



Biomasse og CO₂

Indledning og afgrænsning

Der er i forskellige sammenhænge rejst debat om, hvorvidt biomasse kan betragtes som en CO₂ neutral energikilde. I denne debat indgår begreber som kulstofpulje, kulstofgæld og tilbagebetalingstider.

I forbindelse med en række projekter for konvertering fra kul til biomasse på kraftvarmeanlæg, herunder Varmeplan Hovedstaden, har Ea Energianalyse udarbejdet dette notat om biomassens CO₂ effekt. Der analyseres på CO₂ effekten af at biomasserestprodukter fra produktionsskove i og omkring Danmark anvendes til kraftvarmeproduktion. Biomasserestprodukter er her defineret som de træfraktioner, der ikke ville blive nyttiggjort såfremt de ikke blev anvendt til energiformål og derfor ville blive efterladt i skoven. I referencen vil disse fraktioner derfor undergå en naturlig nedbrydelsesproces (rådne).

Indirekte effekter der kan opstå, såfremt efterspørgslen efter energitræ påvirker produktionen af gavnræ, indgår ikke i analysen. Der ses heller ikke på anvendelse af energitræ fra ellers uberørt skov. Disse emner kommenteres ganske kort sidst i notatet.

Resumé

I notatet analyseres CO₂ effekten af at udskifte kul med biomasse på effektive kraftvarmeværker. Såfremt omlægning til biomasse ændrer forholdet mellem el og varme, antages den marginale el at være kulbaseret, mens den marginale varme er baseret på naturgas.

Biomasse har ved forbrænding en direkte CO₂ emission målt per forbrændt energienhed, der er lidt højere end kul. Medtages de såkaldte opstrøms-emissioner (forarbejdning og transport) og typiske virkningsgrader på et

effektivt kraftvarmeværk, har træflis en lidt lavere og træpiller en lidt højere emissionsfaktor end kul, målt per produceret energienhed.

Biomasse er en fornybar ressource. Når træ vokser, opsuges præcist lige så meget kulstof fra atmosfæren som frigives ved forbrænding. Det betyder, at energitræ der hvert år udtages fra et bestemt skovareal, over tid kan betragtes som en helt CO₂ neutral energikilde¹.

I tiden op til CO₂ neutralitet, kan der opbygges en såkaldt CO₂ gæld. CO₂ gæld betyder her, at den samlede CO₂ udledning stiger i en periode, når der sammenlignes med en reference på kul. Spørgsmålene er hvor stor denne gæld bliver, hvornår den er tilbagebetalt, og hvor mange år der går før der opstår CO₂ neutralitet. Det er typisk sådan, at CO₂ neutralitet indfinder sig flere år efter, at den eventuelle CO₂ gæld er tilbagebetalt.

Resultatet af analyserne er, at der slet ikke opstår CO₂ gæld når kul fortrænges af træflis. Når kul fortrænges af træpiller, så opstår der en lille gæld, som dog er tilbagebetalt allerede efter 2 år. Når der anvendes træflis, er biomassen et CO₂ neutralt brændsel efter 10 års drift. Ved anvendelse af træpiller går der 11 år med anvendelse af standardforudsætningerne.

I bilag er til orientering vist resultatet af et regneeksempel, hvor fliskraftvarme erstatter naturgasfyret gasmotor. I dette tilfælde går der 20 år til CO₂ neutralitet.

Den helt afgørende faktor for hvornår der opnås CO₂ neutralitet når biomasserestprodukter fortrænges kul, er den såkaldte *decay rate* (her kaldet rådnefaktor). Rådnefaktoren udtrykker hvor stor en del af den døde biomasse i skovene der hvert år omsættes som følge af naturlige forrådnelsesprocesser. Rådnefaktoren siger derfor noget om holdbarheden af skovens kulstofpulje, i referencescenariet hvor restprodukterne ikke anvendes til energiformål.

Der er usikkerheder, ved at fastlægge den korrekte rådnefaktor. Med ca. 30% usikkerhed for rådnefaktoren, vil CO₂ neutralitet for træflis og træpiller opstå i intervallet 7-15 år.

Dette notat har i maj/juni været tilsendt en række fagpersoner branchen samt repræsentanter for grønne organisationer for kommentarer. Vi har efter kommenteringsfasen tilrettet notatet.

¹ Her ses i første omgang bort fra forarbejdning og transport.

