fanger opp andre mekanismer enn bare klimagasser som kilde til klimaendringer, for eksempel endringer i refleksjon av solinnstråling (albedo, se egen faktaboks i neste delkapittel). Strålingspådrivet er et mål på potensielt økt temperaturstigning som også tillater å sammenligne albedoeffekt og drivhuseffekt. Strålingspådrivet oppgis i netto irradians per areal, det vil si differansen mellom inngående solstråling og utgående varmestråling fra jorda. Jo større strålingspådrivet er, jo høyere vil temperaturen bli. Det vil også si at økte utslipp av klimagasser vil øke strålingspådrivet.

Utgangspunktet for analysen er et bestand med granskog på 1 hektar som avvirkes etter 90 års vekst. Etter avvirkning vil hogstavfall brytes ned og avgi CO_2. Hvor mye dette utgjør vil avhenge av om greiner og topper (GROT) tas ut til benyttelse. Det vil også frigjøres CO_2 fra jordsmonnet. Etter hvert vokser skogen til igjen på det samme arealet og binder karbon fra CO_2 i lufta.

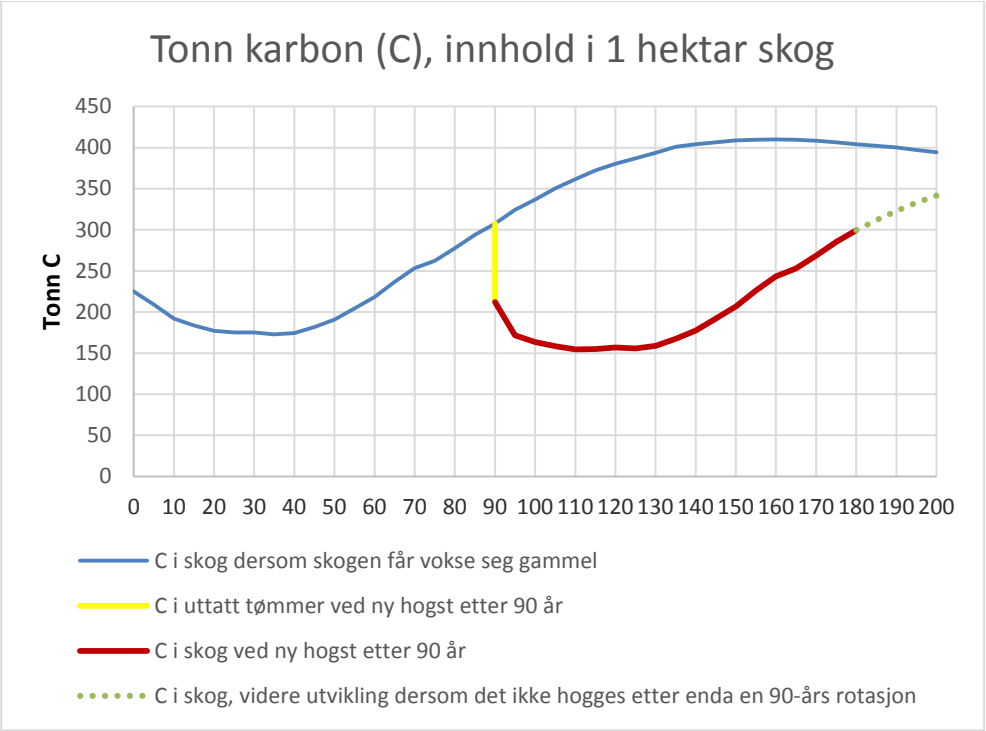
Dersom bestandet ikke var blitt avvirket, ville det fortsatt å vokse og også binde karbon fra CO_2 i lufta. Dette tapte opptaket som følge av hogst medregnes også i analysen.

Tallmaterialet for karboninnholdet i skogen, inkludert karbon i levende biomasse, jord, strø og død ved er hentet fra en tilvekstmodell utviklet av Norsk institutt for skog og landskap. Modellen er satt opp for et granbestand på midlere bonitet (G14), som er avvirket ved år 0 (KLIF 2011). Deretter beskrives hvordan karboninnholdet utvikles de påfølgende 200 år, som vist i Figur 8.



Figur 8 Utvikling av karboninnhold i et granbestand av midlere bonitet (G14).

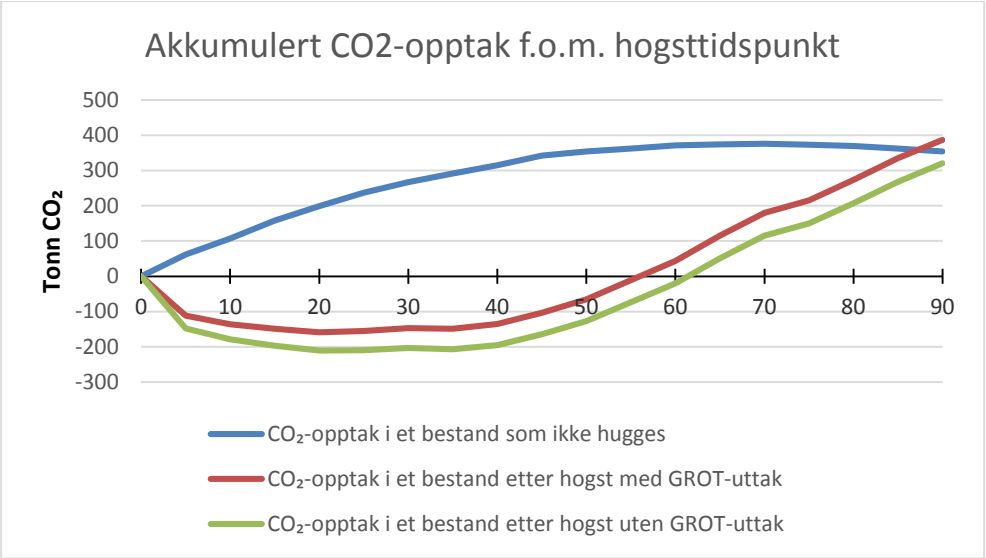
X-aksen viser antall år etter siste hogst. Ved år 0, når skogen hugges, fjernes den levende biomassen og dermed også karbonet bundet i denne. Det er likevel en forholdsvis stor mengde (~225 tonn) karbon bundet i arealet som karbon i jord. Karboninnholdet i levende biomasse øker når nye trær vokser til, frem til en utflating og etter hvert en liten nedgang når skogen blir gammel. Etter hogsten vil karbon lagret i DOM (dødt organisk materiale) frigjøres som CO_2 når etterlatt hogstavfall brytes ned. Karbon vil også frigjøres fra jordsmonnet i forholdsvis lang tid etter hogst. Modellen viser en topp i karboninnholdet bundet i bestandet etter 150 til 160 år. Det er store usikkerheter knyttet til hva som skjer med karboninnholdet i skogen etter dette tidspunktet.



Figur 9 Karboninnholdet i skogen ved hogst etter 90 år, sammenlignet med en skog som får vokse i 200 år.

Figur 9 viser utviklingen i karboninnholdet i et bestand dersom det avvirkes etter 90 års vekst, sammenlignet med et bestand som får vokse i 200 år uten hogst. Det vil normalt antas at et bestand med 90 års rotasjonstid, igjen avvirkes etter nye 90 år, som er nedre aldersgrense for hogstklasse 5. Videre vekst (prikkete linje) representerer imidlertid en fremtidig mulighet for karbonfangst. Hendelser etter 180 år, det vil si f.o.m. 90 år etter avvirkning, er ikke en del av de videre analysene.

Endringene i skogens karboninnhold tilsvarer en utveksling med karbon i lufta i form av CO_2. Figur 10 viser skogens opptak av CO_2 i tiden etter en hogst, både ved hogst uten GROT-uttak og ved hogst med GROT-uttak. Grafen viser også hvilket CO_2-opptak som ville forekommet dersom skogen ikke ble hugget, men fikk stå urørt og vokse videre. Uttak av GROT medfører et noe mindre utslipp enn om GROT blir liggende og brytes ned.



Figur 10 Opptak av CO_2 i tre ulike bestand. Blå linje viser opptaket i et bestand som er 90 år gammelt i år 0 og får vokse videre uten hogst. Rød og grønn linje viser opptak i fremveksten av ny skog etter hogst i år 0, henholdsvis med og uten GROT-uttak.

Figur 10 viser at dersom man starter med to like bestand i hogstmoden alder (90 år gamle), og ett av bestandene hugges mens det andre får vokse videre, vil det i løpet av en ny rotasjonstid, 90 år, være like stort opptak av CO_2 i bestandet som ble avvirket, som i bestandet som får stå urørt.: Mengden karbon lagret i skogen vil derimot være høyere for et bestand som får stå urørt, jfr. figur 9. Forskjellen mellom blå og rød/grønn kurve tilsvarer en forskjell i CO_2 i atmosfæren, og dermed en forskjell i strålingspådriv. I tillegg kan det til rød og grønn kurve være knyttet et CO_2-utslipp fra forbrenning av uttatt virke.

2.3.2 Karbondioksid, andre klimagasser, albedoeffekt og strålingspådriv

Mengden klimagasser i atmosfæren er en av flere faktorer som styrer temperaturen på jorda. I tillegg kommer for eksempel albedoeffekten, som handler om en overflates evne til å reflektere solstråler (se faktaboks 2). Siden albedoeffekten ikke er en klimagass, kan den være vanskelig å sammenligne med utslipp og opptak av CO_2 i skogen. Strålingspådrivet er et mål på potensielt økt temperaturstigning som også tillater å sammenligne albedoeffekt og drivhuseffekt. Strålingspådrivet oppgis i netto irradians per areal, det vil si differansen mellom inngående solstråling og utgående varmestråling fra jorda. Jo større strålingspådrivet er, jo høyere vil temperaturen bli. Det vil også si at økte utslipp av klimagasser vil øke strålingspådrivet.

For å kunne sammenstille de ulike effektene er modellen for karbonbinding i skog lagt inn i en ny modell, en dynamisk klimaeffektmodell, som muliggjør å vise frem strålingspådriv (Levasseur, 2013). Her er også endringer i albedo lagt inn, og resultater oppgis for strålingspådrivet. Modellen inneholder opplysninger om ulike gassers levetid i atmosfæren og gjør at utslipp på ulike tidspunkter vil få en ulik utslippsprofil. Normalt i en LCA vil alle utslipp tilordnes det samme året, hvilket vil gi en feil i resultatene både på

grunn av klimagassers ulike levetid og på grunn av 100-årsperspektivet normalt brukt i klimamodeller.

Andre klimagasser

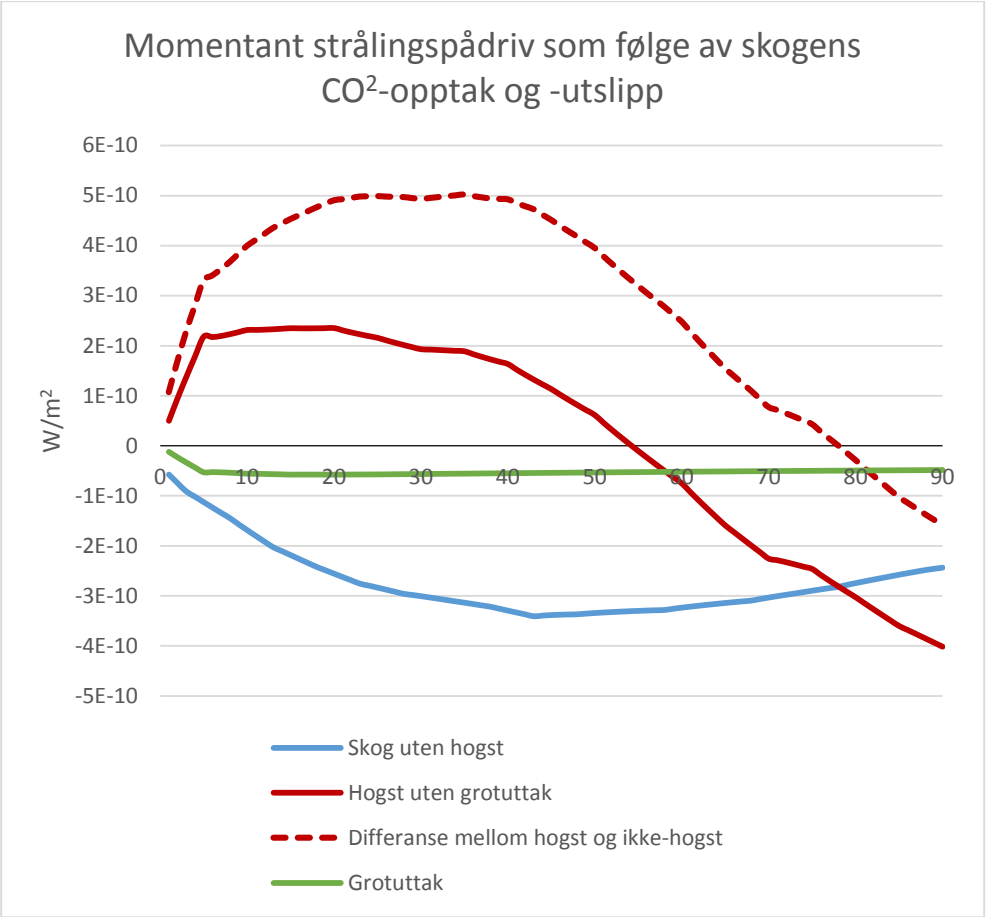
Det finnes en rekke klimagasser i tillegg til karbondioksid (CO_2). og mange med både lenger levetid i atmosfæren og større evne til å absorbere varme enn CO_2. Det er ikke alle disse som er relevante i sammenheng med studier av energisystemer. I denne analysen er fire klimagasser inkludert: CO_2, CH_4 (metan), N_2O (lystgass) og CO (karbonmonoksid).

Albedo

Faktaboks 2. ***Albedo:***
Albedo betegner en overflates evne til å reflektere sollys. En svart flate har en albedo lik 0, som vil si at ingenting reflekteres, mens en hvit flate har albedo lik 1, som vil si at alt lys reflekteres. Når lyset reflekteres blir det heller ikke lagret varme i overflaten, mens det tilsvarende blir varmere når overflaten absorberer lyset. Lysere overflater vil dermed virke dempende på oppvarming, mens mørke overflater vil være med å forsterke oppvarmingen.

En snødekt hogstflate vil reflektere mer solstråling enn et bestand med trær, noe som medfører mindre strålingspådriv. Denne effekten er medregnet i form av nettoendring i strålingspådriv, som til en viss grad oppveier strålingspådrivet fra hogsten.

I analysene her er strålingspådrivet fra CO_2-utslippet og opptaket i skogen beregnet ut fra årlige utslipp, med bruk av samme modell (ligningsverk) som Holtsmark (2014). Figur 11 viser hvordan det momentane strålingspådrivet vil være dersom man henholdsvis avvirker bestandet eller lar det stå.

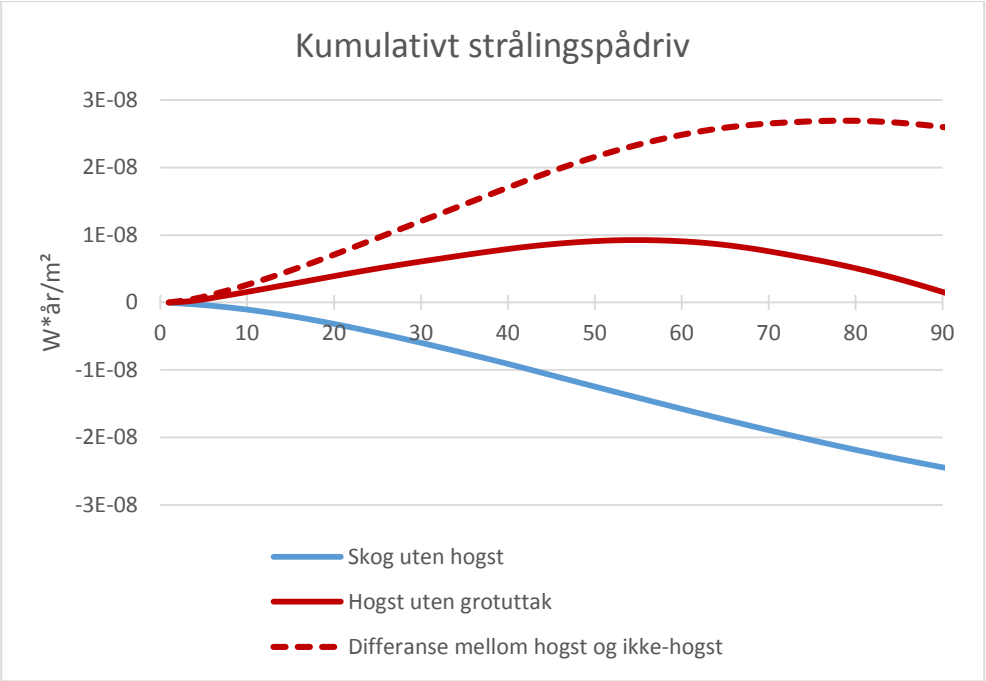


Figur 11 Momentant strålingspådriv (i 90 år) som følge av å la skogbestandet stå eller å hugge

Dersom bestandet ikke avvirkes, vil den stående skogens CO_2-opptak under videre vekst medføre et netto negativt strålingspådriv, altså motvirke global oppvarming, de neste nitti årene.

Dersom skogen hugges, vil CO_2-utslipp fra jord og nedbrytning og hogstavfall de første årene etter hogst gi et CO_2-utslipp som forårsaker økt strålingspådriv, som medfører en økning i global oppvarming. Etter hvert vil fremveksten av ny skog ta opp mer CO_2 enn det som ble sluppet ut, og dermed gjøre strålingspådrivet negativt. Ca 80 år etter hogst vil CO_2-opptaket fra fremveksten av ny skog mer en oppveie strålingspådrivet forårsaket av at skogen ble hugget. Hugging av skogen gir altså netto positivt strålingspådriv, og dermed en økning i drivhuseffekten i de påfølgende 80 årene etter hogst. Etter 80 år oppnås et netto negativt strålingspådriv, det vil si mindre drivhuseffekt. Det vil imidlertid i tillegg være utslipp knyttet til tømmer, f.eks. ved bearbeiding og forbrenning, etter at det er tatt ut av skogen.

Strålingspådrivet blir noe mindre dersom GROT tas ut etter hogst, ettersom dette medfører at mindre hogstavfall nedbrytes og frigjør CO_2 den første tiden etter hogst.



Figur 12 Kumulativt strålingspådriv (over 90 år) avhengig av om bestandet blir stående eller hugges.

