

Askåterföring till gran- och bokbestånd – effekter på näring, tillväxt, kvävedynamik och kolbalans

Gunnar Thelin

Askåterföring till gran- och bokbestånd – effekter på näring, tillväxt, kvävedynamik och kolbalans

Gunnar Thelin

Q4-221

VÄRMEFORSK Service AB
101 53 STOCKHOLM · Tel 08-677 25 80
Mars 2006
ISSN 1653-1248

Sammanfattning

Askåterföring är en viktig del i ett modernt, uthålligt skogsbruk, särskilt vid uttag av GROT. Näringsämnen som förloras vid skörd återförs med askan till skogen. I projektet studerades effekter av askbehandling på barr- och bladkemi, trädens tillväxt, markkemi, markvattenkemi, samt kol- och kvävedynamik i 23 granbestånd i sydvästra Sverige och tio bokbestånd i Skåne. På en del av lokalerna fanns tidigare etablerade försök, men en majoritet var askbehandlingar gjorda utan försöksuppläggning där ask- resp. kontrolltytor etablerades i efterhand. Den vanligaste dosen var två ton självhärdad, krossad aska och två ton Mg-kalk.

Efter att i genomsnitt sju-åtta år har passerat sedan askåterföring har

1. markens utbytbara förråd av baskatjoner ökat i både gran- och bokbestånd
2. markens basmättnad ökat i både gran- och bokbestånd och BC/Al ökat i granbestånd
3. koncentrationer och kvoter till N av P, Ca, Zn och S ökat i granbarr, den förbättrade P-statusen är särskilt viktig eftersom P ligger nära eller under bristnivå på en stor del av lokalerna
4. bokbladens K-koncentration minskat
5. askade granbestånds tillväxt ökat med i genomsnitt 14 % jmf med kontrollen
6. mängderna av kol och kväve ökat i biomassan i granbestånd
7. mängderna av kol och kväve i marken tenderat att öka i bokbestånd och varit opåverkade i granbestånden
8. koncentrationerna av Ca, Mg och SO₄ ökat och ANC varit opåverkad i markvatten
9. den potentiella mineraliseringen inte påverkats men den potentiella nitrifikationshastigheten ökat
10. koncentrationen av nitrat i markvatten minskat i bokbestånd och inte påverkats i granbestånd
11. kväveförlusterna från systemet minskat i bokbestånd och möjligen minskat i granbestånd

Askåterföringen verkar ha gett de positiva effekter som var åsyftade med åtgärden utan negativa effekter på kolbalans och kvävedynamik. Dessutom har trädens tillväxt ökat i granbestånden. De positiva effekterna var dock små på markkemi och markvatten. Dosen två ton aska och två ton kalk verkar vara för låg för att höja pH i mineraljorden och den syraneutraliserande förmågan (ANC) i markvattnet, vilket troligen beror på desorption av tidigare deponerat sulfat. Dosen verkar inte heller räcka för att kompensera för skördeförluster av K och P vid GROT-uttag.

Det är sannolikt trädens förbättrade P-status, inte N-status, som ligger bakom tillväxtökningen i askade granbestånd. Det styrks av att det fanns en korrelation mellan tillväxt och P i barr men ingen korrelation mellan tillväxt och N i barr. Trädens och markens förbättrade näringsstatus innebär en framtida högre uthållig produktionskapacitet och gör träden mer stressresistenta.

Möjligheterna till god lönsamheten i askåterföring för den enskilde markägaren bedöms vara goda.

Summary

Ash recycling is an important part in a modern, sustainable forestry, especially in whole-tree harvest systems. Nutrients lost at harvest are returned to the forest with the wood-ash. In the project the effects of ash treatment on needle and leaf chemistry, tree growth, soil chemistry, soil water chemistry, and carbon and nitrogen dynamics were studied on 23 Norway spruce sites in south-western Sweden and in ten European beech sites in Scania, southern Sweden. On some of the sites there were previously established ash recycling experiments, but on a majority of the sites ash recycling was performed without experimental lay-out and ash and control plots were established afterwards. The most common dose was two tons of self hardened crushed wood-ash and two tons of Mg-lime.

On average seven to eight years after ash recycling the results were

1. increased exchangeable stores of base cations in the soil in the beech and the spruce stands
2. increased base saturation in the beech and the spruce stands and increased BC/Al in the spruce stands
3. increased concentrations and ratios to N of P, Ca, Zn, and S in the needles, the increased P-values are especially important since P is close to or below deficiency levels in a majority of the spruce stands
4. decreased K-concentration in the beech leaves
5. increased tree growth with on average 14 % in the ash treated spruce stands compared to the control plots
6. increased carbon and nitrogen amounts in the biomass in the spruce stands
7. tendencies towards increased amounts of carbon and nitrogen in the soil in the beech stands and no effect in the soil in the spruce stands
8. increased concentrations of Ca, Mg, and SO₄ and no effect on ANC in the soil water
9. no effect on potential net mineralization but increased potential nitrification rates
10. decreased concentration of nitrate in the soil water in the beech stands and no effect in the spruce stands
11. lower system N losses in the beech stands and possibly in the spruce stands

The ash treatments appear to have given the positive effects aimed at without negative effects on the carbon balance and the nitrogen dynamics. In addition, tree growth increased in the spruce stands. The positive effects were, however, small on the soil chemistry and the soil water chemistry. The dose two tons of wood-ash and two tons of lime appear to have been too low in order to improve the mineral soil pH and the acid neutralizing capacity (ANC) in the soil water. This is probably due to desorption of historically deposited sulfate. The dose appears to be too low to compensate for whole-tree harvest losses of K and P.

It is probable that the increased tree growth was caused by the increased tree P-status. This is reinforced by the positive correlation between the tree growth and the needle P concentration and the lack of correlation between the tree growth and the needle N concentration. The improved nutrient status of the trees and the soil implies an

improved future sustainable production capacity and makes the trees more stress resistant.

There is a high possibility of good profitability in ash recycling for the land owner.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
2	MATERIAL OCH METODER	3
2.1	LOKALER	3
2.2	ASKBEHANDLINGAR.....	7
2.3	FÖRSÖKSUPPLÄGGNING	7
2.4	PROVTAGNING.....	8
2.5	ANALYSER AV FÄLTPROVER	9
2.6	INKUBATIONSFÖRSÖK	10
2.7	EXTERNA DATASET	10
2.8	STATISTIK OCH BERÄKNINGAR	10
3	RESULTAT	14
3.1	MARKKEMI	14
3.2	BARR- OCH BLADKEMI	17
3.3	TILLVÄXT OCH NÄRINGSBEGRÄNSNING	18
3.4	MARKVATTENKEMI	22
3.5	POTENTIELL MINERALISERING	22
3.6	C- OCH N-BUDGET.....	25
3.7	EKONOMI.....	27
4	DISKUSSION	29
4.1	MARK OCH VATTEN	29
4.2	BARR- OCH BLADKEMI OCH TILLVÄXT.....	31
4.3	KVÄVEOMSÄTTNING.....	34
4.4	KOLBALANS	36
4.5	EKONOMI	37
4.6	RÄCKER TVÅ TON ASKA OCH TVÅ TON KALK PER HEKTAR?	38
5	SLUTSATSER	40
6	TACK	41
7	REFERENSER	42

1 Inledning

Uthållig skogsproduktion kräver återföring av näringsämnen och buffertförmåga för att kompensera för skördeuttag. På de flesta marker i södra Sverige bedrivs skogsbruket idag med ett långsiktigt underskott på näringsämnen vid enbart stamuttag (Sverdrup och Stjernquist, 2002). Det innebär ett ännu större underskott vid helträdsuttag, t.ex. i form av insamling och flisning av hyggesrester, s.k. GROT. En försämrad näringstillgång kan leda till lägre stressresistens och framtida tillväxtsänkningar hos träden, ett surt avrinningsvatten med giftiga halter av aluminium, samt en negativ påverkan på den biologiska mångfalden, inte minst i vatten. Askåterföring kan motverka sådana negativa effekter. Påtalade risker med askåterföring, som nitratutlakning och kolavgång, måste dock undersökas bättre för att utforma återföring på ett sådant sätt att oönskade miljöeffekter undviks.

Effekter av askåterföring till skogsmark i Sverige har studerats i många försök (se t.ex. Persson och Wirén 1996, Westling och Orth 1998, Eriksson 1999, Larsson m.fl. 1999, Nohrstedt och Sikström 1999, Arvidsson 2001, Högbom m.fl. 2001, Ring m.fl. 2002, Persson och Nilsson 2001, Jacobsson 2003, Larsson m.fl. 2003, Westling m.fl. 2004). Endast ett fåtal försök finns emellertid i den del av landet, sydvästra Götaland, där behovet av näringstillförsel till skogsmark bedöms vara som störst. Dessa försök har bl.a. gällt effekter på markkemi (Fransman och Bramryd 1996, Eriksson 1999), markkemi och kvävedynamik (Nohrstedt och Sikström 1999, Högbom m.fl. 2001, Westling m.fl. 2004), vatten i avrinningsområden (Larsson m.fl. 2003), och effekter på planterade hyggen (Arvidsson 2001, Westling m.fl. 2004). De kan därför bara delvis användas för att dra slutsatser om effekter på träd vid behandling i mogna bestånd. I Skogabyförsöket (Persson och Nilsson 2001) liksom i Westling och Orth (1998) tillfördes askan i form av en mycket hård pellets med cementinblandning vilket innebär att slutsatser om hittillsvarande effekter knappast kan jämföras med tillförsel av mer snabbupplösliga produkter som t.ex. härdad/krossad aska. Larsson m.fl. (1999) ingår i skogsstyrelsens uppföljningsprogram. Här visas bl.a. positiva effekter av asktillförsel på barrkemi på två lokaler i det aktuella området.

Effekter på näringsstatus och tillväxt i mogen skog har studerats i ett antal experiment av Skogforsk (Jacobsson 2003). Tillväxten verkar ha ökat på bördiga marker (södra Sverige) och minskat på fattiga marker (norra Sverige). Sänkt tillväxt på fattiga marker kan bero på att nettoimmobiliseringen av kväve kan öka temporärt när pH ökar. För bestånden med ökad tillväxt drog Jacobsson (2003) slutsatsen att tillväxtökningen troligen beror på ökad kväveomsättning i marken, trots avsaknad av effekt på barrens kvävestatus och tendens till förbättrad fosforstatus i granbestånden. Utan data på kväveomsättning i bestånden är detta en tveksam slutsats, inte minst eftersom det finns studier som visar låg P- och K-status i barr i den aktuella sydvästra delen av landet (Aronsson 1985, Thelin m.fl. 1998, Thelin m.fl. 2002a). Jacobsson (2003) påpekar också risken med ökat nitratläckage vid ökad kväveomsättning efter askåterföring.

Den begränsade tillgången på studier i mogen skog, särskilt i södra Sverige och de skilda åsikterna om orsaker till tillväxteffekter och risker för kväve- och kolförluster gör att mer forskning krävs för att dra slutsatser om effekter av askåterföring i södra Sverige. Detta är bakgrunden till föreliggande studie. Syftet med studien är sålunda att förbättra kunskapsläget m a p effekter av askåterföring på barr/bladkemi, tillväxt, markvattenkemi,

samt kol- och kvävedynamik. Utanför den vetenskapligt planerade försöksverksamheten har askbehandling, oftast i kombination med kalk, gjorts på hundratals fastigheter i södra och sydvästra Sverige sedan början av 1990-talet. Här presenteras uppföljning av 23 sådana lokaler samt ytterligare åtta lokaler med någon form av försökuppläggning.

Följande hypoteser formulerades innan projektets start. Tillförsel av vedaska i det aktuella området leder till:

1. Ökat upptag i barr av näringsämnen som befinner sig nära eller under bristnivå
2. Ökad stamtillväxt
3. Minskat snarare än ökat kväveläckage
4. Små eller inga effekter på kolbalansen
5. Ökad alkalinitet (ANC) i avrinnande vatten

2 Material och metoder

2.1 Lokaler

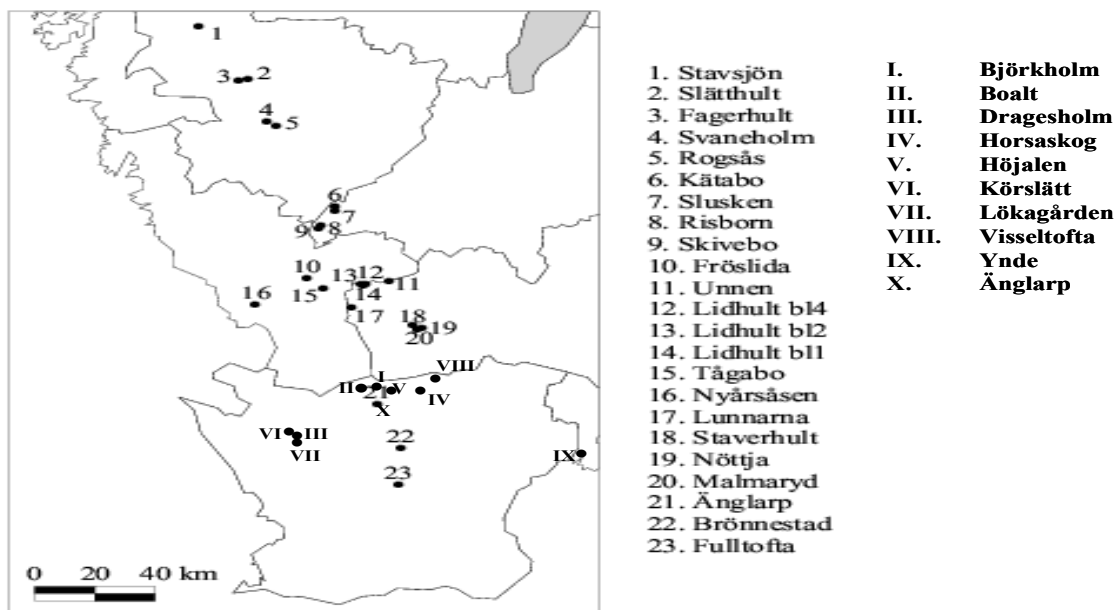
Studien omfattar dels tio boklokaler och dels 23 granlokaler fördelade på följande tre kategorier (figur 1).

1. Fyra befintliga, delvis rapporterade försök i Lidhult, Kronobergs län (Larsson m.fl. 1999), Tågabo i Halland (Larsson m.fl. 1999), samt i Brönnestad (Fransson m.fl. 1999) och Fulltofta (Nihlgård 1997) i Skåne. De olika blocken i Lidhult är så separerade i avstånd och förhållanden att de i denna studie kunde hanteras som tre separata lokaler.
2. Tre försök där det primära syftet varit att undersöka effekter på vattenkvalitet i avrinningsområden på Nyårsåsen (IVL opubl.) och Fröslida (Larsson m.fl. 2003) i Halland och Änglarp i Skåne (Skogsvårdsstyrelsen Södra Götaland 2001).
3. 14 lokaler med mer än fem år gamla askspridningar där tidigare försöksuppläggning saknas, sammanlagt fördelade på Kronobergs län fem st (Unnen, Staverhult, Lunnarna, Nöttja, Malmalyd), Jönköpings län fyra st (Kätabo, Slusken, Risborn, Skivebo) och Västra Götalands län fem st (Slätthult, Fagerhult, Svaneholm, Rogsås and Stavsjön).

De tio boklokalerna fördelar sig på ett befintligt försök i Ynde (Fransman och Bramryd 1996), samt nio lokaler med mer än fem år gamla askspridningar där tidigare försöksuppläggning saknas: Björkholm, Boalt, Dragesholm, Horsaskog, Höjalen, Körslätt, Lökagården, Visseltofta, samt Änglarp.

Granlokalerna i kategori 3 och boklokalerna utom Ynde etablerades enligt följande. Kartunderlag, spridningsinformation etc. för askbehandlade objekt togs fram i samarbete med personal på Skogsvårdsstyrelserna i Södra Götaland, Västra Götaland och Jönköping-Kronoberg.

Efter rekognosering i fält kunde par av kontroll och askbehandling etableras där gräns för spridning med stor säkerhet kunde fastställas, t.ex. där den askade ytan och kontrollytan var skiljda åt av en väg, samt om mark och beståndsförhållandena utöver askspridning var jämförbara.



Figur 1. Granlokalerna (arabiska siffror) ligger mellan latitud 55°00' och 58°03'. Boklokalerna (romerska siffror) ligger i Skåne och Blekinge (Ynde).

Figure 1. Norway spruce sites (arabic numerals) are situated between latitude 55°00' and 58°03'. Beech sites (roman numerals) are situated in the counties Scania and Blekinge (Ynde).

Kraven för likvärdighet var: Askbehandlade och kontrollbestånd inom enskilda par måste ha likvärdig ålder, grundyta, beståndshomogenitet, tidigare markanvändning, markttextur, markttyp, blockighet, markfuktighet, bonitet, topografi, exposition och förekomst av patogener. Ett flertal möjliga objekt fick efter rekognosering och provtagning läggas åt sidan eftersom ett eller flera av kriterierna för likvärdighet inte var uppföljda.

Lokalerna ligger mellan 100-225 m ö h. Medelårstemperatur är 5-8 °C inom det geografiska område i vilket ytorna är belägna och medelårsnederbörd är 713-1061 mm. Deposition av kväve och svavel varierar mellan 13-21 resp. 7-10 kg ha⁻¹ år⁻¹ inom området.

Samtliga lokaler ligger på frisk mark, utom Risborn som har fuktig mark. På granlokalerna saknas i allmänhet fältskiktsvegetation, medan fältskiktet på bokytorna varierar från ört- till gräs- och ristyp. Underliggande berggrund är i huvudsak gnejs. Stenighet i bestånden varierar från medelblockigt till fattigblockigt. Markens textur varierar från grusig till moig morän. Den dominerande texturen är sandig, moig morän. Markttyp är haplic podzol på granytorna, utom Fulltofta som är en cambisol, på bokytorna är det cambisol (FAO). Topografien varierar inom lokalerna men provytorna ligger samtliga på plan mark utan horisontellt rörligt markvatten.

Beståndsålder bedömdes oftast i fält, eftersom det i de flesta fall saknades information om när bestånden etablerats. Vid provtagning år 2003-2005 var granbestånden mellan 40 och 100 år, medel 55 år, och bokbestånden mellan 60 och 110 år, medel 85 år. De flesta bestånd är första eller andra generationens skog. Tidigare markanvändning har i huvudsak varit bete.

Tabell 1. Askor, pannor och bränsle, samt procent oförbränt, Ca, Mg, K och P.

Table 1. Ashes, boiler, fuel, and percentage of not combusted organic material, Ca, Mg, K, and P.

Askproducent	Aska	Panna	Bränsle	Oförbr. ¹	Ca	K	Mg	P
Borås Energi AB	Borås 1996	Plan roster	GROT	5-10	16.9	5.7	2.3	1.3
Borås Energi AB	Borås 1998	Plan roster	GROT	5-10	16.0	5.8	2.2	1.4
Ljungby Eon värme	Ljungby 1995	Trappstegs-roster	bark+spån	3-8	21.0	8.8	2.3	1.4
Ljungby Eon värme	Ljungby 1997	Trappstegs-roster	bark+spån	3-8	22.4	7.7	2.0	1.8
Perstorp AB	Perstorp 1995	CFB ²	bark+spån	2-5	16.2	2.0	2.0	0.4
Skövde Värmeverk AB	Skövde 1996	CFB	GROT	2-5	n.a. ³	n.a.	n.a.	n.a.
StoraEnso Nymölla AB	Nymölla 1990	BFB ⁴	bark m.m. ⁵	2-5	18.9	1.2	2.9	0.5
StoraEnso Nymölla AB	Nymölla 1996	BFB	bark m.m.	2-5	20.7	1.8	5.2	0.9
StoraEnso Nymölla AB	Nymölla 1998	BFB	bark m.m.	2-5	16.0	1.8	5.8	1.2

¹Muntl. uppgifter ²Cirkulerande Fluidiserande Bädd ³Inte analyserat ⁴Bubblande Fluidiserande Bädd

⁵fiberslam, bioslam, bränsleflis, olja

Tabell 2. Granlokaler, behandlingsår, aska och kalk (ton ha⁻¹), doser av Ca, Mg, K och P (kg ha⁻¹).