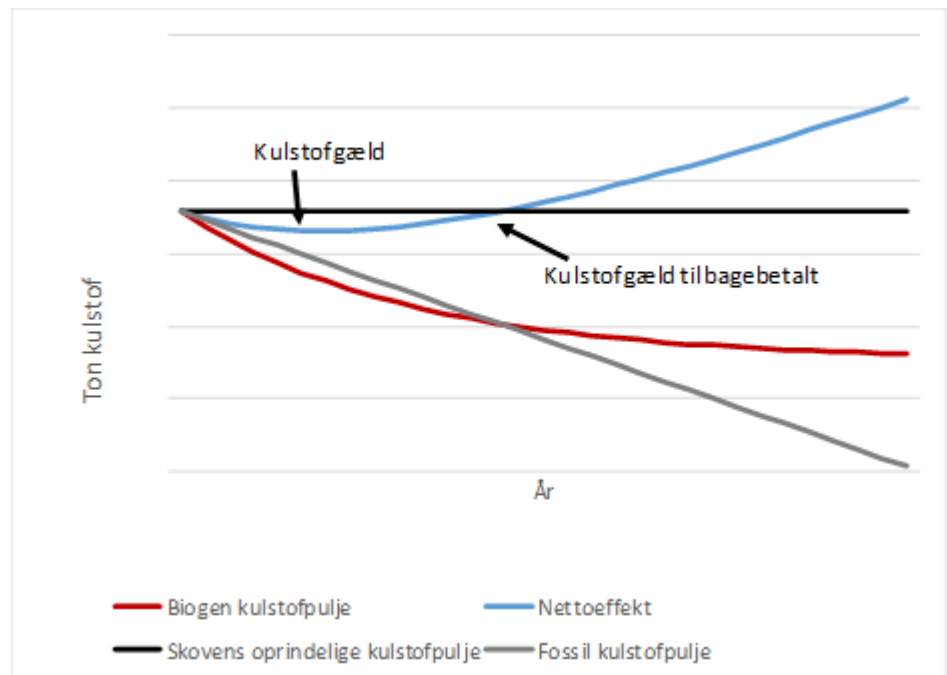
Der blev i kommenteringsrunden bl.a. sat spørgsmålstegn ved, om notatets grundforudsætning om anvendelse af restprodukter er repræsentativ for den biomasse som ventes anvendt på danske kraftværker de kommende årtier. Dette er et relevant spørgsmål, som dog falder udenfor projektet at søge besvaret.

Kulstofpulje, kulstofgæld og tilbagebetalingstid

Begreberne kulstofpulje, kulstofgæld og tilbagebetalingstider henviser til, at der ved forbrænding af træ, på samme måde som ved forbrænding af kul, frigives kulstof til atmosfæren i form af CO₂. Hvis den frigivne kulstofmængde ved at anvende biomasse er større end mængden der frigives ved at anvende kul (referencen), så øges atmosfærens CO₂ indhold i en periode. Man taler om, at der opstår en *kulstofgæld* der skal betales tilbage. Denne tilbagebetaling vil ske ved, at biomasse er en fornybar ressource, der i væksten igen optager CO₂ fra atmosfæren. Hvis der hvert eneste år udtages biomasse til energiformål, er der endvidere en risiko for, at den samlede kulstofpulje i skovene mindskes sammenlignet med referencen.

Beregninger viser, at biomasseudnyttelsens energieffektivitet samt biomassens (decay rate/rådnefaktor) er to helt afgørende faktorer for både kulstofgæld og tilbagebetalingstider.

Ovenstående begreber er principielt illustreret i figuren neden for som er udarbejdet med udgangspunkt i Mitchell (2012), refereret i rapporten "Carbon accounting of forest bioenergy" (Agostini, Giuntoli, & Boulamanti, 2013).



Figur 1: Illustration af kulstofgæld og tilbagebetalingstid udarbejdet med udgangspunkt i Mitchell (2012), refereret i Agostini, Giuntoli, & Boulamanti (2013).

Den sorte linje i figuren repræsenterer den oprindelige kulstofpulje i et driftssystem, hvor der er ligevægt mellem tilvækst på den ene side og udtag til gavntre og naturlig forrådnelse af uudnyttede restprodukter i skovbunden på den anden side.

Den røde kurve viser hvordan økosystemets kulstofpulje kan mindskes, når der tages mere biomasse ud af skoven. Dette udtag kan f.eks. være udnyttelse af udtyndingstræ, grene, toppe og stubbe, der tidligere blev efterladt i skovbunden. En anden mulighed er at driftsformen ændres, så der høstes yngre træer end tidligere, hvorved mængden af gavntre kan opretholdes men med mindre stående vedmasse i skoven.

Efter en periode (det kan tage mange årtier), vil kulstofpuljen stabiliseres, og der vil opstå en ny ligevægtssituation mellem tilvækst og udtag/forrådnelse (den røde kurve flader ud). Den nye balance er på et lavere niveau, hvilket betyder at der over tid er flyttet kulstof fra skov til atmosfære. Forskellen mellem den sorte og den røde linje kaldes i litteraturen for *Brutto kulstofgæld*.

Når biomassen erstatter fossile brændsler, f.eks. kul, så reduceres tabet af i den fossile kulstofpulje (grå kurve). Når denne effekt fratrækkes den røde kurve, fås den samlede påvirkning af jordens kulstofpuljer (økosystemet+ fossile puljer). Bevægelsen i den samlede kulstofpulje er vist ved den blå

kurve. Hvis skovens kulstofindhold i en årrække overstiger besparelsen i fossilt brændsel, så bliver den blå kurve negativ i en periode (netto kulstofgæld). Dette forekommer f.eks. hvis biomassen udnyttes mindre effektivt end det fossile brændsel, eller hvis det fossile brændsels kulstofindhold er lavt sammenlignet med træ (naturgas). Når den blå kurve krydser den sorte linje, er kulstofgælden tilbagebetalt. Først herefter giver biomassen anledning til en egentlig CO₂ besparelse.

