



rapport

IVL Svenska Miljöinstitutet AB

Nettoemissioner av koldioxid till atmosfären vid användning av hyggesrester för el- och värmeproduktion

Lars Zetterberg, Ola Hansén

Stockholm, maj 1998
B 1298

Sammanfattning

Föreliggande rapport uppskattar nettoemissioner av koldioxid till atmosfären vid användning av hyggesrester för el- och värmeproduktion. Användningen av hyggesrester kallas i rapporten *GROT-uttag* (*GRenar Och Toppar*). Nettoemissioner av CO₂, kallat E_{net}, har definierats som skillnaden mellan emissioner vid GROT-uttag och ett referensfall där hyggesresterna får ligga kvar på marken:

$$E_{\text{net}} = E_{\text{GROT}} - E_{\text{ref}}$$

GROT-uttag innefattar emissioner som uppkommer vid förbränning av fossilbränslen vid insamling, flisning och transport, upptag av kol från atmosfären i den växande biomassen, emissioner från förbränningen av biomassen samt indirekta emissioner som orsakas av GROT-uttag. Referensfallet innefattar upptag av kol från atmosfären i den växande biomassen, emissioner som sker vid nedbrytningen av hyggesresterna samt indirekta emissioner som orsakas av de kvarlämnade hyggesresterna. Underlaget har hämtats från litteraturreferenser. Uppskattningarna ges som ett intervall från en "low case-" till en "high case-" uppskattning, samt ett "best estimate"-värde.

Våra resultat visar att över en omloppstid (80 år) är nettotillskottet av CO₂ till atmosfären 15,8 kg CO₂-C/MWh (3,1 - 31,6 kg CO₂-C/MWh), vilket motsvarar 16 % av det totala kolinnehållet i träbränslet (3 % - 32 %). Av detta utgör förbrukning av fossilbränsle 3,1 kg CO₂-C/MWh.

I syfte att uppskatta nettoemissioner över flera omloppstider har vi utgått från tidigare referenser som anger nedbrytning från 0 - 300 år och extrapolerat deras utveckling över 5 omloppstider (400 år) samt över 10 omloppstider (800 år). Den råder stor osäkerhet i den långsiktiga utvecklingen och vi har även här gjort uppskattningarna för ett värsta fall, ett bästa fall och ett "best estimate". Resultaten visar att valet av tidsperiod över vilken analysen görs har stor betydelse för nettoemissionerna av CO₂. Över fem omloppstider är nettotillskottet av CO₂ till atmosfären 8,8 kg CO₂-C/MWh (3,1 - 21,0 kg CO₂-C/MWh), vilket motsvarar 9 % av det totala kolinnehållet i träbränslet (3 % - 21 %). Av detta utgör förbrukning av fossilbränsle 3,1 kg CO₂-C/MWh, d v s detsamma som över en omloppstid. Över tio omloppstider är nettotillskottet av CO₂ till atmosfären 6,6 kg CO₂-C/MWh (3,1 - 18,0 kg CO₂-C/MWh), vilket motsvarar 7 % av det totala kolinnehållet i träbränslet (3 % - 18 %). Av detta utgör förbrukning av fossilbränsle 3,1 kg CO₂-C/MWh, d v s detsamma som över en omloppstid.

GROT-uttag kan indirekt leda till emissioner eller upptag av koldioxid, exempelvis genom förändringar i produktionsförhållanden, förändrad omsättning av kol i humuslagret eller minskning av antalet skogsbränder. På grund av osäkerheter i dataunderlaget är det svårt att kvantifiera dessa effekters storlek och i vissa fall även deras tecken. Vi har därför valt att inte räkna med de indirekta effekterna i våra uppskattningar av GROT-uttags nettoemissioner utan för en mer kvalitativ diskussion kring dem.

I litteraturen diskuteras om GROT-uttag kan påverka produktionen av skogsbiomassa på ett negativt eller positivt sätt, vilket i så fall kan tolkas som en indirekt CO₂-emission eller upptag. Av de referenser som vi tillgått visar flertalet på en oförändrad eller marginellt minskad skogsproduktion p g a GROT-uttag. En referens visar på en produktionsförsämring på motsvarande ca 10 % om inte bortfallet av näringsämnen kompenseras för. Det skulle i så fall innebära en nettoemission på ca 10 kg CO₂-C/MWh. Ett flertal studier visar att askåterföring som den utförs idag ger en större kolomsättning i ytliga marklager. Nästan inga studier har kvantifierat vilka koldioxidemissioner som detta skulle kunna medföra, men studier över haltförändringar tyder på att ca 25 % av humusmängden möjligen kan förloras som en indirekt koldioxidemission. Om hela den koldioxidemissionen skulle tillskrivas GROT-uttaget, skulle det motsvara ca 25 kg CO₂-C/MWh, eller 25 % av kolinnehållet i GROT-uttaget. Effekten är troligen störst för den första generationen. En studie visar dock att återföring av *granulerad* aska inte verkar påverka humushalten eller mängden kol i ytliga marklager och skulle därför inte medföra någon extra koldioxidemission. I vissa fall kan kvarlämnade hyggesrester leda till en påskyndad nedbrytning av det organiska materialet i marken. Kvarlämnandet leder då indirekt till en minskning av kolpoolen istället för en uppbyggnad.

Att GROT-uttagets biogena andel ($E_{\text{net,bio}}$) leder till en nettoemission av koldioxid, trots att det kolet tidigare har tagits upp från atmosfären, kan tyckas förvånande. Förklaringen ligger i att GROT-uttaget systematiskt tidigarelägger emissioner som annars hade skett senare i tiden. Ett kvarlämnande av hyggesrester kan innebära en successiv uppbyggnad av kolpoolen i marken. GROT-uttaget medför alltså att den eventuella långsiktiga uppbyggnaden av kolpoolen uteblir.

Summary

This study estimates net emissions of carbon dioxide to the atmosphere from the use of forest residues for production of heat and electricity. In the report, the use of forest residues for energy production is called residue-usage. Net emissions of CO₂, called E_{net}, is defined as the difference in emissions for a case where forest residues are used for energy production and a reference case where the forest residues are left on the ground.

$$E_{\text{net}} = E_{\text{residue}} - E_{\text{ref}}$$

E_{net} includes emissions emanating from fossil fuel combustion connected to the collection, chipping and transport of the forest residues. It also includes biomass uptake of atmospheric carbon and indirect emissions caused by residue-usage. The reference case includes biomass uptake of atmospheric carbon, emissions from the decay of the forest residues and indirect emissions arising when residue-usage is not practised. The underlying data has been taken from literature references. The estimates are given as an interval ranging from a low-case estimate to a high-case estimate. In addition to this, a best-estimate value is given.

Our results show that for a turnover period of 80 years, the net emission of CO₂ to the atmosphere is 15,8 kg CO₂-C/MWh (3,1 - 31,6 kg CO₂-C/MWh), which represents 16 % of the total carbon content in the wood fuel (3 % - 32 %). Fossil fuel consumption is responsible for 3,1 kg CO₂-C/MWh of this.

To estimate the net emissions from several turnover periods we have used literature values for decay over 0 - 300 years and extrapolated them for the time of 5 turnover periods (400 years) and for 10 turnover periods (800 years). There are great uncertainties connected with the long-term development and we have here, as in the previous case, made a low-case estimate, a high-case estimate and a best-estimate. For 5 turnover periods, the net contribution of carbon to the atmosphere is 8,8 kg CO₂-C/MWh (3,1 - 21,0 kg CO₂-C/MWh), which represents 9 % of the total carbon content in the wood (3 % - 21 %). Fossil fuel consumption is responsible for 3,1 kg CO₂-C/MWh of this, i.e. the same as for one turnover period.

For 10 turnover periods, the net contribution of carbon to the atmosphere is 6,6 kg CO₂-C/MWh (3,1 - 18,0 kg CO₂-C/MWh), which represents 7 % of the total carbon content in the wood (3 - 18 %). Fossil fuel consumption is responsible for 3,1 kg CO₂-C/MWh of this, i.e. the same as for one turnover period.

Residue-usage may produce indirect emissions or uptake of carbon dioxide, e.g. through changes in production conditions, changes in the turnover of carbon in the humus layer or through a reduction of the amount of forest fires. Due to uncertainties in data it is hard to quantify these indirect effects. In some cases it is hard even to determine their signs. As a consequence of this, we have chosen not to include the indirect effects in our estimates of net emissions from residue-usage. Instead we discuss these effects in a qualitative manner.

In the literature, it is discussed whether residue-usage can affect the forest production in a negative or positive direction. If this is the case, it would lead to either an indirect net uptake or an indirect net emission of carbon dioxide. A majority of the references we have studied show an unchanged production due to residue-usage. One reference shows a 10 % decrease in forest production if the loss of nutrients is not compensated for. This would imply a net emission of some 10 kg CO₂-C/MWh. Several studies show that ash reapplication, as it is practised today, results in a greater turnover of carbon in surface soil layers. Almost no studies have quantified what CO₂-emissions this would produce, but studies of concentration changes suggest that 25 % of the humus may be lost as indirect emissions of carbon dioxide. If residue-usage is responsible for all of this, it would represent 25 kg CO₂-C/MWh, or 25 % of the carbon content in the residue-usage. The effect is likely to be most dominating in the first generation. However, a study of reapplication of granulated ash shows that it does not affect the humus content nor the carbon content in surface layers and would thus not produce any additional emissions of carbon dioxide. Residues left to decay can in certain conditions accelerate the decay of the organic material in the soil. In this case the residues left to decay indirectly result in a reduction of the amount of carbon in the ground.

It may seem surprising that the biogenic part of the residue-usage ($E_{\text{net,bio}}$) produces a net emission of carbon dioxide considering that that carbon has originated from the atmosphere. The explanation is that the residue-usage systematically leads to earlier emissions than would be the case if the residues were left on the ground. If forest residues are left to decay, in the long run a pool of carbon might be created in the ground. This does not happen with residue-usage.