Table 2. Norway spruce sites, treatm year, ash and lime (Mg ha⁻¹), Ca, Mg, K, and P dose (kg ha⁻¹).

Lokal	År	Aska	dos	Kalk	dos	Ca	K	Mg	P
Stavsjön ¹	1997	Skövde 1996	2	Mg-kalk Uddagård	2	951	114	126	27
Slätthult	1999	Borås 1998	2	Mg-kalk Uddagård	4	1547	116	204	29
Fagerhult	1999	Borås 1998	2	Mg-kalk Uddagård	4	1547	116	204	29
Svaneholm	1997	Borås 1996	2	Mg-kalk Uddagård	2.4	1058	114	140	27
Rogsås	1999	Borås 1998	2	Mg-kalk Uddagård	2	1547	116	204	29
Kätabo	1998	Nymölla 1998	2	Mg-kalk Önnestad	2	934	36	196	23
Slusken	1998	Nymölla 1998	2	Mg-kalk Önnestad	2	934	36	196	23
Risborn	1998	Nymölla 1998	2	Mg-kalk Önnestad	2	934	36	196	23
Skivebo	1998	Nymölla 1998	2	Mg-kalk Önnestad	2	934	36	196	23
Fröslida	1999	Nymölla 1998	2	Ignaberga	2	1024	36	116	23
Unnen	1998	Nymölla 1998	2	Mg-kalk Ignaberga	2	934	36	196	23
Lidhult bl1	1996	Ljungby 1995	2	ingen	0	420	176	46	28
Lidhult bl2	1996	Ljungby 1995	2	ingen	0	420	176	46	28
Lidhult bl4	1996	Ljungby 1995	2	ingen	0	420	176	46	28
Tågabo	1998	Nymölla 1998	2	Ignaberga	2	1024	36	116	23
Nyårsåsen	1997	Nymölla 1996	2	Ignaberga	6	2430	36	116	23
Lunnarna	1996	Nymölla 1996	2	Mg-kalk Ignaberga	2	934	36	196	23
Staverhult	1998	Nymölla 1998	2	Mg-kalk Önnestad	2	934	36	196	23
Nöttja	1998	Nymölla 1998	2	Mg-kalk Önnestad	2	934	36	196	23
Malmaryd	1998	Nymölla 1998	2	Mg-kalk Önnestad	2	934	36	196	23
Änglarp	1999	Nymölla 1998	2	Ignaberga	2	1024	36	116	23
Brönnestad	1995	Perstorp 1995	3	ingen	0	487	60	59	11
Fulltofta	1998	Ljungby 1997	2.5	ingen	0	560	193	50	45

¹Doser för Stavsjön beräknades m.h.a. askanalys från Borås 1996.

Tabell 3. Boklokaler, behandlingsår, aska och kalk, inkl doser (ton ha⁻¹), samt doser av Ca, Mg, K och P (kg ha⁻¹).

Table 3. Beech sites, treatment year, origin and dose of ash and lime (Mg ha⁻¹), and dose of Ca, Mg, K, and P (kg ha⁻¹).

Lokal	År	Aska	dos	Kalk	dos	Ca	K	Mg	P
Björkholm	1997	Nymölla 1996	2	Mg-kalk Ignaberga	2	934	36	196	23
Boalt	1997	Nymölla 1996	2	Mg-kalk Ignaberga	2	934	36	196	23
Dragesholm	1997	Nymölla 1996	2	Mg-kalk Ignaberga	2	934	36	196	23
Horsaskog	1997	Nymölla 1996	2	Mg-kalk Ignaberga	2	934	36	196	23
Höjalen	1997	Nymölla 1996	2	Mg-kalk Ignaberga	2	934	36	196	23
Körslätt	1997	Nymölla 1996	2	Mg-kalk Ignaberga	2	934	36	196	23
Lökagården	1997	Nymölla 1996	2	Mg-kalk Ignaberga	2	934	36	196	23
Visseltofta	1997	Nymölla 1996	2	Mg-kalk Ignaberga	2	934	36	196	23
Ynde	1990	Nymölla 1990	5	ingen	0	947	61	143	24
Änglarp	1999	Nymölla 1998	2	Ignaberga	2	1024	36	116	23

2.2 Askbehandlings

De askor som har tillförts behandlade ytor har producerats på fem olika ställen (tabell 1). Det är i samtliga fall flygaskor, självhårdade, krossade och siktade. I Ynde var dock askan måttligt hårdad vid spridningstillfället. Bränslet har i samtliga fall varit biobränsle; bark, spån, resp. GROT. I Nymöllas panna ingår en liten kvantitet olja, men askan härrör nästan uteslutande från biobränsle. Variationen i koncentrationer av Ca och Mg i askorna var begränsad, men däremot ganska stor för K, med tydligt lägre halter i askor från fluidbäddpannorna. P-koncentrationerna var låga i askorna Nymölla 1990 och Perstorp 1995.

Lokalerna behandlades med aska enbart eller i kombination med kalk under tiden 1990 till och med 1999 (tabell 2 och 3). I genomsnitt har det mellan behandlingstidpunkt och provtagning/mätning gått sju år för granlokalerna och åtta år för boklokalerna. Den vanligaste dosen har varit 2 ton aska + 2 ton Mg-kalk. Tillförseln av de olika ämnena har varit i medel Ca 983 kg ha⁻¹, K 68 kg ha⁻¹, Mg 158 kg ha⁻¹ och P 25 kg ha⁻¹. Variationen har varit liten för P men ganska stor för K, Ca och Mg.

2.3 Försöksuppläggning

Studien är upplagd som parade jämförelser. På varje enskild lokal finns dels en askbehandlad yta och dels en obehandlad kontrollyta, förutom i Fulltofta, Brönnestad och Ynde där använd data är medelvärden av upprepningar av kontroll resp. askbehandling.

Det finns alltså i övrigt inga upprepningar på enskilda lokaler. Replikeringen är istället lokalerna i sig. Observera att för denna studie gäller att resultat från en enstaka lokal inte kan användas för bedömning av behandlingseffekt, det är heller inte tanken med studien. Istället ska materialet ses i sin helhet.

Vid en parad jämförelse är det mycket viktigt att uppnå största möjliga likhet mellan kontroll och behandling inom paren för andra faktorer än just den faktor som undersökningen gäller. Kravet på likvärdighet gäller alltså inom paren. Däremot finns i princip ingen begränsning för hur stora skillnaderna mellan paren får vara för att förutsättningarna för den statistiska analysen ska vara uppfyllda. Generellt kan man säga att ju större variation desto mer generella resultat. Det är dock lämpligt att avgränsa studien, eftersom det kan vara svårt generalisera resultat över alltför stora områden eller vid alltför skiftande förutsättningar, exempelvis kan skillnader i markförutsättningar innebära olika effekt av samma behandling på t.ex. tillväxt.

Eftersom dels lokaler med olika bakgrund har blivit etablerade med olika syften och dels några provytor på lokaler inom kategori 3 har flyttats är dataserierna delvis inkompleta. Det antal replikat för vilka enskilda statistiska analyser är gjorda redovisas i resultatdelen.

2.4 Provtagning

I varje bestånd markerades fem representativa stammar. Undertryckta, flerstammiga och skadade träd undveks liksom träd nära stickväg, beståndskant, etc.. Grundyta mättes med relaskop vid varje träd. Medelgrundytan fick inte variera mellan kontroll och behandling med mer än 10 %.

Jordprover för analys av markkemi togs, under 2004 på granlokaler och under 2005 på boklokaler, med markborr vid tre ställen inom en två meters radie från varje märkt träd. På granlokaler togs prover från humuslagret och från A/E-horisont (blekjord) och B-horisont (rostjord) i mineraljorden. På boklokalerna, vilka saknade granlokalernas tydliga horisontuppdelning, togs prover från 0-10 cm resp. 20-30 cm markdjup. Prover från varje provhål lades ihop till ett sammelprov per horisont för varje provyta. På granlokalerna mättes tjockleken på humus resp. A/E-horisont för varje provhål. I Lidhult och Fulltofta togs proverna vid 16 punkter längs diagonalerna på provytorna. I Brönnestad, Tågabo och Ynde togs prover vid fem, tio resp. tio punkter slumpvis utspridda på varje provyta. I Brönnestad och Ynde slogs proverna från kontroll resp. askbehandlade ytor ihop till ett sammelprov per behandling. I Lidhult, Fulltofta och Tågabo analyserades däremot prover från olika provytor separat. I Tågabo ingår endast prover från en kontroll resp. en askyta i datamaterialet. Vid markprovtagning i Fulltofta och i Lidhult togs separata humusprover för inkubering för att undersöka effekter på potentiell kvävemineralisering.

Jordprover för centrifugering av markvatten för analys av markvattenkemi (potentiellt utlakningsvatten) togs, för lokalerna i kategori 3, vid tre tillfällen år 2004, på våren (april), sommaren (juni), samt hösten (november-december). Vid varje tillfälle togs prover från 50 – 70 cm markdjup i fem gropar grävda vid de markerade träden och lades ihop till ett sammelprov för varje yta. Detsamma gäller boklokalerna, men de provtogs endast vid ett tillfälle, på våren 2005. I Lidhult togs prover vår och sommar 2003 från två gropar på varje yta, d v s sex gropar för kontroll resp. aska. I Fulltofta togs prover med befintliga lysimetrar.

Från fem träd på varje yta på granlokalerna togs årsbarr från sidoskott av den första och den andra ordningen på huvudgrenar riktade mot söder på det sjunde grenvarvet från toppen (via

klättring). Barren samlades in under perioden november-februari under vintern 2003-2004 resp. vintern 2004-2005. Barr från kontroll och behandling inom ett par provtogs vid samma tillfälle.

Bokblad provtogs i augusti 2005 m.h.a. en teleskopstång från fem träd på varje yta på varje boklokal. Bladen klipptes från den mittre till övre delen av kronan.

På granlokaler togs borrhärdar i brösthöjd på 15 träd, och stamdiameter mättes vid samma punkt, i kontroll resp. behandling i varje par för kategori 3 samt i Brönnestad, Fröslida, Nyårsåsen och Änglarp. I Nöttja (10 i ktrl, 15 i aska) och Malmäryd (8 i ktrl, 8 i aska) provtogs färre träd p.g.a. omfattande trädfällning vid stormen i januari 2005, och därmed stora svårigheter vid provtagning. I Rogsås fanns inte fler än 10 lämpliga träd att tillgå i kontroll resp. aska. I Tågabo provtogs 25 träd i ktrl resp. aska. Årsringsbredd från och med minst fem år före behandlingsår fram t o m nutid mättes i fält med en noggrannhet av 0.01 mm med en årsringsmätare.

På boklokalerna togs och mättes borrhärdar på samma sätt som på granlokalerna men endast tio träd provtogs på kontroll resp. askytor.

I Fulltofta och Lidhult var dbh (diameter i brösthöjd, 1.3 m) mätt före askspridning. Dbh-mätningarna upprepades på samtliga kontroll resp. askytor. Tillväxt före behandling på dessa ytor antogs därför vara som på kontrollytorna efter behandling delat med den relativa medeltillväxten på övriga kontrollytorna. Denna relativa medeltillväxt för kontrollytorna definieras här som kvoten årlig dbh-medeltillväxt efter behandlingstidpunkt/årlig dbh-medeltillväxt före behandlingstidpunkt.

2.5 Analyser av fältprover

Färska markprover för centrifugering av markvatten centrifugerades i en Sorvall RC-5B centrifug med 10000 rpm i 40 min. Hastigheten valdes för att motsvara potentiellt läckagevatten. Vattenproverna frystes i väntan på analys av Al, B, Ca, K, Mg och Na på ICP (Inductively Coupled Plasma Spectroscopy, Perkin Elmer, Conn., USA), NH₄, NO₃ och PO₄ på FIA (Flow Injection Analysis), Cl och SO₄ med jonkromatografi (Dionex DX-100), samt totalhalter organiskt C (TOC) och totalhalter av N (TN) på en VCPH-analysator med en TNM-1-modul. pH-mätvärden kan inte anges eftersom den använda pH-mätaren i efterhand visade sig vara felaktig och återstående provmängd inte räckte för upprepad mätning.

Övriga markprover torkades i minst tre dagar i 40 °C. Proverna sållades sedan med 5 mm såll för humusprover och 2 mm såll för mineraljordsprover och delprover extraherades med 100 ml 0.1 M BaCl₂ (10 g humusprover resp. 20 g mineraljordsprover). Proverna analyserades för B, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na och P på ICP och pH mättes. På andra delprover analyserades totalhalter av C och N på en varioMAX_CN (Elementar Analysen Systeme GMBH, Hannau). Humusproverna maldes före analys av C och N. Data korrigerades för vattenhalt upp till 105 °C.

Färska humusprover från granlokalerna extraherades med 5 ml 10 M Na-oxalat/oxalsyra och analyserades för fosfatkoncentration på FIA.

Barr och blad torkades i 40 °C. 1 g av varje prov uppslötts i koncentrerad salpetersyra och värmdes till 125 °C. B, Ca, Cu, K, Mg, P, S och Zn analyserades på ICP. N analyserades i andra delprover efter malning på en LECO CND-1000. Data korrigerades för vattenhalt upp till 85 °C.

2.6 Inkubationsförsök

Först bestämdes 60 % av WHC (vattenhållande kapacitet) i humusprover från Fulltoftas tre kontrolltytor resp. tre asktytor och Lidhults fyra kontrolltytor resp. fyra asktytor: 20 g sållad (5 mm) humus placerades i små krukor med hål i botten i vattenbad där de fick ta upp vatten i 24 timmar. Därefter fick överskottsvatten rinna av i ytterligare 24 timmar och sedan vägdes krukorna. Kvarvarande vatten definierades som 100 % WHC och 60 % WHC beräknades.

Delprover av färsk humus från samtliga kontroll och asktytor i Fulltofta resp. Lidhult. extraherades med 0.2 M KCl och analyserades för NO_3^- och NH_4^+ på FIA.

För inkubationen placerades sållad humus i 100 ml e-kolvar: 90 st för Fulltofta och 120 för Lidhult, dvs 15 st per provyta. Humusen vattnades med destillerat vatten tills den höll 60 % WHC och e-kolvarna placerades i ett konstantrum (24 °C) för inkubation. 60 % av WHC upprätthölls genom vägning och vattning varannan vecka. Tre e-kolvar för varje provyta togs ut för extraktion av humusen med 0.2 M KCl och analys för NO_3^- och NH_4^+ på FIA efter 1, 2, 4, 6 och 9 veckor. Före extraktionen placerades 1 g av varje prov i en kapsel som förslöts och placerades i konstantrummet i ytterligare 24 timmar. Provet analyserades för CO_2 med en GC-auto injektor för att få ett mått på respirationen i provet.

2.7 Externa dataset

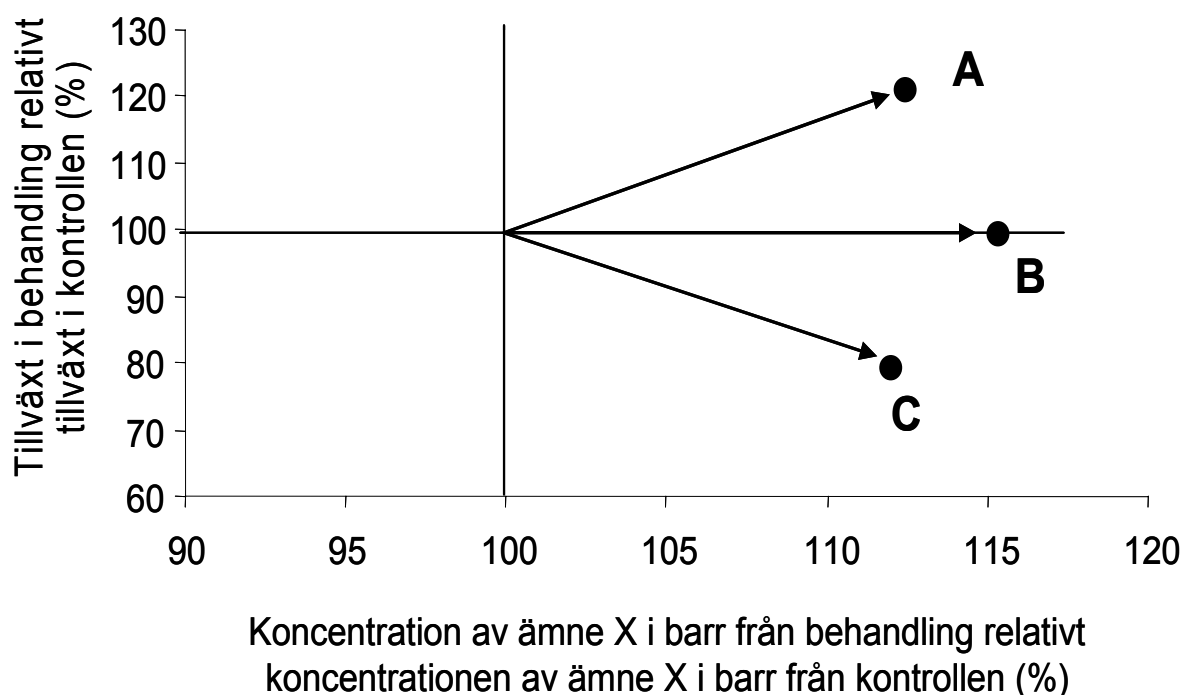
Data på bäckvattenkemi från Nyårsåsen, Fröslida och Änglarp samt lysimetervattenkemi från Tågabo har erhållits från IVL Svenska Miljöinstitutet AB. Data på lysimetervattenkemi för Brönnestad erhöles från Bo Bergkvist, Ekol. Inst., Lunds univ. Datan från Änglarp och Brönnestad gällde dock endast året närmast efter behandling, inte som för andra lokaler fem år eller mer efter behandling, och uteslöts därför från den statistiska analysen. Data på markkemi och lysimetervattenkemi i Ynde är från Bramryd och Fransman (1996).

2.8 Statistik och beräkningar

Effekter av askbehandling på markkemi, markvattenkemi, barr- resp. bladkemi, samt stamtillväxt testades med parat t-test alt. den icke-parametriska motsvarigheten Wilcoxon signed rank test i de fall då förutsättningar för att genomföra parametriskt t-test inte var uppfyllda. Effekter på potentiell kväveminerisering och respiration i humusprover från Fulltofta och Lidhult testades med Repeated measures ANOVA. Samtliga statistiska beräkningar gjordes med SPSS 12.0.

Koncentrationer och kvoter till N i barr och blad jämfördes med bristnivåer och optimala kvoter (Braekke 1994, Linder 1995, Thelin m.fl. 2002a). Med grafisk vektoranalys (figur 2) kan den relativa förändringen i barrkemi för olika ämnen jämföras och diagnos kan underlättas. Metoden har dock flera begränsningar. 1. Den måste användas med stor försiktighet vid samtidig tillförsel av flera ämnen, t.ex. vid askåterföring: Ett ämne X kan felaktigt

diagnosticeras som varande i brist i kontrollen (vektor A enl. fig 2) om koncentrationen har ökat, när det i själva verket är fråga om lyxkonsumtion av X. Detta kan ske om samtidigt tillförsel av ett annat ämne Y häver en brist av ämne Y och därmed ger upphov till en tillväxtökning. För att undvika sådana feltolkningar är det viktigt att också jämföra barrkoncentrationer och näringskvoter med empiriska bristnivåer resp. optimala kvoter (Thelin m.fl. 1999, Thelin m.fl. 2002a). 2. Tillförsel av ett bristämne kan ge upphov till en tillväxtökning utan att man kan mäta någon signifikant effekt på koncentrationen i barr: ökad barrmassa kan späda ut en koncentrationsökning, därför bör man också titta på det totala innehållet i barr av näringsämnet i fråga. 3. Koncentrationsförändringar av näringsämnena med relativt svag koppling till tillväxt, t.ex. mikronäringsämnena, kan felaktigt tolkas som lyxkonsumtion (Thelin m.fl. 1999). Det kan ta mycket lång tid innan brist på mikronäringsämnena ger en försämrad stam- eller barrmassatillväxt. Bristen kan istället innebära t.ex. ett försämrat skydd mot parasiter. I sådana fall kommer troligen effekten av brist, mätt som sämre tillväxt, inte att märkas förrän parasitangreppet sker.