Når den røde linje er vandret taber skoven ikke mere kulstof. Der kan som følge heraf defineres et tidspunkt, hvorefter biomasse til energi kan regnes som 100 % CO₂ neutral i produktionsleddet, dvs. når der ses bort fra anvendelse af fossile brændsler til forarbejdning og transport. I dette projekt er tidspunktet for CO₂ neutralitet defineret når den samlede besparelse i det fossile kulstoflager efter nogle år svarer til skovens tabte kulstoflager.

CO₂ effekt af biomasse – regneeksempler

Når der anvendes biomasse i energiforsyningen til erstatning for kul, er det ikke nødvendigvis med uændret fordeling mellem el- og varmeproduktion. Dette har betydning, idet CO₂ effekten ved at fortrænge el som hovedregel er højere end ved at fortrænge varme.

Tabel 1: Virkningsgrader på kraftvarmeværker, samt antaget CO₂-fortrængning ved produktion af el- og varme. Kilde: Egne beregninger.

	piller	flis	kul
Total:	91%	105%	91%
El	0,36	0,33	0,37
varme	55%	72%	54%

Referencesystem:

CO ₂ indhold varme:	57	KG/GJ
CO ₂ indhold el	750	Kg/MWh
CO ₂ indhold el	208	KG/GJ

Tabel 1 viser de virkningsgrader, der er anvendt som grundlag i dette notat. Det flisfyrede kraftvarmeværk har en mere effektiv energiudnyttelse, men til gengæld et lavere forhold mellem el- og varmeproduktion. Den marginale varme forudsættes i alle tilfælde at være baseret på naturgas, mens den marginale el baseres på 80% kul og 20% naturgas (marginal el i Nordeuropa ca. 2020).

Faste biobrændsler som kul og biomasse, kræver energi til forarbejdning og transport. I tabel 2 vises forudsætninger om energiforbrug og CO₂ emission herved (Upstream).

Tabel 2: CO₂ emission ved forarbejdning og transport af træ og kul. Kilde: Egne beregninger og (Fulton, Mellquist, Kitasai, & Bluestein, 2011).

Emne	Piller	Flis	Kul	Enhed
Transport:	2,8	2,8	1,0	Kg CO ₂ /GJ brændsel
Proces	6,3	0,5	3,7	Kg CO ₂ /GJ brændsel
I alt upstream:	9,1	3,3	4,7	Kg CO₂/GJ brændsel

Transport- og procesdata for biomasse er egne beregninger, mens kuldata er baseret på (Fulton, Mellquist, Kitasai, & Bluestein, 2011). Især for kul kan der være betydelige forskelle, afhængig af bl.a. metan-udslip fra minedriften. For træpiller er anvendt el-data svarende til, at pillerfabrikken er beliggende i det sydlige USA. Det antages endvidere, at biomasse er det primære brændsel til tørring. Der medgår i regneeksemplet ca. 7,5% af biomassen til tørring. De 7,5% indgår i det samlede regnestykke ved beregning af CO₂ gæld, tilbagebetalingstid og CO₂ neutralitet.

Biomasse er en fornybar ressource og dermed i princippet CO₂ neutral, idet der ved forbrænding frigives præcis den samme CO₂ mængde, som der er optaget fra atmosfæren gennem planternes vækst. Den kulstofmængde der optages og frigøres igen ved forbrændingen udgør godt 50% af tør biomasse målt som vægt% (K. W. Ragland, 1991).

Ud over kulstof indeholder biomasse især oxygen og mindre mængder hydrogen. Lettere træarter som poppel, birk og nåletræ har typisk en øvre brændværdi for tørt træ på ca. 21 GJ/ton (19,3 GJ/ton nedre brændværdi). Brændværdierne er typisk lidt lavere for de tungere træarter. I nedenstående tabel ses en række forudsætninger, samt beregnet CO₂ besparelse ved at anvende biomasse frem for kul til produktion af el og varme.

Tabel 3: Sammenligning af direkte CO₂ udledning ved effektiv anvendelse af træpiller, træflis og kul. Kilder: Teknologikataloget, Energistatistikken, egne beregninger samt Worldwatch Institute (Fulton, Mellquist, Kitasai, & Bluestein, 2011).

	Træpiller	Flis	Kul	Enhed
Vandindhold	5%	35%		
Brændværdi	18,2	11,5	25	GJ/ton
CO ₂ - forbrænding:	98	106	95	Kg CO ₂ /GJ brændsel
CO ₂ - forbrænding:	108	101	104	Kg CO ₂ /GJ el+varme
CO₂ i alt	117,7	104,1	109,5	Kg CO₂/GJ el+varme
Fortrængt CO ₂ ref:	116,9	104,6	118,5	Kg CO ₂ /GJ el+varme
Mérfortrængning bio:	-1,7	-14,0	0,0	Kg CO ₂ /GJ el+varme
Sparet CO ₂ pr GJ bio (*):	90,9	106,6		Kg CO ₂ /GJ biomasse

(*) Inklusiv opstrøms emissioner, og uden indregning af CO₂-forbrænding ved biomasse.

