

# Skogsbränslecykelns näringsbalans

Bengt Olsson & Olle Westling

B1669  
Februari 2006

<b>Organisationer</b> SLU, Institutionen för ekologi och miljövärd IVL Svenska Miljöinstitutet AB	<b>Rapportsammanfattning</b>
<b>Adress</b> <sup>1</sup> SLU Box 7072 750 07 Uppsala  <sup>2</sup> IVL Box 5302 400 14 Göteborg	<b>Projekttitel</b> Nationella strategier inom ASTA-programmet
<b>Telefonnr</b> 031-725 62 00	<b>Anslagsgivare för projektet</b> Energimyndigheten
<b>Rapportförfattare</b> Bengt Olsson <sup>1</sup> & Olle Westling <sup>2</sup>	
<b>Rapporttitel och undertitel</b> Skogsbränslecykelns näringsbalans	
<b>Sammanfattning</b> Spridning av stabiliserade trädbränsleaskor till skogsmark skall långsiktigt kompensera för näringsförlusterna vid skogsbränsleuttag, i synnerhet för uttaget av grenar och toppar (GROT). Denna studie har analyserat näringsflödena i hela skogsbränslekedjan och har på en principiell nivå beräknat massbalansen mellan näringsförlusterna (skördeuttaget) och näringsmängderna i användbara askor från CFB-pannor för att undersöka om näringskompensation med aska kan ske i stor skala. Förväntade näringsflöden från skog och genom CFB-pannor till flygaskor beräknades med hjälp av näringsanalyser av olika skogsbestånd och med kännedom om förluster i CFB-pannor. Den beräknade askans sammansättning jämfördes med kända CFB-flygaskor. Datamaterialet har hämtats från publicerade och andra tillgängliga källor. Näringshalter för enskilda träddelar har räknats om till medelvärden för GROT respektive stammar. En syntes av skogsbränsleuttagets effekter på omsättningen av baskatjoner presenteras för två försök med GROT-uttag (Kosta och Granhult) i form av balanserade näringsbudgetar.	
<b>Nyckelord samt ev. anknytning till geografiskt område eller näringsgren</b> Skogsbränsle, GROT, näringsämnen, aska, askåterföring, skogsmark, baskatjonbalans, fosfor	
<b>Bibliografiska uppgifter</b> IVL Rapport B1669	
<b>Rapporten beställs via</b> Hemsida: <a href="http://www.ivl.se">www.ivl.se</a> , e-post: <a href="mailto:publicationservice@ivl.se">publicationservice@ivl.se</a> , fax 08-598 563 90, eller via IVL, Box 21060, 100 31 Stockholm	

.Rapporten godkänd  
2006-02-21



Peringe Grennfelt  
Forskningschef

## Sammanfattning

Spridning av stabiliserade trädbränsleaskor till skogsmark skall långsiktigt kompensera för näringsförlusterna vid skogsbränsleuttag, i synnerhet för uttaget av grenar och toppar (GROT). Denna studie som har utförts av SLU och IVL har analyserat näringsflödena i hela skogsbränslekedjan och har på en principiell nivå beräknat massbalansen mellan näringsförlusterna (skördeuttaget) och näringsmängderna i användbara askor från CFB-pannor för att undersöka om näringskompensation med aska kan ske i stor skala. Förväntade näringsflöden från skog och genom CFB-pannor till flygaskor beräknades med hjälp av näringsanalyser av olika skogsbestånd och med kännedom om förluster i CFB-pannor. Den beräknade askans sammansättning jämfördes med kända CFB-flygaskor. Datamaterialet har hämtats från publicerade och andra tillgängliga källor. Näringshalter för enskilda träddelar har räknats om till medelvärden för GROT respektive stammar. En syntes av skogsbränsleuttagets effekter på omsättningen av baskatjoner presenteras för två försök med GROT-uttag (Kosta och Granhult) i form av balanserade näringsbudgetar. Viktiga slutsatser är:

- I det fall då enbart flygaska från CFB-pannor används räcker inte askan till för kompensation av näringsförlusterna från GROT-uttag (bottenaskor från CFB-pannor sprids ej till skogsmark). Vid sidan av GROT måste lika mycket stamråvara (hälften ved, hälften bark) tillföras för att åstadkomma de kvantiteter aska som krävs för att kompensera för enbart GROT-uttaget. Fullständig kompensation av både stam och GROT-uttag nås ej helt med 75% andel stamråvara. Den lägsta nivån av kompensation gäller för kalium.
- Kända CFB-flygaskors näringsammansättning motsvarar inte den i skördad GROT och annan skördad biomassa. Den högre kvoten mellan kalcium och fosfor i askor kan bara delvis förklaras med bränsmixen (hög andel bark eller stamved). Förluster av fosfor på hygget eller under transport och lagring av bränsle och dåligt kända föroreningar eller tillsatser av kalk är troliga orsaker. I mindre grad förloras även kalium i kedjan från hygge och under transport och lagring av bränslat.
- Den rekommenderade maximala dosen aska (3 ton per ha) överkompenserar i regel för alkalinitet men underkompenserar ofta för kalium och fosfor. Stor risk föreligger att schablonvärden på askåterföring ger ett oönskat resultat, i synnerhet om motivet är att kompensera för specifika näringsämnen.
- Kompensationsbehovet kan differentieras till två nivåer (GROT respektive GROT och stam) samt till fyra mål: (1) förbättra trädens näringsstatus och tillväxt, (2) öka skogsmarkens basmättnad och förråd av näringsämnen (3) förbättra alkaliniteten i avrinnande vatten för att motverka försurning av ytvatten och (4) som komplement till kvävegödsling.
- Alkalinitetsökning i mark och vatten är det kompensationsmål som lättast kan åtgärdas med askåterföring på grund av det relativt höga innehållet av kalcium och magnesium i askor.
- Kompensation för kalium som näringsämne är svårt på grund av kaliums mobilitet i askor och rörlighet i ekosystem. Kalium i GROT och askor visar stor tendens att lakas ut och förloras. Strategier för god hushållning med kalium i skogsekosystem måste omfatta fler aspekter, framför allt utformning av hyggen, tidpunkt för askåterföring, samt hantering av GROT och askor.
- Fosforkompensation genom askåterföring har dålig effekt på grund av fosfors bindning i svårlosta mineral och låga fosforhalter i askor. På kort sikt är askor därför ett dåligt medel att höja fosfortillgängligheten, men fosfor i askor torde dock ha långsiktigt positiva effekter. Det är viktigt att fastställa vilka fosforförluster som faktiskt sker på hygget, och att fastställa om fosforsituationen långsiktigt försämras genom skogsbränslecykeln.
- En förbättrad nationell statistikproduktion över GROT-uttag och askproduktion från skogsbränslen är viktig för att fortlöpande uppskatta näringsströmmar i skogsbränslecykeln.

## Summary

In Sweden, recycling of stabilised wood-ashes to forests is considered to compensate for nutrient removals from whole-tree harvesting (i.e. use of harvest residues – slash – for energy purposes). This study has analysed nutrient fluxes through the complete forest energy cycle and estimated mass balances of nutrients in harvested biomass with those in ashes, to investigate the realism in large-scale nutrient compensation with wood-ash. Expected nutrient fluxes from forests through energy plants were calculated based on nutrient and biomass data of forest stands in the Nordic countries, and from data on nutrient fluxes through CFB-plants. The expected stoichiometric composition of wood-ashes was compared with the composition of CFB-fly ashes from various Swedish energy plants. Nutrient contents for different tree fractions were calculated to express the average nutrient concentrations in slash and stems with bark, respectively. A nutrient budget synthesis of the effects of whole-tree harvesting on base cation turnover in the following stand was presented for two experimental sites. Major conclusions from the study are:

- In the CFB-scenario, where the bottom ash is deposited and only the fly ash can be applied to forests, the fly ash from the slash do not meet the demands for nutrient compensation for slash harvesting. Stem material (50% wood, 50% bark) must be added at equivalent amounts, as the slash to produce the amounts of fly ash needed for compensation of slash harvesting. In the scenario where more stem material was added (75% of total fuel load), the amounts of fly ashes produced hardly compensated for nutrient removals with both stem and slash harvesting. The level of nutrient compensation was lowest for potassium.
- The stoichiometric nutrient composition of CFB-fly ashes from Swedish energy plants is not similar with the nutrient composition of tree biomass. The higher Ca/P ratio in ashes is only partly explained by the mixture of fuels (e.g. increasing bark or wood in fuel mixture). Losses of P at harvesting, fuel storage or transportation, and contamination (soil) or additions of lime are possible causes. To a less extent, also K losses seem to occur in the process.
- On average, the recommended highest dose of ash to forest (3000 kg d.w./ha) over-compensate for alkalinity but under-compensate for K and P. There is thus a risk that standard values of ash doses will not result in the target compensation, in particular if the aim is to compensate for specific elements.
- The nutrient compensation needs can be defined to two levels (compensate for slash, or for slash and stem harvesting, respectively), and to four aims: (1) improve forest tree nutrient status and growth, (2) increase base saturation of forest soils and increase soil nutrient pools, (3) increase alkalinity in run-off water to counteract acidification of surface waters, and (4) as a complement to nitrogen fertilisation. Increasing the alkalinity of soils and soil water is the aim that can be most easily reached by ash application, due to the relatively high Ca and Mg-contents in ashes. Compensation of ash for K losses is complicated by the high mobility of K ion in ecosystems and because its high solubility even in stabilised ashes. K in logging residues and ashes tend to be leached out and lost. Management for maintaining high availability of K in forest ecosystems should include several aspects, in particular the design of clear-fellings, timing of ash recycling and handling of slash and ashes.
- Compensation for P by application of stabilised wood-ashes is normally inefficient in the short time perspective, due to low P content in ashes and the bonding of P into poorly soluble apatit. However, in the long run P in ashes may improve forest P nutrition. New research is needed to estimate P-fluxes associated with harvesting, storage and transport of forest biomass in realistic situations, and to evaluate if P availability will be deteriorated in the long run.
- An improved national statistics is needed, including the extent of slash harvesting and the amounts of ashes produced from forest biomass, to keep up running estimates of nutrient fluxes through the forest energy cycle.

## Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	1
Summary .....	2
1 Introduktion.....	1
1.1 En nationell massbalans.....	2
1.2 Syfte och avgränsning med studien.....	3
1.3 Näringsflöden i skogsbränslecykeln.....	4
1.4 Externa tillflöden av näringsämnen .....	6
1.5 Näringsflöden via användning av stammar .....	6
2 Material och metod .....	8
2.1 Datamaterial.....	8
2.2 Näringshalter i askor .....	9
2.3 Näringsämnen från skog till aska .....	9
2.3.1 Bränsleblandningar.....	9
2.3.2 Förbränning i CFB-panna .....	10
2.3.3 Stökiometriska relationer.....	13
2.3.4 Vad betyder 3 ton aska per hektar?.....	14
2.3.5 Långsiktiga effekter av GROT-uttag.....	14
3 Resultat och diskussion .....	15
3.1 Beräknade näringsflöden och askkvaliteter .....	15
3.2 Effekten av 3 ton aska per hektar .....	17
3.3 Askdoser för näringskompensation på olika lokaler .....	18
3.4 Kompensera mot försurning .....	22
3.5 Kaliumkompensation .....	23
3.6 Fosforkompensation .....	24
4 Avslutande diskussion .....	25
5 Slutsatser .....	26
6 Referenser.....	27

# 1 Introduktion

I Sverige sker en målmedveten satsning på att utnyttja skogsråvara för energiändamål. Avverkningsrester (GROT) från slutavverkning och gallring är en ökande och betydande del av de olika trädbränslen som används. Eftersom näringshalter i barr och grenar är betydligt högre än i stammen innebär GROT-uttag vid slutavverkning (motsvarande helträdsutnyttjande) att näringsförlusterna genom skörd av biomassa ökar 2–4 gånger jämfört med enbart stamskörd. Resultat från långsiktiga fältförsök med helträdsuttag har visat att GROT-uttaget bland annat leder till ökad markförsurning genom förluster av baskatjoner, och kan ge en minskad trädutväxt, i synnerhet för gran (Olsson et al 1996, Egnell et al. 1998, Egnell & Leijon 1999).

Genom att vedaskan som produceras vid förbränningen av GROT kan återföras skogsmarken kan skörderelaterade nettoförluster av näringsämnen från skogsekosystemen förhindras. Därmed skapas ett kretslopp av näringsämnen som kan kallas skogsbränslecykelns kretslopp. Kväve är dock ett undantag, eftersom det försvinner i rökgaserna vid en fullständig förbränning.

Askåterföring till skogsmarken är tänkt att långsiktigt kompensera för näringsförlusterna vid skogsbränsleuttag (Anon. 2001). En viktig följdfråga är om det finns en tillräckligt god massbalans mellan näringsförlusterna (skördeuttaget) och näringsmängderna i de askor som produceras för att näringskompensation med aska skall kunna ske i stor skala. Eftersom skogsbränslecykelns kretslopp inte är slutet är det möjligt att både substantiella förluster och tillflöden av kemiska element kan ske, och massbalansen kan därför vara antingen positiv eller negativ. Massbalansen mellan näringsförlust och näringsmängder i askor bestäms delvis av tekniska förluster på vägen mellan skog och användbar askdepå (Bjurström 2004). Kvalitetskrav avseende takvärden för tungmetaller och miniumhalter av näringsämnen innebär också en begränsning av mängden askor som bör spridas till skogsmark (Anon. 2001).

En nyckelfråga för bedömningen av massbalansen mellan näringsmängderna i skördad biomassa och askor är hur kompensationsbehovet bedöms. Skogsstyrelsen (Anon. 2001) anger att kompensation bör ske efter GROT-uttag, och kan även ske för stamvedsuttag, som en separat åtgärd eller i samband med kompensation för GROT-uttag. Kompensation för stamvedsuttaget anses vara angelägen i starkt försurade områden i södra Sverige. Skogsstyrelsens schablonvärden för rekommenderade askdosor är 1–2 ton TS/ha för gran, 0,7–1,5 ton TS/ha för tall respektive 1–2 ton TS/ha och omloppstid för björk. Den högsta rekommenderade dosen är 3 ton TS/ha och omloppstid. Askdosen kan också bedömas med ledning av uttagets storlek, trädslagsblandning och den tillförda askans näringsinnehåll (näringsbalansmetoden).

En bedömning av kompensationsbehovet och efterfrågan på aska måste även diskutera om det verkligen är nödvändigt att kompensera för näringsförlusterna vid GROT-uttag i alla lägen. Om det uppstår en brist på lämpliga askor för näringskompensation bör spridningen begränsas till prioriterade områden eller ståndorter. Kriterier för bedömning av näringskompensation bör inte bara gälla skogsmarkens långsiktiga produktionsförmåga och trädens behov, utan även behovet att behålla eller öka alkaliniteten i ytvatten. Det nationella miljö kvalitetsmålet *Bara naturlig försurning* (Anon. 2003) kan därför ha stor betydelse för att bedöma behovet av askåterföring.