Punkt	X koncentration	Biomassa	Diagnos
A	Ökning	Ökning	X är tillväxtbegränsande (brist)
B	Ökning	Oförändrad	X lagras (lyxkonsumtion)
C	Ökning	Minskning	X är toxiskt

Figur 2. Grafisk vektoranalys visar tillväxteffekt relativt kontroll resp. koncentration av näringsämnen i barr relativt kontroll efter en behandling. Tillväxt- resp. koncentrationseffekt måste vara signifikanta för att metoden ska kunna användas (modifierad efter Swift och Brockley 1994 och Thelin m.fl. 1999).

Figure 2. Graphical vector analysis showing growth response and nutrient concentration response relative to the control after treatment. Growth and concentrations responses must be significant for the method to be valid (modified after Swift and Brockley 1994 and Thelin et al. 1999).

Markens förråd av utbytbara mängder av Ca, K, Mg och P, samt totala mängder av C och N beräknades för 0-40 cm markdjup vilket bedömdes vara det maximala funktionella rotdjupet (Rosengren och Stjernquist 2004). Det är det markdjup från vilket rötterna har tillgång till näringsämnen och i vilket effekter av askbehandling på C- och N-innehåll bedömdes vara aktuella. Det har föreslagits att mykorrhizan kan nå djupare marklager, men nya rön har visat att mykorrhizans fördelning i marken nära följer finrötternas fördelning (Göransson 2006). För att beräkna förråden per hektar användes data på lagertjocklek, jorddensitet och medelvärden för C och N i marken i föreliggande studie. För bok användes medianer istället för medelvärden eftersom C- och N-halterna på två av lokalerna var tydligt högre än på övriga lokaler. Dessa två lokalers värde får då oproportionerligt stor betydelse för ett medelvärde, men inte för en median.

För att beräkna innehåll av C och N i olika trädfraktioner hos gran vid olika tidpunkter beräknades först trädfraktionernas massor m.h.a. biomassafunktioner (Marklund 1988). Samtliga trädfraktioner antogs innehålla 50 % C. N-koncentrationer i barr från enskilda lokaler i föreliggande studie användes för att beräkna N-innehåll såväl i dagsläget som före behandling. För asktytor före behandling användes N-koncentrationer i motsvarande kontroll. För övriga fraktioner användes följande N-koncentrationer: gren 4.5 mg g⁻¹, stam 1.3 mg g⁻¹, stubbrotsystem 0.7 mg g⁻¹, vilka är medelvärden för flera olika försök från en databas framtagen i MISTRA-programmet SUFOR (Stjernquist m.fl., opubl.). För bok beräknades en stambiomassa per ha på 260 m³ på kontrolltytor och 250 m³ på asktytor. Biomassan i grenar resp. stubbrotsystem antogs vara 50 % av stambiomassan. Följande N-koncentrationer användes gren 5.2 mg g⁻¹, stam 1.3 mg g⁻¹, stubbrotsystem 1.3 mg g⁻¹.

Förnamängd i granskog beräknades med en funktion ($r^2=0.96$) skapad m.h.a. data från Thelin m.fl. (2002b) och Persson och Nilsson (2001):

$$\text{förna (kg ha}^{-1} \text{ år}^{-1}) = 0.0249 * \text{trädmassa (kg ha}^{-1}) + 689.23$$

Totalt N-läckage beräknades genom att uppmätta markvattenkoncentrationer av N multiplicerades med total beräknad avrinning på 500 mm år⁻¹ fördelad på vår (mars-maj) 200 mm, sommar (juni-september) 100 mm och höst (oktober-december) 200 mm.

För att beräkna ekonomin i askåterföring beräknades tillväxteffekten för ett genomsnittligt bestånd med 500 stammar ha⁻¹ och en medelstamdbh på 25 cm som askas vid en beståndsålder på 50 år och avverkas vid 80 år (ingen gallring). Tillväxteffekten av askåterföring enligt figur X antogs kvarstå fram till slutavverkning. Tillväxthastigheterna på 8.3 och 9.4 m³sk (m³ skog) ha⁻¹ år⁻¹ för kontroll resp. för askbehandlade bestånd är normala för gran i åldersklassen 50-80 år i södra Sverige (data från riksskogstaxeringen i Thelin 2000). Stambiomassa (kg) beräknades enligt Marklund (1988) med stamdimeter som indata. Konvertering till volym gjordes med en beräknad torrdensitet på 0.4 kg dm⁻³. Vid slutavverkning antogs 75 % sågtimmer till ett pris på 450 kr m³fub (m³ fast under bark), 25 % massaved till ett pris på 250 kr m³fub och kostnad för avverkning + skotning på 65 kr m³fub, vilket ger netto 252 kr m⁻³sk (1 m³fub = 1.2 m³sk och dagens penningvärdet). Kostnaden för askåterföringen, antogs vara 500 kr ha⁻¹ och den diskonterades fram till slutavverkning med en ränta på 3 %.

3 Resultat

3.1 Markkemi

Granlokalernas askytor hade jämfört med kontroll i humusen högre Ca- och Mg-koncentrationer, basmättnad, CEC och pH, samt tendens till högre P-koncentration; i E-horisont högre Ca- och Mg-koncentrationer, basmättnad och BC/Al-kvot, samt tendens till lägre Al-koncentration; och i B-horisont högre Mg-koncentration och BC/Al-kvot, samt tendens till högre Ca-koncentration (tabell 4).

Tabell 4. Tabell 4. Koncentrationer av Al, Ca, K och Mg (mg g^{-1}), pH, basmättnad (%), CEC (mmolc g^{-1}) och BC/Al (molkvot) (BaCl_2) och P (NaOx) i markprover från granlokaler. Medelskillnad är medel av skillnaderna mellan kontroll och askbehandling. Parat t-test eller Wilcoxon signed rank test, $n=19$.

Table 4. Table 4. Concentrations of Al, Ca, K, and Mg (mg g^{-1}), base saturation (%), CEC (mmolc g^{-1}), and BC/Al (molar ratio) (BaCl_2) and P (NaOx) in soil samples from Norway spruce sites. Mean difference is the mean of the differences between treatment and control. Paired T-test or Wilcoxon signed rank test. $n=19$.

Skikt	Element	Kontroll		Aska		Medelskillnad	Std	p
		Medel	Std	Medel	Std			
Humus	Al	0.322	0.41	0.111	0.167	-0.211	0.399	<0.001
	Ca	1.67	1.19	5.05	2.41	3.38	2.90	<0.001
	K	0.449	0.115	0.479	0.139	0.030	0.118	0.278
	Mg	0.506	0.208	0.812	0.296	0.305	0.335	<0.001
	P	0.011	0.025	0.028	0.053	0.017	0.053	0.082
	pH(BaCl_2)	2.59	0.245	3.20	0.387	0.606	0.540	<0.001
	BS	76.7	16.9	92.9	7.64	16.2	16.1	<0.001
	CEC	0.187	0.076	0.356	0.128	0.169	0.165	<0.001
E	Al	0.213	0.077	0.195	0.080	-0.018	0.045	0.096
	Ca	0.054	0.042	0.119	0.078	0.064	0.063	<0.001
	K	0.026	0.007	0.026	0.008	0.0003	0.008	0.896
	Mg	0.018	0.011	0.033	0.015	0.015	0.016	<0.001
	pH(BaCl_2)	3.23	0.199	3.26	0.156	0.037	0.200	0.107
	BS	14.6	7.61	26.1	11.8	11.5	8.58	<0.001
	CEC	0.038	0.011	0.047	0.035	0.010	0.038	0.469
	BC/Al	0.387	0.289	0.799	0.596	0.411	0.412	<0.001
B	Al	0.213	0.063	0.218	0.074	0.004	0.070	0.791
	Ca	0.026	0.011	0.036	0.024	0.010	0.023	0.084
	K	0.012	0.004	0.014	0.005	0.001	0.005	0.346
	Mg	0.006	0.001	0.009	0.004	0.003	0.004	0.002
	pH(BaCl_2)	4.04	0.093	4.05	0.113	0.011	0.112	0.685
	BS	7.25	2.45	8.55	2.48	1.30	3.70	0.143

CEC	0.039	0.016	0.042	0.017	0.003	0.016	0.488
BC/Al	0.096	0.040	0.125	0.048	0.029	0.059	0.044

Tabell 5. Tabell 5. Koncentrationer av Al, Ca, K och Mg (mg g^{-1}), pH, basmättnad (%), CEC (mmolc g^{-1}) och BC/Al (molvot) (BaCl_2) i markprover från boklokaler. Medelskillnad är medel av skillnaderna mellan mellan kontroll och askbehandling. Parat t-test $n=10$.

Table 5. Table 5. Concentrations of Al, Ca, K, and Mg (mg g^{-1}), base saturation (%), CEC (mmolc g^{-1}), and BC/Al (molar ratio) (BaCl_2) in soil samples from Beech sites. Mean difference is the mean of the differences between treatment and control. Paired t-test $n=10$.

Skikt	Element	Kontroll		Aska		Medelskillnad	Std	p
		Medel	Std	Medel	Std			
0-10 cm	Al	0.241	0.062	0.229	0.116	-0.012	0.096	0.710
	Ca	0.158	0.190	0.357	0.409	0.199	0.272	0.046
	K	0.058	0.038	0.052	0.054	-0.006	0.023	0.422
	Mg	0.033	0.029	0.052	0.052	0.019	0.029	0.070
	pH(BaCl_2)	3.31	0.21	3.46	0.17	0.15	0.17	0.022
	BS	23.0	12.0	35.0	20.3	11.9	15.8	0.041
	CEC	0.040	0.012	0.044	0.023	0.004	0.018	0.499
	BC/Al	0.58	0.38	1.18	1.08	0.60	0.98	0.105
20-30 cm	Al	0.142	0.069	0.144	0.047	0.002	0.050	0.902
	Ca	0.016	0.011	0.056	0.097	0.004	0.091	0.196
	K	0.012	0.009	0.012	0.010	0	0.005	0.889
	Mg	0.005	0.003	0.010	0.012	0.005	0.010	0.153
	pH(BaCl_2)	4.17	0.12	4.15	0.13	-0.02	0.10	0.610
	BS	9.17	2.11	15.2	14.6	5.99	13.8	0.204
	CEC	0.017	0.007	0.020	0.009	0.004	0.006	0.098
	BC/Al	0.16	0.05	0.39	0.68	0.23	0.67	0.342

Boklokalernas asktytor hade jämfört kontroll i 0-10 cm-skiktet högre Ca-koncentration, pH och basmättnad, samt tendens till högre Mg-koncentration; och i 20-30 cm-skiktet tendens till högre CEC (tabell 5). Effekterna i det ytliga marklagret i bokskog var likvärdiga med effekterna i granskogens E-horisont, även om baskatjonkoncentration och basmättnad var högre än i granskogens E-horisont. Effekterna i bokskogens 20-30 cm skikt är jämförbara med effekterna i B-horisonten i granskogen.

Med askan tillfördes ca 2.5 gånger mer Ca, 1.6 gånger mer Mg, 1.4 gånger mer K och ungefär lika mycket P som fanns växttillgängligt i marken (tabell 6). Kalktillförseln innebar dock att sammanlagt tillfördes 7.2 gånger mer Ca och 3.2 gånger mer Mg än vad som fanns växttillgängligt. Aska+kalk-tillförseln motsvarade vittring + deposition under 102 år för Ca, 30 år för Mg, nio år för K och 46 år för P. Omvänt innebär skördeförsluster utan askåterföring att det krävs ett nettotillskott från vittring + deposition enligt tabell 6 under 36 år för Ca, 15 år för Mg, nio år för K och 46 år för P för att kompensera för skördeförslusterna.

Det fanns inga skillnader i C- och N-koncentration i marken mellan kontroll och aska (tabell 7). På granlokalerna fanns det dock tendens till lägre C-halt i humusen på askytorna än på kontroll-

ytorna och på boklokalerna fanns tendens till högre N-halt i det ytliga marklagret på askytorna än på kontrollytorna. C/N-kvoterna var genomgående mycket lika hos kontroll och askbehandling.

Tabell 6. *Tabell 6. Utbytbara (växttillgängliga) mängder per ha av baskationer (BaCl₂-extraherbart) och P (Na-oxalat-extraherbart) i de övre 40 cm av marken på granlokaler, årliga tillskott av näring via vittring och deposition, samt tillskott från aska och kalk (Glimtoft 2005).*

Table 6. *Table 6. Exchangeable (plant available) amounts per ha of base cations (BaCl₂ extractable) and P (Na-oxalate extractable) in the upper 40 cm of the soil profile on Norway spruce plots, inputs from weathering and deposition, and amounts added with wood-ash and lime (Glimtoft 2005).*

	Ca	Mg	K	P
Utbytbart (kg ha ⁻¹)	156	50	56	21.5 ¹
Vittring (kg ha ⁻¹ yr) ²	2	1	1.5	0.4
Deposition (kg ha ⁻¹ yr) ³	4	2	2	0.1
Aska 2 tons ha ⁻¹ (kg ha ⁻¹)	395	80	36	23
Kalk 2 tons ha ⁻¹ (kg ha ⁻¹)	732	80	-----	-----

¹Data för mineraljord (Fransson et al. 1999)

²Akselsson m.fl. 2006

³SMHI 2005

Tabell 7. *Tabell 7. C och N (mg g⁻¹), samt C/N i markprover. Medelskillnad är medel av skillnaderna mellan mellan kontroll och askbehandling. Parat t-test, n=19 för gran och n=10 för bok.*

Table 7. *Table 7. C, N and C/N in the soil samples. Mean difference is the mean of the differences between treatment and control. Elements are given in mg g⁻¹ dry mass. Paired T-test. n=19 for spruce and n=10 for beech.*

Bestånd	Skikt	Element	Kontroll		Aska		Medelskillnad	Std	p
			Medel	Std	Medel	Std			
Gran	Humus	C	455	41.0	438	47.0	-17.2	40.4	0.080
		N	14.8	1.46	14.3	1.18	-0.507	1.76	0.226
		C/N	30.9	4.19	30.6	3.12	-0.314	4.06	0.741
Gran	A	C	36.1	13.9	36.3	16.1	0.230	14.5	0.945
		N	1.75	0.816	1.70	0.719	-0.052	0.78	0.774
		C/N	22.6	7.10	22.7	7.70	0.151	8.22	0.937
Gran	B	C	31.7	11.2	31.3	9.94	-0.336	8.86	0.871
		N	1.50	0.518	1.55	0.628	0.046	0.469	0.674
		C/N	22.3	7.19	21.4	5.27	-0.961	5.27	0.436
Bok	0-10 cm	C	55.3	37.3	73.7	62.5	18.4	35.1	0.131
		N	2.32	1.25	3.39	2.86	1.07	1.86	0.103
		C/N	23.7	4.97	23.3	4.94	-0.350	4.23	0.800
Bok	20-30 cm	C	23.9	8.33	26.4	11.8	2.46	6.43	0.256
		N	1.08	0.349	1.22	0.524	0.143	0.260	0.116
		C/N	22.3	2.75	22.1	4.35	-0.279	4.66	0.854

3.2 Barr- och bladkemi

Koncentrationer och kvoter till N i barr av Ca, P, S och Zn var högre på askytorna än på kontrollytorna (tabell 8). På tolv kontrolltytor och på sju asktytor var P-koncentrationen under en bristnivå på 1.2 mg g^{-1} (Braekke 1994). På tio kontrolltytor och på tio asktytor var N-koncentrationen under en bristnivå på 12 mg g^{-1} och K-koncentrationen var under bristnivån 3.5 mg g^{-1} på fem av kontrollytorna, men på ingen av askytorna (Braekke 1994). Övriga ämnen låg genomgående över bristnivå inkl Ca, S och Zn. Ca-koncentrationerna var 3.4 - 16.3 gånger högre än bristnivån 0.4 mg g^{-1} . På tio kontrolltytor och på fem asktytor var P/N under den optimala kvoten 10 % (Linder 1995).

I bokblad var K-koncentrationen samt kvoterna K/N och S/N lägre och Zn-koncentrationen samt Zn/N tenderade att vara lägre på asktytor än på kontrolltytor. Inga koncentrationer eller kvoter var högre på asktytor än på kontrolltytor.

Tabell 8. Tabell 8. Elementkoncentrationer (Ca, K, Mg, P, N och S i mg g^{-1} ts och B, Cu och Zn i $\mu\text{g g}^{-1}$ ts) och kvoter till N (%) i granbarr. Medelskillnad är medel av skillnaderna mellan kontroll och askbehandling. Parat t-test, n=22.

Table 8. Table 8. Element concentrations (Ca, K, Mg, P, N, and S in mg g^{-1} dry mass and B, Cu, and Zn in $\mu\text{g g}^{-1}$ dry mass) and ratios to N (%) in needles. Mean difference is the mean of the differences between treatment and control. Paired t-test, n=22.

Element	Kontroll		Aska		Medelskillnad	Std	p
	Medel	Std	Medel	Std			
B	16.7	3.56	16.8	3.60	0.105	4.69	0.917
Ca	2.37	0.691	3.96	1.12	1.59	1.13	<0.001
Cu	2.32	0.312	2.40	0.364	0.082	0.338	0.266
K	4.66	1.15	5.06	1.00	0.396	1.18	0.130
Mg	1.13	0.237	1.14	0.175	0.012	0.222	0.795
N	12.2	1.23	12.3	1.06	0.048	0.761	0.769
P	1.27	0.273	1.48	0.336	0.206	0.281	0.002
S	0.725	0.094	0.785	0.112	0.061	0.0983	0.009
Zn	24.0	5.61	35.6	11.1	11.6	13.3	<0.001
B/N	0.137	0.025	0.138	0.026	0.001	0.040	0.887
Ca/N	19.5	6.21	32.8	10.4	13.3	10.4	<0.001
Cu/N	0.019	0.002	0.020	0.003	0.001	0.003	0.240
K/N	38.7	10.9	41.9	9.37	3.23	10.54	0.166
Mg/N	9.31	2.01	9.43	1.53	0.119	2.03	0.785
P/N	10.4	1.94	12.2	2.77	1.79	2.40	0.002
S/N	5.96	0.751	6.47	0.968	0.515	0.937	0.042
Zn/N	0.197	0.046	0.3297	0.105	0.099	0.121	<0.001

Tabell 9. Tabell 9. Elementkoncentrationer (Ca, K, Mg, P, N och S i mg g^{-1} ts och B, Cu och Zn i $\mu\text{g g}^{-1}$ ts) och kvoter till N (%) i bokblad. Medelskillnad är medel av skillnaderna mellan kontroll och askbehandling. Parat t-test, $n=10$.

Table 9. Table 9. Element concentrations (Ca, K, Mg, P, N, and S in mg g^{-1} dry mass and B, Cu, and Zn in $\mu\text{g g}^{-1}$ dry mass) and ratios to N (%) in beech leaves. Mean difference is the mean of the differences between treatment and control. Paired t-test, $n=10$.