Tabellen viser, at der ved selve forbrændingen udledes lidt mere CO₂ fra biomasse end fra kul målt per energienhed brændsel tilført (CO₂-forbrænding). Målt per energienhed el + varme produceret, udledes der ved forbrændingen lidt mindre CO₂ ved anvendelse af flis, sammenlignet med kul og træpiller. Dette er også tilfældet når opstrøms emissionerne medregnes (CO₂ i alt).

Når der indregnes opstrøms emissioner, og når der tages hensyn til at CO₂ effekten ved at fortrænge elektricitet er højere end ved at fortrænge varme, så viser tabellen at 1 GJ biomasse (af skov) har en CO₂ fortrængningseffekt på 90,9 kg, når biomassen nyttiggøres som træpiller. Såfremt biomassen nyttiggøres som træflis, er den samlede fortrængningseffekt 106,6 kg CO₂/GJ. At træflis har en højere fortrængningseffekt end træpiller, skyldes især mere effektiv energiudnyttelse samt lavere opstrøms emissioner.

Beregningerne viser altså, at biomasse og kul har sammenlignelige direkte CO₂ emissioner målt per energienhed produceret. Når der ikke tages hensyn til træets CO₂ optag under væksten, er biomasse og kul altså nogenlunde ligeværdige klimamæssigt. Effekten af, at biomasse helt eller delvist er en fornybar ressource gennemgås efterfølgende.

En forenklet skovmodel

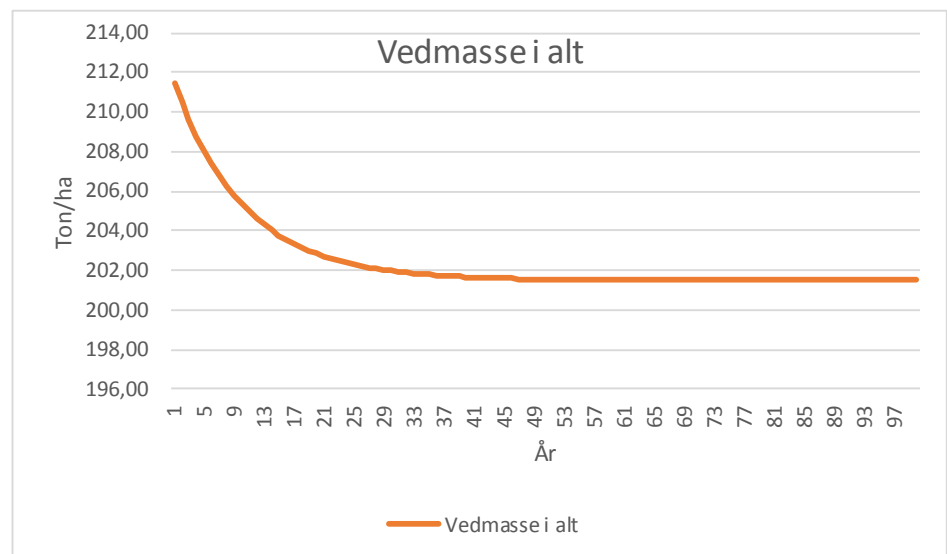
Ved gennemgang af relevant litteratur, herunder rapporten "Carbon accounting of forest bioenergy" fra EU kommissionens Joint Research Center, kan der findes resultater for beregning af tilbagebetalingstider for kulstofgæld (carbon debt). Det er dog vanskeligt at gennemskue præcis beregningsmetode, forudsætninger m.m.

For at få bedre indsigt i dynamikken omkring skovens kulstofpulje når biomasseudtaget øges, har vi fundet det gavnligt at opstille en simpel regnearksmodel. Modellen er tænkt at repræsentere et samlet skovsystem i balance (landscape level), og altså ikke en bestemt parcel (stand level). Det samlede skovsystem er valgt for at eliminere de udsving der kan opstå fra år til år som følge af fældning og genplantning m.v. ved den enkelte parcel.

Modellens primære input er træets vækstrate (ton/ha/år), fældningsaktivitet, (% af årlig tilvækst), samt hvilken mængde der årligt tages ud som gavntre (ton/ha/år). Der endvidere indlagt en procent af levende træmasse der årligt går ud eller dør (%). Endelig er der indlagt en antagelse om rådnefaktor, som beskriver hvilken andel af puljen af død vedmasse der årligt rådner væk (%).

Modellen vil, uanset startværdier, finde en langsigtet balance med ovenstående faktorer, typisk efter over 100 år. Når modellen er i balance, påtrykkes en forandring i form af øget udtag af biomasse til energi. Ved at se hvordan skovens pulje af både levende og dødt træ ændres, kan konsekvensen for skovens kulstofpulje beregnes.