Ovanstående frågeställningar ledde till att en studie initierades av SLU, Institutionen för ekologi och miljövärd och IVL Svenska Miljöinstitutet. Denna redovisning utgör slutrapportering av ett tillägg inom ASTAs (International and national Abatement Strategies for Transboundary Air Pollution, se <http://asta.ivl.se>) nationella program med stöd av Energimyndigheten (projekt 12304-2).

## 1.1 En nationell massbalans

En överslagsberäkning av den nationella massbalansen mellan näringsuttag i GROT och näringsmängden i trädbränsleaskor kan tjäna till att närmare beskriva huvuddragen och några av problemen med skogsbränslecykelns näringsbalans (Tabell 1). Idag produceras ungefär 1 miljon ton askor per år i Sverige. Ungefär hälften är askor från avfallsförbränning (447 000 ton), omkring en fjärdedel är askor från massa- och pappersindustrin (267 000 ton) och ungefär lika mycket (200 – 300 tusen ton) är askor från energiproduktion (Bjurström 2002). Av den senare fraktionen härrör ca 100 000 ton aska per år (med stor osäkerhet) från trädbränslen. Trädbränsleaskorna är i sin tur askor som har sitt ursprung i olika trädfraktioner; avverkningsrester (GROT), spån och bark från skogsindustrier samt förädlade trädbränslen (pellets) som är tillverkade av ved eller bark. Det är i första hand kategorin trädbränsleaskor som är lämpliga att användas för askåterföring till skogsmark. I huvudsak eldas trädbränslen i anläggningar där olika bränslen blandas, eller så varierar bränsleanvändningen efter säsongens tillgång. GROT blandas med andra bränslen bland annat för att kunna styra förbränningen med torrare bränslen eller av kostnadsskäl (bark är billigare än GROT). Med kännedom om typiska näringshalter i trädbränsleaskor (Nilsson & Steenari 1996) kan den årliga produktionen av trädbränsleaskorna innehåller uppskattningsvis beräknas till 18000 ton Ca, 1000 ton P, 4600 ton K och 2200 ton Mg.

Mängden näringsämnen i askor som är lämpliga för spridning i skog kan jämföras med mängden näringsämnen som förs bort vid skörd av GROT, med antagandet att det är näringsbortförselelsen i detta sortiment som i första hand skall kompenseras genom askåterföring. Idag saknas tillförlitlig statistik om mängden GROT som skördas, men enligt Skogsstyrelsen uppskattningar skördas GROT från 30 000 – 35 000 ha per år (H. Eriksson pers. medd. 2005), och uttaget har visat en ökande trend under senare år. Genom antagande av typiska värden för mängden GROT vid förnygringsavverkningar, och näringsinnehållet i denna fraktion (redovisas längre fram i avsnittet Material och metod – Datamaterial), kan kompensationsbehovet i form av olika näringsämnen uppskattas. Resultatet visar att den genomsnittliga kvoten mellan näringsämnen i potentiellt användbara trädbränsleaskor och näringsinnehållet i GROT är 3,46 för Ca, 1,01 för P, 1,43 för K och 2,91 för Mg. I kalkylen bortses från att en viss andel av de producerade askorna är olämpliga att sprida i skogsmark på grund av dålig kvalitet. Slutsatsen är då att på en nationell nivå finns det sannolikt tillgång på askor för kompensation av Ca och Mg, vilken ger en potentiell askdos som ligger nära Skogsstyrelsens rekommenderade maximala dos, medan det är mer knapp tillgång på K och P. Det finns med andra ord skillnader mellan sammansättningen av mineralämnena i GROT och den i trädbränsleaskor. Det är också viktigt att notera att det saknas en god nationell statistikproduktion som separerar GROT från andra skogsbränslen, än mindre särskiljer askproduktionen av GROT-förbränning från andra trädbränslen.

**Tabell 1.** Nationell massbalans för näringsämnen i trädbränsleaskor och GROT: en överslagsberäkning

	Askor tusen ton/år	GROT tusen ton/år	Ca ton/år	P ton/år	K ton/år	Mg ton/år
Trädbränsleaskor*	100	-	18 000	1 000	4 600	2 200
GROT**	-	1 120	5 206	995	3 213	755
Massbalans						
aska : GROT			3,46	1,01	1,43	2,91
Potentiell dos ***:	2,9 ton aska/ ha					

\*) Efter Bjurströms (2002) beräkning av askmängder i Sverige och typvärden av näringsämnen (Bjurström 2004) i askor.

\*\*) Baserad på uppskattningen att 35 000 ha skogsmark utnyttjas varje år för GROT-uttag, och medelvärden för näringsämnen i GROT, i blandningen 75% gran och 25% tall.

\*\*\*) 100 000 ton aska fördelat på 35 000 ha skogsmark.

Överslagsberäkningen reser en del frågeställningar:

1. *Varför skiljer sig sammansättningen av mineralämnen åt mellan GROT och trädbränsleaskor?* Beror den på felaktiga bedömningar om vilken skogsråvara som i verkligheten skördas och eldas i pannorna? Beror avvikelserna på förluster eller tillförsel på väg från skog till panna, eller i industriprocessen (förbränning och hantering av aska)?
2. *Hur fel kan en maximal dos (3 ton per ha) aska bli?* En markägare som säljer GROT och vill kompensera för uttaget genom askåterföring får inte tillbaka ”sin” aska. I sämsta fall sprids en aska i en rekommenderad totaldos vars näringsinnehåll långtifrån motsvarar kompensationsbehovet.
3. *Vad skall kompenseras?* Kompensation med avseende på förluster av baskatjoner kan baseras på Ca-innehållet, som dominerar i askan. Å andra sidan är P och K de ämnen som verkar finnas i relativt underskott i askan och är de ämnen som är mest intressanta som näringsämnen för skogsproduktion. Skall kompensationsbehovet baseras på trädens, markens eller det avrinnande vattnets behov av alkalinitet eller näringsämnen?

## 1.2 Syfte och avgränsning med studien

Syftet med denna studie är att analysera näringsflödet och massbalansen genom hela skogsbränslecykeln, främst på en principiell nivå. Målet är att identifiera och bedöma kunskapen, respektive kunskapsluckor, om viktiga processer och flöden i skogsbränslecykeln. Analysen är avgränsad till flöden av större konstituenten och växtnäringsämnen, men berör inte flöden av tungmetaller eller andra toxiska substanser. Genomgående baseras analyserna på flöden och processer där det finns tillgängliga kvantitativa data av god kvalitet för näringsmängder i träddelar, materialflöden genom pannor och kemiska analyser av askor med väldefinierat ursprung.

Tre frågeställningar som behandlas särskilt är:

1. Varför har vedaskor en annan näringskvot än den i GROT?
2. Vad är konsekvensen av en rekommenderad maximal dos (3 ton/ha) aska för ett urval av skogsbestånd och askor?
3. Vad skall askan kompensera för? Finns det ett behov att göra avsteg från Skogsstyrelsens allmänna rekommendation av kompensationsbehov.

Den första frågeställningen behandlas genom att beräkna förväntade (teoretiska) näringsströmmar från skogsråvara till aska. Uppgiften kompliceras av den mångfald av vägar som flödet kan ta, eftersom det finns olika typer av pannor som eldas med olika bränslen. Denna studie valt att fokuserat på en typ av panna – CFB – främst därför att det finns goda kvantitativa data för denna panntyp, och den dominerar bland de stora anläggningarna. Den stökiometriska sammansättningen hos teoretiska askor, där GROT och stamråvara blandas i olika proportioner, jämförs med verkliga CFB-flygaskors sammansättning. Den andra frågeställningen undersöks genom att beräkna graden av näringskompensation för ett urval av verkliga CFB-askor på ett urval av skogsbestånd.

Analys av kompensationsbehovets storlek har tidigare baserats på teoretiska massbalanser. Krav på ökad realism i bedömning av kompensationsbehov innebär att de i större utsträckning bör baseras på bedömningen av resultat från långsiktiga försök med skogsbränsleuttag och askåterföring. En huvuduppgift i projektet har därför varit att sammanställa data för markkemiska analyser och näringsmängder i träd biomassa från försöken. Resultaten används för beräkningar av näringshalter i GROT och stamråvara, och ingår i beräkningar av näringsbudgetar för olika försök. En syntes av skogsbränsleuttagets effekter på omsättningen av baskatjon presenteras för två försök med GROT-uttag (Kosta och Granhult) i form av balanserade näringsbudgetar.



### 1.3 Näringsflöden i skogsbränslecykeln

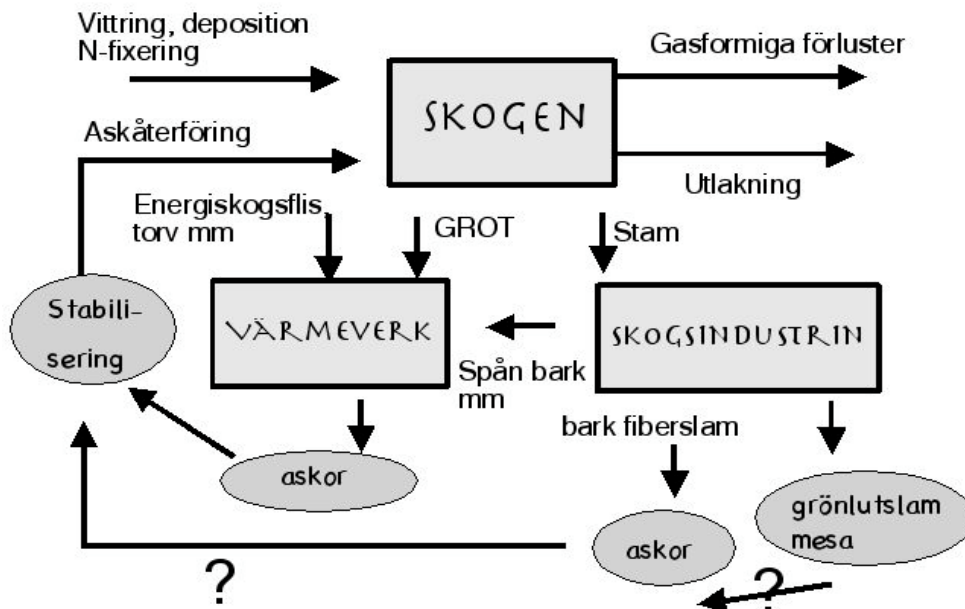
De principiella näringsflödena och processerna i skogsbränslecykeln återges i Figur 1 och kommenteras nedan.

#### Källor av näringsämnen till ekosystem

Källor av näringsämnen till ekosystem är deposition och kvävefixering, inklusive deposition från antropogena källor. Detta tillflöde varierar regionalt och med ståndort (kvävefixering). Vittringen tillför näringsämnen från fasta mineral (i ett kort tidsperspektiv är mineralen utanför ekosystemets gränser) till växttillgängliga förråd i marken, men anses också kunna föras direkt till träd genom mykorrhizasvampars vittrande aktivitet (Jongmans et al. 1997).

#### Naturliga förluster av näringsämnen från ekosystem

Utlakningsförlusterna kan vara betydande efter slutavverkning och andra störningar av det lokala kretsloppet. Vissa studier pekar på att GROT-uttag leder till mindre utlakningsförluster än efter bara stamskörd, vilket måste vägas in då vid jämförelser av näringsförlusterna från skogsmarken vid konventionellt stamuttag med förlusterna vid helträdsuttag (Hart et al. 1991, Golding & Stevens 1988, Titus & Malcolm 1992, Staaf & Olsson 1994, Ring et al. 2001, Westling et al. 2004, Jacobson et al. 2004). Det är framförallt flödet av lättlösliga element som nitrat och kalium som ökar, och nitrifikation under hyggesrester kan därför vara en process som bidrar till att kväve och kalium lakas ut. Näringsförlusterna från hyggen med kvarlämnat GROT varierar dock betydligt mellan olika lokaler, vilket försvårar möjligheten att dra generella slutsatser om betydelsen av denna effekt (Westling et al. 2004). Olsson et al. (1996) fann 15 år efter slutavverkning att merparten (60 – 80%) av kalciuminnehållet i riset återfanns i marken (motsvarande skillnaden i mängden extraherbart Ca i marken mellan försöksleden riset kvar – riset kvarlämnat). Motsvarande siffror för Mg och K var ca 30% resp <20%. Låga kaliumhalter i barr i försöksledet med kvarlämnat ris indikerar att den låga retentionen av kalium berodde på utlakning (Olsson et al. 2000). Utlakningsförlusterna efter avverkning beror också på markens bördighet och på markvegetationens utveckling (Ring et al. 2002).



Figur 1. Schematisk figur över skogsbränslecykelns näringscykel.

Gasformiga förluster av kväve kan ske genom ammoniakavgång och denitrifikation, den senare i syrefattig miljö. En sammanställning av denitrifikationen i tempererade skogar visade att arealförluster var <1 kg N/ha år för de flesta ekosystem, och i några fall var arealförlusten 4 kg/ha år (Davidson et al. 1990). Omfattningen av denitrifikation i skogsmark i nordisk miljö är dåligt känd jämfört med kunskapen om utlakningsförluster. Miljöbetingelserna som skapas efter kalhuggning – hög markfuktighet (lokalt och tillfälligt nära anaeroba förhållanden), god tillgång till nitrat och dött organiskt material – är förhållanden som gynnar denitrifikation. Denitrifikationen förväntas därför kunna vara substantiell i kväverika och fuktiga skogsmarker efter avverkning, men är troligen låg på torra marker. Nohrstedt et al. (1994) fann att denitrifikationen var obetydlig efter slutavverkning av ett tallbestånd på morän i Härjedalen, även i försöksled med tidigare höga givor av kvävegödsel.



**Figur 2.** GROT-välta täckt med papp nära Granhult i Småland.

#### *Skörderelaterade näringsförluster*

Många studier av biomassa och näringsämnenas fördelning i skogsekosystem har gett kunskap om den potentiella mängden organisk substans och näringsämnen som kan skördas i form av GROT och stammar. I verkligheten sker ett visst tekniskt spill när GROT skördas, och det kan ske i flera led i processen. En dominerande metod idag är att GROT läggs i högar under ett tak av papp för att torka och för att låta något av barren ramla av. GROT-högen flisas på plats eller på en terminal, och den flisade råvaran transporteras till förbränningsanläggningen. Eftersom värmeverken bara kan lagra bränsle motsvarande några dagars förbrukning, sker den huvudsakliga lagringen av bränslet i form av papptäckta högar (Fig. 2). Den första formen av tekniskt spill sker genom att alla tillgängliga hyggesrester inte kan skördas. På bränsleanpassade hyggen lägger skördare först avverkningsrester i mindre högar som sedan transporteras till den plats där riset läggs i papptäckta högar (ofta intill en skogsbilväg). Enligt resultat från SkogForsk (Jacobson S & Filipsson J, pers. medd. 2004) är i genomsnitt 87% av avverkningsresterna lokaliserade till högar på bränsleanpassade hyggen. Resterande 13% kommer alltså knappast att plockas upp av GROT-skördare. Skogsstyrelsen rekommenderar att 20% av GROT bör lämnas på hygget.