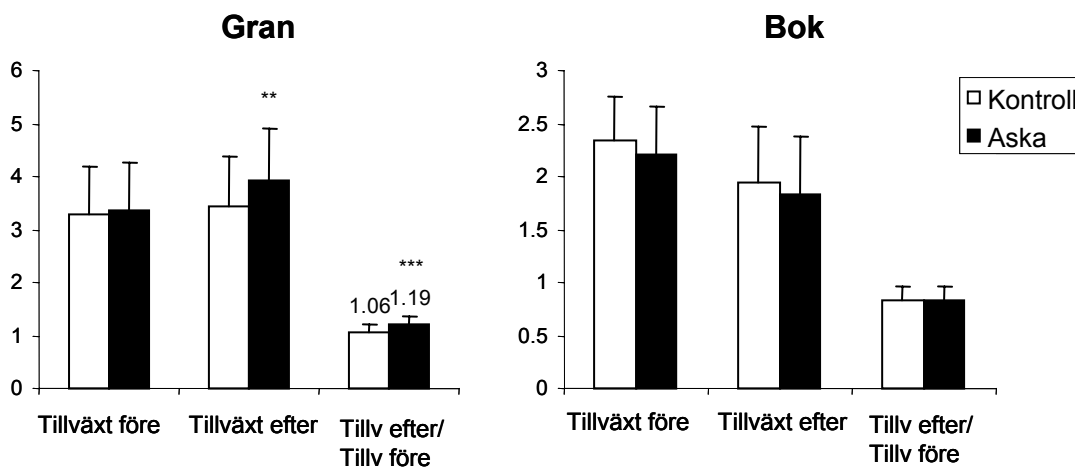
Element	Kontroll		Aska		Medelskillnad	Std	p
	Medel	Std	Medel	Std			
B	24.6	6.32	24.2	6.60	0.415	8.29	0.878
Ca	7.29	3.73	7.77	1.76	-0.486	4.51	0.741
Cu	6.35	1.26	5.85	1.04	0.504	1.66	0.362
K	7.95	0.861	6.37	1.13	1.58	1.20	0.002
Mg	1.19	0.457	1.21	0.186	-0.020	0.530	0.905
N	23.2	2.28	22.9	1.95	0.315	2.73	0.724
P	1.13	0.155	1.15	0.241	-0.022	0.236	0.771
S	1.05	0.121	1.10	0.088	-0.051	0.155	0.327
Zn	26.2	6.06	21.4	3.18	4.72	6.69	0.053
B/N	0.106	0.028	0.106	0.028	0.000	0.035	0.979
Ca/N	31.8	16.4	34.4	9.73	-2.61	19.6	0.684
Cu/N	0.027	0.005	0.025	0.004	0.002	0.006	0.353
K/N	34.3	3.02	27.7	3.91	6.60	4.11	0.001
Mg/N	5.11	1.91	5.30	0.917	-0.190	2.32	0.801
P/N	4.87	0.560	5.05	1.15	-0.184	1.01	0.579
S/N	4.51	0.263	4.80	0.370	-0.299	0.320	0.016
Zn/N	0.114	0.028	0.094	0.014	0.020	0.034	0.095

3.3 Tillväxt och näringsbegränsning

Tillväxten hos gran var 14 % högre efter askåterföring (figur 3). Om Lidhult och Fulltofta exkluderas var tillväxteffekten 12 % och signifikant ($p<0.014$). Jämfört tillväxt före behandling hade tillväxten ökat med 19 % på askbehandlade ytor och med 6 % på kontrolltytor. Dbh var efter behandling på granlokaler 279 mm i kontrollen (std 57 mm) och 284 mm (std 57 mm) på asktytor och på boklokaler 346 mm i kontroll (std 44 mm) och 341 mm i aska (std 52). Det fanns ingen skillnad i dbh varken före eller efter behandling hos varken gran eller bok.

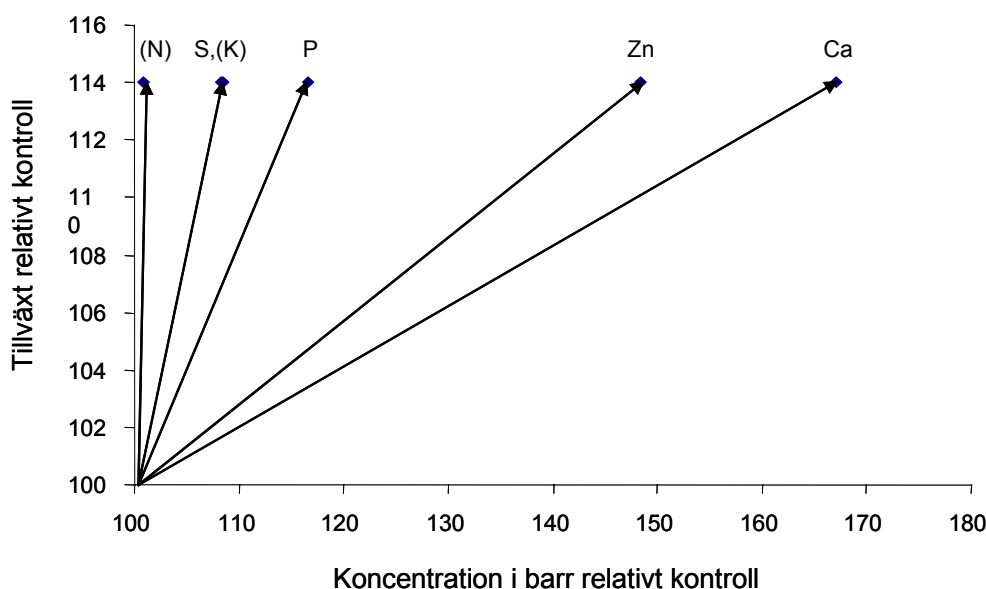
Grafisk vektoranalys av förändringar i tillväxt och koncentrationer av näringsämnen i barr (figur 4) indikerade brist på Ca, Zn, P och S hos gran före behandling. Av dessa ämnen låg Ca och Zn dock långt över bristnivåer. Oförändrad koncentration av ett ämne som inte tillförts, i detta fallet N, bör enligt Valentine och Allen (1990) tolkas som att det finns tillräckligt av ämnet i träden. Men N låg i flera fall under bristnivå. För bok gjordes ingen vektoranalys eftersom tillväxteffekt saknades.

Den relativa tillväxten var korrelerad med barrens P-koncentration, men inte med N-koncentration (figur 5). Korrelationen var starkare för kontrollytorna än för askytorna.



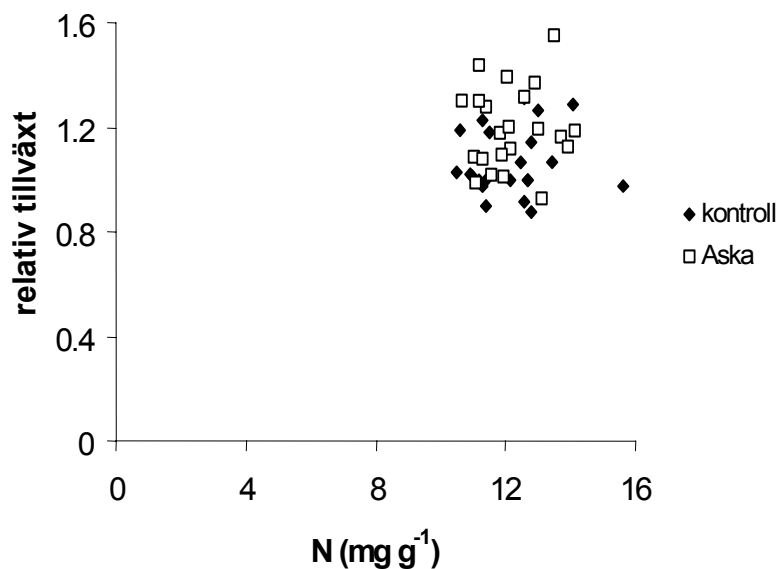
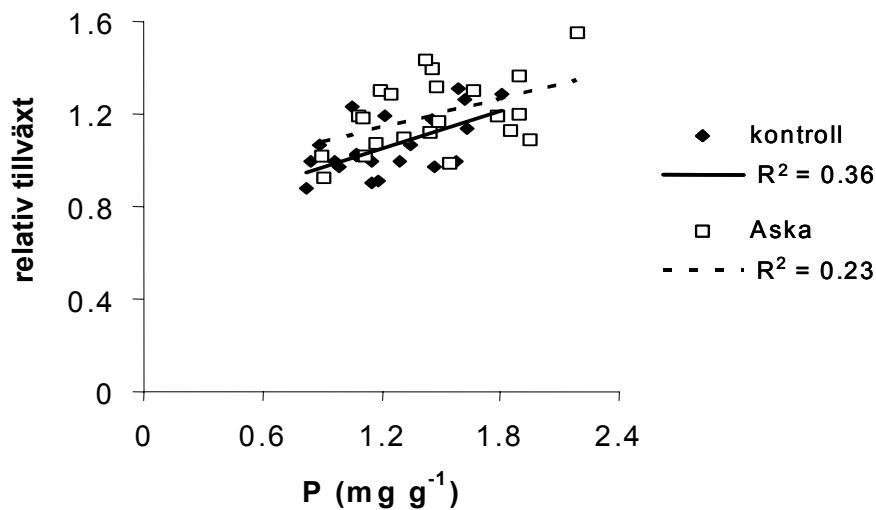
Figur 3. Årlig tillväxt mätt som ökning av dbh (mm år^{-1}) före och efter askäterföring samt kvoten tillväxt efter/tillväxt före behandling på gran- ($n=23$) och bok- ($n=10$) lokaler. Felstaplar visar standardavvikelse och stjärnor visar signifikant skillnad mellan kontroll och aska. Observera olika skalor för gran och bok.

Figure 3. Annual growth measured as dbh increase (mm yr^{-1}) before and after ash treatment and the ratio growth after/growth before treatment on Norway spruce ($n=23$) and beech ($n=10$) sites. Error bars show standard deviation and stars show significant difference between treatments. Observe the different scales for spruce and beech.



Figur 4. Effekt av askäterföring på koncentrationer av näringsämnen i barr och dbh-tillväxt relativt kontroll (100, 100). N och K, för vilka signifikant effekt jmf kontroll saknas, är medtagna av jämförelseskäl.

Figure 4. Effects of wood ash addition on needle nutrient concentrations and growth relative to the control. N and K are included for comparison although they show no differences between treatment and control.



Figur 5. Korrelation mellan barrns P-koncentration (överst) resp. barrns N-koncentration (underst) och relativ tillväxt (tillväxt efter/tillväxt före) hos kontroll och askbehandling. R^2 anger förklaringsgrad, d v s hur stor del av variationen i relativ tillväxteffekt som kan förklaras av variationen i P-koncentration. Korrelation saknas mellan barrns N-koncentration och relativ tillväxt (tillväxt efter/tillväxt före) hos kontroll resp. askbehandling.

Figure 5. Correlation between needle P concentration (above) or needle N concentration (below) and relative growth rate (growth after/growth before treatment) in control and ash treatments. R^2 shows the degree of explanation, i. e. how much of the variation in relative growth rate that can be explained by the variation in P concentration. There were no significant correlations between needle N concentration and relative growth rate.

Tabell 10. Elementkoncentrationer (mg l^{-1}), ANC (mg l^{-1}), och BC/Al (molkvot) i markvatten (centrifugat) på 50-70 cm djup på granlokaler. Medelskillnad är medel av skillnaderna mellan kontroll och askbehandling. Parat t-test eller Wilcoxon signed rank test.

Table 10. Element concentrations (mg l^{-1}), ANC (mg l^{-1}), and BC/Al (molar ratio) in soil water (centrifugates) from 50-70 cm soil depth on Norway spruce sites. Mean difference is the mean of the differences between treatment and control. Paired T-test or Wilcoxon signed rank test.

Tidpunkt	Element	Kontroll		Aska		Medelskillnad	Std	p
		Medel	Std	Medel	Std			
Vår (n=16)	Al	1.077	1.839	0.872	1.125	-0.205	0.910	0.469
	Ca	1.627	1.408	1.976	1.324	0.348	1.093	0.222
	Cl	14.10	9.294	12.99	6.776	-1.116	8.395	0.615
	K	1.897	1.459	1.771	1.272	-0.126	1.399	0.768
	Mg	1.251	0.622	1.517	0.676	0.266	0.478	0.042
	Na	10.32	5.923	8.763	4.166	-1.558	4.964	0.228
	NH ₄	0.131	0.119	0.095	0.060	-0.036	0.091	0.296
	NO ₃	0.555	1.697	0.414	1.178	-0.164	0.538	0.884
	SO ₄	4.491	1.865	5.218	3.124	0.727	1.996	0.180
	TN	2.840	3.596	1.790	1.671	-1.050	2.772	0.455
	TOC	17.10	12.03	12.72	5.589	-4.382	9.929	0.112
	ANC	-0.019	0.070	-0.041	0.083	-0.023	0.083	0.309
	BC/Al	9.849	12.35	14.53	19.39	4.682	20.23	0.362
Sommar (n=15)	Al	0.751	0.692	0.719	1.050	-0.032	0.826	0.884
	Ca	1.663	0.686	2.494	1.296	0.830	1.235	0.008
	Cl ¹	13.63	5.249	13.83	5.362	0.205	5.036	0.881
	K	1.486	0.962	1.618	1.109	0.132	1.322	0.704
	Mg	1.185	0.555	1.728	0.767	0.543	0.657	0.006
	Na	8.997	3.111	9.952	3.124	0.955	3.159	0.261
	NH ₄	0.098	0.141	0.130	0.178	0.032	0.135	0.557
	NO ₃	0.359	0.724	0.545	1.270	0.185	0.565	0.960
	SO ₄	3.983	1.683	5.323	2.474	1.339	1.518	0.006
	TN	1.137	0.806	1.437	1.430	0.305	0.941	0.265
	TOC	11.22	8.399	10.21	3.767	-1.012	8.409	0.917
	ANC	-0.017	0.086	0.009	0.055	0.026	0.088	0.299
	BC/Al	17.99	33.49	16.98	17.04	-1.009	38.60	0.288
Höst (n=20)	Al	0.680	0.477	0.523	0.363	-0.157	0.391	0.089
	Ca	1.463	0.794	2.221	1.102	0.758	0.878	0.001
	Cl	14.44	5.271	13.07	4.357	-1.371	5.476	0.277
	K	1.238	0.852	1.392	0.720	0.155	0.991	0.494
	Mg	1.319	0.592	1.689	0.754	0.370	0.632	0.017
	Na	9.754	3.729	8.499	3.149	-1.254	4.053	0.478
	NH ₄	0.083	0.077	0.121	0.090	0.038	0.091	0.079
	NO ₃	0.254	0.326	0.355	0.437	0.101	0.423	0.299
	SO ₄	3.444	1.790	3.928	2.169	0.484	1.560	0.182
	TN ¹	1.218	0.420	1.632	0.881	0.414	0.908	0.119
	TOC	10.70	3.221	10.81	3.247	0.109	4.614	0.969
	ANC	0.004	0.051	0.025	0.057	0.022	0.056	0.100
	BC/Al	7.857	7.209	17.74	20.83	9.887	20.55	0.003

3.4 Markvattenkemi

På granlokalerna var följande parametrar förhöjda i markvatten på asktytor jämfört kontroll (tabell 10): Mg-koncentrationen på våren, koncentrationerna av Ca, Mg och SO₄ på sommaren, samt koncentrationerna av Ca och Mg, och BC/Al-kvoten på hösten. Det fanns också tendenser till lägre Al-koncentration, högre NH₄-koncentration och högre ANC på askytorna på hösten. Det fanns inga skillnader i NO₃-koncentration, TN (total N-koncentration), eller TOC (total koncentration av organiskt C) vid något av mättillfällena. TOC är här likvärdigt med DOC (löst organiskt kol).

På bokytorna var TN lägre i markvatten från askytorna än i vatten från kontrollytorna (tabell 11). Det fanns också tendenser till lägre NO₃-koncentration och högre SO₄-koncentration i vatten från askytorna. Det fanns inga skillnader i baskatjonkoncentrationer, ANC, eller pH.

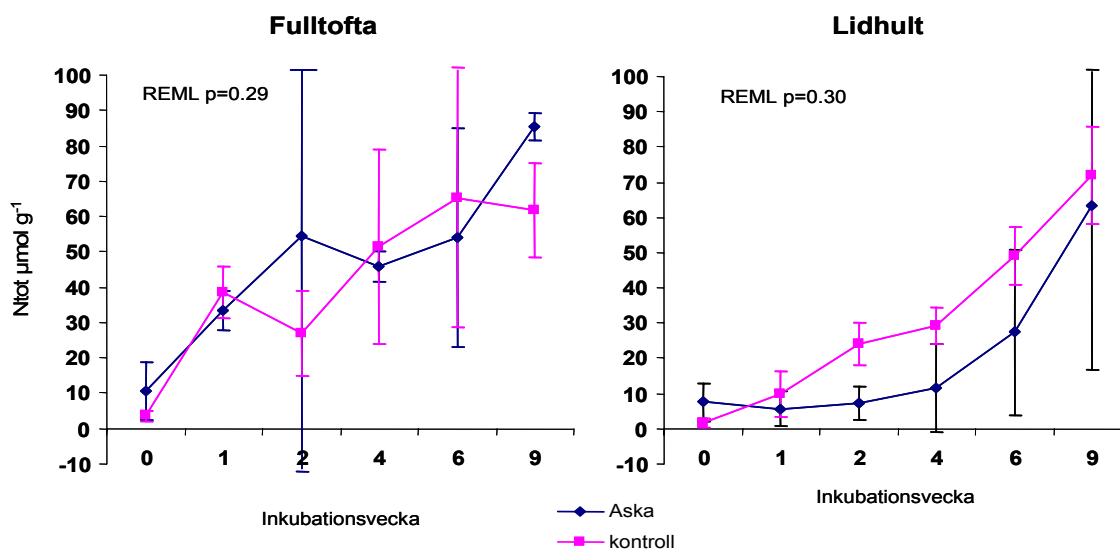
Tabell 11. Elementkoncentrationer (mg l⁻¹), ANC (mg l⁻¹), och pH i markvatten (centrifugat) på 50-70 cm djup på boklokaler. Medelskillnad är medel av skillnaderna mellan kontroll och askbehandling. Parat t-test, n=10.

Table 11. Element concentrations (mg l⁻¹), ANC (mg l⁻¹), and pH in soil water (centrifugates) from 50-70 cm soil depth on beech sites. Mean difference is the mean of the differences between treatment and control. Paired T-test, n=10.