Innehållsförteckning

SAMMANFATTNING	2
SUMMARY	4
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	6
1. INLEDNING OCH SYFTE	7
2. METODIK OCH SYSTEMGRÄNSER	7
3. NETTOEMISSIONER VID GROT-UTTAG	9
3.1 Fossilbränsleförbrukning - insamling, bearbetning och transporter	9
3.2 Totalt kolinnehåll i träbränslet vid tillväxt och förbränning	11
3.2.1 Normala tillväxthastigheter av GROT	12
3.3 Biogena emissioner - referensfallet	13
3.3.1 Nedbrytning av hyggesrester	13
3.3.2 Förändringar i markens kolpool	16
3.4 Biogena nettoemissioner - GROT relativt referensfallet	16
3.4.1 Biogena nettoemissioner	16
3.4.2 Diskussion	19
3.5 Indirekta effekter - diskussion	20
3.5.1 Förändring av skogsproduktionen	20
3.5.2 Askåterföring	22
3.5.3 Komposteffekt av kvarlämnad GROT	22
3.5.4 Ändrade markberedningsmetoder	22
3.5.5 Markkompaktering	23
3.5.6 Förhindrande av skogsbränder	23
3.5.7 Slutsatser av indirekta effekter	23
3.6 Totala nettoemissioner	23
4. SLUTSATSER	24
5. DEFINITIONER	26
6. REFERENSER	26

1. Inledning och syfte

Syftet med föreliggande rapport är att

- uppskatta nettoemissioner av koldioxid till atmosfären vid användning av hyggesrester för el- och värmeproduktion
- uppskatta hur stor del av denna som är fossilbränslebaserad, respektive har biogent ursprung
- undersöka betydelsen av den tidsperiod över vilken analysen utförs (en, fem respektive tio omloppsperioder)
- undersöka hur kolpoolen kan påverkas av uttag av hyggesrester

Studien har finansierats av Södra Skogsägarna ek för, Elforsk AB och Naturvårdsverket och genomförts av IVL, Institutet för Vatten- och Luftvårdsforskning.

Värdefulla råd och synpunkter har lämnats av bl. a. Hillevi Eriksson, SLU och Olle Westling, IVL.

Stockholm 1998-05-14

2. Metodik och systemgränser

Med *hyggesrester*, *avverkningsrester*, *ris* och *GROT* menar vi hyggesrester i form av *grenar* och *toppar* som blir över vid stamavverkning (se vidare avsnitt 5 för definitioner). Vi har inte specificerat om barren lämnas kvar genom avbarrning eller om de följer med i uttaget. Båda varianterna ryms alltså inom begreppen. Det bör dock observeras att barren är en viktig faktor när det gäller att uppskatta storleken på nettoemissionerna speciellt från de indirekta effekterna (se avsnitt 3.5). För de aspekter där det har stor betydelse om barren lämnas kvar på hygget eller inte diskuteras skillnaden mellan de två alternativen i rapporten.

Nettoemissioner av CO₂ har definierats som skillnaden mellan emissioner vid GROT-uttag och emissioner vid ett referensfall där hyggesresterna får ligga kvar på marken:

$$E_{\text{net}} = E_{\text{GROT}} - E_{\text{ref}} \quad (1)$$

Beteckningen "E" innebär här ackumulerade emissioner från en viss starttid. E är en tidsberoende storhet, d v s $E = E(t)$. För enkelhetens skull avstår vi dock från att skriva ut tidsberoendet. GROT-uttag innefattar emissioner som uppkommer från förbränning av fossilbränslen vid insamling, flisning och transport, upptag av kol från atmosfären i den växande biomassan, emissioner från förbränningen av biomassan samt eventuella indirekta emissioner som orsakas av GROT-uttag. Indirekta effekter kan exempelvis vara GROT-uttagets påverkan på skogens produktionsförmåga. Vi kan skriva:

$$E_{\text{GROT}} = E_{\text{GROT, fossil}} + E_{\text{GROT, bio}} + E_{\text{GROT, indirect}} \quad (2)$$

där $E_{\text{GROT, fossil}}$ motsvarar bidraget från förbrukningen av fossilbränslen. $E_{\text{GROT, bio}}$ är bidraget från så kallat biogent kol. Biogent kol utgör det kol som tagits upp från atmosfären i den växande biomassan, alltså det kol som inte är fossilt. $E_{\text{GROT, indirect}}$ representerar indirekta effekter från GROT-uttag och kan vara antingen fossilt eller biogent. Referensfallet innefattar eventuell fossilbränsleanvändning, upptag av kol från atmosfären i den växande biomassan, emissioner som sker vid nedbrytningen av hyggesresterna samt eventuella indirekta emissioner som orsakas av kvarlämnande av hyggesrester:

$$E_{\text{Ref}} = E_{\text{Ref, fossil}} + E_{\text{Ref, bio}} + E_{\text{Ref, indirect}} \quad (3)$$

I syfte att tydliggöra de fossila, biogena respektive de indirekta bidragen till E_{net} kan deras bidrag grupperas ihop. Uttryck (2) och (3) i uttryck (1) ger:

$$\begin{aligned} E_{\text{net}} &= (E_{\text{GROT, fossil}} - E_{\text{Ref, fossil}}) + (E_{\text{GROT, bio}} - E_{\text{Ref, bio}}) + (E_{\text{GROT, indirect}} - E_{\text{Ref, indirect}}) = \\ &= E_{\text{net, fossil}} + E_{\text{net, bio}} + E_{\text{net, indirect}} \end{aligned} \quad (4)$$

där de fossila, biogena respektive indirekta delarna av E_{net} definierats som:

$$E_{\text{net, fossil}} = E_{\text{GROT, fossil}} - E_{\text{Ref, fossil}} \quad (5)$$

$$E_{\text{net, bio}} = E_{\text{GROT, bio}} - E_{\text{Ref, bio}} \quad (6)$$

$$E_{\text{net, indirect}} = E_{\text{GROT, indirect}} - E_{\text{Ref, indirect}} \quad (7)$$

De biogena nettoemissionerna, $E_{\text{net, bio}}$, kan härledas med hjälp av deras relation till det bundna biogena kolet. Om fullständig förbränning av GROT förutsätts blir emissionerna av biogent kol p g a GROT-uttag lika med minskningen av bundet biogent kol p g a GROT-uttag:

$$E_{\text{GROT, bio}} = -\Delta C_{\text{GROT, bio}} \quad (8)$$

där $\Delta C_{\text{GROT, bio}}$ är ändringen av bundet biogent kol p g a GROT-uttag. Analogt gäller för referensfallet:

$$E_{\text{Ref, bio}} = -\Delta C_{\text{Ref, bio}} \quad (9)$$

där $\Delta C_{\text{Ref, bio}}$ är det totala bundna kolet från hyggesresterna i referensfallet. Uttryck (6) ger tillsammans med (8) och (9):

$$E_{\text{net, bio}} = -\Delta C_{\text{GROT, bio}} + \Delta C_{\text{Ref, bio}} \quad (10)$$

I vårt fall kan man härleda ett användbart samband mellan E_{net} och $\Delta C_{\text{Ref, bio}}$ d v s det totala bundna kolet från hyggesresterna i referensfallet. Vid GROT-uttag har en viss mängd kol tagits upp från atmosfären, vilket ökat $C_{\text{GROT, bio}}$. Vid el- och värmeproduktion kommer allt det kolet att åter avgå till atmosfären (om fullständig förbränning förutsätts), d v s $C_{\text{GROT, bio}}$ blir noll igen. Det innebär att efter förbränning gäller:

$$\Delta C_{\text{GROT, bio}} = 0$$

och uttryck (10) kan reduceras till:

$$E_{\text{net, bio}} = \Delta C_{\text{Ref, bio}} \quad (11)$$

D v s att de biogena nettoemissionerna från GROT-uttag är lika med det totala bundna kolet från hyggesresterna i referensfallet.

I vårt fall förekommer användning av fossilbränslen endast vid GROT-uttaget, d v s $E_{\text{net, fossil}} = E_{\text{GROT, fossil}}$. Detta ger tillsammans med uttryck (4) och (11) ett uttryck för hur E_{net} kan beräknas:

$$E_{\text{net}} = E_{\text{GROT, fossil}} + E_{\text{net, indirect}} + \Delta C_{\text{Ref, bio}} \quad (12)$$

eller om vi inte har indirekta effekter:

$$E_{\text{net}} = E_{\text{GROT, fossil}} + \Delta C_{\text{Ref, bio}} \quad (13)$$

För att uppskatta nettoemissionerna från GROT-uttag behöver vi alltså uppskatta förbrukningen av fossilbränslen, det totala bundna kolet från hyggesresterna i referensfallet, samt eventuella indirekta effekter på kolförrådet.

I syfte att ge ett intervall där emissionerna med stor säkerhet ligger inom, har de uppskattade emissionerna angivits för ett värsta fall ("high case"), ett bästa fall ("low case"), samt för ett troligt fall ("best estimate"). Underlag för analysen har hämtats från litteraturen.

Analysen över längre tidsperioder har gjorts genom att litteraturuppgifter från 0 - 300 år extrapolerats enligt high case, low case och best estimate-uppskattningar.

3. Nettoemissioner vid GROT-uttag

3.1 Fossilbränsleförbrukning - insamling, bearbetning och transporter

Enligt [24] ligger CO₂-emissionerna från produktion av skogsbränslen i form av avverkningsrester idag på 0,85 kg C/GJ vilket motsvarar 3,06 kg CO₂-C/MWh_{bränsle}. CO₂-C anger kolinnehållet i den koldioxid som släpps ut. Av 1 kg CO₂ utgörs ca 0,27 kg av C. I produktionen används fossila bränslen och i avverkningsrester ingår rester från både första gallringen och slutavverkningen. Vattenfall [11] anger ett värde på 2,87 kg CO₂-C/MWh_{bränsle}. Andelen GROT per ytenhet har betydelse för utsläpp i samband med ihopsamling och transporter. Vattenfall har räknat med ett markbehov på 93 m²/MWh_{bränsle} och en rotationstid på 80 år.

GROT tas bara ut i samband med stamvedsavverkning. Det primära syftet är att ta tillvara stamveden för produktion av trävaror eller pappersmassa. Man kan

argumentera att användningen av fossilbränslen vid huggning av topp och grenar rimligen bör tillskrivas (allokeras) stamvedsavverkningen. Skulle vi däremot välja att tillskriva denna förbrukning av fossilbränslen GROT-uttaget får vi ändå ingen nettoemission. Orsaken till detta är att både i referensfallet och vid GROT-uttag kommer avverkningsarbetet att bedrivas på samma sätt vilket gör att nettoemissionerna (*GROT* minus *Referens*) blir noll. På motsvarande sätt kommer utsläpp från skogsarbetet under rotationsperioden inte leda till några nettoemissioner av koldioxid.