En annan form av tekniskt spill är att näringsämnen försvinner från den täckta högen, antingen genom utlakning eller genom att barr och fina kvistar ramlar av. Detta är ett mycket svårbedömt spill, och det är dessutom förluster som kan komma den avverkade ståndorten tillgodo i de fall högarna läggs på hygget. I de fall högar läggs nära skogsbilvägar och diken kommer näringsförlusterna från högen att försvinna från skogsbränslecykeln och från ståndorten.

Om riset flisas på platsen skopas fliset upp i en container för direkt transport till energianläggningen. Vid denna hantering är det ofrånkomligt att en del jordmaterial kommer med, som efter förbränningen av bränslet tillför askan föroreningar (Bjurström 2004). En förhöjd halt av kisel i askor ger en tydlig indikation på kontaminering av jordmaterial i bränslet. Bjurström (2004) visade att föroreningsaskan är normalt en stor del av den totala askan<sup>1</sup>.

## 1.4 Externa tillflöden av näringsämnen

Skogsstyrelsen (Anon. 2001) anger att aska som skall spridas till skog till huvuddelen bör härröra från förbränning av skogsbränslen, men viss inblandning av aska från andra bränslen är inget hinder. Värmeverken blandar olika bränslen beroende på tillgång och pris. Energiskogsflis (Salix) utgör normalt ett relativt litet sortiment, som vanligen tillförs värmeverken vintertid. Eftersom energiskog odlas på jordbruksmark innebär det ett externt tillflöde av näringsämnen till skogsbränslecykeln. Andra mer eller mindre externa tillflöden är torveldning och eldning med returträ (RT-flis). Ett motiv till inblandning av torv i träbränslen är att höja svavelhalten i bränslet, men svavel kan också tillsättas direkt under förbränningen av träbränslen (Rönquist 2000). Bränslen med låg S/Cl-kvot kan ge upphov till korrosionsskador på överhettartuber i pannor. Anläggningar som huvudsakligen eldar torv måste tillföra kalk till rökgasreningen, varpå gips bildas och askan blir således mer kalciumrik än den annars skulle ha varit (H. Bjurström pers. medd.). Skogsbränslecykeln – i snäv mening – kan alltså tillföras bränslen och tillsatsämnen (kalk, svavel) från odlingsmark, torvmarker och samhällets avfallshantering i en omfattning som är svår att överblicka.

## 1.5 Näringsflöden via användning av stammar

Skogsindustrins produktion av trävaror och pappersmassa alstrar restprodukter som spån och bark som är viktiga bränslen för värmeverken. Södra Skogsägarna, som är en stor leverantör av skogsbränslen i södra Sverige uppger till exempel att hälften av det flisade bränsle som de levererar till energianläggningar består av GROT, den andra hälften av spån och bark (Maurits Nilsson, Södra Skogsägarna, pers. medd. 2004). Det senare materialet innebär ett flöde av näringsämnen som löper parallellt med GROT-flödet, från skogen till energianläggningen. Eftersom bark är billigare än GROT föredrar energiverken bark, och tillgången på billig råvara styr därför proportionerna mellan bränslen som har sitt ursprung i GROT eller stam. Särskilt spån från skogsindustrin har alltså alternativa användningsområden på ett sätt som GROT inte har. Detta förhållande är viktigt för den totala massbalansen av näringsämnen.

Massindustrin har egna biologiska reningsverk för utgående vatten. Slammet från detta eldas bland annat tillsammans med bark i vissa anläggningar (H. Bjurström pers. medd.). Ett annat, mycket betydande flöde av näringsämnen tar vägen via massindustrins alkalirika restprodukter grönlutslam och mesa, som kemiskt har många likheter med askor. Dessa produkter behandlas inte i denna studie.

---

<sup>1</sup>Den totala askan består av bränsleaskan och föroreningsaskan.

*Vad händer under förbränningen med näringsämnen?*

Förutom bränslets sammansättning och graden av föroreningar bestäms näringsinnehållet i askor i hög grad av pannotyp (Bjurström 2004). I rosterpannor sker förbränning av bränslet på en fast, sluttande botten, och askan separeras i två typer; bottenaskan (som rakas ut från eldstadens botten) och flygaskan (som samlas upp från rökgasfilter). Askan från rosterpannor är ofta inte fullständigt förbrända. I CFB<sup>2</sup> och BFB-pannor tillförs bränslet till en sandbädd och förbränning sker under stark luftström i en virvlande (CFB) eller bubblande (BFB) blandning. I dessa pannor är förbränningen effektivare än i rosterpannor. Till skillnad från rosterpannor är bottenaskorna inte aktuella för spridning i skogen eftersom de domineras av sandmaterialet, men däremot bedöms flygaskan vara lämplig för spridning. Två finska studier av materialflödet genom en CFB-panna påvisade att fosfor har ett konservativt beteende genom pannan, men det sker kaliumförluster genom att kalium binds i bottenaskan eller tappas genom beläggningar (Bjurström 2004, Lind 1999, Valmari 2000). I Tabell 2 visas nettoflöden genom en CFB-panna enligt de finska studierna.

*Stabilisering och agglomering av askan*

Stabilisering – eller härdning – av den lösa, reaktiva askan sker enklast genom vattenbegjutning och innebär att askans oxider omvandlas till hydroxider och karbonater, samt en del andra stabila föreningar (till exempel ettringit, apatit, gips). Na och K-innehållet binds däremot inte hårt och kommer därför att vara i relativt lös form även i en stabiliserad aska (Steenari & Lindqvist 1997, Axelsson 2001). Lagring av askor utomhus kan därför innebära lakningsförluster av kalium. Agglomering av askan syftar på formen av den stabiliserade (härdade) askan. Enklast kan den härdade (vattenbegjutna) askan krossas och siktas, vilket ger en härdad krossaska. Granulering innebär att askan härdas i en process där askan rullas i en trumma, ofta med en liten tillsats av cement. Pelletering görs genom att askan formas med en vals. Pelletering och granulering kan innebära att askan tillförs ämnen, bortsett från karbonaterna. Det är inte känt om dessa steg i hanteringen innebär några egentliga förluster av näringsämnen. Om askan inte uppfyller kvalitetskraven (till exempel höga tungmetallhalter) deponeras den på annat sätt (eller används till vägbyggen etc) och försvinner ur skogsbränslecykeln.

**Tabell 2.** Andel av näringsämnen i tillförda skogsbränslen som återfinns i flygaskan efter förbränning i en CFB-panna enligt två finska studier. Efter Bjurström (2004). "Ansatt värde" anger värden som ingår i beräkningarna i denna studie.

Element	Lind 1999	Valmari 2000	Ansatt värde
Ca	0,65	0,58	0,60
Mg	ej best.	ej best.	0,60
Na	ej best.	0,80	0,80
K	0,49	0,39	0,40
P	0,69	0,69	0,69

<sup>2</sup>CFB står för Circulating Fluidizing Bed, BFB står för Bubbling Circulating Bed.

## 2 Material och metod

### 2.1 Datamaterial

Beräkningarna i denna rapport bygger på näringsanalyser från biomassastudier av gran och tall i Norden, och dels på näringsanalyser av askor.

#### *Näringsmängder i trädbiomassa*

Publicerade studier av biomassa och näringshalter i nordiska skogsbestånd är det huvudsakliga dataunderlaget för denna studie (Tabell 3). Studier från 1970-talet är Nihlgård (1972), Mälkönen (1974) Björkroth & Rosén (1977) och Bringmark (1977).

Sedan har det tillkommit material från finska, svenska och danska bestånd (Andersson, Brække & Hallbäck, 1998). Dessutom har infogats opublicerade resultat från biomassastudier utförda mellan 2000 och 2002 inom projekt finansierade av Energimyndigheten (B. Olsson m fl., opubl.). Dessa har gjorts i samband med gallring i försök med skogsbränsleuttag eller näringstillförsel.

Näringshalterna i stamved, stambark, grenar, kvistar och barr har beräknats från publicerade data där näringsmängder och biomassa (kg/ha) anges i dessa fraktioner. För varje bestånd har sedan de genomsnittliga halterna för stam (bark + stamved) respektive GROT (grenar + kvistar + barr) beräknats (Tabell 3–6).

**Tabell 3.** Studielokaler och studier av trädbiomassa och näringsinnehåll som används i denna rapport. Sk= Skåne, D = Dalarna, BI = Blekinge, H=Halland, SM=Småland, Gä=Gästrikland, Vb=Västerbotten, D=Danmark, F=Finland

Lokal	Trädslag	Ålder	Referens
<i>Slutavverkningsförsök</i>			
Borrestad* (Sk)	gran	33	B. Olsson opubl.*
Kongalund (Sk)	gran	55	Nihlgård 1972
Klosterhede (D)	gran	59	Andersson et al. 1998
Farabol (BI)	gran	70	Andersson et al. 1998
T103 (H)	gran	70	Björkroth & Rosén 1977
Lund (Vb)	tall	93	Björkroth & Rosén 1977
Kosta (Sm)	tall	100	Björkroth & Rosén 1977
Jädraås (Gä)	tall	135	Bringmark 1977
Norråker (??)	gran	181	Andersson et al. 1998
Lövliden (Vb)	gran + tall	165	Björkroth & Rosén 1977
<i>Gallringsförsök</i>			
Kosta (Sm)	tall	25	B. Olsson opubl.*
Tammela 1 (F, )	tall	28	Mälkönen 1974
Åseda (XX)	gran	32	Andersson et al. 1998
Siljansfors (Da)	tall	40	B. Olsson opubl.*
Tammela 3 (F, )	tall	45	Mälkönen 1974
Heinola (F, )	gran	46	Andersson et al. 1998
Tammela 2 ( F, )	tall	47	Mälkönen 1974
Granö (Vb)	tall	52	B. Olsson opubl.*
Granhult (Sm)	gran	53	B. Olsson opubl.*
Kemijärvi (F, )	gran	59	Andersson et al. 1998
Sodankylä(F, )	gran	90	Andersson et al. 1998

\*) Resultaten är rapporterade till Energimyndigheten i form av slutrapporter för forskningsprojekt.

## 2.2 Näringshalter i askor

En databas om den kemiska sammansättningen i askor från trädbränslen upprättades från tillgängliga källor. En publicerad källa är Holmroos (1993) som bygger på vedaskor insamlade 1990–91. Inom Värmeforsks delprogram ”Miljöriktig användning av askor” har Bjurström et al. (2004) skapat en databas – ALASKA – som bygger på analyser av askor från senare år, främst från skogsindustriernas pannor. Data sammanställda från skogliga försök med askåterföring har ställts till förfogande (G. Egnell SLU).

Karakteriseringen av bränslen och panntyp är detaljerad för ALASKA-databasen, men är mer knapphändig för andra databaser. Beteckningen ”ved” betecknar sannolikt ett brett spektrum av trädbränslen.

Kriterier för urvalet i beräkningarna för denna studie har varit askor producerade från CFB-panna eldade med trädbränslen eller torv (Tabell 7–8). Inga askor har uteslutits på grund av att takvärden för tungmetaller har överskridits eller att näringsinnehållet varit för lågt. Skälet till detta är helt enkelt att bara en aska håller måttet. Som redovisas i Tabell 8–9 hade en aska av 23 för höga kopparhalter, medan de andra hade för låga fosfor, magnesium eller kaliumhalter enligt Skogsstyrelsens rekommendationer för spridning till skogsmark (Anon. 2001).

## 2.3 Näringsämnen från skog till aska

För ett urval av tio kända skogsbestånd, som i ålder eller biomassa representerar avverkningsmogna bestånd med gran och tall (slutavverkningsförsöken i Tabell 3), beräknades den teoretiska mängden och den kemiska sammansättningen av flygaskor från en CFB-panna. GROT definierades som summan av levande grenar + döda grenar + barr. Stam definierades som stamved + stambark. Baskatjoner definierades som ekvivalentsumman av Na, K, Ca, Mg. Det tekniska spillet på hygget antogs vara 20%.

Kompensationsbehovet av P, K, Mg, Ca och summa baskatjoner definierades till två alternativa nivåer; (1) mängden näringsämnen i skördad GROT, det vill säga 80% av näringsämnena i den totala GROT-biomassan, respektive (2) mängden näringsämnen i skördad GROT och stam. Kompensationsbehovet är således inte bedömt efter ståndortens förutsättningar eller anpassat efter tecken på fysiologiska bristnivåer, och ingen hänsyn har tagits till förhållandet att näringsutlakningen kan vara något högre på hyggen där hyggesavfallet lämnas.

### 2.3.1 Bränsleblandningar

För varje skogsbestånd beräknades näringsflödet för fyra alternativa bränsleblandningar, det vill säga blandningar mellan GROT och STAM, den senare i form av spån och bark blandat i lika viktsdelar. Då bränsleblandningen är 50% GROT och 50% stam (25% ved, 25% bark) tillförs dubbelt så mycket bränsle som i fallet då bara GROT (100%) används. Olika bränsleblandningar, som den formuleras här, får konsekvenser för sammansättningen av näringsämnen i askan, därför att näringshalterna i stamved och bark är annorlunda än de i GROT. En annan konsekvens är att ju större andel av bränslet som utgörs av stamråvara, ju mer askor finns att tillgå för kompensation för GROT-uttag. Detta antagande beskriver förhållandet att stamråvaran har alternativa användningsområden, vilket inte GROT har, och att en stor andel av stammaterial i bränslet innebär en extern tillförsel av aska för kompensation av GROT-uttag.

### 2.3.2 Förbränning i CFB-panna

Kalkylen antar att förbränning av skogsbränslet sker i en CFB-panna, och att bara flygaskan är användbar för spridning till skogsmark. Förlusterna av enskilda element i förbränningsprocessen är de som anges i Tabell 2, vilka bygger på Bjurströms (2004) sammanställning. Magnesium antogs flöda genom pannan på samma sätt som kalcium. I kalkylen sker ingen tillförsel av ämnen genom kontaminering av jord (föroreningsaska) eller genom tillsatser under härddningen.

**Tabell 4.** Vägda medelhalter (mg/g ts) av N, P och baskatjoner i GROT (barr, grenar och kvistar) av gran i olika försök (se Tabell 3).