Figur 2 viser et eksempel på, hvordan skovens samlede vedmasse ændres, når der (alt andet lige) udtages mere biomasse til f.eks. energiformål. Med de anvendte referencedata præsenteret nedenfor, vil den samlede vedmasse falde med ca. 5 %, fra ca. 210 tons tørstof/ha til ca. 200 tons tørstof/ha.



Figur 2: Illustration af Ændringen i skovens vedmasse, når der med referencedata påtrykkes et øget udtag af træ til biomasse på 1 ton tørstof/ha i år nul. (Bemærk, y-aksen starter ikke ved nul).

Kurven i figur 2 svarer til den røde kurve i figur 1. Bemærk at kurven viser biomasse "ab skov", og ikke "an kraftværk". Referencedata valgt efter bedste skøn, og er ikke baseret på faktiske skovdata, bortset fra rådnefaktoren. Dette vurderer vi dog som uproblematisk, idet beregningerne viser, at hovedresultatet ikke er følsomt overfor variationer af de øvrige parametre.

Referencedata for 1 ha skovmodel:

Vækstrate:	7 ton tørstof/ha/år
Fældning (høst):	50 % af årlig tilvækst
Udtages til gavnræ:	3 ton tørstof/ha/år
Træer der går ud(dør):	2 % af levende træer/år
Rådnefaktor:	10 % af død vedmasse/år
Udtag til energi:	1 ton tørstof/ha/år

I nedenstående tabel vises resultater af en række kørsler, som er gennemført med modellen.

Tabel 4: Resultatdata fra kørsler med simpel skovmodel. Øverste talrække indeholder referencedata. År til CO₂ neutralitet er beregnet ved anvendelse af træet som træpiller.

Vækst	høst	Gavn-træ	Årlig død	Rådne faktor	Energi	liv-træ1	Død-træ1	Liv-træ2	Død-træ 2	År til neutral
ton/år	%	ton/år	%	%	ton/år	Ton	Ton	Ton	Ton	år
7	50%	3	2%	10%	1	171	40	171	30	10,7
10	50%	3	2%	10%	1	245	70	245	60	10,7
7	70%	3	2%	10%	1	102	40	102	30	10,8
7	50%	2	2%	10%	1	171	50	171	40	10,7
7	50%	3	5%	10%	1	67	40	67	30	10,7
7	50%	3	2%	5%	1	171	80	171	60	21,3
7	50%	3	2%	20%	1	171	20	171	15	5,4
7	50%	3	2%	10%	2	171	40	171	20	10,7

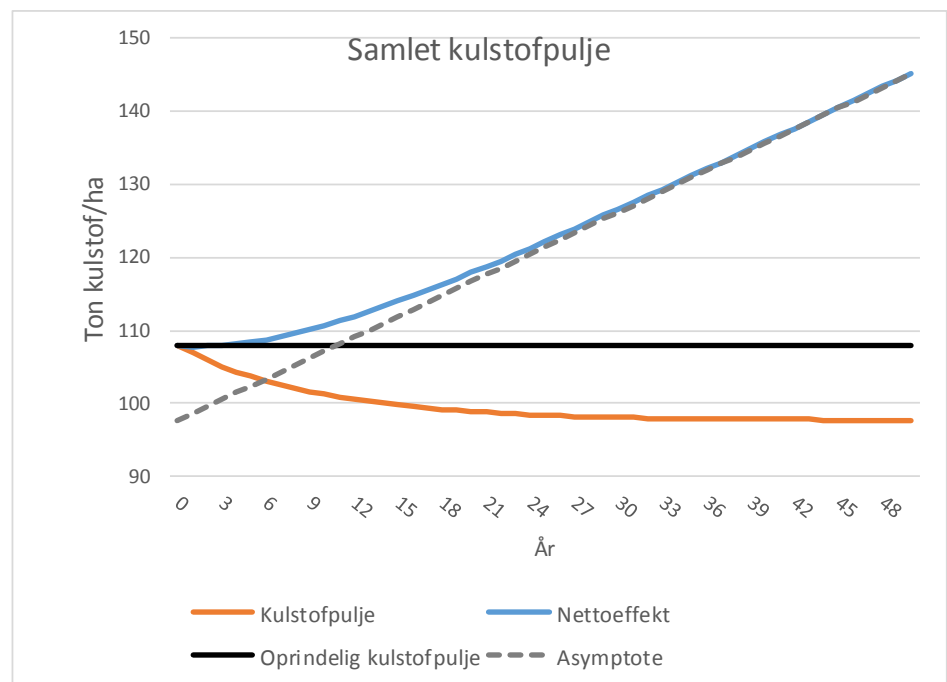
Søjlerne "Livtræ1" og "Dødtræ1" viser fordelingen af henholdsvis levende og død vedmasse, når skoven med de anvendte referencedata er i fuld balance. Herefter påtrykkes et udtræk af energitræ, og der opstår en ny balance, og en ny fordeling af henholdsvis levende og dødt træ (Livtræ2 og Dødtræ2). Kurven i Figur 2 svarer i øvrigt til data i øverste talrække (referencedata).