Kumulativt strålingspådriv vil si den til ethvert tidspunkt beregnede sum av tidligere års strålingspådriv, eller den samlede energimengde, her uttrykt i watt*år/m², som absorberes av jorda over en gitt tidsperiode. Utslipp etter hogst og senere opptak på det samme hogstarealet gir isolert sett omtrent ikke noe kumulativt strålingspådriv i løpet av en 90-årsperiode (utslipp knyttet til uttatt tømmer, f.eks. forbrenning, ikke medregnet), men klimagassene vil ha en oppvarmende effekt i løpet av perioden. Et bestand som står urørt gir derimot et negativt strålingspådriv over hele 90-årsperioden, som bidrar til redusert drivhuseffekt. Nettoeffekten av å hugge bestandet istedenfor å la det det stå urørt (striplet linje) blir dermed en økning i kumulativt strålingspådriv over hele 90-årsperioden fram mot en eventuell ny hogst.

3. Resultater

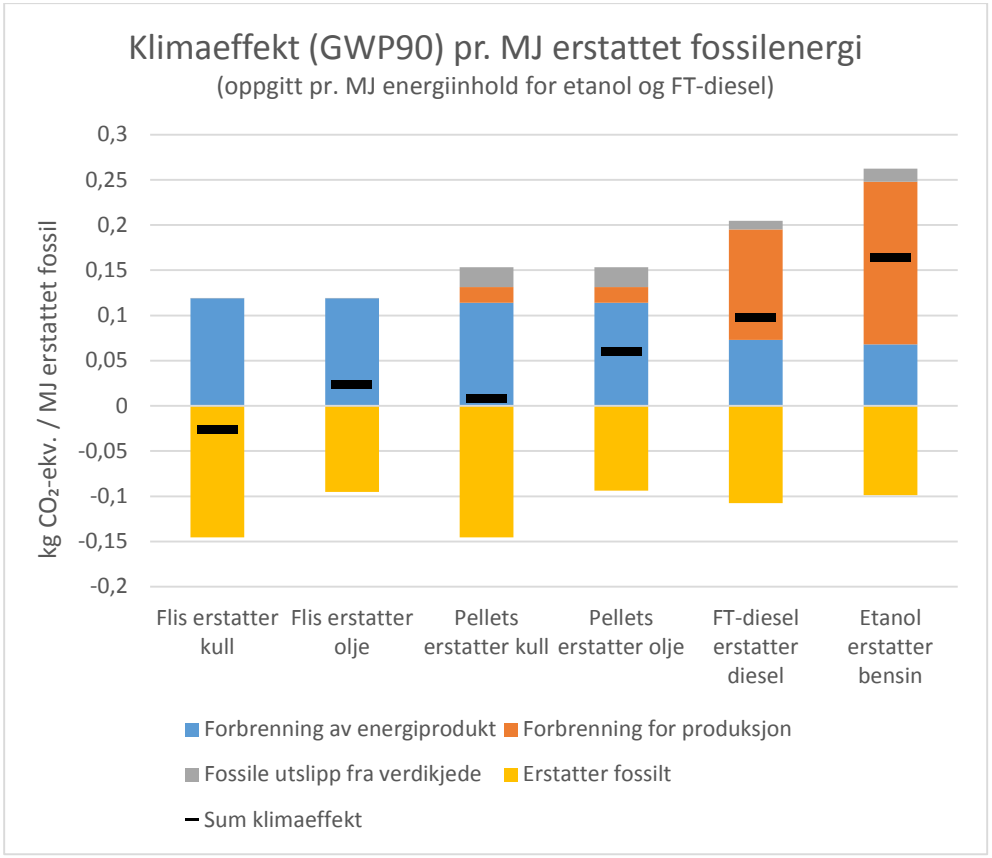
I dette kapitlet presenteres resultatene fra analysen. Først vises resultatene for hvert av scenarioene for seg, deretter blir resultatene vurdert opp mot spørsmålene som er utgangspunktet for analysen.

3.1 Scenario 1: Disponering av flis og massevirke som biprodukt

I dette scenarioet brukes kun et overskudd av restprodukter fra treindustrien til fremstilling av energivarer. Bruken av sagflis og massevirke forårsaker således ingen hogst, men er en konsekvens av hogsten.

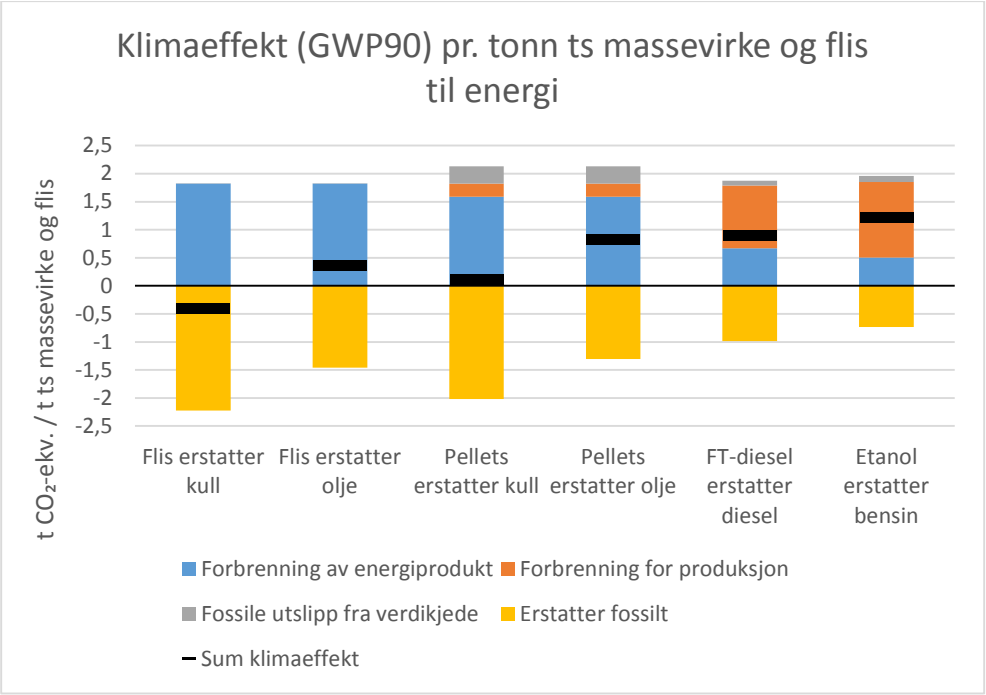
Utslippene kan her anses som å være en miljømessig negativ kostnad knyttet til håndtering av restprodukter. Det kan samtidig være en positiv effekt knyttet til bruk av biobrensler dersom disse brukes istedenfor fossile brensler. Ulike måter å disponere tilgjengelig sagflis og virke vil ha ulikt potensiale for en slik fortrengning av fossile brensler, avhengig av hvor mye og hva slags fossilt brensel som ville ha vært et alternativ.

Figur 13 viser utslipp per MJ erstattet fossil energi for noen mulige måter å disponere et overskudd av sagflis og massevirke. Sagflis kan brennes direkte som et brensel eller foredles til pellets eller flytende biodrivstoff. Ved produksjon av pellets brukes noe virke til prosessvarme under fremstillingen. Det tilkommer også et utslipp knyttet til andre innsatsfaktorer i produksjonen, hovedsakelig fra elektrisitet. Dette gjør at utslippet per MJ anvendbar energi blir noe høyere. Ved produksjon av FT-diesel og bioetanol benyttes en stor del av energien i virket i produksjonsprosessen. Samtidig produseres det også elektrisitet ved produksjon av flytende biodrivstoff. Når det antas at denne erstatter annen elektrisitetsproduksjon, gir det noe reduksjon i klimaeffekten pr. MJ FT-diesel og etanol.



Figur 13: Kumulativt strålingspådriv angitt i kg CO_2-ekvivalenter pr. MJ erstatning av fossile brensler (tilsvarer utslipp av CO_2 ved analysens år 0) for 90-årsperspektiv.

Figur 14 viser effekten av ulike måter å anvende 1 tonn tørrstoff (ts) sagflis og massevirke, dersom sagflis og pellets brukes til å fremstille en mengde varme som ellers ville blitt fremstilt ved å brenne kull eller olje, og dersom den fremstilte energimengden FT-diesel og bioetanol brukes istedenfor en tilsvarende energimengde diesel eller bensin.



Figur 14: Kumulativt strålingspådriv angitt i kg CO_2-ekvivalenter pr. tonn massevirke og flis anvendt til energi, når energiprodukter erstatter fossile brensler (tilsvarer utslipp av CO_2 ved analysens år 0) for 90-årsperspektiv.

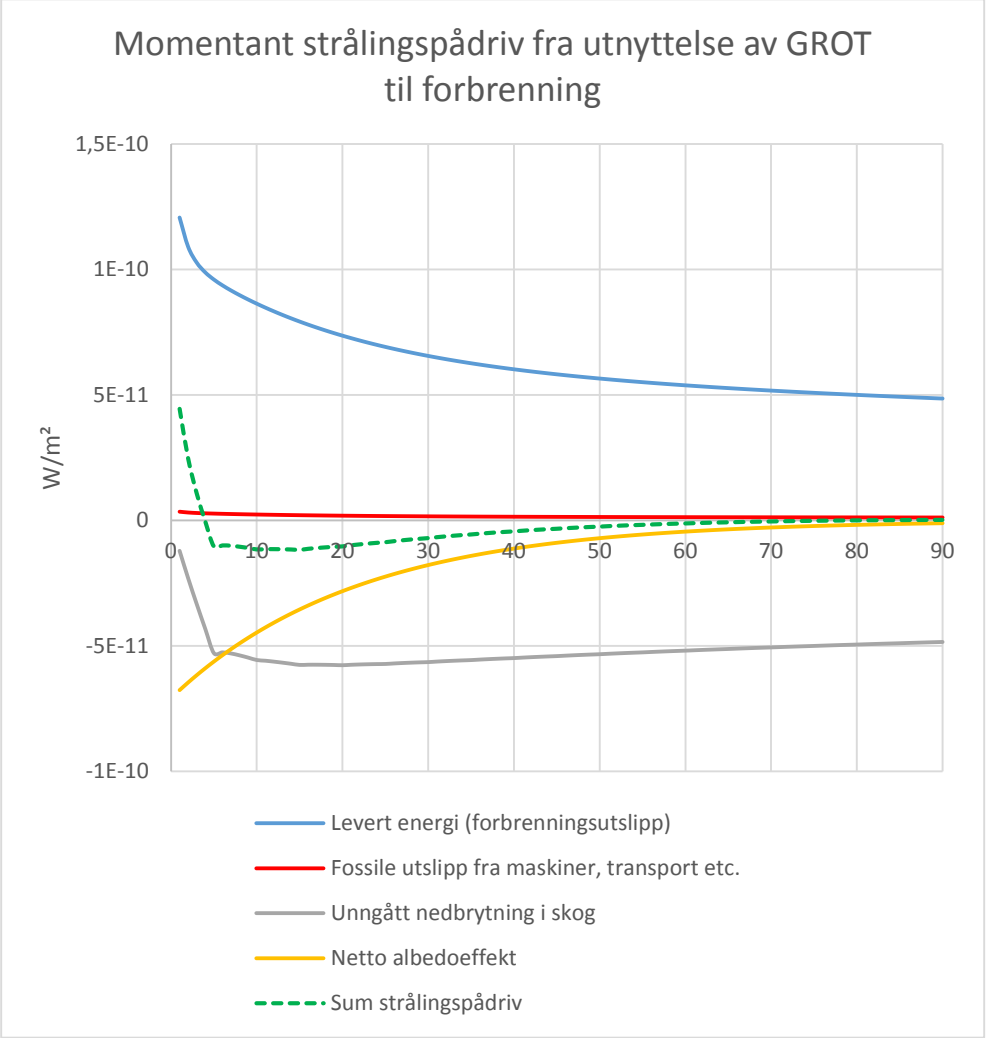
Disponering av sagflis direkte til flisbrensel kan potensielt gi lavest klimagassutslipp pr. tonn ts virke, når det finnes anvendelsesområder der flis eller pellets kan brukes til å erstatte forbrenning av kull. Dersom flis kan benyttes direkte til brensel og erstatte kull, vil det medføre et negativt netto klimagassutslipp på 0,4 t CO_2-ekv./ t. Altså mindre global oppvarming enn om kull benyttes. De øvrige måtene å disponere treavfallet på har alle en større eller mindre klimamessig ugunstig kostnad knyttet til seg, fra 0,1 t CO_2-ekv./ t om det produseres pellets som erstatter kull, til 1,2 t CO_2-ekv./ t om det produseres etanol som erstatter bensin. Av disse resultatene fremgår det at bruk til drivstofformål er mindre gunstig enn bruk til varmeformål med hensyn til påvirkning på klimaet. Produksjon av pellets medfører også et energitap som gjør dette mindre gunstig enn direkte forbrenning av flis. Imidlertid kan pellets være mer teknisk anvendelig til noen formål.

Resultatene tilsier også at fossile brensler i de fleste tilfeller vil, innenfor analysenes tidsperspektiv, ha mindre negativ påvirkning på klimaet enn energiprodukter fra skogen.

3.2 Scenario 2: Uttak av GROT som ellers ville blitt etterlatt

Figur 15 viser endring i strålingspådriv som følge av å ta ut 70 % av GROT-en i et bestand som er hugget. Uttak av GROT medfører økt albedo, som resulterer i et negativt strålingspådriv. At GROT-en ikke vil brytes ned i skogen, slik den ellers ville gjort,

medfører et unngått utslipp som også gir et negativt strålingspådriv. Sammen oppveier disse strålingsbidraget forårsaket av utslipp ved forbrenning av GROT. Fossile utslipp knyttet til uttak, transport og bruk av maskiner er neglisjerbare.



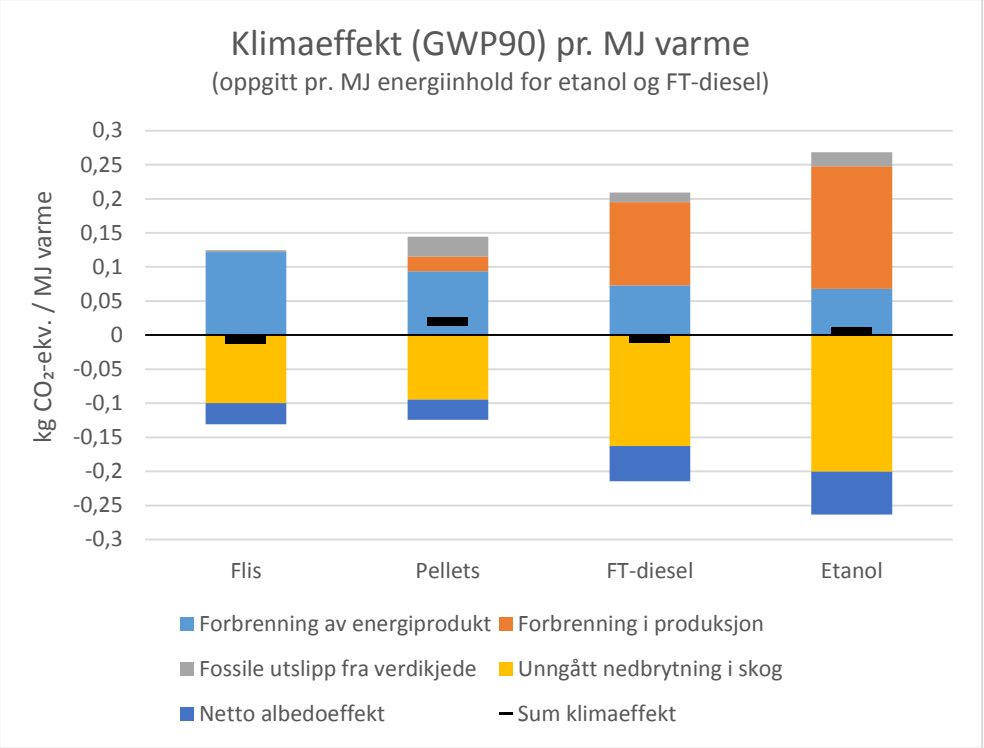
Figur 15: Momentant strålingspådriv i 90 år fra hogsttidspunkt forårsaket av uttak og bruk av GROT til flisfyring.

Tilsvarende beregninger er gjort for:

- Uttak av GROT til pelletsproduksjon og -fyring
- Uttak av GROT til FT-diesel
- Uttak av GROT til bioetanol

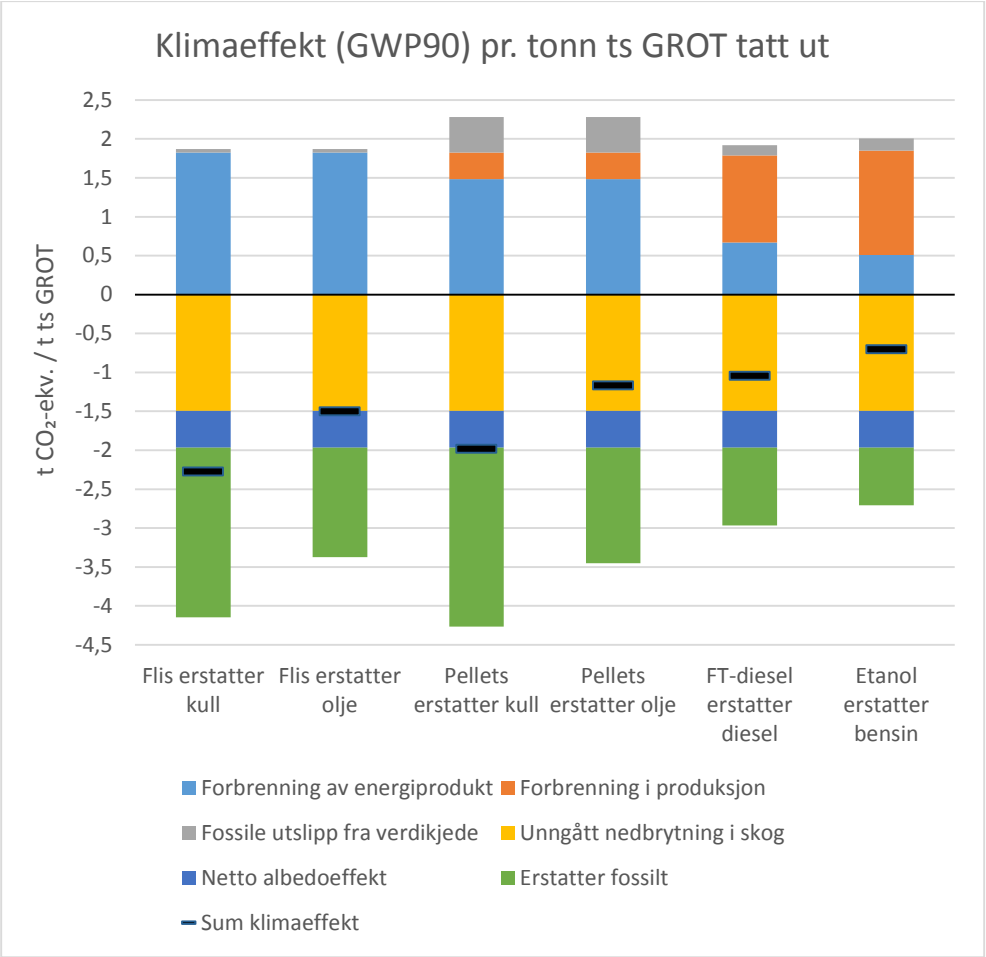
Figur 16 viser klimaeffekten i et 90-årsperspektiv av å benytte flis framstilt av GROT til fyring, som vist i Figur 15, sammenlignet med andre måter å disponere GROTen på. Økt albedo og mindre nedbrytning av organisk materiale som følge av at GROT-en tas ut av skogen, veier opp for utslippene ved å forbrenne GROT-en, slik at fremstilling av 1 MJ

varme fra GROT blir klimanøytralt. Ved foredling av GROT til pellets før forbrenning, tilkommer noe klimagassutslipp i produksjonen, hovedsakelig fra elektrisitetsbruk, men alt i alt er dette svært lite sammenlignet med fossile brensler. Produksjon av flytende drivstoff og forbrenning av disse fremstår også som klimanøytralt.