Lokal	N	P	K	Ca	Mg	Na
<b>Gran</b>						
Borrestad	9,24	1,85	2,75	8,91	0,77	0,090
Farabol	10,37	1,46	4,97	3,35	0,93	
Granhult	7,28	0,91	2,47	3,33	0,70	0,073
Heinola	9,18	1,60	4,22	12,46	0,78	
Kemijärvi	6,15	0,90	2,46	5,40	0,58	
Klostehede	9,02	1,07	3,21	3,97	0,92	
Kongalund	10,55	1,23	5,59	3,71	0,64	
Kosta	5,78	0,64	2,59	3,26	0,57	
Lövliden	4,83	0,59	2,51	7,36	0,58	
Närråker	5,58	0,95	2,79	6,53	0,74	
Skogaby	7,23	0,58	2,02	2,40	0,74	0,230
Sodankylä	6,53	0,74	2,55	5,89	0,83	
T103	6,74	0,56	1,61	3,18	0,69	
Åseda	6,85	0,93	3,11	5,65	0,97	
<b>Medelvärde</b>	<b>7,52</b>	<b>1,00</b>	<b>3,06</b>	<b>5,39</b>	<b>0,75</b>	<b>0,130</b>
<b>medianvärde</b>	<b>7,04</b>	<b>0,92</b>	<b>2,67</b>	<b>4,68</b>	<b>0,74</b>	<b>0,090</b>
<b>Max</b>	<b>10,55</b>	<b>1,85</b>	<b>5,59</b>	<b>12,46</b>	<b>0,97</b>	<b>0,230</b>
<b>Min</b>	<b>4,83</b>	<b>0,56</b>	<b>1,61</b>	<b>2,40</b>	<b>0,57</b>	<b>0,070</b>
<b>SD</b>	<b>1,83</b>	<b>0,40</b>	<b>1,12</b>	<b>2,77</b>	<b>0,13</b>	<b>0,090</b>

**Tabell 5.** Vägda medelhalter (mg/g ts) av N, P och baskatjoner i GROT (barr, grenar och kvistar) av tall i olika försök (se Tabell 3).

Lokal	N	P	K	Ca	Mg	Na
<b>Tall</b>						
Granö	5,06	0,50	1,90	2,70	0,46	0,031
Jädraås	6,05	0,59	2,49	2,20	0,50	0,040
Kosta (1975)	5,43	0,36	2,21	2,13	0,48	
Kosta (2000)	4,84	0,61	2,64	1,37	0,42	0,032
Lövliden	3,82	0,32	1,66	3,11	0,48	
Lund	3,67	0,38	1,46	2,06	0,36	
Siljansfors	6,06	0,60	2,20	2,25	0,51	0,009
Tammela 1	6,43	0,72	3,01	3,59		
Tammela 2	6,65	0,72	2,54	2,36		
Tammela 3	6,21	0,65	2,81	2,60		
<b>Medelvärde</b>	<b>5,42</b>	<b>0,54</b>	<b>2,29</b>	<b>2,44</b>	<b>0,46</b>	<b>0,027</b>
<b>medianvärde</b>	<b>5,74</b>	<b>0,60</b>	<b>2,35</b>	<b>2,30</b>	<b>0,48</b>	<b>0,032</b>
<b>Max</b>	<b>6,65</b>	<b>0,72</b>	<b>3,00</b>	<b>3,59</b>	<b>0,51</b>	<b>0,039</b>
<b>Min</b>	<b>3,67</b>	<b>0,32</b>	<b>1,46</b>	<b>1,37</b>	<b>0,36</b>	<b>0,009</b>
<b>SD</b>	<b>1,06</b>	<b>0,15</b>	<b>0,50</b>	<b>0,61</b>	<b>0,05</b>	<b>0,013</b>

**Tabell 6.** Vägda medelhalter (mg/g ts) av N, P och baskatjoner i stam (bark och stamved) av gran i olika försök (se Tabell 3).

Lokal	N	P	K	Ca	Mg	Na
Gran						
Borrestad	0,62	0,24	0,55	1,57	0,14	0,014
Farabol	1,38	0,08	0,53	1,56	0,21	
Granhult	0,79	0,10	0,61	1,15	0,18	0,004
Heinola	1,36	0,15	0,60	2,15	0,18	
Kemijärvi	1,26	0,10	0,47	2,05	0,00	
Klostehede	1,46	0,15	0,79	1,20	0,19	
Kongalund	1,03	0,11	0,66	1,08	0,15	
Kosta	0,74	0,08	0,40	1,22	0,18	
Lövliden	3,20	0,33	1,67	7,82	0,47	
Närråker	0,84	0,07	0,60	2,00	0,13	
Skogaby	0,68	0,09	0,66	0,79	0,20	0,009
Sodankylä	1,56	0,16	0,66	2,78	0,20	
T103	0,84	0,08	0,37	0,69	0,15	
Åseda	1,18	0,13	0,79	1,52	0,19	
<b>Medelvärde</b>	<b>1,21</b>	<b>0,13</b>	<b>0,66</b>	<b>2,00</b>	<b>0,18</b>	<b>0,009</b>
<b>medianvärde</b>	<b>1,03</b>	<b>0,10</b>	<b>0,60</b>	<b>1,56</b>	<b>0,18</b>	<b>0,009</b>
<b>Max</b>	<b>3,20</b>	<b>0,33</b>	<b>1,67</b>	<b>7,82</b>	<b>0,47</b>	<b>0,014</b>
<b>Min</b>	<b>0,62</b>	<b>0,07</b>	<b>0,37</b>	<b>0,69</b>	<b>0,00</b>	<b>0,004</b>
<b>SD</b>	<b>0,68</b>	<b>0,08</b>	<b>0,32</b>	<b>1,85</b>	<b>0,10</b>	<b>0,005</b>

**Tabell 7.** Vägda medelhalter (mg/g ts) av N, P och baskatjoner i stam (bark och stamved) av tall i olika försök (se Tabell 3).

Lokal	N	P	K	Ca	Mg	Na
Tall						
Granö	0,83	0,09	0,54	0,82	0,18	0,002
Jädraås	0,70	0,06	0,35	0,73	0,16	0,010
Kosta (1975)	0,88	0,06	0,44	0,88	0,21	
Kosta (2000)	0,64	0,05	0,26	0,63	0,14	
Lövliden	0,77	0,09	0,33	0,91	0,14	
Lund	0,62	0,06	0,29	0,74	0,13	
Siljansfors	0,90	0,09	0,58	0,88	0,17	0,002
Tammela 1	1,06	0,14	0,64	1,41		
Tammela 2	1,06	0,11	0,53	0,80		
Tammela 3	0,93	0,08	0,50	0,99		
<b>Medelvärde</b>	<b>0,84</b>	<b>0,08</b>	<b>0,44</b>	<b>0,88</b>	<b>0,16</b>	<b>0,006</b>
<b>medianvärde</b>	<b>0,86</b>	<b>0,09</b>	<b>0,43</b>	<b>0,85</b>	<b>0,16</b>	<b>0,004</b>
<b>Max</b>	<b>1,07</b>	<b>0,14</b>	<b>0,64</b>	<b>1,43</b>	<b>0,21</b>	<b>0,012</b>
<b>Min</b>	<b>0,62</b>	<b>0,05</b>	<b>0,26</b>	<b>0,63</b>	<b>0,13</b>	<b>0,002</b>
<b>SD</b>	<b>0,16</b>	<b>0,03</b>	<b>0,14</b>	<b>0,21</b>	<b>0,03</b>	<b>0,005</b>



**Tabell 8.** Halter (% av torrsubstans) av viktiga näringsämnen, respektive summa baskatjoner (BC, mekv/g ts) i flygaskor från CFB-pannor som huvudsakligen eldas med träbränslen eller torv. TB=träbränslen, SB=skogsbränsle, Slam=slam från massaindustrins biologiska reningssteg. Referens: 1 = Holmroos (1993), 2= ALASKA (Bjurström et al. 2004), 3= Data från askor i skogliga försök (G. Egnell, pers. medd.), I ALASKA-databasen anges aska nr 10 vara avsedd för skog, askor 12–17 avsedda för betong.

Nr	Leverantör	Ref	Bränsle	Ca	K	Mg	P	BC
1	Boden 2	1	Torv	21	3,1	1,4	0,95	12,95
2	Eskilstuna	1	Flis	21	4,7	1,6	0,79	13,49
3	Gällivare	1	Torv	6,6	0,83	1,1	0,9	4,79
4	Nässjö	1	Torv	7,8	1,7	2,2	0,57	6,18
5	Örebro	1	Torv	20	0,9	0,73	0,89	11,04
6	Stora Enso Fors	2	Slam, SB, bark SB-pellets	18,3	3,21	1,07	0,73	11,28
7	Hallsta Bruk Holmen 1	2	Träbränsle, slam	21,44	1	2,41	0,35	13,23
8	Hallsta Bruk Holmen 2	2	avfall, RT-flis, TB, slam, bark	20,01	0,83	2,41	0,31	12,51
9	Hyltebruk Stora Enso	2	RT-flis 30%, kol 7%, TB, slam 63%	25,73	0,66	3,62	0,17	16,21
10	Karlstad Q-4-231 nr 5	2	TB, rent trä	15,94	4,83	1,68	0,82	11,16
11	Karlstad Q-4-231 nr 6	2	Torv, TB	10,93	1,59	0,83	0,57	6,83
12	Örebro	2	Torv 30%, TB 70%, kreosot 10%	17,97	1,29	0,65	0,17	10,14
13	Hallstavik 1	2	TB, bark, slam	18,67	1,37	2,24	0,25	11,74
14	Fors	2	TB, bark, slam	18,3	3,21	1,07	0,73	11,28
15	Nymölla	2	TB, bark, slam	14,08	1,76	3,58	0,54	10,67
16	Hylte	2	TB, slam, bark	25,73	0,65	3,63	0,18	16,23
17	Norrköping	2	avfall (bl a gummi) TB	13,65	4,4	1,66	1,07	9,89
18	Perstorp 1	3	ved, torv	16,2	2	2	0,4	10,94
19	Eskilstuna 1	3	ved	21,1	3,2	2	1,2	13,47
20	Eskilstuna 2	3	ved	16,4	4	1,6	2,2	10,92
21	Perstorp 2	3	ved, torv	18,2	1,4	2	0,5	11,78
22	Ljungby 1	3	ved	9,4	3,4	1,4	0,5	7,58
23	Eskilstuna 3	3	ved	14	4,1	1,5	0,8	9,83
<b>medelvärde</b>				<b>17,06</b>	<b>2,35</b>	<b>1,84</b>	<b>0,6</b>	<b>11,05</b>
<b>median</b>				<b>18,2</b>	<b>1,76</b>	<b>1,66</b>	<b>0,57</b>	<b>11,16</b>
<b>max</b>				<b>25,73</b>	<b>4,83</b>	<b>3,63</b>	<b>2,2</b>	<b>16,23</b>
<b>min</b>				<b>6,6</b>	<b>0,65</b>	<b>0,65</b>	<b>0,17</b>	<b>4,79</b>
<b>Skogsstyrelsens krav</b>				<b>&gt;12,5</b>	<b>&gt;3</b>	<b>&gt;2</b>	<b>&gt;1</b>	

**Tabell 9.** Halter (% av torrsubstans, för Cu µg/g ts) av näringsämnen och metaller i flygaskor från CFB-pannor som huvudsakligen eldas med träbränslen eller torv. TB=träbränslen, SB=skogsbränsle, Slam=fiberslam från massaindustri. Bränslen beskrivs i Tabell 8.

Nr	Leverantör	Ref.	Na	Si	Al	Fe	Mn	S	Cu	Ti
1	Boden 2	1	1,2	19	4,2	9,7	0,79	0,94	89	
2	Eskilstuna	1	1,13	20	3,6	1,63	0,89	0,75	118,33	
3	Gällivare	1	0,87	17	3,9	25	0,16	0,22	34	
4	Nässjö	1	0,1	27	4,6	1,5	0,68	1,8	74	
5	Örebro	1	0,52	19	7,43	6,53	0,24	2,2	210	
6	Stora Enso Fors	2	1,03	15,85	12,38	1,62	0,32	6,41	97,7	0,29
7	Halssta Bruk Holmen 1	2	0,67	14,02	7,94	1,54	0,38			0,24
8	Hallsta Bruk Holmen 2	2	0,74	16,36	9,53	1,4	0,13			0,24
9	Hyltebruk Stora Enso	2	0,52	13,09	7,41	1,4	0,06			0,3
10	Karlstad Q-4-231 nr 5	2	1,35	15,43	2,95	3,9	0,97			0,12
11	Karlstad Q-4-231 nr 6 Sandviken	2	0,66	22,34	6,03	4,33	0,09		18,9	0,14
12	Örebro	2	0,71	7,48	1,66	1,36	0,13		110	0,08
13	Hallstavik 1	2	0,53	14,03	8,98	1,27	0,46	8,53		0,19
14	Fors	2	1,03	15,85	12,38	1,62	0,32	6,14		0,29
15	Nymölla	2	0,57	14,07	2,58	1,22	0,57	12,4		0,11
16	Hylte	2	0,55	13,13	7,3	1,37	0,06			0,29
17	Norrköping	2	1,35	23,84	4,61	2,18	0,69			0,24
18	Perstorp 1	3	1,6	10,7	4,9					
19	Eskilstuna 1	3	1,1	17	3,3	1,8	1,3	1,2	84	
20	Eskilstuna 2	3	0,9	22	2,6	1,4	1,2		43	
21	Perstorp 2	3	1,6	12	4,9	2,6	0,8	2,1	234	
22	Ljungby 1	3	2	26	6,7	3,9	0,6	0,2	5570	
23	Eskilstuna 3	3	1,3	24	2,4	2,4	0,7		24	
	<b>medelvärde</b>		<b>0,96</b>	<b>17,36</b>	<b>5,75</b>	<b>3,62</b>	<b>0,52</b>		<b>515,9</b>	<b>0,21</b>
	<b>median</b>		<b>0,9</b>	<b>16,36</b>	<b>4,9</b>	<b>1,62</b>	<b>0,51</b>	<b>1,2</b>	<b>89</b>	<b>0,24</b>
	<b>max</b>		<b>2</b>	<b>27</b>	<b>12,38</b>	<b>25</b>	<b>1,3</b>	<b>8,53</b>	<b>5570</b>	<b>0,3</b>
	<b>min</b>		<b>0,1</b>	<b>7,48</b>	<b>1,66</b>	<b>1,22</b>	<b>0,06</b>	<b>0,2</b>	<b>18,9</b>	<b>0,08</b>
	<b>Skogsstyrelsens krav</b>								<b>&lt;400</b>	

### 2.3.3 Stökiometriska relationer

En avgörande svårighet som redan framskymt i den nationella överslagsberäkningen, är att det saknas goda mätdata som kvantitativt binder samman bränsleanvändningen och askproduktionen. De stökiometriska relationerna mellan elementen i bränslet och askorna ger dock möjlighet att i någon mån överbrygga denna svårighet. I växter och djur varierar många elements inbördes relationer inom ganska snäva gränser. Ofta görs stökiometriska jämförelser med utgångspunkt för C eller N. Men eftersom kol och kväve försvinner vid förbränningen kan en jämförelse mellan bränslets och askans stökiometriska relationer bäst göras på element som uppträder konservativt i hela hanteringen. För detta ändamål är fosfor lämpligt, främst därför att P saknar gasfas av betydelse i sitt biogeokemiska kretslopp, och P verkar uppträda konservativt genom bränslepannorna (förgasas ej). Ekologiska skäl är att P och N uppträder i väl kontrollerade proportioner i växter och P är en av de

värdefullaste komponenterna i askan och kan vara tillväxtbegränsande ämne i många ekosystem. De stökiometriska relationer som beräknas här är Ca/P, K/P och Mg/P-kvoterna. De kalkylerade askorna för olika skogsbestånd kommer därmed att ha olika näringskvoter och totala askvolymer beroende på bränsleblandning.