Der defineres et tidspunkt for CO₂ neutralitet, beresom tidspunkt er defineret som skovens beregnede maksimale kulstofab (ton kulstof)/ha divideret med

den årlige besparelse i fossilt kulstof (ton kulstof/ha/år) som biomassen medfører, inklusiv CO₂ emission opstrøms (proces og transport).

Søjlen længst til højre viser år til opnåelse af CO₂-neutralitet efter ovenstående definition. Tallet er konkret beregnet ved at dividere skovens maksimale tab af kulstof med data for sparet kulstof når biomassen fortrænger kul i et kraftvarmeværk (på basis af data vist i tabel 1).

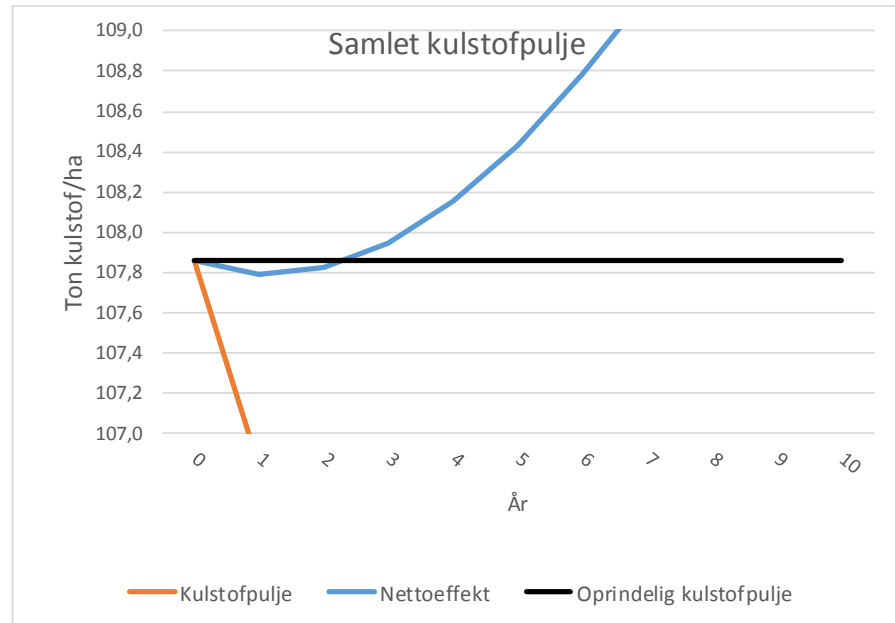
I beregningerne er der gennemført parametervariation, og resultatet i form af antal år til CO₂ neutralitet er aflæst. Beregningerne viser, at antal år til opnåelse af CO₂ neutralitet udelukkende er afhængig af træets rådnefaktor (decay factor). Dette er under antagelsen om, at den biomasse som anvendes til energiformål udelukkende tages fra den døde vedmasse (restprodukter), og ikke ved at ændre på aldersfordelingen af levende træer, eller ved at reducere i mængden af gavntræ som udtages fra skoven.



Figur 3: Skovens kulstofpulje, nettoeffekt ved anvendelse af træet som træpiller samt skæringspunkt ved antal år til CO₂ neutralitet.

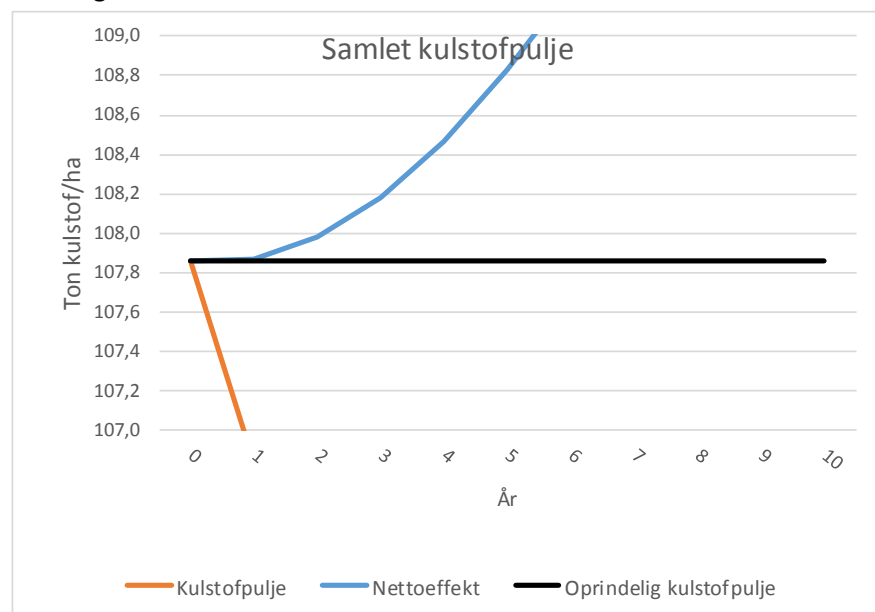
Figur 3 er udarbejdet efter samme principper som figur 1, og med udgangspunkt i skovmodellens referencedata. Det kan vises, at asymptoten for nettoeffekten skærer linjen "Oprindelig kulstofpulje" præcis ved årstallet for opnåelse af CO₂ neutralitet efter 10,7 år. Efter de 10,7 år er der sparet en mængde fossilt kulstof der præcist svarer til skovens langsigtede kulstof-tab.