Figur 16:Kumulativt strålingspådriv angitt i kg CO_2-ekvivalenter pr. MJ levert varme (tilsvarer utslipp av CO_2 ved analysens år 0) for 90-årsperspektiv.

Figur 17 viser klimaeffekten over et 90-årsperspektiv av å ta ut og benytte GROT til erstatning for ulike fossile brensler.

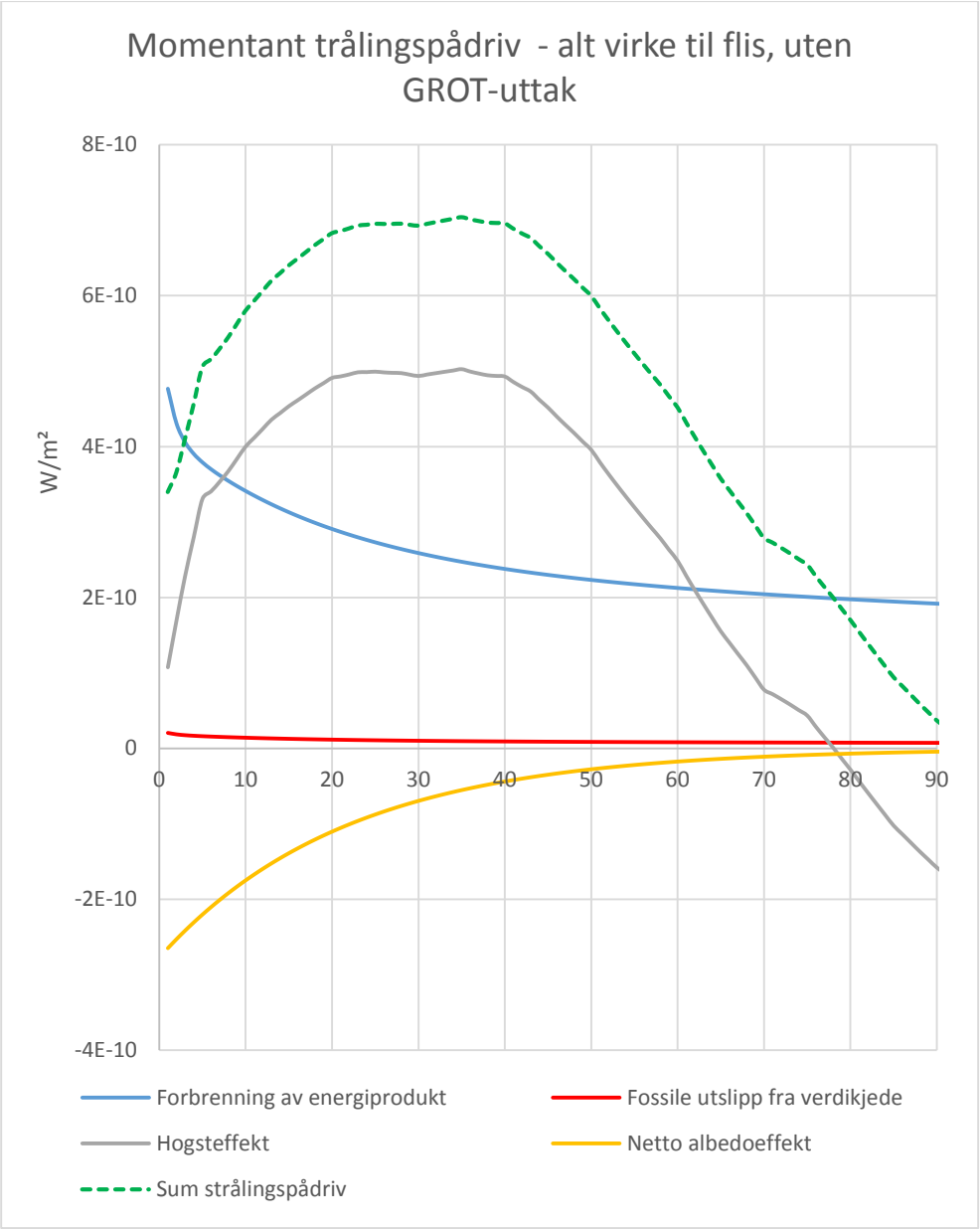


Figur 17: Kumulativt strålingspådriv angitt i kg CO_2-ekvivalenter pr. tonn tørrstoff GROT tatt ut (tilsvarer utslipp av CO_2 ved analysens år 0) for 90-årsperspektiv.

Ettersom uttak og forbrenning av GROT i utgangspunktet er klimanøytralt, vil samtlige av disse måtene å benytte GROT på gi netto redusert global oppvarmingseffekt. Mengden utslipp som unngås blir større med mindre konverteringstap i fremstillingen av biobrensel, dermed fremstår direkte forbrenning av ett tonn ts flis fra GROT som bedre enn konvertering av ett tonn GROT til flytende drivstoff.

3.3 Scenario 3: Økt hogst forårsaket av økt etterspørsel etter virke til energi

Figur 20 viser momentant strålingspådriv over 90 år fra hogsttidspunkt ved uttak, sagflisproduksjon og forbrenning av sagflis fra tømmer. "Hogsteffekt" vil si strålingspådriv forårsaket av nedbrytning av hogstavfall, og opptak av CO_2 i ny skog som vokser til, fratrukket opptaket som ville skjedd dersom den opprinnelige skogen hadde blitt stående. Denne effekten gir et betydelig positivt strålingspådriv fram til ca. 75 år etter hogst, for så å gi et negativt strålingspådriv de siste årene, på grunn av opptaket av CO_2 i ny skog som vokser fram.



Figur 18: Momentant strålingspådriv forårsaket av hogst og bruk av virke til flisfyring når uttak av virke medfører hogst av 1 hektar skog.

Utslipp fra forbrenning av virke gir klimagassutslipp som medfører positivt strålingspådriv, mens økt albedo fra hogstflaten gir negativt strålingspådriv. Fossile utslipp knyttet til uttak, transport og bruk av maskiner er neglisjerbare. Netto strålingspådriv er høyest etter 20 til 40 år, for så å synke, men er positivt sett over hele 90-årsperioden. Det vil altså si at bruk av virke til flisfyring vil gi opphav til økte klimaendringer i mer enn 90 år fremover.

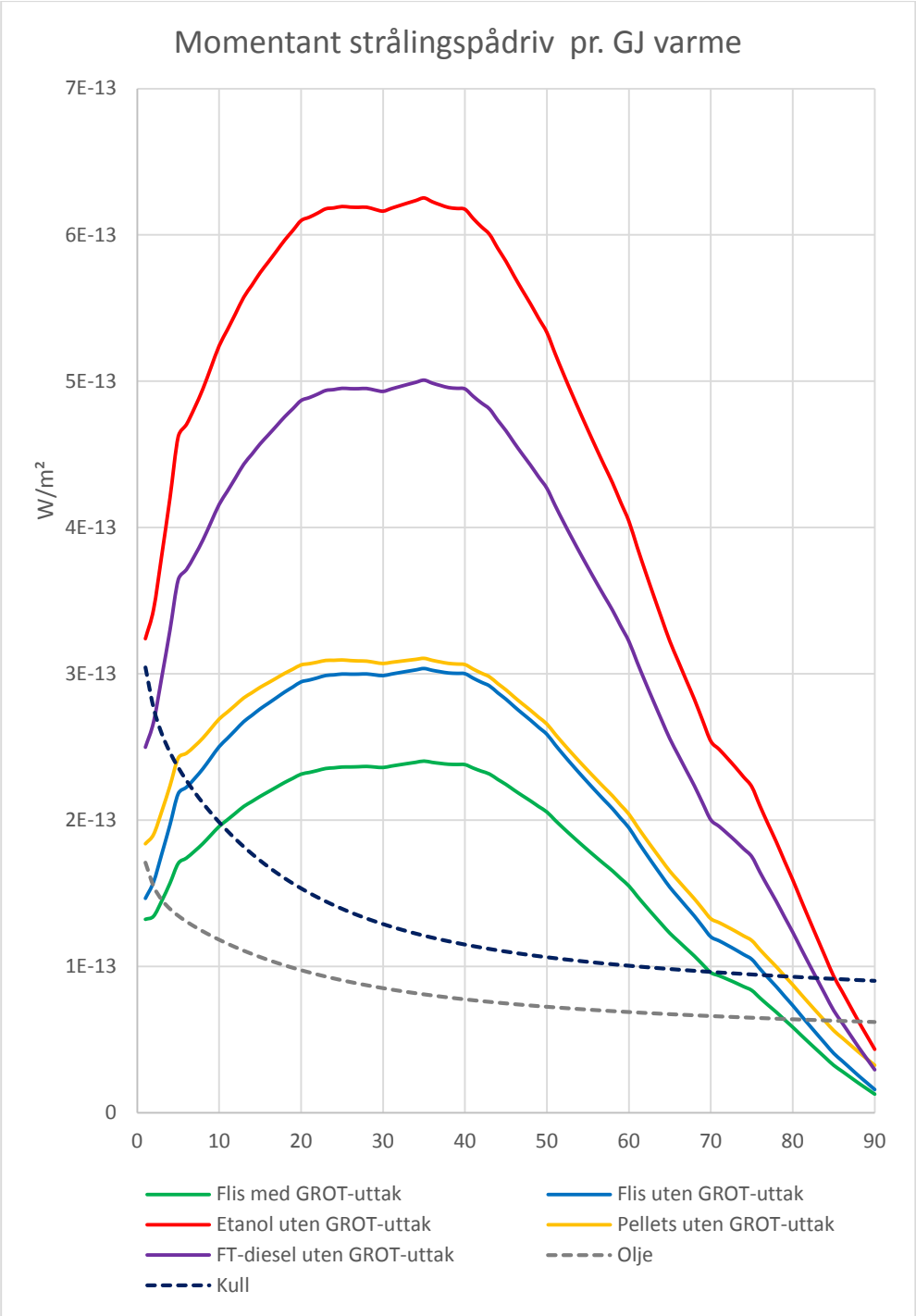
Tilsvarende beregninger er gjort for:

- Virke til flisfyring, med GROT-uttak

- Virke til pelletsfyring, med GROT-uttak
- Virke til pelletsfyring, uten GROT-uttak
- Virke til FT-diesel, med GROT-uttak
- Virke til FT-diesel, uten GROT-uttak
- Virke til bioetanolproduksjon, med GROT-uttak
- Virke til bioetanolproduksjon, uten GROT-uttak

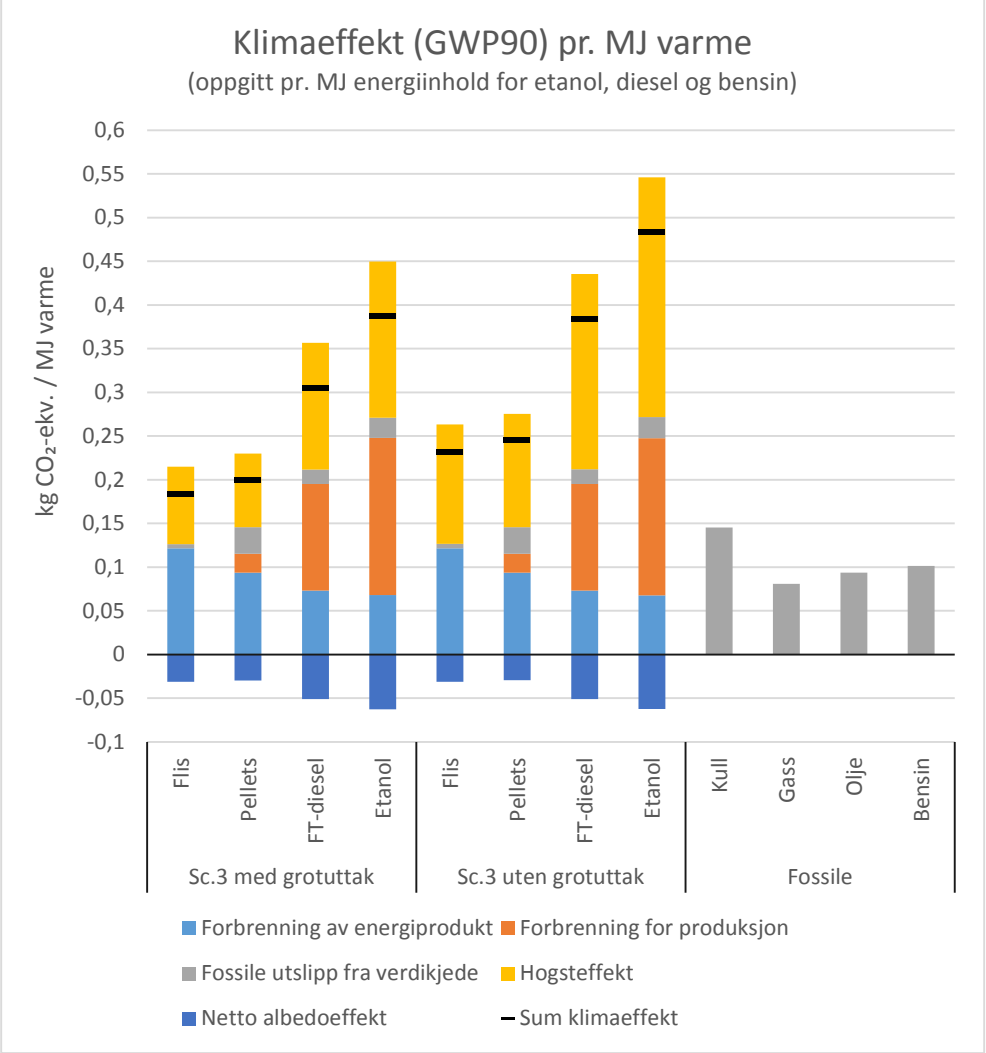
Nettoresultater av et utvalg av disse er vist i figur 19.

Figur 19 viser momentant strålingspådriv over en 90-årsperiode, for noen måter å fremstille varme fra skog, når det forutsettes at produksjonen av energivarer forårsaker hogst som ellers ikke ville forekommet. Til sammenligning vises strålinspådriv forårsaket av en tilsvarende mengde varme fra kull og olje.



Figur 19: Momentant strålingspådriv fra noen måter å fremstille varme fra skog, sammenlignet med tilsvarende energimengde fra kull og olje.

Strålingspådrivet er høyere fra de ulike formene for bioenergi, enn for tilsvarende energi fra kull eller olje i det meste av perioden. Imidlertid vil strålingspådrivet fra bioenergi reduseres, etter hvert som ny skog vokser frem der den gamle skogen ble hogget. Dette medfører at ved 90-årsperiodens slutt er strålingspådrivet mindre fra alle disse formene for bioenergi enn fra et utslipp forårsaket av en tilsvarende energimengde fra kull eller olje. Det kumulative strålingspådrivet for 90-årsperioden er vist i figur 20.



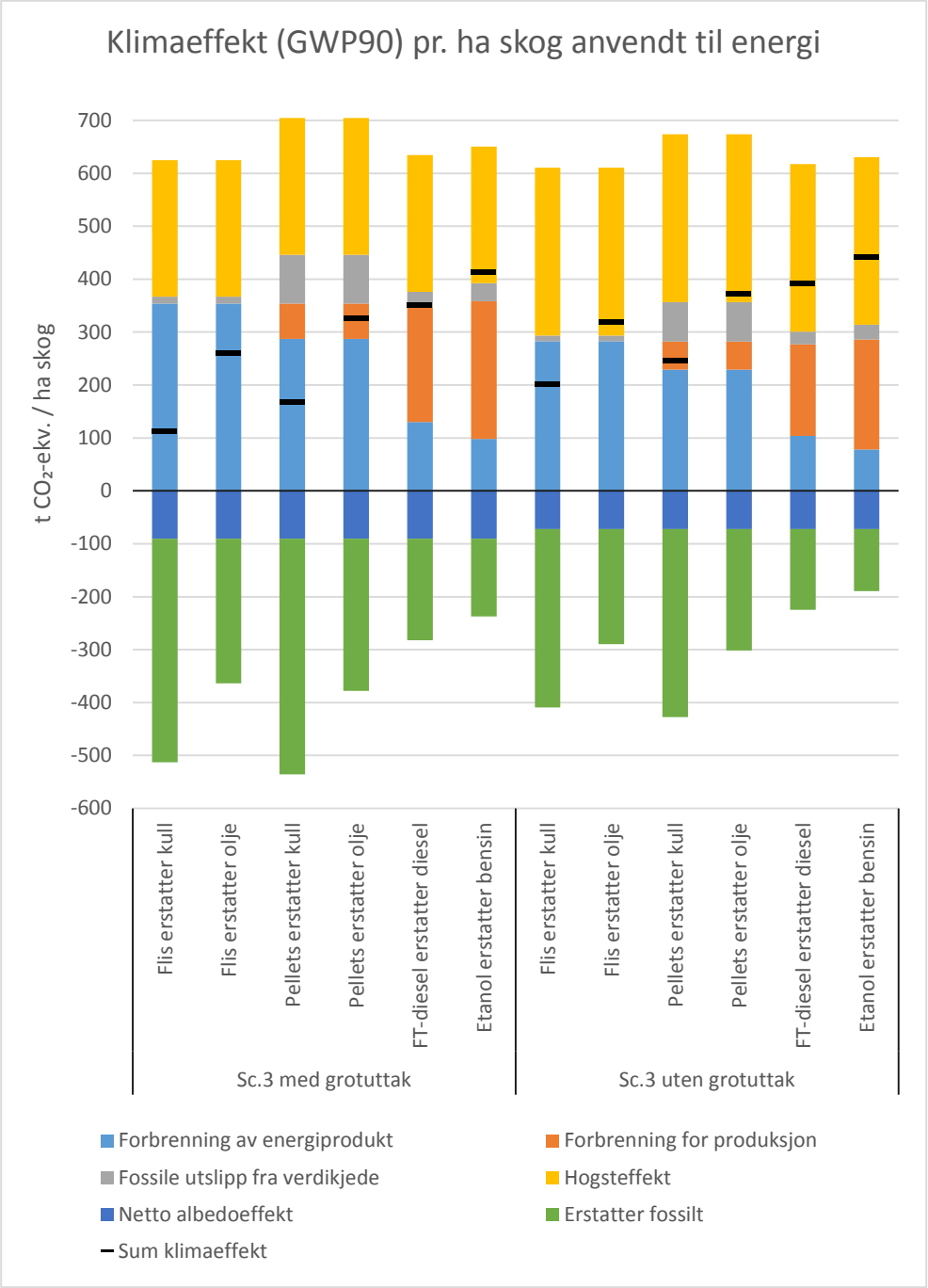
Figur 20: Kumulativt strålingspådriv angitt i kg CO_2-ekvivalenter pr. MJ levert varme (tilsvarer utslipp av CO_2 ved analysens år 0) for 90-årsperspektiv. Til sammenligning vises livsløpsutslipp pr. MJ for noen fossile brensler (inkludert oppstrømsutslipp).