### 2.3.4 Vad betyder 3 ton aska per hektar?

En askdos på 3 ton TS/ha och omloppstid är idag den rekommenderade maximala dosen. Eftersom markägaren inte kan påräkna att få tillbaka askan från sin skog, kan det finnas en risk att en given aska ger en dålig kompensation (för liten eller onödigt stor). För att pröva denna tanke beräknades hur stor del av det beräknade kompensationsbehovet (enligt definitionen ovan) för olika lokaler som fylls av de träbränsleaskor som produceras från CFB-pannor. I beräkningarna används median-, maximum och minimumhalter i askor för respektive element. Ett sista steg i analysen är att beräkna dosen aska som behövs för olika kompensationsbehov.

### 2.3.5 Långsiktiga effekter av GROT-uttag

Balanserade budgetar för baskatjoner beräknades för två småländska försökslokaler med skogsbränsleuttag; Granhult (GROT-uttag vid gallring 1983, gran) och Kosta (GROT-uttag vid slutavverknings 1975, tall). Budgetarna ger en syntes av effekterna av skogsbränsleuttag på medellång sikt (10–30 år) i relation till andra flöden, och tjänar som underlag till en diskussion om kompensationsbehovet. Den balanserade budgeten har följande uttryck (vänster led = källor; höger led = sänkor):

$$D + V + G_m = dM + dB + U \quad (\text{ekv. 1})$$

där D är deposition av baskatjoner (torr och våt), V är vittring,  $G_m$  är frigörelse av baskatjoner från GROT,  $dM$  är förändring i markens förråd av extraerbara baskatjoner, dB är ackumuleringen (nettoupptaget) av baskatjoner i ovanjordisk biomassa och U är utlakning. D interpoleras från IVLs nederbördskemiska data och V beräknades med hjälp av PROFILE-modellen (Sverdrup & Warfvinge 1993). Modellens beräkning krävde bland annat mineralogisk analys av markprover från C-horisonten i försökslokalerna. Hösten 2004 togs prover som analyserades av Analytica AB, Luleå.  $G_m$  beräknades från kända data om avverkningsresternas näringsammansättning (Björkroth & Rosén 1977, Egnell & Leijon 1997) och med antagandet att frigörelsen av baskatjoner motsvarade nedbrytningen av hyggesrester på lokalen T103 i Halland (Hyvönen et al. 2000).  $dM$  bygger på markkemiska mätningar (Olsson et al. 1996, Olsson opubl.). Om  $dM$  har ett positivt värde, det vill säga om en ökning av markens näringsförråd har skett blir  $dM$  en sänka och placeras i högra ledet i (ekv. 1). Om näringsförråden har minskat under en period betraktas marken istället som en källa och  $dM$  får ett positivt tecken men placeras i vänstra ledet i (ekv. 1). Beräkningar av dB baseras på biomassastudier 2000 i Kosta (Egnell & Olsson opubl.) respektive 2002 i Granhult (Olsson opubl.). I Kosta beskrivs dB för perioden från plantering fram till första gallring. I Granhult beskrivs dB för perioden mellan första och andra gallringen. Biomassastudien 2002 användes för att även beräkna näringsförråden vid första gallringen. Utlakningen, U, beräknades som en differens mellan de övriga posterna.

## 3 Resultat och diskussion

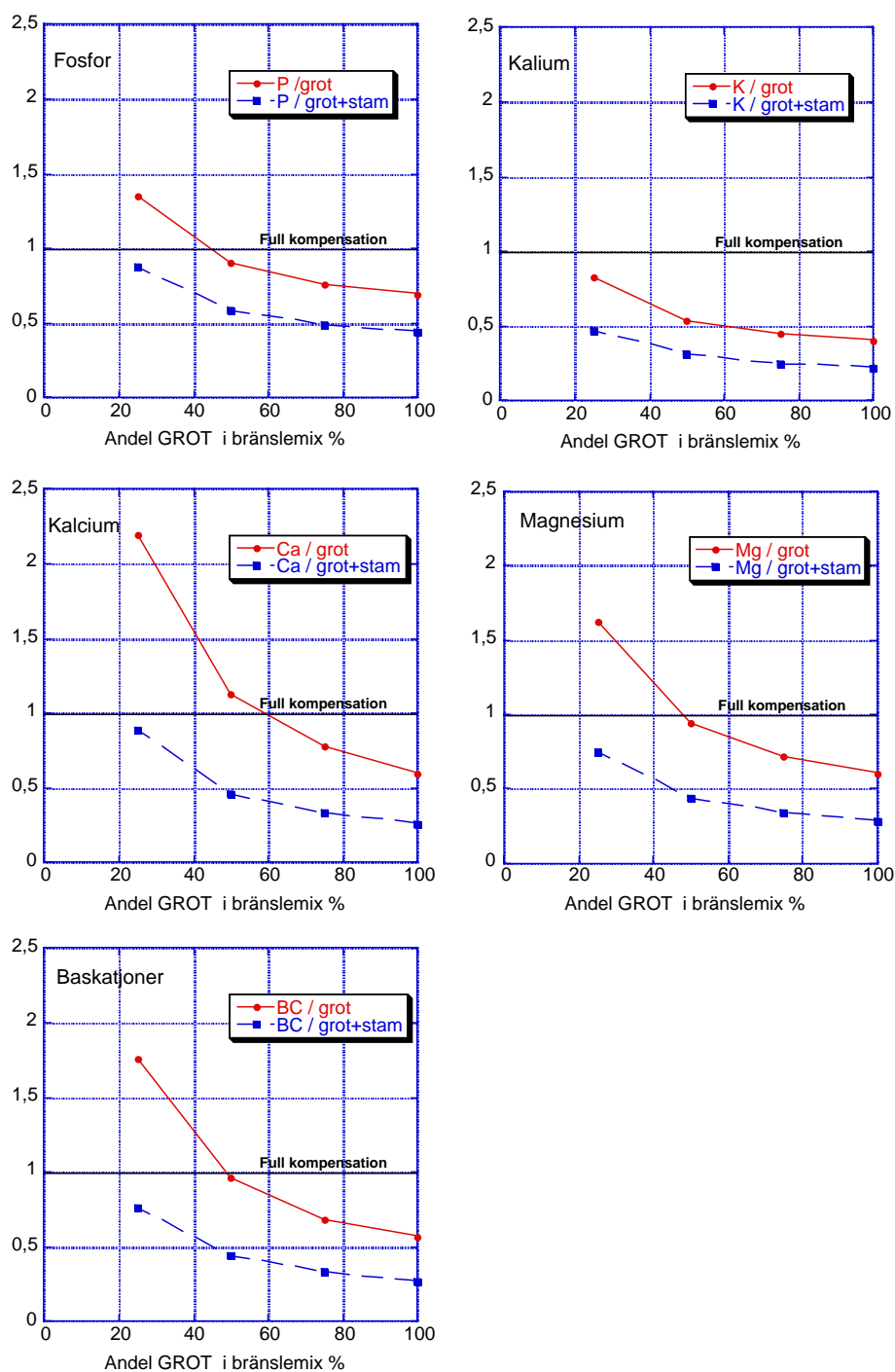
### 3.1 Beräknade näringsflöden och askkvaliteter

Den beräknade massbalansen för näringstransporten genom en CFB-panna visar att ren GROT-eldning resulterar i ett markant underskott av näringsämnen i relation till behovet att kompensera för GROT-uttag, och än mindre (<50%) räcker askan till att kompensera för både stam och GROT-uttag (Fig. 3). Underskottet beror huvudsakligen på att enbart flygaskan kan användas (Tabell 2). Ju mer stamråvara som tillförs systemet, ju större andel av kompensationsbehovet kan täckas. Det krävs en bränsleblandning av ungefär lika delar GROT och stamråvara för att åstadkomma de kvantiteter aska som krävs för att kompensera för enbart GROT-uttaget. Fullständig kompensation av både stam och GROT-uttag nås ej helt med 75% andel stamråvara. Den lägsta nivån av kompensation gäller för kalium.

#### *Överensstämmelse mellan beräknade och verkliga askors sammansättning*

Näringskvoterna i de beräknade askorna visas i Figur 4. Ökad inblandning av stamråvara i GROT-eldning leder till ökade Ca/P-kvoter i askan, men hade mycket liten effekt på K/P och Mg/P-kvoterna.

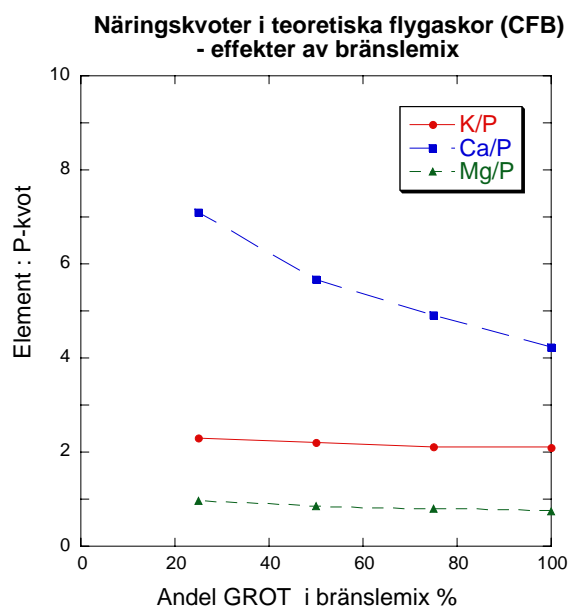
Jämfört med de verkliga flygaskorna från trädbränsle- och torveldade CFB-pannor var K/P och Mg/P-kvoterna något lägre i de beräknade askorna, och Ca/P-kvoten var betydligt lägre än i verkliga askor (Tabell 10). Den bristande överensstämmelsen mellan teoretiska och faktiska askor kan minska med antagandet att fosforförlusterna i pannan är större än i det beräknade fallet (Tabell 2). För K/P och Mg/P-kvoterna kan en minskning från 69 till ca 50% effektivitet för fosfor leda till god överensstämmelse mellan teoretiska och faktiska askor. För Ca/P-kvoten krävs mer än så. Hög inblandning av bark i skogsbränsle höjer Ca/P-kvoten, men inte till den nivå som krävs för att förklara hela diskrepansen. Även om det finns lokaler där Ca/P-kvoter i bark är i nivå med den i verkliga askor (Lövliden, Norråker, Farabol, Heinola) är medelvärdet för Ca/P i bark inte högre än i stamveden totalt (14,6 i granbark, 10,6 i tallbark). Kontaminering av jordmaterial eller kalktillförsel till torvaskor är därför troliga kompletterande orsaker till den höga Ca/P-kvoten i verkliga askor. En annan tänkbar orsak till låga P, K och Mg-halter i relation till Ca-halten i askan är att det sker förluster på hygget och under lagringen av skogsbränsle i fält.



**Figur 3.** Beräknad effekt av tillförelse av spån och bark till GROT som eldas i CFB-panna på mängden P, K, Ca, Mg och baskatjoner i flygaskor. Enheten på y-axeln uttrycker mängden näringsämne i flygaskan i relation till kompensationsbehovet, motsvarande näringsinnehållet i skördad biomassa. Värdet 1 innebär full kompensations för GROT-uttag respektive GROT + stamuttag.

**Tabell 10** Element: P-kvoter i GROT, stamråvara (50/50 % bark och ved), teoretiskt beräknade flygaskor från CFB-pannor samt i verkliga askor; urval av 23 askor, övriga tillgängliga data inom parentes, samt medianaskor efter Nilsson & Steenari (1996).

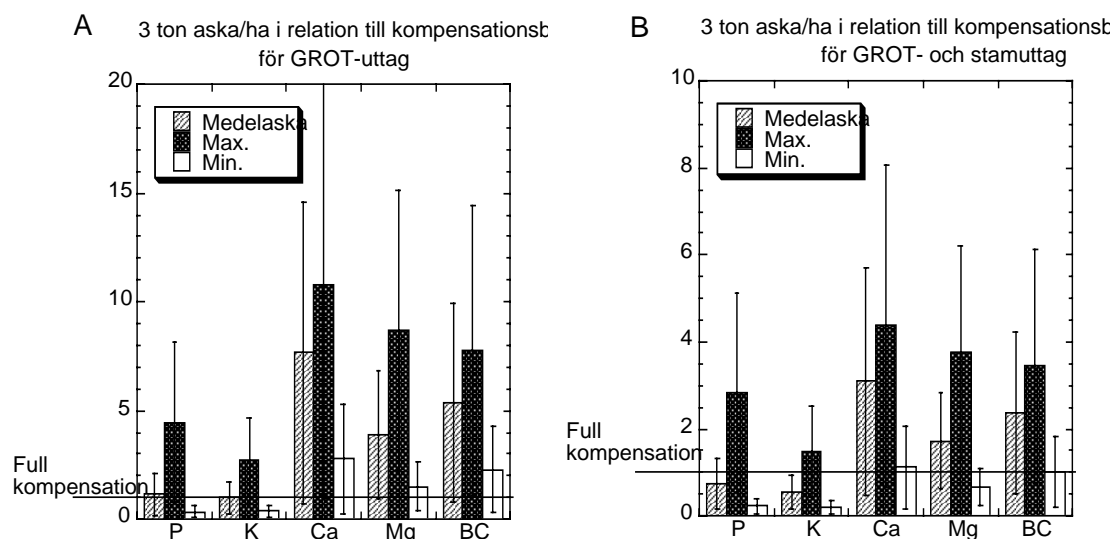
Kvot	GROT gran	tall	Stam gran	stam	Teoretisk CFB-flygaska	Verkliga askor CFB-urval	Verkliga askor Nilsson & Steenari
K/P	3,2	4,33	5,46	7,07	2,1 – 2,3	3,6 (4,5)	4,7
Ca/P	5,67	4,85	14,79	11,4	4,2–7,1	25 (19,5)	18,9
Mg/P	0,83	0,71	2,53	3,24	0,74 – 0,97	2,0 (2,1)	2,1



**Figur 4.** Beräknade element: P-kvoter i flygaskor från CFB-anläggningar som eldats med GROT eller GROT i blandning med spån och bark.

