

# Långsiktiga effekter av askåterföring på mark- och markvattenkemi i skog

Olle Westling och Veronika Kronnäs  
B1670  
Februari 2006

<b>Organisation</b> IVL Svenska Miljöinstitutet AB	<b>Rapportsammanfattning</b>
<b>Adress</b> Box 5302 400 14 Göteborg	<b>Projekttitel</b>
<b>Telefonnr</b> 031-725 62 00	<b>Anslagsgivare för projektet</b> Energimyndigheten
<b>Rapportförfattare</b> Olle Westling och Veronika Kronnäs	
<b>Rapporttitel och undertitel</b> Långsiktiga effekter av askåterföring på mark- och markvattenkemi i skog Slutrapport till Energimyndigheten Projekt 12761-1	
<b>Sammanfattning</b> IVL Svenska Miljöinstitutet har genomfört en studie av långsiktiga behov och möjligheter med askåterföring efter stora uttag av grenar och toppar (GROT) i gran och tallskog i Sverige. Studien baseras på dynamiska modellberäkningar i skogsytor spridda över landet samt tidigare studier av effekten av stabiliserade trädaskor på mark och markvatten. Den minskade belastningen av försurande luftföroreningar som förväntas 2010 kan bidra till en påtaglig återhämtning från försurning, främst i markvatten och avrinning från skogsmark i områden i södra Sverige som tidigare haft en hög deposition. En omfattande återhämtning av markens basmättnadsgrad är dock mindre trolig enligt de utförda modellberäkningarna, i synnerhet om skogsbruk bedrivs utan kompensationsåtgärder. Modellresultaten indikerar att enbart skörd av stamved inte kommer att ha någon avgörande långsiktig inverkan på markens syra-bas status eller försurningen av avrinningen i gran och tallskog i landet. När uttag av stamved kombineras med stora uttag av GROT finns en uppenbar risk för långsiktiga försurningseffekter, framför allt i bördiga granskogar på mineralogiskt svaga marker. Resultaten av studien talar för att kompensation med stabiliserade trädaskor eller kalk bör utföras i bördiga skogar med stora uttag av biomassa, i synnerhet i områden som försurats tidigare av luftföroreningar. Motverka försurning i mark och vatten är sannolikt det långsiktiga kompensationsmål som lättast kan uppnås med askåterföring på grund av det relativt höga innehållet av kalcium och magnesium i stabiliserade askor. Andra långsiktiga mål som att förbättra trädens näringsstatus och tillväxt eller att öka skogsmarkens basmättnad och förråd av näringsämnen kan vara svårare att uppnå i praktiken med de askor som finns att tillgå i nuläget i Sverige.	
<b>Nyckelord samt ev. anknytning till geografiskt område eller näringsgren</b> Skogsbruk, GROT, försurning, skogsmark, aska, basmättnad, dynamiska modellberäkningar	
<b>Bibliografiska uppgifter</b> IVL Rapport B1670	
<b>Rapporten beställs via</b> Hemsida: <a href="http://www.ivl.se">www.ivl.se</a> , e-post: <a href="mailto:publicationservice@ivl.se">publicationservice@ivl.se</a> , fax 08-598 563 90, eller via IVL, Box 21060, 100 31 Stockholm	

Rapporten godkänd:  
2006-02-21



Peringe Grennfelt  
Forskningschef

## **Förord**

Studien analyserar både behovet av långsiktiga åtgärder samt möjligheterna med askåterföring som metod att motverka framför allt försurning av mark och vatten efter uttag av skogsbränslen i form av grenar och toppar (GROT) efter avverkning. Den ursprungliga planeringen av studien var koncentrerad på att studera långsiktiga konsekvenser för mark och vatten av behandlingar med askor med varierande upplösningshastighet, jämfört med alternativet att avverkningsrester med annan nedbrytning än aska lämnas kvar. Under arbetes gång har parallella studier kommit fram till att andra aspekter är minst lika viktiga, som varaktigheten och variationen i effekter av GROT-uttag, samt betydelsen av askornas kemiska sammansättning. Det har gjort att inriktningen ändrats något till att analysera även behovet av långsiktiga åtgärder och möjligheterna att motverka främst försurningseffekter med askåterföring. Den sistnämnda aspekten har belysts genom jämförelser med gamla kalkningsförsök, eftersom det visat sig i utlakningsstudier att kalk och aska har stora likheter. Ovanstående aspekter diskuteras vidare i rapporten.

Arbetet är utfört av IVL Svenska Miljöinstitutet inom ASTAs (International and national Abatement Strategies for Transboundary Air Pollution) nationella program med stöd av Energimyndigheten. Utöver författarna har Filip Moldan IVL deltagit i arbetet med modellberäkningarna med MAGIC. Gustaf Egnell SLU har utfört beräkningar av biomassatillväxt och avverkningsscenarier i de studerade skogsytorna. Johan Knulst IVL har insamlat uppgifter om den historiska markanvändningen i de studerade skogsbestånden. Mätdata från skogsytorna har sammanställt av Eva Uggla IVL.

## Sammanfattning

IVL Svenska Miljöinstitutet har genomfört en studie av långsiktiga behov och möjligheter med askåterföring efter stora uttag av grenar och toppar (GROT) efter avverkning i gran och tallskog i Sverige. Studien baseras på dynamiska modellberäkningar i skogsytor spridda över landet samt tidigare studier av effekten av stabiliserade trädaskor på mark och markvatten.

Den minskade belastningen av försurande luftföroreningar som förväntas 2010 kan bidra till en påtaglig återhämtning från försurning, främst i markvatten och avrinning från skogsmark i områden i södra Sverige som tidigare haft en hög deposition. En omfattande återhämtning av markens basmättnadsgrad är dock mindre trolig enligt de utförda modellberäkningarna, i synnerhet om skogsbruk bedrivs utan kompensationsåtgärder.

Modellresultaten indikerar att enbart skörd av stamved inte kommer att ha någon avgörande långsiktig inverkan på markens syra bas-status eller försurningen av avrinningen i gran och tallskog i landet. Den slutsatsen kan dras genom jämförelser med ett scenario som innebär att skogsbruket upphör efter år 2000. Minskad deposition, även efter 2010, är viktigare i områden som redan är försurade av luftföroreningar. När uttag av stamved kombineras med stora uttag av GROT finns en uppenbar risk för långsiktiga försurningseffekter, framför allt i bördiga granskogar på mineralogiskt svaga marker. Resultaten av studien talar för att kompensation med stabiliserade trädaskor eller kalk bör utföras i bördiga skogar med stora uttag av biomassa, i synnerhet i områden som försurats tidigare av luftföroreningar.

Motverka försurning i mark och vatten är sannolikt det långsiktiga kompensationsmål som lättast kan uppnås med askåterföring på grund av det relativt höga innehållet av kalcium och magnesium i stabiliserade askor. Både laboratorie- och fältstudier har visat att den kemiska sammansättningen och asktypen har större betydelse för den syraneutraliserande förmågan än stabiliseringsmetoden. Den kemiska sammansättningen är i sin tur kopplad till bränslets ursprung (stamved eller GROT) och typ av aska (botten- flyg- eller CFB-aska). Flyg- och CFB-askor har i regel snabbare upplösning än kalk och sannolikt även avverkningsrester med tanke på syraneutraliserande förmåga. På lång sikt har den normala variationen i askornas upplösningshastighet begränsad betydelse för markens förråd av baskatjoner och basmättnad, möjligen med undantag för kalium som kan utlakas i synnerhet i hyggesfasen. Det finns dock inga försöksresultat som tydligt visar att det finns stabiliseringsmetoder som kan åstadkomma en långsam utlakning av kalium. Viktigt är att dosen aska anpassas efter askans kemiska sammansättning, i första hand kalciuminnehåll, om specifika mål för neutralisering ska uppnås. För att den rekommenderade maximala dosen på tre ton per ha ska kunna hållas krävs att askans innehåll av baskatjoner är tillräcklig för att kompensera för uttagen mängd i form av GROT.

Andra långsiktiga mål som att kompensera förluster av näringsämnen som kalium och fosfor i skogsmark med uttag av GROT kan vara svårare att uppnå i praktiken med de askor som finns att tillgå i nuläget i Sverige enligt en studie av Olsson & Westling (2005). En jämförelse mellan näringsförluster genom uttag av GROT och återföring med trädaskor (maximalt 3 ton per ha) med genomsnittlig kemisk sammansättning indikerar förluster i kedjan från skogen genom pannan och tillbaka till skogen i form av aska. Långsiktig kompensation för kalium är svårt att uppnå på grund av att kalium i GROT och askor visar stor tendens att lakas ut. Detta kan även gälla hyggen där riset ligger kvar. Fosforkompensation genom askåterföring har begränsad effekt på grund av fosfors bindning i svårösta mineral och låga halter i askor, men fosfor i de askor som nu finns tillgängliga torde dock ha vissa långsiktigt positiva effekter.

## Summary

IVL Swedish Environmental Research Institute has studied the long-term need of compensatory fertilisation (e.g. wood ash recycling) after whole tree harvest in coniferous forests in Sweden. The study is based on dynamic model calculations with scenarios including reduced atmospheric deposition of air pollutants and different intensity of forest management. The possibilities to counteract acidification in soil and water with application of stabilised wood ash are discussed.

The reduction in deposition of acidifying air pollutants in Sweden up to 2010 is expected to contribute to a significant recovery from acidification in soil- and runoff water in forests. The recovery of the forest soil (e.g. base saturation) will, however, be slow according to the model calculations, especially if compensatory fertilisation is not carried out in managed areas.

The model calculations indicate that the harvest of stemwood will have limited impact on the future acidity of soil and run off water from well drained forest soils. This conclusion is based on a comparison with a scenario where no harvest is assumed. More important for recovery from acidification is further reduction of acidifying air pollutants, even after 2010. Harvest of stemwood in combination with extraction of harvest residues has the potential to cause significant and long term acidification of soils in the future, especially in areas with high forest production and slow weathering rate. The results of the study indicate a need of compensatory fertilisation in these areas if whole tree harvest is applied, especially if the deposition of air pollutants have been high in the past.

Field studies have shown that acidification effects of whole tree harvest can be counteracted by wood ash recycling to forest soils, due to the high content of calcium- and magnesium-rich minerals in the ashes. However, the dose should be adjusted to the need of increasing the acid neutralising capacity in the soil and runoff and the actual chemical content of available ashes. Other long-term objectives, such as improved supply of nutrients as potassium and phosphorus for tree growth, are more difficult to achieve with wood ash recycling, due to a low nutrient content in the ashes, and in some cases limited solubility.