Det er vanskeligt at se på figuren, men der er opbygges en begrænset netto-kulstofgæld de første år. Dette er tydeliggjort i nedenstående figur.



Figur 4: Zoom. Skovens kulstofpulje og nettoeffekt de første år ved anvendelse af træpiller.

I figur 4 tydeliggøres bevægelserne i kulstofpuljerne de første år. Det ses, at der faktisk opbygges en kulstofgæld i år 1 og 2. Allerede i år 3 giver omlægningen til biomasse dog anledning til en CO₂ besparelse samlet set, idet nettoeffekten er positiv. I figur 5 ses den tilsvarende beregning, hvor biomassen udnyttes som træflis. I dette tilfælde oparbejdes ingen kulstofgæld.



Figur 5: Zoom. Skovens kulstofpulje og nettoeffekt de første år ved anvendelse af træflis.

Ved nyttiggørelse af biomassen som træflis viser beregningerne at CO₂ neutralitet nås efter 9,9 år, altså ca. et år tidligere end ved anvendelse som træpiller.

Vurdering af rådnefaktor

På baggrund af krav om indrapportering af ændringer i skovenes kulstofpuljer i forbindelse med indmeldinger til FN, er der i de senere år udgivet en del referencer til belysning af hvor hurtigt træ rådner (rådnefaktor). Rådnefaktoren afhænger bl.a. af træmaterialets størrelse, samt af temperatur- og fugtforhold i skoven.

I tabel 3 ses data fra artiklen *Decomposition of Scots pine fine woody debris in boreal conditions*, Vavrova et al, Helsinki university, 2009. Skovområder klassificeret som "South Boreal" svarer ifølge artiklen til skovområder i Baltikum. Det ses f.eks., at små grene > 1 cm. har en rådnefaktor på 0,127 (12,7 %).

Tabel 5: Beregnet rådnefaktor (K) baseret på analyserede data af fine woody debris (Vavrova, Penttilä, & Laiho, 2009)

Site Size class	k	a.s.e.	Confidence interval	
			lower	higher
North boreal				
Twigs	0.128	0.006	0.116	0.141
Branches	0.066	0.004	0.058	0.074
FWD	0.096	0.005	0.087	0.105
South boreal				
Twigs	0.154	0.007	0.141	0.167
Branches	0.127	0.005	0.118	0.136
FWD	0.140	0.004	0.132	0.149
Hemiboreal				
Twigs	0.188	0.008	0.172	0.203
Branches	0.129	0.006	0.116	0.142
FWD	0.159	0.006	0.147	0.171

Twigs, FWD with diameter ≤ 10 mm; Branches, FWD with diameter > 10 mm.

I nedenstående reference er rådnefaktoren for store grene og stubbe i Irland analyseret: *Estimates of decay rates of components of coarse woody debris in thinned Sitka spruce forests* (Tobin, Black, McGurdy, & Nieuwenhuis, 2007). Her findes rådnefaktor på 5,9% for større grene og 4,7% for stubbe.

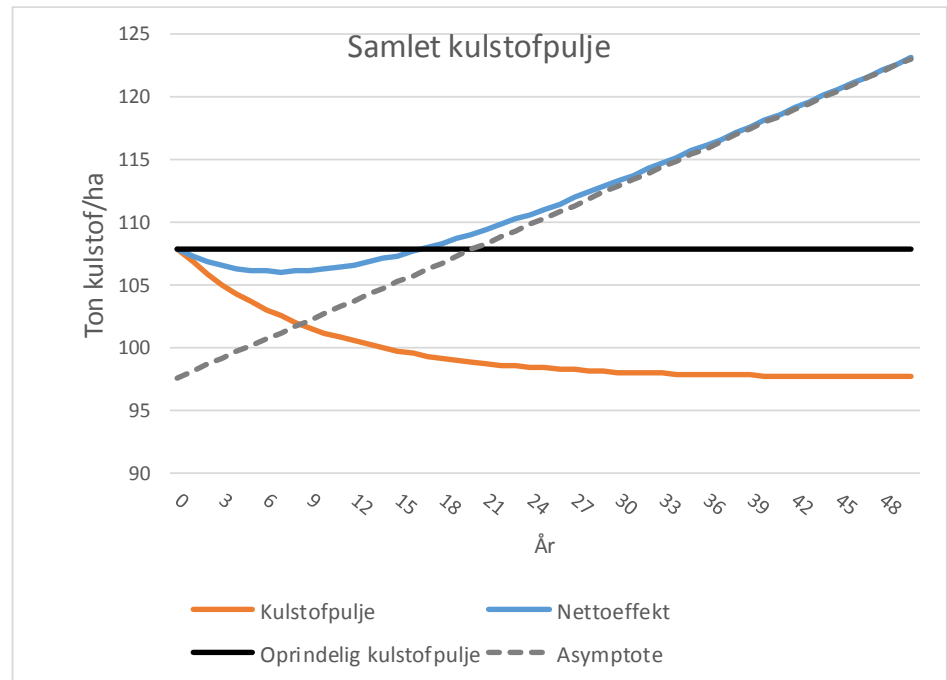
Med udgangspunkt i de to nævnte kilder vurderer vi, at en rådnefaktor på ca. 10% er et godt estimat for restprodukter fra en nordeuropæisk produktionsskov, hvor restprodukter er en blanding mellem grene, toppe og stød.