Som vi kan se på figuren gir uttak av skogsvirke til energiformål klimagassutslipp som forårsaker økt global oppvarming. Klimaeffekten er i et 90-årsperpektiv større enn tilsvarende klimaeffekt for fossile energikilder, det vil si mer uønsket påvirkning på klimaet.

Uttak av GROT sammen med stammevirke reduserer klimaeffekten pr. MJ levert varme, da man "sparer" klimagassutslipp i skogen, og isteden får levert energi for et tilsvarende utslipp fra forbrenning, samtidig som albedoeffekten øker som følge av GROT-uttak.

Det gir mindre klimapåvirkning å benytte skogsvirke til flisfyring enn til framstilling av FT-diesel eller etanol. Dette skyldes konverteringstap og bruk av energi underveis i verdikjedene, som gjør drivstoffproduksjon fra skogsråvare mindre klimavennlig.

Figur 21 viser klimaeffekten av å anvende skog til erstatning for fossile energikilder. I alle analyserte tilfeller medfører en slik erstatning økt global oppvarming i et 90-årsperspektiv. Årsaken til dette ligger i at ved avvirkning av skog tapes muligheten for et snarlig høyt karbonopptak i moden skog som er i en vekstfase. Isteden blir det, i tillegg til selve forbrenningsutslippet, et utslipp fra nedbrytning av hogstavfall. I grafen betegnes disse to uønskede effektene, fratrukket det CO_2-opptak som etter hvert vil bli i ny, fremvoksende skog, som "hogsteffekten".

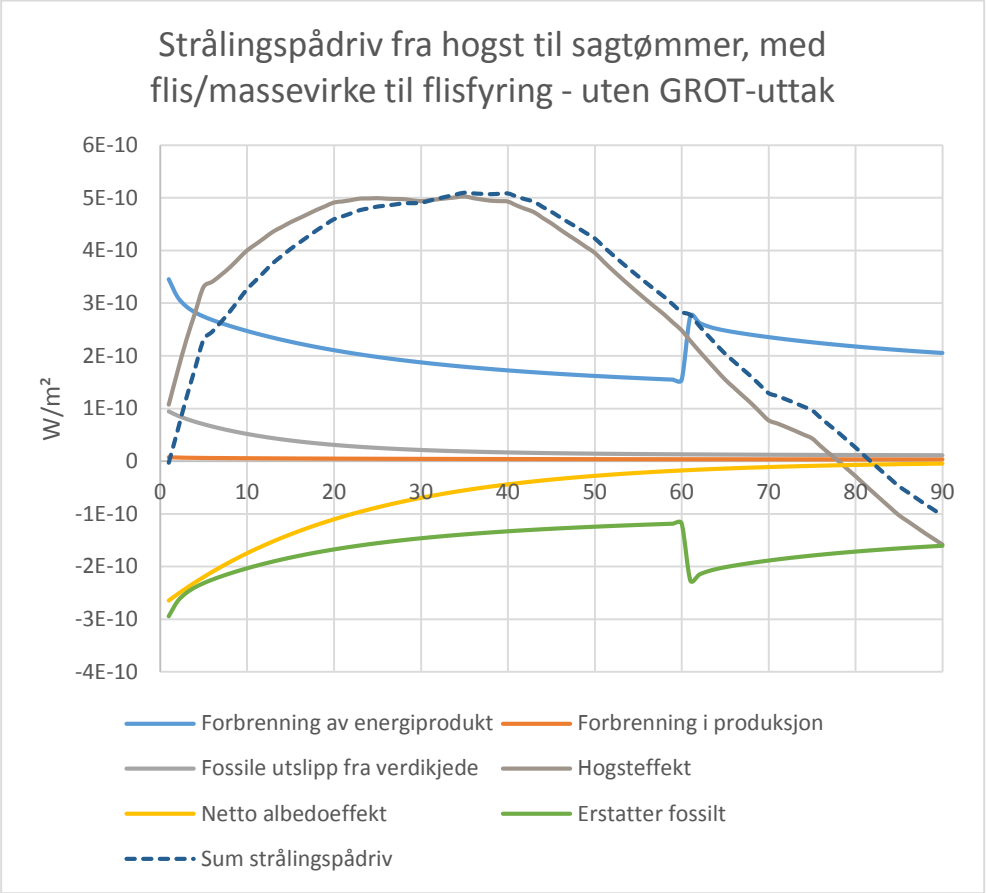


Figur 21: Kumulativt strålingspådriv angitt i kg CO_2-ekvivalenter pr. hektar skog anvendt til erstatning av fossil energi (tilsvarer utslipp av CO_2 ved analysens år 0) for 90-årsperspektiv.

3.4 Scenario 4: Økt hogst forårsaket av økt etterspørsel etter sagtømmer

I Scenario 4 blir omtrent en fjerdedel av den avvirkede massen til 116 m³ trelast, som det er antatt har en levetid på 60 år før det blir avhendet med energiutnyttelse. Levetiden på 60 år tjener som et eksempel, da levetiden for komponenter av tre kan være lengre, f.eks. for innendørs stendere, eller kortere, f.eks. fasader som er utsatt for vær og vind. Utskiftninger kan også forekomme tidligere enn teknisk levetid tilsier.

Figur 22 viser momentant strålingspådriv over 90 år fra hogsttidspunkt ved fremstilling og bruk av 116 m³ trelast, som tilsvarer utbyttet fra 1 ha skog. Det er medregnet at flis, massevirke og avkapp, samt treavfall etter trelastens levetid (satt til 60 år), brukes til flisfyring og erstatter oljefyring.

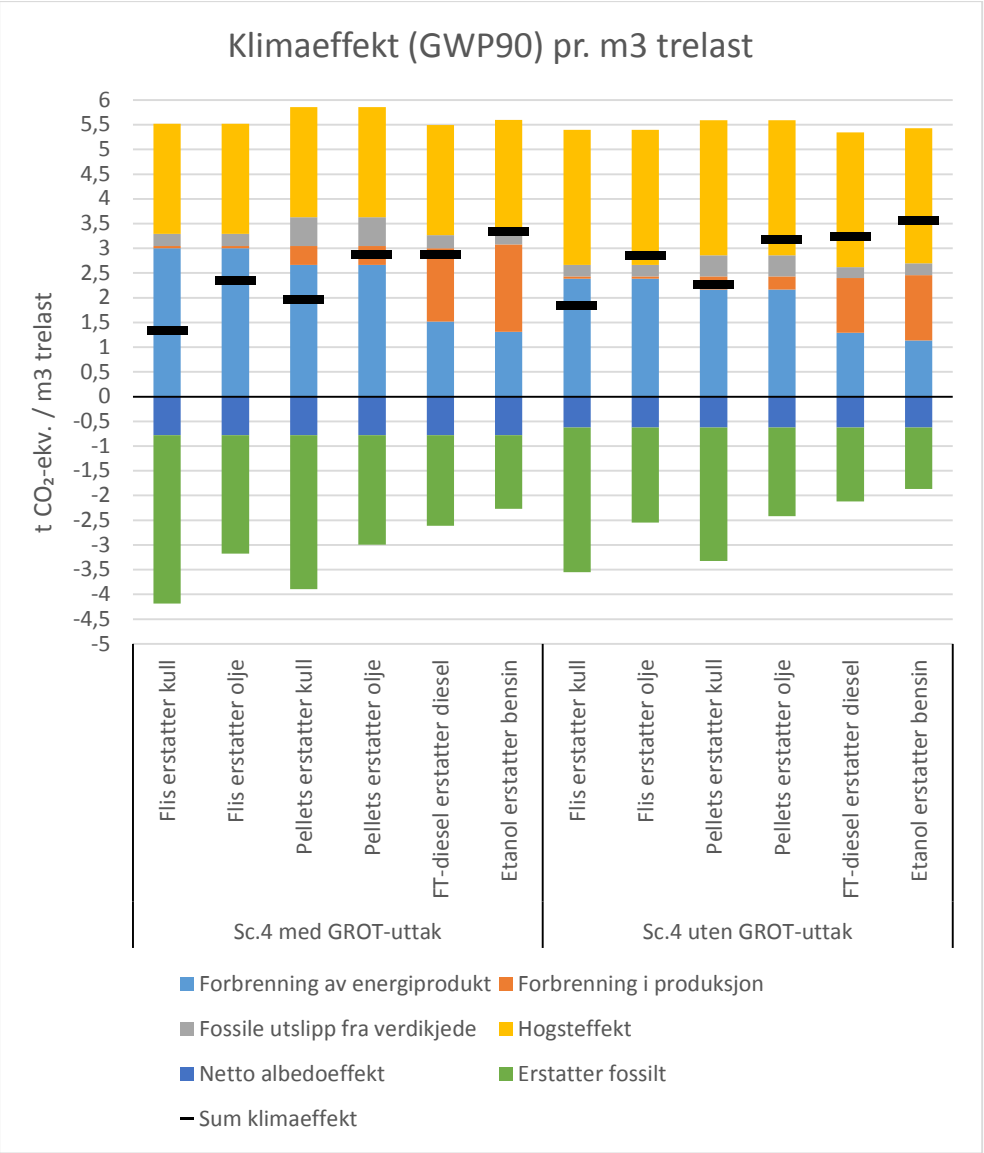


Figur 22: Momentant strålingspådriv fra hogst av 1 hektar skog til sagtømmer, når flis, massevirke og avkapp, samt tre-avfall etter endt levetid, brukes til flisfyring og erstatter oljefyring

"Hogsteffekt" vil si strålingspådriv forårsaket av CO_2 fra nedbrytning av hogstavfall, og opptak av CO_2 i ny skog som vokser til, fratrukket opptaket som ville skjedd dersom den opprinnelige skogen hadde blitt stående. Denne effekten gir et betydelig positivt strålingspådriv fram til ca. 75 år etter hogst, for så å gi et negativt strålingspådriv de siste årene, på grunn av opptaket av CO_2 i ny skog som vokser fram.

Utslipp fra forbrenning av virke gir klimagassutslipp som medfører positivt strålingspådriv, men dette utslippet oppveies for det meste av reduserte utslipp fra oljefyring, når det antas at varme fra flis erstatter varme fra olje. Økt albedo fra hogstflaten gir også negativt strålingspådriv. Netto strålingspådriv er høyest etter 20 til 40 år, for så å synke, og er negativt etter ca. 80 år. Det vil altså si at uttak av tømmer til trelast, med massevirke og flis til flisfyring, vil gi opphav til økt strålingspådriv i ca. 80 år, for deretter å medføre mindre strålingspådriv enn om man hadde latt være å ta ut og bruke tømmeret. Eventuelle utslipp knyttet til behandling og vedlikehold av trelasten i løpet av levetiden ikke er medregnet.

Figur 23 viser klimaeffekten i form av kumulativt strålingspådriv over 90 år pr. m³ trelast produsert når massevirke og sagflis brukes til ulike energiformål som erstatter fossile brensler. Det er antatt at avkapp samt treavfall fra trelast etter endt levetid forbrennes med energiutnyttelse og erstatter oljefyring.



Figur 23: Kumulativt strålingspådriv angitt i kg CO_2-ekvivalenter pr. m³ trelast (tilsvarer utslipp av CO_2 ved analysens år 0) for 90-årsperspektiv. Flis og massevirke erstatter fossile brensler.

Én kubikkmeter med trelast gir et kumulativt strålingspådriv (omregnet i CO_2-ekvivalenter) på mellom rett i underkant av 1,5 tonn og rett i overkant av 3,5 tonn. Disse resultatene er basert på at erstatning av fossile energikilder er inkludert, men det er ikke sett på erstatning av andre byggematerialer. For å kunne si om et slikt bidrag til klima er stort eller lite, må det sammenlignes med andre konstruksjonsmaterialer.

Klimaeffekten knyttet til bruk av sagflis og massevirke isolert sett, vil være tilsvarende den vist i Figur 13 og Figur 14 under Scenario 1. Absolutte utslipp er i denne sammenheng ikke relevant, ettersom restprodukter uansett vil måtte disponeres på en eller annen måte. Forskjellene mellom de ulike metodene for energiutnyttelse kan derimot

være interessante, da de kan ha betydning for klimaeffekten til trelast, som vist i figuren over.

3.5 Oppsummering av resultater

1 Hva er klimaeffekten av å anvende skogsvirke til energiformål dersom alternativet er å la skogen stå og fortsette å binde karbon?

Dette spørsmålet har på sett og vis blitt adressert i alle scenarioene, men det var scenario 3 som var skreddersydd til å gi svar på spørsmålet. I resultatene for scenarioet er det tydelig at man over en tidshorisont på 90 år gir forsterkede klimaendringer ved å avvirke skog til energiformål snarere enn å la den stå og binde karbon. Det gjelder også om tømmer tas ut i den hensikt å erstatte fossile energikilder fremfor å la skogen stå. Mest bidrag til negative klimaendringer får man ved produksjon av etanol, mens flisfyring som erstatning for kull kommer best ut. Ut fra Figur 18 kan man imidlertid se at skogsbaserte energikilder vil ha mindre klimaeffekt enn fossile energikilder om man ser det i et lenger tidsperspektiv. Dette er ytterligere diskutert i neste kapittel.

I scenario 1 gir resultatene svar på hvilket bidrag til klimaendringer enn får ved å bruke restproduktene fra sagbruk og treforedling til energiformål. Selv under slike forutsetninger vil det være et større bidrag til klimaendringer fra flesteparten av de skogbaserte verdikjedene. Det er bare ved substitusjon av forbrenning av kull at man oppnår mindre bidrag til klimaendringer enn ved fossile verdikjeder. Det er her ikke regnet med at restproduktene, dersom de ikke ble benyttet til energiformål likevel ville nedbrytes og forårsake klimagassutslipp. Med en slik forutsetning vil utnyttelse av restprodukter til energiformål gi mindre bidrag til klimaendringer enn fossile energikilder.

2 Hva er klimaeffekten av å benytte GROT (greiner og topper, hogstavfall) til energiformål, istedenfor å la GROT ligge igjen etter hogst?

Resultatene fra scenario 2 viser at uttak av GROT til energiformål vil gi et mindre bidrag til klimaendringer enn ved å la GROTen ligge og benytte fossile energikilder til å oppfylle behovet for energi. Dette skyldes at det også vil være utslipp knyttet til nedbrytning av GROT i skogen. Fordelen ved å benytte GROT til energiformål er både at man får et nyttbart produkt for det utslippet som uansett vil finne sted og at man får en forhøyet albedo når GROTen tas ut. Fordelen gjelder uansett hvilket energiprodukt som produseres, og fordelingen mellom hvilke produkter og substitusjoner som er mest gunstige for klimaet følger samme trend som fortalt i forbindelse med scenario 1 og scenario 3, hvor mindre konvertering gir bedre klimaprestasjon (altså mindre bidrag til klimaendringer) enn mer kompliserte energiprodukter fra skogen.

3 Hva er klimaeffekten av bruk av tre (sagtømmer) i konstruksjoner, når dette også medfører en produksjonsrest til energi?

I scenario 4 er det sett på klimaeffekten ved å bruke mer sagtømmer i konstruksjoner. Fra grafene kan man se at én kubikk med trelast fører til et kumulativt strålingspådriv (regnet om til CO_2-ekvivalenter) på mellom rett i underkant av halvannet tonn til rett i overkant av tre og et halvt tonn. Det er ikke rett frem å si hvorvidt dette er et stort eller lite bidrag til klimaendringer, da det vil avhenge av hva som er alternativene til bruk av trevirke i konstruksjoner, altså hvilken mengde av hvilke bygningsmaterialer som alternativt kan benyttes for å oppnå samme konstruksjonsmessige funksjon.

4. Diskusjon og konklusjoner

Resultatene presentert i foregående kapittel er selvfølgelig sterkt avhengig av de forutsetningene som ligger til grunn for analysene. I modellene som er benyttet er mange forenklinger gjort for å kunne beregne resultater. Det gjør at resultatene i større grad angir prinsipielle verdier enn helt faktiske, absolutte verdier. For eksempel vil modellen for opptak og utslipp av CO_2 fra skog være avhengig av treslag, bonitet, klima og andre faktorer som påvirker vekst.

Rotasjonstiden for biomassen er av stor betydning for resultatene, og den lange rotasjonstiden for boreale skoger er en ulempe på kort sikt. Det betyr at det tar lang tid før den mengden karbon som blir sluppet ut i forbindelse med konvertering fra biomasse til energi igjen blir lagret i skogen. Det er imidlertid ikke så enkelt som at skog (eller andre plantevekster) med kortere rotasjonstid nødvendigvis gir mindre bidrag til uønskede klimaendringer.

Buk av boreal skog vil, i hvert fall i Norge hvor det er en årlig tilvekst av biomasse i skogen, ikke føre til konkurranse om bruk av arealer til dyrking av planter. Mange studier har vist at klimagassutslipp knyttet til indirekte arealbruksendringer ofte er den viktigste faktoren med tanke på bruk av biomasse til energiformål. Det vil si at bioenergiproduksjon legger beslag på arealer som fører til at arealer med høy karbonbinding gjøres om til arealer med lav karbonbinding andre steder i verden. Holtsmark (2014) benytter et eksempel hvor vi i Norge kjøper rapsolje fra Tyskland, som da igjen vil kjøpe sertifisert palmeolje fra Sørøst-Asia. Dét vil imidlertid føre til at matindustriens behov for palmeolje må dekkes av nye plantasjer på bekostning av regnskog som hugges. Slik avskoging regnes da som indirekte arealbruksbruksendring. Implisitt i dette avsnittet ligger det at skoger med lengre rotasjonstid binder mer karbon per arealenhet enn arealer med mer kortlivede plantevekster.

Denne analysen ser på strålingspådrivet, og dermed bidraget til global oppvarming, 90 år fram i tid fra en eventuell hogst. Tidsperspektivet er valgt fordi dette er normal rotasjonstid på granbestandet som er utgangspunktet for analysen. I løpet av denne 90-årsperioden vil alle alternativene for anvendelse gi et bidrag til global oppvarming i form av kumulativt strålingspådriv. Dette skyldes hovedsakelig at bestandet er i en vekstfase når det hogges 90 år gammelt, og man går derfor glipp av et betydelig CO_2-opptak

samtidig som nedbrytning av hogstavfall medfører CO_2-utslipp de første årene etter hogst. Dette medfører at bruk av skog til energiformål, dersom det innebærer økt avvirkning, i et 90-årsperspektiv gir større bidrag til global oppvarming enn tilsvarende bruk av fossile brensler.