## Innehållsförteckning

1	Bakgrund.....	5
1.1	Depositionens försurande inverkan.....	5
1.2	Skogsbruk och markförsurning.....	5
1.3	Markens framtida försurningsutveckling.....	8
2	Studiens syfte.....	8
3	Metoder för modellberäkningar.....	8
3.1	Lokaler.....	9
3.2	Scenarier och indata till modellberäkningarna.....	10
3.2.1	Deposition.....	10
3.2.2	Mark- och markvattendata.....	11
3.2.3	Skogsbruk.....	11
3.2.4	Upptag av baskatjoner i olika träddelar.....	11
3.3	Kalibrering av MAGIC.....	12
4	Resultat av modellberäkningar.....	12
4.1	Effekter av GROT-uttag på syra bas-status i mark.....	12
4.2	Effekter av GROT-uttag på markvatten.....	15
4.3	Modellberäkningarnas osäkerhet.....	17
5	Långsiktiga effekter av askåterföring på markförsurning.....	18
5.1	Behov av långsiktig kompensation.....	18
5.2	Askans syraneutraliserande förmåga.....	19
6	Slutsatser.....	23
6.1	Effekter av minskad belastning av luftföroreningar.....	23
6.2	Effekter av skogens tillväxt och skörd.....	23
6.3	Effekter av askåterföring på lång sikt.....	23
7	Referenser.....	24

# 1 Bakgrund

## 1.1 Depositionens försurande inverkan

Studier från de senaste decennierna visar att pH i södra Sveriges skogsmarker minskat med 0,3-1,0 pH-enheter och förråden av utbytbara baskatjoner minskat med 30–70 % från 1950-talet (Staaf m.fl., 1996). Det är inte förlusten av baskatjoner som i sig orsakar försurning utan det faktum att de ersätts av väte- och aluminiumjoner. Förändringar av mängden baskatjoner är dock en indikator på markförsurning orsakad av starka syror. En stor del av förändringen förklaras med depositionen av framför allt svavel i form av stark syra. Tillförseln av stark syra försurar både mark och vatten genom att den rörliga sulfatjonen bidrar till att utlaka baskatjoner och när basmättnaden sjunker ökar förekomsten av väte- och aluminiumjoner.

Depositionen av svavel i Sverige beräknas minska med cirka 50-60 % fram till år 2010 jämfört med 1990 års nivå. Utsläpp av kväveoxider har samma utsläppskällor som svavel med tillägg för utsläppen från transporter (EMEP, 1998). Jordbruket står för huvuddelen av ammoniakutsläppen. De förväntade minskningarna av kvävedepositionen till år 2010 efter det senaste avtalet om utsläppsbegränsningar är inte lika stora som för svavel. Det medför att depositionen kan komma att ligga kvar på en förhöjd nivå i stora delar av Sverige även efter 2010 och målet att undvika försurnings- och eutrofieringseffekter på grund av kvävedeposition kan vara svårt att nå, i synnerhet i södra Sverige.

## 1.2 Skogsbruk och markförsurning

Marken har försurats långsamt under många tusen år genom naturliga processer. Många markområden i landet har även påverkats i olika riktningar av mänsklig aktivitet. Både arealen och volymen skog har ökat under 1900-talet, i synnerhet i södra Sverige, på bekostnad av åker- och betesmark. Förändringen från ett relativt öppet landskap i södra Sverige till brukade barrskogar påverkar i sig markförsurningen.

Skogens tillväxt är försurande då vätejoner frigörs när rötterna tar upp näring (främst baskatjoner och ammoniumjoner) från marken. Ju snabbare tillväxt desto större blir tillskottet av vätejoner till marken. I ett system som inte skördas är denna försurningseffekt reversibel. När träden dör och bryts ner återförs baskatjonerna.

Bildning och upplagring av organiskt material i ytliga marklager i samband med skogens tillväxt har också en försurande effekt genom tillskottet av organiska syror, samt en fastläggning av baskatjoner (Skjällberg m fl., 2000). Tillskottet av syra beror på att organisk substans innehåller en hög koncentration av protonerade, potentiellt sura funktionella grupper. Ett ökat tillskott av organiskt material i mineraljordshorisonter leder i de flesta fall till en minskad basmättnadsgrad på grund av en utspädning av redan existerande organiskt bundna baskatjoner. Utspädningen innebär att mängden baskatjoner i marken är oförändrad, men markpartiklarna har fått ett tillskott av främst vätejoner (och den totala mängden utbytbara katjoner har ökat).

Det gör att förändringar av mängden baskatjoner inte är en lika bra indikator på försurning när den sker genom organiska syror, istället för starka syror.

En försurning av mark med organiska syror har inte en lika tydlig effekt på avrinnande vatten som tillförsel av starksyra, eftersom de organiska syrornas anjoner inte är så rörliga i markprofilen. Ökad mängd organiska syror och sänkt pH minskar dock kolsyrasystemets vittring, vilket leder till ett minskat tillskott av alkalinitet till vatten i form av vätekarbonatjoner. Den syraneutraliserande förmågan (ANC) förskjuts från vätekarbonat till organiska ämnen som kan uppträda både som syra och bas.

Flera studier har visat att skogsmarkens basmättnadsgrad och förråd av baskatjoner minskar vid skogsbrukets uttag av biomassa. Intensiteten i uttaget påverkar förändringarnas storlek (Egnell m. fl., 1998). Högproduktiva marker med gran får större relativa förändringar av basmättnaden än lågproduktiva tallskogar, trots ofta mer basiska mineral i jordarna på ståndorter med hög produktion. Uttag av avverkningsrester (GROT, Grenar Och Toppar) ger relativt stora förluster av näringsämnen i förhållande till den mängd biomassa som skördas.

Flera regionala och nationella beräkningar av massbalanser av baskatjoner har pekat på risken för nettoförluster av baskatjoner i samband med skogsbruk. Massbalansen i skogsmark omfattar tillförsel i form av vittring och deposition och bortförslen består av utlakning och nettoupptag i biomassa (tillväxt av de trädslag som senare skördas). Helträdsuttag kan leda till utarmning av kalcium, magnesium och kalium i marken i svenska skogar enligt studier av Olsson m. fl. (1993). Massbalansberäkningarna i studien bygger enbart på vittring och nettoupptag av baskatjoner. Oftast är utlakningen större än depositionen i Sverige, vilket ökar förlusterna av baskatjoner från skogsmarken.

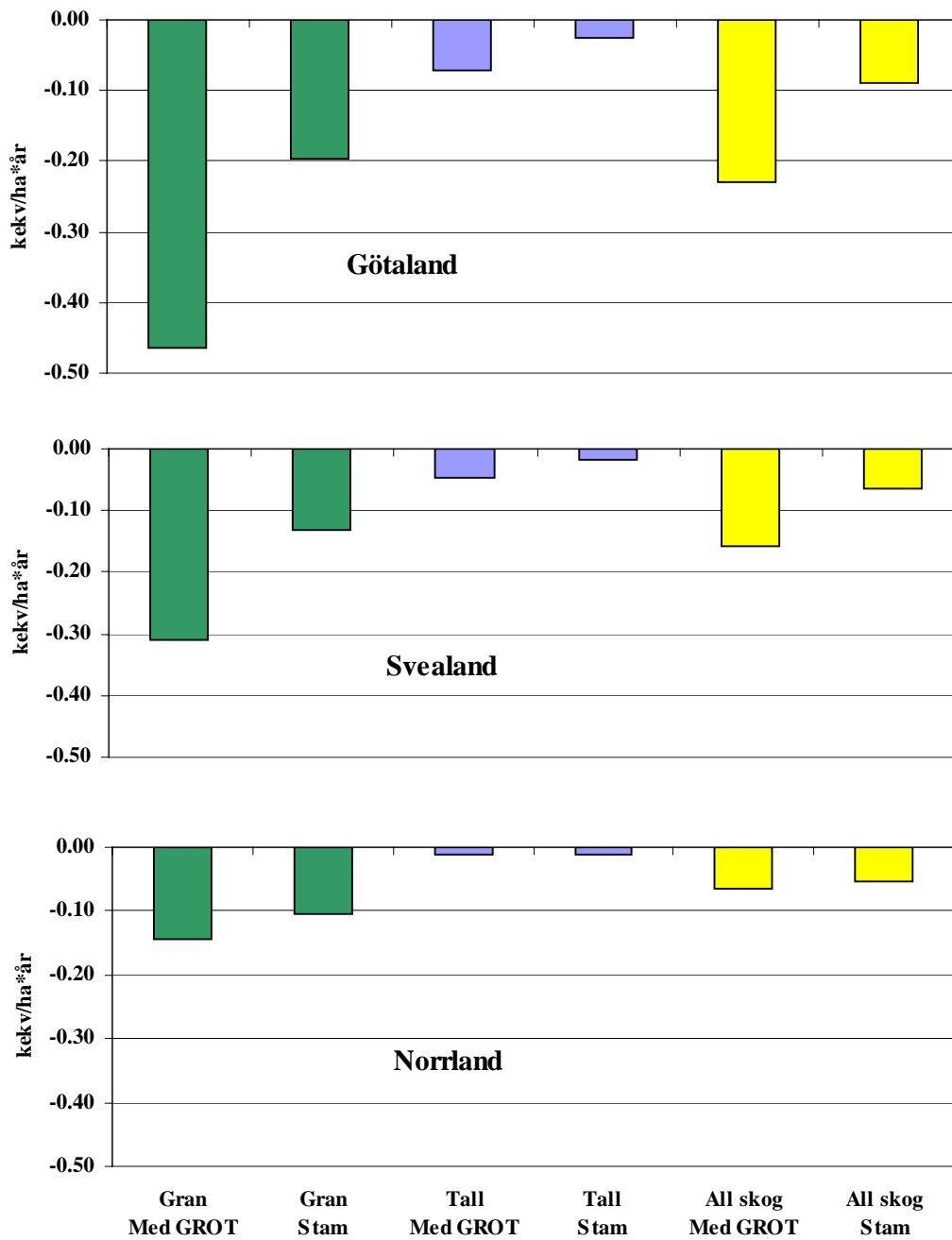
En annan massbalans beräknad för svenska skogar visar att vittring och baskatjondeposition inte räcker till för att kompensera för utlakning och trädens upptag av baskatjoner (Sverdrup och Rosen, 1998). Helträdsuttag utan återförslen av baskatjoner riskerar att påtagligt minska tillgången på näringsämnen i form av baskatjoner i marken inom en till två omloppstider i större delen av landet.

Figur 1 visar en statisk massbalansberäkning med betydligt högre upplösning än tidigare studier som utförts baserad på data från Akselsson (2005). Balansen mellan till- och bortförslen av baskatjoner varierar starkt inte bara i olika regioner utan även mellan olika ståndorter och trädslag enligt beräkningsresultaten. Granskog har en relativt stor potential för GROT-uttag genom fördelningen mellan stam och övriga trädslag, jämfört med andra trädslag. Uttag enligt scenariot i figur 1 visar att den beräknade baskatjonbalansen har ett stort underskott i granskog, i synnerhet i Götaland. Motsvarande beräkning för tall ger ett betydligt mindre underskott.

Förlusten av baskatjoner kan orsaka näringsobalans i marken som på lång sikt kan orsaka minskad tillväxt om något annat ämne än kväve blir tillväxtbegränsande (Rosén, 1988; Sverdrup & Rosen 1998). För närvarande finns det inte några belägg för att en utbredd näringsobalans som påverkar skogstillväxten har uppstått på mineraljordar i Sverige (Johansson m. fl., 1999). Däremot har den minskning av skogsmarkens basmättnadsgrad som noterats i stora delar av södra Sverige orsakat en kraftig försurning av avrinnande vatten, med låga pH-värden och höga halter av oorganiskt aluminium som följd (Nilsson & Tyler 1995; Moldan m. fl., 1999).