De utsläpp som uppkommer i samband med arbetet för att skota och flisa avverkningsresterna räknas till scenariot med GROT-uttag. Vanligtvis utförs detta arbete av dieseldrivna traktorer och arbetsmaskiner. Till denna post hör även alla utsläpp från de transporter som behövs för att förflytta bränslet från skogen till energianläggningen [24]. Dieseldriven lastbil har stått för huvuddelen av transportererna i Vattenfalls beräkning [11].

I Vattenfalls utsläppsvärden i tabell 1 ingår inte askhanteringen. De har dock gjort en uppskattning av bränsleförbrukningen vid askåterföring till skogen och en viss normal askdeponering. Deras utsläppsvärden för hela askhanteringen är 0,00837 g CO₂/kWh_{el} d v s 2,49 g CO₂-C/MWh_{bränsle}. Detta motsvarar mindre än en promille av utsläppen från bränsleproduktion och transporter. Mot denna bakgrund bortser vi från emissionerna av koldioxid från askåterföringen.

Tabell 1. CO₂-emissioner från förbränning av fossila bränslen (Insamling, flisning och transporter)

Angivet värde	Omräkningsfaktor	Utsläpp (kg CO ₂ -C/MWh _{bränsle})	Referens
3,06 kg CO ₂ -C/MWh _{bränsle}		3,06	24
9,67 g CO ₂ /kWh _{el}	1 MWh _{bränsle} = 1,09 MWh _{el} 0,2727 g CO ₂ -C = 1 g CO ₂	2,87	11

Slutsats

Vi väljer att använda uppgifter från Börjesson m fl [24]. Dessa är troligen inte en underskattning av de verkliga utsläppen. Vi bortser från askåterföringen eftersom koldioxidutsläppen per MWh är mindre än en promille av utsläppen från produktion och transport av GROT [11].

I referensfallet förekommer ingen förbrukning av fossilbränslen förutom sådana som är gemensamma med GROT-fallet och som därmed inte påverkar nettoemissionerna. Det innebär att de fossila nettoemissionerna är lika med de fossila emissionerna från GROT: $E_{\text{net, fossil}} = E_{\text{GROT, fossil}} = 3,06 \text{ CO}_2\text{-C/MWh}_{\text{bränsle}}$.

3.2 Totalt kolinnehåll i träbränslet vid tillväxt och förbränning

Vid tillväxten binds en viss mängd kol per MWh i träbränslet. Vi kallar detta "totalt kolinnehåll i träbränslet" och betecknar denna konstant C_0 (enhet: kg C/MWh). Vi förutsätter fullständig förbränning, d v s samma mängd kol kommer frigöras igen till atmosfären vid förbränningen. Detta antagande verkar rimligt enligt Vattenfall [11] där mängden aska i deras studie blir mycket låg och enligt Egnell m fl [28] som hävdar att utvecklingen torde gå mot låga halter av organiskt material i askor. C_0 används i avsnitt 3.3 och 3.4 för att uppskatta det totala bundna kolet i avverkningsresterna och hur detta ändras över tiden. Ett sätt att uppskatta C_0 är att utgå från kolinnehållet i träbränslet (kg C/ton TS) och dividera med värmevärdet (MWh/ton TS).

Tabell 2. Kolhalt och densitet i trärester per vikt torrsubstans (TS)

Mängd kol/TS	Densitet	Referens
ca 50 %	0,42 ton TS/m ³	12
50		25
51,9±1,2		14

Vi väljer värdet 50 g C/g TS trä. Tillsammans med uppgifter om värmevärdet kan vi nu uppskatta kolinnehållet per MWh, vilket redovisas i tabell 3.

Tabell 3. Värmevärden och beräknade emissioner från träbränslen

Typ av bränsle	Värmevärde MWh/ton TS	Fukthalt (%)	kg CO ₂ -C/MWh _{bränsle} (kolhalt på 50 %)	Referens
Helträdsflis av tall	4,5	57	111	21
Helträdsflis av gran	4,5	57	111	21
Träbränslen	4,3-5,0	26-61	100 - 116	21
GROT	5,1	25	98	15
GROT	4,8	50	104	15
Trädflis	5,05	25	99	25
Trä	5,7	0	88	14
GROT, oflisad	4,5	45	111	5
Trädelar	4,6	50	109	5
Biobränsle	4,9		109	33

Utöver givna värmevärden för olika bränslen finns även referenser för direkta utsläpp, se tabell 4.

Tabell 4. Referenser på emissioner vid förbränning av flisade träbränslen

Angivet värde	Omräkningsfaktor	kg CO ₂ - C/MWh _{bränsle}	Referens
100 g CO ₂ /MJ	0,2727 g CO ₂ -C = 1 g CO ₂	98	11
100 g CO ₂ /MJ	0,2727 g CO ₂ -C = 1 g CO ₂	98	3
115 g CO ₂ /MJ	0,2727 g CO ₂ -C = 1 g CO ₂	113	16
102 g CO ₂ /MJ	0,2727 g CO ₂ -C = 1 g CO ₂	100	25
97 g CO ₂ /MJ	0,2727 g CO ₂ -C = 1 g CO ₂	95	25

Slutsats

Vi väljer värdet 98 kg CO₂-C/MWh_{bränsle} som "best estimate" till våra beräkningar. Två stycken referenser har kommit fram till samma värde. Detta utsläppsvärde motsvarar ett värmevärde på 5,1 MWh/ton TS, antaget en kolhalt på 50 %.

3.2.1 Normala tillväxthastigheter av GROT

Tillväxthastighet och tillgång på GROT har inte direkt betydelse för våra beräknade nettoemissioner men bör ändå nämnas eftersom detta är viktiga storheter när det gäller åtgång av fossila bränslen vid insamling och transport. Tillväxten ger också en uppfattning om den totala energipotentialen från GROT-användning. Det som är av betydelse för våra beräknade emissioner är eventuella förändringar av skogens produktionsförmåga p g a GROT-uttag (se vidare avsnitt 3.5 nedan).

Flertalet arbeten med att bedöma potential, miljöeffekter, ekonomi etc för GROT-uttag har utnyttjat avverkningberäkningar från 1992 som underlag [33]. Dessa data har ytterligare bearbetats i miljökonsekvensbeskrivningen (MKBn) av Egnell m fl [28]. Skillnaden jämfört med Anon [33] är en annan region indelning och att Egnell m fl endast tar upp GROT. Anon [33] räknar med en omvandlingsfaktor på 4,9 MWh/ton TS. Enligt de beräkningar som utförts i MKBn [28] blir medelvärdena för hela landet enligt följande: GROT från all avverkning (gallring och slutavverkning) motsvarar 34 % av stamvedens TS eller 25 % av hela trädets TS. Vid slutavverkning motsvarar GROT ca 30 % av stamvedens TS. Förhållandet mellan stamvedens, grenarnas, barrens och rotsystemets biomassa som funktion av stamtjocklek finns även beskrivet i Olsson [6]. När det gäller tall utgör grenarna som minst 20 % av stamvedens biomassa. För gran utgör grenarna som minst 25 % av stamvedens biomassa.

Enligt Egnell m fl [28] blir maxutbytet av GROT (100 % GROT i gallring och slutavverkning inklusive barr) 3,6 MWh/ha, år (medelvärde för hela Sverige) under den närmaste tioårsperioden. Mer realistiskt för dagens teknik är ett uttag av 70 % av grenar och toppar samt 30 % av barr. Detta ger 2,3 MWh/ha, år med uttag i gallring och slutavverkning eller 1,7 MWh/ha, år räknat enbart på slutavverkning [28]. Medelgenerationstiden för hela Sverige är enligt Egnell m fl [28] 90 år. Detta värde tillsammans med omvandlingsfaktorn på 4,9 MWh/ton TS ger att det i medeltal finns 31 ton TS/ha (15,5 ton C) vid slutavverkning. Siffrorna från Egnell m fl [28] relateras till de arealer där uttag kan ske utan annat än tekniska restriktioner och redovisas i tabell 5.

Tabell 5. Energiutbyten och tillväxt per ha i Sverige som medeltal för den närmaste 10-års perioden. (För att beräkna värdena i tabellen har kolinnehållet har satts till 50 % g C/g TS.)

MWh/ha, år	kg C/ha, år	kg C/ha totalt avverkat	Referens
3,6 (Maxutbyte)	367 (inkl gallring)	33 000	28
2,3 (Praktisk drift)	233 (inkl gallring)	21 000	28
1,7 (Praktisk drift)	172 (endast slutavv.)	15 500	28

Som jämförelse kan andra studiers värden för potentiellt uttag av GROT i mellersta Sverige iakttas. Enligt Börjesson [24] kan man utifrån medelvärden på mängden rester från avverkade ytor mellan latitud 58°N och 60°N maximalt få ut 13 GJ ur

avverkningsrester per hektar och år. Dessa värden inkluderar även rester från första gallringen. Gustafsson m fl [23] beräknar utbytet av GROT i mellersta Sverige till 1,1 MWh/ha/år för dagens förhållanden. Vattenfall [11] har räknat med ett markbehov på 93 m²/MWh_{bränsle} och en rotationstid på 80 år för produktionen av GROT. I tabell 6 anges dessa data som jämförelse med de värden som Egnell m fl [28] räknat fram för hela Sverige.

Tabell 6. Energiutbyten, tillväxthastigheter och tillgångar per hektar i mellersta Sverige. (För att beräkna värdena i tabellen har en rotationsperiod på 80 år, ett kolinnehåll på 0,5 g C/g TS och ett värmevärde på 5,1 MWh/ton TS använts.)

MWh/ha, år	kg C/ha, år	kg C/ha vid avverkning	Referens
3,6	354 (inkl gallring)	28 000	24
1,1	110	8 600	23
1,3	130	10 500	11

3.3 Biogena emissioner - referensfallet

3.3.1 Nedbrytning av hyggesrester

Vi har definierat de biogena nettoemissionerna från GROT-uttag som skillnaden mellan totala CO₂-emissioner från GROT-uttag och CO₂-emissioner från referensfallet:

$$E_{\text{net, bio}} = E_{\text{GROT, bio}} - E_{\text{Ref, bio}}$$

I kapitel 2 har vi visat att uttrycket kan förenklas till:

$$E_{\text{net, bio}} = \Delta C_{\text{Ref, bio}}$$

där $\Delta C_{\text{ref, bio}}$ är mängden bundet kol från referensfallet (från hyggesrester). Vi behöver alltså uppskatta mängden bundet kol från kvarliggande hyggesrester. Nedbrytnings-hastigheten blir här avgörande för hur stora de biogena nettoemissionerna blir. I det följande presenterar vi ett antal referenser som beskriver nedbrytningen av hyggesrester. På basis av dessa väljs tre nedbrytningsscenarior som sedan används för att beräkna E_{net} .