Bemærkninger

Når efterspørgslen efter energitræ stiger, kan der fremkomme incitament til at tilpasse skovdriften yderligere. Dette kan f.eks være ved at fælde træerne tidligere, eller ved at øge mængden af udtyndingstræ (pionértræer). Såfremt træerne fældes tidligere, kan det øge antallet af år indtil CO₂ neutralitet. Såfremt der anvendes flere pionértræer vil det omvendt reducere antallet af år indtil CO₂ neutralitet. Hvorvidt den dominerende udvikling frem mod 2035 og mod 2050 vil gå i den ene eller den anden retning, har ikke kunnet vurderes inden for rammerne af dette arbejde.

Ved definitionen af CO₂ neutralitet indgår kulindholdet i biomassen af skov i tælleren, mens den årligt sparede kulstofmængde i det fortrængte fossile kul (med indregning af opstrømstab for både kul og biomasse) indgår i nævneren. Årstallet for CO₂ neutraliteten gælder derfor biomasse af skov. Der vil i årene herefter fortsat være en CO₂ emission ved transport og processering af biomassen, når CO₂-fodaftrykket beregnes.

Bilag: Regneeksempel når fliskraftvarme fortrænger naturgas.



Figur 6: Flis fortrænger naturgas. Skovens kulstofpulje og nettoeffekt ved anvendelse af træet som træflis, samt skæringspunkt ved antal år til CO₂ neutralitet.

Referencer

- Agostini, A., Giuntoli, J., & Boulamanti, A. (2013). *Carbon accounting of forest bioenergy. Conclusions and recommendations from a critical literature review*. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport.
- Colnes, A., Doshi, K., Emick, H., Evans, A., Perschel, R., Robards, T., . . . Sherman, A. (2012). *Biomass Supply and Carbon Accounting for Southeastern Forests*. Biomass Energy Resource Center, Forest Guild, Spatial Informatics Group.
- Fulton, M., Mellquist, N., Kitasai, S., & Bluestein, J. (2011). *Comparing Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions from Natural Gas and Coal*. Worldwatch Institute.
- Holtmark, B. (2012). Harvesting in boreal forests and the biofuel carbon debt. *Climatic Change* 112(2), 415-428.
- Jonker, J., Junginger, H., & Faaij, A. (2013). Carbon payback period and carbon offset parity point of wood pellet production in the Southeastern USA. *GCB Bioenergy*.
- K. W. Ragland, D. J. (1991). Properties of Wood for Combustion Analysis. *Bioresource Technology*, 161-168.

- McKechnie, J., Colombo, S., J. Chen, W., Mabee, & MacLean, H. L. (2011). Forest bioenergy or forest carbon? Assessing trade-offs in greenhouse gas mitigation with wood-based fuels. *Environmental Science and Technology* 45(2), 789-795.
- Mitchell, S. R. (2012). Carbon debt and carbon sequestration parity in forest bioenergy production. *GCB Bioenergy* 4(6), 818-827.
- Mitchell, S. R., Harmon, M. E., & O'Connell, K. E. (2009). Forest fuel reduction alters fire severity and long-term carbon storage in three Pacific Northwest ecosystems. *Ecological Applications* 19(3), 643-655.
- Repo, A., Känkänen, R., Tuovinen, J.-P., Antikainen, R., Tuomi, M., Vanhala, P., & Liski, J. (2012). Forest bioenergy climate impact can be improved by allocating forest residue removal. *GCB Bioenergy* 4(2), 202-212.
- Tobin, B., Black, K., McGurdy, L., & Nieuwenhuis, M. (2007). Estimates of decay rates of components of coarse woody debris. *Forestry*, 80(4), 455-469.
- Vavrova, P., Penttilä, T., & Laiho, R. (2009). Decomposition of Scots pine fine woody debris in boreal conditions; implications for estimating carbon pools and fluxes. *Forest Ecology and Management*, 257, 401-412.
- Zanchi, G., Pena, N., & Bird, N. (2011). Is woody bioenergy carbon neutral? A comparative assessment of emissions from consumption of woody bioenergy and fossil fuel. *GCB Bioenergy* 4(6), 761-772.