Imidlertid vil en skog som ikke hugges etter hvert slutte å vokse, og fungere videre som et karbonlager, det vil si at den ikke bidrar til videre karbonfangst. Analyser med lengre tidsperspektiv vil derfor gi andre resultater. Resultatene av analyser med lengre tidsperspektiv vil avhenge av om skogen hogges én gang med påfølgende elding, eller om den hogges gjentatte ganger med en viss rotasjonstid.

Bruk av GROT til energiformål vil gi en ønsket effekt med hensyn til klimaendringer. Dette er basert på en forutsetning om at skogen uansett avvirkes, slik at GROT som ikke benyttes til energiformål, likevel vil avgi klimagasser når den blir liggende i skogen og brytes ned, men da vil man ikke få noen nyttbar funksjon fra denne GROTen. Det er selvsagt ikke helt sant, da det for eksempel avgis næringsstoffer fra GROT til jorda, og det er anbefalt å la hogstavfallet ligge i hvert fall til nåler har falt av og også etterlate ca 1/3 i skogen (Clarke, et al. 2014).

Det er store usikkerheter knyttet til karbonbinding i jord og det gjenstår mye forskning før man kan slå fast hvordan karbonlageret utvikler seg over tid. For eksempel vet man foreløpig lite om hvordan ulike hogstformer påvirker karbonmengden, om uttak av GROT medfører varige endringer og hvordan gjentakende hogstsykluser virker inn. Det er derfor ikke regnet med slike effekter i denne analysen.

Klimaeffekten av å benytte trevirke til energiformål vil være svært forskjellig, avhengig av om bruken initierer avvirkning av bestand som ellers ikke ville blitt avvirket, og avhengig av hvilket energiprodukt som produseres, hvilket behov dette energiproduktet kan dekke og hva som er aktuell alternativ måte å dekke det samme behovet på.

Dersom benyttelse av trevirke til energiformål ikke påvirker avvirkning, noe som kan være tilfelle om prisen er lav, kan benyttelsen anses som en utnyttelse av et biprodukt/avfallsprodukt som likevel må disponeres på en eller annen måte, og det relevante spørsmålet er ikke om trevirke bør anvendes til energiformål, men hvordan og til hvilket energiformål det bør anvendes for å dekke et energibehov som ellers vil dekkes med fossile energikilder.

Den beste av de muligheter som er inkludert i denne analysen er om trebasert brensel kan benyttes til å fremstille varme der kull ellers ville blitt brukt til å fremstille den samme mengde varme. Anvendelsesområder der trebrensel erstatter olje kan også være et godt alternativ. Fremstilling av biodrivstoff fra trevirke medfører et høyt konverteringstap som gjør at dette fremstår som et mindre gunstig alternativ.

Samtidig er det slik at dersom energi fra skog skal erstatte fossile energikilder, er flytende drivstoff til kjøretøy et område der øvrige alternativer til fossile brensler kan være mer begrenset enn til stasjonær forbrenning. Dersom man legger større vekt på klimaeffekter lengre inn i fremtiden enn klimaeffekter de neste 90 år, kan det dermed være grunn til å

satse på biodrivstoff, selv om de i et 100-årsperspektiv gir et større bidrag til klimaendringer enn drivstoff fra fossile energikilder. Andre analyser har vist at en overgang fra fossile drivstoff til biobaserte drivstoff vil være nødvendig for å nå togradersmålet (IPCC 2014), selv om dette medfører økt global oppvarming på kort til mellomlang sikt. Dette er nærmere beskrevet i litteraturgjennomgangen i det første delprosjektet.

For skog brukt til konstruksjonsvirke kreves det en mer spesifikk analyse av sammenlignbare alternativer for å kunne si hva klimaeffekten er. I denne analysen er det brukt en levetid på trevirket på 60 år. Dette er normalt antatt som teknisk levetid for treverk, men mye trevirke har i praksis lenger levetid i bygninger. Denne forutsetningen har imidlertid ikke så mye å si for størrelsen på resultatene for konstruksjonsvirke som sådan, da de er mer påvirket av at en såpass stor mengde av uttatt virke går til andre formål enn konstruksjonsformål.

Konstruksjoner av trevirke lagrer karbon, men karbonet som lagres i trevirket ville uansett vært lagret i skogen dersom trevirket ikke ble benyttet. Bruk av trekonstruksjoner som "karbonlager" vil dermed si, innenfor denne analysens tidsperpektiv, at karbon flyttes fra ett lager (skogen) til et annet (en konstruksjon).

Resultatene i denne analysen indikerer at avvirkning av skog til energiformål i dag, dersom skogen får vokse fritt og eldes istedenfor å hogges på nytt etter en ny hogstsyklus, i 80-90 år medfører et høyere momentant strålingspådriv, for deretter å gi et lavere momentant strålingspådriv enn om det brukes fossile energikilder i dag (se figur 19).

En problemstilling det her ikke er gått nærmere inn på, er hvordan klimaeffekten vil bli etter avvirkning ved gjentatt hogst etter gitt rotasjonstid. Dersom tidsperspektivet blir langt nok, vil imidlertid bruk av skog til energi fremstå som bedre enn bruk av fossile brensler, ettersom karbon da vil "gjenbrukes", og alternere mellom biosfære og atmosfære, mens bruk av fossile energikilder vil gi et tilskudd av karbon til atmosfæren fra litosfæren. En slik lengre analyse vil imidlertid kreve antagelser om hvilke energikilder som vil benyttes om én rotasjonstid (90 år) inn i fremtiden: om fossile energibærere fortsatt spiller en betydelig rolle som energikilder, eller om de er erstattet av fornybar energi. Mulighetene for en slik analyse er også begrenset av stor usikkerhet knyttet til karbonbinding i skog som når en alder på over 200 år.

Ut fra resultatene i analysen må det konkluderes med at skog til energiformål har et ikke ubetydelig bidrag til klimaendringer i en 90-årsperiode. Dersom alternativet er å la moden skog bli stående og vokse seg gammel, vil avvirkning medføre økt global oppvarming, enten avvirkningen skyldes hovedfokus på energiformål eller er drevet av en etterspørsel etter sagtømmer.

Uttak og bruk av GROT til energiformål fremstår i alle tilfeller som et klimatiltak som gir redusert global oppvarming under de forutsetninger at energi fra GROT erstatter energi fra fossile energibærere, og at GROT-uttaket gjøres på en måte som ikke medfører et tap av næringsstoffer som vesentlig hemmer tilveksten av ny skog.

5. Referanser

Belbo, H., & Gjølsjø, S. (2008). *Trevirke - brennverdier og energitetthet.* Ås: Norsk institutt for skog og landskap. Hentet fra http://www.skogoglandskap.no/filearchive/viten-01-08_trevirke_brennverdier.pdf

Cherubini, F., Bright, R. M., & Strømman, A. H. (2012). Site-specific global warming potentials of biogenic CO2 for bioenergy: Contributions from carbon fluxes and albedo dynamics. *Environmental Research Letters*, 7.

Cherubini, F., Gasser, T., Bright, R. M., Ciais, P., & Strømman, A. H. (2014). Linearity between temperature peak and bioenergy CO2 emission rates. *Nature climate change.* doi:10.1038/NCLIMATE2399

Clarke, N., Eldhuset, T. D., Hanssen, K. H., Kjønaas, O. J., Lange, H., Nordbakken, J. F., Økland, T. (2014, 12 15). *Vi kan få bærekraftig bioenergi fra skog.* Aftenposten.

Ecoinvent Centre. (2014). *Ecoinvent 3.1.* Switzerland.

Graabak, I., & Feilberg, N. (2011). *CO2 emissions in different scenarios of electricity generation in Europe.* Trondheim: Sintef Energi AS.

Holtsmark, B. (2014). *A comparison of the global warming effects of wood fuels and fossil fuels taking albedo into account.* Oslo: Statistisk Sentralbyrå.

Holtsmark, B. (2014, 12 6). *Ikke bærekraftig produksjon.* Aftenposten.

KLIF. (2011). *Skog som biomasseressurs.* Oslo: KLIF.

Levasseur, A. (2013). *Instruction Manual: New Generation Carbon Footprinting - thanks to the Dynamic carbon footprinter v1.0.* Hentet fra CIRAIG - DYNCO2 Dynamic Carbon Fottprinter: http://www.ciraig.org/pdf/DYNCO2_InstructionManual.pdf

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquix, M., Averyt, K., . . . Miller, H. (2007). *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.* Cambridge og New York: Cambridge University Press.

Suh, S., & Nakamura, S. (2007). Five years in the area of input-output and hybrid LCA. *The international journal of life cycle assessment*, 12(6), 351-352.

Tellnes, L. G., Flæte, P. O., & Nyrud, A. Q. (2011). *Material flows in the Norwegian sawmilling industry.* 7th meeting of the Nordic-Baltic network in wood material science and engineering (WSE) (ss. 113-118). Oslo: Norsk institutt for skog og landskap.

Vessia, Ø., & Lindberg, K. B. (2008). *Vil lavere kraftforbruk i Norge gi lavere CO2-utslipp fra europeisk kraftproduksjon?* Kvartalsrapport for kraftmarkedet - 1. kvartal 2008, ss. 51-62.

Vold, B. I., Brekke, A., & Lyng, K.-A. (2011). *Energibruk og konverteringstap ved bioenergiproduksjon.* Oslo: NVE.

Xiaoyu, Y., Inderwildi, O. R., King, D. A., & Boies, A. M. (2013). Effects of Ethanol on Vehicle Energy Efficiency and Implications on Ethanol Life-Cycle Greenhouse Gas Analysis. *Enviromnental Science & Technology*, 5535-5544.

Bilag A Analyserte alternativer: En grundigere beskrivelse av verdikjedene

A.1 Uttak av skog

Skogbrukets forsyningskjede fra skogplanting til industri er utførlig beskrevet i to rapporter fra prosjektet KlimaTre, «Energiforbruk og kostnader - Skog og bioenergi» (Vennesland, et al. 2013) og «Klimagassutslipp i skogbruket - fra frø til industriport. Vugge-til-port livsløpsanalyse (LCA)» (Timmermann & Dibdiakova 2013). Dette og påfølgende kapittel bygger i stor grad på resultater fra disse rapportene, samt på statistikk fra SSB (2014) og Landbruksdirektoratet (2014, tidligere SLF), og gir en generell beskrivelse av uttak og transport av biomasse fra skog i Norge.

A.2 Tynning

Ved tynning tar man ut en viss andel av trærne i et bestand for å fristille og gi bedre lys- og vekstforhold for de gjenstående trærne. I tette bestand som ikke tynnes, vil konkurransen mellom trærne etter hvert redusere veksten på noen trær så mye at de dør. Tynning utføres med hogstmaskin, og gjennomsnittlig uttaksvolum er 5 m^3 per daa. Tynning bidrar på årsbasis med ca. 13 % til det totale avvirkningsvolumet. Til terrengtransport (utkjøring av tømmer fra bestandet til nærmeste velteplass / skogsbilvei) benyttes små eller mellomstore lassbærere. De minste maskinene vil kreve en mindre stikkveisbredde, men lasstørrelsen er lavere enn for de mellomstore maskinene. Midlere kjøreavstand fra skogen til nærmeste skogsbilvei er anslått til 300 m.

A.3 Sluttavvirkning

Sluttavvirkning (foryngelseshogst) danner avslutningen på bestandets produksjonsfase, og forbereder starten på neste omløp. Det finnes ulike former for foryngelseshogst, blant annet flatehogst, småflatehogst, frøtrestillingshogst og skjermstillingshogst. Sluttavvirkningen gjennomføres med samme type hogstmaskin som tynningen. Gjennomsnittlig uttaksvolum er 23 m^3 per daa og gjennomsnittlig størrelse på avvirkningsarealet 50 daa. Rundt 85 % av det totale avvirkningsvolumet stammer fra sluttavvirkning. Til terrengtransport ved foryngelseshogst benyttes lassbærere på samme størrelse som ved tynning. Midlere kjøreavstand på landsbasis fra hogstflata til nærmeste skogsbilvei er 500 m.

A.4 Annen avvirkning

I bratt terreng utføres sluttavvirkningen med taubanesystem eller kabelkran. Trærne felles manuelt med motorsag og fraktes til velteplassen med en taubane eller kabelkran. Hogstvolumet fra denne hogstformen er per i dag liten i forhold til avvirkning med hogstmaskin og lassbærer. Driftskostnadene er høye grunnet lavere produktivitet, behov for flere tunge maskiner og flere mann i manuelt arbeid. Bare rundt 1 % av det årlige hogstvolumet utvinnes med kabelkran. Heltreavvirkning (små diameter) til biobrenselformål utføres med hogstmaskin og lassbærer og omfatter bl.a. veikantrydding. Også dette hogstvolumet er lite og utgjør ca. 1 % av totalen.

A.5 Hogstavfall (GROT)

Hogstavfall (greiner og topper – GROT) utnyttes i dag i liten grad til bioenergi i Norge. Om man vil øke utnyttelsen av GROT etter hogst er det viktig å ta noen hensyn. GROT-haugene bør ligge igjen på hogstflata over sommeren, både for at hogstavfallet kan tørke og for at nålene, som har høyest næringsinnhold, kan falle av og gi næring til ny skog. Rundt en tredjedel av hogstavfallet bør ligge igjen for ikke å fjerne for mange næringsstoffer fra skogbunnen (i praksis vil dette skje uansett). GROT-høsting medfører ekstra terrengtransport med lassbærer og bør derfor fortrinnsvis utføres på vinteren når bakken er frossen for å unngå terrengskader, særlig på mark med dårlig bæreevne.

A.6 Transport av biomasse fra skog

Skogsbilveier

Et godt utbygd skogsbilveinett, som tømmerbilene kan benytte seg av for å hente tømmeret fra velteplassen i skogen, bidrar til å minske terrengtransporten og dermed klimagassutslipp forbundet med denne. På den annen side er veibygging både energi- og kostnadskrevende og forbundet med store utslipp. Tidligere utførte beregninger viser at bygging av 1 km ny skogsbilvei fører til utslipp av nesten 20 t CO_2 ekvivalenter. Ved veibygging blir skogen avvirket med hogstmaskin og lassbærer, stubber og jord fjernet med gravemaskin og grus fordelt med veihøvel eller lignende. Det brukes 1 800 tonn grus til nybygging og 600 tonn til oppgradering av 1 km skogsbilvei med standard veibredde på 4 m. I 2013 ble det på landsbasis bygget 105 km ny vei, og 330 km eksisterende vei ble oppgradert.

Tømmertransport

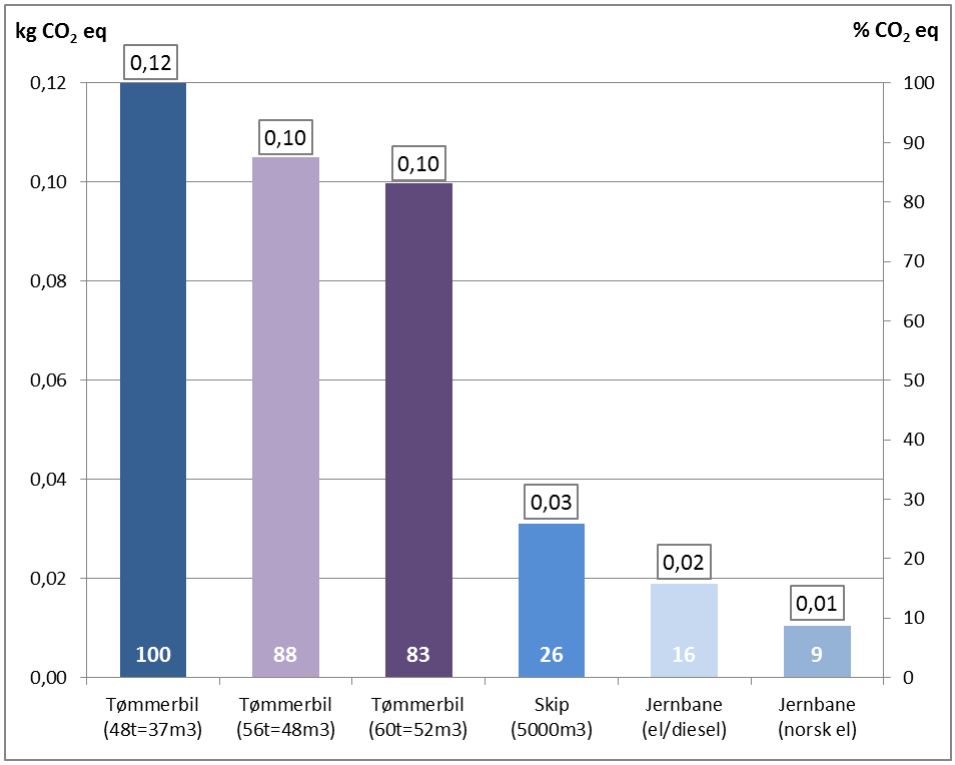
Tidligere studier (Michelsen, et al. 2008, Timmermann & Dibdiakova 2014) har vist at veitransport av tømmeret fra skogen til industrien (sagbruk og treforedlingsindustri) utgjør nesten halvparten av klimagassutslippene i skogbrukets forsyningskjede, som bl.a. omfatter skogplanting og andre skogkulturtiltak, avvirkning og leveranse til industriport. Avstanden fra skogen til industrien har derfor stor betydning for tømmerproduksjonens totale klimagassregnskap.

Tømmertransport på veien utføres i all hovedsak med tømmerbil med henger. Gjennomsnittlig lasstørrelse var 37 m^3 (tilsvarende en totalvekt på 48 t) og gjennomsnittlig drivstofforbruk 0,58 l/km i 2010. Større tillatt totalvekt for tømmerbilene og nye motorer med lavere forbruk og utslipp vil bidra til å bedre klimagassregnskapet for tømmertransporten. Siden tømmerbilene stort sett frakter heltømmer på åpne lasteplan med sidestøtter har de ingen mulighet for returfrakt. Det er store variasjoner i transportavstander på vei fra fylke til fylke. Sagtømmer utgjør vanligvis litt mer enn halvparten av det totale hogstvolumet. Nesten alt sagtømmer blir kjørt direkte fra skog til sagbruk med tømmerbil, og bare 1-2 % transporteres videre med jernbane. Midlere volumveide kjørelengde for sagtømmer på vei var 58 km i 2010. Massevirke transporteres gjennomsnittlig over lengre avstander på vei til fabrikk eller til nærmeste jernbaneterminal, og her var midlere volumveide kjørelengde 69 km i 2010.