Det råder stor osäkerhet om hur stor del av kolet i hyggesresterna som långsiktigt lagras i markens kolpool. Enligt Naturvårdsverket [13] så har huvuddelen av kolet i avverkningsrester som får ligga kvar på marken avgått som koldioxid till atmosfären inom 10-15 år. En mindre del av kolet (< 5 %) omvandlas dock till stabila organiska föreningar som har halveringstider på hundratals eller tusentals år. Vi antar att det är denna rest på mindre än 5 % som återstår efter en generation d v s 80-100 år.

Eriksson och Hallsby [29] har i sin rapport från 1992 antagit en konstant nedbrytningshastighet och uppskattat att alla hyggesrester bryts ned fullständigt till koldioxid efter 20 år. Syftet med studien är att göra en grov uppskattning av bidraget till klimateffekten som inte undervärderar effekten på kolpoolen vid uttag av GROT.

Tiden för nedbrytning baseras på studier av Lundqvist m fl där effekten på mängden organiskt material i marken efter stamvedsuttag respektive helträdsuttag jämförs. Studierna visar att skillnaden mellan de två fallen är marginell efter två decennier [29].

Enligt Klemedtsson m fl [20] delas organiskt kol bundet på och i marken ofta in i tre pooler. Man anger en fraktion med en snabb omsättningsstid på 1-3 år, en långsammare fraktion med en omsättningstid på 20 till 40 år, samt en mycket långsam fraktion med en omsättningstid på 200 till 1500 år. Enligt denna modell blir det avgörande för den långsiktiga kolbalansen hur stor del av förnan som hamnar i den mest långsamma poolen [20].

Schlamadinger [4] har med hjälp av en boxmodell studerat flödena och uppbyggnaden av kol i de tre olika kolpoolerna. I modellen är omloppstiden i förnapoolen några år, i humuspoolen upp till hundra år och i markpoolen är medelomloppstiden flera hundra år. Schlamadinger m fl [4] tar först fram ett basscenario som "best estimate". Genom att variera vissa parametrar, t ex jämviktsvärden och fördelning mellan förnapool och humuspool, beräknas extremvärden. Schlamadinger har även implementerat Eriksson och Hallsbys [29] antagande om linjär fullständig nedbrytning mellan år 0 och 20 i sin modell och därmed erhållit en exponentiell nedbrytningskurva. Schlamadingers basscenario, max-scenario, min-scenario och Erikssons och Hallsbys modifierade nedbrytningsscenario finns redovisade i tabell 7 nedan.

Egnell m fl [28] hänvisar till flera empiriska studier som indikerar att den kortsiktiga effekten av helträdsuttag på markens totala kolförråd är obetydlig. Detta trots att kontrolltyterna ibland försetts med dubbla mängden GROT. Ett skäl kan vara att de avverkningsresterna gynnar och ökar nedbrytningen av organiskt material i förna och humus. Skillnaden i kolförråd mellan GROT-uttag och referensfallet minskar därmed med tiden (se vidare avsnitt 3.5 *Indirekta effekter*).

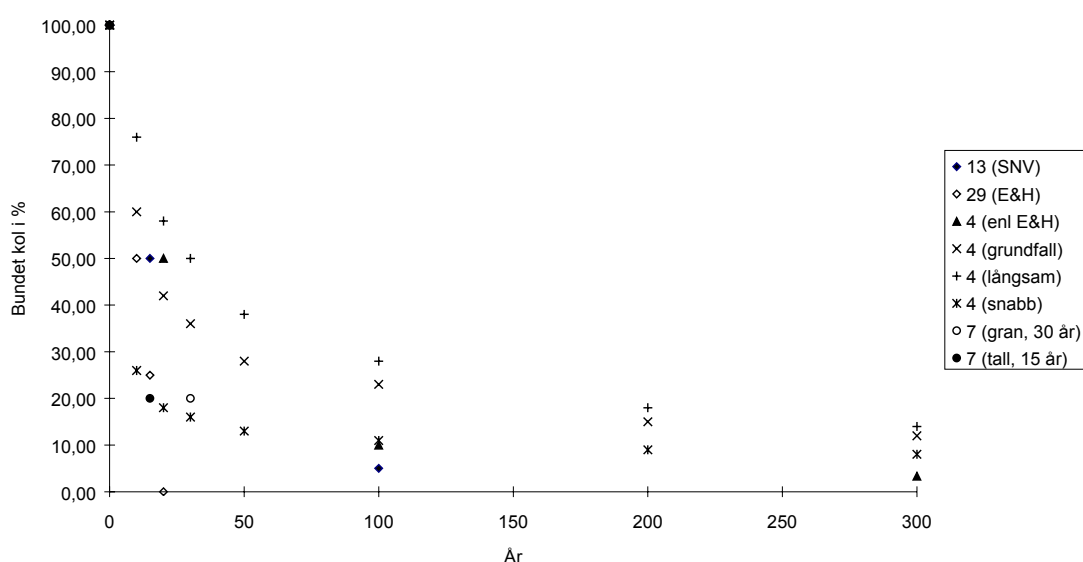
Enligt Olssons [7] empiriska studier kunde inga effekter från riståkt vad gäller markens kolinnehåll detekteras. Däremot minskade humuslagrets kolhalt något i 75 % av försöken. Denna minskning var till viss del balanserad av ökade kolförråd i marken. Inga exakta värden för kolhalten anges dock. När det gäller mängden organiskt material i marken kunde inga signifikanta effekter (i detta försök mindre än 20 procents skillnad) från riståkt iaktas. Varken 30-årigt försök med gran, eller 15-årigt försök med tall har kunnat visa att det skett någon minskning. Genom att anta att mängden kol är proportionell mot mängden organiskt material kan ytterligare två nedbrytningsscenarioer föras in i tabell 7.

Flera modellsimuleringar stämmer väl överens med de empiriska erfarenheter från de försök som presenteras av Olsson m fl [7]. I Bengtsson och Wikströms [31] modellsimuleringar över 300 år syns inte några tydliga effekter på skogsmarkens förråd av organiskt material efter upprepade uttag av GROT inklusive barr. Ågren [30] har för två typbestånd simulerat skogsekosystemets kolförråd med eller utan uttag av grenar (exklusive barr) i slutavverkningar och gallringar. Enligt simuleringarna ledde uttaget av grenar endast till en mycket marginell effekt på kolförrådet.

Tabell 7. Nedbrytning av GROT enligt olika referenser. Siffror i % anger andel av GROT-nedfall som är bundet i fast material och som inte avgått som koldioxid. Kolinnehåll fås genom att multiplicera procentsatserna med totalt kolinnehåll i trädränslet, C_0 . I avsnitt 3.2 antog vi C_0 vara ca 98 kg C/MWh.

Andel kol kvar på eller i marken (%)									
0 år	10 år	15 år	20 år	30 år	50 år	100 år	200 år	300 år	Referens
100		< 50				< 5			13 (Naturvårdsv.)
100	50	25	0						29 (Eriksson & Hallsby)
100			50			10		3,3	4 (enl E&H)
100	60		42	36	28	23	15	12	4 grundfall*
100	76		58	50	38	28	18	14	4 långsam nedbrytning*
100	26		18	16	13	11	9	8	4 snabb omsättning*
100				< 20					7 (gran, 30 år)
100		< 20							7 (tall, 15 år)

Värden från Schlamadingers tre egna kurvor (markerade med * i tabell) är tagna ur diagram i referens [4]. I figur 1 nedan har värden från de olika nedbrytningsscenarierna i tabellen åskådliggjorts grafiskt.



Figur 1. Nedbrytningsscenarier enligt tabell 7

Slutsats

Som “lågemissions-scenario” för våra beräkningar väljer vi de värden som Olsson [7] presenterar för tall. Om mängden kol antas proportionell mot mängden organiskt material är enligt Eriksson och Hallsby [29], Egnell m fl [28] och tidigare simuleringar [30-31] endast en obetydlig del av hyggesresterna kvar efter en generation. I “lågemissions-scenariot” är således den kvarvarande resten mindre än 20 % efter 15 år och 0 % efter 80 år. Schlamadingers [4] anpassning av Eriksson och Hallsbys nedbrytningsscenario väljs som “best estimate” eftersom detta är en exponentiell nedbrytningskurva som bygger på en studie där syftet var att uppskatta, men framförallt inte undervärdera biobränslets bidrag till klimateffekten. Som “high case scenario” väljs Schlamadingers [4] långsammaste nedbrytningskurva.

3.3.2 Förändringar i markens kolpool

En del av all den mängd förna (barr, grenar, löv) som faller ner på marken hamnar till slut i markens kolförråd. Detta kolförråd är inte statiskt utan påverkas av en mängd faktorer. Enligt Eriksson [12] kan organiskt kol inte ackumuleras i det oändliga i väldränerade jordar. Med tiden uppstår en jämvikt mellan tillförsel av förna och nedbrytning. Jämvikten styrs av jordbildande faktorer som klimat, topografi, vegetation, markorganismer och typ av förnasubstans. Även mänsklig aktivitet kan påverka markens kolförråd. Utdikning och markberedning aktiverar nedbrytning och minskar därmed förrådet. I vissa marker kan kvarlämnade hyggesrester i sig leda till en ökad nedbrytning och därmed påverkan på markens kolförråd (se vidare 3.5 Indirekta effekter).