Element	Kontroll		Aska		Medelskillnad	Std	p
	Medel	Std	Medel	Std			
Al	1.27	1.27	0.820	0.352	0.447	1.07	0.217
Ca	3.59	3.08	3.35	1.61	0.240	2.29	0.749
Cl	16.3	7.35	15.4	5.29	0.896	6.33	0.665
K	2.36	1.96	1.72	0.843	0.644	1.79	0.284
Mg	2.04	1.25	1.94	0.902	0.090	0.557	0.620
Na	9.99	3.52	9.85	4.07	0.145	4.06	0.912
NH ₄ -N	0.431	0.409	0.425	0.480	0.006	0.240	0.934
NO ₃ -N	5.60	7.67	3.07	3.72	2.53	4.28	0.094
SO ₄	3.05	0.976	4.02	1.30	-0.968	1.54	0.078
TN	11.2	9.09	7.40	4.59	3.44	4.75	0.046
TOC	8.30	2.38	6.85	1.32	1.30	2.09	0.079
ANC	-0.176	0.256	-0.07316	0.092	-0.103	0.186	0.112
pH	4.70	0.228	4.72	0.246	-0.022	0.238	0.776

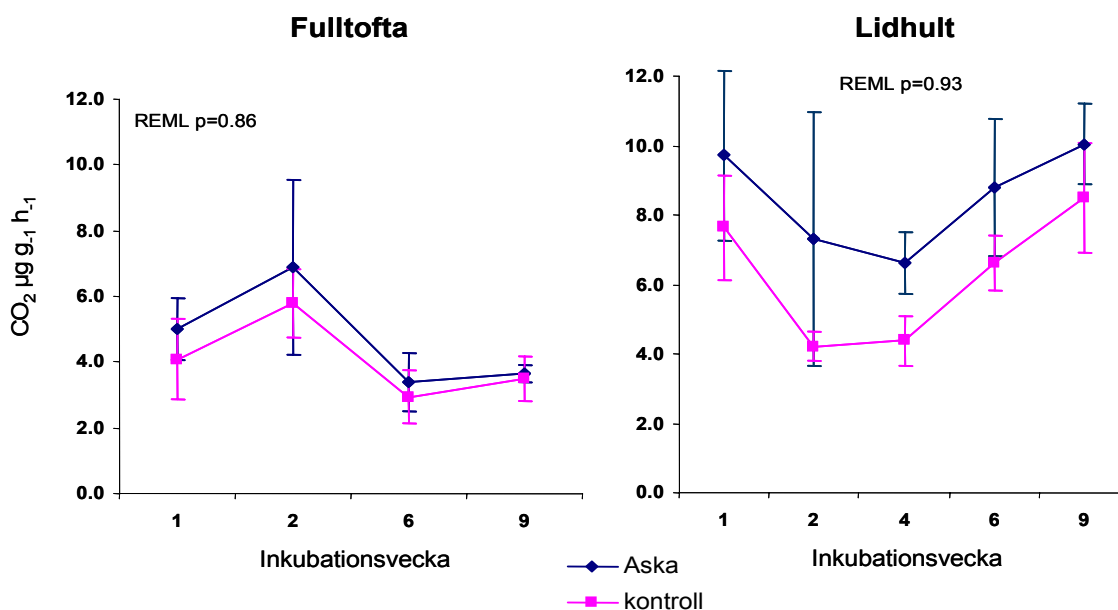
3.5 Potentiell mineralisering

Resultat från inkubationsförsöken indikerade små eller inga skillnader i potentiell N-mineralisering mellan ask- och kontrolltytor i både Fulltofta och Lidhult (figur 6), mätt som summan av NH₄ och NO₃. Respirationen var opåverkad i Fulltofta men bitvis förhöjd i Lidhult (figur 7). Nitrifikationen var förhöjd på askytorna i såväl Fulltofta som Lidhult och svarande mot detta var NH₄-koncentrationen efter hand lägre i inkuberad humus från askytorna (figur 8 och 9).



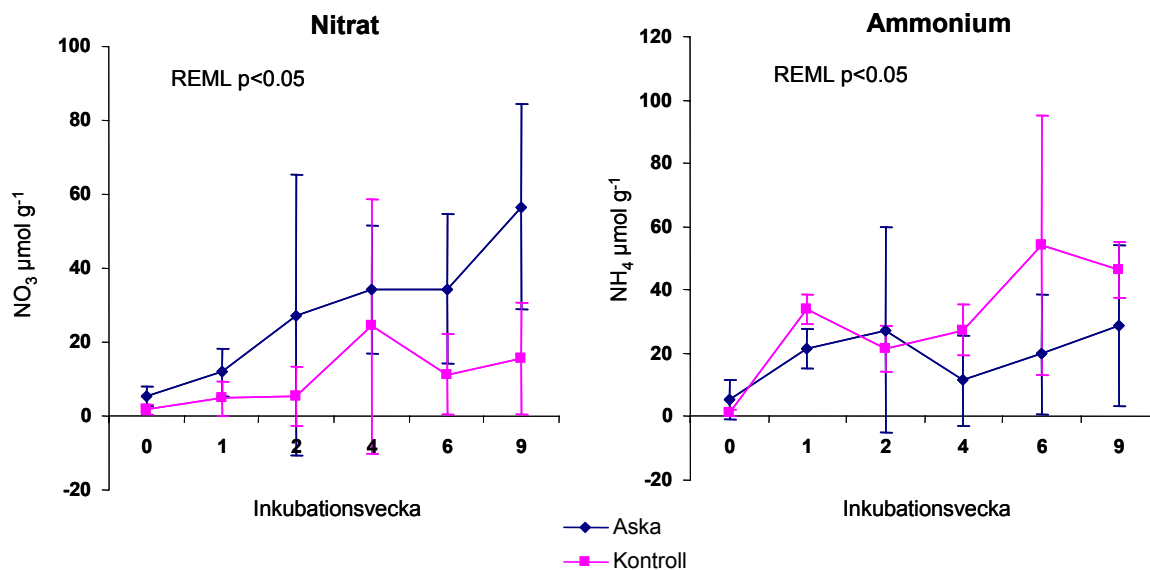
Figur 6. Mineraliserat kväve (nitrat+ammonium) i Fulltofta (n=3, C/N i humus=25) och Lidhult (n=4, C/N i humus=29). Felstaplar visar standardavvikelse. REML=repeated measures ANOVA som testar eventuell skillnad mellan försöksled över hela perioden. Vid enskilda tillfällen finns signifikant skillnad vecka 9 i prover från Fulltofta och veckorna 2 och 4 i prover från Lidhult ($p < 0.05$, t-test).

Figure 6. Mineralized N (nitrate+ammonium) in Fulltofta (n=3, C/N humus=25) and Lidhult (n=4, C/N humus=29). Error bars show standard deviation. REML=repeated measures ANOVA testing differences between treatments over the whole period. On specific occasions there are significant differences week 9 in Fulltofta samples and week 2 and 4 in Lidhult samples ($p < 0.05$, t-test).



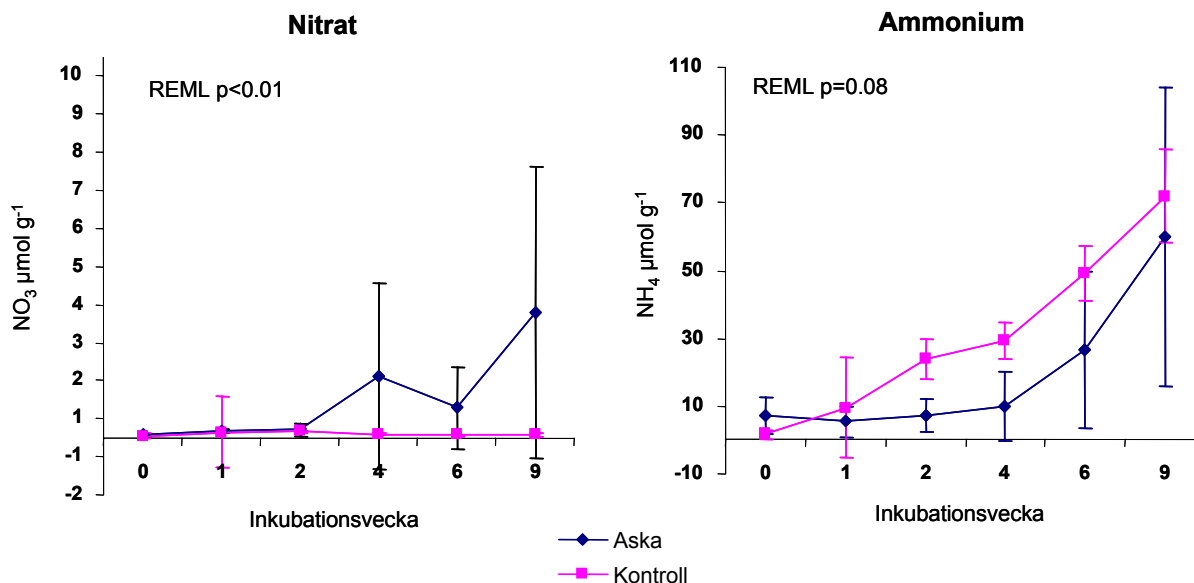
Figur 7. Respiration i humusprover från Fulltofta (n=3) och Lidhult (n=4). Felstaplar visar standardavvikelse. REML=repeated measures ANOVA som testar eventuell skillnad mellan försöksled över hela perioden. Vid enskilda tillfällen finns signifikant skillnad vecka 9 samt tendenser till skillnad veckorna 4 och 6 i prover från Lidhult (parat t-test).

Figure 7. Respiration in humus samples from Fulltofta (n=3) and Lidhult (n=4). Error bars show standard deviation. REML=repeated measures ANOVA testing differences between treatments over the whole period. On specific occasions there is a significant difference week 9 and tendencies for week 4 and 6 in the Lidhult samples (paired t-test).



Figur 8. Mineraliserat N i humusprover från Fulltofta ($n=3$). Felstaplar visar standardavvikelse. REML=repeated measures ANOVA som testar eventuell skillnad mellan försöksled över hela perioden. Vid enskilda tillfällen finns signifikant skillnad vecka 2 för nitrat ($p < 0.05$, t-test).

Figure 8. Figure 8. Mineralized N in humus samples from Fulltofta ($n=3$). Error bars show standard deviation. REML=repeated measures ANOVA testing differences between treatments over the whole period. On specific occasions there is a significant difference week 2 for nitrate ($p < 0.05$, t-test).



Figur 9. Mineraliserat N i humusprover från Lidhult ($n=4$). Felstaplar visar standardavvikelse. REML=repeated measures ANOVA som testar eventuell skillnad mellan försöksled över hela perioden. Vid enskilda tillfällen finns signifikant skillnad vecka 9 för nitrat och vecka 2 och 4 för ammonium samt tendenser för v 6 för både nitrat och ammonium (parat t-test).

Figure 9. Figure 9. Mineralized N in humus samples from Lidhult ($n=4$). Error bars show standard deviation. REML=repeated measures ANOVA testing differences between treatments over the whole period. On specific occasions there are significant differences week 9 for nitrate and week 2 and 4 for ammonium, and week 6 for both ammonium and nitrate (paired t-test).

Eftersom NO_3 -halterna var så låga i Lidhultproverna blev NH_4 -halterna helt utslagsgivande för total mineralisering (figur 6). Därför var total potentiell N-nettomineralisering, liksom ammonium, bitvis förhöjd under inkubationstiden. Skillnaden i potentiell N-nettomineralisering mellan lokalerna- högre i Fulltofta än i Lidhult (figur 6) - beror på mycket högre halter nitrat i Fulltoftaproverna (figur 8 och 9); NH_4 -halterna var jämförbara. Samtidigt var respirationen högre i Lidhult än i Fulltofta (figur 7).

3.6 C- och N-budget

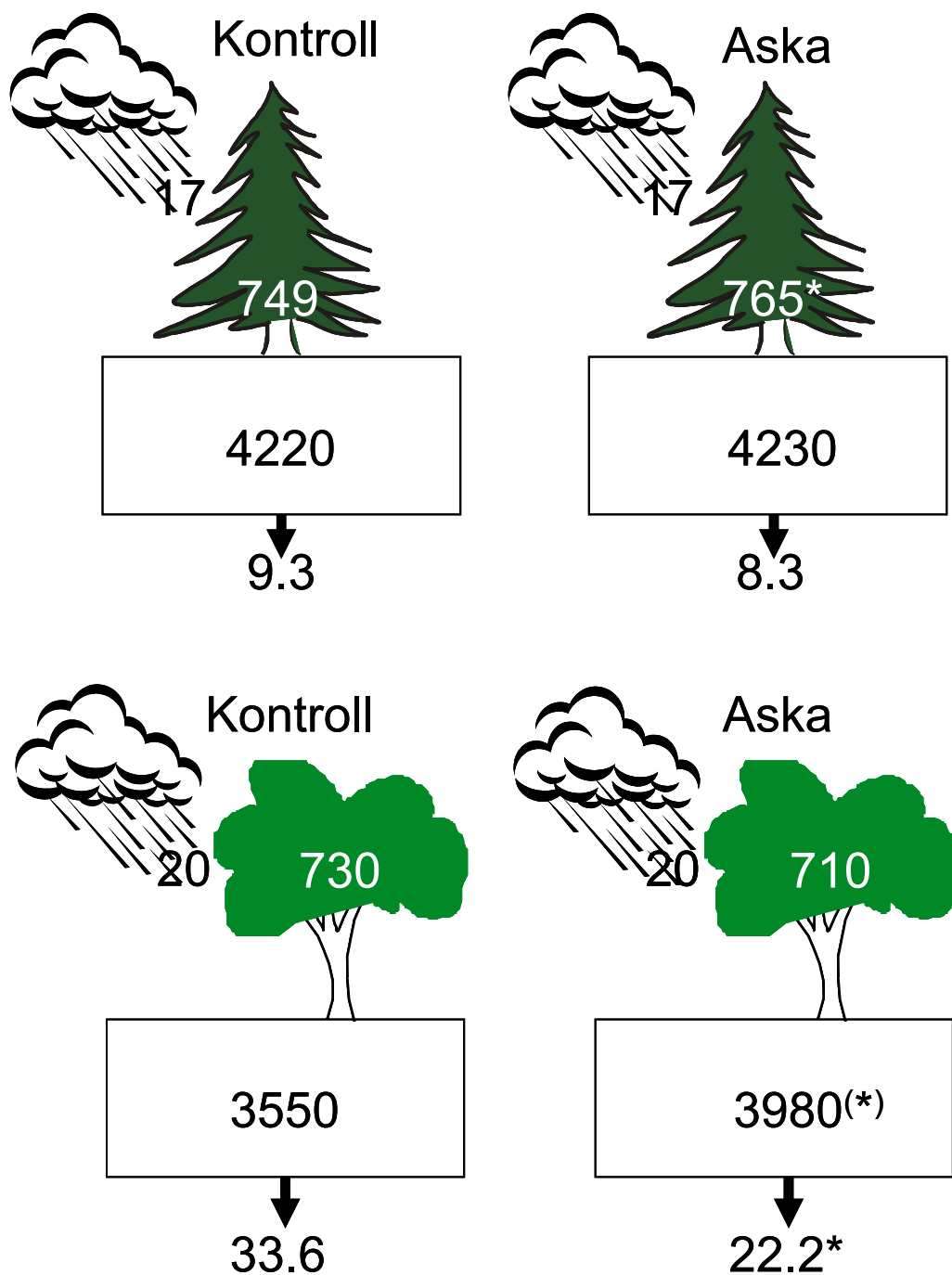
Den årliga ökningen av C- och N-innehåll i granarnas biomassa var större på askytorna än på kontrollytorna (tabell 12), till största delen p.g.a. högre tillväxt. Effekten av askbehandlingen på den strukturella biomassan (stam, grenar och stubbrotssystem) beräknades till ca 2 kg N och 594 kg C $\text{ha}^{-1} \text{år}^{-1}$. Förändringen av N-innehåll i marken på askytorna jämfört med kontrollytorna var inte signifikant (tabell 12). Den totala effekten av askåterföring på granskogens biomassa+mark blev en ökning av N-innehåll med 4.36 kg $\text{ha}^{-1} \text{år}^{-1}$.

I bokskog fanns ingen skillnad i C och N i träden mellan kontroll (172 ton C, 730 kg N) och aska (165 ton C, 710 kg N). De högre siffrorna för kontrollytorna beror på att medelvärdena för biomassan där var något högre från början, före askbehandling (figur 3). Däremot innebar tendenserna till högre C- och N-koncentrationer i marken på askade ytor enligt tabell 7 även tendens till högre mängder C och N per hektar. Den totala effekten av askåterföring på mark i bokskog blev en ökning av såväl C- som N-innehåll med 392 resp. 54 kg $\text{ha}^{-1} \text{år}^{-1}$. Notera dock att fältskiktets innehåll av C och N i bokskog inte ingår.

Tabell 12. Tabell 12. Årlig förändring av N-innehållet (kg ha^{-1}) i olika trädfraktioner och i förna, samt pooler av N i marken ned till 30 cm djup, för ett genomsnittligt granbestånd. Siffror inom parentes för askeffekten på markpooler är för hela perioden efter askåterföring (Σ =summa).

Table 12. Table 12. Annual increase of the N content (kg ha^{-1}) in different tree fractions and litter, and N pools in the soil down to 30 cm soil depth for the average Norway spruce stand. The numbers in parentheses for the ash treatment effect on soil pools are for the whole period after treatment (Σ =sum).

Fraktion	Kontroll	Aska	Askeffekt
Stam	5.71	6.67	+0.95
Gren	5.71	6.56	+0.85
Grovrötter	1.15	1.33	+0.19
Σ strukturell biomassa	12.57	14.56	+1.99
Barr	5.09	5.74	+0.65
Förna	5.05	5.18	+0.13
Σ träd+förna	22.71	25.48	+2.77
Humus (pool)	748	737	(-11.4) -1.8
Mineraljord (pool)	3470	3492	(+21.9) +3.4
Σ mark (pool)	3795	3785	(+10.5) +1.6
Σ system			+4.36



Figur 10. N-balanser för granskog och bokskog med förråd (kg ha^{-1}) och flöden ($\text{kg ha}^{-1} \text{år}^{-1}$). Biologisk fixering samt förråd i förna (granskog) och i fältskikt (bokskog) är inte medtagna i figuren. Stjärnor markerar signifikant skillnad jämfört kontroll.

Figure 10. Figure 10. N-balances in spruce and beech forest with pools kg ha^{-1} and flows ($\text{kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$). Biological N fixation and pools in litter (spruce) and in field layer vegetation (beech) are not included in the figure. Stars show significant difference compared to the control.

Kvävebalanser kan beräknas enligt $\Delta_N = \text{Dep} + \text{Fix} - \text{L} - \text{Denit} - \text{Skörd}$, där Δ_N är den årliga förändringen i systemets kvävemängd, Dep är total deposition, Fix biologisk fixering av N_2 , L är läckage av oorganiskt + organiskt kväve och Denit denitrifikation. Biologisk fixering kan sättas till ungefär $1.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ och denitrifikation försumbar i skog på fastmark (Akselsson m.fl. 2004).

För granlokalerna (fiktiva genomsnittbestånd) blev N-balansen $+9.2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ för kontrolltyorna och $+10.2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ för asktyorna vid en medeldeposition $17 \text{ kg ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$. Hela skillnaden på $1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ beror på lägre läckageförluster (icke signifikanta) från asktyorna än från kontrolltyorna. Skillnaden är i samma storleksordning som skillnaden i årlig upplagring av N enligt tabell 12. För boklokalerna blev N-balansen $-11.6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ för kontrolltyorna och $-0.2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ för asktyorna vid en medeldeposition $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$, dvs omfattande kväveförluster via läckage för kontrolltyorna och ungefärlig balans mellan in- och utflöden för asktyorna. Beståndens kvävedynamik sammanfattas i figur 10. Andelen N i träden var ca 15-17 % av det totala N-innehållet i systemet träd+mark till 40 cm markdjup.

Beräkningar av C-innehåll i ett marklager påverkas mycket av hur stor jordens massa är och hur den mäts och beräknas. Det senare gäller särskilt för humuslagret där densitetsmätningar är vanskliga. Humuslagrets densitet på granlokalerna uppmättes till 89 g dm^{-3} (std 28.4) på askade ytor och på 78 g dm^{-3} (std 17.6) kontrolltytor, skillnaden var inte signifikant ($p=0.21$). Skillnaden i humusskiktets tjocklek, 6.16 cm (std 1.01) på askade ytor och 6.04 cm (std 1.61) på kontrolltytor, var inte heller signifikant ($p=0.85$). Däremot blev beräknad humusmassa (jordvolym*densitet) signifikant ($p=0.025$) högre på asktytor 54.0 ton ha^{-1} (std 12.1) än på kontrolltytor 45.2 ton ha^{-1} (std 8.2). Multiplicerat med C-koncentrationen (tab 7) blev C-innehållet i humusskiktet då 24.1 ton ha^{-1} på asktytor och 21.4 ton ha^{-1} på kontrolltytor (ej signifikant). I mineraljorden var densiteten snarlik på ask- och kontrolltytor: 800 g dm^{-3} . För hela markprofilen, humus + 35 cm mineraljord, blev C-innehållet 95.9 ton ha^{-1} på asktytor och 94.0 ton ha^{-1} på kontrolltytor (ej signifikant). När C-innehållet i marken istället beräknades med samma densitet (medel 83.6 g dm^{-3}) i humus på kontroll och asktytor, blev C-innehållet i humus 22.6 ton ha^{-1} på asktytor och 23.0 ton ha^{-1} på kontrolltytor (ej signifikant). För hela markprofilen, humus + 35 cm mineraljord, blev C-innehållet 94.4 ton ha^{-1} på asktytor och 95.6 ton ha^{-1} på kontrolltytor (ej signifikant).