Om lag en tredjedel av massevirket transportertes så videre over lengre avstander med jernbane, enten til treforedlingsindustrien i Norge, eller til en mottaker i utlandet (først og fremst i Sverige). Økt transport av tømmer på jernbanen vil kunne gi betydelige utslippsreduksjoner. Et tømmertog frakter vanligvis 800 til 1 000 m^3 tømmer og erstatter dermed 20-30 tømmerbiler på veinettet. Jernbanetransport av tømmer er likevel bare lønnsomt over lengre avstander, og begrenses også av en utilstrekkelig infrastruktur i form av manglende terminaler og for dårlig strekningskapasitet. Heller ikke jernbanevognene som benyttes til tømmertransport har mulighet for returfrakt (SLF/JBV 2010).

Skipstransport av tømmer og flis langs kysten til treforedlingsindustrien i Norge eller i utlandet er både kostnads- og energieffektivt pga. det store volumet som hvert skip kan frakte. Et mellomstort lasteskip har en kapasitet på rundt 5000 m^3 tilsvarende 125 tømmerbiler. Effektiv skipstransport forutsetter imidlertid tilfredsstillende kaianlegg langs kysten og nærhet til avvirkningsflatene for å unngå utstrakt biltransport i forkant av skipstransporten. Også her er infrastrukturen per i dag en begrensende faktor (Nørstebø et al. 2011).

I Figuren under illustreres klimagassutslipp per transportert m^3 tømmer med ulike transportmidler.



Figur: Klimagassutslipp i CO_2-ekvivalenter (CO_2-eq.) ved transport av 1 m^3 tømmer over en avstand på 1 km (=0,765 tkm) ved ulike transportalternativer. Venstre akse: kg CO_2-eq./m^3/km, høyre akse: Prosent CO_2-eq./m^3/km (i forhold til Tømmerbil, 48t), el=elektrisk kraft. Kilde: Timmermann & Dibdiakova 2013 og 2014.

Flistransport

I den grad hogstavfall utnyttes, bør dette hugges til flis før det transporteres fra skogen. Hogstavfall har et stort volum (lav tetthet) og krever mer transport per enhet enn flis. Flis kan dessuten transporteres med containerbil med mulighet for returfrakt.

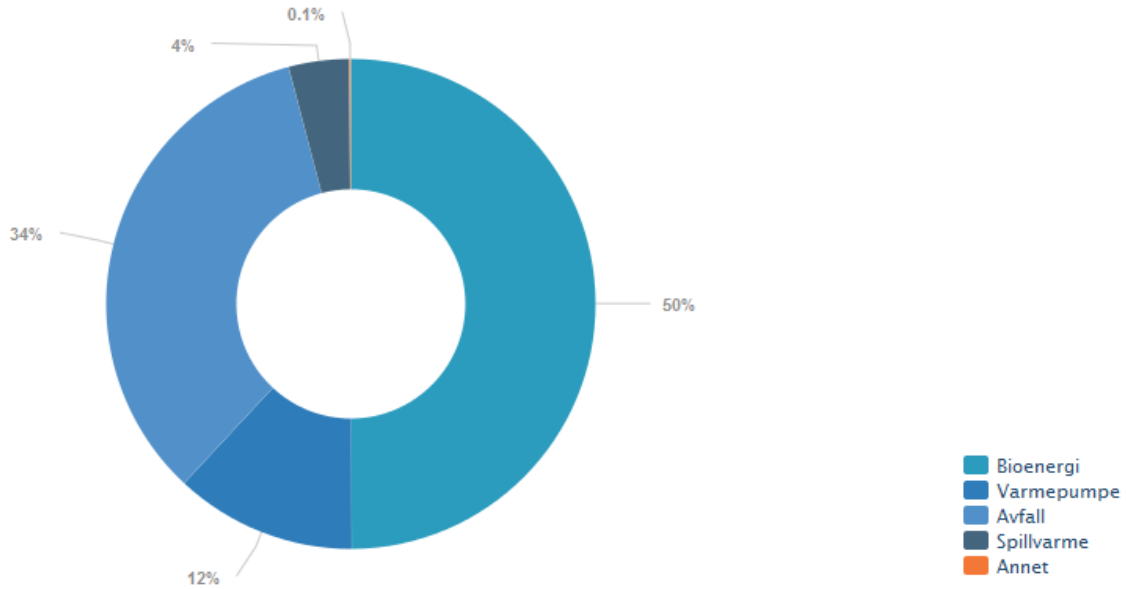
Biomasse fra veikantrydding består som oftest av busker og små trær. Disse buntes og fraktes med tømmerbil med sidelemmer til flising et annet sted.

A.7 Konvertering til bioenergiprodukter

Den teknologiske utviklingen har gjort det stadig mer økonomisk å utnytte biomasse som naturressurs. Det finnes ressurser nok til å dekke 20-25 % av klodens totale energibehov. Den vanligste måten å bruke bioenergi på er å holde seg med ved. I 2012 lå forbruket av ved i Norge på rundt 7-8 TWh, mens totalt forbruk av bioenergi lå på om lag 18 TWh. I Norge bygges flere termiske varmeanlegg som bruker treflis og annet trevirke som energikilde, men flesteparten av disse har en begrenset effekt (1-10 MW).

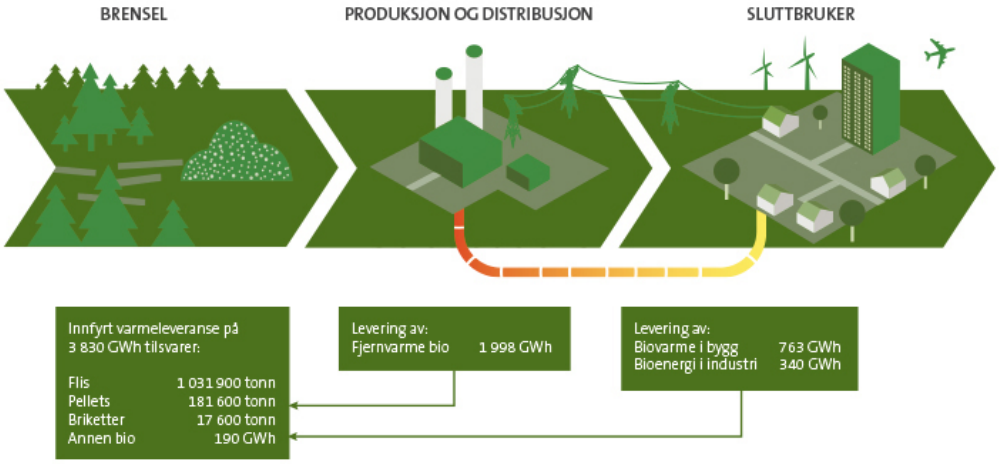
Biobrensel er en samlebetegnelse for all brennbart organisk materiale som kommer fra skogdrift eller jordbruk. Følgende biobrensel vurderes som aktuelle til bruk i industrien: flis, pellets og briketter, biogass, biofyringsolje, avfall og restprodukter.

I 2012 ble det i Norge gitt støtte til 331 GWh biobasert varmeleveranse og produksjon av biobrensel. Dette fordeler seg på 252 GWh biobasert varmeleveranse og 79 GWh biogassproduksjon. I varmeleveransen er det inkludert avfallsenergi med 73 GWh. Biobrensel som flis, pellets og briketter utgjør vel 50 prosent av energiresultatene som er oppnådd innenfor varmeproduksjon basert på fornybare energikilder i 2012. Av dette er det flis som dominerer og inngår som brensel i 74 prosent av varmeproduksjonen basert på bioenergi (Figur 1).



Figur 1 Fornybar energileveranse levert sluttbruker i perioden 2001-2012 fordelt på brensel (kilde: Enova).

Det kontraktsfestede energiresultatet med bioenergi som energikilde representerer en etterspørsel på rundt 1 million tonn flis, 180 000 tonn pellets og 18 000 tonn briketter. Omlegging til fornybar varme basert på bioenergi, enten den leveres via fjernvarmenett eller produseres lokalt hos den enkelte sluttbruker, virker oppover i verdikjeden. Dette er illustrert i Figur 2.



Figur 2 Varmeleveranse basert på bioenergi omregnet til produsert mengde biobrensel oppgitt i tonn (kilde: Enova).

En mulighetsstudie fra Enova for bioenergi i industrien i 2012 peker på et bedriftsøkonomisk potensial for konvertering til bioenergi i industrien på 3-4 TWh, forutsatt en pris på alternativ energikilde på 50 øre/kWh. Studien viser ressursens følsomhet for prisen på alternative energikilder, og med dagens prisnivå er det økonomiske potensialet lite uten støtte. Totalt forbruk av bioenergi i Norge var på 18,1 TWh i 2012. Ved en forutsatt flispris på 22 øre/kWh for flis er potensialet for økt utvinning av flis fra skogsbruket vurdert til hele 12 TWh. Om lag halvparten av dette potensialet kommer fra hogstavfall som har bestemte krav til forbrenningsteknologien. Tilgangen på flis er best på Østlandet, og da særlig i Hedmark, Oppland, Buskerud og mindre i Vest-Norge og Nord-Norge. Østfold, Vestfold og Telemark er også viktige fylker for utvinning fra skog. Tilgangen inkluderer skogvirke i Norge som vil bli gjort tilgjengelig for energiformål, inkludert både rundtømmer og sekundære biomasseressurser som grener, røtter og topper. For sekundære biomasseressurser er det tatt utgangspunkt i hogstavfall fra vanlig skogdrift. Ved en lavere brenselspris ned mot 18 øre/kWh vil den økte tilgangen på flis bare være på 3,5 TWh, mens 20 øre/kWh kan gi en utvinning på hele 9 TWh. En økning i pris til 26 øre/kWh kan øke tilgangen på flis til 15 TWh, forutsatt at øvrige tømmersortimenter har tilstrekkelig avsetning. For å utløse volum innenfor bioenergi, er de store anleggene og tett dialog med den profesjonelle delen av varmemarkedet og industriaktørene viktig.

Skogsråstoff representerer det viktigste potensialet for bioenergi. Tilveksten i skogen er nesten tre ganger høyere enn avvirkning og hogstavfall utnyttes i svært beskjeden grad. Samtidig har skogavvirkningen vært relativt konstant i nærmere 100 år og skogindustrien importerer 30-40 % av sitt virkesforbruk i et normalår. Dette viser at økte skogressurser og stor etterspørsel ikke nødvendigvis er tilstrekkelige faktorer for økt avvirkning.

I treforedlingsindustrien (inkluderer trelast, trevare, all produksjon av papirmasse og papir, samt øvrige treprodukter i Norge), som er den tredje største næringen når det kommer til energiforbruk, benyttes mye bioenergi, og da særlig egenprodusert bioenergi og biobasert avfall. Industrien har direkte tilgang på egne restprodukter fra biomasseforedlingen. Disse restproduktene har lav alternativ verdi for industrien og bruk til energiformål er derfor ofte lønnsomt. Det er stor grad av energigjenvinning i treforedlingsindustrien, og egenprodusert varme/damp dekker total ca. 8 % av energibehovet. Industrien er på tross av høy bruk av bioenergi, fjernvarme og energigjenvinning likevel en kraftintensiv bransje, og innkjøpt elektrisitet er den største energibæreren inn. Mye av produksjon skjer på Østlandet og i Midt-Norge som har sammenheng med god tilgang på trevarer som råvare inn in industrien. Innen trelast går ca. 85 % av energibruken til tørking av saget virke før salg eller høvling. Innen papir- og kartong-produksjon står også tørking ved bruk av damp i en tørkemaskin for en stor andel.

A.8 Flis

Flis er tre med eller uten bark som har blitt hugget opp til flis med en lengde under 150 mm. Flis produseres i dag i hovedsak av returvirke og rundtømmer (biovirke og energivirke) fra skog. Flis kan ha varierende foredlingsgrad og egenskaper, avhengig av treslag, utstyret som er brukt for flising, sortering og fuktinnhold. Ulike typer flis er stammevedflis, heltreflis og industriflis. Tørr flis er et lagringsdyktig brensel, men fuktig flis begynner å kompostere hvis man lar den ligge for lenge. Det finnes mange ulike driftsopplegg for produksjon av flis. I Norge i dag er det mest vanlig at rundtømmer flises på terminal, mens GROT lagres på velteplass og flises der før den transporteres i kontainer til terminal eller brenselsanlegg. Det er økende utnyttelse av hogstavfall (greiner og topper – GROT, samt røtter) til energiflis (ofte kalt grønn flis) som kan bli en viktig ressurs for varmeproduksjon i Norge i årene som kommer. Fordi flis i hovedsak er et biprodukt fra skogavvirkningen, er regional tilgang og potensial sterkt koblet til skogavvirkning og skogressursene. Flis har en lavere energitetthet enn pellets, bioolje og biogass, og koster dermed mye å transportere og lagre. Til gjengjeld er brenselsprisen lavere.

A.9 GROT

GROT er hogstavfall (grener og topper). GROT har den fordelen at selve brenselet er svært billig. Derimot har det høy fuktighet og er et lite homogent brensel, slik at forbrenningsprosessen er komplisert og krever høye investeringskostnader. I tillegg kan transport av GROT og uttak fra skogen gi relativt høye kostnader. Teknologien for bruk av GROT er antatt å være for kostbar og komplisert, og gi for lang tilbakebetalingsperiode til å være relevant for direkte bruk i industrien. Det er også mulig å produsere flis fra GROT.

A.10 Energiflis fra hogstavfall (GROT)

I 2010 var utnyttelsen av hogstavfall i Norge om lag 250 000 løskubikkmeter, som tilsvarer om lag 200 GWh. Fordelen med hogstavfall er at tilgangen ikke krever økt avvirkning, men er basert på pågående hogstaktivitet. Dersom avvirkning øker til 12 mill. m^3 i 2020 eller til 17 mill. m^3, som er det beregnede bærekraftige avvirkningspotensialet i

Norge (Enova 2012), vil tilgangen av hogstavfall øke tilsvarende. Eventuelle begrensinger på uttaket på lave boniteter får først effekt når prisen nærmer seg 20 øre/kWh fordi uttak på lave boniteter ikke er lønnsomt ved lave priser. Dette skyldes at innsamlingen er dyrere på lav bonitet og lave boniteter ligger også oftere lenger fra bilveg. Ved flispriser på 25 øre/kWh er både uttaksprosent og eventuelle restriksjoner på bonitet viktig. Ved en flispris levert anlegg på 22 øre/kWh er økt tilgang beregnet å være ca. 12 TWh, hvorav om lag halvparten kommer fra hogstavfall. Men denne tilgangen forutsetter også økt avvirkning av sagtømmer og en stor økning i bygging av bioenergianlegg i Norge. Ved høyere flispriser vil bioenergien møte sterk konkurranse fra varmepumper og etter hvert kanskje også fra høytemperatur geotermiske løsninger.

A.11 Pellets og briketter

Pellets er sammenpresset tørket flis fra tre- eller returvirke, i små sylindre med mindre enn 25 mm lengde, standarddiameter er 6, 8 og 12 mm. Komprimeringen gjør pellets enkle å transportere, og gir høy energitetthet. Pellets og briketter produseres i dag i hovedsak av tørre biprodukter fra trelastindustrien, det vil si høvelspon og tørr sagflis. Begrenset tilgang på slike ressurser på grunn av avtagende trelastproduksjon, konkurranse med dyrestrø og kostbar transport, gjør at rundtømmer i større grad vil brukes til pelletsproduksjon framover. Dette krever imidlertid at råstoffer tørkes på anlegget og innebærer i praksis større anlegg. Briketter er sammenpresset flis i kubber eller sylindre, men med større diameter enn pellets på 25-70 mm. Briketter kan brukes på mange av de samme måtene som flis, og har tilnærmet like investeringskostnader for forbrenningsutstyr. Brenselkostnaden er noe høyere enn for flis. I Norge har produksjonen av briketter og pellets vært i samme størrelsesorden, og var på 45 000 tonn av hver i Norge i 2012. Inkludert import var det totale forbruket av pellets og briketter i 2012 på nesten 500 GWh. Ca. 2/3 av pelletsproduksjon i Norge leveres i bulk.

A.12 Biodiesel

Biodiesel kan produseres fra skog ved hjelp av en såkalt Fischer-Tropsch prosess for omdanning fra trevirke til flytende drivstoff. Det var en slik prosess Xynergo forsøkte å sette opp i Norge, men som ble skrinlagt i 2010. Prosessen er likevel under utvikling og det er godt mulig den kan drives kommersielt i Norge med andre markedsbetingelser enn det man har i dag, for eksempel ved lavere pris på råvaren eller støtteordninger knyttet til biodiesel..

Prosessen foregår i to trinn. I det første trinnet males flis som er forhåndstørket til et fuktinnhold under 15 %, før den gassifiseres ved en oppvarming til over 700 grader i oksygenfattig atmosfære. Da har man fått en såkalt syngass som kan brukes som råstoff også til materielle formål. Dersom man skal lage biodrivstoff, leder man imidlertid gassen inn i en Fischer-Tropsch-reaktor hvor syntesegassen bestående av karbonmonoksid og hydrogen får reagere over en katalysator (som regel kobolt) og danne langkjedede hydrokarboner. Disse spaltes så i kortere kjeder, og man har da et dieselprodukt.

Produksjonen avgir mye varme, som både kan brukes til å drive anlegget og til å generere et overskudd av elektrisitet.

A.13 Bioetanol

Bioetanol produseres ved gjæring av cellulosen i trevirket, hvor sukkeret befinner seg. De fleste anlegg for produksjon av bioetanol benytter ligninet til å produsere varme og elektrisitet, mens Borregaard benytter dette til andre materialprodukter.

I denne analysen er det satt opp en prosess der ligninet brennes og benyttes til prosessenergi og produksjon av elektrisitet. I første trinn av prosessen kokes flis med syre og vann for å skille cellulose og lignin. Deretter skilles væske og fast stoff og væskefasen går gjennom ionebytting og pH-justering før væske og fast stoff igjen blandes og fermenteres med gjær. Cellulosen gjøres her om til glukose og så etanol, som til slutt destilleres for å få en etanolkonsentrasjon på ca 95 %..

A.14 Avfall og restprodukter

Restprodukter fra industrien kan være returfiber, rivningsvirke og sagflis. Restprodukter blir brukt flere steder i industrien i dag, og har den fordelen at de har lave kostnader. Restproduktene er ofte lite kompakt og det er derfor lite hensiktmessing å transportere dem over lange avstander. 2,6 TWh avfall forbrennes årlig i forbrenningsanlegg og går til fjernvarme i de største byer i Norge. En del restprodukter fra treforedlingsindustrien som flis, bark, bioslam eller avlut benyttes både til energiformål til eget forbruk og i varmesentraler. Høvelspon og tørr sagflis fra trelastproduksjon er et viktig råstoff for produksjon av pellets.

I næringsmiddelindustrien er det mange bedrifter som har bioavfall fra egen produksjon til å produsere gjødsel til landbruket, til bioenergi i form av gass eller fyringsolje eller direkte til forbrenning i avfallsanlegg og energigjenvinning gjennom fjernvarme.