Styrkan med de statiska massbalansberäkningarna som beskrivs ovan är att de kan göras yttäckande och att de sannolikt belyser nuvarande tillstånd väl, under förutsättning att tillgången på data är god. Svagheten är att de inte utan vidare kan extrapoleras in i framtiden eftersom de inte tar hänsyn till dynamiska förlopp.





Figur 1. Nuvarande genomsnittliga baskatjonbalans (inkl. Na) i produktiva skogar med två scenarier för skörd i tre delar av landet. Uttag av stam baseras på länsvisa avverkningsmöjligheter i SKA 99. Uttag av GROT innebär 75 % av grenar och toppar samt 56 % av barren i gallring och förnygringsavverkning. Underlag från ASTAs databas med upplösningen 5\*5 km samt data från Akselsson (2005).

## 1.3 Markens framtida försurningsutveckling

Regionala skillnader i markens känslighet och depositionens storlek har gjort att antropogen försurning av skogsmark endast återfinns i vissa områden, framför allt i södra Sverige. Om nedfallet av starka syror minskar tillräckligt mycket kan skogsmarken till viss del återhämta sig från försurning. Hur mycket, och med vilken hastighet, kan bland annat dynamiska modellberäkningar ge en uppfattning om. Ett scenario som tidigare studerats är hur markens tidigare försurning och eventuella återhämtning i 20 skogsytor i södra Sverige påverkas av ett ökat och sedan reducerat nedfall (Moldan, m. fl., 1999). Scenariot innebär att det andra svavelprotokollet följs fullt ut, det vill säga svavelnedfallet reduceras med ca 70 % (från 1980), och skogen avverkas inte när den når hög ålder utan står kvar med låg tillväxt. Med få undantag sker en viss förbättring av vattenkvaliteten i avrinningen, men basmättnadsgraden i marken fortsätter att sjunka i de flesta skogsytorna. Avrinningsvattnet i de mest försurade områdena kan inte uppnå en acceptabel kvalitet före år 2020 enligt dessa beräkningar. Den syraneutraliserande förmågan (ANC) kommer inte att uppnå förindustriella nivåer i någon av de 20 ytorna. Många skogsytor kommer att fortsätta att vara försurade under lång tid framöver. Om skogen avverkas, i synnerhet med uttag av GROT (grenar och toppar) utan kompensationsåtgärder, och nya generationer med hög tillväxt påverkar skogsmarken kan försurningen öka ytterligare i framtiden (Moldan m. fl., 2001). Liknande resultat som i Moldan m. fl. (1999) redovisas i Martinsson m. fl. (2005) som utfört dynamiska modellberäkningar med SAFE i 16 skogsytor i Sverige, bland annat de 12 ytorna som ingår i denna studie.

## 2 Studiens syfte

Syftet med denna studie var att:

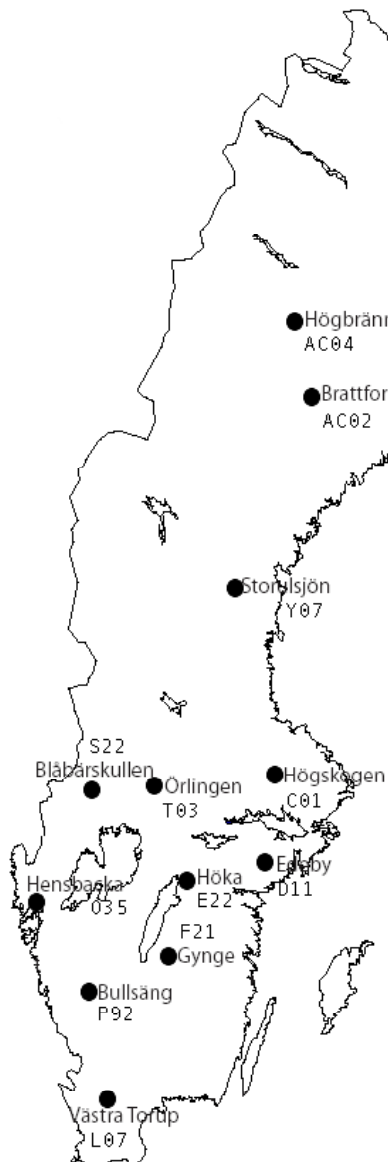
- Komplettera yttäckande förenklade massbalansstudier i skogsmark med uttag av GROT med dynamiska modellberäkningar som tar hänsyn till hur syratillskott förändrar markens och markvattnets (avrinningens) syra bas-status med tiden.
- Analysera i vilken utsträckning askåterföring långsiktigt kan kompensera för den försurnings-effekt, som följd av GROT uttag, som modellberäkningarna beskriver.

## 3 Metoder för modellberäkningar

Historisk och framtida mark- och markvattenkemi i 12 skogsytor har beräknats med MAGIC 7 (Cosby m. fl., 2001) med hjälp av detaljerade tidsserier på skogens upptag och skörd av baskatjoner med syfte att beskriva skogsbrukets försurnings-effekt. MAGIC är en dynamisk modell som beskriver kvantitativ påverkan på mark- markvatten- och avrinningskemi baserat på biogeokemiska processer och massbalanser. Data från skogsytorna kommer från pågående mätningar inom det europeiska miljöövervakningsprogrammet ICP-Forest ((International Co-operative Program on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests) Level II (Hallgren Larsson m. fl., 1995). Denna beräkning utnyttjade uppmätta data på mark- och markvattenkemi samt deposition av baskatjoner, svavel, kväve och klorid från perioden 1996 till 2001.

### 3.1 Lokaler

Jordarten i skogsytorna är i samtliga fall morän. Åtta av ytorna är planterade med gran och fyra med tall. Planteringarna av de nuvarande bestånden är utförda mellan 1915 och 1955. Fyra ytor finns i södra Sverige (figur 2) där deposition, skogstillväxt och utlakning är hög jämfört med övriga landet. Fem ytor återfinns i Svealand och tre i norra Sverige. Alla ytor har för de aktuella områdena representativ deposition, skogstillväxt och utlakning. Depositionen i norra Sverige av försurande svavel är idag endast något förhöjd (Liljergren & Westling 2005a). Lokalerna finns även mer utförligt beskrivna i Martinsson m. fl. (2005) och Belyazid m. fl. (2006).



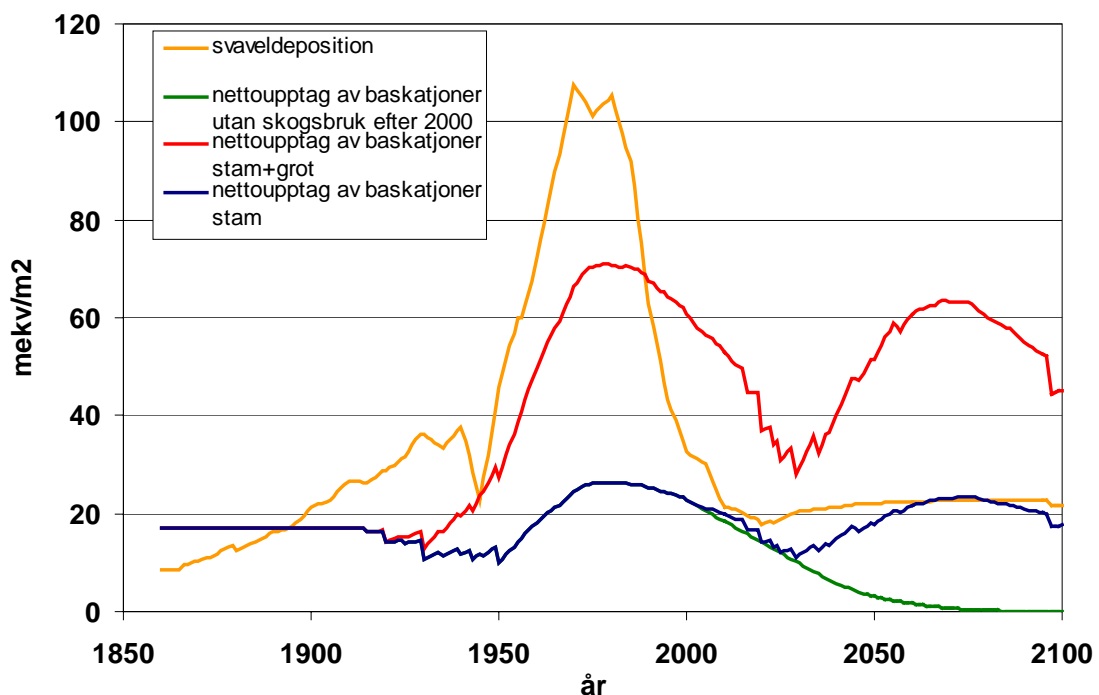
Figur 2. Undersökta lokaler

## 3.2 Scenarier och indata till modellberäkningarna

### 3.2.1 Deposition

Deposition på de studerade skogsytorna mättes som krondropp och nederbörd på öppet fält enligt manualen för ICP-Forest (Forest Mapping Manual 1998). Torrdeposition av baskatjoner och kväve till skogen beräknades enligt Westling m. fl. (1995). Deposition under fem år (1997-2001) användes för som bas för depositionssekvenser mellan 1860 och 2100 (figur 3), som är indata till modellberäkningarna.

Depositionstrender för svavel och kväve hämtades från CCE/IIASA (Schöpp m. fl., 2003) och trenden mellan 2000 och 2100 förutsätter full implementering av internationella avtal i form av Göteborgsprotokollet (UNECE, 1999). Depositionssekvenserna skalades till de undersökta skogsytorna baserat på mätningarna av deposition. Torrdepositionen varierade med beståndets ålder (kronbiomassa). Depositionen ökade linjärt från hygge (uppmätta värden på öppet fält) upp till maximal tillväxt (uppmätta och beräknade värden i slutet skog) indikerad av nettoupptaget av baskatjoner i figur 3, för att därefter ligga kvar under beståndets livslängd.



Figur 3. Tidsserier som använts i modellberäkningarnas olika scenarier för att beskriva tillskott av aciditet i form svaveldeposition samt skörd av baskatjoner som träden tagit upp (nettoupptag). Genomsnitt för alla lokaler. Med nettoupptag menas upptag i biomassa som senare skördas i de olika scenarierna.

### 3.2.2 Mark- och markvattendata

Indata på genomsnittlig markkemi från 1995 och 2000 från skogsytorna fanns tillgängliga från humus och mineraljordsskikt ner till 80 cm. Data omfattade utbytbara katjoner samt totalhalter av svavel, kol och kväve. I det djupaste mineraljordsskiktet fanns även totalhalter av makrokonstituenten som används bland annat för mineralogisk bestämning och vittringsberäkningar.

Data på markvattenkemi i skogsytorna under perioden 1997-2001 användes i modellberäkningarna. Markvatten provtogs med undertryckslysimetrar (P80) på 50 cm djup i mineraljorden.

### 3.2.3 Skogsbruk

Beståndsbeskrivningen från respektive skogsyta är hämtad från ICP-Forest program. Denna beskrivning låg till grund för en beräkning av historisk och framtida tillväxt samt olika scenarier för möjlig skörd. Både förväntad tillväxt och skörd beräknades med standardmetoder för skoglig planering i Sverige (Gustaf Egnell muntl. medd.) som bygger på empiriska data från bland annat Riksskogstaxeringen. Information om historisk markanvändning inhämtades via intervjuer och kartmaterial.