Bedömningar av kvantitativa förändringar av markens kolförråd är svåra att göra [12]. Enligt Eriksson [12] är det troligt att en viss uppbyggnad av förrådet sker på grund av minskningen av skogsbränder, skogens produktionsökning etc. Andra faktorer som kan påverka kolförrådet är kvävenedfall, försurning och ökad CO₂-halt i atmosfären. Eriksson [32] uppskattar i dagsläget förändringen av markbundet kol i Sveriges skogsmark till mellan 0 och +6 miljoner ton kol per år. En studie från Naturvårdsverket [27] anger att den svenska skogsmarkens kolförråd ökar med ca 5 (3-7) miljoner ton kol per år. I denna studie antas att ca 5-10 % av förnanedfallet består av en mycket svårnedbrytbar del vilket gör att ett ökat uttag av hyggesrester från 300 000 hektar beräknas reducera fastläggningen av kol i marken med ca en halv miljon ton kol per år [27].

Enligt Egnell m fl [28] har flera studier visat att nedbrytningsgraden är lägre ju kväverikare substratet är. Barren är de mest kväverika delarna av hyggesresterna och bryts därmed ned långsammast. Nedbrytningen kan även bli ofullständig vilket skulle leda till en växande svårnedbrytbar rest i marken. Enligt detta får det stor betydelse om barren tas med eller lämnas kvar på hygget vid ett GROT-uttag [28]. Även Anon [27] påpekar att barren sannolikt har en större betydelse än grenarna och topparna när det gäller en eventuell uppbyggnad av kolpoolen. Skillnaden i kolpoolsuppbyggnad mellan GROT-fallet och referensfallet blir sannolikt mindre om barren vid ett GROT-uttag tillåts bara av sig innan ihopsamling och flisning.

Börjesson m fl [15] refererar till en studie på norsk tall där det framkom att nedfallet av GROT vid avverkning motsvarar 8-10 % av det totala förnanedfallet under en rotationsperiod. GROT representerar således en mindre del av den förna som faller ner under en rotationsperiod. En sammanställning från Naturvårdsverket [27] nämner en liknande siffra, dvs grenar och toppar motsvarar 10 % av beståndets hela produktion av fallförna under en omloppstid.

3.4 Biogena nettoemissioner - GROT relativt referensfallet

3.4.1 Biogena nettoemissioner

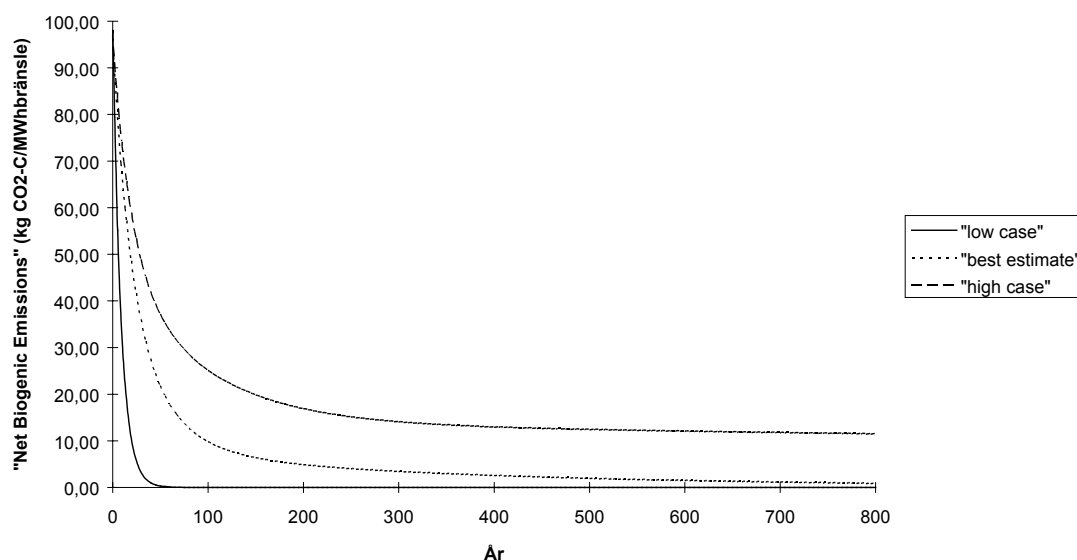
Som tidigare nämnts kan de biogena nettoemissionerna, $E_{\text{net, bio}}$ uppskattas som:

$$E_{\text{net, bio}} = E_{\text{GROT, bio}} - E_{\text{Ref, bio}} = \Delta C_{\text{Ref, bio}}$$

där $\Delta C_{\text{ref, bio}}$ är mängden bundet kol från referensfallet (från hyggesrester). Sambandet visar att de biogena nettoemissionerna från GROT-uttag lika med det totala bundna kolet från hyggesresterna i referensfallet.

Utifrån värden i tabell 7 har vi gjort uppskattningar av det bundna kolets utveckling under en 800-års period. Uppskattningarna har gjorts för tre scenarier; "low case", "best estimate" och "high case". I "low case" utgår vi från Olssons [7] värden (med dess statistiska mätosäkerhet) samt de värden och simuleringar [28-31] som visat på en marginell effekt på kolförrådet efter några decennier eller generationer. För att anpassa en exponentiell nedbrytningskurva till detta modifierade scenario har en fraktion på 100 % tilldelats en halveringstid motsvarande 6 år. Efter 15 år återstår då ca 18 % av avverkningsresterna och efter 80 år återstår 0 %. I "best estimate" utgår vi från Schlamadingers [4] anpassning av Erikssons och Hallbys nedbrytningsscenario. Värden mellan 0 och 300 år har erhållits genom kurvanpassning. Restposten på 3,3 % vid år 300 antas sedan avklinga med en halveringstid motsvarande ca 250 år. I "high case" utgår vi från den långsammaste nedbrytningen i referens [4] i 300 år. Mellanliggande värden (0-300 år) har erhållits genom kurvanpassning. Efter 300 år antar vi att återstående 15 % avklingar med en halveringstid motsvarande 3000 år. Detta innebär att denna restpost nästan är konstant under de första 800 åren. Värden för de tre scenarierna redovisas i tabell 8. I figur 2 åskådliggörs samma värden.

Som nämnts ovan är de biogena nettoemissionerna enligt våra antaganden lika med den totala mängden bundet kol från hyggesresterna varför båda dessa rubriker används i tabeller och figurer.



Figur 2. Biogena nettoemissioner /Totalt bundet kol från en generation under 800 år.

Tabell 8. Biogena nettoemissioner /Totalt bundet kol från en generation under 800 år.

Biogena nettoemissioner /Totalt bundet kol	80 år	400 år	800 år
kg CO ₂ -C/MWh _{bränsle}	12,7 (0 - 28,6)	2,5 (0 - 12,9)	0,8 (0 - 11,4)

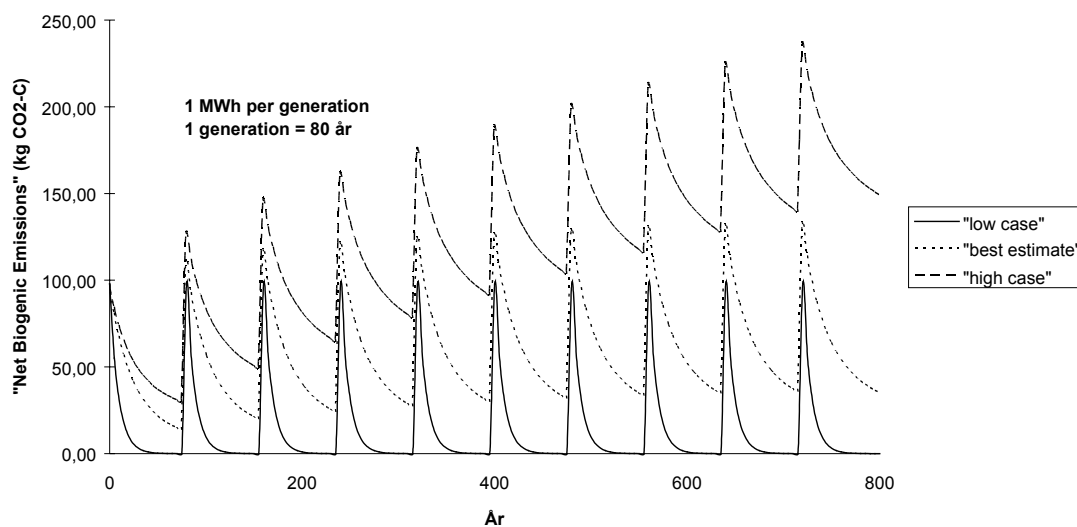
% av totalt bundet kol	13,0 (0 - 29,1)	2,6 (0 - 13,2)	0,8 (0 - 11,6)
------------------------	-----------------	----------------	----------------

I syfte att studera effekten av tio omloppsstider, adderar vi tio generationer på varandra, med 80 års intervall, och får då värden för sammanlagda utsläpp/totalt bundet kol enligt tabell 9. Varje generation ger 1 MWh_{bränsle} d v s efter tio generationer har 10 MWh bränsle producerats.

Tabell 9. Biogena nettoemissioner /Totalt bundet kol från 10 generationer under 800 år. Varje generation ger 1 MWh_{bränsle}.

Biogena nettoemissioner /Totalt bundet kol	1 generation, 80 år	5 generationer, 400 år	10 generationer, 800 år
kg CO ₂ -C (Varje generation ger 1 MWh _{bränsle})	12,7 (0 - 28,6)	28,4 (0 - 89,6)	35,1 (0 - 149,1)
% av totalt bundet kol	13,0 (0 - 29,1)	5,8 (0 - 18,3)	3,6 (0 - 15,2)

Samma värden för utsläpp/totalt bundet kol åskådliggörs i figur 3.



Figur 3. Biogena nettoemissioner/Totalt bundet kol från 10 generationer under 800 år. Varje generation ger 1 MWh_{bränsle}.

Av figur 3 ser man att nettoemissionerna ökar för scenarierna “high” och “best estimate”, men inte linjärt. Tillväxttakten minskar ju fler generationer som läggs till (effekten diskuteras i avsnitt 3.4.2). Det betyder att räknat per producerad MWh bränsle så minskar nettoemissionerna ju längre tidsperiod som studeras. I tabell 10 har värdena från tabell 9 dividerats med det totala antalet producerade MWh_{bränsle} för att ge biogena nettoemissioner per MWh_{bränsle} ($E_{net, bio}$).

Tabell 10. Biogena nettoemissioner ($E_{net, bio}$)/Totalt bundet kol från 10 generationer under 800 år.