### 3.2 Effekten av 3 ton aska per hektar

Effekten av att sprida maximala dosen 3 ton TS per ha av verkliga askor på de tio olika skogslokaler visas i Figur 5. En CFB-aska av mediankvalitet överkompenserar på de flesta lokaler för GROT-uttaget av baskatjoner (Ca och Mg), medan däremot dosen ganska väl motsvarar kompensationsbehovet för K och P. De högsta uppmätta halterna (maximala värden) i CFB-askorna ger en betydande överkompensation för alla element, medan askor med de lägsta halterna ger tillräcklig kompensation för baskatjoner, Ca och Mg, men otillräcklig för K och P. Kompensationen för både stam och GROT-uttag är givetvis generellt lägre (Figur 5). Här räcker medianaskan vanligen inte till att kompensera för P och K-uttaget, medan Ca, Mg och kompensationen av baskatjoner är mer än tillräcklig.



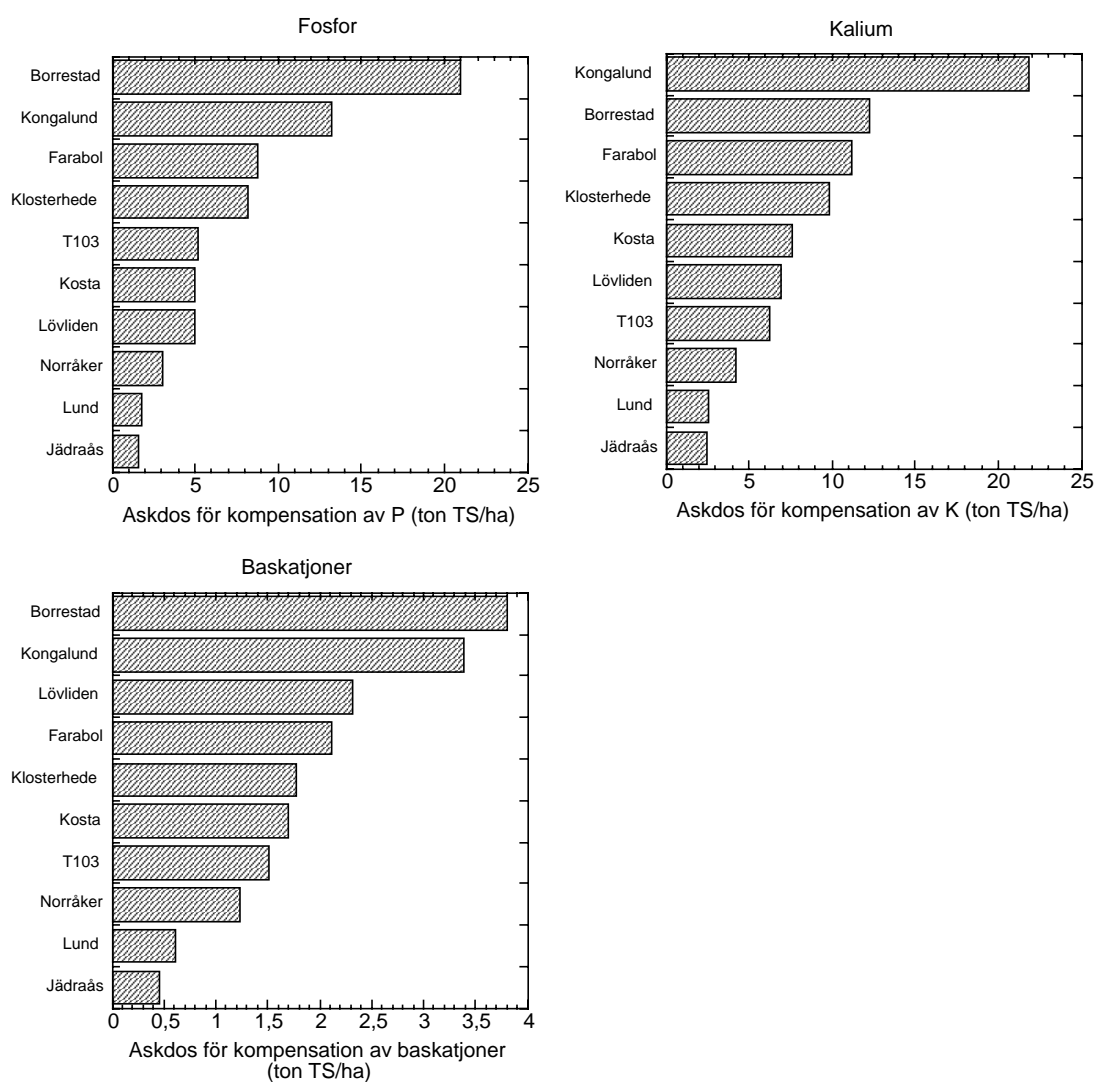
Figur 5. Effekten av 3 ton aska/ha av olika kvaliteter (median-, max- och minimumhalter) av CFB-flygaska i relation till kompensationsbehovet i 10 skogsbestånd i Norden. Felstaplar visar standardavvikelsen från medelvärdet.

### 3.3 Askdoser för näringskompensation på olika lokaler

Ett alternativt sätt att beskriva effekten av medianaskorna ges i Figur 6, som visar vilken dos som behövs på en viss lokal för att nå full kompensation för GROT och stamuttag. För de allra flesta lokaler kan doser under 3 ton räcka för att kompensera för baskatjonuttaget, men kompensation för K och P i de flesta fall kräver betydligt högre doser. Resultatet visar att den variation som förekommer i askkvalitet tillsammans med variationen i kompensationsbehov mellan lokaler leder till många fall av både överkompensation och underkompensation. Skogsstyrelsen rekommendation att inte sprida större doser än 3 ton TS/ha omloppstid är delvis baserat på bristen på fältförsök med högre doser härdad aska (Egnell et al. 1998).

#### *Kompensationsbehovet*

Resultaten från beräkningar av massbalansen genom en CFB-panna visar på betydande underskott i mängden näringsämnen som finns tillgängliga för kompensationsgödsling med enbart GROT som bränsle, såvida inte stamved och bark tillförs. Med hänsyn tagen till att många tillgängliga askor inte bör spridas i skogen på grund av dålig kvalitet och olämpligt ursprung reduceras sannolikt mängden lämpliga askor betydligt. Den aska som produceras har ett bra innehåll av baskatjoner, med undantag för kalium, och ett lågt fosforinnehåll, därför finns uppenbara svårigheter att uppfylla målet att askåterföring generellt skall kompensera för skogsbränsleuttag. Än svårare är det att uppfylla målet att kompensera för stamuttag. Om det finns en brist på lämpliga askor är det viktigt att identifiera ståndorter där behovet av kompensation är störst.



**Figur 6.** Mängden CFB-flygaska av mediankvalitet (ton TS/ha) som behövs för att kompensera för skörde-förluster (GROT-stamuttag) av P, K och basketjones på 10 lokaler i Sverige och Danmark. Observera att lokalerna är ordnade efter storleksordning på kompensationsbehov.

#### *Basketjonbudgetar för två försök med helträdsutnyttjande*

En utgångspunkt för en diskussion om kompensationsbehovet är näringsbudgetar för basketjones på två försök med helträdsutnyttjande, Granhult respektive Kosta i Småland. Försöket i Granhult är ett försök med helträdsuttag vid första gallring (gran) som etablerades 1983 (Fig. 7). Tillväxten under de första 10 åren efter gallring var inte signifikant påverkad av helträdsuttag (Egnell & Leijon 1997). Biomassastudien 2002 (B. Olsson opubl. data) indikerade dock en något lägre total biomassa vid helträdsuttag jämfört med stamuttag. Det fanns också små skillnader i mängden extraherbara basketjones i marken, med något lägre förråd efter helträds-gallring, men skillnaderna var inte statistiskt signifikanta för vare sig näringskapitalet i träden eller i marken. Eftersom de extraherbara basketjonförråden i marken 2002 var lägre än 1983 i båda försöksleden, kan den markkemiska förändringen betraktas som en källa till en frigjord pool av basketjones i (ekv. 1). De huvudsakliga

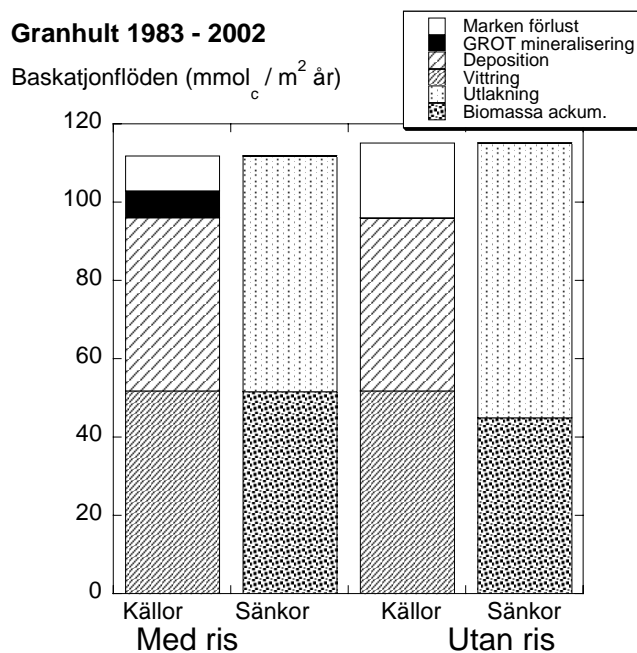


källorna var dock vittringen och depositionen som tillsammans stod för mer än 80% av källorna. Frigörelse av baskatjoner från gallringsresterna bidrog med ungefär lika mycket baskatjoner per år som den årliga minskningen i extraherbara baskatjoner. I försöksledet *Utan ris* var förändringen i marken ensamt större än summan av baskatjoner från avverkningsrester och den markkemiska förändringen, och totalt uppskattades därför källorna vara större i *Utan ris* än i *Med ris*. Bland sänkorna utgör utlakningen och ackumulation i ovanjordisk biomassa de huvudsakliga komponenterna. Ackumulationen i biomassa bygger på uppmätt biomassa och näringshalter. Utlakningen – den återstående komponenten – beräknas som en differens för att göra källor och sänkor lika stora. Ett konsekvens av beräkningssättet är att i försöksledet *Utan ris* kommer utlakningen av baskatjoner att vara större än i *Med ris*. Det omvända resultatet hade snarare varit det förväntade. Mätningar av markvatten från 50 cm djup 2003 i Granhult indikerar också att utlakningen av baskatjoner är något lägre i försöksledet *Utan ris* (O. Westling, unpubl. data).

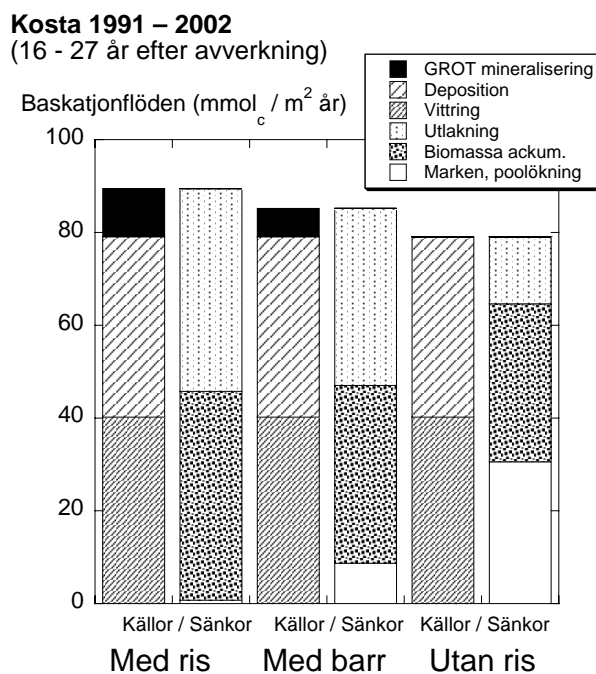
En tänkbar förklaring till avvikelsen från det förväntade resultatet är att beräkningen har utgått från att vittringshastigheten är densamma i båda försöksleden. Denna förenkling i beräkningen har varit nödvändig i brist på mätdata. Det är dock tänkbart att vittringen i försöksledet *Utan ris* snarare har varit lägre än i *Med ris*, vilket skulle ge en totalt lägre omsättning av baskatjoner inklusive en lägre utlakning i försöksledet *Utan ris*. En indikation på detta är den uppmätta lägre tillväxten och lägre upptaget av baskatjoner i försöksledet *Utan ris*. En annan omständighet som inte behandlas i beräkningen är att vittring kan ske i rumsligt olika sfärer i marken. Dels finns en tillväxtdriven vittring i rhizosfären, vars produkter i första hand tas upp i växten, medan utlakningen av baskatjoner främst sker utanför rhizosfären där vittringen sker genom inverkan av organiska syror från nedbrytningen (van Breemen et al, 2000).

Andra osäkerheter i näringsbudgeten är att näringsackumulation i rotbiomassa och markvegetationen inte är medtagna. Totalt sett finns således en rad osäkerheter i beräkningarna, men helhetsintrycket är att budgeten åskådliggör den genomsnittliga storleken av GROT-uttagets effekter i relation till andra flöden under en period på nästan 20 år. Figuren illustrerar också hur effekten av GROT-uttag fördelas på både minskad ackumulation i trädbiomassa och minskade extraherbara baskatjonförråd i marken.

Försöket vid Kosta (tall) är ett försök med helträdsutnyttjande vid slutavverkning som etablerades 1975 (Fig. 8). Markkemiska undersökningar gjordes 1983, 1990 och 2001, och vid de senare två undersöktes extraherbara baskatjoner på ett jämförbart sätt. 1990, 15 år efter slutavverkningen, hade en skillnad i extraherbara baskatjoner etablerats mellan försöksleden, men vid 2001 års revision hade skillnaderna minskat något. Dessutom uppskattades generellt större förråd av extraherbara baskatjoner i marken 2001 än 1990. Åren 1990 – 2001 kan därför beskrivas som en period av återhämtning från uppnådda behandlingsskillnader i marken. I baskatjonbudgeten för Kosta blir därför den markkemiska förändringen bokförd som en sänka, och sänkan är störst i behandlingsledet *Utan ris*.



**Figur 7.** Balanserad budget för basketjonflöden i försöket Granhult (gran, Småland). Medelvärden för perioden 1983 – 2002, för försöksleden Med ris respektive Utan ris kvarlämnat efter första gallring. Ackumulation av biomassa avser enbart ovanjordisk trädbiomassa.