Årliga tidsserier för skogens nettoupptag av baskatjoner från 1860 och in i framtiden togs fram med hjälp av tillväxtberäkningar och uppgifter om historisk markanvändning (figur 3). Avverkningarna omfattade en till fyra gallringar samt föryngringsavverkning efter 79 till 141 år (medel 98 år) beroende på bonitet och trädslag i de olika skogsytorna.

Tre skogsbruksscenarier modellberäknades:

1. Skörd av stam: en till fyra gallringar samt föryngringsavverkning följt av plantering. När scenariot används i modellberäkningarna indikerar det även den långsiktiga utvecklingen i mark och vatten om den försurande effekten av GROT-uttag motverkas fullt ut med till exempel askåterföring.
2. Skörd av stam och GROT (75 % av grenar toppar och barr): som scenario 1 men skörd av GROT i både gallring och föryngringsavverkning. Använt i modellberäkningarna representerar det stort uttag av biomassa utan någon kompensation med till exempel askåterföring.
3. Ingen skörd: endast utförda gallringar till år 2000 (vilket skett i praktiken i de nuvarande bestånden). Efter 2000 minskar nettoupptaget av baskatjoner linjärt till ett stadium då bestånden inte har någon nettotillväxt. Ingen avverkning sker efter 2000. När scenariot används i modellberäkningarna indikerar det även den långsiktiga utvecklingen i mark och vatten om den försurande effekten av både stam- och GROT-uttag motverkas fullt ut med till exempel askåterföring.

### 3.2.4 Upptag av baskatjoner i olika trädslagar

Nettoupptaget av baskatjoner under den modellberäknade perioden (se figur 3) beräknades från tillväxtuppskattningarna och scenarier för skörd. Nettoupptag avser upptag i tillväxt av trädslagar som sedan skördas.

Denna del kommer i modellberäkningarna att utgöra ett syratillskott eftersom baskatjoner som vid upptag försurat marken förs bort permanent från beståndet. Halter i olika träddelar hämtades från Akselsson (2005).

### 3.3 Kalibrering av MAGIC

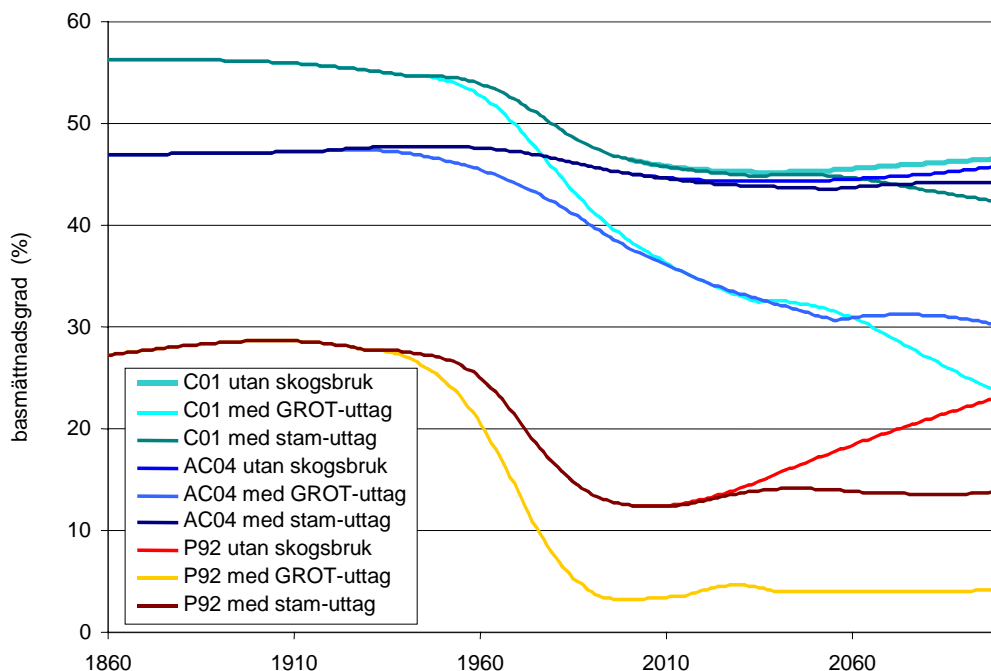
MAGIC-modellen kalibrerades till de 12 skogsytorna, så att modellvärden för år 2000 stämmer överens med uppmätta värden för följande parametrar: basmättnadsgrad i marken för fyra individuella baskatjoner (kalcium, magnesium, natrium och kalium) och koncentration i avrinningen av sulfat, kalcium, magnesium, natrium och kalium. Kalibreringen går till så att modellen kör sig själv upprepade gånger och justerar vissa parametrar, exempelvis den förindustriella basmättnadsgraden, tills överensstämmelse med dagens uppmätta kemi uppnås.

## 4 Resultat av modellberäkningar

Dynamiska modellberäkningar med MAGIC kan belysa förlopp i försurningsutveckling både historiskt och i framtiden med vissa antaganden och scenarier. Modellberäkningar av mark- och vattenkemiska förlopp i skogsytorna kan framför allt visa hur markens syra bas-status och utlakning kan förändras med olika inriktning på skogsbruket och deposition av luftföroreningar som fortsätter eller minskar något ytterligare till år 2010. Beräkningarna resulterar i en mängd utdata, men denna redovisning av resultat koncentreras på två parametrar som har stor betydelse för surhetsstillståndet i mark respektive markvatten. Basmättnad uttrycker andelen utbytbara baskatjoner i förhållande till samtliga utbytbara katjoner på markpartiklarna, i detta fall uttryckt som ett genomsnitt ner till 50 cm i mineraljorden i respektive skogsyta. Basmättnadsgraden är viktig för markens syra bas-status och påverkar bland annat surhetsgraden i markvattnet. Snabba förändringar av basmättnaden, som kan orsakas av både deposition av försurande luftföroreningar och skörd av biomassa, indikerar en antropogen försurningspåverkan som kan ge biologiska effekter i både terrester och akvatisk miljö. Med markvatten menas i denna studie avrinning från 50 cm, vilket innebär att vattenkemin är anpassad till normalt koldioxidtryck för ytvatten. Markvattnets och avrinningens syraneutraliserande förmåga (ANC) är viktig för att skydda vattenlevande organismer för försurningseffekter i form av låga pH-värden och höga halter av oorganiskt aluminium. Positiva värden på ANC innebär att det finns en neutraliseringsförmåga. Internationellt används ofta 20 µg/l som en nedre gräns i ytvatten i för att skydda fisk och andra vattenlevande organismer.

### 4.1 Effekter av GROT-uttag på syra bas-status i mark

Ett urval av tre olika granbestånd med olika förutsättningar att motstå försurning visas i figur 4. Modellberäkningarna med MAGIC omfattar tre scenarier för skogsbruk; utan skörd, enbart stamuttag samt stam- och GROT-uttag i de nuvarande bestånden (i nuläget 65 till 90 år gamla) och den kommande skogsgenerationen.



Figur 4. Modellberäknad (MAGIC) utveckling av genomsnittlig basmättnadsgrad i markprofilen ner till 50 cm i tre skogsytor med gran mellan år 1860 och 2100 med tre scenarier för skogsbruk. C01 i Uppsala län har ståndortsindex G28, AC04 i Norrbottens län G16 och P92 i V. Götalands län G30.

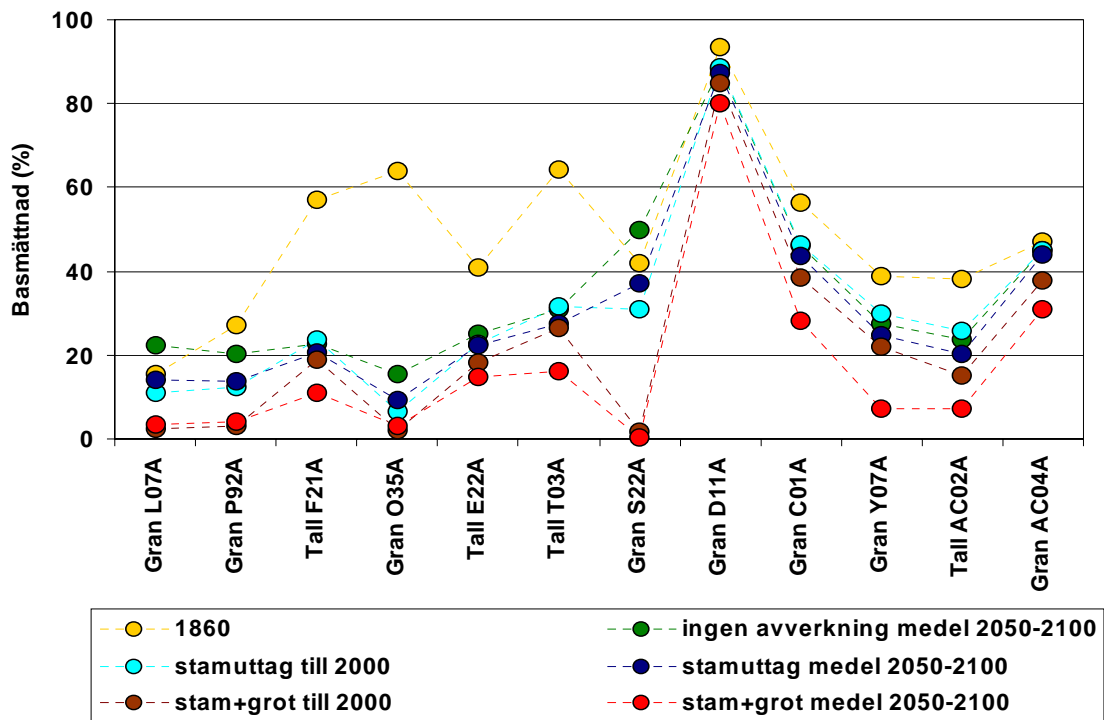
Modellberäkningarna indikerar att kombinationen stam- och GROT-uttag har potential att sänka basmättnadsgraden påtagligt under de två skogsgenerationerna med scenarier för skogsbruk. Skogsytan i Västerbottens län (AC04) uppvisar minst relativ skillnad beroende på att tillväxten, och därmed skörden, är lägre än i södra Sverige. Dessutom är utgångsläget bra med relativt hög basmättnad som inte har påverkats av luftföroreningar i någon stor omfattning. Skogsytan i Uppsala län (C01) har genomsnittlig tillväxt för regionen och naturligt hög basmättnadsgrad, som dock kan sänkas något av stamvedsuttag och betydligt mer om det dessutom sker GROT-uttag. Granskogen i sydvästra delen av Västra Götalands län (P92) avviker från de två andra i figur 4, men är representativ för bördig granskog på från början sur, och med tiden försurad, skogsmark. Försurningen är i första hand orsakad av luftföroreningar, men GROT-uttag hade sannolikt förvärrat situationen om det praktiserats samtidigt som belastningen av luftföroreningar var som störst. Sedan slutet av 1980-talet minskade svavelbelastningen successivt, men återhämtningen blir svag med de två scenarierna för skörd. Om skogsbruket upphör finns dock en teoretisk möjlighet till återhämtning enligt beräkningarna.