A.15 Forbrenningsteknologier

Biobrensel forbrennes i en lukket ovn, i et forbrenningskammer eller på en rist og produserer varm røykgass. Varmen som oppstår benyttes til å varme vann eller produsere damp i en dampkjel. Det er også mulig å produsere strøm fra biobrensel, enten ved at den produserte dampen går inn i en dampturbin, eller ved gassifisering av selve biobrenselet til energigass som kan benyttes i en gassturbin eller gassmotor. Det kan oppnås høye temperaturer opp mot 500-600 ˚C på røykgassen for alle typer biobrensel, og dermed kan det produseres damp eller strøm. Forskjellige biobrensel vil ha ulik virkningsgrad avhengig av energitetthet og vanninnhold. Videre vil det kreves ulik forbrenningsteknologi og renseteknologi med varierende investeringskostnader. Små biobrenselsanlegg under 1,5 MW, har gjerne integrert brenner og kjel, mens større anlegg over 1,5 MW består av en separat brenselsenhet, en eller flere kjeler med rørsystem, et askesystem og et røykgassystem med rensing og skorstein.

A.16 Sammenligningsprodukter

Tall for produksjon og forbrenning av fossile energikilder er hentet fra LCA-databasen Ecoinvent 3.1 (Ecoinvent Centre 2014). Dette er anerkjente og kvalitetssikrede data, samtidig som de betegner gjennomsnittssystemer for produksjon av fossile energibærere.

Bilag B Viktige parametere i modellen

Faktor	Beskrivelse	Kilde	Kommentar
Skogtype	Gran		
Fuktighet av stammeved (%)	**41,21**	Dibdiakova et al. (2014)	
Fuktighet av kvister (%)	**49,02**	Dibdiakova et al. (2014)	
Fuktighet av bark (%)	**55,14**	Dibdiakova et al. (2014)	
Basisdensitet av stammeved (kg TS/fm^3)	**478,67**	Dibdiakova et al. (2014)	
Basisdensitet av kvister (kg TS/fm^3)	**441,84**	Dibdiakova et al. (2014)	
Basisdensitet av bark (kg TS/fm^3)	**401,47**	Dibdiakova et al. (2014)	

Andel sagtømmer og massevirke
Levende biomasse i hogstmoden skog er i skogsmodellen fordelt på tørrstoffbasis med 47 % på tømmer, 17 % på GROT og 36 % på annen biomasse.

Tømmeret er videre fordelt med 52 % på sagtømmer og 48 % på massevirke.

Massestrømmer ved sagbruk
Massestrømmer ved sagbruk er basert på Tellnes et. al. (2011), men forenklet ved at noen strømmer er slått sammen. På tørrstoffbasis blir 52 % av sagtømmeret til trelast, mens 48 % blir flis (inkludert bark). 7 % av flisen (inkl. bark) brukes til varmeproduksjon internt på sagbruket, mens 93 % blir tilgjengelig til andre formål, som energi.

For produksjon av trelast er det medregnet et elektrisitetsforbruk på 58 kWh pr. m³ trelast, basert på ecoinvent. Øvrige innsatsfaktorer for produksjon av trelast er ikke medregnet.

Det er videre antatt, basert på hva som er vanlig i norske EPD-er for trelast, at 5 % av trelasten blir avkapp. Det antas at avkapp brennes som treavfall med energiutnyttelse og erstatter oljefyring.

Elektrisitet
Utslipp fra elektrisitet er, med henvisning til Vessia & Lindberg (2008) og Graabak & Feilberg (2011), basert på marginalstrøm. Det antas noe forenklet i forhold til de nevnte kilder at denne utgjøres av import, eller eksport som erstatter, 50 % kullkraft og 50 % gasskraft. Produksjonsprosesser for elektrisitet er hentet fra ecoinvent 3.

Elektrisitet brukes i fremstilling av pellets og flytende biodrivstoff. I produksjon av FT-diesel og bioetanol produseres også elektrisitet, og denne produserte elektrisiteten godskrives med erstatning av annen elektrisitetsproduksjon.

Forbrenning og sammenligning med fossile alternativer
Forbrenning av flis er basert på to ulike ecoinvent-prosesser, en for flis fra sagbruk og en for flis direkte fra skog. Prosessene som benyttes er basert på forholdsvis store ovner som gir et varmeutbytte på henholdsvis 16 og 15 MJ/kg tørrstoff flis.

Forbrenning av kull og olje til sammenligning eller erstatning er basert på tilsvarende ecoinvent-prosesser, der sammenligningen/erstatningen er pr. MJ varme generert i ovnen.

Forbrenning av pellets er i mangel på en mer nøyaktig prosess, også basert på ecoinventprosess for forbrenning av flis fra sagbruk. Ettersom denne er pr. tørrstoff, antas forskjellen å være liten.

For FT-diesel og bioetanol er sammenligning mot diesel og bensin basert på nedre brennverdi for de ulike energiproduktene. Det antas altså at man kan få samme nytte av 1 MJ energiinnhold i FT-diesel og etanol, som en MJ i diesel og bensin. Dette antas å være en god approksimasjon for diesel/FT-diesel. For etanol/bensin er bildet mer komplisert. Etanol/bensin-blandinger kan ha både høyere og lavere virkningsgrad i forhold til bensin, avhengig av motorteknologi. Ved optimalisering av motorer kan etanol ha potensial for å bedre virkningsgraden noe i forhold til bensin (Xiaoyu, et al. 2013).

Pelletsproduksjon

Pelletsproduksjon er satt opp med data fra Vold, Brekke og Lyng (2011). Det er benyttet forskjellige verdier for pellets produsert fra råflis og fra sagflis. Dette skyldes at det brukes ekstra energi for å tørke råflis sammenlignet med flis fra sagbruk. Det benyttes hovedsakelig energi fra forbrenning av flis, men også litt olje og elektrisitet.

For råflis benyttes ca 35 MJ fra olje, 3500 MJ fra flis og i underkant av 700 kWh elektrisitet.

For sagflis benyttes ca 35 MJ fra Olje, 250 MJ fra flis og 115 kWh elektrisitet.

Det er i tillegg regnet med 2 % svinn av flis i prosessen.

FT-dieselproduksjon

FT-dieselproduksjon er satt sammen av data fra Vold, Brekke og Lyng (2011) og Ecoinvent (2014).

Det benyttes ca 0,1 kg ts flis og ca 0,006 kWh elektrisitet per MJ diesel. I prosessen benyttes også flis til varme- og elproduksjon og det eksporteres ca 0,03 kWh elektrisitet per MJ FT-diesel produsert.

I prosessen benyttes også lut (ca $2*10^{-4}$ kg), svovelsyre (ca $8 * 10^{-4}$ kg) og kobolt (ca $2 *10^{-6}$ kg).

Etanolproduksjon

Etanolproduksjon er satt sammen av data fra Vold, Brekke og Lyng (2011) og Ecoinvent (2014).

Det benyttes ca 0,09 kg TS flis til produksjon av 1 MJ bioetanol. Energi til produksjonen genereres ved forbrenning av ligninet i flisa. Dette skaper også et overskudd energi på ca 0,02 kWh elektrisitet til nett. I prosessen benyttes også svovelsyre (0,04 kg), ammoniakk (0,03 kg), kalsiumklorid ($5*10^{-4}$ kg)og kalk (0,02 kg).

Albedoeffekt

Endring i strålingspådriv som følge av økt albedo for et hogstfelt er basert på ligninger fra Holtsmark (2014). Disse er igjen basert på Cherubini et al. (2012). Endring i strålringspådriv, ΔRF, som følge av endring i albedoeffekt t år etter en flatehogst er i Holtsmarks artikkel oppgitt som:

$$\Delta RF_{Albedo}(t) = (1 - \delta_{Albedo})^t \cdot \Delta RF_{Albedo}(0)$$

der δ_{Albedo} er 0,045. $\Delta RF_{Albedo}(0)$ er 135,1 kW/ha for hogst uten GROT-uttak og 168,6 kW/ha for hogst med GROT-uttak. GROT-uttak bidrar altså til ytterligere refleksjon i forhold til hogst uten GROT-uttak.

Bilag C Datakilder benyttet

Navn på prosess	Verdikjede	Kilde
Lagring og opptak av karbon i skog	Alle	Excelmodell utviklet hos Skog og landskap **(KLIF 2011)**
Markberedning		Timmermann og Dibdiakova (2013) , Vennesland et al. (2013)
Planting		Timmermann og Dibdiakova (2013) , Vennesland et al. (2013)
Ungskogpleie		Timmermann og Dibdiakova (2013) , Vennesland et al. (2013)
Sprøyting		Timmermann og Dibdiakova (2013) , Vennesland et al. (2013)
Gjødsling		Timmermann og Dibdiakova (2013) , Vennesland et al. (2013)
Skogsbilveier, nybygging og oppgradering		Timmermann og Dibdiakova (2013)
Tynning		Timmermann og Dibdiakova (2013) , Vennesland et al. (2013)
Sluttavvirkning		Timmermann og Dibdiakova (2013) , Vennesland et al. (2013)
Sluttavvirkning med taubane		Timmermann og Dibdiakova (2013), Vennesland et al. (2013)
Avvirkning av heltre		Vennesland et al. (2013)
Transport av tømmer til skogsvei (terrengtransport)	Alle	Timmermann og Dibdiakova (2013), Vennesland et al. (2013)
GROT utkjøring		Vennesland et al. (2013)
Flishugging		Vennesland et al. (2013)
Tømmertransport med tømmerbil med		Timmermann og Dibdiakova

henger	(2013), Vennesland et al. (2013)
Heltretransport med tømmerbil og henger	Vennesland et al. (2013)
Flistransport med containerbil og henger	Vennesland et al. (2013)
Langtransport flis (båt og bane)	Nørstebø et al. (2011), SLF/JBV (2010), Vennesland et al. (2013)
Langtransport virke (båt og bane)	Nørstebø et al. (2011), SLF/JBV (2010), Timmermann og Dibdiakova (2013), Vennesland et al. (2013)
Pelletsproduksjon	Dahlquist (2013), **(Vold, Brekke og Lyng 2011)**
Brikettproduksjon	Dahlquist (2013)
FT-diesel	**(Vold, Brekke og Lyng 2011, Ecoinvent Centre 2014)**
Etanol	**(Vold, Brekke og Lyng 2011, Ecoinvent Centre 2014)**

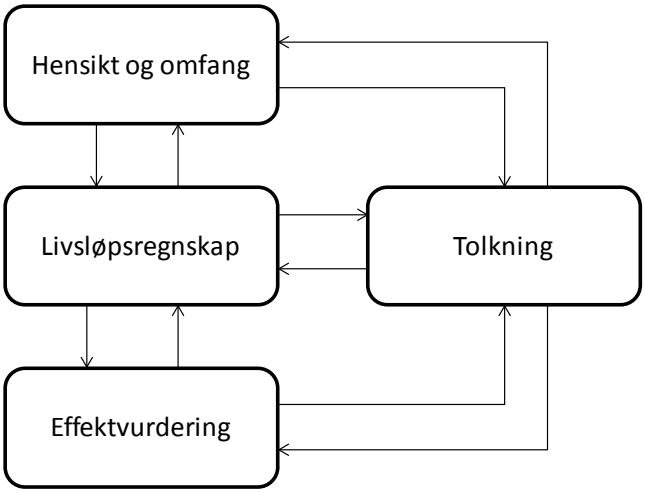
Bilag D Metode: LCA for analyse av skog til energiformål

LCA som metode forsøker å fange opp alle miljøbelastninger knyttet til fremstillingen av et produkt eller en tjeneste. Analysen setter opp en oversikt over alle aktiviteter som er involvert i: produksjon av råvarer (og i produksjon av råvarer til råvarene), transport av råvarer, fremstilling av produktet, bruk av produktet og avhending av produktet. Et hovedpoeng med LCA er å unngå to typer såkalte problemskifter: 1) at man reduserer miljøbelastninger i én livsløpsfase bare for å øke dem i en eller flere andre (et eksempel er elbiler hvor elektrisiteten kommer fra kullkraft, hvor miljøbelastningene fra bruksfasen blir mindre, men de samlede miljøbelastningene fra bilkjøring kan øke); og 2) at man reduserer én type miljøbelastning bare for å øke en eller flere andre (for eksempel ved at man skifter ut en prosess med store klimagassutslipp med en prosess med toksiske utslipp). En ”ordentlig” LCA vil altså ikke bare være et klimagassregnskap, men vil også inneholde informasjon om andre miljøbelastninger som for eksempel forsuring, eutrofiering og toksisitet[4]. Det er som regel langt større bidrag til forsuring og eutrofiering fra en bioenergiverdikjede enn fra en verdikjede for fossile energikilder.

Agostini, Giuntoli og Boulamanti (2013, s. 29) refererer til flere kilder som hevder at livsløpsvurderinger (LCA) er den beste tilgjengelige metodikken for å gjøre klimaanalyser av bioenergisystemer. En av hovedstyrkene til LCA er at det metodiske rammeverket tillater, ja endog innbyr til, å omfatte flere typer kvantifiserbare miljøbelastninger for å unngå at man reduserer et miljøproblem bare for å øke et annet. Til tross for at denne styrken ikke kommer til syne i en klimaanalyse, er altså likevel LCA en foretrukken metodikk. Det skyldes at den tilbyr et strukturert rammeverk for hvordan man skal kartlegge inn- og utstrømmer av materialer og energi i industrielle (og noen naturlige) prosesser tilknyttet hele livsløpet til produktsystemer.

Det strukturerte rammeverket er beskrevet i en rekke artikler, rapporter, lærebøker og er også ISO-standardisert. I figur 24er en prinsippskisse over trinnene i en LCA vist, basert på en figur i ISO 14044

[4] Eutrofiering kalles også overgjødsling og er knyttet til for store mengder næringsstoffer tilført til naturen, spesielt i vann, som fører til gjengroing og oksygenmangel. Toksisitet er fagbetegnelsen for giftighet og er et mål på hvordan ulike stoffer kan bidra til sykdom og død hos planter, dyr og mennesker.



Figur 24 De fire trinnene i gjennomføring av en LCA

Figuren ser ganske oversiktlig ut, bortsett fra pilene som går til og fra hver boks. De indikerer at LCA er en iterativ prosess, der man ofte må gå tilbake å revidere et tidligere prosesstrinn når ny kunnskap oppnås i et påfølgende. I det følgende vil hvert av trinnene beskrives nærmere.

D.1 Hensikt og omfang

I denne fasen av en LCA skal hensikten med analysen spesifiseres, da ulike hensikter kan kreve ulike oppsett for analysen. Det kan høres rart ut at hensikten med analysen skal ha noe å si for måten analysen settes opp, men det kan ha avgjørende betydning om vi skal gjøre en miljøanalyse av et produkt produsert i fortiden eller ett vi forventer produsert i fremtiden. LCA kan brukes til såpass forskjellige formål som for eksempel: a) å lage en standardisert miljødeklarasjon (kalt EPD) for et produkt; b) å undersøke en produksjonsprosess for å finne hvor miljøbelastninger oppstår; eller c) å vurdere hvordan miljøbelastningen i verden vil være i 2050 etter innfasing av nye energikilder i energisystemet. Slike ulike analyser vil kreve forskjellig datagrunnlag, ha forskjellige krav til mulighet for sammenlignbarhet, og ha forskjellige systemgrenser.

Et eksplisitt skille beskrevet i LCA-litteraturen er mellom såkalt ”regnskaps-LCA” (attributional) og ”konsekvens-LCA” (consequential), som kan hjelpe til å beskrive hvordan analysen skal settes opp for ulike formål. En ”regnskaps-LCA” er basert på en oppstilling av informasjon fra eksisterende produksjonsprosesser og ser ikke på hvordan økonomiske markeder eventuelt endres som følge av produktet eller tjenesten som produseres. En ”konsekvens-LCA” søker å gi svar på hvordan et produkt endrer miljøbelastningen fra selve produktsystemet, men også fra tilgrensende systemer som påvirkes av produktet man undersøker. Dersom man skal dokumentere hvordan et bioenergiprodukt har blitt produsert vil det være riktig å benytte en ”regnskaps-LCA”, med så spesifikke data om inn- og utstrømmer som mulig. Dersom man i stedet skal se på effekter i form av økte eller reduserte utslipp som følge av nåværende eller fremtidig bioenergibruk, for eksempel hvordan en økning, det være seg i størrelsesorden alt fra en marginal økning til f.eks. en dobling i bioenergibruk i Norge, vil påvirke miljøet, vil det være riktigere å bruke en ”konsekvens-LCA”. I en slik LCA må man forsøke å kartlegge

hvordan systemer endrer seg som følge av økt produksjon av bioenergi og må gjøre forutsetninger om hvilke marginale produksjonsteknologier som vil tas i bruk. Dersom man ser på en større fremtidig økning, vil det også i en slik analyse være naturlig å regne med et større innslag av biodrivstoff i transportkjeder, samtidig som man må kartlegge ressursbegrensningene som finnes for biomassen og hvordan andre markeder påvirkes. Resultater fra de to ulike analysetypene kan være svært forskjellige for tilsynelatende like produkter. Derfor er det viktig med god kunnskap om LCA-metodikk for å kunne vurdere ulike analyser og resultater som presenteres.

Forfatterne av denne rapporten deler oppfatningen av at både ”regnskaps”-LCA og ”konsekvens”-LCA har sine bruksområder. En ”konsekvens”-LCA har tradisjonelt blitt utført med bakgrunnsdata fra en database som tar utgangspunkt i ”regnskaps”-LCA til å gjennomføre analysene. Samtidig vil en ”regnskaps”-LCA ha begrenset nytteverdi for å analysere for eksempel marginale endringer som følge av nåværende beslutninger, eller fremtidige energisystemer hvor det vil være store endringer i flere underliggende produktsystemer (skifte av drivstoffteknologier for transport, energikilder, eksport og import av kraft mellom ulike land, osv). Vi vil ikke konkludere med at det ene metodevalget er bedre enn det andre til ethvert formål, men presisere at en som leser og bruker LCA-resultater må være oppmerksom på hvordan modellen er satt opp. Den som selv skal utføre en LCA, må bygge opp modellen sin i henhold til hva den skal besvare og være bevisst på, og formidle åpent, hva som er fordelene og ulempene ved den endelige modellen.

D.1.1 Funksjonell enhet

Den funksjonelle enheten skal beskrive hva produktsystemet leverer, altså hva analysen studerer, og aller helst åpne for produktsammenligninger der det samme behovet kan nås gjennom ulike løsninger. For eksempel er ikke én liter maling noen god funksjonell enhet, da den ikke tar høyde for dekkevnen til ulike typer maling, ei heller levetid. En riktigere funksjonell enhet for maling kan derfor være noe slikt som: ”beskyttelse av x m² overflate i y år”. Samtidig kan en slik funksjonell enhet ha noen ulemper, for eksempel med hensyn til at maling oftere gjøres av estetiske hensyn enn av absolutt nødvendighet. For mange energiprodukter vil den funksjonelle enheten være satt til en energienhet, som 1 kWh eller 1 MJ, uten at en slik enhet nødvendigvis sier så mye om hvilken funksjon som blir oppfylt.