**Figur 8.** Balanserad budget för basketjonflöden i försöket Kosta (tall, Småland). Medelvärden för perioden 1991 – 2002 (16–27 år efter slutavverkning), för försöksleden Med ris, Med barr respektive Utan ris kvarlämnat efter slutavverkningen 1975. Ackumulation av biomassa avser enbart ovanjordisk trädbiomassa.

Baskatjonkällorna i Kosta domineras av vittring och deposition, och frigörelse från avverkningsrester utgör en liten post i försöksleden *Med ris* respektive *Med barr*. I likhet med Granhult, visar den sammanlagda budgeten för Kosta hur effekten av helträdsuttag är spridd på flera komponenter, i detta fallet en minskad utlakning av baskatjoner och en lägre ackumulation av baskatjoner i trädbiomassan. Återhämtningen i marken, som innebär att förråden i marken har ökat mest i försöksleden *Utan ris*, kan beskrivas som effekter av en mindre ackumulation i trädbiomassa, och en lägre utlakning, vars storlek här beräknas som en differens mellan källor och sänkor för att budgeten skall balanseras. En tolkning av budgeten är att en återhämtningsfas i marken kan betyda en minskad utlakning. Skillnader i träd tillväxt är den primära process som driver fram detta resultat, och den är troligen mest framträdande i en situation med kvävebegränsning.

De båda baskatjonbudgetarna illustrerar några viktiga särdrag i effekterna av helträdsuttag. Effekten av GROT-uttag sprids till olika komponenter i ett ekosystem, och även till angränsande ekosystem. Skörd av GROT ger minskad tillgänglighet i marken som ger lägre halter av baskatjoner i biomassan. Minskad träd tillväxt – främst en effekt av minskad kvävetillgänglighet – innebär tillsammans med lägre halter i biomassa en reducerad ackumulation av baskatjoner i biomassan. Perioder av ”återhämtning” i marken kan delvis förklaras av minskad näringsupptag i biomassa. Minskad utlakning av baskatjoner (surare avrinning) är en effekt av lägre basmättnad. Alla dessa processer tar tid att utvecklas. Frigörelse av baskatjoner från GROT som bryts ner på hygget är en långsam process, åtminstone för Ca, och därför utvecklas den potentiella skillnaden mellan försöksled *Med ris* och *Utan ris* långsamt. Tillväxt och näringsackumulation är också långsamma processer.

Kompensation med aska förväntas ha i stort sett ett analogt förlopp som effekterna av GROT-uttag, med successiv spridning till marken, träden (vegetationen) och markvattnet. En viktig skillnad är dock att askan saknar kväve, och förväntas därför ha marginella effekter på träd tillväxten. Teoretiskt behöver därför inte askdosen för en näringskompensation utan kväve vara lika stor som en näringskompensation med kväve, som innebär ökad produktion och större upptag av alla näringsämnen.

Det är inte möjligt att kompensera för en specifik effekt som vid en viss tidpunkt uppträder i marken, till exempel försurning av marken. En åtgärd som askåterföring påverkar många olika processer i marken. Däremot kan motivet att återföra askan vara att enbart motverka försurning av ytvatten, eller att enbart förbättra fosforsituationen för träd. Detta har betydelse för valet av både askdos och askkvalitet.

### 3.4 Kompensera mot försurning

Sedan depositionen av svavel har minskat markant i Sverige sedan 1990 finns hopp om att många försurade vattendrag i Sverige skall kunna återhämta sig (Warfvinge & Bertills 2000). Skogsbränsleuttagens försurande effekt i skogsmark är dock substantiell, och har relativt sett ökat i betydelse i takt med att svavelnedfallet har minskat (Akselsson 2005, Egnell et al 1998). Vattendragens återhämtning efter försurning kräver att omgivande skogsmark inte bara levererar mindre syra med sulfatjoner, men också kan exportera alkalinitet till ytvatten. Skogsbränsleuttag i försurade regioner som inte följs av askåterföring kan därför hindra det nationella miljökvalitetsmålet ”Bara naturlig försurning” och detta kan ensamt vara ett avgörande motiv till askåterföring. EUs vattendirektiv kan ge ytterligare skärpa till detta mål. Eftersom förekomsten av vattendrag som försurats genom sur nederbörd är störst i södra och sydvästra Sverige innebär det att motiven till askåterföring blir starkast i denna region. Det är även ett argument för Skolstyrelsens rekommendation att kompensera för både GROT- och stamuttaget i dessa regioner. Eftersom askorna förefaller innehålla mer

kalcium relativt andra ämnen innebär det att det behövs mindre aska för att kompensera för baskatjonförlust om målet är att motverka mark- och ytvattenförsurning.

### 3.5 Kaliumkompensation

Kaliumbrist som leder till klassiska bristsymptom (klorotiska barr eller blad) anses förekomma sällsynt i Sverige, mestadels på utdikad torvmark. Linder (1995) ansåg att K/N-kvoter i fjolårsbarr på gran bör vara 35% eller högre för maximal tillväxt. Observationer från södra Sverige visar att kvoter under detta tal inte är ovanliga (Thelin et al. 2000, Olsson et al. 2000). Kunskapen om vad de lägre K/N-kvoter (20-30%) som är vanliga i Skåne och Halland egentligen betyder för skogsproduktionen är dåligt kända, bland annat därför att det saknas experiment i denna region som enbart varierat kaliumtillförseln. En viktig funktion för kalium i växter är kontrollen av klyvöppningar, och kaliumbrist kan därför förväntas ha störst betydelse i samband med torka. I områden med lågt K/N (<25%) i barr finns det skäl att anta att ett tillskott av K kan höja produktionen.

Problemet med kalium i askan är analogt med kalium i organiskt material och dess relativt höga mobilitet i marken. Kalium förekommer huvudsakligen som elektrolyt i cellplasman, den är motjon till negativt laddade makromolekyler, och ingår inte i kovalenta bindningar (Fraústo da Silva & Williams 1991). Under nedbrytningen av förna förloras kalium till stor del genom utlakning. Gröna barr som bryts ner på hyggen förlorar huvuddelen av sitt kaliuminnehåll inom ett år (Berg et al 1991). God täckning av markvegetation och mossor är generellt omständigheter som kan motverka förluster av kalium från ekosystemet. Omständigheter som underlättar förlust av kalium genom utlakning är brist på vegetation, nitrifikation och hög nederbörd, i synnerhet om dessa faktorer kombineras. Kaliumförlusterna på hyggen kan förväntas vara stora där avverkningsresterna lämnas kvar och där marken är störd av markberedning eller maskinspår.

Det finns exempel på att kalium i hyggesrester i stort sett helt kan förloras genom utlakning under hyggesfasen (Goulding & Stevens 1988), men svenska studier visar på en betydande variation inom och mellan lokaler som gör det svårt att dra generella slutsatser om storleken på sådana förluster (Westling et al. 2004). En konsekvens är att GROT-uttag kan innebära en relativt bättre retention av kvarvarande kalium. Vidare är det den snabba förlusten av kalium från GROT som kan vara huvudorsaken till att askor är relativt kaliumfattiga, jämfört med innehållet av kalcium. Dessutom kan ökad nitrifikation på hyggen utan GROT-uttag göra att hög nitratutlakning åtföljs av bland annat utlakning av kalium från markens rotzon.

Kaliumjonens dåliga förmåga att bygga stabila kovalenta föreningar eller komplex innebär också att kalium i askor, även de stabiliserade, uppvisar en stor tendens att lakas ut. Många studier visar också på en snabb puls av ökad kaliumhalter i markvattnet under rotzonen efter spridning av härdad aska. Därför ger det lösliga kaliuminnehållet i askor ett mycket kortvarigt tillskott. Kompensation med aska på hyggen, där utlakningen av kalium redan är stor, riskerar innebära att betydande mängder av tillfört kalium förloras.

Kaliumcirkulationen i skogsekosystem utmärks av snabb omsättning och stor stabilitet i mängden extraherbart kalium i marken. En beräkning av omsättningen av kalium i Skogaby visar att ungefär 25 kg K omsätts per ha och år, och omsättningshastigheten av den extraherbara poolen i marken, 52 kg/ha, var 0,48/år (kalkyl baserad på data i Persson & Nilsson 2001). Huvuddelen av omsättningen (15 kg/ha år) består i en snabb cirkulation mellan K som lakas från trädkronor (uppmätt i krondropp) och sedan tas upp i träden igen. Mineraliseringen bedömdes här vara av underordnad

betydelse som kaliumkälla. En jämförelse med 15 andra försök<sup>3</sup> med motsvarande mätmetod för kalium i marken (extraherbart i 1 M NH<sub>4</sub>Cl, humus + mineraljord 0–20 cm) visade att kaliumförrådet i marken är förvånansvärt konstant, oavsett bonitet och marktextur (stenighet). I medeltal var kaliumförrådet 52 kg/ha i ytor med ris och 48 kg/ha i ytor utan ris. Ett genomsnitt för 15 lokaler med helträdsförsök visade att den relativa standardavvikelsen var 29 respektive 27% av medelvärdet. Motsvarande siffror för Ca var 195 respektive 183 kg Ca/ha och standardavvikelsen var 72 respektive 65% av medelvärdet, alltså en betydligt större variation kring medelvärdet.

Resultatet indikerar att det förekommer en stark biologisk kontroll av kalium i rhizosfären, där överskott tenderar att förloras. Kalcium visar å andra sidan en starkare koppling till markens totala katjonbytesförmåga och mineralogi.

Slutsatser av detta resonemang är att dålig tillgång på kalium kan ha betydelse för skogsproduktionen på vissa lokaler, men asktillförsel eller kvarlämnade av hyggesrester är inte ensamma de åtgärder som leder till en god hushållning med kalium på ståndorten. Genom att begränsa störningar av marken i samband med avverkningar och att underlätta för markvegetationens etablering skapas förutsättningar för god kaliumhushållning, Skörd av GROT och återföring av stabiliserad vedaska kan vara en del av en god strategi för kaliumretention i skogsmarken om den förenas med andra skötselåtgärder.

### 3.6 Fosforkompensation

Kompensation med aska med målet att höja fosfortillgången för skogsträd kan vara angeläget där P/N-kvoter i barren är låga. På samma sätt som för kalium är det svårt att påvisa tydliga tillväxt-effekter av fosfor, men det finns studier i Halland som indikerar att PK-gödsling eller SkogVital kan stimulera tillväxten. En studie av biomassan i Skogaby 2001 visade att SkogVital resulterade i en högre barrbiomassa, men inte högre stambiomassa (B. Olsson opubl. data). Motsvarande effekt fanns inte i ytor behandlade med granulerad aska, som givit ökade kaliumhalter i barren men inte påverkat fosforhalten. Bergholm och Johansson (pers. medd.) fann i ett halländskt granbestånd en tendens till ökad tillväxt i grundyta (ej signifikant) fem år efter gödsling med Skogvital (+6%) eller Apatit + biotit (+16%), och ansåg att tillfört P var av störst betydelse för resultatet. Det finns alltså vissa belägg för att fosforgödsling kan ha positiva effekter på tillväxten i sydvästra Sverige.

Fosforhalten i askor är som tidigare visat lägre än vad som kan förväntas från bränslets fosforhalter. Fosfor i härdade askor förekommer som apatit (eller motsvarande) och löses ut långsamt. Särskilt i den granulerade aska som har använts i försöken Skogaby, Asa och Flakaliden har fosfor varit hårt bunden, och mycket litet har frigjorts (J. Bergholm pers. medd.). Även härdad och krossad samt valsplattad aska har i fältförsök uppvisat långsam utlösning av fosfor (Westling & Larsson 2006). Växters upptag av fosfor sker huvudsakligen via mykorrhiza eller andra mikrobiella interaktioner med rötter, och därför har mycket intresse riktats mot svampars förmåga att tillgodogöra sig fosfor i askgranuler (till exempel Mahmood et al. 2003). Utlakning och deposition utgör relativt små flöden i fosfors kretslopp (till exempel Persson & Broberg 1985). Dessa egenskaper hos fosfors kretslopp gör att askåterföring för fosforkompensation måste göras inom ramen för ett mer långsiktigt mål, jämfört med kompensation med kalium eller mot försurning. En stor osäkerhet i bedömningen av behovet av fosforkompensation är om fosfor förloras från bränslet redan på avverkningsplatsen eller om det sker förluster senare i skogsbränslekedjan.

<sup>3</sup> Försökslokaler är Örsås, Vetlanda, Åmot, Lakaträsk, T103, Kosta, Lövliden, Lund, Skogaby, Avesta, Ruskelse, Ramsberg, Granö, Granhult, Mesele, Borrestad.

## 4 Avslutande diskussion

### *Urvalet av askor*

Studiens uppläggnings med beräkningar för enbart CFB-pannor innebär givetvis en inskränkning, men liknande resultat kan sannolikt uppträda även för andra panntyper. Huvudresultatet, att det kan finnas ett underskott på askor, beror till stor del på att bottenaskan inte kan spridas till skogsmark. Emilsson (2005) anger att huvudsakligen bottenaskor från rosterpannor bör användas för spridning till skogsmark, eftersom den är bättre utbränd än flygaskan och ofta har högre metallhalter. I mindre anläggningar blandas botten- och flygaskor. I praktiken får det ofta liknande konsekvenser som i vårt beräknade scenario, då en del av askan ej kan användas för spridning till skogsmark.

Ett annat problem med urvalet av askor är att en del av dem inte var avsedda för spridning till skogsmark. Men vid en analys av sammansättningen av kemiska element avviker dessa inte på något markant sätt från de andra askorna. Ett annat urval av askor än det som gjorts här ger sannolikt ett resultat som inte skiljer sig markant från det här presenterade.

### *Bristfällig nationell statistikproduktion om GROT-uttag och GROT-askor*

Uppläggningsen av denna studie har präglats av förhållandet att den nationella statistiken över skogsbränslen saknar uppdelning på GROT och andra bränslen, och många databaser med uppgifter om trädaskor lider av mycket ofullständig dokumentation om bränslet. Om det är GROT-uttagets näringsförkluster som i första hand skall kompenseras måste omfattningen av uttaget, och andelen i bränslemixen, vara känd.