Resultat från alla de tolv ytorna visas i figur 5. Modellberäkningarna visar att framför allt deposition av försurande luftföroreningar, men även skogsbruk, försurade samtliga skogsytor till det tillstånd i form av basmättnadsgrad som har uppmätts under 1990-talet. Den minsta förändringen noteras för den mest försurade ytan i Skåne (L07) och den sannolikt minst försurade skogsytan i Norrbotten (AC04). Skogsytan i Skåne var troligen försurad redan i mitten av 1800-talet på grund av intensivt bete. Ytan i Norrbotten har relativt låg bonitet och dessutom mark som inte är naturligt sur, vilket gör att förändringen är liten mellan 1860 och 2100 med alla scenarier för skogsbruk.

Modellberäkningarna indikerar att både gran- och tallytor försurats sedan 1860. Skogsbrukets påverkan i tallbestånden är dock liten (jämför utvecklingen till 2000 med enbart stamuttag respek-

tive både stam och GROT-uttag i figur 5). Granbestånden uppvisar en större påverkan med uttag av GROT utöver stamuttag till år 2000, i synnerhet i södra Sverige, vilket beror på större uttag och näringsrikare träddelar jämfört med tall.

Prognosen för återhämtning varierar starkt mellan regioner, trädslag och scenarier för skogsbruk. Figur 5 visar basmättnaden som medelvärde för perioden 2050 till 2100 med olika skogsbruk efter 2000. Scenariot utan skogsbruk (eller full kompensation för hela biomassauttagets försurnings-effekt) visar att det finns en påtaglig potential för återhämtning, men sällan till förhållandena 1860 (figur 5). Det beror främst på att depositionen fortfarande har en försurningseffekt efter 2010. Enbart stamuttag efter 2000 (eller kompensation av GROT-uttagets försurnande effekt) gör att basmättnadsgraden blir relativt oförändrad under lång tid i flertalet skogsytor jämfört med år 2000. Uttag av både stam och GROT (eller ingen kompensation för uttag av stam och GROT) kan minska basmättnadsgraden ytterligare efter år 2000 i alla skogsytorna enligt modellberäkningarna. Minskningen är störst i ytor med gran.

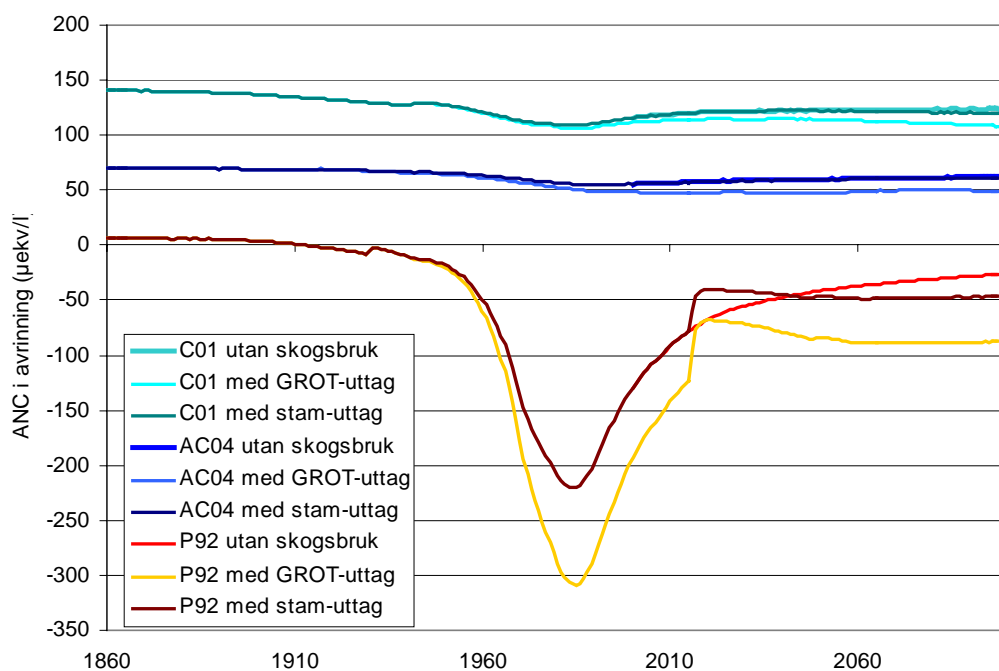


Figur 5. Jämförelse av modellberäknad (MAGIC) genomsnittlig basmättnadsgrad i markprofilen ner till 50 cm mellan olika scenarier, år och lokaler. Stamuttag i gallring har skett i samtliga scenarier mellan 1860 och 2000. Ett scenario simulerar även helträdsuttag i gallring till 2000. Övriga scenarier baseras på stamuttag i gallring till 2000 och därefter olika skogsbruk där figuren redovisar ett genomsnitt för perioden 2050-2100. Med GROT-uttag menas uttag av 75 % av grenar, toppar och barr.



## 4.2 Effekter av GROT-uttag på markvatten

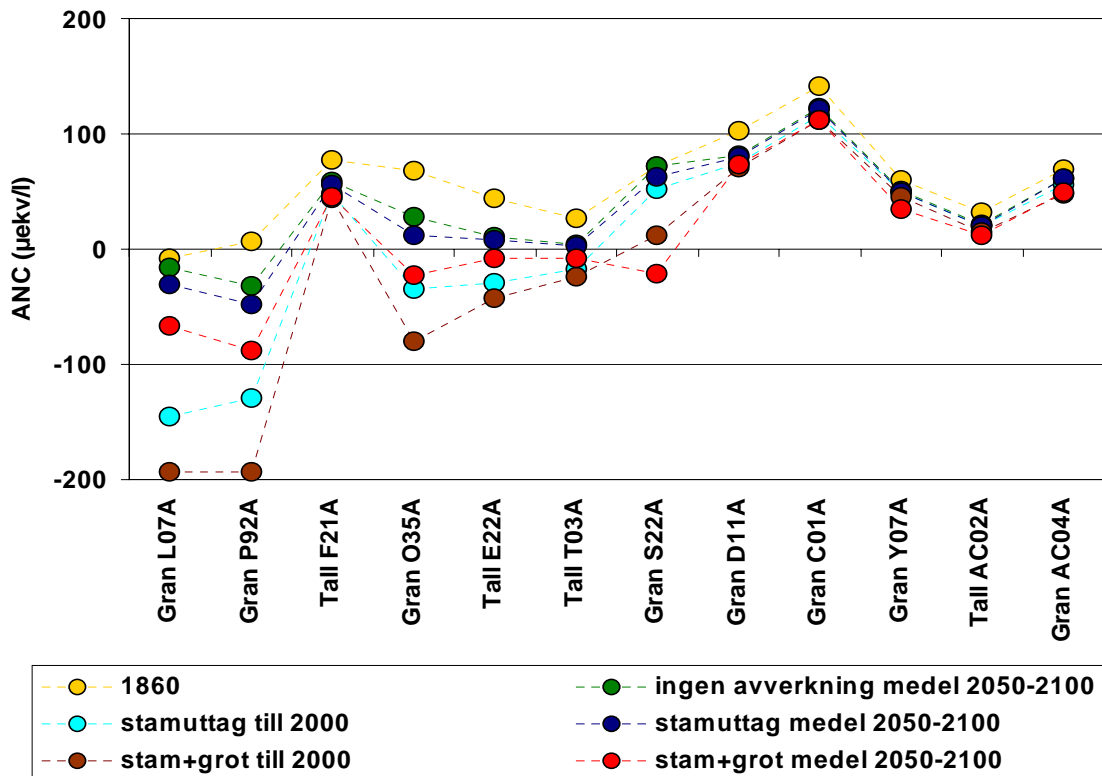
Det finns en stark koppling mellan markens syra bas-status och kvalitén på avrinningen från rotzonen, i detta fall markvatten på 50 cm, men pågående upptag i vegetation och nedfall av luftföroreningar har även stor betydelse. Markvattnets syraneutraliserande förmåga (ANC) är bland annat viktig för att motverka höga halter i avrinningen av oorganiskt aluminium, som är giftigt för främst vattenlevande organismer. ANC i de tre utvalda granytorna i olika delar av landet är relativt hög i skogsytorna AC04 och C01 enligt mätningar och modellberäkningar (figur 6). Den sänkning av basmättnadsgraden som sker framför allt med uttag av stam och GROT är inte tillräcklig för att minska ANC i markvatten på ett påtagligt sätt. Den betydligt surare ytan P92 uppvisar större skillnader mellan de olika skogsbruksscenarioerna. En återhämtning är tydlig i alla beräkningsalternativen på grund av den minskade svavelbelastningen, men ANC i markvatten når aldrig nivån i de andra skogsytorna. Detta trots att basmättnadsgraden i alternativet ”utan skogsbruk” når upp till samma nivå som de andra ytorna med kombinerat stam- och GROT-uttag. Orsakerna är flera, som att kvarvarande svavelnedfall är högst i sydvästra Sverige, bindningsstyrkan av olika joner till markpartiklarna varierar med de markkemiska egenskaperna, samt att ytan P92 uppvisar en något förhöjd utlakning av nitrat.



Figur 6. Modellberäknad (MAGIC) utveckling av ANC i avrinning från 50 cm i tre skogsytor med gran mellan år 1860 och 2100 med tre scenarier för skogsbruk. C01 i Uppsala län har ståndortsindex G28, AC04 i Norrbottens län G16 och P92 i V. Götalands län G30.

Modellberäkningarna visar att markvattnets (avrinning från 50 cm) syraneutraliserande förmåga (ANC) minskade mellan 1860 och 2000 i de 12 undersökta skogsytorna, men förändringen är liten i tallbestånden (utom E22 i Östergötland) samt i alla ytor i norra och mellersta Sverige (figur 7). Om uttag av GROT skett i samband med gallring av de nuvarande bestånden fram till 2000 hade försurningen förvärrats kraftigt i granytor i södra Sverige.

Efter ca 1990 sker en återhämtning av ANC, främst i skogsytorna i södra Sverige, oberoende av skogsbrukets effekt, som beror på en snabb minskning av depositionen av försurande svavel (se figur 3). Scenariot utan skogsbruk (eller full kompensation för biomassuttagets försurningseffekt) visar att det finns en påtaglig potential för återhämtning, men sällan till förhållandena nära 1860 i de tydligt försurade skogsytorna med gran i södra Sverige (figur 7). Det beror på att basmättnadsgraden minskat varaktigt och att depositionen fortfarande har en försurningseffekt efter 2010. Flertalet ytor, utom de mest försurade L07 och P92, kan dock uppnå ANC över noll i avrinningen från 50 cm. Enbart stamuttag efter 2000 (eller kompensation av GROT-uttagets försurande effekt) medför även det en återhämtning som inte skiljer så mycket från scenariot utan skogsbruk efter 2000. Uttag av både stam och GROT (utan kompensation för uttag av stam och GROT) efter år 2000 i skogsytorna minskar återhämtningen tydligt i försurningspåverkade skogsytor enligt modellberäkningarna. I ett fall, S22 i Värmland, leder det till negativt ANC i en yta där de nuvarande mätningarna visar tydligt positiva värden (Liljergren & Westling 2005b).