Cherubini og Strømman (2011) refererer til fire forskjellige typer funksjonelle enheter benyttet i livsløpsvurderinger av bioenergisystemer:

4 Relatert til input: det vil si mengden biomasse som benyttes, enten oppgitt i vekt- eller energienheter.

5 Relatert til output: det vil si mengden kraft eller varme produsert, eller antall kilometer kjørt.

6 Arealbruk: det vil si hektar benyttet for å produsere biomasseressursen.

7 År: det vil si mengde produkt, eller produkter, per år.Disse benyttes for litt ulike formål, der 1) ofte benyttes for å finne den beste bruken av en gitt biomasseressurs; 2) brukes for å finne hvilken biomasseressurs som er best egnet til et gitt bioenergiprodukt; 3) benyttes for å undersøke beste bruk av areal; og 4) er mest brukt i studier der det er en lang rekke sluttprodukter og man ønsker å unngå allokering (Cherubini og Strømman 2011).

Den funksjonelle enheten skal i utgangspunktet ikke være avgjørende for resultatet, da det bør være mulig å konvertere fra én til én annen ved at man har størrelser for viktige faktorer som energimengde/fm³, fm³/hektar eller fm³/år. Problemet er at slike konverteringsfaktorer sjelden er oppgitt i litteraturen og gjør det vanskelig å sammenligne resultater fra ulike studier. Er for eksempel 0,025 kg CO_2-ekvivalenter/MJ biodiesel produsert mer eller mindre enn 2.200 kg CO_2-ekvivalenter /ha skog for biodieselproduksjon? Det er ikke lett å svare på ved første øyekast.

D.1.2 Systemgrenser

Systemgrenser relaterer til å avgrense gyldighetsområdet for analysen. I en LCA er det flere systemgrenser som settes, enten eksplisitt eller implisitt. Naturlige områder hvor systemgrenser må settes er:

- Geografi. (For hvilke områder skal livsløpsdataene og –resultatene være gyldige);
- Tidsperspektiv. (Hvilken tidsperiode skal resultatene være gyldige for, og hvor nye må dataene være);
- Naturlige kontra industrielle systemer. (Hva skal regnes som naturlige prosesser og hva skal innregnes som menneskelig påvirkning):
- Teknologivalg. (Hvilke teknologier er inkludert i analysen); og
- Avgrensning mot andre produktsystemer.

Den som utfører en LCA, må altså i forkant av analysen ha gjort seg opp en mening om hvordan systemet skal avgrenses, samtidig som utføreren i løpet av analysen vil konfronteres med ting som gjør at systemgrensene kanskje må revideres. For eksempel kan vanskelig tilgjengelige data gjøre at man må akseptere eldre teknologier enn man ideelt sett skulle ønske, eller motsatt kan man komme over nyere teknologier i løpet av datainnsamlingen som endrer systemgrensene.

D.1.3 Allokering

Allokering betyr fordeling, og i LCA-sammenheng er begrepet brukt om hvordan man skal fordele energi- og materialstrømmer på de ulike produktene fra en prosess som skaper mer enn et produkt. I ISO 14040-44-serien anbefales det å unngå allokering ved enten å gjøre prosessene så detaljert at man kan fordele strømmer eller ved å utvide systemgrensene til å inkludere alle produkter som kommer ut av prosessen. Det er ikke alltid slikt lar seg gjøre. Hvis man for eksempel studerer en elektronisk komponent som inneholder gull, vil det ikke nødvendigvis være fornuftig å utvide systemgrensene til å inkludere all steinmassen som graves ut for å komme til gullåren og hva denne erstatter som fyllmasse i for eksempel veier. Da vil man måtte avgjøre hvilket prinsipp som skal

ligge til grunn for å fordele dieselforbruket i gruvemaskiner mellom gullproduktet og andre steinprodukter som kommer fra gruva. Benytter man masse som referanse for allokering, vil gullet ende opp med veldig lav miljøbelastning. Det er derfor mange argumenterer for å bruke markedsverdier for allokering i slike tilfeller, hvor gullet vil få en stor andel av miljøbelastningene på tross av en langt mindre produktmengde enn annen stein brutt i gruva.

Cherubini og Strømman (2011) skriver at allokeringsproblematikk er spesielt viktig med tanke på bioenergisystemer, da disse ofte gir flere produkter som skal ha sin andel av utslipp, avfall og energi- og materialforbruk og de tilhørende miljøbelastninger. For eksempel må man i et kraftvarmeanlegg avgjøre hvilke belastninger som skal tillegges strømproduktet og hvilke som skal tillegges varmeproduktet. I biodrivstoffproduksjon vil man ofte få andre biprodukter som for eksempel glyserin. En måte å unngå allokeringsproblematikk kan være å velge en funksjonell enhet knyttet til input, areal eller år, men det krever også at man ikke skal sammenligne med et spesifikt produkt. Cherubini og Strømman (2011, s. 444) viser til at ulike standarder, som EUs fornybardirektiv, PAS 2050 og ISOs standard for karbonfotavtrykk oppgir forskjellige anbefalinger for hvordan allokering skal gjennomføres.

Det er uunngåelig å møte allokeringsproblematikk i en LCA av et bioenergisystem, men det er ikke mulig å fastslå hva som er den riktige løsningen for et generelt tilfelle. Snarere må man se hva den aktuelle LCAen prøver å besvare og også gjennomføre sensitivitetsanalyser som kan gjøre eksplisitt hvordan allokeringsvalg påvirker resultatene.

D.2 Livsløpsregnskap

Livsløpsregnskapet betegner det trinnet i prosessen hvor alle inn- og utstrømmer fra alle involverte prosesser skal kartlegges. For å finne nødvendige data brukes en lang rekke kilder; direkte fra aktører involvert i produksjonsprosessene, litteraturkilder, statistikk og databaser.

Et stort databehov er en av vanskelighetene med å utføre en LCA. Ideelt sett skal alle masse- og energistrømmer assosiert med et produktsystem være kartlagt (altså være i inventarmodellen) for å få en fullverdig LCA[5]. Stadig større og mer sofistikerte LCA-databaser har gjort jobben enklere for LCA-utførere, men det er fremdeles slik at en mengde data må samles inn og man kan være ganske sikker på at en stor del av prosessene som indirekte er involvert i et produktsystem ikke vil fanges opp. En av løsningene har vært såkalt hybrid LCA (Suh og Nakamura 2007) der man kombinerer prosess-LCA (”vanlig” LCA basert på kartlegging av masse- og energistrømmer) med IO-LCA (input-output LCA basert på økonomiske kryssløpstabeller og utslippsintensiteter fra industrielle sektorer). Ved en hybrid tilnærming kan man benytte prosess-LCA for alle de prosessene man klarer å kartlegge og utfylle med kryssløpstabeller og utslippsintensiteter for de prosessene man mangler data for. I tillegg

[5] Hvilket i bunn og grunn vil si alle material- og energistrømmer i verden, selv om de aller fleste vil være så indirekte, altså så mange trinn unna de sentrale prosessene, at de er knapt synlige.

til å supplere for manglende data, kan en hybrid LCA-tilnærming også utvide inventarmodellen med økonomiske aktiviteter som vanligvis ikke fanges opp i en LCA. Blant annet vil advokat- og konsulenttjenester og andre tjenester inngå i regnskapet og reisevirksomhet og energibruk i disse sektorene blir tilordnet de produktsystemene tjenestene benyttes i. Det gjør selvsagt også at en hybrid-LCA vil vise større miljøbelastninger enn en prosess-LCA utført for det samme produktsystemet.

Det betyr ikke at det er et enkelt valg å skulle gjennomføre hybrid-LCA. Mange usikkerheter kommer inn i analysen knyttet til at det er vanskelig å velge riktig sektor for et gitt materiale, det kan være store interne forskjeller i utslippsintensiteter innenfor en sektor som ikke vil komme frem og kryssløpstabeller har, i likhet med LCA, fått kritikk for være etterspørselsstyrt og å ha en for statisk tilnærming til økonomien (Brekke 1998). Det innebærer at man alltid vil ha et høyere utslipp ved en høyere kostnad, mens det motsatte kan være tilfellet i realiteten dersom det for eksempel innføres renseteknologi.

D.3 Effektvurdering

I effektvurderingen skal livsløpsregnskapet oversettes til mulige miljøbelastninger. Metoden LCA inneholder ikke i seg selv modeller for denne oversettelsen, men en lang rekke forskere har knyttet modeller for forskjellige miljøbelastninger sammen med LCA, og i mange tilfeller også skreddersydd modellene så de passer med rammeverket.

Som regel bruker man LCA-programvare til å gjennomføre effektvurderingen. Det programvaren gjør er å sortere ulike utslipp, ulik ressursbruk og ulike avfall i miljøbelastningskategorier der disse hører hjemme. For eksempel vil utslipp av CO_2 til luft sorteres i miljøbelastningskategorien *klimaendringer*, mens utslipp av forskjellige metallioner til vann vil sorteres i miljøbelastningskategoriene *økotoksisitet* og *humantoksisitet*. Det finnes mange miljøbelastningskategorier og de varierer med forskjellige effektvurderingsmetoder. Dette er viktig å vite når man gjennomfører en LCA og skal sikre at ikke én miljøbelastning skiftes ut med én annen. I dette prosjektet er det imidlertid påvirkning på klima knyttet til bruk av bioenergi som er i fokus, og det er derfor presentert litt nærmere hvordan man håndterer dette i LCA.

D.3.1 Klimagassregnskap basert på LCA

LCA inneholder altså ikke i seg selv noen metode for å beregne klimaeffekter. I stedet har man importert og utviklet metoder som kan benyttes innenfor LCA-rammeverket. Som grunnlag for de fleste klimaberegninger i LCA ligger metodikk beskrevet i rapporter fra IPCC. Flere forskere innen LCA-feltet har vært med på å utvikle metodikk knyttet til tallfesting av klimaeffekter, også spesifikt knyttet til skog og til bioenergi. Eksempler på utvikling har vært en overgang fra CO_2-ekvivalenter som indikator til måleindikatorer som strålingspådriv i W/m² (Cherubini, Bright og Strømman, Site-specific global warming potentials of biogenic CO2 for bioenergy: Contributions from carbon fluxes and albedo dynamics 2012) og karbon-klima respons i °C/TtonC (TtonC = terratonn karbon = 10^{12} tonn karbon) (Cherubini, Gasser, et al. 2014). Det er kanskje ikke selve måleindikatorene som peker på en utvikling, men det at resultatene ligger nærmere opp mot det vi er interessert i, altså hvordan karbonet som slippes ut i atmosfæren påvirker klimaet.

Det er nok fortsatt mange som utfører en LCA på "gamlemåten" hvor man lager en liste over alle utslipp i verdikjeden og multipliserer disse med karakteriseringsfaktorer relatert til CO_2-ekvivalenter, men det har kommet modeller og hjelpemidler som gjør LCA-praktikere i stand til å modellere for eksempel tidsdynamikk. Utviklingen av metoder for å analysere skogsdynamikk og mekanismer som albedo og karbonlagring har vært rivende de seneste årene. Mange tidligere analyser har dermed ikke med seg slik informasjon, men baserer seg ofte på klimanøytralitet for skog.

D.3.2 Karbonlagring i skog og i produkter fra skogråvarer

EUs Joint Research Centre har publisert en rapport om hvordan man bør regnskapsføre karbon i studier av bioenergi fra skogsråvarer (Agostini, Giuntoli og Boulamanti 2013). De begynner i en ganske alarmerende tone med å advare mot hvordan politiske rammeverk benevner biomasse som en karbonnøytral kilde. De peker spesielt på at dedikert hogst av stammevirke for bioenergiformål ikke vil være klimanøytralt, men fremstå slik på grunn av statiske og ufullstendige metoder og modeller for beregning av karbonlagre og -strømmer.

Allerede i 2002 publiserte European Forest Institute en rapport om karbonlagring i skog og i treprodukter (EFI 2002). De skriver at skogsvegetasjon inneholder om lag 86 % (483 Pg C; 1 Pg = 10^{15} g = 10^{9} t = 1 Gt) av alt jordrelatert karbon over bakken og ca 40 % av alt jordrelatert karbon under bakken (fra Sedjo 1992 og Dixon et al. 1994). Annet jordrelatert karbon er da knyttet til annen vegetasjon, som for eksempel jordbruk. I analysen av karbonlagre og -flyt settes det opp forutsetninger for gjennomsnittlig tettheter for henholdsvis nåletrær og løvtrær i utvalgte europeiske land. Videre defineres levetid for ulike applikasjoner av skog (byggematerialer 50 år, innendørs byggematerialer 16 år, forskalingsmaterialer 1år, møbler 16 år, emballasjematerialer 1 år, langlivede papirprodukter 4 år og kortlivede papirprodukter 1 år). Europa regionaliseres så i Nord-Europa, Sentral-Europa og Sør-Europa. Resultatene viser en oppgang i karbonlager i trær fra 6894 til 10001 Tg[6] C, i bakken fra 6086 til 6541 Tg C og i produkter fra 769 til 885 Tg C fra 2000 til 2050. Deretter er det satt opp ulike scenarioer knyttet til skogpleie og bruk av tre, som viser at den potensielle karbonbindingen vil påvirkes av riktig forvaltning av skogressurser.

D.3.3 Klimaeffekter som følge av endringer i albedo etter hogst

Det er heller ikke så enkelt som at skogens eneste klimaeffekt er knyttet til CO_2-opptak. Albedoeffekten, som beskriver hvordan sollys reflekteres av lyse, og absorberes av mørke, overflater, er også potensielt viktig. Spesielt gjelder det områder på jordkloden med snødekke om vinteren. Grønne tretopper absorberer sollys og lagrer dermed varme som bidrar til global oppvarming. Skoghogst, med reduksjon av CO_2-binding, kan derfor (i hvert fall delvis, om ikke helt) oppveies av økt refleksjon fra åpne, snødekte hogstflater om vinteren (Cherubini, Bright og Strømman 2007).

Cherubini, Bright og Strømman (2012) har vurdert hvordan endringer i albedo etter hogst påvirker klimaeffekten av uttak av skog. Albedo betegner i hvilken grad solstråler

[6] Tg = terragram = 10^{12} gram

reflekteres av jordoverflaten. Spesielt på flater som er snødekte deler av året vil det være stor forskjell mellom en tett og mørk skog og hvit snø, der førstnevnte vil ta opp mye mer varme enn sistnevnte. Reflekterte solstråler er ikke noen klimagass og i stedet for å relatere albedoeffekt til klimagasser (og deres levetid i atmosfæren og evne til å absorbere infrarød stråling) blir albedoeffekten relatert til såkalt ”radiative forcing” – strålingspådriv.

D.3.4 Modellering av klimagasser i atmosfæren

I LCA regnes utslipp av ulike substanser om til ekvivalenter innen ulike miljøpåvirkningskategorier. For miljøpåvirkningskategorien ”global oppvarming” er det vanlig at effekten av klimagasser, f.eks. metan og lystgass, regnes om til CO_2-ekvivalenter, det vil si hvor stor mengde CO_2 en mengde metan eller lystgass tilsvarer.

Klimaeffekten knyttet til utslipp av en bestemt gass bestemmes hovedsakelig av to faktorer: gassens strålingspådriv og gassens levetid i atmosfæren. Ettersom de ulike klimagassene har ulik levetid i atmosfæren innebærer en omregning til CO_2-ekvivalenter en sammenligning av strålingspådriv innenfor en gitt tidsperiode. FNs klimapanel, IPCC, har publisert omregningsfaktorer for 20, 100 og 500 år, kjent som henholdsvis GWP-20, GWP-100 og GWP-500, der GWP står for global warming potential. I følge disse tilsvarer utslipp av 1 kg metan 25 kg CO_2 over en tidshorisont på 100 år, mens det tilsvarer 72 kg CO_2 dersom tidshorisonten bare er 20 år framover (Solomon, et al. 2007). Årsaken til denne forskjellen er at metan har sterkere strålingspådriv, men betydelig kortere levetid i atmosfæren enn CO_2.

De mest brukte karakteriseringsmetodene for klimautslipp innen LCA, slik som IPCCs GWP-100, tar ikke hensyn til når et utslipp skjer. Dette medfører ifølge Levasseur (2013) to problemer:

- Manglende konsistens i temporære systemgrenser
- Manglende rammeverk for å analysere effekten av karbonlagring eller utsettelse av utslipp

Problemet med manglende konsistens i temporære systemgrenser kan beskrives som at metoden implisitt forutsetter at alle utslipp skjer samtidig, fordi omregningen til CO_2-ekvivalenter beregner en klimaeffekt f.eks. 100 år fram i tid fra utslippet skjer. For et utslipp som skjer i dag vil det medregnes en oppvarmingseffekt som virker 100 år fram i tid. For et utslipp som skjer 80 år fram i tid vil det imidlertid medregnes et oppvarmingspotensiale 100 år framover fra utslippet skjer, det vil si 180 år fram i tid. Problemet er beskrevet blant annet i ”ILCD Handbook – General guide for Life Cycle Assessment, Detailed guidance” (EU JRC 2010).

Problemet med manglende rammeverk for å analysere effekten av karbonlagring gjør at CO_2-ekvivalenter som angitt i IPCCs karakteriseringsmetode GWP-100 er uegnet til analyser der utslippene er fordelt over lengre tidsperioder, som med analyser av energiskog med lang rotasjonstid. For slike analyser bør en dynamisk karakterisering benyttes.

D.4 Tolkning

Tolkning refererer ikke til en avgrenset fase i gjennomføringen av en LCA. I stedet er tolkning en aktivitet sterkt knyttet til alle de tre andre fasene. For eksempel vil man i definisjonen av systemgrenser allerede måtte tolke hvilke datakilder man forventer å finne og hvilke resultater man kan forvente å få, i livsløpsregnskapet må man tolke innkomne data for å finne ut om de samsvarer med hensikt og omfang, og tilsvarende må man i effektvurderingen finne ut om man har samlet inn alle relevante data eller om det kreves nøyere granskning av spesifikke utslippskomponenter. Det mest synlige resultatet av tolkningstrinnet i en LCA vil være knyttet til diskusjon av resultater og beskrivelse av konklusjoner fra analysen.

D.4.1 Sammenligning med referansesystemer

De aller fleste livsløpsvurderinger av bioenergisystemer undersøkt av Cherubini og Strømman (2011) inneholder sammenligninger med fossile referansesystemer. Dette trenger ikke potensielt å være noe problem, men for mange analyser kan det virke som om det gjøres en nitidig jobb med å lage modell og samle inn data for bioenergisystemet, mens referansesystemet er mer eller mindre en direkte import av ett tall fra en tidligere analyse.

Det er viktig, når man skal sammenligne ulike alternativer, at det gjøres med henvisning til riktig geografi, riktig teknologi og riktig bruksområde. For eksempel vil klimagassutslipp knyttet til direkte og indirekte arealbruksendringer være veldig viktige i en bioenergisammenheng, samtidig som de er geografisk betinget.

Norges
vassdrags- og
energidirektorat

Norges vassdrags- og energidirektorat

Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstuen
0301 Oslo

Telefon: 09575
Internett: www.nve.no