Biogena nettoemissioner /Totalt bundet kol	1 generation, 80 år	5 generationer, 400 år	10 generationer, 800 år
kg CO ₂ -C/MWh _{bränsle}	12,7 (0 - 28,6)	5,7 (0 - 17,9)	3,5 (0 - 14,9)
% av totalt bundet kol	13,0 (0 - 29,1)	5,8 (0 - 18,3)	3,6 (0 - 15,2)

3.4.2 Diskussion

GROT-uttag innebär att man systematiskt tidigarelägger emissioner som annars hade skett senare i tiden. Ett kvarlämnande av hyggesrester kan innebära att en kolpool successivt byggs upp i marken. Med ordet kolpool avser vi i det här fallet den kolpool som har ursprung i hyggesresterna, till skillnad från det totala markbundna kolet.

Skillnaden i kolpoolsuppbyggnad mellan GROT-fallet och referensfallet kan observeras för de tre scenariorna i figur 3, som anger totalt bundet kol från hyggesrester. GROT-uttaget innebär alltså (för scenarierna “high” och “best estimate”) att den kolpool som annars hade byggts upp uteblir. Nettoemissionerna från GROT-uttag har i vår studie definierats som skillnaden mellan emissioner från GROT-uttag och emissionerna från kvarlämnandet av hyggesrester (referensfallet). Som en följd av att vi antar fullständig förbränning av GROT blir beräknade biogena nettoemissioner från GROT-uttag till beloppet identiskt lika stort som referensfallets bundna kol, d v s den kolpool som skulle ha byggts upp av hyggesresterna. I det fallet där ingen kolpool byggs upp är nettoemissionerna noll.

Om man från början redan har en kolpool blir nettoeffekten densamma. Kvarlämnande av hyggesrester innebär troligtvis ett bibehållande av kolpoolen. GROT-uttag innebär att kolpoolen reduceras. Våra beräknade nettoemissioner, d v s skillnaden mellan GROT och referensfallet, blir även i det här fallet lika med storleken på den kolpool som försvunnit.

Om det förhåller sig så att en kolpool byggs upp av kvarlämnade hyggesrester blir poolens tillväxttakt (i kg/år) hög till en början, men lägre ju större kolpoolen blir. Detta beror på att nedbrytningstakten (i kg/år) ökar ju större poolen blir, under det att tillförseln av organiskt material är konstant i vårt scenario. Ofta beskriver man nedbrytningen av hyggesresterna till att vara proportionell mot den totala mängden material i kolpoolen. Under sådana förutsättningar nås slutligen en jämvikt där det tillförda materialet är lika stort som nedbrytningen. Då växer inte poolen längre utan har uppnått en steady-state nivå (se avsnitt 3.3.2). Storleken på den slutliga kolpoolen är det gränsvärde som kurvorna i figur 3 går mot i oändligheten.

Vi har uppskattat nettoemissionerna (= kolpoolsförlusten) per MWh för olika tidsperioder. Man kan konstatera att nettoemissionerna blir lägre ju fler generationer som analysen omfattar (se tabell 10). Orsaken till detta är att det ackumulerade MWh-uttaget ökar linjärt med tiden i en takt av 1 MWh per 80 år. Kolpoolen i referensfallet ökar däremot inte linjärt med tiden utan tillväxttakten avtar ju större poolen blir. Detta gör att nettoemissionerna per MWh minskar med tiden. Det bör observeras att i scenariot “low” får vi ingen långsiktig uppbyggnad av kolpoolen alls. De biogena nettoemissionerna blir därigenom noll både efter en respektive tio generationer.

3.5 Indirekta effekter - diskussion

3.5.1 Förändring av skogsproduktionen

Trots att mängden biomassa i grenar, toppar och barr är mindre än hälften av den i stamveden finns större delen av näringsinnehållet i dessa delar [6, 9]. Detta gäller framförallt barren som innehåller mycket näring i förhållande till biomassa. Att avlägsna dessa avverkningsrester kan därför leda till brist på näringsämnen som kväve och fosfor vilka är viktigast för tillväxten. Enligt Olsson [6] blir förluster av kväve betydligt större vid uttag av stam, grenar och barr än bara uttag av stam. Näringsämnen som exempelvis baskatjonerna kalcium (Ca), magnesium (Mg) och kalium (K) försvinner också. När dessa mineraler försvinner reduceras markens motstånd mot försurning. Om skogen ej kompenseras för näringsförlusterna eller andra åtgärder inte genomförs finns risk för att skogens långsiktiga produktionsförmåga försämras [6, 7, 9].

Genom att låta hyggesresterna barra av sig innan borttransport kan kortsiktiga och långsiktiga fosforunderskott undvikas [6, 28]. På samma sätt kan dessutom kortsiktig brist på kväve undvikas [28]. Avbarrning kan även ha en positiv effekt på kaliumhalten i marken [7]. Förlusten av baskatjoner vid stamveds- och GROT-uttag med barr är enligt Olsson [6] större än vad som tillförs marken naturligt genom vittring. För att kompensera för detta kan en del av vedaskan föras tillbaka till skogen. Eriksson [8] påpekar att några år efter att välhårdade askgranuler spridits ut i skog där GROT-uttag gjorts liknar effekterna i marken vad gäller surhet och baskatjoninnehåll de effekter som hyggesrester skulle ha givit. Inga anmärkningsvärt höga halter av zink och kadmium har heller uppmätts. Askåterföring kan alltså vara ett sätt att kompensera för uttag av avverkningsrester.

Det måste påpekas att trots att vi räknar med ett 100 %-igt uttag av GROT i denna studie blir de verkliga utbytena lägre eftersom de små delarna av grenarna är svåra att samla in. I försök beskrivna i Egnell m fl [9] blev mer än 30 % av avverkningsresterna kvar. Dessa delar innehåller höga halter av näringsämnen som alltså kommer marken till godo trots GROT-uttaget. Detta bekräftas av Egnell m fl [28] som anger att vid ett GROT-uttag med dagens teknik blir 30 % av grenar och toppar och 70 % av barren kvar på hygget.

Enligt Leijon m fl [10] har försök i granskog där 2-3 gallringar gjorts under 30 år visat på produktionsförluster motsvarande 2-4 normala tillväxtår. Motsvarande försök i tallskog gav både vinster och förluster i tillväxt. Resultaten från gallringsförsöken kan enligt Leijon m fl [10] översättas procentuellt till en hel rotationstid. För en generationstid på 90 år kan produktionsbortfallet alltså bli 6-12 normala tillväxtår. I fattig tallskog där ett område för 70 år sedan belades med mångdubbla givor av avverkningsrester och andra områden rensades helt kunde ingen mätbar skillnad produktionsförmåga upptäckas. Resultaten i Leijon m fl [10] inger inga farhågor för långsiktigt försämrade produktionsförmåga. Om det finns negativa effekter är de i så fall endast additiva och inte accelererande effekter. Enligt Egnell m fl [28] så kan en marginell och temporär minskad produktion uppstå vid GROT-uttag motsvarande 2-4 år på en rotationsperiod. Produktionsminskningen är dock inte större än att den helt

eller delvis kan kompenseras med högre plantöverlevnad tillsammans med mer självföryngring och eventuell näringskompensation. Om barren lämnas jämnt utspridda vid GROT-uttaget verkar tillväxtförlusten utebli helt [28].

Egnell m fl [9] visar att i flera fall blir både plantöverlevnad och tillväxt bättre den första 10-årsperioden efter ett uttag av GROT. Enligt Egnell m fl [28] kan askåterföring leda till en antingen ökad eller minskad skogsproduktion beroende på bördigheten (C/N-kvoten). Informationsunderlaget är dock för bristfälligt för att förändringen ska kunna kvantifieras på ett tillfredsställande sätt.

I de nordiska försök som nämns i Jacobsson [26] har parallella försök med kompensationsgödsling inte drabbats av tillväxtminskning. I norra Sverige kan kvävegödsling bli aktuellt för att hålla den långsiktiga produktionsförmågan, eftersom depositionen av kväve i dessa delar av landet är låg. I södra Sverige är deposition tillräcklig för att kompensera för de förluster som uttag av GROT medför. Enligt Klemedtsson m fl [20] kommer GROT-uttag inte nämnvärt att påverka NPP (Nettoprimärproduktionen) förutsatt att man genomför åtgärder för att kompensera för ökad borttransport av näringsämnen.

Tabell 11. Skogens produktionsförmåga efter uttag av GROT och andra avverkningsrester

Undersökning	Effekt	Referens
20 år, helträdsuttag (stam, GROT med barr) jämfört med uttag av stam och GROT utan barr samt uttag av bara stamved	Ingen tydlig effekt	9
Granskog 2-3 gallringar på 30 år. Flera kontrolltytor med och utan uttag av GROT.	Förluster på 2-4 år normalårstillväxt	10
Tallskog 2-3 gallringar på 30 år. Flera kontrolltytor med och utan uttag av GROT.	Både vinster och förluster	10
Fattig tallmark 70 år ett område med flerdubbla givor ris jämfört med ett utan givor.	Ingen signifikant skillnad	10
15 år försök hela Norden, utan kompensationsgödsling. Flera kontrolltytor med och utan uttag av GROT.	4-6 % minskning	26
15 år försök hela Norden, med kompensationsgödsling. Flera kontrolltytor med och utan uttag av GROT.	Ingen minskning	26
Andra fältstudier, 10-20 år. Flera kontrolltytor med och utan uttag av GROT.	Ingen minskad tillväxt	26

Ett "high case scenario" skulle vara från Leijon m fl [10] där så mycket som 10 % av tillväxten kan ha försvunnit efter ett uttag av GROT. Efter en generation skulle detta innebära ett extra utsläpp på 9,8 kg CO₂-C/MWh_{bränsle} eftersom 10 % av tillväxten fallit bort. Det råder dock väldigt stor osäkerhet om detta försök kan överföras på en hel rotationstid (studien endast 30 år). Andra försök på nästan en hel generation (70 år) har inte visat på några signifikanta skillnader i tillväxt [10]. I försök har vissa ståndorter reagerat med förbättrat föryngringsresultat efter uttag av GROT [9, 28]. Ett

“low case scenario” skulle därmed innebära ett upptag av koldioxid. Flera hävdar att man med rätt åtgärder kan kompensera för den bortförel av näring som GROT-uttaget medför [20, 26]. Det råder brist på kunskaper om och i så fall hur produktivitetseffekter drabbar efterföljande generationer.