Figur 7. Jämförelse av modellberäknad (MAGIC) ANC i avrinning från 50 cm mellan olika scenarier, år och lokaler. Stamuttag i gallring har skett i samtliga scenarier mellan 1860 och 2000. Ett scenario simulerar även helträdsuttag i gallring till 2000. Övriga scenarier baseras på stamuttag i gallring till 2000 och därefter olika skogsbruk där figuren redovisar ett genomsnitt för perioden 2050-2100. Med GROT-uttag menas uttag av 75 % av grenar, toppar och barr.

### 4.3 Modellberäkningarnas osäkerhet

Modellberäkningar av försurningsutveckling med olika typer av skogsbruk har vissa osäkerheter som beror på ingångsdata, gjorda antaganden och modellens förmåga att beskriva dynamiska förlopp. I denna studie införs fler moment i modellberäkningarna som teoretiskt kan öka osäkerheten; den långa tidsrymden i prognosen och effekter av uttag av biomassa.

Den historiska markanvändningen i ett specifikt skogsbestånd är ofta okänd eller uppgifterna är osäkra. Det gör att ”förindustriella” referenstillståndet som är satt till 1860 i denna studie kan vara osäkert om den verkliga markanvändningen före det nuvarande beståndet är felbedömd. En annan komponent som är viktig att uppskatta rätt är markens vittring av basiska ämnen som är det stora årliga nettotillskottet av ny syraneutraliserande förmåga. MAGIC beräknar sannolik vittring i massbalansen av baskatjoner och resultaten jämförs i tabell 1 med andra oberoende studier som utgår från mineralogisk bestämning och beräkning av vittringshastighet baserat på typ av mineral och andra faktorer som textur och markfuktighet. Den totala vittringen av baskatjoner är likartad i de olika beräkningarna med MAGIC och SAFE (samma skogsytor) och dessutom jämförbara med medianvärden för hela landet (tabell 1). Även enskilda ämnen uppvisar samma nivå med undantag för kalium, där vittringen i beräkningarna med MAGIC är orimligt låg. Det kan bero på att depositionen av kalium till skogsytorna är överskattad, vilket MAGIC kompenserar genom att minska vittringen. Om vittringen av kalium i MAGIC beräkningen ökas till samma nivå som SAFE beräkningen blir uppskattad vittring av totala mängden baskatjoner mycket lika.

Tabell 1. Jämförelse mellan genomsnittlig beräknad vittring till 50 cm med MAGIC och SAFE (Martinsson m. f., 2005) i 11 skogsytor, samt med PROFILE på ca 25 000 punkter i Sverige (Akselsson 2005).

11 ytor vittring 50 cm	mekv/m <sup>2</sup> /år					
	medel	Ca	Mg	Na	K	tot BC
MAGIC		10.7	3.4	11.6	0.9	26.6
SAFE		10.4	5.0	10.7	5.3	31.5
ASTA median Sverige		8.6	5.9	10.8	4.3	29.5

Kalibreringen av modellen kan ge vissa skillnader i framförallt nivån på slutresultatet, och det gör att slutsatser baserade på tolkningen av skillnaderna mellan scenarier är säkrare än den absoluta nivån på beräknade halter och flöden.

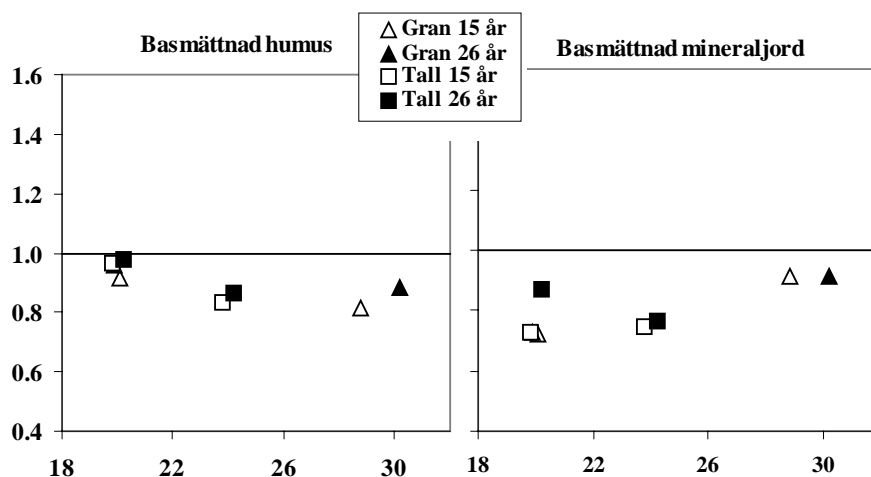
Det finns en osäkerhet i alla ingångsparametrarna i modellberäkningarna. Markens totala jonbyteskapacitet och upptaget av baskatjoner per producerad mängd biomassa är sannolikt dynamiska förlopp i en skog som genomgår stora förändringar i form av beskogning och kraftigt minskad basmättnadsgrad och tillgång till näringsämnen. I modellberäkningarna är dessa parametrar konstanta. Till exempel har försök med kalkning och asktillförsel visat att granskog tar upp mer kalcium när tillgången ökar, trots att nivåerna i barr är långt från en bristsituation (Larsson m. fl., 1999). De genomsnittliga upptagshastigheter som använts för baskatjoner per producerad volym biomassa baseras på att halterna av baskatjoner i olika träddelar är samma i hela landet (de varierar dock mellan olika träddelar). Använda halter i träddelarna är inte självklart representativa för alla skogsbestånd. Om upptaget av baskatjoner minskar som en funktion av minskad basmättnad kommer försurningsutvecklingen att bli mindre uttalad jämfört med om upptaget per producerad mängd biomassa är opåverkat under hela beräkningsperioden i modellen. Minskade halter har visats i långliggande helträdsförsök. När tillgången på baskatjoner i marken minskar på grund av stort biomassauttag minskar även halterna i träddelar (Olsson & Westling, 2005). Samtidigt finns det sannolikt gränser för hur mycket upptaget kan minska, i ett visst läge uppstår en bristsituation i trädet som i sin tur påverkar på ett dynamiskt sätt genom framför allt minskad tillväxt.

## 5 Långsiktiga effekter av askåterföring på markförsurning

### 5.1 Behov av långsiktig kompensation

Modellberäkningarna indikerar att det största behovet av långsiktig kompensation för att motverka försurning av mark och vatten finns i bördiga granbestånd på marker med låg eller måttlig vitt-rings hastighet. Om bestånden dessutom finns i områden med tidigare hög deposition av försurnande luftföroreningar ökar behovet ytterligare för att möjliggöra en önskvärd återhämtning av markens försurning. Även bördiga tallbestånd på svaga marker kan uppvisa en tydlig försurningseffekt enligt modellberäkningarna. Modellberäkningarna indikerar även att det viktigaste är att kompensera för GROT-uttag. Uttag av enbart stamved har en mindre försurningseffekt eftersom halterna av baskatjoner är lägre, samt att förlusten av baskatjoner delvis ryms inom markens naturliga förmåga att motverka försurning (överskott i massbalansen av baskatjoner utan skörd).

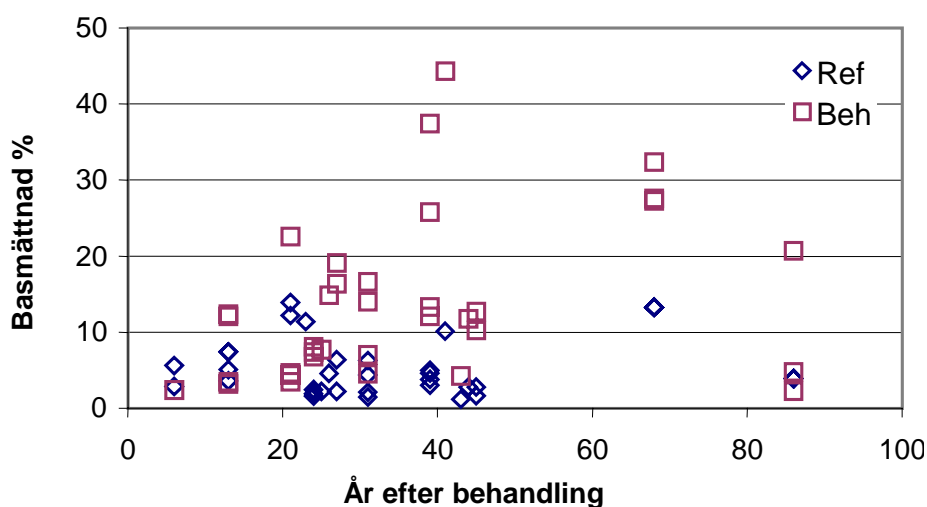
Erfarenheterna från långliggande fältförsök med helträdsuttag visar, liksom modellberäkningarna, att biomassauttaget har betydelse för markens surhetstillstånd och basmättnadsgrad. Figur 8 visar en sammanställning från olika försök i landet, där försöksled med helträdsuttag jämförs med enbart stamuttag, där basmättnadsgraden är tydligt sänkt i försök som är upp till 26 år gamla. Det är svårt att direkt göra kvantitativa jämförelser mellan mätningar och modellberäkningar men tendensen är den samma. Det finns dock en indikation på att skillnaden i markförsurning mellan helträdsuttag och stamuttag minskar efter ett lång tid (Olsson & Westling 2005) på ett sätt som inte framgår av modellberäkningarna. Det kan bero på att på skillnader i biomassauttag påverkar vittring, trädens tillväxt och halten av baskatjoner i olika trädeldar på ett dynamiskt sätt som inte ingår i modellberäkningarna.



Figur 8. Kvoten skogsbränsleuttag/kontroll (Y-axeln) som funktion av ståndortsindex H100 (X-axeln) beräknad på genomsnittlig basmättnad i procent i humus och mineraljord (5-10 cm) i långliggande gran- och tallförsök i Sverige. Årtalen i legenden anger tidsintervall efter skogsbränsleuttag i samband med föryngringsavverkning. Data i figuren är hämtade från olika delvis opublicerade undersökningar utförda av SLU.