3.7 Ekonomi

En enkel ekonomisk kalkyl indikerar möjligheter till god lönsamhet i askåterföring (tabell 14). Om den förhöjda tillväxten enligt figur 5 kvarstår fram t o m slutavverkning innebär det en ökad sammanlagd produktion på $30 \text{ m}^3 \text{ sk ha}^{-1}$, vilket ger ett förbättrat netto på knappt 8000 kr ha^{-1} vid en askåterföringskostnad på 500 kr ha^{-1} och en ränta på 3 % (för övriga antaganden se Material och metoder). Åtgärden ger ett förhöjt netto upp till en askåterföringskostnad på 3200 kr ha^{-1} vid 3 % ränta. Vid 5 % ränta blir nettot knappt 7000 kr ha^{-1} .

Tabell 13. Produktion och ekonomi för ett genomsnittligt granbestånd med och utan askåterföring

Table 13. Production and economy for an average Norway spruce stand with and without ash recycling

Bestånd	Tillväxt (m ³ ha ⁻¹ år ⁻¹)	Volym (m ³ ha ⁻¹) vid			Netto (kr ha ⁻¹)
		50 år	60 år	80 år	
Kontroll	8.3	230	315	480	137300
Aska	9.4	230	325	510	144700
Differen s	1.1	0	10	30	7400

4 Diskussion

Resultaten visar att askåterföring ger eftersträvarade positiva effekter - motverkan av försurning av mark och vatten och förbättrad näringsförsörjning hos träd - utan att ge befarade negativa bieffekter som förhöjd N-utlakning och C-förlust. Dessutom visar resultaten att askåterföring ger en liten, men tydlig tillväxtökning i granskog, vilket gör åtgärden mycket lönsam, samt minskad N-utlakning från bokskog, vilket är miljömässigt eftersträvansvärt.

Det relativt stora antalet lokaler, samt breda intäckning av variation i bonitet gör att resultaten bör kunna hanteras som generella för sydvästra Sverige. Eftersom ett stort antal parametrar har undersökts, istället för att begränsa undersökningen till enstaka parametrar, får man en helhetsbild som ökar möjligheten att få en övergripande förståelse för hur skogsekosystemen reagerar på asktillförsel.

4.1 Mark och vatten

Ökade Ca- och Mg-koncentrationer, pH, basmättnad och BC/Al i marken i granskog (tabell 4 och 5) är direkta effekter av askan+kalken som stämmer bra överens med andra studier av effekter av askåterföring på mark (t.ex. Saarsalmi m.fl. 2001, Arvidsson och Lundkvist 2002, Olsson m.fl. 2005). Att effekten på Ca gick att se i B-horisonten på granlokalerna redan sju år efter behandling kanske är lite förvånande eftersom Ca rör sig ganska långsamt i marken – ca en cm per år (Eriksson 1995, Nihlgård m.fl. 2000). Mg rör sig snabbare och korttidseffekter på surhetsgrad i mineraljorden har ofta visats bero på tillförsel av Mg, snarare än Ca (Kreutzer 1995, Nihlgård m.fl. 1995). Att det inte gick att se någon effekt på K i mark och vatten beror troligen dels på att K snabbt lakas ut från askan (Eriksson 1998) och sedan rör sig snabbt genom marken så att effekten i markvatten klingar av redan efter tre-fyra år (Ring m.fl. 2002, Olsson m.fl. 2005), och dels på att mängden tillförd K är liten i förhållande till hur mycket K det finns i marken, jämfört med Ca och Mg (tabell 6).

Förhöjd CEC kan bero på ökad nedbrytning av organiskt material, men det kan också bero på att det blir fler negativa laddningar på humuspartiklarnas ytor när pH stiger (Brady och Weil 2002). Det senare förklarar också varför CEC ökar i humusen i granskogen, där pH ökat, men inte i mineraljorden där pH var oförändrat. Lägre Al-koncentrationer i det övre marklagret hänger också ihop med pH-höjningen eftersom Al extraheras lättare vid lägre pH.

Att pH inte stiger i mineraljorden har flera orsaker. Askan+kalkens pH-höjande karbonater förbrukas i humusskiktet och ger pH-höjning där. I mineraljorden kan en pH-höjning åstadkommas genom ökad basmättnad, d v s att andelen baskatjonbuffring ökar på bekostnad av Al-buffring, vilket är det dominerande buffringssystemet i sura mineraljordar med mycket Al. Men eftersom det finns så mycket Al i förhållande till baskatjoner i mineraljorden (tabell 4 och 5) och flödet nedåt av baskatjoner är långsamt och litet tar det lång tid innan pH påverkas där. Det tar längre tid ju djupare ned i mineraljorden man går. Det finns också mycket sulfat adsorberat i marken vilket kan ses i markvattnet (tabell 10 och 11). Hög sulfatkoncentration ger låg ANC i vattnet och därmed lågt pH, eftersom sulfatdesorption från Fe- och Al-oxider producerar protoner. Sulfatkoncentrationerna var i

genomsnitt fem-tio gånger högre än i markvatten i Norrland (IVL 2006) där det historiska nedfallet av svavel varit mycket lägre än i sydvästra Sverige. När pH stiger, som efter tillförsel av aska eller kalk, ökar desorptionen av sulfat (Martinson m.fl. 2003) och det buffrar mot en pH-höjning. För att ANC och pH ska stiga räcker det inte med att koncentrationerna av baskatjoner i lösning stiger utan kvoten baskatjoner/(sulfat+nitrat) måste också stiga. Om koncentrationen av sulfat stiger lika mycket eller mer än koncentrationen av baskatjoner, som i vattnet från askytor i granskog (tabell 10), påverkas därför inte ANC och pH i vattnet nämnvärt. Om det dessutom, som i bokskogen (tabell 11) finns mycket nitrat i markvattnet sänker även det ANC och pH. Det beror på att protoner som producerats vid nitrifikationen inte neutraliserats av nitratupptag. I vattnet från bokskogen, där baskatjonkoncentrationerna var opåverkade, har ökningen av sulfat i vatten från askytorna motverkats av en minskning av nitrat, vilket lett till att ANC och pH är opåverkade (tabell 11). Minskningen av nitrat beror troligen på att mer kväve är kvar i markens organiska material (tabell 7) och även i fältvegetation på askytorna än på kontrollytorna på boklokalerna (se vidare stycket om kväveomsättning).

Att askåterföringen inte lett till förhöjda baskatjonkoncentrationer i markvattnet från bokytorna kan bero på att läckaget av baskatjoner i kontrollen är relativt högt – högre än från askytor på granlokalerna (tabell 10 och 11) - och då blir tillskottet från behandlingen relativt sett mindre. Det ser ut som om att bokskogen inte har kommit lika långt i försurnings-processen som granskogen och därför har ett större kapital av baskatjoner kvar i marken som det kan läcka ifrån. Det sura nedfallet är oftast och har historiskt varit högre i den vintergröna granskogen med stor sammanlagd yta som kan fånga torrdeposition, än i den lövfällande bokskogen (IVL 2006). Dock, högre baskatjonkoncentrationer i mark och vatten kan också bero på bördigare mark med högre vittringskapacitet.

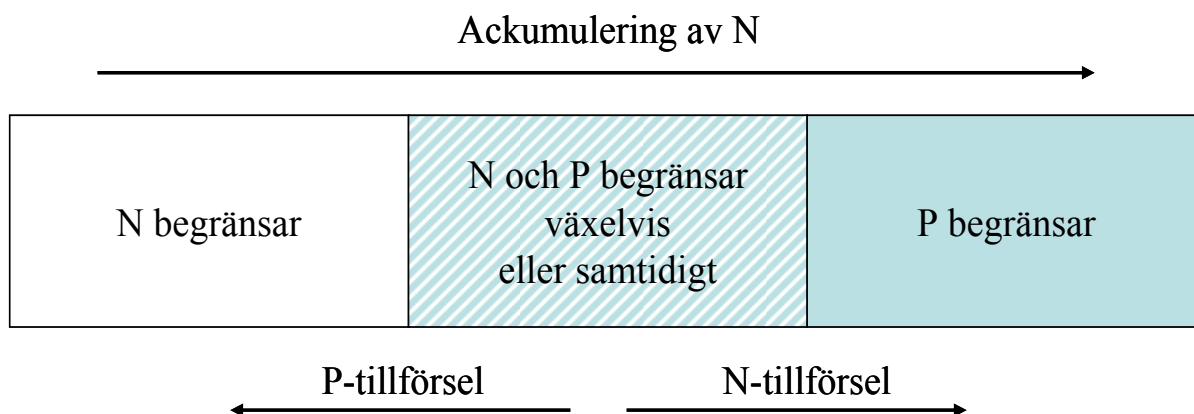
Effekterna på markvattenkemi efter sju-åtta år stämmer ganska bra överens med de effekter man får efter tillförsel av finmald kalk (Akselsson m.fl. 1998, Akselsson m.fl. 2000). Det tar längre tid med mer svårupplöslig krosskalk (Akselsson m.fl. 2000) och om askan är mycket svårupplöslig likt de granuler med cementinblandning som användes i Skogaby - där saknades effekt, utom för K, i markvattnet (Olsson m.fl. 2005). Men trots att askan är relativt lättupplöslig var effekterna i markvattnet inte särskilt stora och inte tillräckliga för att nämnvärt påverka ANC och pH. Det har föreslagits bero på att det mesta av tillfört Ca och Mg finns kvar i humus och i förna (Akselsson m.fl. 1998, van Hees m.fl. 2003). Med utgångspunkt från data i föreliggande studie kan det i träd och nyproducerad förna sitta maximalt 20-30 kg ha⁻¹ mer Ca på askytorna än på kontrollytorna och markvattenhalterna (tabell 10) motsvarar ett förhöjt årligt läckage på ca 3 kg ha⁻¹. Men om det även här finns stora mängder tillfört Ca, såväl som Mg, kvar i marken, eftersom dosen var ca 1100 resp. 160 kg ha⁻¹. De utbytbara halterna Ca i marken (tabell 4) motsvarar en skillnad på ca 250 kg ha⁻¹, alltså bör det mesta finnas kvar i ovittrad form. Det innebär att effekten bör kunna kvarstå under ganska lång tid, åtminstone >15 år som enligt Saarsalmi m.fl. (2001).

Effekterna på markvattnet är sannolikt för små för att få någon effekt på vattenlevande organismer (Larsson m.fl. 1999). För att åstadkomma sådana effekter krävs högre doser och/eller upprepad behandling och nya behandlingsstrategier. Enligt Larsson m.fl. (2003) bör en kombination av behandling på fastmark och i utströmningsområden ge bäst effekt. Om bara utströmningsområden behandlas kommer effekten att försvinna efter några år. Dosen på fastmark bör anpassas till hur mycket sulfat som finns adsorberat i marken. I

princip bör allt sulfat med ursprung i antropogent nedfall neutraliseras, för att återställa marken till någon sorts pre-försurningsläge. Det innebär att 2+2 ton aska+kalk per omloppstid i de allra flesta fall är alldeles för lite. Den naturliga återhämtningen är så långsam (Martinson 2004, Akselsson m.fl. 2006) och bromsas av sulfatdesorptionen att askåterföring och kalkning är nödvändiga åtgärder för att kunna bedriva ett uthålligt skogsbruk och återfå en bra kvalitet på det avrinnande vattnet.

4.2 Barr- och bladkemi och tillväxt

Kombinationen av vektoranalys (figur 4) och jämförelse med bristnivåer (tabell 8) indikerar att P är det ämne som är mest tillväxtbegränsande på granlokalerna. Förhållandet att ett ämnes koncentration stiger från en nivå där brist är trolig samtidigt som biomassan ökar (figur 3) är en god indikation på att ämnet varit och är tillväxtbegränsande. Barrens låga N-status indikerar dock att även N-begränsning kan föreligga. Men, det fanns ingen korrelation mellan N-koncentration och tillväxt (figur 5), vilket vore att förvänta vid så låga N-koncentrationer som här. Det beror antagligen på att P-statusen varit viktigare för tillväxthastigheten. Det stöds av att det fanns en korrelation mellan P-koncentration och tillväxt (figur 5). Att korrelationen är relativt svag beror delvis på att det finns få lokaler med bra P-status, endast en kontrolllyta har >1.8 mg g⁻¹ (optimumnivå enligt Braekke 1994). Korrelation var sämre för askbehandlade ytor än för kontrolllytor, vilket är logiskt; när trädens P-status förbättras kan tillväxtbegränsningen ge vika för begränsning av något annat. Det troliga här är att träden med ökad P-tillgång förs tillbaka till den mer ursprungliga N-begränsningen – åt vänster i figur 11. Det är särskilt sannolikt med tanke på den låga N-statusen i barren.



Figur 11. Schematisk bild av hur N och P kan växelverka som tillväxtbegränsande faktorer.

Figure 11. Schematic image of how N and P can alternate as growth-limiting factors.

Den gängse uppfattningen är att skogens tillväxt i Sverige är naturligt begränsad av tillgången på N (Tamm 1991, Gundersen och Bashkin 1994, Binkley och Högberg 1997). Ökad tillväxt vid N-gödsling i stora delar av Sverige tycks bekräfta detta. P-begränsning kan emellertid vara mer omfattande än man hittills trott. Wardle m.fl. (2004) visade m.h.a. data från nio olika platser i världen att ekosystemen utvecklas från N-brist mot P-brist när de åldras. Det beror på att i ett åldrande system tillförs inget P på naturlig väg, utöver ett

begränsat vittringstillskott, och lättillgängliga kalciumfosfater ersätts efter hand av mer svårösliga aluminium- och järnfosfater. N tillförs dock kontinuerligt med biologisk och atmosfärisk fixering, även om tillförseln naturligt är låg jämfört med de depositionsnivåer som förekommer i dag i södra Sverige. Oftast betraktas våra nordliga ekosystem som unga och därför N-begränsande. Men, alla åtgärder som innebär en ökad bortförsel av P från systemet, t.ex. genom ökad skogsproduktion, ökar hastigheten i utvecklingen mot P-begränsning. Detta gäller oberoende av vad som orsakat produktionsökningen – förhöjt N-nedfall, klimatförändring, eller skogsskötsel. Kvävenedfall har i flera studier visats orsaka P-brist (Mohren m.fl. 1986, Teng och Timmer 1995). I Skåne visar trädens P-status en nedåtgående trend från 1988 till 2000 och i flera bestånd kan P-begränsning nu föreligga (Thelin m.fl. 2002a). Där fanns också en starkare korrelation mellan barrens P-status och stamtillväxt, än mellan barrens N-status och stamtillväxt (Thelin, manus). Månsson (2005) fick tydliga tillväxteffekter hos gräs odlat i sur sydvästsvensk bokskogsjord efter P-tillförsel, men inga effekter efter N-tillförsel. Giesler m.fl. (2002) fann tillväxtbegränsning av fosfor på bördig mark med hög omsättning av organiskt material och relativt god kvävetillgång i Norrlands inland.

En viktig orsak till att N betraktas som det begränsande ämnet på den absoluta majoriteten av skogsmarken i Sverige är nog den dokumenterade tillväxteffekten efter N-gödsling - och avsaknaden av effekt efter gödsling med andra ämnen - i ett stort antal försök i huvudsak drivna av Skogforsk (Rosvall 1980, Nohrstedt 1990, Sikström m.fl. 1998, Jacobsson 2003). Det är dock mycket viktigt att poängtera att de flesta svenska försök som gjorts med andra ämnen än N inte lagts där brist på något annat än N indikerats (Nohrstedt 1990). Effekt av gödsling med andra ämnen än N bör inte förväntas i bestånd med N-brist (Thelin 2000). I många av de försök där P har ingått har också P-givan varit så liten (t.ex. Nohrstedt m.fl. 1993, Sikström 2002) att effekter kan vara svåra att belägga p.g.a. den höga P-sorptionen i majoriteten av skogsjordarna.

I EcoFor-projektet (Thelin 2005) tillfördes höga P-givor i sju granbestånd i sydvästra Sverige och det gav en förhöjning av barrens P-status från under bristnivå till optimumnivå 1,5 år efter behandling. I sex av de sju bestånden indikerade barranalyser P-brist före behandling och den snabba effekten tyder på ett tydligt behov av P (Thelin 2005). På ytor med lägre P-tillförsel, motsvarande askytorna i denna studie, fanns ingen effekt på barrens P-status. Det verkar som om det måste gå ett antal år efter behandling innan träden har hunnit tillgodogöra sig P tillfört i lägre doser. Men, trots effekt på barrens P-status i föreliggande studie är den inte tillfredställande. Det verkar som om P-doser på 20-30 kg ha⁻¹ visserligen kan påverka trädens P-status lite grann, men att det krävs mycket högre doser för att P-status ska nå en eftersträvad optimumnivå på ca 1.8 mg g⁻¹.

Det är osannolikt att något annat ämne utöver P och N är begränsande för tillväxten i dagsläget, eftersom övriga ämnen låg över bristnivåer (tabell 8). K-koncentrationen är dock genomgående relativt låg på kontroll- såväl som på askytor, om optimum är >7 mg g⁻¹ (Braekke 1994). Detta och att det fanns enstaka kontrolltytor med K-status under bristnivå innebär en viss risk för att en del lokaler skulle kunna utveckla K-brist liksom i granskog i Skåne (Thelin m.fl. 1998). Att samtliga askade ytor hade K-status över bristnivå tyder på att det fanns en behandlingseffekt, även om det inte fanns någon signifikant skillnad mellan kontroll och askbehandling i hela materialet, men effekten är i så fall liten. Resultat från EcoFor-projektet tyder på att det behövs en högre K-giva än de 40-120 kg ha⁻¹ som tillförts

de här undersökta lokalerna för att få upp barrrens K-koncentration till optimumnivå (Thelin 2005). Det är viktigt att se till att K-halten ligger på en bra nivå eftersom K-brist, i motsats till brist på N och P, leder till minskad allokering av kol till rötter och mykorrhiza (Ericsson m.fl. 1996). K-brist ökar också risken för frostsador (Jönsson 2000).

Det ökade upptaget av Ca, S och Zn bör betraktas som lyxupptag. Detta gäller särskilt Ca, med halter långt över trädens egentliga behov. Det höga upptaget av Ca innebär att skörd leder till en stor export av Ca från systemet. Risken att Ca-brist uppstår för träden är liten: Under överskådlig tid kommer det att finnas gott om Ca i marken i förhållande till trädens behov och det är mycket mer sannolikt att tillväxtbegränsning av andra ämnen, troligast P, inträder före Ca-begränsning. Förluster av Ca har större betydelse för kvaliteten på det avrinnande vattnet.

Eftersom tillväxtsiffrorna gäller medelstammens dbh, inte volym eller grundyta per ha, kan möjligen deras giltighet ifrågasättas. Normalt mäts tillväxt genom att man mäter samtliga träd inom ett större område (>500 m²) och återkommer efter ett visst antal år och upprepar mätningarna. Det var inte möjligt här eftersom de flesta ytorna är utlagda i efterhand. Alternativet hade varit att borra ett mycket större antal träd på varje provyta och därmed också öka ytans storlek. Med det alternativet hade antalet replikat fått reduceras till kanske en tredjedel; dels är borring och årsringmätning mycket tidskrävande och dels hade många av lokalerna inte kunnat användas eftersom det blir svårare att upprätthålla lika förhållanden mellan kontroll och behandling när man går upp i ytstorlek. Det bedömdes viktigare för hela studien att inte minska antalet replikat. För att minska risken för att konkurrensförhållandena var olika för träd på kontroll resp. asktyor mättes grundyta på flera punkter i varje bestånd och undertryckta, flerstammiga, skadade, och i övrigt orepresentativa träd undveks.