### *Skogsbränslecykeln är ett relativt öppet system där nya tekniker skapar nya vägar och kombinationer av näringsströmmar*

Det är uppenbart att skogsbränslecykeln inte består av en väl definierad flödesväg för näringsämnen, utan har många möjliga vägar. Framför allt är skogsbränslecykeln inte ett slutet kretslopp mellan skogsekosystem och energianläggningar och GROT utgör ännu en relativt begränsad del av biobränslesortimentet. Av tekniska (korrosion, pålagringar i panna, energieffektivitet), miljömässiga (reducera emissioner av PAH, dioxiner, NO<sub>x</sub> i rökgaser) och ekonomiska (tillgång och pris på bränslen) skäl sameldas olika biobränslen i många anläggningar (till exempel Steenari & Lindqvist 1999, Rönnquist 2000, Kling et al. 2005). Den snabba tekniska utvecklingen på området kan också innebära att nya näringsströmmar skapas. Ett exempel är att lakning och separering av näringsämnen från trädbränslen med så kallade flisnjurar har undersökts, främst som en lösning för massaindustrin. Lakvätskan kan sedan behandlas av till exempel industrins egna reningsverk innan den når recipienten. En reduktion av näringshalter i trädbränslen skulle ge attraktivare förbränningsgenskaper och bland annat minska utsläpp av kväveoxider (Backlund & Rådeström 2005).

## 5 Slutsatser

Studien kan sammanfattas med följande slutsatser:

- Enbart flygaska från CFB-pannor räcker inte till för kompensation av näringsförlusterna vid GROT-uttag (bottenaskor från CFB-pannor deponeras).
- Askans näringsbalans motsvarar inte näringsbalansen i skördad GROT och annan skördad biomassa.
- Hög Ca/P kvot i aska kan bara delvis förklaras med bränsemixen (hög andel bark eller stamved). Förluster av P på hygget eller under transport och lagring av bränsle och dåligt kända föroreningar eller tillsatser av kalk är troliga orsaker. I mindre grad tycks även K förloras i kedjan från hygge och under transport och lagring av bränslat.
- En maximal dos aska (3 ton /ha) överkompenserar i regel för alkalinitet men underkompenserar ofta för K och P. Stor risk föreligger att schablonvärden på askåterföring ger ett oönskat resultat, i synnerhet om motivet är att kompensera för specifika näringsämnen.
- Kompensationsbehovet kan differentieras till två nivåer (GROT och GROT + stam) samt till fyra mål: (1) förbättra trädens näringsstatus och tillväxt, (2) öka skogsmarkens basmättnad och förråd av näringsämnen (3) förbättra alkaliniteten i avrinnande vatten för att motverka försurning av ytvatten och (4) som komplement till kvävegödsling.
- Baskatjonbudgetar visar att effekter av helträdsuttag sprids till olika delar av ekosystemet under lång tid. Askans effekter förväntas vara analoga, men motriktade helträdsuttaget, med undantag för att askan inte förväntas ha positiva tillväxteffekter .
- Alkalinitetsökning i mark och vatten är den komponent som lättast kan åtgärdas med askåterföring.
- Kompensation för kalium som näringsämne är svårt på grund av kaliums tendens att lakas ut från såväl avverkningsrester som askor, och dess allmänt stora rörlighet i ekosystem. Det är också svårt att bedöma hur kritisk kaliumsituationen är på fastmark i södra Sverige. Strategier för god hushållning med kalium i skogsekosystem måste omfatta fler aspekter, framför allt utformning av hyggen, tidpunkt för askåterföring, samt hantering av GROT och askor.
- Fosforkompensation genom askåterföring har dålig effekt på grund av fosfors bindning i svårlösta mineral och låga P-halter i askor. På kort sikt är askor därför ett dåligt medel att höja P-tillgängligheten, men fosfor i askor torde dock ha långsiktigt positiva effekter. Det är viktigt att fastställa vilka P-förluster som faktiskt sker på hygget, och att fastställa om fosforsituationen långsiktigt försämras genom skogsbränslecykeln.
- Skogsbränslecykeln är ett relativt öppet system där nya tekniker skapar nya vägar och kombinationer av näringsströmmar.
- En förbättrad nationell statistikproduktion över GROT-uttag och askproduktion från skogsbränslen är viktig för att fortlöpande uppskatta näringsströmmar i skogsbränslecykeln.

## 6 Referenser

- Anonym 2001. Rekommendationer vid uttag av skogsbränsle och kompensationsgödsling. Skogsstyrelsen, Meddelande 2-2001. Jönköping.
- Anonym 2003. Bara naturlig försurning. Underlagsrapport till fördjupad utvärdering av miljömålsarbetet. Rapport 5317-okt 2003. Naturvårdsverket. ISBN 91-620-5317-5.
- Akselsson C & Westling O (2004) Regionalized nitrogen budgets in forest soils for different deposition and forestry scenarios in Sweden. *Global Ecology and Biogeography*, 14: 85–95.
- Andersson, F, Brække, F & Hallbäcken L (1998) *Nutrition and growth of Norway spruce forests in a Nordic climatic and deposition gradient. TemaNord 1998:566. Nordic Council of Ministers, Copenhagen. ISBN 92-893-0228-3*
- Akselsson C & Westling O (2004) Kritisk belastning och baskatjonbalans för skogsmark i Halland. IVL rapport B1577, 31 s.
- Arvidsson, H. 2001. Wood ash application in spruce stands. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae: Silvestria* 221. Doctoral thesis.
- Backlund B & Rådeström R. 2005 Trädbränsleförädling med flisnjure – Utlakning av problemsubstanser. Värmeforsk Rapport 934.
- Berg B, Booltink H, Breymer A, Ewertsson A, Gallardo A, Holm B, Johansson M-B, Koivuojala S, Meentenmeyer V, Nyman P, Olofsson J, Pettersson A-S, Reurslag A, Staaf H, Staaf I & Uba L. 1991. Data on needle litter decomposition and soil climate as well as site characteristics for some coniferous forest sites. Part 2. Decomposition data. Report 42, Department of Ecology and Environmental Research, Swedish University of Agricultural Sciences. ISBN 91-576—4341-5
- Bergh J, Linder S, Lundmark T & Elfving B (1999) The effect of water and nutrient availability on the productivity of Norway spruce in northern and southern Sweden. *Forest Ecology and Management*, 119: 51-62.
- Bertills U & Lövblad G (red) (2002) Kritisk belastning för svavel och kväve. Naturvårdsverkets förlag. ISBN 91-620-5174-1
- Bjurström H. 2002. En bedömning av askvolymen. PM, Svenska Energiaskor AB 2002-01-30
- Bjurström H. 2004. De mineraliska ämnens flöden genom pannorna. Rapport 500743, ÅF Miljö & Energi AB.
- Bjurström H, Rydstrand C, Berg M & Wikman K. 2004. Databas inom delprogrammet. Värmeforsk projekt Q4-211, Rapport 857.
- Björkroth, G & Rosén K (1977) *Biomassa och näringsämnen på fyra ståndorter. Rapport Projekt helträdsutnyttjande, Stockholm.*
- van Breemen, N., Finlay, R., Lundström, U, Jongmans A. G. Giesler, R. & Olsson, M. 2000. Mycorrhizal weathering: A true case of mineral plant nutrition?. *Biogeochemistry* 49: 53-67.
- Bringmark, L (1977) *A bioelement budget of an old Scots pine forest in Central Sweden. Silva Fennica* 11: 201-257.
- Davidson, E, Myrold DD & Groffman PM. 1990. *Denitrification in temperate forest ecosystems. In: Gessel SP, Lacate DS, Weetman GF & Powers RF (eds) Sustained Productivity of Forests, pp. 196–220. University of British Columbia Faculty of Forestry Publication, Vancouver.*
- Egnell G & Leijon, B (1997) Effects of different levels of biomass removal in thinning on short-term production of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* stands. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 12: 17 – 26.



- Egnell G & Leijon B (1999) Survival and growth of planted seedlings of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* after different levels of biomass removal in clear-felling. *Scandinavian Journal of Forest Research* 14: 303-311.
- Egnell G, Nohrstedt H-Ö, Weslien J, Westling O & Örlander G. 1998. Miljökonsekvensbeskrivning (MKB) av skogsbränsleuttag, asktillförsel och övrig näringskompensation. Rapport 1639, Skogsstyrelsen.
- Egnell G & Valinger E (2003) Survival, growth and growth allocation of planted Scots pine trees after different levels of biomass removal in clear-felling. *Forest Ecology and Management* 177: 65-74.
- Emilsson S. 2004. Från skogsbränsleuttag till askåterföring. Handbok, Rec-Ash -projektet. Skogsvårdstyrelsen Värmland-Örebro.
- Fraústo da Silva, JJR & Williams RJP. 1991. *The Biological Chemistry of the Elements. The Inorganic Chemistry of Life*. Clarendon Press, Oxford, 561 pp.
- Goulding KWT & Stevens PA. 1988. Potassium reserves in a forested, acid upland soil and the effect on them of clear-felling versus whole-tree harvesting. *Soil Use Management*, 4: 45-51.
- Hart, G.E., DeByle, N.V. & Hennes, R.W. 1981. Slash treatment after clearcutting lodgepole pine affects nutrients in soil water. *J. For.*, 79: 446-450.
- Holmroos, S. 1993. Karaktärisering av vedaska. Rapport VU-E 93:64, Vattenfall Utveckling.
- Hyvönen, R., Olsson, B.A., Lundkvist, H. and Staaf, H. 2000. Decomposition and nutrient release from *Picea abies* (L.) Karst. and *Pinus sylvestris* L. logging residues. *Forest Ecology and Management*, 126: 97-112.
- Jacobson S, Ring E, Lundström H & Nordlund S. 2004. Avverkningsresternas fördelning på hygget och dess påverkan på näringsutlakning och planttillväxt. Slutrapport av projekt p12699-1 till Energimyndigheten.
- Jongmans AG, van Breemen N, Lundström US, van Hees PAW, Finlay RD, Srinivasan M, Unestam T, Giesler R, Melkerud PA, Olsson M. 1997. Rock-eating fungi. *Nature*, 389, 682–683.
- Kling Å, Myringer Å, Eskilsson D, Aurell J & Marklund S. 2005. SCR vid sameldning av biobränslen och returbränslen. Värmeforsk Rapport 932.
- Linder S (1995) Foliar analysis for detecting and correcting nutrient imbalances in Norway spruce. *Ecological Bulletins (Copenhagen)* 44: 178-190.
- Mahmood S, Filay RD, Fransson A & Wallander H. 2003. Effects of hardened wood ash on microbial activity, plant growth and nutrient uptake by ectomycorrhizal spruce seedlings. *FEMS Microbiology Ecology* 3: 12–131.
- Mälkönen, E (1974) *Annual primary production and nutrient cycle in some Scots pine stands. Akademisk avhandling. Comm. Inst. For. Fenn.* 84:5.
- Nihlgård B (1972) Plant biomass, primary production and distribution of chemical elements in a beech and a planted spruce forest in South Sweden. *Oikos* 23: 69-81.
- Nilsson C & Steenari B-M. 1996. Karaktärisering och behandling av träaska. NUTEK Rapport 1996:15.
- Nohrstedt H-Ö, Ring E, Klemedtsson L & Nilsson A. 1994. Nitrogen losses and soil-water acidity after clear-felling of fertilized experimental plots in a *Pinus sylvestris* stand. *Forest Ecology and Management*, 66: 69-86.
- Olsson, B.A., Lundkvist, H. and Staaf, H. (2000) Nutrient status in needles of Norway spruce and Scots pine following harvesting of logging residues. *Plant and Soil*, 223: 161-173.

- Olsson BA, Lundkvist H, Bergholm J, Brandtberg, P-O, Grip H & Lövdahl L (2004) Revisioner av markens näringsstillstånd i långliggande fältförsök med skogsbränsleuttag respektive askåterföring. Slutrapport till Energimyndigheten för projekt p12773-1. Institutionen för ekologi och miljövärd, SLU.
- Persson G & Brobarg O. 1985. Nutrient concentration in the acidified Lake Gårdsjön: the role of transport and retention of phosphorous, nitrogen and DOC in watershed and lake. *Ecol. Bull. (Stockholm)* 37: 158–175.
- Persson T & Nilsson L-O. 2001. Skogabyförsöket – Effekter av långvarig kväve- och svaveltillförsel till skogsekosystem. Rapport 5173, Naturvårddsverket Förlag.
- Ring E, Högbom L, Nohrstedt H-Ö. 2001. Effects of brush removal after clear felling on soil and soil-solution chemistry and field-layer biomass in an experimental nitrogen gradient. In: Optimizing nitrogen management in food and energy production and environmental protection. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Nitrogen Conference on Science and Policy. The ScientificWorld [serial online], 1: 457-466. Available from <http://www.thescientificworld.com>.
- Ring, E., Bergholm, J., Olsson, B.A. & Jansson, G. 2003. Urea fertilizations of a Norway spruce stand: effects on nitrogen in soil water and field-layer vegetation after final felling. *Canadian Journal of Forest Research*, 33, 375-384.
- Rolff C & Ågren GI (1999) Predicting effects of different harvesting intensities with a model of nitrogen limited forest growth. *Ecological Modelling* 118: 193-211.
- Rönquist E-M. 2000. Överhettarkorrosion i bioeldad panna – teorier och prov i Västermalmsverket, Falun. Värmeforsk Rapport 708.
- Staab H & Olsson BA. 1994. Effects of slash removal and stump harvesting on soil water chemistry in a clearcutting in SW Sweden. *Scand J For Res*, 9: 305-310.
- Steenari M-B & Lindqvist O. 1997. Stabilisation of biofuel ashes for recycling to forest soil. *Biomass and Bioenergy* 13: 39–50.
- Steenari M-B & Lindqvist O. 1999. Fly ash characteristics in co-combustion of wood with coal, oil or peat. *Fuel* 78: 479-488.
- Sverdrup H & Warfvinge P. 1993. Calculating field weathering rates using a mechanistic geochemical model (PROFILE). *J. Appl. Geochem.*, 8: 273–283.)
- Tamm, CO (1991) Nitrogen in Terrestrial Ecosystems. *Ecological Studies* 81. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York.
- Theelin G, Rosengren U, Callesen I & Ingerslev M. 2002. The nutrient status of Norway spruce in pure and mixed-species stands. *Forest Ecology and Management*, 160: 115–125.
- Titus, B.D. & Malcolm, D.C. 1992. Nutrient leaching from the litter layer after clearfelling of Sitka spruce stands on peaty gley soils. *Forestry* 65: 389–416.
- Warfvinge P & Bertills U. 2000. Naturens återhämtning från försurning – aktuell kunskap och framtidsscenarioer. Rapport 5028, Naturvårdsverket. ISBN 91-620-502
- Westling O, Andersson, I & Örlander G. 2004. Effekter av askåterföring till granplanteringar med riståkt. IVL Rapport B1552.
- Westling, O. & Larsson P-E. 2006. Översättning av resultat i laboratorium till fältförhållanden. IVL Rapport B1660. 23 s.
- Ågren G, Olsson B & Persson T (2004) Intensivodling av granskog – biomassastudier. Slutrapport till Energimyndigheten för projekt p20432-1. Institutionen för ekologi och miljövärd, SLU.