3.5.2 Askåterföring

Ett flertal studier visar att återföring av lös aska ger en större kolomsättning i ytliga marklager [28]. Väldigt få studier har kunnat kvantifiera vilka koldioxidemissioner detta skulle kunna medföra, men studier över haltförändringar tyder på att ca 25 % av humusmängden kan förloras som koldioxid emission [28]. Mängden kol i humuslagret är enligt Egnell m fl [28] i samma storleksordning som uttaget av GROT vid avverkning d v s ca 20-40 ton C/ha i södra Sverige. Ett GROT-uttag kombinerat med återföring av lös aska skulle därför kunna medföra en ökad nettoemission av koldioxid. Om hela den koldioxid som frigörs vid askåterföringen tillskrivs GROT-uttaget så skulle det motsvara 25 % av kolinnehållet i GROT-uttaget eller 25 kg CO₂-C/MWh. Effekten är troligen störst för den första generationen. Återföring av *granulerad* aska verkar dock inte påverka humushalten eller mängden kol i ytliga marklager [28]. En återföring av denna typ av aska skulle därmed inte medföra några koldioxidemissioner från markens humuslager. Undantag kan vara fuktiga och blöta fastmarker och dikade torrmarker där risken för nedbrytning av organiskt material är större vid askåterföring [28].

3.5.3 Komposteffekt av kvarlämnad GROT

Som nämnts tidigare [28] kan man i kväverika marker få en s k “komposteffekt” av kvarlämnade hyggesrester. Nedbrytningsprocessen av hyggesresterna aktiverar och påskyndar nedbrytningen av annat organiskt material i förna och humus. Detta resulterar i att markens totala kolpool inte byggs på i samma omfattning eller att poolen t o m minskar jämfört med i mindre kväverika marker. I kväverika marker kan ett GROT-uttags effekt på kolpoolen bli mycket mindre eller kanske t o m positiv eftersom “komposteffekten” undviks. “Komposteffekten” är svår att kvantifiera och är aktuell endast i vissa marker.

3.5.4 Ändrade markberedningsmetoder

Vid markberedning ökar omsättningen och nedbrytningen av organiskt material i marken [12]. Om marken inte bereds finns risk för dålig föryngring av skogen och därmed dålig biomassaproduktion. Hur stor minskningen av organiskt material blir beror av intensiteten vid markberedningen. Plöjning medför större förluster av markbundet kol än mildare markberedning som exempelvis högläggning. Det kan förekomma skillnader när det gäller markberedning mellan de två scenarierna vi har studerat. Ett exempel på detta är att marken ofta går att markbereda tidigare (vanligtvis ett år) efter avverkning när grenar och toppar avlägsnats [32]. Markberedningen blir vanligtvis bättre efter ett GROT-uttag. Nettoemissionerna från GROT-uttag kan alltså påverkas. Vi har dock inte funnit underlag som möjliggör en

uppskattning av denna påverkan, men. med största sannolikhet är en eventuell effekt relativt liten [32].

3.5.5 Markkompaktering

Tillväxten kan påverkas negativt av ökad markkompaktering [28]. Kompakteringen ökar troligtvis vid uttag av GROT eftersom insamling innebär ytterligare körningar i beståndet. Avverkningsresterna kan i GROT-fallet inte heller användas som underlag på körvägarna, vilket är ett sätt att minska kompakteringen vid vanlig stamskörd. Kompakteringen vid GROT-uttag borde kunna minimeras genom att begränsa körningarna i beståndet eller göra större delen av uttagen när marken är tjälad [28].

3.5.6 Förhindrande av skogsbränder

Vid skogsbränder reduceras mängden organiskt material i marken till viss del [20]. Minskningen av antalet skogsbränder är en av anledningarna till den ökning av markens kollager som sker i Sverige idag [27]. Även Eriksson [12] anger förhindrandet av skogsbränder det senaste århundradet som en anledning till en möjlig uppbyggnad av markens kollager. GROT-uttag skulle kunna innebära förändrade förutsättningar både vad gäller risken för brand samt omfattningen av branden, vilket i sin tur skulle påverka nettoemissionerna av koldioxid. Vi har inte funnit underlag som möjliggör en uppskattning av denna effekt.

3.5.7 Slutsatser av indirekta effekter

På grund av osäkerheter i dataunderlaget är det svårt att kvantifiera de indirekta effekternas storlek och i vissa fall även deras tecken. Vi har därför valt att inte ta med dessa effekter i våra uppskattningar av GROT-uttagets nettoemissioner.

I vår fortsatta analys förutsätter vi således att man genomför åtgärder som medför en oförändrad produktionsförmåga (t ex avbarrning och kompensationsgödsling), att askåterföring och kvarlämnade av hyggesrester inte leder till en ökad koldioxidemission från markens humuslager och att det inte föreligger någon skillnad mellan de två scenarierna när det gäller risk för skogsbrand samt behov av markberedning.

3.6 Totala nettoemissioner

Totala nettoemissioner (fossila och biogena) är sammanställda för 10 generationer i tabell 12. Ekvation (4) (där de indirekta effekterna har uppskattats till noll) har använts för att beräkna nettoemissioner, E_{net} , enligt:

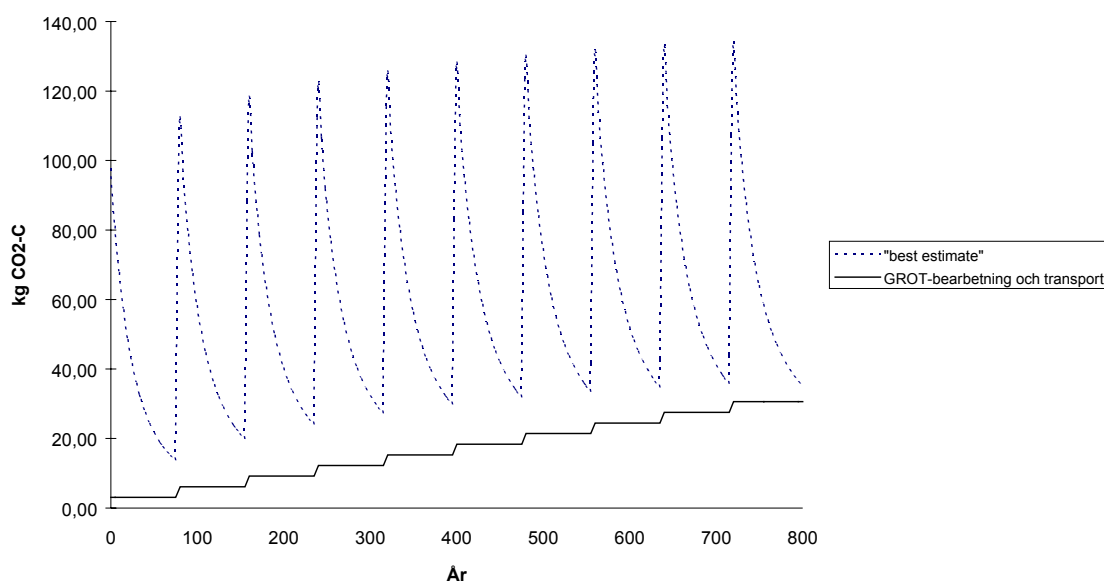
$$E_{\text{net}} = E_{\text{net, fossil}} + E_{\text{net, bio}} \quad (4)$$

De fossila emissionerna ($E_{\text{net, fossil}}$) är hämtade från avsnitt 3.1 och de biogena nettoemissionerna ($E_{\text{net, bio}}$) är hämtade från tabell 10.

Tabell 12. Totala nettoemissioner från 10 generationer med GROT-uttag under 800 år.

Ackumulerade utsläpp i:	1 generation, 80 år kg CO ₂ -C/MWh _{bränsle}	5 generationer, 400 år kg CO ₂ -C/MWh _{bränsle}	10 generationer, 800 år kg CO ₂ -C/MWh _{bränsle}
Biogena nettoemissioner	12,7 (0 - 28,6)	5,7 (0 - 17,9)	3,5 (0 -14,9)
Emissioner från fossila bränslen (Prod. och trp)	3,06	3,06	3,06
Totala nettoemissioner	15,8 (3,1 - 31,6)	8,8 (3,1 - 21,0)	6,6 (3,1 - 18,0)

Efter en generation uppgår emissionerna från de fossila bränslena bara till ca 20 % av de totala nettoemissionerna (räknat på "best estimate"). Efter 10 generationer har de fossila bränslenas bidrag till de totala nettoemissionerna ökat till ca 45 % (räknat på "best estimate"). På samma sätt har betydelsen av de biogena nettoemissionerna minskat med tiden. Detta åskådliggörs av figur 4 där "best estimate" av biogena nettoemissioner jämförs med emissionerna från fossila bränslen (i figuren ger varje generation 1 MWh).



Figur 4. Emissioner från fossila bränslen och biogena nettoemissioner ("best estimate") under 10 generationer. Varje generation ger 1 MWh.

4. Slutsatser och diskussion

Våra resultat visar att över en omloppstid (80 år) är nettotillskottet av CO₂ till atmosfären 15,8 kg CO₂-C/MWh (3,1 - 31,6 kg CO₂-C/MWh), vilket motsvarar 16 % av det totala kolinnehållet i träbränslet (3 % - 32 %). Av detta utgör förbrukning av fossilbränsle 3,1 kg CO₂-C/MWh.

I syfte att uppskatta nettoemissioner över flera omloppstider har vi utgått från tidigare referenser som anger nedbrytning från 0 - 300 år och extrapolerat deras utveckling över 5 omloppstider (400 år) samt över 10 omloppstider (800 år). Den råder stor osäkerhet i den långsiktiga utvecklingen och vi har även här gjort uppskattningarna för ett värsta fall, ett bästa fall och ett "best estimate". Resultaten visar att valet av tidsperiod över vilken analysen görs har stor betydelse för nettoemissionerna av CO₂.

Över fem omloppstider är nettotillskottet av CO₂ till atmosfären 8,8 kg CO₂-C/MWh (3,1 - 21,0 kg CO₂-C/MWh), vilket motsvarar 9 % av det totala kolinnehållet i träbränslet (3 % - 21 %). Av detta utgör förbrukning av fossilbränsle 3,1 kg CO₂-C/MWh, d v s detsamma som över en omloppstid. Över tio omloppstider är nettotillskottet av CO₂ till atmosfären 6,6 kg CO₂-C/MWh (3,1 - 18,0 kg CO₂-C/MWh), vilket motsvarar 7 % av det totala kolinnehållet i träbränslet (3 % - 18 %). Av detta utgör förbrukning av fossilbränsle 3,1 kg CO₂-C/MWh, d v s detsamma som över en omloppstid.