Att tillväxt före behandlingstillfälle, som kunde mätas genom borring, var likvärdig på kontroll och asktyor (figur 3), samt att det inte fanns någon skillnad i dbh före behandling, ökar trovärdigheten i tillväxtsiffrorna. Dessutom, tillväxteffekten på ca 14 % ca sju år efter askåterföring (figur 3) är i samma storleksordning som för de granlokaler Uddevalla, Torup och Åled presenterade i Jacobsson (2003) som ligger i samma geografiska område som de här undersökta lokalerna. Det verkar troligt att en tillväxtökning på 10-20 % är ett generellt mönster vid askåterföring med 1-3 ton till granskog i sydvästra Sverige och att förbättrad P-status är en huvudorsak. I Jacobsson (2003) fanns en tendens till skillnader i P-koncentration, men inte N-koncentration, i barr på asktyor i granskog jämfört kontroll.

Avsaknaden av effekt på bokbladskemi är intressant med tanke på de tydliga effekterna för gran. Att Ca inte ökar är anmärkningsvärt p.g.a. att lyxupptag av Ca är vanligt. Att P inte ökar kan bero på att för lite P tillförts i relation till trädens behov och/eller att bok med sin lägre tillväxthastighet tar längre tid på sig att reagera på åtgärden. Det skulle i så fall också förklara den uteblivna tillväxteffekten. En annan möjlig förklaring är att fältskiktet tagit upp mycket av tillförd näring, särskilt för K som faktiskt är lägre på askade ytor trots att K tillförts med askan. Örter, men särskilt gräs, har relativt träd ett högt K-behov. Om tillförd P och K återfinns i fältskiktet finns det också kvar i beståndet och kan användas för framtida tillväxt. Det är möjligt att fältskiktet är mer effektivt än träden på att tillgodogöra sig tillförd näring och därför hade dosen behövt vara högre för att få effekt i bokskog. Bokarna kan också vara utsatta för någon biotisk stress som minskar deras förmåga att reagera på asktillförsel. Angrepp av skadesvampen *Phytophthora* har visats sig ganska vanligt i

sydsvensk ekskog (Jönsson 2005). Motsvarande skadesvamp finns även för bok, men utbredningen är inte lika känd.

4.3 Kväveomsättning

Resultaten av inkubationsförsöket (figur 6-9) gäller potentiell, inte verklig, mineralisering eftersom försöken är gjorda på lab med hög jämn temperatur och fuktighet. Dessutom saknas bortförel/upptag av mineraliserad näring. Det innebär att man från datan inte kan dra några slutsatser om nivån på mineralisering resp. nitrifikation i fält. Däremot är undersökningen viktig som ett kvalitativt mått på effekt av askåterföring på mineralisering.

Att potentiell nettomineralisering av N inte påverkats nämnvärt efter tillförel av 2 resp. 2.5 ton aska i Lidhult resp. i Fulltofta (figur 6) stämmer ganska väl överens med tidigare studier (Andersson m.fl. 1994). Nilsson m.fl. (2001) fann ökad mineralisering vid doser på 8-10 ton ha⁻¹ vilket hade gett upphov till en pH-höjning på två enheter i humuslagret, men inte vid doser på 2-4 ton. Det är troligt att det krävs en pH-höjning på ett par enheter för att få någon ordentlig effekt på mineraliseringen. Data från fält stöder detta, pH har höjts med 0.6 enheter (tabell 4), N och C/N i humuslagret är oförändrade (tabell 7) och det finns inget ökat N-läckage (tabell 10). Tendensen till lägre C-koncentration i humusen från askytor (tabell 7) kan dock möjligen tyda på en något ökad aktivitet och respiration i humuslagret. Det stämmer i så fall överens med högre respiration i humus från askytor än i humus från kontrolltytor i Lidhult (figur 7). Å andra sidan hade humusmängden ökat på askytor även om siffrorna var osäkra m.a.p. humusdensitet. Det antyder att även om nedbrytningshastigheten skulle ha ökat något så verkar skillnaden i tillförel av nytt organiskt material vara relativt större.

Skillnaderna i potentiell N-mineralisering mellan Fulltofta och Lidhult beror på att Fulltofta är en från början mycket N-rikare lokal än Lidhult. C/N-kvoten i humusen var 25 i Fulltofta och 29 i Lidhult (Olsbäck 2005). Det indikerar att nedbrytarna ligger närmare N-begränsning i Lidhult och närmare C-begränsning i Fulltofta. Ökad mineralisering efter en pH-höjning skulle därför kunna innebära att mer mineraliserat N i Fulltofta blivit tillgängligt för träden eller för utlakning. Resultaten från inkubationsförsöken stöder detta. Bitvis under inkubationsperioden var det lägre halter av såväl NH₄ (figur 6) som NH₄+NO₃ (figur 8) i humus från Lidhults askade ytor än i humus från Lidhults kontrolltytor. Samtidigt var respirationen förhöjd (figur 7). Detta tyder på en ökad immobilisering av N i humusen från Lidhults askytor. Högre aktivitet (respiration) kan sålunda leda till både höjd och sänkt nettomineralisering av N, beroende på N-tillgång för nedbrytarna. En något ökad immobilisering i laboratorieförsök behöver dock inte innebära att motsvarande effekter skulle uppstå i fält, eftersom temperatur och fuktighet är långt ifrån optimala i fält. Resultat från Lidhult, tendenser till såväl ökad tillväxt som förhöjd N-koncentration i barr (Olsbäck 2005), ger inga indikationer på att det skulle finnas mindre tillgängligt N för träden på askytorna än på kontrolltytor i Lidhult.

Risk för N-läckage kan vara mer kopplad till nitrifikation än till mineralisering eftersom förhöjt N-läckage ofta är liktydigt med förhöjt läckage av nitrat. Nitratläckage har diskuterats som en risk vid pH-höjning efter kalkning eller askning (Persson och Wirén 1996, Jacobsson 2003), eftersom nitrifikationen ofta ökar. Det finns exempel både på ökning och minskning av nitratläckage efter kalkning eller askning. Den generella bilden är dock att nitratläckaget inte påverkas av kalkning eller askning och pH-höjning, vilket visas i ett stort antal studier av IVL bl.a. inom Skogsstyrelsens åtgärdsprogram (Larsson och Westling 1997, Akselsson m.fl. 1998, Akselsson m.fl. 2000, Larsson m.fl. 2003, Zetterberg och Westling 2005). För aska finns mycket färre studier på N-läckage. Teoretiskt sett borde det dock finnas större möjligheter att bromsa N-läckage med askning än med kalkning, eftersom askan, men inte kalken, kan avhjälpa brist på ämnen som K och P. Försök i Tyskland och Storbritannien har visat att det är möjligt att minska nitratutlakning genom tillförsel av bristämnen (Mohamed m.fl. 1993, Stevens m.fl. 1993).

Den begränsade N-tillgången på granlokalerna gör risken för N-läckage liten, särskilt efter en tillväxtökning som ger ökat N-upptag. De genomgående låga halterna mineraliserat N i markvattnet (tabell 10) bekräftar detta. N-balansberäkningarna (tabell 12 och figur 10) indikerar att N-mängden i granskog totalt ökar i såväl aska som kontroll. Granskogens N-ackumulering med 9-10 kg ha⁻¹ år⁻¹ stämmer med Akselsson och Westling (2005) som beräknade N-ackumulering på >8 kg ha⁻¹ år⁻¹ för det aktuella geografiska området. Ökad N-ackumulering ökar den framtida risken för N-läckage, särskilt efter avverkning. Markväxsystemet kan inte hålla hur mycket N som helst. Med kontinuerlig ackumulering av N i systemet kommer man förr eller senare till en punkt där det börjar läcka (Thelin 2000). Då behövs åtgärder som kan öka systemets N-hållande förmåga, t.ex. genom ökad tillväxt (granskog figur 3) eller ökad organisk halt i marken (bokskog tabell 7) efter askåterföring. Resultaten antyder att en viss mängd N på askytor i granskog har tagits upp istället för att lakas ut, eftersom den totala beräknade mängden N i träden ökat på askytorna (tabell 12) och det beräknade lägre N-läckaget från askytor (figur 10) är i samma storleksordning som den årliga ökningen i träden (tabell 12).

I motsats till granlokalerna verkar boklokalerna ha nått N-mättnad, oberoende av vilken definition på N-mättnad som tillämpas. Markvattenhalterna av nitrat är höga (tabell 11) och det beräknade läckaget är stort och överskrider på kontrollytorna depositionen med god marginal (figur 10). Eftersom inga skördeuttag gjorts sedan askbehandlingen och faktorerna deposition, fixering och denitrifikation inte antogs ha påverkats blir eventuell skillnad i läckage utslagsgivande för kvävebalansen. Kontrollytorna har negativ kvävebalans, medan askytorna är nära +/- 0. Det minskade N-läckaget kan inte förklaras av trädupptag eftersom N-koncentration i bladen var oförändrad och det inte fanns någon tillväxteffekt hos träden. Det N som inte har läckt på askytorna verkar istället ha stannat kvar i marken (tabell 7, figur 10). Troligen är skillnaden i mark-N mellan kontroll och askytor något överskattad eftersom den skulle innebära att kontrollytorna jämfört med askytorna har förlorat 54 kg N ha⁻¹ år⁻¹ sedan askåterföring. Men det är också möjligt att skillnaden i läckage mellan kontroll och behandling är större än ca 10 kg ha⁻¹ år⁻¹. Att även C tenderar att öka i marken är logiskt och visar att markens högre N-innehåll på askytor sannolikt beror på ökad halt organiskt material i marken. Mycket av det N som är bundet i marken kan sitta i mykorrhiza (Nilsson 2004). Men mykorrhizan kan inte förklara ökad C-halt i marken. Istället är det sannolikt att markens fältvegetation reagerat på askåterföringen med ökad tillväxt och C-inbindning. När bundet C allokeras till mykorrhiza och när döda växtdelar bryts ner kan markens C-innehåll,

liksom N-innehåll, öka. Fältskiktets betydelse för N-retention i lövskog är visad sen tidigare (Olsson 2002) och på hygge sjunker N-läckaget tydligt när fältskiktet är etablerat (Westling m.fl. 2004, Thelin 2005). Nihlgård (2006) fann minskat N-läckage, men ingen ökad tillväxt hos träden efter askåterföring till ekdominerad ek-bokblandskog som ligger intill det granbestånd i Fulltofta som ingår i denna studie. I granbeståndet var N-tillgången hög och det fanns tendenser till högre N-läckage på askade ytor, men ingen tillväxteffekt hos träden (Olsbäck 2005). I lövbeståndet finns nästan heltäckande fältvegetation, medan granskogen är i det närmaste fältskiktlös (Nihlgård 2006). Det är sannolikt att skillnaderna i N-läckage mellan de två bestånden beror på fältskiktets N-upptag.

Ökat nitratläckage efter askåterföring verkar bara uppstå om man har kombinationen ökad nitrifikation och inget ökat N-upptag av vegetation. Att granarna inte reagerat på askåterföringen i Fulltofta kan bero på att beståndet är gammalt och för länge sedan lämnat högtillväxtfasen och därför inte tar upp nitrifierat N. Det skulle i så fall motsvara förhållandena på ett färskt hygge. För att minimera risken för nitratläckage är det viktigt att tillse att det behandlade beståndet har kapacitet att reagera på tillfört material med ökat N-upptag. Därför bör färska hyggen, gamla bestånd och sjuka bestånd undvikas. Möjligheten att utnyttja fältskiktets N-retentionskapacitet i syfte att minska N-läckage och att öka den m. h. a. asktillförsel bör utredas närmare.

4.4 Kolbalans

Resultaten visar att risken för ökad C-avgång vid askåterföring verkar vara överskattad. Den totala effekten på C-balansen var positiv i såväl granbestånd som bokbestånd. För granbestånden gäller det oberoende av hur C-innehåll i marken beräknats.

Liksom för N-mineralisering är det troligt att den pH-ökning som askåterföringen inneburit inte varit tillräcklig för att nämnvärt påverka nedbrytningshastigheten och därmed C-förluster genom markandning. En ökning av mängden humus på askade ytor med ca nio ton per ha jämfört med kontrollytorna, enligt kalkylen på s 27 där olika värden för humuslagrets densitet använts, verkar osannolik. Det motsvarar ett årligt nettotillskott av organiskt material sedan askbehandlingen på ca $1400 \text{ kg ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$. Det årliga förnafallet är ca $800 \text{ kg ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$. Det är troligt att skillnaden i densitet är överskattad. En liten ökning av humuslagrets densitet är dock inte osannolik och skulle kunna bero på att materialet kan packas ihop en aning om nedbrytningshastigheten ökar lite grann. Detta måste dock undersökas ytterligare.

Det är viktigt att notera att en lägre C-koncentration i humusen på askbehandlade ytor (tabell 7) inte behöver innebära ett lägre C-innehåll per ytenhet. Skillnader i densitet och lagertjocklek kan vara viktigare för slutresultatet. Därför bör man inte dra slutsatser om effekter på systemets C-balans enbart utifrån data på C-koncentration eller C/N-kvot. Dessutom, humusens C-innehåll är bara en liten del av markens totala C-innehåll och det C som finns i mineraljorden påverkas i mindre grad än humusen av åtgärder som askåterföring.

Sett ur ett samhällsperspektiv blir C-balansen än mer positiv om den ökade biomassan kan användas för att ersätta förbränning av fossil kol och olja liksom om trä i större utsträckning ersätter mycket mer energikrävande stål och aluminium som konstruktionsmaterial.

Förädling av skogsråvara till papper och sågade varor innebär alltid en åtminstone temporär C-sänka.

4.5 Ekonomi

Den ekonomiska kalkylen visar på det finns goda möjligheter till lönsamheten i askåterföring för skogsägaren med en tillväxtökning på 14 % och en askåterföringskostnad på 500 kr per ha (tabell 13), under förutsättning att tillväxten kvarstår fram till slutavverkning. Om vi antar att tillväxteffekten avklingar efter 10 år kommer det ändå att finnas ca 10 m³sk ha⁻¹ mer att skörda på askbehandlade ytor. Nettot blir i så fall 1600 kr ha⁻¹ högre efter askåterföring.

Kostnaden är mycket låg i relation till tillväxtbefrämjande åtgärder som plantering ca 12 000 kr ha⁻¹, markberedning ca 1500 kr ha⁻¹ och röjning 3000 kr ha⁻¹. Om röjning utförs två gånger blir den diskonterade kostnaden fram till slutavverkning knappt 50 000 kr ha⁻¹ för vilket det krävs en tillväxteffekt på knappt 140 m³ ha⁻¹ för att det ska vara lönsamt. För att uppnå samma lönsamhet som den här beräknade efter askåterföring krävs en tillväxteffekt på ca 160 m³ ha⁻¹. Det är osannolikt att röjning ger sådana tillväxteffekter. Det är anmärkningsvärt att åtgärder med så begränsad lönsamhet som röjning framförs som nödvändiga för en god skogsekonomi samtidigt som askåterföring, för vilket den ekonomiska risken är minimal, har beskrivits som en extra kostnad som skogsbruket inte kan bära.

Antagandet om bibehållen tillväxtökning med drygt en m³sk ha⁻¹ år⁻¹ kan verka orimligt eftersom effekten av N-gödsling brukar avklinga efter ca 10 år. Det är dock avsevärd skillnad på om tillväxteffekten beror på tillfört P istället för tillfört N. Den ökade tillväxten beror på en ökad barrbiomassa. Träden bör kunna behålla denna större barrbiomassa länge framöver, så länge det finns tillräckligt med N, P, övriga näringsämnen och vatten. Tillväxten i perioden 50-80 år är ganska jämn (långsamt sjunkande) efter en nedgång jämfört med högtillväxtfasen fram till ca 30 år. Träd i åldersklassen 50-80 år är konservativa med sina näringsämnen, d v s de recirkulerar väl sina tillgångar. P recirkuleras mycket väl och förlusterna från mark-växtsystemet, förutom med skörd, är mycket små, mindre än för N. Dessutom, det kan ta tid för P-gödsling att ge mätbar respons eftersom det är hög P-sorption i skogsmarken och träden bara kommer åt lite per tidsenhet av det som tillförts, särskilt om P finns i en mer bunden form än om P tillförts med konstgödselmedel. Omvänt innebär det att effekten av P-tillförsel bör kunna finnas kvar länge, längre än för N. Det N som tillförs med konstgödsel är tillgängligt mer eller mindre omgående även om en stor del immobiliseras av mikrober i marken. Eftersom bestånden ackumulerar N kan man faktiskt förvänta sig en N-gödslingseffekt när ytterligare N ackumulerat på de ytor där askningen lett till att P-begränsningen åtminstone delvis tagits bort. Denna N-gödslingseffekt kommer inte att infinna sig om bestånden är begränsade av P eller av något annat.

Det är viktigt att komma ihåg att tillväxteffekten av askåterföring inte är självklar. I kraftigt N-begränsade bestånd bör inte någon tillväxteffekt förväntas, åtminstone inte på kort sikt. Likaså, i bestånd utsatta för kontinuerlig torkstress kommer vatten att vara begränsande. Det kan också vara så att det finns tillräckligt av alla tillväxtfaktorer men träden är för gamla eller sjuka för att kunna svara med ökad tillväxt på tillförsel av bristämnen.

Det är viktigt att fortsätta uppföljningen av askförsök, särskilt vad gäller tillväxteffekter på lång sikt, för att därmed få en bättre uppfattning om lönsamheten i åtgärden.

4.6 Räcker två ton aska och två ton kalk per hektar?

Ovan har diskuterats effekter på avrinnande vatten, med slutsatsen att dosen behöver vara högre för att motverka effekten av sulfatdesorption. Effekterna på barrkemi antyder också att för att säkra trädens P-status skulle en högre dos behövas. För att ytterligare bedöma om återföring med 2+2 ton aska+kalk är en tillräcklig åtgärd för att åstadkomma balans för systemet m a p Ca, K, Mg och P, säkra trädens näringsförsörjning, samt förbättra kvaliteten på avrinnande vatten beräknades uttag resp. tillskott för granskog med askåterföring (tabell 14).

Balanserna i systemet helträdkörd+askåterföring är positiva för Ca och Mg men negativa för K och P. För Ca och Mg beror det på att mycket extra Ca och Mg tillförs med kalkgivan. Det är troligt att återföring med 2+2 ton aska+ kalk inte är en tillräcklig åtgärd för att uppnå balans m a p K och P vid helträdkörd (GROT-uttag). Det stämmer överens med Olsson och Westling (2005) som fann att en dos aska om 3 ton ha⁻¹ i regel överkompenserar för förlorad alkalinitet men ofta underkompenserar för K och P.

Även vid stamskörd finns risk för negativ K-balans. Det behövs 0.6-4 ton högre dos för att uppnå balans för K och P. Även om vittringen skulle vara underskattad måste underskattningen vara mycket stor, >100 %, för att balans säkert ska uppnås och det är knappast sannolikt.

Tabell 14. Tabell 14. Uttag, tillskott och netto av Ca, K, Mg och P vid stam- och helträdkörd i ett askåterföringssystem, samt ytterligare behov mätt som askdos. Biomassor beräknades enligt Marklund (1988). W+D-L är vittring+deposition-utlakning enligt Akseleson m.fl. (2006), Sverdrup och Stjernquist (2002), samt Robles (2005). Aska+kalk är enligt tabell 6.

Table 14. Table 14. Outputs, inputs and net of Ca, Mg, K and P at stem and whole-tree harvest in an ash recycling system, and additional nutrient demands as ash dose. Biomass was calculated according to Marklund (1988). W+D-L is weathering+deposition-leaching according to Akseleson (2006), Sverdrup and Stjernquist (2002), and Robles (2005). Ash+lime is according to table 6.