## 5.2 Askans syraneutraliserande förmåga

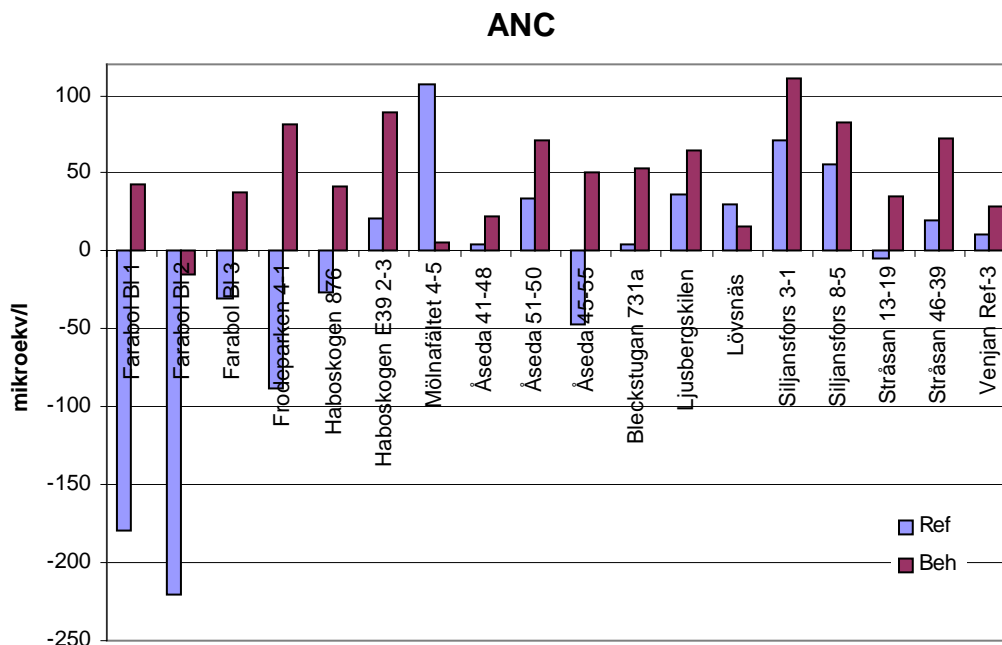
Det finns inga kända försök där stabiliserad trädaska undersökts i skogsmark under lång tid med avseende på upplösning och förmåga att motverka försurning. Den erfarenhet som finns med liknande produkter som aska kommer från gamla kalkningsförsök som finns spridda över landet. De visar att doser på 3 till 10 ton kan öka bland annat basmättnadsgraden ner till 50 cm djup i mineraljorden under många decennier (Larsson m. fl., 2003). Tillgängliga försök indikerar att effekten på djupet 30 till 50 cm av den tillförda kalken kulminerar efter ca 40 år (figur 9), för att därefter klinga av. Undersökningarna visar att en betydande del av tillförd kalk finns kvar i humus-skiktet även efter mycket lång tid. Doserna som använts i de gamla kalkningsförsöken är i regel högre än vad som är aktuellt vid askåterföring, men kalkbehandlingarna har i många fall resulterat i förändringar av bland annat basmättnadsgraden som är långt över ”naturligt” tillstånd.



Figur 9. Basmettnad (%) i mineraljorden (30-50 cm) år 2000 som funktion av år efter behandling i 12 äldre kalkningsförsök i barrskog i södra och mellersta Sverige. Behandlingarna utfördes mellan 1913 och 1977 och kalkdosen varierade mellan 3-10 ton per ha (Larsson m. fl., 2003).

Effekten på markvattenkvalitet undersöktes i de gamla kalkningsförsöken år 2000, vilket är 23 till 87 år efter behandling. Resultaten för ANC visar, liksom effekten på basmettnad, en långsiktig ökning vid jämförelse med den obehandlade kontrollen (figur 10). Effekten är i regel störst på försurade jordar i södra Sverige som har utvecklat negativt ANC, främst beroende på hög deposition av försurande luftföroreningar.

Slutsatsen är att det är möjligt att långsiktigt (minst en skogsgeneration) motverka försurning av mark och markvatten djupt ner i markprofilen med basiska produkter som krossad och mald kalksten, men effekten tar lång tid att uppnå på grund av den långsamma upplösningstiden och nedträngningen i markprofilen.

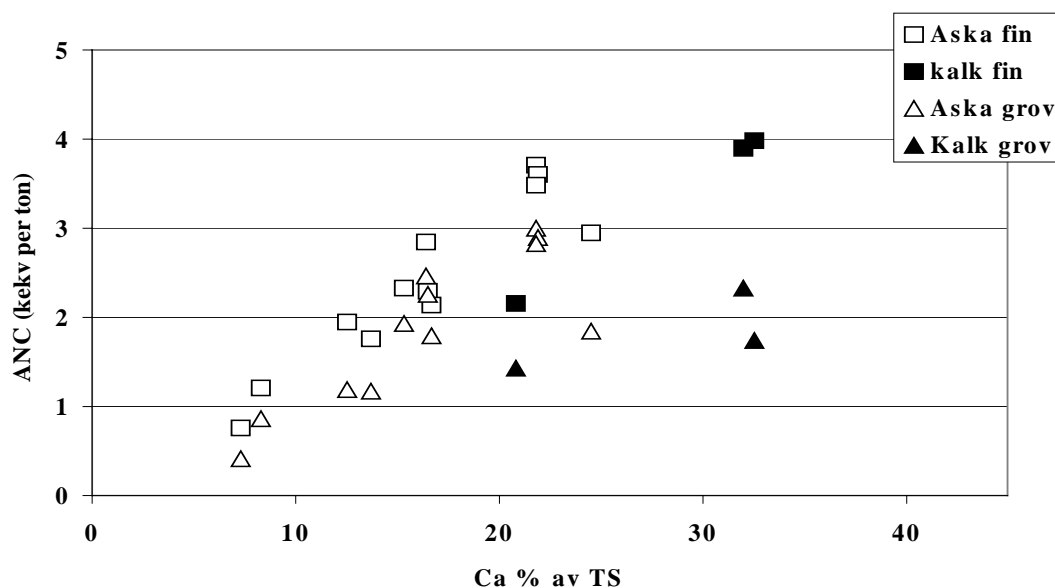


Figur 10. ANC i markvatten (50 cm) hösten 2000 i 12 äldre kalkningsförsök i barrskog i södra och mellersta Sverige. Behandlingarna utfördes mellan 1913 och 1977 och kalkdosen varierade mellan 3-10 ton per ha (Larsson m. fl., 2003).

Eftersom det saknas gamla fältförsök med stabiliserad vedaska är det svårt att direkt jämföra effekten om trädaska använd som basiskt medel i stället för kalk. Försök med upprepad lakning i laboratorium, med syfte att efterlikna en långsam upplösning i fält, har jämfört en rad olika stabiliserade botten och flygaskor med kalk (Larsson & Westling 1999; Westling & Larsson 2004).

Upprepad lakning ger bland annat ett mått på kalkens och askornas syranutraliserande förmåga (ANC). Figur 11 visar ANC som funktion av produkternas kalciuminnehåll (% av torrvikten). En fin fraktion av kalk samt alla askor, både fina och grova fraktioner med ett undantag, uppvisar en god korrelation med kalciumandelen i produkten. Grova fraktioner av kalk har långsammare upplösning, men kornstorleken har inte samma betydelse för askornas utlakning. Det betyder att det är sannolikt att aska och kalk kommer att uppträda på likartat sätt i skogsmarken under förutsättning att dosen av aska justeras så att kalciummängden är tillräcklig för att motverka försurning från stora biomassaavfall.

Resultaten i figur 11 indikerar att det i genomsnitt behövs dubbelt så mycket aska som finmald kalksten för att uppnå samma neutralisering, men variationen mellan askorna är stor. Askorna med lågt kalciuminnehåll är i regel bottenaskor och högre halter återfinns normalt i flygaskor. Kalken med lågt kalciuminnehåll är dolomitisk kalksten, vilket indikerar att det mineraler är mer svårvittrat och har betydligt lägre neutraliseringsförmåga med de tidsperspektiv som studerats i laboratorielakningarna (ca 60 år).

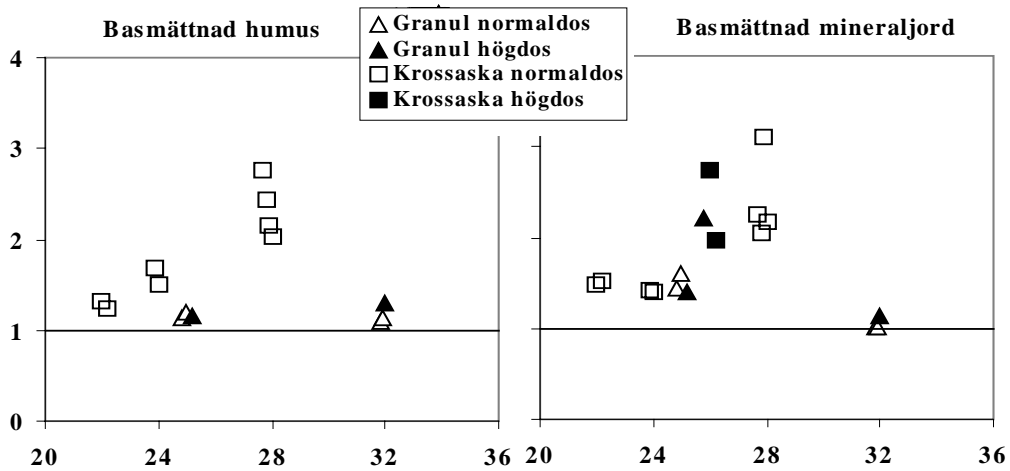


Figur 11..Syranneutraliserande förmåga (ANC) i 12 stabiliserade botten- och flygaskor, samt i karbonat- och dolomitkalk, som funktion av kalciumhalten. ANC är uppmätt som den summerade effekten av upprepad lakning i laboratorium (30 lakningar) som simulerar en lång tidsperiod i fält på ca 60 år (modifierad från Larsson & Westling 1999).

Den upprepade utlakningen studerade även utlakningen av enskilda ämnen i relation till den ursprungliga mängden i produkten och fann att kalcium utlakats med 79 %, magnesium med 53 % och fosfor med 48 %, efter 30 laksteg som simulerar ca 60 år i fält (Larsson & Westling 1999). Motsvarande värden för kalk var 59 % för kalcium och 35 % för magnesium (medel av både grov och fin fraktion). Det senare värdet gäller dolomitkalk. Jämförelsen med kalk indikerar att det inte finns belägg för den syranneutraliserande komponenten i stabiliserad aska utlakas långsammare än i kalk under tidsperioder som kan motsvara en skogsgeneration.

En annan studie med samma metod för upprepad lakning i laboratorium av tre askor och en kalksort med pH-justerad (ca 4,0) lakvätska visade att den uppmätta viktförlusten efter 30 lakningar korrelerade väl med den ackumulerade syranneutraliserande förmågan, men undantag för en asktyp (Westling & Larsson 2004). Efter 30 upprepade lakningar i laboratorium, som simulerar en knapp skogsgeneration, var den upplösta andelen av askorna som högst 35 %, och för kalk 20 %, vilket indikerar att tiden för vittring av produkterna är mycket lång. I detta försök kunde även utlakningen av kalium mätas och den varierade mellan 40 och 50 % av ursprunglig mängd efter 30 lakningar. Studien undersökte även samma askors viktförlust i fält efter 30 månader. För askorna noterades 8 till 22 %, vilket indikerar en långvarig upplösningstid. En asktyp som var valsplletterad visade signifikant långsammare upplösning i laboratorieförsök med upprepad utlakning, men upplösningen i fältförsöket var lika snabb som andra asktyper.

Resultat från fältförsök visar att markförsurning kan motverkas och basmättnadsgraden ökas med stabiliserade trädaskor, även om den studerade tiden efter behandling är relativt kort. Det är dock inget som talar för att effekten är kortvarig med tanke på askornas långsamma upplösning. Figur 12 visar resultat från svenska fältförsök där den relativa effekten av olika askprodukter på basmättnad studerats i barrskog, genom en jämförelse med obehandlad kontroll.



Figur 12. Kvoten askbehandling/kontroll (Y-axeln) som funktion av ståndortsindex H100 (X-axeln) beräknad på genomsnittlig basmättnadsgrad i procent i humus och mineraljord (5-10 cm) i gran- och tallförsök i Sverige. Undersökningarna är utförda 1-6 år efter askbehandling. Normaldos är 1-3 ton per ha och högdos 4-9 ton aska per ha. Data i figuren är hämtade från olika delvis opublicerade undersökningar utförda av SLU och SkogForsk.