GROT-uttag kan indirekt leda till emissioner eller upptag av koldioxid, exempelvis genom förändringar i produktionsförhållanden, förändrad omsättning av kol i humuslagret p g a askåterföring eller en reduktion av koldioxidemissioner p g a reduktionen av skogsbränder. På grund av osäkerheter i dataunderlaget är det svårt att kvantifiera dessa effekters storlek och i vissa fall även deras tecken. Vi har därför valt att inte medräkna de indirekta effekterna i våra uppskattningar av GROT-uttagets nettoemissioner utan för en mer kvalitativ diskussion kring dem.

I litteraturen diskuteras om GROT-uttag kan påverka produktionen av skogsbiomassa på ett negativt eller positivt sätt, vilket i så fall kan tolkas som en indirekt CO₂-emission eller upptag. Av de referenser som vi tillgått visar flertalet på en oförändrad eller marginellt minskad skogsproduktion p g a GROT-uttag. En referens visar på en produktionsförsämring på motsvarande ca 10 % om inte bortfallet av näringsämnen kompenseras för. Det skulle i så fall innebära en nettoemission på ca 10 kg CO₂-C/MWh. I försök har vissa ståndorter reagerat med förbättrat föryngringsresultat efter uttag av GROT. En viktig faktor för att begränsa eller förhindra produktionsförsämringen är att lämna barren jämnt utspridda på hygget vid GROT-uttag.

Ett flertal studier visar att askåterföring som den utförs idag ger en större kolomsättning i ytliga marklager. Väldigt få studier har kvantifierat vilka koldioxidemissioner som detta skulle kunna medföra, men studier över haltförändringar tyder på att ca 25 % av humusmängden möjligen kan förloras som en indirekt koldioxidemission. Om hela den koldioxidemissionen skulle tillskrivas GROT-uttaget, skulle det motsvara ca 25 kg CO₂-C/MWh, eller 25 % av kolinnehållet i GROT-uttaget. Effekten är troligen störst för den första generationen. En studie visar dock att återföring av *granulerad* aska inte verkar påverka humushalten eller mängden kol i ytliga marklager och skulle därför inte medföra någon extra koldioxidemission. GROT-uttag skulle även kunna innebära förändrade förutsättningar både vad gäller risken för brand samt omfattningen av bränder, vilket i sin tur skulle kunna påverka nettoemissionerna av koldioxid på ett indirekt sätt.

Att GROT-uttagets biogena andel ($E_{net,bio}$) leder till en nettoemission av koldioxid, trots att det kolet tidigare har tagits upp från atmosfären, kan tyckas förvånande. Förklaringen ligger i att GROT-uttaget systematiskt tidigare lägger emissioner genom förbränning som annars hade skett senare i tiden genom förmultning. Ett kvarlämnande av hyggesrester kan innebära att en kolpool successivt byggs upp i marken. GROT-uttaget medför alltså att denna eventuella uppbyggnad av en kolpool uteblir.

För referensfallets eventuella uppbyggnad av kolpool blir tillväxttakten (i kg/år) hög till en början, men lägre ju större kolpoolen blir. Detta beror på att nedbrytningstakten (i kg/år) ökar ju större poolen blir, under det att tillförseln av organiskt material i vårt scenario är konstant. Ofta beskriver man nedbrytningen av hyggesresterna till att vara proportionell mot den totala mängden material i kolpoolen. Under sådana förutsättningar nås slutligen en jämvikt där det tillförda materialet är lika stort som nedbrytningen. Då växer inte poolen längre utan har uppnått en steady-state nivå.

5. Definitioner

Stamavverkning = stam kapas, och omhändertas: Grenar, toppar, stubbe och rotsystem lämnas kvar.

Helträdsutnyttjande = avverkning där förutom stam även grenar, toppar, barr och ibland även stubbe samlas ihop och omhändertas.

Fullträdsutnyttjande = se helträdsutnyttjande

GROT = grenar och toppar med eller utan barr. Får grenar och toppar ligga kvar på hygget ett tag kan en stor del av barren falla av. Kan vara både från gallring och slutavverkning. I rester från gallring kan även viss stamved ingå.

Hyggesrester = se GROT

Ris = se GROT

Avverkningsrester = se GROT

Ristäkt = GROT-uttag

NPP (Nettoprimärproduktionen) = den del av den totalt genom fotosyntes fixerade koldioxiden som bygger upp biomassan (dvs det som inte respireras bort av primärproducenterna).

CO₂-C. = anger kolinnehållet i koldioxid. Av 1 kg CO₂ utgörs ca 0,27 kg av kol.

Rotationsperiod = tiden för en generation att växa färdigt dvs tiden mellan två avverkningar. I rapporten har rotationstiden satts till 80 år.

m³sk = kubikmeter stamved (grenar, rot eller stubbeingår inte)

6. Referenser

1. Zetterberg, L, Klemedtsson, L, "The contribution to the Greenhouse Effect from the Use of Peat and Coal for Energy", IVL-rapport B1237, juni 1996.

2. Zetterberg, L, "A Method For Assessing the Expected Climatic Effects from Emission Scenarios Using the Quantity Radiative Forcing", IVL-rapport B1111, augusti 1993.
3. Cooper, D, Zetterberg, L, "svensk skogsindustris emissioner och upptag av växthusgaser", IVL-rapport B1130, februari 1994.
4. Schlamadinger, B, *m fl.* "Carbon Balance of Bioenergy from Logging Residues", *Biomass and Bioenergy*, 8(4): 221-234, 1995.
5. Brunberg, B, Hillring, B. "Skogsbränsleuttag idag och imorgon", *Kungl. Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift*, 135(13): 11-24, 1996.
6. Olsson, Mats. "Långsiktiga näringsbalanser vid uttag av skogsbränsle", *Kungl. Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift*, 135(13): 37-44, 1996.
7. Olsson, Bengt A. "Näringsekoologiska effekter av helträdsutnyttjande", *Kungl. Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift*, 135(13): 45-51, 1996.
8. Lundqvist, H. "Markbiologi - effekter av skogsbränsle uttag och askåterföring", *Kungl. Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift*, 135(13): 61-68, 1996.
9. Egnell, G, Leijon, B. "Kortsiktiga effekter på skogsproduktion av helträdsuttag i gallring och slutavverkning", *Kungl. Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift*, 135(13): 73-82, 1996.
10. Leijon, B, Egnell, G. "Långsiktiga effekter på skogsproduktion av stora uttag av avverkningsrester", *Kungl. Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift*, 135(13): 83-89, 1996.
11. Vattenfall. "Livscykelanalys för Vattenfalls elproduktion - Sammanfattande rapport", Vattenfall, 1996.
12. Eriksson, H. "Sources and Sinks of Carbon Dioxide in Sweden", *Ambio*, 20: 146-150, 1991.
13. Anon "Åtgärder mot klimatförändringar", Naturvårdsverket, Rapport 4120, 1992.
14. Nordin, A. "Chemical Elemental Characteristics of Biomass Fuels", *Biomass and Bioenergy*, 6(5): 339-347, 1994.
15. Börjesson, P., *m fl.* "Future Production and Utilisation of Biomass in Sweden: Potentials and CO₂ Mitigation", Lunds Universitet, 1997.
16. Savolainen, I, *m fl.* "Greenhouse Impacts of the Use of Peat and Wood for Energy", VTT Research Notes 1559, Finland, 1994.

17. Marland, G, Schlamadinger, B. "Biomass Fuels and Forest-Management Strategies: How do We Calculate the Greenhouse-Gas Emissions Benefits?", *Energy*, 20(11): 1134-1140, 1995.
18. Levander, T. "The Importance of Greenhouse Gases other than Carbon Dioxide and other Possible Differences between Various Fuels", Statens energiverk 1989:R19, 1989.
19. SOU 1992:76 Bilaga II.
20. Klemedtsson, L, m fl. "Biogena emissioner av växthusgaser (CO₂, N₂O och CH₄) vid produktion av biobränsle i olika system", Vattenfall, 1993.
21. Hektor, B, m fl. "Trädbränslepotential i Sverige på 2000-talet - Ett uppdrag för Energikommissionen", SIMS-utredning 17, SLU, 1995.
22. Anon. "Skogsstatistisk årsbok 1995", Skogsstyrelsen, 1995.
23. Gustavsson, L, m fl. "Reducing CO₂ Emissions by Substituting Biomass for Fossil Fuels", *Energy*, 20(11): 1097-1113, 1995.
24. Börjesson, P, Gustavsson, L. "Regional Produktion and Utilization of Biomass in Sweden", *Energy*, 21(9): 747-764, 1996.
25. Anon, "Bioenergy and the Greenhouse Effect", Nutek B1991:1.
26. Jacobson, S. "Askåterföring och kompensationsgödsling efter helträdsavverkning - effekt på trädens stamtillväxt", Kungl. *Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift*, 135(13): 91-102, 1996.
27. Anon. "Kol i marken - konsekvenser av markanvändning i skogs- och jordbruk", Rapport 4782, Naturvårdsverket, 1997.
28. Egnell, G, Nohrstedt, H-Ö, Weslien, J, Westling, O, Örlander, G. "Miljökonsekvensbeskrivning (MKB) av skogsbränsleuttag, asktillförsel och övrig näringskompensation" Skogsstyrelsen, rapport XX, mars, 1998.
29. Eriksson, H, Hallsby, G. "Biomass fuels - Effects on the carbon dioxide budget", Nutek R1992:10, 1992.
30. Ågren, G. "Kolbalans beräkningar för bränsleuttag i skogsbruk". Rapport från Vattenfall Utveckling AB, Projekt Bioenergi, Nr 39, 14 s, 1990.
31. Bengtsson, J, Wikström, F. "Effects on whole-tree harvest on the amount of soil carbon: model results", *New Zealand Journal of Forestry Science*, 23: 380-389, 1993.
32. Eriksson, H. SLU, muntlig referens, 1998.

33. Anon. "Virkesbalanser 1992", Meddelande 2-1993, Skogsstyrelsen, Jönköping, 1993.