ämne	Skörd		W+D-L	aska+kal k	Netto		Behov motsv aska (ton)
	Stam	Helträd			Stamskörd +aska/kalk	Helträd +aska/kalk	
Ca	450-660	670-1050	240	1100	680-890	290- 670	0
K	110-310	310-600	200	80	-30-170	-320- -30	0.4-4
Mg	35-50	75-110	40	160	150-165	90- 125	0
P	30-60	80-125	40	25	5-35	-60- -15	0.6-2.4

För Ca ser det visserligen bra ut, men balansen är räknad med siffror på läckage- och skördeförluster före askåterföring. Eftersom såväl upptag (tabell 8) som läckage (tabell 10)

ökar kommer balansen efter askåterföring sannolikt inte att vara så positiv som beräkningen enligt tabell 14 indikerar. Läckaget ökar, vilket i sig är positivt för vattenkvaliteten, till ca $11 \text{ kg Ca ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ (beräknat enligt tabell 10). Vittring och deposition påverkas sannolikt inte nämnvärt. Om lyxupptag av Ca i barr också innebär att upptaget ökar i motsvarande grad i övriga delar av den ovanjordiska biomassan, här med 67 % (tabell 8), så innebär det Ca-förluster på sammanlagt $1100\text{-}1800 \text{ kg ha}^{-1}$. En jämförelse med tabell 14 visar att det alltså finns en risk för att behandling med två ton aska och två ton kalk ton inte är tillräckligt för att kompensera skörde- och läckageförluster av Ca om GROT tas ut. Det finns stora osäkerheter i dylika kalkyler, vittringsberäkningar bör t.ex. göras för samma bestånd som uttaget beräknas för. Det krävs ytterligare studier för att undersöka hur stor askgivan behöver vara för att uppnå ett uthålligt skogsbruk.

5 Slutsatser

Askåterföringen verkar ha gett de positiva effekter som var åsyftade med åtgärden, förbättrad näringsstatus i mark och träd och minskad aciditet i mark. Det gäller i högre grad för granbestånden än för bokbestånden där effekter på bladkemi saknades. De positiva effekterna var dock små i mineraljorden och i markvattnet. Dosen två ton aska och två ton kalk verkar vara för låg för att höja pH i mineraljorden och ANC i markvattnet. Det beror troligen på desorption av tidigare deponerat sulfat.

Befarade negativa effekter på N-läckage och C-balans har uteblivit. Istället verkar C-balansen vara positiv i såväl gran- som bokbestånd och N-förlusterna har minskat i askade bokbestånd. Det senare kan bero på högre inbindning av N i fältskikt och i mark. Dosen verkar vara för låg för att ge någon nämnvärd effekt på mineraliseringshastigheten, däremot kan nitrifikationshastigheten ha ökat något. Men, så länge vegetationen kan ta upp frigjort nitrat, vilket sannolikt har skett i de här studerade bestånden, kommer det inte att leda till ökat nitratläckage.

Det är sannolikt trädens förbättrade P-status, inte N-status, som ligger bakom tillväxtökningen i askade granbestånd. Det styrks av att det finns en korrelation mellan tillväxt och P i barr men ingen korrelation mellan tillväxt och N i barr. Den uteblivna tillväxteffekten för bok kan bero på att för lite P tillförts i relation till trädens behov och/eller att bok med sin lägre tillväxthastighet tar längre tid på sig att reagera på åtgärden. Trädens och markens förbättrade näringsstatus innebär en framtida högre uthållig produktionskapacitet och gör träden mer stressresistenta.

För att fullständigt kompensera för skördeförluster av K och P vid GROT-uttag krävs högre dos än två ton per ha av de flesta askor. Om syftet med behandlingen också är att motverka antropogen försurning måste mer alkalinitet tillföras. Om behandlingen anpassas till de enskilda beståndens behov m.a.p. träd och avrinnande vatten ökar effektiviteten i askåterföringssystemet. För att göra det krävs forskning och utveckling av dels verktyg för att bedöma åtgärdsbehov och dels hantering/produktion av aska. Det är t.ex. önskvärt att anpassa förbränning så att förluster av K och P minimeras.

Möjligheterna till god lönsamheten i åtgärden askåterföring för den enskilde markägaren bedöms vara goda.

6 Tack

Två examensarbeten har utförts inom projektet av Maria Olsbäck resp. Daniel Glimtoft, Lunds Universitet. Stort tack för era goda insatser. Tack till Lars-Göran Thuresson, Therese Zetterberg, Zoltan Fazakas, Ingmar Josefsson och Dan Karlsson Skogsstyrelsen för hjälp med framtagning av lämpliga lokaler. Tack till Anders Jonshagen, Biokonsult, Sven Bengtsson och Tönnersjöhedens försökspark för provtagning. Tack till Per-Erik Larsson, IVL och Bo Bergqvist och Bengt Nihlgård, LU för hjälp med data. Projektet finansierades av Värmeforsk.

7 Referenser

- Akselsson C, Larsson P-E och Westling O. 1998. Markkemi och markvatten i kalkad skog. Årsrapport 1997. Effekttuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödning av skogsmark. IVL – Svenska Miljöinstitutet AB, Rapport B 1318.
- Akselsson C, Westling O, Larsson P-E och Petersson P. 2000. Markvatten, barrkemi och trädutväxt efter behandling med olika doser och sorter av kalk. Årsrapport 1999. Effekttuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödning av skogsmark. IVL – Svenska Miljöinstitutet AB, Rapport B 1386.
- Akselsson C, Westling O och Örländer G. 2004. Regional mapping of nitrogen leaching from clearcuts in southern Sweden. *Forest Ecology and Management* 202, 235-243.
- Akselsson C, Sverdrup H, Westling O, Holmqvist J, Thelin G, Uggla E och Malm G. 2006. Impact of harvest intensity on long-term base cation budgets in Swedish forest soils. Accepted for publ. in *Water, Air, and Soil Pollution*.
- Akselsson C och Westling O. 2005. Regionalized nitrogen budgets in forest soils for different deposition and forestry scenarios in Sweden. *Global Ecology and Biogeography* 14, 85-95.
- Andersson S, Valeur I och Nilsson I. 1994. Influence of lime on soil respiration, leaching of DOC, and C/S relationships in the mor humus of a Haplic Podsol. *Environ. Int.* 20, 81-88.
- Aronsson A. 1985. Indikationer på stress vid obalans i trädens växtnäringsinnehåll. *K. Skogs- o. Lantbr.akad. tidskr. Suppl.* 17, 40–51.
- Arvidsson H. 2001. Wood Ash Application in Spruce Stands, Effects on ground vegetation, tree nutrient status and soil chemistry. Doktorsavhandling, SLU, Uppsala. ISBN 91-576-6305-X.
- Arvidsson H och Lundkvist H. 2002. Effects of crushed wood ash on soil chemistry in young Norway spruce stands, *Forest Ecology and Management* 176, 121-132.
- Binkley D och Högberg P. 1997. Does atmospheric deposition of nitrogen threaten Swedish forests? *Forest Ecology and Management* 92, 119-152.
- Brady N C och Weil R R. 2002. The nature and properties of soil – 13th ed. Prentice Hall. ISBN 0-13-016763-0.
- Braekke F H. 1994. Diagnostiske greseverdier for næringsselementer i gran- og furunåler. *Aktuelt fra Skogforsk* 15, 1-11.
- Ericsson T, Rytter L och Vapaavuori E. 1996. Physiology of carbon allocation in trees. *Biomass and Bioenergy* 11, 115-127.
- Eriksson H M. 1999. Återföring av granulerad vedaska – effekter på avrinningsvatten, markvatten och markkemi. Ramprogram askåterföring, Energimyndigheten, rapport ER 21:1999.
- Eriksson J. 1998. Dissolution of Hardened Wood Ashes in Forest Soils: Studies in a Column Experiment. *Scand. J. For. Res. Suppl.* 2, 23-32.
- Fransman B och Bramryd T. 1996. Barkaska som vitaliseringsmedel i samband med bokskogsförnygring – Yndeprojektet. *Ekol. Inst., Lunds Univ.*
- Fransson A-M, Bergkvist B och Tyler G. 1999. Phosphorus solubility in an acid forest soil as influenced by form of applied phosphorus and liming. *Scandinavian Journal of forest research* 14, 538-544.

- Giesler R, Pettersson T och Högberg P. 2002. Phosphorus limitation in boreal forests: Effects of aluminum and iron accumulation in the humus layer. *Ecosystems* 5, 300-314.
- Glimtoft D. 2005. Effect of wood ash addition on nutrient dynamics in Norway spruce stands. Reports in Ecology and Environmental engineering, Dept. of chemical engineering, Lund University. Report 2005:6. ISRN LUTKDD/TKKT-3026-SE.
- Gundersen P och Bashkin V N. 1994. Nitrogen cycling. I Moldan B. and Cerny J. (red.). *Biogeochemistry of small catchments: a tool for environmental research*. John Wiley and Sons Ltd., London, Scope 51, s 255-283. ISBN 0-471-93723-1.
- Göransson H. 2006. The vertical distribution of roots, mycorrhizal mycelia and nutrient acquisition in mature forest trees. Doktorsavhandling Lunds Universitet. ISBN 91-7105-233-X.
- Högbom L, Nohrstedt H-Ö och Nordlund S. 2001. Effects of wood-ash addition on soil-solution chemistry and soil N dynamics at a *Picea abies* (L.) Karst. site in southwest Sweden. SkogForsk Raoport 4, 2001.
- IVL. 2006. Krondroppsnetet, IVL Svenska miljöinstitutet AB, www.ivl.se/miljo/projekt/kron.
- Jacobsson S. 2003. Addition of Stabilized Wood Ashes to Swedish Coniferous Stands on Mineral Soils- Effects on Stem Growth and Needle Nutrient Concentrations. *Silva Fennica* 37, 437-450.
- Jönsson A M. 2000. Bark lesions and sensitivity to frost in beech and Norway spruce. Doktorsavhandling Lunds Universitet.
- Jönsson U. 2005. Phytophthora and Oak decline – Impact on seedlings and mature trees in forest soils. Doktorsavhandling Lunds Universitet, ISBN 91-7105-214-3.
- Kreutzer, K. 1995. Effects of forest liming on soil processes. *Plant and Soil* 168-169, 447-470.
- Larsson P-E och Westling O. 1997. Ytvatten i kalkade avrinningsområden. Årsrapport 1996 Effektuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitalisering av skogsmark. IVL – Svenska Miljöinstitutet AB, Rapport B1279.
- Larsson P –E, Westling O och Abrahamsson I. 2003. En integrerad strategi för kalk- och askspridning i avrinningsområden. IVL – Svenska Miljöinstitutet AB, Rapport B1435.
- Larsson P-E, Akselsson C, Bengtsson R och Bjelke U. 1999. Biologiska effekter i kalkad skog – Effektuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark, Årsrapport 1998. IVL – Svenska Miljöinstitutet AB, Rapport B1343.
- Linder S. 1995. Foliar analysis for detecting and correcting nutrient imbalances in Norway spruce. *Ecological Bulletins* 44, 178-196.
- Martinson L. 2004. Recovery from acidification – Policy oriented dynamic modeling. Doktorsavhandling Lunds Universitet, ISBN 91-628-6016-X.
- Martinson L, Alveteg M och Warfvinge P. 2003. Parameterization and evaluation of sulfate adsorption in a dynamic soil chemistry model. *Environmental Pollution* 124, 119-125.
- Mohamed A D, Ranger J, Dambrine E, Bonneau M, Gelhaye D och Granier A. 1993. The effects of limestone and of limestone plus NPK fertilization on the soil and mass balance of a spruce stand (*Picea abies* (L.) Karst.) in the Vosges mountains. *Forest Ecology and Management* 60, 291-310.
- Mohren G M J, Van den Burg J och Burger F W. 1986. Phosphorous deficiency induced by nitrogen input in Douglas fir in the Netherlands. *Plant and Soil* 95, 191-200.

- Månsson K. 2005. Plant-Bacterial and Plant-Fungal Competition for Nitrogen and Phosphorus. Doktorsavhandling Lunds Universitet, ISBN 91-7105-220-8.
- Nihlgård B, Nilsson I, Popovic' B, Bramryd T, Fransman B, Gyllin M och Ljungström M. 1995. Markkemiska effekter av kalkning. I Staaf H, Persson T och Bertills U. (red), Skogsmarkskalkning. Naturvårdsverket Rapport 4559, 45-69.
- Nihlgård B. 1997. Fulltofta Kretslopps försök. Rapport 2. Ekol. Inst., Lunds Univ.
- Nihlgård B. 2006. Fulltofta Kretslopps försök - Askåterföring till skogsmark, Ett projekt 1996-2005 i regi av Region Skåne, Malmö Värme AB, Sydbränsle AB och Lunds Universitet. Ekol. Inst., Lunds Univ.
- Nilsson S I, Andersson S, Valeur I, Persson T, Bergholm J och Wirén A. 2001. Influence of dolomite lime on leaching and storage of C, N and S in a Spodosol under Norway spruce (*Picea abies* (L.)Karst.). Forest Ecology and Management 146, 55-73.
- Nilsson L-O. 2004. External mycelia of mycorrhizal fungi – responses to elevated N in forest ecosystems. Doktorsavhandling Lunds Universitet, ISBN91-7105-213-5.
- Nohrstedt H-Ö. 1990. Tillväxteffekter vid gödning med olika näringsämnen i barrskog. – En sammanfattning av resultat erhållna vid Institutet för skogsförbättring. I L-E Liljelund (red.), Skogsvitalisering – Kunskapsläge och forskningsbehov. Naturvårdsverket, rapport 3813, ISBN 91-620-3813-3.
- Nohrstedt H-Ö, Sikström U och Ring E. 1993. Experiments with vitality fertilisation in Norway spruce stands in southern Sweden. Skogforsk, rapport 2, 1993.
- Nohrstedt H-Ö och Sikström U. 1999. Skogsvitalisering, Halmstad den 27 maj 1999, exkursionsguide, Skogforsk.
- Olsbäck, M. 2005. Effects of wood-ash fertilization in two Norway spruce stands (*Picea abies* (L.) Karst.) in southern Sweden. Examensarbete, Inst. f. Kemiteknik, Lunds Univ.
- Olsson B och Westling O. 2005. Skogsbränslecykelns näringsbalans. Slutrapport till Energimyndigheten Projekt p 12304-2.
- Olsson B, Lundkvist H, Bergholm J, Brandtberg P-O, Grip H och Lövdahl L. 2005. Revisioner av markens näringstillstånd i långliggande fältförsök med skogsbränsleuttag respektive askåterföring. Slutrapport av STEM-projekt p12773-1 för perioden 2000-07-01 – 2004-06-30.
- Persson T och Nilsson L-O. 2001. Skogabyförsöket – Effekter av långvarig kväve och svaveltillförsel till ett skogsekosystem. Naturvårdsverket, rapport 5173. ISBN 90-620-5173-3.
- Persson T och Wirén A. 1996. Effekter av skogsmarkskalkning på kväveomsättningen. I Staaf H, Persson T och Bertills U. Skogsmarkskalkning – Resultat och slutsatser från Naturvårdsverkets försöksverksamhet. Naturvårdsverket, rapport 4559.
- Ring E, Jacobsson S och Högbom L. 2002. Slutrapport år 2002 för projekt: ”Massaindustrins barkaska åt skogen”. Skogforsk.
- Robles M. 2005. Assesing nutrient sustainability of forests at Björnstorp Estate. Examensarbete, Inst. f. Kemiteknik, Lunds Univ. ISRN LUTKDD/TKKT—3024—SE.
- Rosengren U och Stjernquist I. 2004. Gå på djupet! Om rottdjup och rotproduktion i olika skogstyper. Lunds Univ., ISBN 91-576-6617-2.
- Rosvall O. 1980. Prognosfunktioner för beräkning av gödningseffekter. Årsbok 1979 Föreningen skogsträdsförädling och Institutet för skogsförbättring, Uppsala, s 70-130.
- Saarsalmi A, Mälkönen E och Piirainen S. 2001. Effects of wood ash fertilization on forest soil chemical properties. Silva Fennica 35, 355-368.

- Sikström U, Nohrstedt H-Ö, Pettersson F och Jacobson S. 1998. Stem-growth response of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* to nitrogen fertilization as related to needle nitrogen concentration. *Trees* 12, 208-214.
- Sikström U. 2002. Effects of liming and fertilization (N, PK) on stem growth, crown transparency, and needle element concentrations of *Picea abies* stands in southwestern Sweden. *Can. J. For. Res.* 32, 1717–1727.
- Stevens P A, Harrison A F, Jones H E, Williams T G och Hughes S. 1993. Nitrate leaching from a Sitka spruce plantation and the effect of fertilisation with phosphorus and potassium. *Forest Ecology and Management* 58, 233-247.
- Sverdrup H och Stjernquist I. 2002. Developing principles for sustainable forestry in Sweden, Kluwer Academic publishers, ISBN 1-4020-0999-2.
- Swift K I och Brockley R P. 1994. Evaluating the nutrient status and fertilization response potential of planted spruce in the interior of British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research* 24, 594-602.
- Tamm C-O. 1991. Nitrogen in Terrestrial Ecosystems. Questions of Productivity. Springer Verlag, Berlin, 116 pp. TTSRTR.
- Teng Y och Timmer V R. 1995. Rhizosphere phosphorus depletion induced by heavy nitrogen fertilization in forest nursery soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, 227-233.
- Theelin G. 2000. Nutrient imbalance in Norway spruce. Doktorsavhandling Lunds Universitet, ISBN 91-7105-147-3.
- Theelin G, Rosengren-Brinck U, Nihlgård B och Barkman A. 1998. Trends in needle and soil chemistry of Norway spruce and Scots pine stands in South Sweden 1985-1994. *Environmental Pollution* 99, 149-158.
- Theelin G, Rosengren-Brinck U och Nihlgård B. 1999. Can graphical vector analysis be used to identify micro nutrient deficiency? *Water, Air, and Soil Pollution* 116, 383-388.
- Theelin G, Rosengren U och Nihlgård B. 2002a. Barrkemi på skånska gran- och tallprovtytor 2000. Skånes samrådsgrupp mot skogsskador, rapport 20.
- Theelin G, Sverdrup H, Holmqvist J, Rosengren U och Lindén M. 2002b. Assessment of nutrient sustainability in Norway spruce and mixed Norway spruce-oak stands at Jämjö. I Sverdrup H och Stjernquist I (red), Developing principles for sustainable forestry in Sweden, Kluwer Academic publishers, ISBN 1-4020-0999-2.
- Theelin, G. 2005. EcoFor - Återföring av restprodukter från skogsindustrin till skogen - fältförsök. Slutrapport till STEM.
- Valentine D W och Allen H L. 1990. Foliar responses to fertilization identify nutrient limitation in loblolly pine. *Canadian Journal of Forest Research* 20, 144-151.
- van Hees P, Nyberg L, Holmström S J M och Lundström U S. 2003. Pools and fluxes of cations, anions and DOC in two forest soils treated with lime and ash. *Water Air and Soil Pollution: Focus*, 3, 145-165.
- Wardle D A, Walker L R och Bardgett R D. 2004. Ecosystem Properties and Forest Decline in Contrasting Long-Term Chronosequences. *Science* 305, 509-513.
- Westling O och Orth L. 1998. Tillförsel av aska och kalk till skogsmark i södra Sverige. Projektrapport, IVL och SÖDRA.
- Westling O, Andersson I och Öhrlander G. 2004. Effekter av askåterföring till granplanteringar med riståkt. IVL – Svenska Miljöinstitutet AB, Rapport B1552.
- Zetterberg T och Westling O. 2005. Utlakning från kalkade avrinningsområden, Effektuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitalisering av skogsmark. IVL – Svenska Miljöinstitutet AB, Rapport B1642.

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeknisk forskning och utveckling. Forskningsprogrammet är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem.

Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrin
- Övrig industri

VÄRMEFORSK SAMARBETAR MED
STATENS ENERGI MYNDIGHET

VÄRMEFORSK SERVICE AB
101 53 Stockholm
Tel 08-677 25 80
Fax 08-677 25 35
www.varmeforsk.se

Beställning av trycksaker
Fax 08-677 25 35