Den syraneutraliserande effekten av askåterföring kan även jämföras med att avverkningsrester ligger kvar. Nedbrytningstiden för avverkningsrester är sannolikt kortare än tiden för askans upplösning, i synnerhet för barr. En modellberäkning med MAGIC i en skogsyta som jämförde askåterföring med kvarlämnade avverkningsrester, indikerade att den långsiktiga effekten på markens syra bas-status var lika, men de kortvariga variationerna skilde på grund av olika upplösningshastighet och att askan i modellsimuleringen återfördes i samband med första gallring (Moldan m. fl., 2001).



## 6 Slutsatser

### 6.1 Effekter av minskad belastning av luftföroreningar

Den minskade belastningen av försurande luftföroreningar som förväntas till 2010 kan bidra till en påtaglig återhämtning från försurning, främst i markvatten och avrinning från skogsmark i områden i södra Sverige som tidigare haft en hög deposition. En omfattande återhämtning av markens basmättnadsgrad är dock mindre trolig enligt de utförda modellberäkningarna i de 12 skogsytorna, i synnerhet om skogsbruk bedrivs utan kompensationsåtgärder. Utrymmet för att öka basmättnadsgraden i balansen mellan tillförsel av basiska ämnen genom vittring och deposition och förbrukningen genom upptag (skörd) av biomassa och utlakning är inte stor. Att avrinningen visar en tydlig återhämtning trots att markens syra bas-status inte förändras så mycket beror på att flödet av starka syror från atmosfären minskar kraftigt till år 2010, jämfört med en kulmen runt 1980. De starka syrorna ger i sura jordar en sur avrinningen genom jonbyte och att mobila anjoner som sulfat för med sig väte- och aluminiumjoner till grund- och ytvatten. Minskar depositionen av starka syror blir avrinningen snabbt mindre sur, även om markens surhet inte förändras.

### 6.2 Effekter av skogens tillväxt och skörd

Modellresultaten indikerar att enbart skörd av stamved inte kommer att ha någon avgörande långsiktig inverkan på markens syra bas-status eller försurningen av avrinningen i gran och tallskog i landet. Den slutsatsen kan dras genom jämförelser med ett scenario som innebär att skogsbruket upphör efter år 2000. Minskad deposition, även efter 2010, är viktigare i områden som redan är försurade av luftföroreningar. När uttag av stamved kombineras med stora uttag av GROT finns en uppenbar risk för långsiktiga försurningseffekter, framför allt i bördiga granskogar på mineralogiskt svaga marker. Detta framgår av både statiska och dynamiska modellberäkningar, liksom av resultat från långliggande försök med helträdsuttag. En jämförelse med fältförsök indikerar dock att resultaten från modellberäkningarna kan överdriva styrkan och varaktigheten av försurningseffekten efter GROT-uttag på grund av att vissa dynamiska processer inte ingår i modellberäkningarna. Trots detta talar resultaten för att kompensation med stabiliserade trädaskor eller kalk bör utföras i bördiga skogar med stora uttag av biomassa, i synnerhet i områden som försurats tidigare av luftföroreningar.

### 6.3 Effekter av askåterföring på lång sikt

Motverka försurning i mark och vatten är sannolikt det långsiktiga kompensationsmål som lättast kan uppnås med askåterföring på grund av det relativt höga innehållet av kalcium och magnesium i stabiliserade askor. Både laboratorie- och fältstudier har visat att den kemiska sammansättningen och asktypen har större betydelse för den syraneutraliserande förmågan än stabiliseringsmetoden. Askor som är valspelleterade kan uppvisa långsam upplösning i laboratorieförsök, men lika snabb i fält som andra asktyper. Den kemiska sammansättningen är i sin tur kopplad till bränslets ursprung (stamved eller GROT) och typ av aska (botten- flyg- eller CFB-aska). Flyg- och CFB-askor har i regel snabbare upplösning initialt än kalk och sannolikt även avverkningsrester med tanke på syra-

neutraliserande förmåga. På lång sikt har den normala variationen i askornas upplösningshastighet, och avverkningsresternas nedbrytningshastighet, begränsad betydelse för markens förråd av baskatjoner och basmättnad, möjligen med undantag för kalium som kan utlakas i synnerhet i hyggesfasen. Det finns dock inga försöksresultat som tydligt visar att det finns stabiliseringsmetoder som kan åstadkomma en långsam utlakning av kalium. Viktigt är att dosen aska anpassas efter askans kemiska sammansättning, i första hand kalciuminnehåll, om specifika mål för neutralisering ska uppnås. För att den rekommenderade maximala dosen på tre ton per ha ska kunna hållas krävs att askans innehåll av baskatjoner är tillräcklig för att kompensera för uttagen mängd i form av GROT.

Andra långsiktiga mål som att kompensera förluster av näringsämnen som kalium och fosfor i skogsmark med uttag av GROT kan vara svårare att uppnå i praktiken med de askor som finns att tillgå i nuläget i Sverige enligt en studie av Olsson & Westling (2005). En jämförelse mellan näringsförluster genom uttag av GROT och återföring med trädaskor (maximalt 3 ton per ha) med genomsnittlig kemisk sammansättning indikerar förluster i kedjan från skogen genom pannan och tillbaka till skogen i form av aska. Långsiktig kompensation för kalium som näringsämne är svårt att uppnå på grund av att kalium i GROT och askor visar stor tendens att lakas ut. Detta kan även gälla hyggen där riset ligger kvar. Strategier för god hushållning med kalium i skogsekosystem måste omfatta fler aspekter, framför allt utformning av hyggen, tidpunkt för askåterföring, samt hantering av GROT och askor. Fosforkompensation genom askåterföring har begränsad effekt på grund av fosfors bindning i svårlösta mineral och låga halter i askor, men fosfor i de askor som nu finns tillgängliga torde dock ha vissa långsiktiga positiva effekter.

## 7 Referenser

- Akselsson, C. 2005. Regional nutrient budgets in forest soils in a policy perspective. Doctoral Thesis, Department of Chemical Engineering, Lund University.
- Belyazid, S., Westling, O. & Sverdrup, H. 2006. Modelling changes in forest soil chemistry at 16 Swedish coniferous forest sites following deposition reduction. Environmental Pollution (accepterad).
- Cosby, B. J., Hornberger, G. M., Galloway, J. N. & Wright, R. F. 1985. Modelling the effects of acid deposition: assessment of a lumped parameter model of soil water and streamwater chemistry. Water Resources Research 18: 51-63.
- Egnell, G., Nohrstedt, H.-Ö., Weslien, J., Westling, O. & Örlander, G. 1998 Miljökonsekvensbeskrivning (MKB) av skogsbränsleuttag, asktillförsel och övrig näringskompensation. Skogsstyrelsen Rapport 1:1998. Jönköping.
- EMEP, 1998, Transboundary Acidifying Air Pollution in Europe. EMEP/MSC-W Status report – Part 1.
- Hallgren Larsson, E., Knulst, J., Malm, G. & Westling, O. 1995. Deposition of Acidifying Compounds in Sweden. Water, Air and Soil Pollution 85:2271-2276.
- Johansson, M-B., Nilsson, T. & Olsson, M. 1999. Miljökonsekvensbeskrivning av Skogsstyrelsens förslag till åtgärdsprogram för kalkning och vitalisering. Skogsstyrelsen rapport 1:1999.
- Larsson, P.-E., Akselsson, C. Bengtsson, R. & Bjelke, U. 1999. Biologiska effekter i kalkad skog. Årsrapport 1998. Effekttuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark. IVL Svenska Miljöinstitutet, B 1343. Aneboda 59 s.
- Larsson, P.-E. & Westling, O. 1999. Lakning av vedaska - en laboratoriestudie. IVL Rapport B 1325

- Larsson, P.-E., Uggla, E. & Westling, O. 2003. Långsiktiga effekter av skogsmarkskalkning på mark- och markvattenkemi. IVL Rapport B1524
- Liljergren, A. & Westling, O. 2005a. Övervakning av luftföroreningar i norra Sverige. IVL Rapport B 1628.
- Liljergren, A. & Westling, O. 2005b. Övervakning av luftföroreningar i Värmland. IVL Rapport B 1613.
- Martinsson, L., Alveteg, M., Kronnäs, V., Sverdrup, H., Westling, O. & Warfvinge, P. 2005. A Regional Perspective on Present and Future Soil Chemistry at 16 Swedish Forest Sites. *Water, Air, and Soil Pollution* (2005) 162: 89–105
- Moldan F., Westling O. & Munthe J. 1999. Geochemical modelling of acidification and recovery in forest soils. Institutet för Vatten och Luftvårdsforskning, IVL B 1323. Göteborg 56 s.
- Moldan, F., Manngård, B & Westling, O. 2001. Återhämtning av försurad skogsmark med olika uttag av biomassa. IVL Rapport B1424.
- Nilsson, S.I. & Tyler, G. 1995. Acidification-induced chemical changes of forest soils during recent decades - a review. - *Ecological Bulletins* 44:54-64. Copenhagen.
- Olsson, B. & Westling, O. 2005. Skogsbränslecykelns näringsbalans. Slutrapport till Energimyndigheten Projekt p 12304-2.
- Olsson M, Rosen K, & Melkerud P-A. 1993. Regional modelling of base cation losses from Swedish forest soils due to whole-tree harvesting. *Applied Geochemistry*, suppl. issue 1993; 189-194.
- Rosén K., 1988. Effekter av biomassa ackumulering och skogsbruk på kvävet i skogsekosystem. In: Nilsson J. and Grennfelt P-I., eds., *Critical loads for sulphur and nitrogen, report from a workshop held at Skokloster, Sweden 19-24 March 1988*, Miljörapport 1988:15, Nordic Council of Ministers, Copenhagen.
- Schöpp, W., Posch, M., Mylona, S. and Johansson, M. 2003. Long-term development of acid deposition (1880–2030) in sensitive freshwater regions in Europe. *Hydrol. Earth Sci. Syst.* 7, 436–446.
- Skyllberg U., Jacks, G. & Westling, O. 2001. Markförsurningsprocesser. Skogsstyrelsen Jönköping, Rapport 11B.
- Staaf, H., Persson, T. & Bertills (red.) 1996. Skogsmarkskalkning. Resultat och slutsatser från Naturvårdsverkets försöksverksamhet. Rapport 4559: 111-120. ISSN 0282-7298.
- Sverdrup, H. & Rosén, K. Long-term base cation mass balances for Swedish forests and the concept of sustainability. *Forest Ecology and Management* 110(1-3), 221-236. 98.
- UNECE.1999. Protocol to the 1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution to abate acidification, eutrophication and ground-level ozone. United Nations Economic Commission for Europe <http://www.unece.org/env/lrtap>.
- Westling, O., Hultberg, H. & Malm, G., 1995. Total deposition and tree canopy internal circulation of nutrients in a strong acid gradient in Sweden, as reflected by throughfall fluxes. L.O. Nilsson, R.F. Huttel & U.T. Johansson (red.), *Nutrient uptake and cycling in forest ecosystems*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 639-647.
- Westling, O. & Larsson, P.-E. 2004. Översättning av resultat från asklagningsförsök i laboratorium till fältförhållanden. Slutrapport till Energimyndigheten. Projekt: P-12757-1.